



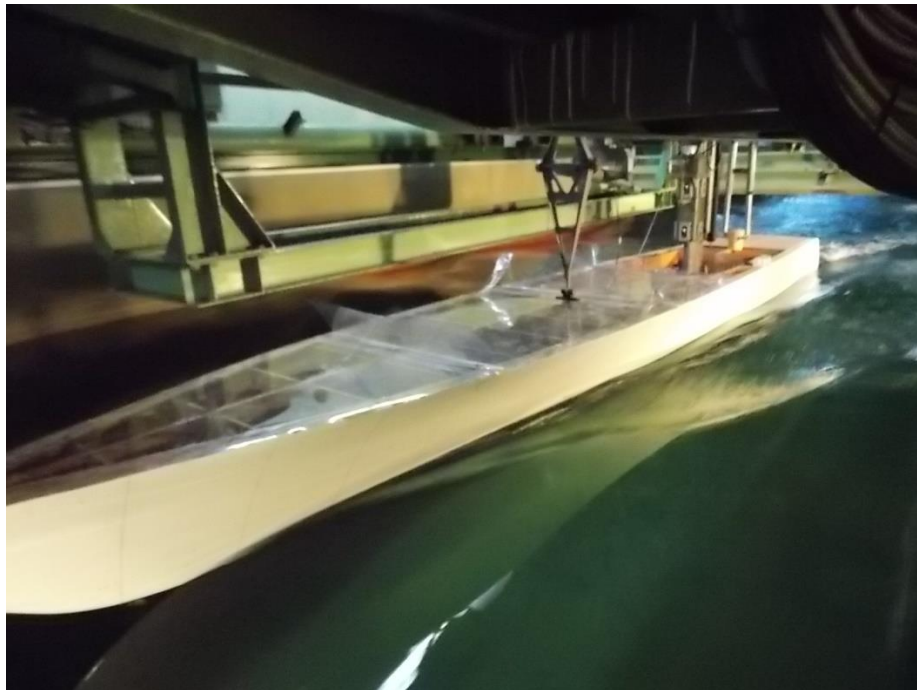
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΑΧΥΠΛΟΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ $L/B=7$ ΜΕ ΔΙΠΛΗ ΑΚΜΗ ΣΕ ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ**



**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ: ΜΙΚΕΛΗΣ ΝΙΚΗΤΑΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ :ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ ΓΡΗΓΟΡΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ 2019**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	3
1.1 Γενικά.....	3
1.2 Είδη κινήσεων.....	3
1.3 Βασική Θεωρία Κυματισμών.....	4
1.3.1 Γενικά.....	4
1.4 Ονοματολογία.....	5
1.5 Αρμονικοί κυματισμοί.....	6
1.6 Ανεμογενείς κυματισμοί και στοιχεία θεωρίας στοχαστικών διαδικασιών.....	7
1.6.1 Γενικά.....	7
1.6.2 Τα φάσματα των κυμάτων ανέμου.....	8
2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ – ΣΕΙΡΑ ΝΤΥΑ.....	12
2.1 Γενικά.....	12
2.2 Συστηματική σειρά ΝΤΥΑ.....	14
3. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ/ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	19
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	21
4.1 Πειραματική διάταξη.....	21
4.2 Προετοιμασία πειράματος.....	24
4.3 Υπολογισμός αποφόρτισης.....	27
4.4 Βαθμονόμηση μετρητικών διατάξεων.....	28
4.5 Τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων.....	30
4.6 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων.....	31
5. ΔΟΚΙΜΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	32
6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	37
6.1 Φάσματα κυματισμών αποκρίσεων.....	37
6.2 Τιμές RMS των αποτελεσμάτων.....	52
6.3 Επίδραση του εκτοπίσματος στις αποκρίσεις με σταθερό L/B=7.....	57
6.4 Επίδραση του λόγου L/B στις αποκρίσεις με σταθερό $CDL = 1.61$ .....	62
6.5 Σύγκριση τιμών αποκρίσεων που προκύπτουν μέσω πειραμάτων και με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών.....	67
ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	79

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Κατά τη σχεδίαση ενός ταχύπλοου σκάφους, η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς σε θαλάσσιους κυματισμούς αποτελεί απαραίτητη διαδικασία για να διαπιστωθεί η ικανότητα του για αντοχή της κατασκευής του, για την άνεση και την ασφάλεια των επιβαινόντων, για τη διατήρηση της υπηρεσιακής ταχύτητας, για ασφαλή πλεύση κ.ο.κ.

Είναι σημαντικό λοιπόν να εκτιμηθεί η καταλληλότητα του κάθε ταχύπλοου σκάφους, και εν προκειμένω των σκαφών της συστηματικής σειράς του Ε.Μ.Π., σε διαφορετικές καταστάσεις θάλασσας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιλέγει σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή (κατάσταση θάλασσας) ποια γάστρα με ποια χαρακτηριστικά είναι η πλέον κατάλληλη και θα αποφέρει την καλύτερη δυναμική συμπεριφορά.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην Πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Το μοντέλο υπό κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στη συστηματική σειρά ταχυπλόων σκαφών του Ε.Μ.Π., ενώ οι τυχαίοι κυματισμοί που μελετήθηκαν προσομοιώνουν πραγματικές καταστάσεις θάλασσας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κύριο Γρηγορόπουλο για την παραχώρηση του παρόντος θέματος και την υποστήριξη του σε όλη τη διαδικασία της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες στους κυρίους Γιάννη Τραχανά μέλος Ε.Τ.Ε.Π., Λιαροκάπη Δημήτρη μέλος Ε.Τ.Ε.Π. και Κασάπη Φώτη μέλος Ε.Δ.Ι.Π. για τη συνδρομή τους με πολλούς τρόπους στην υλοποίηση αυτής της εργασίας και που με τις προσπάθειες τους κρατάνε ζωντανή την πειραματική δεξαμενή.

## 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 1.1 Γενικά

Στο θεωρητικό μέρος της παρούσας διπλωματικής Εργασίας δίνονται κάποια στοιχεία και λεπτομέρειες για το είδος των κινήσεων ενός σκάφους στο θαλάσσιο περιβάλλον, για το είδος των κυμάτων που εμφανίζονται στη θάλασσα καθώς και το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο έχουν όλα αυτά βασιστεί.

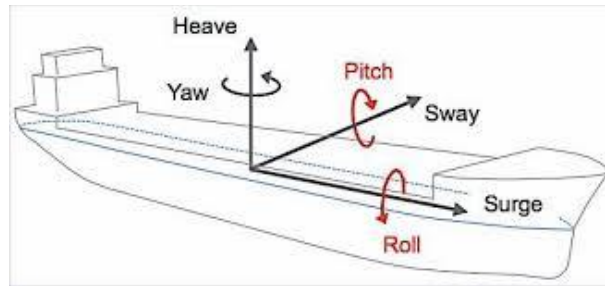
### 1.2 Είδη κινήσεων

Η δυναμική συμπεριφορά των ταχύπλων σκαφών σε κυματισμούς αποτελεί ένα αρκετά σύνθετο και πολύπλοκο φαινόμενο και αυτό διότι το σκάφος έχει 6 βαθμούς ελευθερίας κινήσεων με αποτέλεσμα οι διεγείρουσες δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό λόγω των κυματισμών να το εξαναγκάζουν σε πολλές κινήσεις ταυτοχρόνως. Οι βαθμοί αυτοί ελευθερίας  $\xi_i = \xi_i(t)$ ,  $i=1 \dots 6$ , είναι οι παρακάτω :

Κίνηση	Ονομασία	
ξ1	Διαμήκης οριζόντια ταλάντωση	Surge
ξ2	Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση	Sway
ξ3	Κατακόρυφη ταλάντωση	Heave
ξ4	Ταλάντωση περί τον διαμήκη άξονα – Διατοιχισμός	Roll
ξ5	Ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα - Πρόνευση	Pitch
ξ6	Ταλάντωση περί τον κατακόρυφο άξονα	Yaw

*Πίνακας 1.2.1 Βαθμοί ελευθερίας σκάφους*

Οι κινήσεις που εξετάζονται κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς για την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός σκάφους είναι το Pitch και το Heave καθώς και οι παραγόμενες κατάκόρυφες επιταχύνσεις και αυτό διότι οι τιμές αυτών των κινήσεων επιδρούν σημαντικά σε τυχαία συμβάντα (φαινόμενα σφυρόκρουσης, μετακίνηση φορτίου, ανάδυση έλικας, έλλειψη ευστάθειας, κακή πηδαλιουχία, διαβροχή καταστρώματος κ.ά.) που με τη σειρά τους επηρεάζουν την άνεση των επιβατών και την ασφάλεια του πλοίου.



Εικόνα 1.2.1: Βαθμοί ελευθερίας πλοίου.

### 1.3 Βασική Θεωρία Κυματισμών

#### 1.3.1 Γενικά

Οι κυματισμοί της θάλασσας, που είναι υπεύθυνοι για τη διέγερση της δυναμικής συμπεριφοράς των πλοίων, δημιουργούνται από τον άνεμο. Το μέγεθος των κυματισμών, η διεύθυνση μετάδοσής τους καθώς και η συνάρτηση πυκνότητας φάσματος εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες:

- Την ταχύτητα του διεγείροντος ανέμου (wind speed)
- Τη διάρκεια πνοής του διεγείροντος ανέμου (wind duration)
- Την ελεύθερη έκταση της επιφάνειας της θάλασσας πάνω στην οποία μπορούν να αναπτυχθούν κυματισμοί (wave fetch)

Ο μηχανισμός παραγωγής κυμάτων ανέμου καθώς και η αποτύπωση του πλήρους φάσματος ενός τέτοιου κυματισμού είναι κάτι το εξαιρετικά δύσκολο και περίπλοκο, καθώς η μορφολογία της επιφάνειας της θάλασσας στην οποία κινούνται τα διάφορα σκάφη χαρακτηρίζεται από μεγάλη αταξία και αστάθεια ως προς το είδος των κυμάτων. Αν δοκιμάσει κανείς να καταγράψει τα θαλάσσια κύματα θα παρατηρήσει ακανόνιστη και κυρίως **τυχαία** αλληλουχία κορυφών και κοιλάδων.

Έτσι, ο μόνος γνωστός τρόπος πλήρους στατιστικής περιγραφής αυτών των τυχαίων διεγέρσεων, εφόσον μία ντερτεμινιστική διαδικασία αποκλείεται, είναι η θεωρία στοχαστικών διαδικασιών που προέκυψε ως επέκταση της θεωρίας των πιθανοτήτων. Σε αυτό το κλίμα λοιπόν έχουν διατυπωθεί και αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα μελέτης αυτών των τυχαίων κυματισμών τα οποία βασίζονται στους αρμονικούς κυματισμούς. Τα βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων αυτών αναλύονται παρακάτω.

Πριν από την ανάλυση αυτή όμως υπενθυμίζονται οι συμβολισμοί που θα χρησιμοποιηθούν στην ενότητα αυτή.

#### 1.4 Ονοματολογία

- $L_{OA}$ : ολικό μήκος [m]
- $L_{WL}$ : μήκος ισάλου [m]
- $B$ : μέσο πλάτος στην άνω ακμή [m]
- $\Delta$ : εκτόπισμα [tn]
- $\nabla$ : όγκος εκτοπίσματος [m<sup>3</sup>]
- LCG: διαμήκης θέση κέντρου βάρους από μέση τομή, θετική πρώραθεν [m]
- L/B: λόγος ολικού μήκους προς μέγιστο πλάτος
- $F_n = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L_{WL}}}$ , αριθμός Froude
- $C_{DL} = \frac{\nabla}{(0.1 \cdot L_{WL})^3}$ , συντελεστής εκτοπίσματος
- WS: βρεχόμενη επιφάνεια [m<sup>2</sup>]
- V: ταχύτητα [m/sec]
- T: μέσο βυθισμα [m]
- $\rho$ : πυκνότητα του νερού [kg/m<sup>3</sup>]
- g: 9.81 m/sec<sup>2</sup>, επιτάχυνση της βαρύτητας
- S( $\omega$ ): συνάρτηση πυκνότητας φάσματος ή φάσμα ισχύος
- $\omega_p$ : κυκλική συχνότητα κορυφής του φάσματος [rad/sec]
- $H^{1/3}$ : σημαντικό ύψος κύματος που είναι η μέση τιμή του 1/3 των μεγαλύτερων υψών κύματος [m]
- f: συχνότητα κύματος [Hz]
- $\zeta_0$ : πλάτος ανύψωσης κυματισμού
- $\lambda$ : μήκος κύματος [m]
- $k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$  κυματικός αριθμός
- $\omega^2 = g \cdot k$ , εξίσωση διασποράς
- $T_p = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_p}$ , περίοδος κορυφής κύματος [sec]
- $T_p' = \frac{T_p}{\sqrt{\frac{L_{BP}}{g}}}$ , αδιάστατη περίοδος
- $(m_0)^{1/2}$ : η μέση τετραγωνική τιμή ή rms (root mean square)
- RAO: συντελεστής απόκρισης (Response Amplitude Operator)
- $S(\omega)_{\text{response}} = RAO^2 \cdot S(\omega)_{\text{seastate}}$  αρχή γραμμικής υπέρθεσης

### 1.5 Αρμονικοί κυματισμοί

Ένας αρμονικός κυματισμός μπορεί να περιγραφεί από την περίοδο  $T$ , τη συχνότητα  $f$ , το μήκος κύματος  $\lambda$  και το ύψος κύματος  $H$ . Για τη συχνότητα και την περίοδο ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$f = \sqrt{\frac{g}{2 \cdot \pi \cdot \lambda}} \text{ [Hz]}$$

$$T = \frac{1}{f} \text{ [sec]}$$

Θεωρούμε ότι το σύστημα μοντέλο – πλοίο είναι γραμμικό και η απόκριση του πλοίου εκφράζεται με τη σχέση:

$$X = X_a \cdot \cos(\omega_e \cdot t + \varepsilon_x)$$

Τότε, το πηλίκο του πλάτους της απόκρισης  $X_a$  σε αρμονικούς κυματισμούς προς το πλάτος της ανύψωσης  $\zeta_a$  των κυματισμών, αποτελεί τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος  $R_x$ , δηλαδή:

$$R_x = \frac{X_a(\omega)}{\zeta_a(\omega)}$$

Η αδιαστατοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων γίνεται με τη χρήση των συντελεστών απόκρισης RAO (Response Amplitude Operators) σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις:

$$RAO_{heave} = \frac{\xi_o}{\zeta_o}$$

$$RAO_{pitch} = \frac{\lambda \cdot \vartheta}{360 \cdot \zeta_o}$$

$$RAO_{accel} = \frac{L_{WL} \cdot \alpha}{\zeta_o \cdot g}$$

όπου,

$\xi_o$  : πλάτος κατακόρυφης απόκρισης

$\zeta_o$  : πλάτος ανύψωσης κυματισμού

$\lambda$  : μήκος κύματος

$\theta$  : πλάτος δυναμικής διαγωγής

$\alpha$  : πλάτος των επιταχύνσεων

$g$  : επιτάχυνση της βαρύτητας

## 1.6 Ανεμογενείς κυματισμοί και στοιχεία θεωρίας στοχαστικών διαδικασιών

### 1.6.1 Γενικά

Ο άνεμος κατά τη διάρκεια που πνέει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας ή γενικότερα πάνω από κάθε υδάτινη επιφάνεια μεταφέρει στο νερό ένα μέρος από την ενέργειά του. Η μεταφορά αυτή ενέργειας γίνεται μέσω συνεκτικών δυνάμεων και δυνάμεων κάθετης πίεσης στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο ρευστών και έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία επιφανειακών κυματισμών στο νερό.

Σε αντίθεση προς την εύκολη περιγραφή της επιφάνειας ενός απλού κύματος βαρύτητας, η μορφή της επιφάνειας των κυμάτων ανέμου δεν παρουσιάζει καμία κανονικότητα, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς τοπικά και χρονικά, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να περιγράψουμε με τις συνηθισμένες αναλυτικές και προσδιοριστικές μεθόδους τα κύματα ανέμου (wind waves).

Συναρτήσεις του χρόνου (time series) που παρουσιάζουν την παραπάνω έλλειψη κάθε κανονικότητας στη μορφή τους, ονομάζουμε στοχαστικές διαδικασίες (stochastic processes). Μια βαθύτερη έννοια των στοχαστικών διαδικασιών είναι ότι προκειμένου κανείς να τις περιγράψει θα πρέπει να θεωρήσει την ολότητα των πιθανών μορφών τους, που θα μπορούσαν να παραχθούν κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Αν εκτελέσουμε το ίδιο ακριβώς πείραμα πολλές φορές και τα αποτελέσματα είναι ακριβώς επαναλήψιμα, λέμε ότι πρόκειται για προσδιοριστική διαδικασία (deterministic process). Αν όμως, όπως συμβαίνει με τα κύματα ανέμου, τα αποτελέσματα των πειραμάτων είναι διαφορετικής μορφής, ενώ όλες οι συνθήκες που βρίσκονται κάτω από τον έλεγχο του πειραματιστή παραμένουν σταθερές, λέμε ότι πρόκειται για στοχαστική διαδικασία. Στην περίπτωση αυτή δεν είναι τόσο χρήσιμη η μορφή του αποτελέσματος ενός πειράματος, όσο η στατιστική περιγραφή των αποτελεσμάτων όλων των πιθανών πειραμάτων.

Ο μόνος γνωστός τρόπος πλήρους στατιστικής περιγραφής τέτοιων τυχαίων διεγέρσεων, είναι η θεωρία στοχαστικών διαδικασιών, που προέκυψε σαν επέκταση της θεωρίας των πιθανοτήτων και εφαρμόζεται στη μελέτη όλων των πρακτικών προβλημάτων που περιέχουν τέτοιες τυχαίες διεγέρσεις .



Η βασική έννοια μιας στοχαστικής διαδικασίας  $f(t)$  είναι ότι πρέπει να περιγραφεί όχι μόνο η χρονική ιστορία ενός δείγματός της, αλλά όλη η οικογένεια ή ολότητα των χρονικών ιστοριών των πιθανών πειραμάτων που χαρακτηρίζουν τη στοχαστική διαδικασία. Το κάθε μέλος αυτής της οικογένειας ονομάζεται συνάρτηση-δείγμα.

Προκειμένου να μελετηθούν οι κυματισμοί αυτοί προσομοιώνονται στη βραχυχρόνια θεώρηση με στάσιμες και κανονικές στοχαστικές διαδικασίες. Το μοντέλο που χρησιμοποιούμε για να μελετήσουμε την ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας είναι το μοντέλο των *Longuet-Higgins*. Η κεντρική ιδέα αυτού του μοντέλου είναι ότι η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας μπορεί να θεωρηθεί ότι παράγεται από την υπέρθεση άπειρων απλών μικρών κυμάτων βαρύτητας το καθένα από τα οποία έχει σταθερό πλάτος ταλάντωσης  $C_n$ , μια σταθερή συχνότητα  $\omega_n$  και ένα σταθερό κυματικό αριθμό  $k_n$  αλλά με τυχαίες διαφορές γωνιών φάσεων.

### 1.6.2 Τα φάσματα των κυμάτων ανέμου

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει να ερμηνευθεί ο μηχανισμός παραγωγής κυμάτων ανέμου. Οι διάφορες θεωρίες που διατυπώθηκαν προσπαθούν αφ' ενός να δώσουν μία φυσική ερμηνεία στο μηχανισμό μεταβίβασης ενέργειας από τον άνεμο στον κυματισμό, αφ' ετέρου να ερμηνεύσουν τις πολυπληθείς ωκεανογραφικές πειραματικές μετρήσεις προσπαθώντας παράλληλα να λάβουν υπόψη την πρόδηλη εξάρτηση των κυμάτων ανέμου από τους τρεις παραπάνω παράγοντες.

Οι φυσικοί κυματισμοί έχουν κοντές κορυφές (*short-crested seas*) σαν αποτέλεσμα του συνδυασμού κυματισμών από διάφορες διευθύνσεις. Στην περίπτωση αυτή η συνάρτηση πυκνότητας φάσματος θα εξαρτάται και από τη γωνία διεύθυνσης των κυματισμών και θα είναι της μορφής  $S(\omega, \theta)$ . Αποδεικνύεται ότι η ολική ενέργεια ενός οιοδήποτε κυματικού πεδίου, ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$E = \rho \cdot g \cdot \bar{\zeta}^2 = \rho \cdot g \cdot \int_0^{2\pi\infty} \int_0 \omega \cdot S(\omega, \theta) d\omega d\theta$$

Τα γενικά αυτά φάσματα  $S(\omega, \theta)$  είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν και να αναλυθούν. Επιπλέον, τα πλοία καταπονούνται εν γένει περισσότερο μέσα σε κυματισμούς μιας περίπου διεύθυνσης. Έτσι, τα φάσματα των κυματισμών της θάλασσας μετρούνται σε ένα μόνο σημείο και θεωρούνται σε συνάρτηση μόνο της συχνότητας. Στην περίπτωση αυτή οι κυματισμοί έχουν σχετικά μακριές κορυφές (*long-crested seas*) και για τους αναλυτικούς υπολογισμούς θεωρούνται σαν διδιάστατοι, δηλαδή με άπειρο πλάτος. Η συνάρτηση πυκνότητας φάσματος σε αυτή την περίπτωση είναι της μορφής  $S(\omega)$  και η ολική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση:

$$E = \rho \cdot g \cdot \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

Με άλλα λόγια το Φάσμα περιγράφει την **κατανομή ενέργειας στις επιμέρους αρμονικές** σύμφωνα με το μοντέλο που αναφέραμε παραπάνω. Η συχνότητα που αντιστοιχεί στην **υψηλότερη φασματική τιμή** είναι και η συχνότητα όπου η διέγερση ή η απόκριση **αποδίδει ή απορροφά την περισσότερη ενέργεια**. Για μια μεγαλύτερη εμβάθυνση στις ιδιότητες των φασμάτων και για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε διάφορα φάσματα μεταξύ τους, ορίζουμε τις ροπές  $m_n$  του φάσματος  $S(\omega)$  μέσω των οποίων μπορούμε να εκφράσουμε όλα τα στατιστικά μεγέθη των κυματισμών:

Η νιοστή ροπή της  $S(\omega)$  είναι:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega$$

Η μηδενική ροπή  $m_0$ , δηλαδή το εμβαδόν κάτω από την  $S(\omega)$  είναι η διακύμανση  $\sigma^2$  των κυματισμών:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \sigma^2$$

Σχετικά με το πλάτος της καμπύλης της συνάρτησης πυκνότητας φάσματος διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

#### Διαδικασίες στενής λωρίδας

Η μορφή του φάσματος των διαδικασιών στενής λωρίδας παρουσιάζει μέγιστο σε κάποια συχνότητα  $\omega_0$  και η συνολική επιφάνεια του φάσματος, η «ενέργεια» της διαδικασίας, είναι συγκεντρωμένη κοντά σ' αυτή τη συχνότητα.

#### Διαδικασίες ευρείας λωρίδας

Η συνολική επιφάνεια του φάσματός εξαπλώνεται σε μια πλατειά περιοχή συχνοτήτων.

Ένα μέτρο του μέσου πλάτους της  $S(\omega)$  είναι ο συντελεστής πλάτους φάσματος  $\epsilon$ . Οι συνηθισμένες φυσικές στοχαστικές διαδικασίες έχουν ενδιάμεσες τιμές (μεταξύ 0 και 1) του συντελεστή πλάτους φάσματος και οι θαλάσσιοι κυματισμοί καθώς και οι αποκρίσεις του πλοίου τείνουν προς διαδικασίες στενής λωρίδας.

Σχετικά με την εξάρτηση της  $S(\omega)$  από τη χρονική διάρκεια πνοής του ανέμου, διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- Πλήρως αναπτυγμένες θάλασσες (fully developed seas): Όταν ο άνεμος έχει πνεύσει σταθερός και ανεμπόδιστος για μακρύ χρονικό διάστημα, και έχουμε φτάσει σε μία κατάσταση ισορροπίας.
- αναπτυσσόμενες θάλασσες (developing seas): Όταν ο άνεμος έχει πνεύσει για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα.
- αποσβενόμενες θάλασσες (decaying seas): Όταν έχει παύσει ή περιοριστεί η ταχύτητα του ανέμου, οπότε η ενέργεια των κυματισμών καταστρέφεται βαθμιαία λόγω συνεκτικών δυνάμεων.

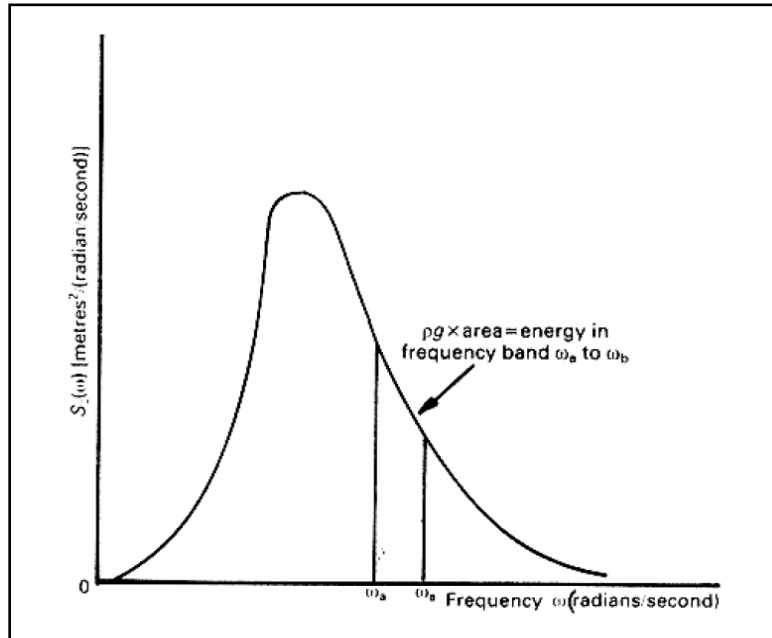
Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων των φασμάτων των κυματισμών, σε συνδυασμό με τις σχετικές θεωρίες για τη μεταφορά ενέργειας από τον άνεμο προς το νερό, έχουν προκύψει αναλυτικά μοντέλα για τα φάσματα των θαλάσσιων κυματισμών. Τα μοντέλα αυτά δίνουν μέσες τιμές για τα φάσματα των καταστάσεων θάλασσας (sea state) συναρτήσει της πραγματικής ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή της ταχύτητας έξω από το οριακό στρώμα. Σήμερα το σχεδόν αποκλειστικά χρησιμοποιούμενο μοντέλο για τα φάσματα των θαλάσσιων κυματισμών είναι το μοντέλο των Pierson-Moskowitz.

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί που προκαλεί ο άνεμος είναι μόνο μία από τις αιτίες παραμόρφωσης της επιφάνειας της θάλασσας. Άλλοι κυματισμοί οφείλονται σε φαινόμενα βαρύτητας και περιστροφής της γης (παλίρροιες, άμπωτης και πλημμύρες), σε σεισμούς (tsunamis) και γεωφυσικά φαινόμενα. Επειδή όμως οι συχνότητες των θαλάσσιων κυματισμών που δεν προκαλούνται άμεσα από τον άνεμο είναι πολύ μικρές, το πλοίο αποκρίνεται ψευδοστατικά (quasi-static) σ' αυτούς και συνεπώς οι κυματισμοί αυτοί δεν προκαλούν δυναμική συμπεριφορά του πλοίου. Από την πλευρά των μεγάλων συχνοτήτων έχουμε τα τριχοειδή κύματα (capillary waves) που προκαλούνται όταν ο άνεμος αρχίζει να φυσά πάνω από μία ήρεμη έκταση και στο σχηματισμό τους παίζει ρόλο η επιφανειακή τάση. Επειδή έχουν πολύ μικρό ύψος και μήκος δεν προκαλούν δυναμική συμπεριφορά του πλοίου.

Τους θαλάσσιους κυματισμούς ανέμου που προκαλούν τη δυναμική συμπεριφορά του πλοίου, χωρίζουμε σε δύο κατηγορίες: τις θάλασσες (seas) και τις φουσκοθαλασσιές (swells). Ο σχηματισμός κυματισμών των δύο αυτών κατηγοριών ρυθμίζεται από τις δυνάμεις βαρύτητας. Όταν η επίδραση του ανέμου εξακολουθεί να εξασκείται πάνω στους κυματισμούς, λέμε ότι έχουμε «θάλασσα» και όταν οι κυματισμοί έχουν απομακρυνθεί από την περιοχή της ατμοσφαιρικής διέγερσης, λέμε ότι έχουμε «φουσκοθαλασσιά».

Η καμπύλη της συνάρτησης πυκνότητας φάσματος ανεβαίνει απότομα, από τις μικρές τιμές της κυκλικής συχνότητας μέχρι ένα μέγιστο, που λέγεται κορυφή του φάσματος (spectral peak). Η συχνότητα  $\omega_p$  που αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος λέγεται κυκλική συχνότητα κορυφής (spectral peak frequency). Μετά την κορυφή, η καμπύλη πέφτει ομαλά και καταλήγει στην ουρά (tail) του φάσματος, που έχει μικρές τιμές της  $S(\omega)$  για μεγάλες τιμές της συχνότητας. Αποτελεί τώρα χαρακτηριστική ιδιότητα των θαλάσσιων κυμάτων ανέμου, ότι τα φάσματά τους στην αδιάστατη

μορφή ταυτίζονται. Επομένως, αν γνωρίζουμε τα μεγέθη  $\omega_p$  και  $S(\omega)$  και την αδιάστατη μορφή της καμπύλης φασματικής πυκνότητας, ξέρουμε και το φάσμα κάθε κατάστασης θάλασσας (sea state).



Εικόνα 1.6.1 Μορφή φάσματος

Για την κατάσταση θαλάσσιων κυματισμών πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα, τα πιο γνωστά από τα οποία αυτό των Pierson – Moskowitz και αυτό του Bretschneider. Τα φάσματα των κυμάτων που παράχθηκαν από τον κυματιστήρα είχαν δημιουργηθεί με τη χρήση της συνάρτησης πυκνότητας φάσματος του **Bretschneider**, που είναι διπαραμετρικό φάσμα για ανοιχτές θάλασσες οποιουδήποτε βαθμού ανάπτυξης. Το φάσμα αυτό λέγεται διπαραμετρικό διότι ορίζεται με τη βοήθεια δύο παραμέτρων: της συχνότητας κορυφής  $\omega_p$  και του σημαντικού ύψους κύματος  $H^{1/3}$ .

Το σημαντικό ύψος κύματος  $H^{1/3}$  (significant wave height) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν χαρακτηριστική παράμετρος των φασμάτων των κυματισμών γιατί συνδέεται με την επιφάνεια  $m_0$  κάτω από την καμπύλη του φάσματος τους με τη σχέση:

$$\overline{H}^{1/3} = 4 \cdot \sqrt{m_0}$$

## 2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ – ΣΕΙΡΑ ΝΤΥΑ

### 2.1 Γενικά

Με σκοπό την πρόβλεψη της δυναμικής συμπεριφοράς, έχουν αναπτυχθεί από ορισμένα επιστημονικά κέντρα και πανεπιστήμια συστηματικές σειρές ταχύπλων σκαφών. Στις σειρές αυτές έχουν γίνει όλα τα απαραίτητα πειράματα για τη συμπεριφορά των μοντέλων, κατ' αρχάς σε αντίσταση και ύστερα σε διάφορα είδη κυματισμών.

Στόχος της δημιουργίας αυτών των συστηματικών σειρών, είναι να υπάρχει μία συγκριτική βάση για την υδροδυναμική συμπεριφορά των ταχύπλων, έτσι ώστε σκάφη με ίδια ή παρόμοια γάστρα να μπορούν να μελετηθούν ως προς το Seakeeping βασιζόμενα στα αποτελέσματα αυτών των συστηματικών σειρών χωρίς να χρειάζεται εκ νέου πειραματική διερεύνηση.

#### **Συστηματικές σειρές σκαφών ημι-εκτοπίσματος με στρογγυλό πυθμένα**

Η συστηματική σειρά NPL (National Physical Laboratory): Κατά το τέλος της δεκαετίας του 1960, έγιναν στο NPL πειράματα με πρότυπα ταχύπλων με στρογγυλό πυθμένα. Αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά από τους Marwood και Bailey (1969) και η συστηματική σειρά διαμορφώθηκε οριστικά από τον Bailey (1976) σε έκδοση της R.I.N.A. Τα σκάφη της σειράς αυτής προέκυψαν από ένα βασικό σκάφος διατηρώντας τους ίδιους αδιάστατους συντελεστές μορφής και μεταβάλλοντας ομοιόμορφα τις κύριες διαστάσεις.

Οι γάστρες της σειράς χαρακτηρίζονται από ευθείες ισάλους στην είσοδο, στρογγυλούς νομείς στην πρύμνη και ευθείες διαμήκεις τομές (buttock lines) που τελειώνουν απότομα στην πρύμνη καθρέπτη. Η διαμήκης θέση του κέντρου άνωσης είναι 6.4% του μήκους πρυμνηθέν του μέσου νομέα.

Η συστηματική σειρά 63: Η σειρά 63 βασίστηκε σε πειράματα με πέντε πρότυπα γαστρών με στρογγυλό πυθμένα που έγιναν στο Davidson Laboratory του Stevens Institute of Technology και παρουσιάστηκε από τον Beys (1963). Το πατρικό πρότυπο είχε λόγο  $L/B = 4$ , ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα προέκυψαν από αυτό με μεταβολή της ισαπόστασης νομένων και διαμήκων τομών έτσι ώστε, ο λόγος  $L/B$  να πάρει τις τιμές 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0. Τα πρότυπα δοκιμάστηκαν σε ίδιες τιμές λόγου  $L/\nabla^{1/3}$ .

Η συστηματική σειρά SSPA: Η σειρά αυτή αναπτύχθηκε στο σουηδικό οργανισμό SSPA κυρίως για ταχεία μικρά πολεμικά σκάφη και αποτελείται από εννέα πρότυπα. Τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν από τους Lindgren και Williams (1968). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διερευνήθηκε η επίδραση των λόγων  $L/\nabla^{1/3}$  και  $B/T$  στην αντίσταση, για ταχύτητες μέχρι  $F_n = 1.3$ . Επίσης, διερευνήθηκε η επίδραση των αντιδιαβροχικών λωρίδων στην αντίσταση και η υδροδυναμική συμπεριφορά των προτύπων σε ημιτονικούς κυματισμούς.

### **Συστηματικές σειρές σκαφών με απλή ακμή**

Η συστηματική σειρά 62: Η συστηματική σειρά 62 παρουσιάστηκε από τους Clement και Blount (1963) και αναφέρεται σε ταχύπλοα σκάφη με ακμή (hard chine). Η σειρά αποτελείται από πέντε πρότυπα ταχύπλοα σκάφη με λόγους μήκος προς πλάτος  $L_p/B_{px}$  2.00, 3.06, 4.09, 5.50, 7.00.

Για κάθε ένα από τα πέντε πρότυπα έγιναν πειράματα για τέσσερις διαμήκεις θέσεις του κέντρου βάρους LCG: 0%, 4%, 8%, 12% του μήκους της ακμής  $L_p$  πρύμνηθεν του κέντρου βάρους της επιφάνειας της ισάλου  $A_p$ . Επίσης, τα πειράματα περιέλαβαν καταστάσεις φόρτωσης με λόγους  $\frac{A_p}{\nabla^{2/3}}$  ίσους με 4.0, 5.5, 7.0, 8.5, όπου  $\nabla$  είναι ο όγκος εκτοπίσματος του σκάφους. Άλλα χαρακτηριστικά των προτύπων της σειράς 62 είναι:

1. Η γωνία deadrise, από το μέσο του πλοίου και προς την πρύμνη είναι σταθερή και ίση με  $12.5^\circ$ .
2. Το πλάτος της ακμής στην πρύμνη ισούται με το 65% του μεγίστου πλάτους της ακμής.
3. Οι γραμμές των πρωραίων νομέων είναι κυρτές.

Η σειρά Keuning-Gerritsma: Το πατρικό αυτής της σειράς αναπτύχθηκε από τις γραμμές του πατρικού του Clement, αυξάνοντας την γωνία ανύψωσης πυθμένα από  $12.5^\circ$  σε  $25^\circ$ . Στη σειρά αυτή είναι βασισμένο το πρότυπο Deer-V που αποτελεί προϊόν σχεδίασης και μελέτης του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π.

### **Σκάφη με διπλή ακμή**

Σχεδίαση σκαφών διπλής ακμής κατά Savitsky: Οι Savitsky, Roper και Benen (1972) χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματα της σειράς των εργασιών του Savitsky και κυρίως του άρθρου του πάνω στην υδροδυναμική σχεδίαση ολισθακάτων (1964), για να σχεδιάσουν μια ολισθακάτο διπλής ακμής και ανύψωση πυθμένα με βελτιωμένη δυναμική συμπεριφορά σε κυματισμούς. Αυτή η μορφή γάστρας είχε πλατύ καθρέπτη, με στρεβλή (warped) επιφάνεια ολίσθησης, διπλή ακμή και πολύ λεπτόγραμμη πλώρη με μεγάλη γωνία ανύψωσης πυθμένα και εξοχή πλευρών.

Η σχεδιαστική διαδικασία βασίστηκε κυρίως στο συνδυασμό των μεθόδων πρόβλεψης της συμπεριφοράς σε ήρεμο νερό, όπως περιγράφεται από τους Savitsky (1964) και Hadler (1966), και των αντιστοίχων μεθόδων για κυματισμούς, όπως περιγράφεται από το Fridsma (1971). Αν και οι εργασίες αυτές αναφέρονται σε πρισματικές γάστρες (σταθερό πλάτος, γωνία ανύψωσης πυθμένα  $\beta$ , διαμήκεις τομές παράλληλες με την τρόπιδα), οι τεχνικές αυτές έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε πραγματικές γάστρες με κατάλληλη εκλογή ενεργών τιμών πλάτους και γωνίας  $\beta$ .

Επί πλέον, έχει δοθεί προσοχή στη συσχέτιση των κυρίων διαστάσεων με τα παρακάτω υδροδυναμικά χαρακτηριστικά:

- Υδροδυναμικά κρουστικά φορτία σε κυματισμούς
- Υδροστατικό εκτόπισμα
- Ολίσθηση σε μεγάλες ταχύτητες
- Ολίσθηση σε μικρές ταχύτητες
- Μετακεντρική ευστάθεια

Η συστηματική σειρά NTUA: Η συστηματική σειρά γαστρών με διπλή ακμή (double chine), με πλατύ καθρέπτη και με στρεβλή επιφάνεια ολίσθησης αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά την τελευταία δεκαετία. Η σειρά είναι κατάλληλη για την προκαταρκτική σχεδίαση μονόγαστρων σκαφών σε κατάσταση «προ-ολίσθησης» που λειτουργούν σαν εμπορικά (επιβατηγά, ΕΓ/ΟΓ, κρουαζιερόπλοια και πλοία αναψυχής) ή πολεμικά και λειτουργούν σε μεγάλες ταχύτητες σχεδίασης. Η σειρά αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

## 2.2 Συστηματική σειρά NTUA

Πριν από αρκετά χρόνια οι Savitsky, Roper και Benen (1972) πρότειναν μια ολισθάκατο υψηλής ταχύτητας με πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά σε κυματισμούς. Αυτή η μορφή γάστρας είχε πλατύ καθρέπτη, στρεβλή (warped) επιφάνεια ολίσθησης, διπλή ακμή και πολύ λεπτόγραμμη πλήρη με μεγάλη γωνία ανύψωσης πυθμένα και εξοχή πλευρών.

Ο Καθηγητής του Ε.Μ.Π. Θεόδωρος Λουκάκης και ο Καθηγητής Ε.Μ.Π Γρηγόριος Γρηγορόπουλος είχαν συζητήσει από τη δεκαετία του 80 την πιθανότητα της δημιουργίας μιας συστηματικής σειράς με τον Dan Savitsky. Πράγματι, η προσπάθεια ξεκίνησε το 1994 οπότε και κατασκευάστηκε το πατρικό σκάφος της σειράς NTUA – 097/94 με λόγο  $L/B=5.50$ .

Για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της αντίστασης του πατρικού σκάφους, αποφασίστηκε να γίνει σύγκριση με πέντε «ισοδύναμες», ισομήκεις γάστρες. Οι γάστρες αυτές είχαν προταθεί από τους κάτωθι:

- Σειρά 62, απλής ακμής, Clement & Blount (1963)
- Βαθύ "V" (Deep V), απλής ακμής, Keuning & Gerritsma (1982)
- Διπλής ακμής, βασισμένη στη σειρά 62, Grigoropoulos & Loukakis (1995)
- Με διπλή ακμή και πλατύ καθρέπτη, Savitsky et al (1972)
- Παραλλαγή της προηγούμενης με στρογγυλό πυθμένα και πλατύ καθρέπτη, Grigoropoulos & Loukakis (1995)

Τα πέντε πρότυπα κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν εκτενώς στην πειραματική δεξαμενή του ΕΝΘΥ, με και χωρίς αντιδιαβροχικές λωρίδες. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή τη μελέτη είναι τα εξής:

- Το πρότυπο με διπλή ακμή και πλατύ καθρέπτη, παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά αντίστασης πριν την περιοχή ολίσθησης.
- Οι αντιδιαβροχικές λωρίδες δεν είναι απαραίτητες για τη συγκεκριμένη μορφή γάστρας. Στην πραγματικότητα αυξάνουν την αντίσταση, ενώ τη βελτιώνουν στις υπόλοιπες μορφές γαστρών.

Ο **λόγος μήκους προς πλάτος (L/B)** είναι συνήθως η βασική παράμετρος για τη δημιουργία μιας συστηματικής σειράς ταχύπλων σκαφών, όταν πρόκειται να εξεταστεί η αντίσταση και η δυναμική συμπεριφορά τους σε κυματισμούς. Η μικρότερη τιμή του λόγου είναι 4.00 επειδή η σειρά δεν αναφέρεται σε μικρά σκάφη αναψυχής, ενώ η μεγαλύτερη τιμή 7.00 καλύπτει τη συνήθη περιοχή σχεδιασμού. Η σειρά αποτελείται από πέντε πρότυπα με διαφορετικούς λόγους **L/B = 4.00, 4.75, 5.50, 6.25 και 7.00**. Το πατρικό σκάφος είναι αυτό με λόγο L/B = 5.50.

Το πατρικό σκάφος, έχει δύο ακμές που εκτείνονται από τον καθρέπτη έως περίπου το 70% του μήκους στην πλώρη. Η γάστρα έχει πλατύ καθρέπτη και κοίλες πλευρές στην περιοχή της πλώρης καθώς και μεταβλητή γωνία ανύψωσης πυθμένα η οποία ξεκινάει από 10° στον καθρέπτη και φτάνει έως και 70° στην πλώρη, σχήμα 4. Τα μέλη της σειράς προέκυψαν από το πατρικό κρατώντας την ίδια μορφή στη μέση τομή και μετατρέποντας κατάλληλα τα υπόλοιπα μεγέθη.

Η άλλη βασική παράμετρος της σειράς είναι ο **αδιάστατος λόγος όγκου εκτοπίσματος**  
$$C_{DL} = \frac{\nabla}{(0.1 \cdot L_{WL})^3}$$
, όπου  $\nabla$  είναι ο όγκος του εκτοπιζόμενου υγρού και  $L_{WL}$  το μήκος της ισάλου. Ο συντελεστής  $C_{DL}$  είναι μια άλλη έκφραση του γνωστού αδιάστατου λόγου  $M = \frac{L_{WL}}{\nabla^{1/3}}$ . Η γωνία εισόδου είναι αρκετά μικρή για όλες τις ισάλους που δοκιμάστηκαν.

Έξι ισοβύθιστες καταστάσεις φόρτωσης επιλέχθηκαν και δοκιμάστηκαν, αντιστοιχούν σε  $C_{DL} =$  **1.00, 1.61, 2.23, 3.00, 3.62 και 4.23**. Οι χαμηλές τιμές του λόγου  $C_{DL}$  αντιστοιχούν στις καταστάσεις λειτουργίας μεγάλων πλοίων, ενώ οι υψηλότερες σε μικρότερα επιβατηγά σκάφη και σκάφη αναψυχής.

Το μήκος των προτύπων έχει προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας την 21<sup>st</sup> I.T.T.C. High Speed Marine Vehicles Committee (Trondheim, 1996), σύμφωνα με την οποία τα πρότυπα πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο μέτρα. Επειδή, οι χαμηλές τιμές του λόγου  $C_{DL}$  δεν μπορούν να επιτευχθούν με τα



πρότυπα των δύο περίπου μέτρων, για καθένα από αυτά κατασκευάστηκε ένα μεγαλύτερο με κλίμακα 5/3:1.

Η συστηματική σειρά γαστρών με διπλή ακμή του Ε.Μ.Π. έχει ολοκληρώσει τις δοκιμές αντίστασης αλλά όχι και τις εκτεταμένες δοκιμές υδροδυναμικής συμπεριφοράς σε κανονικό και τυχαίο κυματισμό. Στα πλαίσια της προσπάθειας για την ολοκλήρωση των δοκιμών υδροδυναμικής συμπεριφοράς έγιναν και τα πειράματα σε τυχαίους κυματισμούς στην παρούσα διπλωματική εργασία στο πατρικό σκάφος της σειράς NTUA-166/01 με λόγο  $L/B=7.00$ .

Όλα τα πρότυπα της σειράς με τα κύρια χαρακτηριστικά τους στις έξι καταστάσεις φόρτωσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 2.2.1 :** Χαρακτηριστικά των μοντέλων της σειράς NTUA

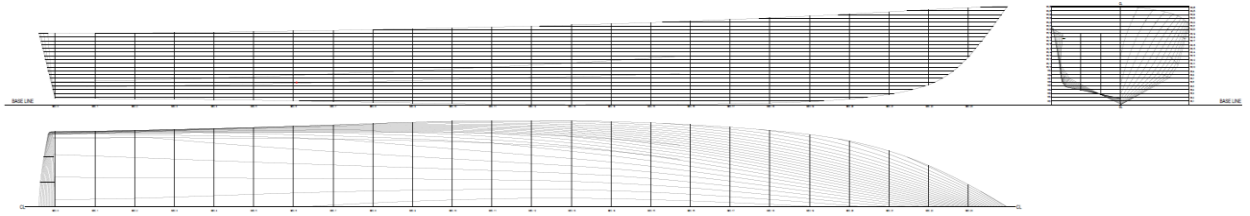
L/B	4.00-big (163/01)	4.00-small (113/95)	4.75-big (150/99A)	4.75-small (154/99)	5.50-big (118/96)	5.50-small (097/94)	6.25-big (164/01)	6.25-small (146/98)	7.00-big (166/01)	7.00-small (116/96)
L <sub>OA</sub>	3.820 m	2.292 m	3.820 m	2.292 m	3.820 m	2.292 m	4.3417	2.605 m	4.8617	2.917 m
C <sub>DL</sub>										
	3.3915 1.32296		3.4147 1.34795		3.4300 1.36522		3.9683 1.71757		4.4570 2.083	
1.00	39.057		39.781		41.443		63.100		88.140	
	-0.3887 0.080		-0.4357 0.0770		-0.4795 0.0766		-0.5151 0.0880		-0.7660 0.0966	
	3.4453 1.73802		3.4681 1.69619		3.4970 1.63517		4.0293 2.02227	2.4074 0.73096	4.5302 2.4528	2.7181 0.88301
1.61	66.097		67.118		69.103		105.405	22.464	150.095	32.420
	-0.4613 0.099		-0.4954 0.0962		-0.5108 0.0966		-0.5185 0.1130	-0.3480 0.0669	-0.7550 0.1275	-0.3905 0.0765
	3.4803 2.00428		3.5046 1.91518	2.1128 0.70763	3.5389 1.8320	2.1258 0.66092	4.0703 2.26491	2.4347 0.81661		2.7310 0.9876
2.23	93.890		96.021	21.053	99.564	21.506	150.151	32.236		45.436
	-0.4936 0.1150		-0.5108 0.1137	-0.3066 0.0639	-0.5083 0.1165	-0.2940 0.0702	-0.5001 0.1372	-0.3387 0.0815		-0.3686 0.0932
	3.5142 2.24366	2.0977 0.80396	3.5392 2.11683	2.1343 0.77624		2.1450 0.7280	4.1130 2.5471	2.4623 0.91432		2.7830 1.1304
3.00	130.436	27.707	133.078	29.143		29.615	208.642	44.794		64.618
	-0.5049 0.1338	-0.3056 0.0790	-0.5081 0.1343	-0.3013 0.0760		-0.2967 0.0834	-0.4720 0.1670	-0.3235 0.0992		-0.3451 0.1164
		2.1104 0.85713		2.1488 0.82664		2.1600 0.7821		2.4817 0.99309		2.8094 1.2445
3.62		33.993		35.934		36.513		55.489		80.344
		-0.3065 0.0874		-0.2948 0.0857		-0.2883 0.0945		-0.3105 0.1135		-0.3269 0.1345
		2.1231 0.90345		2.1615 0.87376		2.1750 0.8343		2.4998 1.07443		2.8338 1.35476
4.23		40.462		42.730		43.530		66.608		96.134
		-0.3046 0.0957		-0.2876 0.0951		-0.2797 0.1055		-0.2970 0.1280		-0.3093 0.1520

**Σημειώσεις:**

- Κάθε κελί του πίνακα περιέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του μοντέλου:

L <sub>WL</sub> [m]	WS [m <sup>2</sup> ]
D [Kgr]	
LCG [m]	T [m]

- Η διαμήκης θέση LCG μετράται από το μέσο νομέα, θετικές τιμές πλώραθεν.



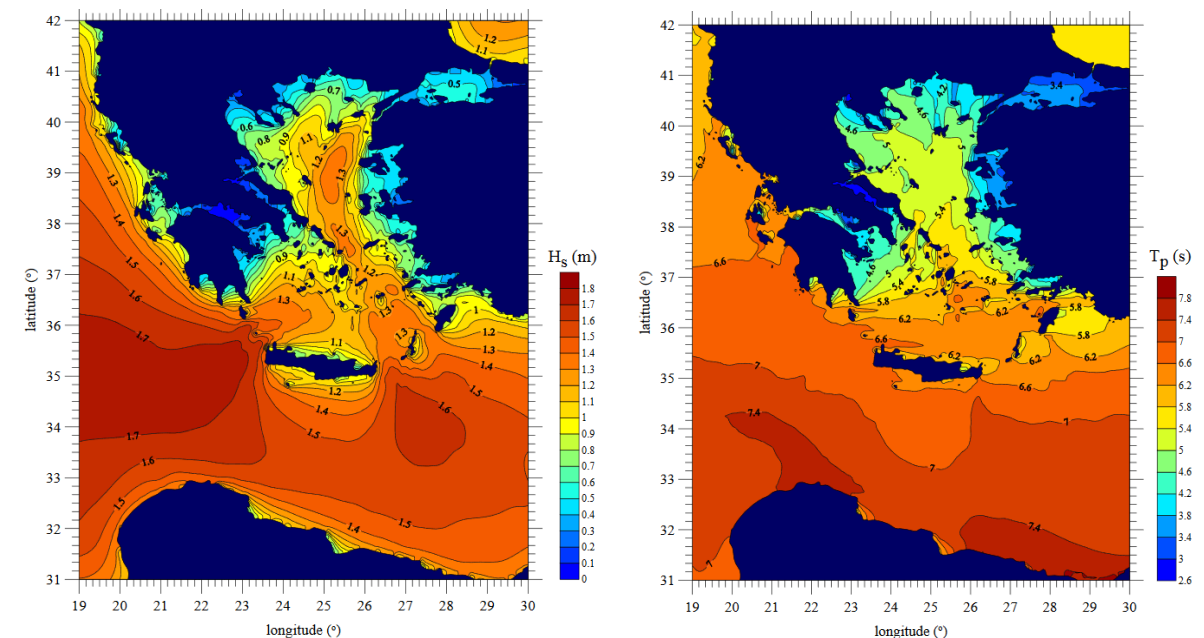
*Εικόνα 2.2.1 Ναυπηγικές γραμμές μοντέλου 166/01*

### 3. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ/ΣΚΟΠΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Όπως έχουμε αναφέρει αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς (seakeeping) σε τυχαίους κυματισμούς του μοντέλου της συστηματικής σειράς ΝΤΥΑ ταχυπλόων με  $L/B=7.00$  και συγκεκριμένα του μοντέλου μεγάλης κλίμακας. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική δεξαμενή του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής. Του Ε.Μ.Π. την οποία θα περιγράψουμε αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο.

Όπως τονίστηκε και στην εισαγωγή κύριος **σκοπός** της διαδικασίας αυτής είναι να αξιολογηθούν όλα τα μοντέλα της σειράς ως προς την δυναμική τους συμπεριφορά και να συγκριθούν μεταξύ τους ως προς την καταλληλότητά τους σε διαφορετικές θαλάσσιες εφαρμογές.

Πιο συγκεκριμένα κάθε χρόνο δημοσιεύονται χάρτες θαλασσίων περιοχών με στατιστικά στοιχεία των κυματισμών που επικρατούν σε μια συγκεκριμένη περιοχή ανάλογα με την εποχή. Τα στοιχεία των κυματισμών δίνονται με δύο παραμέτρους το σημαντικό ύψος κύματος ( $H^{1/3}$ ) και την περίοδο κορυφής ( $T_p$ ), δηλαδή οι δύο παράμετροι του μοντέλου που χρησιμοποιούμε (Bretschneider). Ως εκ τούτου με τις κατάλληλες παρεμβολές μπορούμε να κρίνουμε ποιο μοντέλο της συστηματικής σειράς είναι το πλέον κατάλληλο σε μια εφαρμογή.



Εικόνα 3.1 Ισοψείς χάρτες ελληνικών θαλασσών με βάση το σημαντικό ύψος κύματος και την περίοδο κύματισμού

Οπότε έγινε η διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς του παραπάνω μοντέλου για επτά διαφορετικές καταστάσεις θάλασσας για συντελεστή εκτοπίσματος  $C_{DL}=1.61$  και για ταχύτητα που αντιστοιχεί σε αριθμο Froude ίσο με 0.34.

Συνοπτικά άρα οι παράμετροι του πειράματος είναι οι παρακάτω:

- Μοντέλο: NTUA 166/01
- Εκτόπισμα:  $C_{DL}=1.61$  ( $\Delta=150.095$  Kg)
- Ταχύτητα:  $F_n=0.34$  ( $V_m=2.26$  m/s)

Για τις καταστάσεις θάλασσας, παράγουμε στον κυματιστήρα της δεξαμενής (που θα περιγράψουμε στη συνέχεια) ένα κύμα με δοσμένο φάσμα που αντιστοιχεί στην εκάστοτε κατάσταση θάλασσας και με βάση αυτό δοκιμάζουμε το μοντέλο.

Τα φάσματα των κυμάτων που παράγονται από τον κυματιστήρα δημιουργούνται με βάση τον τύπο του Bretschneider, που είναι διπαραμετρικό φάσμα για ανοιχτές θάλασσες οποιουδήποτε βαθμού ανάπτυξης με παραμέτρους τη συχνότητα κορυφής  $\omega_p$  και του σημαντικού ύψους κύματος  $H^{1/3}$ , και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$S(\omega) = \left\{ \frac{5}{16} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right) \frac{(H^{1/3})^2}{\omega_p} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \right\}$$

Σκοπός μας είναι τα κύματα που θα παράγουμε στον κυματιστήρα, το φάσμα τους, το πραγματικό φάσμα των παραγόμενων κυματισμών να είναι κοντά στο θεωρητικό και επιθυμητό φάσμα σύμφωνα με τον τύπο του Bretschneider. Έτσι επιλέγουμε το κατάλληλο αρχείο με τον κατάλληλο συντελεστή κλίμακας (scalefactor) που μας βοηθάει στη σύγκλιση πραγματικού και θεωρητικού φάσματος. Αναλυτικά, στην συνέχεια παρουσιάζεται το κατά πόσο επιτεύχθηκαν οι επιθυμητές φασματικές κατανομές των κυμάτων.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά των κυματισμών που αντιστοιχούν στις επτά καταστάσεις θάλασσας.

$T_p'$	1.5	2.0	2.5	3.0	3.0	3.5	4.0
$T_{p-model}$ (s)	1.019	1.359	1.699	2.039	2.039	2.378	2.718
$\omega_{p-model}$ (rad/s)	6.166	4.623	3.698	3.082	3.082	2.642	2.312
$F_{model}$ (Hz)	0.981	0.736	0.589	0.491	0.491	0.420	0.368
$H^{1/3}_{model}$ (cm)	8.5	10	12	14	16	17	14
File name	h85tp15	h10tp20	h12tp25	h14tp30	h16tp30	h17tp35	h14tp40

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά πειραματικών καταστάσεων θάλασσας

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

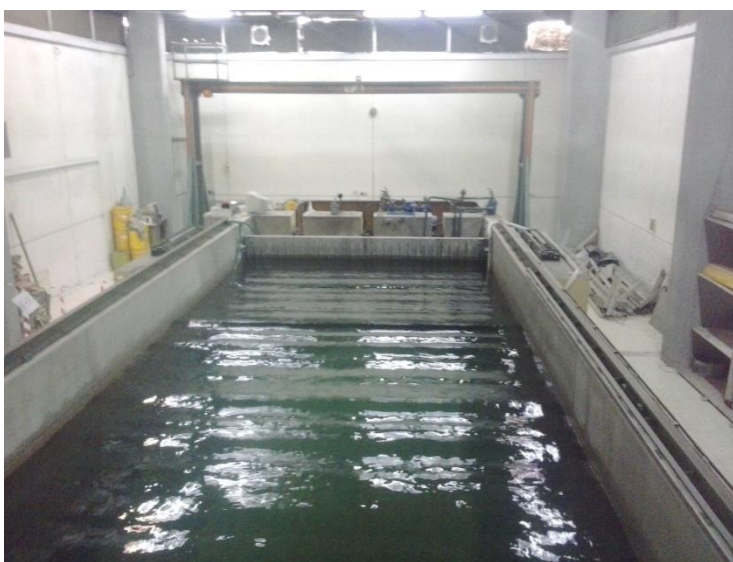
### 4.1 Πειραματική διάταξη

Όπως έχουμε αναφέρει ο χώρος διεξαγωγής των πειραμάτων ήταν η πειραματική δεξαμενή του εργαστηρίου ναυτικής και θαλάσσιας υδροδυναμικής. Η δεξαμενή αποτελείται από το **φορείο**, τον **κυματιστήρα** και τον **αποσβεστήρα** και εκτείνεται σε μήκος 91 μέτρων.

Βασικό μέρος της λοιπόν είναι το *φορείο* που προσδένουμε το εκάστοτε μοντέλο που θέλουμε να εξετάσουμε. Πρώτα απ' όλα αποτελείται από τη διάταξη πρόσδεσης του μοντέλου. Υπάρχει το δυναμόμετρο που είναι το όργανο που διαθέτει τους βασικούς αισθητήρες για το pitch, το heave και την αντίσταση και προσδέεται με μία πλάκα το σκάφος. Επίσης υπάρχει ο λεγόμενος οδηγός που δίνει την κατεύθυνση στο σκάφος, το διατηρεί σε ευθεία θέση και όπως επίσης το λεγόμενο φρένο ώστε να μην καταπονείται το δυναμόμετρο στην επιτάχυνση και στην επιβράδυνση. Στο φορείο υπάρχουν οι υπολογιστές οι οποίοι δίνουν τις εντολές για την κίνηση του φορείου και άρα του μοντέλου και στους οποίους καταγράφονται όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων από όλους τους αισθητήρες.

Ο *κυματιστήρας* βρίσκεται στην άκρη της δεξαμενής και μπορεί να παράγει αρμονικούς και τυχαίους κυματισμούς. Βαθμονομείται κατάλληλα και μπορείς να εισάγεις τις παραμέτρους του κύματος που επιθυμείς να παράξει στον υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με αυτόν και αυτός με τη σειρά του παράγει μια χρονοσειρά που αντιστοιχεί στο ζητούμενο κύμα και με βάση αυτήν κινείται το «πέδιλο» του κυματιστήρα.

Επιπλέον, οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτοί για το pitch και το heave και την αντίσταση που βρίσκονται στο δυναμόμετρο, τα τρία επιταχυνσιόμετρα που τοποθετήσαμε στην FP, στην AP και το LCG του πλοίου και αυτός για τη μέτρηση της ανύψωσης της επιφάνειας της δεξαμενής για να μετράμε το παραγόμενο κύμα.



Εικόνα 4.1.1: άποψη της πειραματικής δεξαμενής και του κυματιστήρα



*Εικόνα 4.1.2 Υπολογιστής του κυματιστήρα*



*Εικόνα 4.1.3 Άποψη της πειραματικής δεξαμενής*



*Εικόνα 4.1.4 Κυματοστήρας της πειραματικής δεξαμενής*



*Εικόνα 4.1.5 Άποψη του φορείου της πειραματικής δεξαμενής με προσδεμένο το μοντέλο*



#### 4.2 Προετοιμασία πειράματος

Πρώτα απο όλα βρήκαμε στο χώρο του εργαστηρίου το μοντέλο μας (166/01) και έπρεπε να διαπιστωθεί σε τι κατάσταση βρίσκεται και να γίνουν οι απαραίτητες εργασίες.



*Εικόνα 4.2.1 Μεταφορά του μοντέλου απο τη θέση του.*

Οπότε αρχικά το μοντέλο καθαρίστηκε και βρήκαμε πού υπάρχουν ρωγμές (crackings) που έχουν δημιουργηθεί με το πέρασμα των ετών και βάλαμε κολλητική ταινία στα σημεία αυτά ώστε να μπορούν να διεξαχθούν τα πειράματα χωρίς προβλήματα.



*Εικόνα 4.2.2 Το μοντέλο 166/01*

Αφού ολοκληρώθηκε η παραπάνω διαδικασία και αφού έχουμε ορίσει το επιθυμητό εκτόπισμα ( $C_{DL}=1.61$ ), έπρεπε να το επιτύχουμε στο παρόν σκάφος. Αφού ζυγίσαμε λοιπόν το LightShip του σκάφους (βάρος άφορτου σκάφους) και υπολογίσαμε το βάρος που θα προστεθεί λόγω του δυναμόμετρου, καταλήξαμε στο βάρος που πρέπει να προσθέσουμε για να φτάσουμε στο συνολικό επιθυμητό εκτόπισμα. Χρησιμοποιήσαμε λοιπόν μεταλλικές πλάκες που υπάρχουν στο εργαστήριο και

αφού τις ζυγίσαμε τις τοποθετήσαμε ομοιόμορφα στο σκάφος μας. Εν τέλει για επιβεβαίωση ζυγίσαμε όλο το σκάφος με τα βάρη που τοποθετήσαμε και πράγματι η τιμή που πήραμε ήταν πολύ κοντά στην επιθυμητή.



Εικόνα 4.2.3 Τοποθέτηση των βαρών στο σκάφος

Επιπλέον πρέπει να γνωρίζουμε που ακριβώς βρίσκεται η διαμήκης θέση του κέντρου βάρους (LCG) που αντιστοιχεί στο εκτόπισμα μας για να τοποθετήσουμε το δυναμόμετρο όπως και να χαράξουμε την ίσαλο γραμμή του εκτόπισματος αυτού ως «οπτική επιβεβαίωση». Σημειώνεται ότι θέλουμε ισοβύθιστη αρχική κατάσταση οπότε και η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης ισούται με αυτή του κέντρου βάρους. Στο μοντέλο μας ήταν ήδη χαραγμένη η ίσαλος και σημαδεμένο το LCG της φόρτωσης αυτής. Όμως έπρεπε να επιβεβαιώσουμε τα στοιχεία αυτά. Από τον πίνακα με τα μοντέλα της σειράς NTUA γνωρίζουμε ποιές είναι οι τιμές του LCG και του βυθίσματος για το εκτόπισμά μας. Στη συνέχεια «ταυτοποιήσαμε» με βάση τα σχέδια γραμμών του που υπήρχαν, στο πρόγραμμα *Autocad*® ώστε να βεβαιωθούμε από πού θα μετρήσουμε τα ζητούμε μεγέθη. Πράγματι το LCG ήταν σημαδεμένο εκεί που έπρεπε, όπως και η ίσαλος γραμμή (που βεβαιώθηκε με τη βοήθεια ισοϋψή χαράκτη). Έπειτα με τη βοήθεια του γερανού της δεξαμενής τοποθετήσαμε το μοντέλο στο νερό για να δούμε αν όντως είμαστε στο εκτόπισμα έχοντας χαραγμένη την ίσαλο και μετακινήσαμε ελάχιστα τα βάρη για να μην έχουμε εγκάρσια γωνία κλίσης, πράγμα που το ελέγχουμε με αλφάδι.

Παρόλα αυτά, η τελική θέση των βαρών θα καθοριστεί ελέγχοντας την περίοδο της ιδιοταλάντωσης από τον άξονα OZ ώστε να είναι ίση με την αντίστοιχη θεωρητική του πλοίου.

Για να υπολογίσουμε την ακτίνα αδράνειας και την περίοδο της ιδιοταλάντωσης τοποθετήσαμε το μοντέλο αιωρούμενο σε δύο ιμάντες που συνδέονται με ράβδους που είναι πακτωμένοι σε χώρο του εργαστηρίου, ώστε να μπορεί να ταλαντωθεί ελεύθερα.

Η ταύτιση λοιπόν της θεωρητικής περιόδου με αυτή που θα μετρήσουμε είναι ένδειξη καλής κατανομής των βαρών που έχουμε τοποθετήσει στο μοντέλο.

Οπότε το πρότυπο μας κατά την ταλάντωση περί του άξονα OZ πρέπει να χει περίοδο που δίνεται από τη σχέση:

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

Όπου :

- T, η περίοδος ιδιοταλάντωσης του συστήματος περί του άξονα ZZ
- $I_{ZZ}$ , η ροπή αδράνειας γύρω από τον άξονα ZZ
- l, το μήκος από τα στελέχη από τα οποία αναρτάται το μοντέλο ως το σημείο που είναι δεμένα
- Δ, το εκτόπισμα του μοντέλου
- α, η ημιαπόσταση των ιμάντων από κέντρο βάρους μοντέλου

Επίσης ισχύει ότι,  $I_{ZZ} = r_{ZZ}^2 \Delta$ , όπου  $r_{ZZ}$  η ακτίνα αδράνειας, η οποία εμπειρικά από την ανάλυση ομοίων σκαφών προσδιορίζεται ως  $0.25L_{WL}$  οπότε ο τύπος της περιόδου γίνεται:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r_{ZZ}^2 l}{a^2 g}}$$

$$\Leftrightarrow T = \frac{2\pi r_{ZZ}}{a} \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Για το μοντέλο έχουμε:

$$r_{ZZ} = 1.133 \text{ m}$$

$$l = 3.954 \text{ m}$$

$$a = 0.75 \text{ m}$$

$$g = 9.81 \text{ m/sec}^2$$

Οπότε προκύπτει περίοδος ιδιοταλάντωσης T του μοντέλου ίση με :  $T_{theoretical} = 6.024 \text{ sec}$

Χρονομετρήσαμε λυπών επιπλέον την ταλάντωση του μοντέλου για 10 περιόδους δίνοντας του μια αρχική γωνία και αφήνοντας το. Έτσι τελικά προέκυψε μετρούμενη περίοδος ιδιοταλάντωσης που είναι πολύ κοντά σ' αυτήν που είναι και ζητούμενη.



Εικόνα 4.2.4 Υπολογισμός ακτίνας αδρανείας του μοντέλου

### 4.3 Υπολογισμός αποφόρτισης

Στα ταχύπλοα σκάφη όπως αυτό που μελετάμε, λόγω των σημαντικών τιμών της διαγωγής που αποκτάται, ο άξονας της έλικας, αν δεχτούμε ένα συμβατικό σύστημα πρόωσης, βρίσκεται υπό κλίση περεταίρω της αρχικής κατασκευαστικής κλίσης. Έτσι, η ώση που παράγει η έλικα μπορεί να αναλυθεί σε οριζόντια ( $T_H$ ), η οποία εξισορροπεί την αντίσταση του σκάφους ( $R$ ) και σε κατακόρυφη ( $T_V$ ). Από τη στιγμή που η κλίση του άξονα παίρνει σημαντικές τιμές θα πρέπει να υπολογίσουμε την κατακόρυφη συνιστώσα και έτσι το εκτόπισμα του σκάφους μειώνεται σε  $\Delta' = \Delta - T_V$ .

Άμα θεωρήσουμε ως μια τυπική κατασκευαστική κλίση του άξονα αυτή των  $6.5^\circ$  θα έχουμε:

$$T_V = T_H \tan(6.5^\circ - trim) = R \tan(6.5^\circ - trim) \text{ (θετική διαγωγή θεωρείται η έμπροωρη).}$$

Οπότε όταν διεξάγουμε ένα πείραμα και το σκάφος αποκτά ταχύτητα το εκτόπισμα θα μειωθεί και αυτό θα πρέπει να συνυπολογιστεί στα αποτελέσματα που θα λάβουμε. Άρα εν τέλει υπολογίσαμε την αποφόρτιση και δημιουργήσαμε ένα φορτίο ίσο με αυτήν το οποίο συνυπολογίστηκε όταν ζυγίσαμε το σκάφος και «δημιουργήσαμε» το επιθυμητό εκτόπισμα στην ισοβύθιστη κατάσταση. Έτσι σε κάθε πείραμα αφαιρούσαμε τη αποφόρτιση για να έχουμε το σωστό εκτόπισμα.

Για να βρούμε την τιμή της αποφόρτισης ανατρέξαμε σε παλιότερες μετρήσεις για το μοντέλο αυτό που αφορούσαν την αντίσταση σε ήρεμο νερό τη διαγωγή και την αποφόρτιση:

Vm (m/s)	Resistance (Kp)	Pitch (degrees)	Unloading (Kg)
1.00	0.705	-0.071	0.081
2.00	3.837	-0.274	0.456

3.00	7.359	-0.796	0.942
4.00	10.890	-1.205	1.473
5.00	14.013	-1.144	1.880

Πίνακας 4.3.1 Τιμή της αποφόρτισης συναρτήσει της ταχύτητας του μοντέλου

Με καινούργια runs στη δεξαμενή ελέγξαμε την καμπύλη της αντίστασης και τα αποτελέσματα ήταν πολύ κοντά οπότε χρησιμοποιήσαμε τις τιμές αυτές της αποφόρτισης και με γραμμική παρεμβολή καταλήξαμε ότι η αποφόρτιση είναι ίση με **0.582 kg** για την ταχύτητα των **2.267 m/s**.

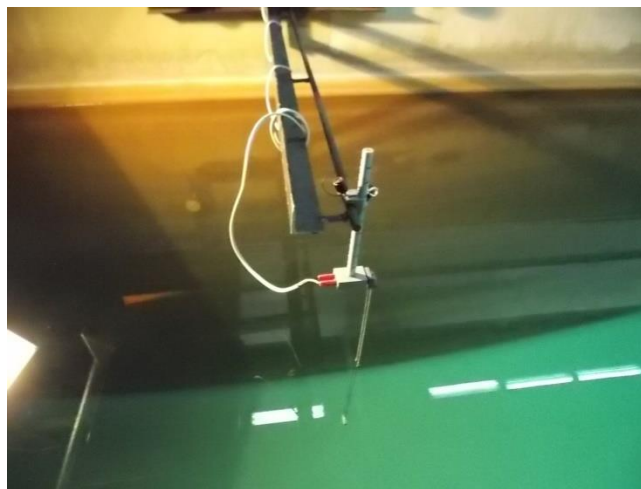
#### 4.4 Βαθμονόμηση μετρητικών διατάξεων

Όπως έχουμε αναφέρει κατά την εκτέλεση των πειραμάτων τα μεγέθη που μετράμε είναι τα εξής:

- Αντίσταση (Resistance)
- Κατακόρυφη κίνηση (Heave)
- Προνευτασμός (Pitch)
- Κατακόρυφες επιταχύνσεις στην πλώρη, στο κέντρο βάρους και στην πρύμνη (Bow, Mid, Stern acceleration)
- Ανύψωση επιφάνειας νερού δεξαμενής (μέτρηση παραγόμενου κυματισμού) (Wave tank probe)

Πιο συγκεκριμένα:

Η μέτρηση της *ανύψωσης του νερού* της δεξαμενής πραγματοποιείται μέσω σταθερού αισθητήρα (wave tank probe) που στερεώνεται σε σταθερό πρόβολο στη δεξαμενή, κοντά στον κυματιστήρα, ώστε να βλέπουμε το κύμα που παράγει αυτός χωρίς απόσβεση. Οι μετρήσεις λαμβάνονται μέσω διπλού μεταλλικού στελέχους που βυθίζεται στο νερό. Τα δύο αυτά τμήματα του μεταλλικού στελέχους μπορούν να θεωρηθούν σαν οπλισμοί πυκνωτή με το νερό ως διηλεκτρικό μέσο. Οπότε η μετρούμενη χωρητικότητα δίνει ένα μέτρο της βύθισης.



Εικόνα 4.4.1 Αισθητήρας ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας (wave tank probe)

Οι κατακόρυφες επιταχύνσεις του σκάφους μετρούνται από τρία επιταχυνσιόμετρα τύπου Kistler που τοποθετούνται στις τρεις επιθυμητές θέσεις με συγκόλληση.

Η αντίσταση και οι κινήσεις *Heave* και *Pitch* μετρώνται μέσω αισθητήρων δυναμόμετρου που βρίσκεται στο φορείο της δεξαμενής και προσδένεται στο εκάστοτε σκάφος σε ειδική πλάκα στο κέντρο βάρους του.



*Εικόνα 4.4.2 Δυναμόμετρο του πειραματικού φορείου.*

Ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι της διαδικασίας αποτελεί η **βαθμονόμηση** των μετρητικών οργάνων. Όλοι οι αισθητήρες δίνουν ως έξοδο ηλεκτρικό σήμα σε Volts. Το σήμα αυτό καταγράφεται ανάλογα της συχνότητας δειγματοληψίας που έχουμε ορίσει. Εμείς ορίσαμε συχνότητα ίση με 20 Hz. Το σήμα υποβάλλεται σε ενίσχυση και καταγράφεται στον υπολογιστή του φορείου. Έτσι πρέπει να βαθμονομήσουμε τα όργανα αυτά και να βρούμε τη συνάρτηση μεταφοράς από Volt στο εκάστοτε μέγεθος που θέλουμε και προφανώς να ελέγξουμε αν δουλεύουν σωστά αν είναι λογικές οι τιμές που παίρνουμε. Η βαθμονόμηση γίνεται με το να μετράμε το σήμα των οργάνων όταν έχουμε συγκεκριμένη την μηχανική τιμή που πρέπει να έχουμε. Π.χ. με ζυγισμένα βάρη στην αντίσταση.

Ανάλογα με την ευαισθησία του κάθε οργάνου κάποια βαθμονομούνται καθημερινά ενώ κάποια μια φορά την εβδομάδα. Συγκεκριμένα, ο αισθητήρας της ανύψωσης του κύματος είναι πολύ ευαίσθητος στις καιρικές μεταβολές και στις διαφορετικές συνθήκες οπότε βαθμονομούνταν κάθε μέρα, όπως κάθε μέρα βαθμονομούνταν και ο αισθητήρας της αντίστασης. Αντίθετα μια φορά την εβδομάδα βαθμονομούσαμε τους αισθητήρες του *pitch* και του *heave* ενώ τα επιταχυνσιόμετρα, η βαθμονόμησή τους γίνεται μόνο μια φορά (πριν την τοποθέτησή τους στο μοντέλο) καθώς πρόκειται για πολύ σταθερά και αξιόπιστα όργανα.

Τέλος να αναφέρουμε ότι πριν τοποθετήσουμε το μοντέλο στο νερό έτοιμο για τα πειράματα έγιναν οι τελικές ετοιμασίες. Τοποθετήσαμε τα επιταχυνσιόμετρα στις επιθυμητές θέσεις και τοποθετήσαμε και

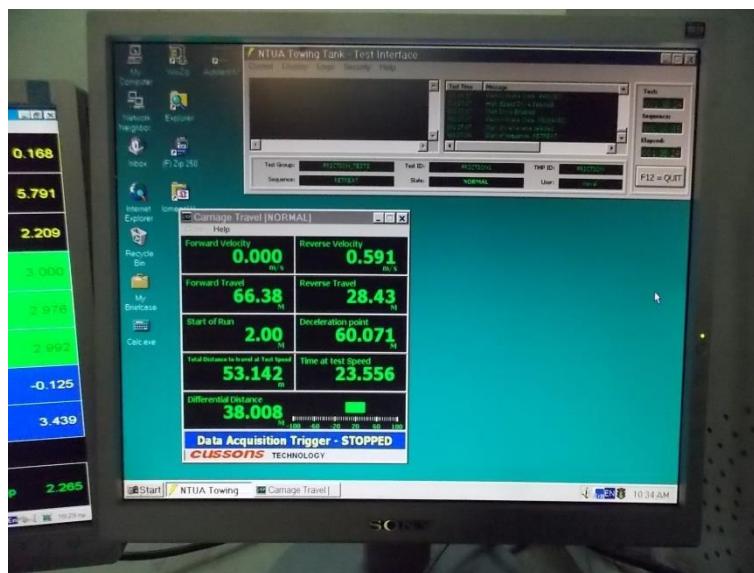
τις προστατευτικές ζελατίνες για να μην μπαίνει νερό και έγινε ένας τελικός έλεγχος για ρωγμές στο σκάφος.

#### 4.5 Τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων

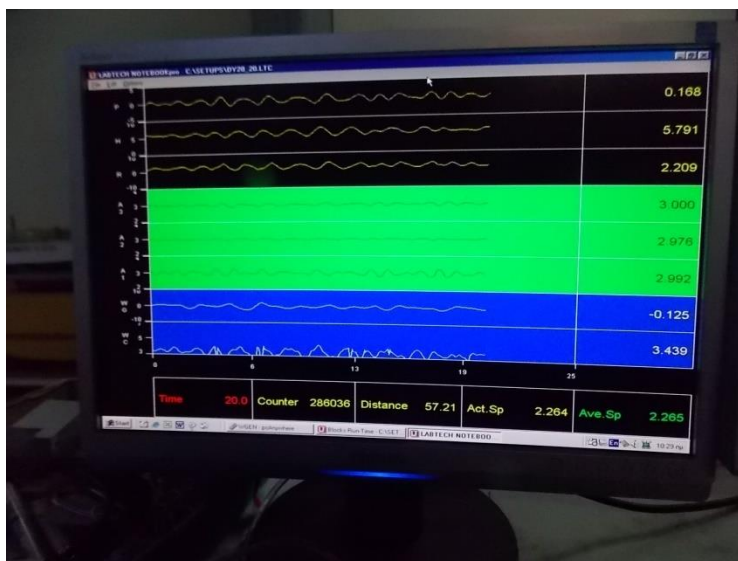
Τα πειράματα διεξάγονται όπως έχει αναφερθεί στην πειραματική δεξαμενή του εργαστηρίου Ναυτικής και θαλάσσιας υδροδυναμικής με τη βοήθεια του προσωπικού.

Καθημερινά βάζαμε το μοντέλο στο νερό και το προσδέναμε κατάλληλα στο φορείο της δεξαμενής. Στη συνέχεια βαθμονομούνταν τα όργανα που απαιτείται όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Τον αισθητήρα της ανύψωσης του κύματος και τον αισθητήρα της αντίστασης.

Στη συνέχεια επιλέγαμε το κύμα που θέλαμε να παράγει ο κυματιστήρας οπότε και επιλέγαμε το αντίστοιχο αρχείο που είχαμε φτιάξει στον φάκελο flumetou υπολογιστή του κυματιστήρα. Οπότε ο κυματιστήρας παράγει το κύμα που επιθυμούμε και μόλις αναπτυχθεί και φτάσει στο μοντέλο μας ξεκινάμε το «τρέξιμο» του φορείου στην ταχύτητα που θέλουμε και μόλις πιάσουμε την ταχύτητα αυτή ενεργοποιούμε το πρόγραμμα στον υπολογιστή που καταγράφει τις μετρήσεις όλων των αισθητήρων για το χρόνο που του χουμε ορίσει. Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό χρησιμοποιήσαμε «φρένο» στο μοντέλο. Δηλαδή ένας μηχανισμός που κρατάει σταθερό το μοντέλο στην πρύμνη στην εκκίνηση και στο σταμάτημα ώστε να αποφύγουμε έντονες δυνάμεις στο δυναμόμετρο με αποτέλεσμα να σπάσει, λόγω ταχύτητας και μεγέθους του μοντέλου.



Εικόνα 4.4.3 Οθόνη ελέγχου της θέσης του πειραματικού φορείου.



Εικόνα 4.4.4 Οθόνη καταγραφής των μετρήσεων των αισθητήρων του πειραματικού φορείου.

Ο επιθυμητός χρόνος πειραματικών δοκιμών, δηλαδή χρονοσειράς μετρήσεων για το εκάστοτε μέγεθος είναι **360** δευτερόλεπτα, ώστε να έχουμε αρκετό δείγμα για να κάνουμε την επεξεργασία. Λόγω μήκους της δεξαμενής, μήκους του μοντέλου και λόγω της απαιτούμενης ταχύτητας για τον αριθμό Froude = 0.34 ο χρόνος που μπορούμε να μετρήσουμε σε κάθε επανάληψη είναι 20 δευτερόλεπτα. Άρα για να έχουμε χρονοσειρά 360 δευτερολέπτων απαιτούνται 18 πειραματικές επαναλήψεις (runs). Η συχνότητα δειγματοληψίας που έχουμε είναι 20 Hz.

Τα στοιχεία των πειραμάτων, οι συναρτήσεις βαθμονόμησης, τα ονόματα των αρχείων για κάθε run και ότι χρειάζεται καταγράφονται σε ειδικό φύλλο πειραμάτων του εργαστηρίου.

Τέλος, μεταξύ των runs έπρεπε να περιμένουμε 25 λεπτά ώστε να ηρεμήσει το νερό και να μην επηρεάσει τα αποτελέσματά μας.

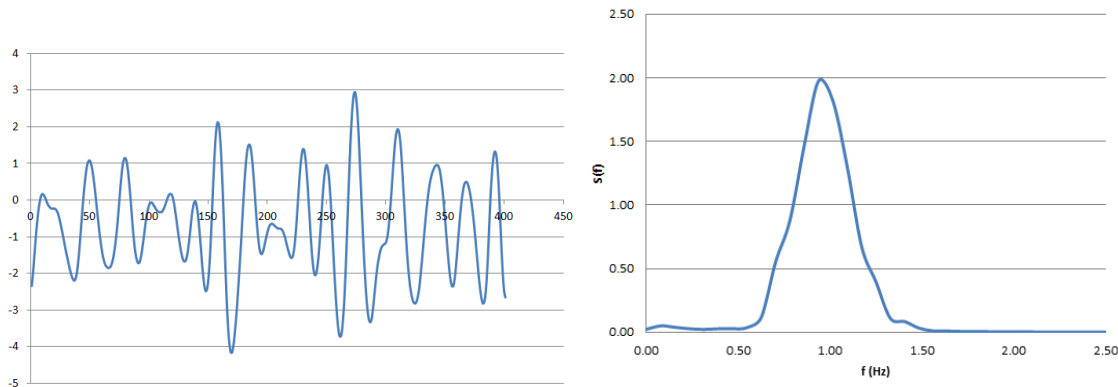
#### 4.6 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Οι μετρήσεις από όλους τους αισθητήρες (σε volt) σε κάθε run καταγράφονται αυτόματα μετά το πέρας των 20 δευτερολέπτων σε ένα αρχείο .dat. Για να επεξεργαστούμε τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα fft51.for του εργαστηρίου σε FORTRAN. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα δίνοντας του τα αρχεία που θέλουμε και τις συναρτήσεις μεταφοράς για κάθε μέγεθος, με ανάλυση Fourier εξάγει δύο αρχεία:

- Ένα αρχείο .out που μας δίνει τα φάσματα όλων των μετρούμενων μεγεθών εκτός της αντίστασης καθώς και στατιστικά στοιχεία αυτών
- Ένα αρχείο .rms που μας δίνει χωριστά τις τιμές RMS των μετρούμενων μεγεθών συμπεριλαμβανομένης και της αντίστασης.



Η καταγραφή της εκάστοτε διέγερσης δηλαδή, μετατρέπεται απο το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων.



Με αυτόν τον τρόπο για κάθε κατάσταση θάλασσας έχουμε τις τιμές RMS και τα φάσματα της διεγερσης (κυματισμός) και των αποκρίσεων (επιταχύνσεων, αντίστασης, προνευτασμού, κατακόρυφης κίνησης) που θα επεργαστούμε στο Microsoft Excel και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα.

## 5. ΔΟΚΙΜΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

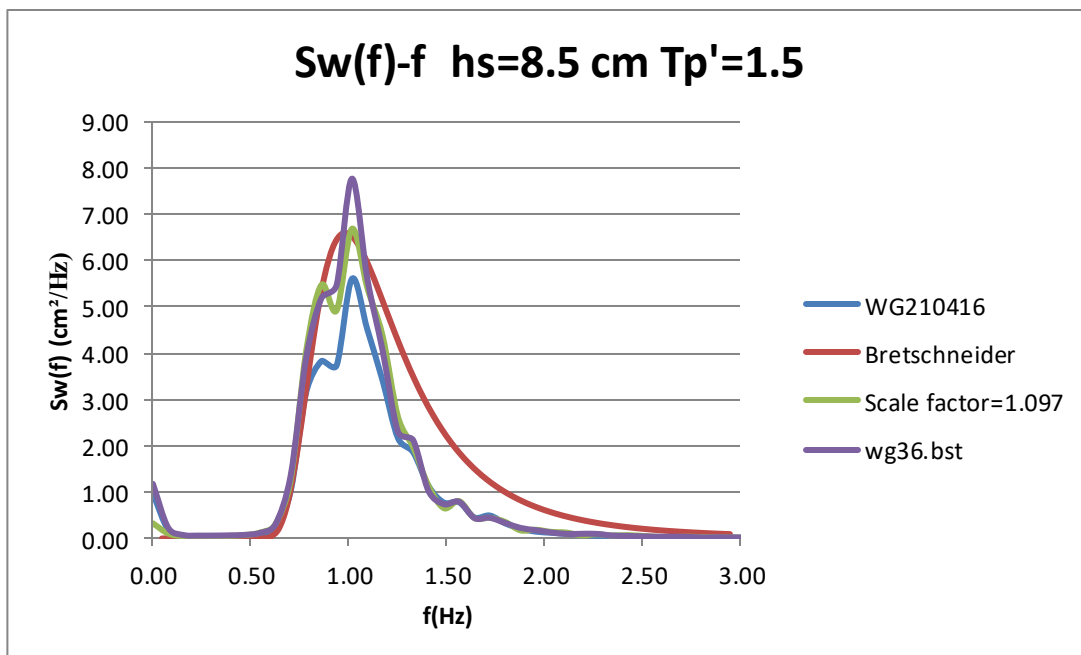
Όπως αναφέραμε και προηγούμενα στόχος είναι να εξεταστεί η δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου σε μερικές καταστάσεις θάλασσας αντιπροσωπευτικές. Οι καταστάσεις θάλασσες χαρακτηρίζονται από ψευδοτυχαίους κυματισμούς και επιλέξαμε να τους δημιουργήσουμε με το διπαραμετρικό φάσμα Bretschneider με παραμέτρους την κυκλική συχνότητα και το σημαντικό ύψος κύματος. Έτσι επιλέγοντας ένα αντιπροσωπευτικό εύρος τιμών των παραπάνω μεταβλητών καταλήξαμε σε 7 καταστάσεις θάλασσας από υψηλόσυχνες έως χαμηλόσυχνες.

Για να «δημιουργήσουμε» τα φάσματα αυτά στον κυματιστήρα υπάρχει κατάλληλο πρόγραμμα στον υπολογιστή που συνδέεται με τον κυματιστήρα που δίνοντας το επιθυμητό είδος το φάσματος που (εδώ Bretschneider) και τις παραμέτρους (συχνότητα και σημαντικό ύψος κύματος) και μερικά ακόμη στοιχεία παράγει μια χρονοιστορία η οποία είναι input στον κυματιστήρα και μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα και άρα κατάλληλη κίνηση του κυματιστήρα.

Όμως λόγω διάφορων παραμέτρων όπως ακραίες συχνότητες, λειτουργικές απώλειες και αδυναμίες του κυματιστήρα κ.ο.κ το τελικά παραγόμενο κύμα έχει απόκλιση από το θεωρητικό και ζητούμενο (bretschneider). Οπότε για κάθε κατάσταση θάλασσας αφού «κατασκευάσαμε» τα κύματα δώσαμε εντολή να τα δημιουργήσει και για 600 sec μετρούσαμε χωρίς το μοντέλο, την ανύψωση της στάθμης της δεξαμενής με τον αντίστοιχο αισθητήρα wgen που βρίσκεται κοντά στον κυματιστήρα. Αυτός ο χρόνος θεωρήθηκε αρκετός ώστε οι παράμετροι του ψευδοτυχαίου κυματισμού να έχουν σταθεροποιηθεί. Έτσι με την ανάλυση που περιγράφηκε παραπάνω, εξάγαμε τη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας του κύματος και βλέπαμε πόσο κοντά είναι στη θεωρητική (Bretschneider) και άρα αν είναι αποδεκτή να συνεχίσουμε παρακάτω. Να σημειώσουμε ότι κατασκευάσαμε τα κύματα με δύο διαφορετικά προγράμματα βαθμονόμησης, και με βάση το αποτέλεσμα διαλέξαμε ποιο θα «τρέξουμε» στην κάθε περίπτωση.

Στη συνέχεια οπότε παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης των παραγόμενων κυματισμών με τους θεωρητικούς.

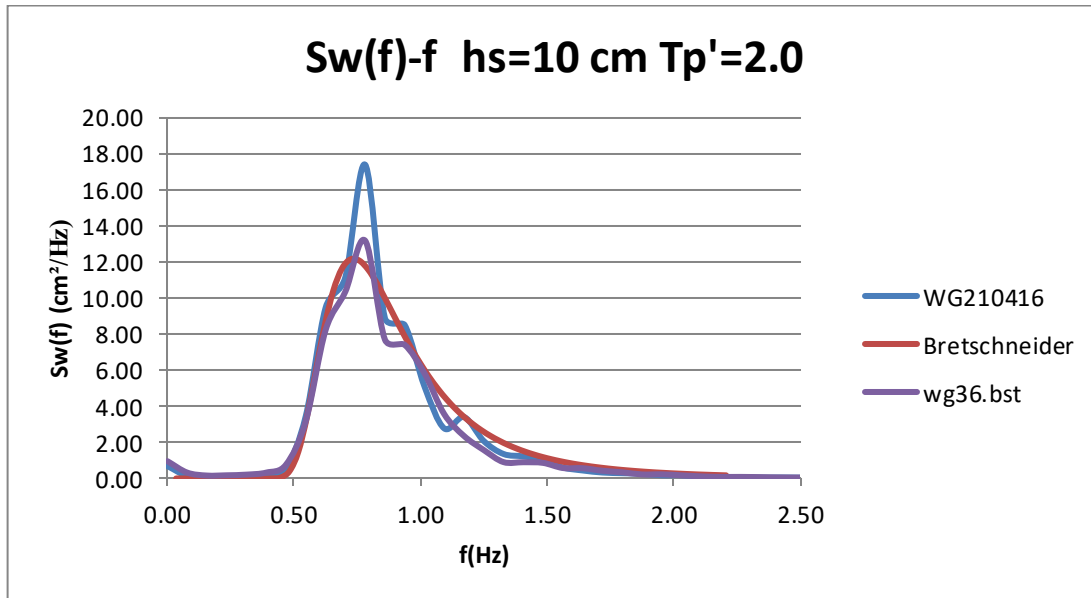
$$T_p' = 1.5 H_s = 8.5 \text{ cm}$$



Διάγραμμα 5.1 Σύγκριση θεωρητικού φάσματος Bretschneider με το μετρούμενο πειραματικά για  $H_s=8.5 \text{ cm}$  and  $T_p'=1.5$

Επιλέγουμε το πρόγραμμα **wg36.bst**

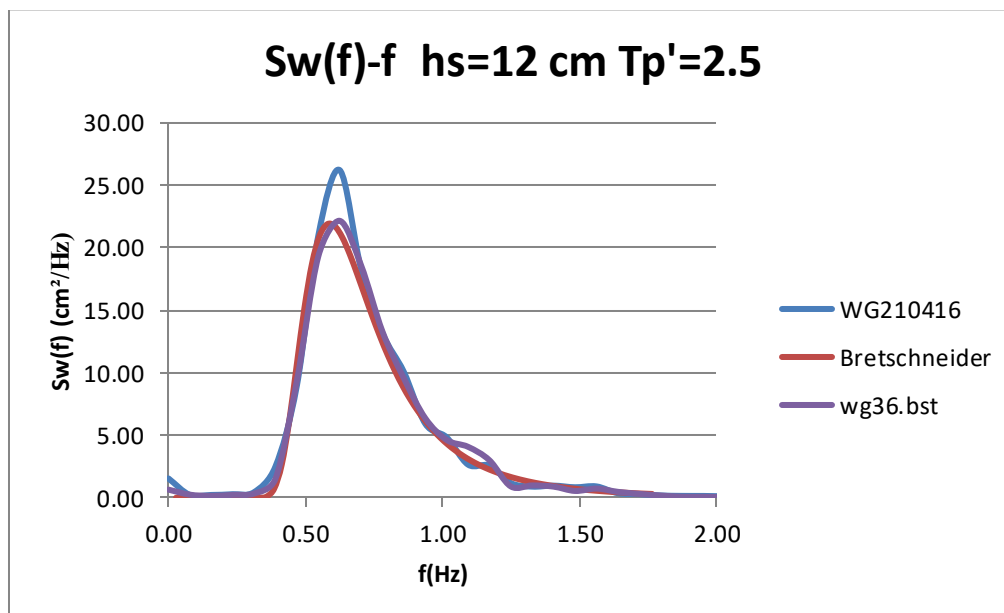
$T_p'=2.0$   $H_s = 10\text{cm}$



Διάγραμμα 5.2 Σύγκριση θεωρητικού φάσματος Bretschneider με το μετρούμενο πειραματικά για  $H_s=10$  cm and  $T_p'=2.0$

Επιλέγουμε το πρόγραμμα **wg36.bst**

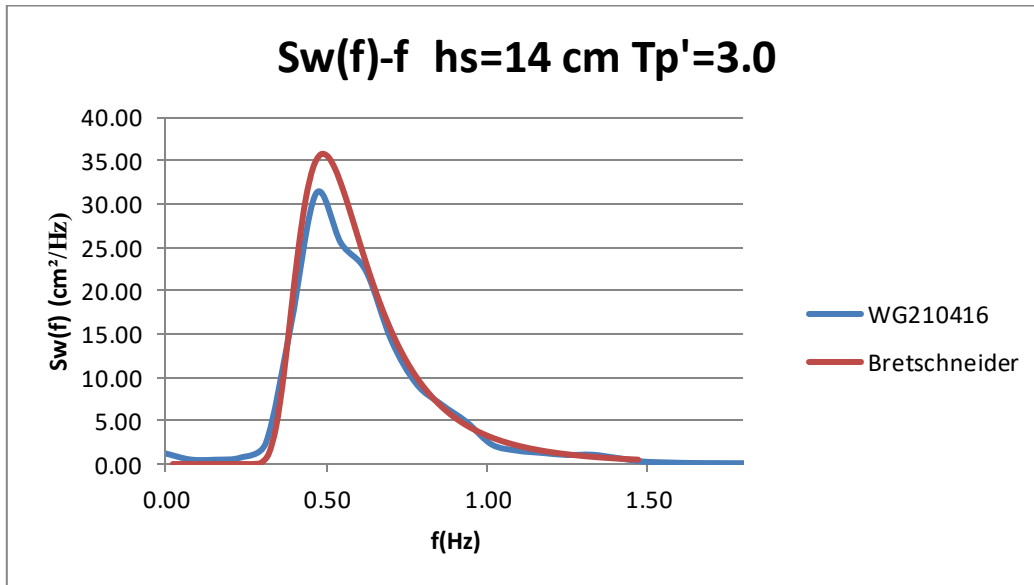
$T_p'=2.5$   $H_s = 12\text{cm}$



Διάγραμμα 5.3 Σύγκριση θεωρητικού φάσματος Bretschneider με το μετρούμενο πειραματικά για  $H_s=12$  cm and  $T_p'=2.5$

Επιλέγουμε το πρόγραμμα **wg36.bst**

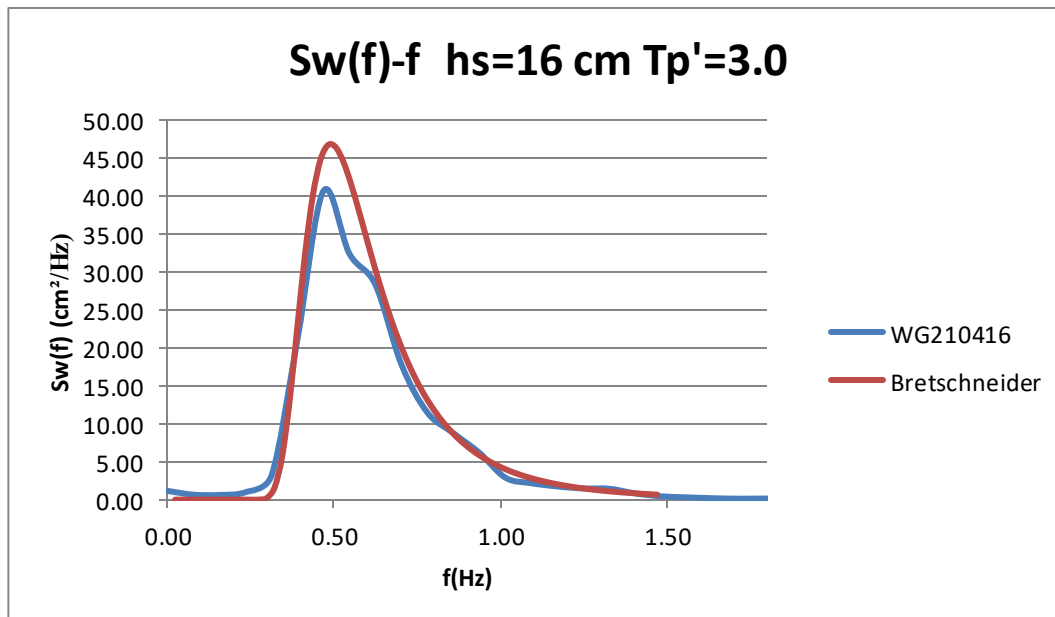
$T_p'=3.0 H_s = 14cm$



Διάγραμμα 5.4 Σύγκριση θεωρητικού φάσματος Bretschneider με το μετρούμενο πειραματικά για  $H_s=14$  cm and  $T_p'=3.0$

Επιλέγουμε το πρόγραμμα **WG210416** με scale factor 1.05

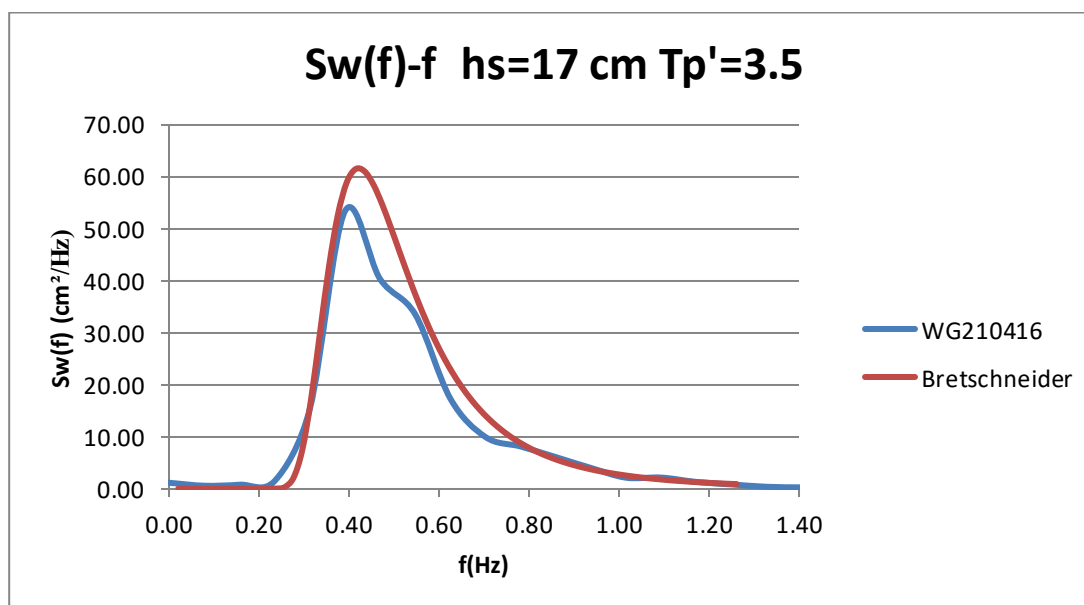
$T_p'=3.0 H_s = 16cm$



Διάγραμμα 5.5 Σύγκριση θεωρητικού φάσματος Bretschneider με το μετρούμενο πειραματικά για  $H_s=16$  cm and  $T_p'=3.0$

Επιλέγουμε το πρόγραμμα **WG210416** με scale factor 1.05

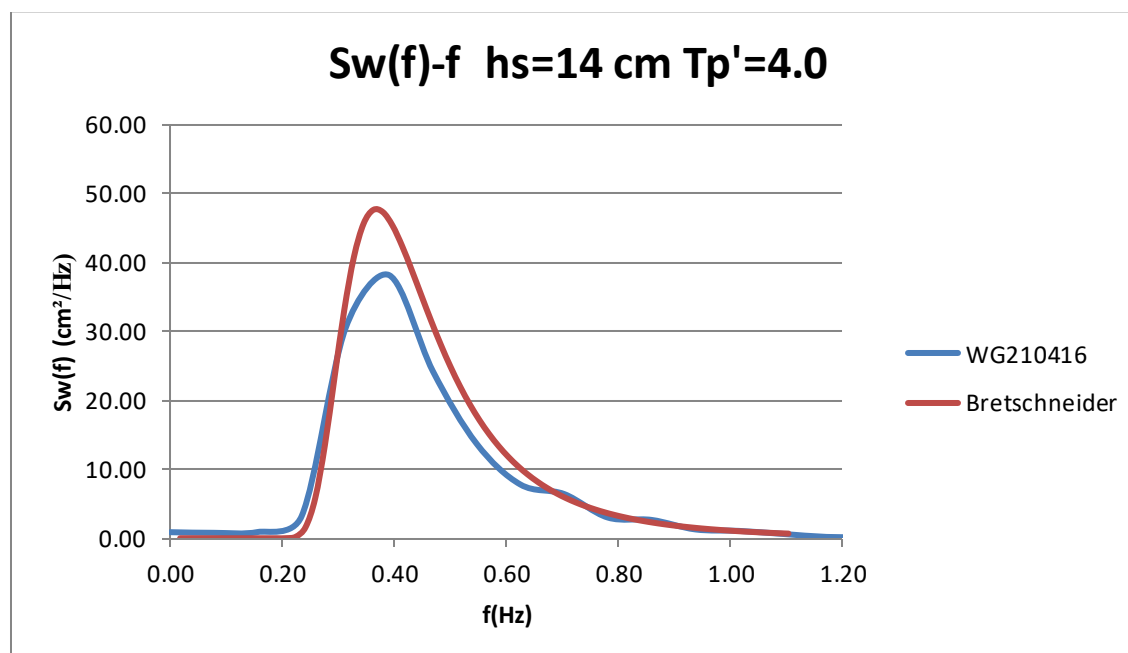
$T_p'=3.5 H_s = 17cm$



Διάγραμμα 5.6 Σύγκριση θεωρητικού φάσματος Bretschneider με το μετρούμενο πειραματικά για  $H_s=17$  cm and  $T_p'=3.5$

Επιλέγουμε το πρόγραμμα **WG210416** με scale factor 1.08

$T_p'=4.0 H_s = 14cm$



Διάγραμμα 5.7 Σύγκριση θεωρητικού φάσματος Bretschneider με το μετρούμενο πειραματικά για  $H_s=14$  cm and  $T_p'=4.0$

Επιλέγουμε το πρόγραμμα **WG210416** με scale factor 1.08

## 6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 6.1 Φάσματα κυματισμών αποκρίσεων

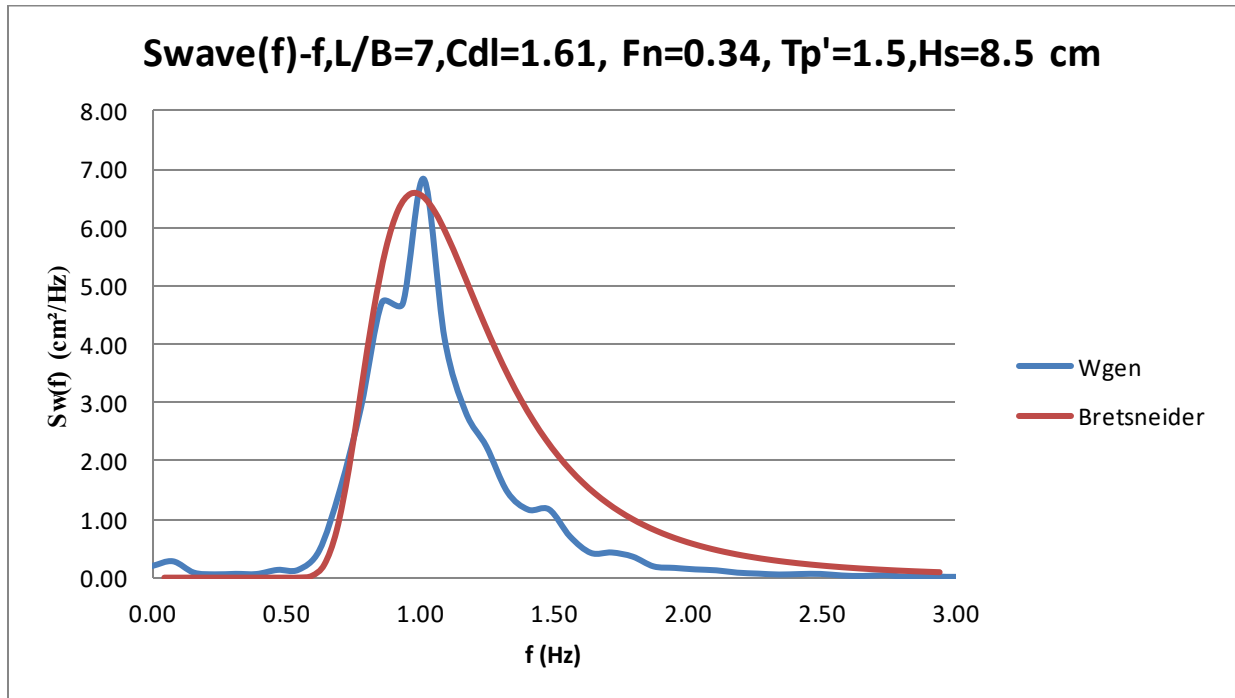
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται για κάθε κατάσταση θάλασσας τα διαγράμματα συνάρτησης φασματικής πυκνότητας της διέγερσης (κυματισμού) και των αποκρίσεων που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές του μοντέλου μας (**166/01**) για την κατάσταση φόρτωσης  $C_{DL}=1.61$  για ταχύτητα ίση με  $F_n=0.34$ .

Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα παρακάτω διαγράμματα:

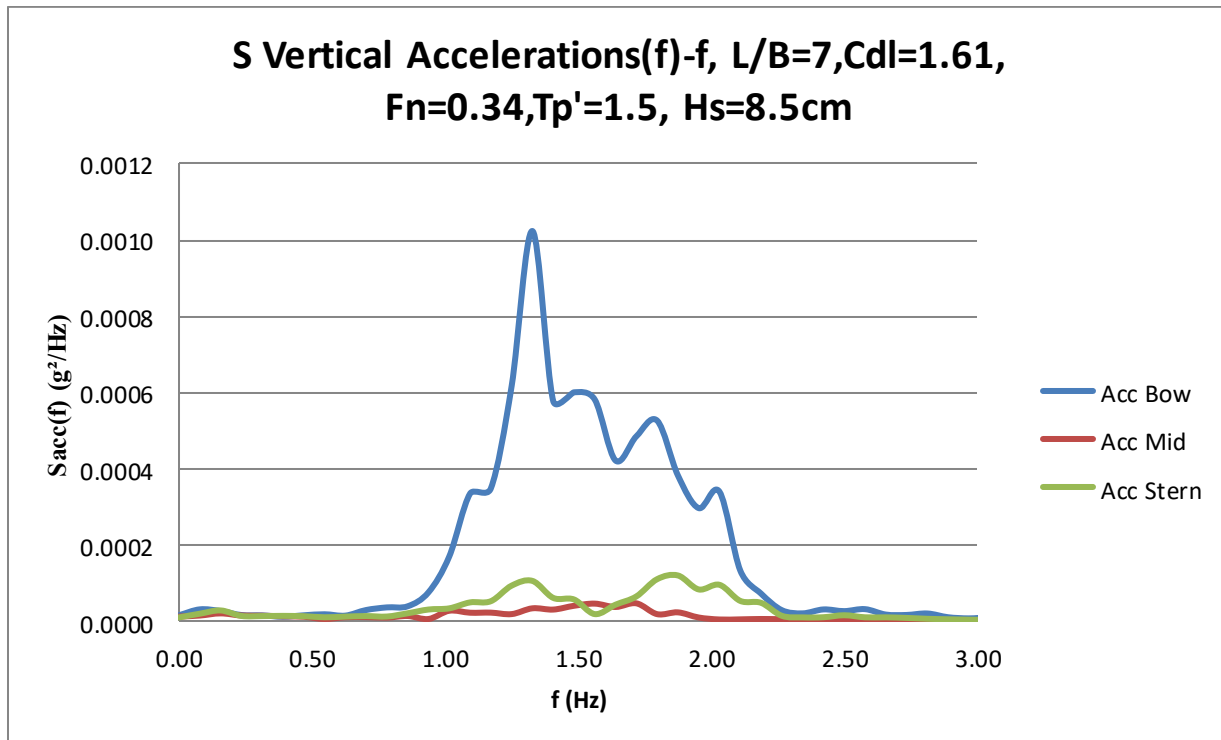
- Πυκνότητα φάσματος  $S(f)$  κυματισμού ( $\text{cm}^2/\text{Hz}$ ), συγκρινόμενη με το επιθυμητό φάσμα Bretschneider
- Πυκνότητα φάσματος  $S(f)$  κατακόρυφων επιταχύνσεων ( $\text{g}^2/\text{Hz}$ ) στις τρεις θέσεις επί του μοντέλου: πλώραθεν, κέντρο βάρους, πρύμνηθεν  
*\*Συμβολισμοί:*  
**BVA (Bow vertical acceleration)**  
**MVA (Mid vertical acceleration)**  
**SVA (Stern vertical acceleration)**
- Πυκνότητα φάσματος  $S(f)$  Heave ( $\text{cm}^2/\text{Hz}$ )
- Πυκνότητα φάσματος  $S(f)$  Pitch ( $\text{deg}^2/\text{Hz}$ )

Πρέπει να αναφέρουμε πως το φάσμα του κύματος αναφέρεται σε ακίνητο σύστημα αναφοράς, σε αντίθεση με τα φάσματα των αποκρίσεων που αναφέρονται σε κινούμενο καθώς οι αισθητήρες αυτοί αφορούν το κινούμενο μοντέλο.

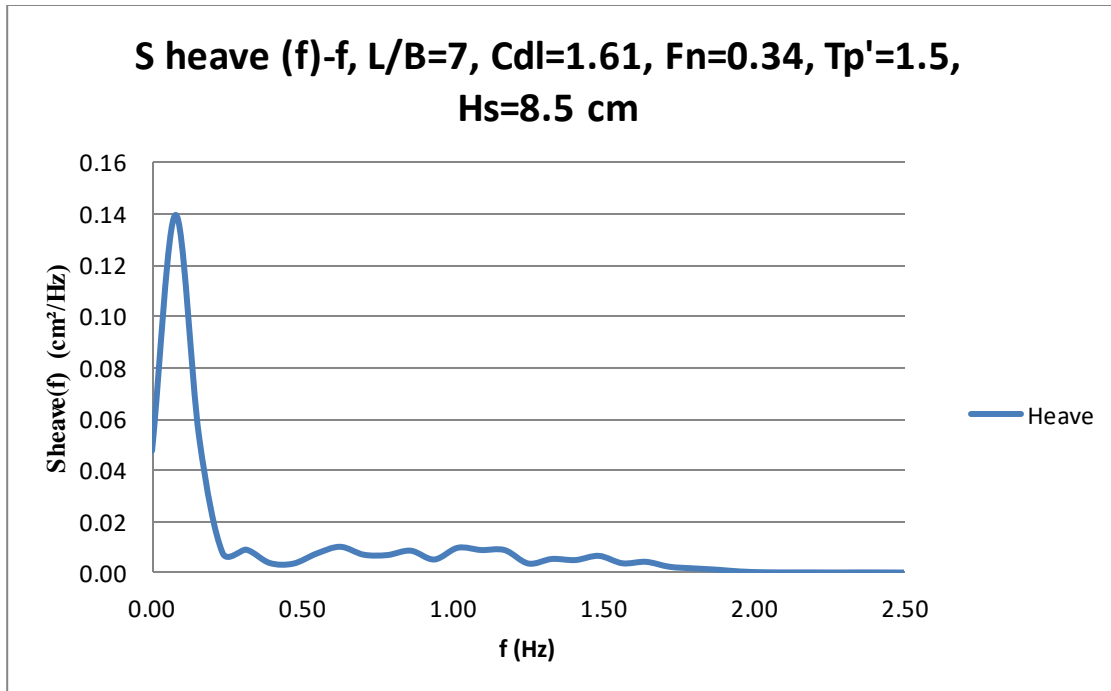
$T_p'=1.5$   $H_s = 8.5$  cm



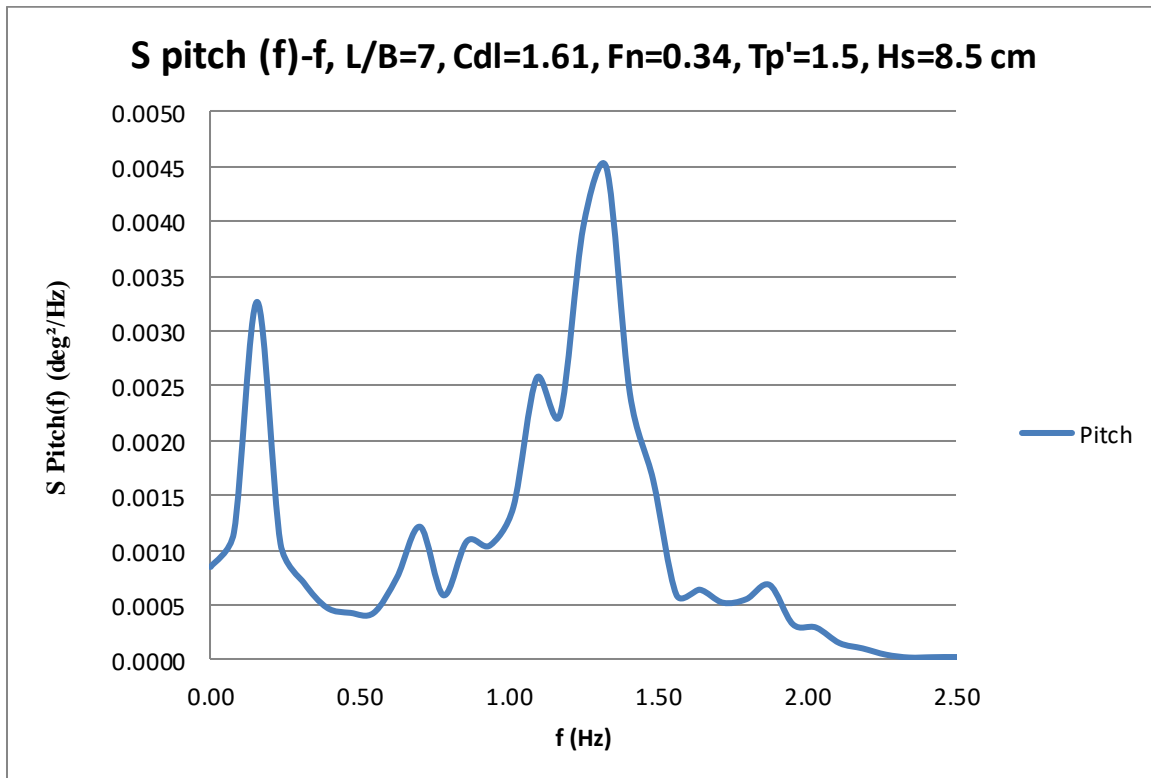
Διάγραμμα 6.1.1 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ανύψωσης επιφάνειας του νερού ( $H_s=8.5$  cm και  $T_p'=1.5$ )



Διάγραμμα 6.1.2 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφων επιταχύνσεων ( $H_s=8.5$  cm και  $T_p'=1.5$ )



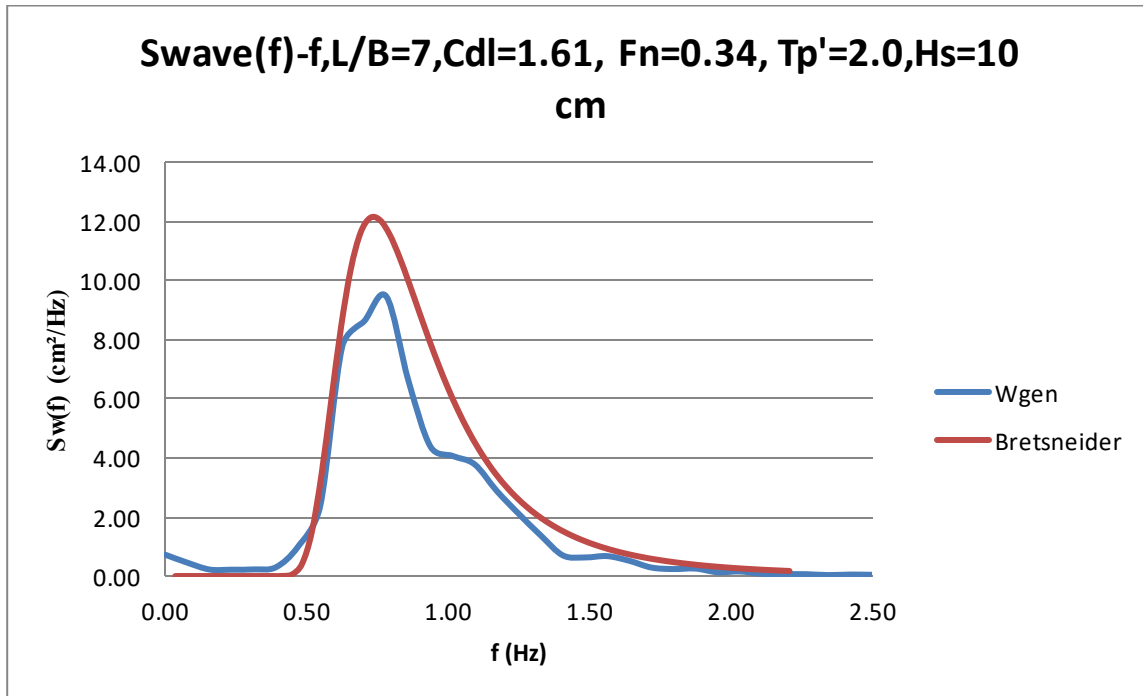
Διάγραμμα 6.1.3 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφης κίνησης (heave) ( $H_s=8.5$  cm και  $T_p'=1.5$ )



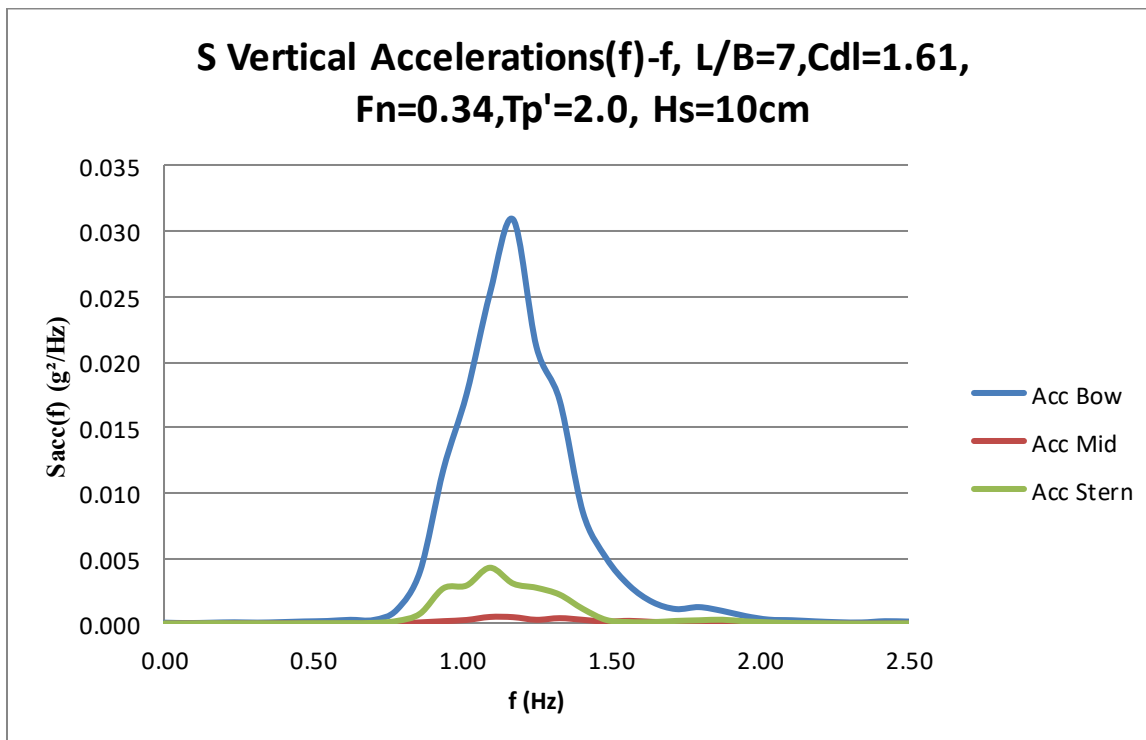
Διάγραμμα 6.1.4 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας προνευτασμού (pitch) ( $H_s=8.5$ cm και  $T_p'=1.5$ )



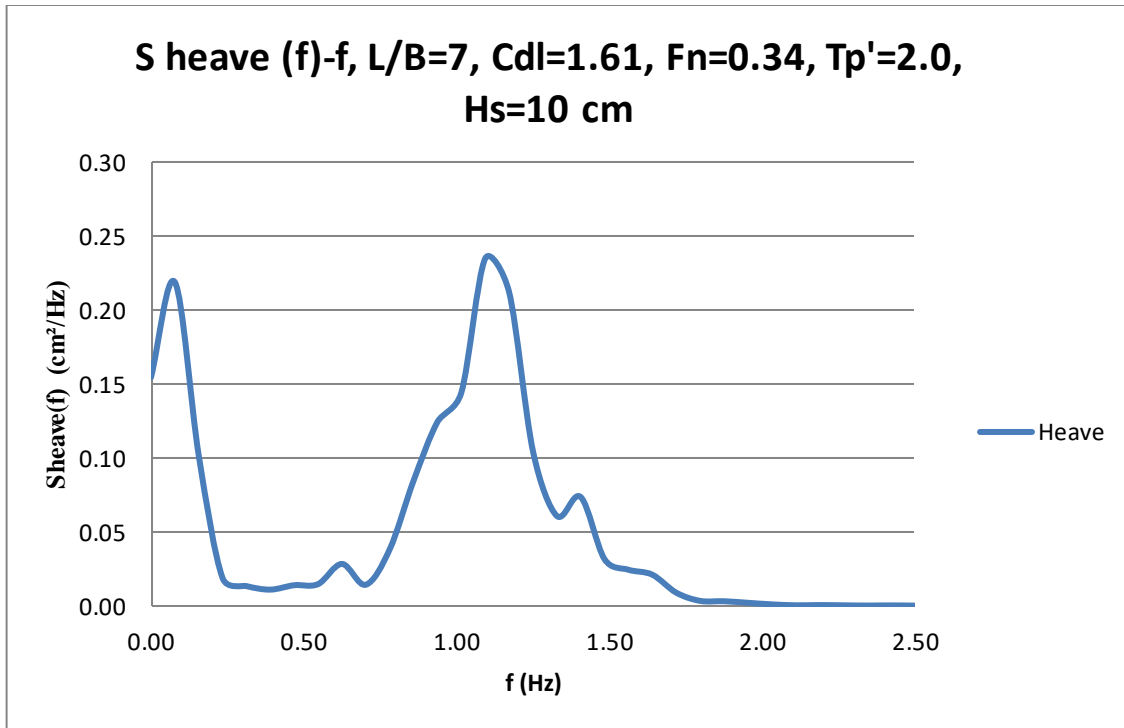
$T_p'=2.0 H_s = 10 \text{ cm}$



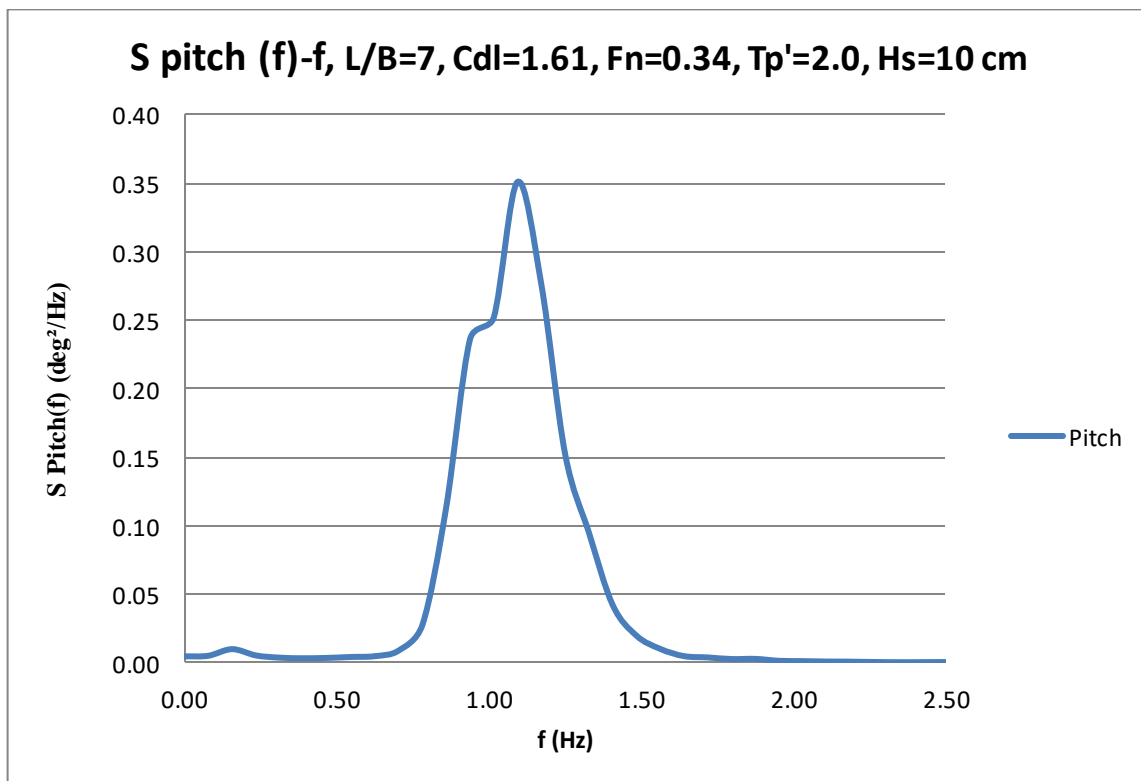
Διάγραμμα 6.1.5 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ανύψωσης επιφάνειας του νερού ( $H_s=10 \text{ cm}$  και  $T_p'=2.0$ )



Διάγραμμα 6.1.6 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφων επιταχύνσεων ( $H_s=10 \text{ cm}$  και  $T_p'=2.0$ )

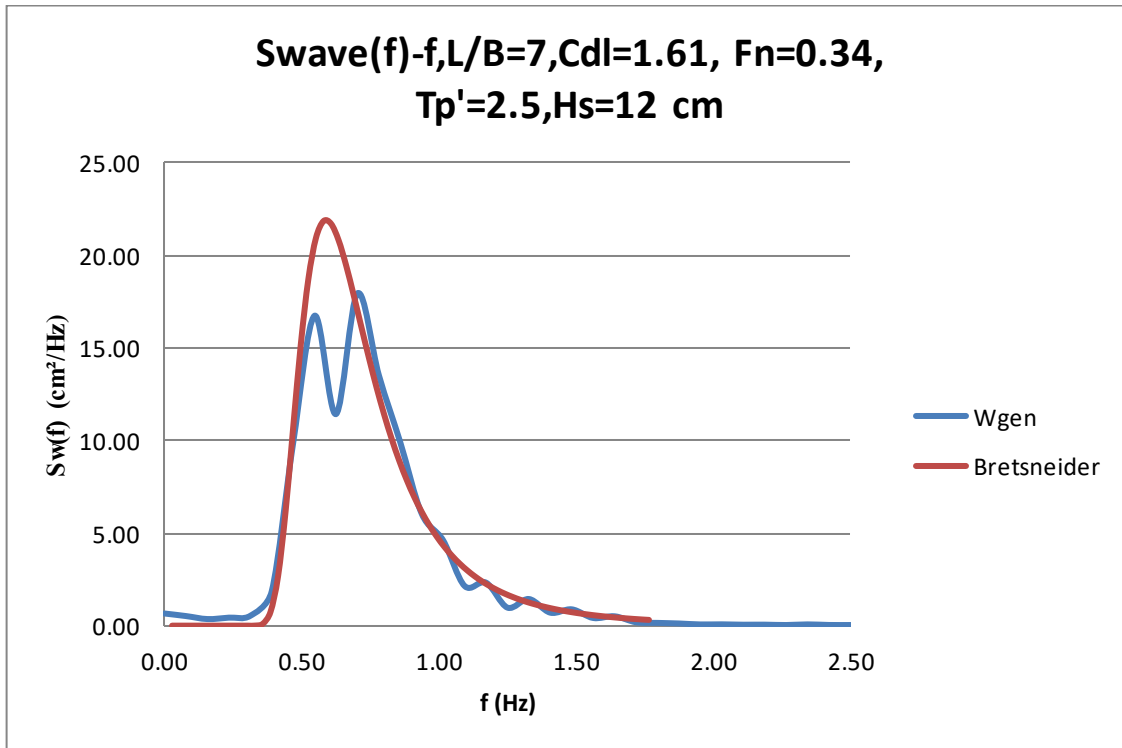


Διάγραμμα 6.1.7 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφης κίνησης (heave) ( $H_s=10$  cm και  $T_p'=2.0$ )

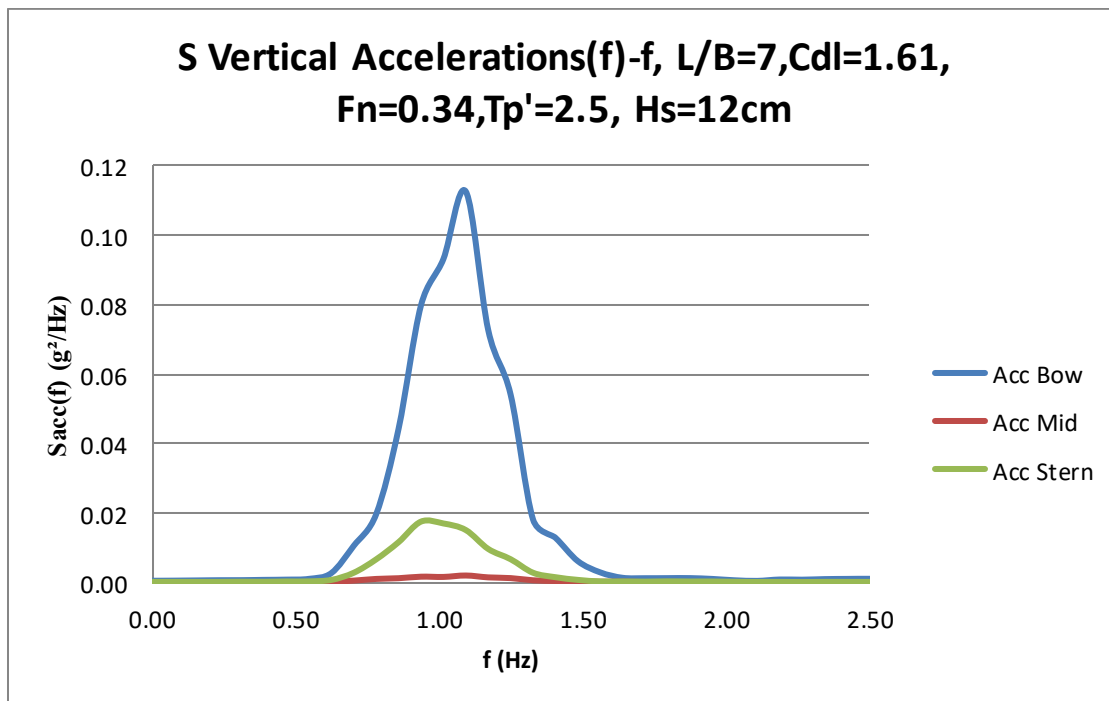


Διάγραμμα 6.1.8 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας προνευτασμού (pitch) ( $H_s=10$ cm και  $T_p'=2.0$ )

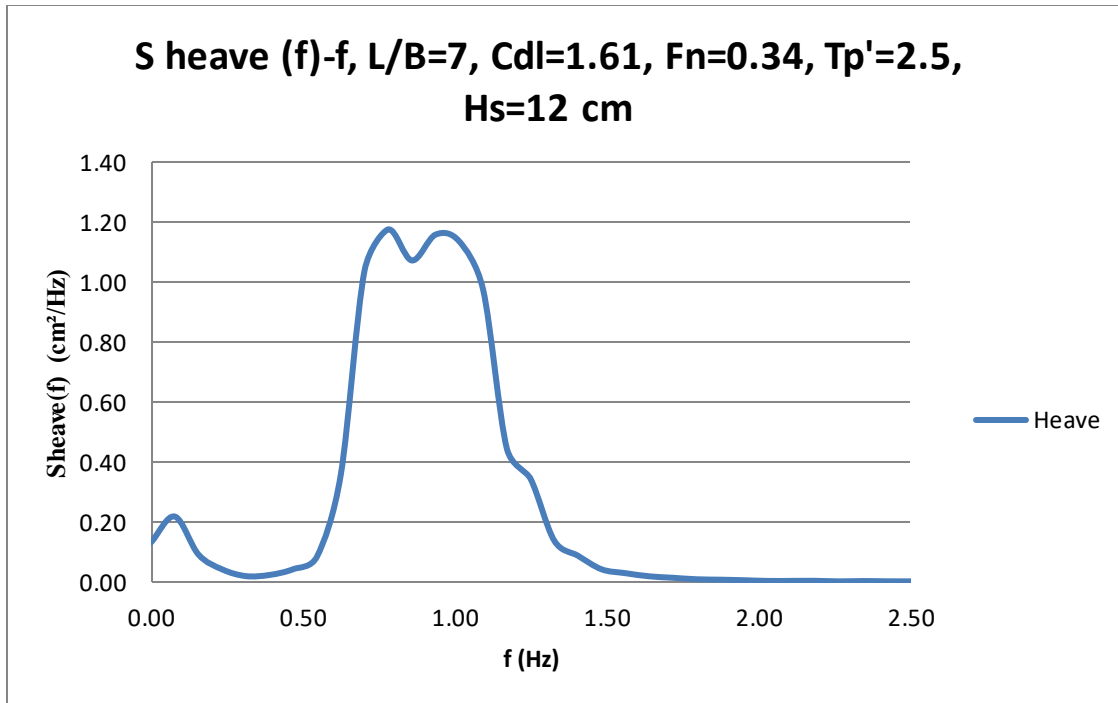
$T_p'=2.5$   $H_s = 12$  cm



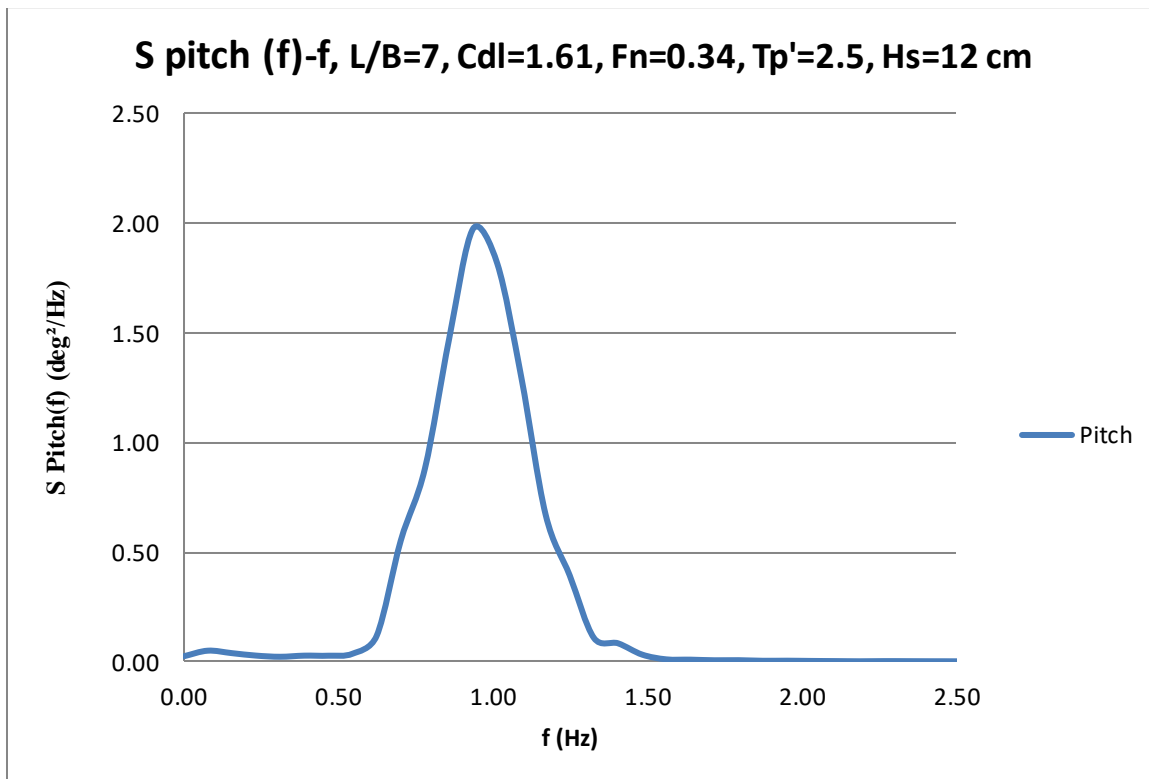
Διάγραμμα 6.1.9 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ανύψωσης επιφάνειας του νερού ( $H_s=12$  cm και  $T_p'=2.5$ )



Διάγραμμα 6.1.10 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφων επιταχύνσεων ( $H_s=12$  cm και  $T_p'=2.5$ )

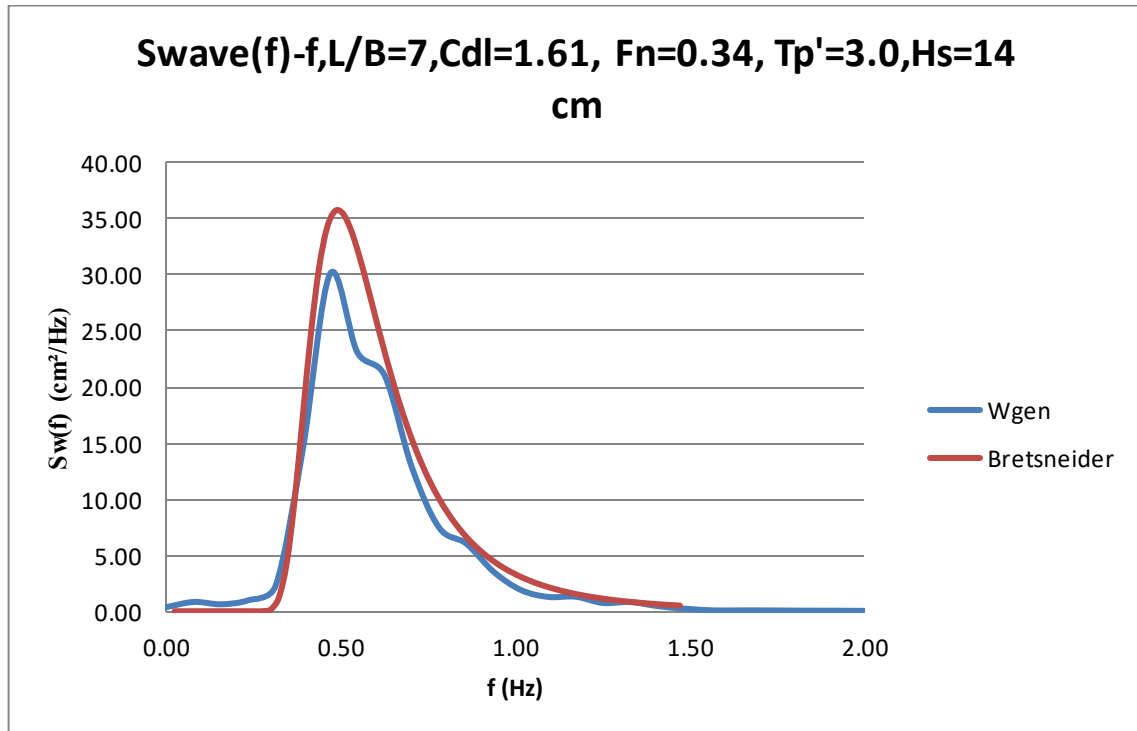


Διάγραμμα 6.1.11 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφης κίνησης (heave) ( $H_s=12$  cm και  $T_p'=2.5$ )

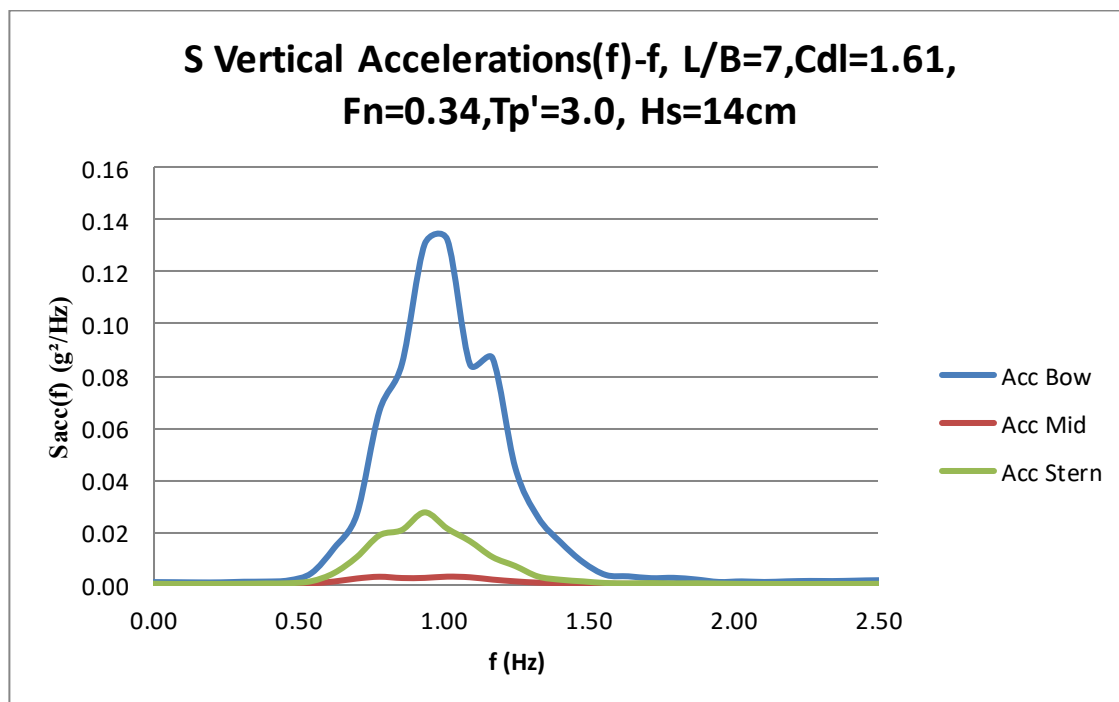


Διάγραμμα 6.1.12 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας προνευτασμού (pitch) ( $H_s=12$  cm και  $T_p'=2.5$ )

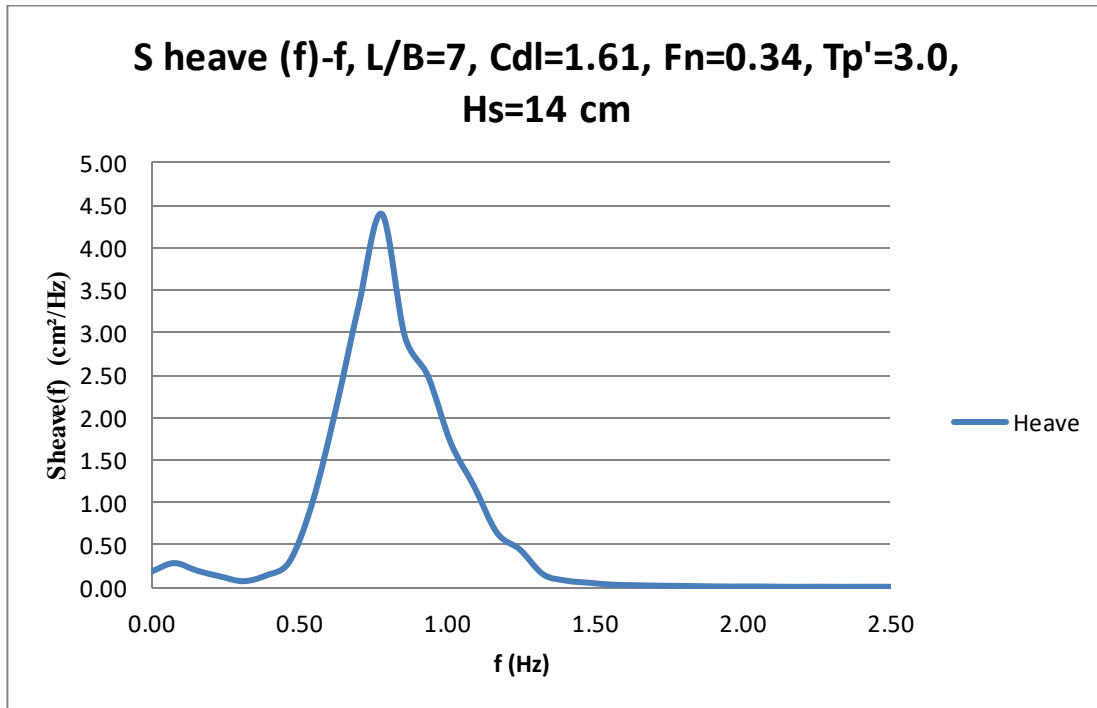
$T_p'=3.0H_s = 14 \text{ cm}$



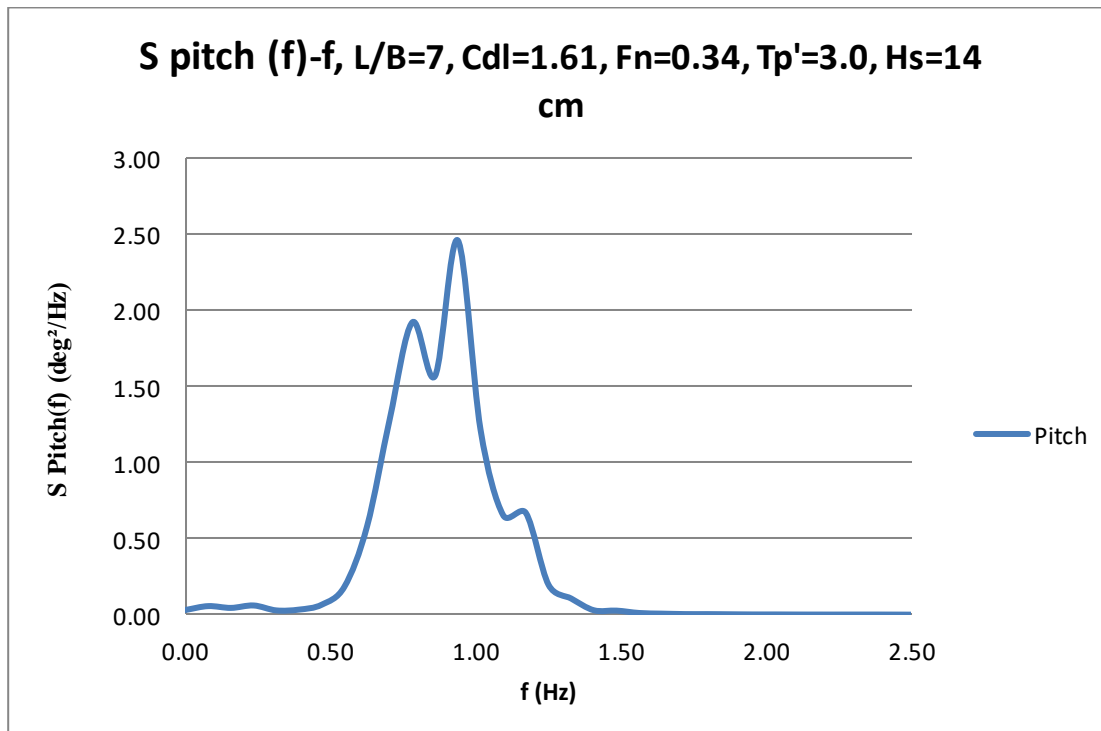
Διάγραμμα 6.1.13 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ανύψωσης επιφάνειας του νερού ( $H_s=14$  cm και  $T_p'=3.0$ )



Διάγραμμα 6.1.14 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφων επιταχύνσεων ( $H_s=14$  cm και  $T_p'=3.0$ )

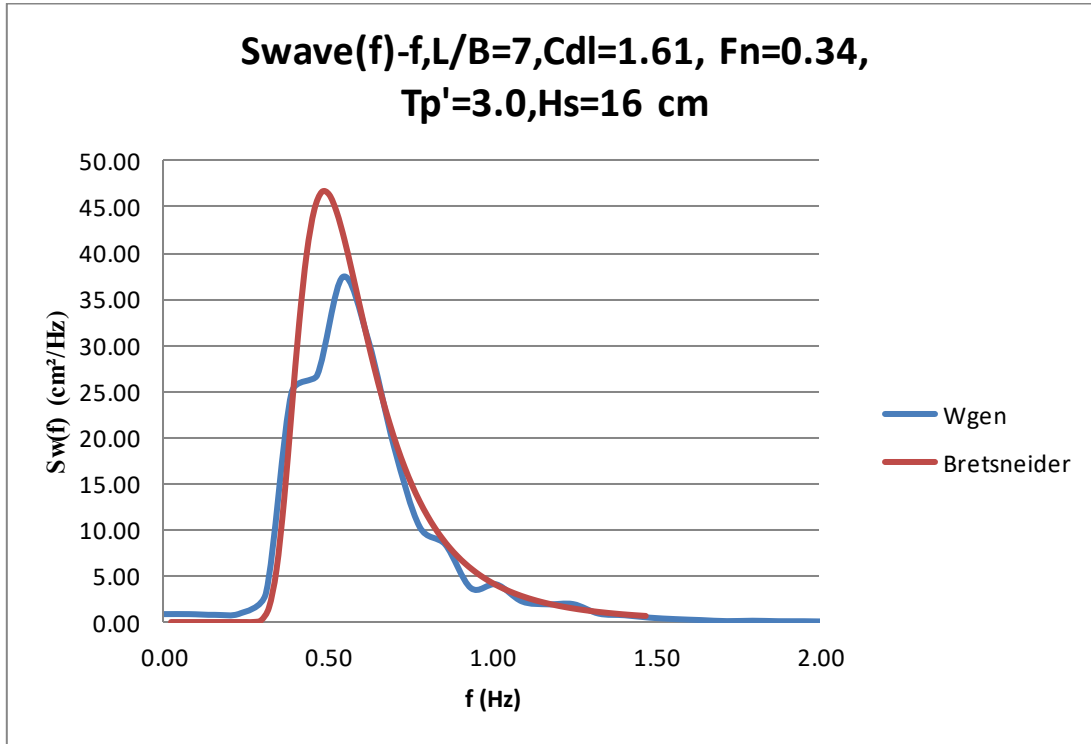


Διάγραμμα 6.1.15 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφης κίνησης (heave) ( $H_s=14$  cm και  $T_p'=3.0$ )

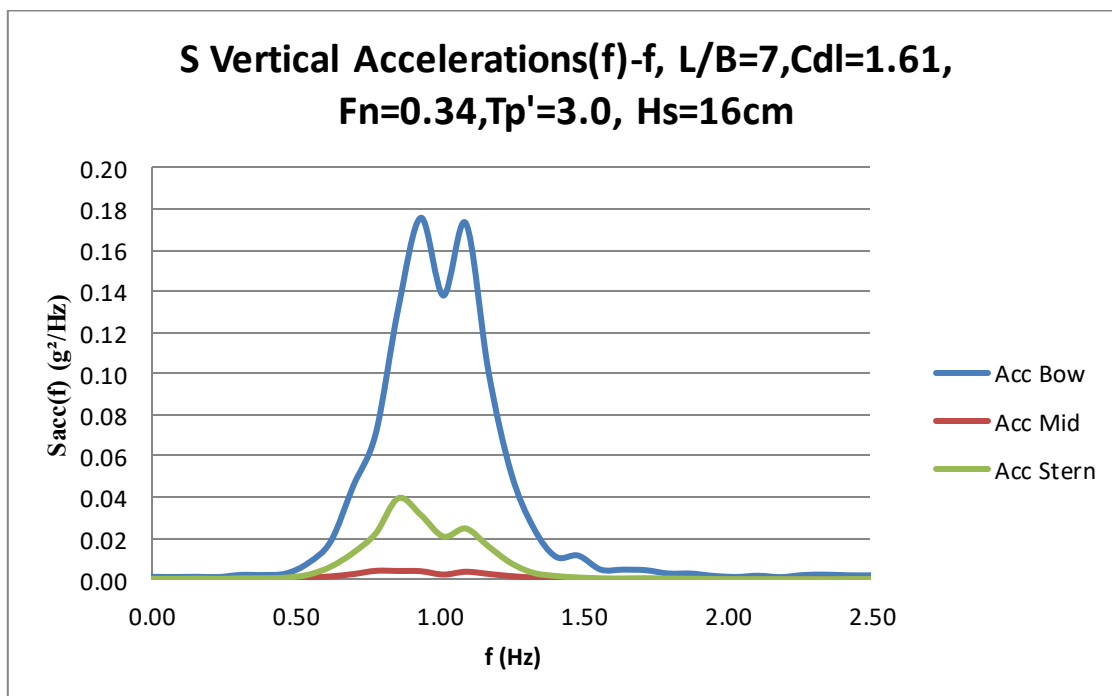


Διάγραμμα 6.1.16 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας προνευτασμού (pitch) ( $H_s=14$  cm και  $T_p'=3.0$ )

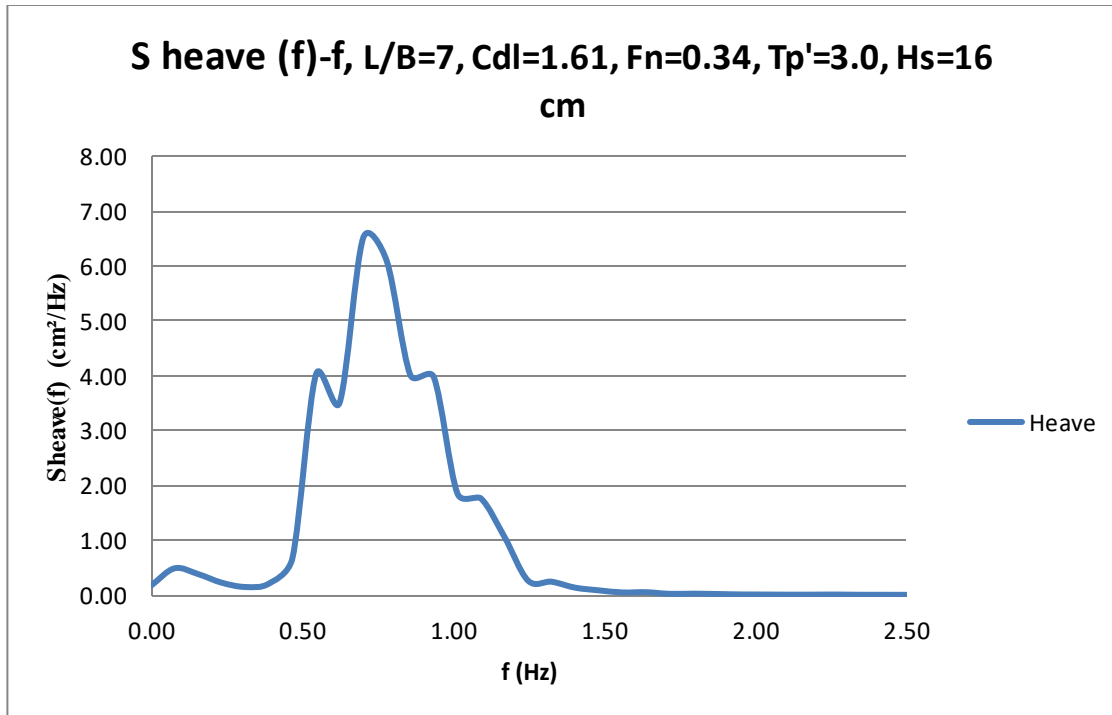
$T_p'=3.0H_s = 16 \text{ cm}$



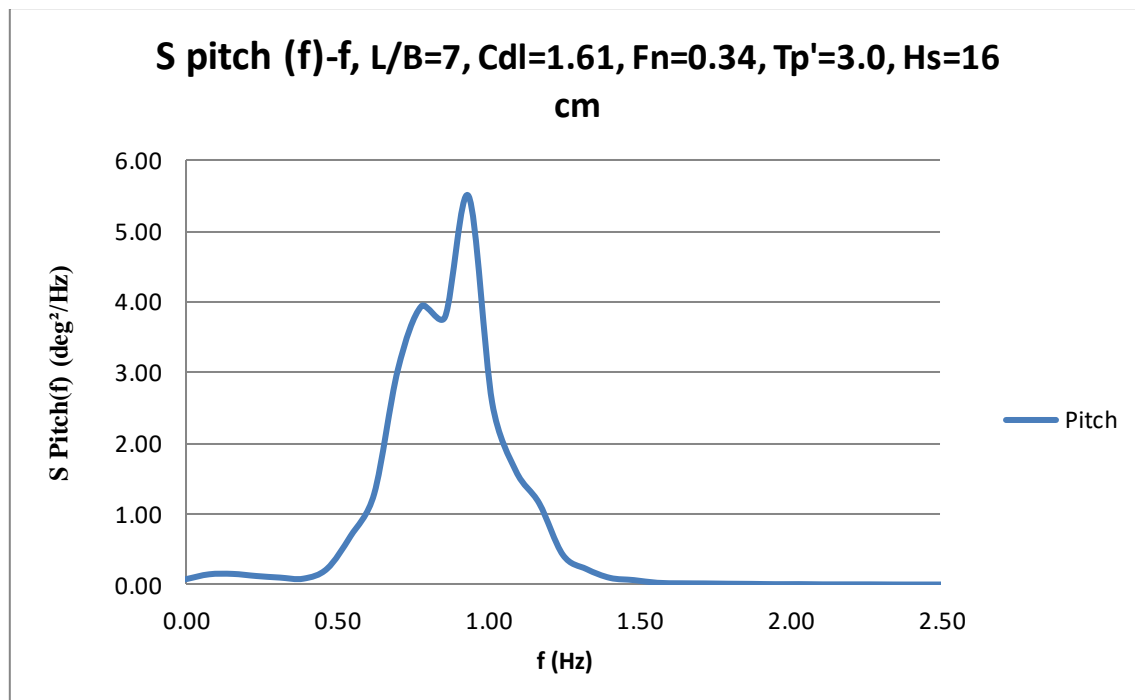
Διάγραμμα 6.1.17 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ανύψωσης επιφάνειας του νερού ( $H_s=16 \text{ cm}$  και  $T_p'=3.0$ )



Διάγραμμα 6.1.18 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφων επιταχύνσεων ( $H_s=16 \text{ cm}$  και  $T_p'=3.0$ )



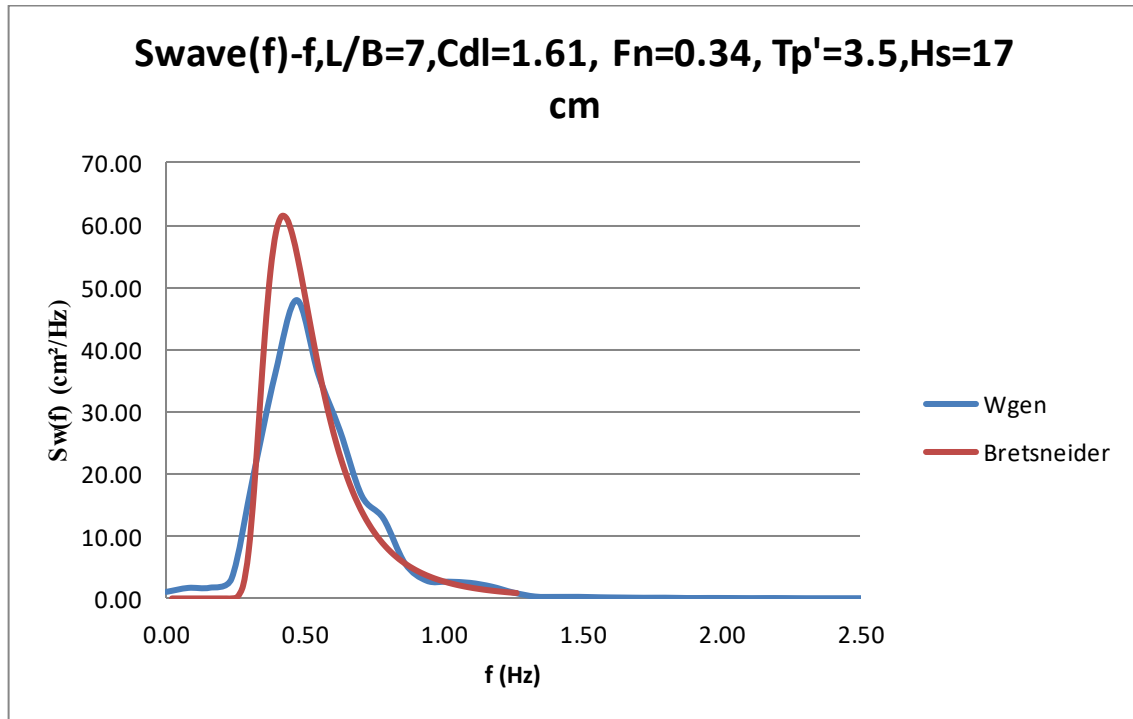
Διάγραμμα 6.1.19 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφης κίνησης (heave) ( $H_s=16$  cm και  $T_p'=3.0$ )



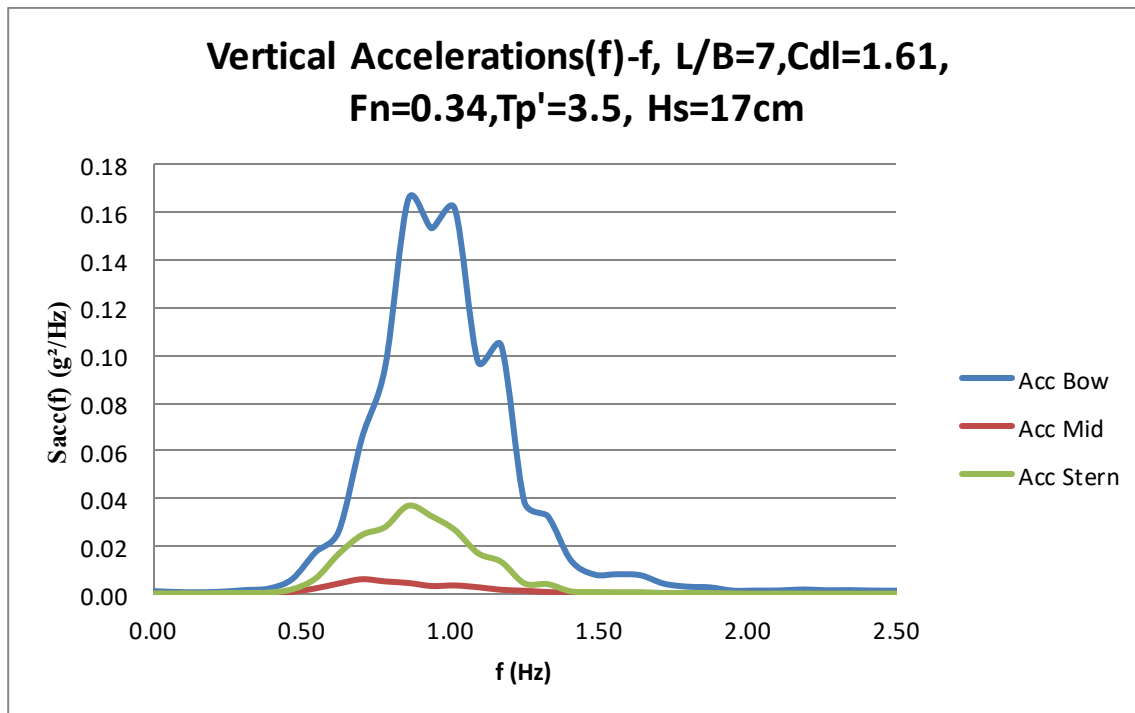
Διάγραμμα 6.1.20 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας προνευτασμού (pitch) ( $H_s=16$ cm και  $T_p'=3.0$ )



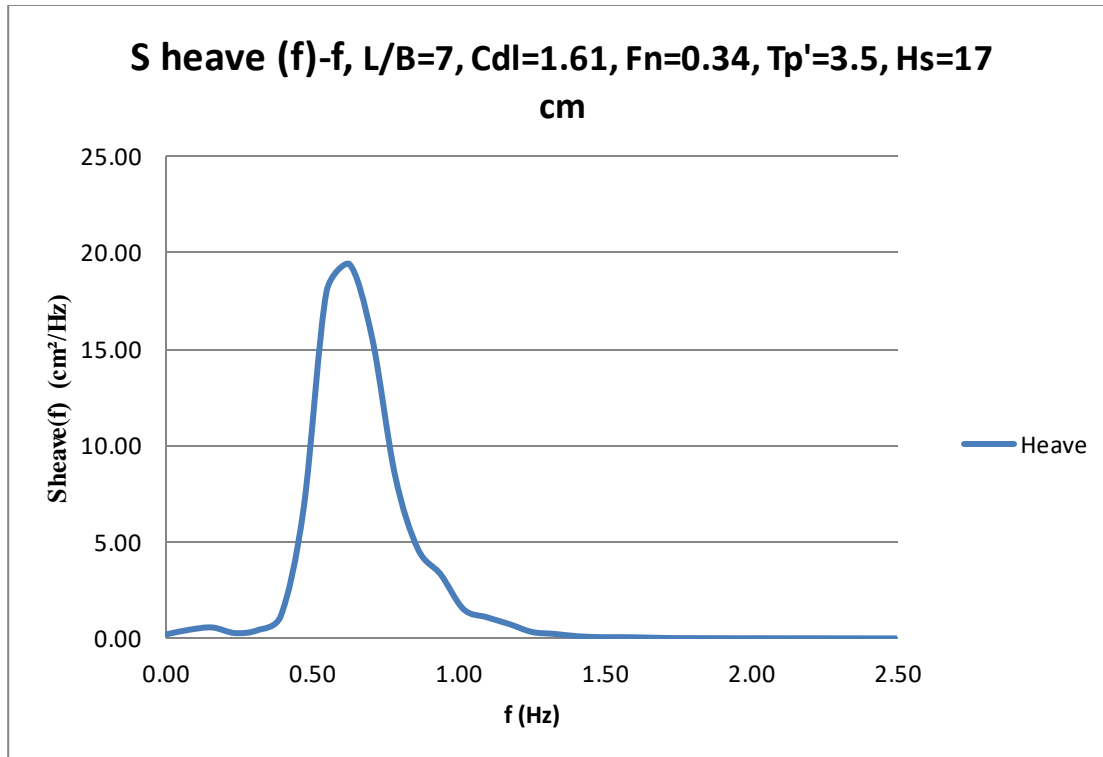
$$T_p' = 3.5 H_s = 17 \text{ cm}$$



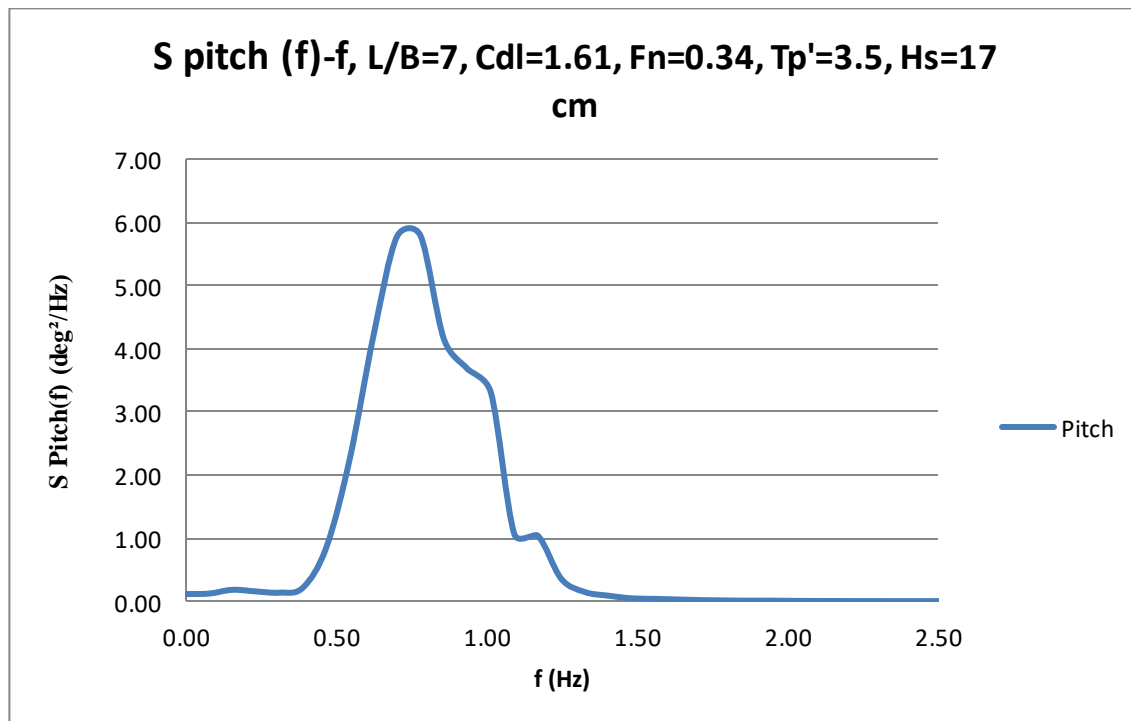
Διάγραμμα 6.1.21 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ανύψωσης επιφάνειας του νερού ( $H_s=17$  cm και  $T_p'=3.5$ )



Διάγραμμα 6.1.22 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφων επιταχύνσεων ( $H_s=17$  cm και  $T_p'=3.5$ )

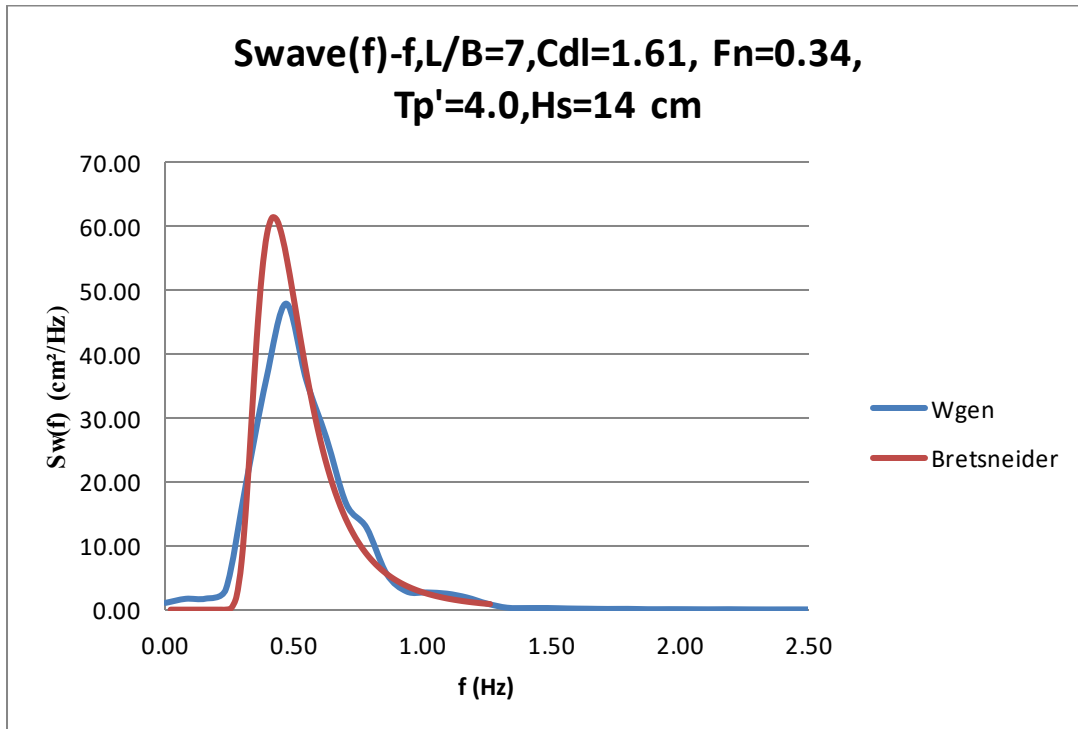


Διάγραμμα 6.1.23 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφης κίνησης (heave) ( $H_s=17$  cm και  $T_p'=3.5$ )

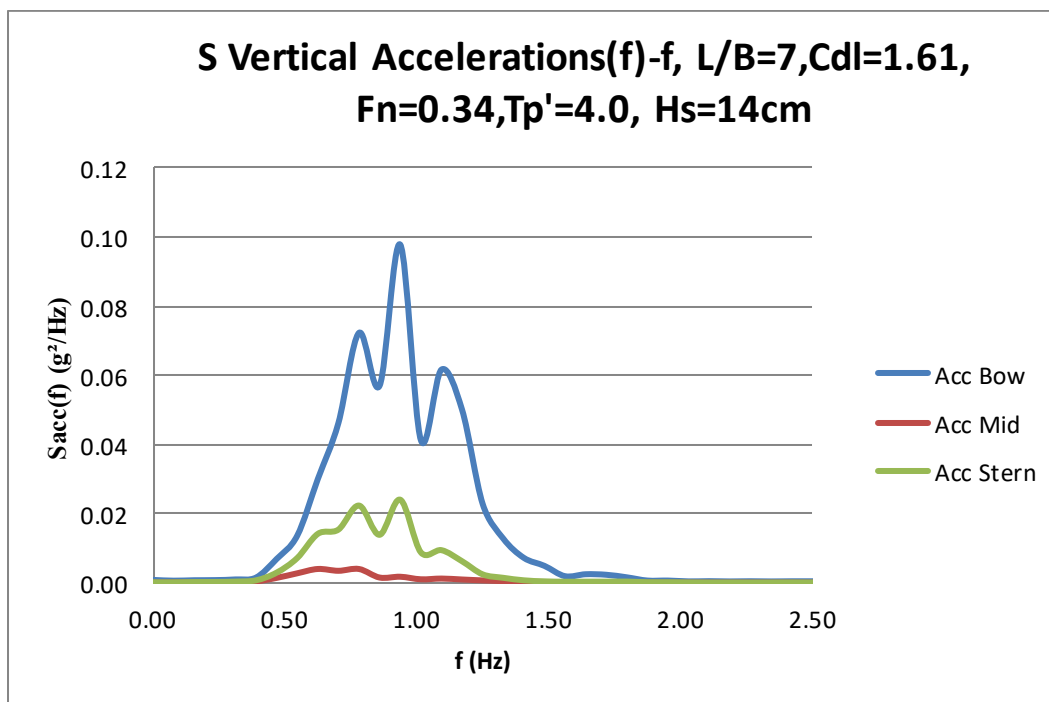


Διάγραμμα 6.1.24 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας προνευτασμού (pitch) ( $H_s=17$ cm και  $T_p'=3.5$ )

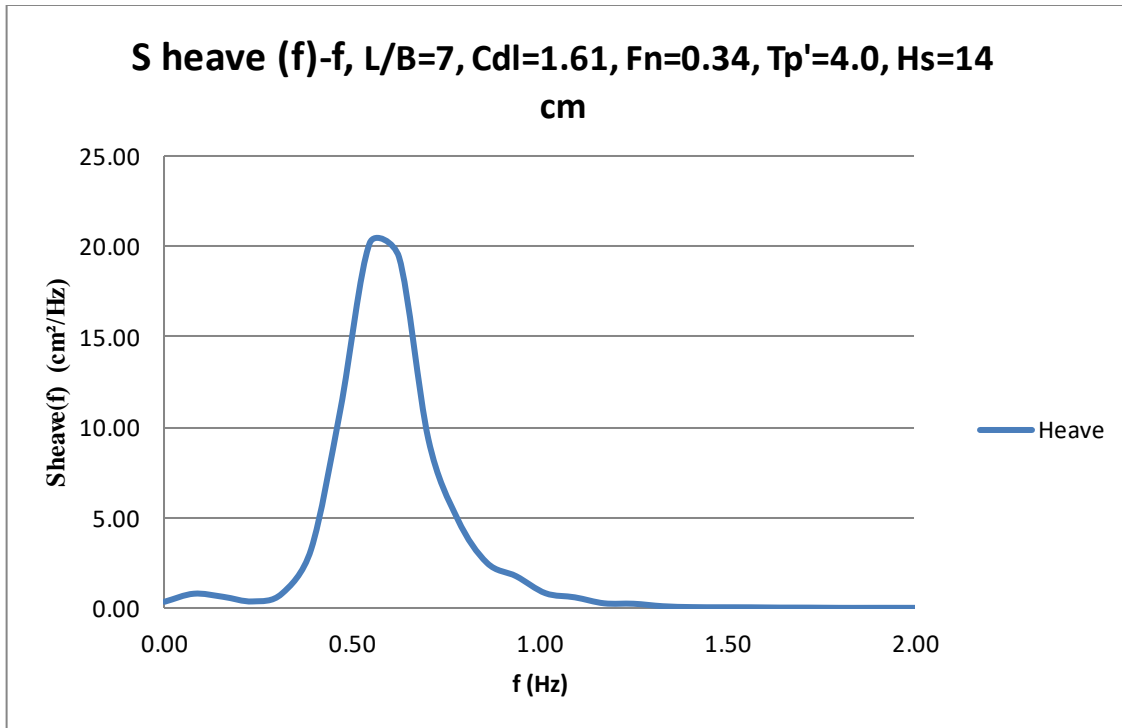
$T_p'=4.0H_s = 14 \text{ cm}$



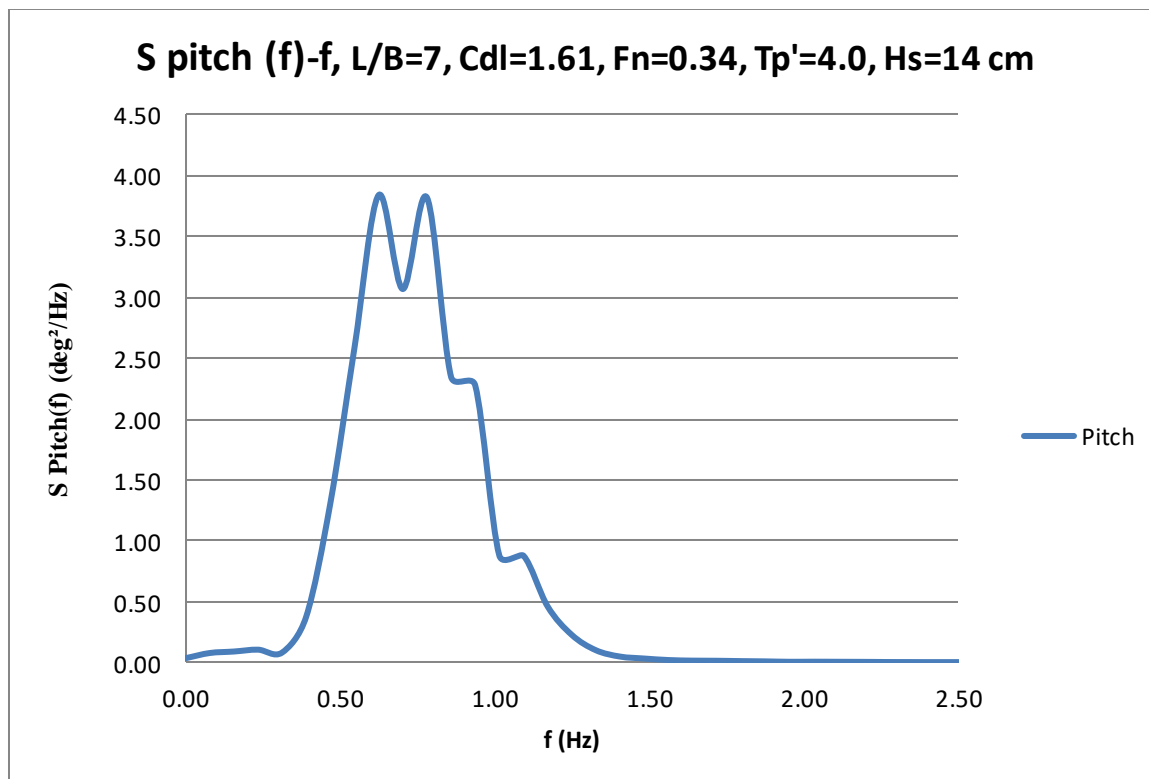
Διάγραμμα 6.1.25 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας ανύψωσης επιφάνειας του νερού ( $H_s=14 \text{ cm}$  και  $T_p'=4.0$ )



Διάγραμμα 6.1.26 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφων επιταχύνσεων ( $H_s=14 \text{ cm}$  και  $T_p'=4.0$ )



Διάγραμμα 6.1.27 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κατακόρυφης κίνησης (heave) ( $H_s=14$  cm και  $T_p'=4.0$ )



Διάγραμμα 6.1.28 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας προνευτασμού (pitch) ( $H_s=14$  cm και  $T_p'=4.0$ )

## 6.2 Τιμές RMS των αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι τιμές RMS των αποκρίσεων που προέκυψαν από τα πειράματα για κάθε αδιάστατη περίοδο κορυφής  $T_p'$  καθώς και τα διαγράμματα των παραπάνω τιμών συναρτήσει της περιόδου  $T_p'$ .

Όπως έχουμε αναφέρει στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να ενταχθεί και αυτή μαζί με προηγούμενες στην προσπάθεια του εργαστηρίου να υπάρξει βάση δεδομένων αξιολόγησης της συμπεριφοράς της συστηματικής σειράς του ΕΜΠ σε τυχαίους κυματισμούς ώστε να μπορεί ο εκάστοτε μελετητής για την εφαρμογή που επιθυμεί (π.χ. κατάσταση θάλασσας) να διαλέξει το κατάλληλο μοντέλο της σειράς συναρτήσεων λόγου L/B και κατάστασης φόρτωσης. Ως εκ τούτου πρέπει να υπάρχουν ενιαία κριτήρια σύγκρισης των μοντέλων και γι' αυτό το λόγο:

- Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής  $T_p'$  ώστε να ανεξαρτητοποιείται από το μήκος του σκάφους.
- Γίνεται αναγωγή των αποκρίσεων ως προς  $H_s$  ούτως ώστε να έχουμε καλύτερη συγκριτική εποπτεία μεταξύ απόκρισης – διέγερσης και να είναι πιο εύκολα συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα άλλων πειραμάτων που έχουν γίνει σε άλλα μοντέλα – πλοία.

Προφανώς γνωρίζουμε ότι το σημαντικό ύψος κύματος, που μετρήθηκε και υπολογίστηκε από τη σχέση  $H_{1/3}=4 \cdot RMS$  διαφέρει από το αρχικά επιδιωκόμενο για διάφορους λόγους. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε έναν διορθωτικό συντελεστή  $k$  «ενέργειας», που είναι ο λόγος της επιδιωκόμενης τιμής προς αυτήν που στα πειράματα επιτύχαμε. Τα μεγέθη των αποκρίσεων λοιπόν τροποποιήθηκαν με τις παρακάτω γραμμικές σχέσεις ώστε να προσεγγιστούν οι τιμές που θα παίρναμε εφόσον είχαμε επιτύχει το ζητούμε σημαντικό ύψος κύματος:

$$RMS_{\text{διορθωμένο}} = RMS_{\text{μέτρησης}} \cdot k$$

$$R_{AW\text{διορθωμένο}} = R_{AW\text{μέτρησης}} \cdot k^2$$

Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι εξής πίνακες:

- RMS τιμές όλων των αποκρίσεων για κάθε αδιάστατη περίοδος κορυφής  $T_p'$  όπως προέκυψαν από τα πειράματα καθώς και οι τιμές των διορθωτικών συντελεστών  $k$
- RMS τιμές όλων των αποκρίσεων διορθωμένες με το συντελεστή  $k$  και διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  για κάθε αδιάστατη περίοδος κορυφής  $T_p'$

Και τα εξής διαγράμματα:

- RMS τιμές Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στις τρεις θέσεις (πλήρη, κέντρο βάρους, πρύμνη) επί του μοντέλου διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  (g/cm) συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής  $T_p'$

\*Συμβολισμοί:

**BVA (Bow vertical acceleration)**

**MVA (Mid vertical acceleration)**

**SVA (Stern vertical acceleration)**

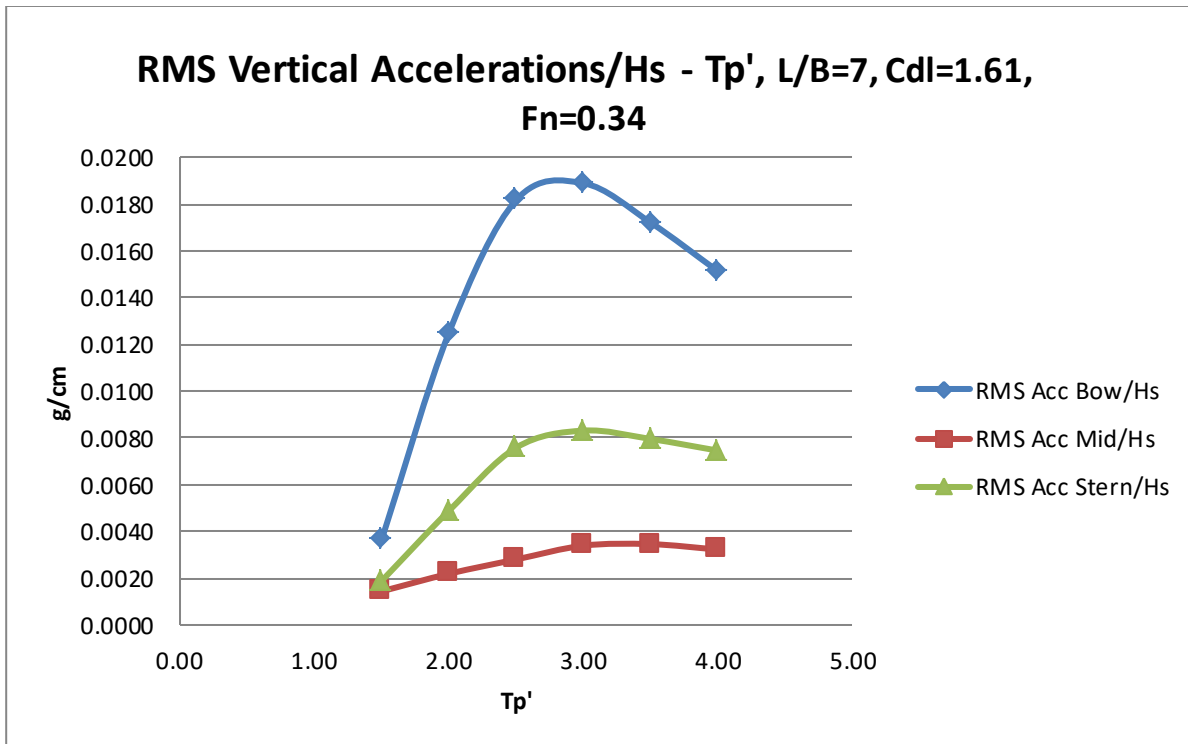
- RMS τιμές Κατακόρυφης Κίνηση –Heave διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  (cm/cm) συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής  $T_p'$
- RMS τιμές Προνευτασμού –Pitch διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  (deg/cm) συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής  $T_p'$
- Τιμές Πρόσθετης Αντίστασης-AddedResistance διαιρεμένες με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος  $H_s$  ( $kr/cm^2$ ) συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής  $T_p'$ .

RMS									
Τρ'	BVA (g)	MVA (g)	SVA (g)	Added Res (kp)	Heave (cm)	Pitch (deg)	Hs ζητούμενο (cm)	Hs πειραμάτων (cm)	k
1.50	0.0254	0.0100	0.0131	0.1617	0.1673	0.0534	8.5	6.92	1.223
2.00	0.1095	0.0192	0.0428	0.3850	0.3660	0.3571	10	8.75	1.143
2.50	0.2079	0.0321	0.0868	0.7108	0.8284	0.8720	12	11.44	1.049
3.00	0.2450	0.0430	0.1086	0.9748	1.3096	0.9395	14	12.79	1.095
3.00	0.2842	0.0511	0.1251	1.1364	1.6819	1.4119	16	15.05	1.063
3.50	0.2865	0.0576	0.1325	1.2121	2.5548	1.6287	17	16.66	1.020
4.00	0.2066	0.0441	0.1019	0.6087	2.4615	1.3373	14	13.67	1.024

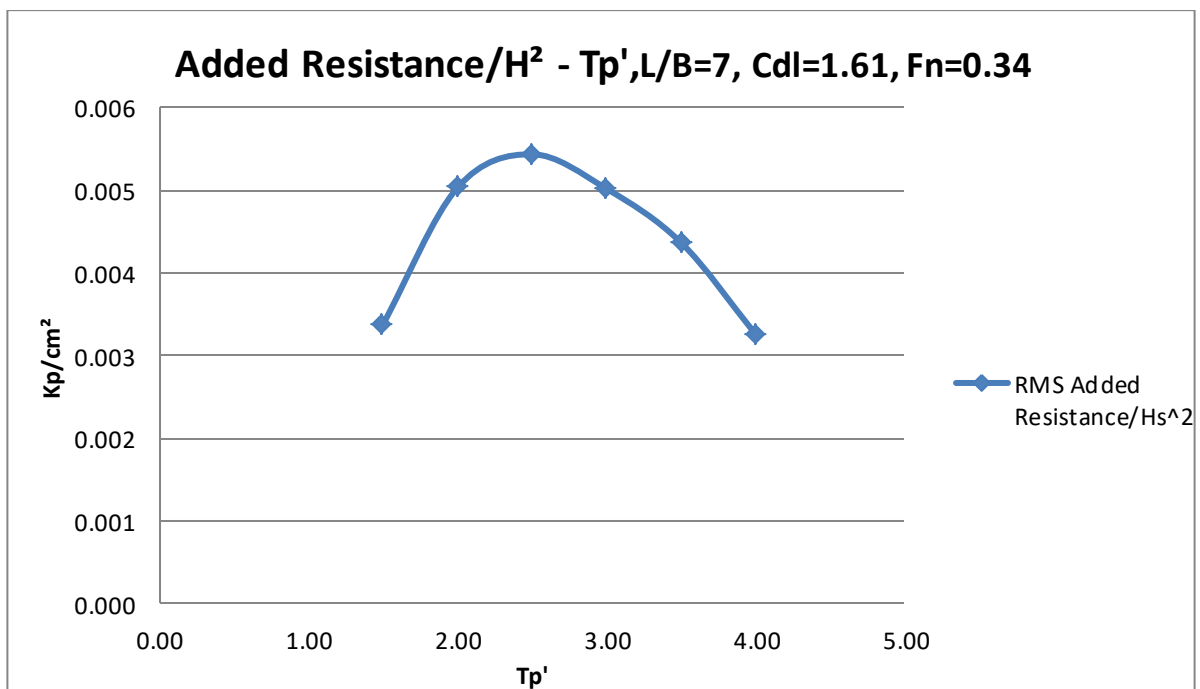
Πίνακας 7.1 Τιμές RMS των μετρούμενων μεγεθών συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής

RMS							
Τρ'	Hs (cm)	BVA/Hs (g/cm)	MVA/Hs (g/cm)	SVA/Hs (g/cm)	Added Res/Hs <sup>2</sup> (kp/cm <sup>2</sup> )	Heave/Hs (cm/cm)	Pitch/Hs (deg/cm)
1.50	8.5	0.0037	0.0014	0.0019	0.0034	0.0242	0.0077
2.00	10	0.0125	0.0022	0.0049	0.0050	0.0418	0.0408
2.50	12	0.0182	0.0028	0.0076	0.0054	0.0724	0.0763
3.00	14	0.0192	0.0034	0.0085	0.0060	0.1024	0.0735
3.00	16	0.0189	0.0034	0.0083	0.0050	0.1118	0.0938
3.50	17	0.0172	0.0035	0.0080	0.0044	0.1533	0.0977
4.00	14	0.0151	0.0032	0.0075	0.0033	0.1800	0.0978

Πίνακας 7.2 Τιμές RMS των μετρούμενων μεγεθών διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής

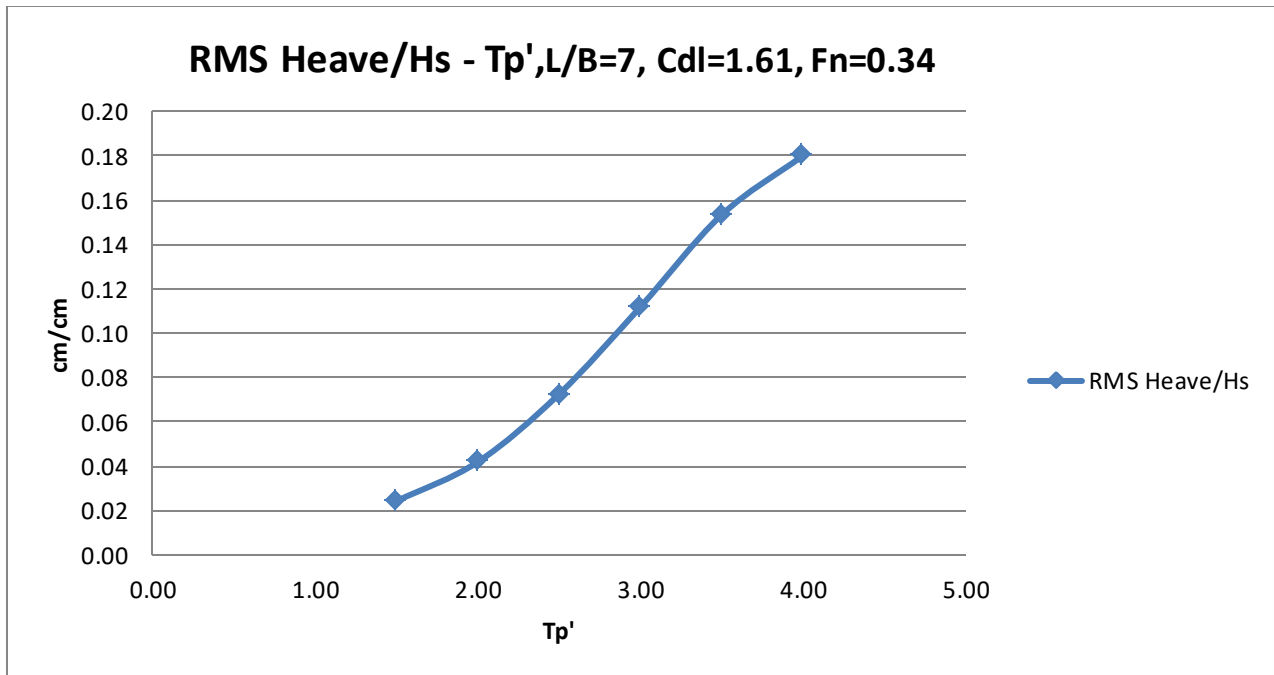


Διάγραμμα 6.2.1 Τιμές RMS των κατακόρυφων επιταχύνσεων διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής.

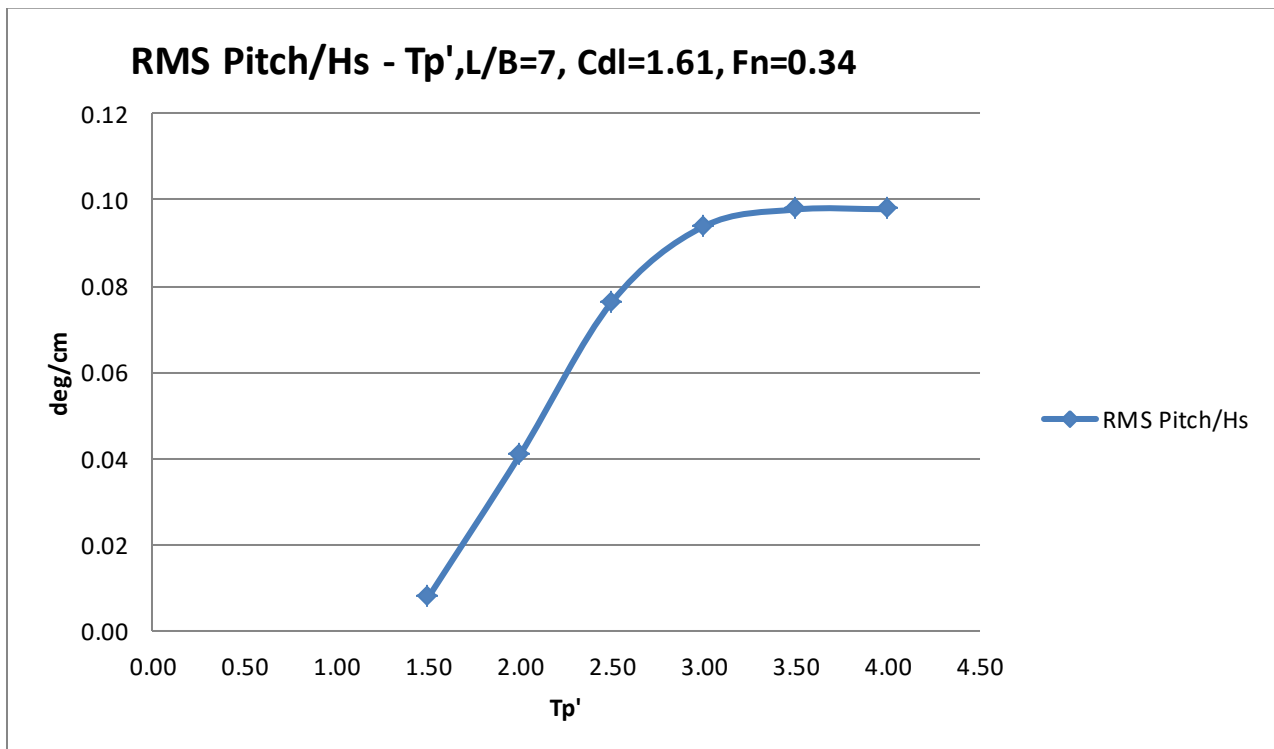


Διάγραμμα 6.2.2 Τιμές της πρόσθετης αντίστασης διαιρεμένες με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής.





Διάγραμμα 6.2.3 Τιμές RMS της κατακόρυφης κίνησης (heave) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής.



Διάγραμμα 6.2.4 Τιμές RMS του προνευμασμού (pitch) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής.

### 6.3 Επίδραση του εκτοπίσματος στις αποκρίσεις με σταθερό $L/B=7$

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των αποκρίσεων με μεταβαλλόμενη παράμετρο το **συντελεστή εκτοπίσματος  $C_{DL}$**  και σταθερό τον λόγο  $L/B$  και την ταχύτητα ( $F_n$ ).

Ως εκ τούτου συγκρίνουμε τη δυναμική συμπεριφορά για λόγο  $L/B=7$ ,  $F_n=0.34$  και για τρία εκτοπίσματα που αντιστοιχούν σε  $C_{DL}=1.61, 3.00, 4.23$  τα οποία είναι και τα εκτοπίσματα της συστηματικής σειράς. Τα δεδομένα για τα αποτελέσματα τα συλλέγουμε αφενός από την παρούσα διπλωματική και αφετέρου από παλαιότερες.

Συγκεκριμένα:

- Για  $C_{DL}=1.61$  έχουμε τα αποτελέσματα από την **παρούσα διπλωματική** για το μοντέλο **166/01**
- Για  $C_{DL}=3.00$  έχουμε τα αποτελέσματα από τη **διπλωματική του Ρούσου(2007)** για το μοντέλο **116/96**
- Για  $C_{DL}=4.23$  έχουμε τα αποτελέσματα από τη **διπλωματική του Χουντάλα(2016)** για το μοντέλο **116/96**

Οπότε παρακάτω παρουσιάζονται τα **εξής συγκριτικά διαγράμματα**:

- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Acceleration Bow-BVA) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Acceleration Mid-MVA) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρύμνη (Acceleration Stern-SVA) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).
- RMS τιμή Κατακόρυφης Κίνησης (Heave) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [cm/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).
- RMS τιμή Κίνησης Προνευτασμού (Pitch) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [deg/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).
- Τιμή πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένη με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος  $H_s^2$  [kr/cm<sup>2</sup>] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).

Πρέπει να επισημάνουμε ότι το μοντέλο που εξετάζουμε (166/01) είναι μοντέλο μεγάλης κλίμακας ενώ το άλλο (116/96) μικρής κλίμακας. Οπότε, πρέπει να ανάγουμε τα μεγέθη μικρής κλίμακας σε μεγέθη μεγάλης κλίμακας. Υπενθυμίζουμε ότι το μοντέλο μεγάλης κλίμακας αντιστοιχεί σε 5/3 του μικρού. Οπότε η αναγωγή των μεγεθών γίνεται με τις παρακάτω σχέσεις, όπου  $\lambda$  η κλίμακα 5/3:

RMS ανύψωσης κύματος (cm):  $RMS_{big} = \lambda \cdot RMS_{small}$

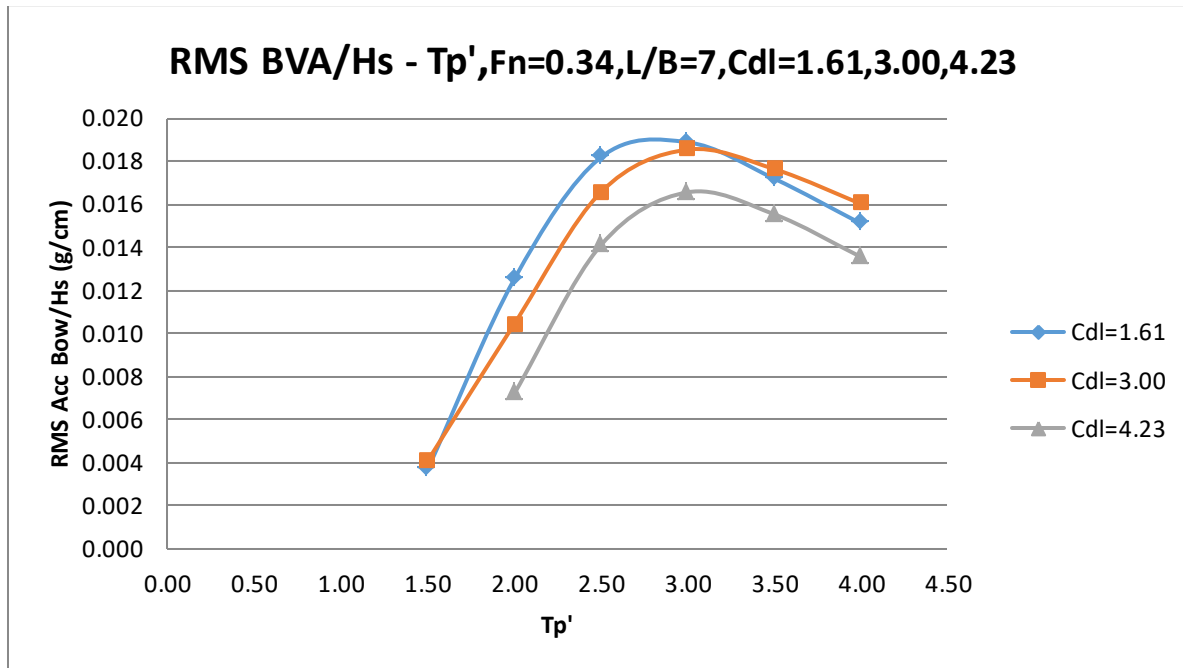
RMS κατακόρυφων επιταχύνσεων (g):  $RMS_{big} = RMS_{small}$

RMS κατακόρυφης κίνησης (cm):  $RMS_{big} = \lambda \cdot RMS_{small}$

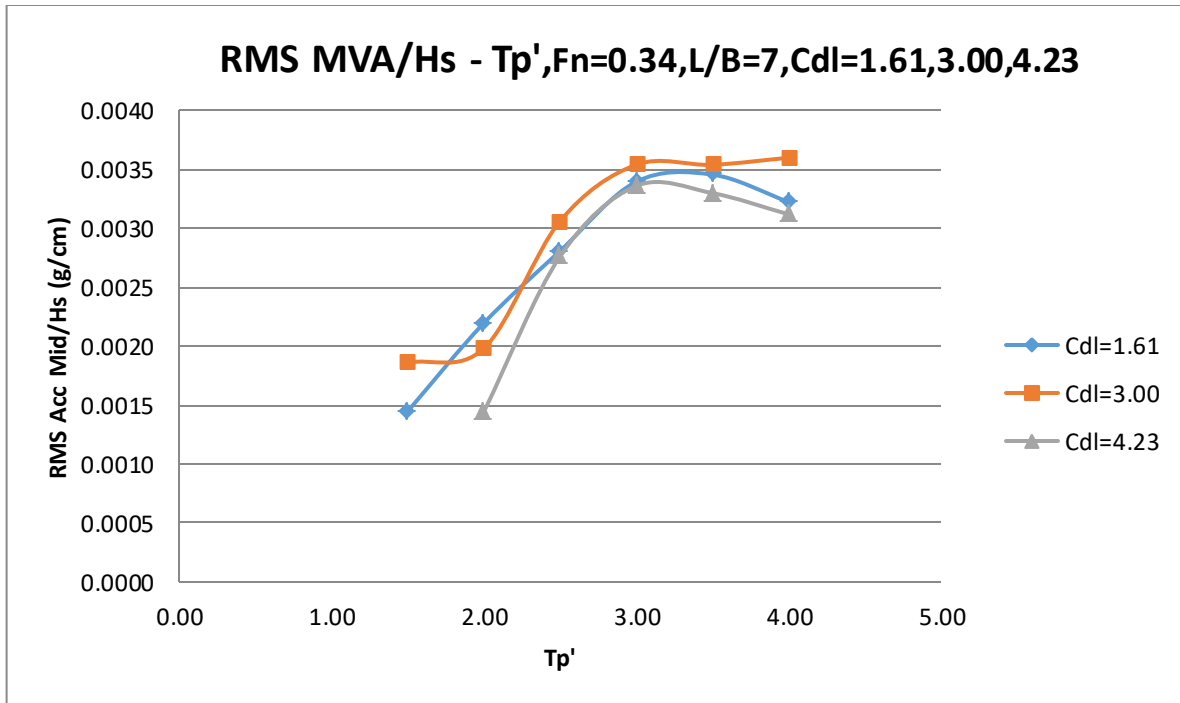
RMS προνευτασμού (cm):  $RMS_{big} = RMS_{small}$

Πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς (kp):  $R_{AWbig} = \lambda^3 \cdot R_{AWsmall}$

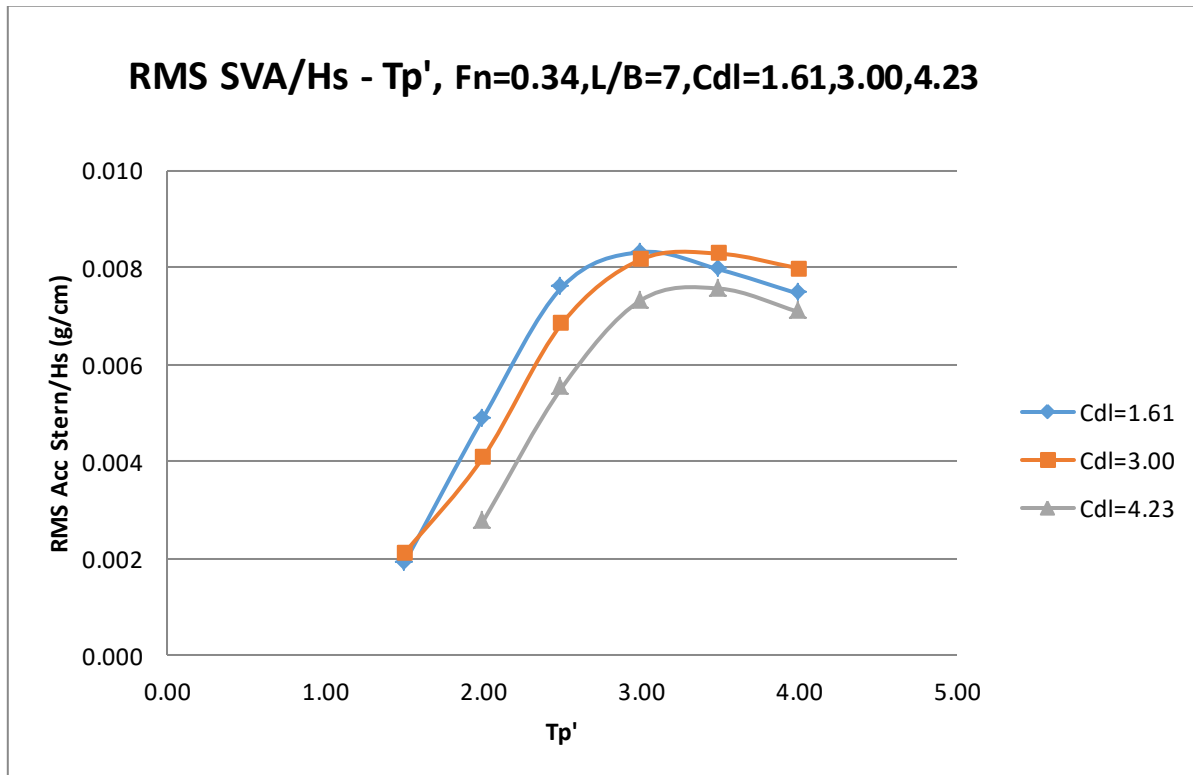
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα:



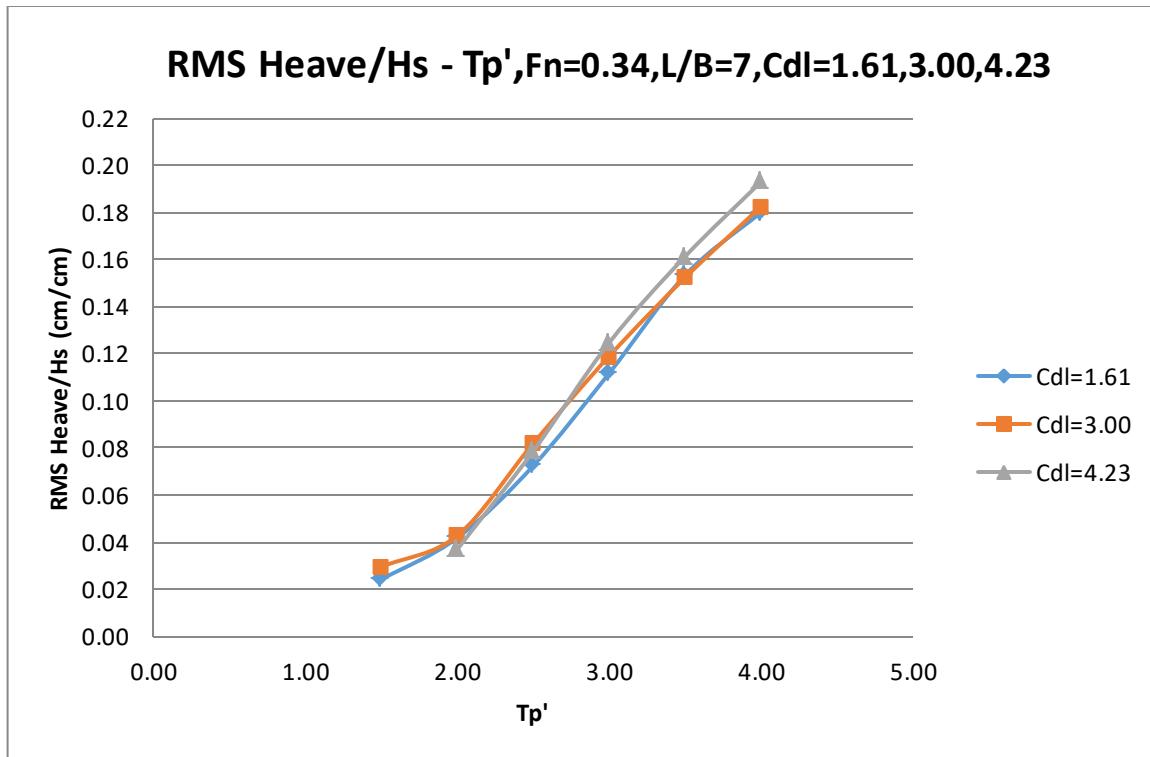
Διάγραμμα 6.3.1 Τιμές RMS της κατακόρυφης επιταχύνσης στην πλήρη διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικά εκτοπίσματα.



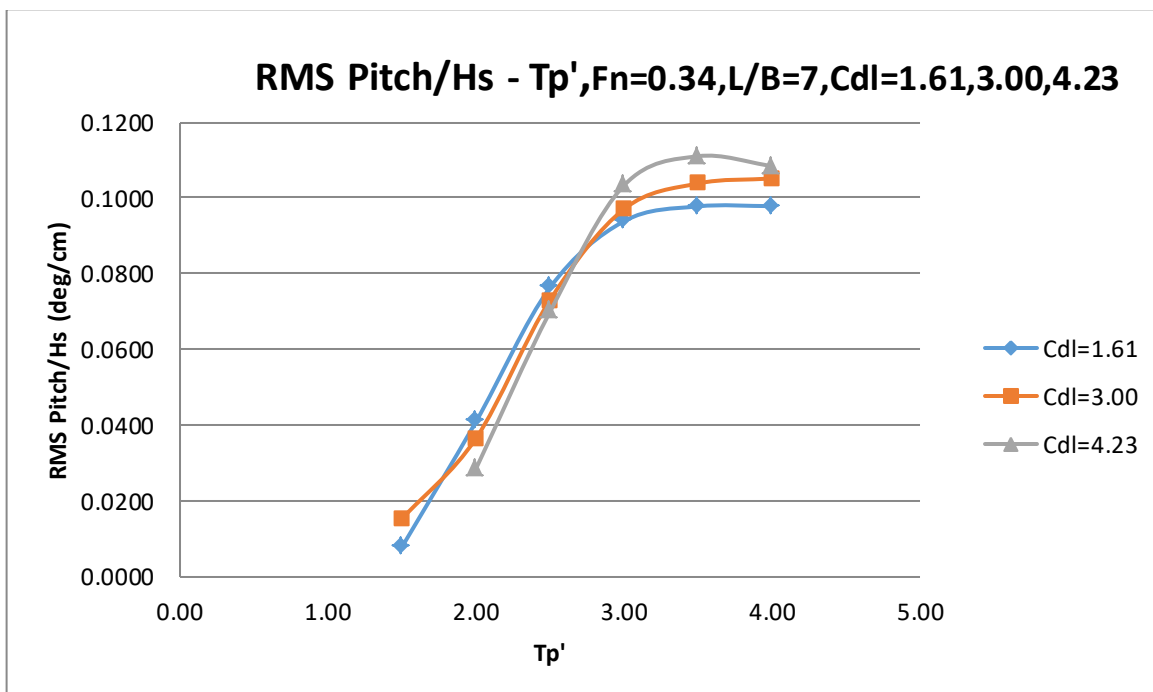
Διάγραμμα 6.3.2 Τιμές RMS της κατακόρυφης επιταχύνσης στο μέσο διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικά εκτοπίσματα.



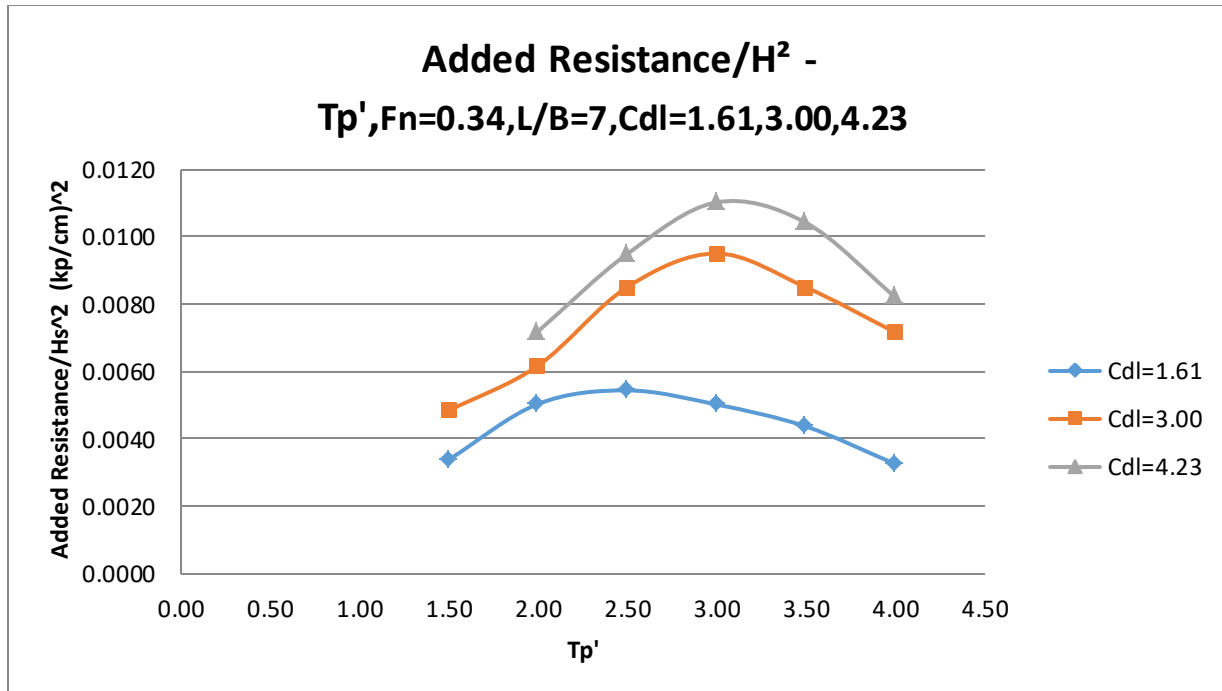
Διάγραμμα 6.3.3 Τιμές RMS της κατακόρυφης επιταχύνσης στην πρύμνη διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικά εκτοπίσματα.



Διάγραμμα 6.3.4 Τιμές RMS της κατακόρυφης κίνησης (Heave) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικά εκτοπίσματα.



Διάγραμμα 6.3.5 Τιμές RMS του προνευσμού (Pitch) διαιρεμένου με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικά εκτοπίσματα.



Διάγραμμα 6.3.6 Τιμές RMS της πρόσθετης αντίστασης διαιρεμένης με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικά εκτοπίσματα.

#### Παρατηρήσεις:

- Οι **επιταχύνσεις** έχουν τάση μείωσης με την αύξηση του εκτοπίσματος, κυρίως αυτές στην πλώρη και στην πρύμνη ενώ στην επιτάχυνση στο LCG παρατηρείται τις μεγαλύτερες επιταχύνσεις να τις έχουμε για  $C_{DL} = 3.00$  και τις μικρότερες για  $C_{DL} = 4.23$
- Η **κατακόρυφη κίνηση (heave)** εμφανίζει πολύ κοντινές τιμές για τα τρία εκτοπίσματα παρόλα αυτά υπάρχει αυξητική τάση με την αύξηση του εκτοπίσματος κυρίως από  $Tp'=3.00$  και πάνω.
- Όσον αφορά τον **προνευτασμό (Pitch)** για περιόδους  $Tp'=1.50$  έως και 2.75 περίπου η αύξηση του εκτοπίσματος οδηγεί σε ελαφρά μείωση του pitch σε αντίθεση με τις υψηλότερες περιόδους, όπου το σκάφος τείνει να ακολουθήσει το κύμα και με αύξηση του εκτοπίσματος έχουμε σημαντική αύξηση του Pitch
- Τέλος, η αύξηση του εκτοπίσματος οδηγεί ξεκάθαρα σε ιδιαίτερα αισθητή αύξηση της **πρόσθετης αντίστασης**.

#### 6.4 Επίδραση του λόγου $L/B$ στις αποκρίσεις με σταθερό $C_{DL} = 1.61$

Επιπλέον συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των αποκρίσεων με μεταβαλλόμενη παράμετρο το λόγο  $L/B$  και σταθερό το συντελεστή εκτόπισματος  $C_{DL}$  και την ταχύτητα ( $F_n$ ).

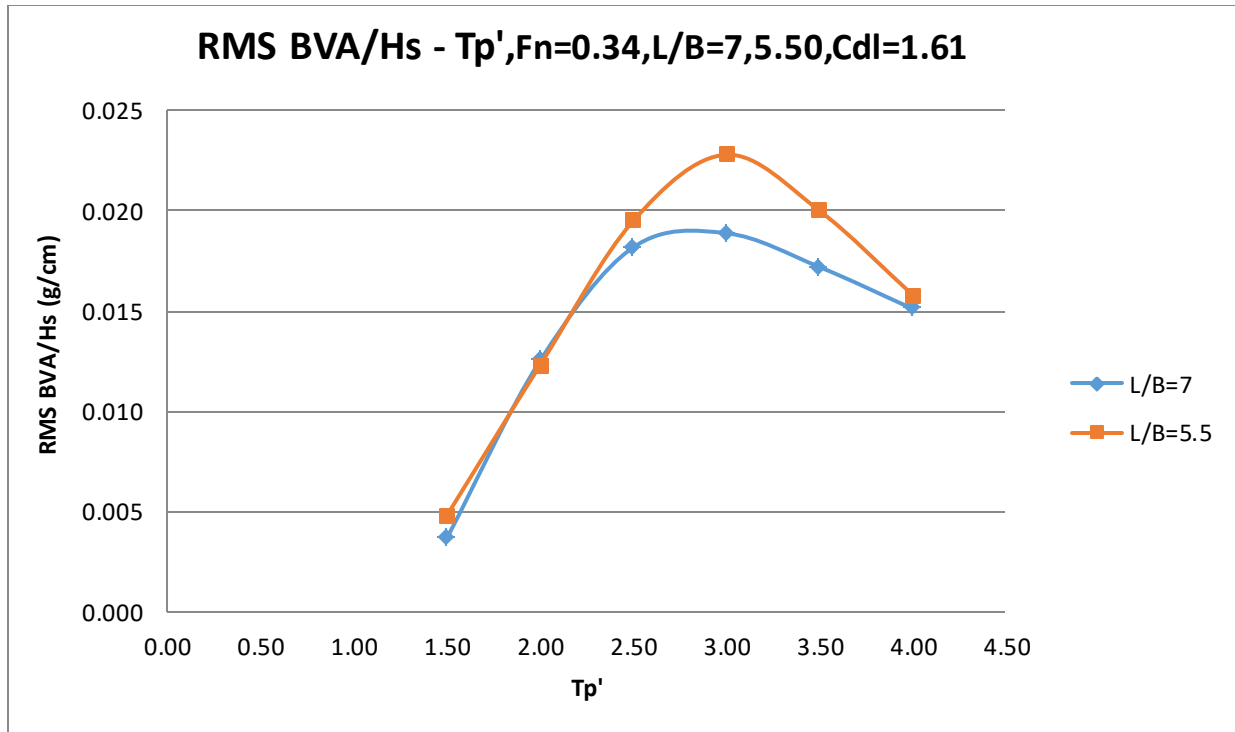
Ως εκ τούτου συγκρίνουμε τη δυναμική συμπεριφορά για λόγο σε  $C_{DL}=1.61$ ,  $F_n=0.34$  και για δύο λόγους  $L/B=5.5$  και  $7$  οι οποίοι είναι οι μόνοι για τους οποίους υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα για το εκτόπισμα αυτό. Τα δεδομένα για τα αποτελέσματα τα συλλέγουμε αφενός από την παρούσα διπλωματική και αφετέρου από μία παλαιότερη.

Συγκεκριμένα:

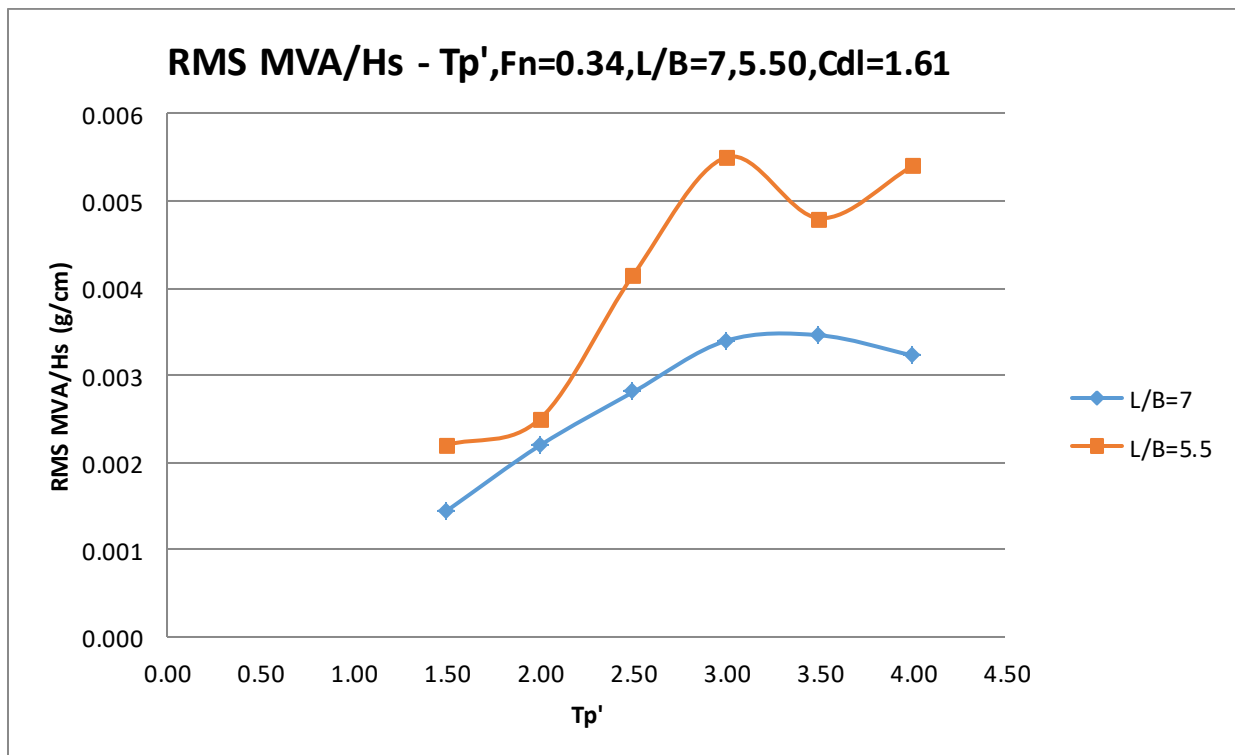
- Για  $L/B=7.00$  έχουμε τα αποτελέσματα από την παρούσα διπλωματική για το μοντέλο **166/01**
- Για  $L/B=7.00$  έχουμε τα αποτελέσματα από τη διπλωματική της Περδικάρη (2006) για το μοντέλο **118/96**

Οπότε παρακάτω παρουσιάζονται τα **εξής συγκριτικά διαγράμματα**:

- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Acceleration Bow-BVA) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Acceleration Mid-MVA) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρύμνη (Acceleration Stern-SVA) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).
- RMS τιμή Κατακόρυφης Κίνησης (Heave) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [cm/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).
- RMS τιμή Κίνησης Προνευτασμού (Pitch) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  [deg/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).
- Τιμή πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένη με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος  $H_s^2$  [kr/cm<sup>2</sup>] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $Tr'$ ).

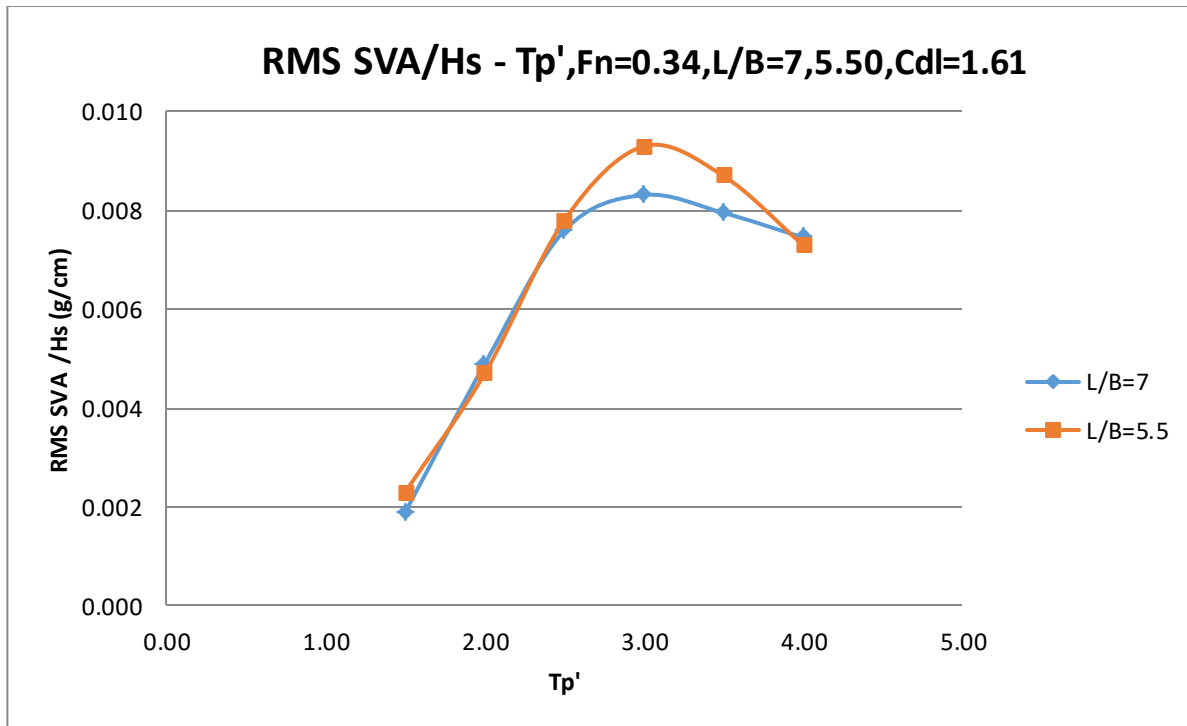


Διάγραμμα 6.4.1 Τιμές RMS της κατακόρυφης επιταχύνσης στην πλήρη διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικούς λόγους  $L/B$ .

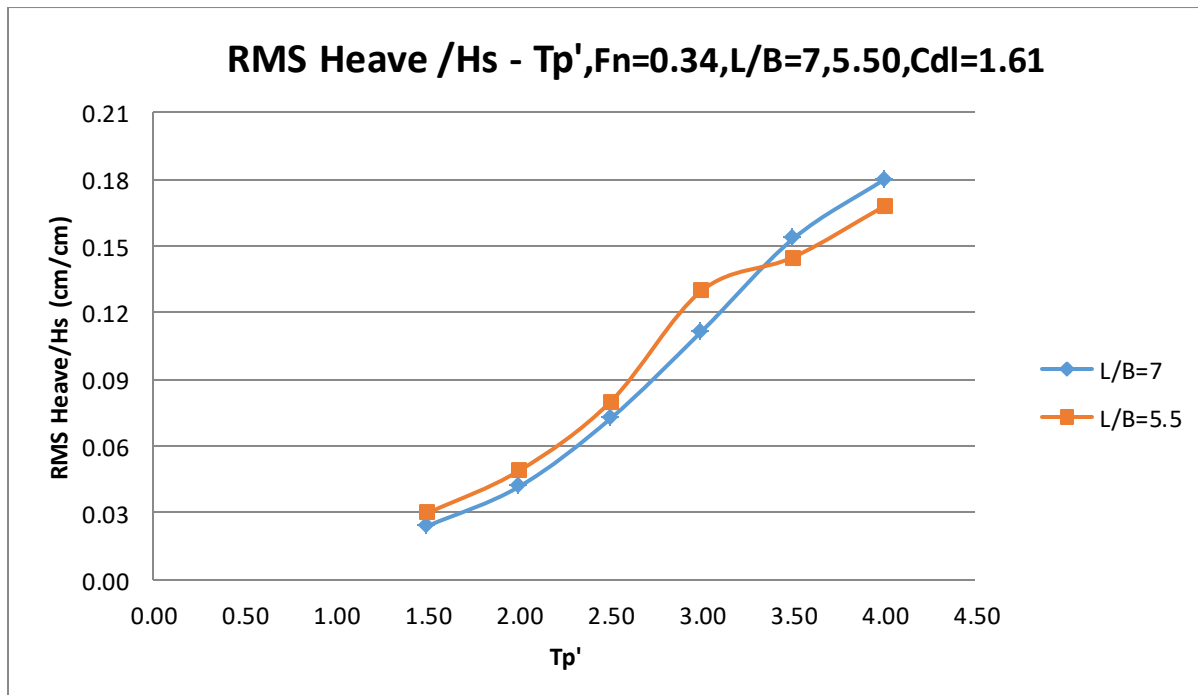


Διάγραμμα 6.4.2 Τιμές RMS της κατακόρυφης επιταχύνσης στο μέσο διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικούς λόγους  $L/B$

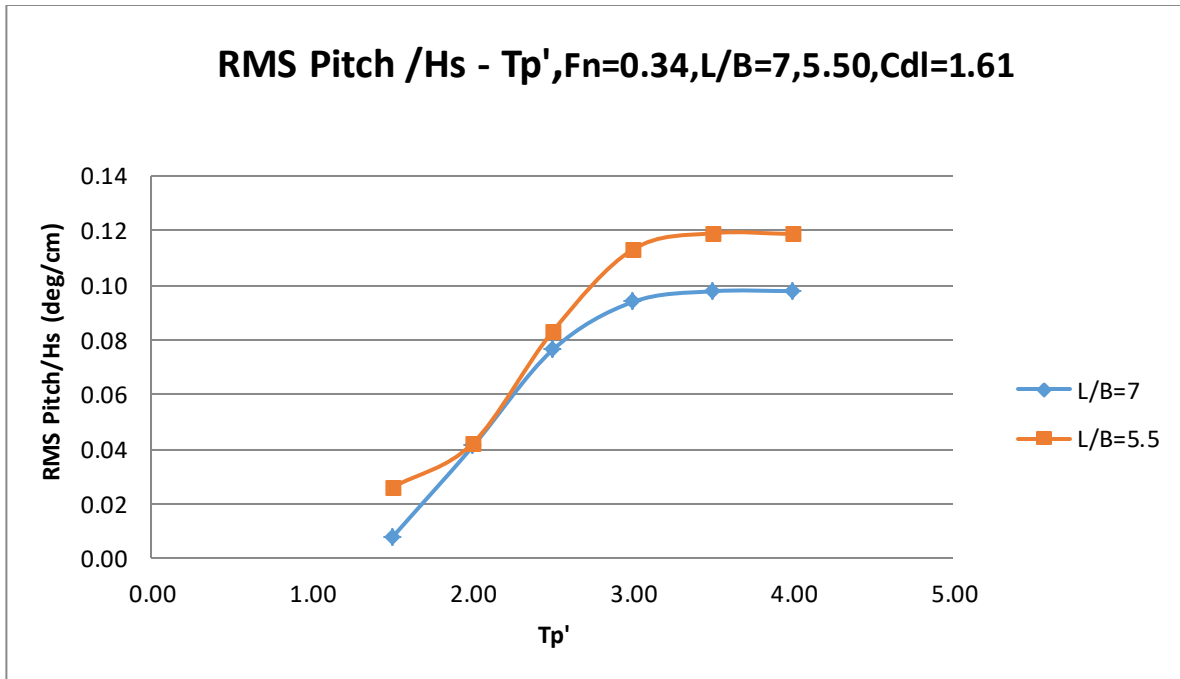




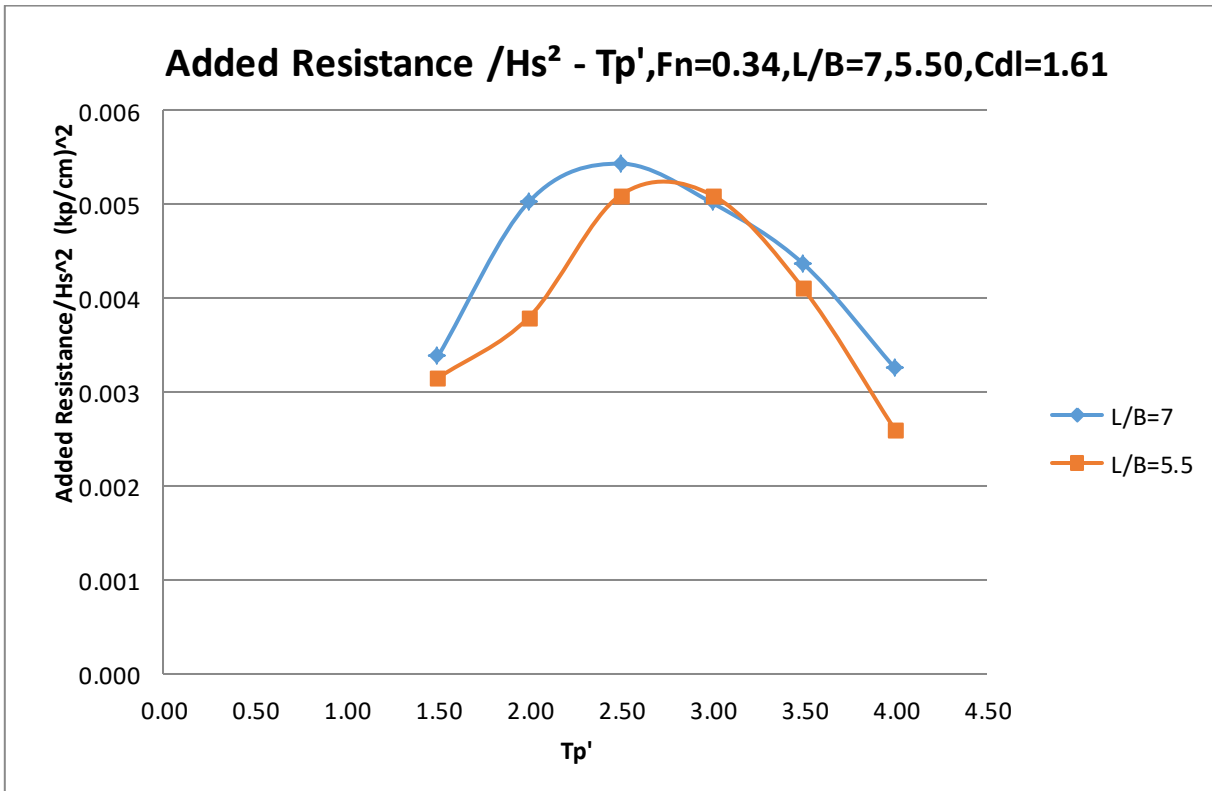
Διάγραμμα 6.4.3 Τιμές RMS της κατακόρυφης επιταχύνωσης στην πρύμνη διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικούς λόγους  $L/B$ .



Διάγραμμα 6.4.4 Τιμές RMS της κατακόρυφης κίνησης (Heave) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικούς λόγους  $L/B$ .



Διάγραμμα 6.4.5 Τιμές RMS του προνευστασμού (Pitch) διαιρεμένου με το σημαντικό ύψος κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικούς λόγους  $L/B$ .



Διάγραμμα 6.4.6 Τιμές RMS της πρόσθετης αντίστασης διαιρεμένης με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής για διαφορετικούς λόγους  $L/B$ .

*Παρατηρήσεις:*

- Οι **επιταχύνσεις** έχουν μεγαλύτερες τιμές για μικρότερο λόγο  $L/B$  και κυρίως για  $T_p'=2.50$  και πάνω. Ένω στις χαμηλότερες περιόδους οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται. Οι επιταχύνσεις στο μέσο του πλοίου όμως είναι σαφώς μεγαλύτερες για όλες τις περιόδους για τον μικρότερο λόγο  $L/B=5.50$
- Η **κατακόρυφη κίνηση (heave)** είναι σχεδόν ταυτόσημη με λίγο πιο αυξημένη για λόγο  $L/B=5.50$  εμφανίζει πολύ κοντινές τιμές για τα τρία εκτοπίσματα παρόλα αυτά υπάρχει αυξητική τάση με την αύξηση του εκτοπίσματος κυρίως από  $T_p'=3.00$  και πάνω.
- Όσον αφορά **τον προνευτασμό (Pitch)** υπάρχει σαφής αυξητική τάση για  $L/B=5.50$  σε σχέση με τον μεγαλύτερο λόγο και κυρίως για τις μεγαλύτερες περιόδους.
- Τέλος, η αύξηση του λόγου  $L/B$  οδηγεί σε αισθητή αύξηση της **πρόσθετης αντίστασης**.

### 6.5 Σύγκριση τιμών αποκρίσεων που προκύπτουν μέσω πειραμάτων και με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών.

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι έχοντας τις πειραματικές μετρήσεις των αποκρίσεων και άρα τα φάσματα και τις αντίστοιχες στατικές επεξεργασίες, τις αποκρίσεις αυτές να τις συγκρίνουμε με αυτές που θα παίρναμε έχοντας τις μετρήσεις της διέγερσης και χρησιμοποιώντας τους συντελεστές RAO που είχαν προκύψει από παλαιότερα πειράματα σε αρμονικούς κυματισμούς.

Ορίσαμε στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής τον ορισμό του συντελεστή απόκρισης RAO (Response Amplitude Operator). Επαναλαμβάνεται πως **η πρόβλεψη της δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου στο θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να γίνει στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας με χρήση των συντελεστών απόκρισης σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς σε συνδυασμό με τη γνώση του φάσματος των επικρατούντων κυματισμών.**

Έτσι θεωρώντας γραμμικό σύστημα το φάσμα της απόκρισης  $S_{\xi\xi}(\omega_0)$  συνδέεται με το φάσμα του θαλάσσιου κυματισμού  $S_{\eta\eta}(\omega_0)$  (διέγερσης) με τη σχέση:

$$S_{\xi\xi}(\omega_0) = |RAO_{\eta\xi}(\omega_0)|^2 S_{\eta\eta}(\omega_0)$$

Επιπλέον, οι μετρήσεις της διέγερσης, των κυματισμών δηλαδή, αναφέρονται και στα πειράματα μας σε σταθερή θέση στο χώρο και άρα το φάσμα διέγερσης,  $W_{gen}$ , εκφράζεται ως προς την φυσική κυκλική συχνότητα του κύματος  $(\omega_0)$  ενώ αντίθετα οι αποκρίσεις του πλοίου εκφράζονται ως προς τη συχνότητα συνάντησης  $(\omega)$ , τη συχνότητα του κινητού μέσου. Έτσι, για να μπορούμε να μεταβούμε από το φάσμα της απόκρισης στο φάσμα της διέγερσης τα φάσματα πρέπει να είναι ανηγμένα στην ίδια ανεξάρτητη μεταβλητή. Οπότε η σχέση που συνδέει τις συχνότητες  $\omega$ ,  $\omega_0$  είναι:

$$\omega = \omega_0 - kV \cos\beta, \text{ και}$$

$$\omega = \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} V \cos\beta, \quad \text{για βαθύ νερο.}$$

Όπου  $V$  η ταχύτητα του σκάφους και  $\beta$  η κατευθυντήρια γωνία του κύματος ( $\beta=180^\circ$  για μετωπικούς κυματισμούς)

Επιπλέον πρέπει να μετασχηματιστεί το φάσμα διέγερσης από το αδρανειακό στο κινούμενο σύστημα με τη σχέση:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \left| 1 - \frac{2\omega_0 V}{g} \cos\beta \right|^{-1} S_{\eta\eta}(\omega_0)$$

Οπότε παρουσιάζουμε τη σύγκριση των **φασμάτων** και των **τιμών RMS** με τους δύο τρόπους (πειράματα, RAO):

- Για τρεις συχνότητες:
  - Μια Υψηλή (φάσμα  $H_s=10\text{cm}$ ,  $T_p'=2.0$ )
  - Μια Μεσαία (φάσμα  $H_s=16\text{cm}$ ,  $T_p'=3.0$ )
  - Μια Υψηλή (φάσμα  $H_s=14\text{cm}$ ,  $T_p'=4.0$ )

- Για τέσσερις αποκρίσεις:
- Την επιτάχυνση στην πλώρη (Bow acceleration-BVA)
  - Την επιτάχυνση στο LCG (Mid acceleration-MVA)
  - Την επιτάχυνση στην πρύμνη (Stern acceleration-SVA)
  - Τον προνευτασμό (Pitch)

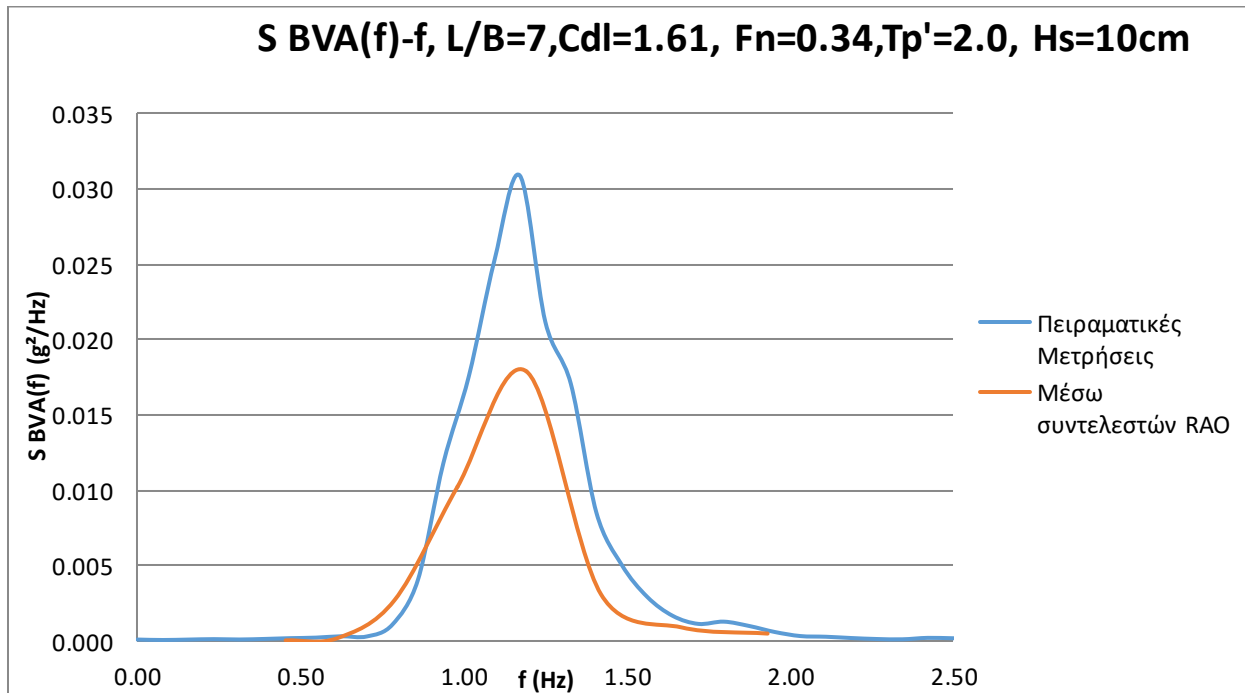
Για να προκύψει το φάσμα της απόκρισης με τη χρήση των RAO και το φάσμα της διέγερσης ακολουθούμε τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Μετασχηματίζουμε όλα τα μεγέθη σε συχνότητες συνάντησης και για την κάθε συχνότητα πολλαπλασιάζουμε την τιμή του φάσματος με την τιμή του RAO στο τετράγωνο για την αντίστοιχη συχνότητα. Αναλυτικότερα στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τα μεγέθη των φασμάτων των RAO και των συχνοτήτων.

- **Hs=10cm, T<sub>p</sub>'=2.0**
- **Hs=16cm, T<sub>p</sub>'=3.0**
- **Hs=14cm, T<sub>p</sub>'=4.0**

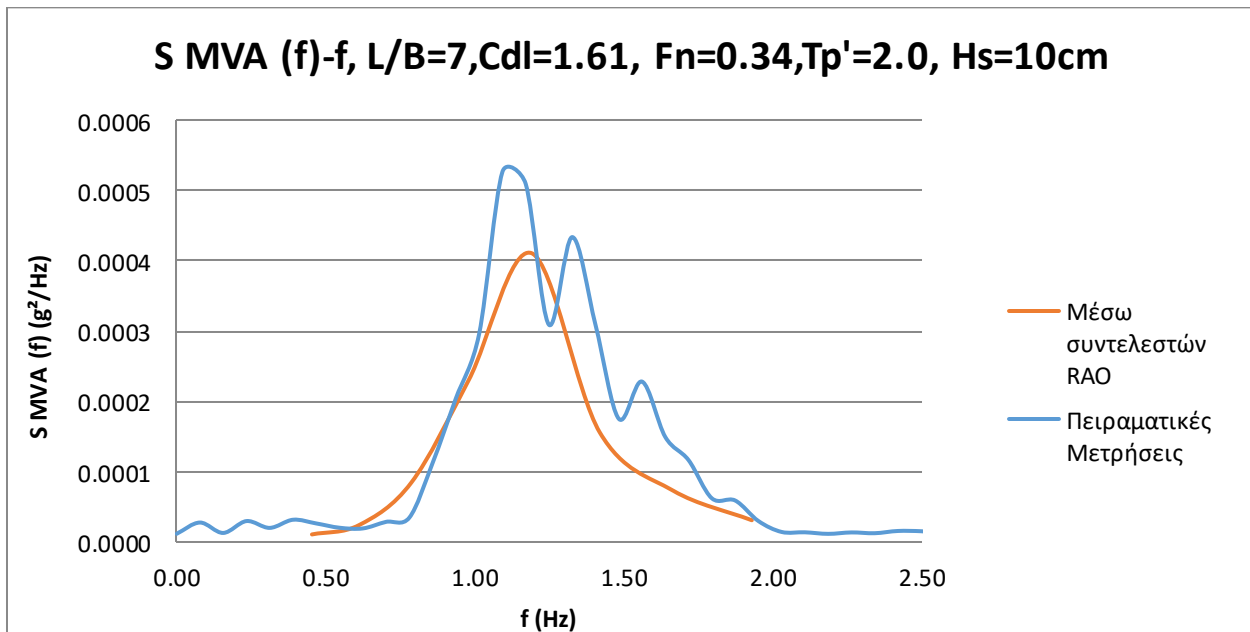
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα **συγκριτικά διαγράμματα** και οι **συγκριτικές τιμές RMS**.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΜΑΤΟΣ.

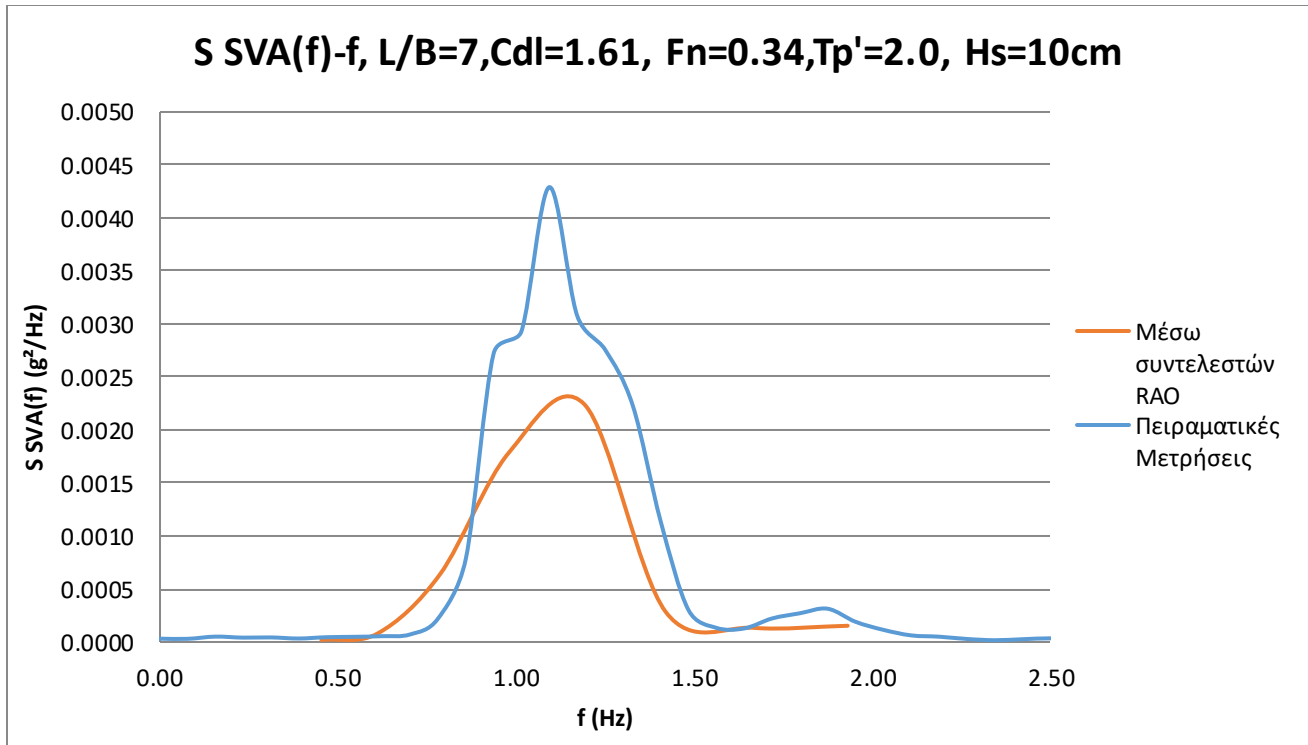
- $H_s=10\text{cm}$ ,  $T_p'=2.0$



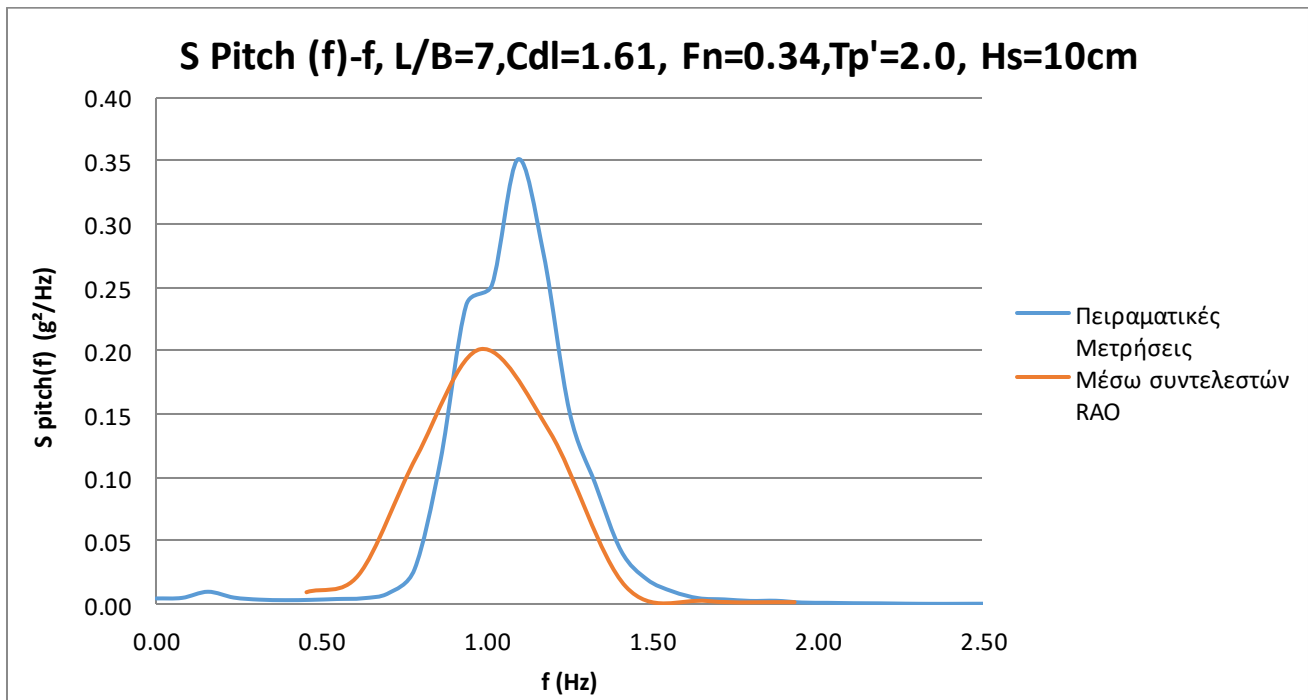
Διάγραμμα 6.5.1 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη που προκύπτει απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτήν που προκύπτει με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. ( $H_s=10\text{cm}$  και  $T_p'=2.0$ )



Διάγραμμα 6.5.2 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας της κατακόρυφης επιτάχυνσης στο μέσο που προκύπτει απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτήν που προκύπτει με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. ( $H_s=10\text{cm}$  και  $T_p'=2.0$ )

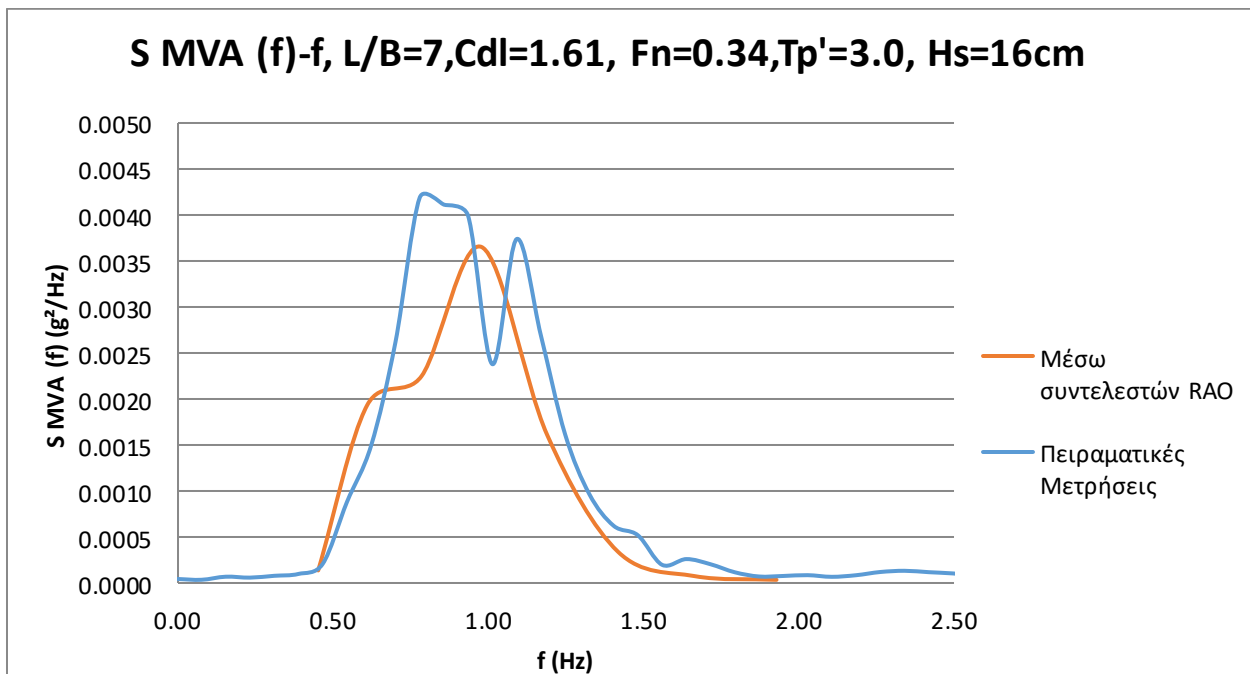
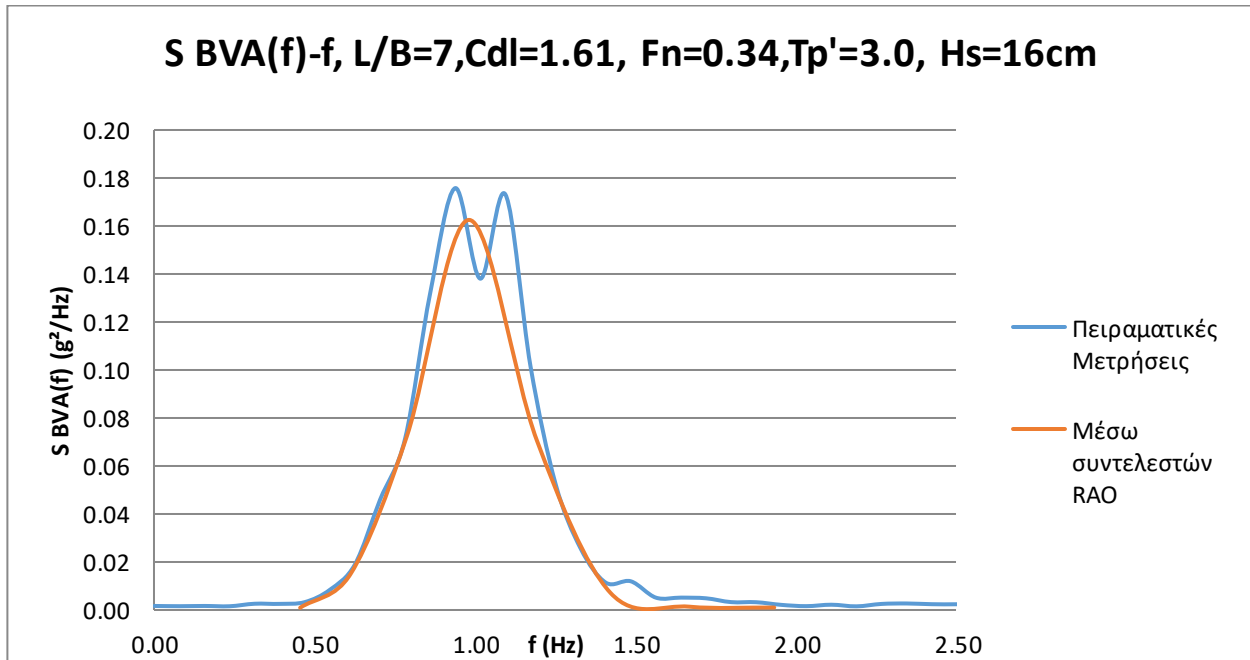


Διάγραμμα 6.5.3 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη που προκύπτει απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτήν που προκύπτει με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. ( $H_s=10\text{cm}$  και  $T_p'=2.0$ )

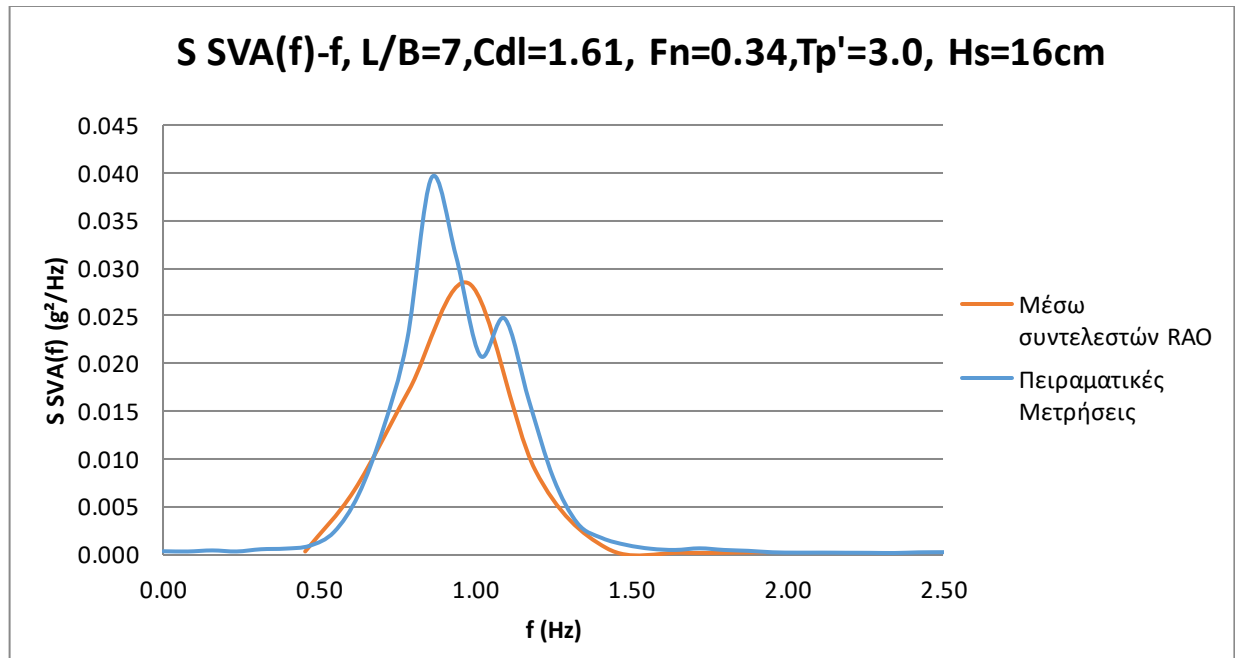


Διάγραμμα 6.5.4 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας του προνευτασμού (pitch) που προκύπτει απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτήν που προκύπτει με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. ( $H_s=10\text{cm}$  και  $T_p'=2.0$ )

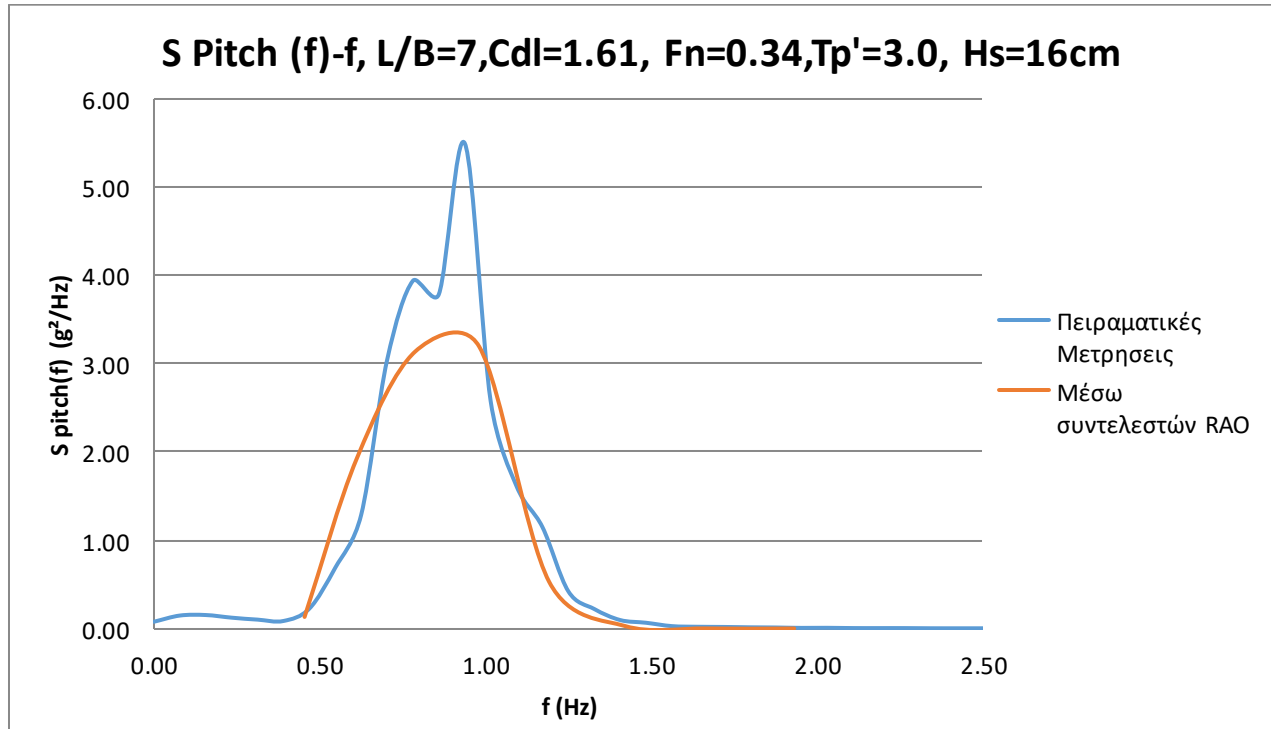
- $H_s=16\text{cm}$ ,  $T_p'=3.0$





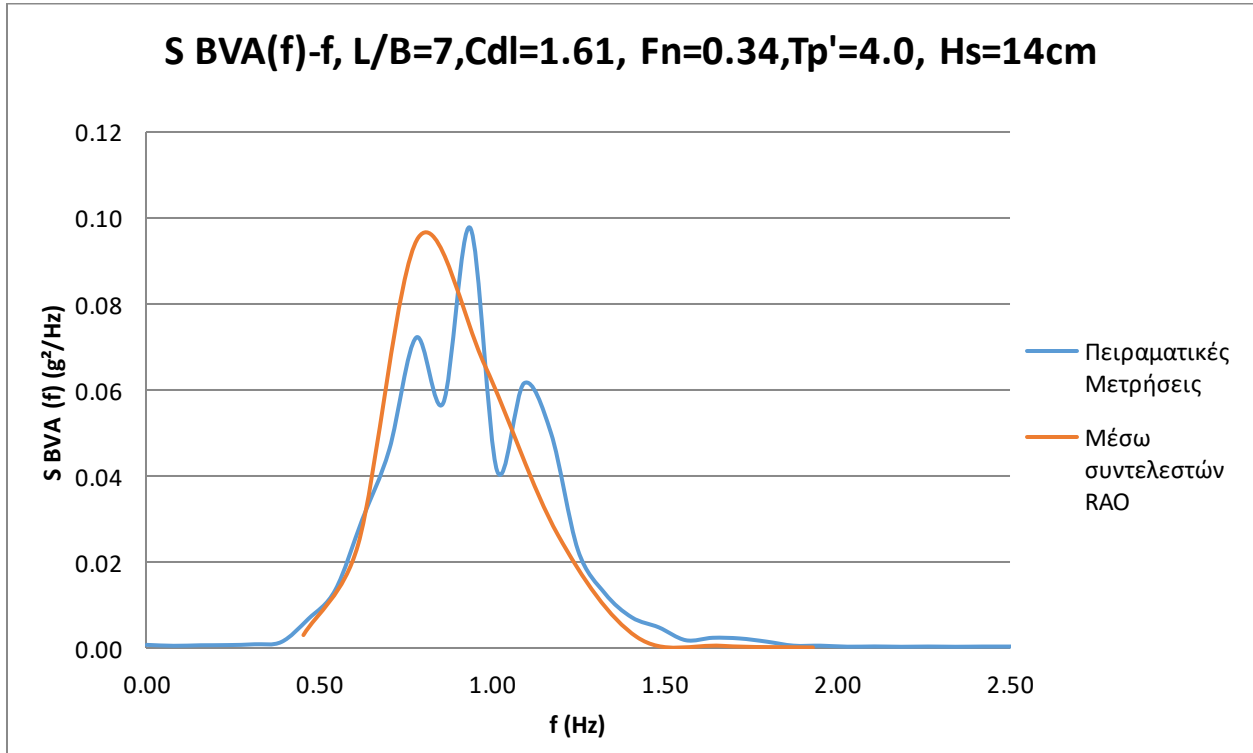


Διάγραμμα 6.5.7 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη που προκύπτει απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτήν που προκύπτει με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. ( $H_s=16cm$  και  $T_p'=3.0$ )

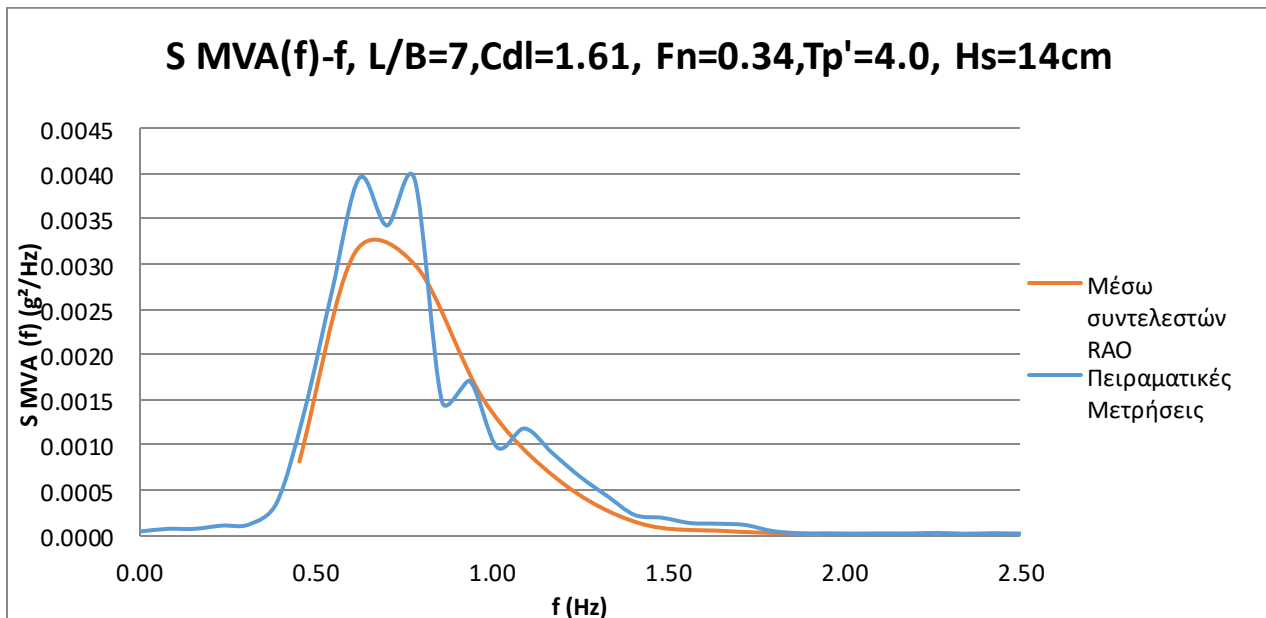


Διάγραμμα 6.5.8 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας του προνευτασμού (pitch) που προκύπτει απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτήν που προκύπτει με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. ( $H_s=16cm$  και  $T_p'=3.0$ )

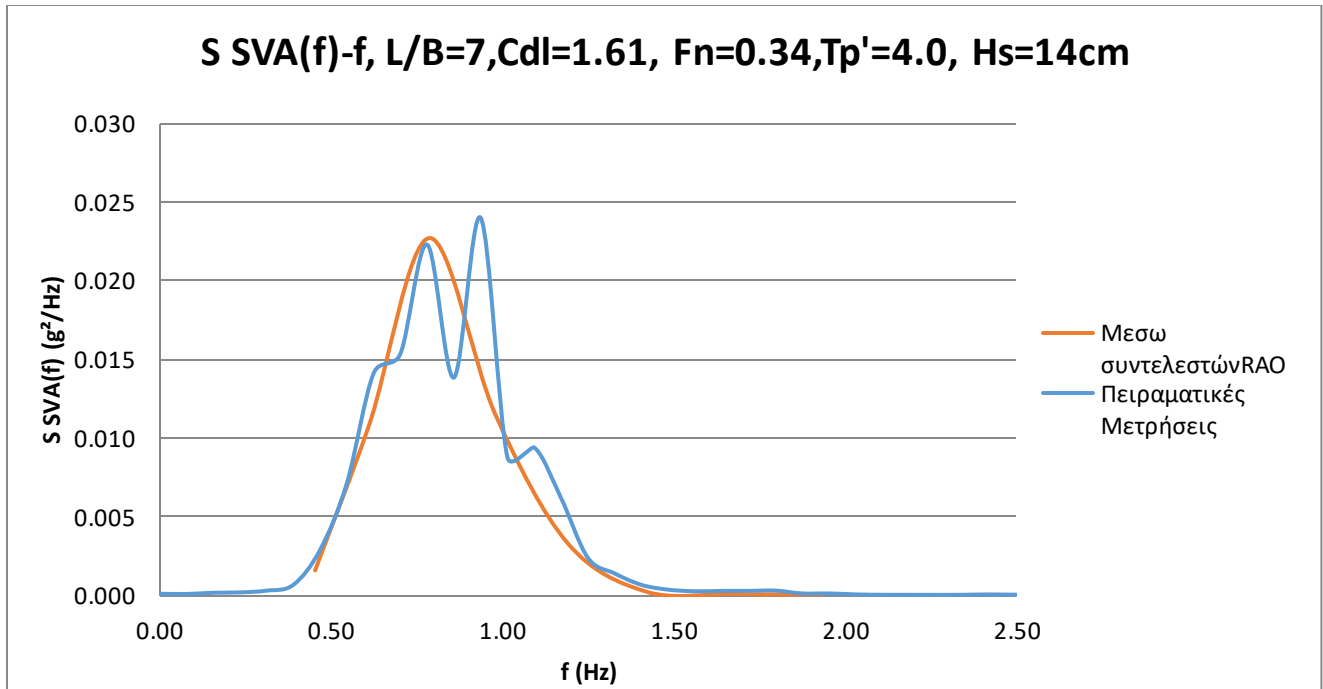
- $H_s=14\text{cm}$ ,  $T_p'=4.0$



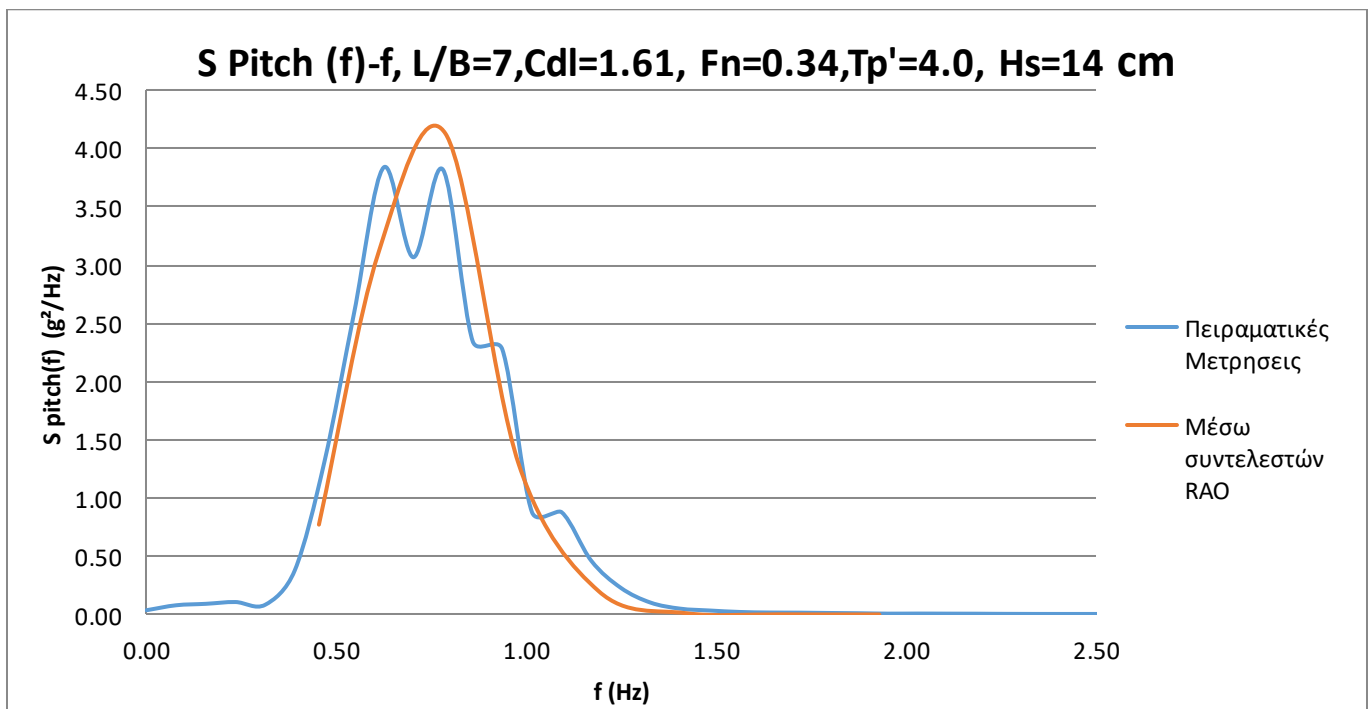
Διάγραμμα 6.5.9 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη που προκύπτει απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτήν που προκύπτει με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. ( $H_s=14\text{cm}$  και  $T_p'=4.0$ )



Διάγραμμα 6.5.10 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας της κατακόρυφης επιτάχυνσης στο μέσο που προκύπτει απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτήν που προκύπτει με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. ( $H_s=14\text{cm}$  και  $T_p'=4.0$ )



Διάγραμμα 6.5.11 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη που προκύπτει απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτήν που προκύπτει με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. ( $H_s=14\text{cm}$  και  $T_p'=4.0$ )



Διάγραμμα 6.5.12 Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας του προνευτασμού (pitch) που προκύπτει απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτήν που προκύπτει με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. ( $H_s=16\text{cm}$  και  $T_p'=3.0$ )

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ RMS.**

- **Hs=10cm, T<sub>p</sub>'=2.0**

	RMS AccBow (g)	RMS Acc Mid (g)	RMS Acc Stern (g)	RMS Pitch (g)
Πειραματικές Μετρήσεις	0.1095	0.0192	0.0428	0.3571
Μέσω συντελεστών RAO	0.0870	0.0147	0.0333	0.3175

*Πίνακας 6.5.1 Τιμές RMS για τις κατακόρυφες επιταχύνσεις και τον προνευτασμό που προκύπτουν απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτές που προκύπτουν με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. (H<sub>s</sub>=10cm και T<sub>p</sub>'=2.0)*

- **Hs=16cm, T<sub>p</sub>'=3.0**

	RMS AccBow (g)	RMS Acc Mid (g)	RMS AccStern (g)	RMS Pitch (g)
Πειραματικές Μετρήσεις	0.2842	0.0511	0.1251	1.4119
Μέσω συντελεστών RAO	0.2571	0.0442	0.1104	1.2965

*Πίνακας 6.5.2 Τιμές RMS για τις κατακόρυφες επιταχύνσεις και τον προνευτασμό που προκύπτουν απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτές που προκύπτουν με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. (H<sub>s</sub>=16cm και T<sub>p</sub>'=3.0)*

- **Hs=14cm, T<sub>p</sub>'=4.0**

	RMS AccBow (g)	RMS Acc Mid (g)	RMS AccStern (g)	RMS Pitch (g)
Πειραματικές Μετρήσεις	0.2066	0.0441	0.1019	1.3373
Μέσω συντελεστών RAO	0.2042	0.0401	0.0962	1.2845

*Πίνακας 6.5.3 Τιμές RMS για τις κατακόρυφες επιταχύνσεις και τον προνευτασμό που προκύπτουν απτα πειράματα σε σύγκριση με αυτές που προκύπτουν με τη χρήση των συντελεστών RAO των αρμονικών κυματισμών. (H<sub>s</sub>=14cm και T<sub>p</sub>'=4.0)*

*Παρατηρήσεις :*

Παρατηρούμε πως συνυπολογίζοντας τα διαγράμματα των φασμάτων και τις τιμές RMS που εξάγουμε από τα δύο διαγράμματα με τους δύο τρόπους, στις χαμηλές συχνότητες ( $T_p'=4.0$ ) υπάρχει καλή ομοιότητα μεταξύ των δύο φασμάτων ενώ στις υψηλές και στις μεσαίες ( $T_p'=2.0$  και  $T_p'=3.0$  αντίστοιχα) οι αποκλίσεις είναι σημαντικές και κυρίως στις υψηλές. Αυτό συμβαίνει διότι στις χαμηλές συχνότητες όπου το πλοίο ακολουθεί τη μορφή του κύματος υπάρχει γραμμικότητα όπως προκύπτει από τη σύγκριση του φάσματος των αποκρίσεων που εξάγεται από τα πειράματα με αυτό που εξάγεται αν χρησιμοποιήσουμε το φάσμα της διέγερσης και τους συντελεστές απόκρισης RAO από παλιότερες μετρήσεις σε αρμονικούς κυματισμούς. Στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες αυτή δεν ισχύει λόγω ότι ο κυματισμός «σπάει» λόγω μεγάλης κλίσης (στις υψηλές συχνότητες κυρίως) και πιθανώς λόγω φαινομένων συντονισμού.

## ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Το φάσμα των κυμάτων που παρήχθησαν στον κυματιστήρα για τις καταστάσεις θάλασσας που εξετάζονται προσεγγίζει ικανοποιητικά το θεωρητικό διαπραματρικό φάσμα.
- Στην ανάλυση των μετρήσεων επιβεβαιώνεται ότι όταν το μήκος του κύματος είναι ίσο ή μεγαλύτερο του μήκους του σκάφους αυτό ακολουθεί την κίνηση του κύματος και ότι οι κατακόρυφες επιταχύνσεις στην πλώρη και την πρύμνη είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτήν στο κέντρο βάρους εξαιτίας της ροπής λόγω προνευτασμού.
- Σχετικά με την επίδραση του συντελεστή εκτοπίσματος στη δυναμική συμπεριφορά:
  - Οι **επιταχύνσεις** έχουν τάση μείωσης με την αύξηση του εκτοπίσματος, κυρίως αυτές στην πλώρη και στην πρύμνη ενώ στην επιτάχυνση στο LCG παρατηρείται τις μεγαλύτερες επιταχύνσεις να τις έχουμε για  $C_{DL} = 3.00$  και τις μικρότερες για  $C_{DL} = 4.23$
  - Η **κατακόρυφη κίνηση (heave)** εμφανίζει πολύ κοντινές τιμές για τα τρία εκτοπίσματα παρόλα αυτά υπάρχει αυξητική τάση με την αύξηση του εκτοπίσματος κυρίως από  $T_p'=3.00$  και πάνω.
  - Όσον αφορά τον **προνευτασμό (Pitch)** για περιόδους  $T_p'=1.50$  έως και  $2.75$  περίπου η αύξηση του εκτοπίσματος οδηγεί σε ελαφρά μείωση του pitch σε αντίθεση με τις υψηλότερες περιόδους, όπου το σκάφος τείνει να ακολουθήσει το κύμα και με αύξηση του εκτοπίσματος έχουμε σημαντική αύξηση του Pitch
  - Τέλος, η αύξηση του εκτοπίσματος οδηγεί ξεκάθαρα σε ιδιαίτερα αισθητή αύξηση της **πρόσθετης αντίστασης**.
- Σχετικά με την επίδραση του λόγου L/B δυναμική συμπεριφορά:
  - Οι **επιταχύνσεις** έχουν μεγαλύτερες τιμές για μικρότερο λόγο L/B και κυρίως για  $T_p'=2.50$  και πάνω. Ενώ στις χαμηλότερες περιόδους οι δύο καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται. Οι επιταχύνσεις στο μέσο του πλοίου όμως είναι σαφώς μεγαλύτερες για όλες τις περιόδους για τον μικρότερο λόγο L/B=5.50
  - Η **κατακόρυφη κίνηση (heave)** είναι σχεδόν ταυτόσημη με λίγο πιο αυξημένη για λόγο L/B=5.50 εμφανίζει πολύ κοντινές τιμές για τα τρία εκτοπίσματα παρόλα αυτά υπάρχει αυξητική τάση με την αύξηση του εκτοπίσματος κυρίως από  $T_p'=3.00$  και πάνω.
  - Όσον αφορά τον **προνευτασμό (Pitch)** υπάρχει σαφής αυξητική τάση για L/B=5.50 σε σχέση με τον μεγαλύτερο λόγο και κυρίως για τις μεγαλύτερες περιόδους.
  - Τέλος, η αύξηση του λόγου L/B οδηγεί σε αισθητή αύξηση της **πρόσθετης αντίστασης**.
- Επιβεβαιώνεται πως στις χαμηλές συχνότητες όπου το πλοίο ακολουθεί τη μορφή του κύματος υπάρχει γραμμικότητα όπως προκύπτει από τη σύγκριση του φάσματος των αποκρίσεων που εξάγεται από τα πειράματα με αυτό που εξάγεται αν χρησιμοποιήσουμε το φάσμα της διέγερσης και τους συντελεστές απόκρισης RAO από παλιότερες μετρήσεις σε αρμονικούς κυματισμούς. Στις μεσαίες και υψηλές συχνότητες αυτή δεν ισχύει λόγω ότι ο κυματισμός «σπάει» λόγω μεγάλης κλίσης (στις υψηλές συχνότητες κυρίως) και πιθανώς λόγω φαινομένων συντονισμού.

- Μια συχνότητα κυματισμού παραμένουσα στη δεξαμενή επηρεάζει τα παραγόμενα φάσματα ως μια μικρή πρόσθετη ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες. Αυτή η ενέργεια είναι εμφανής στα κύματα υψηλών συχνοτήτων που έχουμε και μικρά ύψη κύματος. Ως αποτέλεσμα, σε φάσματα αποκρίσεων σε υψηλόσυχνες θάλασσες σε εύρος κοντά στη μηδενική συχνότητα υπάρχει συγκέντρωση ενέργειας και άρα τιμή φάσματος σημαντική.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Γρηγόρης Γρηγορόπουλος, Γεράσιμος Αθανασούλης, “Δυναμική Συμπεριφορά πλοίων σε κυματισμούς – Σημειώσεις σπουδαστών ΔΠΜΣ”, Αθήνα 1998.
- 2) Γ.Α Αθανασούλης, Κ.Α. Μπελιμπασάκης, «Δυναμική πλοίου», Αθήνα 2012
- 3) J.M. Lloyd, “Seakeeping: Ship behavior in rough weather”, Ellis Horwood Limited 1989.
- 4) Gregory Grigoropoulos, Dimitra Damala, Theodore Loukakis, “Dynamic Performance of the NTUA Double – Chine Series Hull Forms in Regular Waves”, Annapolis, Maryland March 2010.
- 5) Gregory Grigoropoulos, Dimitra Damala, “Dynamic Performance of the NTUA Double – Chine Series Hull Forms in Random Waves”, Honolulu, Hawaii, USA September 2011.
- 6) Daniel Savitsky, “On the subject of high – speed monohulls”, Athens, Greece October 2003.
- 7) Γεώργιος Ρούσσοσ, “Πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοων σκαφών διπλής ακμής σε κυματισμούς” - Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2007.
- 8) Χουντάλας, “Πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοων σκαφών διπλής ακμής σε κυματισμούς” - Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2016.
- 9) Περδικάρη, “Πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοων σκαφών διπλής ακμής σε κυματισμούς” - Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2006.