



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΕ
ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΛΟΙΩΝ**

ΙΩΑΝΝΑ Γ. ΤΣΑΜΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Γ.ΤΖΑΜΠΙΡΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΜΕΛΗ: Κ. ΜΠΕΛΙΜΠΑΣΑΚΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Γ. ΠΟΛΙΤΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2013

Στην Ελένη, το Γιώργο,
τη Λίνα και το Σταύρο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία στηρίζεται στην αρωγή πολλών ανθρώπων που συνετέλεσαν στην εκπόνησή της από την αρχή μέχρι το τέλος της.

Για το λόγο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών **κ. Γεώργιο Τζαμπίρα** για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος. Η καθοδήγησή του σε όλη τη διάρκεια ήταν πολύτιμη για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, ιδιαίτερα τους **κ.Γιάννη Τραχανά, κ.Δημήτρη Λιαροκάπη, κ.Γιώργο Μυλωνά** και **κ.Φώτη Κασάπη** που συνέβαλαν τα μέγιστα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και την **κ. Δήμητρα Δαμάλα, τον κ. Βαγγέλη Παπακωνσταντίνου, τον κ.Δημοσθένη Τριπερίνα** και τον **κ.Γιώργο Κατσαούνη** που βοήθησαν στην επεξεργασία των μετρήσεων.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω και τον καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών **κ.Γρηγόρη Γρηγορόπουλο** για τη συμβολή του σε ένα από τα καθοριστικά σημεία της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στους φίλους και συναδέλφους **Αγγελική Λάσκαρη, Γιώργο Παυλάκο** και **Πολυτίμη Φράγγου**.

Τέλος, καθοριστικής σημασίας ήταν η στήριξη και η υπομονή της οικογένειάς μου όλα αυτά τα χρόνια, τους οποίους ευχαριστώ για όσα έχουν κάνει για μένα καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ	5
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	7
3.1. ΕΙΔΗ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΣΚΑΦΟΥΣ	7
3.2. ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	8
3.3. ΑΡΜΟΝΙΚΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ.....	8
3.4. ΤΥΧΑΙΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ	9
3.5. ΦΑΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	11
3.6. ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	13
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	15
4.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ	16
4.2. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	20
4.3. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	22
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	23
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	27
6.1. BULK CARRIER HURON.....	28
6.1.1. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ T=0.207m	29
6.1.1.I. Ισοβύθιστη κατάσταση (even keel)	30
6.1.1.I.i. Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό	30
6.1.1.I.ii.Εύρεση ακτίνας αδρανείας και περιόδου ιδιοταλάντωσης ...	32
6.1.1.I.iii. Μετρήσεις σε φάσμα Bretschneider.....	46
6.1.1.I.iv. Μετρήσεις σε αρμονικούς κυματισμούς.....	49
6.1.1.I.v.Σύνθεση αντίστασης αρμονικών κυματισμών.....	57
6.1.1.I.vi. Μείωση της ταχύτητας του μοντέλου και μετρήσεις σε φάσμα Bretschneider	58
6.1.1.II. Έμπρυμνη διαγωγή 0.5 μοιρών (trim 0.5 angle by stern)	61
6.1.1.II.i.Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό	61
6.1.1.II.ii.Μετρήσεις σε φάσμα Bretschneider	62
6.1.1.III. Συμπεράσματα.....	65
6.1.2. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ T=0.290m	67
6.1.2.I. Ισοβύθιστη κατάσταση (even keel)	68
6.1.2.I.i. Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό.....	68
6.1.2.I.ii.Μετρήσεις σε φάσμα Bretschneider.	70
6.1.2.I.iii.Μετρήσεις σε αρμονικούς κυματισμούς.	73
6.1.2.I.iv.Σύνθεση αντίστασης αρμονικών κυματισμών	81

6.1.2.I.v. Μείωση της ταχύτητας του μοντέλου και μετρήσεις σε φάσμα Bretschneider.....	82
6.1.2.II. Έμπρυμνη διαγωγή 0.5 μοιρών (trim 0.5 angle by stern)	85
6.1.2.II.i.Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό	85
6.1.2.II.ii.Μετρήσεις σε φάσμα Bretschneider.	86
6.1.2.III.Συμπεράσματα.....	89
6.2. Ε/Ο ROPAX	91
6.2.1. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ T=0.163m	92
6.2.1.I. Ισοβύθιστη κατάσταση (even keel)	93
6.2.1.I.i. Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό.....	93
6.2.1.I.ii.Εύρεση ακτίνας αδρανείας και περιόδου ιδιοταλάντωσης ...	95
6.2.1.I.iii.Μετρήσεις σε φάσμα Bretschneider.....	97
6.2.1.I.iv.Μετρήσεις σε αρμονικούς κυματισμούς.....	100
6.2.1.I.v.Σύνθεση αντίστασης αρμονικών κυματισμών.....	108
6.2.1.I.vi.Μείωση της ταχύτητας του μοντέλου και μετρήσεις σε φάσμα Bretschneider.....	109
6.2.1.II. Διαγωγή 1.0 μοίρας (trim 1.0 angle by stern),	112
6.2.1.II.i.Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό	112
6.2.1.II.ii.Μετρήσεις σε φάσμα Bretschneider	113
6.2.1.III.Ισοβύθιστη κατάσταση (Even keel).....	116
6.2.1.III.i.Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό	116
6.2.1.III.ii.Μετρήσεις σε φάσμα Bretschneider	117
6.2.1.IV.Συμπεράσματα	120
7. ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	122
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	123

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία διερευνάται πειραματικά η δυναμική συμπεριφορά προτύπων πλοίου σε τυχαίους κυματισμούς. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην Πειραματική Δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κύριος σκοπός είναι ο προσδιορισμός της πρόσθετης αντίστασης του πλοίου σε κυματισμούς. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δύο μοντέλα, ένα bulk carrier και ένα επιβατηγό, στα οποία μετρήθηκε η πρόσθετη αντίσταση τόσο σε αρμονικούς, όσο και σε τυχαίους κυματισμούς που προσομοιώνουν πραγματικές καταστάσεις θάλασσας του Ατλαντικού Ωκεανού.

Χρησιμοποιώντας υπάρχουσα μεθοδολογία, προσεγγίζεται η πρόσθετη αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς κατόπιν συνθέσεως της πρόσθετης αντίστασης όπως προκύπτει από τους ημιτονικούς κυματισμούς.

Μελετάται, παράλληλα, η επίδραση της διαγωγής στο ήρεμο νερό και στους τυχαίους κυματισμούς. Τέλος, υπολογίζεται η μείωση της ταχύτητας των μοντέλων στους κυματισμούς έτσι, ώστε να παρουσιάζουν την ίδια αντίσταση με το ήρεμο νερό.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πλοίο, ως μια ειδική κατασκευή σχεδιασμένη για να κινείται με ασφάλεια στο νερό, χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για ποικίλες χρήσεις από τα αρχαία χρόνια. Η αποτελεσματική κίνηση στο νερό αποτελεί τον βασικό και διαχρονικό στόχο για έναν σχεδιαστή από τα πρώτα αξιόπλοια σκάφη που κατασκευάστηκαν έως και τα σκάφη της σύγχρονης εποχής που σχετίζονται άμεσα με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας.

Ένας από τους παράγοντες που λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού των πλοίων είναι η υδροδυναμική τους συμπεριφορά. Επομένως, για να επιτευχθεί ο ανωτέρω στόχος, απαιτείται η μελέτη της αντίστασης των πλοίων στο νερό, η οποία εν συνεχεία μπορεί να μετατραπεί σε ισχύ πρόωσης.

Η αντίσταση του πλοίου οφείλεται σε απώλειες ενέργειας λόγω της επαφής του με το περιβάλλον ρευστό, καθιστώντας τη μελέτη της ένα περίπλοκο φαινόμενο. Αναλυτικότερα, η αντίσταση διαχωρίζεται σε επιμέρους συνιστώσες, με σκοπό να απλουστευθεί η μελέτη της. Οι κυριότερες από τις συνιστώσες αυτές είναι η αντίσταση τριβής, η αντίσταση κυματισμού και η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας.

Οι περισσότερες μελέτες, σε ό, τι αφορά την υδροδυναμική συμπεριφορά ενός πλοίου, επικεντρώνονται στον υπολογισμό της αντίστασης της γάστρας σε ήρεμο νερό. Μπορεί, όμως, η θεώρηση αυτή να αντικατοπτρίσει τις πραγματικές συνθήκες θάλασσας στις οποίες το πλοίο έχει σχεδιασθεί να ανταποκρίνεται;

Είναι γνωστό ότι το πλοίο κινούμενο στο νερό παράγει κυματισμούς. Οι κυματισμοί αυτοί οφείλονται σε δύο λόγους: στη διαταραχή του ήρεμου νερού λόγω της ταχύτητας του πλοίου με την οποία κινείται σε αυτό και αφετέρου στις κινήσεις του πλοίου λόγω των προσπιπτόντων κυματισμών. Είναι προφανές, επομένως, ότι η αντίσταση του πλοίου στους κυματισμούς είναι σαφώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε ήρεμο νερό.

Ο υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης στους κυματισμούς μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας είτε πειραματικές είτε αριθμητικές μεθόδους.

Εστιάζοντας στις πειραματικές μεθόδους, ο απλούστερος και αμεσότερος τρόπος υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης πραγματοποιείται μέσω πειραμάτων κατά τη διάρκεια των οποίων γίνεται προσομοίωση τυχαίων κυματισμών. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή θεωρείται εν γένει επισφαλής, ενώ η χρήση της αφορά σε περιορισμένο εύρος τυχαίων κυματισμών. Αντίθετα, οι μετρήσεις σε ημιτονικούς κυματισμούς παρέχουν ακριβέστερα αποτελέσματα τα οποία είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση τυχαίων κυματισμών μεγαλύτερου εύρους.

Τέλος, υπολογίζοντας την πρόσθετη αντίσταση στους κυματισμούς, δίνεται η δυνατότητα να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το κόστος καυσίμου της μηχανής ενός πλοίου. Συνεπώς, καθίσταται αντιληπτό ότι ο υπολογισμός αυτός διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στην οικονομική εκμετάλλευση ενός πλοίου με απώτερο σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας.

3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

3.1. ΕΙΔΗ ΚΙΝΗΣΕΩΝ ΣΚΑΦΟΥΣ

Η κίνηση κάθε πλέοντος σκάφους χαρακτηρίζεται συνολικά από 6 βαθμούς ελευθερίας:

- τρεις μεταφορικές κατά μήκος των αξόνων x , y , z και
- τρεις περιστροφικές περί αυτών

Μεταφορικές:

ξ1 Διαμήκης οριζόντια ταλάντωση (Surge)

ξ2 Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση (Sway)

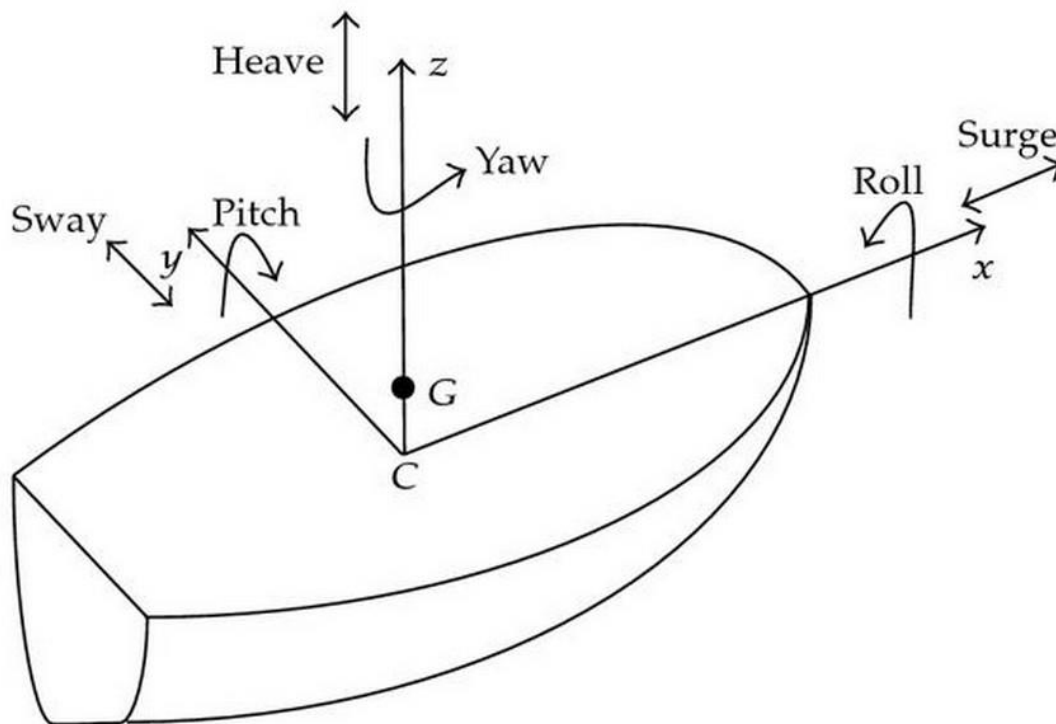
ξ3 Κατακόρυφη ταλάντωση (Heave)

Περιστροφικές:

ξ4 Ταλάντωση περί το διαμήκη άξονα/Διατοιχισμός (Roll)

ξ5 Ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα/Προνευτασμός (Pitch)

ξ6 Ταλάντωση περί τον κατακόρυφο άξονα (Yaw)



Εικόνα 1: Βαθμοί ελευθερίας κίνησης σκάφους.

Οι παραπάνω κινήσεις είναι στην πραγματικότητα συζευγμένες μεταξύ τους. Συνεπώς οι εκάστοτε διεγείρουσες δυνάμεις που ασκούνται στο σκάφος από προσπίπτοντες κυματισμούς δημιουργούν αποκρίσεις σύνθετης φύσεως. Για το λόγο αυτό η δυναμική συμπεριφορά σε κυματισμούς (Seakeeping) αποτελεί πολύπλοκο φαινόμενο.

Οι αποκρίσεις που συνήθως εξετάζονται κατά την πλεύση σκάφους σε μετωπικούς κυματισμούς για την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς του είναι οι εξής:

- Heave
- Pitch
- Πρόσθετη αντίσταση (added resistance)
- Πλευρική δύναμη (Side Force)
- Κάθετες επιταχύνσεις (vertical accelerations) σε επιλεγμένα σημεία του σκάφους

Επιπλέον, βάσει των παραπάνω αποκρίσεων, μπορεί κανείς να υπολογίσει την πιθανότητα εμφάνισης ορισμένων τυχαίων συμβάντων, τα οποία δεν αποτελούν συνεχείς χρονικές συναρτήσεις. Τέτοια συμβάντα είναι η σφυρόκρουση πυθμένα/πλευρών πλώρας (bottom/bow flare slamming) και η διαβροχή καταστρώματος (deck wetness)

3.2. ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

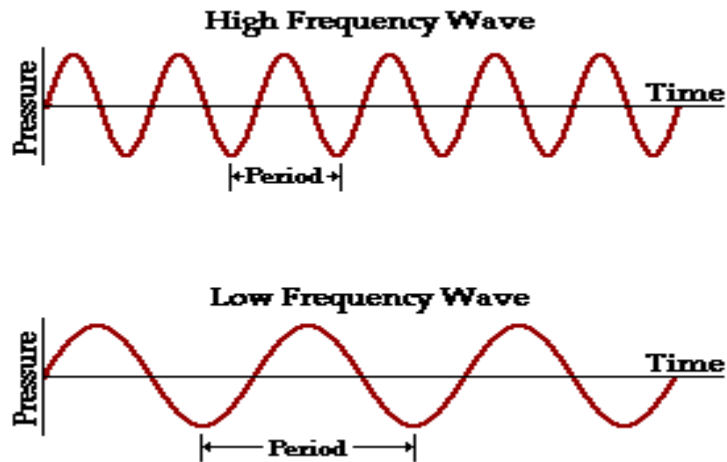
Οι κυματισμοί στην επιφάνεια της θάλασσας δημιουργούνται από τον άνεμο. Η φύση των κυματισμών (μέγεθος, διεύθυνση μετάδοσης, ενεργειακή στάθμη) εξαρτώνται κυρίως από τρεις παράγοντες:

- Ταχύτητα ανέμου
- Χρονικό διάστημα πνοής
- Έκταση θαλάσσιας επιφάνειας επί της οποίας αναπτύσσονται

Ο μηχανισμός δημιουργίας θαλάσσιων κυμάτων είναι εξαιρετικά πολύπλοκος. Υπάρχει άπειρη ποικιλία ως προς το είδος των κυματισμών, ενώ κάθε προσπάθεια καταγραφής τους αποκαλύπτει ακανόνιστη αλληλουχία κορυφών και κοιλάδων σε διάφορες διευθύνσεις με τυχαία εξέλιξη στο πεδίο του χρόνου. Συνεπώς, η ακριβής περιγραφή ενεργειακού φάσματος δεδομένης θαλάσσιας περιοχής είναι εξαιρετικά δύσκολη. Για το λόγο αυτό, ο μόνος τρόπος μιας ολοκληρωμένης στατιστικής ανάλυσης των κυματικών διεγέρσεων είναι τα πιθανοθεωρητικά μοντέλα στοχαστικών διαδικασιών. Έτσι είμαστε σε θέση να περιγράψουμε και να αναλύσουμε με ακρίβεια μια δεδομένη κατάσταση θάλασσας. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στα δύο κύρια είδη κυματισμών.

3.3. ΑΡΜΟΝΙΚΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ

Η μορφή τους είναι απλή ημιτονοειδής ή συνημιτονοειδής. Κύριες παράμετροι περιγραφής τους είναι η περίοδος T , η συχνότητα f , το μήκος κύματος λ και το ύψος κύματος H .



Εικόνα 2: Αρμονικοί κυματισμοί διαφορετικών συχνοτήτων.

Με τη βοήθεια της εξίσωσης διασποράς βρίσκουμε ότι η συχνότητα δίνεται από τη σχέση:

$$f = \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda}}$$

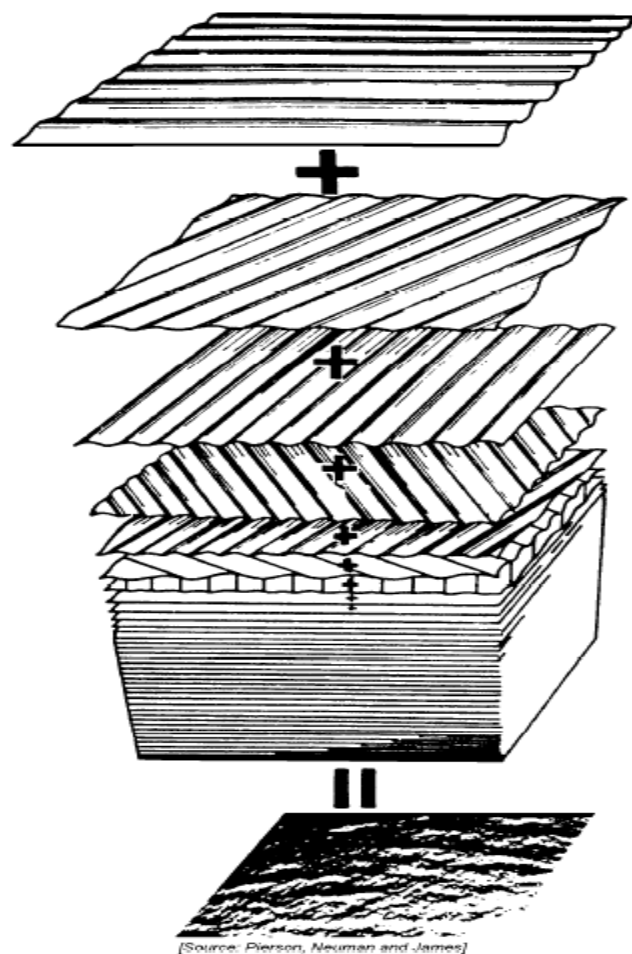
ενώ μεταξύ περιόδου – συχνότητας ισχύει η γνωστή σχέση $T=1/f$.

3.4. ΤΥΧΑΙΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ

Οι τυχαίοι κυματισμοί, βάσει των οποίων θα γίνουν τα πειράματα δυναμικής συμπεριφοράς, περιγράφουν το θαλάσσιο περιβάλλον με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τους αρμονικούς. Για την μελέτη τους χρησιμοποιούνται στοχαστικές μέθοδοι. Η ανύψωση της θαλάσσιας επιφάνειας απεικονίζεται με τη βοήθεια του μοντέλου των Longuet – Higgins. Σύμφωνα με αυτό, το σύνθετο κυματικό προφίλ προκύπτει από την επαλληλία ημιτονικών κυμάτων πλήθους i της μορφής:

$$A(t) = \sum A_i \cos(\omega_i t + \phi_i)$$

Καθένα από τα κύματα αυτά έχει σταθερό πλάτος, σταθερές παραμέτρους (πλάτος, συχνότητα, κυματικός αριθμός) αλλά διαφορετική γωνία φάσης.



Εικόνα 3: Περιγραφή προφίλ τυχαίων κυματισμών με επαλληλία ημιτονικών κυμάτων.

Το κυματικό περιβάλλον που περιγράψαμε προηγουμένως χαρακτηρίζεται από **φαινόμενα** και **στατιστικά** μεγέθη.

Φαινόμενα είναι τα μεγέθη που μετρώνται απευθείας κατά την καταγραφή ενός θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η περαιτέρω επεξεργασία τους βάσει στατιστικών παραμέτρων μας δίνει τα στατιστικά μεγέθη των κυματισμών.

Η συνάρτηση ανύψωσης θαλάσσιας επιφάνειας (συμβολίζεται με η) παριστάνεται με δύο τρόπους:

A) Στο πεδίο του χρόνου $t - \eta(t)$, όπου t η διάρκεια χρονικής καταγραφής

B) Στο πεδίο συγκεκριμένης διεύθυνσης $\theta - \eta(r/\theta)$, όπου r ακτίνα κυκλικού δίσκου (μήκος χωρικής καταγραφής) και $\theta = \text{σταθ.}$

Τα φαινόμενα μεγέθη που αναφέρονται σε συγκεκριμένη χρονική ιστορία ονομάζονται φαινόμενα μεγέθη χρόνου, ενώ εκείνα που μελετώνται σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ονομάζονται φαινόμενα μεγέθη χώρου.

Σ' αυτές τις δύο κατηγορίες ανήκουν: το φαινόμενο ύψος κύματος, η φαινόμενη περίοδος κορυφών/μηδενικής υπέρβασης (για μεγέθη χρόνου), το φαινόμενο μήκος κύματος (για μεγέθη χώρου) κ.α.

Στατιστικά είναι τα μεγέθη που προκύπτουν από τη στατιστική επεξεργασία των φαινόμενων μεγεθών. Τέτοια μεγέθη είναι το μέσο μήκος κύματος, η τυπική απόκλιση H_{rms} του ύψους κύματος, το σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$ κ.α.

Το σημαντικό ύψος κύματος ορίζεται ως εξής: Υποθέτουμε ότι σε μια χρονική καταγραφή θαλασσίου περιβάλλοντος προκύπτουν N φαινόμενα ύψη κύματος. Αν τα διατάξουμε κατά σειρά από το μικρότερο στο μεγαλύτερο και πάρουμε τη μέση τιμή του $1/3$ των υψηλότερων, προκύπτει το σημαντικό ύψος κύματος:

$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j$$

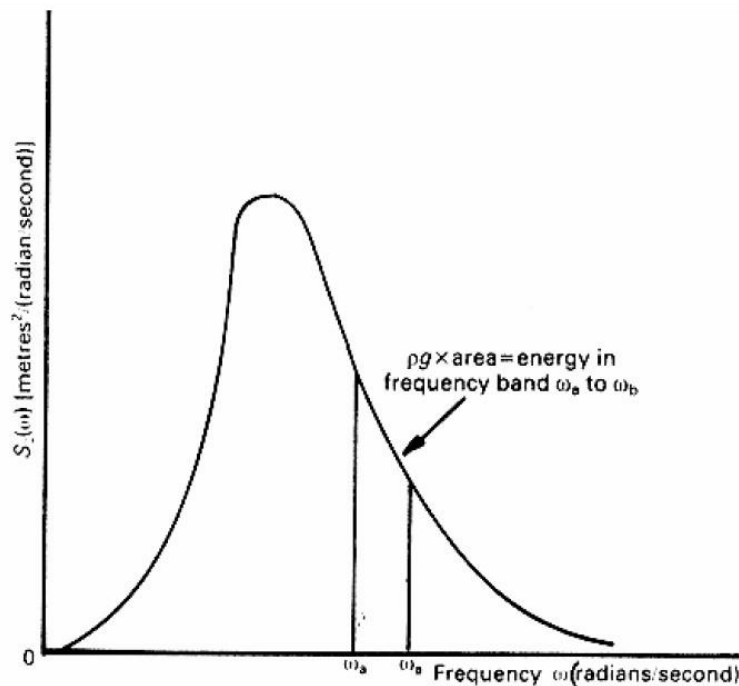
Στην περίπτωση που οι τιμές κύματος ληφθούν ως τιμές χώρου, τότε τα στατιστικά μεγέθη εξαρτώνται και από την κατεύθυνση διάδοσης θ . Εάν το $H_{1/3}$ παρουσιάζει έντονο ολικό μέγιστο για κάποια κατεύθυνση Θ_0 , τότε η κατεύθυνση αυτή λέγεται κύρια κατεύθυνση διάδοσης κύματος. Εάν παρουσιάζονται παραπάνω από ένα μέγιστα, τότε αντίστοιχα έχουμε δύο ή περισσότερες κύριες κατευθύνσεις διάδοσης.

3.5. ΦΑΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η πιθανοθεωρητική δομή του κυματικού πεδίου που αναφέραμε προηγουμένως περιγράφεται πλήρως μέσω του κατευθυντικού φάσματος $S(\omega, \theta)$, (ω =κυκλική συχνότητα, θ = κατεύθυνση μετάδοσης). Μέσω του φάσματος αυτού, μπορούν να εκφραστούν τα στοχαστικά μεγέθη του κυματισμού.

Τα φασματικά μεγέθη που αντιστοιχούν στα στατιστικά μεγέθη χρόνου εκφράζονται με τη βοήθεια του σημειακού φάσματος κυκλικής συχνότητας $S(\omega)$ ή $S(f)$.

$$S(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) d\theta$$



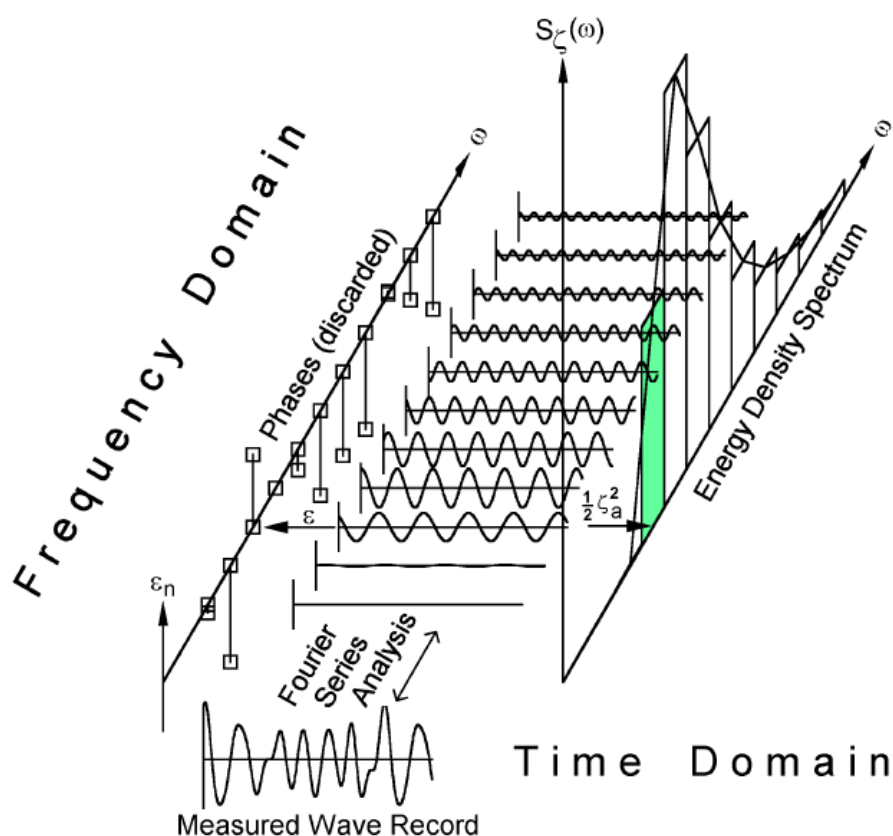
Εικόνα 4: Συνάρτηση φάσματος $S(\omega)$.

Η μορφή της συνάρτησης $S(\omega)/S(f)$ εξαρτάται από τη διάρκεια πνοής του ανέμου και κατά συνέπεια καθορίζεται από το παραγόμενο θαλάσσιο κυματικό περιβάλλον.

Διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

- **αναπτυσσόμενες θάλασσες:** Η θαλάσσια επιφάνεια δεν έχει απορροφήσει πλήρως τη διαθέσιμη ενέργεια ανέμου.
- **πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες:** Το κυματικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη απορροφηθείσα ενέργεια ανέμου.
- **αποσβενόμενες θάλασσες:** Η ενέργεια χάνεται σταδιακά λόγω απωλειών.

Στην εικόνα 5 παριστάνεται γραφικά ο τρόπος με τον οποίον το φάσμα $S(\omega)$ περιγράφει την κατανομή ενέργειας στις επιμέρους αρμονικές. Το σύνθετο κυματικό περιβάλλον που προκύπτει αναλύεται μέσω μετασχηματισμού Fourier.



Εικόνα 5: Παραγωγή φάσματος $S(\omega)$ τυχαίου κυματισμού μέσω αρμονικών συνιστωσών.

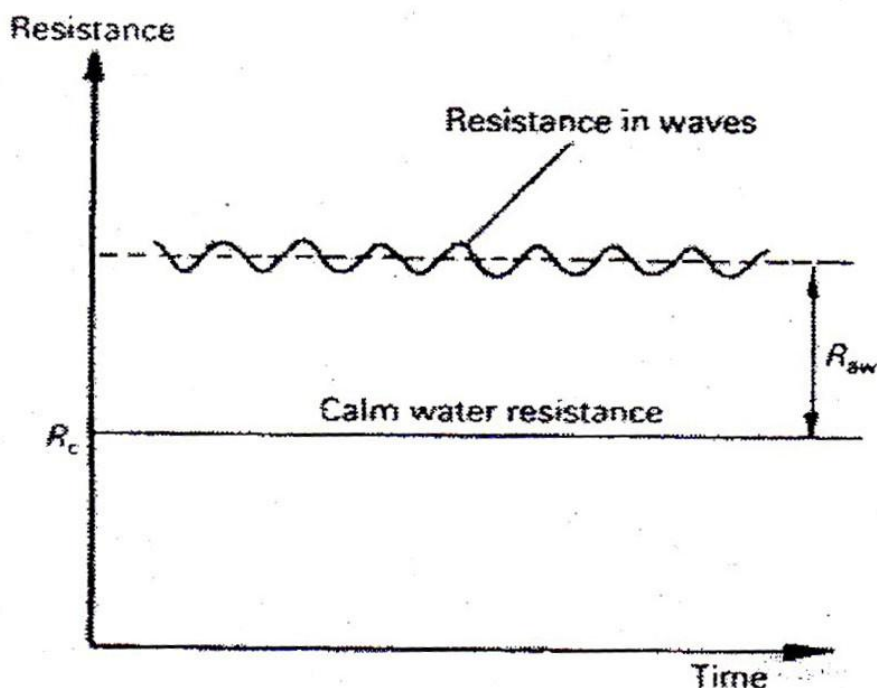
Τα πειράματα που διεξήχθησαν στη δεξαμενή αφορούσαν τυχαίους κυματισμούς σε πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες. Για την περιγραφή των τυχαίων κυματισμών έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα, όπως το Pierson-Moskowitz, το Bretschneider, το Jonswap κλπ.

Συγκεκριμένα εξετάστηκαν τυχαίοι μετωπικοί κυματισμοί που περιγράφονται από το φάσμα Bretschneider. Το φάσμα αυτό περιγράφει ανοιχτές θάλασσες οποιουδήποτε βαθμού ανάπτυξης και ονομάζεται διπαραμετρικό διότι ορίζεται με τη

βοήθεια δυο παραμέτρων, της συχνότητας κορυφής f_p και του σημαντικού ύψους κύματος $H_{1/3}$.

3.6. ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η ολική αντίσταση του σκάφους κατά την πλεύση σε κυματισμούς αποτελείται από δύο συνιστώσες: την αντίσταση σε ήρεμο νερό (calm water resistance) και την πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς (added wave resistance).



Εικόνα 6: Ολική αντίσταση σκάφους σε κυματισμούς.

Ο αισθητήρας Resistance μετράει τιμές ολικής αντίστασης, ενώ κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων ζητούνται διαγράμματα της πρόσθετης αντίστασης για διάφορες καταστάσεις θάλασσας (συναρτήσει της ταχύτητας). Συνεπώς θα πρέπει να αφαιρεθούν τα αντίστοιχα μεγέθη της αντίστασης σε ήρεμο νερό από εκείνα της ολικής.

Επομένως, προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$R_{aw} = R_w - R_{sw}$$

Όπου,

R_w , είναι η αντίσταση σε κυματισμούς

R_{sw} , είναι η αντίσταση σε ήρεμο νερό και

R_{aw} , είναι η πρόσθετη αντίσταση

Η πρόσθετη αντίσταση σε φάσμα τυχαίων κυματισμών μπορεί να υπολογιστεί με τον ίδιο τρόπο όπως και στις περιπτώσεις των ημιτονικών κυματισμών.

Γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά του φάσματος τυχαίων κυματισμών, τα πλάτη και τις συχνότητες από τις οποίες αποτελείται, είναι δυνατό να υπολογιστεί ο ακόλουθος αδιάστατος συντελεστής.

$$C_{aw} = \frac{R_{aw}}{\rho A^2 \cdot \left(\frac{B^2}{L_{PP}}\right)}$$

Η μεθοδολογία υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης προϋποθέτει ότι η πρόσθετη αντίσταση είναι ανάλογη του τετραγώνου του ύψους κύματος και της συχνότητας συνάντησης.

Επομένως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για τις ίδιες συχνότητες αρμονικών κυματισμών και διαφορετικά πλάτη, ο ανωτέρω συντελεστής παραμένει σταθερός.

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης σε φάσμα τυχαίων κυματισμών, για ένα εύρος αρμονικών κυματισμών, υπολογίζεται για κάθε συχνότητα συνάντησης το φάσμα απόκρισης του κυματισμού και ο συντελεστής πρόσθετης αντίστασης.

Κάνοντας τις ανωτέρω παραδοχές, καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση:

$$R_{AW} = 2 \int_0^{\infty} S(w_e) \frac{R_{aw}(w_e)}{\zeta^2} dw_e$$

Με τη χρήση της ανωτέρω σχέσης, είναι εφικτός ο υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ο προσδιορισμός της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμούς προσδιορίζεται μέσω πειραμάτων. Δεδομένου ότι οι πειραματικές μετρήσεις σε φυσική κλίμακα είναι οικονομικά ανέφικτες, τα πειράματα πραγματοποιούνται σε δεξαμενές ρυμούλκησης.

Επομένως, η χρήση της πειραματικής δεξαμενής ρυμουλκήσεως κρίνεται μείζονος σημασίας, καθώς παρέχει τη δυνατότητα διεξαγωγής πειραμάτων μοντέλων πλοίων υπό κλίμακα. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει αξιολογηθεί ως αξιόπιστη εφόσον δίνει, παράλληλα, τη δυνατότητα διαφοροποίησης των υδροδυναμικών παραμέτρων, η επίδραση των οποίων διερευνάται.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων του Ε.Μ.Π.

Στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται συνοπτικά η διάταξη της πειραματικής δεξαμενής, ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση των πειραμάτων καθώς επίσης και η χρήση τους για την επίτευξη των απαιτούμενων μετρήσεων.

4.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

4.1.1. Πειραματική δεξαμενή

Το ονομαστικό μήκος της δεξαμενής είναι 100 μέτρα εκ των οποίων τα 90 περίπου μέτρα είναι διαθέσιμα για την εκπόνηση πειραμάτων. Το πλάτος της είναι 4.56 μέτρα και το βάθος της μπορεί να φτάσει έως και τα 3.5 μέτρα. Στο ένα άκρο της δεξαμενής είναι εγκατεστημένος ένας μηχανισμός παραγωγής κυμάτων (κυματιστήρας), ενώ στο άλλο άκρο είναι εγκατεστημένη μία ειδική ξύλινη διάταξη απόσβεσης κυμάτων (αποσβεστήρας).

Στα πλευρικά τοιχώματα της πειραματικής δεξαμενής μπορούν να τοποθετηθούν ειδικές διατάξεις απόσβεσης κυματισμών, ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε πειράματος.

Στο άνω μέρος των πλευρικών τοιχωμάτων της δεξαμενής, έχουν τοποθετηθεί κατά μήκος ράγες, κατάλληλες να κινείται το φορείο στο οποίο αναρτώνται τα πρότυπα.

Περί το μέσο της δεξαμενής, έχουν τοποθετηθεί παράθυρα παρατηρήσεων τα οποία καλύπτουν 18 μέτρα.

Η δεξαμενή γεμίζει με νερό που προέρχεται από το δίκτυο ύδρευσης της Πολυτεχνειούπολης το οποίο αντλείται από γεώτρηση. Βασική απαίτηση είναι η αποφυγή δημιουργίας μικροβιολογικού φόρτου στο νερό. Για το λόγο αυτό, ο χώρος στον οποίο είναι εγκατεστημένη η πειραματική δεξαμενή είναι πλήρως απομονωμένος από το ηλιακό φως ενώ, παράλληλα, διατίθεται ειδικό φίλτρο μέσω του οποίου γίνεται ανακύκλωση του νερού της δεξαμενής. Τέλος, ανάλογα με τις ανάγκες του εργαστηρίου, η δεξαμενή αδειάζει κάθε τρία χρόνια περίπου οπότε και πραγματοποιείται καθαρισμός της. Στη συνέχεια γεμίζει και πάλι με νερό έτσι, ώστε να ανταποκρίνεται στο λειτουργικό της ρόλο.



Εικόνα 7: Πειραματική δεξαμενή Ε.Ν.Θ.Υ.

4.1.2.Κυματιστήρας

Το σύστημα παραγωγής κυματισμών βρίσκεται ένα μέτρο πριν το τέλος της δεξαμενής και αποτελείται από ένα πτερύγιο (flap) από ανοξείδωτο χάλυβα, που καταλαμβάνει όλο το πλάτος της δεξαμενής. Το πτερύγιο αυτό εδράζεται με άρθρωση σε ύψος 1.3 μέτρα πάνω από τον πυθμένα και φτάνει μέχρι το χείλος της δεξαμενής. Για τη λειτουργία του, αντλείται το νερό από το χώρο πίσω από το πτερύγιο, το οποίο στη συνέχεια κινείται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος. Το σύστημα του κυματιστήρα, είναι τύπου πτερυγίου (flap type) και μπορεί να δημιουργήσει κανονικούς αρμονικούς κυματισμούς με μήκη από 0.5 μέτρα έως και 13 μέτρα και συχνότητες από 0.3 Hz έως 1.4 Hz. Επίσης, μπορεί να δημιουργήσει και πρότυπα θαλασσίων κυματισμών με προκαθορισμένο φάσμα ενέργειας.

4.1.3.Φορείο

Το φορείο είναι αναπόσπαστο κομμάτι της πειραματικής δεξαμενής και φέρει το μετρητικό εξοπλισμό, βασικό μέρος του οποίου είναι τα δυναμόμετρα πάνω στα οποία δένονται τα πρότυπα.

Το βάρος του φορείου είναι 5.5 τόνοι και κινείται πάνω σε σιδηροτροχιές κατά μήκος της δεξαμενής με ταχύτητα έως και 5.5 m/s. Η κίνησή του είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και μπορεί να δουλέψει χωρίς οδηγό, εάν και αυτό για λόγους ασφαλείας απαγορεύεται. Η ταχύτητά του μετριέται με έναν αισθητήρα φωτεινών παλμών, οι οποίοι δημιουργούνται από ένα ειδικό σύστημα που φωτίζει ένα βαθμονομημένο τροχό σε επαφή με τις σιδηροτροχιές. Η ακρίβεια μέτρησης της ταχύτητας είναι της τάξεως του 0.1 mm/s.

Τέλος, στο πίσω μέρος του φορείου ακολουθεί ένας μηχανισμός βίαιης απόσβεσης υψηλών κυματισμών που δημιουργεί το πρότυπο (σιδερώστρα). Η απόσβεση επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση της σιδερώστρας εφαπτομενικά της επιφάνειας του νερού κατά την επιστροφή του φορείου στη θέση εκκίνησης.

4.1.4.Δυναμόμετρο

Το δυναμόμετρο αποτελείται από ένα σταθερό και ένα κινητό στέλεχος. Διαθέτει τρεις άξονες ελευθερίας (κίνηση κατά το διάμηκες, κίνηση κατά το κατακόρυφο και περιστροφή περί τον κατακόρυφο άξονα). Διαθέτει έναν αισθητήρα ο οποίος μετράει τα μεγέθη τα μεγέθη της αντίστασης, της γωνίας διαγωγής (pitch) και της ανύψωσης ή βύθισης (heave).

Στο σταθερό μέρος του δυναμομέτρου, μια πακτωμένη δοκός με ειδική διαμόρφωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 8, επιτελεί τους εξής δύο ρόλους: στηρίζει τον αισθητήρα μέτρησης της κατακόρυφης κίνησης (heave) ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα σε ένα βαγονέτο να κινείται κατά μήκος της στο κατακόρυφο επίπεδο. Επιπρόσθετα, έχει τοποθετηθεί μετρητική ταινία η οποία χρησιμεύει στη βαθμονόμηση του αισθητήρα της κατακόρυφης κίνησης (heave).



Εικόνα 8: Δυναμόμετρο ρυμούλκησης προτύπων πλοίων Ε.Ν.Θ.Υ.

Το κινητό στέλεχος του δυναμομέτρου αποτελείται από το βαγονέτο και από το πόδι του δυναμομέτρου. Τόσο το βαγονέτο όσο και το πόδι διαθέτουν τέσσερις οπές μέσω των οποίων πραγματοποιείται η σύνδεσή τους με τη χρήση κοχλιών. Στο πόδι του δυναμομέτρου τοποθετείται ειδικό controller στο οποίο συνδέονται τα καλώδια του αισθητήρα μέτρησης του προνευτασμού (pitch).

Το βαγονέτο δεν κινείται με πλήρη ελευθερία κατά μήκος της ειδικά διαμορφωμένης δοκού αλλά προβάλλει μία αντίσταση σε αυτή. Στο εργαστήριο, μετρήθηκε πειραματικά το ελάχιστο βάρος που απαιτείται να προστεθεί στο βαγονέτο έτσι, ώστε να αρχίσει να κινείται κάμπτοντας την αρχική αυτή αντίσταση. Το βάρος αυτό αντιστοιχεί σε $w_1 = 14.150kg$.

Εκτός από την αρχική αντίσταση του βαγονέτου, μετρήθηκε και το βάρος του ποδιού του δυναμομέτρου μαζί με τους κοχλίες στήριξης που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεσή του με το σταθερό μέρος του δυναμομέτρου. Το βάρος αυτό ανέρχεται σε $w_2 = 16.110kg$

Το ολικό βάρος των δύο μετρήσεων αυτών είναι $w_{tot} = 30.260kg$ το οποίο αφαιρείται από το εκτόπισμα του μοντέλου κατά τη διαδικασία ερματισμού του.

Το πόδι του δυναμομέτρου προσδένεται σε μία ειδική κατασκευή που έχει τοποθετηθεί στο μοντέλο, στο μέσο του πλάτους κατά το εγκάρσιο (CL) και στην θέση του διαμήκους κέντρου άντωσης (LCB) κατά το διάμηκες. Η τελευταία αυτή θέση επιλέχθηκε καθώς βρίσκεται στην ίδια κατακόρυφη ευθεία με το κέντρο βάρους του πλοίου (LCG), όσο και γιατί, για συνήθεις μορφές πλοίων, βρίσκεται κοντά στο

κέντρο πλευστότητας, γύρω από το οποίο γίνονται οι περιστροφές, σύμφωνα με την θεωρία μικρών μεταβολών. Η ειδική κατασκευή αυτή αποτελείται από δύο πλάκες, παράλληλες μεταξύ τους, στο μέσον των οποίων παρεμβάλλεται ο αισθητήρας μέτρησης της αντίστασης του μοντέλου.

4.1.5. Wave probes

Τα μετρητικά ύψους κύματος (wave probes) αποτελούν μία από τις βασικές μετρητικές διατάξεις με τα οποία διεξάγονται πειράματα καταγραφής της ελεύθερης επιφάνειας και δυναμικής συμπεριφοράς που παράγονται από τον κυματιστήρα (seakeeping).

Το καθένα από αυτά αποτελείται από δύο παράλληλα τοποθετημένα λεπτά σύρματα με μήκος 40cm. Τα σύρματα ενώνονται στο κάτω άκρο τους ώστε να δημιουργούν ένα κλειστό κύκλωμα. Το πάνω μέρος τους τοποθετείται σε ειδική βάση που είναι αναρτημένη σε πρόβολο, έτσι ώστε το probe να είναι μισοβυθισμένο και κάθετο στην ελεύθερη επιφάνεια.

Η λειτουργία του οργάνου βασίζεται στη διαφορά αντίστασης ενός γυμνού σύρματος όταν αυτό βρίσκεται στον αέρα και όταν είναι βυθισμένο στο νερό. Καθώς διέρχεται ένα κύμα από το waveprobe, μεταβάλλεται η αναλογία του ελεύθερου προς το βυθισμένο μήκος του. Η αναλογία αυτή, λόγω της σταθερής τάσης, οδηγεί σε αλλαγή της έντασης του ρεύματος, η οποία μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης μεταφράζεται σε ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.

4.1.6. Γερανοί

Το εργαστήριο έχει στη διάθεσή του δύο γερανούς που βοηθούν στην εγκατάσταση του βαρέως εξοπλισμού και την τοποθέτηση των δυναμομέτρων και των προτύπων. Ο ένας βρίσκεται πλησίον του αποσβεστήρα ενώ ο δεύτερος, ο οποίος έχει και μεγαλύτερη ανυψωτική ικανότητα, βρίσκεται περίπου στο μέσον της δεξαμενής πλησιέστερα στον κυματιστήρα.

4.2. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

4.2.1. Ερματισμός προτύπων πλοίων

Από τα υδροστατικά στοιχεία, είχαμε δεδομένο το απαιτούμενο εκτόπισμα της κάθε κατάστασης. Με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής ζυγαριάς του εργαστηρίου μετρήθηκε το βάρος του άφορτου σκάφους, και στη συνέχεια, υπολογίστηκε από τη διαφορά του εκτοπίσματος, αλλά και του βάρους του δυναμόμετρου τον ακριβή αριθμό των κιλών που απαιτούνταν να προστεθούν κάθε φορά για να επιτευχθεί το αντίστοιχο εκτόπισμα.

Τα πρόσθετα βάρη τοποθετούνταν αρχικά συμμετρικά ως προς το κέντρο βάρους του προτύπου προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενη εγκάρσια κλίση του αλλά και για να επιτευχθεί η κατανομή εκείνη η οποία θα αντιστοιχεί σε ακτίνα αδρανείας ίση περίπου με $r_{zz} = 0.25L_{WL}$. Σε αντίθετη περίπτωση, τα βάρη μετακινούνταν με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτευχθούν οι δύο αυτοί παράμετροι.

Ειδικότερα, στις καταστάσεις φόρτωσης εκείνες για τις οποίες το πρότυπο έπρεπε να πλέει ισοβύθιστο, πραγματοποιούνταν επιπρόσθετος έλεγχος μέσω του αισθητήρα μέτρησης του προνευτασμού. Ο έλεγχος αυτός γινόταν στη θέση εκκίνησης του φορείου ενώ το νερό στην πειραματική δεξαμενή ήταν ήρεμο. Η ένδειξη της γωνίας διαγωγής έπρεπε να ήταν μηδενική. Σε αντίθετη περίπτωση, πραγματοποιούνταν μετακίνηση των βαρών και πάλι συμμετρικά έως ότου η ένδειξη είναι η επιθυμητή.

4.2.2. Βαθμονόμηση οργάνων μετρήσεων

- **Βαθμονόμηση wave probes.**

Το wave probe βαθμονομούταν πριν την έναρξη των πειραμάτων. Έχοντας στη διάθεσή του οπές κατά μήκος του η απόσταση των οποίων αντιστοιχεί στα 2cm, μετακινούνταν κατακόρυφα προς τα πάνω και προς τα κάτω, ενώ το νερό της πειραματικής δεξαμενής ήταν ήρεμο. Από τις διαδοχικές αυτές μετακινήσεις, λαμβάνονταν μετρήσεις προκειμένου να κατασκευαστεί η συνάρτηση μεταφοράς, το αποτέλεσμα της οποίας ήταν γραμμικό.

- **Βαθμονόμηση του οργάνου της γωνίας διαγωγής (pitch).**

Το δυναμόμετρο, ανυψώνονταν στον αέρα με τη βοήθεια γερανού προκειμένου να υπάρχει εύκολη πρόσβαση στο κάτω τμήμα του, μέσω του οποίου γίνεται και η βαθμονόμηση. Στη συνέχεια μετακινούνταν προς τα κάτω το πόδι του δυναμομέτρου, ώστε να ακουμπάει πάνω στην ειδική κατασκευή που έχει τοποθετηθεί για την πρόσδεση του δυναμομέτρου με το μοντέλο. Ανάμεσα τους τοποθετούνταν σφήνες διαφορετικών γωνιών, οπότε για διάφορες τιμές των γωνιών των σφηνών λαμβάνονταν μετρήσεις από το όργανο. Το αποτέλεσμα των μετρήσεων ήταν γραμμικό.

- **Βαθμονόμηση του οργάνου της γωνίας ανύψωσης (heave).**

Για το σκοπό αυτό, το δυναμόμετρο δένεται στο μοντέλο. Στη συνέχεια, με σημείο αναφοράς το ύψος στο οποίο έχει δεθεί στο μοντέλο, το στελέχος του δυναμομέτρου μετακινούνται κατακόρυφα πάνω και κάτω λαμβάνοντας μετρήσεις για τις διάφορες ανυψώσεις και βυθίσεις του στελέχους. Από τις διαδοχικές αυτές μετακινήσεις, κατασκευάζεται η συνάρτηση μεταφοράς, το αποτέλεσμα της οποίας ήταν γραμμικό.

4.3. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Στην ανωτέρω πειραματική διάταξη και με τη χρήση του εξοπλισμού του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε με τον τρόπο που περιγράφηκε, πραγματοποιήθηκαν πειράματα αντίστασης σε:

- α) Ένα διπλέλικο Επιβατηγό/Οχηματαγωγό τύπου ROPAX
- β) Ένα Bulk Carrier

Οι κατηγορίες των πειραμάτων αντίστασης που έλαβαν χώρα είναι συνοπτικά οι ακόλουθες:

- **Πειράματα αντίστασης σε ήρεμο νερό**

Στις διάφορες καταστάσεις φόρτωσης και για διάφορες ταχύτητες, μετρήθηκε η αντίσταση των προαναφερθέντων προτύπων στο ήρεμο νερό.

- **Πειράματα αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς**

Με χρήση κατάλληλου λογισμικού προγράμματος, δίδεται στον κυματιστήρα εντολή να παράγει υπό κλίμακα φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5\text{m}$ και περίοδο $T=12\text{s}$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Κατόπιν, το φορείο ρυμουλκεί το μοντέλο το οποίο είναι προσδεμένο μέσω του δυναμομέτρου και πραγματοποιείται μέτρηση της αντίστασης στη συγκεκριμένη κατάσταση, με σταθερή ταχύτητα του φορείου.

- **Πειράματα αντίστασης σε αρμονικούς κυματισμούς**

Με χρήση κατάλληλου λογισμικού, δίδεται στον κυματιστήρα εντολή να παράγει αρμονικό κυματισμό στον οποίο, ομοίως με τα πειράματα αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς, πραγματοποιείται μέτρηση της αντίστασης του ρυμουλκούμενου προτύπου, με σταθερή ταχύτητα του φορείου.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η αντίσταση μετρήθηκε σε ένα πλήθος αρμονικών κυματισμών με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του φάσματος Bretschneider και τις δυνατότητες του κυματιστήρα.

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- **Συναρτήσεις μεταφοράς**

Στο φορείο υπάρχουν μετρητικά συστήματα, τα οποία κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, λαμβάνουν μετρήσεις για διάφορα μεγέθη, όπως της αντίστασης ρυμούλκησης (resistance), της γωνίας διαγωγής (pitch) και της ανύψωσης (heave) του προτύπου. Οι μετρήσεις αυτές οι οποίες είναι σε Volts ανάγονται στις φυσικές μονάδες μέτρησης των μετρούμενων μεγεθών που είναι σε kg, μοίρες και cm αντίστοιχα, με την βοήθεια μια συνάρτησης μεταφοράς, η οποία προκύπτει από τη διαδικασία της βαθμονόμησης και προηγείται του πειράματος.

Κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης, από γνωστά ζεύγη τιμών (x,y), όπου x οι μετρήσεις σε Volts των γνωστών y φυσικών μεγεθών, προκύπτουν οι τρεις συναρτήσεις μεταφοράς που είναι γραμμικές, δηλαδή της μορφής:

$$y = a \cdot x + b$$

Κατά τη διάρκεια της κύριας πειραματικής διαδικασίας, πριν από κάθε ρυμούλκηση, λαμβάνεται μηδενική μέτρηση x_0 σε κατάσταση ακινησίας για κάθε μετρούμενο μέγεθος. Κατά τη ρυμούλκηση μετράται τιμή x_1 , οπότε το ζητούμενο φυσικό μέγεθος προκύπτει από:

$$y = y - y_0 = [a \cdot x_1 + b] - [a \cdot x_0 + b] = a (x_1 - x_0)$$

Η εξαγωγή και χρήση της συνάρτησης μεταφοράς για τον υπολογισμό της τελικής τιμής της μέτρησης γίνεται αφενός για να ληφθούν υπόψη διαταραχές που επηρεάζουν το σύστημα μέτρησης – όπως η συχνότητα και η τάση του δικτύου τροφοδοσίας ρεύματος, η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας των οργάνων κλπ. – και αφετέρου η μετατροπή των τιμών από μονάδες ρεύματος σε μονάδες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

- **Μέτρηση της αντίστασης στο ήρεμο νερό**

Η καταγραφή των τιμών της αντίστασης πραγματοποιούταν από την έναρξη της κίνησης του φορείου έως και την ακινητοποίησή του. Υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης στο ήρεμο νερό για το χρονικό διάστημα στο οποίο είναι σταθερή, αφαιρώντας δηλαδή τις τιμές της αντίστασης κατά την έναρξη και την ακινητοποίηση του φορείου. Ο υπολογισμός της τιμής της αντίστασης γίνεται με χρήση του παρακάτω τύπου:

$$R_{sw} = \frac{\sum R(t)}{N_{sample}} \quad (1)$$

- **Μέτρηση της αντίστασης σε αρμονικούς κυματισμούς**

Η καταγραφή των τιμών της αντίστασης πραγματοποιούταν λίγο μετά την έναρξη της κίνησης του φορείου έως και λίγο πριν την ακινητοποίησή του. Δεδομένου ότι το φαινόμενο είναι περιοδικό, η τιμή της αντίστασης πρέπει να υπολογιστεί σε ακέραιο αριθμό περιόδων. Με χρήση κατάλληλου λογισμικού, έχοντας ως δεδομένα το μήκος

του μοντέλου, τη συχνότητα του αρμονικού κυματισμού αλλά και την ταχύτητα του φορείου, υπολογίζεται η περίοδος συνάντησης του μοντέλου σε σχέση με το προσπίπτον κύμα.

Κατόπιν, με δεδομένη τη συχνότητα δειγματοληψίας από το μετρητικό του φορείου, είναι εφικτό να υπολογιστεί πόσα δείγματα (samples) αντιστοιχούν σε μία περίοδο. Έτσι, η αντίσταση στα αρμονικά κύματα υπολογίζεται με τη χρήση του παρακάτω τύπου:

$$R_w = \frac{\sum R(t)}{kT_e} \quad (2)$$

Όπου, $k=1,2,3\dots$ και T_e είναι η περίοδος συνάντησης.

- **Μέτρηση της αντίστασης σε φάσμα τυχαίων κυματισμών**

Η καταγραφή των τιμών της αντίστασης πραγματοποιούταν λίγο μετά την έναρξη της κίνησης του φορείου έως και λίγο πριν την ακινητοποίησή του. Ο υπολογισμός της τιμής της αντίστασης γίνεται με χρήση του παρακάτω τύπου:

$$R_w = \frac{\sum R(t)}{N_{sample}} \quad (3)$$

- **Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης**

Η τιμή της πρόσθετης αντίστασης προκύπτει αφαιρώντας την τιμή της αντίστασης στο ήρεμο νερό από την τιμή της αντίστασης στον κυματισμό.

$$R_{aw} = R_w - R_{sw} \quad (4)$$

- **Χρήση αλγορίθμου FFT (Fast Fourier Transform)**

Με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού ανεπτυγμένο σε γλώσσα FORTRAN από το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, έγινε η επεξεργασία των τιμών για την ανάλυση των σημάτων της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού (wave elevation), της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch), λαμβάνονται τα ακόλουθα διαγράμματα με τις σημαντικές τιμές τους.

Τόσο για τους αρμονικούς όσο και για τους τυχαίους κυματισμούς, υπολογίστηκαν οι σημαντικές τιμές των προαναφερθέντων μεγεθών καθώς επίσης και οι συχνότητες στις οποίες αυτές εμφανίζονται.

- **Υπολογισμός αδιάστατου συντελεστή πρόσθετης αντίστασης**

Υπολογίζεται η πρόσθετη αντίσταση στους ημιτονικούς κυματισμούς με τη βοήθεια της σχέσης (2). Κατόπιν, υπολογίζεται η σημαντική τιμή της ανύψωσης των αρμονικών κυματισμών με χρήση του αλγορίθμου FFT (Fast Fourier Transform).

Γνωρίζοντας τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου , B και L_{pp} , υπολογίζεται ο ακόλουθος αδιάστατος συντελεστής πρόσθετης αντίστασης.

$$C_{aw} = \frac{R_{aw}}{\rho A^2 \cdot \left(\frac{B^2}{L_{pp}}\right)} \quad (5)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο αδιάστατος συντελεστής αυτός για αρμονικούς κυματισμούς ίδιας συχνότητας πρέπει να παραμένει σταθερός.

- **Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης σε φάσμα τυχαίου κυματισμού βάσει της αντίστασης σε αρμονικούς κυματισμούς.**

Για τον υπολογισμό αυτό, γίνεται χρήση της ακόλουθης σχέσης [1]:

$$R_{AW.cal.} = 2 \int_0^{\infty} S(w_e) \frac{R_{aw}(w_e)}{A^2} dw_e \quad (6)$$

Από κατάλληλο λογισμικό είναι γνωστές οι τιμές $S(w_e)$ για διάφορες συχνότητες. Βάσει της σχέσης (4), όπου ο αδιάστατος συντελεστής παραμένει σταθερός, γίνεται αριθμητική προσέγγιση της πρόσθετης αντίστασης σε φάσμα τυχαίων κυματισμών.

Οι πειραματικές μετρήσεις δεν ανταποκρίνονται πλήρως στο εύρος των τιμών που απαιτούνται για τον υπολογισμό του ανωτέρω μεγέθους. Ωστόσο, είναι ισοκατανεμημένες στο μετρούμενο πεδίο συχνοτήτων. Επομένως, σε περιπτώσεις που απαιτούνται ενδιάμεσες τιμές, υπολογίζονται με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής.

- **Ποσοστό πρόσθετης αντίστασης φάσματος τυχαίου κυματισμού επί της αντίστασης στο ήρεμο νερό.**

Ορίζεται ο συντελεστής, $\lambda = \frac{R_{aw}}{R_{sw}} 100\% \quad (7)$

- **Ποσοστιαία απόκλιση των μετρήσεων της αντίστασης σε ήρεμο νερό του νέου δυναμομέτρου από παλαιότερο.**

Ορίζεται ο συντελεστής, $\delta = \frac{R_{m.new} - R_{m.old}}{R_{m.old}} \cdot 100\% \quad (8)$

- Ποσοστιαία απόκλιση του μετρούμενου σημαντικού ύψους κύματος από το θεωρητικό.

Ορίζεται ο συντελεστής, $a = \frac{H_{s.meas.} - H_{s.theor.}}{H_{s.theor.}} \cdot 100\%$ (9)

- Ποσοστιαία απόκλιση της μετρούμενης φαινόμενης περιόδου από τη θεωρητική.

Ορίζεται ο συντελεστής, $b = \frac{T_{p.meas.} - T_{p.theor.}}{T_{p.theor.}} \cdot 100\%$ (10)

- Ποσοστιαία απόκλιση της μετρούμενης συχνότητας αρμονικού κυματισμού από τη θεωρητική.

Ορίζεται ο συντελεστής, $c = \frac{f_{FFT} - f_{theor.}}{f_{theor.}} \cdot 100\%$ (11)

- Ποσοστιαία απόκλιση του μετρούμενου πλάτους αρμονικού κυματισμού από το θεωρητικό.

Ορίζεται ο συντελεστής, $d = \frac{A_{FFT} - A_{theor.}}{A_{theor.}} \cdot 100\%$ (12)

- Ποσοστιαία απόκλιση της υπολογισθείσας τιμής πρόσθετης αντίστασης σε φάσμα τυχαίων κυματισμών βάσει της αντίστασης σε αρμονικούς κυματισμούς από τη μετρούμενη.

Ορίζεται ο συντελεστής, $k = \frac{R_{AW.cal.} - R_{AW.meas.}}{R_{AW.meas.}} \cdot 100\%$ (13)

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

6.1. BULK CARRIER HURON

Η γάστρα που δοκιμάστηκε ανήκει σε ένα bulk carrier. Το μήκος του μοντέλου αυτού ήταν 5.11m και η κλίμακα 1/35. Για το μοντέλο αυτό, έγιναν δοκιμές σε 2 διαφορετικά βυθίσματα που αντιστοιχούν σε δύο καταστάσεις φόρτωσης: Full Load και Heavy Ballast.



6.1.1.ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ T=0.207m

Χαρακτηριστικά μοντέλου	Σύμβολο		Καταστάσεις δοκιμών	
			1	2
Μήκος ισάλου	L_{WL}	m	5.11	5.362
Μήκος με βολβό	L_{BULB}	m	5.116	5.361
Πλάτος ισάλου	B_{WL}	m	0.677	0.677
Μέσο βύθισμα	T_m	m	0.207	0.207
Trim	t	deg	0.000	-0.500
Εκτόπισμα	Δ	kg	589.42	556.84
Βρεχόμενη επιφάνεια	W.S.	m^2	4.669	4.677
Συντελεστής γάστρας	C_B		0.82	0.808

6.1.1.I. Ισοβύθιστη κατάσταση (even keel)

6.1.1.I.i. Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό για τις ακόλουθες ταχύτητες:

- i) $v=0.516$ m/s
- ii) $v=0.774$ m/s
- iii) $v=0.945$ m/s
- iv) $v=1.117$ m/s
- v) $v=1.289$ m/s
- vi) $v=1.461$ m/s

Ειδικότερα, στην ταχύτητα $v= 1.461$ m/s ελήφθησαν περισσότερες από μία μετρήσεις προκειμένου να πιστοποιηθεί η επαναληψιμότητά τους.

Ο προσδιορισμός της τιμής της αντίστασης σε ήρεμο νερό, για συγκεκριμένη ταχύτητα, αποτελεί το πρώτο στάδιο για την εκτίμηση του ποσοστού της πρόσθετης αντίστασης, παρουσία κυματισμών.

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα των τιμών της αντίστασης για την ταχύτητα $v=1.461$ m/s είναι τα εξής:

No of run	Rm (kg)
1	3.078
2	3.167
3	3.065
4	3.126
5	2.999
6	3.126
7	3.110
average	3.096

Πίνακας 6.1.1.I.1

Η τιμή, λοιπόν, της αντίστασης για το ήρεμο νερό είναι η ακόλουθη:

$$R_{sw} = 3.096kg$$

Οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης για τις προαναφερθείσες ταχύτητες δοκιμών είναι οι ακόλουθες:

v (m/s)	Rm (kg)
0.516	0.339
0.774	0.710
0.945	1.024
1.117	1.604
1.289	2.154
1.461	3.096

Πίνακας 6.1.1.I.2

Για το συγκεκριμένο μοντέλο, στην αντίστοιχη κατάσταση φόρτωσης παρατίθενται και οι τιμές της αντίστασης στις ίδιες ταχύτητες, οι οποίες ελήφθησαν χρησιμοποιώντας παλαιότερο δυναμόμετρο του εργαστηρίου, προκειμένου να ελεγχθεί η σύγκλισή τους.

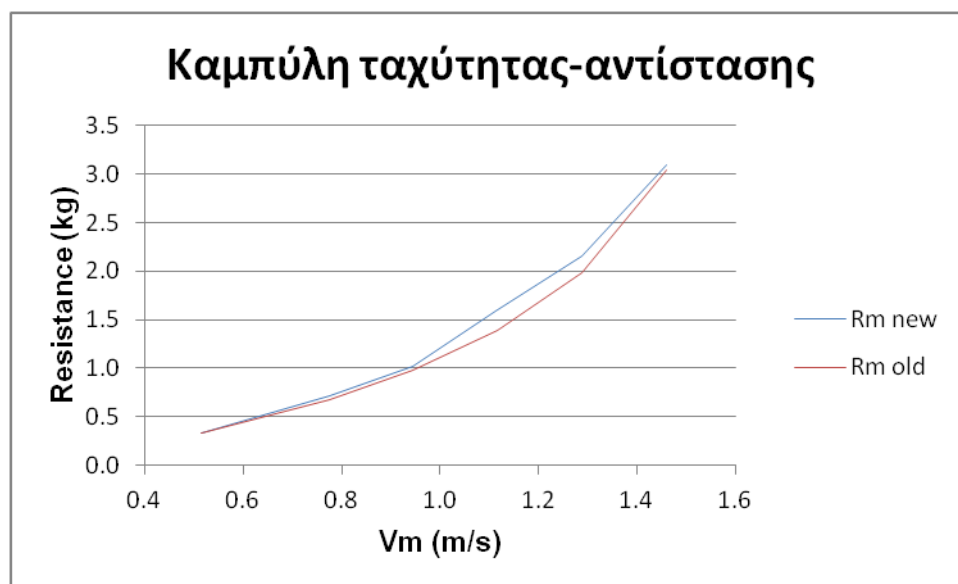
Στον παρακάτω πίνακα, οι τιμές $R_{m\ new}$ αφορούν στην αντίσταση όπως μετρήθηκε με το νέο δυναμόμετρο και οι αντίστοιχες τιμές $R_{m\ old}$ αφορούν στην αντίσταση όπως μετρήθηκε με το παλαιό δυναμόμετρο.

Παράλληλα, σε κάθε ταχύτητα, παρατίθεται η απόκλιση των μετρήσεων μεταξύ του παλαιού και του νέου δυναμομέτρου. Ο προσδιορισμός της απόκλισης των τιμών ορίζεται από τη σχέση (8)

v (m/s)	$R_{m\ new}$ (kg)	$R_{m\ old}$ (kg)	δ (%)
0.516	0.339	0.338	0.30
0.774	0.71	0.673	5.50
0.945	1.024	0.979	4.60
1.117	1.604	1.391	15.31
1.289	2.154	1.984	8.57
1.461	3.096	3.037	1.94

Πίνακας 6.1.1.1.3

Οι ανωτέρω τιμές απεικονίζονται σχηματικά στο επόμενο διάγραμμα:



Διάγραμμα 6.1.1.1.1

6.1.1.1.ii. Εύρεση ακτίνας αδρανεΐας και περιόδου ιδιοταλάντωσης

Ο υπολογισμός της ακτίνας αδρανεΐας του μοντέλου λόγω του μεγάλου εκτοπίσματός του πραγματοποιήθηκε υπολογιστικά.

Για λόγους πληρότητας και για την ταυτοποίηση των μετρούμενων μεγεθών, υπολογίστηκε αρχικά το βάρος του άφορτου σκάφους χρησιμοποιώντας τον κανόνα ολοκλήρωσης κατά Simpson.

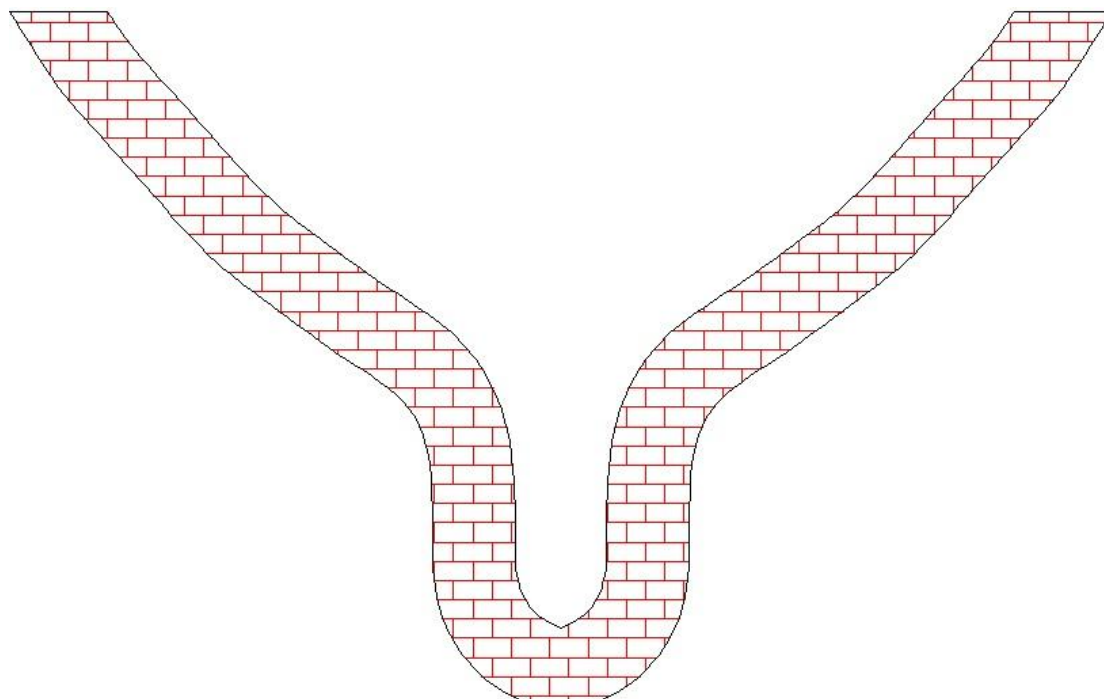
Χρησιμοποιώντας το σχέδιο των γραμμών του πλοΐου και θεωρώντας ένα μέσο πάχος για το ξύλο, $h=3.5\text{cm}$, υπολογίστηκε η επιφάνεια για κάθε νομέα με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AUTOCAD 2012.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Νομέας	$A_n (m^2)$
0	0.0240
0.5	0.0266
1	0.0401
1.5	0.0402
2	0.0415
2.5	0.0432
3	0.0449
4	0.0482
5	0.0506
6	0.0523
7	0.0534
8	0.0539
9	0.0539
10	0.0539
11	0.0539
12	0.0539
13	0.0539
14	0.0538
15	0.0525
16	0.0522
17	0.0509
17.5	0.0480
18	0.0474
18.5	0.0449
19	0.0413
19.25	0.0401
19.5	0.0392
19.75	0.0374
20	0.0364
20.25	0.0310
20.5	0.0256
20.75	0.0247
21	0.0203

Πίνακας 6.1.1.1.4

Όπου, σε κάθε νομέα, μία εγκάρσια τομή της επιφάνειας της γάστρας έχει τη μορφή που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1

Παρατηρούμε ότι η γάστρα του πλοίου περιγράφεται κυρίως από 21 ισαπέχοντες νομείς. Ωστόσο, υπάρχουν και επιπλέον νομείς οι οποίοι πυκνώνουν στις περιοχές της πρύμνης και της πλώρης καθώς επίσης και στην περιοχή του βολβού για λεπτομερέστερη απόδοσή της γεωμετρίας της γάστρας.

Η γενική σχέση που χρησιμοποιείται για την αριθμητική ολοκλήρωση κατά Simpson είναι η ακόλουθη:

$$\nabla = \frac{\delta x}{3} [1A_0 + 4A_1 + 2A_2 + 4A_3 + \dots + 4A_{N-3} + 2A_{N-2} + 4A_{N-1} + 1A_N]$$

,(14)

Όπου, στη συγκεκριμένη περίπτωση, $\delta x = \frac{L}{21}$, είναι η ισαπόσταση των νομέων.

Γνωρίζοντας ότι $L=5.116\text{m}$, προκύπτει ότι $\delta x= 0.2436\text{m}$.

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχει πυκνότερη διακριτοποίηση στις περιοχές της πρύμνης, της πλώρης και του βολβού. Για το λόγο αυτό, ο υπολογισμός του συνολικού όγκου γίνεται βάσει της παρακάτω σχέσης:

$$\nabla = \nabla_1 + \nabla_2 + \nabla_3 + \nabla_4 \quad (15)$$

Όπου:

$$\nabla_1 = \frac{(\delta x/2)}{3} \cdot [1A_0 + 4A_{0.5} + 2A_1 + 4A_{1.5} + 2A_2 + 4A_{2.5} + 1A_3] \quad (16)$$

$$\nabla_2 = \frac{\delta x}{3} \cdot [1A_3 + 4A_4 + 2A_5 + 4A_6 + \dots + 4A_{14} + 2A_{15} + 4A_{16} + 1A_{17}] \quad (17)$$

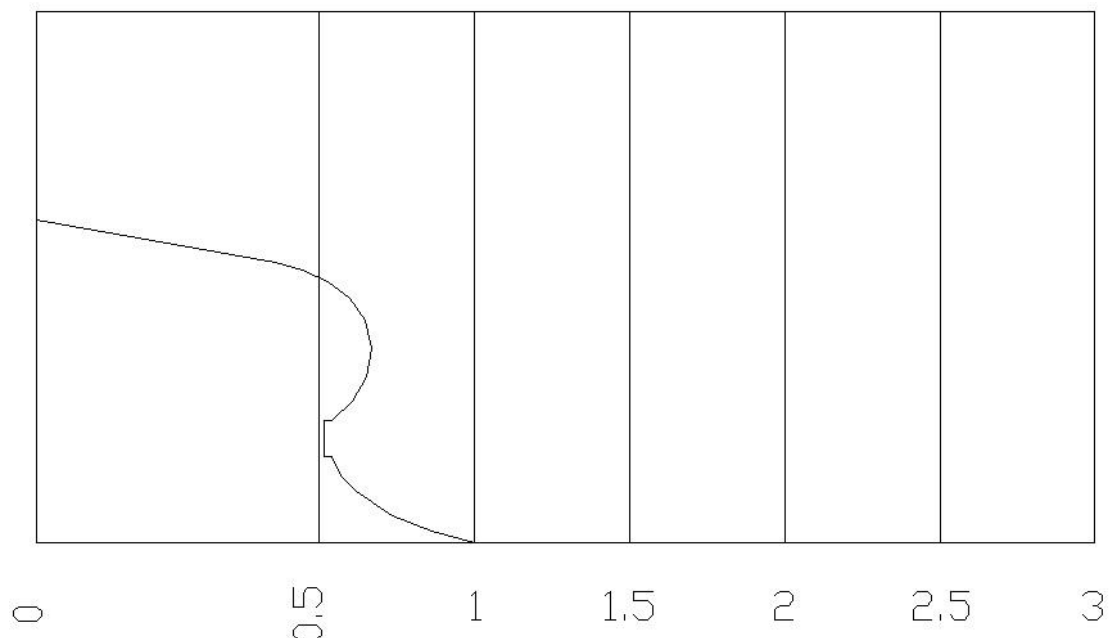
$$\nabla_3 = \frac{(\delta x/2)}{3} \cdot [1A_{17} + 4A_{17.5} + 2A_{18} + 4A_{18.5} + 1A_{19}] \quad (18)$$

$$\nabla_4 = \frac{(\delta x/4)}{3} \cdot [1A_{19} + 4A_{19.25} + 2A_{19.5} + 4A_{19.75} + 2A_{20} + 4A_{20.25} + 2A_{20.5} + 4A_{20.75} + 1A_{21}] \quad (19)$$

Κάνοντας χρήση των ανωτέρω τύπων καθώς επίσης και των στοιχείων του Πίνακα 6.1.1.1.4, προκύπτουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα:

➤ Για τον όγκο ∇_1

Το τμήμα της γάστρας του πλοίου που ολοκληρώνεται αριθμητικά κατά Simpson απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2

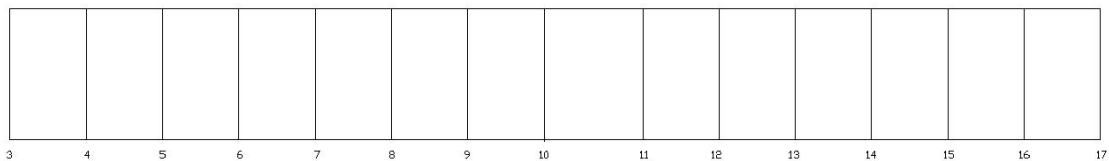
Νομέας	$A_n (m^2)$ [1]	Συντελεστής Simpson [2]	$F_i = [1] \times [2]$
0	0.0240	1	0.0240
0.5	0.0266	4	0.1063
1	0.0401	2	0.0801
1.5	0.0402	4	0.1610
2	0.0415	2	0.0830
2.5	0.0432	4	0.1728
3	0.0449	1	0.0449
		ΣF_1	0.6721

Πίνακας 6.1.1.1.5

Άρα, $\nabla_1 = \frac{(\delta x/2)}{3} \cdot \Sigma F_1 = \frac{0.1218}{3} \cdot 0.6721 = 0.0406 \cdot 0.6721 = 0.0273 m^3$
 Συνεπώς: $\nabla_1 = 0.0273 m^3$ (20)

➤ Για τον όγκο ∇_2

Το τμήμα της γάστρας του πλοίου που ολοκληρώνεται αριθμητικά κατά Simpson απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3

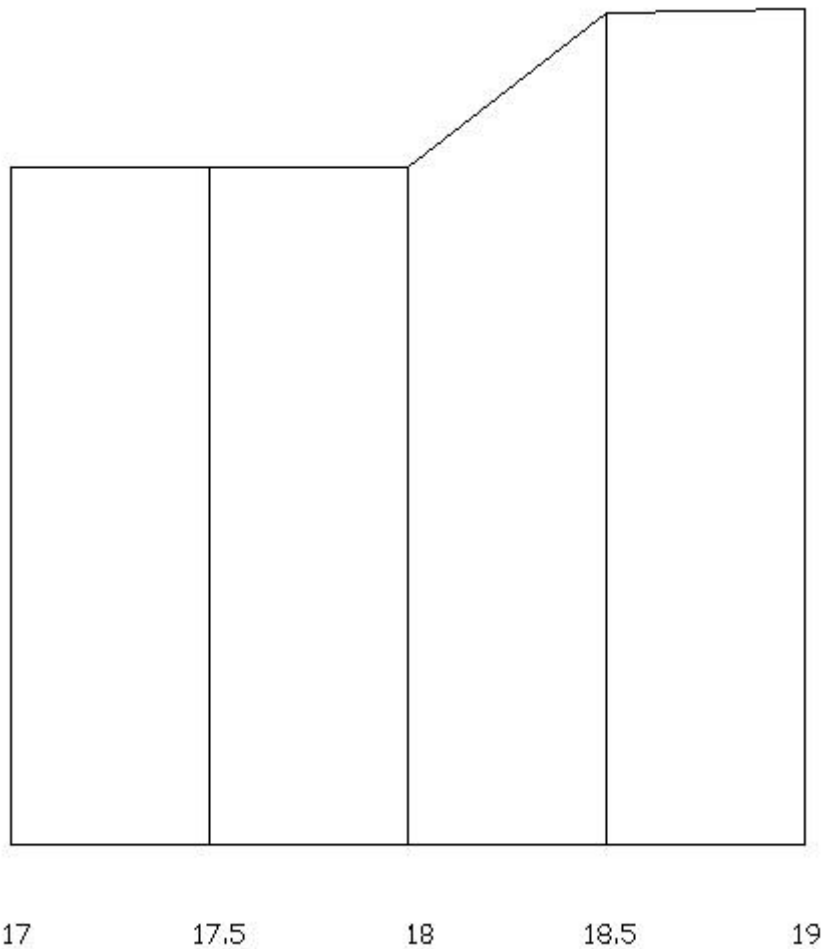
Νομέας	$A_n (m^2)$ [1]	Συντελεστής Simpson [2]	$F_i = [1] \times [2]$
3	0.0449	1	0.0449
4	0.0482	4	0.1929
5	0.0506	2	0.1012
6	0.0523	4	0.2093
7	0.0534	2	0.1068
8	0.0539	4	0.2157
9	0.0539	2	0.1078
10	0.0539	4	0.2157
11	0.0539	2	0.1078
12	0.0539	4	0.2157
13	0.0539	2	0.1078
14	0.0538	4	0.2151
15	0.0525	2	0.1049
16	0.0522	4	0.2088
17	0.0509	1	0.0509
		ΣF_2	2.2054

Πίνακας 6.1.1.1.6

Άρα, $\nabla_2 = \frac{\delta x}{3} \cdot \Sigma F_2 = \frac{0.2436}{3} \cdot 2.2054 = 0.0812 \cdot 2.2054 = 0.1791 m^3$
 Συνεπώς: $\nabla_2 = 0.1791 m^3$ (21)

➤ Για τον όγκο ∇_3

Το τμήμα της γάστρας του πλοίου που ολοκληρώνεται αριθμητικά κατά Simpson απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4

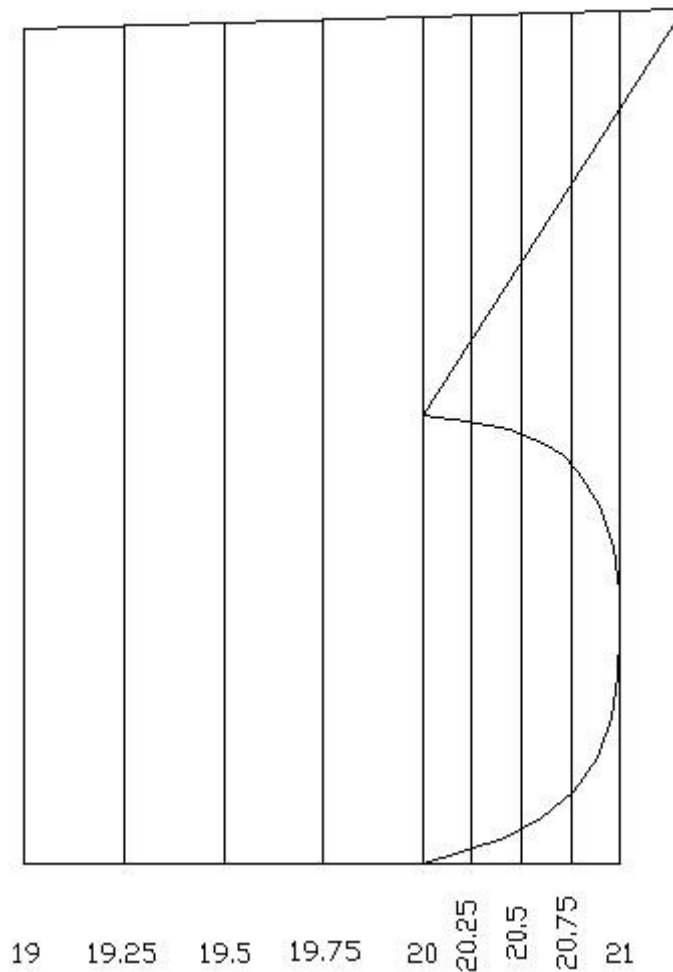
Νομέας	$A_n (m^2)$ [1]	Συντελεστής Simpson [2]	$F_i = [1] \times [2]$
17	0.0509	1	0.0509
17.5	0.0480	4	0.1920
18	0.0474	2	0.0949
18.5	0.0449	4	0.1798
19	0.0413	1	0.0413
		ΣF_3	0.5589

Πίνακας 6.1.1.1.7

Αρα, $\nabla_3 = \frac{(\delta x/2)}{3} \cdot \Sigma F_3 = \frac{0.1218}{3} \cdot 0.5589 = 0.0406 \cdot 0.5589 = 0.0227 m^3$
 Συνεπώς: $\nabla_3 = 0.0227 m^3$ (22)

➤ Για τον όγκο ∇_4

Το τμήμα της γάστρας του πλοίου που ολοκληρώνεται αριθμητικά κατά Simpson απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5

Νομέας	$A_n (m^2)$ [1]	Συντελεστής Simpson [2]	$F_i = [1] \times [2]$
19	0.0413	1	0.0413
19.25	0.0401	4	0.1602
19.5	0.0392	2	0.0785
19.75	0.0374	4	0.1495
20	0.0364	2	0.0729
20.25	0.0310	4	0.1238
20.5	0.0256	2	0.0512
20.75	0.0247	4	0.0988
21	0.0203	1	0.0203
		ΣF_4	0.7965

Πίνακας 6.1.1.1.8

$$\text{Άρα, } \nabla_4 = \frac{(\delta x/4)}{3} \cdot \Sigma F_4 = \frac{0.0609}{3} \cdot 0.7965 = 0.0203 \cdot 0.7965 = 0.0162m^3$$

$$\text{Συνεπώς: } \nabla_4 = 0.0162m^3 \quad (23)$$

Από τις σχέσεις : (15), (20), (21), (22) και (23) προκύπτει ότι:

$$\nabla = \nabla_1 + \nabla_2 + \nabla_3 + \nabla_4 = 0.0273m^3 + 0.1791m^3 + 0.0227m^3 + 0.0162m^3 = 0.2452m^3$$

Συνεπώς:

$$\nabla = 0.2452m^3 \quad (24)$$

Για τον υπολογισμό του βάρους του άφορτου σκάφους απαιτείται η χρήση της πυκνότητας του ξύλου από το οποίο είναι κατασκευασμένο το μοντέλο. Δεδομένου ότι χρησιμοποιήθηκε ρητίνη προκειμένου να στεγανοποιηθεί το μοντέλο στο εσωτερικό του, προσαιξάνεται η τιμή της πυκνότητας του ξύλου ώστε να πραγματοποιηθεί ο απαιτούμενος υπολογισμός:

$$L.S.m.calc. = \gamma_{υλικού} \cdot \nabla \quad (25)$$

Από τις σχέσεις: (24) και (25) , για $\gamma_{υλικού} = 450kg/m^3$ προκύπτει ότι :

$$L.S.m.calc. = 110.36kg$$

Κατά την πειραματική διαδικασία, το βάρος του άφορτου σκάφους ζυγίστηκε με την ηλεκτρονική ζυγαριά του εργαστηρίου, η ένδειξη της οποίας ήταν η ακόλουθη:

$$L.S.m.real = 106.24kg$$

Η απόκλιση των ανωτέρω μετρήσεων είναι η ακόλουθη:

$$\frac{L.S.m.calc. - L.S.m.real}{L.S.m.calc.} = \frac{110.36 - 106.24}{110.36} = \frac{4.12}{110.36} = 3.73\%$$

η οποία θεωρείται ικανοποιητική.

Εφ'όσον αποδείχτηκε ότι η ολοκλήρωση κατά Simpson δίνει ακριβή αποτελέσματα, υπολογίζεται στη συνέχεια η ακτίνα αδρανείας του μοντέλου.

Για τον υπολογισμό της ακτίνας αδρανείας, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$\Sigma W_{fr.i} \cdot d_i^2 + \Sigma W_{bal.j} \cdot d_j^2 = \Delta \cdot r_{zz}^2 \quad (26)$$

- Υπολογισμός $\sum W_{fr,i} \cdot d_i^2$:

Ως $W_{fr,i}$ συμβολίζεται το στοιχειώδες βάρος του σκάφους ανά νομέα και d_i η απόσταση του στοιχειώδους αυτού βάρους από το διάμηκες κέντρο άντωσης (LCB) του μοντέλου.

Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του ανωτέρου όρου είναι η εξής:

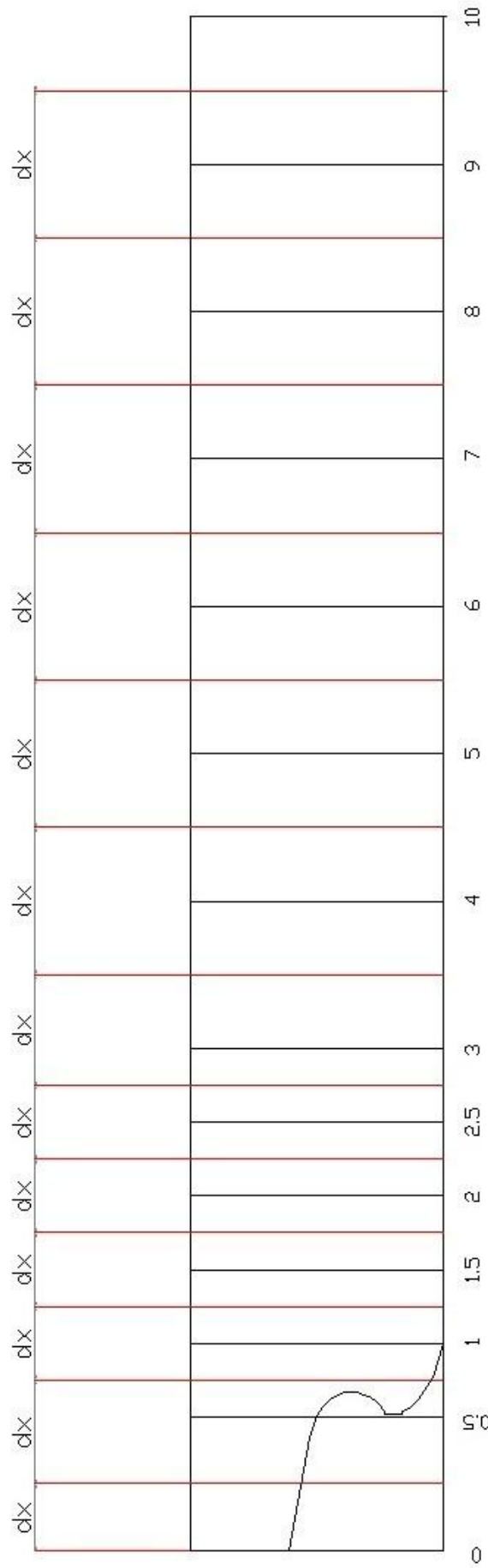
Λόγω της πυκνής διακριτοποίησης των νομέων στις περιοχές της πρύμνης, της πλώρης και του βολβού, έγινε η παραδοχή ότι για μικρά διαστήματα η επιφάνεια του νομέα παραμένει σταθερή.

Γνωρίζοντας, επομένως, τις αριθμητικές τιμές των επιφανειών κάθε νομέα i , θεωρήθηκε διάστημα dx εκατέρωθεν του νομέα.

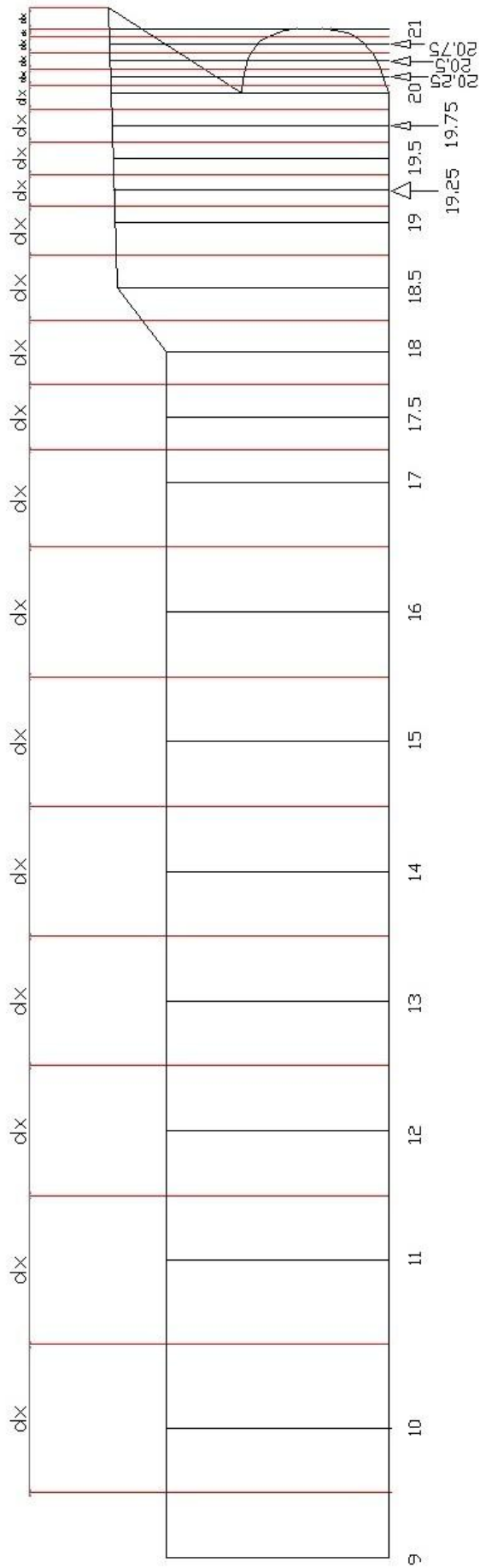
Το διάστημα αυτό έχει ως μέσο τη θέση του νομέα i , ενώ ως κάτω άκρο ορίζεται η ημιαπόσταση μεταξύ των νομέων $i-1$ και i και ως άνω άκρο ορίζεται η ημιαπόσταση μεταξύ των νομέων i και $i+1$.

Σχηματικά, η ανωτέρω διαδικασία απεικονίζεται παρακάτω:

ΠΡΥΜΝΑΙΟ ΤΜΗΜΑ



ΠΡΩΡΑΙΟ ΤΜΗΜΑ



Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζεται ο στοιχειώδης όγκος ανά νομέα, ∇_i , ο οποίος εν συνεχεία πολλαπλασιάζεται με την πυκνότητα του υλικού, $\gamma_{υλικού} = 450\text{kg/m}^3$, αποδίδει το στοιχειώδες βάρος W_i .

Προκύπτει ο πίνακας με το στοιχειώδες βάρος ανά νομέα:

Νομέας	$A_i (m^2)$	$dx (m)$	$\nabla_i = A_i \cdot dx (m^3)$	$W_i = \gamma_{υλικού} \cdot \nabla_i$
0	0.0240	0.0609	0.0015	0.6571
0.5	0.0266	0.1218	0.0032	1.4569
1	0.0401	0.1218	0.0049	2.1955
1.5	0.0402	0.1218	0.0049	2.2060
2	0.0415	0.1218	0.0051	2.2754
2.5	0.0432	0.1218	0.0053	2.3685
3	0.0449	0.1827	0.0082	3.6910
4	0.0482	0.2436	0.0117	5.2869
5	0.0506	0.2436	0.0123	5.5452
6	0.0523	0.2436	0.0127	5.7371
7	0.0534	0.2436	0.0130	5.8568
8	0.0539	0.2436	0.0131	5.9115
9	0.0539	0.2436	0.0131	5.9115
10	0.0539	0.2436	0.0131	5.9115
11	0.0539	0.2436	0.0131	5.9115
12	0.0539	0.2436	0.0131	5.9115
13	0.0539	0.2436	0.0131	5.9115
14	0.0538	0.2436	0.0131	5.8942
15	0.0522	0.2436	0.0127	5.7223
16	0.0525	0.2436	0.0128	5.7521
17	0.0509	0.1827	0.0093	4.1822
17.5	0.0476	0.1218	0.0058	2.6112
18	0.0480	0.1218	0.0058	2.6317
18.5	0.0449	0.0914	0.0041	1.8476
19	0.0413	0.1218	0.0050	2.2641
19.25	0.0392	0.0609	0.0024	1.0756
19.5	0.0374	0.0609	0.0023	1.0241
19.75	0.0364	0.0609	0.0022	0.9988
20	0.0247	0.0609	0.0015	0.6768
20.25	0.0401	0.0609	0.0024	1.0978
20.5	0.0310	0.0609	0.0019	0.8485
20.75	0.0256	0.0609	0.0016	0.7019
21	0.0203	0.1523	0.0031	1.3883

Πίνακας 6.1.1.1.9

Από τα υδροστατικά διαγράμματα του πλοίου, η απόσταση d_i του στοιχειώδους αυτού βάρους από το διάμηκες κέντρο άντωσης (LCB) του μοντέλου είναι γνωστή και έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

W_i (kg)	d_i^2 (m ²)	$W_i \cdot d_i^2$ (kg · m ²)
0.6571	2.728	4.890
1.4569	2.606	9.896
2.1955	2.484	13.551
2.2060	2.363	12.313
2.2754	2.241	11.425
2.3685	2.119	10.634
3.6910	1.997	14.722
5.2869	1.754	16.256
5.5452	1.510	12.642
5.7371	1.266	9.199
5.8568	1.023	6.125
5.9115	0.779	3.588
5.9115	0.535	1.695
5.9115	0.292	0.503
5.9115	0.048	0.014
5.9115	0.195	0.226
5.9115	0.439	1.140
5.8942	0.683	2.747
5.7223	0.926	4.910
5.7521	1.170	7.873
4.1822	1.414	8.356
2.6112	1.535	6.155
2.6317	1.657	7.227
1.8476	1.779	5.847
2.2641	1.901	8.180
1.0756	1.962	4.139
1.0241	2.023	4.189
0.9988	2.083	4.336
0.6768	2.144	3.112
1.0978	2.205	5.339
0.8485	2.266	4.358
0.7019	2.327	3.801
1.3883	2.388	7.917
	$\Sigma W_i \cdot d_i^2$	217.305

Πίνακας 6.1.1.1.10

- Υπολογισμός $\Sigma W_{bal.j} \cdot d_j^2$

Για τον υπολογισμό του όρου αυτού, μετρήθηκε η απόσταση κάθε βάρους που χρησιμοποιήθηκε για τον ερματισμό του μοντέλου προκειμένου να επιτευχθεί το απαιτούμενο εκτόπισμα, από το διάμηκες κέντρο άντωσης.

Τα βάρη έχουν σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου και η εν λόγω απόσταση μετρήθηκε από τον άξονα συμμετρίας τους.

Να σημειωθεί ότι για την απλούστευση των υπολογισμών, τα βάρη θεωρήθηκαν ως σημειακά φορτία.

Οι μετρήσεις που προέκυψαν καθώς επίσης και ο υπολογισμός του όρου $\Sigma W_{bal.j} \cdot d_j^2$ παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα :

W_j (kg)	d_j^2 (m ²)	$W_j \cdot d_j^2$ (kg · m ²)
22	2.772	60.989
22	2.772	60.989
11.7	4.410	51.597
11.7	3.534	41.352
11.7	1.988	23.261
7.91	1.538	12.162
22	1.188	26.138
22	0.748	16.461
22	0.748	16.461
22	0.810	17.820
11.7	0.372	4.354
22	0.194	4.259
17.55	0.036	0.634
17.55	0.036	0.634
22	0.570	12.541
22	0.570	12.541
22	0.230	5.069
22	0.325	7.148
5.85	0.436	2.548
22	0.740	16.271
22	2.088	45.937
22	2.088	45.937
22	1.145	25.188
17.55	1.488	26.121
11.7	2.592	30.328
22	4.182	92.005
	$\Sigma W_{bal.j} \cdot d_j^2$	658.742

Πίνακας 6.1.1.1.11

Από τους ανωτέρω υπολογισμούς και για εκτόπισμα $\Delta=589.42\text{kg}$, γίνεται αντικατάσταση στη σχέση (26) και προκύπτει ότι :

$$\Sigma W_{fr.i} \cdot d_i^2 + \Sigma W_{bal.j} \cdot d_j^2 = \Delta \cdot r_{zz}^2 \Rightarrow r_{zz}^2 = 1.486 \text{ m}^2$$

Άρα προκύπτει ότι η τιμή της ακτίνας αδρανείας είναι $r_{zz} = 1.219\text{m}$

Γνωρίζοντας ότι $L_{BP} = 5.116\text{m}$, από την υπολογισθείσα τιμή της ακτίνας αδρανείας προκύπτει ότι:

$$r_{zz} = 0.24L_{BP}$$

Από την ανάλυση της κατανομής υπαρχόντων πλοίων, έχει υπολογιστεί ότι η τιμή της ακτίνας αδρανείας είναι περίπου :

$$r_{zz,theor.} = 0.25L_{BP}$$

Η απόκλιση της τιμής της ακτίνας αδρανείας που υπολογίσθηκε από τη θεωρητική είναι η ακόλουθη:

$$\frac{r_{zz,theor.} - r_{zz}}{r_{zz,theor.}} = \frac{0.25L_{BP} - 0.24L_{BP}}{0.25L_{BP}} = \frac{0.01}{0.25} = 0.04 = 4\%$$

η οποία κρίνεται ικανοποιητική.

6.1.1.I.iii. Μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5m$ και περίοδο $T=12s$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Στην ταχύτητα υπηρεσίας, $v=1.461$ m/s, μετρήθηκε η αντίσταση του μοντέλου σε φάσμα κυματισμών με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθησαν.

Υπολογίζοντας την αντίσταση του μοντέλου για χρονική ιστορία του φάσματος τυχαίου κυματισμού ίση με 300s, είναι πλέον εφικτό να υπολογισθεί και το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασής του, συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή της αντίστασης σε ήρεμο νερό.

Για τον υπολογισμό αυτό, ελήφθησαν συνολικά οι ακόλουθες δέκα (10) μετρήσεις, όπως προέκυψαν από τη ρυμούλκηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή.

No of run	Rm (kg)
1	4.162
2	3.862
3	3.848
4	4.306
5	3.983
6	4.391
7	4.044
8	3.698
9	3.695
10	4.107
average	4.010

Πίνακας 6.1.1.I. 12

Η τιμή της αντίστασης σε τυχαίο κυματισμό είναι η ακόλουθη :

$$R_w = 4.010kg$$

Από τη σχέση (4) υπολογίζεται ότι η τιμή της πρόσθετης αντίστασης είναι ίση με:

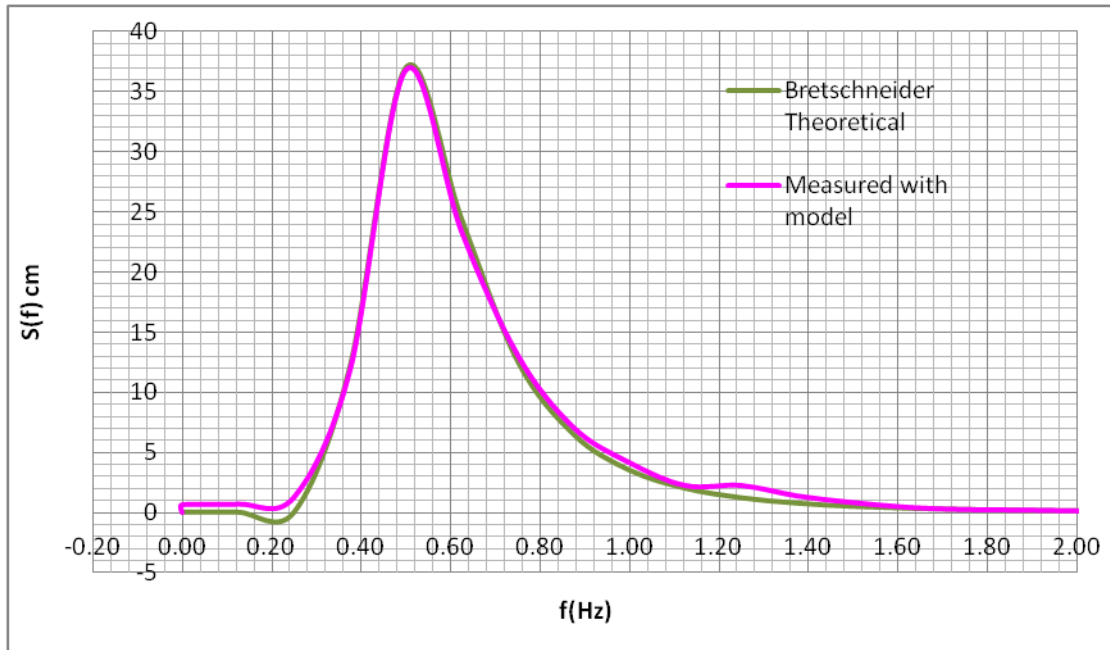
$$R_{aw} = 0.914kg$$

Το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμό επί της αντίστοιχης σε ήρεμο νερό, βάσει της σχέσης (7) είναι :

$$\lambda = 29.52\%$$

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform) για την ανάλυση των σημάτων της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού (wave elevation), της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch), λαμβάνονται τα ακόλουθα διαγράμματα με τις σημαντικές τιμές τους.

Για την ανύψωση του κύματος (wave elevation) :



Διάγραμμα 6.1.1.1.2

Η σημαντική τιμή του μετρούμενου ύψους κύματος και η φαινόμενη μετρούμενη περίοδος είναι:

$$H_{s.meas.} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 3.662\text{cm} = 14.65\text{cm}$$

$$T_{p.meas.} = 2.00\text{s}$$

Οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές είναι:

$$H_{s.theor.} = 14.29\text{cm}$$

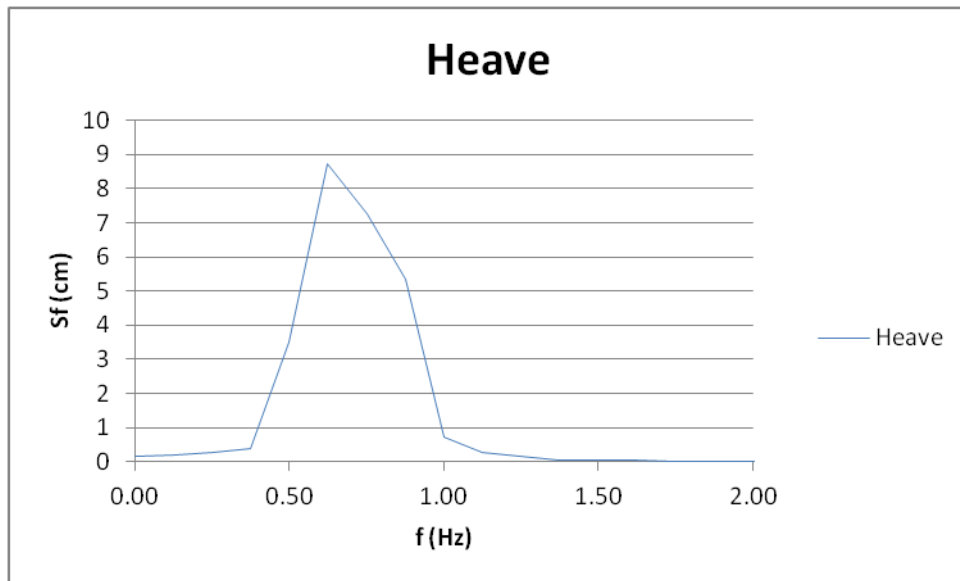
$$T_{p.theor.} = 2.03\text{s}$$

Από τις σχέσεις (9) και (10) οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των θεωρητικών μεγεθών είναι οι ακόλουθες:

$$a = 2.52\%$$

$$b = -1.48\%$$

Για την κατακόρυφη ανύψωση :



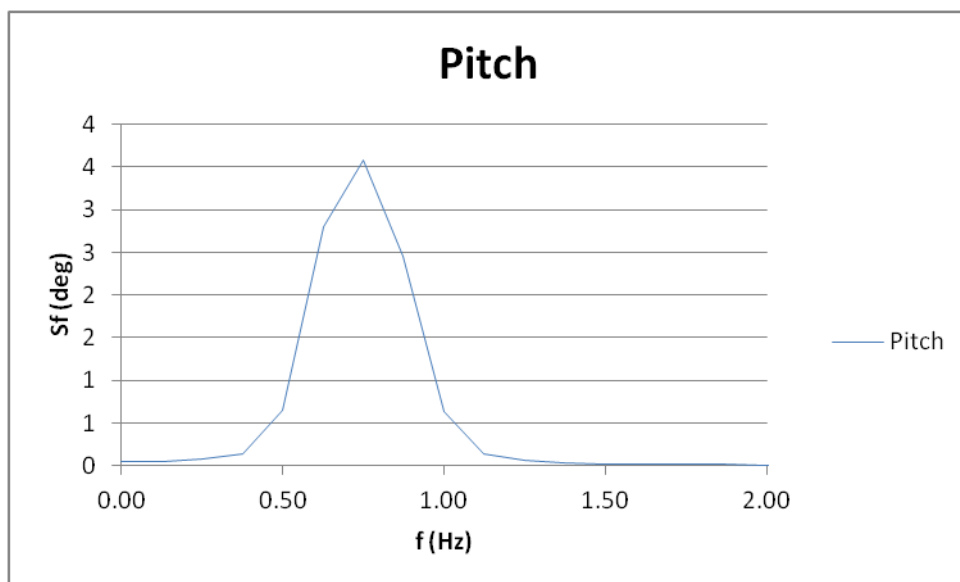
Διάγραμμα 6.1.1.1.3

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.856cm = 7.422cm$$

$$T_p = 1.6s$$

Για τον προνευτισμό :



Διάγραμμα 6.1.1.1.4

Η σημαντική τιμή του προνευτισμού και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$P_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.161cm = 4.644deg$$

$$T_p = 1.35s$$

6.1.1.I.iv. Μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε αρμονικούς κυματισμούς διαφορετικών υψών και συχνοτήτων.

Για τα ακόλουθα μεγέθη:

A) Αντίσταση σε ημιτονικούς κυματισμούς

B) Ανύψωση κύματος

Γ) Κατακόρυφη ανύψωση μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς

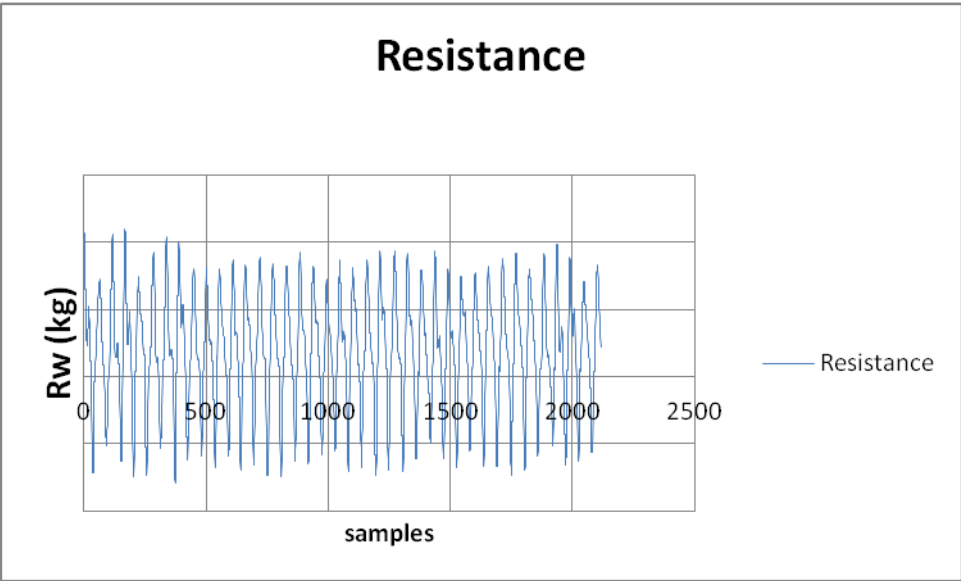
Δ) Προνευτασμός μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς

ελήφθησαν μετρήσεις για τις παρακάτω συχνότητες και πλάτη αρμονικών κυματισμών:

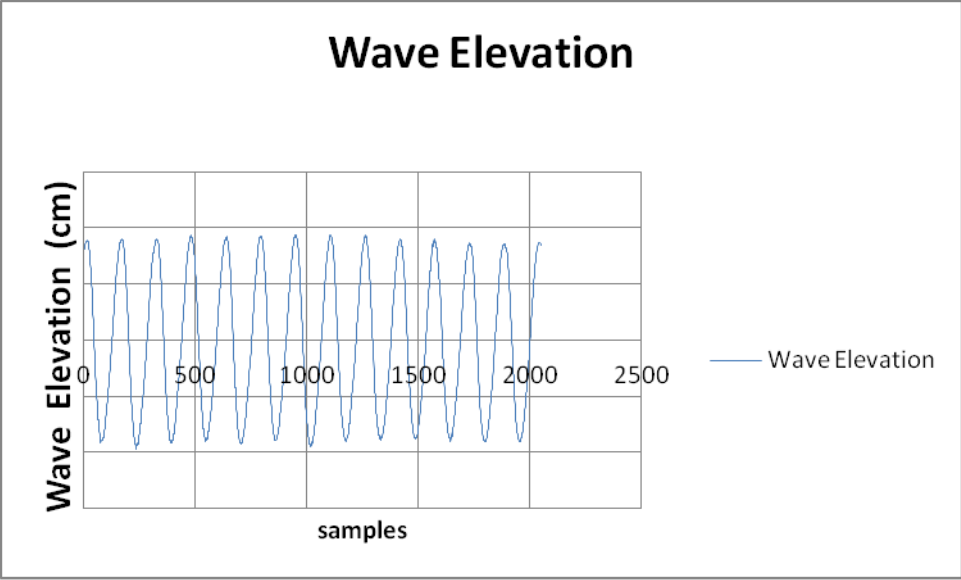
A/A	f (Hz)	A (cm)
1	0.4	10
2	0.5	5
3	0.5	8
4	0.6	5
5	0.6	8
6	0.7	6
7	0.7	5
8	0.8	5
9	0.9	5
10	0.9	4
11	1	3
12	1	5
13	1	7
14	1.1	2
15	1.1	5
16	1.2	2

Πίνακας 6.1.1.I.13

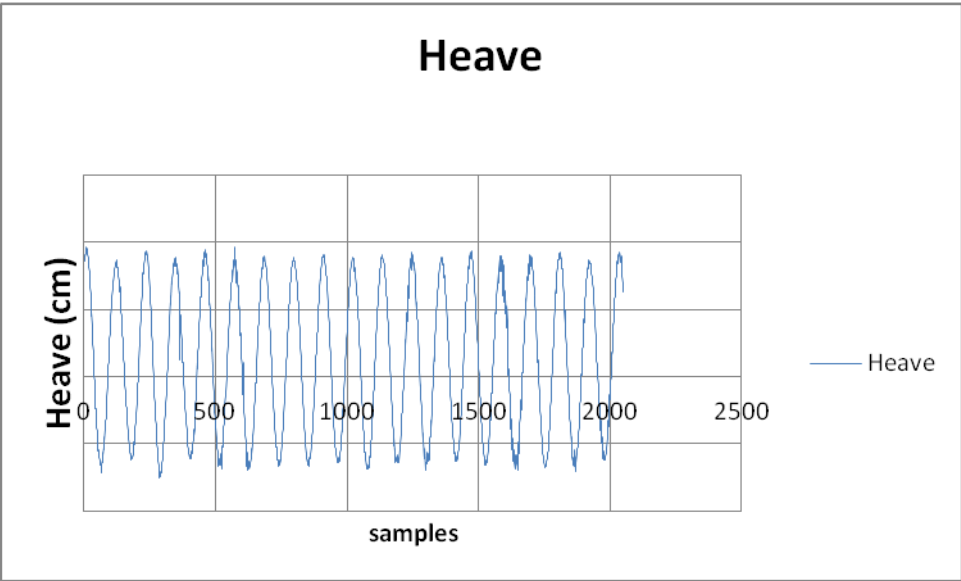
Τα διαγράμματα των μεγεθών αυτών ως προς το χρόνο, έχουν την παρακάτω μορφή:



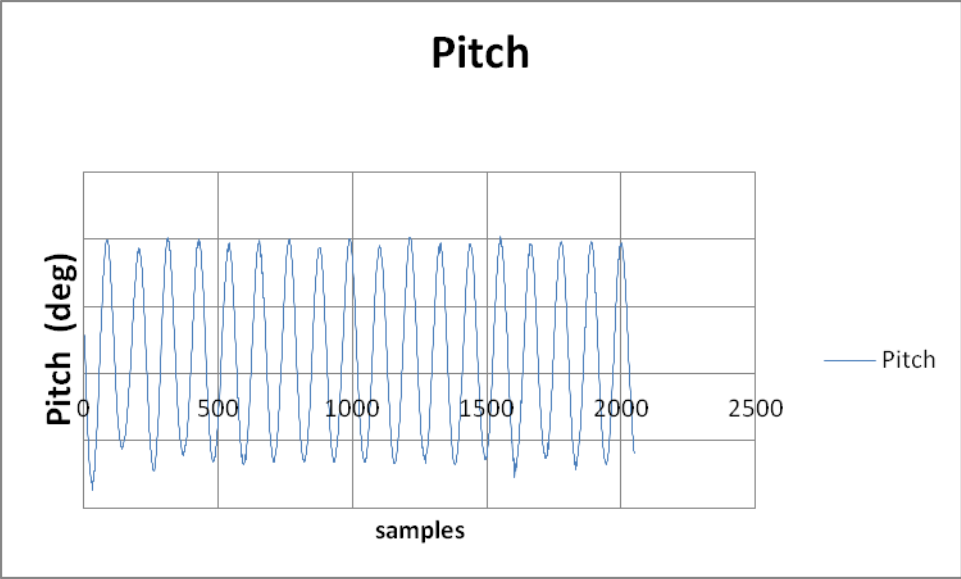
Διάγραμμα 6.1.1.1.5



Διάγραμμα 6.1.1.1.6



Διάγραμμα 6.1.1.1.7

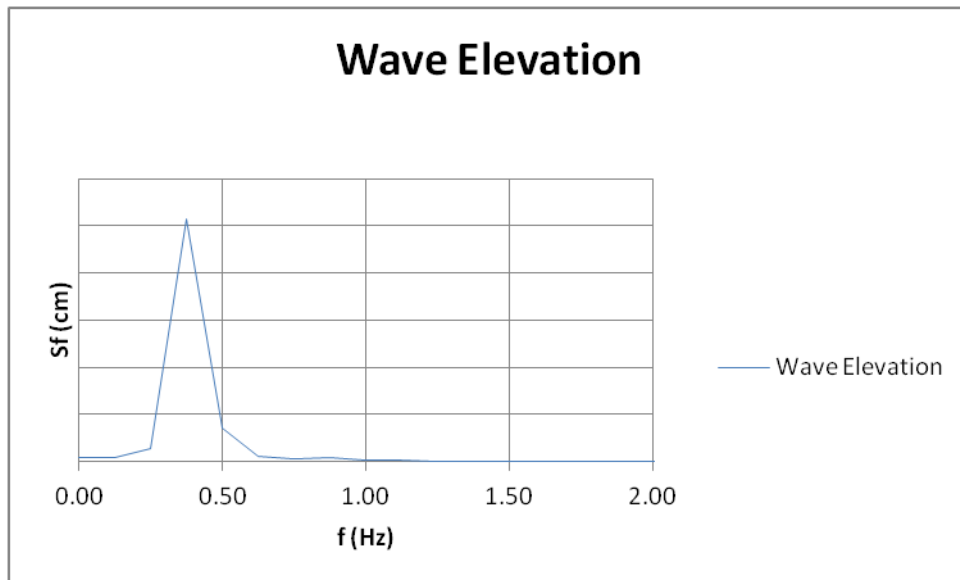


Διάγραμμα 6.1.1.1.8

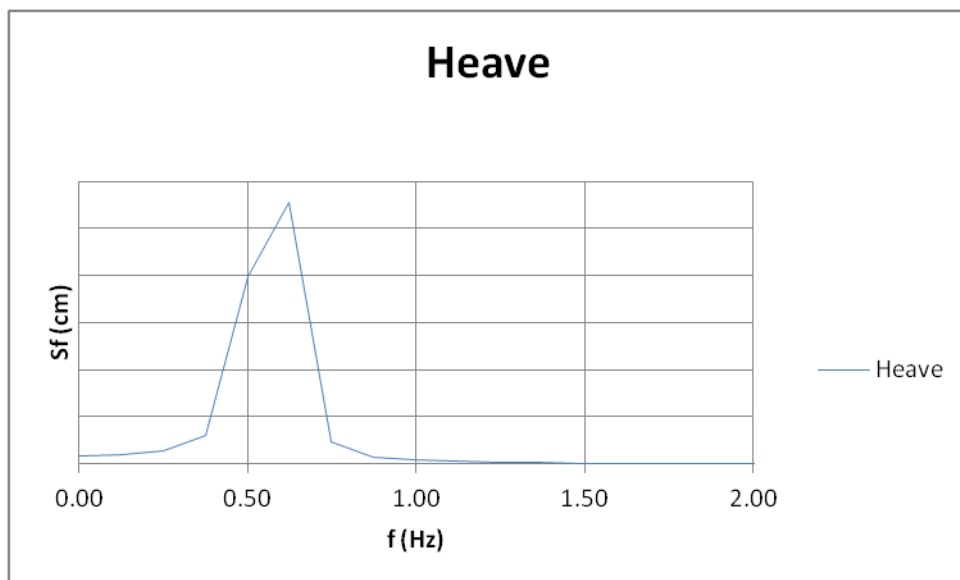
Τα σήματα των μετρήσεων που ελήφθησαν για :

- A) Ανύψωση κύματος
- B) Κατακόρυφη ανύψωση μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς
- Γ) Προνευτασμός μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς

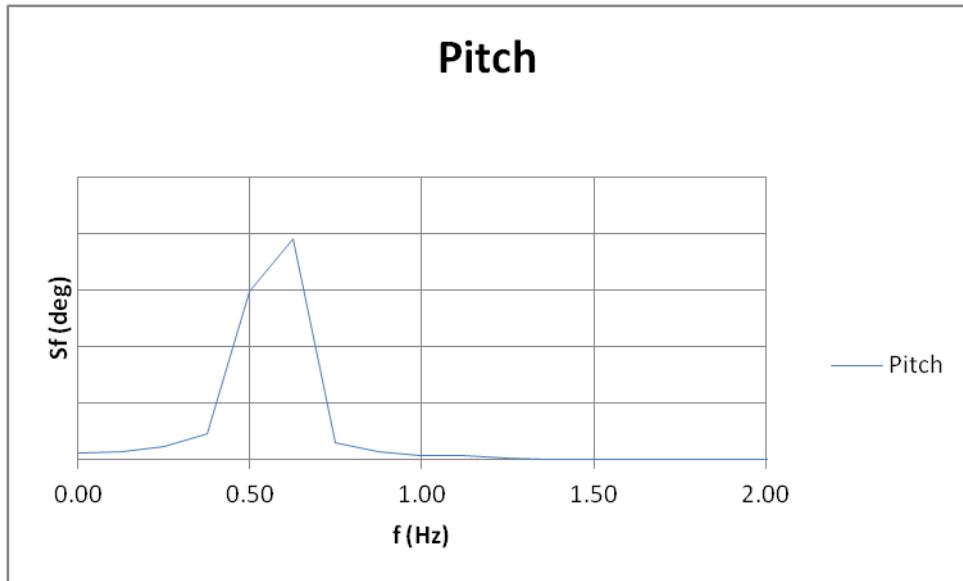
αναλύθηκαν με τη χρήση του αλγορίθμου Fast Fourier Transform (FFT).
Τα διαγράμματά τους έχουν την παρακάτω μορφή:



Διάγραμμα 6.1.1.1.9



Διάγραμμα 6.1.1.1.10



Διάγραμμα 6.1.1.1.11

Στον ακόλουθο πίνακα, παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν για την ανύψωση του κύματος και την αντίστοιχη συχνότητά του, καθώς επίσης, από τις σχέσεις (11) και (12) οι ποσοστιαίες αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές οι οποίες εισήχθησαν ως δεδομένα στον κυματιστήρα του εργαστηρίου:

A/A	f_{FFT} (Hz)	$f_{theor.}$ (Hz)	c %	A_{FFT} (cm)	$A_{theor.}$ (cm)	d %
1	0.37	0.4	-6.25	9.17	10	-8.26
2	0.50	0.5	0.00	4.65	5	-6.95
3	0.50	0.5	0.00	7.51	8	-6.12
4	0.63	0.6	4.17	4.81	5	-3.75
5	0.63	0.6	4.17	7.77	8	-2.88
6	0.75	0.7	7.14	6.04	6	0.59
7	0.75	0.7	7.14	4.98	5	-0.38
8	0.88	0.8	9.38	4.96	5	-0.72
9	0.88	0.9	-2.78	4.69	5	-6.26
10	0.88	0.9	-2.78	3.70	4	-7.54
11	1.00	1	0.00	2.74	3	-8.72
12	1.00	1	0.00	5.04	5	0.86
13	1.00	1	0.00	6.43	7	-8.09
14	1.12	1.1	2.27	1.85	2	-7.58
15	1.00	1.1	-9.09	5.04	5	0.86
16	1.25	1.2	4.17	1.63	2	-18.69

Πίνακας 6.1.1.1.14

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι σημαντικές τιμές της κατακόρυφης ανύψωσης και του προνευτασμού για τους ίδιους αρμονικούς κυματισμούς:

A/A	f_{heave} (Hz)	Heave (cm)	f_{pitch} (Hz)	Pitch (deg)
1	0.63	7.62	3.25	0.63
2	0.75	3.19	2.19	0.75
3	0.75	4.83	3.37	0.75
4	1.00	1.40	1.23	1.00
5	1.00	2.21	1.98	1.00
6	1.12	0.73	0.23	1.12
7	1.12	0.73	0.20	1.12
8	0.13	0.39	0.17	1.37
9	0.06	0.51	0.09	1.62
10	0.06	0.38	0.07	0.25
11	0.13	0.36	0.05	0.25
12	1.12	0.49	0.09	2.00
13	1.88	0.43	0.09	1.88
14	0.06	0.35	0.05	0.25
15	1.12	0.49	0.09	2.00
16	0.13	0.36	0.05	0.25

Πίνακας 6.1.1.1.15

Για τα προαναφερθέντα πλάτη και συχνότητες, υπολογίστηκε επίσης η αντίσταση στους αρμονικούς κυματισμούς, R_w , αλλά και η πρόσθετη αντίσταση R_{aw} , έχοντας αφαιρέσει την τιμή της αντίστασης από το ήρεμο νερό.

A/A	R_w (kg)	R_{aw} (kg)
1	3.568	0.472
2	4.064	0.968
3	5.407	2.311
4	4.506	1.410
5	6.544	3.448
6	4.054	0.958
7	3.825	0.729
8	3.767	0.671
9	3.727	0.631
10	3.545	0.449
11	3.376	0.280
12	3.897	0.801
13	4.244	1.148
14	3.271	0.175
15	3.991	0.895
16	3.275	0.179

Πίνακας 6.1.1.1.16

Γνωρίζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, $B=0.677\text{m}$ και $L_{pp}= 5.11 \text{ m}$, προκύπτει η παρακάτω αδιαστατοποίηση από τη σχέση (5):

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:

A/A	f (Hz)	A (cm)	Caw
1	0.4	10	0.610
2	0.5	5	4.862
3	0.5	8	4.455
4	0.6	5	6.624
5	0.6	8	6.213
6	0.7	6	2.861
7	0.7	5	3.194
8	0.8	5	2.961
9	0.9	5	3.122
10	0.9	4	3.572
11	1	3	4.055
12	1	5	3.424
13	1	7	3.015
14	1.1	2	5.573
15	1.1	5	3.829
16	1.2	2	7.381

Πίνακας 6.1.1.1.17

Για την ταχύτητα $v=1.461\text{m/s}$ και για το δεδομένο μήκος μοντέλου, βάσει των συχνοτήτων των εκάστοτε κυματισμών, υπολογίστηκε και το αντίστοιχο μήκος κύματος.

Οι τιμές τόσο του μήκους κύματος για κάθε συχνότητα, καθώς επίσης και αδιαστατοποιημένες ως προς το μήκος μοντέλου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

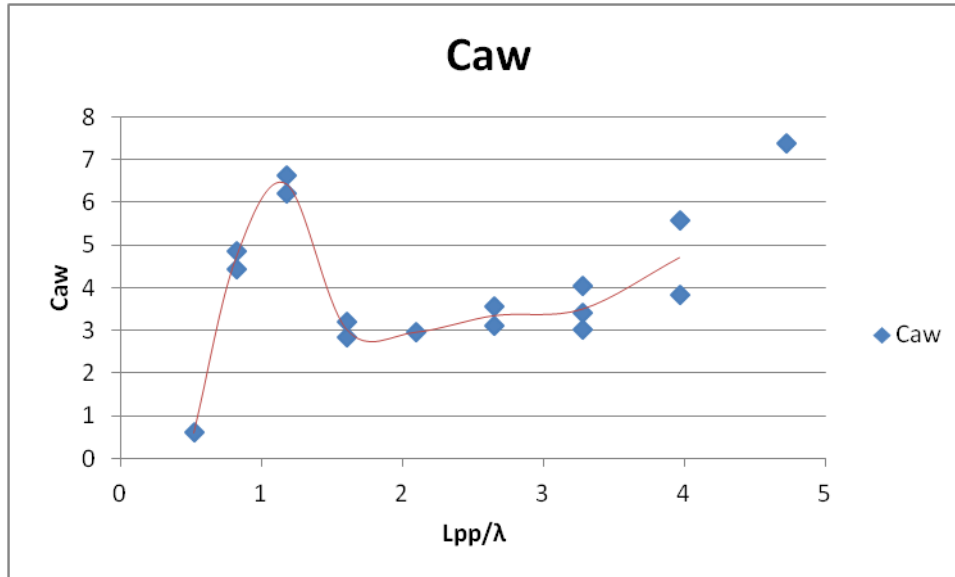
f (Hz)	λ (m)	L_{pp}/λ
0.3	17.342	0.295
0.4	9.755	0.524
0.5	6.243	0.819
0.6	4.335	1.179
0.7	3.185	1.604
0.8	2.439	2.095
0.9	1.927	2.652
1	1.561	3.274
1.1	1.290	3.962
1.2	1.084	4.715

Πίνακας 6.1.1.1.18

Τα ακόλουθα ζεύγη των αδιαστατοποιημένων τιμών απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα:

A/A	f (Hz)	A (cm)	Caw	Lpp/λ
1	0.4	10	0.610	0.524
2	0.5	5	4.862	0.819
3	0.5	8	4.455	0.819
4	0.6	5	6.624	1.179
5	0.6	8	6.213	1.179
6	0.7	6	2.861	1.604
7	0.7	5	3.194	1.604
8	0.8	5	2.961	2.095
9	0.9	5	3.122	2.652
10	0.9	4	3.572	2.652
11	1	3	4.055	3.274
12	1	5	3.424	3.274
13	1	7	3.015	3.274
14	1.1	2	5.573	3.962
15	1.1	5	3.829	3.962
16	1.2	2	7.381	4.715

Πίνακας 6.1.1.1.19



Διάγραμμα 6.1.1.1.12

6.1.1.I.v. Σύνθεση αντίστασης αρμονικών κυματισμών για τον υπολογισμό της αντίστασης σε φάσμα τυχαίου κυματισμού

Ο υπολογισμός του ζητούμενου μεγέθους γίνεται με χρήση της σχέσης (6).

$$R_{AW.cal.} = 2 \int_0^{\infty} S(w_e) \frac{R_{aw}(w_e)}{A^2} dw_e \quad (6)$$

Για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος γίνεται χρήση του κανόνα του τραπέζιου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Frequency	Period	Energy Spectrum	Energy Content	$\frac{R_{aw}}{\zeta^2}$	Raw
Hz	s	$m^2 \cdot s$	m^2	kg/m^2	kg
0.42	2.40	0.0025728	0.000118935	178.15	0.0212
0.46	2.16	0.0035479	0.000164012	315.08	0.0517
0.51	1.97	0.0036794	0.000170091	439.96	0.0748
0.55	1.80	0.0032955	0.000152344	499.87	0.0762
0.60	1.66	0.0027350	0.000126434	559.26	0.0707
0.65	1.55	0.0021835	0.000100939	535.2	0.0540
0.69	1.44	0.0017118	0.000079133	420.75	0.0333
0.74	1.35	0.0013332	0.000061631	303.52	0.0187
0.79	1.27	0.0010384	0.000048003	276.57	0.0133
0.83	1.20	0.0008118	0.000037526	274.3	0.0103
0.88	1.14	0.0006383	0.000029508	307.53	0.0091
0.92	1.08	0.0005054	0.000023365	303.11	0.0071
0.97	1.03	0.0004032	0.000018638	298.74	0.0056
1.02	0.98	0.0003241	0.000014981	319.16	0.0048
1.06	0.94	0.0002624	0.000012131	381.81	0.0046
1.11	0.90	0.0002140	0.000009895	445.9	0.0044

Πίνακας 6.1.1.I.20

Προκύπτει ότι:

$$I = \int_0^{\infty} S(w_e) \frac{R_{aw}(w_e)}{A^2} dw_e = 0.460kg$$

Άρα, $R_{AW.cal.} = 0.919kg$

Έχοντας υπολογίσει την πρόσθετη αντίσταση στο φάσμα Bretschneider ίση με :

$$R_{AWmeas.} = 0.914kg$$

Η ποσοστιαία απόκλιση των δύο τιμών με χρήση της σχέσης (13) είναι ίση με:

$$k = 0.64\%$$

6.1.1.I.vi. Μείωση της ταχύτητας του μοντέλου και μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5m$ και περίοδο $T=12s$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Πραγματοποιήθηκε πειραματικός προσδιορισμός της μείωσης της ταχύτητας του μοντέλου έτσι, ώστε να επιτευχθεί τιμή της αντίστασης ίσης με αυτής σε ήρεμο νερό, για φάσμα με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.

Για την ακριβή τιμή της νέας ταχύτητας, μετρήθηκε αρχικά η αντίσταση του μοντέλου το οποίο τοποθετήθηκε ακίνητο στη μέση της πειραματικής δεξαμενής υπό την επίδραση του φάσματος με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν.

Κατόπιν, προσεγγιστικά με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής, προσδιορίστηκε μια νέα ταχύτητα, μειωμένη από την αρχική ταχύτητα $v= 1.461$ m/s, για την οποία ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία.

Επαναλαμβάνοντας την ίδια προσεγγιστική διαδικασία, επιτεύχθηκε ο στόχος του προσδιορισμού της απαιτούμενης μειωμένης ταχύτητας από την αρχική έτσι, ώστε η τιμή της αντίστασης στο φάσμα να είναι περίπου ίδια με αυτή στο ήρεμο νερό. Η ταχύτητα αυτή είναι στα $v=1.336$ m/s .

Στον παρακάτω πίνακα περιλαμβάνονται συνολικά οι ακόλουθες οκτώ (8) μετρήσεις, όπως προέκυψαν από τη ρυμούλκηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή.

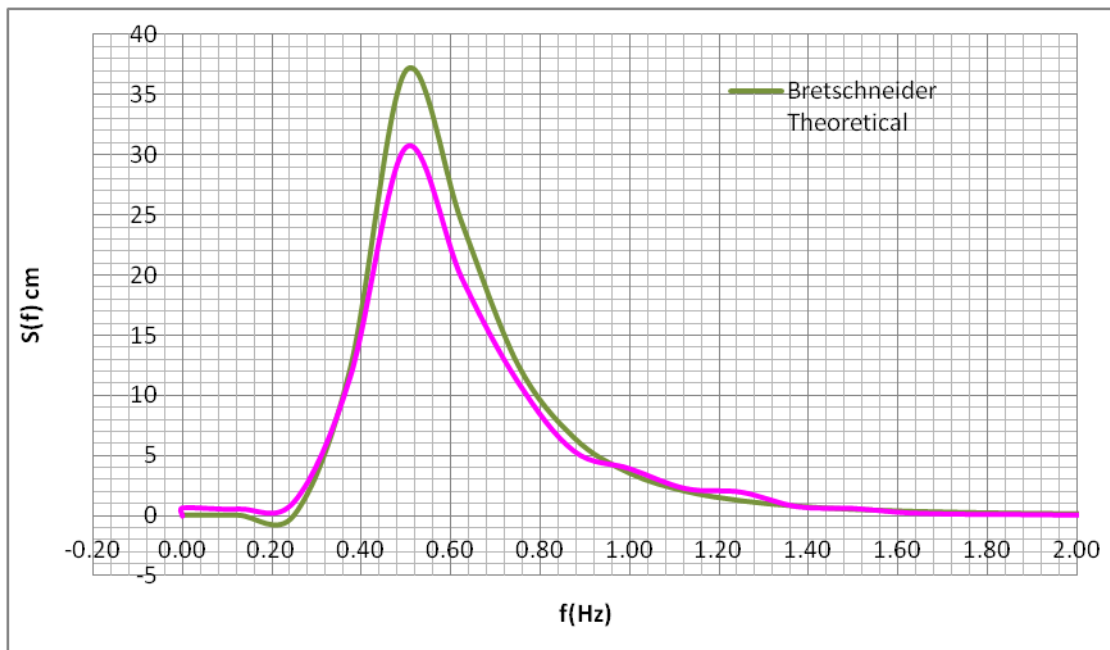
No of run	Rm (kg)
1	3.143
2	3.038
3	3.028
4	3.290
5	3.114
6	3.139
7	2.961
8	2.792
average	3.063

Πίνακας 6.1.1.I.21

Παρατηρούμε ότι η επιτευχθείσα τιμή της αντίστασης είναι : $R_w = 3.063kg$, η οποία είναι αρκετά κοντά στην τιμή της αντίστασης για το ήρεμο νερό $R_{sw} = 3.096kg$, για ταχύτητα $v=1.461m/s$.

Για λόγους πληρότητας, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform), παρατίθενται τα διαγράμματα από την ανάλυση των σημάτων, της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού (wave elevation), της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch), με τις σημαντικές τιμές τους.

Για την ανύψωση του κύματος (wave elevation) :



Διάγραμμα 6.1.1.1.13

Η σημαντική τιμή του ύψους κύματος και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 3.381 \text{ cm} = 13.52 \text{ cm}$$

$$T_p = 2.00 \text{ s}$$

Οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές είναι:

$$H_{s.theor.} = 14.29 \text{ cm}$$

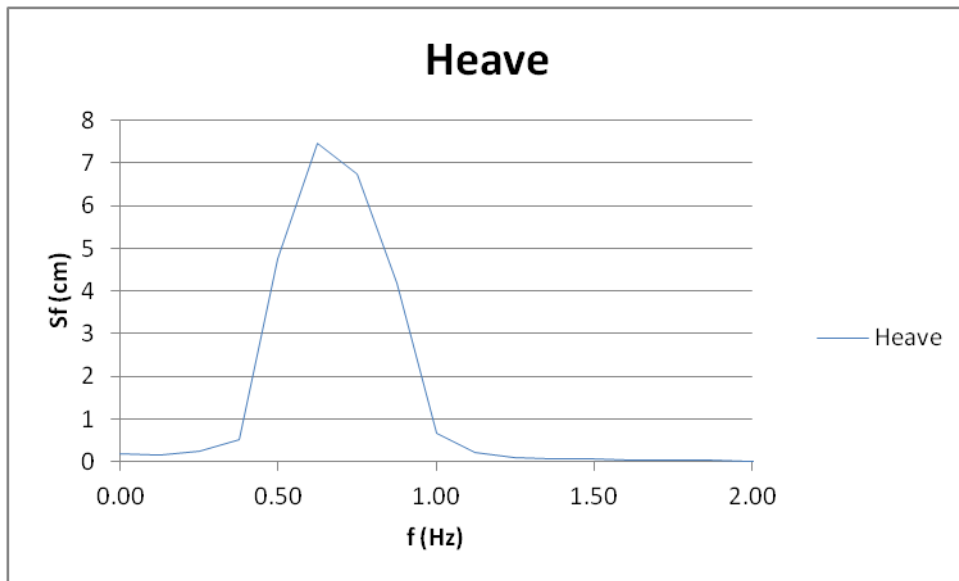
$$T_{p.theor.} = 2.03 \text{ s}$$

Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των θεωρητικών μεγεθών υπολογίζονται από τις σχέσεις (9) και (10):

$$a = -5.39\%$$

$$b = -1.48\%$$

Για την κατακόρυφη ανύψωση:



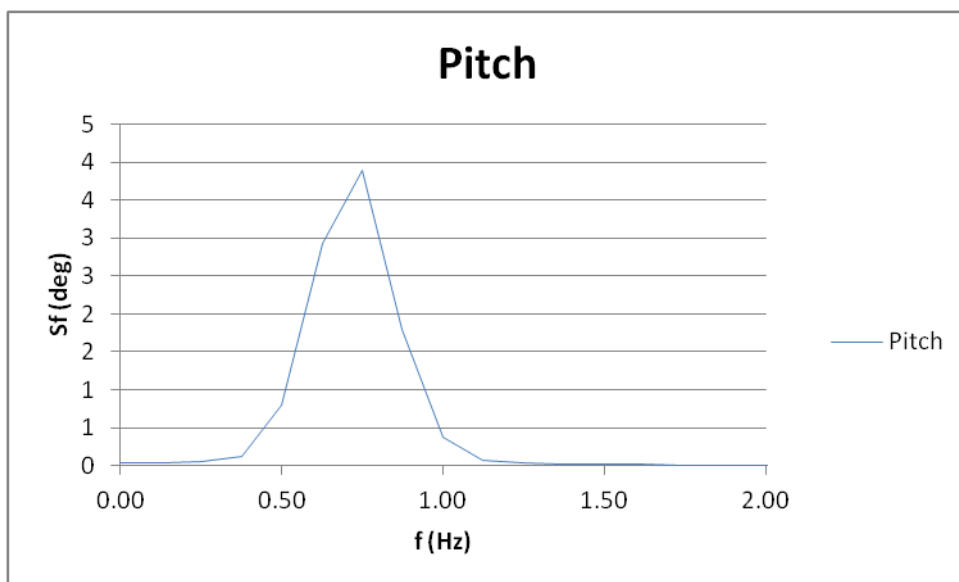
Διάγραμμα 6.1.1.1.14

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.800\text{cm} = 7.201\text{cm}$$

$$T_p = 1.6\text{s}$$

Για τον προνευτισμό :



Διάγραμμα 6.1.1.1.15

Η σημαντική τιμή του προνευτισμού και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$P_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.133\text{cm} = 4.531\text{cm}$$

$$T_p = 1.33\text{s}$$

6.1.1.II. Έμπρυμνη διαγωγή 0.5 μοιρών (trim 0.5 angle by stern)

6.1.1.II.i. Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό

Ο προσδιορισμός της τιμής της αντίστασης σε ήρεμο νερό, για συγκεκριμένη ταχύτητα, αποτελεί το πρώτο στάδιο για την εκτίμηση του ποσοστού της πρόσθετης αντίστασης παρουσία κυματισμών.

Η τιμή της αντίστασης για το ήρεμο νερό σε ταχύτητα $v=1.231$ m/s είναι η ακόλουθη:
 $R_{sw} = 2.063kg$

6.1.1.II.ii. Μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5m$ και περίοδο $T=12s$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Στην ταχύτητα υπηρεσίας, $v=1.231$ m/s, μετρήθηκε η αντίσταση του μοντέλου σε φάσμα κυματισμών με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν.

Υπολογίζοντας την αντίσταση του μοντέλου για χρονική ιστορία του φάσματος τυχαίου κυματισμού ίση με 300s, είναι πλέον εφικτό να υπολογισθεί και το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασής του, συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή της αντίστασης σε ήρεμο νερό.

Για τον υπολογισμό αυτό, ελήφθησαν συνολικά οι ακόλουθες εννέα (9) μετρήσεις, όπως προέκυψαν από τη ρυμούλκηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή.

No of run	Rm (kg)
1	2.620
2	2.520
3	2.475
4	2.826
5	3.037
6	2.729
7	2.926
8	3.028
9	2.935
average	2.788

Πίνακας 6.1.1.II.1

Η τιμή της αντίστασης σε τυχαίο κυματισμό είναι η ακόλουθη : $R_w = 2.788kg$

Από τη σχέση (4) υπολογίζεται ότι η τιμή της πρόσθετης αντίστασης είναι ίση με:

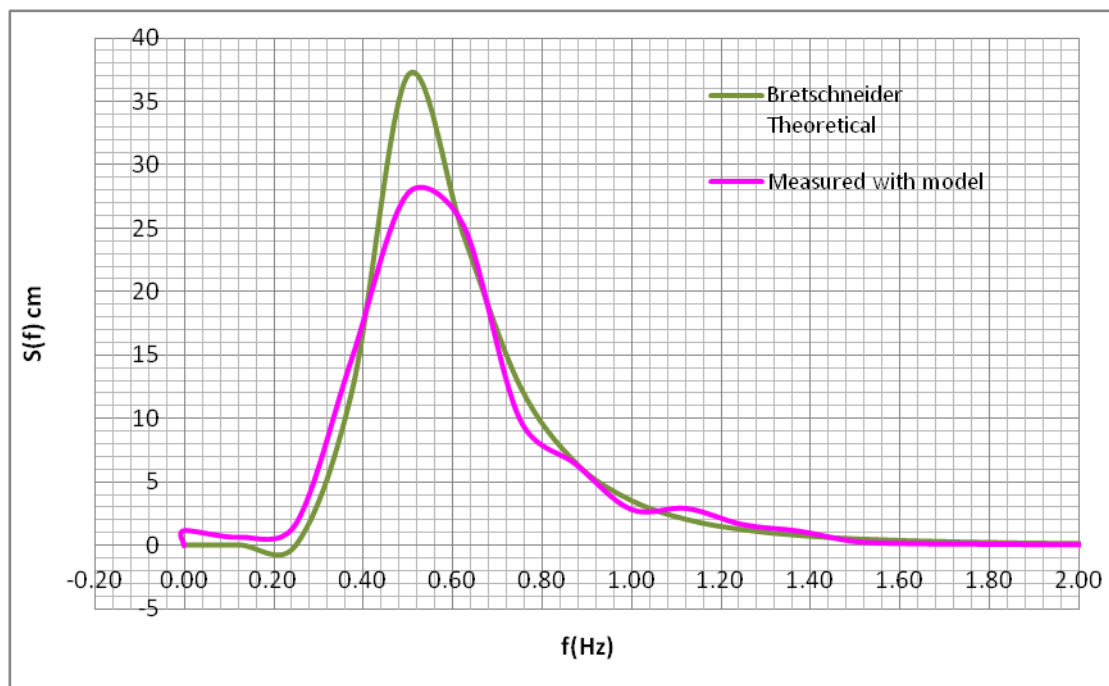
$$R_{aw} = 0.725kg$$

Το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμό επί της αντίστοιχης σε ήρεμο νερό υπολογίζεται ως εξής:

$$\lambda = 35.15\%$$

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform) για την ανάλυση των σημάτων της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού (wave elevation), της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch), λαμβάνονται τα ακόλουθα διαγράμματα με τις σημαντικές τιμές τους.

Για την ανύψωση του κύματος (wave elevation) :



Διάγραμμα 6.1.1.II.1

Η σημαντική τιμή του ύψους κύματος και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 3.485 \text{ cm} = 13.94 \text{ cm}$$

$$T_p = 2.00 \text{ s}$$

Οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές είναι:

$$H_{s.theor.} = 14.29 \text{ cm}$$

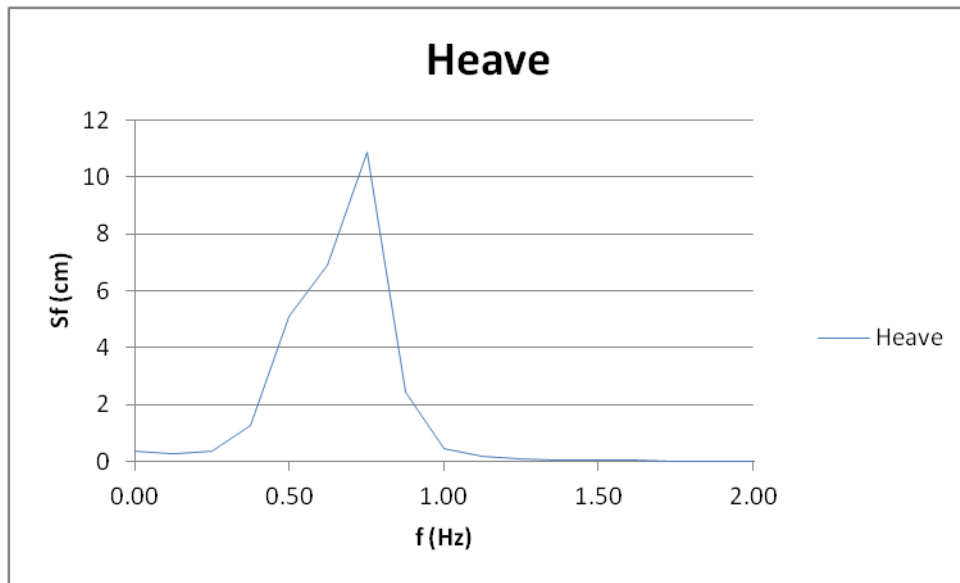
$$T_{p.theor.} = 2.03 \text{ s}$$

Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των θεωρητικών μεγεθών υπολογίζονται από τις σχέσεις (9) και (10):

$$a = -2.45\%$$

$$b = -1.48\%$$

Για την κατακόρυφη ανύψωση :



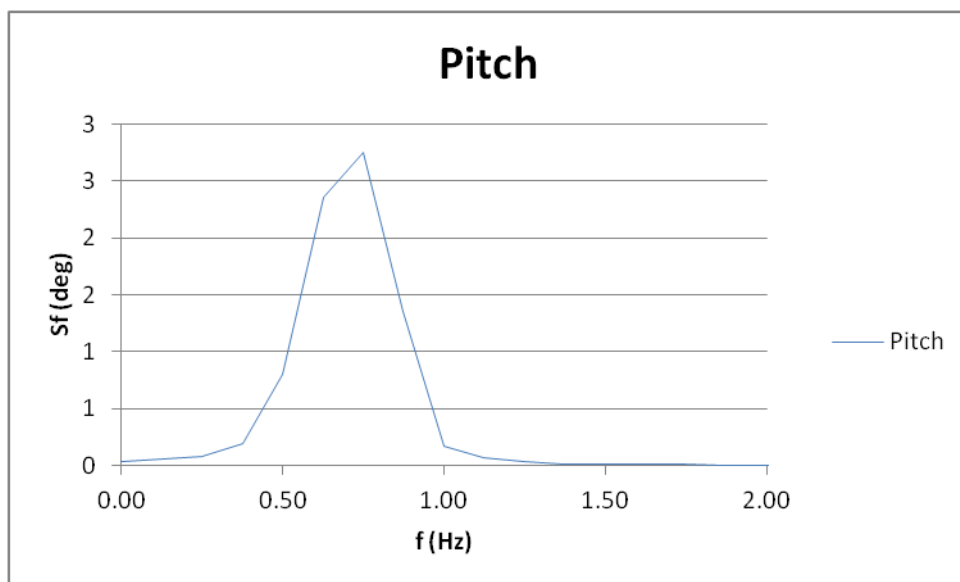
Διάγραμμα 6.1.1.II.2

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.893cm = 7.57cm$$

$$T_p = 1.33s$$

Για τον προνευτασμό :



Διάγραμμα 6.1.1.II.3

Η σημαντική τιμή του προνευτασμού και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$P_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.000cm = 4.00cm$$

$$T_p = 1.33s$$

6.1.1.III. Συμπεράσματα

- Για την ισοβύθιστη κατάσταση δοκιμών:
 - ✓ Οι τιμές της μετρούμενης αντίστασης σε ήρεμο νερό για τις ίδιες ταχύτητες, με χρήση του νέου δυναμομέτρου είναι αυξημένες από 0.30% έως 15.31% συγκριτικά με τις αντίστοιχες που μετρήθηκαν με το παλαιό δυναμόμετρο.
 - ✓ Παρατηρείται ένα εύρος αποκλίσεων στις μετρήσεις της αντίστασης με το παλαιό και το νέο δυναμόμετρο. Το πλήθος των μετρήσεων που ελήφθησαν για κάθε ταχύτητα για τη διαπίστωση της επαναληψιμότητας είναι διαφορετικό. Παρατηρείται ότι η ποσοστιαία απόκλιση στην ταχύτητα δοκιμών είναι μικρή.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.461$ m/s, η αντίσταση σε φάσμα τυχαίων κυματισμών αυξάνεται κατά 29.51% σε σύγκριση με την αντίσταση σε ήρεμο νερό.
 - ✓ Στις ίδιες συχνότητες, η τιμή του αδιάστατου συντελεστή C_{aw} παραμένει σχεδόν σταθερή, όπως αναμενόταν.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.461$ m/s, συνθέτοντας τις μετρούμενες τιμές της αντίστασης σε αρμονικούς κυματισμούς με τη χρήση του συντελεστή πρόσθετης αντίστασης εκτιμάται η τιμή της αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς μεγαλύτερη κατά 0.64% από τη μετρούμενη στο φάσμα τυχαίων κυματισμών.
 - ✓ Για να επιτευχθεί η ίδια τιμή της αντίστασης με το ήρεμο νερό, μειώνεται η ταχύτητα του προτύπου κατά 8.56% κατά τη μέτρηση της αντίστασης σε φάσμα τυχαίων κυματισμών.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.461$ m/s, η μετρούμενη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος είναι κατά 2.52% μεγαλύτερη από τη θεωρητική ενώ η μετρούμενη φαινόμενη περίοδος είναι κατά 1.48% μικρότερη από τη θεωρητική.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.336$ m/s, η μετρούμενη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος είναι κατά 5.39% μικρότερη από τη θεωρητική ενώ η μετρούμενη φαινόμενη περίοδος είναι κατά 1.48% μικρότερη από τη θεωρητική.

- Για την κατάσταση δοκιμών έμπυρμνης διαγωγής 0.5 μοιρών:
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.231$ m/s , η αντίσταση σε φάσμα τυχαίων κυματισμών αυξάνεται κατά 35.13% σε σύγκριση με την αντίσταση σε ήρεμο νερό.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.231$ m/s , η μετρούμενη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος είναι κατά 2.45% μικρότερη από τη θεωρητική ενώ η μετρούμενη φαινόμενη περίοδος είναι κατά 1.48% μικρότερη από τη θεωρητική.

- Γενικά σχόλια:
 - ✓ Για τις μετρούμενες και τις θεωρητικές τιμές των φασμάτων παρατηρούνται αποκλίσεις, οι οποίες ενδέχεται να οφείλονται στο μέγεθος της χρονικής ιστορίας που ελήφθησαν οι μετρήσεις.
 - ✓ Οι αποκλίσεις στις τιμές της αντίστασης μεταξύ του παλαιού και του νέου δυναμομέτρου οφείλονται στην ακρίβεια του αισθητήρα που χρησιμοποιείται για το νέο δυναμόμετρο.

6.1.2.ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ T=0.290m

Χαρακτηριστικά μοντέλου	Σύμβολο		Καταστάσεις δοκιμών	
			1	2
Μήκος ισάλου	L_{WL}	m	5.237	5.352
Μήκος με βολβό	L_{BULB}	m	5.362	5.364
Πλάτος ισάλου	B_{WL}	m	0.677	0.677
Μέσο βύθισμα	T_m	m	0.290	0.290
Trim	t	deg	0.000	-0.005
Εκτόπισμα	Δ	kg	846	846
Βρεχόμενη επιφάνεια	W.S.	m^2	5.620	5.634
Συντελεστής γάστρας	C_B		0.82	0.82

6.1.2.I. Ισοβύθιστη κατάσταση (even keel)

6.1.2.I.i. Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό για τις ακόλουθες ταχύτητες:

- i) $v=0.516$ m/s
- ii) $v=0.774$ m/s
- iii) $v=0.945$ m/s
- iv) $v=1.117$ m/s
- v) $v=1.203$ m/s
- vi) $v=1.289$ m/s

Ειδικότερα, στην ταχύτητα $v= 1.289$ m/s ελήφθησαν περισσότερες από μία μετρήσεις προκειμένου να πιστοποιηθεί η επαναληψιμότητά τους.

Ο προσδιορισμός της τιμής της αντίστασης σε ήρεμο νερό, για συγκεκριμένη ταχύτητα, αποτελεί το πρώτο στάδιο για την εκτίμηση του ποσοστού της πρόσθετης αντίστασης, παρουσία κυματισμών.

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα των τιμών της αντίστασης για την ταχύτητα $v=1.289$ m/s είναι τα εξής:

No of run	Rm (kg)
1	2.472
2	2.503
3	2.453
4	2.491
5	2.487
average	2.481

Πίνακας 6.1.2.1.1

Η τιμή, λοιπόν, της αντίστασης για το ήρεμο νερό είναι η ακόλουθη: $R_{sw} = 2.4811kg$

Οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης για τις προαναφερθείσες ταχύτητες δοκιμών είναι οι ακόλουθες:

v (m/s)	Rm (kg)
0.516	0.410
0.774	0.862
0.945	1.244
1.117	1.718
1.203	2.030
1.289	2.481

Πίνακας 6.1.2.1.2

Για το συγκεκριμένο μοντέλο, στην αντίστοιχη κατάσταση φόρτωσης παρατίθενται και οι τιμές της αντίστασης στις ίδιες ταχύτητες, οι οποίες ελήφθησαν χρησιμοποιώντας

παλαιότερο δυναμόμετρο του εργαστηρίου, προκειμένου να ελεγχθεί η σύγκλισή τους.

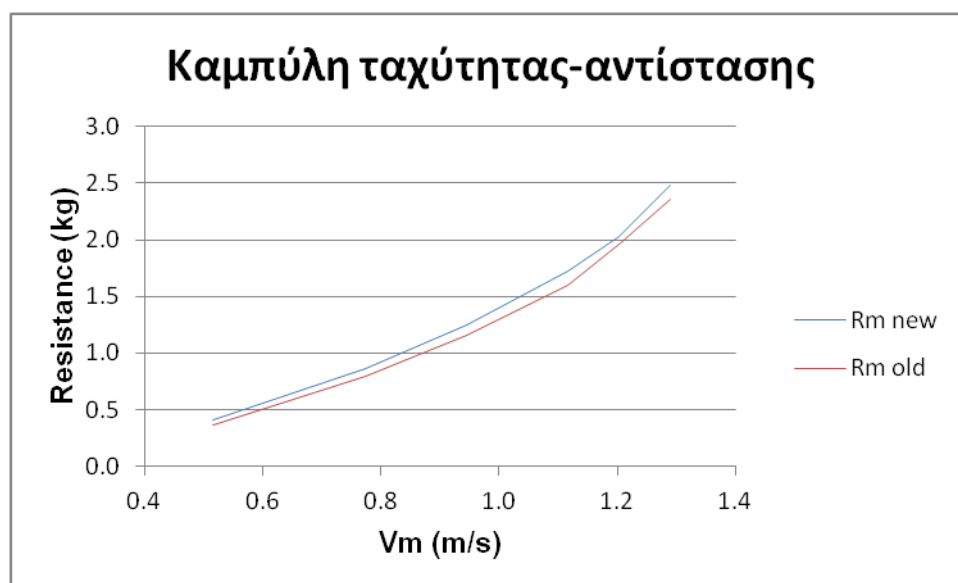
Στον παρακάτω πίνακα, οι τιμές R_m new αφορούν στην αντίσταση όπως μετρήθηκε με το νέο δυναμόμετρο και οι αντίστοιχες τιμές R_m old αφορούν στην αντίσταση όπως μετρήθηκε με το παλαιό δυναμόμετρο.

Παράλληλα, σε κάθε ταχύτητα, παρατίθεται η απόκλιση των μετρήσεων μεταξύ του παλαιού και του νέου δυναμομέτρου, χρησιμοποιώντας τη σχέση (8).

v (m/s)	R_m new (kg)	R_m old (kg)	δ (%)
0.516	0.410	0.36	13.89
0.774	0.862	0.793	8.74
0.945	1.244	1.156	7.60
1.117	1.718	1.597	7.60
1.203	2.030	1.965	3.30
1.289	2.481	2.354	5.40

Πίνακας 6.1.2.1.3

Οι ανωτέρω τιμές απεικονίζονται σχηματικά στο επόμενο διάγραμμα:



Διάγραμμα 6.1.2.1.1

6.1.2.1.ii. Μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5m$ και περίοδο $T=12s$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Στην ταχύτητα υπηρεσίας, $v=1.289$ m/s, μετρήθηκε η αντίσταση του μοντέλου σε φάσμα κυματισμών με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν.

Υπολογίζοντας την αντίσταση του μοντέλου για χρονική ιστορία του φάσματος τυχαίου κυματισμού ίση με 300s, είναι πλέον εφικτό να υπολογισθεί και το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασής του, συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή της αντίστασης σε ήρεμο νερό.

Για τον υπολογισμό αυτό, ελήφθησαν συνολικά οι ακόλουθες οκτώ (8) μετρήσεις, όπως προέκυψαν από τη ρυμούλκηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή.

No of run	Rm (kg)
1	3.300
2	3.154
3	3.267
4	3.438
5	3.412
6	3.384
7	3.195
8	3.171
average	3.290

Πίνακας 6.1.2.1.4

Η τιμή της αντίστασης σε τυχαίο κυματισμό είναι η ακόλουθη : $R_w = 3.290$

Από τη σχέση (4) υπολογίζεται ότι η τιμή της πρόσθετης αντίστασης είναι ίση με:

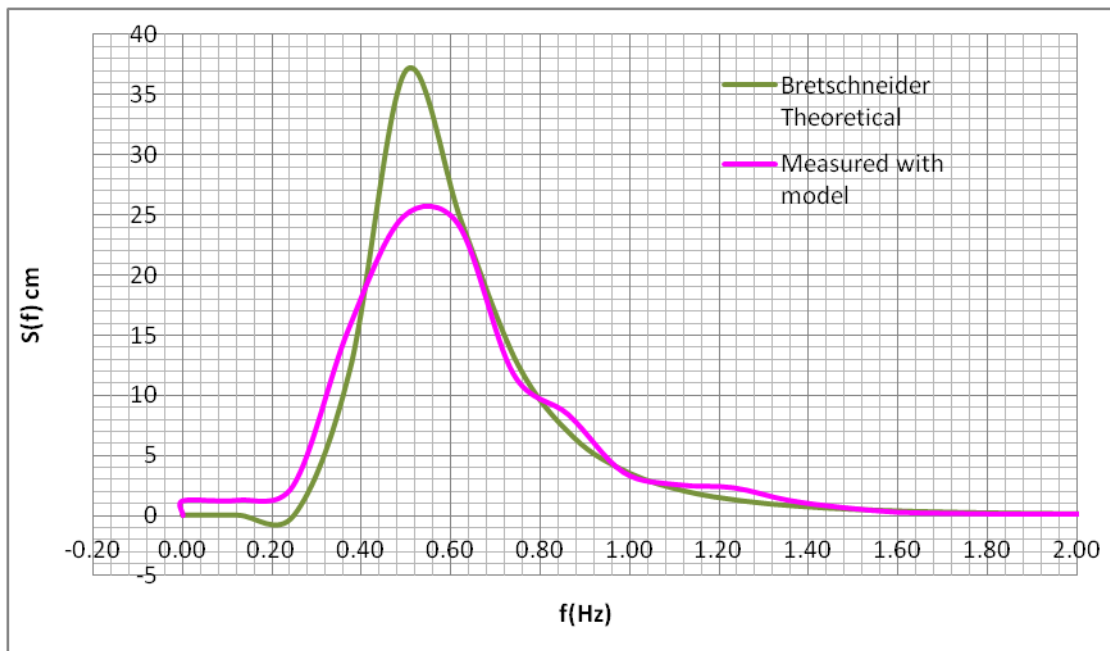
$$R_{aw} = 0.809kg$$

Το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμό επί της αντίστοιχης σε ήρεμο νερό υπολογίζεται από τη σχέση (7):

$$\lambda = 32.61\%$$

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform) για την ανάλυση των σημάτων της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού (wave elevation), της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch), λαμβάνονται τα ακόλουθα διαγράμματα με τις σημαντικές τιμές τους.

Για την ανύψωση του κύματος (wave elevation) :



Διάγραμμα 6.1.2.1.2

Η σημαντική τιμή του ύψους κύματος και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 3.527 \text{ cm} = 14.11 \text{ cm}$$

$$T_p = 2.03 \text{ s}$$

Οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές είναι:

$$H_{s.theor.} = 14.29 \text{ cm}$$

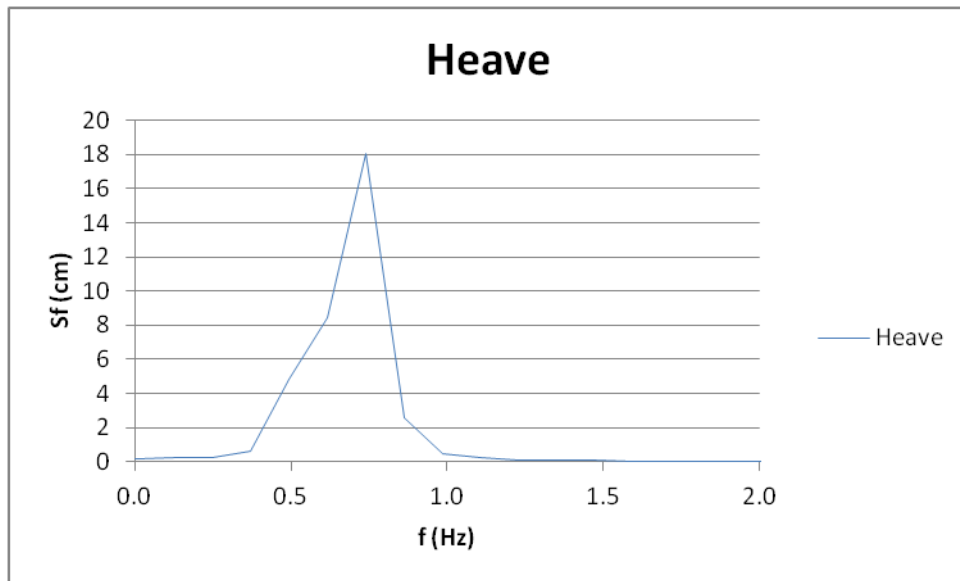
$$T_{p.theor.} = 2.03 \text{ s}$$

Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των θεωρητικών μεγεθών υπολογίζονται από τις σχέσεις (9) και (10):

$$a = -1.26\%$$

$$b = 0\%$$

Για την κατακόρυφη ανύψωση :



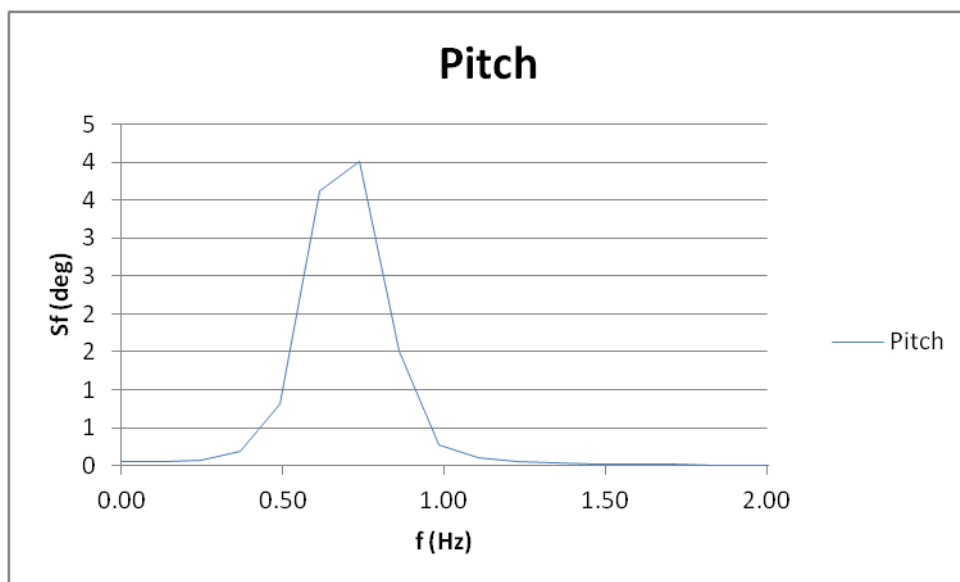
Διάγραμμα 6.1.2.1.3

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 2.121cm = 8.484cm$$

$$T_p = 1.35s$$

Για τον προνευτισμό :



Διάγραμμα 6.1.2.1.4

Η σημαντική τιμή του προνευτισμού και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$P_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.161cm = 4.643deg$$

$$T_p = 1.35s$$

6.1.2.1.iii. Μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε αρμονικούς κυματισμούς διαφορετικών υψών και συχνοτήτων.

Για τα ακόλουθα μεγέθη:

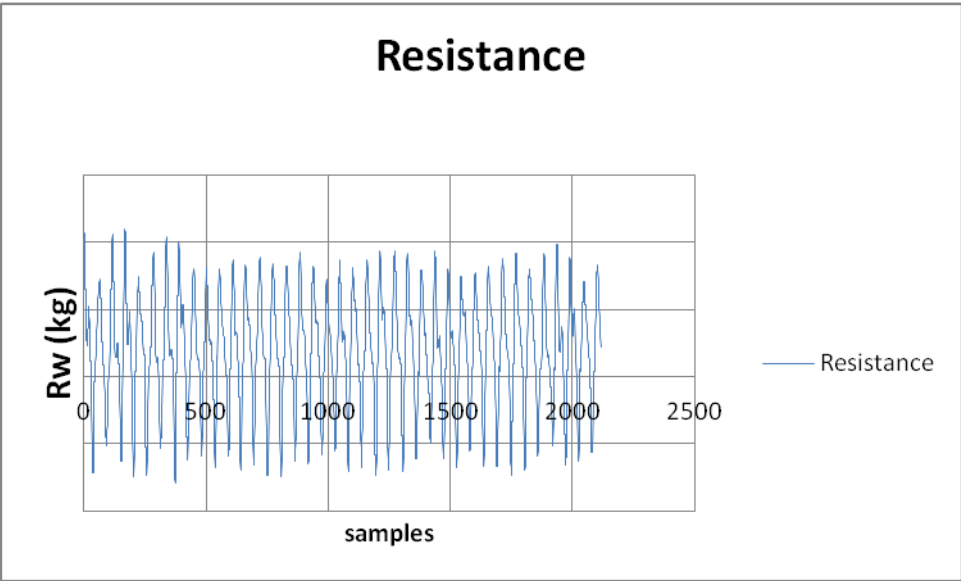
- A) Αντίσταση σε ημιτονικούς κυματισμούς
- B) Ανύψωση κύματος
- Γ) Κατακόρυφη ανύψωση μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς
- Δ) Προνευτασμός μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς

ελήφθησαν μετρήσεις για τις παρακάτω συχνότητες και πλάτη αρμονικών κυματισμών:

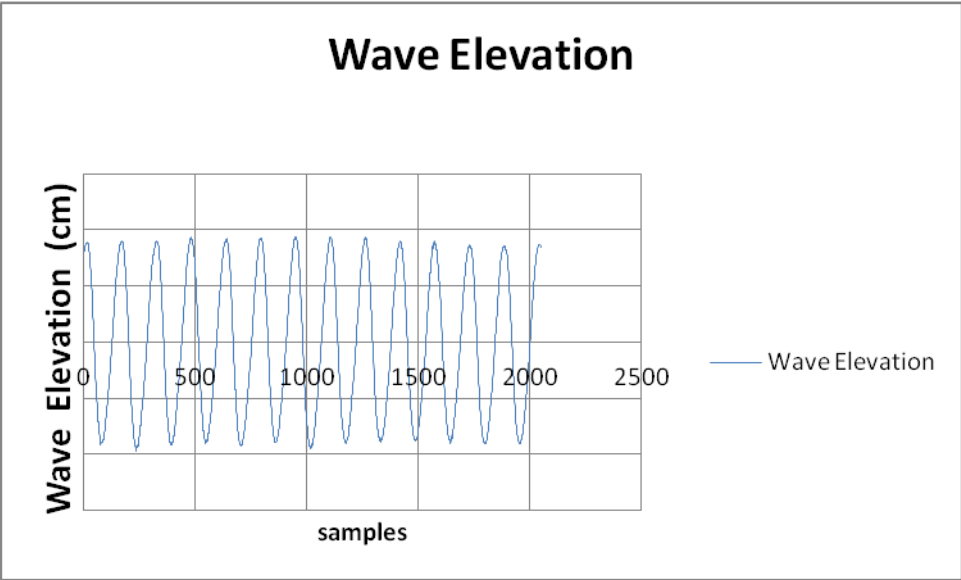
A/A	f (Hz)	A (cm)
1	0.3	5
2	0.3	8
3	0.4	5
4	0.4	10
5	0.6	5
6	0.6	8
7	0.7	5
8	0.7	6
9	0.5	5
10	0.8	5
11	0.9	4
12	0.9	5
13	1	2
14	1	5
15	1.1	2
16	1.1	5
17	1.2	2

Πίνακας 6.1.2.1.5

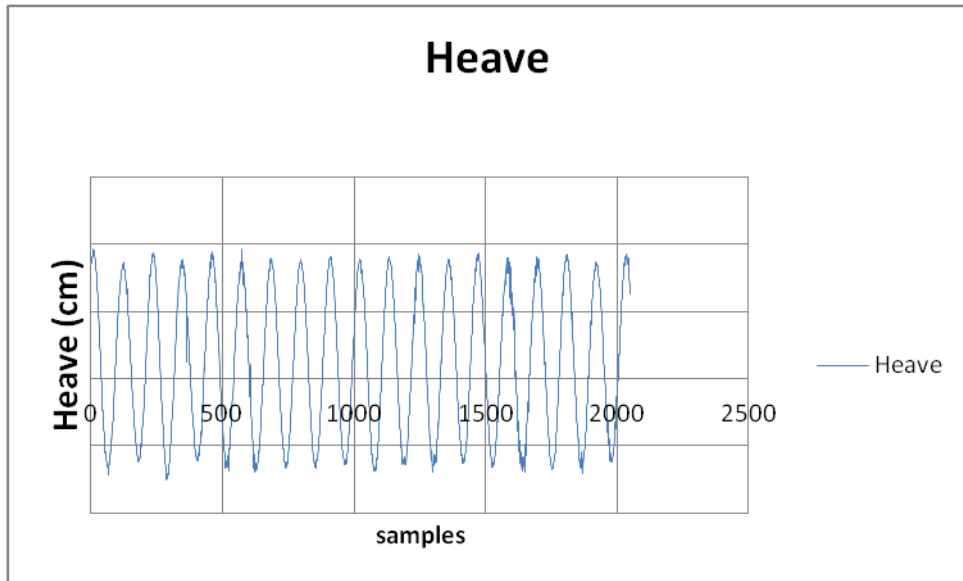
Τα διαγράμματα των μεγεθών αυτών ως προς το χρόνο, έχουν την παρακάτω μορφή:



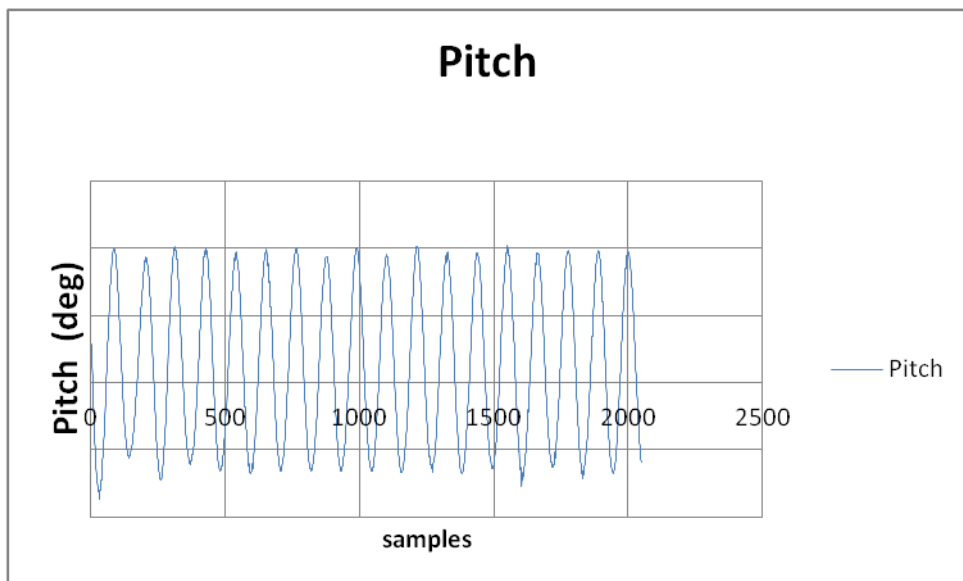
Διάγραμμα 6.1.2.1.5



Διάγραμμα 6.1.2.1.6



Διάγραμμα 6.1.2.1.7



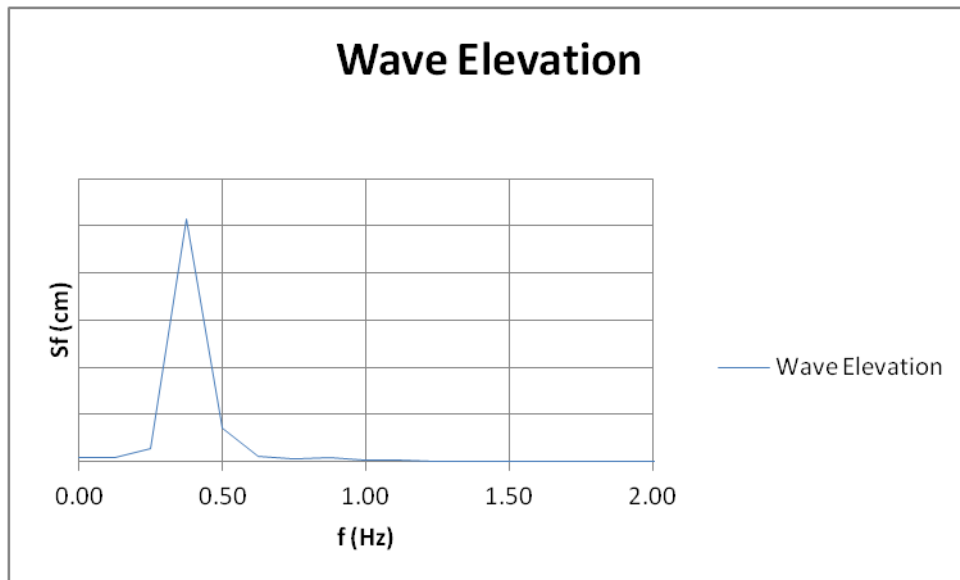
Διάγραμμα 6.1.2.1.8

Τα σήματα των μετρήσεων που ελήφθησαν για :

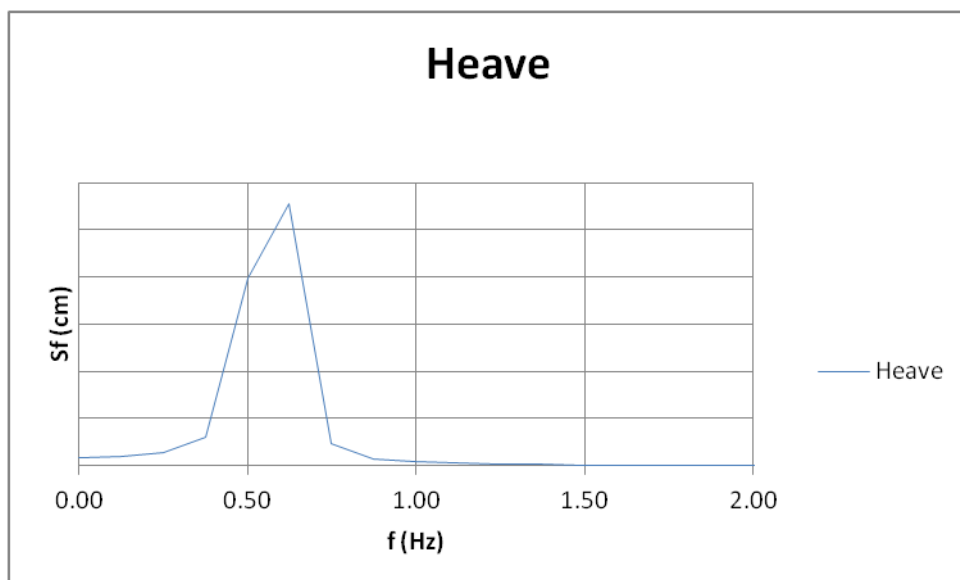
- A) Ανύψωση κύματος
- B) Κατακόρυφη ανύψωση μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς
- Γ) Πρηνευτασμός μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς

αναλύθηκαν με τη χρήση του αλγορίθμου Fast Fourier Transform (FFT).

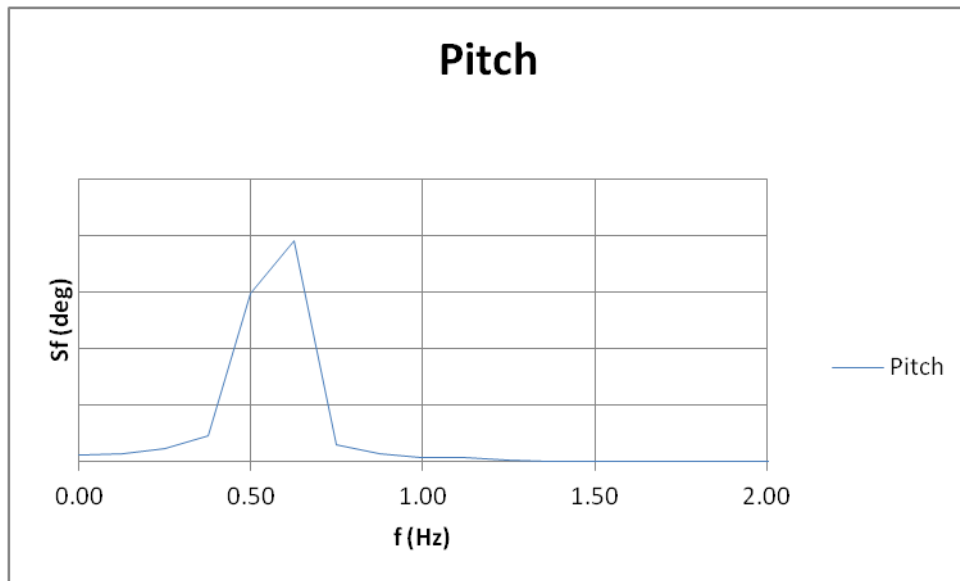
Τα διαγράμματά τους έχουν την παρακάτω μορφή:



Διάγραμμα 6.1.2.1.9



Διάγραμμα 6.1.2.1.10



Διάγραμμα 6.1.2.1.11

Στον ακόλουθο πίνακα, παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν για την ανύψωση του κύματος και την αντίστοιχη συχνότητά του, καθώς επίσης, από τις σχέσεις (11) και (12) οι ποσοστιαίες αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές οι οποίες εισήχθησαν ως δεδομένα στον κυματιστήρα του εργαστηρίου:

A/A	f_{FFT} (Hz)	$f_{theor.}$ (Hz)	c %	A_{FFT} (cm)	$A_{theor.}$ (cm)	d %
1	0.25	0.3	-16.67	5.06	5	1.12
2	0.25	0.3	-16.67	7.78	8	-2.74
3	0.37	0.4	-6.25	4.88	5	-2.41
4	0.37	0.4	-6.25	9.46	10	-5.43
5	0.63	0.6	4.17	5.10	5	1.95
6	0.63	0.6	4.17	7.74	8	-3.27
7	0.75	0.7	7.14	5.03	5	0.55
8	0.75	0.7	7.14	6.06	6	0.98
9	0.50	0.5	0.00	4.71	5	-5.75
10	0.86	0.8	7.67	4.81	5	-3.78
11	0.86	0.9	-4.30	3.53	4	-11.66
12	0.86	0.9	-4.30	5.12	5	2.33
13	0.98	1	-1.56	1.80	2	-10.08
14	0.98	1	-1.56	5.22	5	4.39
15	1.11	1.1	0.67	1.88	2	-6.00
16	1.11	1.1	0.67	4.93	5	-1.37
17	1.23	1.2	2.54	2.27	2	13.58

Πίνακας 6.1.2.1.6

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι σημαντικές τιμές της κατακόρυφης ανύψωσης και του προνευτασμού για τους ίδιους αρμονικούς κυματισμούς:

A/A	f_{heave} (Hz)	Heave (cm)	f_{pitch} (Hz)	Pitch (deg)
1	0.37	4.36	0.37	1.30
2	0.37	6.77	0.37	2.01
3	0.50	4.40	0.50	1.79
4	0.50	8.50	0.50	3.42
5	0.88	0.76	0.88	1.13
6	0.88	1.25	0.88	1.80
7	1.12	0.55	1.12	0.20
8	1.12	0.61	1.12	1.41
9	0.75	4.61	0.75	2.01
10	0.06	0.40	1.35	0.13
11	0.12	0.27	0.25	0.05
12	0.12	0.38	0.86	0.07
13	0.12	0.28	1.85	0.05
14	0.12	0.30	1.85	0.05
15	0.25	0.30	2.09	0.05
16	0.06	0.39	2.09	0.07
17	0.12	0.38	0.74	0.06

Πίνακας 6.1.2.1.7

Για τα προαναφερθέντα πλάτη και συχνότητες, υπολογίστηκε επίσης η αντίσταση στους αρμονικούς κυματισμούς, R_w , αλλά και η πρόσθετη αντίσταση R_{aw} , έχοντας αφαιρέσει την τιμή της αντίστασης από το ήρεμο νερό.

A/A	R_w (kg)	R_{aw} (kg)
1	2.791	0.310
2	2.882	0.401
3	2.683	0.202
4	2.768	0.287
5	3.711	1.230
6	3.535	1.054
7	5.042	2.561
8	3.075	0.594
9	3.380	0.898
10	3.110	0.629
11	2.847	0.366
12	3.100	0.618
13	2.525	0.044
14	3.182	0.701
15	2.572	0.091
16	3.193	0.711
17	2.605	0.124

Πίνακας 6.1.2.1.8

Γνωρίζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, $B=0.677\text{m}$ και $L_{pp}= 5.362\text{ m}$, προκύπτει η παρακάτω αδιαστατοποίηση από τη σχέση (5):

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:

A/A	f (Hz)	A (cm)	Caw
1	0.3	5	1.386
2	0.3	8	0.756
3	0.4	5	0.970
4	0.4	10	0.366
5	0.5	5	6.320
6	0.6	5	4.630
7	0.6	8	4.881
8	0.7	5	2.683
9	0.7	6	2.793
10	0.8	5	3.103
11	0.9	4	3.344
12	0.9	5	2.696
13	1	2	1.565
14	1	5	2.938
15	1.1	2	2.937
16	1.1	5	3.339
17	1.2	2	2.751

Πίνακας 6.1.2.1.9

Για την ταχύτητα $v=1.289\text{m/s}$ και για το δεδομένο μήκος μοντέλου, βάσει των συχνοτήτων των εκάστοτε κυματισμών, υπολογίστηκε και το αντίστοιχο μήκος κύματος.

Οι τιμές τόσο του μήκους κύματος για κάθε συχνότητα, καθώς επίσης και αδιαστατοποιημένες ως προς το μήκος μοντέλου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

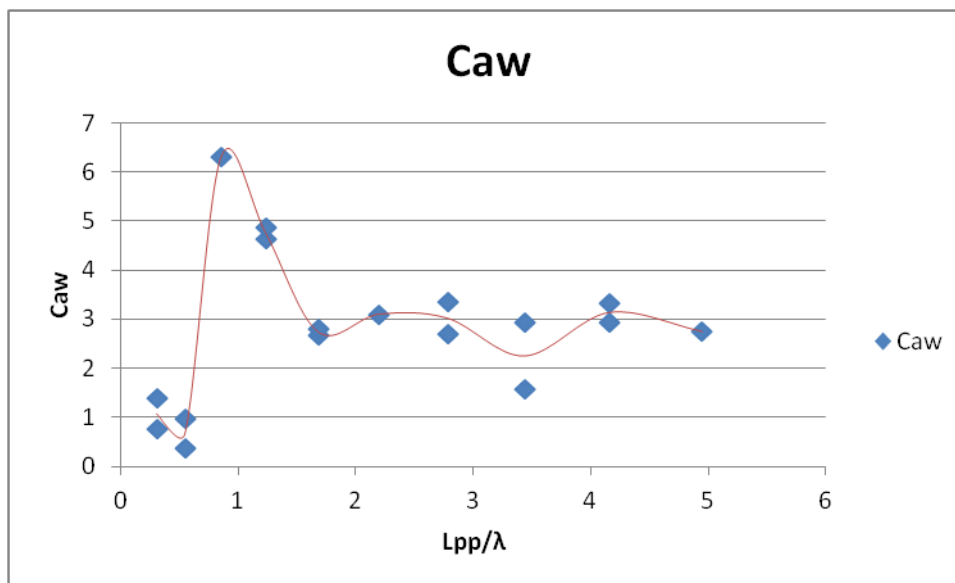
f (Hz)	λ (m)	L_{pp}/λ
0.3	17.342	0.309
0.4	9.755	0.550
0.5	6.243	0.859
0.6	4.335	1.237
0.7	3.185	1.683
0.8	2.439	2.199
0.9	1.927	2.783
1	1.561	3.435
1.1	1.290	4.157
1.2	1.084	4.947

Πίνακας 6.1.2.1.10

Τα ακόλουθα ζεύγη των αδιαστατοποιημένων τιμών απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα:

A/A	f (Hz)	A (cm)	Caw	Lpp/λ
1	0.3	5	1.386	0.309
2	0.3	8	0.756	0.309
3	0.4	5	0.970	0.550
4	0.4	10	0.366	0.550
5	0.5	5	6.320	0.859
6	0.6	5	4.630	1.237
7	0.6	8	4.881	1.237
8	0.7	5	2.683	1.683
9	0.7	6	2.793	1.683
10	0.8	5	3.103	2.199
11	0.9	4	3.344	2.783
12	0.9	5	2.696	2.783
13	1	2	1.565	3.435
14	1	5	2.938	3.435
15	1.1	2	2.937	4.157
16	1.1	5	3.339	4.157
17	1.2	2	2.751	4.947

Πίνακας 6.1.2.1.11



Διάγραμμα 6.1.2.1.12

6.1.2.i.iv. Σύνθεση αντίστασης αρμονικών κυματισμών για τον υπολογισμό της αντίστασης σε φάσμα τυχαίου κυματισμού

Ο υπολογισμός του ζητούμενου μεγέθους γίνεται με χρήση της σχέσης (6).

$$R_{AW.cal.} = 2 \int_0^{\infty} S(w_e) \frac{R_{aw}(w_e)}{A^2} dw_e \quad (6)$$

Για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος γίνεται χρήση του κανόνα του τραπεζίου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Frequency	Period	Energy Spectrum	Energy Content	$\frac{R_{aw}}{\zeta^2}$	Raw
Hz	s	$m^2 \cdot s$	m^2	kg/m^2	kg
0.28	3.61	0.0000009	0.000000040	86.18	0.0000
0.32	3.09	0.0001260	0.000005823	72.97	0.0004
0.37	2.70	0.0010509	0.000048581	59.93	0.0029
0.42	2.40	0.0025728	0.000118935	220.96	0.0263
0.46	2.16	0.0035479	0.000164012	403.21	0.0661
0.51	1.97	0.0036794	0.000170091	543.88	0.0925
0.55	1.80	0.0032955	0.000152344	493.09	0.0751
0.60	1.66	0.0027350	0.000126434	442.74	0.0560
0.65	1.55	0.0021835	0.000100939	385.52	0.0389
0.69	1.44	0.0017118	0.000079133	320.64	0.0254
0.74	1.35	0.0013332	0.000061631	254.17	0.0157
0.79	1.27	0.0010384	0.000048003	250.25	0.0120
0.83	1.20	0.0008118	0.000037526	263.48	0.0099
0.88	1.14	0.0006383	0.000029508	256.27	0.0076
0.92	1.08	0.0005054	0.000023365	230.3	0.0054
0.97	1.03	0.0004032	0.000018638	204.65	0.0038
1.02	0.98	0.0003241	0.000014981	217.86	0.0033
1.06	0.94	0.0002624	0.000012131	246.91	0.0030
1.11	0.90	0.0002140	0.000009895	274.25	0.0027
1.16	0.87	0.0001758	0.000008127	261.47	0.0021
1.20	0.83	0.0001454	0.000006720	248.8	0.0017

Πίνακας 6.1.2.1.12

Προκύπτει ότι:

$$I = \int_0^{\infty} S(w_e) \frac{R_{aw}(w_e)}{A^2} dw_e = 0.451kg$$

Άρα, $R_{AW.cal.} = 0.902kg$

Έχοντας υπολογίσει την πρόσθετη αντίσταση στο φάσμα Bretschneider ίση με :

$$R_{AWmeas.} = 0.809kg$$

Η ποσοστιαία απόκλιση των δύο τιμών με χρήση της σχέσης (13) είναι ίση με:

$$k = 11.44\%$$

6.1.2.I.v. Μείωση της ταχύτητας του μοντέλου και μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5m$ και περίοδο $T=12s$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Πραγματοποιήθηκε πειραματικός προσδιορισμός της μείωσης της ταχύτητας του μοντέλου έτσι, ώστε να επιτευχθεί τιμή της αντίστασης ίσης με αυτής σε ήρεμο νερό, για φάσμα με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.

Για την ακριβή τιμή της νέας ταχύτητας, μετρήθηκε αρχικά η αντίσταση του μοντέλου το οποίο τοποθετήθηκε ακίνητο στη μέση της πειραματικής δεξαμενής υπό την επίδραση του φάσματος με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθησαν.

Κατόπιν, προσεγγιστικά με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής, προσδιορίστηκε μια νέα ταχύτητα, μειωμένη από την αρχική ταχύτητα $v= 1.289 m/s$, για την οποία ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία.

Επαναλαμβάνοντας την ίδια προσεγγιστική διαδικασία, επιτεύχθηκε ο στόχος του προσδιορισμού της απαιτούμενης μειωμένης ταχύτητας από την αρχική έτσι, ώστε η τιμή της αντίστασης στο φάσμα να είναι περίπου ίδια με αυτή στο ήρεμο νερό. Η ταχύτητα αυτή είναι στα $v=1.12 m/s$.

Στον παρακάτω πίνακα περιλαμβάνονται συνολικά οι ακόλουθες οκτώ (8) μετρήσεις, όπως προέκυψαν από τη ρυμούλκηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή.

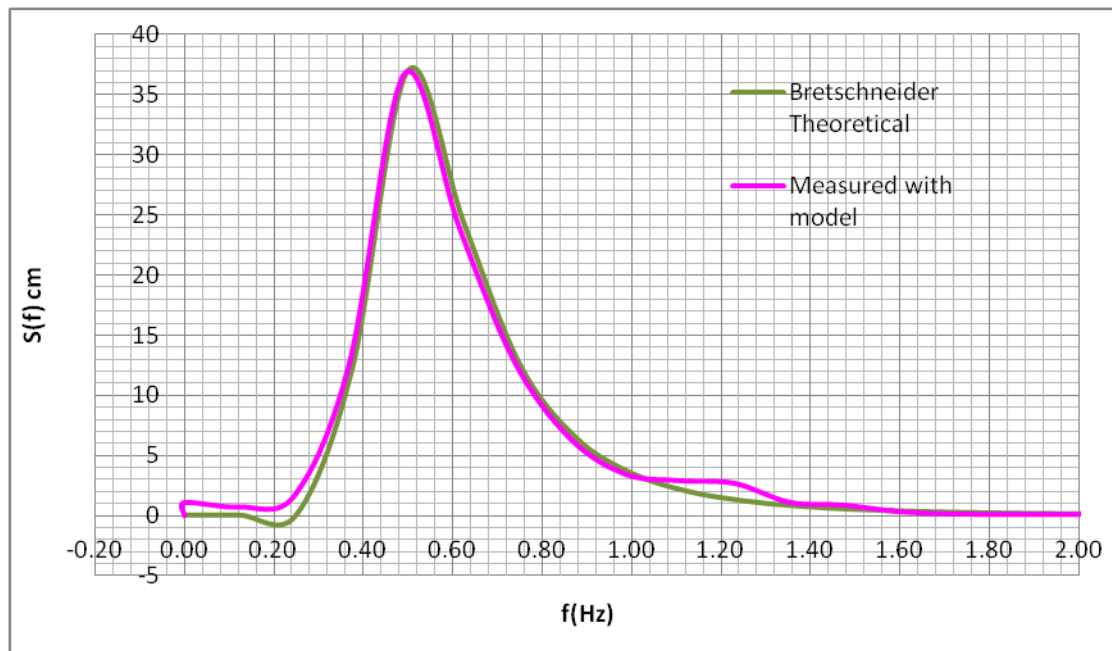
No of run	Rm (kg)
1	2.513
2	2.537
3	2.449
4	3.157
5	2.713
6	2.630
7	2.432
8	2.342
average	2.597

Πίνακας 6.1.2.I.13

Παρατηρούμε ότι η επιτευχθείσα τιμή της αντίστασης είναι : $R_w = 2.597kg$, η οποία είναι αρκετά κοντά στην τιμή της αντίστασης για το ήρεμο νερό $R_{sw} = 2.481kg$, για ταχύτητα $v=1.289m/s$.

Για λόγους πληρότητας, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform), παρατίθενται τα διαγράμματα από την ανάλυση των σημάτων, της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού (wave elevation), της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch), με τις σημαντικές τιμές τους.

Για την ανύψωση του κύματος (wave elevation) :



Διάγραμμα 6.1.2.1.13

Η σημαντική τιμή του ύψους κύματος και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 3.647 \text{ cm} = 14.59 \text{ cm}$$

$$T_p = 2.03 \text{ s}$$

Οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές είναι:

$$H_{s.theor.} = 14.29 \text{ cm}$$

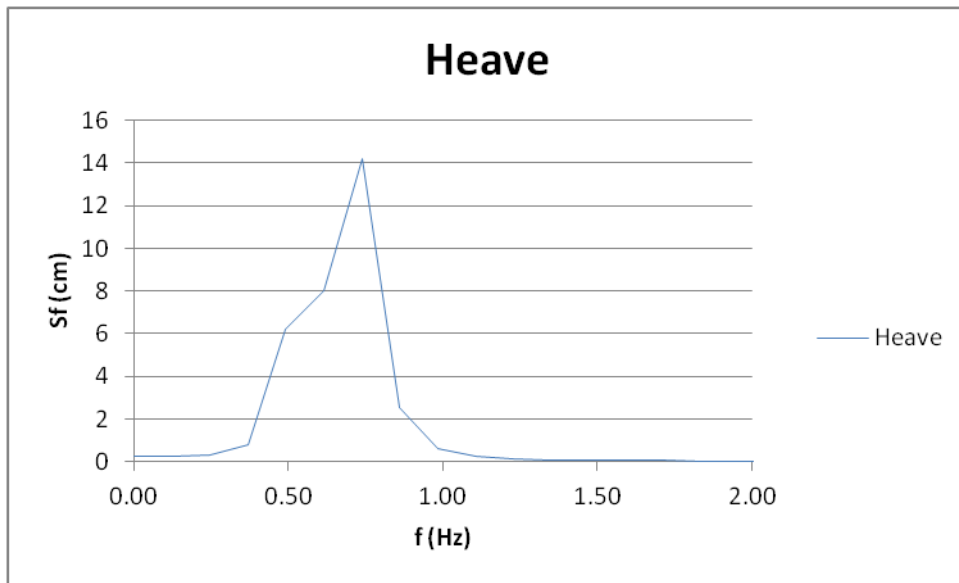
$$T_{p.theor.} = 2.03 \text{ s}$$

Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των θεωρητικών μεγεθών υπολογίζονται από τις σχέσεις (9) και (10):

$$a = 2.10\%$$

$$b = 0\%$$

Για την κατακόρυφη ανύψωση:



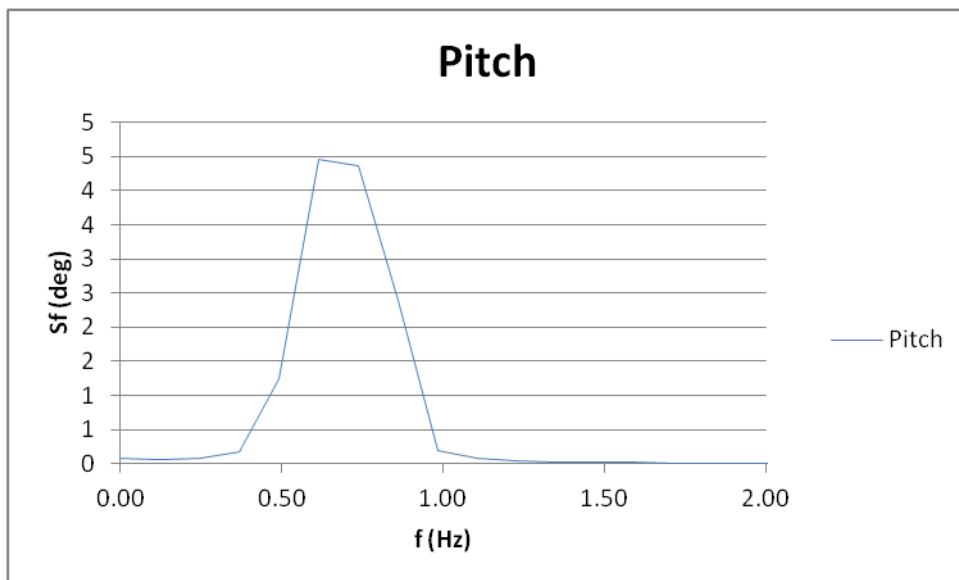
Διάγραμμα 6.1.2.1.14

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 2.056cm = 8.224cm$$

$$T_p = 1.35s$$

Για τον προνευτισμό :



Διάγραμμα 6.1.2.1.15

Η σημαντική τιμή του προνευτισμού και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$P_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.279cm = 5.116cm$$

$$T_p = 1.63s$$

6.1.2.II. Έμπρυμνη διαγωγή 0.5 μοιρών (trim 0.5 angle by stern)

6.1.2.II.i. Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό

Ο προσδιορισμός της τιμής της αντίστασης σε ήρεμο νερό, για συγκεκριμένη ταχύτητα, αποτελεί το πρώτο στάδιο για την εκτίμηση του ποσοστού της πρόσθετης αντίστασης παρουσία κυματισμών.

Η τιμή της αντίστασης για το ήρεμο νερό σε ταχύτητα $v=1.289$ m/s είναι η ακόλουθη:
 $R_{sw} = 2.428kg$

Για το συγκεκριμένο μοντέλο, στην αντίστοιχη κατάσταση φόρτωσης και στην ίδια ταχύτητα, χρησιμοποιώντας παλαιότερο δυναμόμετρο του εργαστηρίου, μετρήθηκε αντίσταση ίση με $R_{sw,old} = 2.279kg$

Η ποσοστιαία διαφορά τους από τη σχέση (8) προκύπτει:

$$\delta = 6.5\%$$

6.1.2.II.ii. Μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5m$ και περίοδο $T=12s$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Στην ταχύτητα υπηρεσίας, $v=1.289$ m/s, μετρήθηκε η αντίσταση του μοντέλου σε φάσμα κυματισμών με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν.

Υπολογίζοντας την αντίσταση του μοντέλου για χρονική ιστορία του φάσματος τυχαίου κυματισμού ίση με 300s, είναι πλέον εφικτό να υπολογισθεί και το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασής του, συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή της αντίστασης σε ήρεμο νερό.

Για τον υπολογισμό αυτό, ελήφθησαν συνολικά οι ακόλουθες οκτώ (8) μετρήσεις, όπως προέκυψαν από τη ρυμούλκηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή.

No of run	Rm (kg)
1	3.367
2	3.117
3	3.166
4	3.584
5	3.273
6	3.371
7	3.188
8	3.128
average	3.274

Πίνακας 6.1.2.II.1

Η τιμή της αντίστασης σε τυχαίο κυματισμό είναι η ακόλουθη : $R_w = 3.274$

Από τη σχέση (4) υπολογίζεται ότι η τιμή της πρόσθετης αντίστασης είναι ίση με:

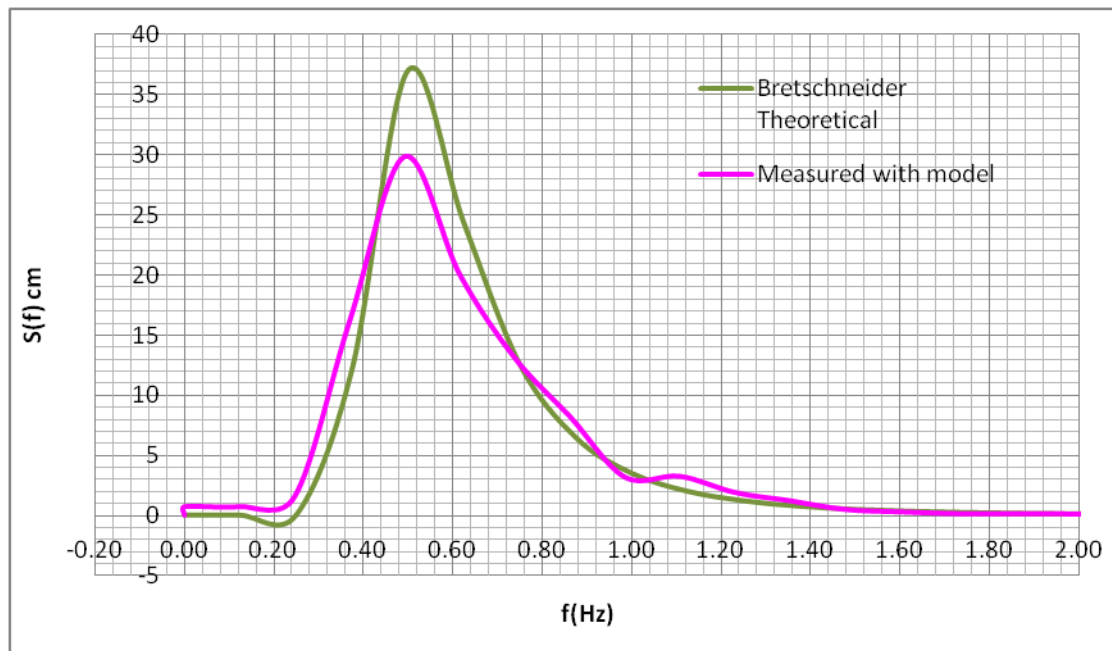
$$R_{aw} = 0.846kg$$

Από τη σχέση (7), το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμό επί της αντίστοιχης σε ήρεμο νερό υπολογίζεται:

$$\lambda = 34.84\%$$

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform) για την ανάλυση των σημάτων της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού (wave elevation), της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch), λαμβάνονται τα ακόλουθα διαγράμματα με τις σημαντικές τιμές τους.

Για την ανύψωση του κύματος (wave elevation) :



Διάγραμμα 6.1.2.II.1

Η σημαντική τιμή του ύψους κύματος και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 3.205 \text{ cm} = 14.12 \text{ cm}$$

$$T_p = 2.03 \text{ s}$$

Οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές είναι:

$$H_{s,theor.} = 14.29 \text{ cm}$$

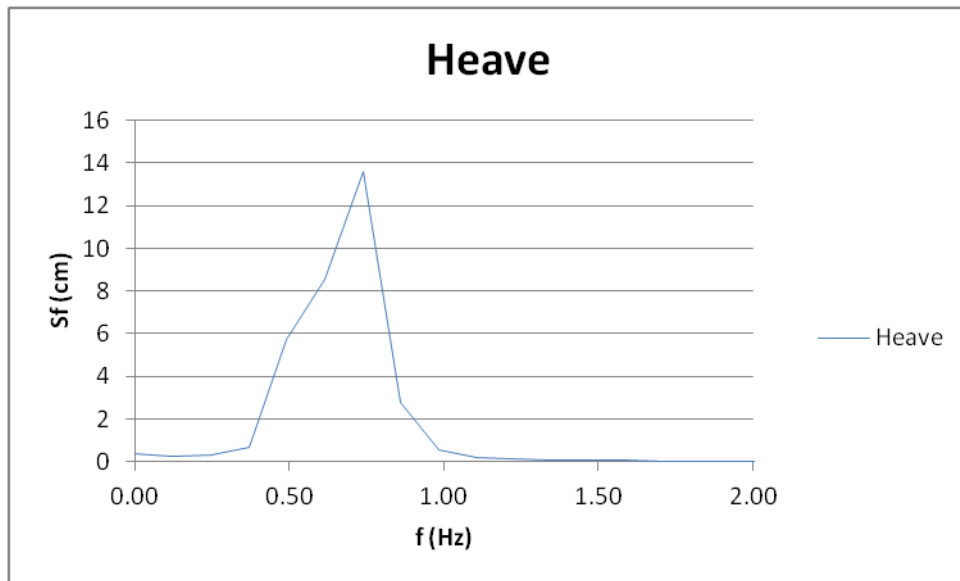
$$T_{p,theor.} = 2.03 \text{ s}$$

Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των θεωρητικών μεγεθών υπολογίζονται από τις σχέσεις (9) και (10):

$$a = -1.19\%$$

$$b = 0\%$$

Για την κατακόρυφη ανύψωση :



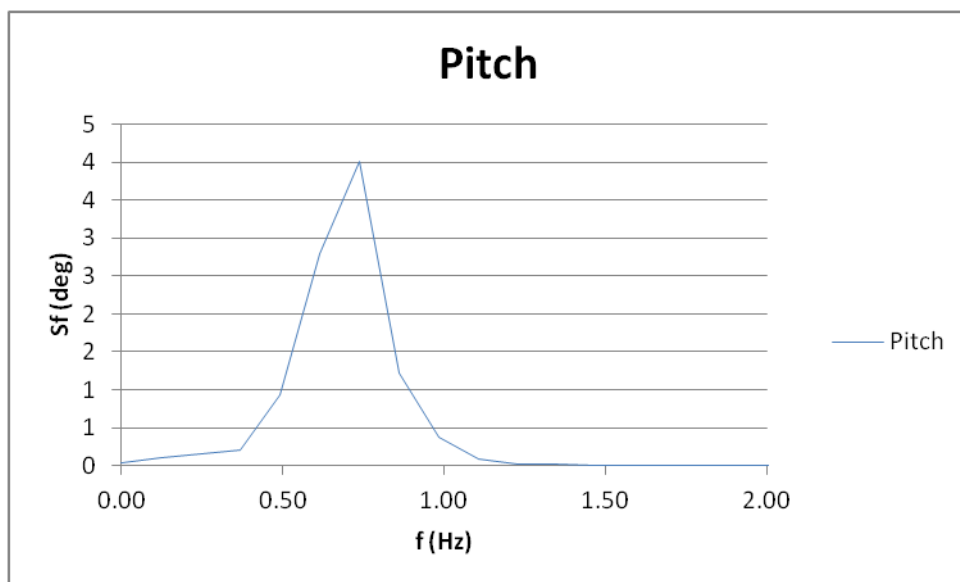
Διάγραμμα 6.1.2.ΙΙ.2

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 2.044\text{cm} = 8.177\text{cm}$$

$$T_p = 1.35\text{s}$$

Για τον προνευτισμό :



Διάγραμμα 6.1.2.ΙΙ.3

Η σημαντική τιμή του προνευτισμού και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$P_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.161\text{cm} = 4.643\text{cm}$$

$$T_p = 1.35\text{s}$$

6.1.2.III. Συμπεράσματα

- Για την ισοβύθιστη κατάσταση δοκιμών:
 - ✓ Οι τιμές της μετρούμενης αντίστασης σε ήρεμο νερό για τις ίδιες ταχύτητες, με χρήση του νέου δυναμομέτρου είναι αυξημένες από 3.30% έως 13.89% συγκριτικά με τις αντίστοιχες που μετρήθηκαν με το παλαιό δυναμόμετρο.
 - ✓ Παρατηρείται ένα εύρος αποκλίσεων στις μετρήσεις της αντίστασης με το παλαιό και το νέο δυναμόμετρο. Το πλήθος των μετρήσεων που ελήφθησαν για κάθε ταχύτητα για τη διαπίστωση της επαναληψιμότητας είναι διαφορετικό. Παρατηρείται ότι η ποσοστιαία απόκλιση στην ταχύτητα δοκιμών είναι μικρή.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.289$ m/s, η αντίσταση σε φάσμα τυχαίων κυματισμών αυξάνεται κατά 32.6% σε σύγκριση με την αντίσταση σε ήρεμο νερό.
 - ✓ Στις ίδιες συχνότητες, η τιμή του αδιάστατου συντελεστή C_{aw} παραμένει σχεδόν σταθερή, όπως αναμενόταν.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.289$ m/s, συνθέτοντας τις μετρούμενες τιμές της αντίστασης σε αρμονικούς κυματισμούς με τη χρήση του συντελεστή πρόσθετης αντίστασης εκτιμάται η τιμή της αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς μεγαλύτερη κατά 11.44% από τη μετρούμενη στο φάσμα τυχαίων κυματισμών.
 - ✓ Για να επιτευχθεί η ίδια τιμή της αντίστασης με το ήρεμο νερό, μειώνεται η ταχύτητα του προτύπου κατά 13.11% κατά τη μέτρηση της αντίστασης σε φάσμα τυχαίων κυματισμών.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.289$ m/s, η μετρούμενη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος είναι κατά 1.26% μικρότερη από τη θεωρητική ενώ η μετρούμενη φαινόμενη περίοδος συμπίπτει με τη θεωρητική.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.12$ m/s, η μετρούμενη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος είναι κατά 2.10% μεγαλύτερη από τη θεωρητική ενώ η μετρούμενη φαινόμενη περίοδος συμπίπτει με τη θεωρητική.
- Για την κατάσταση δοκιμών έμπρυμνης διαγωγής 0.5 μοιρών:
 - ✓ Η τιμή της μετρούμενης αντίστασης με χρήση του νέου δυναμομέτρου είναι αυξημένη κατά 6.5% συγκριτικά με την αντίστοιχη που μετρήθηκε με το παλαιό δυναμόμετρο.

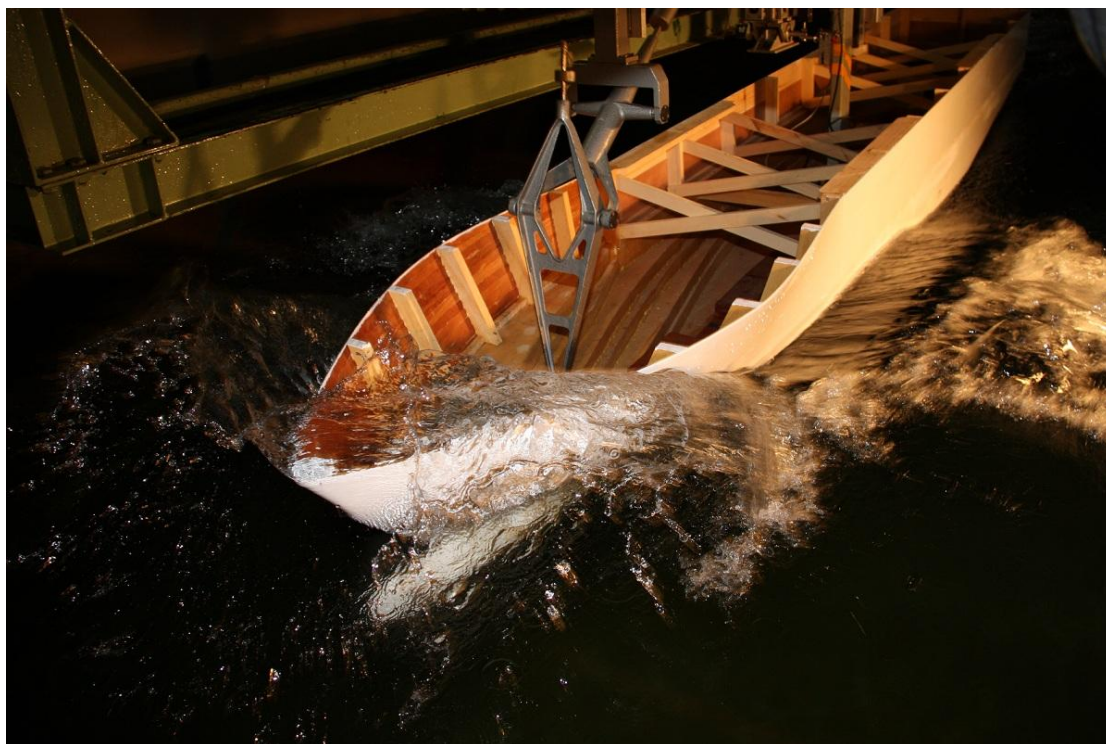
- ✓ Στην ταχύτητα $v=1.289$ m/s , η αντίσταση σε φάσμα τυχαίων κυματισμών αυξάνεται κατά 34.87% σε σύγκριση με την αντίσταση σε ήρεμο νερό.
- ✓ Στην ταχύτητα $v=1.289$ m/s , η μετρούμενη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος είναι κατά 1.19% μικρότερη από τη θεωρητική ενώ η μετρούμενη φαινόμενη περίοδος συμπίπτει με τη θεωρητική.
- Σύγκριση ισοβύθιστης κατάστασης δοκιμών και έμπρυμνης διαγωγής 0.5 μοιρών:
 - ✓ Στο ήρεμο νερό, η τιμή της αντίστασης στην ισοβύθιστη κατάσταση είναι κατά 2.18% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε κατάσταση έμπρυμνης διαγωγής 0.5 μοιρών.
 - ✓ Στο φάσμα τυχαίων κυματισμών, η τιμή της αντίστασης στην ισοβύθιστη κατάσταση είναι κατά 0.49% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε κατάσταση έμπρυμνης διαγωγής 0.5 μοιρών.
- Γενικά σχόλια:
 - ✓ Για τις μετρούμενες και τις θεωρητικές τιμές των φασμάτων παρατηρούνται αποκλίσεις, οι οποίες ενδέχεται να οφείλονται στο μέγεθος της χρονικής ιστορίας που ελήφθησαν οι μετρήσεις.
 - ✓ Οι αποκλίσεις στις τιμές της αντίστασης μεταξύ του παλαιού και του νέου δυναμομέτρου οφείλονται στην ακρίβεια του αισθητήρα που χρησιμοποιείται για το νέο δυναμόμετρο.

6.2. Ε/Ο ROPAX

Η γάστρα που δοκιμάστηκε ανήκει σε ένα διπλέλικο ταχύπλοο ΕΓ/ΟΓ πλοίο το οποίο έχει μια ιδιαίτερη πρύμνη που καταλήγει σε καθρέφτη ενώ διαθέτει και βολβό. Η κλίμακα του μοντέλου είναι 1/35 και πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε βύθισμα $T=0.163m$.

Στο συγκεκριμένο βύθισμα, έγιναν δοκιμές στις εξής περιπτώσεις:

1. Ισοβύθιστη κατάσταση (Even keel), όπου το πόδι του δυναμομέτρου έχει δεθεί στην ίσαλο πλεύσης του μοντέλου
2. Έμπρυμνη διαγωγή 1.0 μοίρας (trim 1.0 angle by stern), όπου το πόδι του δυναμομέτρου έχει δεθεί στην ίσαλο πλεύσης του μοντέλου
3. Ισοβύθιστη κατάσταση (Even keel), όπου το πόδι του δυναμομέτρου έχει δεθεί 9 cm υψηλότερα από την ίσαλο πλεύσης του μοντέλου



6.2.1.ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ T=0.163m

Χαρακτηριστικά μοντέλου	Σύμβολο		Καταστάσεις δοκιμών		
			1	2	3
Μήκος ισάλου	L_{WL}	m	4.33	4.423	4.33
Μήκος με βολβό	L_{BULB}	m	4.423	4.423	4.423
Πλάτος ισάλου	B_{WL}	m	0.646	0.646	0.646
Μέσο βύθισμα	T_m	m	0.163	0.163	0.163
Trim	t	deg	0.000	-1.000	0.000
Εκτόπισμα	Δ	kg	269.66	269.66	269.66
Βρεχόμενη επιφάνεια	W.S.	m^2	3.018	3.074	3.018
Συντελεστής γάστρας	C_B		0.54	0.575	0.54

6.2.1.I. Ισοβύθιστη κατάσταση (even keel)

το πόδι του δυναμομέτρου έχει δεθεί στην ίσαλο πλεύσης του μοντέλου

6.2.1.I.i. Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό για τις ακόλουθες ταχύτητες:

- i) $v=1.564$ m/s
- ii) $v=1.737$ m/s
- iii) $v= 1.919$ m/s
- iv) $v= 2.083$ m/s
- v) $v= 2.259$ m/s
- vi) $v= 2.436$ m/s
- vii) $v= 3.197$ m/s

Ειδικότερα, στην ταχύτητα $v= 1.919$ m/s ελήφθησαν περισσότερες από μία μετρήσεις προκειμένου να πιστοποιηθεί η επαναληψιμότητά τους.

Ο προσδιορισμός της τιμής της αντίστασης σε ήρεμο νερό, για συγκεκριμένη ταχύτητα, αποτελεί το πρώτο στάδιο για την εκτίμηση του ποσοστού της πρόσθετης αντίστασης, παρουσία κυματισμών.

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα των τιμών της αντίστασης για την ταχύτητα $v=1.919$ m/s είναι τα εξής:

No of run	Rm (kg)
1	2.818
2	2.794
3	2.746
4	2.679
5	2.779
6	2.780
7	2.764
8	2.796
average	2.770

Πίνακας 6.2.1.I.1

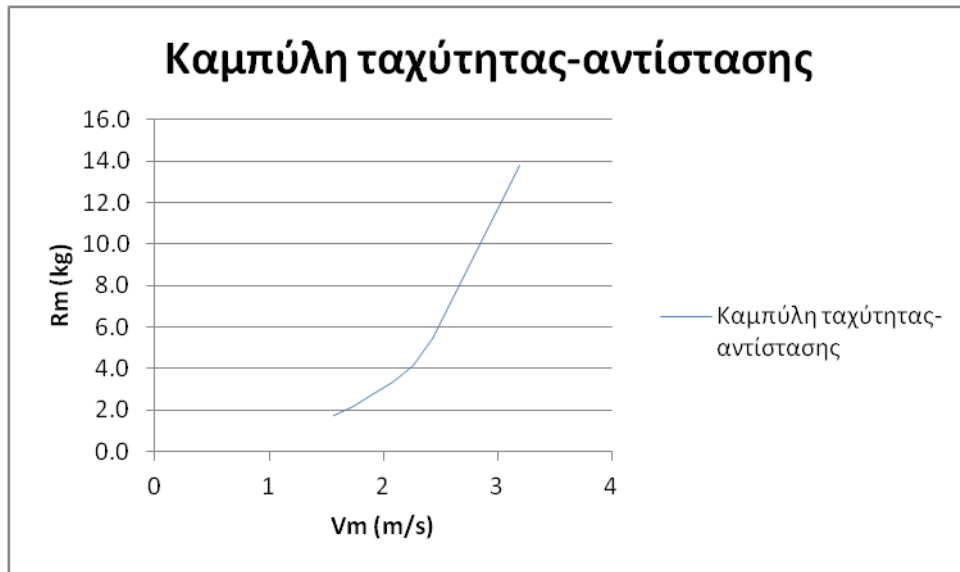
Η τιμή, λοιπόν, της αντίστασης για το ήρεμο νερό είναι η ακόλουθη: $R_{sw} = 2.770$ kg

Οι αντίστοιχες τιμές της αντίστασης για τις προαναφερθείσες ταχύτητες δοκιμών είναι οι ακόλουθες:

Vm (m/s)	Rm (kg)
1.564	1.711
1.737	2.190
1.919	2.770
2.083	3.350
2.259	4.152
2.436	5.456
3.197	13.812

Πίνακας 6.2.1.I.2

Οι ανωτέρω τιμές απεικονίζονται σχηματικά στο επόμενο διάγραμμα:



Διάγραμμα 6.2.1.1.1

6.2.1.I.ii. Εύρεση ακτίνας αδράνειας και περιόδου ιδιοταλάντωσης

Προκειμένου να υπολογιστεί πρακτικά η ακτίνα αδράνειας, το μοντέλο προσδένεται με ιμάντες από δύο εκκρεμείς ράβδους που είναι πακτωμένοι σε ειδικό χώρο στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής.

Με τον τρόπο πρόσδεσης αυτόν δίδεται η δυνατότητα εκτέλεσης ταλαντώσεων γύρω από το κέντρο βάρους του, περί τον κατακόρυφο άξονα.

Το μοντέλο, κατά την ταλάντωσή του γύρω από το κατακόρυφο επίπεδο, θα πρέπει να έχει την περίοδο που δίνεται από τη σχέση:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{I_{ZZ} \cdot l}{\Delta \cdot \alpha^2 \cdot g}}$$

όπου:

T : η περίοδος ιδιοταλάντωσης του συστήματος περί τον άξονα ZZ .

I_{ZZ} : η ροπή αδράνειας γύρω από τον άξονα ZZ .

l : το μήκος ανακρέμασης από την κατακόρυφη θάση του κέντρου βάρους.

Δ : το εκτόπισμα του μοντέλου μαζί με τους ιμάντες ανάρτησης

α : η ημιαπόσταση μεταξύ των στελεχών (γύρω από το κέντρο βάρους).

Γνωρίζουμε όμως ακόμα ότι:

$$I_{ZZ} = r_{ZZ}^2 \cdot \Delta$$

όπου r_{ZZ} ακτίνα αδράνειας, η οποία από την ανάλυση της κατανομής υπαρχόντων πλοίων έχει προσδιοριστεί ότι είναι περίπου 0.25 LBP, κάτι που επαληθεύεται πρακτικά από την παραπάνω διαδικασία.

Οπότε, αν αντικαταστήσουμε στον τύπο της περιόδου προκύπτει:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{r_{ZZ}^2 \cdot l}{\alpha^2 \cdot g}} \Rightarrow T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{ZZ}}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Για το μοντέλο αυτό, με δεδομένα τα ακόλουθα, υπολογίζεται η ακτίνα αδρανείας ακολούθως:

$$r_{zz} = 0.25L_{BP} = 1.0975m$$

$$l = 3m + 0.75m + \frac{2}{3}D = 4.17m, \text{ όπου, } D=0.63m \text{ είναι το κοίλο του μοντέλου.}$$

$$a=0.75m$$

$$g = 9.81m/s^2$$

Οπότε η περίοδος ιδιοταλάντωσης T του μοντέλου θα είναι:

$$T_{\theta} = 5.992s$$

Χρονομετρήθηκε η ταλάντωση του μοντέλου σε $N=10$ περιόδους, ώστε να βρεθεί αν συμπίπτει η πραγματική περίοδος με τη θεωρητική που υπολογίστηκε προηγουμένως.

Για τις $N=10$ αυτές ταλαντώσεις, προέκυψε το συνολικό διάστημα χρονομέτρησης:

$$\Delta t=59.96s.$$

Συνεπώς, ισχύει ότι:

$$T_{\pi} = \frac{\Delta t}{N} = \frac{59.96s}{10} = 5.996s$$

Η απόκλιση μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής τιμής είναι η ακόλουθη:

$$\frac{T_{\pi}-T_{\theta}}{T_{\pi}} = \frac{5.996s - 5.992s}{5.992s} = \frac{0.004}{5.992} = 0.0007 = 0.07\%$$

6.2.1.I.iii. Μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5m$ και περίοδο $T=12s$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Στην ταχύτητα υπηρεσίας, $v=1.919$ m/s, μετρήθηκε η αντίσταση του μοντέλου σε φάσμα κυματισμών με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν.

Υπολογίζοντας την αντίσταση του μοντέλου για χρονική ιστορία του φάσματος τυχαίου κυματισμού ίση με 300s, είναι πλέον εφικτό να υπολογισθεί και το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασής του, συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή της αντίστασης σε ήρεμο νερό.

Για τον υπολογισμό αυτό, ελήφθησαν συνολικά οι ακόλουθες δεκατρείς (13) μετρήσεις, όπως προέκυψαν από τη ρυμούλκηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή.

Run No	Rm (kg)
1	3.814
2	3.400
3	3.441
4	3.728
5	3.424
6	3.801
7	3.642
8	3.192
9	3.754
10	3.911
11	4.115
12	3.963
13	4.499
average	3.745

Πίνακας 6.2.1.1.3

Η τιμή της αντίστασης σε τυχαίο κυματισμό είναι η ακόλουθη : $R_w = 3.7448$

Από τη σχέση (4) υπολογίζεται ότι η τιμή της πρόσθετης αντίστασης είναι ίση με:

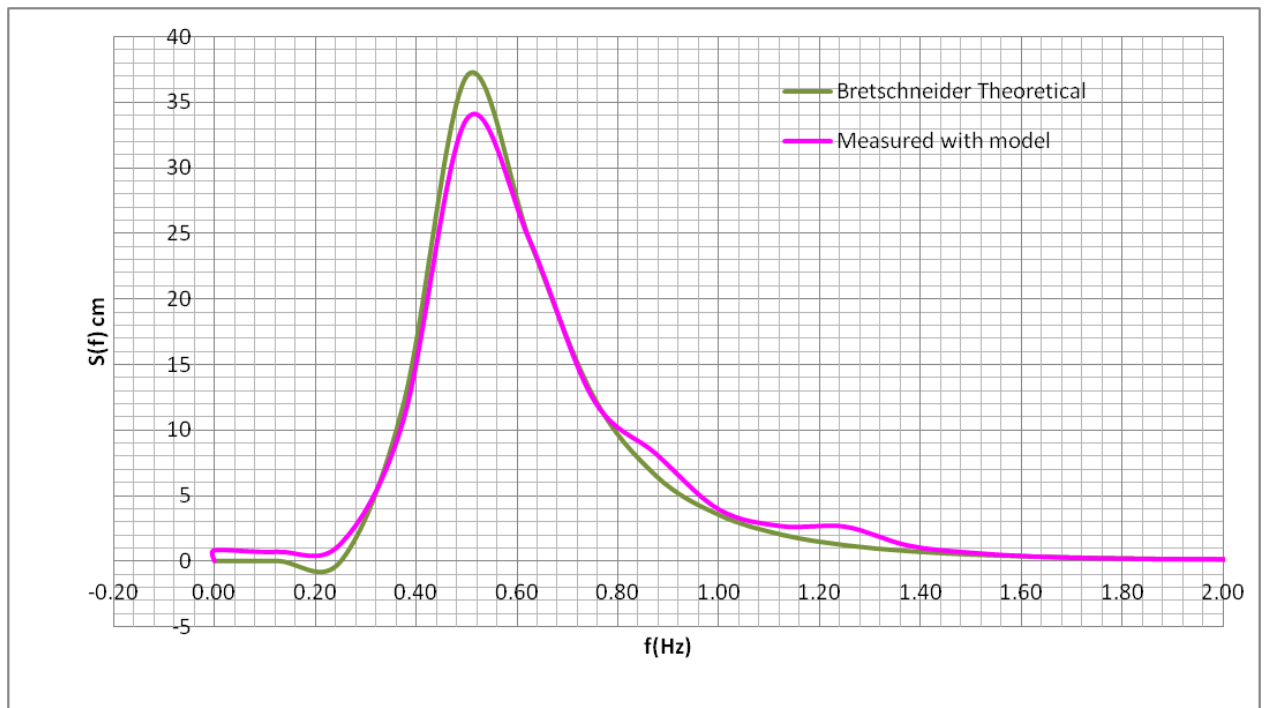
$$R_{aw} = 0.9753kg \quad (3)$$

Από τη σχέση (7), το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμό επί της αντίστοιχης σε ήρεμο νερό υπολογίζεται:

$$\lambda = 35.22\%$$

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform) για την ανάλυση των σημάτων της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού (wave elevation), της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch), λαμβάνονται τα ακόλουθα διαγράμματα με τις σημαντικές τιμές τους.

Για την ανύψωση του κύματος (wave elevation) :



Διάγραμμα 6.2.1.1.2

Η σημαντική τιμή του ύψους κύματος και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 3.612\text{cm} = 14.45\text{cm}$$

$$T_p = 2.00\text{s}$$

Οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές είναι:

$$H_{s.theor.} = 14.29\text{cm}$$

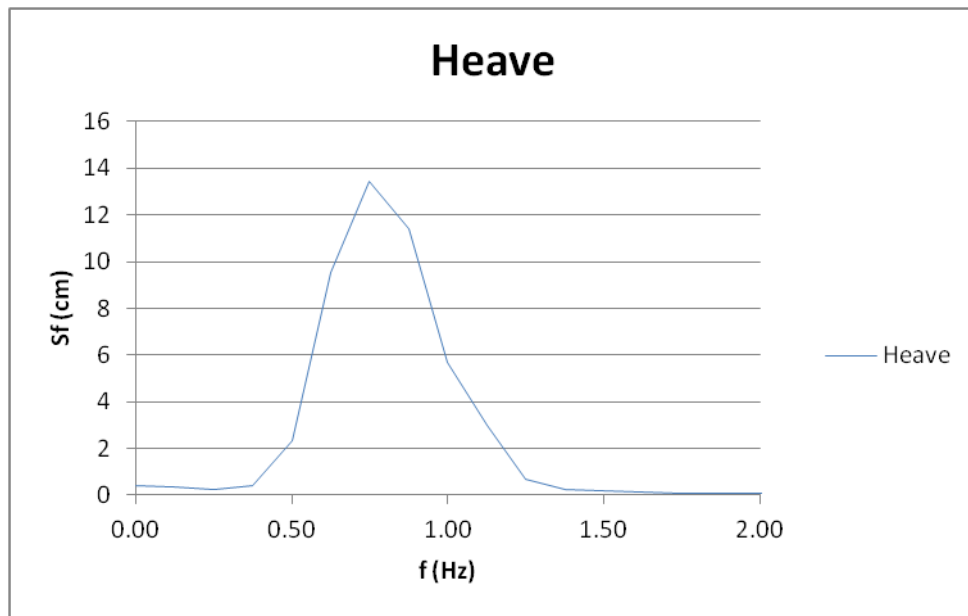
$$T_{p.theor.} = 2.03\text{s}$$

Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των θεωρητικών μεγεθών υπολογίζονται από τις σχέσεις (9) και (10):

$$a = 1.12\%$$

$$b = -1.48\%$$

Για την κατακόρυφη ανύψωση:



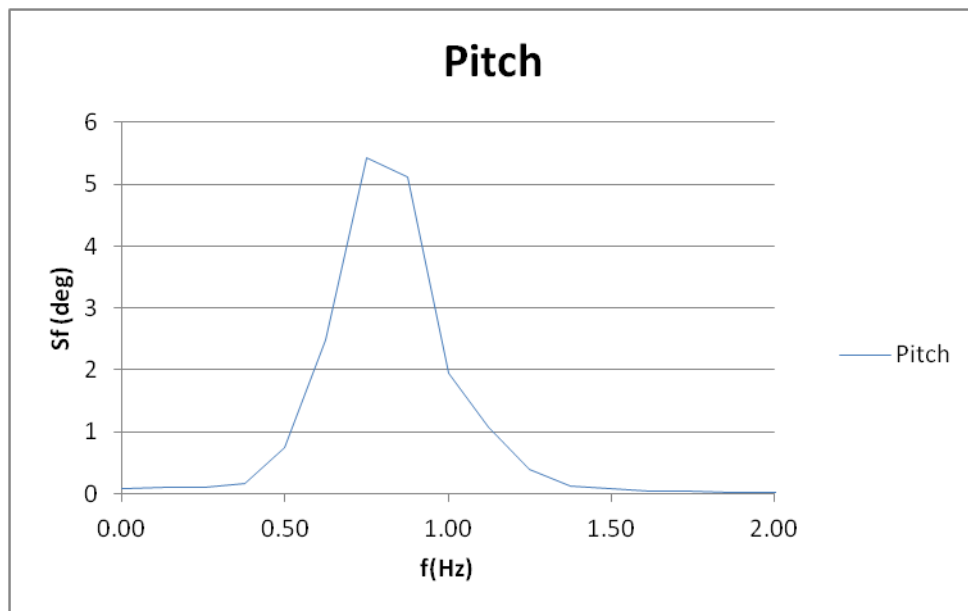
Διάγραμμα 6.2.1.1.3

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 2.475 \text{ cm} = 9.899 \text{ cm}$$

$$T_p = 1.33 \text{ s}$$

Για τον προνευτισμό :



Διάγραμμα 6.2.1.1.4

Η σημαντική τιμή του προνευτισμού και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$P_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.506 \text{ cm} = 6.025 \text{ cm}$$

$$T_p = 1.33$$

6.2.1.1.iv. Μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε αρμονικούς κυματισμούς διαφορετικών υψών και συχνοτήτων.

Για τα ακόλουθα μεγέθη:

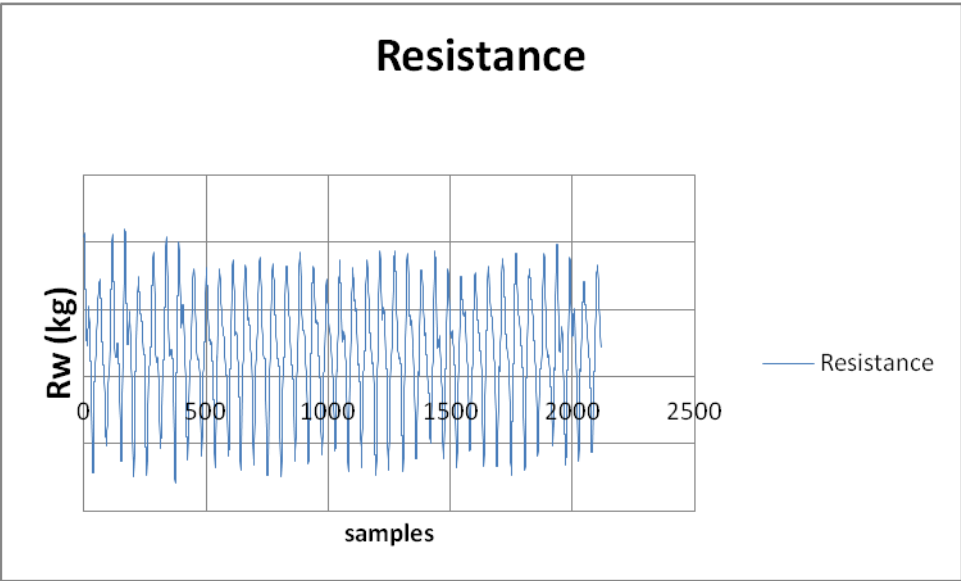
- A) Ανύψωση κύματος
- B) Κατακόρυφη ανύψωση μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς
- Γ) Προνευτασμός μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς
- Δ) Αντίσταση σε ημιτονικούς κυματισμούς

ελήφθησαν μετρήσεις για τις παρακάτω συχνότητες και πλάτη αρμονικών κυματισμών:

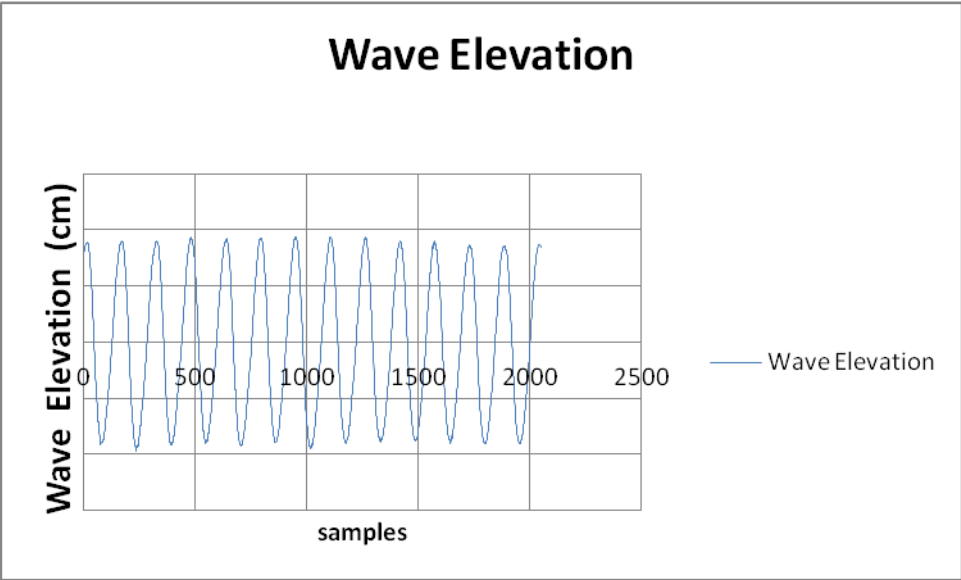
A/A	f (Hz)	A (cm)
1	0.3	8
2	0.4	8
3	0.4	5
4	0.5	5
5	0.5	10
6	0.6	8
7	0.6	5
8	0.7	6
9	0.7	5
10	0.8	5
11	0.9	4
12	0.9	5
13	1	3
14	1	5
15	1.1	2
16	1.1	5
17	1.2	2

Πίνακας 6.2.1.1.4

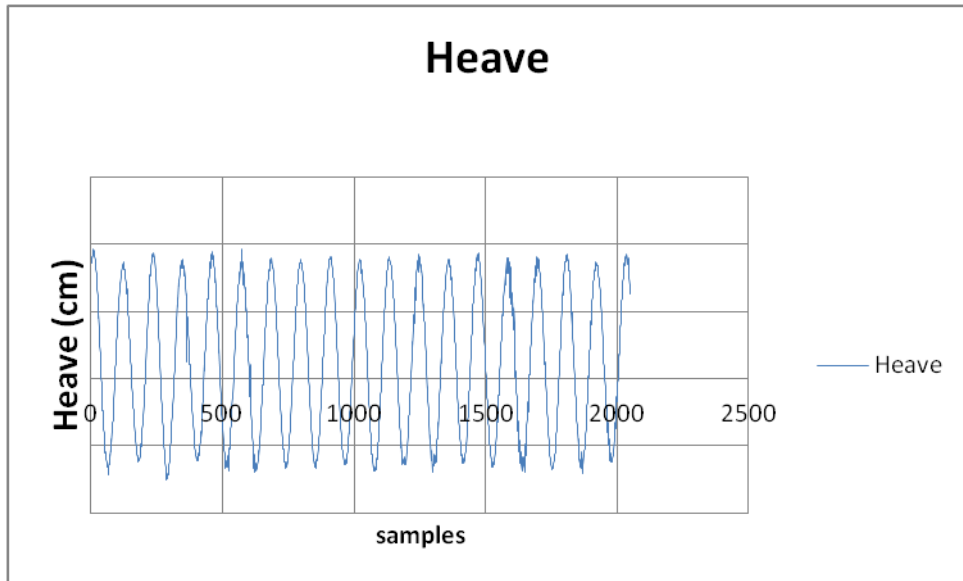
Τα διαγράμματα των μεγεθών αυτών ως προς το χρόνο, έχουν την παρακάτω μορφή:



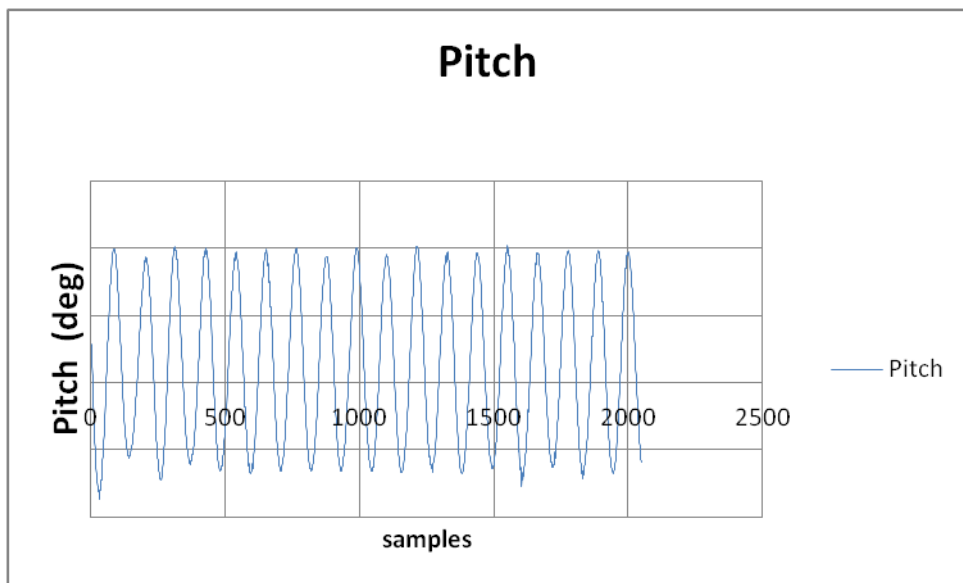
Διάγραμμα 6.2.1.1.5



Διάγραμμα 6.2.1.1.6



Διάγραμμα 6.2.1.1.7



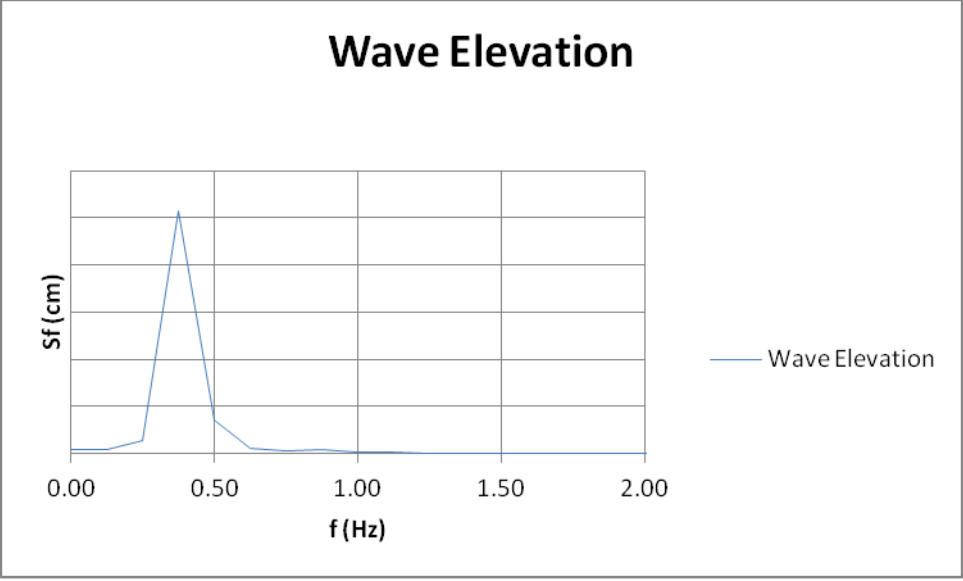
Διάγραμμα 6.2.1.1.8

Τα σήματα των μετρήσεων που ελήφθησαν για :

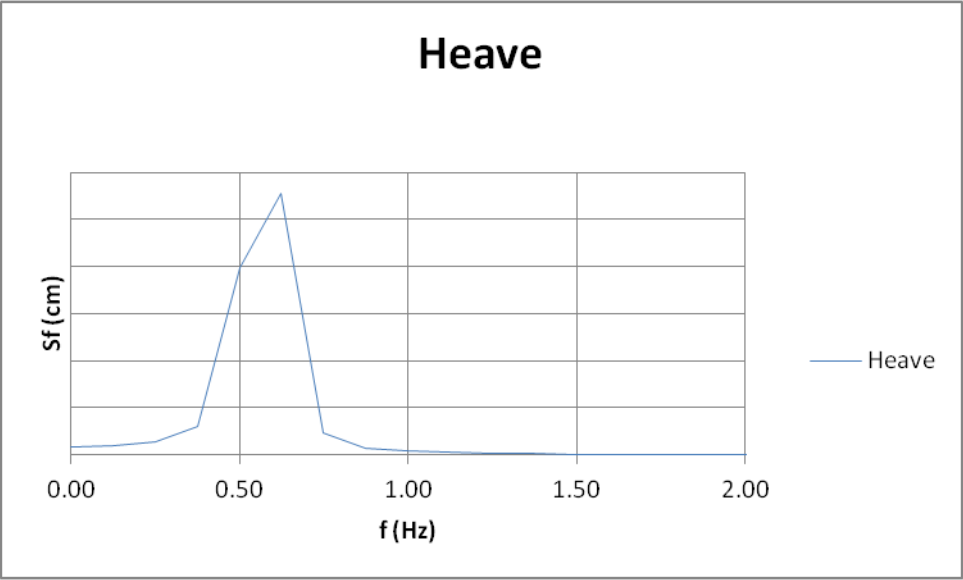
- A) Ανύψωση κύματος
- B) Κατακόρυφη ανύψωση μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς
- Γ) Προνευασμός μοντέλου σε ημιτονικούς κυματισμούς

αναλύθηκαν με τη χρήση του αλγορίθμου Fast Fourier Transform (FFT).

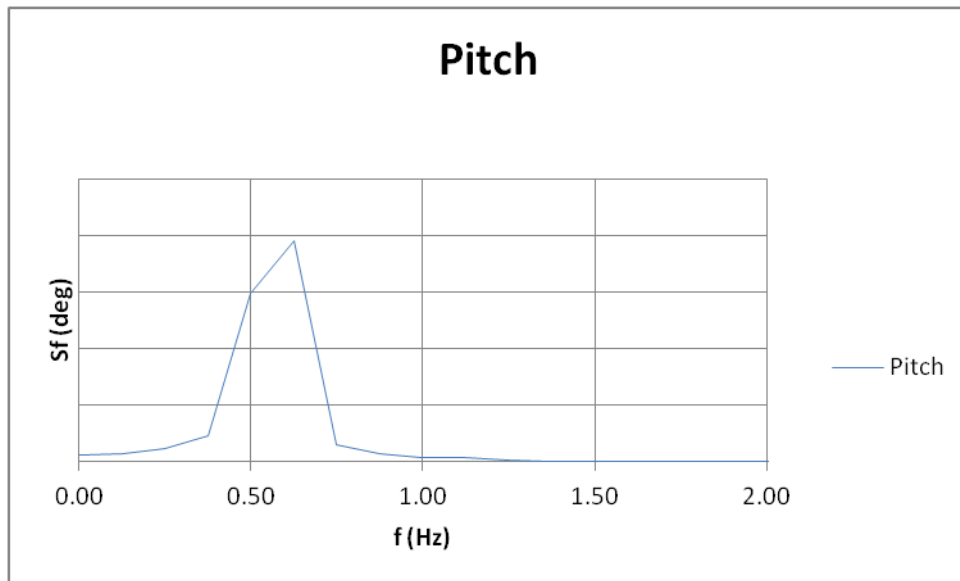
Τα διαγράμματά τους έχουν την παρακάτω μορφή:



Διάγραμμα 6.2.1.1.9



Διάγραμμα 6.2.1.1.10



Διάγραμμα 6.2.1.1.11

Στον ακόλουθο πίνακα, παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν για την ανύψωση του κύματος και την αντίστοιχη συχνότητά του, καθώς επίσης, από τις σχέσεις (11) και (12) οι ποσοστιαίες αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές οι οποίες εισήχθησαν ως δεδομένα στον κυματιστήρα του εργαστηρίου:

A/A	f_{FFT} (Hz)	$f_{theor.}$ (Hz)	c %	A_{FFT} (cm)	$A_{theor.}$ (cm)	d %
1	0.24	0.3	-18.62	7.82	8	-2.26
2	0.37	0.4	-8.45	7.63	8	-4.60
3	0.37	0.4	-8.45	4.84	5	-3.25
4	0.49	0.5	-2.34	4.75	5	-4.92
5	0.49	0.5	-2.34	9.32	10	-6.77
6	0.61	0.6	1.73	7.96	8	-0.47
7	0.61	0.6	1.73	5.21	5	4.13
8	0.73	0.7	4.63	6.05	6	0.78
9	0.73	0.7	4.63	5.04	5	0.86
10	0.85	0.8	6.81	5.00	5	0.05
11	0.85	0.9	-5.06	3.89	4	-2.79
12	0.85	0.9	-5.06	5.31	5	6.18
13	0.98	1	-2.34	3.12	3	3.85
14	0.98	1	-2.34	5.14	5	2.77
15	1.10	1.1	-0.12	2.08	2	3.86
16	1.10	1.1	-0.12	4.87	5	-2.57
17	1.22	1.2	1.73	2.34	2	16.92

Πίνακας 6.2.1.1.5

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι σημαντικές τιμές της κατακόρυφης ανύψωσης και του προνευτασμού για τους ίδιους αρμονικούς κυματισμούς:

A/A	f_{heave} (Hz)	Heave (cm)	f_{pitch} (Hz)	Pitch (deg)
1	0.37	7.30	0.49	2.12
2	0.61	7.01	0.61	3.50
3	0.61	4.50	0.61	2.28
4	0.85	4.61	0.85	3.02
5	0.49	5.00	0.49	4.72
6	0.98	4.80	0.98	2.66
7	1.10	3.00	1.10	1.83
8	1.34	0.83	1.34	0.54
9	1.34	0.69	1.34	0.45
10	1.59	0.48	1.59	0.11
11	1.83	0.27	1.83	0.12
12	1.83	0.27	1.83	0.13
13	0.12	0.25	0.24	0.06
14	0.24	0.21	2.20	0.06
15	0.24	0.27	0.24	0.06
16	0.24	0.21	0.24	0.09
17	0.24	0.22	0.12	0.06

Πίνακας 6.2.1.1.6

Για τα προαναφερθέντα πλάτη και συχνότητες, υπολογίστηκε επίσης η αντίσταση στους αρμονικούς κυματισμούς, R_w , αλλά και η πρόσθετη αντίσταση R_{aw} , έχοντας αφαιρέσει την τιμή της αντίστασης από το ήρεμο νερό.

A/A	R_w (kg)	R_{aw} (kg)
1	4.237	1.468
2	4.435	1.666
3	3.003	0.234
4	4.386	1.617
5	6.455	3.685
6	6.425	3.655
7	4.244	1.474
8	3.003	0.234
9	3.533	0.764
10	4.244	1.474
11	3.080	0.311
12	3.255	0.485
13	2.906	0.137
14	3.298	0.528
15	2.898	0.129
16	3.393	0.624
17	2.887	0.118

Πίνακας 6.2.1.1.7

Γνωρίζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, $B=0.646\text{m}$ και $L_{pp}= 4.46172\text{m}$, προκύπτει η παρακάτω αδιαστατοποίηση από τη σχέση (5):

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα:

A/A	f (Hz)	A (cm)	Caw	L_{pp}/λ
1	0.3	8	2.504	0.257
2	0.4	8	2.983	0.457
3	0.4	5	1.041	0.457
4	0.5	5	7.461	0.715
5	0.5	10	4.422	0.715
6	0.6	8	6.014	1.029
7	0.6	5	5.673	1.029
8	0.7	6	0.666	1.401
9	0.7	5	3.133	1.401
10	0.8	5	6.145	1.830
11	0.9	4	2.144	2.316
12	0.9	5	1.796	2.316
13	1	3	1.468	2.859
14	1	5	2.087	2.859
15	1.1	2	3.106	3.459
16	1.1	5	2.742	3.459
17	1.2	2	2.245	4.116

Πίνακας 6.2.1.1.8

Για την ταχύτητα $v=1.919\text{m/s}$ και για το δεδομένο μήκος μοντέλου, βάσει των συχνοτήτων των εκάστοτε κυματισμών, υπολογίστηκε και το αντίστοιχο μήκος κύματος.

Οι τιμές τόσο του μήκους κύματος για κάθε συχνότητα, καθώς επίσης και αδιαστατοποιημένες ως προς το μήκος μοντέλου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

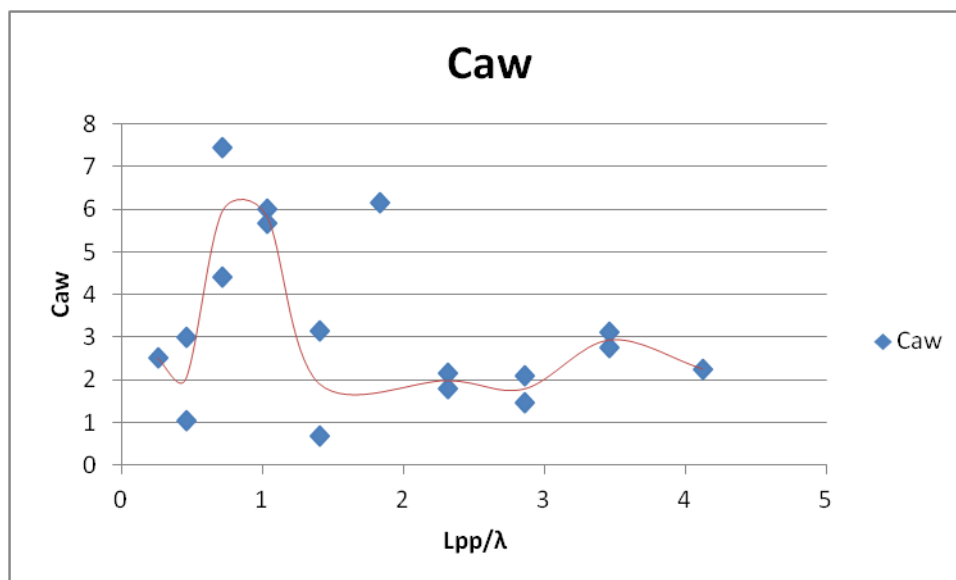
f (Hz)	λ (m)	L_{pp}/λ
0.3	17.342	0.257
0.4	9.755	0.457
0.5	6.243	0.715
0.6	4.335	1.029
0.7	3.185	1.401
0.8	2.439	1.830
0.9	1.927	2.316
1	1.561	2.859
1.1	1.290	3.459
1.2	1.084	4.116

Πίνακας 6.2.1.1.9

Τα ακόλουθα ζεύγη των αδιαστατοποιημένων τιμών απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα:

A/A	f (Hz)	A (cm)	Caw	Lpp/λ
1	0.3	8	2.504	0.257
2	0.4	8	2.983	0.457
3	0.4	5	1.041	0.457
4	0.5	5	7.461	0.715
5	0.5	10	4.422	0.715
6	0.6	8	6.014	1.029
7	0.6	5	5.673	1.029
8	0.7	6	0.666	1.401
9	0.7	5	3.133	1.401
10	0.8	5	6.145	1.830
11	0.9	4	2.144	2.316
12	0.9	5	1.796	2.316
13	1	3	1.468	2.859
14	1	5	2.087	2.859
15	1.1	2	3.106	3.459
16	1.1	5	2.742	3.459
17	1.2	2	2.245	4.116

Πίνακας 6.2.1.1.10



Διάγραμμα 6.2.1.1.12

6.2.1.I.v. Σύνθεση αντίστασης αρμονικών κυματισμών για τον υπολογισμό της αντίστασης σε φάσμα τυχαίου κυματισμού.

Ο υπολογισμός του ζητούμενου μεγέθους γίνεται με χρήση της σχέσης (6).

$$R_{AW.cal.} = 2 \int_0^{\infty} S(w_e) \frac{R_{aw}(w_e)}{A^2} dw_e \quad (6)$$

Για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος γίνεται χρήση του κανόνα του τραπεζίου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Frequency	Period	Energy Spectrum	Energy Content	$\frac{R_{aw}}{\zeta^2}$	Raw
Hz	s	$m^2 \cdot s$	m^2	kg/m^2	kg
0.28	3.61	0.0000009	0.000000040	227.34	0.0000
0.32	3.09	0.0001260	0.000005823	209.16	0.0012
0.37	2.70	0.0010509	0.000048581	205.26	0.0100
0.42	2.40	0.0025728	0.000118935	347.31	0.0413
0.46	2.16	0.0035479	0.000164012	489.37	0.0803
0.51	1.97	0.0036794	0.000170091	511.78	0.0870
0.55	1.80	0.0032955	0.000152344	533.84	0.0813
0.60	1.66	0.0027350	0.000126434	555.90	0.0703
0.65	1.55	0.0021835	0.000100939	445.56	0.0450
0.69	1.44	0.0017118	0.000079133	303.00	0.0240
0.74	1.35	0.0013332	0.000061631	182.58	0.0113
0.79	1.27	0.0010384	0.000048003	185.12	0.0089
0.83	1.20	0.0008118	0.000037526	187.66	0.0070
0.88	1.14	0.0006383	0.000029508	185.26	0.0055
0.92	1.08	0.0005054	0.000023365	178.20	0.0042
0.97	1.03	0.0004032	0.000018638	171.29	0.0032
1.02	0.98	0.0003241	0.000014981	206.44	0.0031
1.06	0.94	0.0002624	0.000012131	247.90	0.0030
1.11	0.90	0.0002140	0.000009895	274.48	0.0027
1.16	0.87	0.0001758	0.000008127	249.94	0.0020
1.20	0.83	0.0001454	0.000006720	225.40	0.0015

Πίνακας 6.2.1.I.11

Προκύπτει ότι:

$$I = \int_0^{\infty} S(w_e) \frac{R_{aw}(w_e)}{A^2} dw_e = 0.493kg$$

Άρα, $R_{AW.cal.} = 0.985kg$

Έχοντας υπολογίσει την πρόσθετη αντίσταση στο φάσμα Bretschneider ίση με :

$$R_{AWmeas.} = 0.975kg$$

Η ποσοστιαία απόκλιση των δύο τιμών με χρήση της σχέσης (13) είναι ίση με:

$$k = 1.08\%$$

6.2.1.I.vi. Μείωση της ταχύτητας του μοντέλου και μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5m$ και περίοδο $T=12s$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Πραγματοποιήθηκε πειραματικός προσδιορισμός της μείωσης της ταχύτητας του μοντέλου έτσι, ώστε να επιτευχθεί τιμή της αντίστασης ίσης με αυτής σε ήρεμο νερό, για φάσμα με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.

Για την ακριβή τιμή της νέας ταχύτητας, μετρήθηκε αρχικά η αντίσταση του μοντέλου το οποίο τοποθετήθηκε ακίνητο στη μέση της πειραματικής δεξαμενής υπό την επίδραση του φάσματος με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθησαν.

Κατόπιν, προσεγγιστικά με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής, προσδιορίστηκε μια νέα ταχύτητα μειωμένη από την αρχική ταχύτητα $v= 1.919 m/s$, για την οποία ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία.

Επαναλαμβάνοντας την ίδια προσεγγιστική διαδικασία, επιτεύχθηκε ο στόχος του προσδιορισμού της απαιτούμενης μειωμένης ταχύτητας, $v=1.53 m/s$, έτσι, ώστε η τιμή της αντίστασης στο φάσμα να είναι περίπου ίδια με αυτή στο ήρεμο νερό.

Στον παρακάτω πίνακα περιλαμβάνονται συνολικά οι ακόλουθες δέκα (10) μετρήσεις, όπως προέκυψαν από τη ρυμούλκηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή.

No of run	Rm (kg)
1	2.821
2	2.656
3	2.686
4	3.158
5	2.730
6	3.184
7	2.972
8	2.635
9	2.606
10	3.202
average	2.865

Πίνακας 6.2.1.I. 12

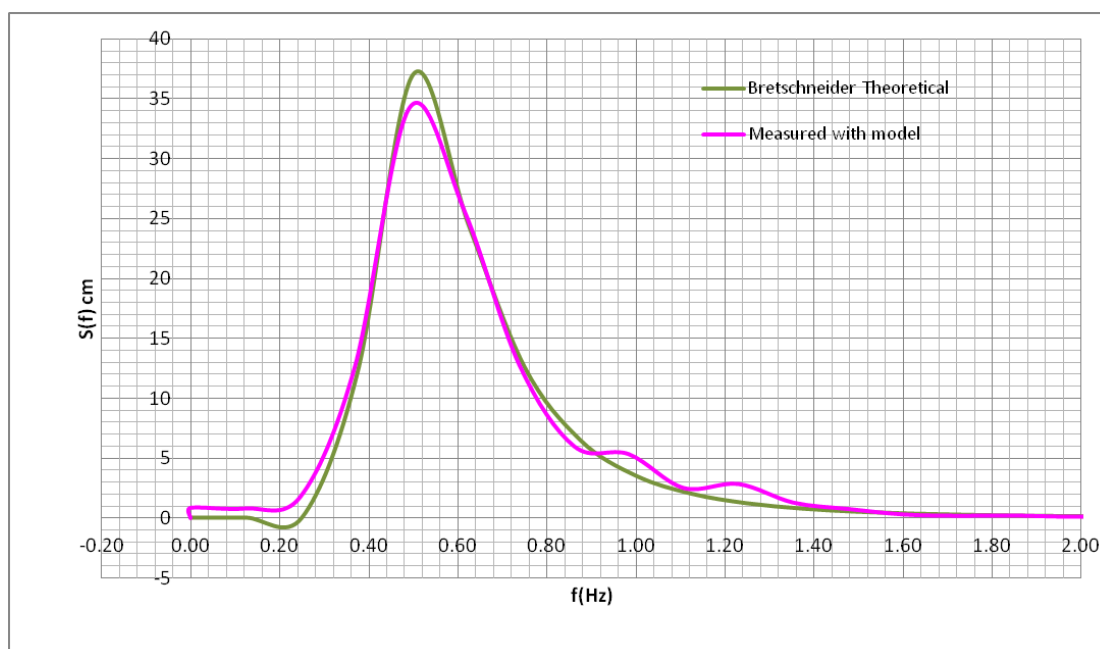
Προκύπτει, επομένως, ότι:

$$R_w = 2.865kg \text{ ενώ από τη σχέση (1) ισχύει : } R_{sw} = 2.7695kg$$

Παρατηρούμε ότι η επιτευχθείσα τιμή της αντίστασης είναι : $R_w = 2.8650kg$, η οποία είναι αρκετά κοντά στην τιμή της αντίστασης για το ήρεμο νερό $R_{sw} = 2.7695kg$, για ταχύτητα $v=1.53m/s$.

Για λόγους πληρότητας, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform), παρατίθενται τα διαγράμματα από την ανάλυση των σημάτων, της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού (wave elevation), της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch), με τις σημαντικές τιμές τους.

Για την ανύψωση του κύματος (wave elevation) :



Διάγραμμα 6.2.1.1.13

Η σημαντική τιμή του ύψους κύματος και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 3.664 \text{ cm} = 14.66 \text{ cm}$$

$$T_p = 2.03 \text{ s}$$

Οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές είναι:

$$H_{s.theor.} = 14.29 \text{ cm}$$

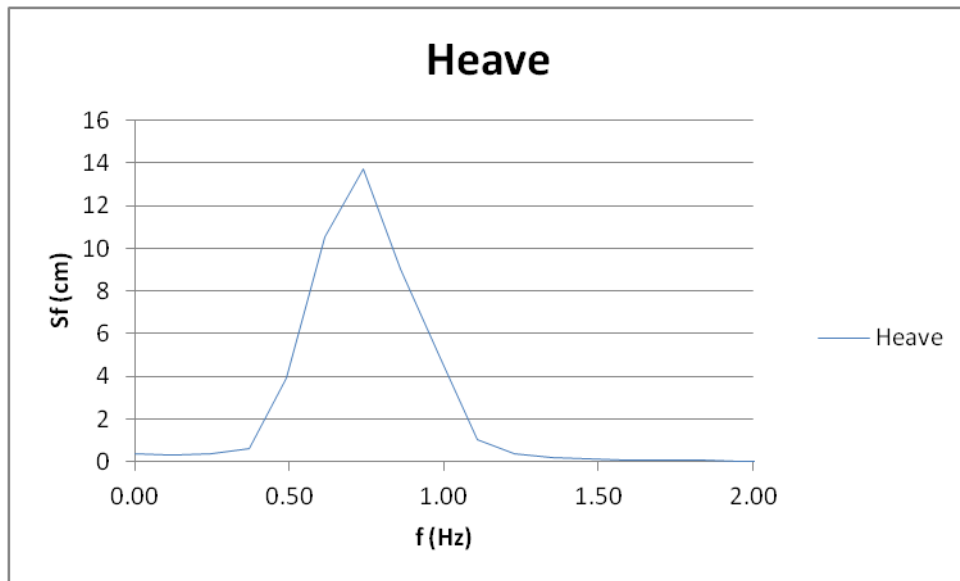
$$T_{p.theor.} = 2.03 \text{ s}$$

Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των θεωρητικών μεγεθών υπολογίζονται από τις σχέσεις (9) και (10):

$$a = 2.59\%$$

$$b = 0\%$$

Για την κατακόρυφη ανύψωση:



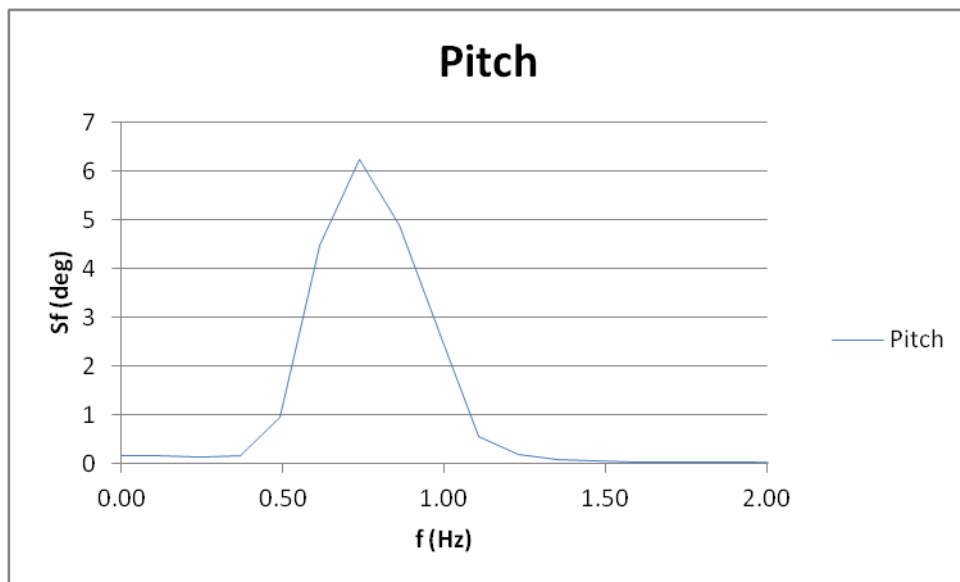
Διάγραμμα 6.2.1.1.14

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 2.381cm = 9.526cm$$

$$T_p = 1.35s$$

Για τον προνευτισμό :



Διάγραμμα 6.2.1.1.15

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$P_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.609cm = 6.434cm$$

$$T_p = 1.35s$$

6.2.1.II. Διαγωγή 1.0 μοίρας (trim 1.0 angle by stern),
όπου το πόδι του δυναμομέτρου έχει δεθεί στην ίσαλο πλεύσης του μοντέλου

6.2.1.II.i. Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό

Ο προσδιορισμός της τιμής της αντίστασης σε ήρεμο νερό, για συγκεκριμένη ταχύτητα, αποτελεί το πρώτο στάδιο για την εκτίμηση του ποσοστού της πρόσθετης αντίστασης παρουσία κυματισμών.

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα των τιμών της αντίστασης για την ταχύτητα $v=1.919$ m/s είναι τα εξής:

No of run	Rm (kg)
1	2.934
2	2.912
3	2.896
4	2.939
5	2.929
6	2.918
7	2.928
Average	2.922

Πίνακας 6.2.1.II.1

Η τιμή, λοιπόν, της αντίστασης για το ήρεμο νερό είναι η ακόλουθη:

$$R_{sw} = 2.922kg$$

6.2.1.II.ii. Μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5m$ και περίοδο $T=12s$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Στην ταχύτητα υπηρεσίας, $v=1.919$ m/s, μετρήθηκε η αντίσταση του μοντέλου σε φάσμα κυματισμών με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν.

Υπολογίζοντας την αντίσταση του μοντέλου για χρονική ιστορία του φάσματος τυχαίου κυματισμού ίση με 300s, είναι πλέον εφικτό να υπολογισθεί και το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασής του συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή της αντίστασης σε ήρεμο νερό.

Για τον υπολογισμό αυτό, ελήφθησαν συνολικά οι ακόλουθες δεκατρείς (13) μετρήσεις, όπως προέκυψαν από τη ρυμούλκηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή.

No of run	Rm (kg)
1	4.345
2	4.198
3	4.207
4	4.313
5	4.111
6	4.349
7	4.426
8	4.282
9	4.190
10	4.024
11	4.164
12	4.224
13	4.143
Average	4.229

Πίνακας 6.2.1.II.2

Η τιμή της αντίστασης σε τυχαίο κυματισμό είναι η ακόλουθη : $R_w = 4.229$

Από τη σχέση (4) υπολογίζεται ότι η τιμή της πρόσθετης αντίστασης είναι ίση με:

$$R_{aw} = 1.3068kg \text{ (8)}$$

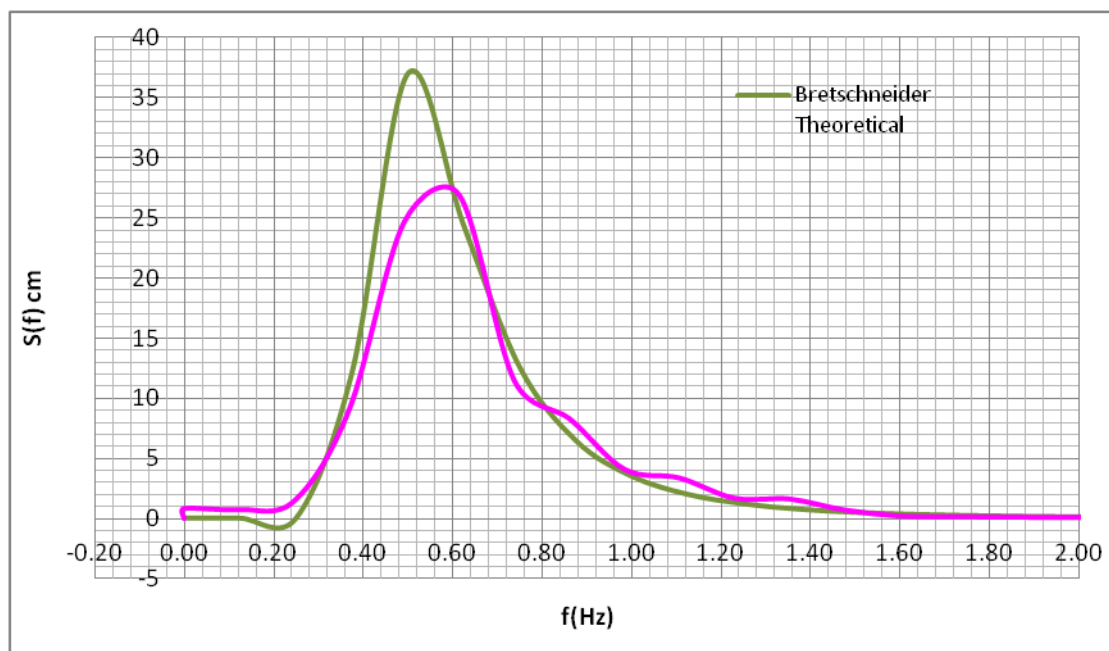
Το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμό επί της αντίστοιχης σε ήρεμο νερό υπολογίζεται ως εξής:

$$\lambda = 44.72\%$$

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform) για την ανάλυση των σημάτων της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού, της κατακόρυφης ανύψωσης

(heave) και του προνευτασμού (pitch), λαμβάνονται τα ακόλουθα διαγράμματα με τις σημαντικές τιμές τους.

Για την ανύψωση του κύματος (wave elevation) :



Διάγραμμα 6.2.1.11.1

Η σημαντική τιμή του ύψους κύματος και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 3.433 \text{ cm} = 13.73 \text{ cm}$$

$$T_p = 1.63 \text{ s}$$

Οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές είναι:

$$H_{s.theor.} = 14.29 \text{ cm}$$

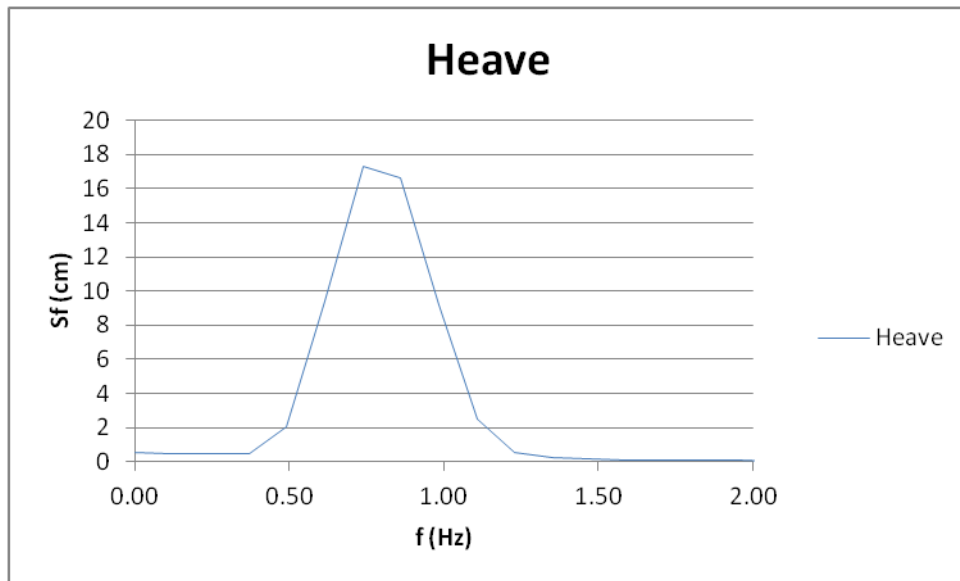
$$T_{p.theor.} = 2.03 \text{ s}$$

Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των θεωρητικών μεγεθών υπολογίζονται από τις σχέσεις (9) και (10):

$$a = -3.92\%$$

$$b = -19.7\%$$

Για την κατακόρυφη ανύψωση:



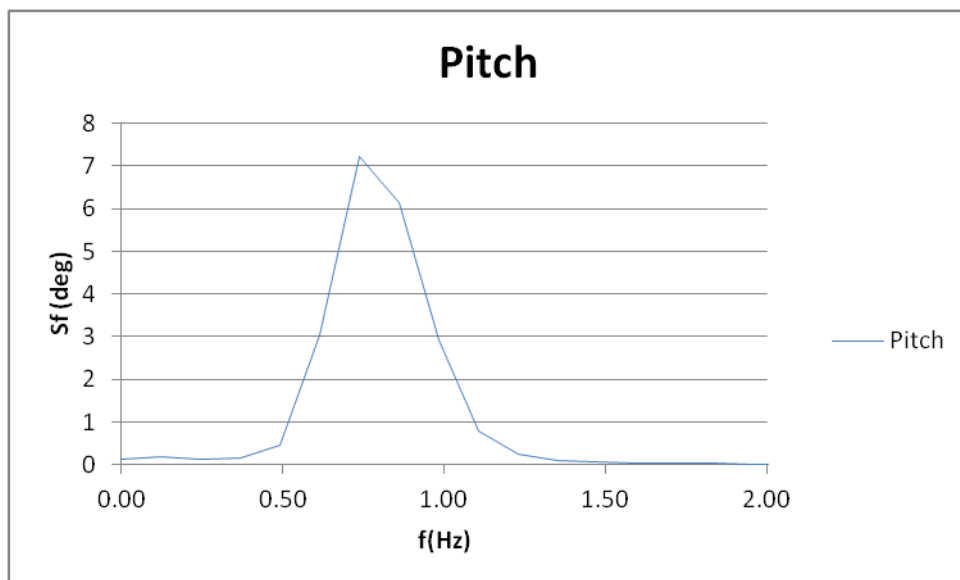
Διάγραμμα 6.2.1.11.2

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 2.723 \text{ cm} = 10.893 \text{ cm}$$

$$T_p = 1.35 \text{ s}$$

Για τον προνευτισμό :



Διάγραμμα 6.2.1.11.3

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$P_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.638 \text{ cm} = 6.551 \text{ cm}$$

$$T_p = 1.35 \text{ s}$$

6.2.1.III. Ισοβύθιστη κατάσταση (Even keel)

όπου το πόδι του δυναμομέτρου έχει δεθεί 10 cm υψηλότερα από την ίσαλο πλεύσης του μοντέλου

Ο προσδιορισμός της τιμής της αντίστασης σε ήρεμο νερό, για συγκεκριμένη ταχύτητα, αποτελεί το πρώτο στάδιο για την εκτίμηση του ποσοστού της πρόσθετης αντίστασης παρουσία κυματισμών.

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα των τιμών της αντίστασης για την ταχύτητα $v=1.919$ m/s είναι τα εξής:

6.2.1.III.i. Μέτρηση αντίστασης σε ήρεμο νερό

Ο προσδιορισμός της τιμής της αντίστασης σε ήρεμο νερό, για συγκεκριμένη ταχύτητα, αποτελεί το πρώτο στάδιο για την εκτίμηση του ποσοστού της πρόσθετης αντίστασης παρουσία κυματισμών.

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα των τιμών της αντίστασης για την ταχύτητα $v=1.919$ m/s είναι τα εξής:

Run No	Rm (kg)
1	2.695
2	2.704
3	2.701
4	2.657
5	2.660
6	2.723
7	2.698
average	2.691

Πίνακας 6.2.1.III.1

Η τιμή, λοιπόν, της αντίστασης για το ήρεμο νερό είναι η ακόλουθη:

$$R_{sw} = 2.6912kg$$

6.2.1.III.ii. Μέτρηση αντίστασης, ανύψωσης κύματος, κατακόρυφης ανύψωσης μοντέλου και προνευτασμού σε φάσμα Bretschneider με σημαντικό ύψος κύματος $H=5m$ και περίοδο $T=12s$, που αντιστοιχεί σε πραγματική κατάσταση θάλασσας.

Στην ταχύτητα υπηρεσίας, $v=1.919$ m/s, μετρήθηκε η αντίσταση του μοντέλου σε φάσμα κυματισμών με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν.

Υπολογίζοντας την αντίσταση του μοντέλου για χρονική ιστορία του φάσματος τυχαίου κυματισμού ίση με 300s, είναι πλέον εφικτό να υπολογισθεί και το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασής του συγκριτικά με την αντίστοιχη τιμή της αντίστασης σε ήρεμο νερό.

Για τον υπολογισμό αυτό, ελήφθησαν συνολικά οι ακόλουθες δεκατρείς (13) μετρήσεις, όπως προέκυψαν από τη ρυμούλκηση του μοντέλου στην πειραματική δεξαμενή.

Run No	Rm (kg)
1	4.013
2	3.831
3	3.724
4	4.025
5	3.679
6	3.938
7	4.215
8	4.238
9	3.572
10	3.494
11	3.708
12	3.869
13	3.839
average	3.857

Πίνακας 6.2.1.III.2

Η τιμή της αντίστασης σε τυχαίο κυματισμό είναι η ακόλουθη : $R_w = 3.857kg$

Από τη σχέση (4) υπολογίζεται ότι η τιμή της πρόσθετης αντίστασης είναι ίση με:

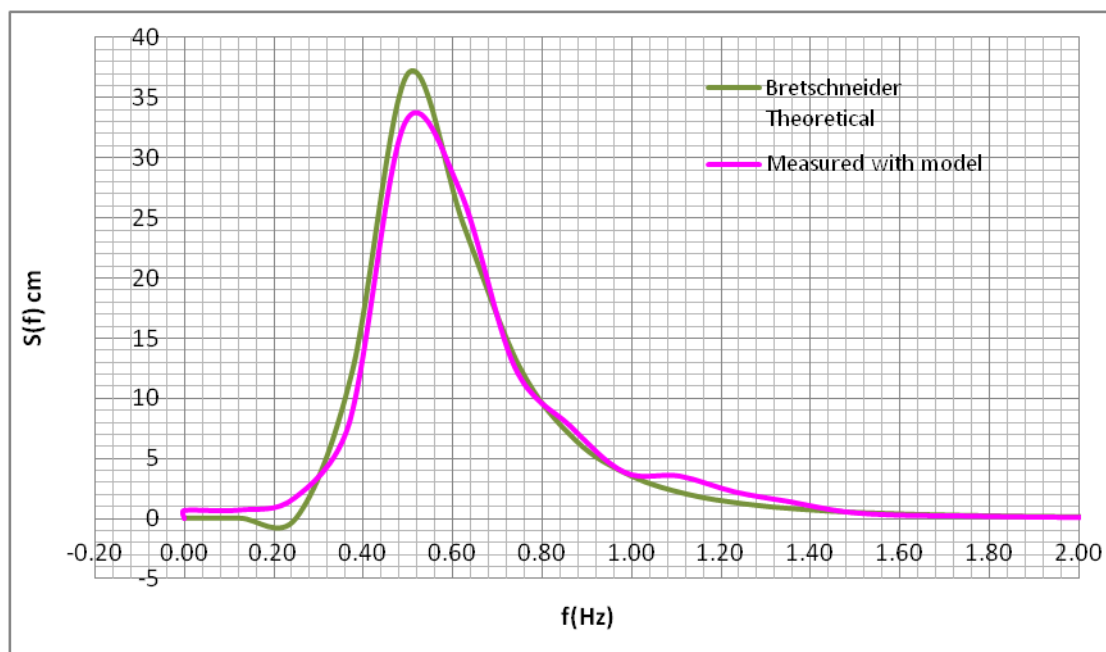
$$R_{aw} = 1.1661kg$$

Το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμό επί της αντίστοιχης σε ήρεμο νερό υπολογίζεται ως εξής:

$$\lambda = 43.33\%$$

Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο FFT (Fast Fourier Transform) για την ανάλυση των σημάτων της ανύψωσης του τυχαίου κυματισμού, της κατακόρυφης ανύψωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch), λαμβάνονται τα ακόλουθα διαγράμματα με τις σημαντικές τιμές τους.

Για την ανύψωση του κύματος (wave elevation) :



Διάγραμμα 6.2.1.III.1

Η σημαντική τιμή του ύψους κύματος και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 3.586 \text{ cm} = 14.34 \text{ cm}$$

$$T_p = 2.03 \text{ s}$$

Οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές είναι:

$$H_{s.theor.} = 14.29 \text{ cm}$$

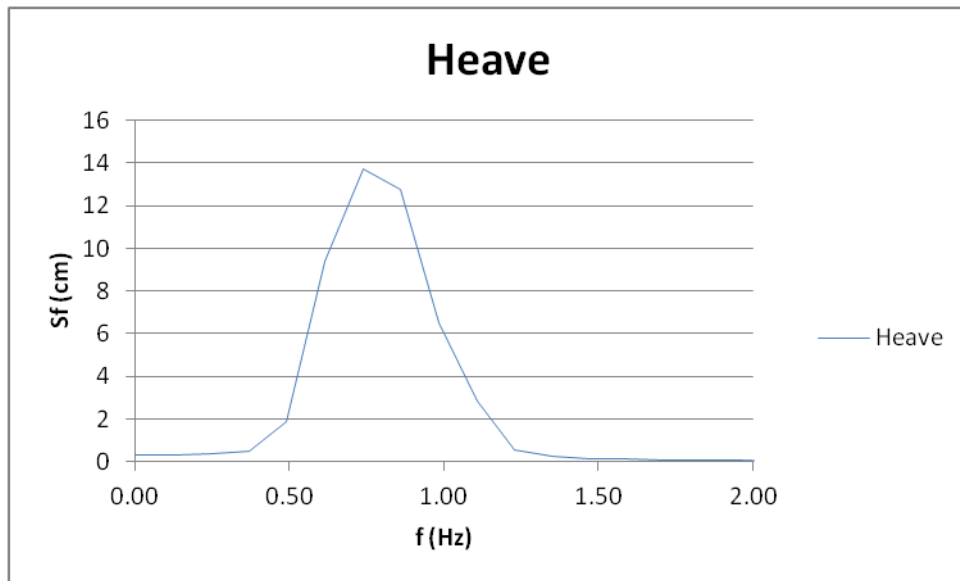
$$T_{p.theor.} = 2.03 \text{ s}$$

Οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων και των θεωρητικών μεγεθών υπολογίζονται από τις σχέσεις (9) και (10):

$$a = 0.35\%$$

$$b = 0\%$$

Για την κατακόρυφη ανύψωση :



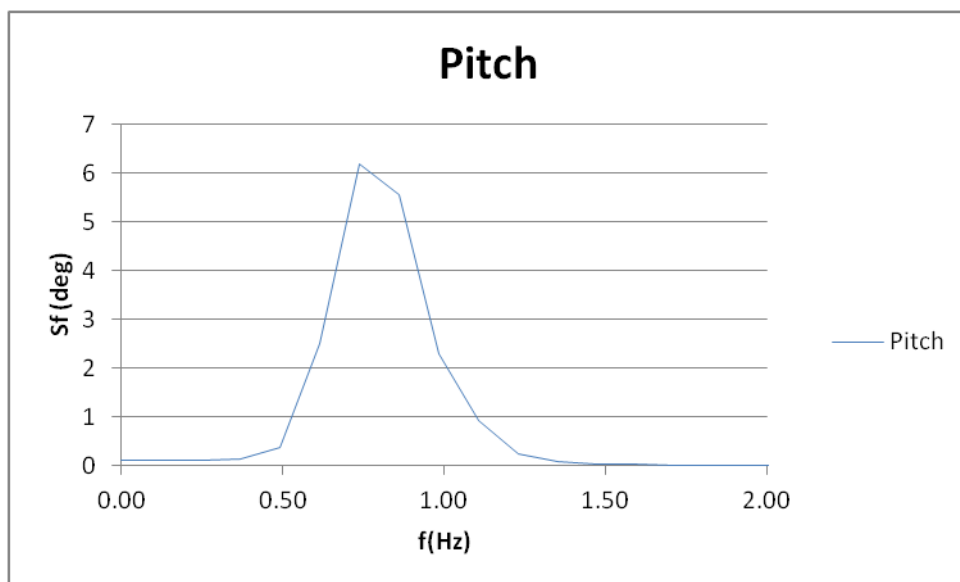
Διάγραμμα 6.2.1.III.2

Η σημαντική τιμή της κατακόρυφης ανύψωσης και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 2.485cm = 9.938cm$$

$$T_p = 1.35s$$

Για τον προνευτισμό :



Διάγραμμα 6.2.1.III.3

Η σημαντική τιμή του προνευτισμού και η φαινόμενη περίοδος είναι:

$$P_{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4 \cdot 1.518cm = 6.072cm$$

$$T_p = 1.35s$$

6.2.1.IV. Συμπεράσματα

- Για την ισοβύθιστη κατάσταση δοκιμών:
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.919$ m/s , η αντίσταση σε φάσμα τυχαίων κυματισμών αυξάνεται κατά 35.22% σε σύγκριση με την αντίσταση σε ήρεμο νερό.
 - ✓ Στις ίδιες συχνότητες, η τιμή του αδιάστατου συντελεστή C_{aw} παραμένει σχεδόν σταθερή, όπως αναμενόταν.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.919$ m/s , συνθέτοντας τις μετρούμενες τιμές της αντίστασης σε αρμονικούς κυματισμούς με τη χρήση του συντελεστή πρόσθετης αντίστασης εκτιμάται η τιμή της αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς μεγαλύτερη κατά 1.08% από τη μετρούμενη στο φάσμα τυχαίων κυματισμών.
 - ✓ Για να επιτευχθεί η ίδια τιμή της αντίστασης με το ήρεμο νερό, μειώνεται η ταχύτητα του προτύπου κατά 20.27% κατά τη μέτρηση της αντίστασης σε φάσμα τυχαίων κυματισμών.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.919$ m/s, η μετρούμενη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος είναι κατά 1.12% μεγαλύτερη από τη θεωρητική ενώ η μετρούμενη φαινόμενη περίοδος είναι κατά -1.48% μικρότερη από τη θεωρητική.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.53$ m/s, η μετρούμενη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος είναι κατά 2.59% μεγαλύτερη από τη θεωρητική ενώ η μετρούμενη φαινόμενη περίοδος συμπίπτει με τη θεωρητική.
- Για την κατάσταση δοκιμών έμπρυμνης διαγωγής 1.0 μοιρών:
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.919$ m/s , η αντίσταση σε φάσμα τυχαίων κυματισμών αυξάνεται κατά 44.72% σε σύγκριση με την αντίσταση σε ήρεμο νερό.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.919$ m/s , η μετρούμενη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος είναι κατά 3.92% μικρότερη από τη θεωρητική ενώ η μετρούμενη φαινόμενη περίοδος είναι κατά 19.70% μικρότερη από τη θεωρητική.

- Για την ισοβύθιστη κατάσταση δοκιμών, όπου το πόδι του δυναμομέτρου έχει δεθεί κατά 10cm υψηλότερα από την ίσαλο πλεύσης:
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.919\text{m/s}$, η αντίσταση σε φάσμα τυχαίων κυματισμών αυξάνεται κατά 43.33 % σε σύγκριση με την αντίσταση σε ήρεμο νερό.
 - ✓ Στην ταχύτητα $v=1.919\text{m/s}$, η μετρούμενη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος είναι κατά 0.35% μεγαλύτερη από τη θεωρητική ενώ η μετρούμενη φαινόμενη περίοδος συμπίπτει με τη θεωρητική.

- Συγκρίσεις μεταξύ των τριών καταστάσεων δοκιμών:
 - ✓ Στο ήρεμο νερό, η τιμή της αντίστασης στην κατάσταση έμπρυμνης διαγωγής 1.0 μοιρών είναι κατά 5.49 % μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην ισοβύθιστη κατάσταση.
 - ✓ Στο ήρεμο νερό, η τιμή της αντίστασης στην ισοβύθιστη κατάσταση είναι κατά 2.94 % μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην ισοβύθιστη κατάσταση δοκιμών όπου το πόδι του δυναμομέτρου έχει δεθεί κατά 10cm υψηλότερα από την ίσαλο πλεύσης.
 - ✓ Στο φάσμα τυχαίων κυματισμών, η τιμή της αντίστασης στην κατάσταση έμπρυμνης διαγωγής 1.0 μοιρών είναι κατά 12.92 % μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην ισοβύθιστη κατάσταση.
 - ✓ Στο φάσμα τυχαίων κυματισμών, η τιμή της αντίστασης στην ισοβύθιστη κατάσταση δοκιμών όπου το πόδι του δυναμομέτρου έχει δεθεί κατά 10cm υψηλότερα από την ίσαλο πλεύσης είναι κατά 2.99 % μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην ισοβύθιστη κατάσταση.

- Γενικό σχόλιο:
 - ✓ Για τις μετρούμενες και τις θεωρητικές τιμές των φασμάτων παρατηρούνται αποκλίσεις, οι οποίες ενδέχεται να οφείλονται στο μέγεθος της χρονικής ιστορίας που ελήφθησαν οι μετρήσεις.

7. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Σκοπός της εργασίας ήταν η πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς προτύπων πλοίου σε τυχαίους κυματισμούς με έμφαση στον προσδιορισμό της πρόσθετης αντίστασής τους.

Όπως ήταν αναμενόμενο, η διαγωγή επιδρά στην αντίσταση του πλοίου τόσο στο ήρεμο νερό όσο και στους κυματισμούς.

Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι το ποσοστό της πρόσθετης αντίστασης στις καταστάσεις φόρτωσης με έμπρυμνη διαγωγή είναι αισθητά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό στις ισοβύθιστες καταστάσεις φόρτωσης.

Παράλληλα, χρησιμοποιώντας υπάρχουσα μεθοδολογία, έγινε εκτίμηση της πρόσθετης αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς κατόπιν συνθέσεως της αντίστασης όπως προκύπτει από τους ημιτονικούς κυματισμούς. Τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας μεθοδολογίας συγκλίνουν με τις μετρήσεις της πρόσθετης αντίστασης στα φάσματα τυχαίων κυματισμών.

Ειδικότερα, θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι ο τρόπος πρόσδεσης του δυναμομέτρου στο πρότυπο πλοίου επιδρά στις τιμές της αντίστασης τόσο στο ήρεμο νερό όσο και στο φάσμα τυχαίων κυματισμών.

Επομένως, θα μπορούσε να θεσπιστεί ως στόχος η βέλτιστη κατάσταση πλεύσης στην ταχύτητα υπηρεσίας για την εκάστοτε κατάσταση φόρτωσης προκειμένου να επιτευχθεί η ελάχιστη πρόσθετη αντίσταση στους κυματισμούς.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **F. Pérez Arribas**, «Some methods to obtain the added resistance of a ship advancing in waves», 2006
- [2] **GUO Bing-jie, STEEN Sverre**, «Evaluation of added resistance of KVLCC2 in short waves», 2011
- [3] **Ιακωβάτος Μάριος**, : «Επίδραση της διαγωγής διαφόρων μοντέλων και πλοίων», Αθήνα 2011
- [4] **ITTC**, Recommended Procedures and Guidelines, Testing and Extrapolation Methods, Loads and responses, Sea Keeping, Sea Keeping Experiments, 7.5-02 07-02.1 , 2005
- [5] **ITTC**, Recommended Procedures, Prediction of Power Increase in Irregular Waves from Model Test, 7.5-02 -07-02.2, 2011
- [6] **Joncquez S. A., Andersen P.; Bingham H. B.**, «A Comparison of Methods for Computing the Added Resistance», 2012
- [7] **P. A. WILSON**, «A review of the methods of calculation of added resistance for ships in a seaway» , 1985
- [8] **Shukui Liu, Apostolos Papanikolaou, George Zaraphonitis**, «Prediction of added resistance of ships in waves», 2011
- [9] **Πολίτης Γ.Κ.**,: «Αντίσταση και Πρόωση πλοίου», Σημειώσεις μαθήματος, Αθήνα 2008.
- [10] **Τζαμπίρας Γ.Δ.**,: «Υδροστατική και Ευστάθεια Πλοίου Ι, Τόμος Α» , Σημειώσεις μαθήματος, Αθήνα 2007.
- [11] **ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΛΟΙΟΥ**, Κύματα Ανέμου και Στοιχεία Θεωρίας Στοχαστικών Διαδικασιών, Ε.Μ.Π., 2004
- [12] **Walter H. Michel**, «Sea Spectra Simplified», 1968