



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ ΣΚΑΦΩΝ ΣΕ
ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ**



ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:
ΜΑΖΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, ΦΟΙΤΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ..

Πρώτα απ'όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ.Γρηγόριο Γρηγορόπουλο για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τομέα που με ενδιαφέρει ιδιαίτερα. Επίσης, τον ευχαριστώ για τις υποδείξεις και την αμέριστη βοήθειά του σε κρίσιμα σημεία της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διευθυντή της Πειραματικής Δεξαμενής Προτύπων Πλοίων, κ. Γεώργιο Τζαμπίρα, για την παραχώρηση της δεξαμενής.

Επιπλέον, πολλές ευχαριστίες στο προσωπικό της δεξαμενής για το εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας και συνεννόησης που διαμόρφωσαν. Ειδικότερα, στον κ. Ιωάννη Τραχανά, ΕΤΕΠ για τις τεχνικές υποδείξεις και συμβουλές του, τον κ.Φώτιο Κασάπη, ΕΕΔΙΠ, για την συμβολή στην εκτέλεση πειραμάτων έως αργά το απόγευμα, καθώς και στον κ.Δημήτριο Λιαροκάπη, Υ.Δ, για την ηθική και ουσιαστική υποστήριξή του καθ'όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

*Αφιερώνεται στα παιδιά που περπατήσαμε μαζί
αυτά τα χρόνια
δρόμους αλληλεγγύης και αξιοπρέπειας..*

Περιεχόμενα:

Κεφάλαιο 1.Εισαγωγή.....σελ.6	σελ.6
Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....σελ.9	σελ.9
2.1. Θεωρία Κυματισμών.....σελ.9	σελ.9
2.1.1. Γενικά.....σελ.9	σελ.9
2.1.2. Αρμονικοί κυματισμοί.....σελ.10	σελ.10
2.1.3. Τυχαίοι Κυματισμοί.....σελ.11	σελ.11
2.1.3.1. Μορφή κυματικών φασμάτων.....σελ.13	σελ.13
2.1.3.2. Χαρακτηριστικά μεγέθη φάσματος.....σελ.16	σελ.16
2.2. Είδη κινήσεων.....σελ.18	σελ.18
2.3. Κώδικας SWAN2.....σελ.20	σελ.20
2.4. Πρόσθετη αντίσταση.....σελ.26	σελ.26
2.5. RAO (Response Amplitude Operator).....σελ.27	σελ.27
2.6. Παράμετροι σχεδίασης ταχυπλόων σκαφών.....σελ.30	σελ.30
Κεφάλαιο 3. Συστηματικές σειρές ταχύπλοων σκαφών.....σελ.31	σελ.31
3.1. Εισαγωγή.....σελ.31	σελ.31
3.2. Συστηματικές σειρές σκαφών με στρογγυλό πυθμένα.....σελ.32	σελ.32
3.3. Συστηματικές σειρές σκαφών με ακμή.....σελ.33	σελ.33
3.4. Συστηματικές σειρές σκαφών με διπλή ακμή.....σελ.34	σελ.34
3.5. Συστηματική σειρά NTUA.....σελ.38	σελ.38
Κεφάλαιο 4. Πειραματική Διαδικασία.....σελ.42	σελ.42
4.1. Πειραματική Εγκατάσταση.....σελ.42	σελ.42
4.2. Στάδια Πειραματικής διαδικασίας.....σελ.43	σελ.43
4.2.1. Προετοιμασία προτύπου.....σελ.43	σελ.43
4.2.1.1. Εύρεση επιθυμητού εκτοπίσματος.....σελ.44	σελ.44

4.2.1.2. Εύρεση επιθυμητής διαγωγής - εγκάρσιας κλίσης..σελ.45	
4.2.1.3. Προσδιορισμός ακτίνας αδρανείας - περιόδου ιδιοταλάντωσης.....σελ.45	
4.2.1.4. Υπολογισμός αποφόρτισης.....σελ.47	
4.2.2. Βαθμονόμηση οργάνων μέτρησης.....σελ.48	
4.2.3. Δημιουργία επιθυμητών καταστάσεων θάλασσας.....σελ.50	
4.2.4. Διεξαγωγή πειράματος.....σελ.57	
4.6. Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....σελ.61	
Κεφάλαιο 5. Αποτελέσματα σε τυχαίους κυματισμούς.....σελ.63	
5.1. Διαγράμματα φασμάτων κυματισμού-αποκρίσεων.....σελ.63	
5.2. Η επίδραση της ταχύτητας.....σελ.121	
Κεφάλαιο 6. Υπολογισμοί με το πρόγραμμα SWAN2 - σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα.....σελ.132	
6.1. Χρήση του SWAN2.....σελ.132	
6.2. RAO για τυχαίους κυματισμούς.....σελ.136	
Κεφάλαιο 7. Συγκριτική παρουσίαση του συνόλου των σκαφών της NTUA series.....σελ.212	
7.1. Με fitting 2ου βαθμού.....σελ.212	
7.2. Με fitting 3ου βαθμού.....σελ.219	
Κεφάλαιο 8. Βιβλιογραφία.....σελ.228	
Παράρτημα I	
Παράρτημα II	

Κατά την σχεδίαση ενός ταχύπλοου σκάφους, η διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς σε θαλάσσιους κυματισμούς αποτελεί απαραίτητη διαδικασία για έναν μελετητή ναυπηγό. Αρχικά, διότι βασικό κριτήριο για τα ταχύπλοα σκάφη είναι η άνεση πληρώματος και επιβατών, και στην συνέχεια επειδή μια καλή υδροδυναμική σχεδίαση σημαίνει μικρότερες καταπονήσεις από τα κύματα, άρα και μεγαλύτερη διάρκεια χρήσης δηλαδή οικονομικής εκμετάλλευσης του πλοίου.

Η διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς (Seakeeping) ενός σκάφους συνίσταται στην ανάλυση των χαρακτηριστικών κινήσεων του, των επιταχύνσεων που αναπτύσσονται σε κρίσιμα σημεία της κατασκευής καθώς και της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμούς. Υπάρχουν δύο μέθοδοι προσέγγισης του ζητήματος:

- 1) Η πειραματική διαδικασία, η οποία γίνεται σε μοντέλο σε κλίμακα. Τα πειράματα διεξάγονται σε δεξαμενές με δυνατότητα παραγωγής φασμάτων τυχαίων και ημιτονικών κυματισμών.
- 2) Η αναλυτική πρόβλεψη με H/Y, με χρήση προγραμμάτων όπως το SWAN 2.

Αυτό είναι και το αντικείμενο της παρούσης Διπλωματικής Εργασίας, η **πειραματική και αναλυτική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοου σκάφους σε τυχαίους κυματισμούς.**

Σε συνθήκες ανταγωνισμού, ένα πλοίο με σωστή υδροδυναμική σχεδίαση, είναι άνετο για επιβάτες και πλήρωμα, χρειάζεται μικρότερη αύξηση ισχύος σε

κυματισμό-για διατήρηση της υπηρεσιακής ταχύτητας. Κάτι που συνεπάγεται μικρότερο κόστος καυσίμων. Άρα γίνεται κατανοητό ότι η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός ταχύπλοου σκάφους δεν είναι μια πολυτέλεια, αλλά κάτι απαραίτητο εφόσον η σωστή υδροδυναμική σχεδίαση οδηγεί σε ορθότερη οικονομική εκμετάλλευση του σκάφους.

Ακολουθεί ονοματολογία των συμβόλων που εμφανίζονται μέσα στην διπλωματική εργασία.

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

L_{OA} : ολικό μήκος [m]

L_{WL} : μήκος ισάλου [m]

B : μέσο πλάτος στην άνω ακμή [m]

Δ : εκτόπισμα [tn]

∇ : όγκος εκτοπίσματος [m^3]

LCG : διαμήκης θέση κέντρου βάρους από μέση τομή, θετική πρόραθεν
[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^2]

V : ταχύτητα [m/sec]

- T : μέσο βύθισμα [m]
- t : δυναμική διαγωγή, εμπρορη ή εμπρυμνη [m]
- ρ : πυκνότητα νερού [kg/m³]
- g : = 9.81 m/sec², επιτάχυνση της βαρύτητας
- T_p : = $\frac{2 \cdot \pi}{\omega_p}$, περίοδος κορυφής κύματος [sec]
- T_p' : = $\frac{T_p}{\sqrt{\frac{L_{BP}}{g}}}$, αδιάστατη περίοδος
- $H_s = H^{1/3}$: σημαντικό ύψος κύματος [m]
- λ : μήκος κύματος [m]
- k : κυματικός αριθμός
- ω : κυκλική συχνότητα [rad/sec]
- f : συχνότητα [Hz]
- S(f) : συνάρτηση πυκνότητας φάσματος (συναρτήσει της συχνότητας)
- m_0 : rms (root mean square), η μέση τετραγωνική τιμή
- RAO : συντελεστής απόκρισης (Response Amplitude Operator) που
ισούται με το πηλίκο του πλάτους απόκρισης προς το πλάτος της
διέγερσης

2.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1

Θεωρία Κυματισμών

2.1.1 Γενικά

Οι κυματισμοί στην επιφάνεια της θάλασσας δημιουργούνται από τον άνεμο. Το μέγεθος των κυματισμών, η διεύθυνση μετάδοσής τους καθώς και η συνάρτηση πυκνότητας φάσματος (spectral density function or power spectrum) 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)

Αν εκτελέσουμε ένα πείραμα πολλές φορές και τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μια επαναληπτικότητα ακρίβειας, τότε πρόκειται για *προσδιοριστική διαδικασία*. Αυτό όμως δεν συμβαίνει με τους θαλάσσιους κυματισμούς. Η μορφή των κυμάτων δεν παρουσιάζει κανονικότητα, μεταβάλλεται συνεχώς τοπικά και χρονικά, καθιστώντας αδύνατη την προσπάθεια περιγραφής των κυμάτων με την συνηθισμένη προσδιοριστική διαδικασία. Η διαδικασία κατά την οποία ενώ οι συνθήκες του πειράματος παραμένουν σταθερές, τα αποτελέσματα είναι ανόμοια και διαφορετικής μορφής, ονομάζεται *στοχαστική διαδικασία*. Στην περίπτωση αυτή, είναι χρήσιμη μια στατιστική περιγραφή των αποτελεσμάτων όλων των πειραμάτων. Ο μόνος γνωστός τρόπος πλήρους στατιστικής περιγραφής αυτών των τυχαίων διεγέρσεων είναι η θεωρία των στοχαστικών διαδικασιών, που προέκυψε ως επέκταση της θεωρίας των πιθανοτήτων. Μοντέλα μελέτης των τυχαίων κυματισμών αναφέρονται παρακάτω.

Ακολουθεί επεξήγηση των όρων που θα χρησιμοποιηθούν:

$S(\omega)$: συνάρτηση πυκνότητας φάσματος ή φάσμα ισχύος

ω_p : κυκλική συχνότητα κορυφής ενός φάσματος

$H^{1/3}$: σημαντικό ύψος κύματος που είναι η μέση τιμή του 1/3 των
μεγαλύτερων υψών κύματος

f : συχνότητα κύματος

ζ_a : πλάτος κύματος

T : περίοδος κύματος

λ : μήκος κύματος

k : κυματικός αριθμός

C : ταχύτητα κορυφής κύματος ή φασική ταχύτητα

T_p : περίοδος που αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος ($T_p = 2\pi/\omega_p$)

m_0 : η μέση τετραγωνική τιμή ή rms (root mean square)

2.1.2. Αρμονικοί κυματισμοί

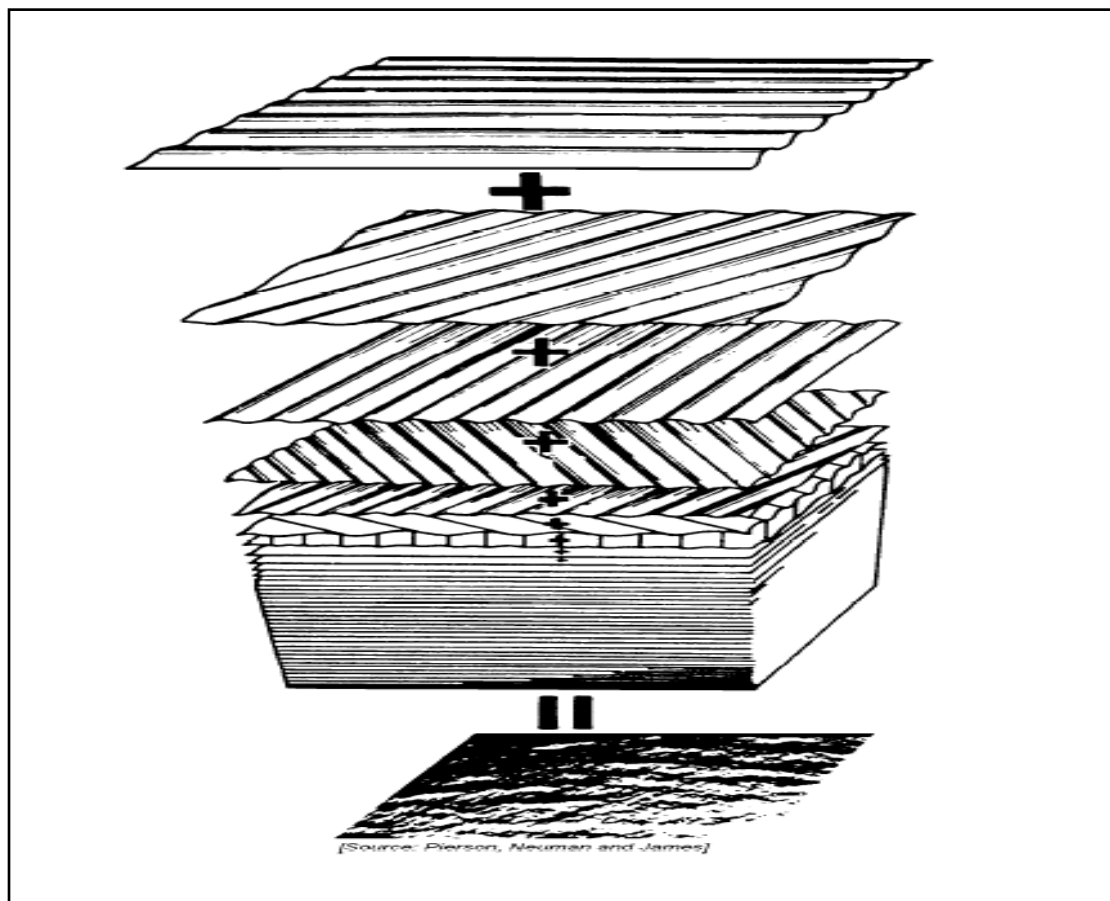
Η μορφή τους είναι απλή ημιτονοειδής ή συνημιτονοειδής. Περιγράφονται από την περίοδο T , την συχνότητα f , το μήκος κύματος λ και το ύψος κύματος H . Για την συχνότητα και την περίοδο ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

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

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

2.1.3. Τυχαίοι κυματισμοί

Το μοντέλο που χρησιμοποιούμε για την μελέτη ενός τυχαίου κυματισμού, είναι το μοντέλο *Longuet-Higgins*.



Σχήμα 2.1. Υπέρθεση άπειρων ημιτονικών κυμάτων. Μοντέλο Longuet-Higgins

Σύμφωνα με αυτό, το κυματικό προφίλ ενός τυχαίου κυματισμού προκύπτει σαν *υπέρθεση άπειρων ημιτονικών κυμάτων*, πλήθους i , σταθερών παραμέτρων (συχνότητα, κυματικός αριθμός, πλάτος ταλάντωσης A) αλλά με διαφορετικές γωνίες φάσης (σχήμα 2.1). Η σχέση που ακολουθεί περιγράφει το μοντέλο:

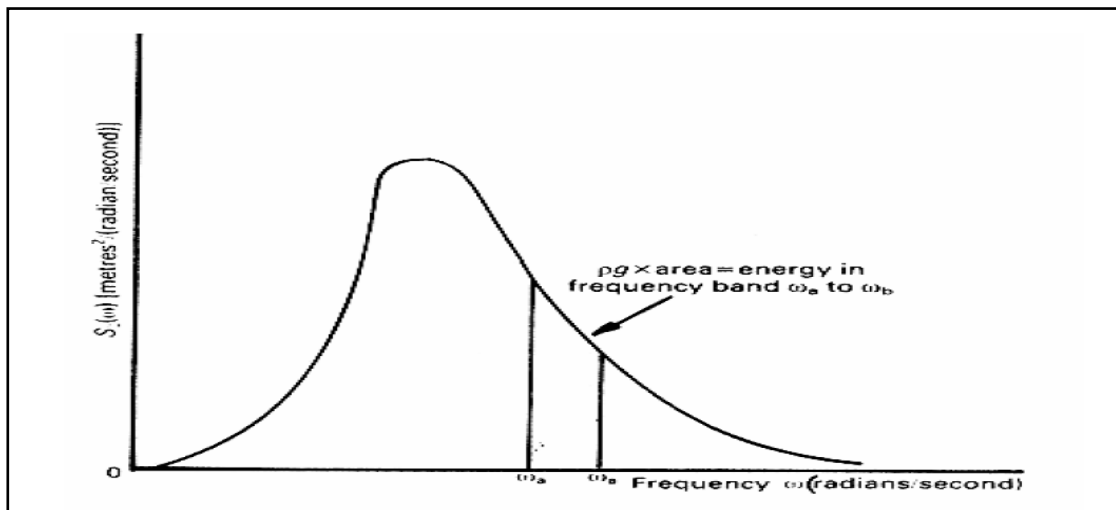
$$A(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (2.1)$$

Κατά αυτόν τον τρόπο, η τυχαία κυματομορφή αναλύεται σε ένα άπειρο άθροισμα αρμονικών κυματισμών με πλάτος A_i και διαφορά φάσης ϕ_i . Στην πράξη, η άπειρη σειρά αντικαθίσταται από έναν πεπερασμένο αριθμό όρων.

Όταν θέλουμε να περιγράψουμε μια κατάσταση θάλασσας και να μελετήσουμε τις αποκρίσεις ενός πλοίου σε αυτήν, δεν ενδιαφερόμαστε για την ακριβή καταγραφή μιας μεμονωμένης κυματομορφής, όσο για την εύρεση χαρακτηριστικών στατιστικών μεγεθών που επιτρέπουν την ικανοποιητική περιγραφή της επικρατούσας κατάστασης θάλασσας και την μελέτη των αντίστοιχων στατιστικών στοιχείων που χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά του πλοίου.

Μια δεδομένη κατάσταση θάλασσας περιγράφεται με την βοήθεια του **φάσματος κυματικής ενέργειας** (wave energy spectrum) (Σχήμα 2.2). Το φάσμα κυματικής ενέργειας $S(\omega)$ δίνει την κατανομή της κυματικής ενέργειας μέσα σε ένα φάσμα συχνοτήτων. Οι τιμές της $S(\omega)$ επιλέγονται έτσι ώστε η κυματική ενέργεια της συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας στην λωρίδα συχνοτήτων $\omega_a \leq \omega \leq \omega_b$ να ισούται με $\frac{1}{2} \rho g d A$, όπου:

$-dA = S(\omega) d\omega$, το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη $S(\omega)$ στην λωρίδα συχνοτήτων $\omega_a \leq \omega \leq \omega_b$, $\bar{\omega} = (\omega_a + \omega_b) / 2$, $d\omega = \omega_b - \omega_a$.



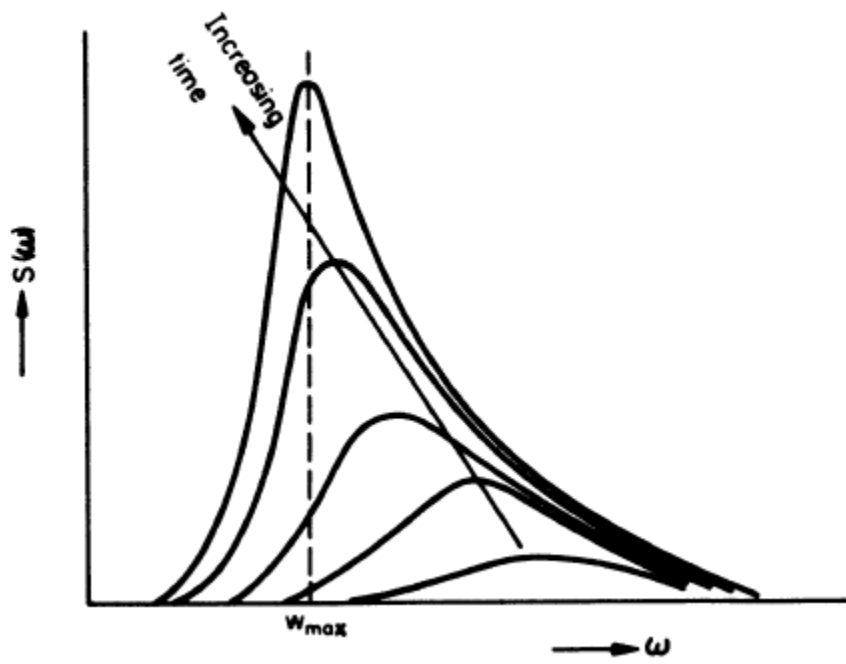
Σχήμα 2.2.Μορφή φάσματος κυματικής ενέργειας

Η συνάρτηση $S(\omega)$ εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια πνοής του ανέμου για την οποία διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

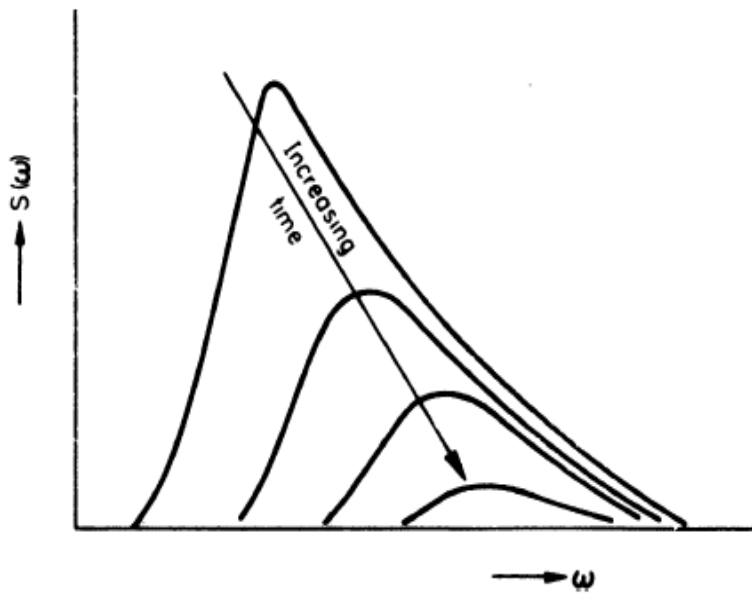
- πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες (fully developed seas): Όταν ο άνεμος έχει πνεύσει σταθερός και ανεμπόδιστος για μακρύ χρονικό διάστημα και θεωρούμε ότι έχουμε φτάσει σε μία κατάσταση ισορροπίας
- αναπτυσσόμενες θάλασσες (developing seas): Όταν ο άνεμος έχει πνεύσει για σχετικά μικρό διάστημα και δεν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

2.1.3.1 Μορφή κυματικών φασμάτων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το σύστημα κυματισμού εξαρτάται από την ένταση, την διάρκεια και το μήκος δράσης του ανέμου (wave fetch). Ορισμένες από τις διαφορές των προτεινόμενων κυματικών φασμάτων οφείλονται στην δυσκολία να προσδιορισθεί πότε ένας κυματισμός είναι πλήρως ανεπτυγμένος, καθώς ένας ομοιογενής άνεμος σπάνια φυσά για αρκετό διάστημα, ώστε να καθοριστεί αυτό. Όταν αρχίζει να φυσά, αρχικά σχηματίζονται κοντά κύματα, μικρού πλάτους. Όσο ο άνεμος συνεχίζει να φυσά, σχηματίζονται υψηλότερα και μακρύτερα κύματα. Καθώς ο άνεμος εξασθενεί, απομακρύνονται τα μακρύτερα κύματα λόγω της υψηλότερης ταχύτητάς τους, αφήνοντας τα κοντύτερα κύματα. Η ανάπτυξη και η εξασθένηση των κυματικών φασμάτων φαίνεται στα σχήματα 2.3 και 2.4.



Σχήμα 2.3. Ανάπτυξη φάσματος.



Σχήμα 2.4. Εξασθένηση φάσματος.

Απόπειρες ορισμού κυματικών φασμάτων χρησιμοποιούσαν την ταχύτητα του ανέμου σαν κύρια παράμετρο. Ένα τέτοιο φάσμα ήταν αυτό των **Pierson-Moskowitz** :

$$S(\omega) = \frac{0.0081 \cdot g^2}{\omega^5} \cdot \exp \left\{ -0.74 \cdot \left(\frac{g}{V_w \cdot \omega} \right)^4 \right\} \text{ m}^2 \cdot \text{sec} , \quad (2.2)$$

όπου:

V_w η ταχύτητα του ανέμου (σε m/sec)

Η παραπάνω οικογένεια είναι μονοπαραμετρική με μοναδική παράμετρο την ταχύτητα του ανέμου, δηλαδή οι καταστάσεις θάλασσας εξαρτώνται μόνο από αυτήν την παράμετρο. Η πραγματικότητα όμως είναι πιο πολύπλοκη. Το μονοπαραμετρικό φάσμα Pierson-Moskowitz δίνει μικρότερη τιμή για τη συχνότητα κορυφής ω_p από την πραγματική. Η δυσκολία αυτή μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση διπαραμετρικών φασμάτων της ίδιας αναλυτικής μορφής, που μπορούν να περιγράψουν θάλασσες σε όλες τις φάσεις εξέλιξής τους.

Ένα τέτοιο φάσμα που χρησιμοποιείται περισσότερο σήμερα είναι αυτό που προτάθηκε από τον International Towing Tank Conference (ITTC):

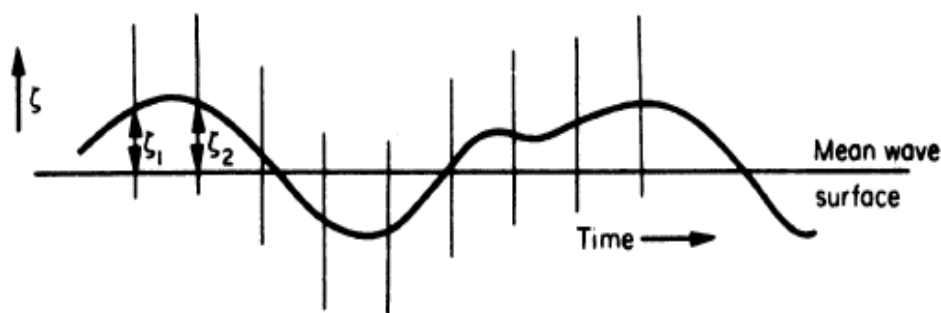
$$S(\omega) = \left\{ \frac{5}{16} \cdot \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^5 \cdot \frac{(H^{1/3})^2}{\omega_p} \cdot \exp \left[-\frac{5}{4} \cdot \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \right\} \quad (2.3)$$

Το παραπάνω φάσμα ονομάζεται **φάσμα Bretschneider**. Είναι διπαραμετρικό, για πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες. Οι παράμετροι που ορίζουν το φάσμα είναι: η συχνότητα κορυφής ω_p και το σημαντικό ύψος κύματος $H^{1/3}$.

2.1.3.2. Χαρακτηριστικά μεγέθη φάσματος

Η επιφάνεια κάτω από το φάσμα ισούται με $\int S(\omega)d\omega = m_o =$ μέσο τετράγωνο (mean square) της ανύψωσης επιφάνειας.

Το m_o μπορεί να βρεθεί μετρώντας την ανύψωση της επιφάνειας ζ ως προς την μέση στάθμη, σε ίσα χρονικά διαστήματα (Σχήμα 2.5). Για n τέτοιες μετρήσεις έχουμε:



Σχήμα 2.5. Η διαμέριση της ανύψωσης ζ του κύματος σε ίσα χρονικά διαστήματα.

$$m_o = \frac{1}{2n} \sum \zeta^2 = \frac{1}{2n} (\zeta_1^2 + \zeta_2^2 + \dots + \zeta_n^2) \quad (2.4)$$

Από παρατηρήσεις στην θάλασσα, έχει δειχθεί ότι πολλές από τις στατιστικές ιδιότητες της επιφάνειας του κύματος προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την κατανομή *Rayleigh*. Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά μερικά στατιστικά μεγέθη που προσεγγίζονται από την κατανομή *Rayleigh*:

- Πλάτος κύματος (root mean square amplitude) = 1.00σ
- Μέση τιμή του πλάτους κύματος (average amplitude) = 1.25σ
- Μέσο πλάτος του 1/3 των υψηλότερων κυμάτων (average of highest 1/3 amplitude) = 2.00σ

- Μέσο πλάτος του 1/10 των υψηλότερων κυμάτων (average of highest 1/10 amplitude) = 2.55σ
- Μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης (zero up-crossings) = $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$
- Μέση περίοδος κορυφών = $T_m = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$
- Το σημαντικό ύψος κύματος που αναφέρθηκε σαν παράμετρος για το φάσμα Bretschneider, συνδέεται με την μέση τετραγωνική τιμή m_0 από την σχέση:

$$H^{1/3} = 4 \cdot \sqrt{m_0} \quad (2.5)$$

Όπου:

Οι ποσότητες m_0, m_2, m_4 ονομάζονται **φασματικές ροπές** και προκύπτουν από τη σχέση:

$$m_n = \int \omega^n S(\omega) d\omega \quad (2.6)$$

Η σχέση (2.6), για $n = 0$ γίνεται :

$$m_0 = \int S(\omega) d\omega \quad (2.7)$$

Και έτσι ισχύει:

$$\sigma = \text{rms} = \sqrt{m_0} \quad (2.8)$$

είναι η **τυπική απόκλιση** ή αλλιώς η ρίζα της μέσης τετραγωνικής τιμής του φάσματος (root mean square – rms). Άρα, η μέση τετραγωνική τιμή (rms^2) ισούται με εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της φασματικής συνάρτησης.

Η συχνότητα που αντιστοιχεί στην υψηλότερη φασματική τιμή (**συχνότητα κορυφής ω_p**), είναι η συχνότητα όπου η διέγερση/απόκριση αποδίδει/απορροφά την περισσότερη ενέργεια.

2.2.

Είδη κινήσεων

Η κίνηση κάθε πλέοντος σκάφους χαρακτηρίζεται συνολικά από 6 βαθμούς ελευθερίας: τρεις **μεταφορικές** κατά μήκος των αξόνων x, y, z και τρεις **περιστροφικές** περί αυτών (Σχήμα 2.6) :

Μεταφορικές

ξ_1 : Διαμήκης οριζόντια ταλάντωση/παρέαση (Surge)

ξ_2 : Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση/έκπτωση (Sway)

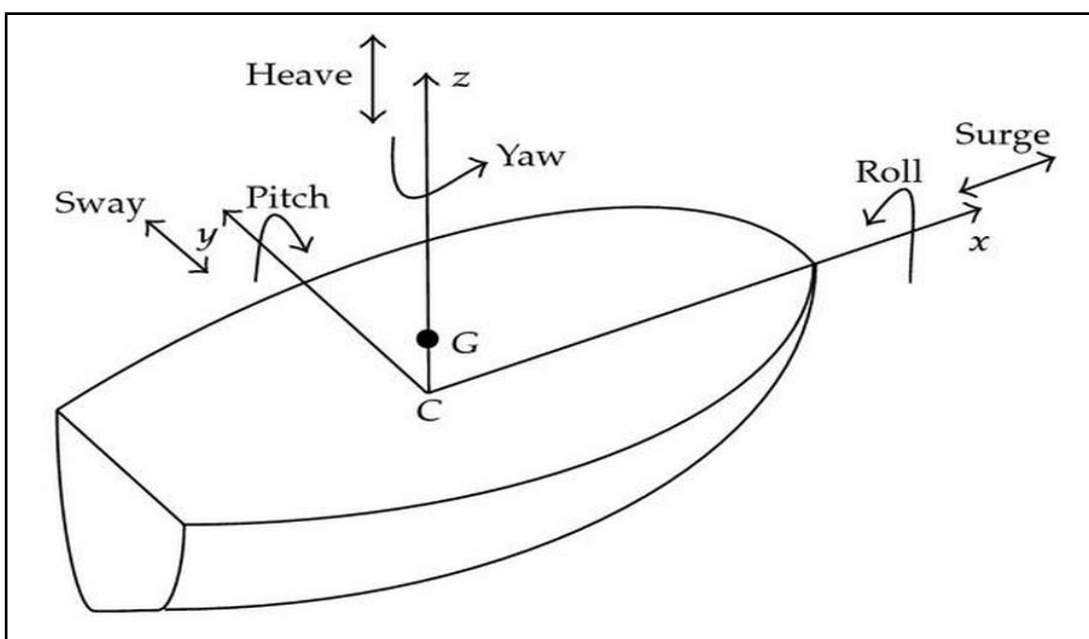
ξ_3 : Κατακόρυφη ταλάντωση (Heave)

Περιστροφικές

ξ_4 : Ταλάντωση περί το διαμήκη άξονα/Διατοιχισμός (Roll)

ξ_5 : Ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα/Προνευτασμός (Pitch)

ξ_6 : Ταλάντωση περί τον κατακόρυφο άξονα/παροιάκισμα (Yaw)



Σχήμα 2.6.Βαθμοί ελευθερίας και ονομασία κινήσεων του σκάφους.

Κατά την κίνηση ενός σκάφους σε heave, pitch ή roll, μεταβάλλεται ο όγκος και η μορφή των υφάλων, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται

υδροστατικές δυνάμεις και ροπές που τείνουν να επαναφέρουν το πλοίο στην θέση ισορροπίας. Αντίθετα, κατά την κίνηση surge, sway ή yaw μεταβάλλεται η θέση ή κατεύθυνση του πλοίου, ενώ η μορφή των υφάλων παραμένει ανεπηρέαστη, με συνέπεια στις κινήσεις αυτές να μην εμφανίζονται υδροστατικοί όροι επαναφοράς. Οι κινήσεις όπου αναπτύσσονται υδροστατικοί όροι επαναφοράς, χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση φαινομένων συντονισμού όταν η συχνότητα διέγερσης πλησιάζει τις ιδιοσυχνότητες του πλοίου.

Οι κινήσεις heave, pitch και surge είναι οι λεγόμενες *συμμετρικές κινήσεις* και είναι συζευγμένες μεταξύ τους ενώ οι υπόλοιπες τρεις κινήσεις αποτελούν την δεύτερη ομάδα συζευγμένων κινήσεων. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι αποκρίσεις ενός σκάφους σε surge, heave και pitch βρίσκονται σε αλληλεπίδραση, ενώ δεν επηρεάζουν ούτε επηρεάζονται από τις ταυτόχρονες κινήσεις του σκάφους σε yaw, sway και roll.

Οι κινήσεις που κατά κύριο λόγο εξετάζονται κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς είναι το heave και pitch. Αυτό επιλέγεται γιατί οι υψηλές τιμές αυτών των κινήσεων επιδρούν σημαντικά στις κατακόρυφες επιταχύνσεις κατά μήκος του πλοίου αλλά και προκαλούν προβλήματα όπως μετακινήσεις φορτίου, ανάδυση έλικας, κακή πηδαλιουχία, έλλειψη ευστάθειας, διαβροχή καταστρώματος κ.α, επηρεάζοντας έτσι την άνεση του πληρώματος και των επιβατών.

2.3.

Κώδικας SWAN2

Η αναλυτική μελέτη των αποκρίσεων ενός σκάφους σε θαλάσσιους κυματισμούς, αποτελεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Το σύνολο των κινήσεων του σκάφους είναι μη γραμμικό πρόβλημα και περιλαμβάνει πολλές μη γραμμικότητες, σχετιζόμενες με την ελεύθερη επιφάνεια και με την βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος όπως:

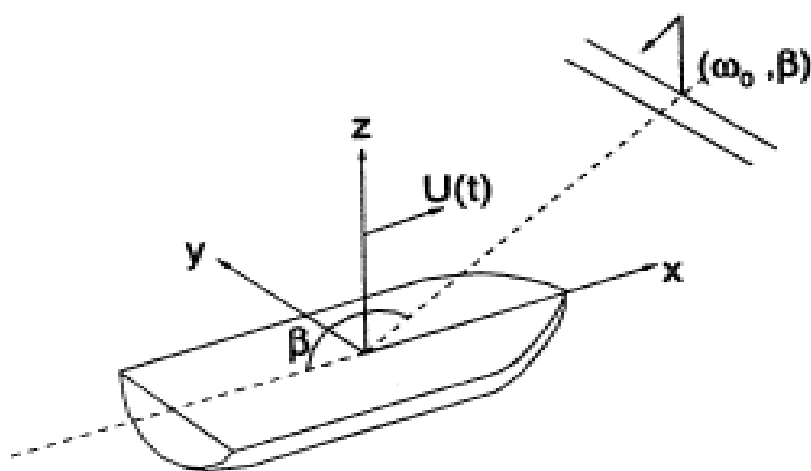
- Οι συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας είναι μη γραμμικές και περιέχουν μη γραμμικούς όρους
- Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε διαφορετικές συχνότητες κυματισμών
- Μη λεπτόγραμμες γάστρες παράγουν συχνά μη γραμμικές διαταραχές, π.χ αποκολλήσεις ροής
- Απότομες αλλαγές στην γεωμετρία κοντά στην ίσαλο πλεύσης προσθέτουν μη γραμμικά προβλήματα
- Η κίνηση σκάφους σε υψηλή ταχύτητα, προκαλεί φαινόμενα μη γραμμικά όπως σφυρόκρουση

Η πρώτη προσπάθεια προσέγγισης του προβλήματος έγινε με την **κλασσική γραμμική θεωρία κινήσεων** (classical linear ship motion theory). Βασισμένη στην αρχή της γραμμικής υπέρθεσης, υποστηρίζει ότι οι αποκρίσεις του σκάφους σε μια τυχαία κατάσταση θάλασσας μπορούν να αναχθούν σε άθροισμα των αποκρίσεων του σκάφους για κάθε συνιστώσα του φάσματος κυματισμών. Η παραπάνω θεωρία είναι αξιόπιστη σε γεωμετρικά απλές μορφές γάστρας που λειτουργούν σε ήρεμο θαλάσσιο περιβάλλον. Για πιο περίπλοκες γεωμετρίες και σε έντονες καταστάσεις θάλασσας, η κλασσική γραμμική θεωρία κρίνεται αναξιόπιστη καθότι δεν λαμβάνει υπόψιν ισχυρές μη γραμμικότητες.

Το SWAN2 (Ship Wave Analysis 2) είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα για την ανάλυση της κίνησης πλοίου κινούμενου ή ακίνητου σε νερό απείρου ή πεπερασμένου βάθους. Επιλύει το μόνιμο και μη μόνιμο πρόβλημα ροής ελεύθερης επιφάνειας γύρω από πλοίο χρησιμοποιώντας τη τρισδιάστατη

μέθοδο *Rankine Panel* στο πεδίο του χρόνου, κατανέμοντας τετράπλευρα πλαίσια πάνω στη γάστρα του πλοίου και την ελεύθερη επιφάνεια.

Σε αντίθεση με την κλασσική γραμμική θεωρία (classic linear ship motion theory), η υπόθεση που χρησιμοποιείται στο SWAN2 (Weak-Scattered hypothesis), “χαλαρώνει” τους δύο βασικούς περιορισμούς της κλασσικής γραμμικής θεωρίας -το πλάτος κυματισμού A και οι κινήσεις του πλοίου-, δεδομένου ότι οι διαταραχές ακτινοβολίας και περίθλασης είναι μικρές και επιπλέον γραμμικοποιήσιμες.



Σχήμα 2.7. Παράμετροι και διευθύνσεις για το input του προγράμματος SWAN2.

Οι εξισώσεις κίνησης του ρευστού δηλώνονται σύμφωνα με το καρτεσιανό σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 2.7. Για λόγους συνέχειας, το δυναμικό της ταχύτητας $\Phi(x,t)$ υπακούει στην εξίσωση Laplace στο πεδίο ροής:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (2.9)$$

Η θέση της ελεύθερης επιφάνειας καθορίζεται από την ανύψωση του κύματος $\zeta(x,y,t)$, όπου μαζί με το δυναμικό της ταχύτητας $\Phi(x,t)$ είναι οι μεταβλητές που προσδιορίζονται από την μέθοδο RPM (Rankine Panel Method).

Οι παραπάνω δύο μεταβλητές συνδέονται με δύο συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια. Η κινηματική συνθήκη αξιώνει ότι ένα σωματίδιο ρευστού στην διεπιφάνεια αέρα – ρευστού που βρίσκεται σε συγκεκριμένη θέση για $t = 0$, θα παραμείνει στην θέση αυτή συνεχώς. Η εξίσωση που εκφράζει την αντίστοιχη συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού, είναι:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla\Phi) \cdot \nabla\right]\zeta = \frac{\partial\Phi}{\partial z}, \quad (2.10)$$

Όπου, $z = \zeta(x,y,t)$

Η δυναμική συνθήκη δηλώνει ότι η πίεση του ρευστού στην ελεύθερη επιφάνεια πρέπει να είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση, η οποία θεωρείται ίση με το μηδέν. Από την εξίσωση Bernoulli προκύπτει ότι:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \vec{U} \cdot \nabla\right]\Phi + \frac{1}{2}\nabla\Phi \cdot \nabla\Phi = -g\zeta \quad (2.11)$$

Στην επιφάνεια της γάστρας του σκάφους, η κανονική ταχύτητα της ροής ισοδυναμεί με την ταχύτητα στο στερεό σύνορο. Ορίζοντας σαν n το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στην στιγμιαία θέση της γάστρας του πλοίου και \vec{v} η μεταβολή της ταχύτητας του πλοίου λόγω των κινήσεων του, προκύπτει η εξίσωση:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = \vec{U} \cdot \vec{n} + \vec{v} \cdot \vec{n} \quad (2.12)$$

Για αποστάσεις μακριά από το πλοίο, η ταχύτητα της ροής θα πρέπει να είναι μηδενική.

Λόγω της δυσκολίας επίλυσης των παραπάνω εξισώσεων, εισάγονται δύο γραμμικοποιήσεις: για την οριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας και την οριακή συνθήκη γάστρας.

Η **πρώτη γραμμικοποίηση** αφορά τις συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας και κρίνεται ικανοποιητική υπό την προϋπόθεση ότι η κλίση του κύματος είναι

μικρή και η γάστρα λεπτόγραμμη. Σε αυτό το σημείο, είναι δυνατός ο διαχωρισμός του **δυναμικού Φ** σε δύο μέρη:

$$\Phi = \phi_0 + \phi_1 \quad (2.13)$$

$$|\nabla \phi_1| \ll |\nabla \phi_0| \quad (2.14)$$

Όπου, ϕ_0 το δυναμικό της βασικής ροής και ϕ_1 το δυναμικό της ροής της διαταραχής λόγω κίνησης του σκάφους.

Για την **ανύψωση του κύματος ζ** , ισχύει:

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_1 \quad (2.15)$$

$$\zeta_1 \ll \zeta_0 \quad (2.16)$$

Κάνοντας χρήση της *Double-body linearization*, προκύπτει:

$$\zeta_0 = \frac{U}{g} \frac{\partial \phi_0}{\partial x} - \frac{1}{2g} \nabla \phi_0 \cdot \nabla \phi_0, z = 0 \quad (2.17)$$

Κάνοντας χρήση των εξισώσεων (2.14) και (2.16), προκύπτουν:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \phi_0) \cdot \nabla \right] \zeta_1 = \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial z^2} \zeta_1 + \frac{\partial \phi_1}{\partial z}, z = 0 \quad (2.18)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla \phi_0) \cdot \nabla \right] \phi_1 = -g \zeta_1 + [\bar{U} \cdot \nabla \phi_0 - \frac{1}{2} \nabla \phi_0 \cdot \nabla \phi_0], z = 0 \quad (2.19)$$

Η **δεύτερη γραμμικοποίηση** αφορά την οριακή συνθήκη του στερεού συνόρου του σώματος, της γάστρας. Αυτή γίνεται γύρω από την μέση βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας, υποθέτοντας ότι η μεταβολή γύρω από αυτή την θέση είναι μικρή. Το πλοίο θεωρείται ότι υπόκειται στις ταλαντωτικές κινήσεις ξ_j , $j = 1, 2, \dots, 6$ αντίστοιχα με τους βαθμούς ελευθερίας του. Υποθέτοντας την εξίσωση (2.13), προκύπτει:

$$\frac{\partial \phi_0}{\partial n} = \vec{U} \cdot \vec{n} = U \cdot n_1 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_1}{\partial n} \quad (2.21)$$

Οπότε η εξίσωση (2.12) γίνεται:

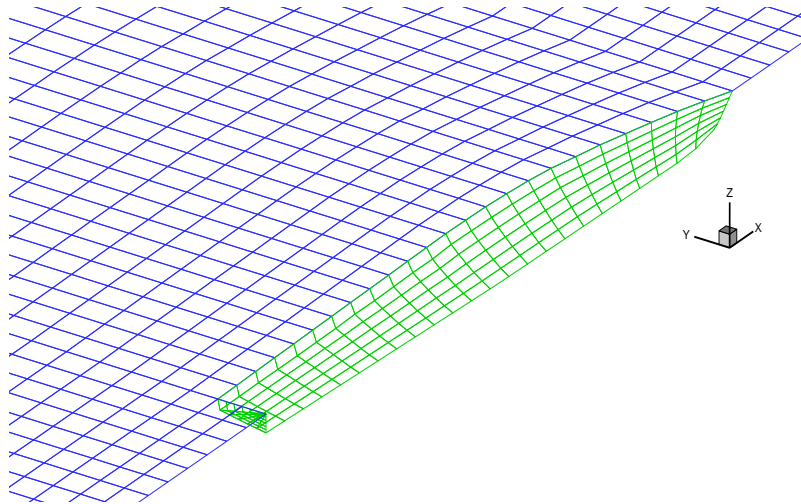
$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial t} n_j + \xi_j m_j \right) \quad (2.22)$$

Όπου:

- $(n_4, n_5, n_6) = \vec{x} \times \vec{n}$,
- $(m_1, m_2, m_3) = (\vec{n} \cdot \nabla)(\vec{U} - \nabla \phi_0)$
- $(m_4, m_5, m_6) = (\vec{n} \cdot \nabla)[\vec{x} \times (\vec{U} - \nabla \phi_0)]$
- Οι m όροι στις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της σταθερής δυναμικής ροής και της ασταθούς ροής που αποτελεί παράγωγο της ακτινοβολίας.

Λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας και δυσκολίας επίλυσης των παραπάνω εξισώσεων, γραμμικοποιούνται με την Double-Body Linearization.

Σε αυτό το σημείο γίνεται η δημιουργία και κατανομή των τετραπλεύρων στην γάστρα και την ελεύθερη επιφάνεια (σχήμα 2.8) και επιλύεται το μόνιμο και μη μόνιμο πρόβλημα ροής ελεύθερης επιφάνειας γύρω από πλοίο χρησιμοποιώντας τη τρισδιάστατη μέθοδο Rankine Panel στο πεδίο του χρόνου.



Σχήμα 2.8. Κατανομή τετραπλεύρων στην γάστρα και στην ελεύθερη επιφάνεια.

Ο κώδικας ζητά την εισαγωγή δύο τύπων αρχείων:

- Ένα αρχείο *.pln* που περιγράφει την γεωμετρία της γάστρας του πλοίου
- Ένα αρχείο *.inp* όπου περιγράφει την κατάσταση της θάλασσας (πλάτος κυματισμών, γωνία β , περίοδος κυματισμών, συχνότητα), χαρακτηριστικά του πλοίου όπως: μήκος, βάρος, θέση κέντρου βάρους, δυναμική άνωση, διαγωγή, ακτίνα περιστροφής, ταχύτητα, θέση επιταχυνσιόμετρων πάνω στο μοντέλο, συνολικός χρόνος και βήμα προσομοίωσης.

Το SWAN2 αποτελείται από τους τρεις ανεξάρτητους κώδικες MAKESSG, SETUP και SOLVE και έναν βοηθητικό κώδικα εισαγωγής δεδομένων (που περιλαμβάνει τα 5 βήματα).

- Ο κώδικας MAKESSG μοντελοποιεί τη γεωμετρία και κατασκευάζει το πλέγμα των τετραπλεύρων που θα τοποθετηθούν στη γάστρα και στην ελεύθερη επιφάνεια. Η πυκνότητα του πλέγματος καθορίζει τόσο το αριθμητικό αποτέλεσμα όσο και τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο.

- Ο κώδικας SETUP εφαρμόζει την οριακή συνθήκη του σώματος και υπολογίζει τη βασική ροή. Η βασική ροή, δεν είναι χρονοεξαρτώμενη και επιλύεται σε ένα βήμα
- Ο κώδικας SOLVE είναι το κεντρικό λογισμικό επίλυσης του προβλήματος και δίνει μετά το πέρας των υπολογισμών τα αποτελέσματα. Καθώς πρόκειται για περίπλοκο πρόβλημα, ο κώδικας αυτός τρέχει για μία έως δύο ώρες, ανάλογα με το πρόβλημα και την πυκνότητα του πλέγματος.

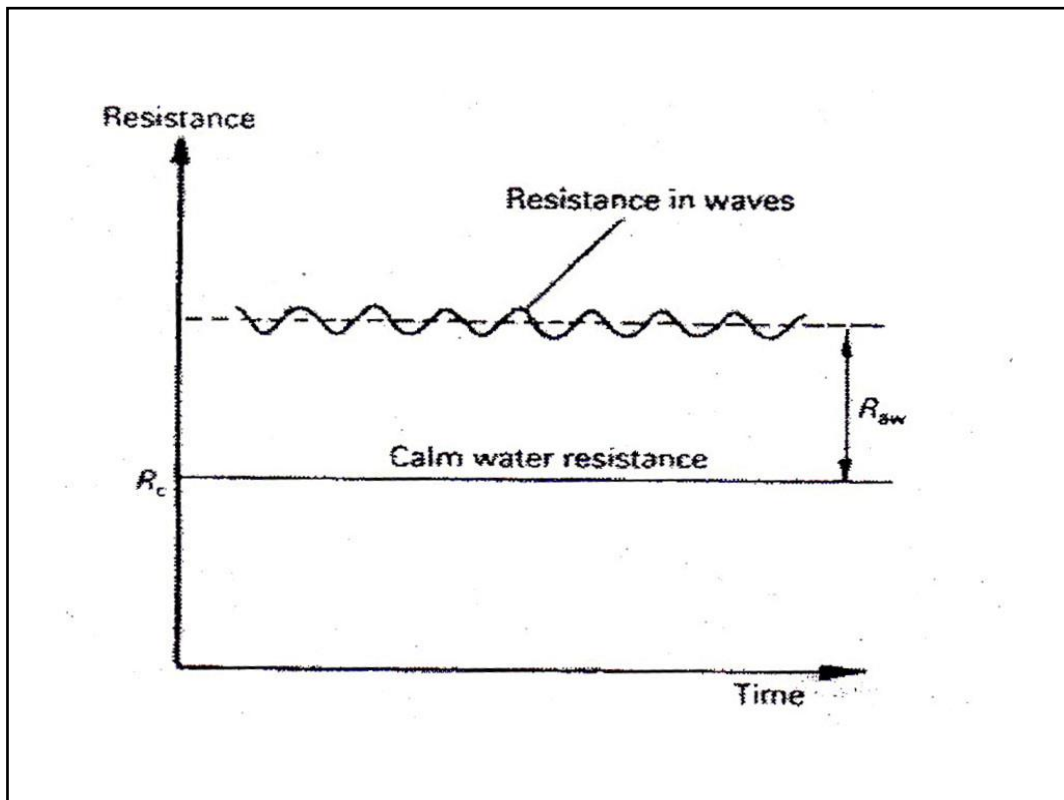
Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε, για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας με στόχο να συγκρίνουμε τα αποτελέσματά του με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται το περιβάλλον του SWAN2 και τα αποτελέσματα που παράγει.

2.4. Πρόσθετη Αντίσταση (Added Resistance)

Για την προωστήρια εγκατάσταση, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της αντίστασης του πλοίου. Σε κακές καιρικές συνθήκες, η αντίσταση μπορεί να μεταβληθεί από την ενέργεια των κυμάτων και τον άνεμο. Υπό αυτές τις επιδράσεις, αυξάνεται η ολική αντίσταση του πλοίου με αποτέλεσμα την μείωση της ονομαστικής ταχύτητας του πλοίου.

Η ολική αντίσταση του σκάφους κατά την πλεύση σε κυματισμούς αποτελείται από δύο συνιστώσες: την αντίσταση σε ήρεμο νερό (calm water resistance) και την πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς (added wave resistance) (Σχήμα 2.9).

$$R_{\text{total resistance}} = R_{\text{calm water}} + R_{\text{added resistance}} \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.9. Συνιστώσες ολικής αντίστασης σκάφους.

2.5. *RAO (Response Amplitude Operator)*

Η εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός πλοίου σε κυματισμούς γίνεται με τη χρήση των αδιάστατων συντελεστών απόκρισης (Response Amplitude Operator – RAO).

Αν ορίσουμε το φάσμα απόκρισης ως $S_{\xi}(\omega)$ και το φάσμα διέγερσης του πλοίου ως $S_{\zeta}(\omega)$.

Η γραμμικότητα απόκρισης - διέγερσης περιγράφεται μέσω της γενικής σχέσης:

$$S_{\xi}(\omega) = \text{RAO}^2 * S_{\zeta}(\omega) \quad (2.10)$$

Τα RAO των αποκρίσεων, σύμφωνα με το ITTC (2005) έχουν ως εξής:

Heave

$$RAO_{HEAVE} = \frac{\xi_3}{A} \quad (2.11)$$

Όπου,

A: το πλάτος του κύματος

Pitch

$$RAO_{PITCH} = \frac{\xi_5 \cdot \lambda}{360 \cdot A} \quad (2.12)$$

Όπου,

λ: το μήκος του κύματος

Accelerations

$$RAO_{ACC} = \frac{a \cdot Lwl}{A} \quad (2.13)$$

Όπου,

Lwl: το μήκος της ισάλου του μοντέλου.

2.6. Παράμετροι Σχεδίασης ταχύπλοων σκαφών που επιδρούν στην δυναμική τους συμπεριφορά

Η μελέτη και σχεδίαση ενός ταχύπλοου σκάφους έτσι ώστε να έχει καλή δυναμική συμπεριφορά είναι μία διαδικασία δύσκολη και σχετικά επίπονη, καθώς υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη οι οποίοι μάλιστα αλληλοσυγκρούονται. Ένας μελετητής ναυπηγός λοιπόν θα πρέπει να συνδυάσει τις παράμετρους σχεδίασης που ακολουθούν:

- Λόγος μήκους/πλάτος (L/B): Γενικά πειραματικές και αναλυτικές διαδικασίες έχουν δείξει ότι αύξηση του λόγου L/B έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των επιταχύνσεων σε όλα τα επίπεδα και για όλες τις περιοχές ταχυτήτων.
- Γωνία ανύψωσης του πυθμένα (deadrise): Η αύξηση της γωνίας ανύψωσης του πυθμένα επιδρά θετικά στον περιορισμό των κινήσεων του σκάφους καθώς και στη μείωση της πρόσθετης αντίστασης. Ακόμη, μεγάλες γωνίες ανύψωσης πυθμένα βελτιώνουν την ευστάθεια πορείας ενός πλοίου. Οπότε θα μπορούσε να πει κανείς ότι έχει ευνοϊκή επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά του σκάφους, όμως επιδρά αρνητικά στις κρουστικές επιταχύνσεις. Άρα θα πρέπει να γίνει προσεκτικά τελικά η επιλογή της γωνίας αυτής.
- Γωνία Διαγωγής (trim): Είναι γνωστό ότι μείωση της γωνίας διαγωγής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατακόρυφης κίνησης, του προνευτασμού, της πρόσθετης αντίστασης και των κρουστικών επιταχύνσεων. Η μείωση όμως έχει και το μειονέκτημα ότι αυξάνεται η πρόσθετη αντίσταση στις ταχύτητες που αντιστοιχούν στην περιοχή μετά το τοπικό μέγιστο της καμπύλης αντίστασης.

- Μορφή νομέων: Είναι γνωστό ότι η μορφή των νομέων σχήματος V συμβάλλει στην βελτίωση της πηδαλιουχίας (manoeuvring) του σκάφους σε κυματισμούς καθώς και στον περιορισμό της δημιουργίας αφρού. Όμως, η μορφή αυτή έχει το ελάττωμα ότι οδηγεί σε μεγάλα κρουστικά φορτία και σε έντονη σφυρόκρουση στην περιοχή της πλώρης. Σε ορισμένες περιπτώσεις λοιπόν μια καλή επιλογή θα μπορούσε να είναι η μορφή νομέων σε σχήμα ανεστραμμένου κουδουνιού που δεν αυξάνει πολύ την πρόσθετη αντίσταση και συγχρόνως έχει λιγότερο έντονες κρουστικές φορτίσεις.
- Συντελεστής φόρτισης C_A : Έχει αποδειχθεί ότι οι επιταχύνσεις μειώνονται γραμμικά με την αύξηση του συντελεστή φόρτισης. Ακόμη, είναι γνωστό ότι για ταχύτητες με αριθμό Froude πάνω από 0.6 αύξηση του συντελεστή φόρτισης οδηγεί σε ελαφριά μείωση των κινήσεων του πλοίου καθώς και της πρόσθετης αντίστασης.

3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ **TACHYPLOON SKAFON.NTUA SERIES**

3.1. *Εισαγωγή*

Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός σκάφους σε κυματισμούς μπορεί να εκτιμηθεί είτε με υπολογιστική μέθοδο κάνοντας χρήση ενός λογισμικού είτε μέσω πειραμάτων. Στα πλαίσια της προσπάθειας αυτής, αναπτύχθηκαν από ορισμένα ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια, συστηματικές σειρές ταχυπλόων σκαφών, δηλαδή οικογένειες γαστρών με ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά. Στα σκάφη που αποτελούν αυτή την οικογένεια, έχουν γίνει όλα τα απαραίτητα πειράματα αντίστασης σε ήρεμο νερό και δυναμικής συμπεριφοράς σε διάφορες καταστάσεις θάλασσας και για διάφορες ταχύτητες. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια βάση δεδομένων για την υδροδυναμική συμπεριφορά των ταχυπλόων, έτσι ώστε για σκάφη με όμοια ή παρόμοια γεωμετρία γάστρας, να είναι δυνατόν να προβλεφθεί η υδροδυναμική τους συμπεριφορά χωρίς πειραματική διερεύνηση.

Οι σειρές που έχουν αναπτυχθεί ποικίλουν ως προς την γεωμετρία της γάστρας και ως προς τις παραμέτρους σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι, υπάρχουν συστηματικές σειρές για σκάφη με στρογγυλό πυθμένα, σκάφη με μία ακμή, σκάφη με δύο ακμές. Θα αναφερθούμε περιληπτικά σε κάποιες γνωστές σειρές και στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλυτικότερα την συστηματική σειρά που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π.

στρογγυλό πυθμένα (rounded bilge)

- Η σειρά NPL (National Physical Laboratory): Αποτελέσματα πειραμάτων για αυτή τη σειρά παρουσιάστηκαν πρώτη φορά από τους Marwood and Bailey (1976). Τα σκάφη της σειράς προέκυψαν από ένα βασικό σκάφος, διατηρώντας τους ίδιους αδιλαστατους συντελεστές μορφής (συντελεστή γάστρας, πρισματικός συντελεστής, συντελεστής ισάλου επιφάνειας, LCB/L, LCF/L) και μεταβάλλοντας ομοιόμορφα τις κύριες διαστάσεις (L,B,D). Οι γάστρες της σειράς χαρακτηρίζονται από ευθείες ισάλους στην είσοδο, στρογγυλούς πυθμένες στην πρύμνη και ευθείες διαμήκεις τομές που τελειώνουν απότομα στην πρύμνη καθρέπτη. Η διαμήκης θέση του κέντρου άνωσης είναι 6,4% του μήκους πρύμνηθεν του μέσου νομέα.
- Η σειρά VTT: Αναπτύχθηκε από το ομώνυμο κέντρο ερευνών στο Esroo της Φιλανδίας και παρουσιάστηκε το 1991. Πρόκειται για σειρά πέντε προτύπων και ικανοποιεί τις απαιτήσεις μικρού βυθίσματος για λειτουργία στην περιοχή των φιλανδικών ακτών και δυνατότητας τοποθέτησης συστήματος waterjet.
- Η σειρά 63: Βασίζεται σε πειράματα με πέντε πρότυπα γαστρών που έγιναν στο Davidson Laboratory του Stevens Institute of Technology και παρουσιάστηκαν το 1963 από τον Beys. Το πατρικό πρότυπο της σειράς αυτής είχε λόγο $L/B = 4$ ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα έχουν προκύψει με μεταβολή της ισαπόστασης των νομέων και των 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 $\frac{L}{\nabla^{1/3}}$.

- Η σειρά 64: Βασίστηκε σε πειράματα με 27 πρότυπα ταχύπλοων σκαφών που έγιναν στο DTNSRDC και παρουσιάστηκε από τον Yen(1965). Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: ο λόγος $\Delta/(0.01L)^3(15-50)$, B/T (2-4) και C_B (0.35-0.55). Η σειρά χρησιμοποιείται κυρίως σε παραμετρικές μελέτες λεπτόγραμμων σκαφών.
- Η σειρά SSPA: Αναπτύχθηκε από τον σουηδικό οργανισμό SSPA και τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάστηκαν από τους Lindgren και Williams το 1968. Αποτελείται από εννέα κρατώντας σταθερά τα C_B , C_X , LCB και LCF. Στα πειράματα εκτός από την αντίσταση, διερευνήθηκε η επίδραση των αντιδιαβροχικών λωρίδων καθώς και η υδροδυναμική συμπεριφορά των προτύπων σε ημιτονοειδείς κυματισμούς. Χρησιμοποιείται κυρίως για ταχέα μικρά πολεμικά σκάφη.
- Η σειρά NSMB: Αναπτύχθηκε στο ομόνυμο ολλανδικό κέντρο και παρουσιάστηκε το 1985 από τους Oassanen and Pieffers. Κλυριο στόχος της σειράς ήταν η υδροδυναμική συμπεριφορά των προτύπων σε κυματισμούς όπου περιγράφεται αναλυτικά από τους Blok and Beukelman (1984). Η σειρά περιλαμβάνει είκοσιεπτά πρότυπα και σαν παραμέτρους ελήφθησαν οι: L/B , B/T και C_B .

3.3. Συστηματικές σειρές σκαφών με ακμή (single chine)

- Η σειρά 62: Παρουσιάστηκε από τους Clement και Blount το 1963. Αποτελείται από πέντε πρότυπα με λόγους L_P/B_{PX} : 2.00, 3.06, 4.09, 5.50, 7.00. Για καθένα από τα πέντε πρότυπα έγιναν δοκιμές σε τέσσερις καταστάσεις φόρτωσης με λόγους $\frac{A_P}{\nabla^{2/3}} = 4.0, 5.5, 7.0, 8.5$ και σε τέσσερις διαμήκεις θέσεις κέντρου βάρους $LCG = 0\%, 4\%, 8\%, 12\%$ του μήκους ακμής L_P πρύμνηθεν του κέντρου βάρους της επιφανείας ισάλου A_P . Τα πρότυπα όλα έχουν γάστρα με σταθερή γωνία ανύψωσης

πυθμένα $\beta=12.5^\circ$, κυρτές γραμμές προβαίων νομέων και πλάτος ακμής στην πρύμνη ίσο με 65% του μεγίστου πλάτους ακμής.

- Η σειρά Keuning–Gerritsma(Delft Series): Αποτελεί βελτιωμένη έκδοση της σειράς 62 με αύξηση της γωνίας ανύψωσης πυθμένα από 12.5° σε 25° .

3.4. Συστηματικές σειρές σκαφών με διπλή ακμή (double chine)

- Σειρά κατά Savitsky: Οι Savitsky, Roper και Benen χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματα μελετών του Savitsky για να σχεδιάσουν ολισθάκατο με δύο ακμές και ανύψωση πυθμένα με βελτιωμένη συμπεριφορά σε κυματισμούς. Η σχεδιαστική διαδικασία βασίστηκε κυρίως στο συνδυασμό των μεθόδων πρόβλεψης συμπεριφοράς σε ήρεμο νερό σύμφωνα με τους Savitsky (1964) και Hadler (1966) και των αντίστοιχων μεθόδων για κυματισμούς κατά Fridsma (1971). Αν και οι εργασίες αυτές αναφέρονταν σε γάστρες με σταθερό πλάτος, σταθερή γωνία ανύψωσης πυθμένα β και με παράλληλες στην τροπίδα διαμήκεις τομές, εφαρμόστηκαν επιτυχώς και σε πραγματικές γάστρες με κατάλληλη επιλογή ενεργών τιμών πλάτους και γωνίας β .

Κατά τη σχεδίαση δόθηκε προσοχή στη συσχέτιση των κύριων διαστάσεων με τα εξής υδροδυναμικά χαρακτηριστικά:

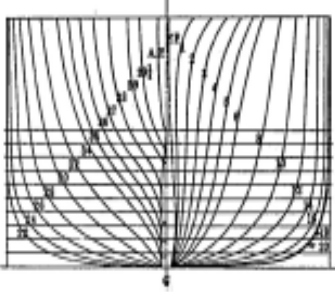
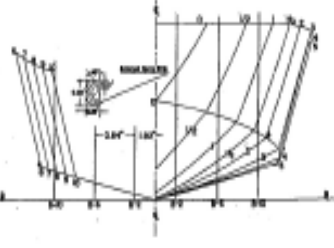
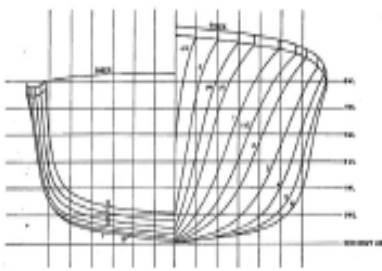
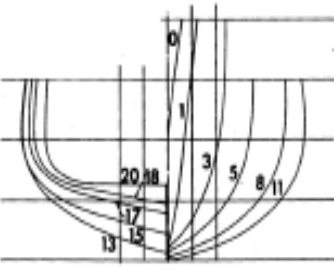
- υδροδυναμικά κρουστικά φορτία σε κυματισμούς
- υδροστατικό εκτόπισμα
- ολίσθηση σε μεγάλες ταχύτητες
- ολίσθηση σε μικρές ταχύτητες
- μετακεντρική ευστάθεια

Έγινε μελέτη για γωνία ανύψωσης πυθμένα $\beta = 10^\circ, 20^\circ$ και 30° από τις οποίες επιλέχθηκε τελικά η $\beta=20^\circ$.

- Η σειρά NTUA: Η σειρά αυτή δημιουργήθηκε από το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π και περιλαμβάνει πρότυπα με δύο ακμές με πειράματα αντίστασης και συμπεριφοράς σε κυματισμούς, βασισμένα στη σχεδίαση του Savitsky που προαναφέρθηκε καθώς και στη σειρά 62.

Στην συνέχεια διακρίνονται πολλές από τις σειρές που αναφέρθηκαν καθώς και σειρές που δεν έχουν ειδικό ενδιαφέρον για τα ταχύπλοα σκάφη που μελετάμε (πίνακες 3.1 και 3.2).

Πίνακας 3.1.Συστηματικές Σειρές ταχύπλων σκαφών

 <p>A technical drawing of a hull cross-section for the Taylor Standard Series. It shows a series of curved lines representing the hull's profile, with various points and lines labeled. The hull is symmetrical about a vertical centerline.</p>	<p>TAYLOR STANDARD SERIES 145 Models Testing 1907 to 1914 D.W. Taylor Maximum Speed $F_{at} = 0.60$ <u>Fixed Parameters</u> $LCB/L = 0.50, L_{1/2}/L = 0.50, C_X = 0.925$ <u>Variable Parameters</u> $F_{at}, L/\nabla^{1/3}, B/T, C_D, C_T$</p>
 <p>A technical drawing of a hull cross-section for DTMB Series 62. It shows a hull with a distinct transverse flare and a flat bottom. The hull is symmetrical about a vertical centerline. Various points and lines are labeled.</p>	<p>DTMB SERIES 62 5 Models Published 1963 E. Clement & D. Blount Maximum Speed $F_{at} = 3.00$ <u>Fixed Parameters</u> $\beta_T = 12.5^\circ$ <u>Variable Parameters</u> $F_{at}, L/\nabla^{1/3}, L/B, LCG, LCB/L$</p>
 <p>A technical drawing of a hull cross-section for DTMB Series 63. It shows a hull with a wide, flat bottom and a slight transverse flare. The hull is symmetrical about a vertical centerline. Various points and lines are labeled.</p>	<p>DTMB SERIES 63 5 Models Published 1963 P. Beys Maximum Speed $F_{at} = 0.88$ <u>Fixed Parameters</u> L, static trim <u>Variable Parameters</u> $F_{at}, L/\nabla^{1/3}, L/B, LCG, C_D, C_T, C_X$</p>
 <p>A technical drawing of a hull cross-section for DTMB Series 64. It shows a hull with a wide, flat bottom and a slight transverse flare. The hull is symmetrical about a vertical centerline. Various points and lines are labeled.</p>	<p>DTMB SERIES 64 27 Models Published 1965 H.Y.H. Yeh Maximum Speed $F_{at} = 1.50$ <u>Fixed Parameters</u> $L, L_{1/2}/L = 0.60, LCF/L = 0.40$ fwd AP, $LCB/L = 0.43$ fwd AP, $C_D = 0.63, C_T = 0.52, C_W = 0.76$ <u>Variable Parameters</u> $F_{at}, L/\nabla^{1/3}, L/B, C_D, B/T, C_X, i_s$</p>

Πίνακας 3.2.Συστηματικές Σειρές ταχύπλων σκαφών

	<p>NPL SERIES 22 Models Published 1969 & 1976 D. Bailey, et al Maximum Speed $F_{st} = 1.20$ <u>Fixed Parameters</u> $C_B = 0.40$, $C_P = 0.69$, $C_X = 0.57$, $LCB/L = 0.44$ fwd AP, $L_{cl}/L = 0.60$ <u>Variable Parameters</u> F_{st}, L, L/B, B/T, $L/\nabla^{1/3}$, i_a</p>
	<p>DTMB NAVAL LCB-ICF MINI-SERIES 9 Models Published 1970 M. Lasky Maximum Speed $F_{st} = 0.54$ <u>Fixed Parameters</u> L/B, B/T, ∇, $C_B = 0.47$, $C_P = 0.58$, $C_X = 0.81$ <u>Variable Parameters</u> F_{st}, C_{PW}, L_{cl}/L, i_a, LCB/L, LCF/L</p>
	<p>DELFT SERIES (RELATED TO DTMB SERIES 62) 5 Models Published 1982 J. Keuning & J. Gerritsma Maximum Speed $F_{st} = 1.65$ <u>Fixed Parameters</u> $\beta_T = 25.0^\circ$ <u>Variable Parameters</u> F_{st}, $L/\nabla^{1/3}$, L/B, LCG, LCB/L</p>
	<p>NTUA SERIES 5 Models Published 1999 & 2001 G. Grigoropoulos, et al Maximum Speed $F_{st} = 1.10$ <u>Fixed Parameters</u> $\beta_T = 10^\circ$ <u>Variable Parameters</u> F_{st}, $L/\nabla^{1/3}$, B/T, L/B, LCB/L</p>
	<p>USCG SERIES 4 Models Published 2006 D. Kowalshyn & B. Metcalf Maximum Speed $F_{st} = 2.54$ <u>Fixed Parameters</u> $C_B = 0.43$, $LCB/L = 0.38$, $\beta_T = 16.6^{**}$, $C_P = 0.70$, $LCF/L = 0.40$, $i_a = 19.5^{***}$ <u>Variable Parameters</u> F_{st}, $L/\nabla^{1/3}$, B/T, L/B, C_P $*$ for one model $\beta_T = 20^\circ$ $**$ for one model $i_a = 21^\circ$</p>

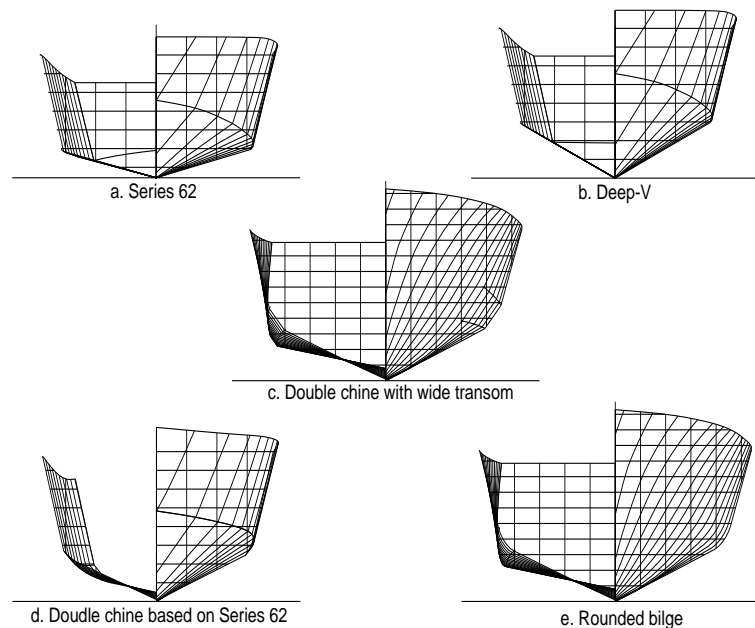
Η συστηματική σειρά NTUA που αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, περιλαμβάνει πρότυπα με διπλή ακμή, πεπλατυσμένο καθρέπτη στην πρύμνη και «δίπλωμα» του V προς την πρόρα που δημιουργεί αύξηση γωνίας ανύψωσης τυθμένα (warp) στην επιφάνεια ολίσθησης.

Η σειρά αυτή δημιουργήθηκε ώστε να μπορεί να βασιστεί σε αυτήν ένας μελετητής για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό μεγάλου μονόγαστρου πλοίου ή σκάφους αναψυχής που θα λειτουργεί σε μεγάλες ταχύτητες αλλά όχι σε ταχύτητες ολίσθησης. Η σειρά αποτελείται από πέντε πρότυπα με λόγους μήκους προς πλάτος $L/B = 4.00, 4.75, 5.50, 6.25$ και 7.00 . Το καθένα από τα πέντε πρότυπα δοκιμάζεται σε έξι διαφορετικά εκτόπισματα, συμπεριλαμβανομένων και των πολύ ελαφριών έτσι ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες μεγάλων ταχύπλοων πλοίων αλλά και ιδιωτικών σκαφών.

Η προσπάθεια ξεκίνησε από τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π. Θεόδωρο Λουκάκη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. Γρηγόρη Γρηγορόπουλο το 1994 οπότε και κατασκευάστηκε το πατρικό σκάφος της σειράς, το *NTUA-097/94* με λόγο $L/B = 5.50$ συνδυάζοντας τη γάστρα της σειράς 62 και της γάστρας των Savitsky, Roper και Benen, με χαρακτηριστικά τη διπλή ακμή και τον πεπλατυσμένο καθρέπτη στην πρύμνη. Έγιναν σε αυτό καταρχάς πειράματα αντίστασης με αντιδιαβροχικές λωρίδες και χωρίς, καθώς και σε άλλα τέσσερα πρότυπα γνωστών σειρών (Σχήμα 3.3) με το ίδιο μήκος ($L = 2.29\text{m}$) και πλάτος ($B = 0.416\text{m}$) στο εκτόπισμα των 29.7 kg ($C_{DL} = 3.00$), που ήταν τα εξής:

- Σκάφος Σειράς 62 με μία ακμή των Clement & Blount, 1965
- Σκάφος μορφής βαθέος V (Deep V) με μία ακμή των Keuning & Gerritsma, 1982

- Σκάφος με διπλή ακμή και πλατύ καθρέπτη των Savitsky, Roper και Benen, 1972
- Σκάφος με εξομαλυμένες τις δύο ακμές (Rounded bilge) και πλατύ καθρέπτη των Γρηγορόπουλου και Λουκάκη, 1995



Σχήμα 3.3.Συστηματικές Σειρές που ελέγχθηκαν πειραματικά στο ENΘΥ

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν και στις πέντε γάστρες έδειξαν ότι το πρότυπο της διπλής ακμής και πλατιού καθρέπτη των Γρηγορόπουλου και Λουκάκη είχε μειωμένη αντίσταση σε σχέση με τα άλλα στην προ ολίσθησης περιοχή. Ακόμη, έδειξε ότι οι αντιδιαβροχικές λωρίδες σε αυτό προσέθεταν αντίσταση αντί να αφαιρούν παρόλο που στα άλλα βελτιώναν τα χαρακτηριστικά της αντίστασης.

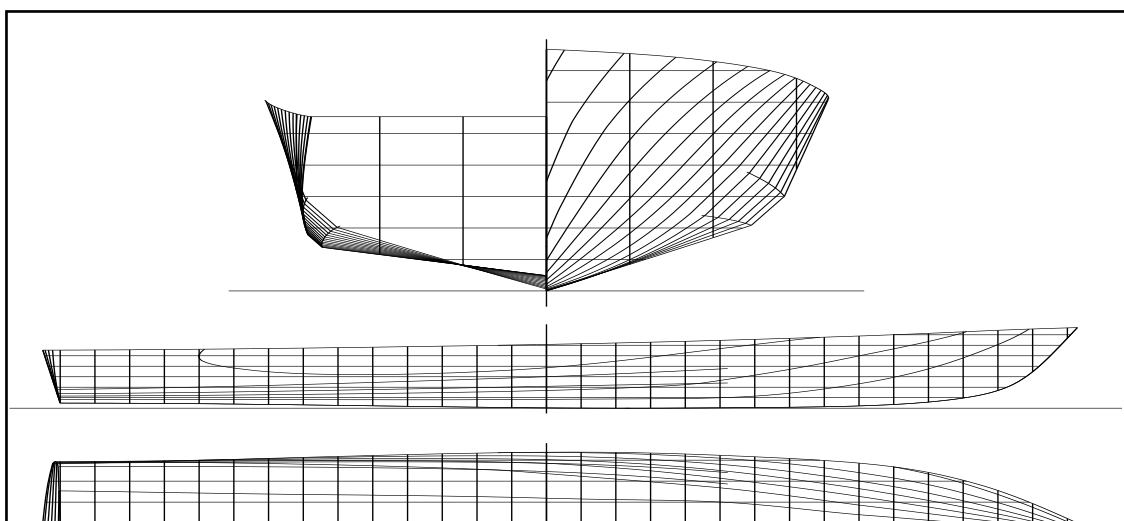
Βασική παράμετρος της σειράς επιλέχθηκε ο λόγος μήκους προς πλάτος L/B , όπως συμβαίνει άλλωστε και στις περισσότερες σειρές γαστρών ταχύπλοων σκαφών, με κάτω όριο το 4.00 και άνω όριο το 7.00. Κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν πέντε πρότυπα με $L/B = 4.00, 4.75, 5.50,$

6.25 και 7.00 με πατρικό το $L/B = 5.50$. Τα υπόλοιπα τέσσερα πρότυπα προέκυψαν από το πατρικό κρατώντας σταθερή τη μέση τομή και αλλάζοντας κατάλληλα τα υπόλοιπα μεγέθη. Η δεύτερη βασική παράμετρος είναι ο

συντελεστής εκτοπίσματος $C_{DL} = \frac{\nabla}{\rho \cdot L_{WL} \hat{I}}$, όπου ∇ είναι ο όγκος

εκτοπίσματος και L_{WL} το μήκος ισάλου. Επιλέχθηκαν έξι διαφορετικές τιμές του συντελεστή αυτού, οι εξής: $C_{DL} = 1.00, 1.61, 2.23, 3.00, 3.62, 4.23$. Οι χαμηλότερες τιμές του συντελεστή εκτοπίσματος αντιστοιχούν όπως είναι αντιληπτό σε ελαφριές καταστάσεις φόρτωσης ενώ οι υψηλότερες σε μεγαλύτερα φορτία. Για τις χαμηλές τιμές του συντελεστή εκτοπίσματος, προβλέφθηκε η κατασκευή πέντε μοντέλων κλίμακας 5/3:1 για να γίνει δυνατή η επίτευξη του επιθυμητού εκτοπίσματος. Στα πλαίσια της προσπάθειας ολοκλήρωσης των πειραμάτων δυναμικής συμπεριφοράς των προτύπων της σειράς, επιλέχθηκαν προς διερεύνηση στην παρούσα διπλωματική τα μοντέλα “154/99” λόγου $L/B=4.75$ και “146/98” λόγου $L/B=6.25$, για συντελεστή εκτοπίσματος $C_{DL}=3.00$.

Παρακάτω φαίνεται το σχέδιο γραμμών του πατρικού σκάφους της συστηματικής σειράς NTUA (Σχήμα 3.4) καθώς και τα χαρακτηριστικά των υπό εξέταση μοντέλων (Πίνακας 3.5 και 3.6).



Σχήμα 3.4.Σχέδιο γραμμών πατρικού σκάφους της Συστηματικής Σειράς NTUA.

Πίνακας 3.5. Χαρακτηριστικά μοντέλου NTUA-154/99

ΠΡΟΤΥΠΟ NTUA-154/99	
L _{OA}	2.292 m
L _{WL}	2.1343 m
WS	0.77624 m ²
Δ	29.143kg
LCB (% L _{WL} aft from mid.sec)	14.12%
T	0.076m

Πίνακας 3.6.Χαρακτηριστικά μοντέλου NTUA-146/98

ΠΡΟΤΥΠΟ NTUA-146/98	
L _{OA}	2.605 m
L _{WL}	2.4623 m
WS	0.91432 m ²
Δ	44.794kg
LCB (% L _{WL} aft from mid.sec)	13.14%
T	0.099m

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Αντικείμενο της πειραματικής διαδικασίας αποτέλεσε η μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς σε τυχαίους κυματισμούς των προτύπων NTUA/154–99 και NTUA/146–98 της συστηματικής σειράς Ε.Μ.Π. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π.

4.1 Πειραματική Εγκατάσταση

Η πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π. έχει μήκος 91m, πλάτος 4.6m και μέγιστο βάθος νερού 3.0m, πλάνο της οποίας φαίνεται στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1. Πλάνο της πειραματικής δεξαμενής από την πλευρά του κυματιστήρα.

Το πρότυπο προσδένεται σε ένα φορείο, το οποίο κινείται πάνω σε ράγες (εικόνα 4.2). Το φορείο είναι εφοδιασμένο με Η/Υ συνδεδεμένο με τον κυματιστήρα, το δυναμόμετρο το οποίο αποτελεί το μέσο σύνδεσης με το πρότυπο, διάδρομο κίνησης για εγκατάσταση των μοντέλων καθώς και

αποσβεστήρα, για απόσβεση των κυματισμών κατά την επιστροφή του στην αρχική θέση. Η ταχύτητα που μπορεί να αποκτήσει το φορείο είναι έως 5 m/sec, σε υψηλή ή χαμηλή επιτάχυνση, ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος, καθότι υψηλότερη ταχύτητα είναι επικίνδυνη και για τους συμμετέχοντες στο πείραμα αλλά και για την εγκατάσταση, σε περίπτωση εμπλοκής.



Εικόνα 4.2. Το φορείο της Πειραματικής Δεξαμενής. Διακρίνεται στο πίσω μέρος ο αποσβεστήρας.

4.2 Στάδια Πειραματικής Διαδικασίας

Τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνουν την προετοιμασία του προτύπου, τις βαθμονομήσεις των οργάνων μέτρησης, την δημιουργία των επιθυμητών καταστάσεων θάλασσας και την διεξαγωγή του πειράματος.

4.2.1. Προετοιμασία προτύπου

Τα στάδια προετοιμασίας των προτύπων για πειράματα seakeeping είναι τα εξής:

- 1) Επίτευξη επιθυμητού εκτοπίσματος

- 2) Εύρεση επιθυμητής διαγωγής και εγκάρσιας κλίσης
- 3) Προσδιορισμός ακτίνας αδρανείας και περιόδου ιδιοταλάντωσης
- 4) Υπολογισμός αποφόρτισης

Τα στάδια προετοιμασίας έγιναν δύο φορές, μία φορά για κάθε μοντέλο ως εξής:

4.2.1.1.Εύρεση επιθυμητού εκτόπισματος

Αφού επιλέξαμε την επιθυμητή κατάσταση φόρτωσης για την οποία θα γίνουν τα πειράματα, βρέθηκε η αντίστοιχη ίσαλος πλευσης (ήδη χαραγμένη στο μοντέλο από προηγούμενα πειράματα).

Ύστερα τοποθετήθηκε η πλάκα πρόσδεσης του δυναμόμετρου στο κέντρο βάρους του μοντέλου. Επί της πλάκας τοποθετήθηκε βάρος ίσο με το βάρος του δυναμόμετρου.

Στη συνέχεια, βαθμονομήθηκαν και τοποθετήθηκαν τα τρία επιταχυνσιόμετρα με τα οποία μετράμε τις κατακόρυφες επιταχύνσεις. Τοποθετήσαμε από ένα επιταχυνσιόμετρο στην πρόρα (Acc.Bow), στο κέντρο βάρους (Acc.Mid) και στην πρύμνη (Acc.Stern).

Μετά τοποθετήθηκαν όλα τα απαραίτητα βάρη για την επίτευξη του επιθυμητού εκτόπισματος. Για να αποφευχθεί η εισροή νερού στο μοντέλο κατά την διάρκεια των πειραμάτων, τοποθετούνται πλαστικές ζελατίνες, το βάρος των οποίων λαμβάνουμε υπόψιν. Σε αυτό το σημείο, ζυγίσαμε το μοντέλο σε ζυγαριά ακριβείας που διαθέτει η δεξαμενή, για να διαπιστωθεί αν επιτεύχθηκε το επιθυμητό εκτόπισμα. Επιτεύχθηκε το εκτόπισμα $\Delta = 28.475 \text{ kg}$ για το μοντέλο NTUA-154/99, και το εκτόπισμα $\Delta = 45.067 \text{ kg}$ για το μοντέλο NTUA-146/98, και τα δύο για $C_{DL} = 3.00$.

4.2.1.2.Εύρεση επιθυμητής διαγωγής και εγκάρσιας κλίσης

Στα πειράματα seakeeping, τα μοντέλα μας έχουν μηδενική γωνία διαγωγής (trim), ενώ δεν παρουσιάζουν εγκάρσια κλίση. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ισοβύθιστη κατάσταση και εφόσον επετεύχθη το επιθυμητό εκτόπισμα, τοποθετήσαμε το μοντέλο στην πειραματική δεξαμενή σε ήρεμο νερό και το δέσαμε στο δυναμόμετρο ώστε να είναι σταθερό. Στην συνέχεια με κατάλληλη μετακίνηση των βαρών, φέραμε το μοντέλο σε ισοβύθιστη κατάσταση.

4.2.1.3. Προσδιορισμός ακτίνας αδρανείας και περιόδου ιδιοταλάντωσης

Η προηγούμενη τοποθέτηση των βαρών ελέγχεται για το αν η κατανομή τους είναι τέτοια ώστε η ακτίνα αδρανείας γύρω από τον κατακόρυφο άξονα είναι αντίστοιχη του πλοίου. Για τον προσδιορισμό της δένουμε το μοντέλο σε μιάντες προσαρμοσμένους σε δύο εκκρεμείς ράβδους στο χώρο του εργαστηρίου (εικόνες 4.3, 4.4).



Εικόνες 4.3-4.4. Διακρίνεται η πρόσδεση του μοντέλου στους μιάντες, καθώς και κάποια από τα μετακινήσιμα βάρη.

Η θεωρητικά υπολογιζόμενη περίοδος ιδιοταλάντωσης του μοντέλου περί τον κατακόρυφο άξονα δίδεται από τη σχέση 4.1:

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{I_{zz} \cdot l}{\Delta \cdot a^2 \cdot g}} \quad (4.1)$$

Όπου,

I_{zz} : ροπή αδρανείας γύρω από τον άξονα zz

l : το συνολικό μήκος από την πλάκα πρόσδεσης του δυναμόμετρου έως το σημείο πρόσδεσης των εκκρεμών ράβδων (= 4.03m)

Δ : η μάζα του μοντέλου και των ιμάντων πρόσδεσης

a : ημιαπόσταση στελεχών από κέντρο βάρους μοντέλου (= 0.75m)

Η ροπή αδρανείας δίνεται από τη σχέση 4.2:

$$I_{zz} = r_{zz}^2 \Delta \quad (4.2)$$

Όπου, r_{zz} : η ακτίνα αδρανείας.

Έχει υπολογισθεί εμπειρικά μέσω ομοίων πλοίων ότι η ακτίνα αδρανείας είναι περίπου 0,25 L_{BP} . Συνεπώς, η σχέση 4.1 γίνεται:

$$T = \frac{2r_{zz}}{\alpha} \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (4.3)$$

Για το μοντέλο **NTUA - 154/99** έχουμε $r_{zz} = 0,5336\text{m}$ και για το μοντέλο **NTUA - 146/98** έχουμε $r_{zz} = 0,6158\text{m}$.

Μετά τους θεωρητικούς υπολογισμούς, χρονομετρήσαμε την ταλάντωση του μοντέλου σε δέκα περιόδους. Σκοπός είναι η περίοδος που θα προκύψει να συμπίπτει με την θεωρητική τιμή που υπολογίσαμε παραπάνω. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με μικρές μετακινήσεις βαρών περί το κέντρο του μοντέλου, έτσι ώστε να παραμένει σταθερό το αλγεβρικό άθροισμα των ροπών και ισοβύθιστη ίσαλο πλευσης.

Πίνακας 4.5. Θεωρητική και πραγματική περίοδος ιδιοταλάντωσης για τα δύο μοντέλα.

	NTUA-154/99	NTUA-146/98
Θεωρητική περίοδος ιδιοταλάντωσης (sec)	2.864	3.305
Πραγματική περίοδος ιδιοταλάντωσης (sec)	2.88	3.36

4.2.1.4. Υπολογισμός αποφόρτισης

Σε ταχύπλοα σκάφη με συμβατικά συστήματα πρόωσης ο άξονας της έλικας βρίσκεται υπό κλίση. Στη περίπτωση του πειράματός μας, δεχόμαστε μια τυπική κλίση της τάξης των $6,5^\circ$ ως προς το βασικό επίπεδο αναφοράς.

Λόγω της κλίσης αυτής, η ώση που παρέχεται από την έλικα αποτελείται από δύο συνιστώσες: την οριζόντια T_H η οποία εξισορροπεί την αντίσταση R του σκάφους και την κατακόρυφη T_v . Λόγω της κατακόρυφης συνιστώσας, το εκτόπισμα του σκάφους μειώνεται σε $\Delta' = \Delta - T_v$.

Όπου,

$$T_v = T_H * \tan (\tau - 6,5^\circ) = R * \tan (\tau + 6,5^\circ) \quad (4.4)$$

τ : η διαγωγή (trim) που αποκτά το σκάφος σε διάφορες ταχύτητες (θεωρείται θετική όταν είναι εμπροχή)

Για τον υπολογισμό της αντίστασης και της διαγωγής, ανατρέχουμε στα αποτελέσματα πειραμάτων αντίστασης που έχουν πραγματοποιηθεί παλαιότερα σε ήρεμο νερό και για διάφορες ταχύτητες. Συγκεντρωτικά, οι αποφορτίσεις φαίνονται στον πίνακα 4.6.

Πίνακας 4.6. Τιμές αποφορτίσεων για τα δύο μοντέλα.

	NTUA-154/99	NTUA-146/98
Αποφόρτιση (kg) για $F_n = 0.34$	0.126	0.205
Αποφόρτιση (kg) για $F_n = 0.68$	0.404	0.637

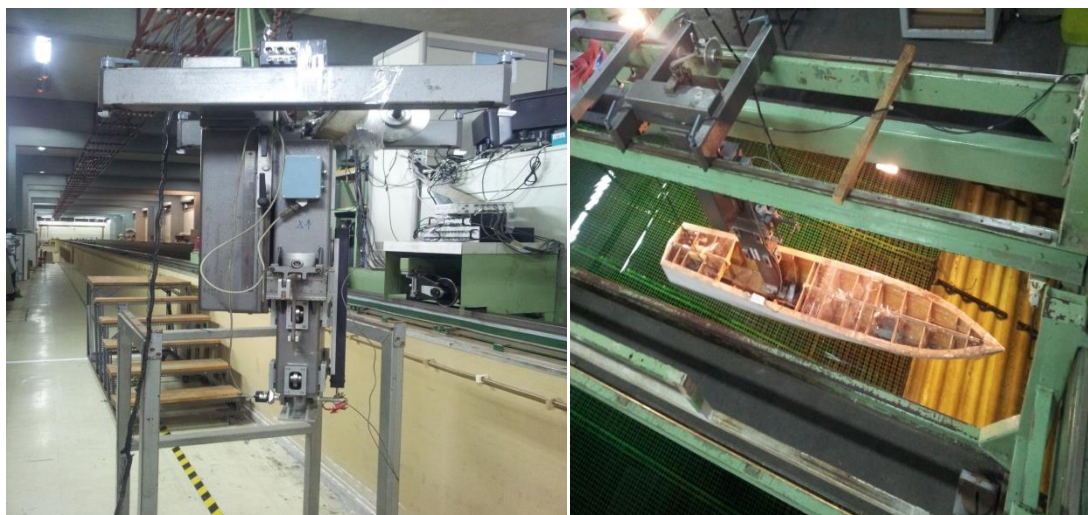
4.2.2. Βαθμονόμηση οργάνων μέτρησης

Τα μεγέθη που μετρήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων ήταν τα εξής:

- ✓ Κατακόρυφη κίνηση (Heave)
- ✓ Προνευτασμός (Pitch)
- ✓ Κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη (Acc. Bow)
- ✓ Κατακόρυφη επιτάχυνση στο κέντρο βάρους του προτύπου (Acc. Mid)
- ✓ Κατακόρυφη επιτάχυνση στην πρύμνη (Acc. Stern)
- ✓ Ανύψωση κύματος δεξαμενής (Wave Tank Probe)
- ✓ Αντίσταση (Resistance)

Οι κατακόρυφες επιταχύνσεις μετρήθηκαν με τρία επιταχυνσιόμετρα, που όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 4.2.1.1, τοποθετήθηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις πάνω στο μοντέλο. Η μέτρηση της ανύψωσης του κύματος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ακίνητου αισθητήρα (Wave Tank Probe), προσδεμένου σε σταθερό σημείο στη δεξαμενή. Λαμβάνει μετρήσεις μέσω διπλού μεταλλικού

στελέχους βυθιζόμενου στο νερό. Τα δύο μεταλλικά στοιχεία μπορούν να θεωρηθούν σαν οπλισμοί ενός πυκνωτή και το νερό σαν διηλεκτρικό μέσο. Οι μετρήσεις δίνουν ένα μέτρο του μεγέθους της βύθισης. Οι υπόλοιπες τρεις μετρήσεις πραγματοποιούνται με τη βοήθεια των αισθητήρων του δυναμόμετρου R-47 (εικόνα 4.7), το οποίο προσδένεται σε ειδική πλάκα στο κέντρο βάρους του μοντέλου (εικόνα 4.8).



Εικόνες 4.7-4.8. Διακρίνεται το δυναμόμετρο εκτός του φορείου και η πρόσδεση του μοντέλου μέσω του δυναμόμετρου στο φορείο.

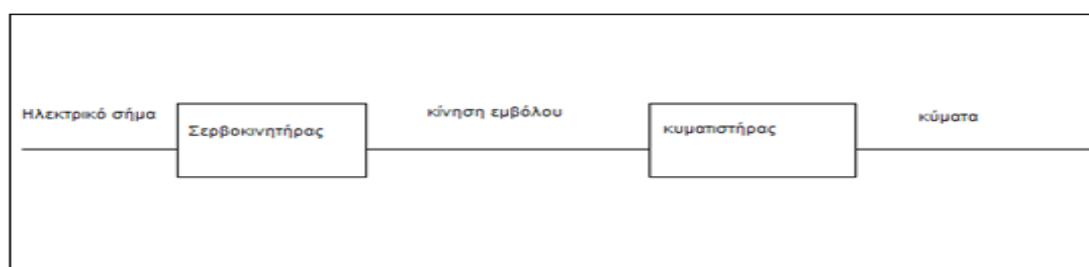
Οι αισθητήρες δίνουν την μέτρηση σαν ηλεκτρικό σήμα (Volts). Το σήμα ενισχύεται και καταγράφεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του φορείου.

Πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι απαραίτητη η **βαθμονόμηση** όλων των οργάνων μέτρησης ώστε να διαπιστωθεί η σωστή λειτουργία τους και να καταστρώσουμε την συνάρτηση μεταφοράς από τις μονάδες των Volts που μετρούνται, στις επιθυμητές για κάθε μέγεθος μονάδες. Η συχνότητα των βαθμονομήσεων εξαρτάται από την ευαισθησία των οργάνων στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Οπότε, ο μετρητής Wave Tank Probe και ο αισθητήρας μέτρησης της αντίστασης βαθμονομούνταν καθημερινά πριν την έναρξη του πειράματος, ο αισθητήρας Heave βαθμονομήθηκε τέσσερις φορές, ο αισθητήρας Pitch πέντε φορές ενώ τα επιταχυνσιόμετρα bow, mid και stern δύο φορές. Η διαδικασία της βαθμονόμησης ήταν χρονοβόρα και αυξημένης

βαρύτητας: για λόγους ευαισθησίας - κόστους των οργάνων αλλά και γιατί από αυτήν κρίνονταν οι σωστές μετρήσεις που θα καταγράφονταν και αναλύονταν αργότερα.

4.2.3. Δημιουργία επιθυμητών καταστάσεων θάλασσας (sea states)

Τα κύματα δημιουργούνται από την κίνηση ενός πέδιλου (εικόνα 4.10) στο άκρο της δεξαμενής. Ο κυματιστήρας κινείται από ένα σέρβο-υδραυλικό έμβολο (εικόνα 4.11), το οποίο ενεργοποιείται με ηλεκτρικό σήμα. Στο σχήμα 4.9 φαίνεται το διάγραμμα λειτουργίας για την παραγωγή κυματισμών.



Σχήμα 4.9. Διάγραμμα παραγωγής κυματισμού.

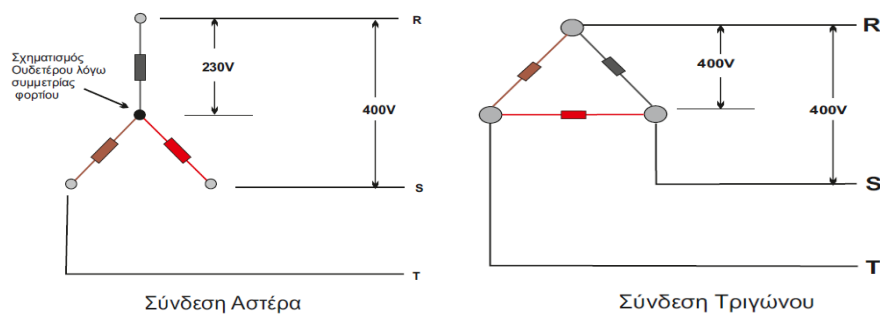


Εικόνα 4.10. Πλάνο του κυματιστήρα όπου διακρίνονται και τα έμβολα κίνησης του.



Εικόνα 4.11. Πλάνο του σερβοκινητήρα που κινεί το έμβολο του κυματιστήρα.

Η εκκίνηση του σερβοκινητήρα (εικόνα 4.11) έχει την εξής ιδιαιτερότητα: η συνδεσμολογία λειτουργίας του είναι συνδεσμολογία τριγώνου (εικόνα 4.12). Το ρεύμα εκκίνησης είναι πολλαπλάσιο (τέσσερις με οχτώ φορές) του ρεύματος κανονικής λειτουργίας. Η απευθείας εκκίνηση του κινητήρα σε συνδεσμολογία τριγώνου, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο δίκτυο όπως βυθίσεις τάσης, φαινόμενο που δύναται να προκαλέσει απώλειες και στους υπολογιστές που χρησιμοποιούνται στην δεξαμενή για τον προγραμματισμό του κυματιστήρα. Για τους παραπάνω λόγους, χρησιμοποιείται ο **αυτόματος διακόπτης αστέρα - τριγώνου**, όπου το ρεύμα εκκίνησης σε συνδεσμολογία αστέρα είναι το ένα τρίτο του αντίστοιχου ρεύματος σε συνδεσμολογία τριγώνου.



Εικόνα 4.12. Συνδεσμολογίες αστέρα και τριγώνου.

Τα φάσματα των κυμάτων που παρήχθησαν από τον κυματιστήρα, δημιουργήθηκαν με χρήση του διπαραμετρικού φάσματος του Bretschneider (εδάφιο 2.1.3.1) που ορίζεται με την βοήθεια δύο παραμέτρων, της συχνότητας κορυφής ω_p και του σημαντικού ύψους κύματος H_s .

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται οι αδιάστατες περίοδοι T_p' , οι περίοδοι κορυφής T_p , οι κυκλικές συχνότητες κορυφής ω_p , οι συχνότητες f_p και τα σημαντικά ύψη κύματος για κάθε κατάσταση κύματος $H^{1/3} = H_s$. Επιπλέον, φαίνονται τα ονόματα των αρχείων που περιείχαν την συνάρτηση πυκνότητας του φάσματος για κάθε κατάσταση θάλασσας καθώς και τον συντελεστή κλίμακας (scale factor - αναλύεται παρακάτω) με τον οποίον παράχθηκαν στον κυματιστήρα.

Πίνακας 4.13. Καταστάσεις θάλασσας για $L/B=4.75$.

Cdl =	3						
Scale =	50						
Lship (m)=	106.72						
Lmodel(m)=	2.1343						
Tp'	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Tpship (sec)	6.60	8.25	9.89	11.54	13.19	14.84	16.49
Tpmodel (sec)	0.933	1.166	1.399	1.633	1.866	2.099	2.332
ω p model (rad/sec)	6.732	5.386	4.488	3.847	3.366	2.992	2.693
Fmodel (Hz)	1.072	0.858	0.715	0.613	0.536	0.476	0.429
H^{1/3} (m)	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16
File name	h8tp2.c	h9tp25.475	h10tp3.475	h11tp35.475	h12tp4.475	h14tp45.475	h16tp5.475
Scale Factor	1.02	1.10	1.09	1.04	1.04	1.07	1.07
Fn=0.34	x	x	x	x	x	x	x
Fn=0.68	x	x	x	x	x	x	x

Πίνακας 4.14. Καταστάσεις θάλασσας $L/B=6.25$.

Cdl =	3						
Scale =	50						
Lship(m) =	123.16						
Lmodel(m)=	2.4632						
Tp'	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Tpship (sec)	7.09	8.86	10.63	12.40	14.17	15.94	17.72
Tpmodel (sec)	1.002	1.253	1.503	1.754	2.004	2.255	2.505
ω p model (rad/sec)	6.266	5.013	4.178	3.581	3.133	2.785	2.507
Fmodel (Hz)	0.998	0.798	0.665	0.570	0.499	0.443	0.399
H^{1/3} (m)	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16
File name	h8tp2.b	h9tp25.625	h10tp3.625	h11tp35.625	h12tp4.625	h14tp45.625	h16tp5.625
Scale Factor	0.99	1.07	1.04	1.01	1.04	1.06	1.06
Fn=0.34	x	x	x	x	x	x	x
Fn=0.68	x	x	x	x	x	x	x

Στο σημείο αυτό κρίνεται αναγκαία μια αναφορά στον τρόπο παραγωγής τυχαίων κυματισμών. Στην Πειραματική Δεξαμενή του Ε.Μ.Π εφαρμόζεται μια τεχνική παραγωγής ψευδο-τυχαίου κυματισμού με δεδομένη ενεργειακή κατανομή (φάσμα). Το σχετικό πρόγραμμα WGEN που αναπτύχθηκε από τον καθ. Γ.Γρηγορόπουλο (1981), είναι ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Basic 7.0, το οποίο μπορεί να παράγει τρία είδη κυμάτων: ημιτονικούς, τυχαίους κυματισμούς με δεδομένο φάσμα και παροδικά κύματα.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την μαθηματική θεωρία των μετακινούμενων θέσεων μνήμης δυϊκού πεδίου τιμών (binary shift registers) με επανατροφοδότηση, για την *παραγωγή λευκού θορύβου με συγκεκριμένη περίοδο επανάληψης*. Με αυτή την τεχνική παράγεται ο ψευδο-τυχαίος θόρυβος.

Αρχικά, το πρόγραμμα WGEN ζητά από τον χρήστη (εικόνα 4.15):

- Το είδος της κάρτας γραφικών
- Τον τύπο του κύματος (ημιτονικό, τυχαίο ή παροδικό)
- Αν η κυματομορφή θα χρησιμοποιηθεί για οδήγηση του κυματιστήρα ή για ανάλυση των χαρακτηριστικών της στον υπολογιστή (<A> or <U>)
- Αν είναι τρέξιμο βαθμονόμησης του κυματιστήρα
- Το όνομα του αρχείου που αποθηκεύονται τα αποτελέσματα του τρεξίματος
- Τον τύπο φάσματος που θα χρησιμοποιηθεί (στην παρούσα μελέτη: φάσμα Bretschneider)
- Το πλήθος των σημείων που θα περιγράψουν το παραπάνω φάσμα
- Το σημαντικό ύψος κύματος [m]
- Την περίοδο κορυφής κύματος [sec]

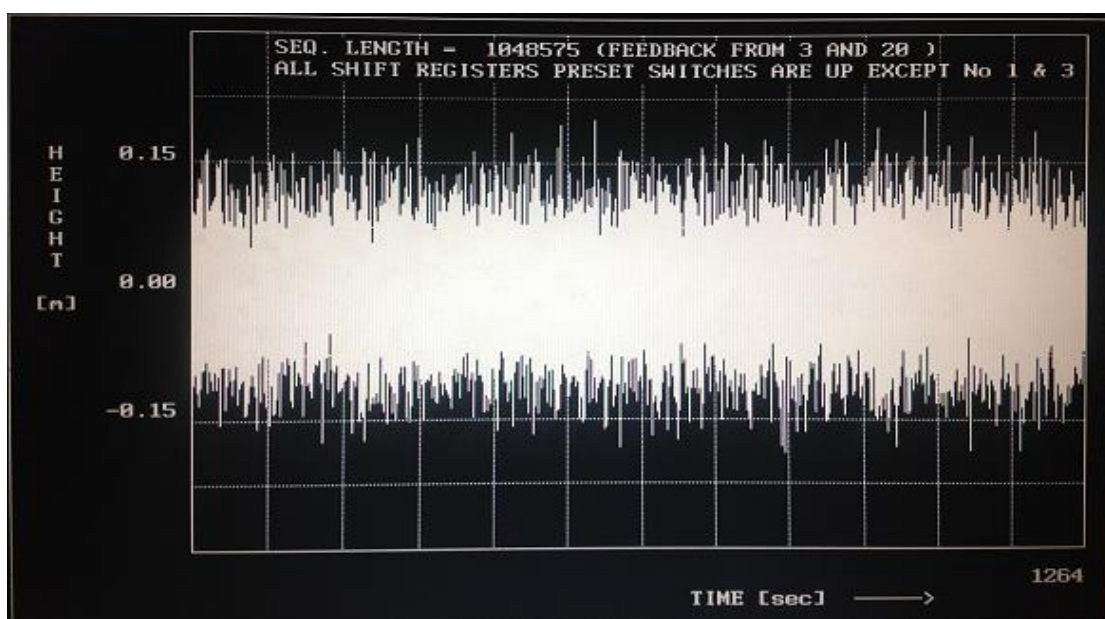
```

G:\ΔΙΠΛΩΜ-1\WG080411.EXE
YOUR GRAPHICS CARD IS <H>ERCULES, <E>GA OR <U>GA ? u
GENERATE <S>INE, <R>ANDOM OR <T>RANSIENT WAVES ? r
GENERATE NEW DATA <Y/N> ? y
ACTUAL <A> OR UNITY <U> TRANSFER FUNCTION USED ? a
IS THIS A CALIBRATION RUN <Y/N> ? n
FILE NAME TO SAVE SESSION < <CR> TO SUPPRESS SAVING> : h10tp3.475
BRETSCHNEIDER<1>, JONSWAP<2>, TOP-HAT<3>, BIMODAL<4> OR OTHER<5> ? 1
No OF SPECTRAL ORDINATES <No <= 128. Default No = 32> ? 128
GIVE H1/3 <H1/3=0 FOR PEAK LENGTH Lp INPUT - F.D.SEAS> : 0.10
GIVE Tp <Tp=0 FOR FULLY DEVELOPED SEAS> : 1.399
PLOT INPUT SPECTRUM <Y/N> ? _

```

Εικόνα 4.15. Οι αρχικές ερωτήσεις του προγράμματος WGEN προς τον χρήστη και τα στοιχεία που δόθηκαν για την δημιουργία του φάσματος H10tp3.475.

Σε αυτό το σημείο, το πρόγραμμα σχεδιάζει το φάσμα εισόδου εφόσον το επιθυμούμε. Με βάση τα στοιχεία του φάσματος που δίνουμε, το πρόγραμμα υπολογίζει την αντίστοιχη παλμική συνάρτηση απόκρισης (impulse response function). Στην συνέχεια, ζητείται από τον χρήστη να προσδιορίσει την χρονική διάρκεια της υπό δημιουργία κυματομορφής και την περίοδο της ψευδο-τυχαίας ακολουθίας αριθμών που παράγεται ψηφιακά με την μέθοδο των shift registers. Η χρονική ιστορία που παράγεται φαίνεται στην εικόνα 4.16:



Εικόνα 4.16. Χρονική ιστορία για το H10tp3.475.

Ακολουθεί η φασματική ανάλυση της παραπάνω χρονικής ιστορίας με μετασχηματισμό Fourier.

Στα αποτελέσματα της ανάλυσης περιλαμβάνονται:

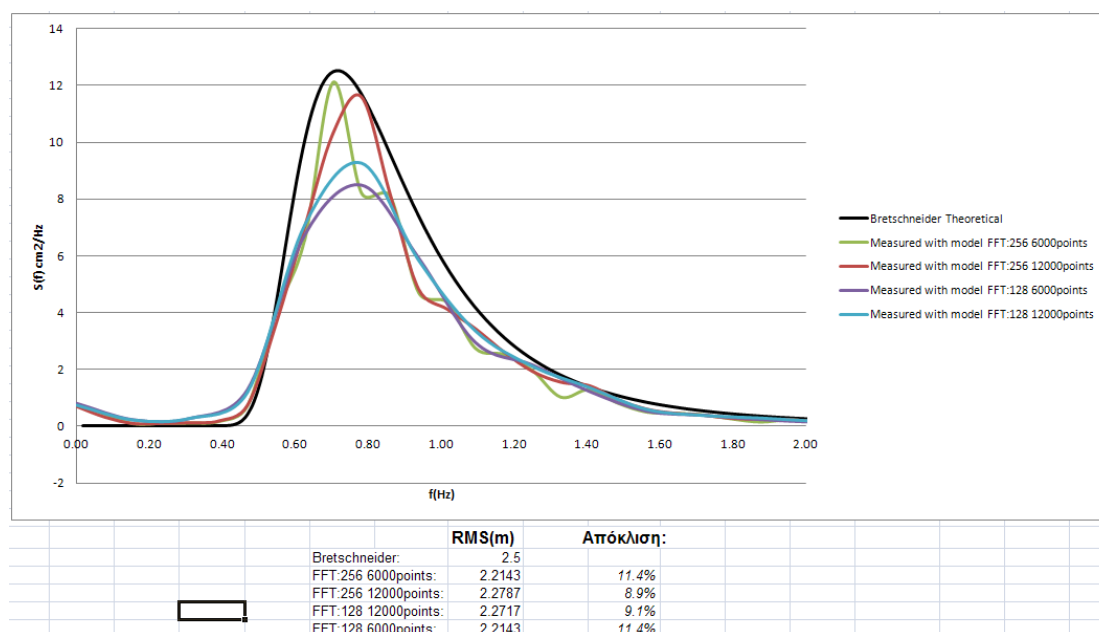
- Οι rms τιμές των επιμέρους τμημάτων της κυματομορφής που αποτελούνται από $2N$ σημεία, όπου N ο αριθμός των φίλτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση της χρονικής ιστορίας.
- Το συνολικό rms της χρονικής ιστορίας
- Το φάσμα της χρονικής ιστορίας όπως αναμένεται στην δεξαμενή.

Στην συνέχεια, αφού έχει επιβεβαιωθεί η ετοιμότητα του κυματιστήρα και έχει γίνει η εγκατάσταση και βαθμονόμηση του αισθητήρα ανύψωσης κύματος, ξεκινά η διαδικασία παραγωγής κυματισμών. Η διαδικασία διήρκησε 600sec για καθένα από τα δεκατέσσερα συνολικά φάσματα, με συχνότητα δειγματοληψίας 20μετρήσεις/sec. Όπως έχει προαναφερθεί, τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταγράφονται ως τάσεις μέσω ειδικού προγράμματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του φορείου. Έτσι, για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητος κάποιος μετασχηματισμός ώστε να δοθούν τα αποτελέσματα από μονάδες μέτρησης Volts στις επιθυμητές μονάδες.

Αυτού του είδους η ανάλυση έγινε με **μετασχηματισμούς Fourier** οι οποίοι γίνονται με τη βοήθεια ειδικού κώδικα γραμμένου σε γλώσσα Fortran που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο. Ο κώδικας αποθηκεύεται σε μορφή αρχείου «.for» και ανοίγει με το πρόγραμμα “Compaq Visual Fortran version 6.5”. Στην συνέχεια, δίνουμε τις συναρτήσεις μεταφοράς για τον αισθητήρα ανύψωσης κύματος, το όνομα του αρχείου που θέλουμε να αναλυθεί και τον αριθμό των σημείων που το πρόγραμμα θα κάνει κάθε φορά μετασχηματισμό Fourier. Το πρόγραμμα δίνει τα τελικά αποτελέσματα σε δύο αρχεία: ένα αρχείο τύπου “.out” που έχει το ζητούμενο μέγεθος σε φάσμα $S(f)$ για

διάφορες συχνότητες f , ενώ το δεύτερο αρχείο είναι της μορφής “.rms” και δίνει την μέση τετραγωνική τιμή (root mean square) της απόκρισης.

Ύστερα, κάναμε ανάλυση των αποτελεσμάτων με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους-μετασχηματισμός Fourier με 128 και 256 σημεία, για όλα τα σημεία της δειγματοληψίας ($= 600 \cdot 20 = 12000$ σημεία) και ανά δύο ($= 6000$ σημεία). Σε αυτό το σημείο, μετρώντας την απόκλιση των rms τιμών, είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε το συντελεστή κλίμακας (Scale Factor) με τον οποίον θα παραχθούν τα φάσματα στον κυματιστήρα κατά την εκτέλεση του πειράματος (σχήμα 4.17).



Σχήμα 4.17. Προσδιορισμός Scale Factor για το φάσμα $h10tp3.475$.

4.2.4. Διεξαγωγή πειράματος

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης του Wave Probe Tank, αν κριθεί αναγκαίο κάνουμε βαθμονόμηση Heave και Pitch πριν την πρόσδεση του δυναμόμετρου με το μοντέλο, ελέγχουμε το μοντέλο για τυχόν ατέλειες (ρωγμές, αποκόλληση πλαστικών ζελατίνων) και ύστερα το

προσδένουμε στο φορείο μέσω του δυναμόμετρου όπως φαίνεται στην εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.9. Το μοντέλο συνδεδεμένο με το δυναμόμετρο.

Στην συνέχεια, αφού γίνει η βαθμονόμηση της αντίστασης, σχεδιάζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς με τη βοήθεια του Microsoft Excel. Το σύνολο των βαθμονομήσεων είναι καταγεγραμμένο σε ειδικά φύλλα Βαθμονομήσεων.

Αφού ολοκληρώνονταν οι παραπάνω διαδικασίες, ενεργοποιούνταν ο κυματιστήρας, ενώ με το πρόγραμμα WGEN καλούσαμε το κύμα που μας ενδιαφέρει (Πίνακες 4.13- 4.14). Ύστερα, εισαγάγαμε το συντελεστή κλίμακας (Scale Factor) για κάθε περίπτωση (εδάφιο 4.4) και ο κυματιστήρας άρχισε να παράγει τα κύματα. Όταν τα κύματα έφταναν στο άλλο άκρο της δεξαμενής όπου βρισκόταν το φορείο με το μοντέλο, ξεκινούσαμε το φορείο έχοντας δώσει στο κατάλληλο πρόγραμμα την επιθυμητή ταχύτητα. Μόλις το φορείο έφτανε στην επιθυμητή ταχύτητα, ξεκινούσαμε το πρόγραμμα που λάμβανε όλες τις μετρήσεις των οργάνων. Όταν το φορείο διέσχισε όλη τη δεξαμενή, τότε ολοκληρώνονταν και το πείραμα.

Για λόγους αξιοπιστίας των πειραματικών αποτελεσμάτων και συμμόρφωσης με διεθνείς κανονισμούς διεξαγωγής πειραμάτων (ITTC), η

δειγματοληψία πρέπει να είναι της τάξης των 300sec. Έτσι, στην μικρή ταχύτητα ($F_n = 0.34$):

- Για το μοντέλο NTUA-146/98, έγιναν 11 τρεξίματα (runs) του μοντέλου μέσα στην δεξαμενή, διάρκειας 30sec το καθένα, με συχνότητα δειγματοληψίας 20Hz.
- Για το μοντέλο NTUA-154/99, έγιναν 10 τρεξίματα, διάρκειας 35sec το καθένα, με συχνότητα δειγματοληψίας 20Hz.

Στην μεγάλη ταχύτητα ($F_n = 0.68$), το σκάφος διανύει το ίδιο διάστημα σε μικρότερο χρόνο, οπότε η διάρκεια της μέτρησης είναι μικρότερη απ'ότι στην μικρή ταχύτητα. Για το μοντέλο NTUA-154/99, έγινε μια προσπάθεια να αυξήσουμε το διάστημα που διανύει στην δεξαμενή μετακινώντας το φορείο κατά 1 με 1.5 μέτρο πιο πίσω, κάτι που απαιτούσε αυξημένη επαγρύπνηση για την αποτροπή τυχόν ατυχημάτων (π.χ ανεβάζαμε εγκαίρως τον αποσβεστήρα). Έτσι, είχαμε:

- Για το μοντέλο NTUA-146/98, έγιναν 22 τρεξίματα, διάρκειας 14sec το καθένα, με συχνότητα δειγματοληψίας 20Hz.
- Για το μοντέλο NTUA-154/99, έγιναν 19 τρεξίματα, διάρκειας 16sec το καθένα, με συχνότητα δειγματοληψίας 20Hz.

Μετά από κάθε πείραμα ήταν αναγκαία η αναμονή περίπου 20 λεπτών μέχρι να ξεκινήσει το επόμενο πείραμα ώστε να έχει ηρεμήσει το νερό της δεξαμενής από τους προηγούμενους κυματισμούς, ώστε σε κάθε επανάληψη του πειράματος ο κυματιστήρας να δημιουργεί κύμα από ηρεμία. Όλα τα πειράματα καθώς και οι λεπτομέρειες αυτών καταγράφονταν καθημερινά στο ειδικό φύλλο Πειραμάτων Δυναμικής Συμπεριφοράς σε Κυματισμούς.

Μετά το τελευταίο τρέξιμο (run), βγάζουμε το μοντέλο από την δεξαμενή, ώστε να αποστραγγιστεί, αποσυνδέουμε τον αισθητήρα Wave Tank Probe, τερματίζουμε την λειτουργία του κυματιστήρα και παίρνουμε τα πειραματικά αρχεία από τον υπολογιστή της δεξαμενής.

Στο πίνακες 4.10 και 4.11, φαίνονται συγκεντρωτικά τα πειραματικά χαρακτηριστικά των μοντέλων.

Πίνακας 4.10. Πειραματικά χαρακτηριστικά για το μοντέλο NTUA-146/98 ($L/B = 6.25$).

Αριθμός F_n	Ταχύτητα V_m (m/s)	Χρόνος μέτρησης τρεξίματος (run)	Αριθμός runs για κάθε κατάσταση	Συνολικός χρόνος πειραμάτων
0.34	1.671	30 sec	11	330 sec
0.68	3.342	14 sec	22	308 sec

Πίνακας 4.11. Πειραματικά χαρακτηριστικά για το μοντέλο NTUA-154/99 ($L/B = 4.75$).

Αριθμός F_n	Ταχύτητα V_m (m/s)	Χρόνος μέτρησης τρεξίματος (run)	Αριθμός runs για κάθε κατάσταση	Συνολικός χρόνος πειραμάτων
0.34	1.556	35 sec	10	350 sec
0.68	3.112	16 sec	19	304 sec

Όπως έχει προαναφερθεί στο εδάφιο 4.4, τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταγράφονται ως τάσεις μέσω ειδικού προγράμματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του φορείου. Έτσι, για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητος κάποιος μετασχηματισμός ώστε να δοθούν τα αποτελέσματα από μονάδες μέτρησης Volts στις επιθυμητές μονάδες. Η ανάλυση έγινε με μετασχηματισμούς Fourier οι οποίοι γίνονται με τη βοήθεια ειδικού κώδικα γραμμένου σε γλώσσα Fortran που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο. Ο κώδικας αποθηκεύεται σε μορφή αρχείου “.for” και ανοίγει με το πρόγραμμα “Compaq Visual Fortran version 6.5” . Στην εικόνα 4.10, φαίνονται τα στοιχεία που εισάγουμε στο κώδικα.

```

PARAMETER (N1=512, N2=256, N3=100001, NCOL=7)
IMPLICIT REAL (C)
CHARACTER TITLE*80, FNAME*4, ASK*1, sk4*4, sk3*3, sk2*2, sk1*1, ss(10)*1
REAL K, K1, K2, K3
COMMON /SHORT/ K(N1,2), K1(N3), K2(N1), SCOS(N2), SSIN(N2)
DIMENSION F1(N1), K3(N3, NCOL), aa(NCOL), bb(NCOL), rms(NCOL)
DIMENSION cc(NCOL), dd(NCOL)

data ss/'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9'/
C data vgen, Acc#1, Acc#2, Acc#3, Res, Heave, Pitch, ActSp, wcar 56
data aa/3, 6549, 1, 97407, 2, 00165, 2, 02382, 2, 7013, -4, 5794, -2, 3000/
C -2, 28622, 0/
data bb/-1, 0580, -5, 01810, -5, 04335, -5, 10773, -0, 0438, 25, 4630, 2, 7350/
C 2, 18448, 0/

C
C No of Resistance Column
ires=5
L=1
NA=1
Scale=1.00
Clock=20
PI=3.14159265
RAD=180.0/PI
C aa(4)=aa(4)*RAD
C aa(5)=aa(5)*RAD
C aa(6)=aa(6)*RAD
C ISTART=1
C IEND=1

ASK='N'
WRITE(*, '(A\)' ) ' Perform Inverse FFT (Y/N) ? '
C READ(*, '(A\)' ) ASK
IF (ASK.EQ. 'Y'.OR. ASK.EQ. 'y') L=0

IF (L.GT. 0) THEN
WRITE (*, '(A\)' ) ' FILE NAME ? '
C READ (*, '(A\)' ) FNAME
FNAME='DAT_'
OPEN(3, FILE=FNAME//'.out', STATUS='UNKNOWN')
OPEN(4, FILE=FNAME//'.rms', STATUS='UNKNOWN')
WRITE (*, '(A\)' ) ' STARTING FILE No ? '
C READ (*, *) ISTART
WRITE (*, '(A\)' ) ' ENDING FILE No ? '
C READ (*, *) IEND
C IEND=ISTART
WRITE (*, '(A\)' ) ' No OF POINTS PER RUN ? '
C READ (*, *) IRUN

```

Εικόνα 4.10. Εισάγονται οι συντελεστές των συναρτήσεων μεταφοράς (*data aa*, *data bb*), η κωδικοποίηση του αρχείου που αναλύουμε (*FNAME = DAT_*), τον αριθμό του αρχικού και τελικού αρχείου (*ISTART*, *IEND*) και το πλήθος των σημείων (*IRUN*). Παρακάτω (δεν διακρίνεται), ζητείται από τον χρήστη ο αριθμός των σημείων που θα κάνει το πρόγραμμα κάθε φορά μετασχηματισμό Fourier.

Για το μοντέλο NTUA-146/98 στην μικρή ταχύτητα είναι $IRUN = 30\text{sec/run} * 20\text{Hz} = 600\text{σημεία}$ και στην μεγάλη ταχύτητα $14\text{sec/run} * 20\text{Hz} = 280\text{σημεία}$. Για το μοντέλο NTUA-154/99 στην μικρή ταχύτητα είναι $35\text{sec/run} * 20\text{Hz} = 700\text{σημεία}$, ενώ στην μεγάλη ταχύτητα είναι $16\text{sec/run} * 20\text{Hz} = 320\text{σημεία}$.

Το πρόγραμμα δίνει τα τελικά αποτελέσματα σε δύο αρχεία:

- ένα αρχείο τύπου **“.out”** που έχει τα ζητούμενα μεγέθη σε φάσμα $S(f)$ για διάφορες συχνότητες f ,
- και ένα αρχείο της μορφής **“.rms”** δίνει την μέση τετραγωνική τιμή (root mean square) των αποκρίσεων.

Αφού συγκεντρωθούν τα αρχεία **“.out”** και **“.rms”**, ακολουθούν το σύνολο των αποτελεσμάτων σε τυχαίους κυματισμούς.

5.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

ΣΕ ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

5.1 Διαγράμματα φασμάτων κυματισμού - αποκρίσεων

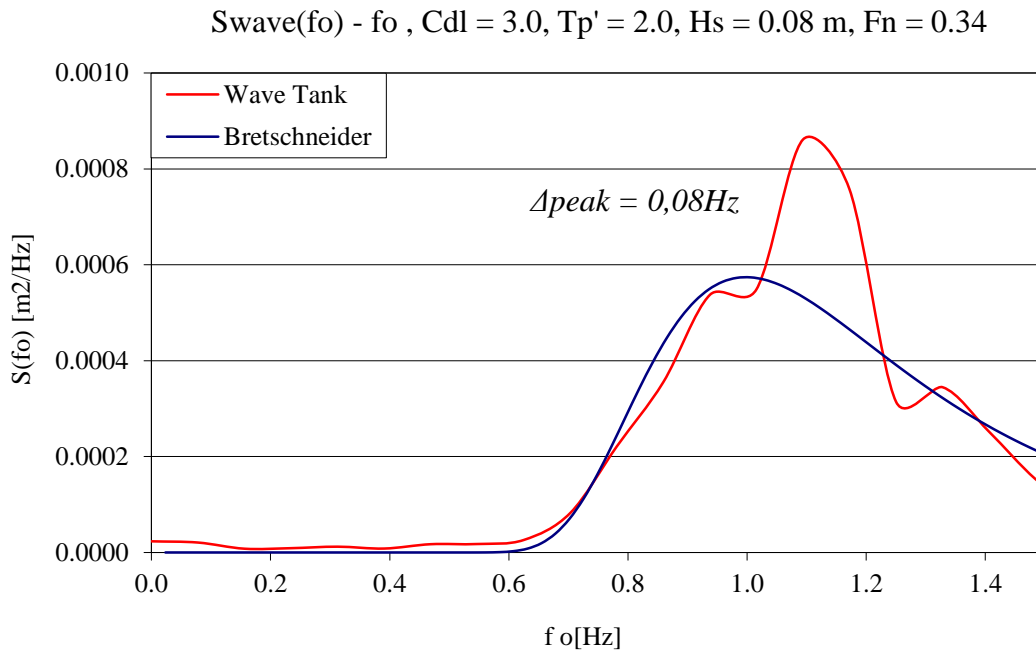
Στο παρόν εδάφιο της διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται τα διαγράμματα των χρονικών ιστοριών όλων των πειραματικών καταστάσεων, στο πεδίο των συχνοτήτων. Πρόκειται, όπως προαναφέρθηκε, για 14 καταστάσεις για κάθε μοντέλο (7 στην μικρή ταχύτητα και 7 στην μεγάλη ταχύτητα). Ειδικότερα, τα διαγράμματα είναι:

- *Φάσμα κύματος $S(f)$ σε μέτρα στο τετράγωνο ανά Hertz (m^2/Hz) συναρτήσει της συχνότητας f σε Hertz σε ακίνητο σύστημα αναφοράς:*
 - 1) μετρημένο από τον ακίνητο αισθητήρα probe που ήταν τοποθετημένος μέσα στη δεξαμενή κοντά στον κυματιστήρα (Wave Tank)
 - 2) το θεωρητικό φάσμα που είχε ζητηθεί να παραχθεί από τον κυματιστήρα σύμφωνα με την εξίσωση του Bretschneider
- *Φάσμα Κατακόρυφης κίνησης (heave) $S(f)$ σε εκατοστά στο τετράγωνο ανά Hertz (cm^2/Hz) συναρτήσει της συχνότητας f σε Hertz*
- *Φάσμα Προνευτασμού (pitch) $S(f)$ σε μοίρες στο τετράγωνο ανά Hertz (deg^2/Hz) συναρτήσει της συχνότητας f σε Hertz*
- *Φάσματα Κατακόρυφων επιταχύνσεων $S(f)$ σε επιτάχυνση βαρύτητας στο τετράγωνο ανά Hertz (g^2/Hz) συναρτήσει της συχνότητας f σε Hertz στις τρεις θέσεις:*
 - 1) πλώραθεν
 - 2) στη διαμήκη θέση κέντρου βάρους και
 - 3) πρύμνηθεν

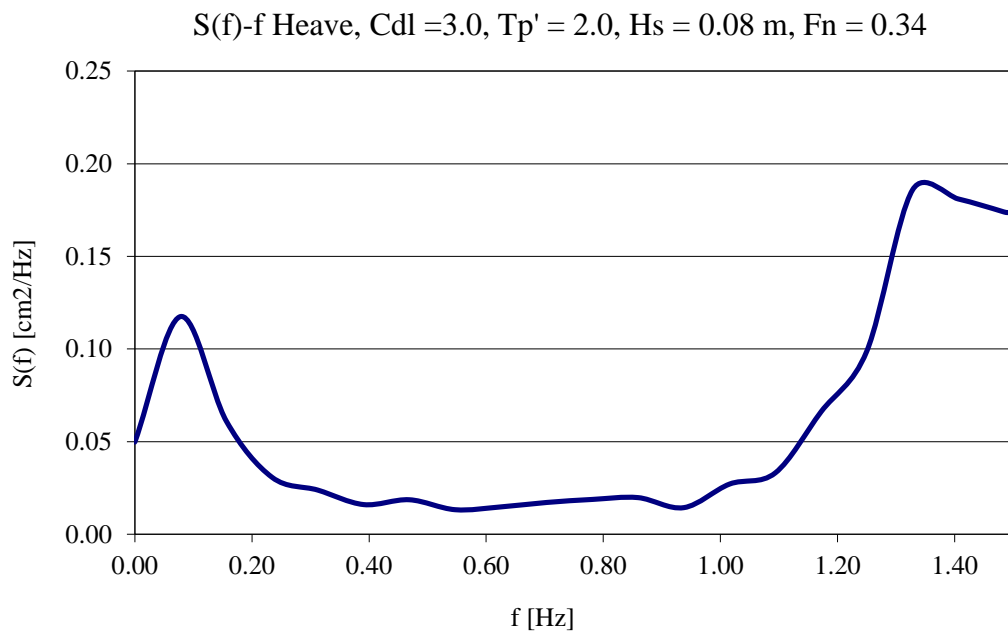
✓ Για το μοντέλο NTUA-146/98 ($L/B = 6.25$), έχουμε:

Για την μικρή ταχύτητα, $Fn = 0.34$:

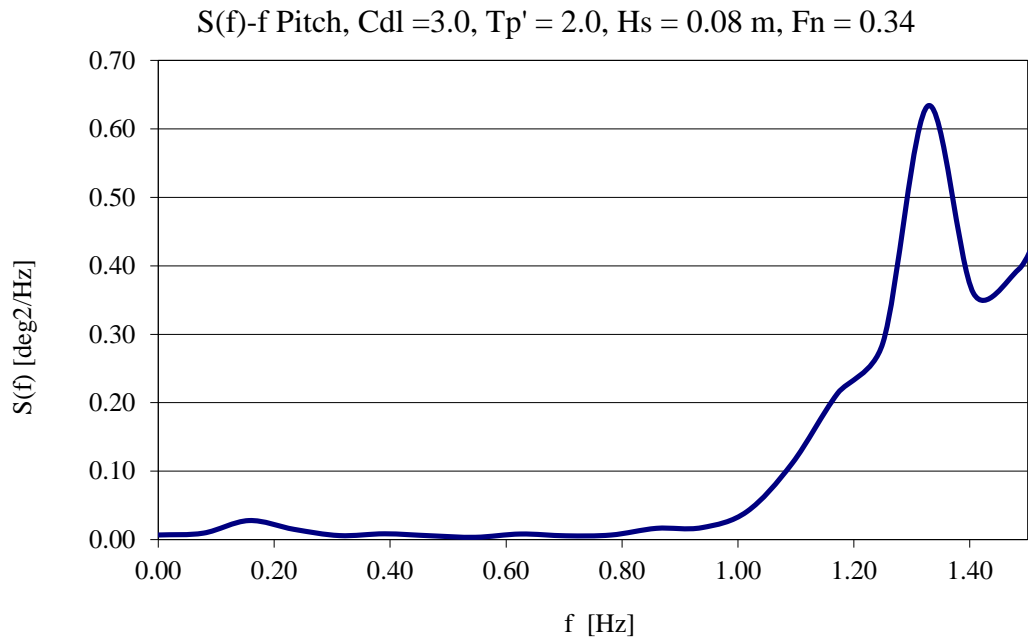
- Κύμα H8tp2.b



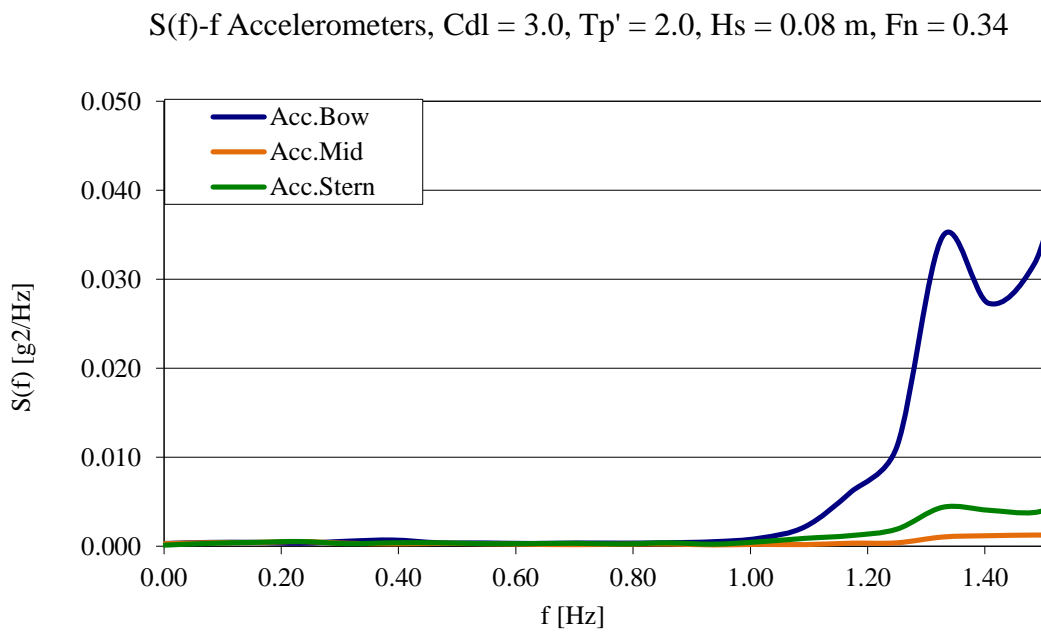
Σχήμα 5.1. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.2. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

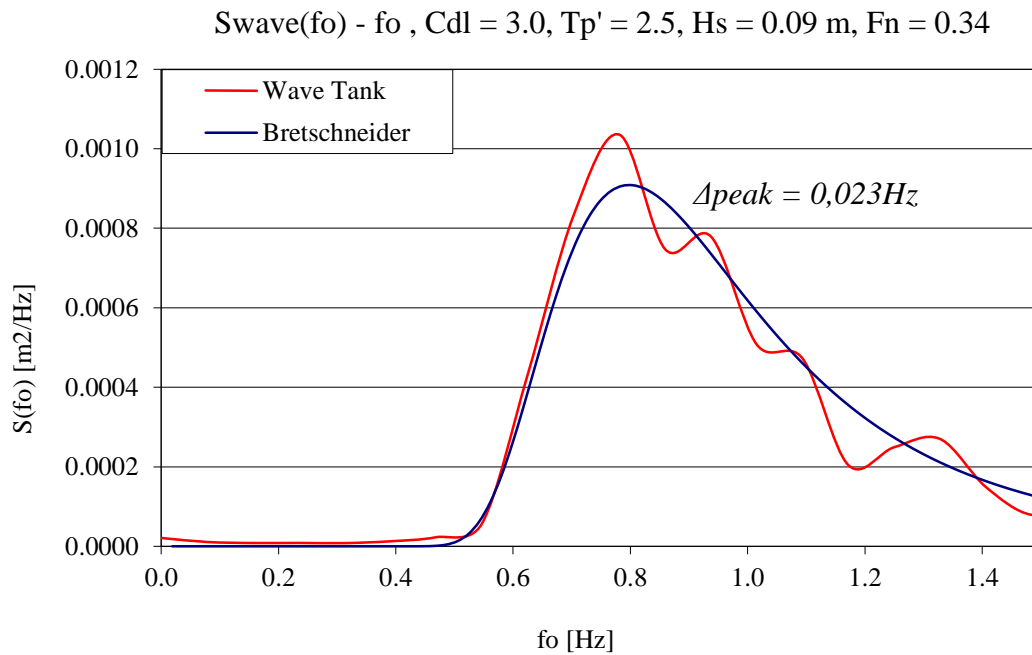


Σχήμα 5.3. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

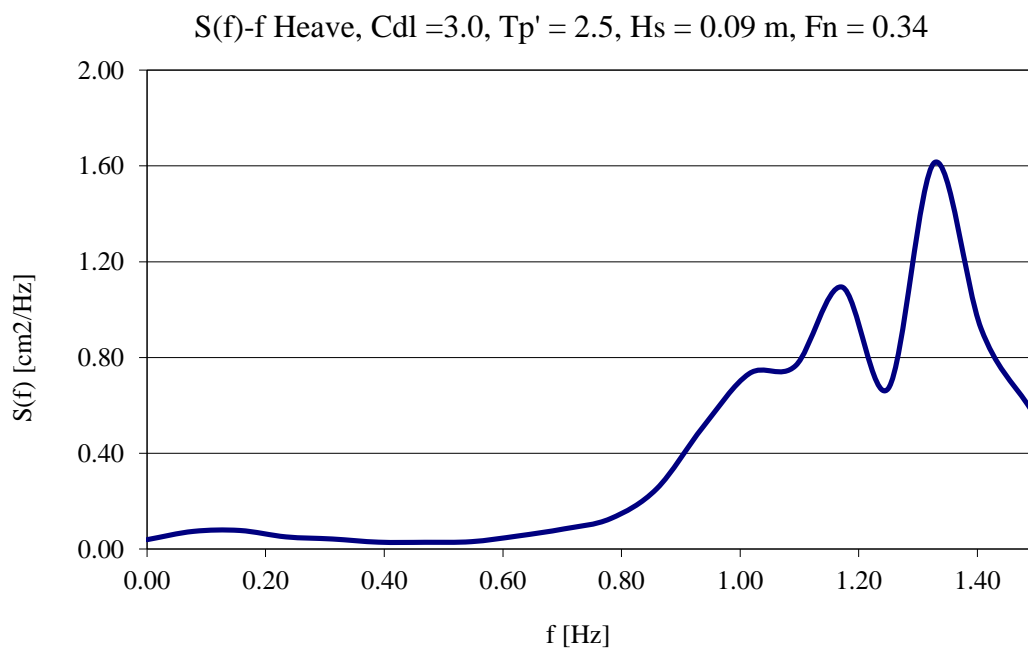


Σχήμα 5.4. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

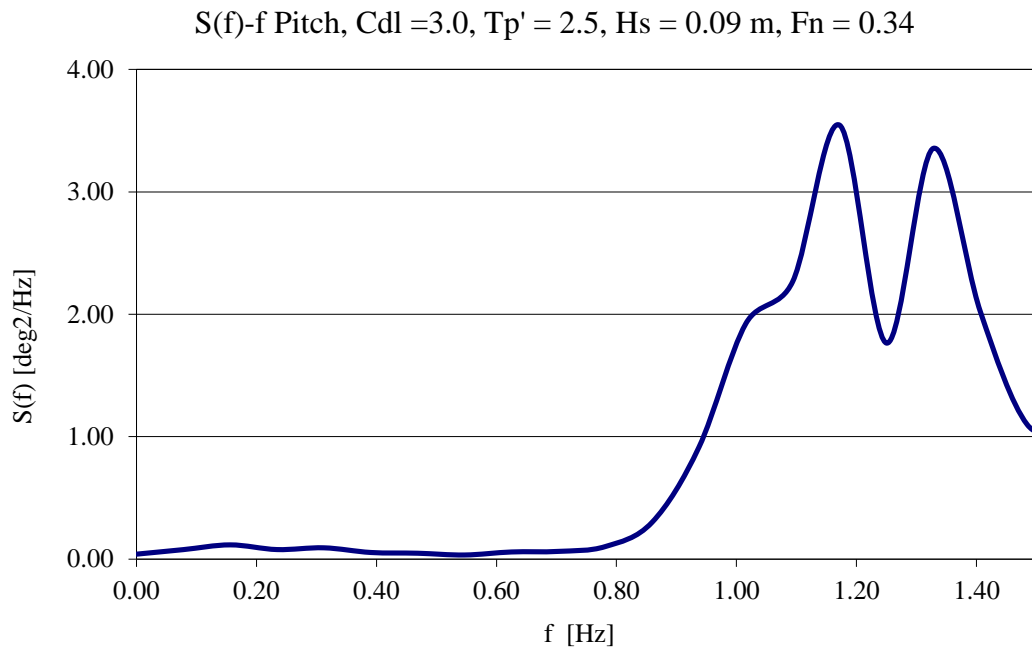
- Κύμα H9Tp2.625



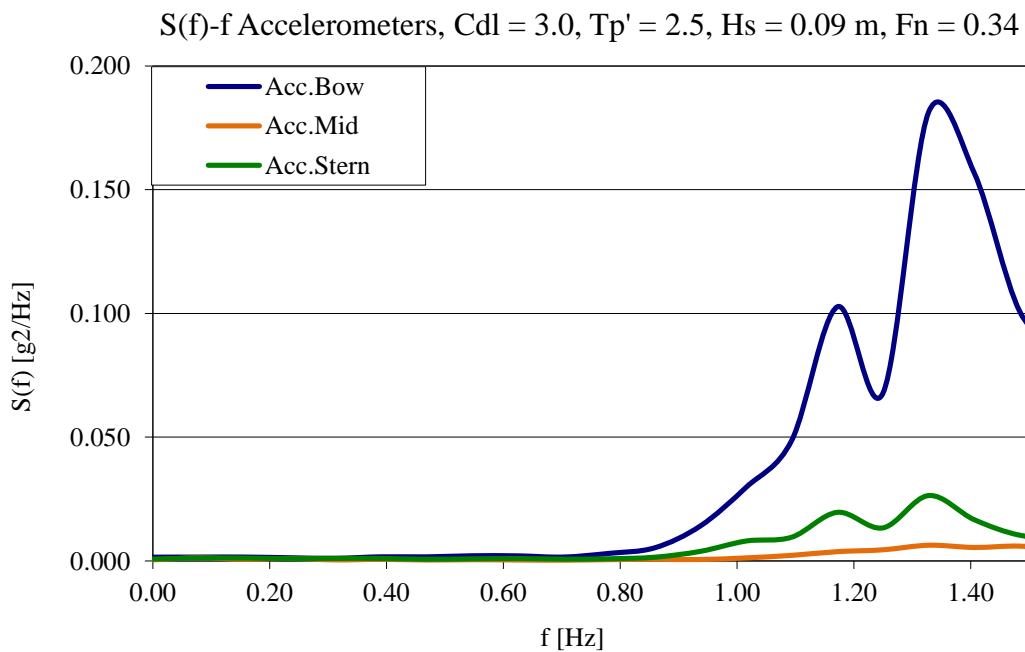
Σχήμα 5.5. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.6. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

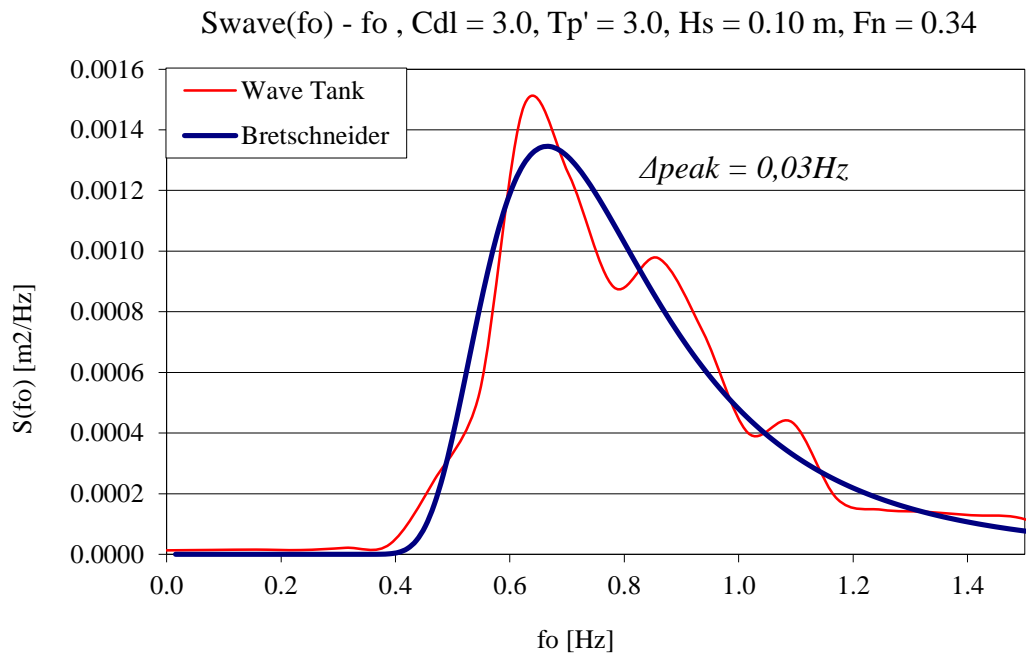


Σχήμα 5.7. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

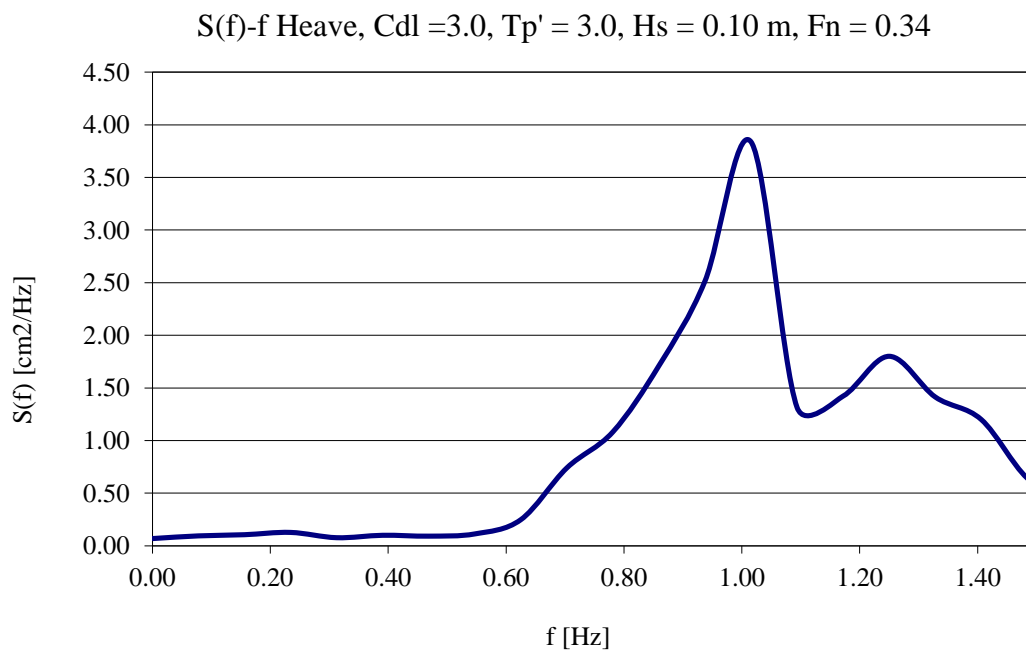


Σχήμα 5.8. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

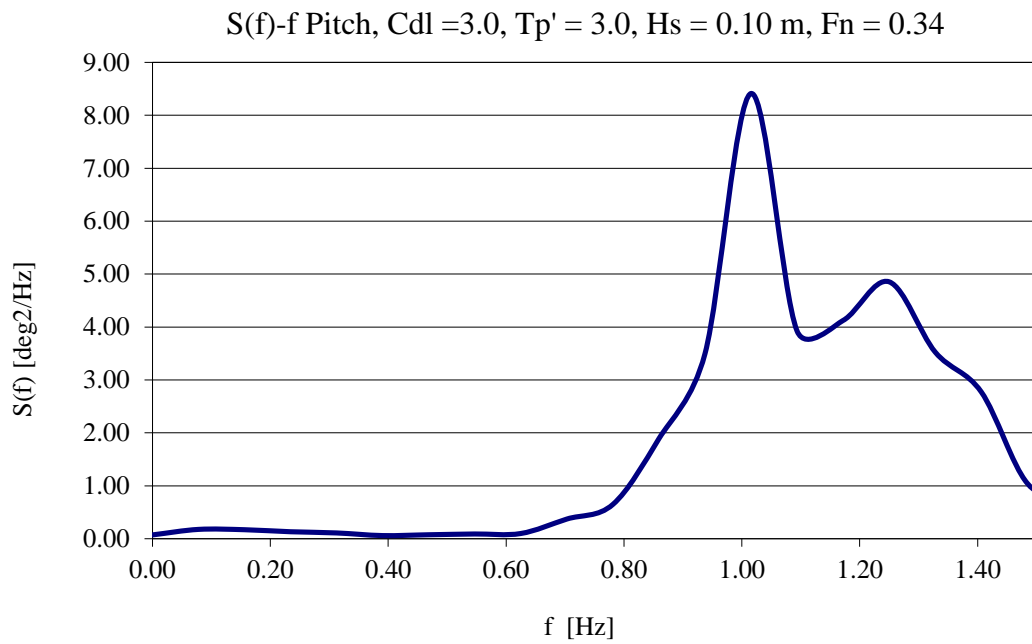
- Κύμα H10tp3.625



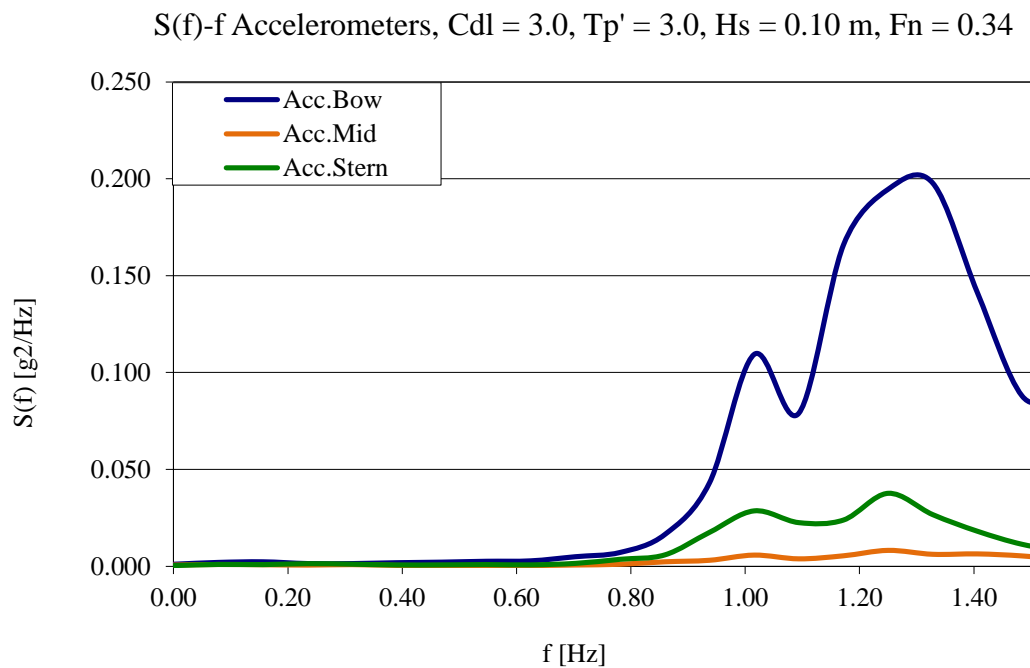
Σχήμα 5.9. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.10. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



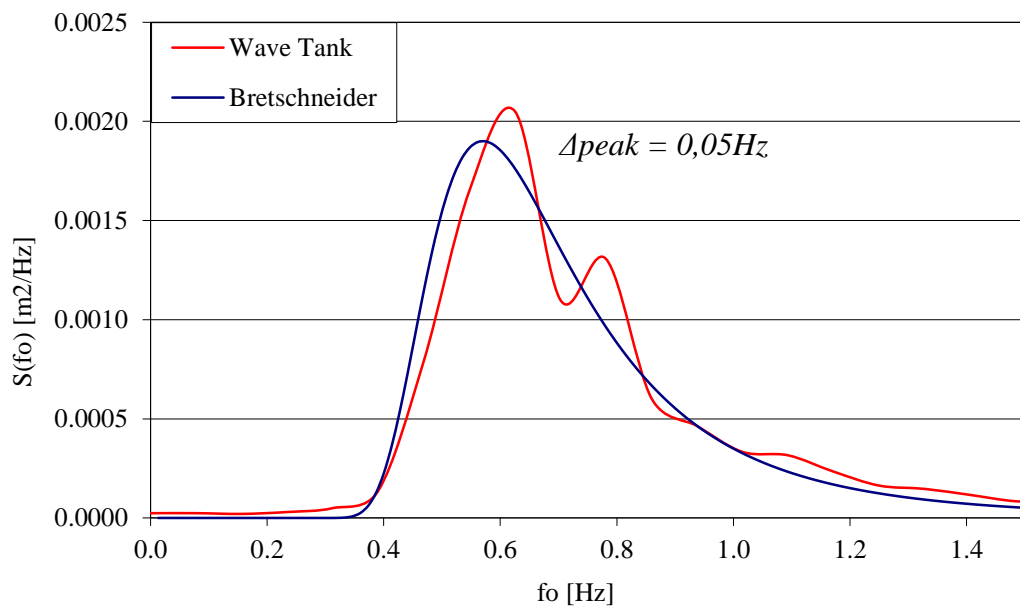
Σχήμα 5.11. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



Σχήμα 5.12. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

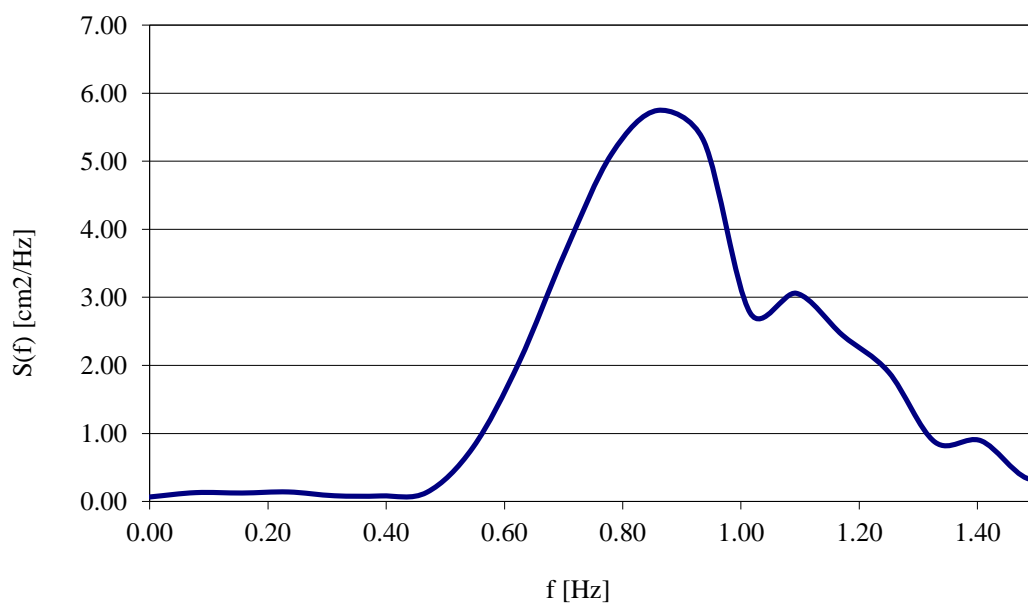
- Κύμα H11tp35.625

$S_{wave}(f_0) - f_0$, $C_{dl} = 3.0$, $T_{p'} = 3.5$, $H_s = 0.11$ m, $F_n = 0.34$

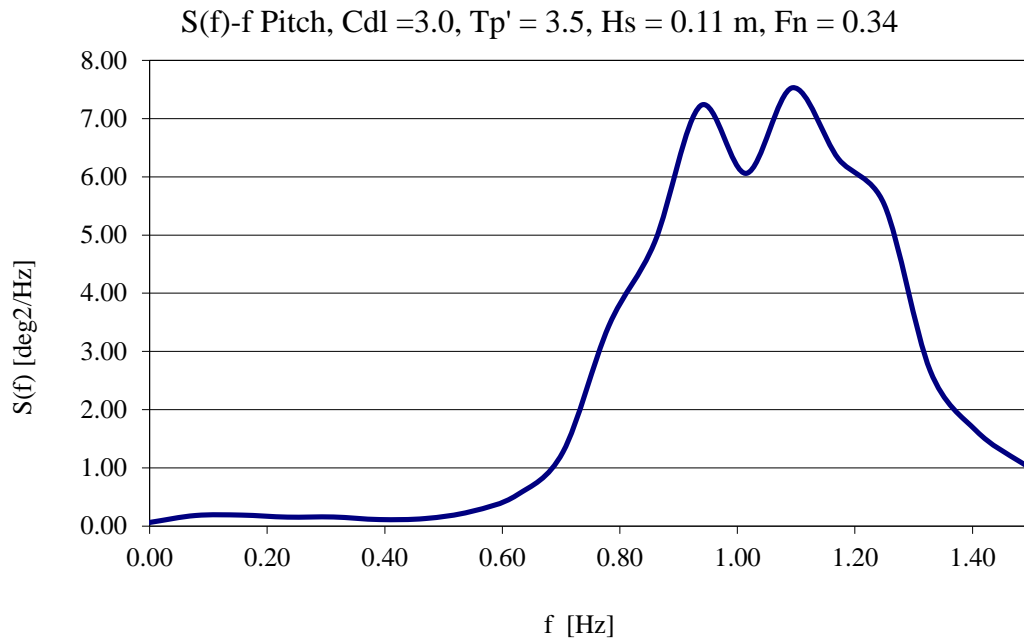


Σχήμα 5.13. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος

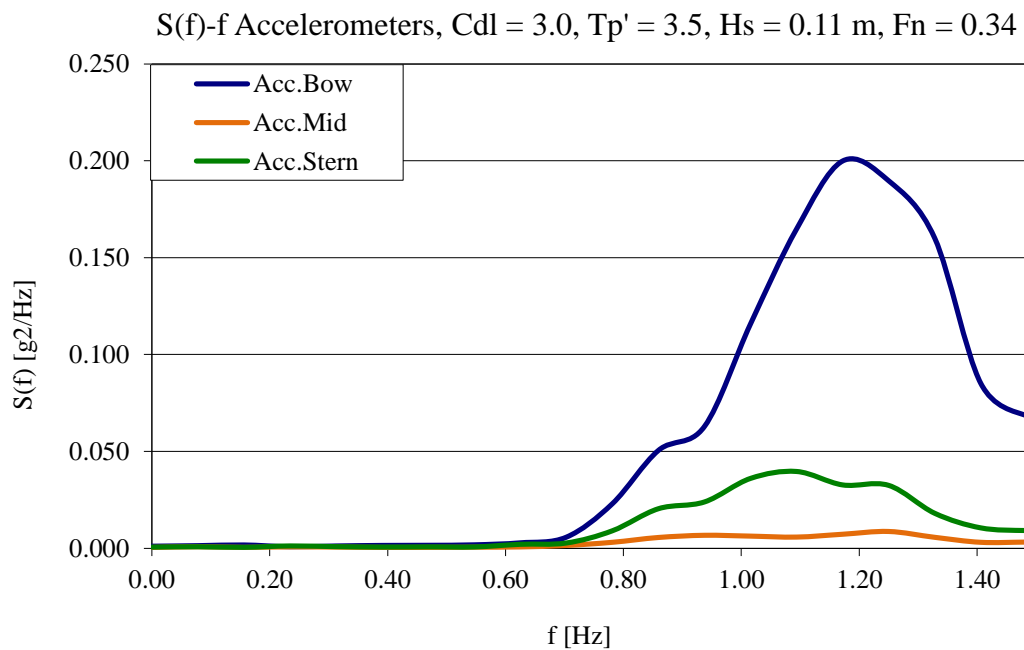
$S(f)-f$ Heave, $C_{dl} = 3.0$, $T_{p'} = 3.5$, $H_s = 0.11$ m, $F_n = 0.34$



Σχήμα 5.14. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



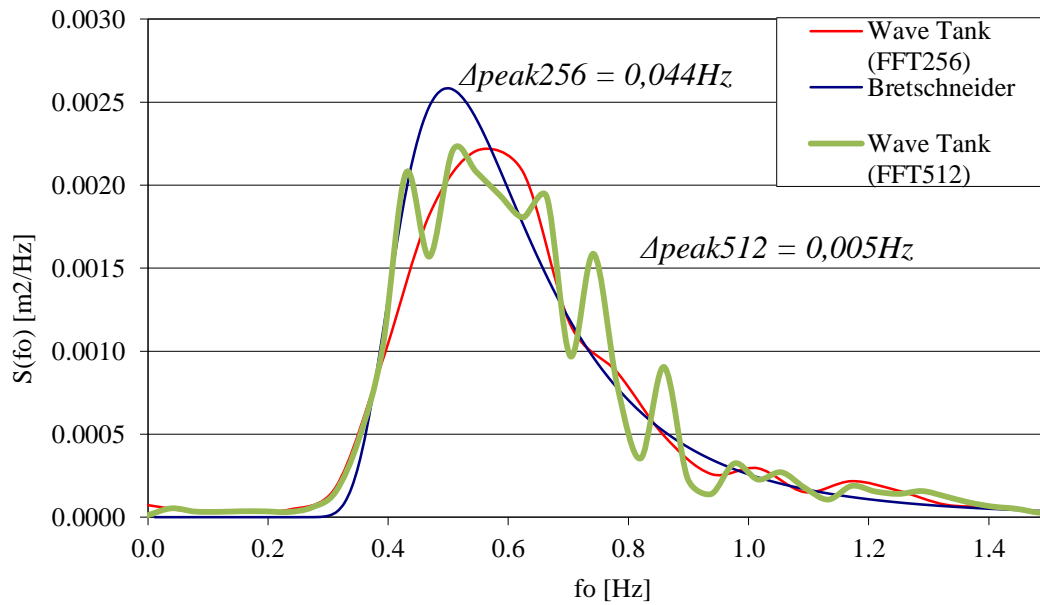
Σχήμα 5.15. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



Σχήμα 5.16. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

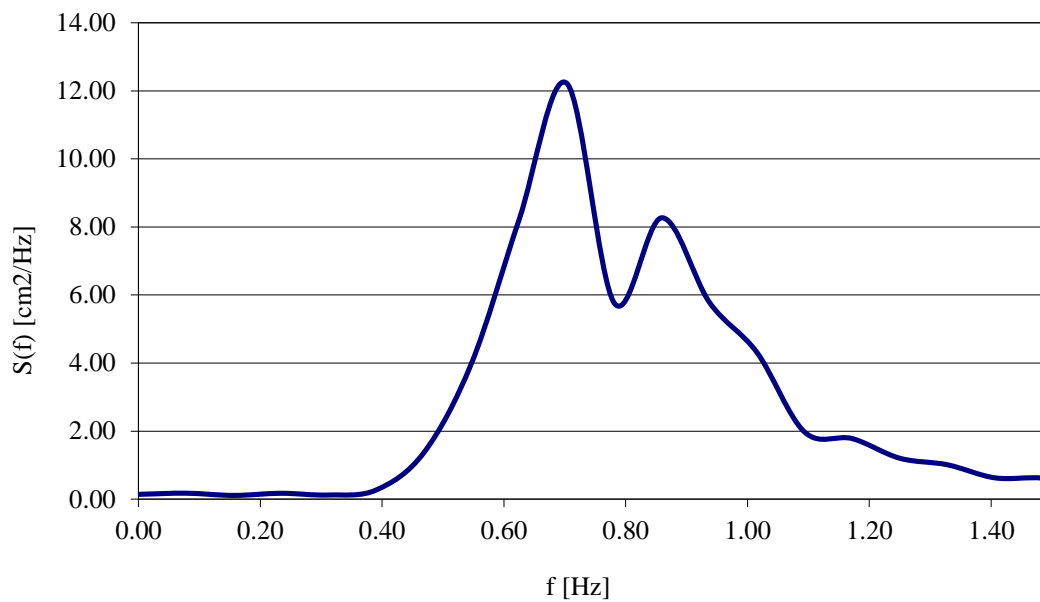
- Κύμα H12tp4.625

$S_{wave}(fo) - fo$, $C_{dl} = 3.0$, $T_{p'} = 4.0$, $H_s = 0.12$ m, $F_n = 0.34$

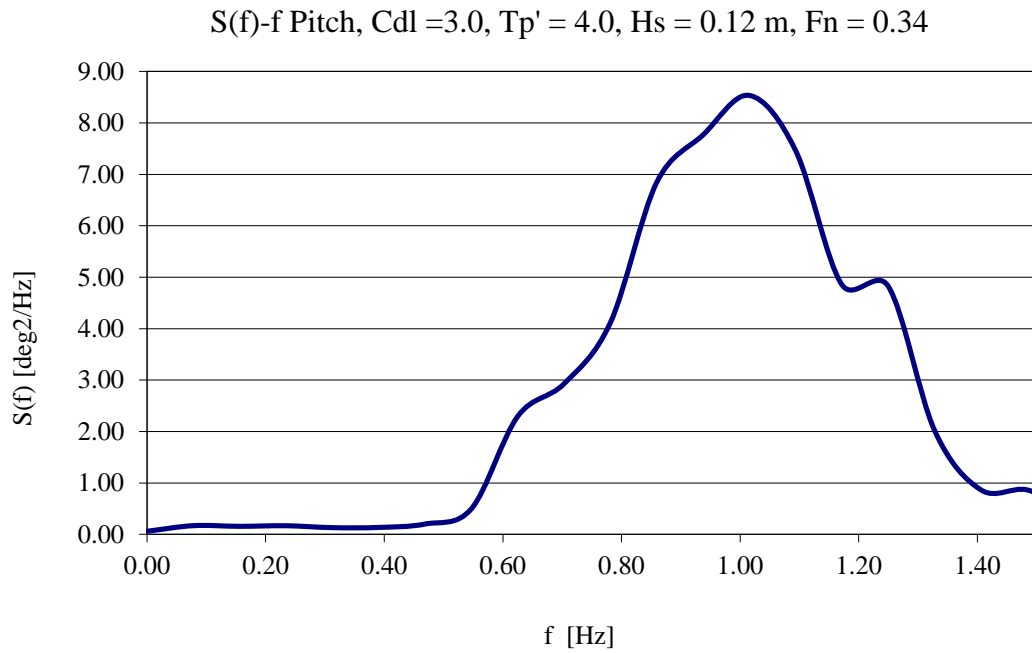


Σχήμα 5.17. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος

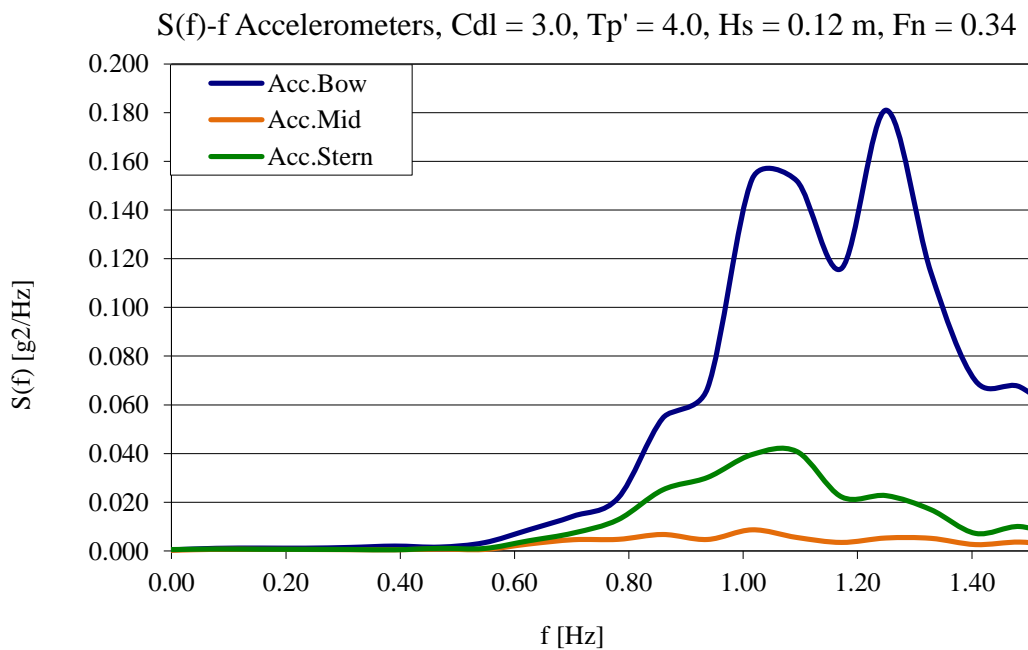
$S(f)-f$ Heave, $C_{dl} = 3.0$, $T_{p'} = 4.0$, $H_s = 0.12$ m, $F_n = 0.34$



Σχήμα 5.18. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

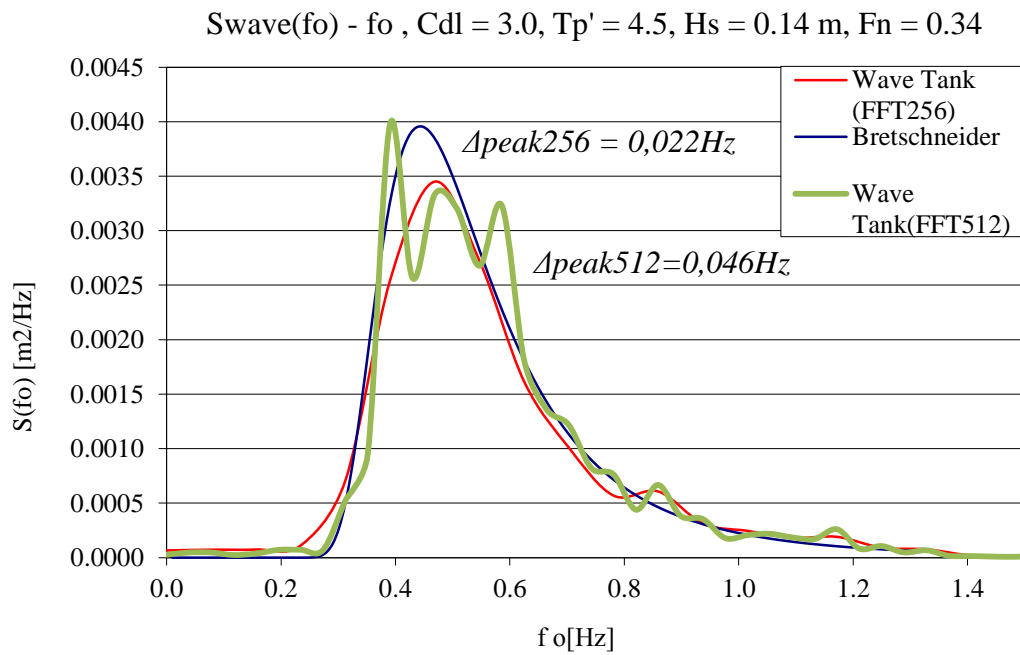


Σχήμα 5.19. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

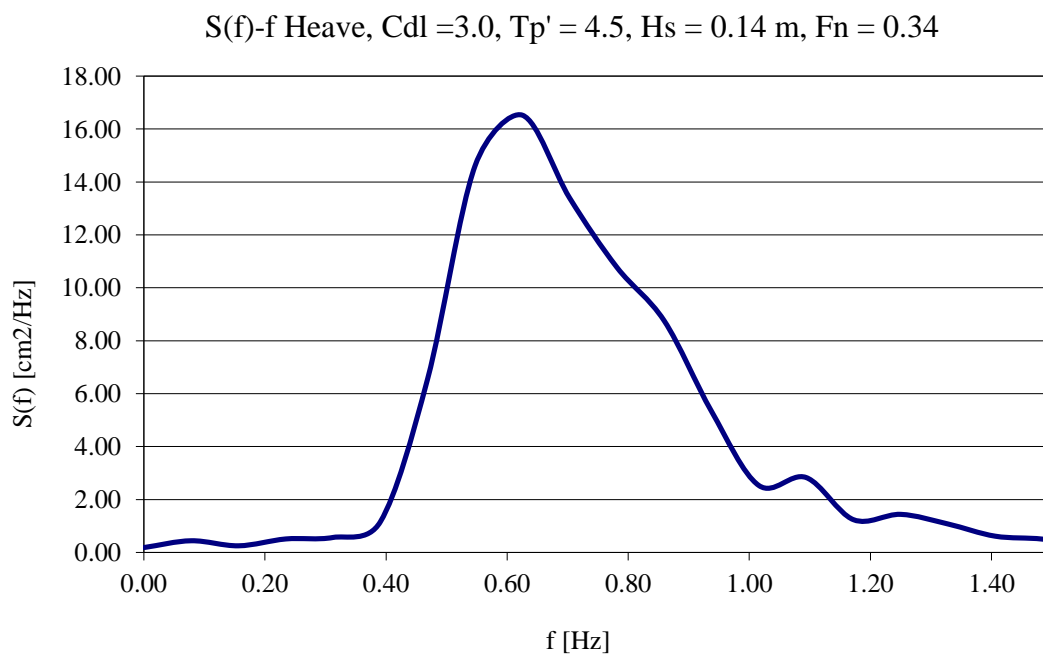


Σχήμα 5.20. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

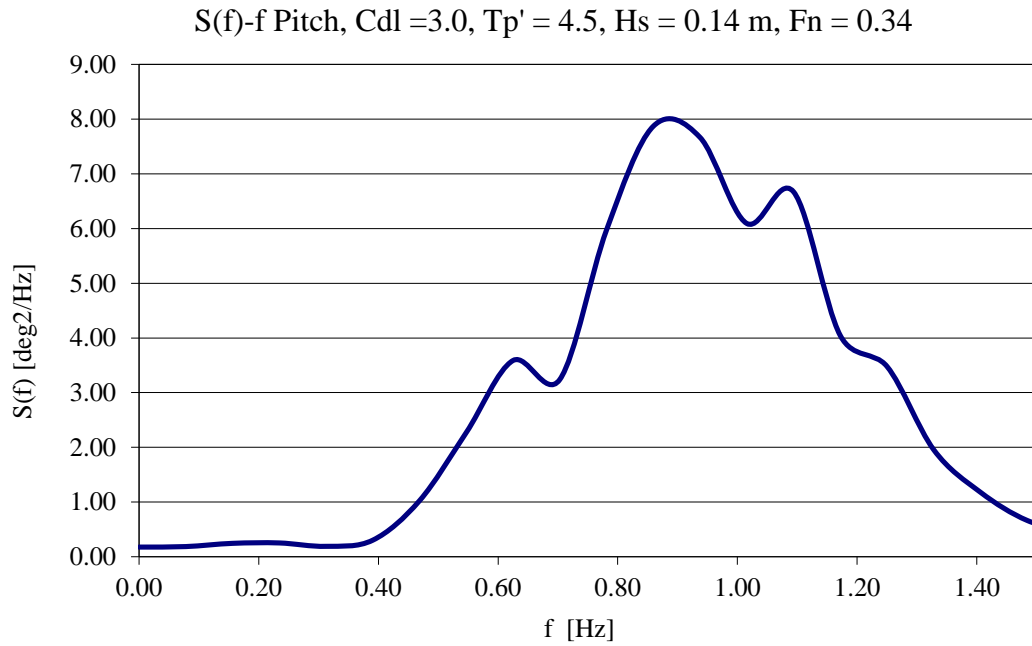
- Κύμα H14tp45.625



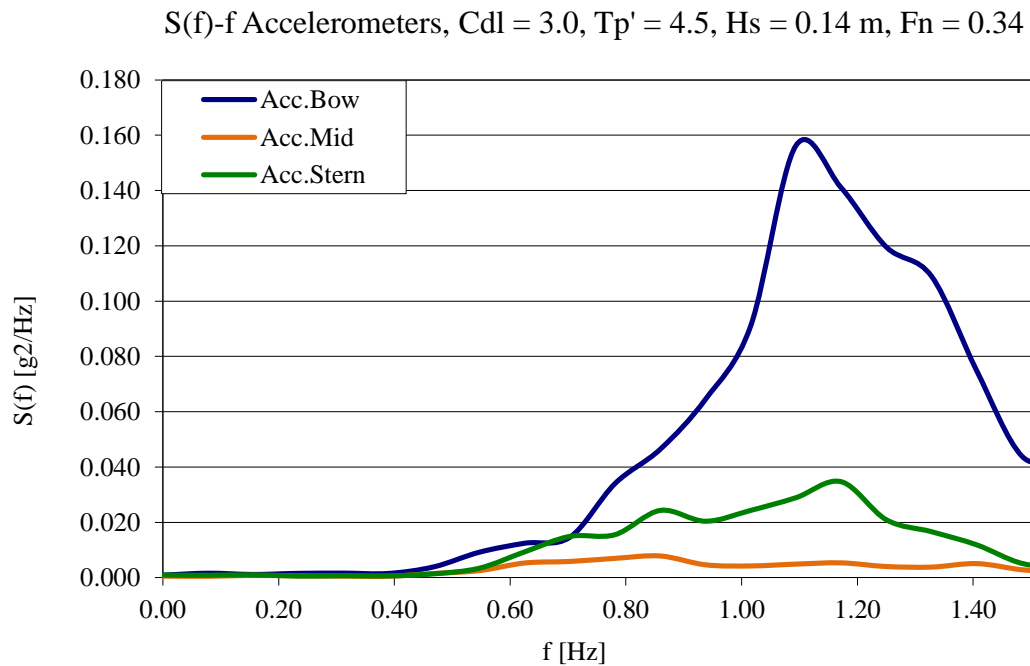
Σχήμα 5.21. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.22. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

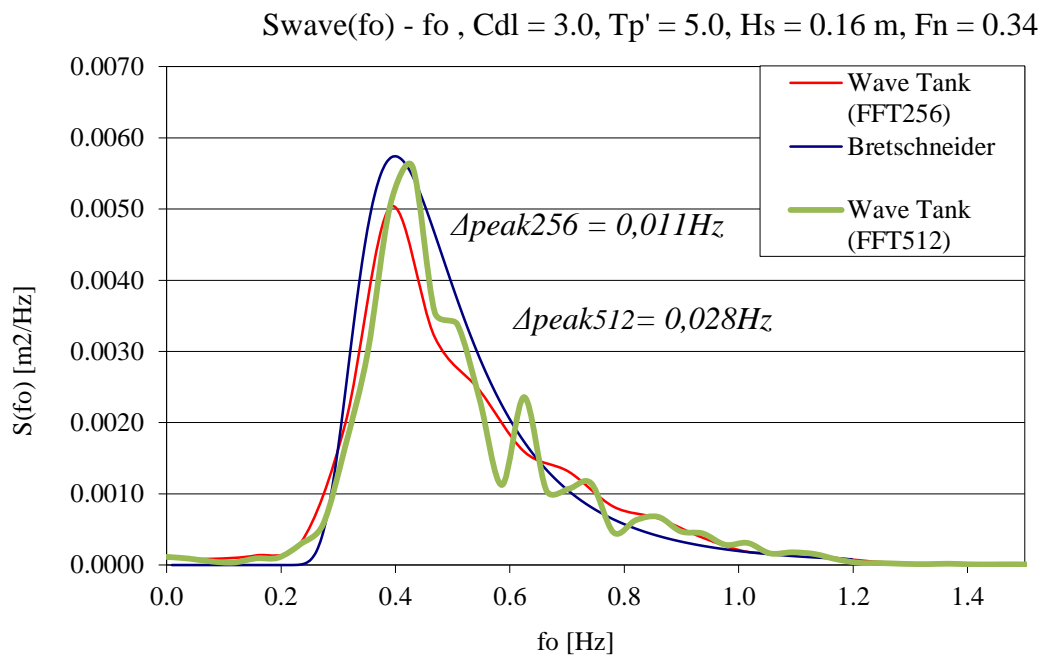


Σχήμα 5.23. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

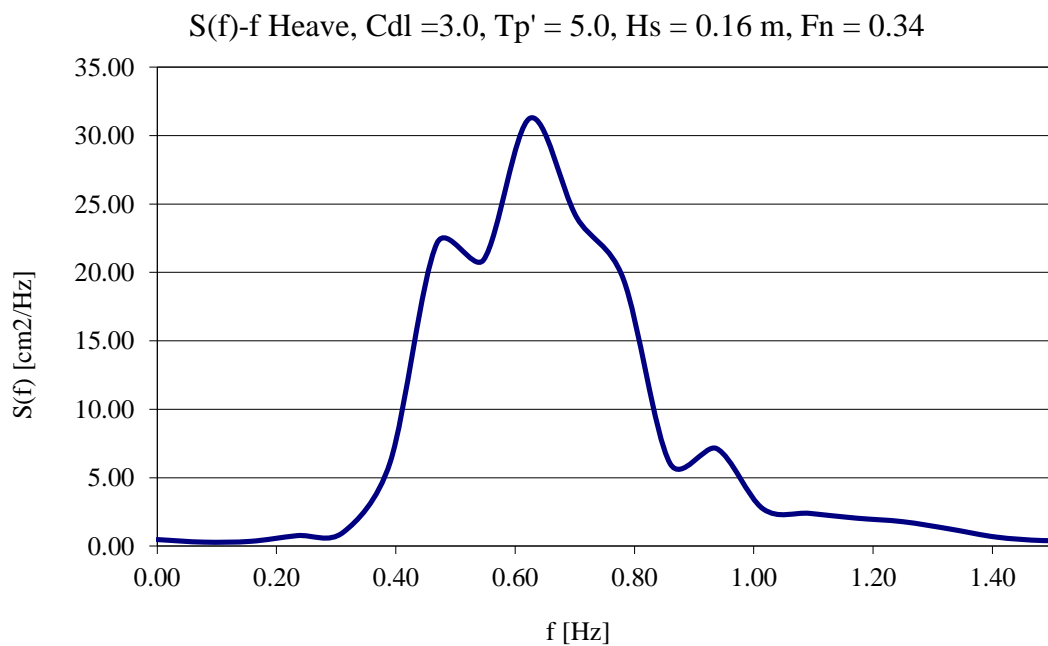


Σχήμα 5.24. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

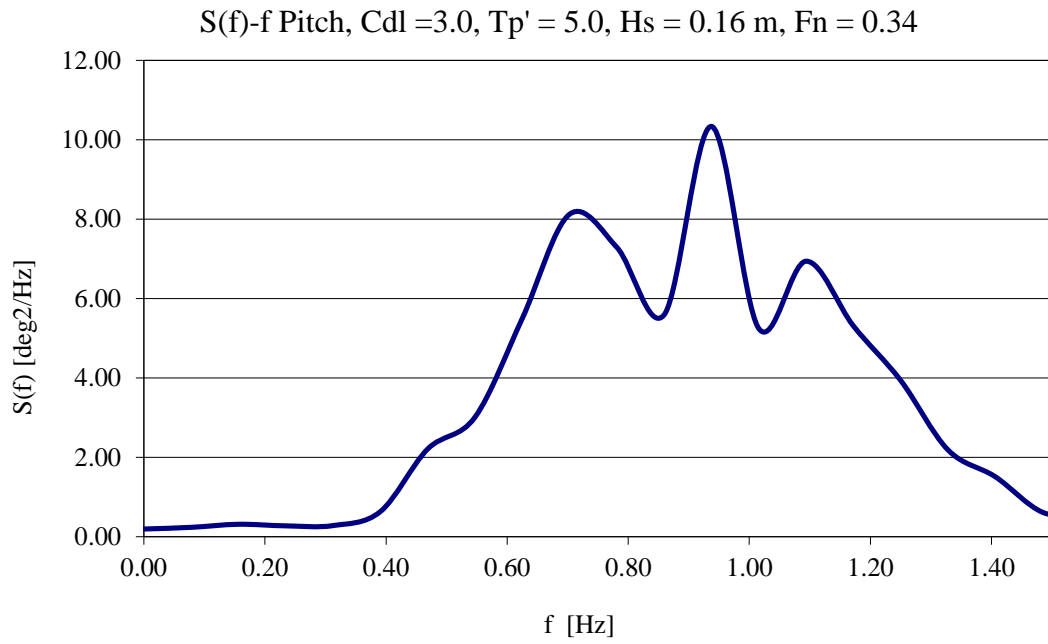
- Κύμα H16tp5.625



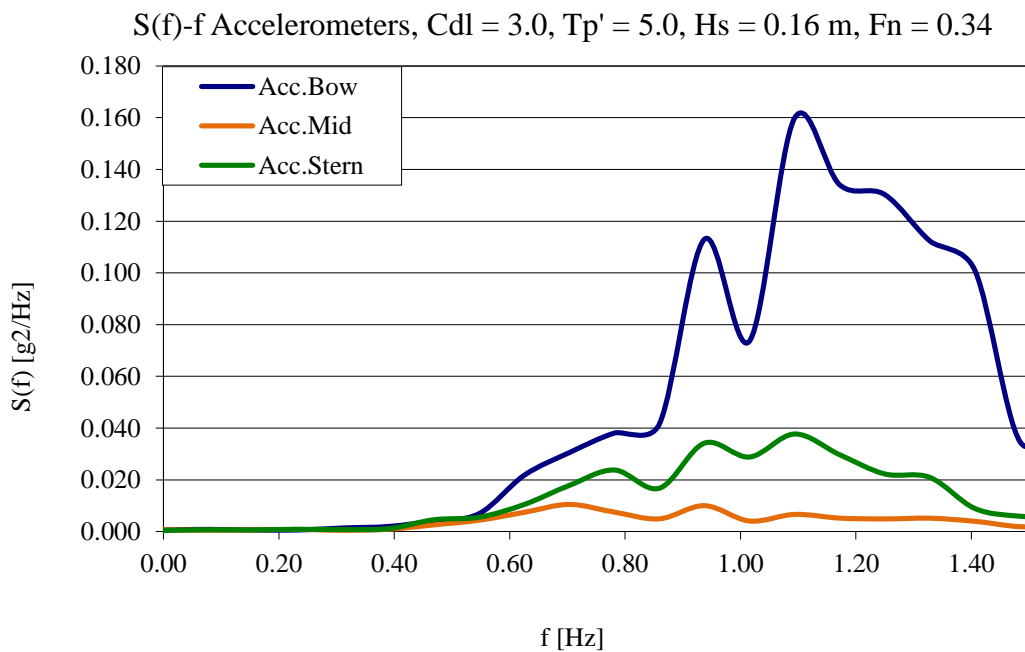
Σχήμα 5.25. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.26. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



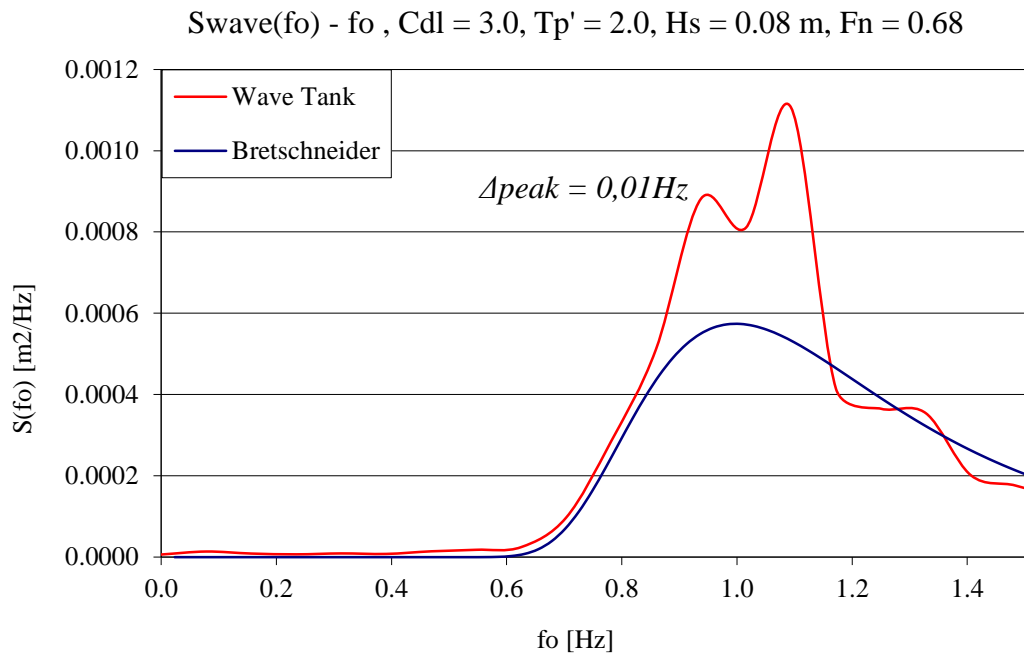
Σχήμα 5.27. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



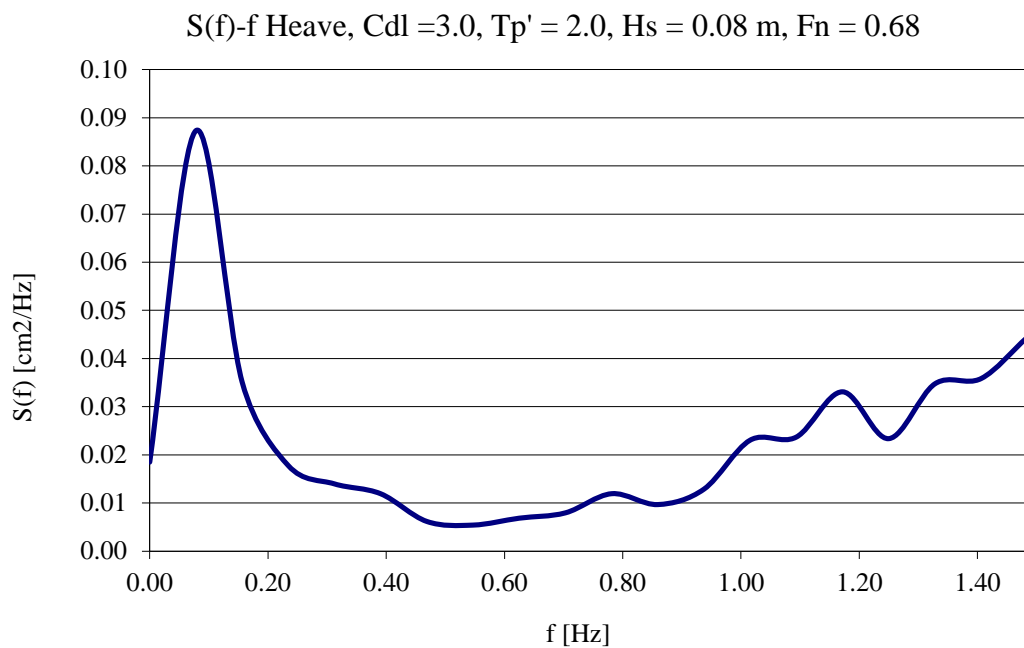
Σχήμα 5.28. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

Για την μεγάλη ταχύτητα, $Fn = 0.68$:

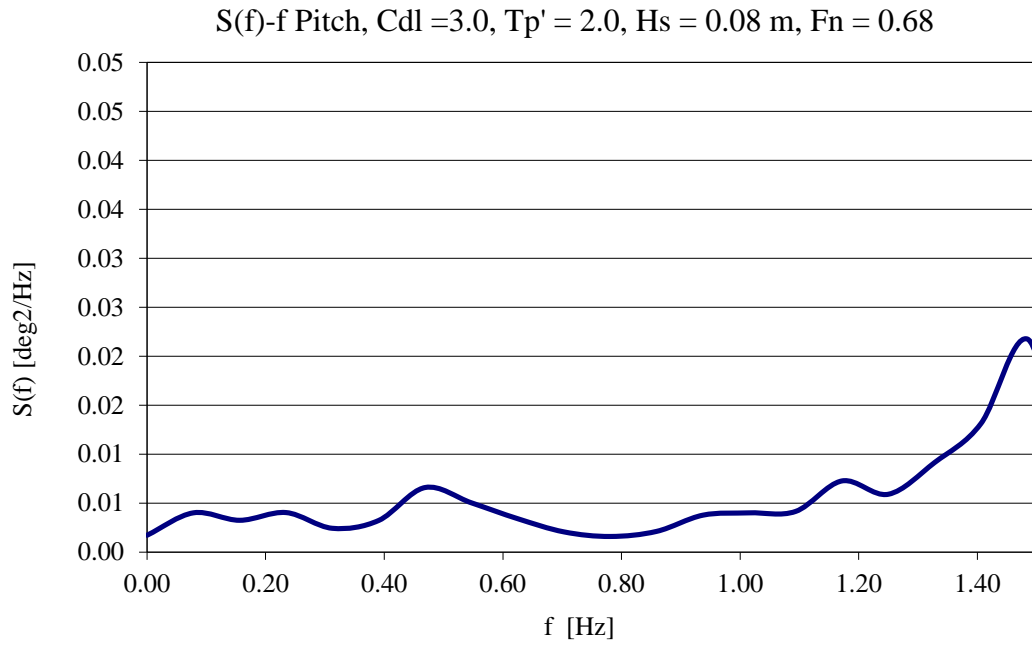
- Κύμα H8tp2.b



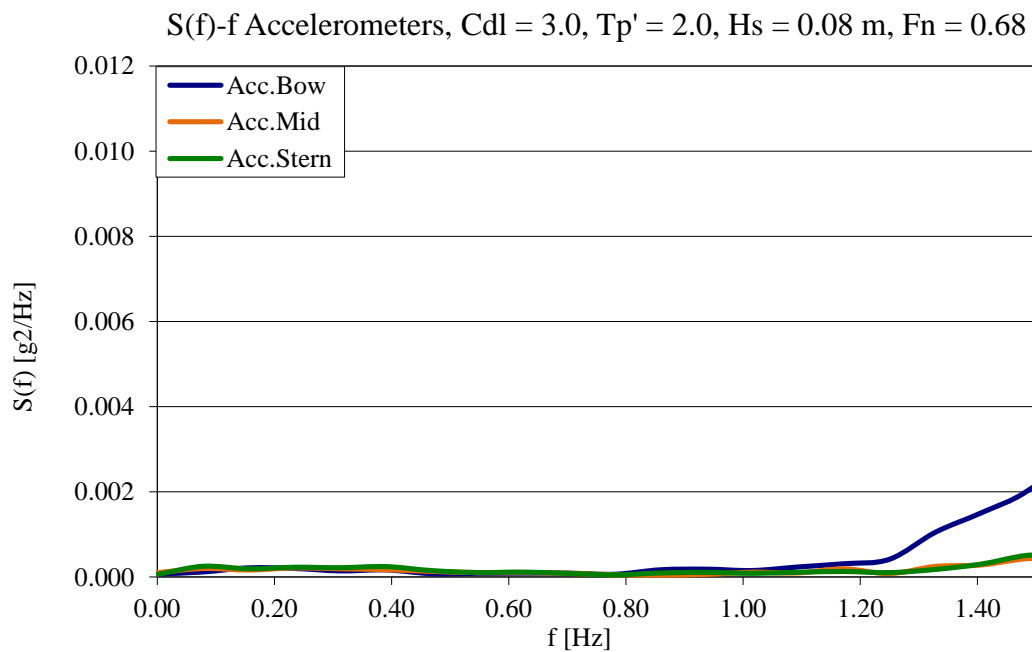
Σχήμα 5.29. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.30. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

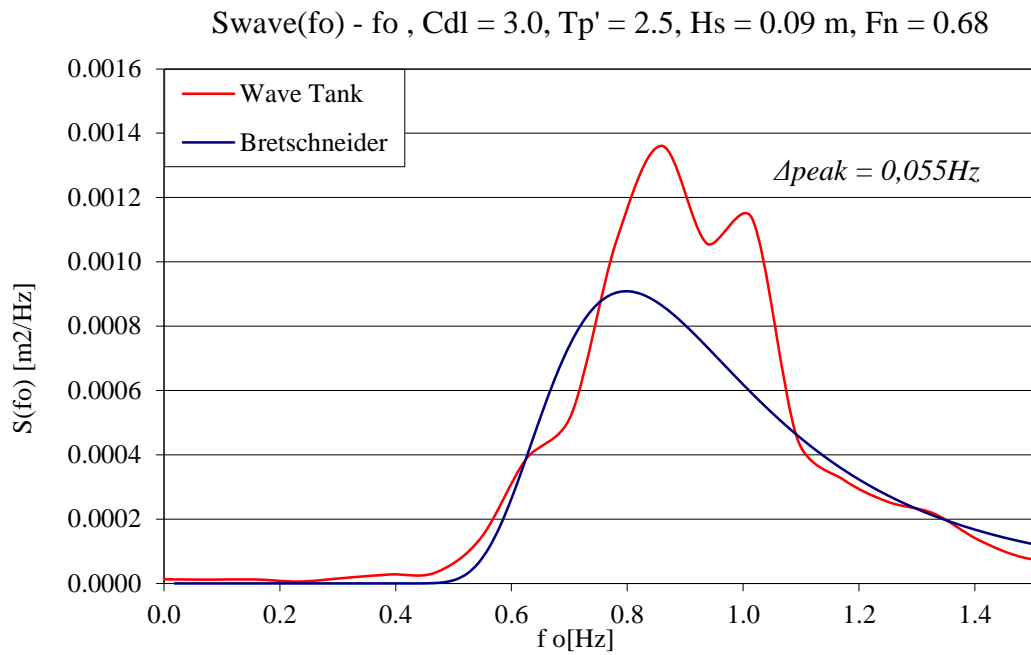


Σχήμα 5.31. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

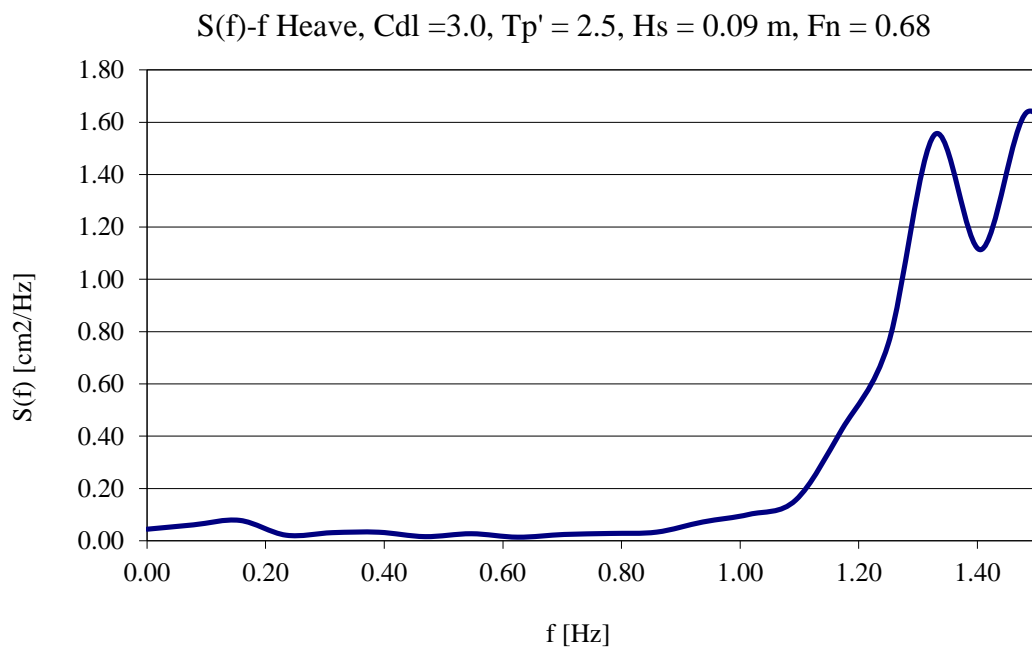


Σχήμα 5.32. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

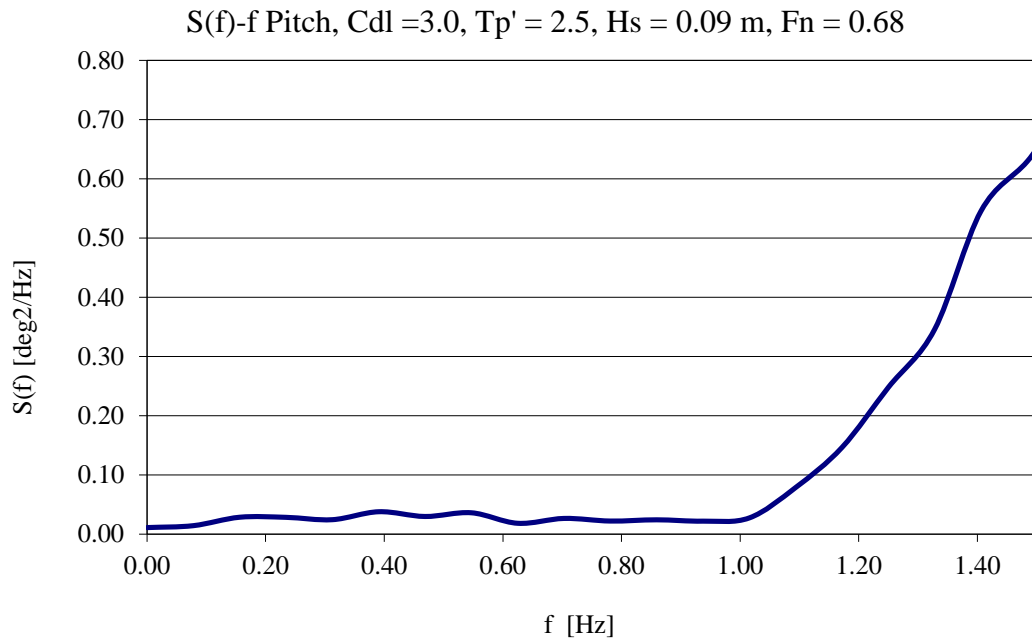
- Κύμα H9tp25.625



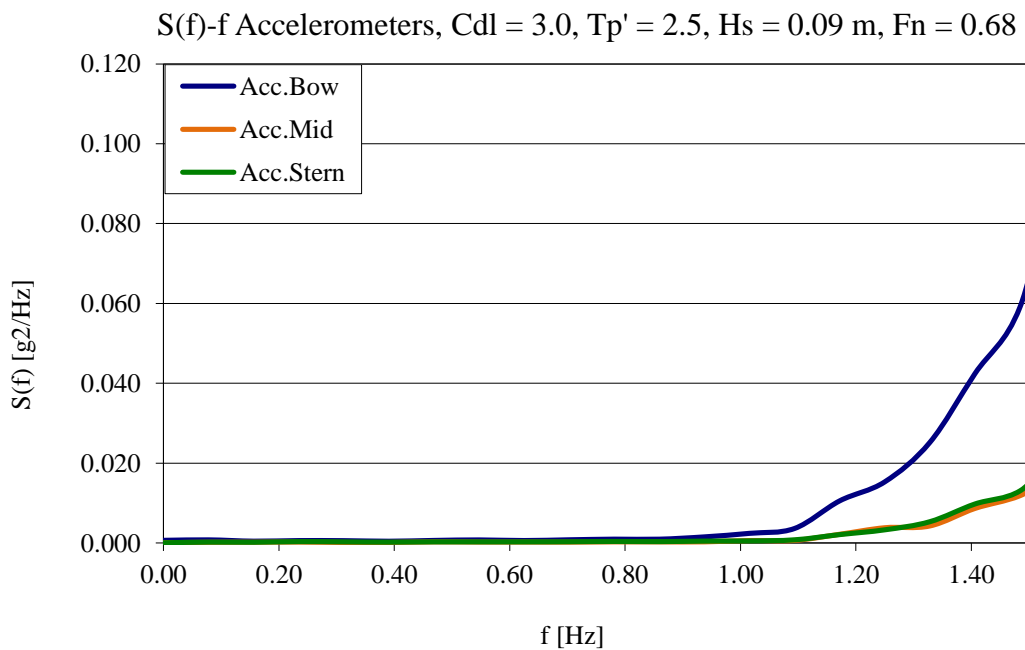
Σχήμα 5.33. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.34. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

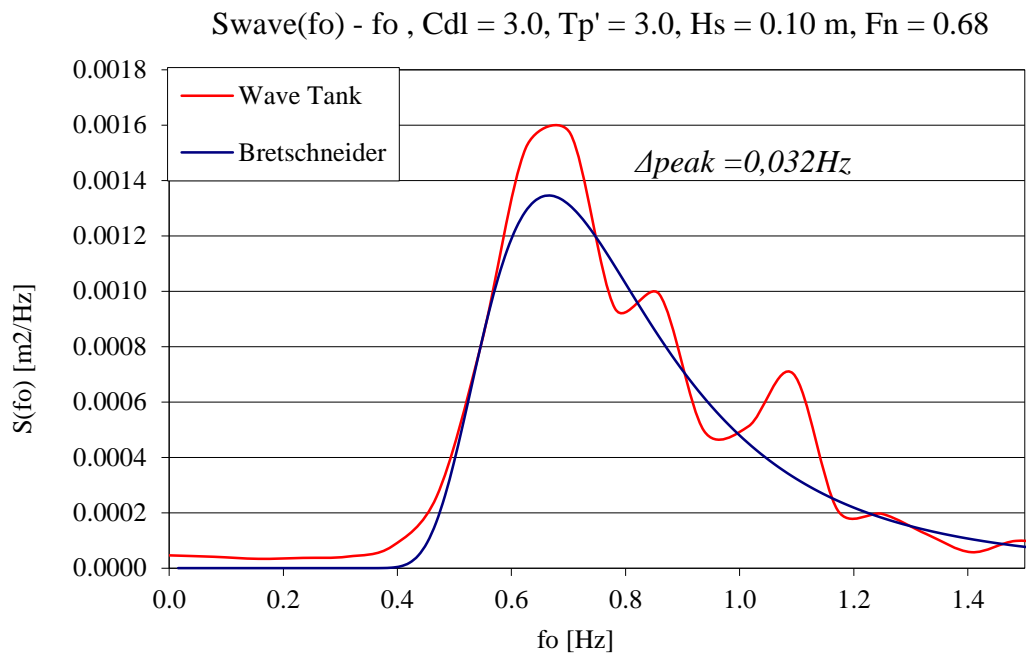


Σχήμα 5.35. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

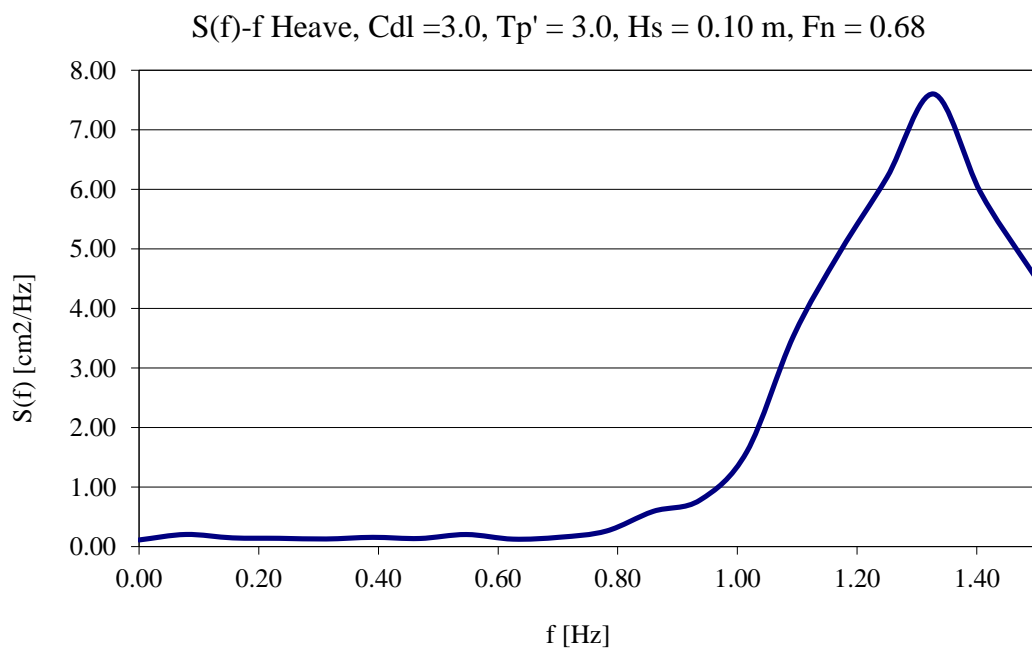


Σχήμα 5.36. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

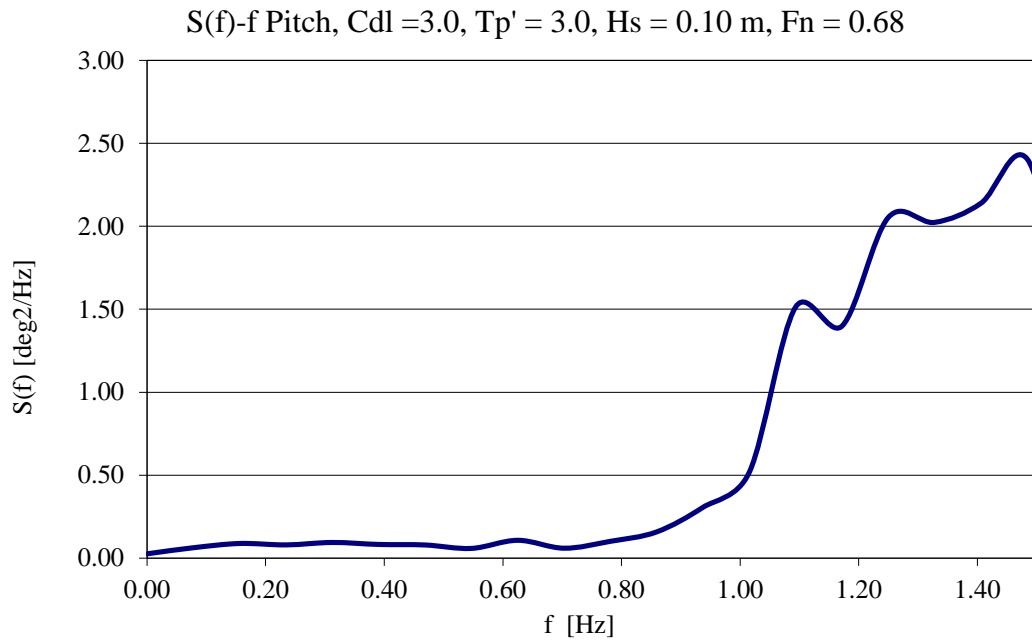
- Κύμα H10tp3.625



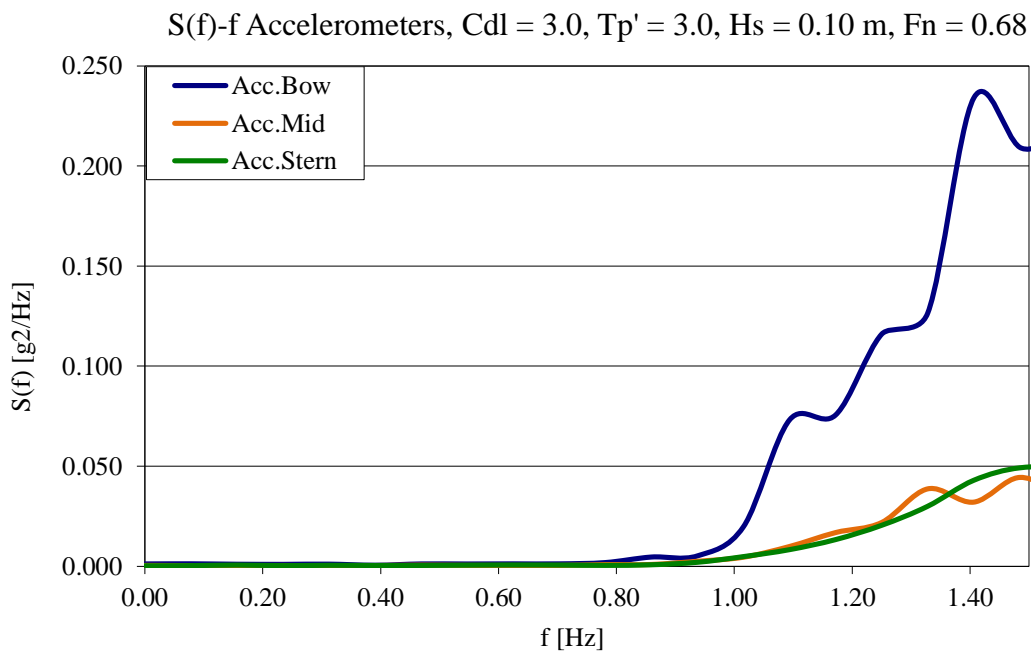
Σχήμα 5.37. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.38. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

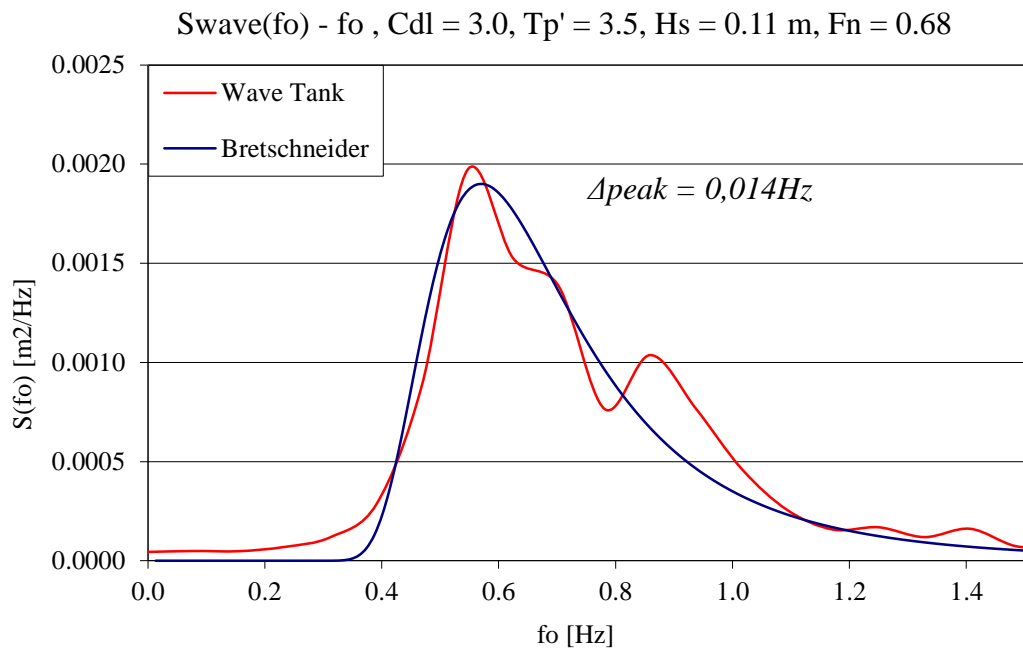


Σχήμα 5.39. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

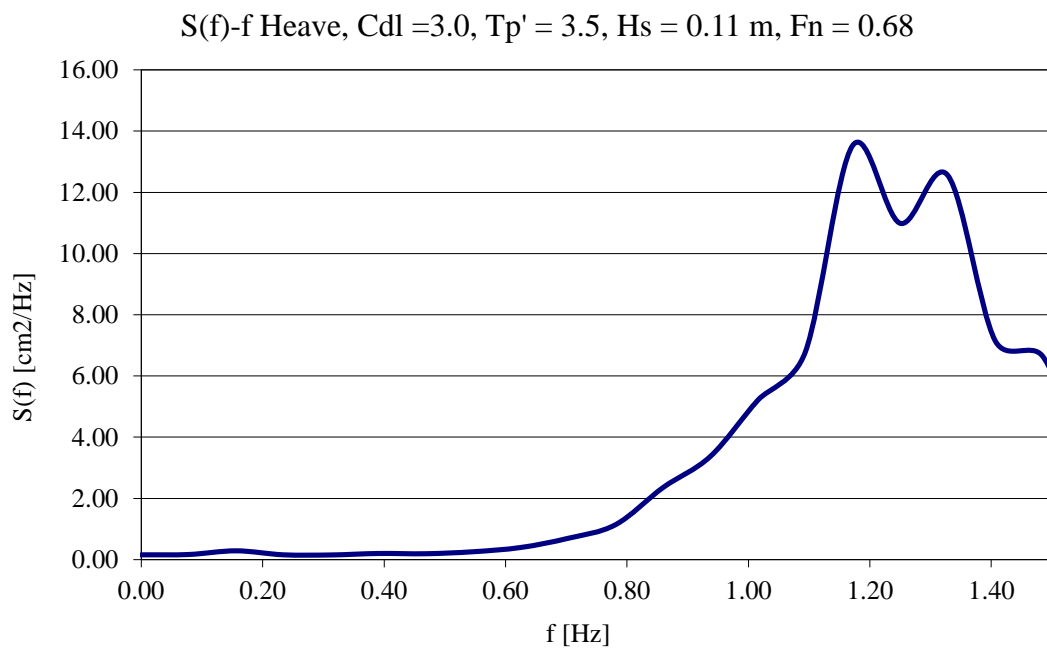


Σχήμα 5.40. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

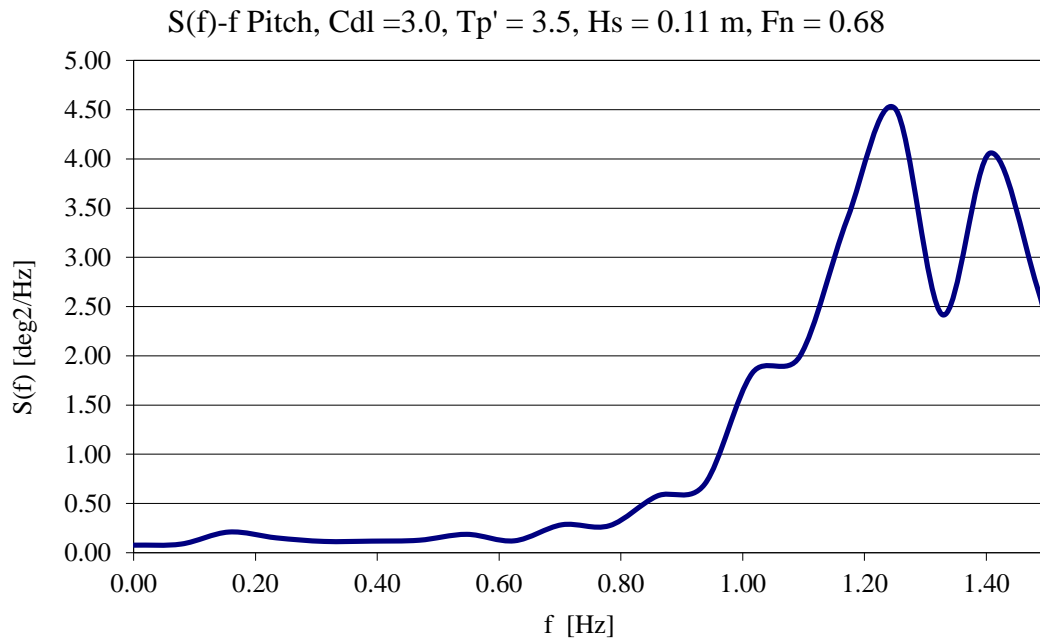
- Κύμα H11tp35.625



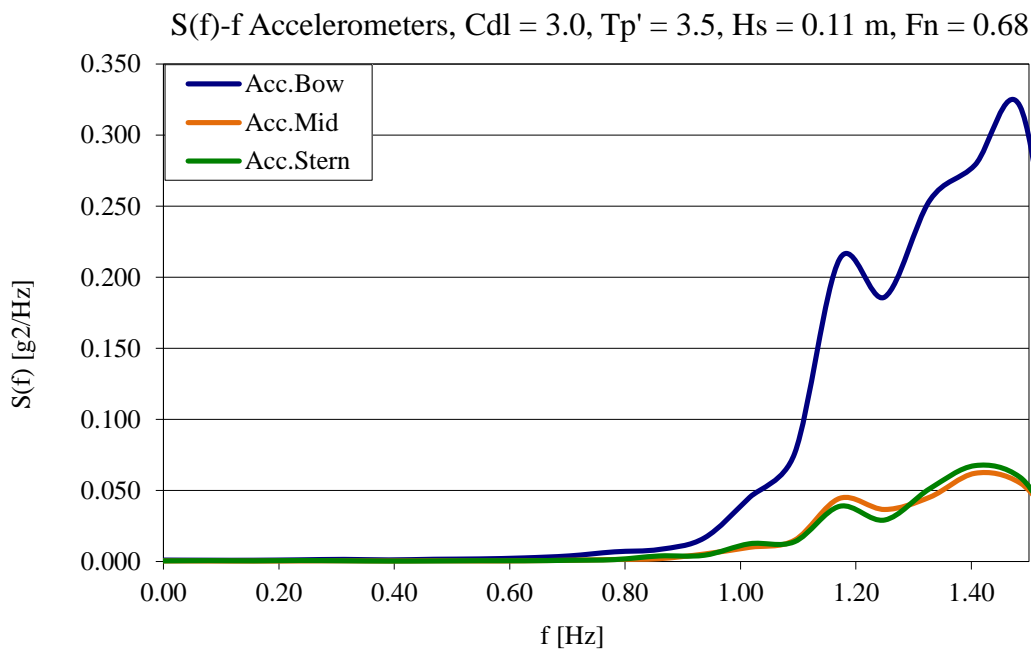
Σχήμα 5.41. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.42. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

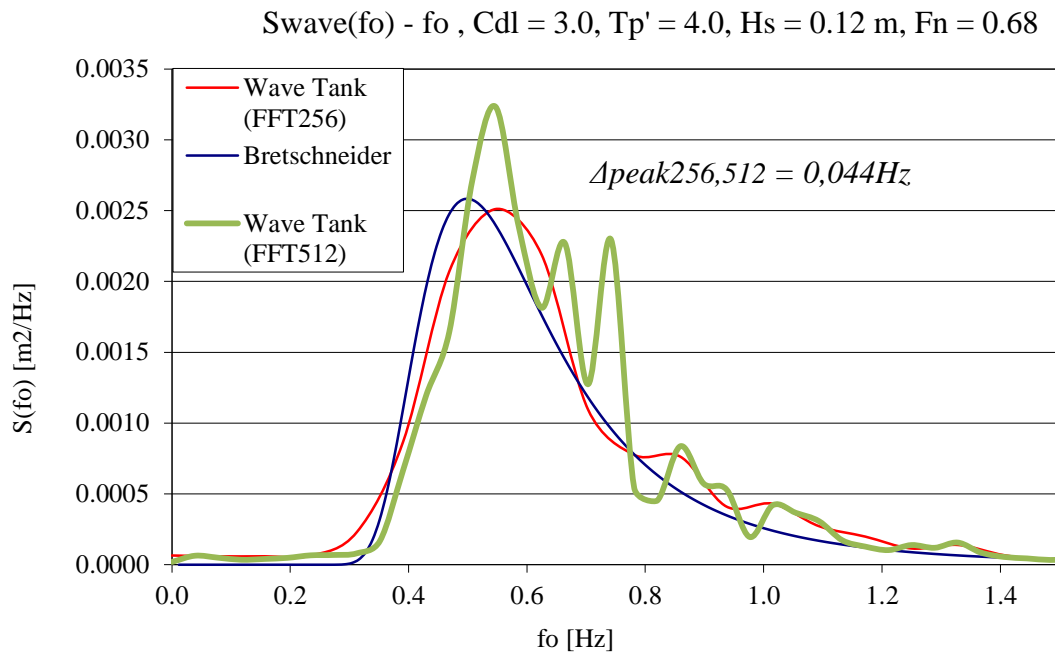


Σχήμα 5.43. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

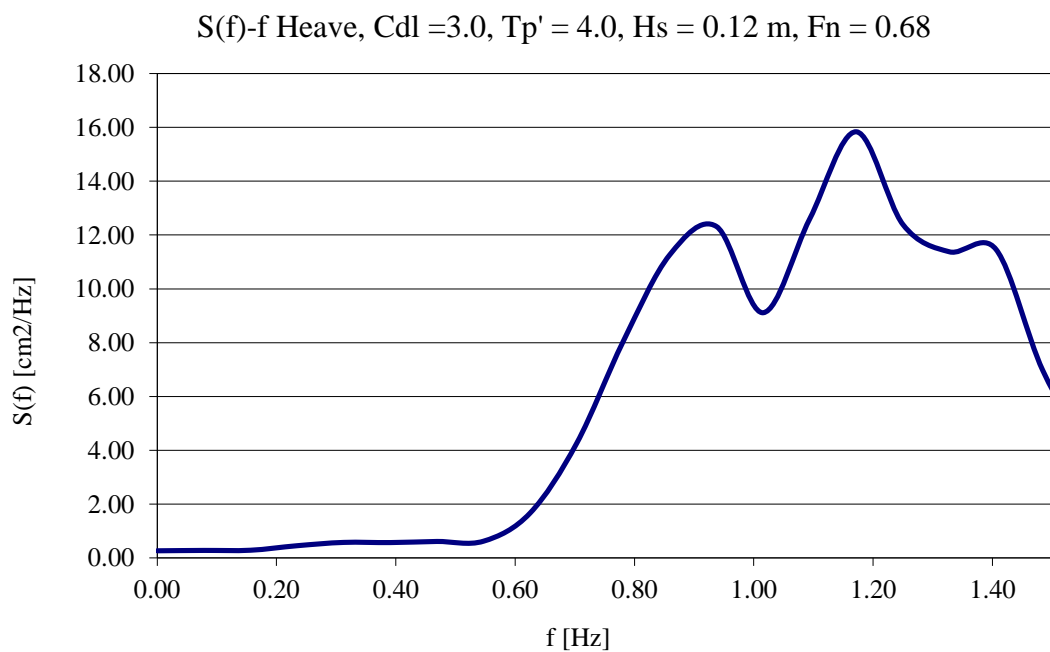


Σχήμα 5.44. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

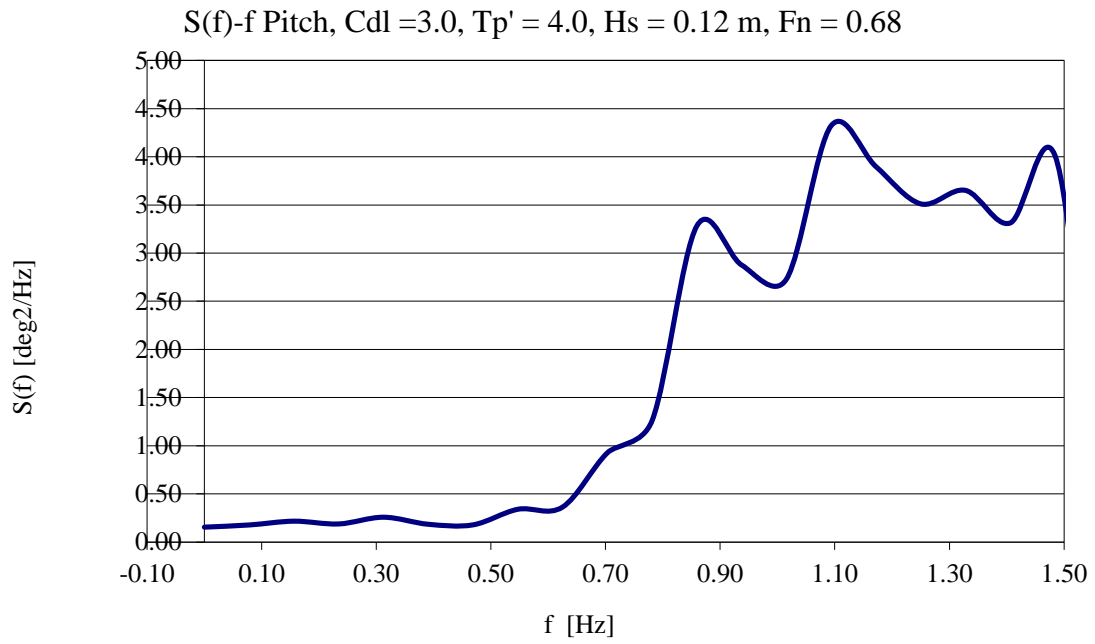
- Κύμα H12tp4.625



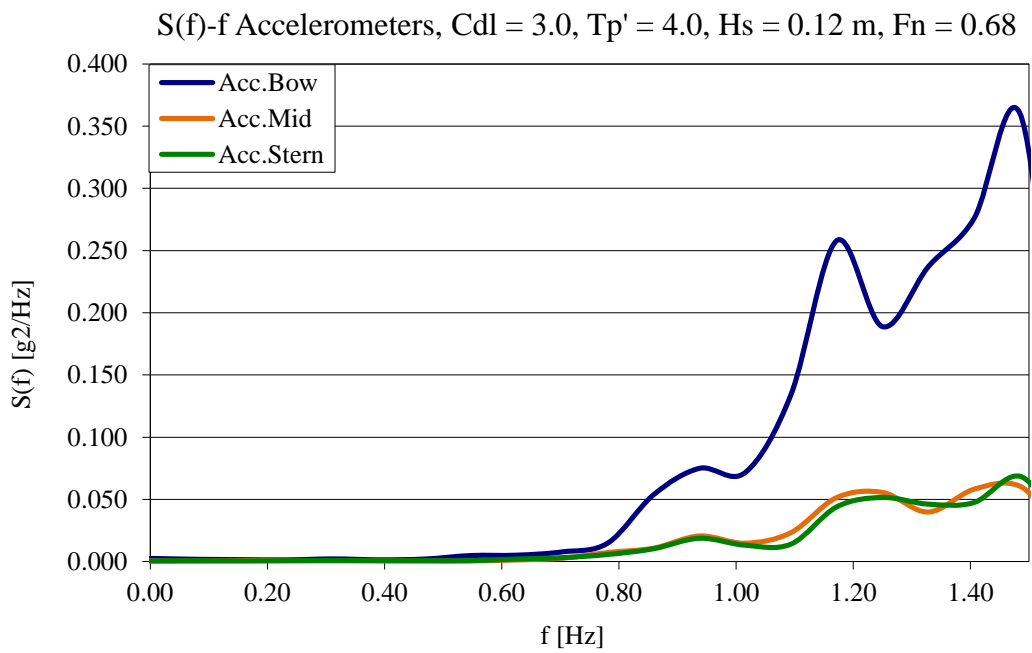
Σχήμα 5.45. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.46. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



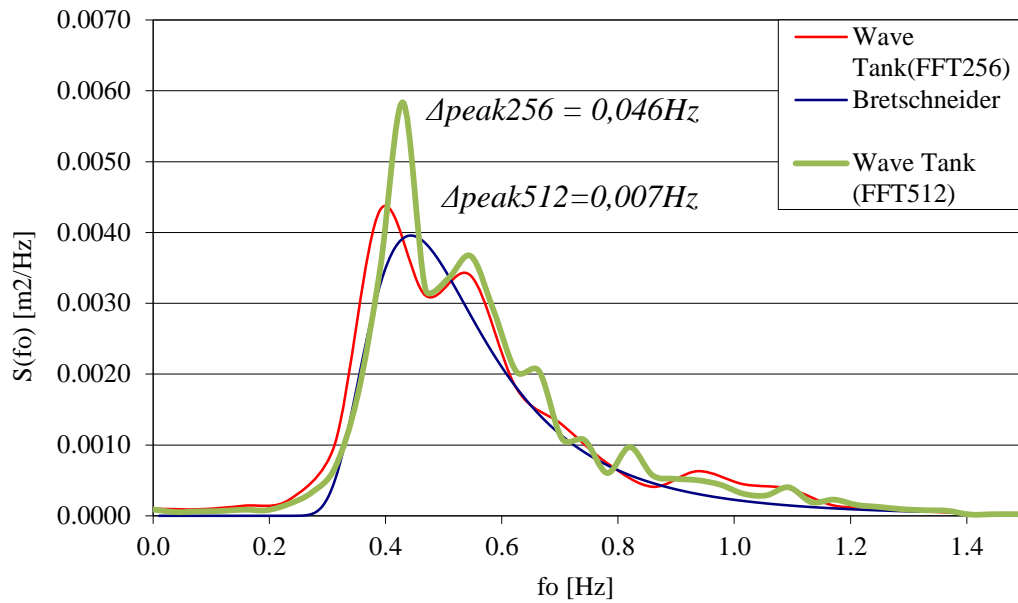
Σχήμα 5.47. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



Σχήμα 5.48. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

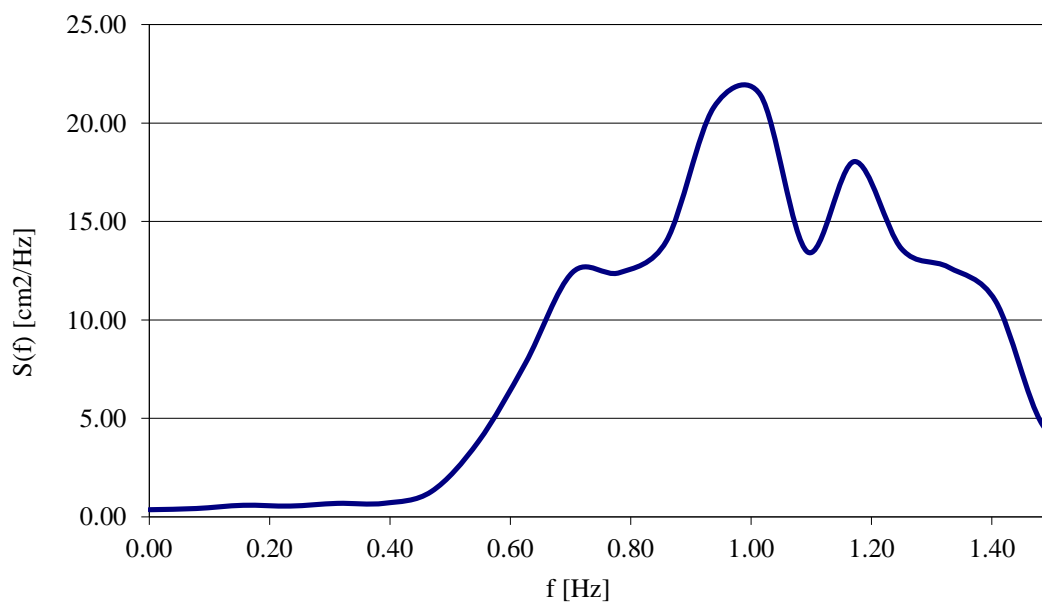
- Κύμα H14tp45.625

$S_{wave}(fo) - fo$, $C_{dl} = 3.0$, $T_{p'} = 4.5$, $H_s = 0.14$ m, $F_n = 0.68$

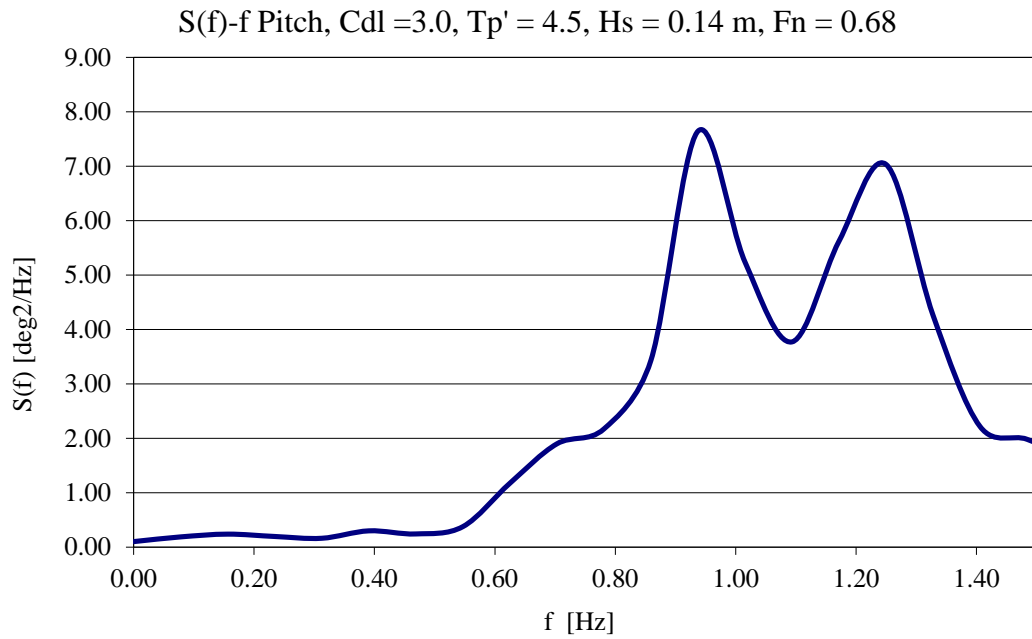


Σχήμα 5.49. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος

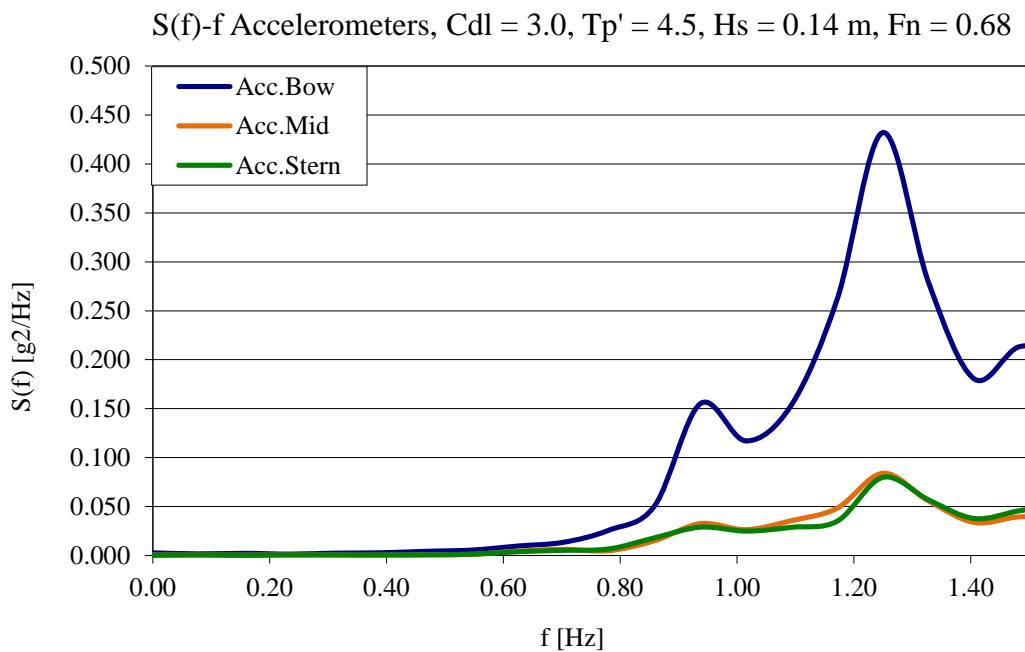
$S(f)-f$ Heave, $C_{dl} = 3.0$, $T_{p'} = 4.5$, $H_s = 0.14$ m, $F_n = 0.68$



Σχήμα 5.50. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

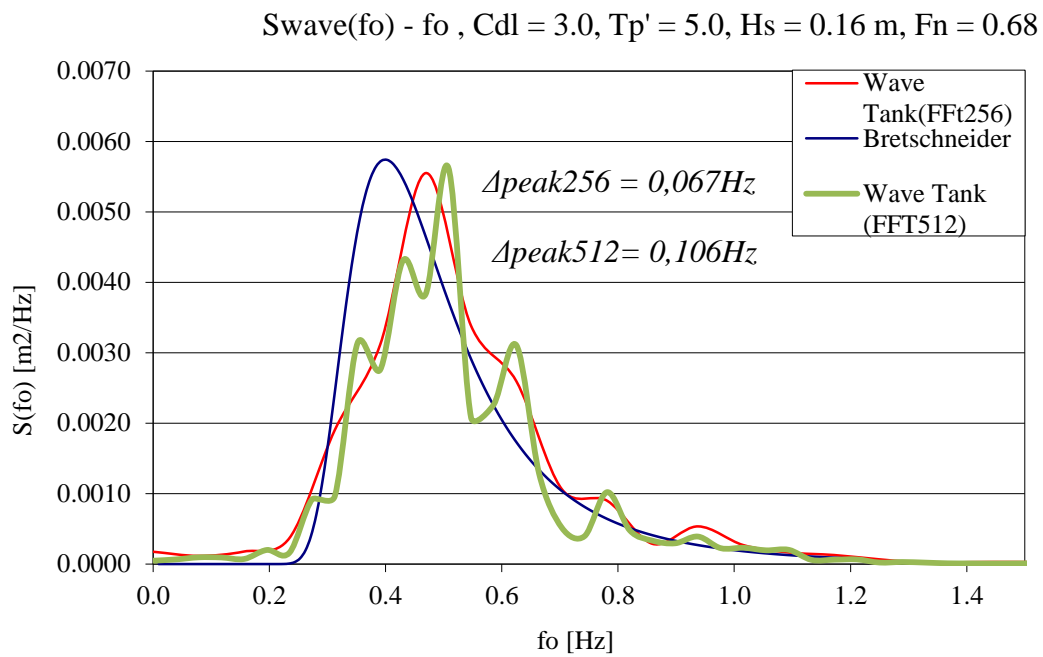


Σχήμα 5.51. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

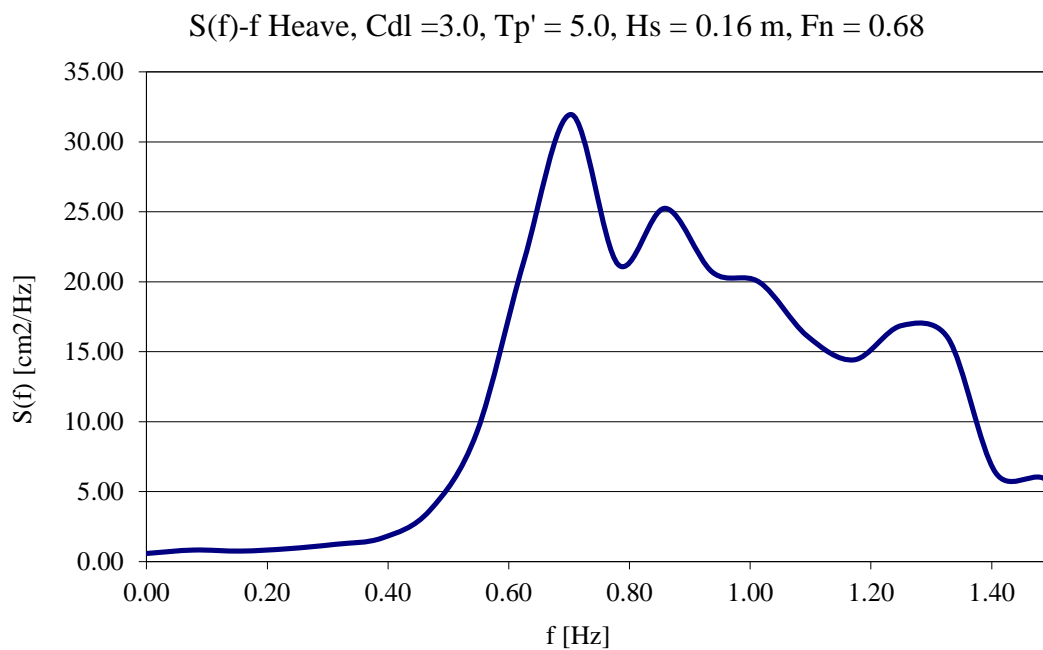


Σχήμα 5.52. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

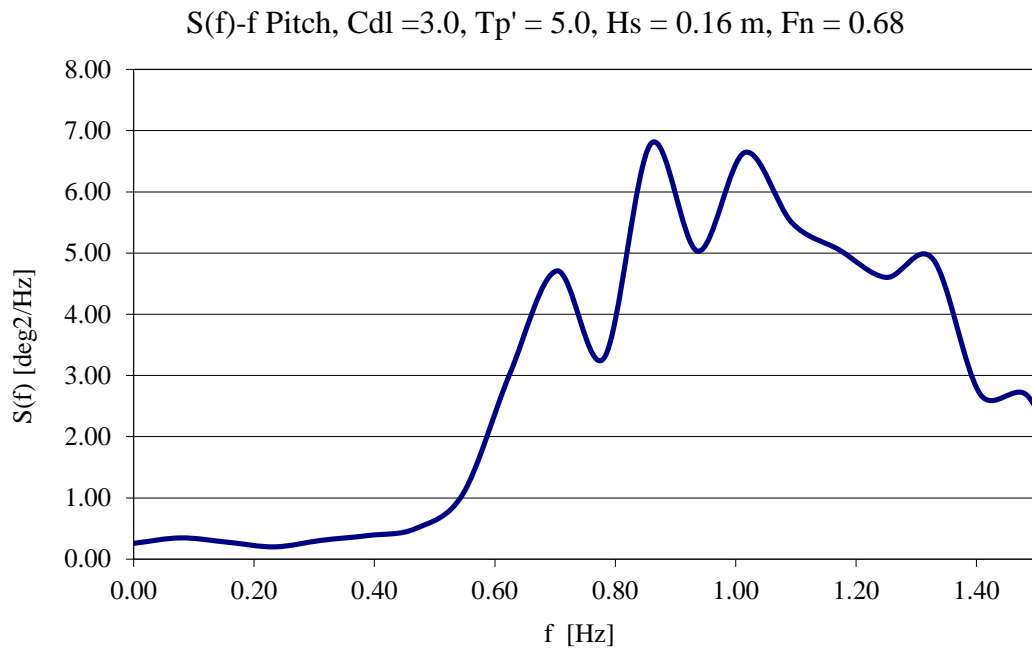
- Κύμα H16tp5.625



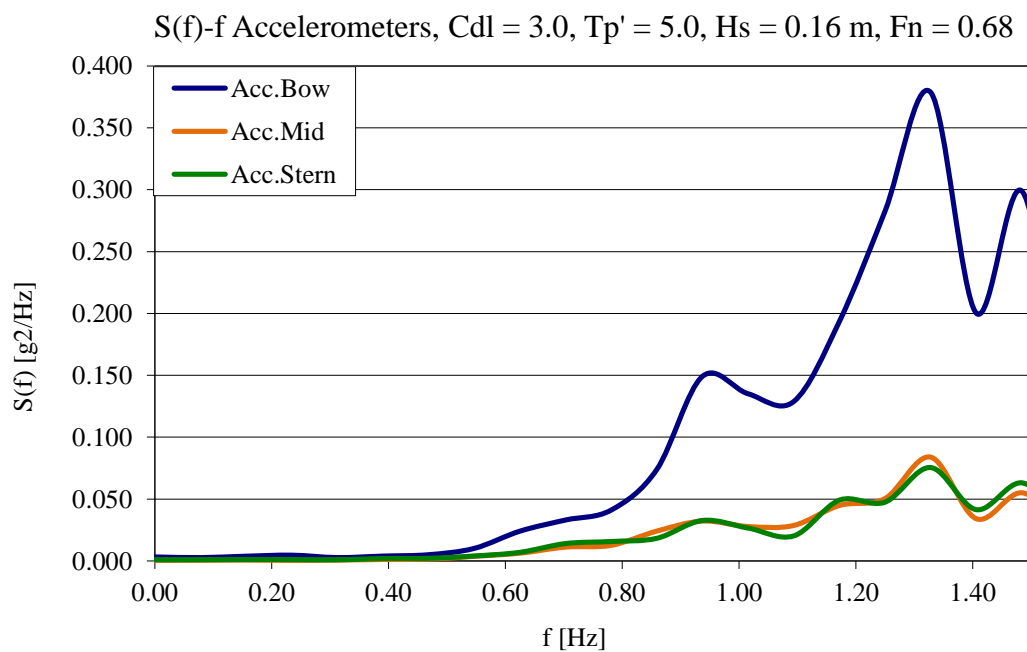
Σχήμα 5.53. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.54. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



Σχήμα 5.55. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

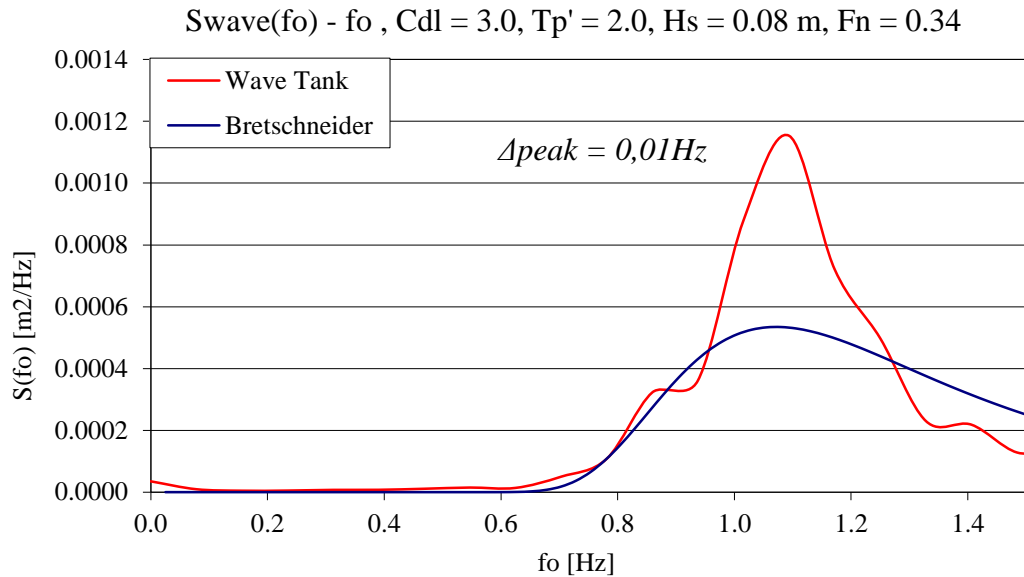


Σχήμα 5.56. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

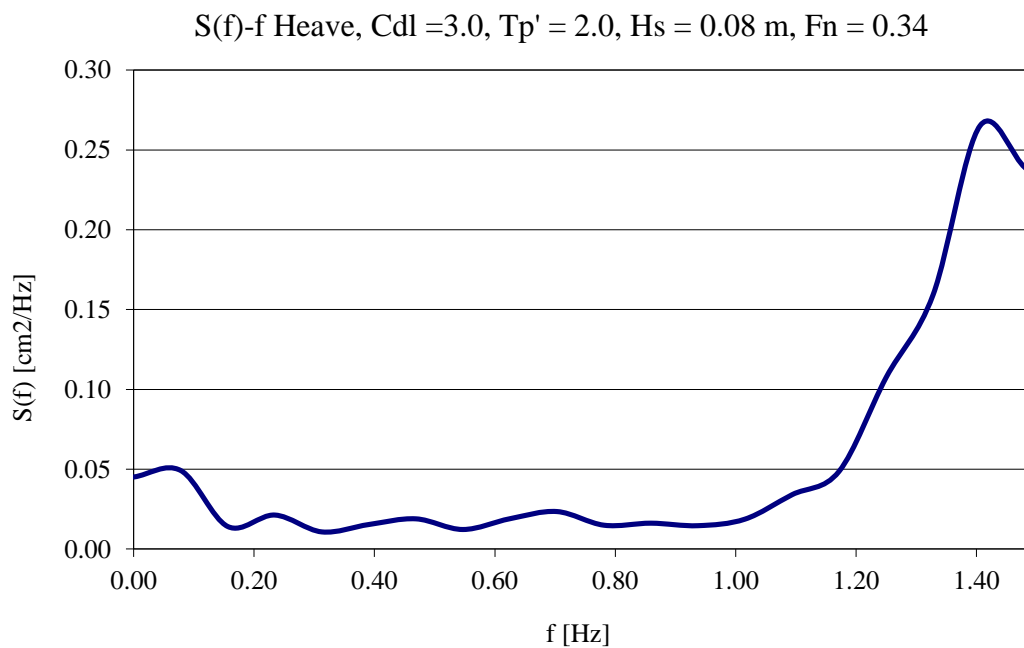
✓ Για το μοντέλο NTUA-154/99 ($L/B = 4.75$), έχουμε:

Για την μικρή ταχύτητα, $Fn = 0.34$:

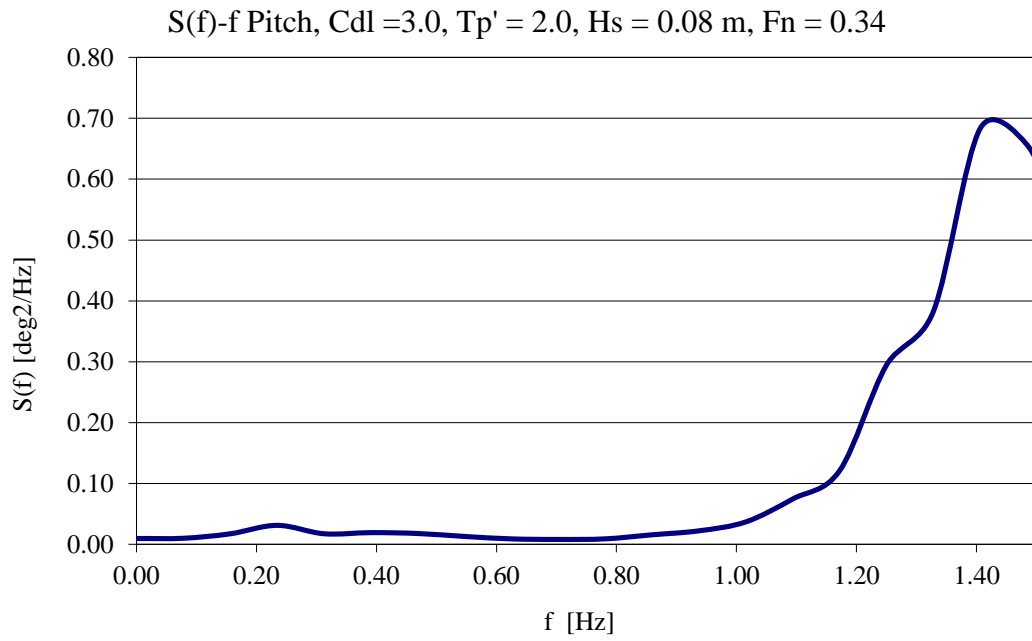
- Κύμα H8tp2.c



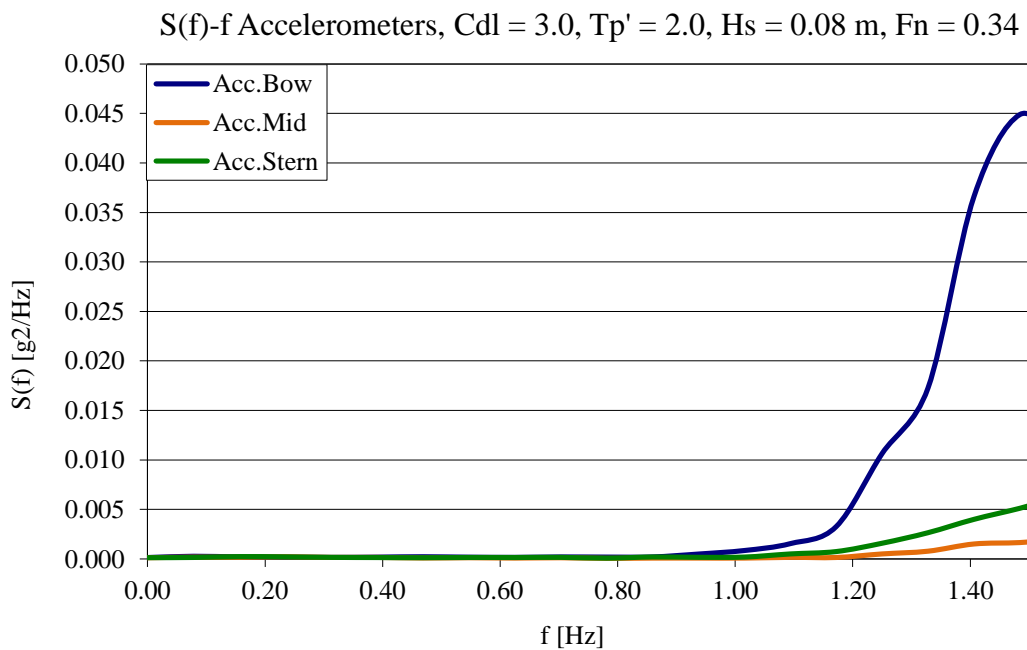
Σχήμα 5.57. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.58. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

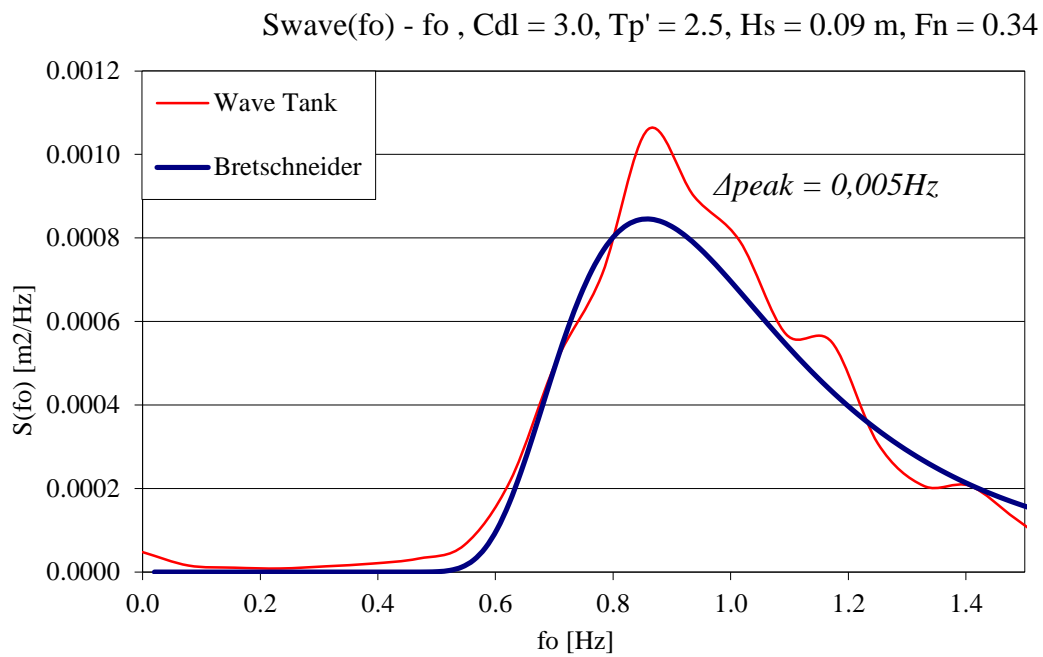


Σχήμα 5.59. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

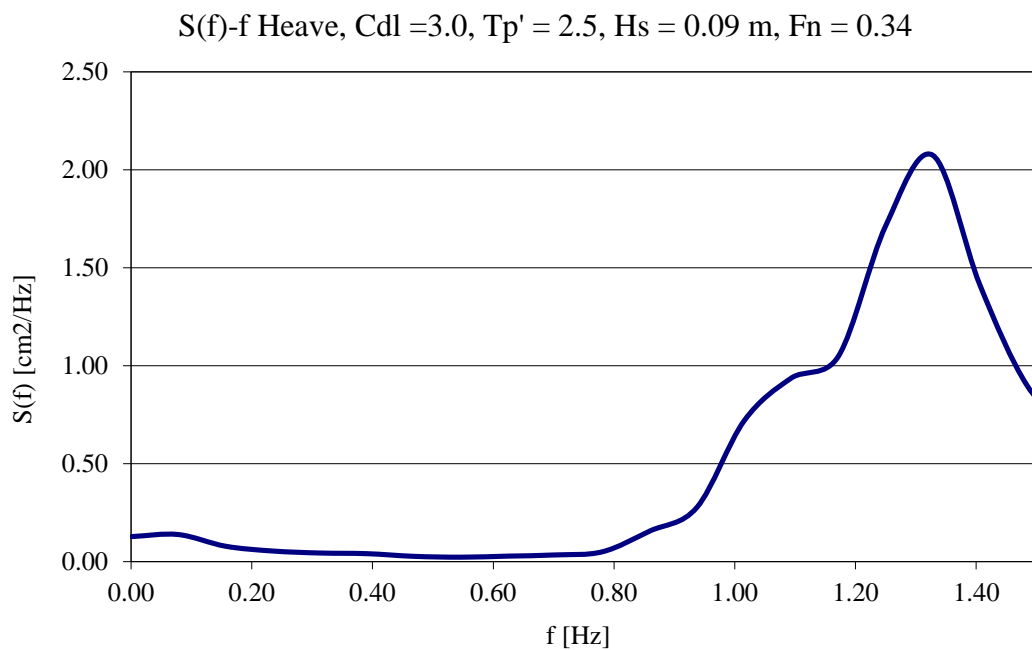


Σχήμα 5.60. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

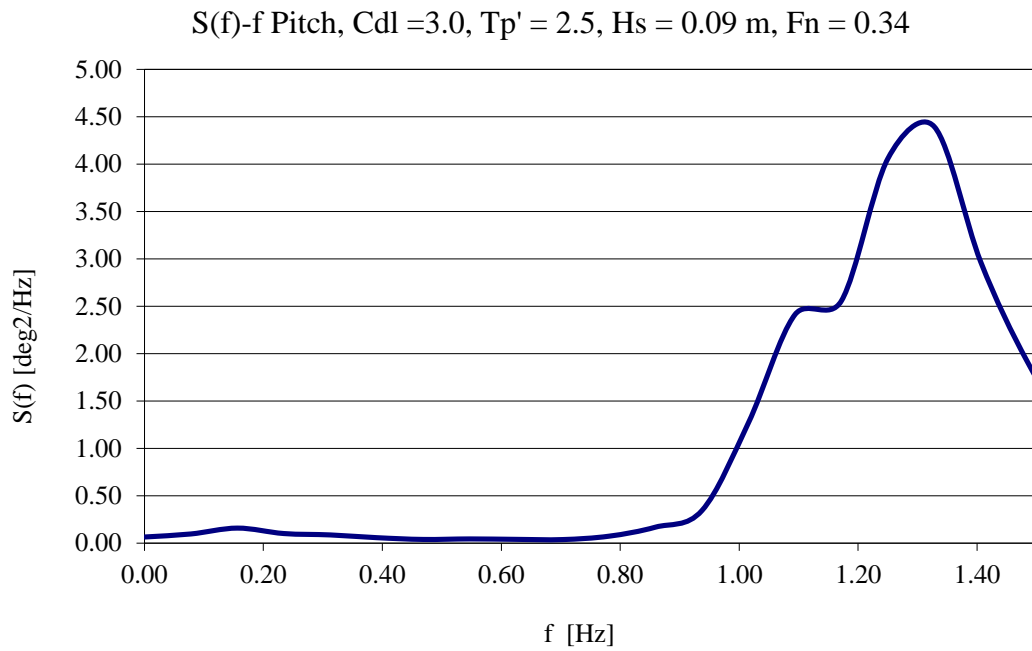
- Κύμα H9tp2.475



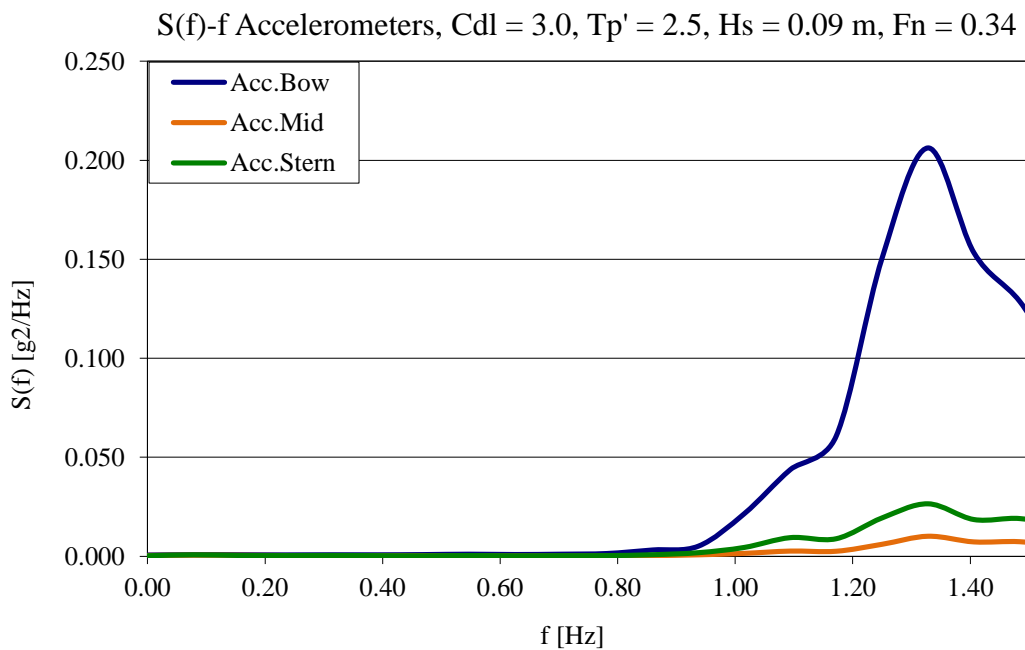
Σχήμα 5.61. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.62. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

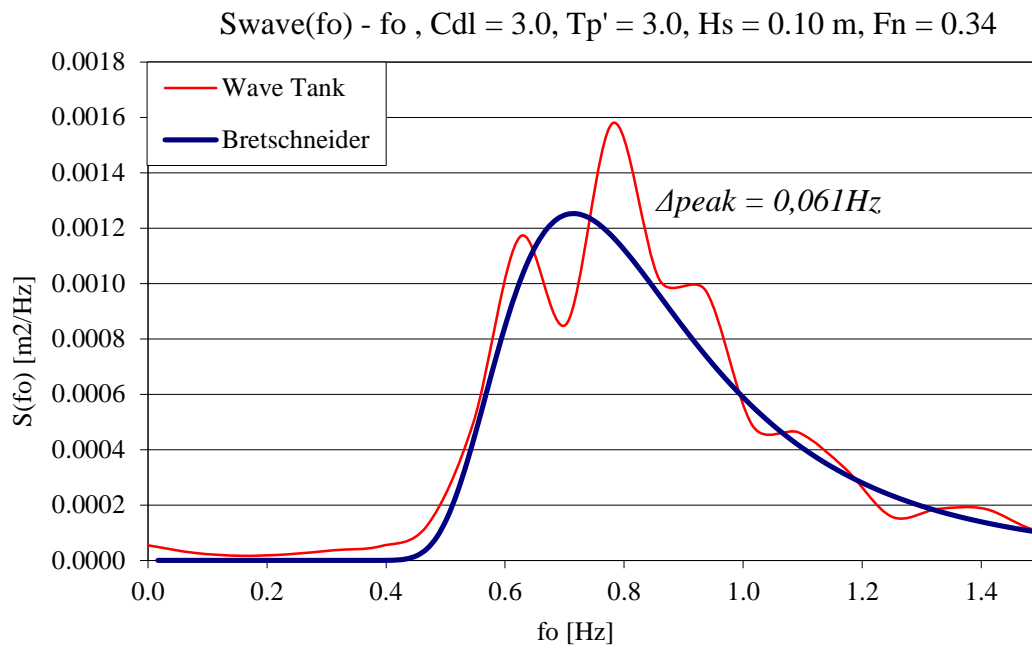


Σχήμα 5.63. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

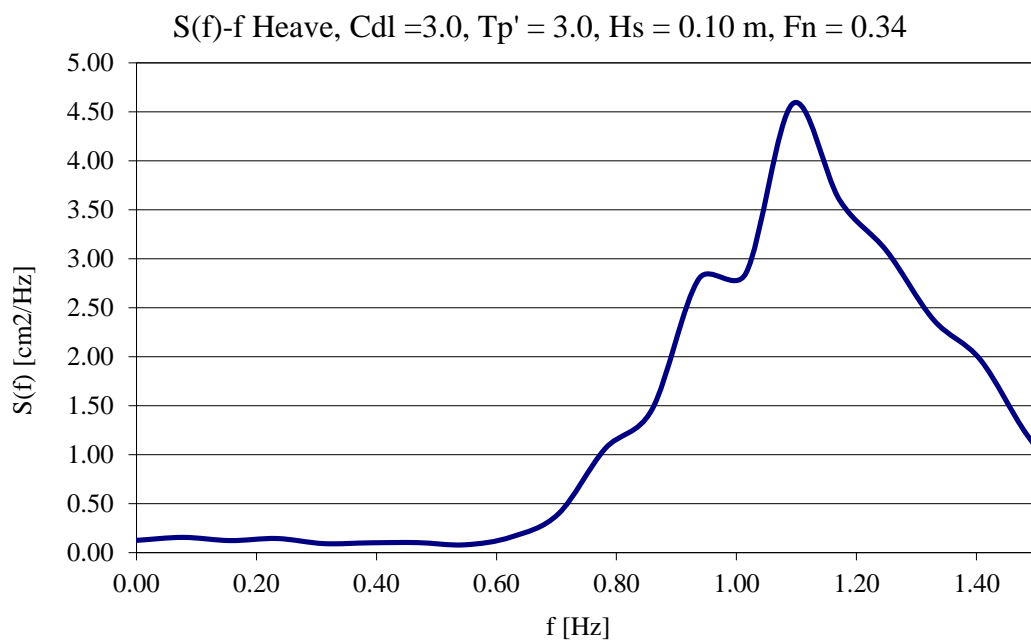


Σχήμα 5.64. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

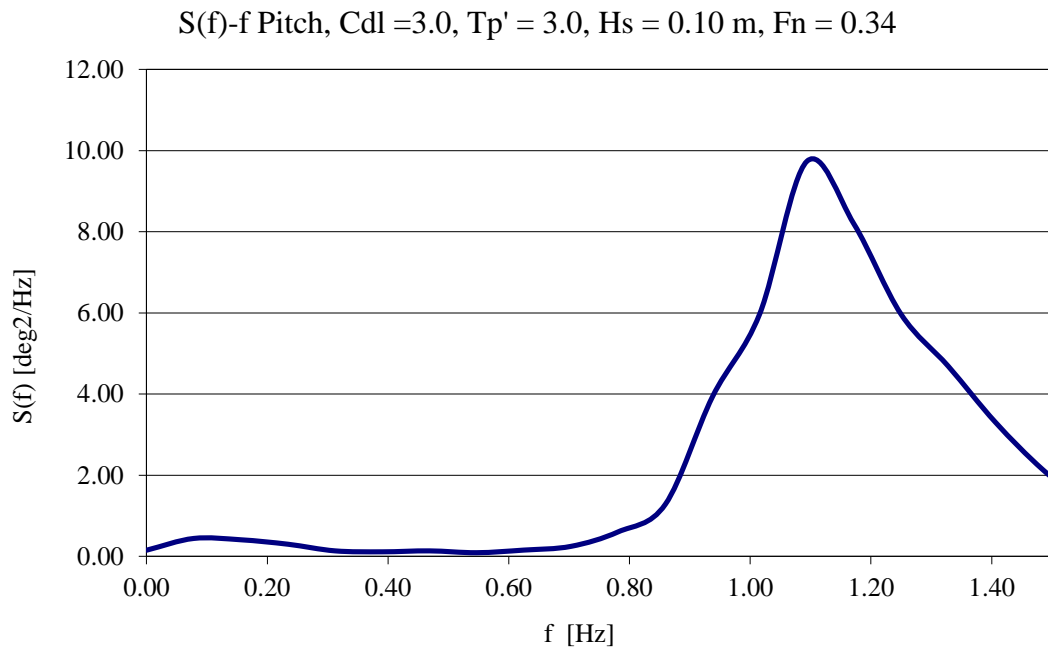
- Κύμα H10tp3.475



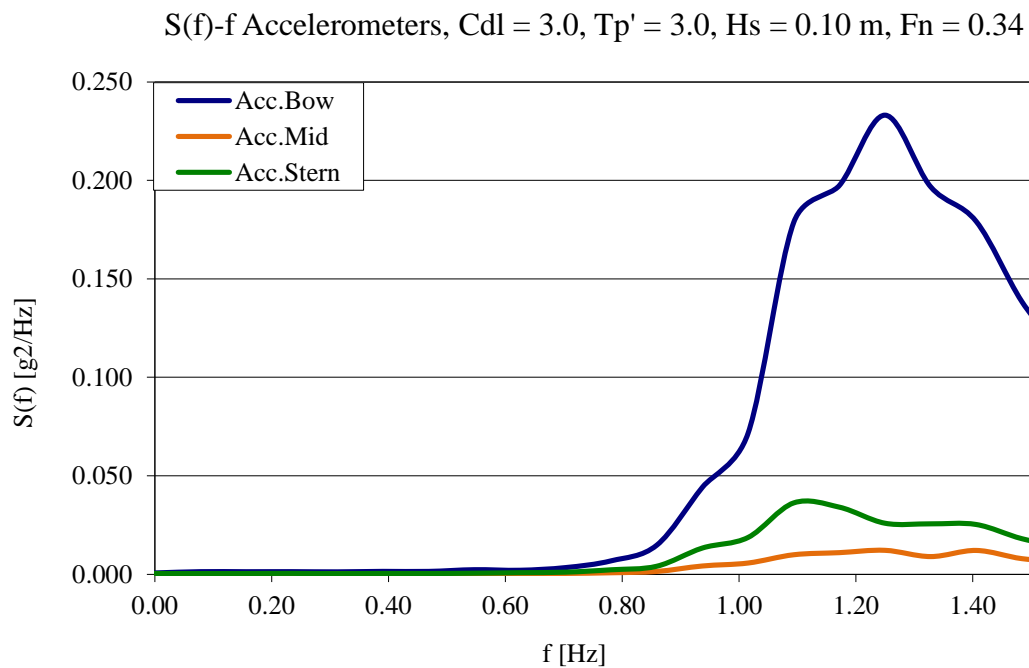
Σχήμα 5.65. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.66. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

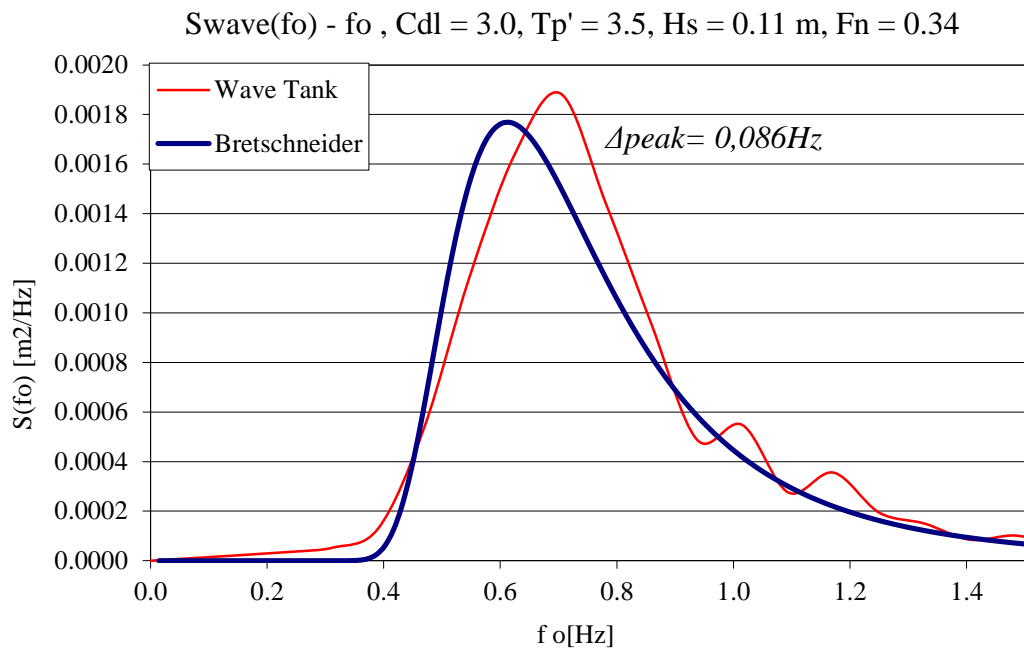


Σχήμα 5.67. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

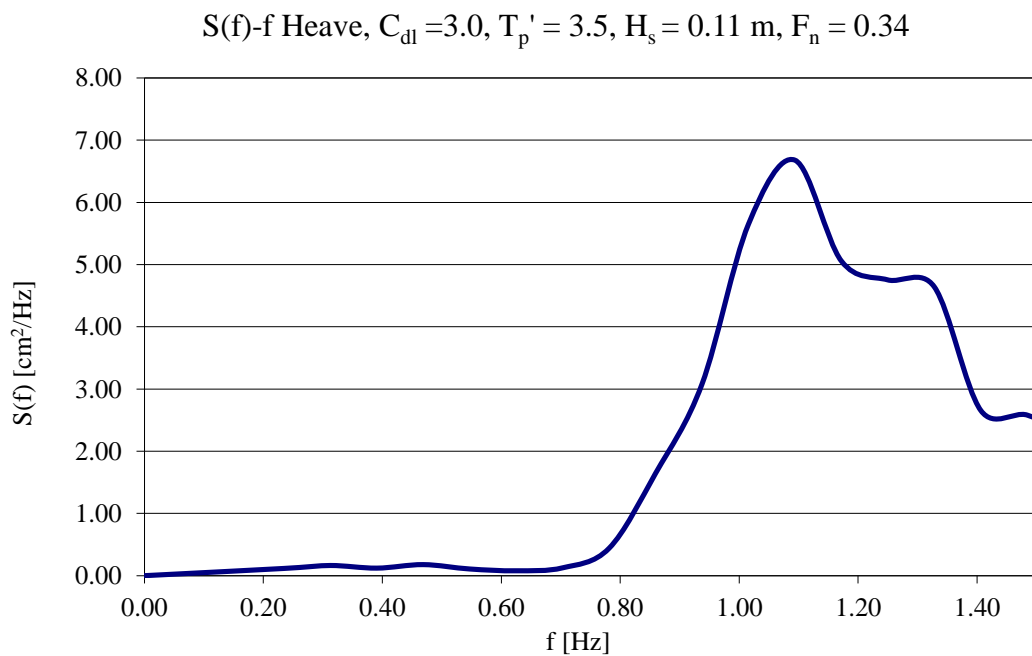


Σχήμα 5.68. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

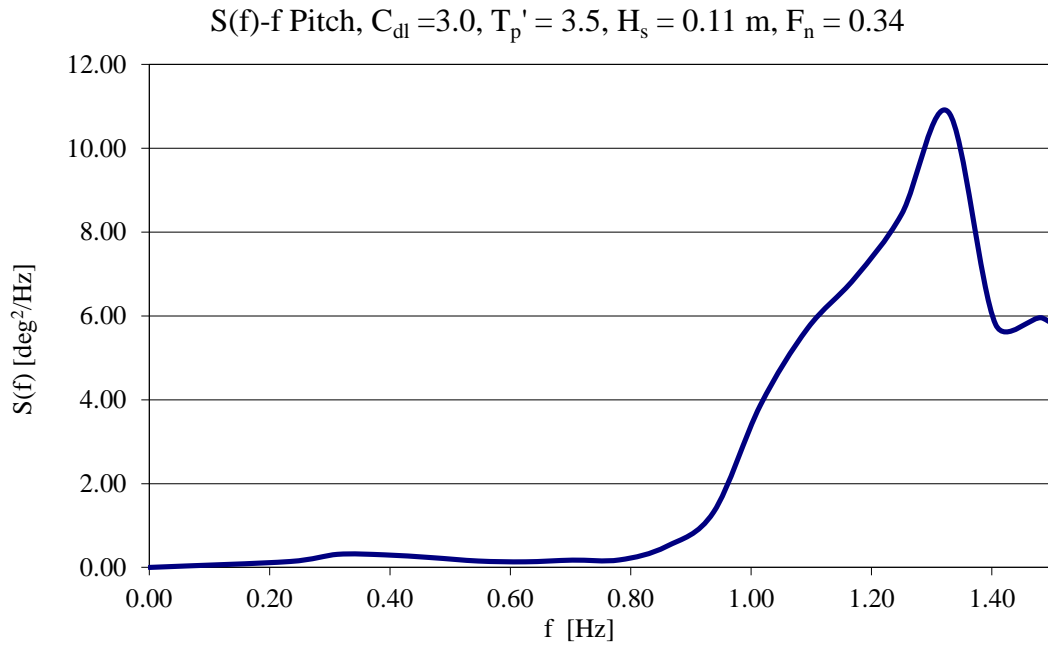
- Κύμα H11tp35.475



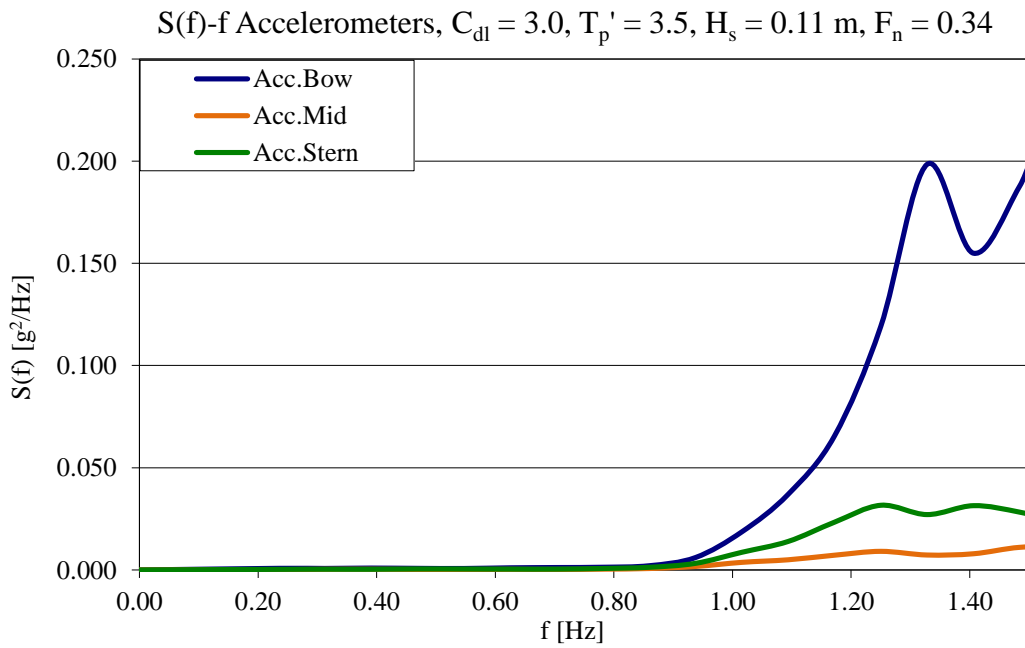
Σχήμα 5.69. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.70. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

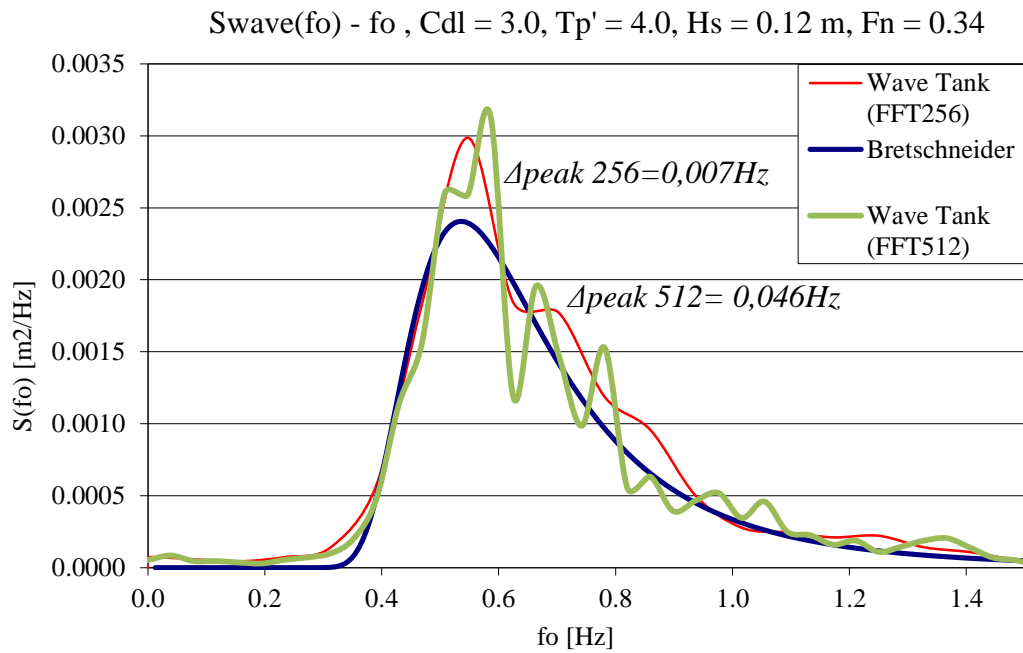


Σχήμα 5.71. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

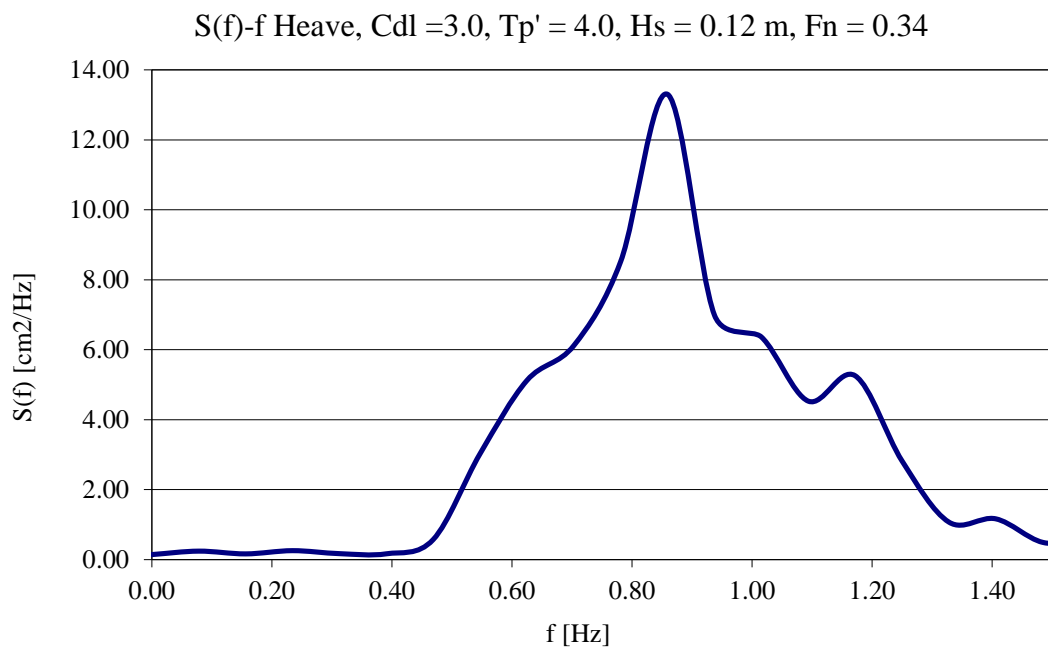


Σχήμα 5.72. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

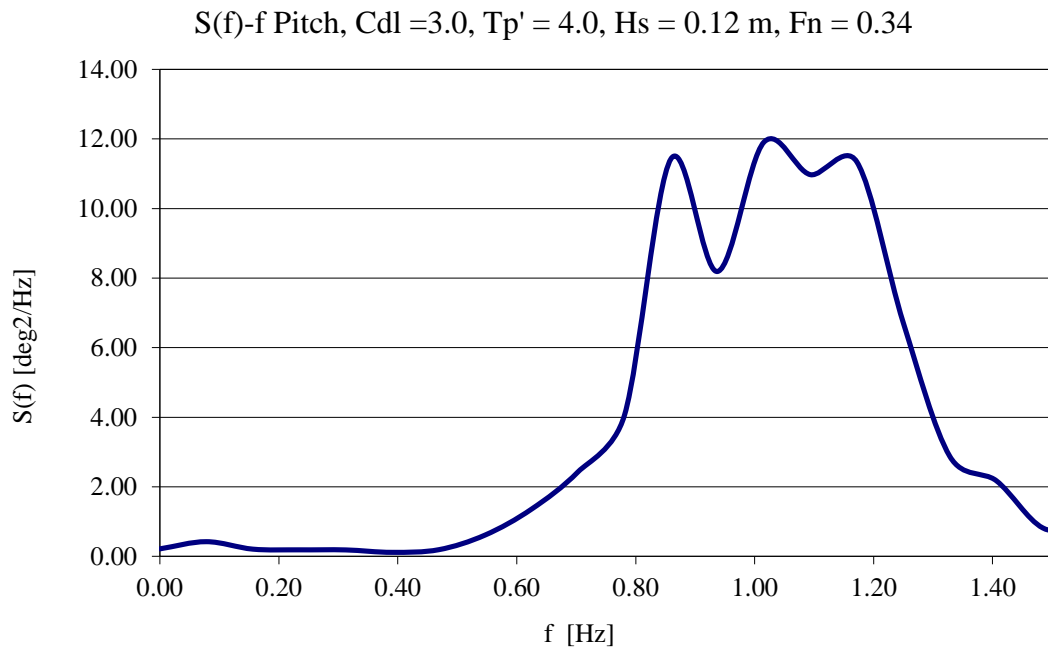
- Κύμα H12tp4.475



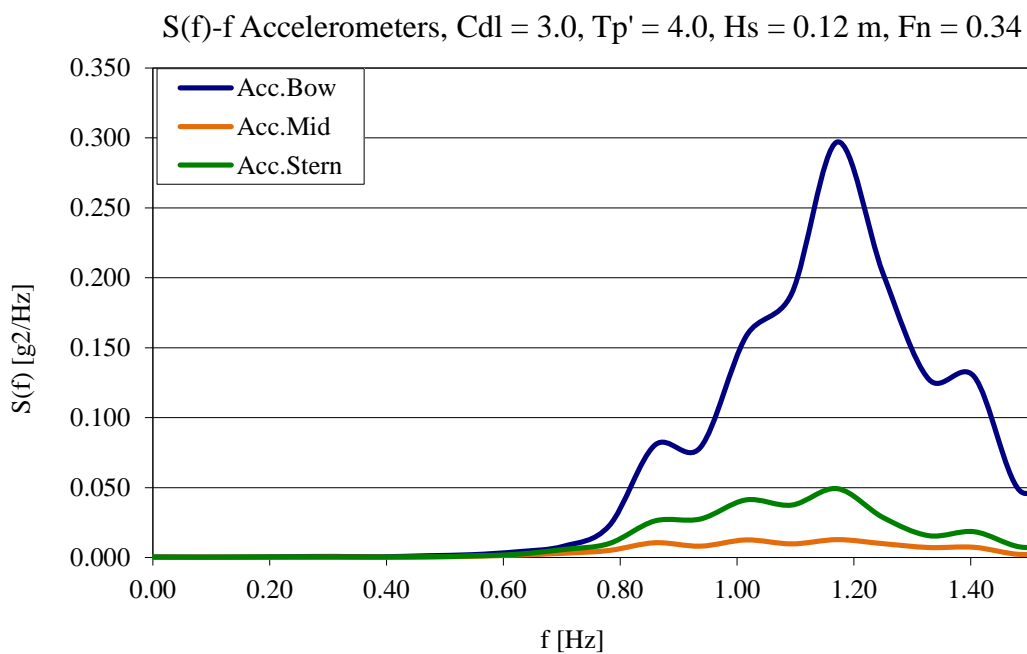
Σχήμα 5.73. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.74. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

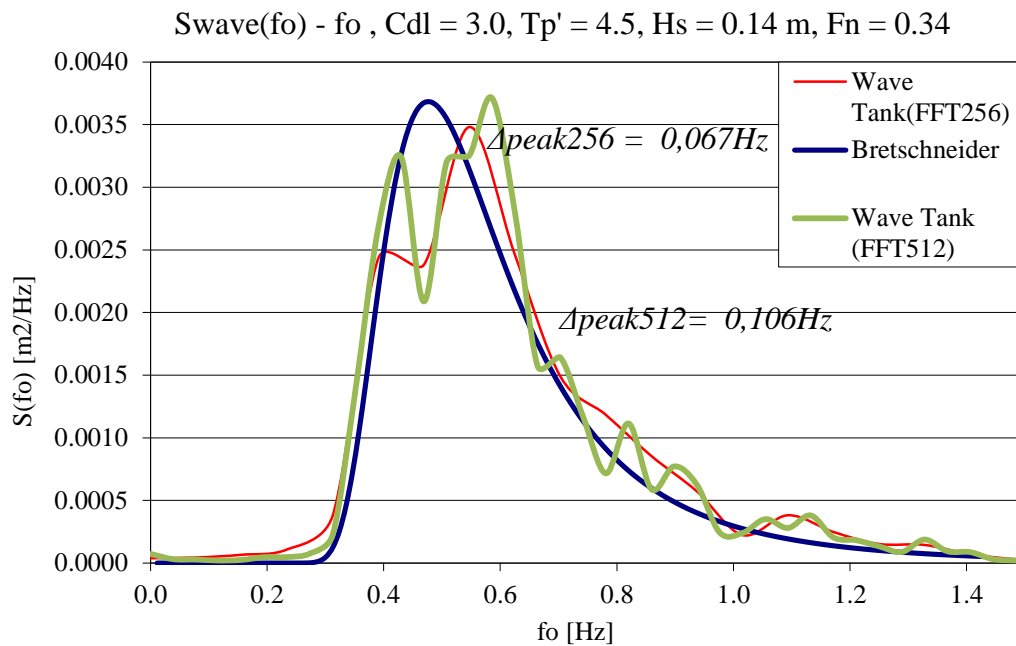


Σχήμα 5.75. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

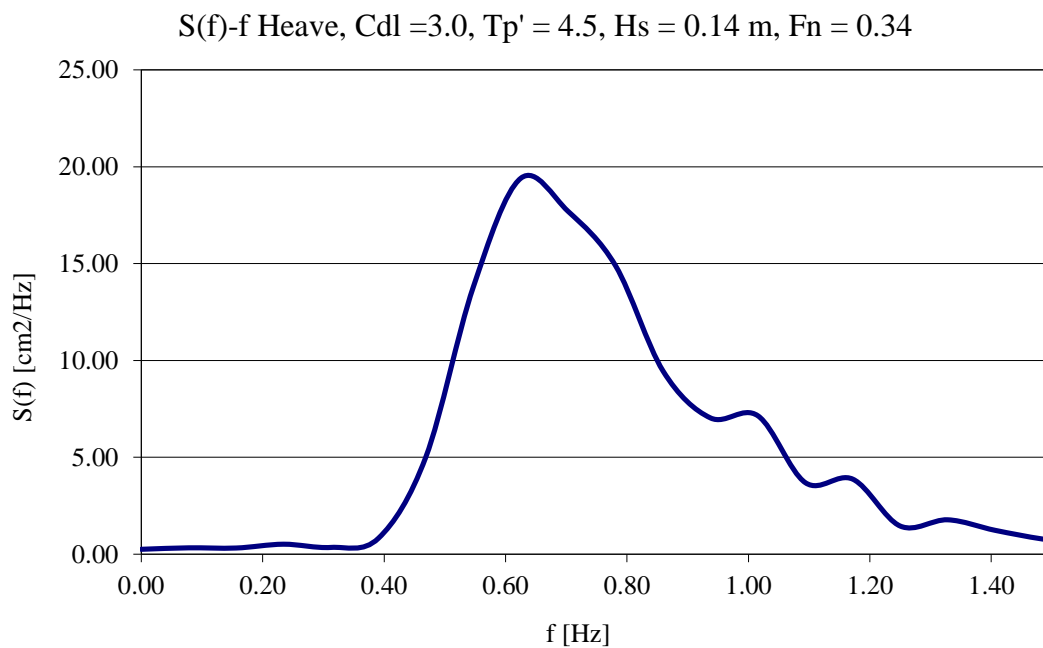


Σχήμα 5.76. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

- Κύμα H14tp45.475

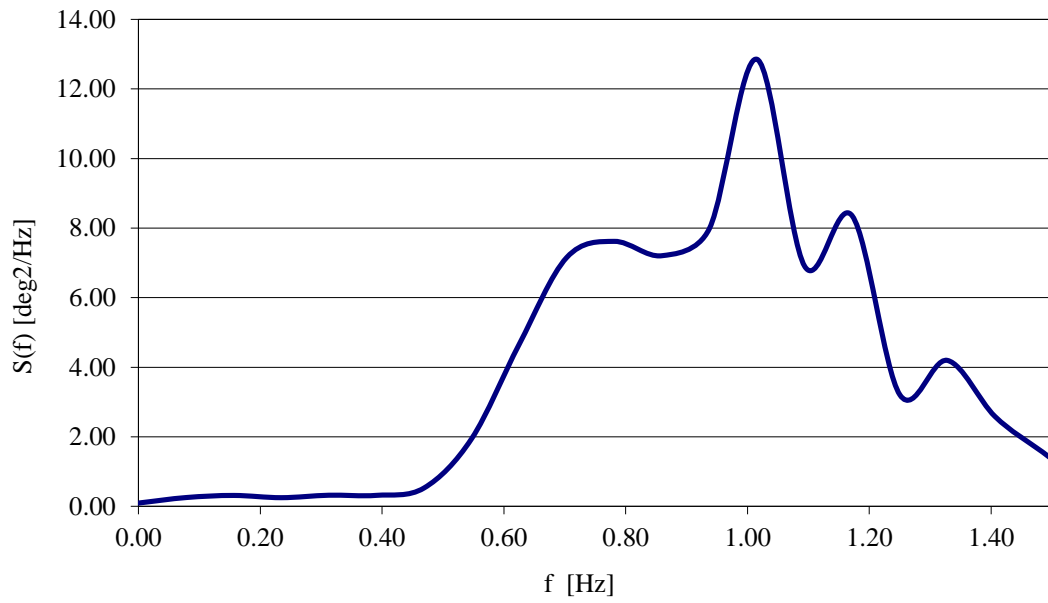


Σχήμα 5.77. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



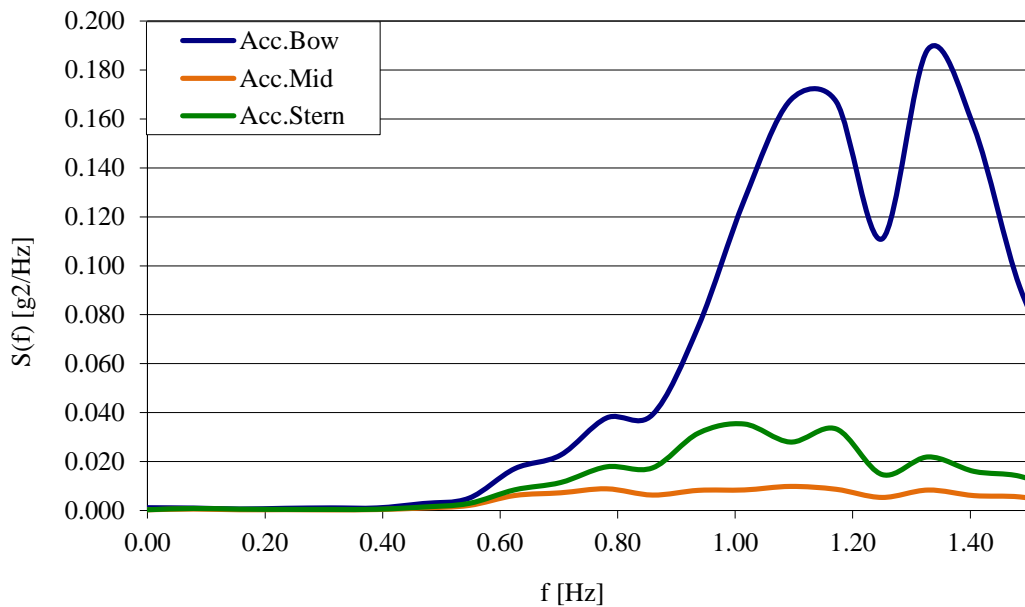
Σχήμα 5.78. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

$S(f)$ - f Pitch, $C_{dl} = 3.0$, $T_{p'} = 4.5$, $H_s = 0.14$ m, $F_n = 0.34$



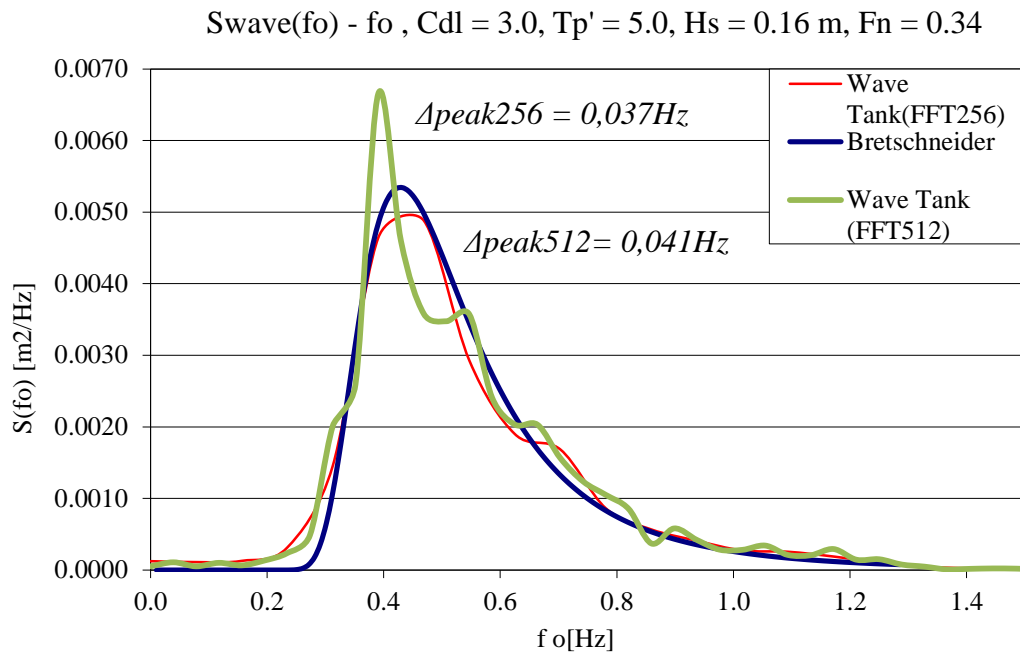
Σχήμα 5.79. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

$S(f)$ - f Accelerometers, $C_{dl} = 3.0$, $T_{p'} = 4.5$, $H_s = 0.14$ m, $F_n = 0.34$

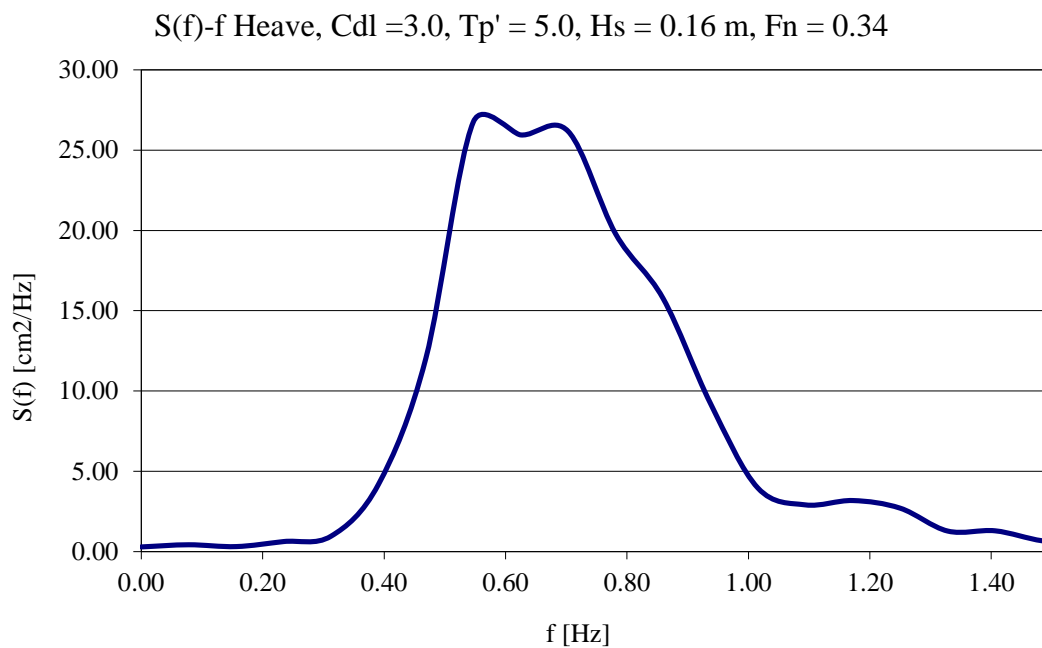


Σχήμα 5.80. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

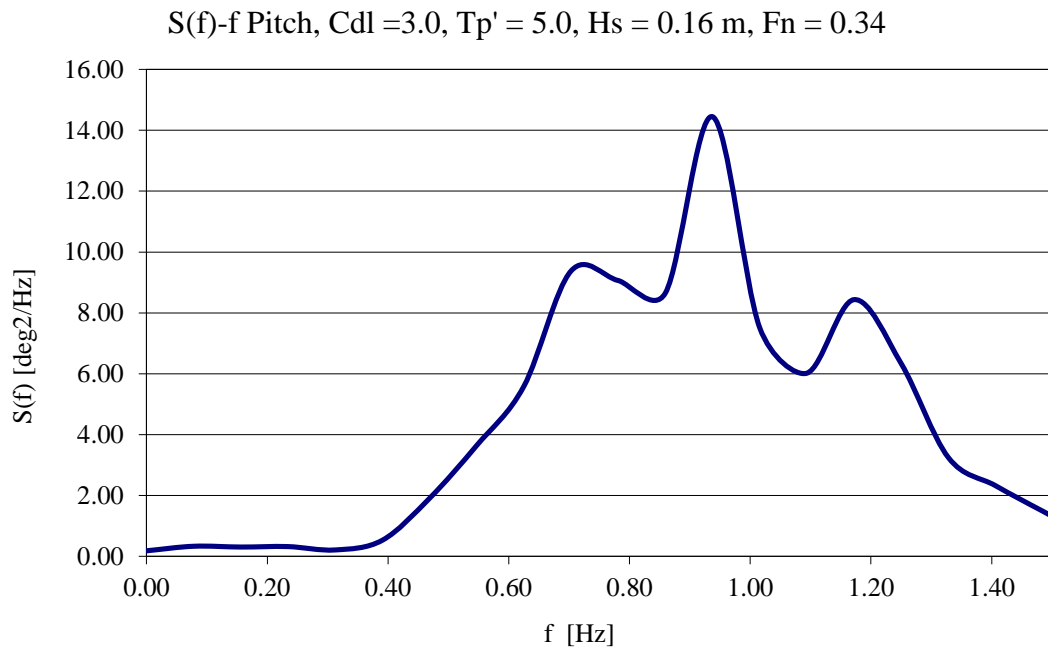
- Κύμα H16tp5.475



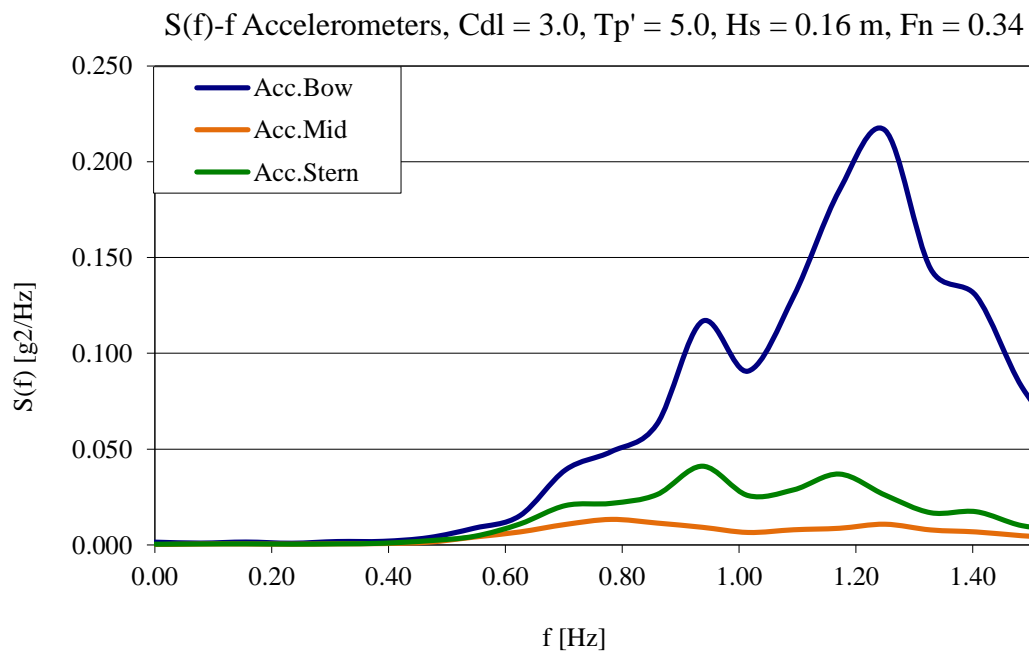
Σχήμα 5.81. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.82. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



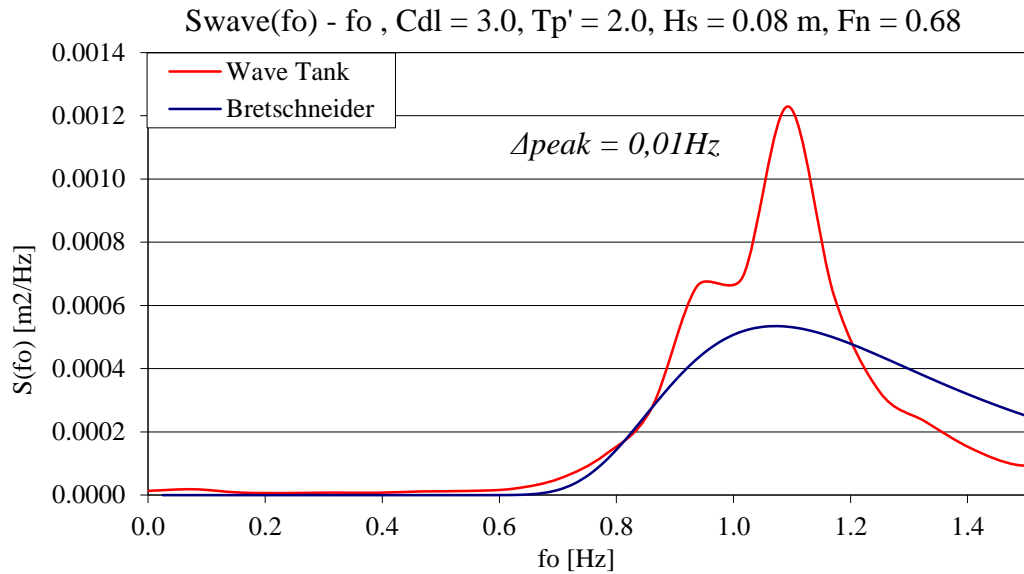
Σχήμα 5.83. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



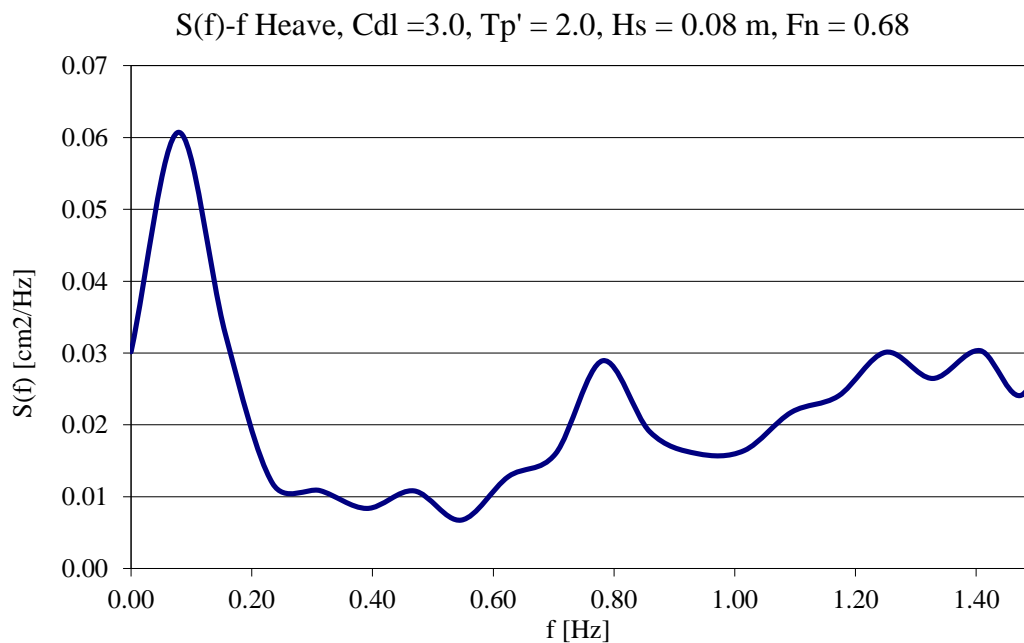
Σχήμα 5.84. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

Για την μεγάλη ταχύτητα, $Fn = 0.68$:

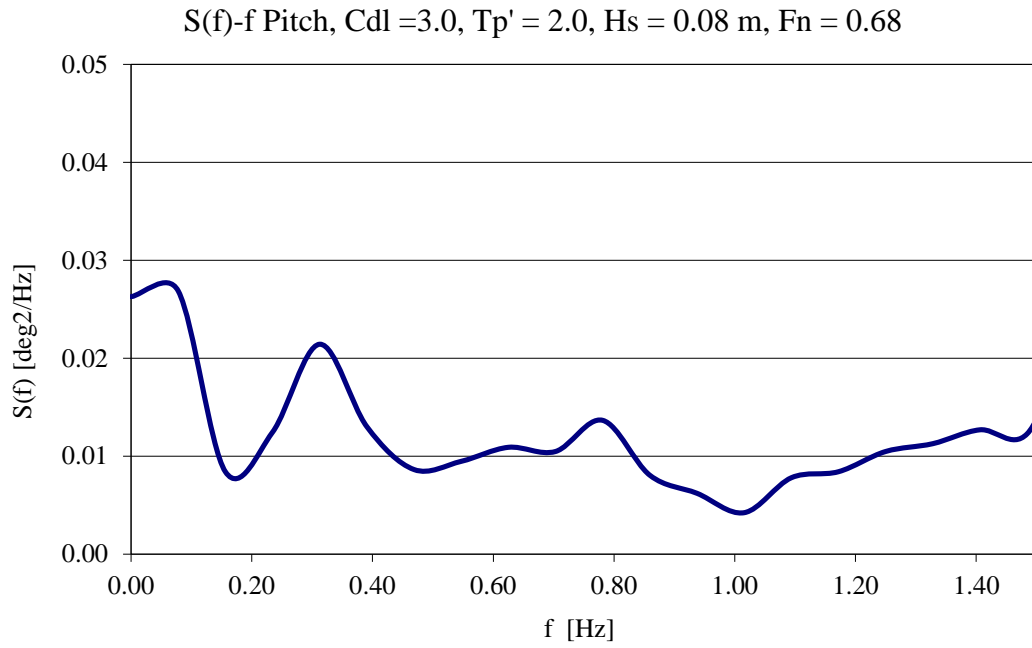
- Κύμα H8tp2.b



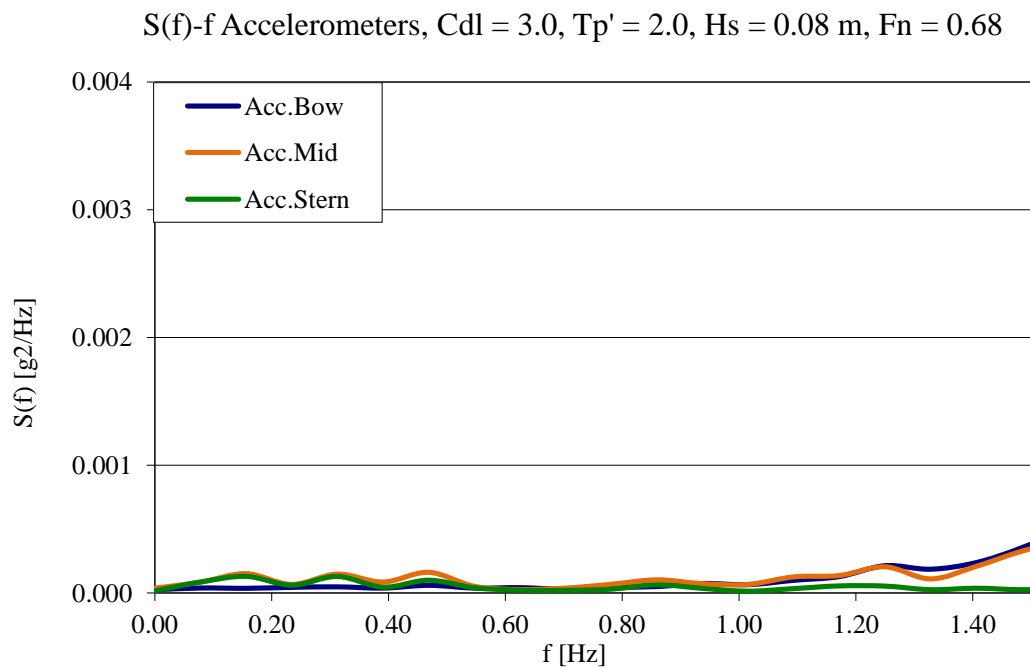
Σχήμα 5.85. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.86. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

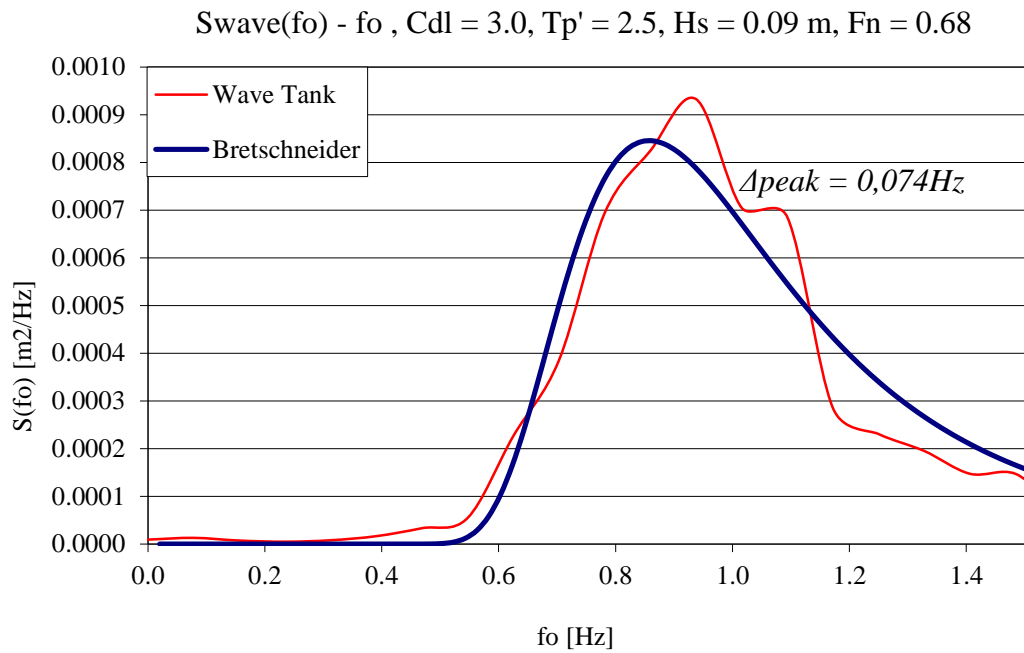


Σχήμα 5.87. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

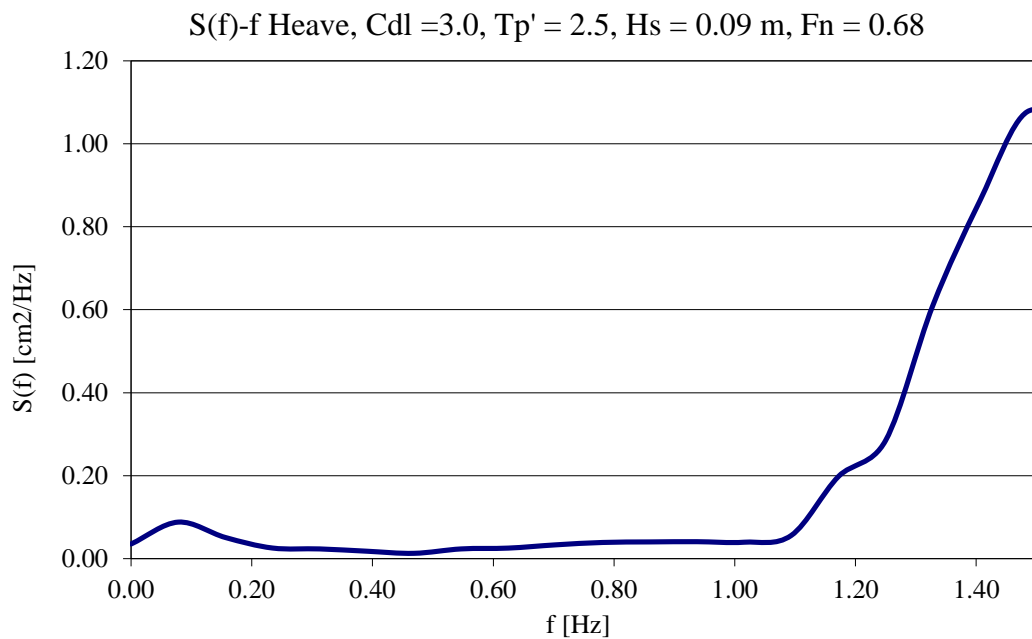


Σχήμα 5.88. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

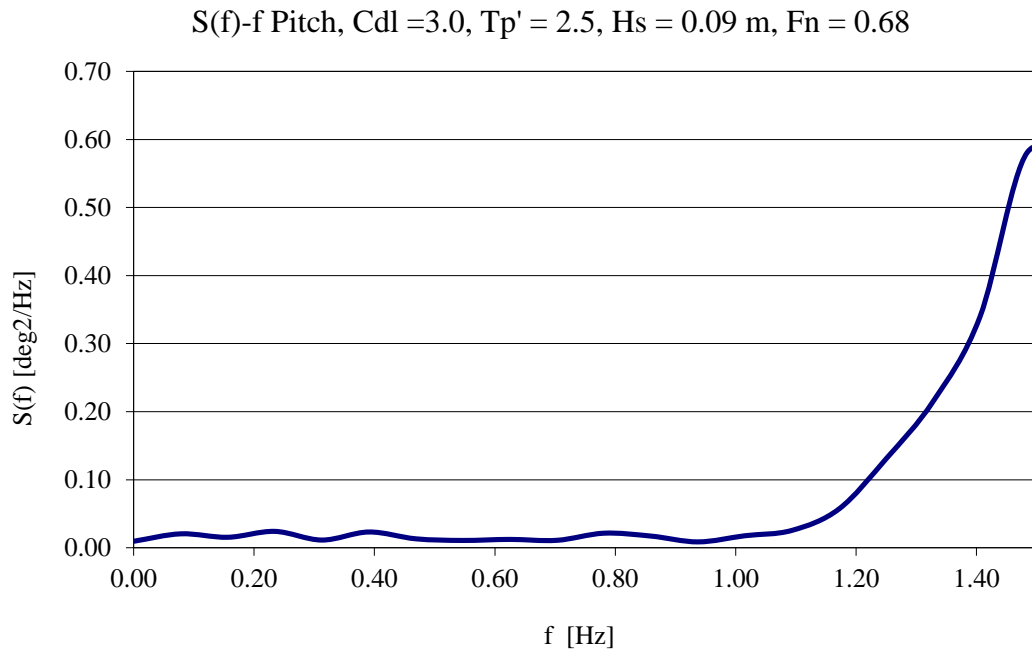
- Κύμα H9tp25.475



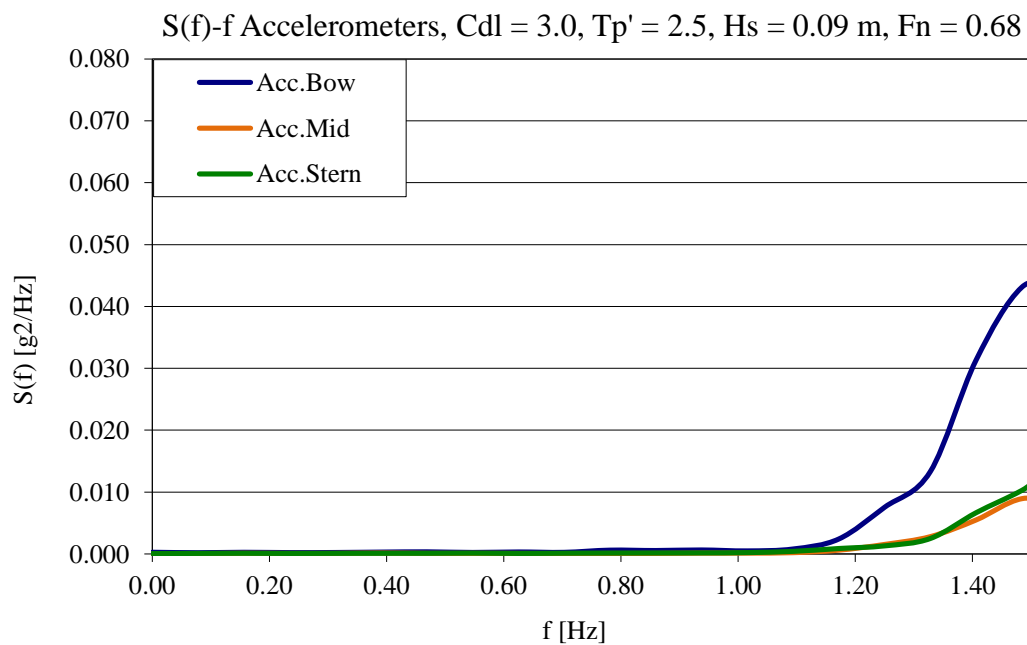
Σχήμα 5.89. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.90. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

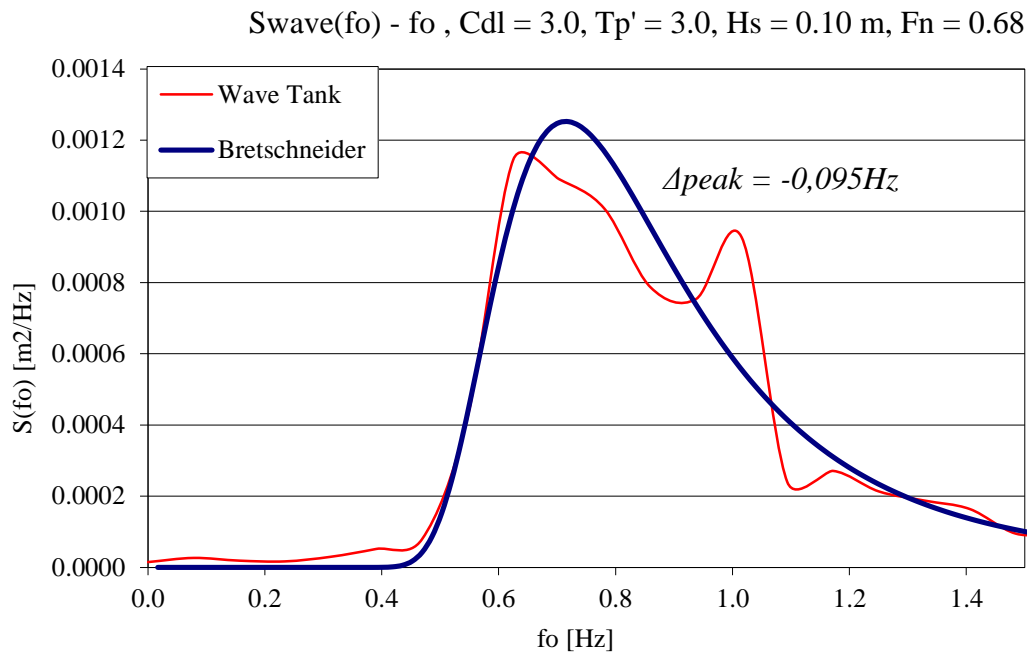


Σχήμα 5.91. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

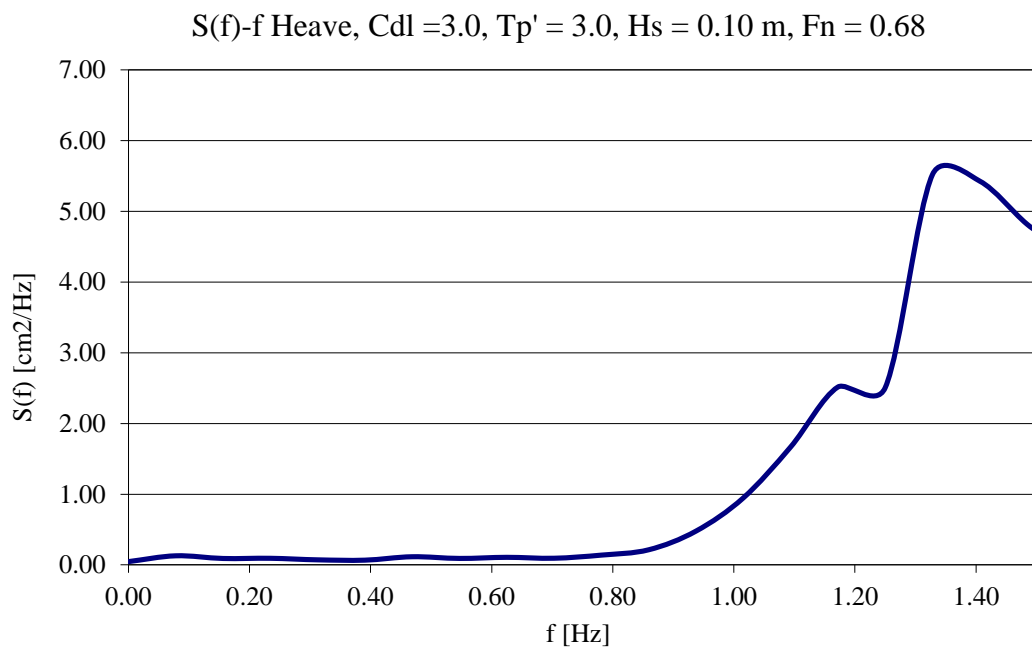


Σχήμα 5.92. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

- Κύμα H10tp3.475

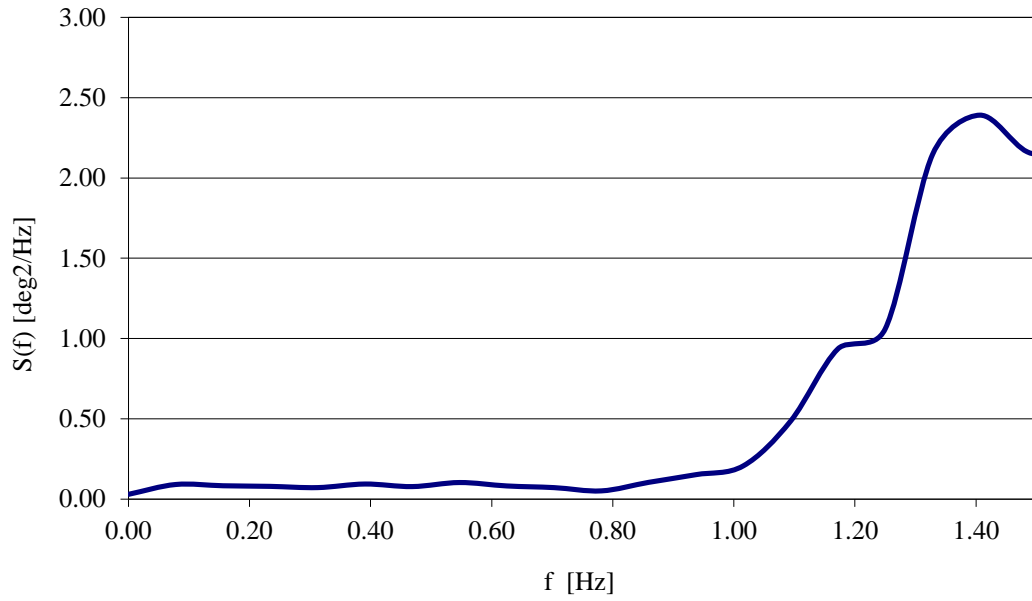


Σχήμα 5.93. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



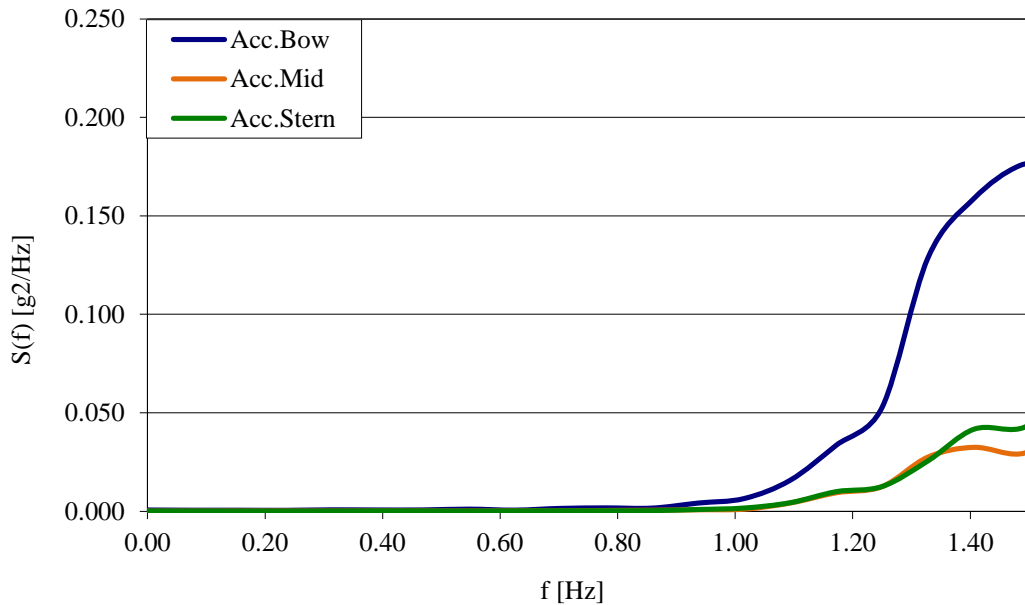
Σχήμα 5.94. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

S(f)-f Pitch, Cdl =3.0, Tp' = 3.0, Hs = 0.10 m, Fn = 0.68



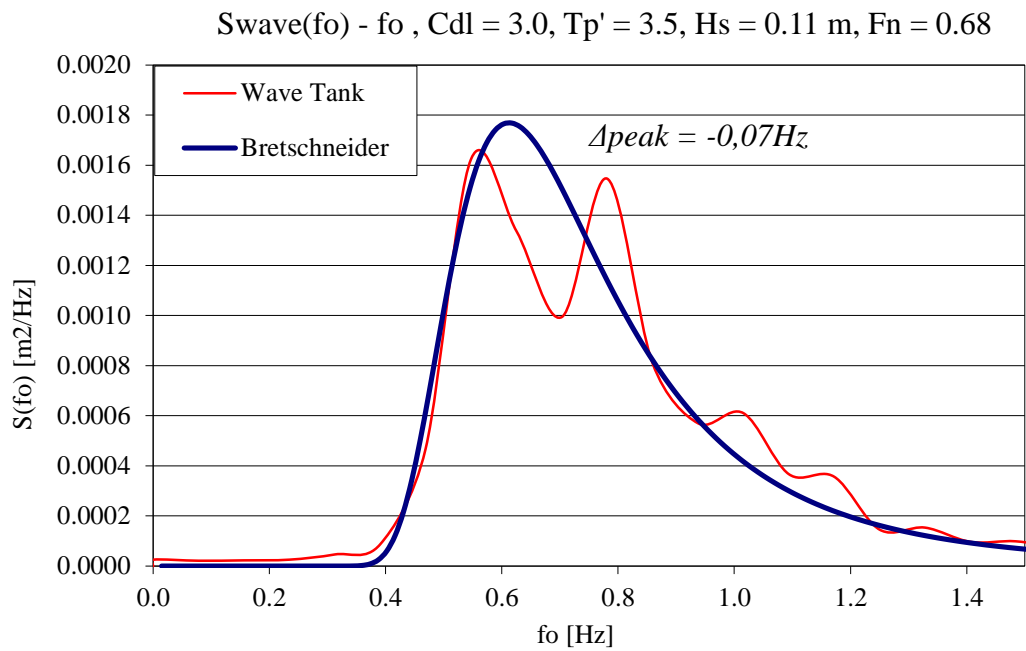
Σχήμα 5.95. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

S(f)-f Accelerometers, Cdl = 3.0, Tp' = 3.0, Hs = 0.10 m, Fn = 0.68

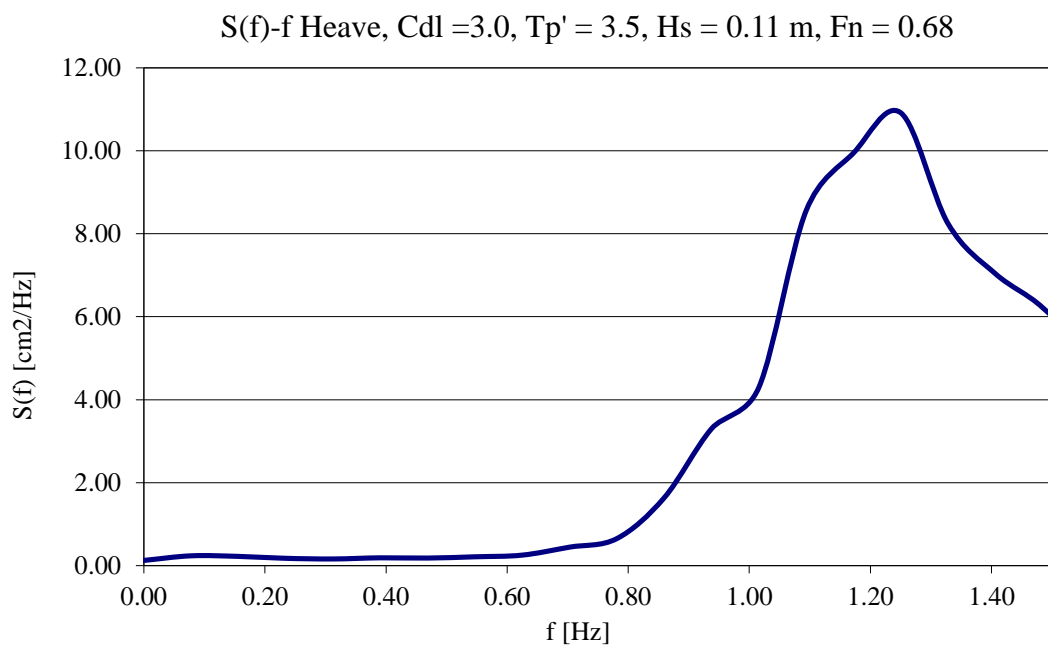


Σχήμα 5.96. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

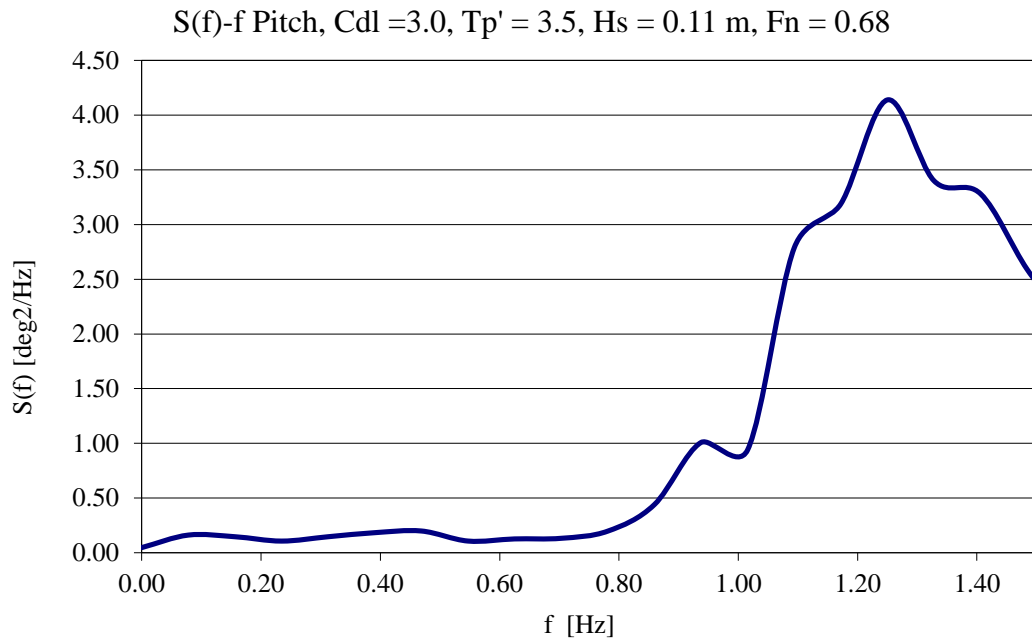
- Κύμα H11tp35.475



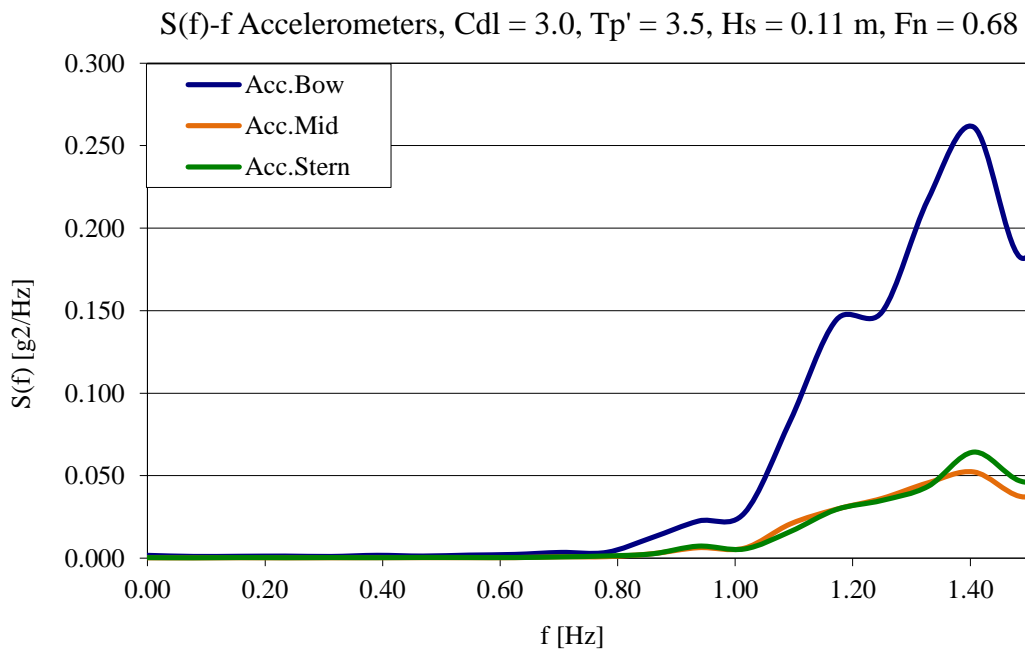
Σχήμα 5.97. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.98. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

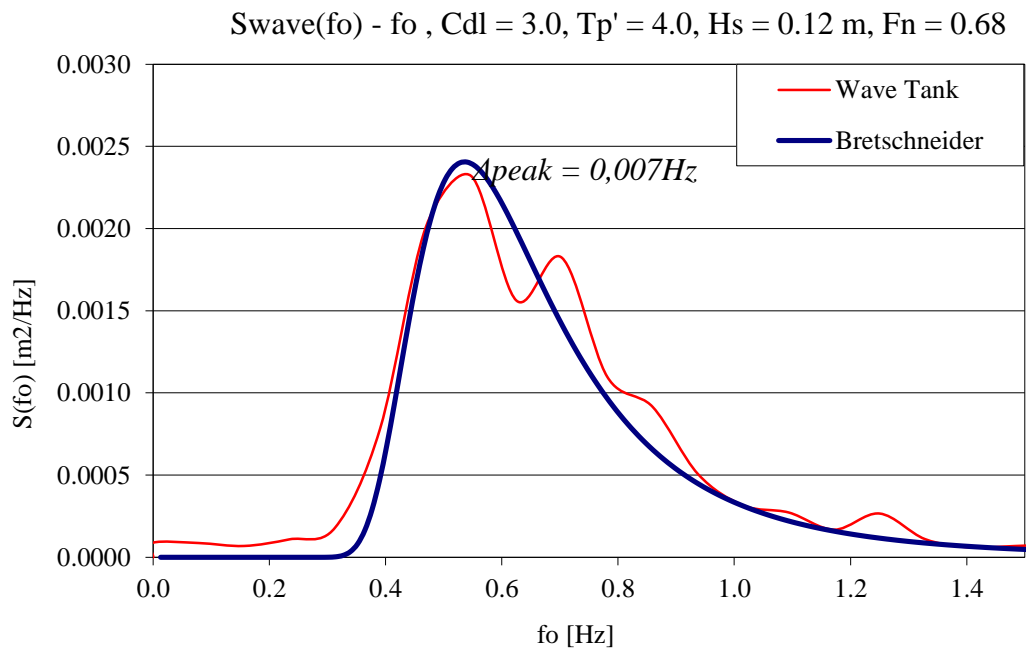


Σχήμα 5.95. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

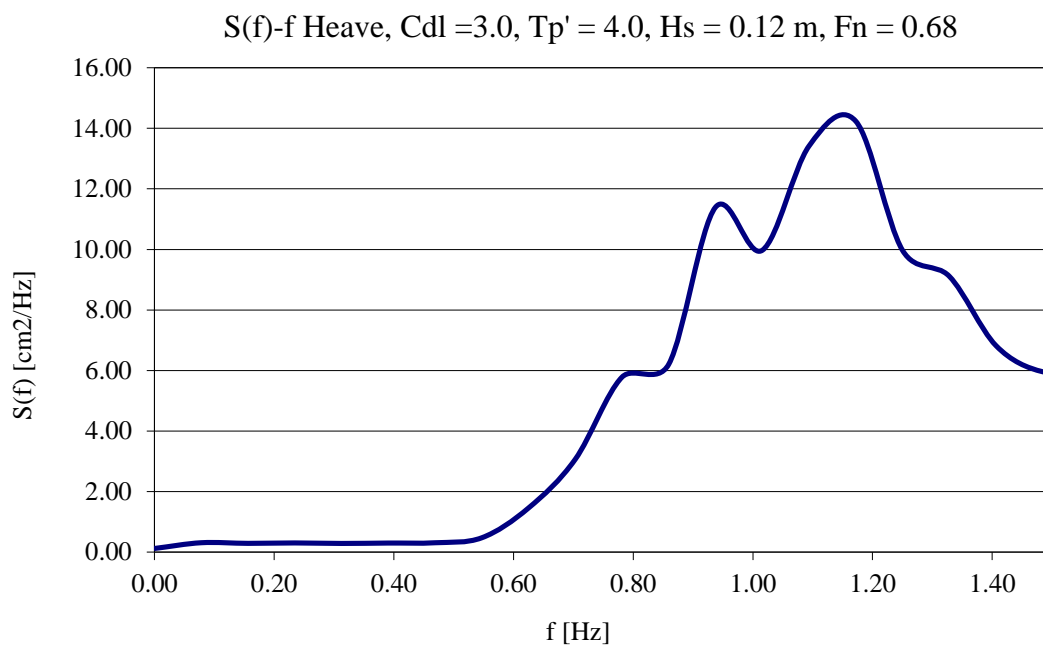


Σχήμα 5.100. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

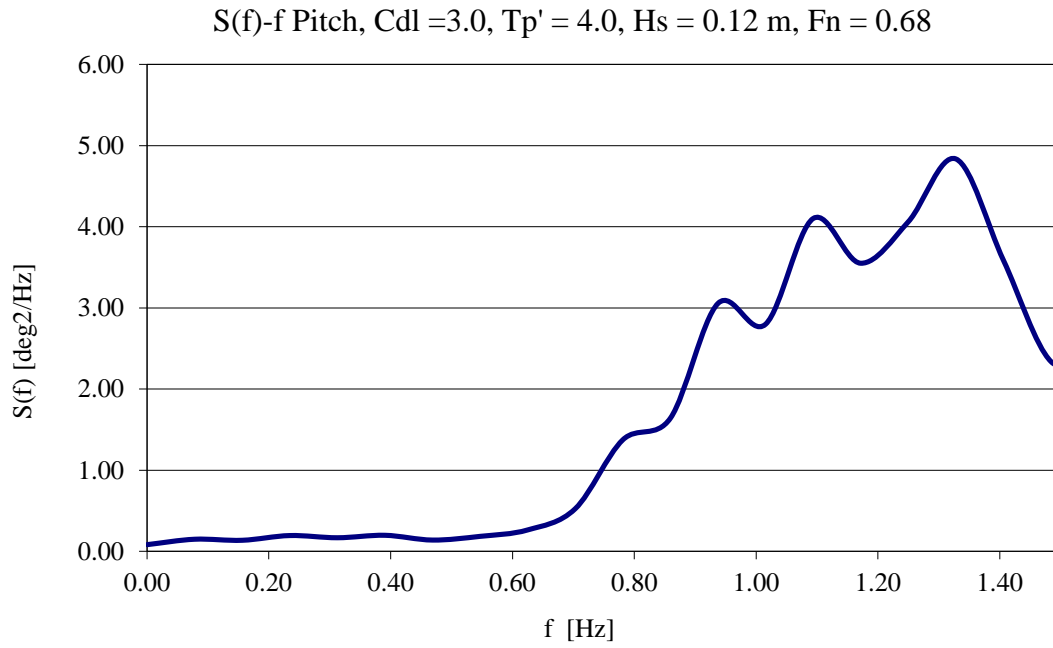
- Κύμα H12tp4.475



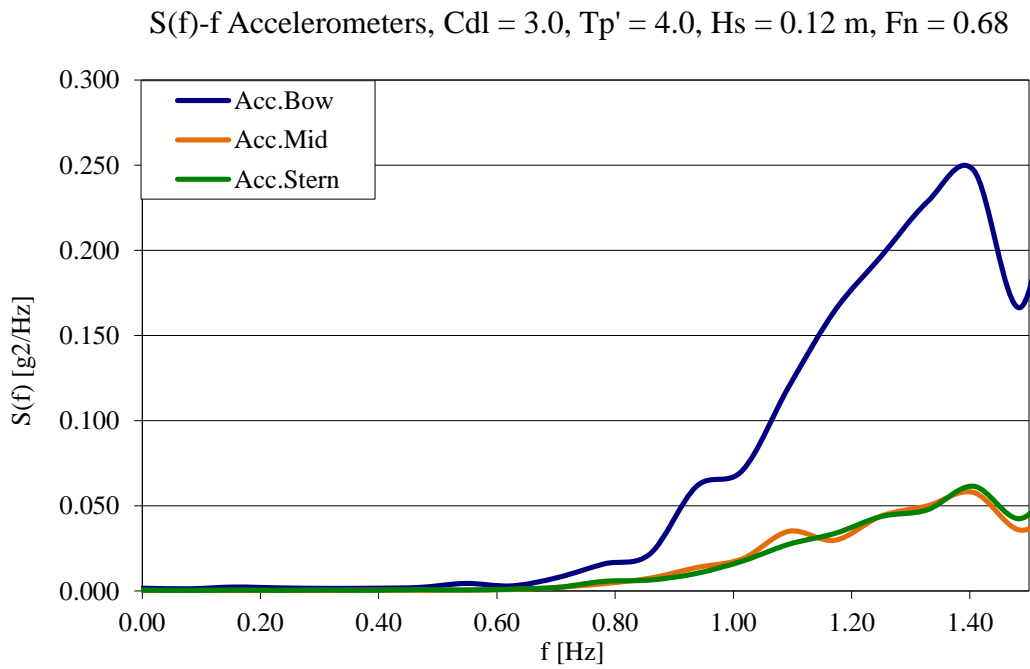
Σχήμα 5.101. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.102. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

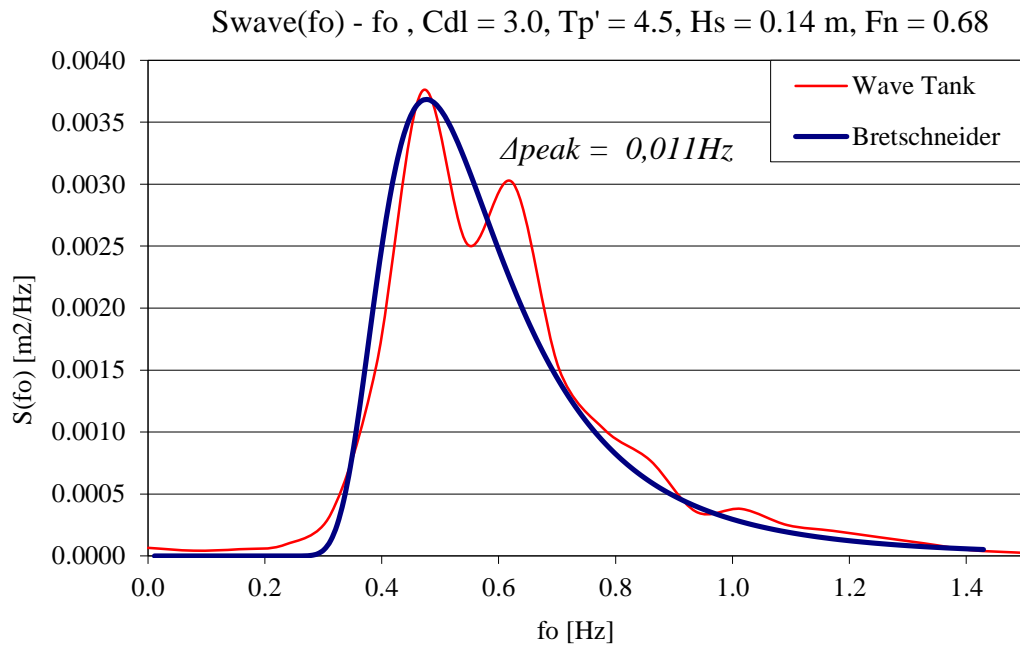


Σχήμα 5.103. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

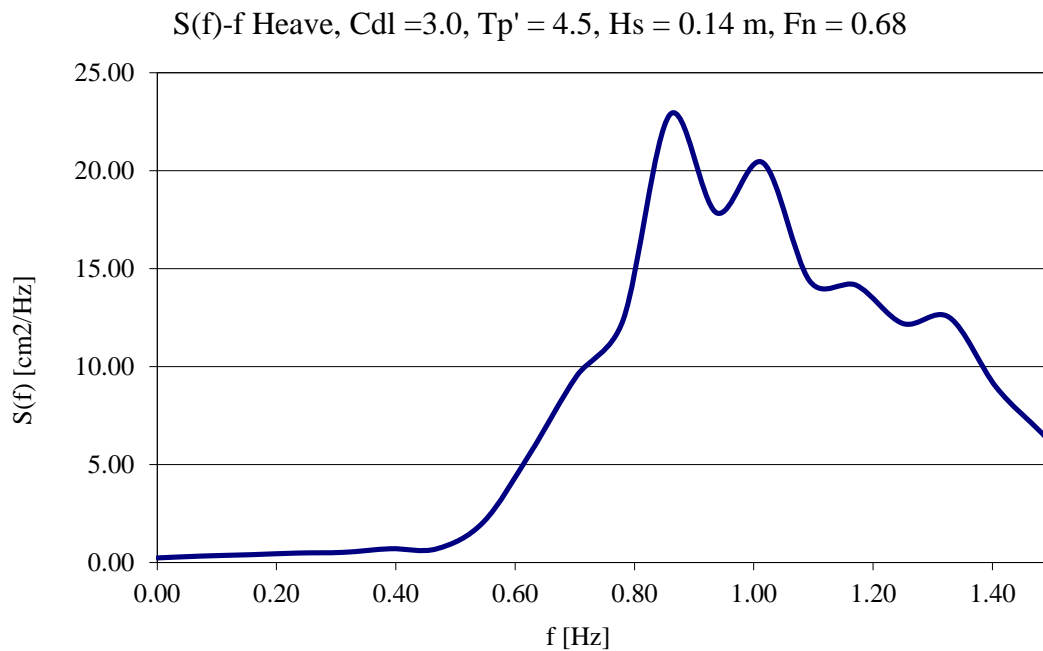


Σχήμα 5.104. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

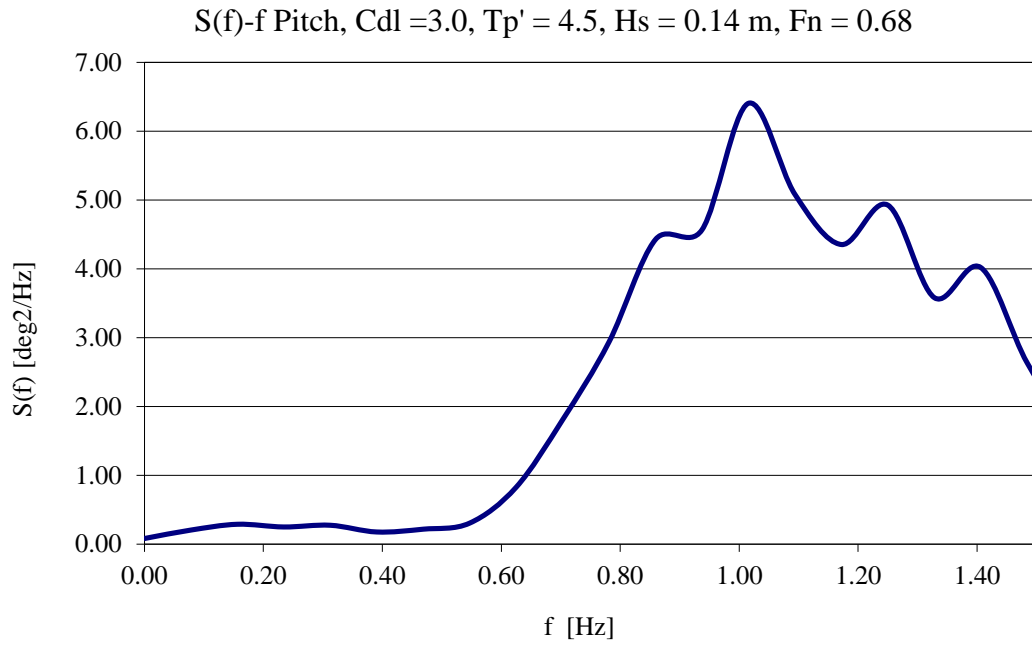
- Κύμα H14tp45.475



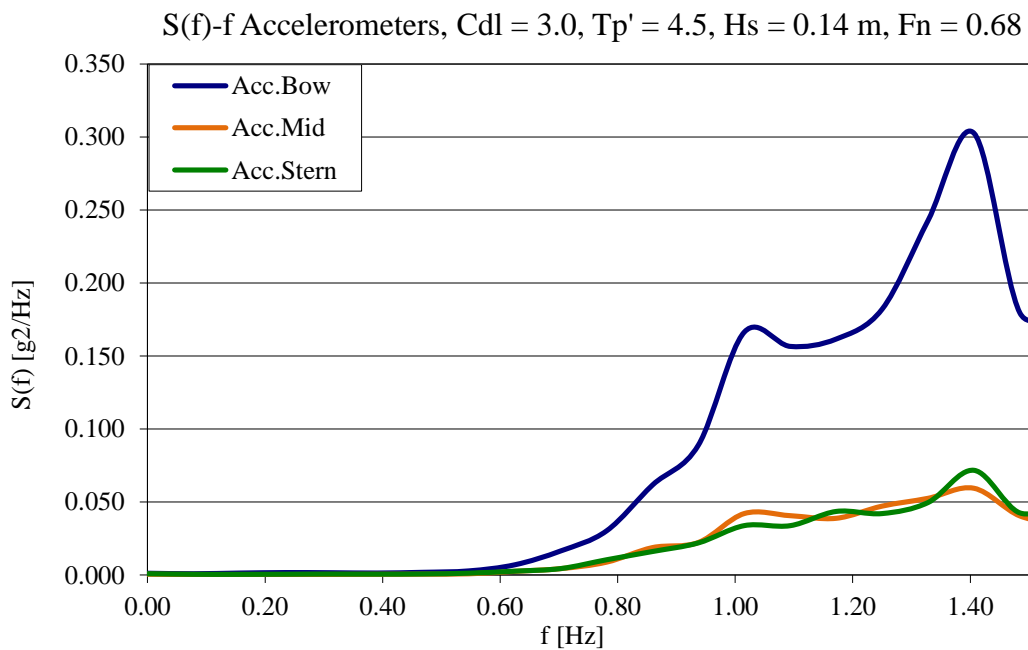
Σχήμα 5.105. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.106. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

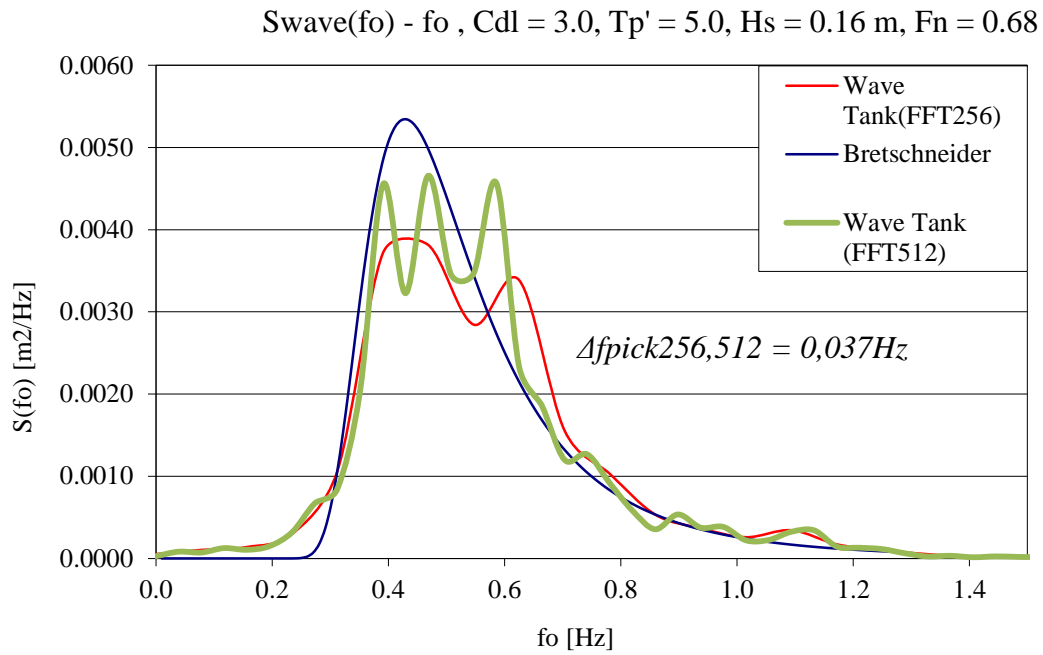


Σχήμα 5.107. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

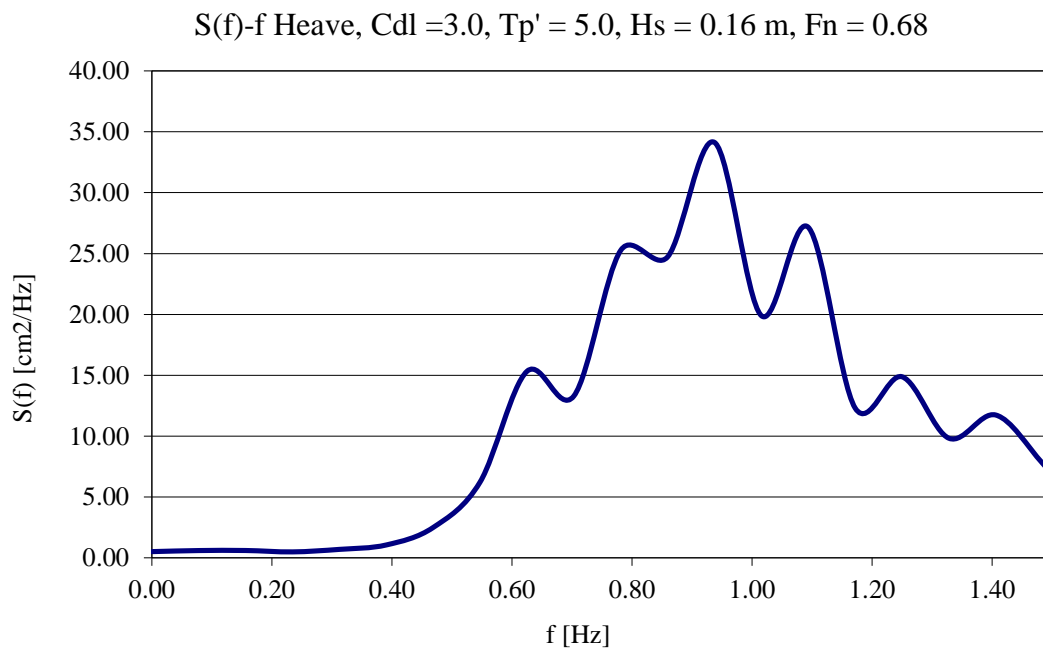


Σχήμα 5.108. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

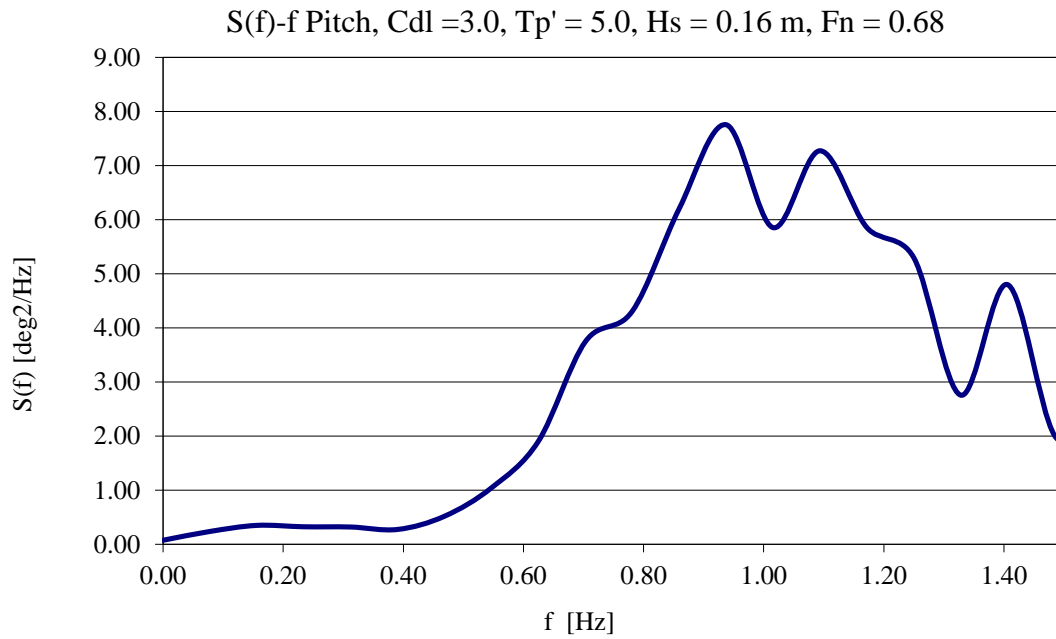
- Κύμα H16tp5.475



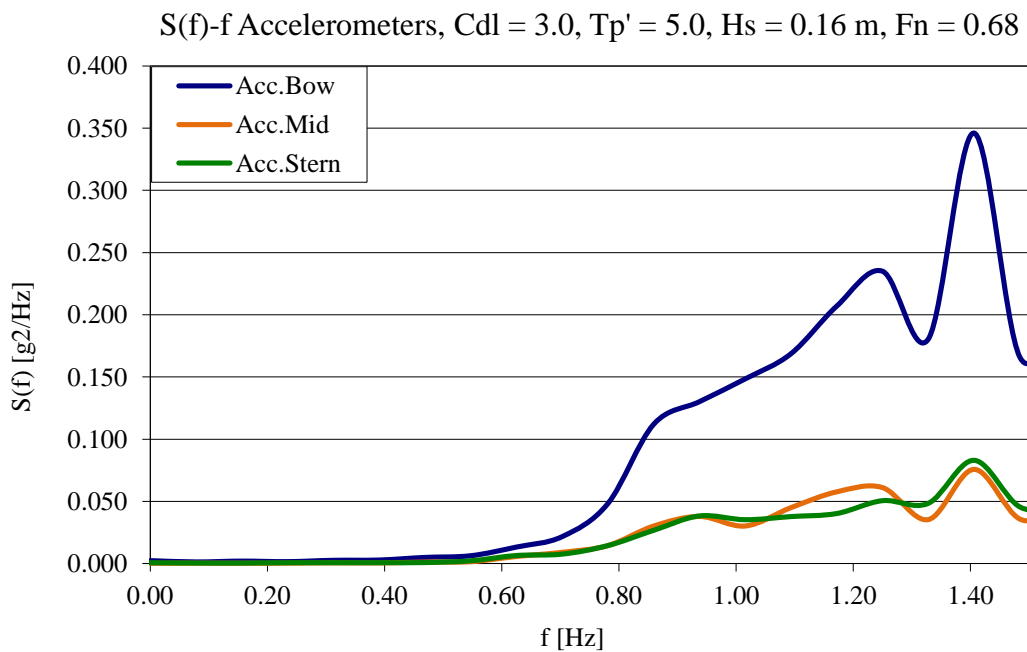
Σχήμα 5.109. Θεωρητική και πειραματική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 5.110. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



Σχήμα 5.111. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



Σχήμα 5.112. Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος επιταχύνσεων

Παρατηρήσεις

- Η παρουσίαση των διαγραμμάτων έγινε για την περιοχή συχνοτήτων 0-1.5Hz, καθότι μεγαλύτερες τιμές δεν συναντώνται στο θαλάσσιο περιβάλλον
- Στα διαγράμματα της θεωρητικής και πειραματικής συνάρτησης φασματικής πυκνότητας κύματος, αναγράφεται η **απόκλιση** της κορυφής του πειραματικού φάσματος από το θεωρητικό. Αυτό αποτελεί μέτρο αξιοπιστίας της πειραματικής μέτρησης.
- Στα μεγαλύτερα φάσματα, εκτός της ανάλυσης Fourier με 256 σημεία, έγινε ανάλυση Fourier και με 512 σημεία.
- Βασική παράμετρος για την σύγκριση των φασμάτων των κυμάτων μεταξύ τους ήταν η **αδιάστατη περίοδος T_p'** , ώστε να γίνεται σύγκριση ανεξαρτήτου του μοντέλου δοκιμών.
- Η **κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη** είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερη σε σχέση με τις κατακόρυφες επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους και στην πρύμνη. Ακολουθεί η επιτάχυνση στην πρύμνη και τελευταία αυτή στο κέντρο βάρους. Αυτό συμβαίνει επειδή η επιτάχυνση στο κέντρο βάρους δεν επηρεάζεται από την κίνηση Pitch.
- Στο μικρότερο κύμα, σε όλες τις καταστάσεις και για τα δύο μοντέλα, παρατηρούνται **πολύ μικρές τιμές** και αυξημένος θόρυβος. Αυτό συμβαίνει διότι: α) σε αυτές τις καταστάσεις ο κυματιστήρας παράγει κύματα με πολύ υψηλή συχνότητα, δουλεύοντας στα όριά του και το κύμα που παράγει, “σπάει” (η κορυφή του αποκολλάται λόγω του μεγέθους του) και β) επειδή το κύμα είναι πολύ μικρής περιόδου, οι μετρήσεις για επιταχύνσεις, προνευτασμό και κατακόρυφη κίνηση είναι

πολύ μικρές στα όρια του θορύβου που παράγεται στα ηλεκτρονικά όργανα.

5.2

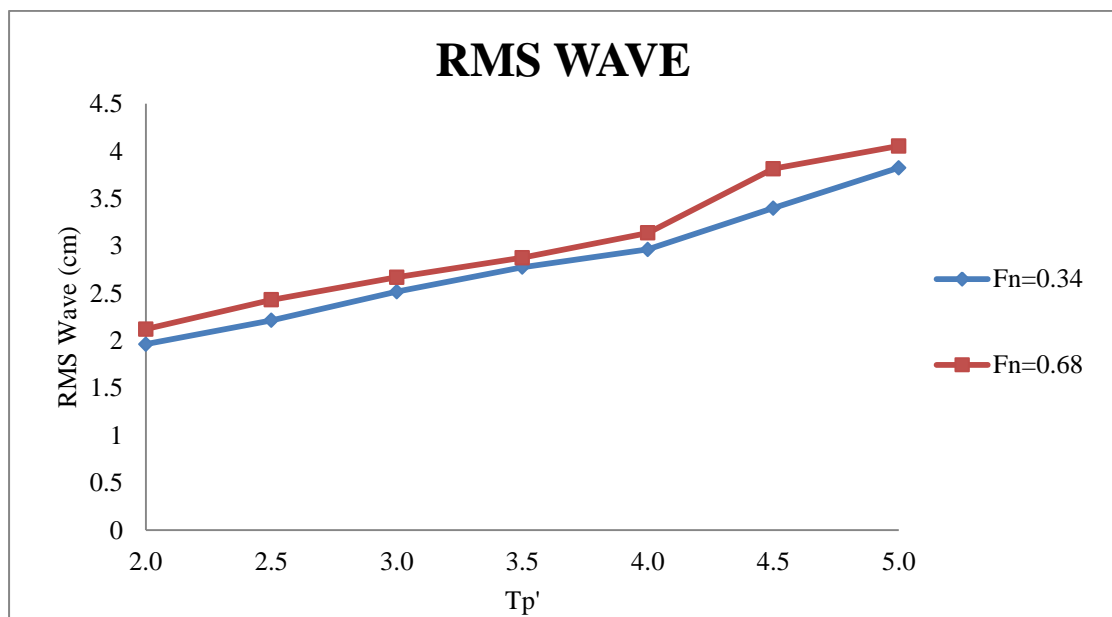
Η επίδραση της ταχύτητας

Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα των rms τιμών κάθε απόκρισης και για την δύο ταχύτητες, συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής.

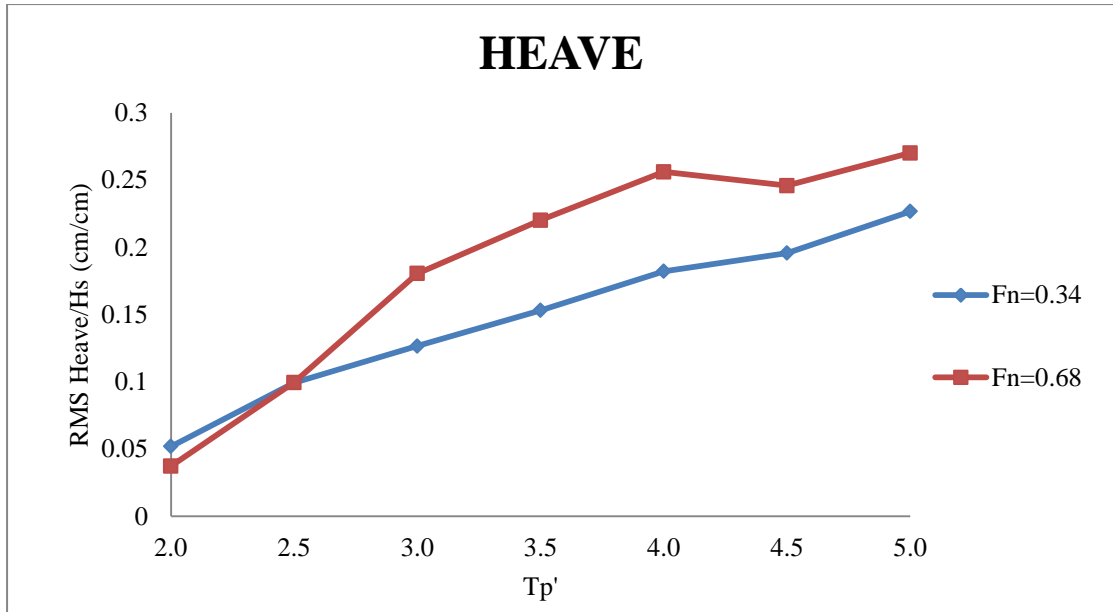
- *RMS τιμή ανύψωσης κύματος από τον ακίνητο αισθητήρα Wave Tank Probe*
- *RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Vertical Acceleration Bow) πολλαπλασιασμένη με τον λόγο μήκους ισάλου (Lwl) προς το σημαντικό ύψος κύματος H_s [$g*cm/cm$] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T'_{peak})*
- *RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Vertical Acceleration Middle) πολλαπλασιασμένη με τον λόγο μήκους ισάλου (Lwl) προς το σημαντικό ύψος κύματος H_s [$g*cm/cm$] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T'_{peak})*
- *RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρόμνη (Vertical Acceleration Stern) πολλαπλασιασμένη με τον λόγο μήκους ισάλου (Lwl) προς το σημαντικό ύψος κύματος H_s [$g*cm/cm$] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T'_{peak})*

- *RMS* τιμή Πρόσθετης Αντίστασης (*Added Resistance*) πολλαπλασιασμένη με τον λόγο μήκους ισάλου (Lwl) προς το γινόμενο της πυκνότητας, του τετραγώνου του πλάτους ισάλου B και του τετραγώνου του σημαντικού ύψους κύματος H_s συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T'_{peak})
- *RMS* τιμή Κατακόρυφης Κίνησης (*Heave*) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [cm/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T'_{peak})
- *RMS* τιμή Κίνησης Προνευτασμού (*Pitch*) πολλαπλασιασμένη με τον λόγο μήκους ισάλου (Lwl) προς το σημαντικό ύψος κύματος H_s [$g*cm/cm$] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T'_{peak})

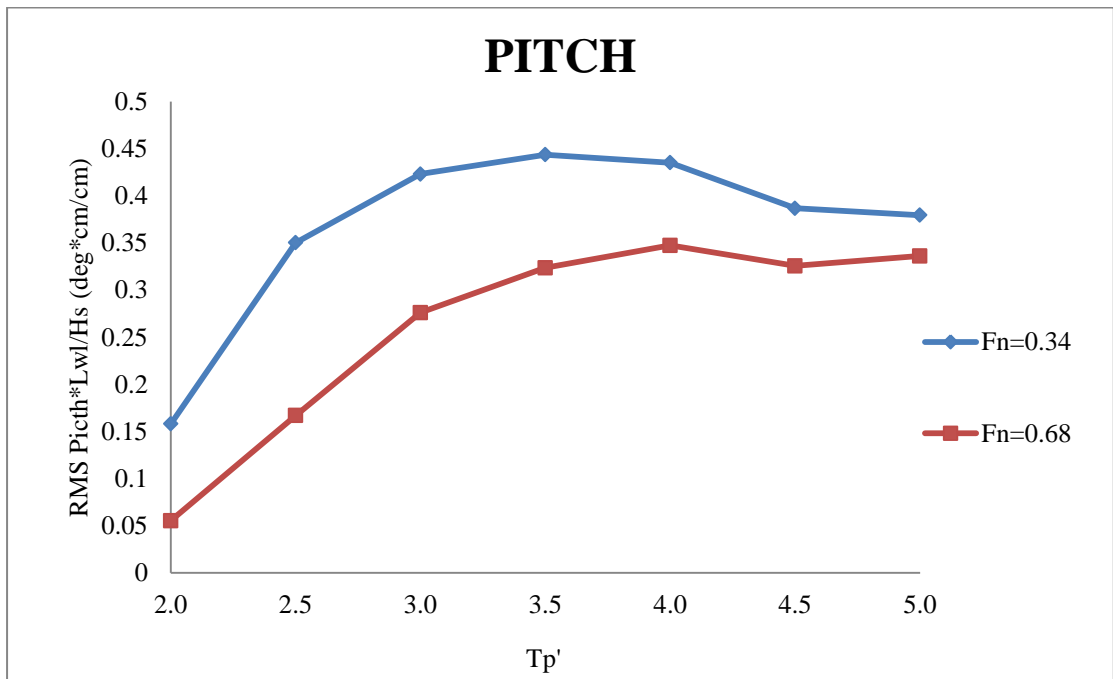
✓ Για το μοντέλο NTUA-146/98 ($L/B = 6.25$):



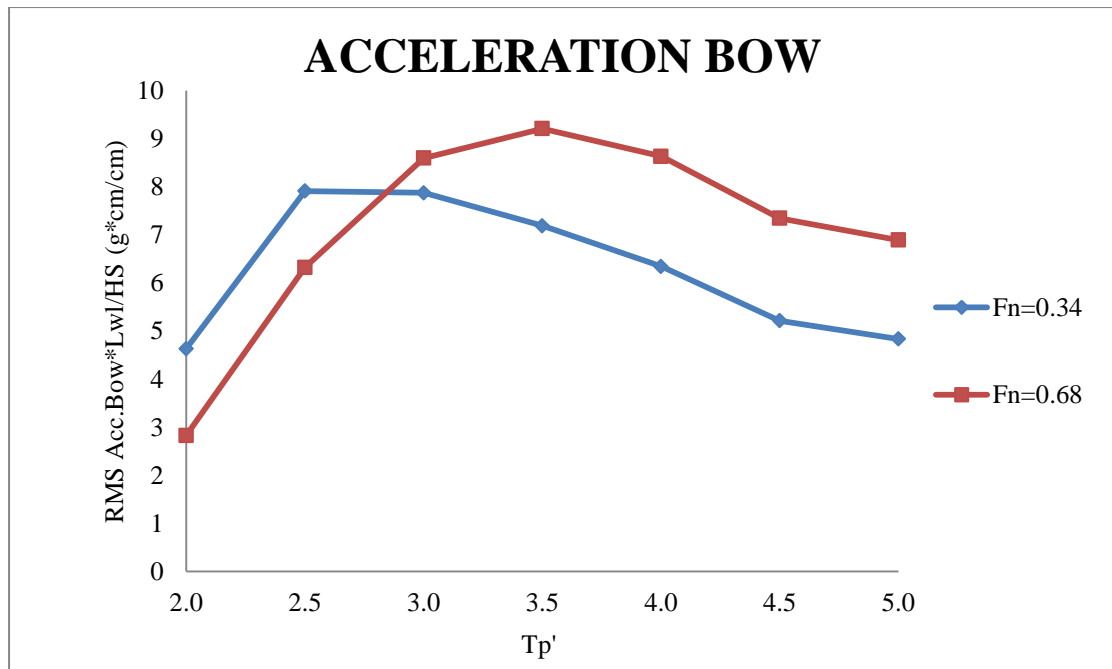
Σχήμα 5.113. *RMS* τιμές ανύψωσης κύματος



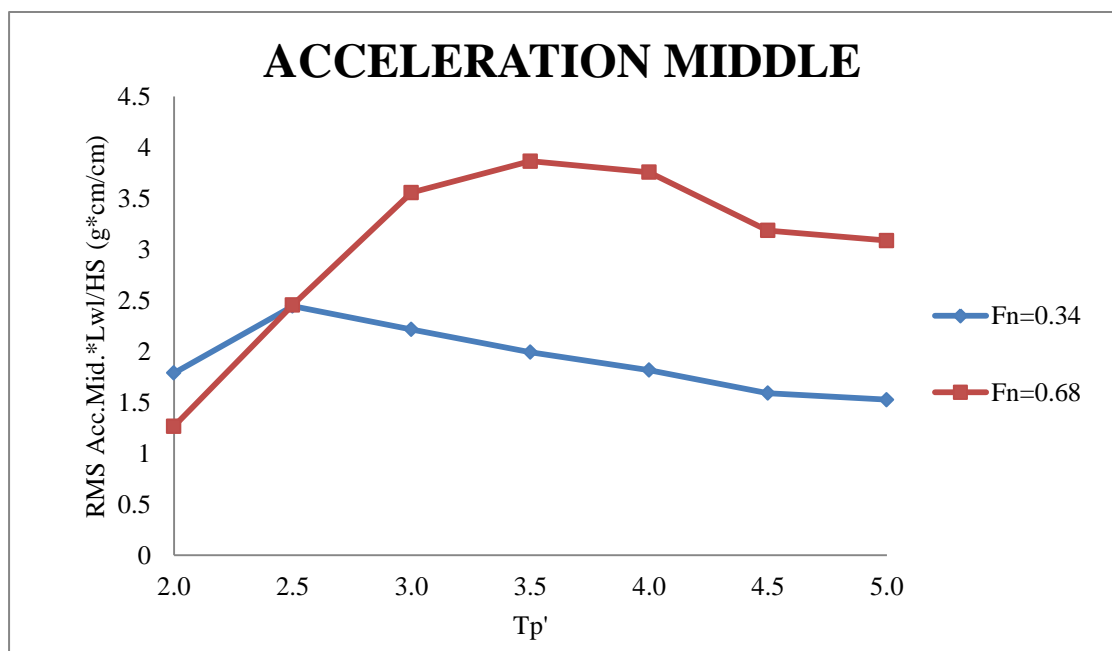
Σχήμα 5.114. Τιμές κατακόρυφης κίνησης



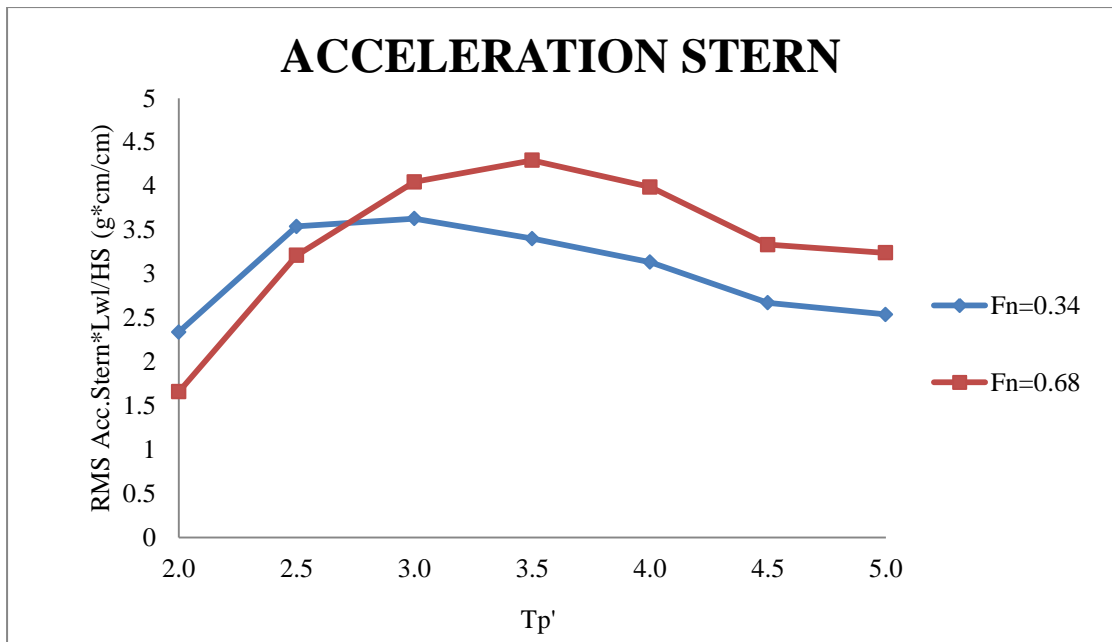
Σχήμα 5.115. Τιμές προνευτασμού



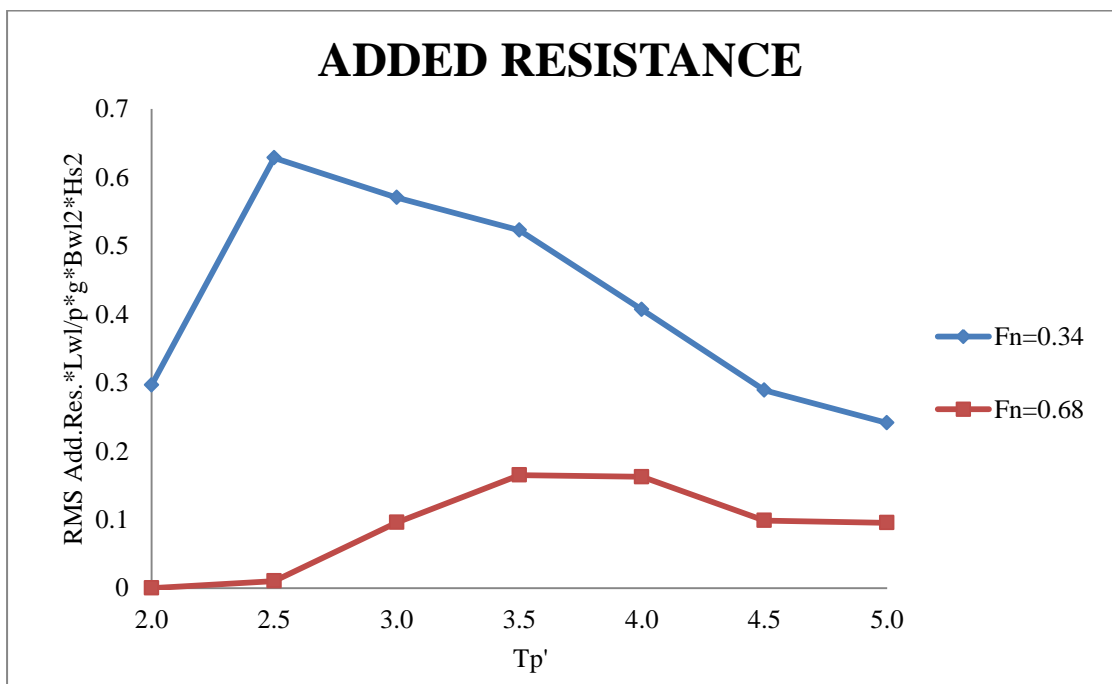
Σχήμα 5.116. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Σχήμα 5.117. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

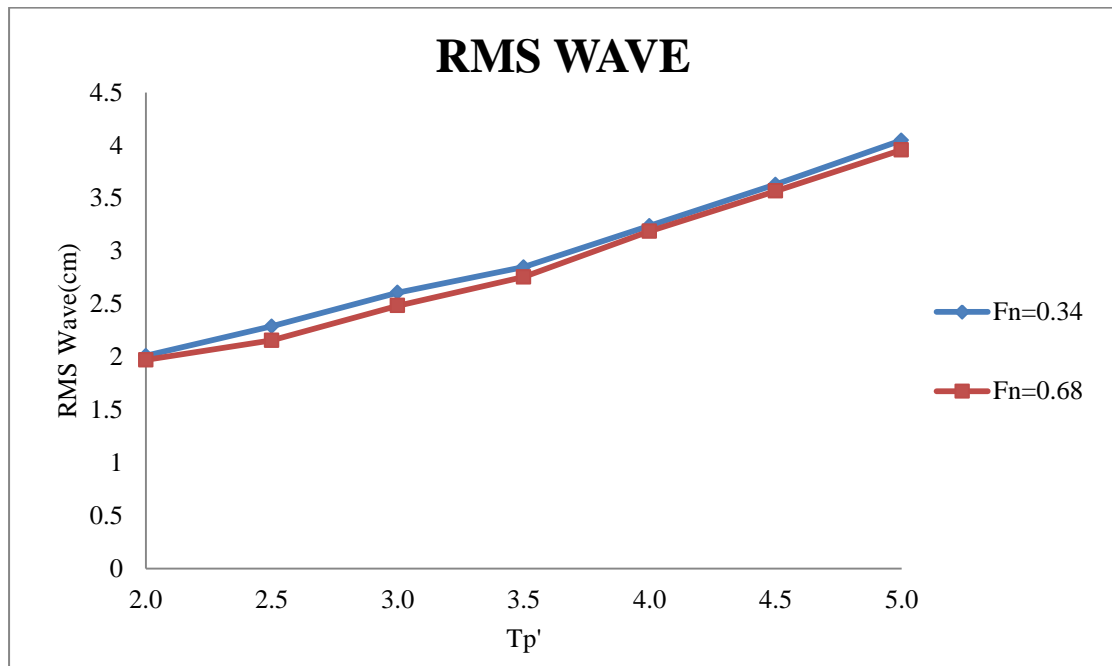


Σχήμα 5.118. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

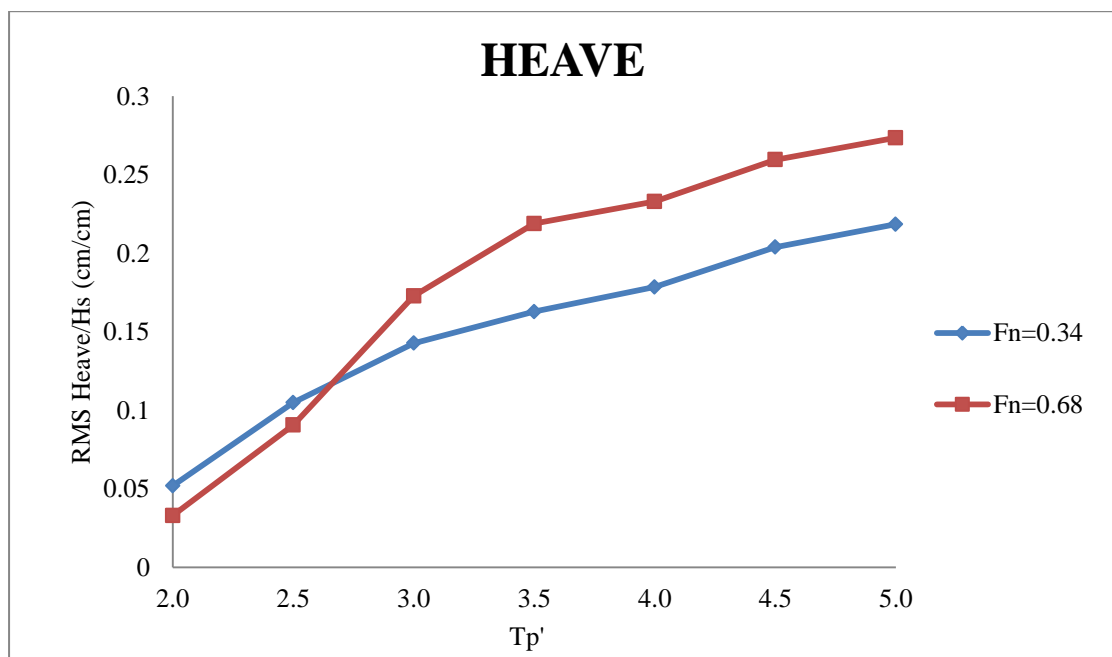


Σχήμα 5.119. Τιμές πρόσθετης αντίστασης

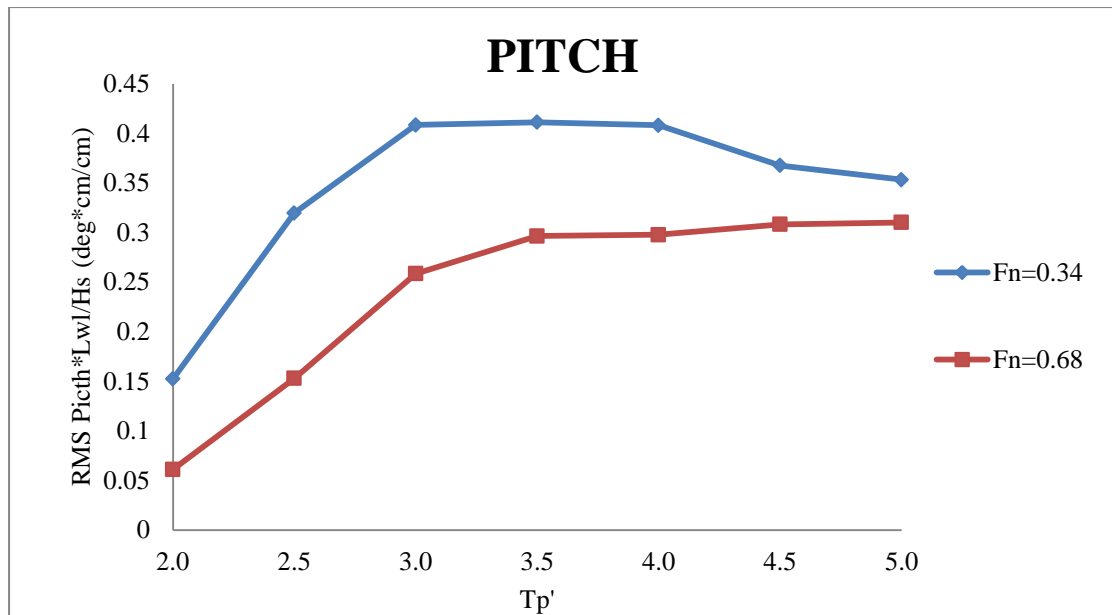
✓ Για το μοντέλο NTUA-154/98 ($L/B = 4.75$):



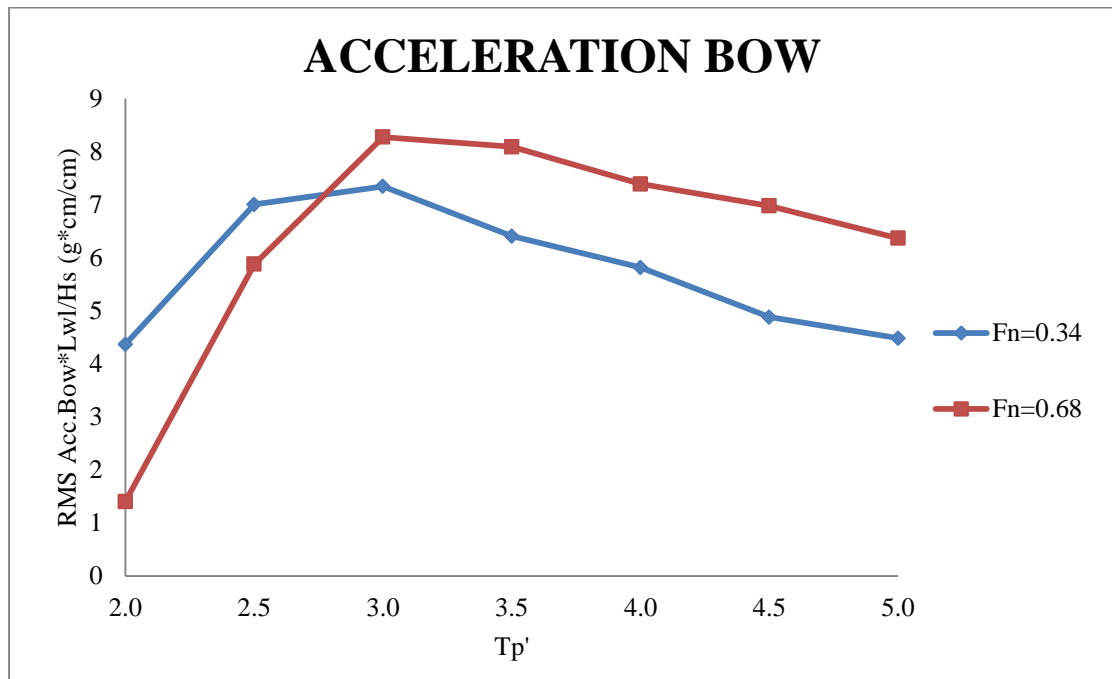
Σχήμα 5.120. RMS τιμές ανύψωσης κύματος



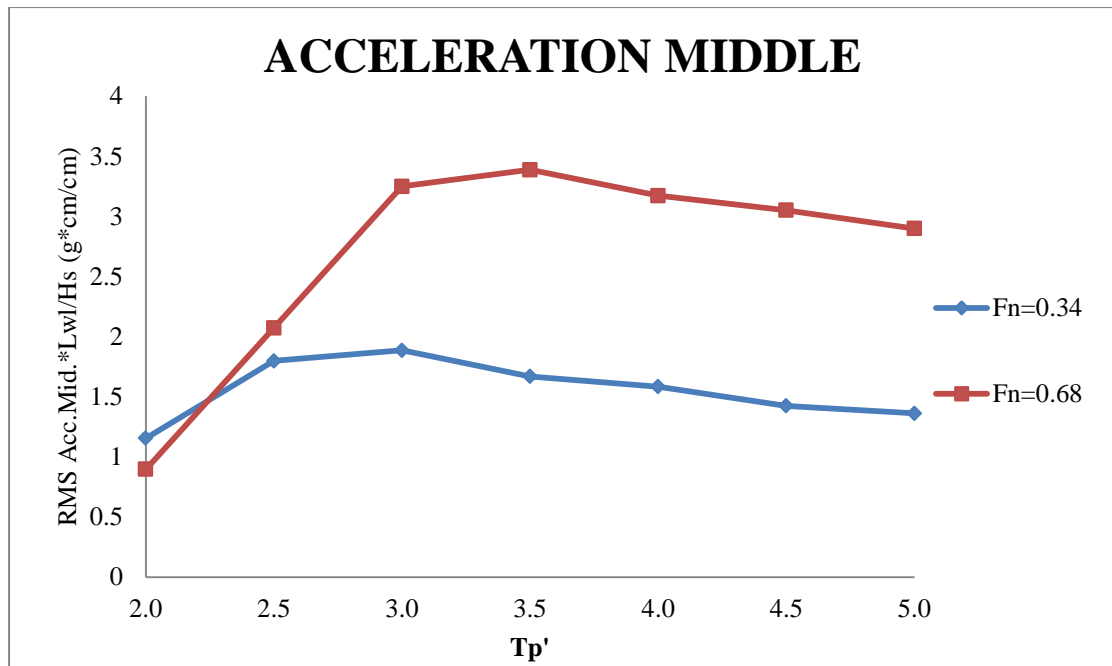
Σχήμα 5.121. Τιμές κατακόρυφης κίνησης



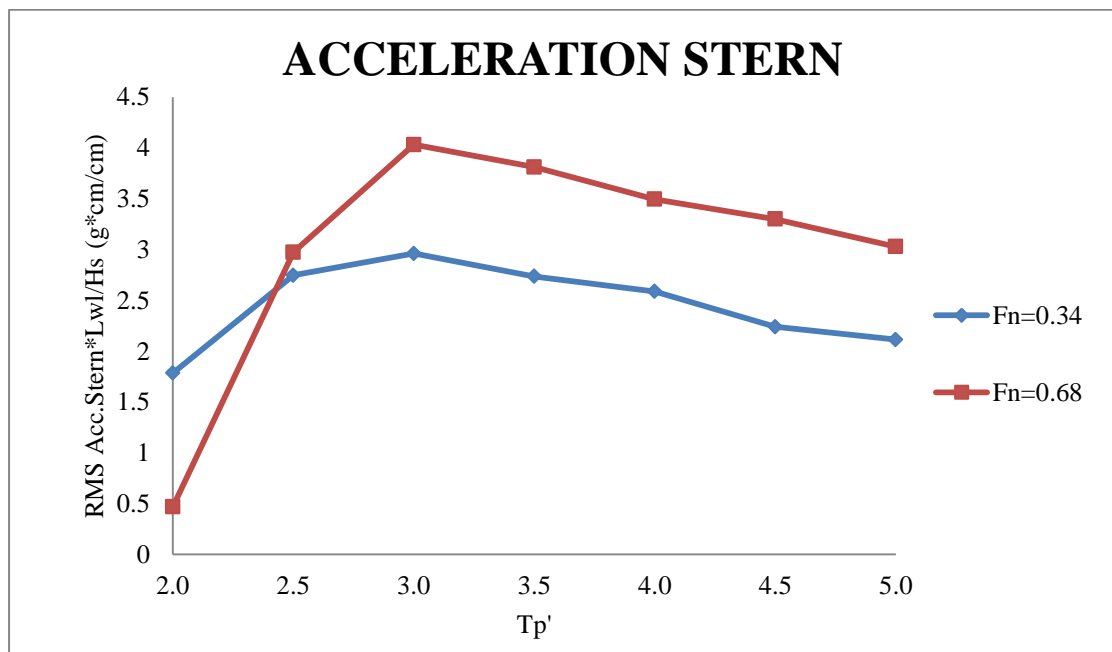
Σχήμα 5.122. Τιμές προνευτασμού



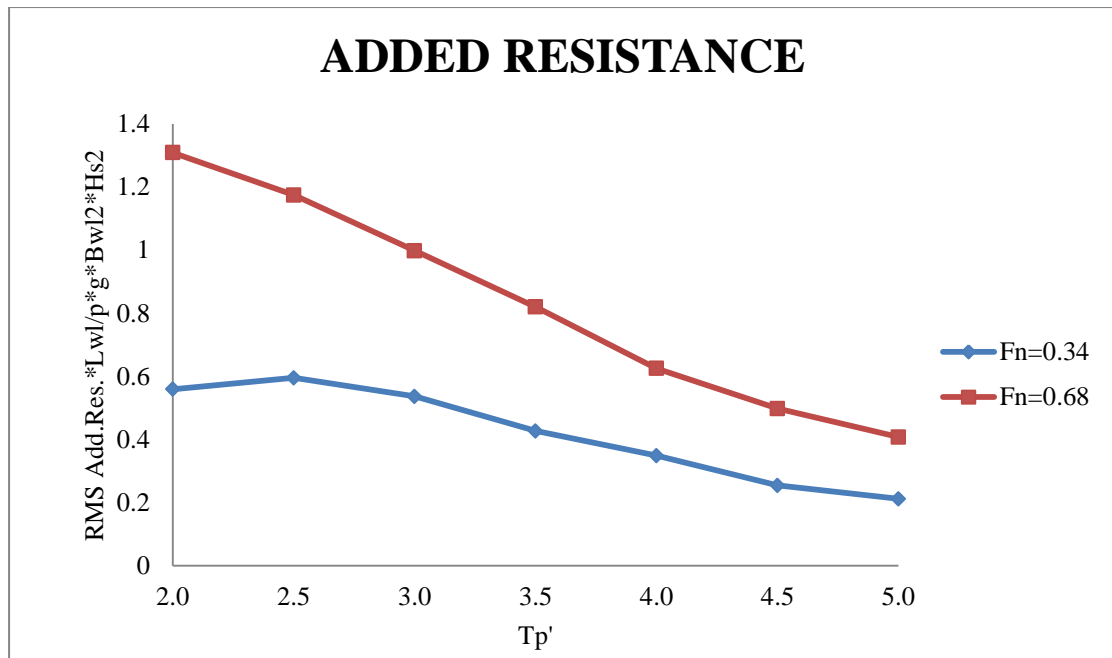
Σχήμα 5.123. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Σχήμα 5.124. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους



Σχήμα 5.125. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη



Σχήμα 5.126. Τιμές πρόσθετης αντίστασης

Παρατηρήσεις

- **Για την κίνηση Heave**, παρατηρείται ότι και στα δύο μοντέλα, για τις περιόδους $Tr'=2$ και 2.5 , οι αδιάστατες τιμές είναι σχεδόν ίδιες και για τις δύο ταχύτητες, ενώ στις μεγαλύτερες περιόδους οι αδιάστατες τιμές είναι μεγαλύτερες στην μεγάλη ταχύτητα.
- **Για την κίνηση Pitch**, διακρίνουμε ότι στην μικρή ταχύτητα έχει μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με την μεγάλη ταχύτητα, σε όλες τις περιόδους.
- **Γενικά για τις κατακόρυφες επιταχύνσεις**, παρατηρήθηκαν πιο χαμηλές τιμές στην μικρή ταχύτητα σε σχέση αυτές στην μεγάλη ταχύτητα. Ο ρυθμός αύξησης τους είναι μεγαλύτερος για $Fn = 0.68$. Επίσης, από κάποια περίοδος κύματος και μετά, παρατηρήθηκε μείωση και στις δύο ταχύτητες.

- Η **κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη**, στις μικρές περιόδους είναι μεγαλύτερη στην μικρή ταχύτητα, ενώ για μεγαλύτερες περιόδους ισχύει το αντίστροφο. Επίσης, παρατηρείται ότι για το μοντέλο $L/B = 6.25$, αυξάνει μέχρι την περίοδο $Tr' = 3.5$ για $Fn = 0.34$ και μέχρι $Tr' = 2.5$ για $Fn = 0.68$ (σχήμα 5.116). Στο μοντέλο $L/B = 4.75$, αυτή η αύξηση συμβαίνει και για τις δύο ταχύτητες μέχρι την περίοδο $Tr' = 3$ (σχήμα 5.123).
- Η τιμή της **κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους**, στις περιόδους $Tr' = 2$ και 2.5 , είναι πολύ κοντά και για τις δύο ταχύτητες. Για μεγαλύτερες περιόδους, παρατηρείται αύξηση στην μεγάλη ταχύτητα με μεγαλύτερο ρυθμό ώστε η διαφορά με τις τιμές στην μικρή ταχύτητα να γίνεται περίπου διπλάσια. Επίσης, παρατηρείται ότι για το μοντέλο $L/B = 6.25$, αυξάνει μέχρι την περίοδο $Tr' = 3.5$ για $Fn = 0.34$ και μέχρι $Tr' = 2.5$ για $Fn = 0.68$ (σχήμα 5.117). Στο μοντέλο $L/B = 4.75$, αυτή η αύξηση συμβαίνει για την μεγάλη ταχύτητα μέχρι την περίοδο $Tr' = 3.5$ ενώ για $Fn = 0.34$, μέχρι την περίοδο $Tr' = 3$ (σχήμα 5.124).
- Για την **κατακόρυφη επιτάχυνση στην πρύμνη**, οι τιμές για τις μικρές περιόδους είναι σχετικά κοντά. Για περιόδους μεγαλύτερες της $Tr' = 2.5$, παρατηρείται μεγαλύτερες επιταχύνσεις στην μεγάλη ταχύτητα. Επίσης, για το μοντέλο $L/B = 6.25$, η τιμή της επιτάχυνσης αυξάνει μέχρι την περίοδο $Tr' = 3.5$ για $Fn = 0.34$ και μέχρι $Tr' = 2.5$ για $Fn = 0.68$ (σχήμα 5.118). Στο μοντέλο $L/B = 4.75$, αυτή η αύξηση συμβαίνει και για τις δύο ταχύτητες μέχρι την περίοδο $Tr' = 3$ (σχήμα 5.125).
- **Για τις τιμές της πρόσθετης αντίστασης**, δεν μπορεί να εξαχθεί όμοιο συμπέρασμα και για τα δύο μοντέλα, διότι για το $L/B = 4.75$ η αδιάστατη τιμή της πρόσθετης αντίστασης είναι μεγαλύτερη για $Fn = 0.68$, για όλες τις περιόδους μειούμενη και για τις δύο ταχύτητες (σχήμα

5.126). Για το μοντέλο $L/B = 6.25$, παρατηρούμε ότι η αδιάστατη τιμή είναι μεγαλύτερη στην ταχύτητα $Fn = 0.34$, για όλες τις περιόδους. Επίσης, για το μοντέλο $L/B = 6.25$, ενώ στην μικρή ταχύτητα μετά την περίοδο $Tr' = 2.5$ μειώνεται η αδιάστατη τιμή, στην μεγάλη ταχύτητα αυξάνεται στο διάστημα $Tr' = 2.5 - 4$.

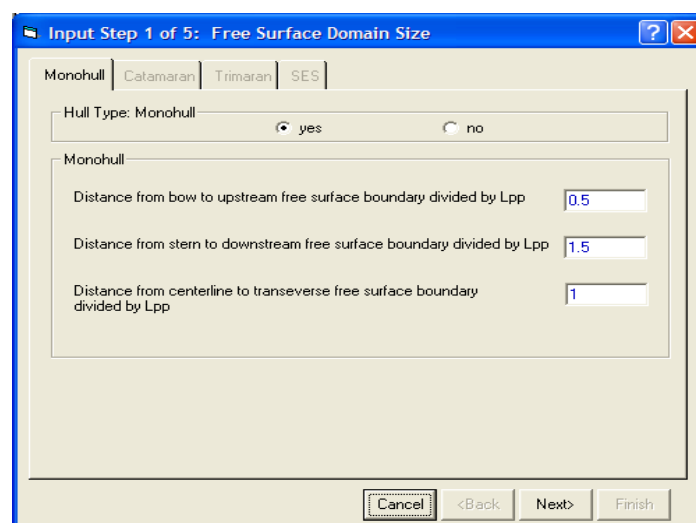
6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SWAN2 - ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1. Χρήση του SWAN2

Για μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του κώδικα, αρχικά γίνεται μελέτη σύγκλισης για την βύθιση (sinkage) και την διαγωγή (trim) του σκάφους. Αυτό γίνεται για την ευσταθή κατάσταση, δηλαδή σε ήρεμη θάλασσα (Παράρτημα II). Ύστερα από την σύγκλιση σε λογικές τιμές, εισάγουμε το αρχείο .rln που περιγράφει τους νομείς του σκάφους, τις συντεταγμένες των οποίων πήραμε από το σχέδιο του κάθε σκάφους στο AUTOCAD. Στο ίδιο περιβάλλον εισάγουμε το αρχείο .inp το οποίο περιέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για το τρέξιμο του κώδικα (εδάφιο 2.3). Ο κώδικας διαβάζει αυτόματα τις πληροφορίες του αρχείου .inp, οπότε ακολουθούν τα παρακάτω βήματα:

Βήμα 1ο

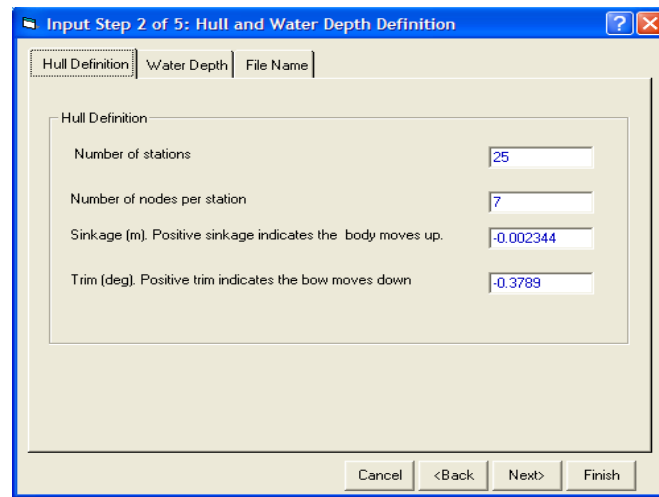
Εισάγονται ο τύπος της γάστρας και οι αποστάσεις ορίων ελεύθερης επιφάνειας διαιρεμένες με το μήκος L_{pp} .



Εικόνα 6.1. Μέγεθος πεδίου ελεύθερης επιφάνειας

Βήμα 2ο

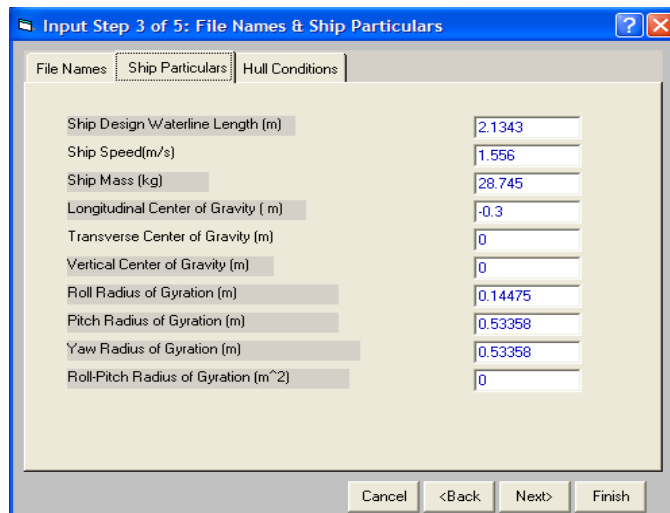
Εισάγονται ο αριθμός των νομέων, η διαγωγή και το sinkage, καθώς και το όνομα του αρχείου.



Εικόνα 6.2.Ορισμός γάστρας και βάθους νερού

Βήμα 3ο

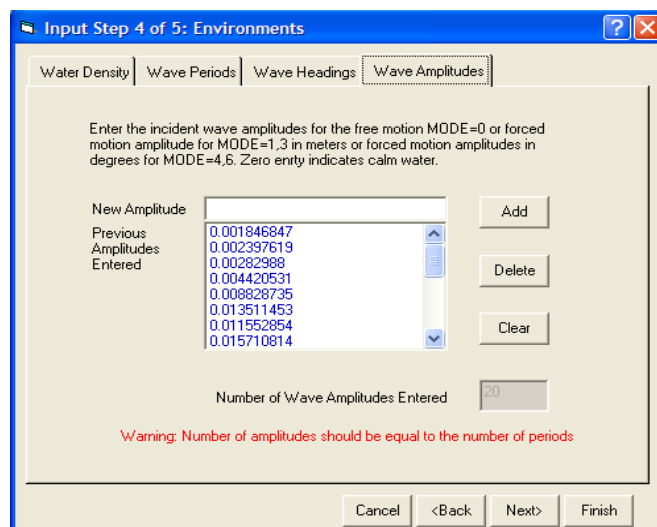
Εισάγονται τα ονόματα των αρχείων, κατάσταση της γάστρας και χαρακτηριστικά του πλοίου όπως μήκος, ταχύτητα (εικόνα 6.3). Σημειώνεται ότι η εγκάρσια ακτίνα περιστροφής (roll radius of gyration) πάρθηκε ίση με $0.3 \cdot B$ και η διαμήκης ακτίνα περιστροφής (pitch radius of gyration) ίση με $0.25 \cdot L_{wl}$.



Εικόνα 6.3.Ονόματα αρχείων και χαρακτηριστικά του πλοίου

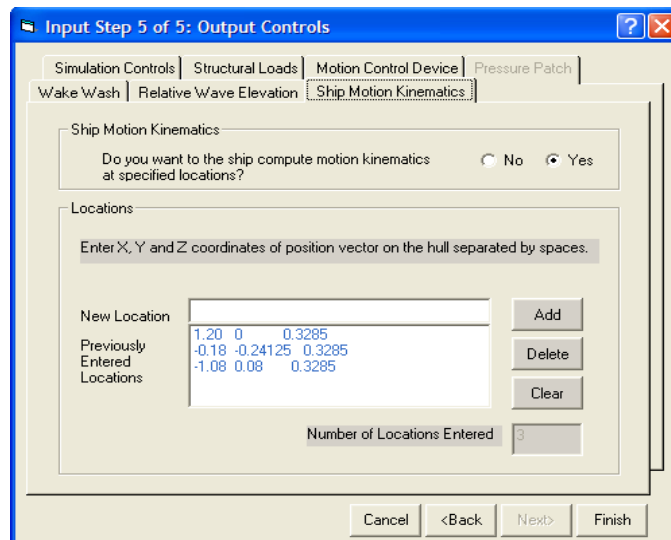
Βήμα 4ο

Εισάγονται η πυκνότητα του νερού, οι περίοδοι των κυμάτων, η γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων ($\beta=180^\circ$), και τα πλάτη των κυματισμών.



Εικόνα 6.4.Περιβάλλοντα

Ύστερα, καθορίζονται ο χρόνος και το βήμα προσομοίωσης αλλά και οι συντεταγμένες που επιθυμούμε να υπολογιστούν κατακόρυφες επιταχύνσεις (εικόνα 6.5).



Εικόνα 6.5. Έλεγχος αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.6 Χρόνος και βήμα προσομοίωσης ανά ταχύτητα

	$F_n=0.34$	$F_n=0.68$
Χρόνος προσομοίωσης	300	300
Βήμα προσομοίωσης	0.02	0.005

Σε αυτό το σημείο, το πρόγραμμα δημιουργεί την επιφάνεια του πλοίου με τα όριά του, το οποίο μπορεί να πλοταριστεί τρισδιάστατα με την βοήθεια του προγράμματος Tecplot. Ύστερα, τρέχουμε τον κώδικα SETUP και τέλος τον κώδικα SOLVE, που επιλύει το πρόβλημα και δίνει τα αποτελέσματα σε αρχεία, από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

- “.out”: περιέχει όλες τις πληροφορίες για το δημιουργηθέν πλέγμα και τα κύρια υδροστατικά χαρακτηριστικά του σκάφους.
- “.rao”: περιέχει όλα τα RAO των κινήσεων Heave - Pitch και τις γωνίες φάσεων αυτών.
- “.for.40”: περιέχει τα RAO των κατακόρυφων επιταχύνσεων στα σημεία του σκάφους που επιθυμούμε (πλώρη, κέντρο βάρους, πρύμνη) και τις γωνίες φάσης αυτών.

6.2.

RAO για τυχαίους κυματισμούς

Στο παρόν εδάφιο, παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα τα πειραματικά RAO με τα RAO που εξήγαγε ο κώδικας SWAN2 συναρτήσει του λόγου μήκους κύματος και μήκους σκάφους λ/L . Πριν την παρουσίαση, προηγήθηκε η μεταφορά στο ίδιο σύστημα αναφοράς των μεγεθών.

Οι σχέσεις σύμφωνα με τις οποίες γίνεται η μεταφορά από το κινούμενο σύστημα αναφοράς:

- Η συχνότητα f_0 στο ακίνητο σύστημα αναφοράς συναρτήσει του κινούμενου:

$$\frac{-1 \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 + 4 \cdot \frac{V}{g} \cdot \frac{f}{2\pi}}}{2 \cdot \frac{V}{g}}$$

- Η συνάρτηση πυκνότητας φάσματος στο ακίνητο σύστημα αναφοράς συναρτήσει του κινούμενου:

$$S(f_0) = S(f) \cdot \left(1 + \frac{4\pi f_0 \cdot V}{g}\right)$$

Στον πίνακα 6.7, παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιήσεις που έγιναν για τα πειραματικά αποτελέσματα και για τα αποτελέσματα του SWAN2.

Πίνακας 6.7. Αδιαστατοποιήσεις

	Acceleration	Heave	Pitch
RAOSwan2	$= RAO_{acc.} \cdot \frac{L_{wl}}{g}$	$= RAO_{heave}$	$= RAO_{pitch} \cdot \frac{\lambda}{360}$
RAOexperimental	$= \sqrt{\frac{S_{acc.}(f_0)}{S_{wave}(f_0)}} \cdot L_{wl}$	$= \sqrt{\frac{S_{heave}(f_0)}{S_{wave}(f_0)}}$	$= \sqrt{\frac{S_{pitch}(f_0)}{S_{wave}(f_0)}} \cdot \frac{\lambda}{360}$
RAOregular wave	$= \frac{RMS_{acc.}}{RMS_{wave}} \cdot L_{wl}$	$= \frac{RMS_{heave}}{RMS_{wave}}$	$= \frac{RMS_{pitch}}{RMS_{wave}} \cdot \frac{\lambda}{360}$

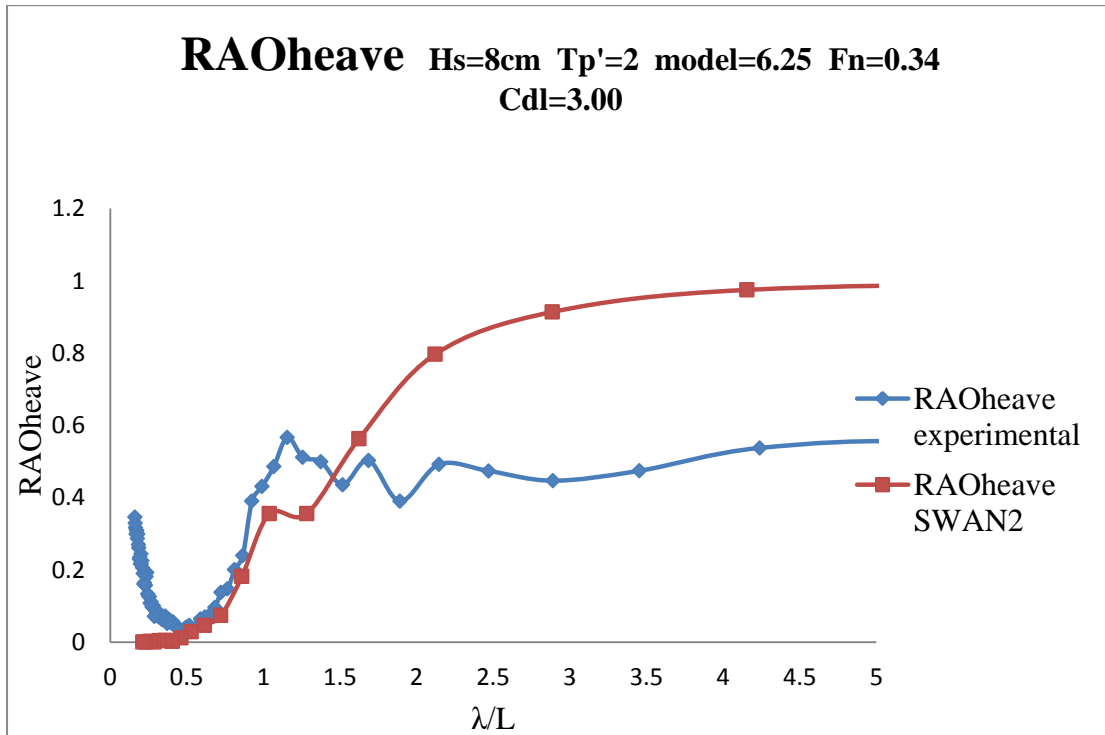
Όπου:

- $RAO_{acc.}$, σε $(\frac{m/s^2}{m})$, είναι τα RAO αποτελέσματα του κώδικα για τις τρεις ζητούμενες επιταχύνσεις, στην πλώρη, πρύμνη και κέντρο βάρους
- RAO_{heave} , σε $(\frac{m}{m})$, είναι το RAO αποτέλεσμα του κώδικα για την κατακόρυφη κίνηση
- RAO_{pitch} , σε $(\frac{deg}{m})$, είναι το RAO αποτέλεσμα του κώδικα για τον προνευτασμό
- $S_{acc.}(f_0)$, σε $(\frac{g^2}{Hz})$, είναι το φάσμα, στο ακίνητο σύστημα αναφοράς, των κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πλώρη, πρύμνη και κέντρο βάρους κάθε φορά.
- $S_{wave}(f_0)$, σε $(\frac{m^2}{Hz})$, είναι το φάσμα του κύματος στο ακίνητο σύστημα αναφοράς.
- $S_{heave}(f_0)$, σε $(\frac{m^2}{Hz})$, είναι το φάσμα της κατακόρυφης κίνησης στο ακίνητο σύστημα αναφοράς.
- $S_{pitch}(f_0)$, σε $(\frac{deg^2}{Hz})$, είναι το φάσμα του προνευστασμού στο ακίνητο σύστημα αναφοράς.
- RMS_{heave} , σε m, είναι η rms τιμή της κατακόρυφης κίνησης σε αρμονικό κύμα.
- RMS_{pitch} , σε deg, είναι η rms τιμή του προνευστασμού σε αρμονικό κύμα.
- RMS_{wave} , σε m, είναι η rms τιμή της ανύψωσης του αρμονικού κύματος.
- λ , σε m, το μήκος του κύματος

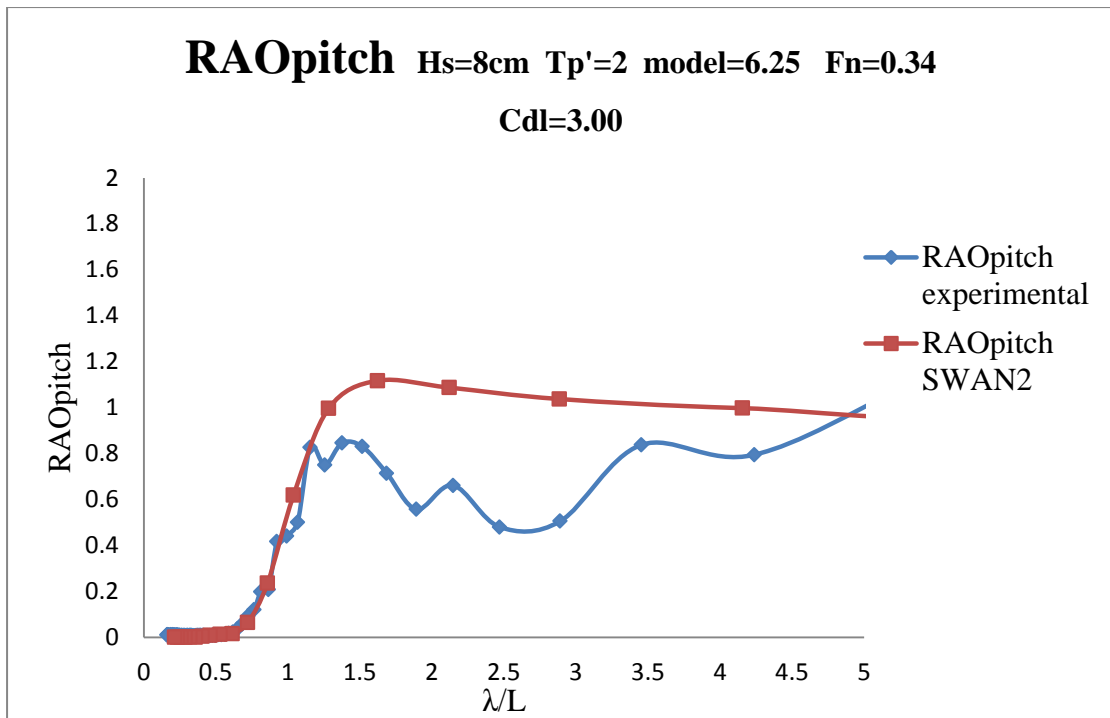
✓ Για το μοντέλο NTUA-146/98 ($L/B = 6.25$):

Για την μικρή ταχύτητα, $F_n = 0.34$:

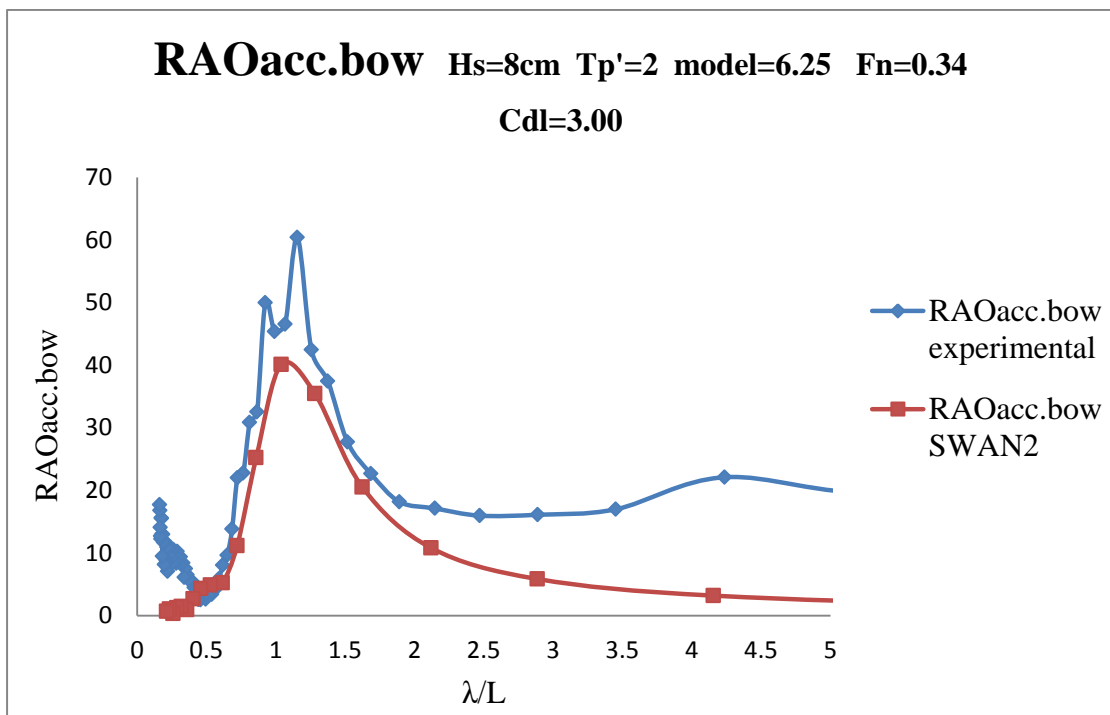
- Κύμα H8tp2.b



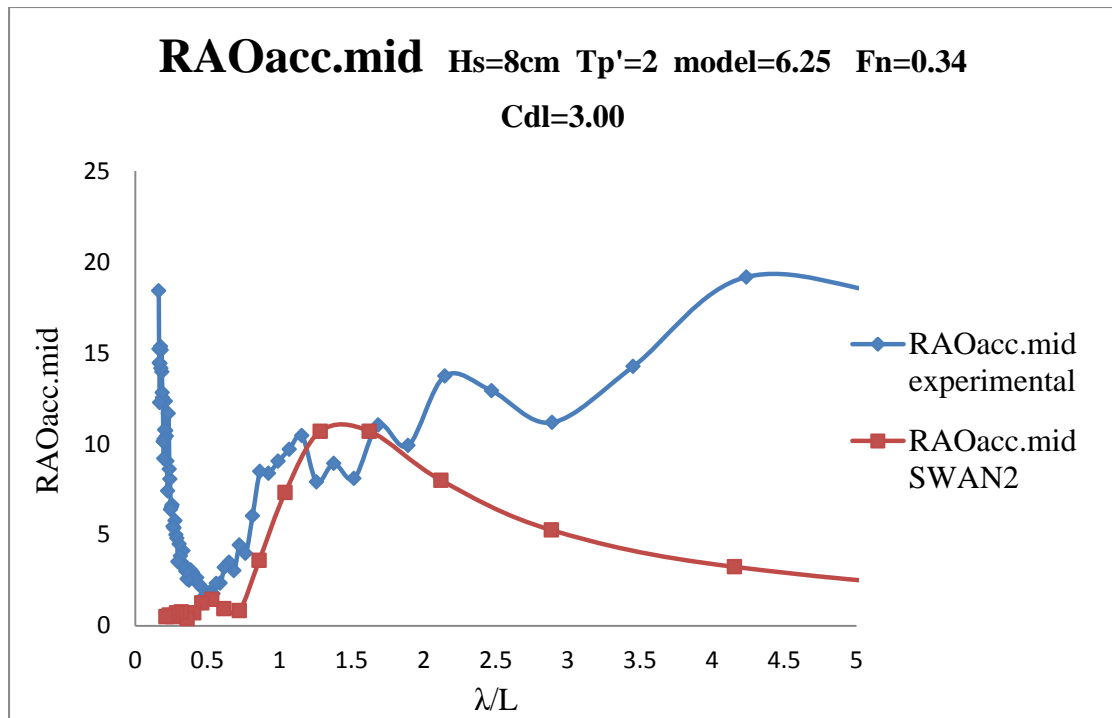
Σχήμα 6.1. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



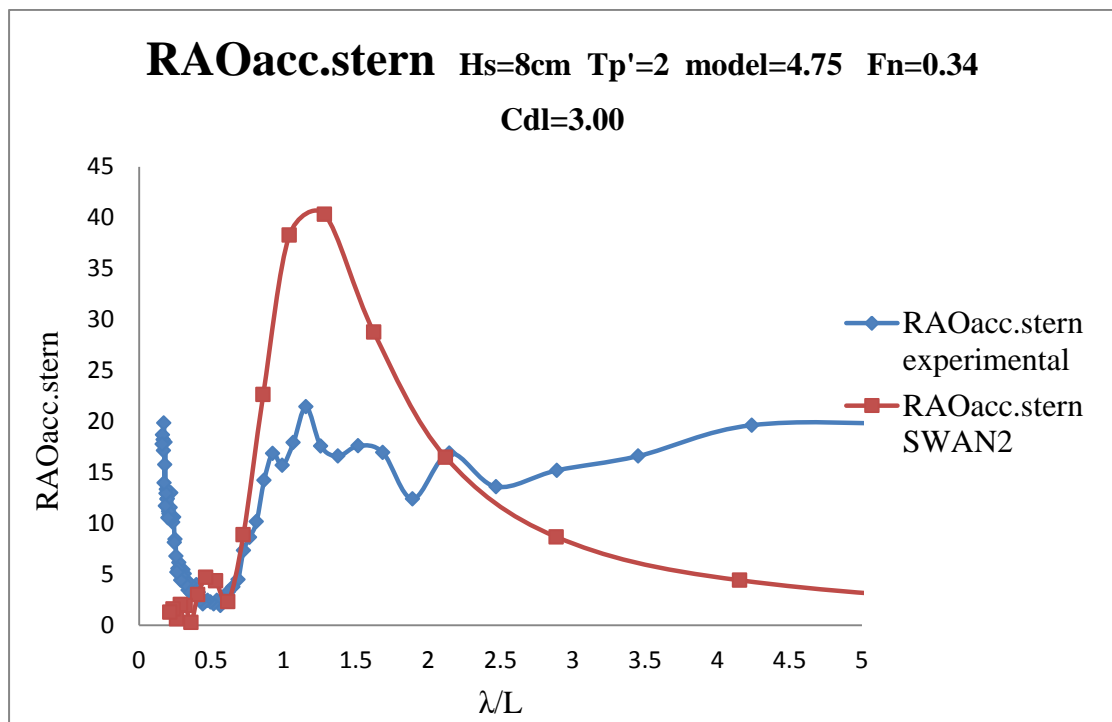
Σχήμα 6.2. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.3. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

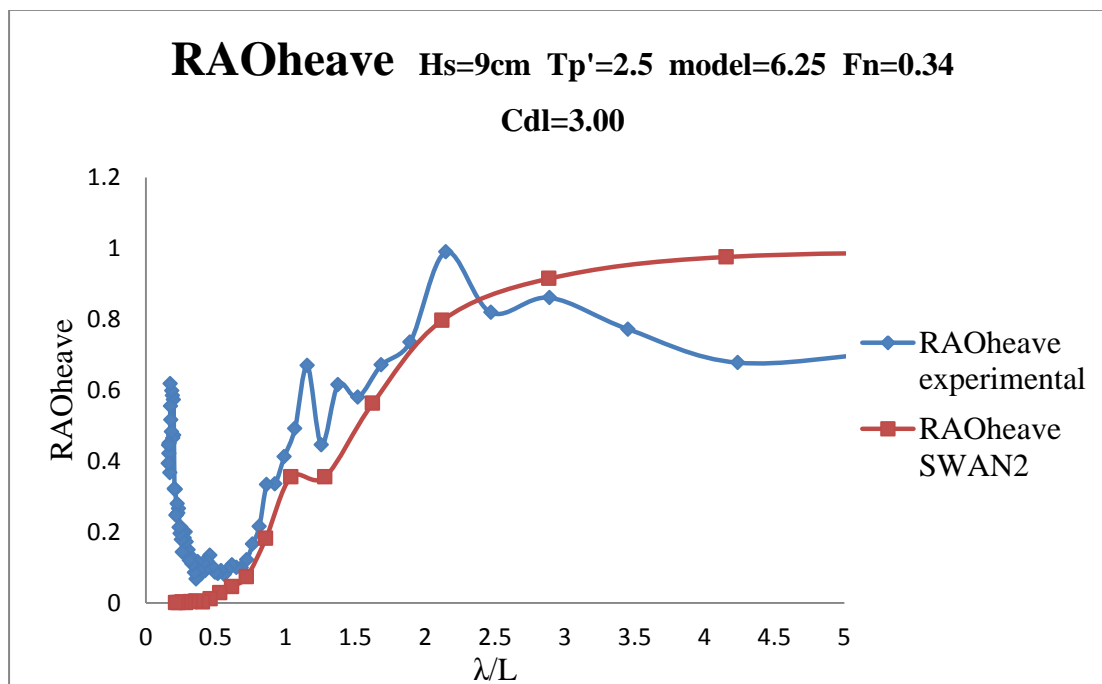


Σχήμα 6.4. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

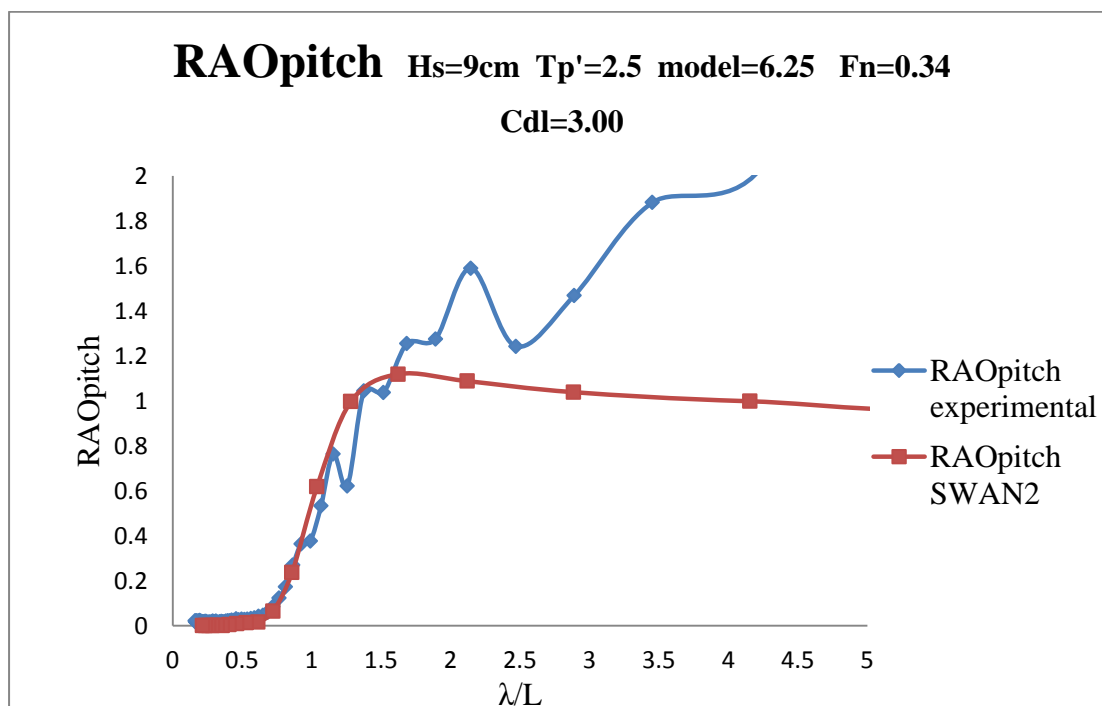


Σχήμα 6.5. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

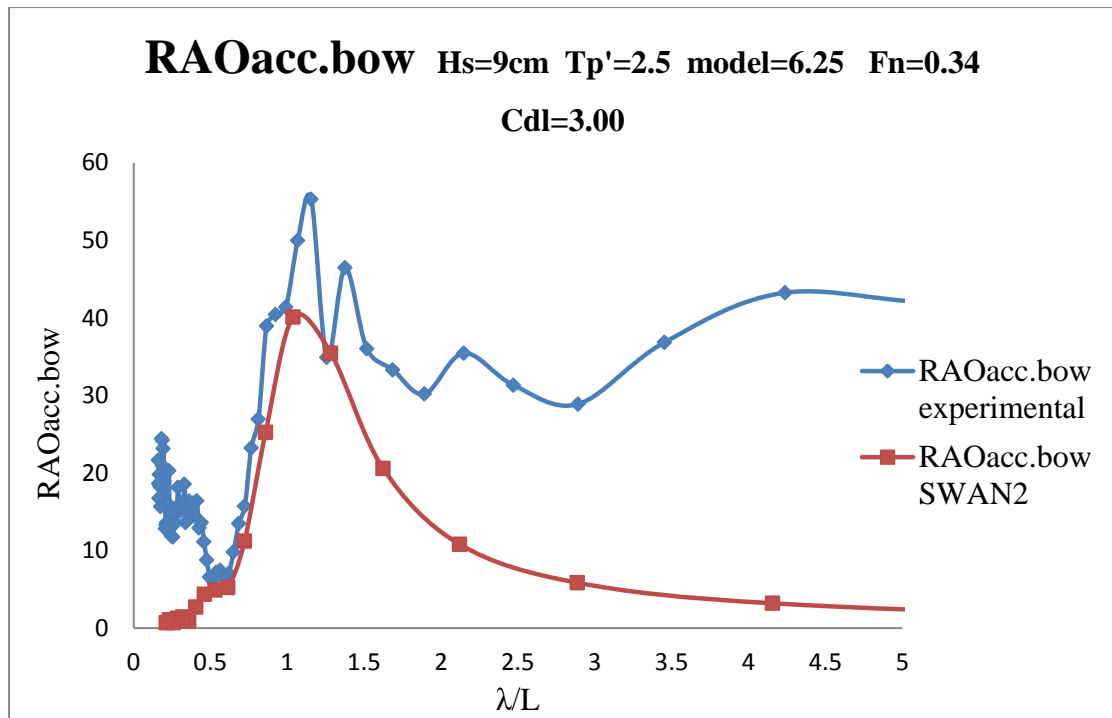
- Κύμα H9tp25.625



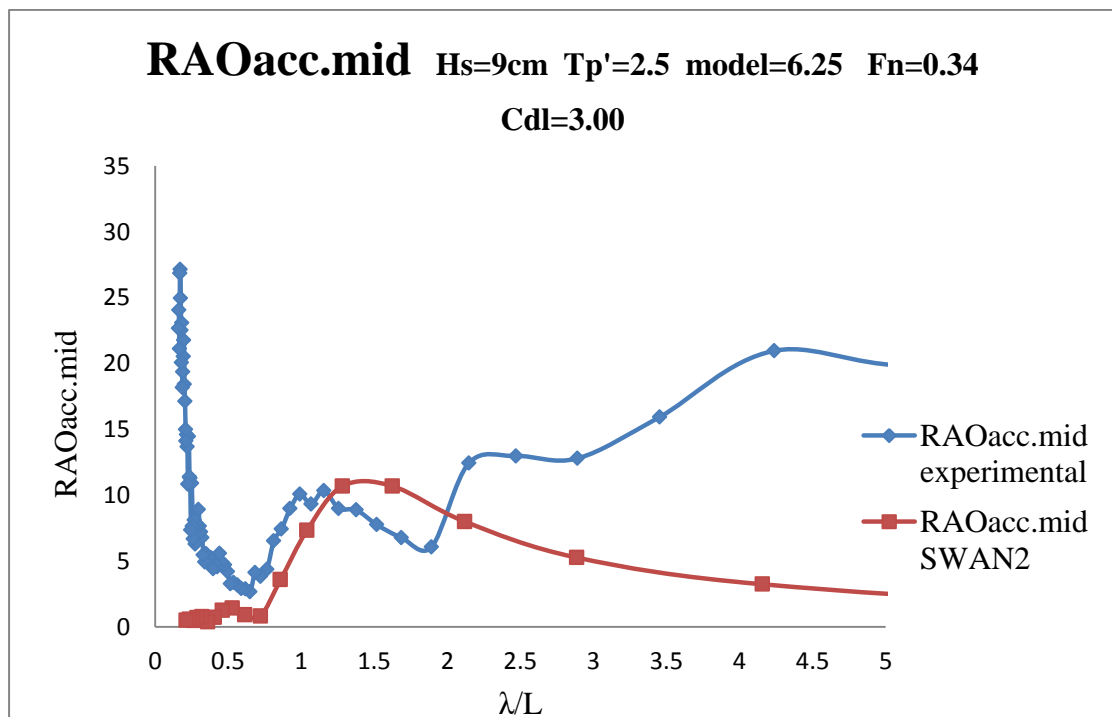
Σχήμα 6.6. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



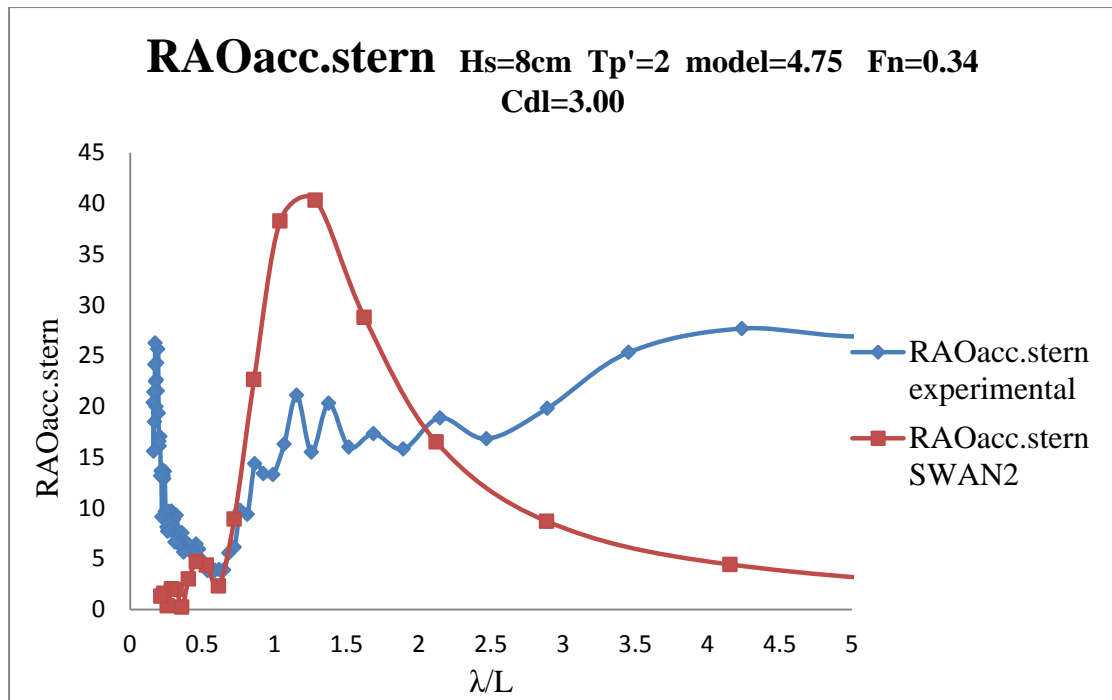
Σχήμα 6.7. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.8. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

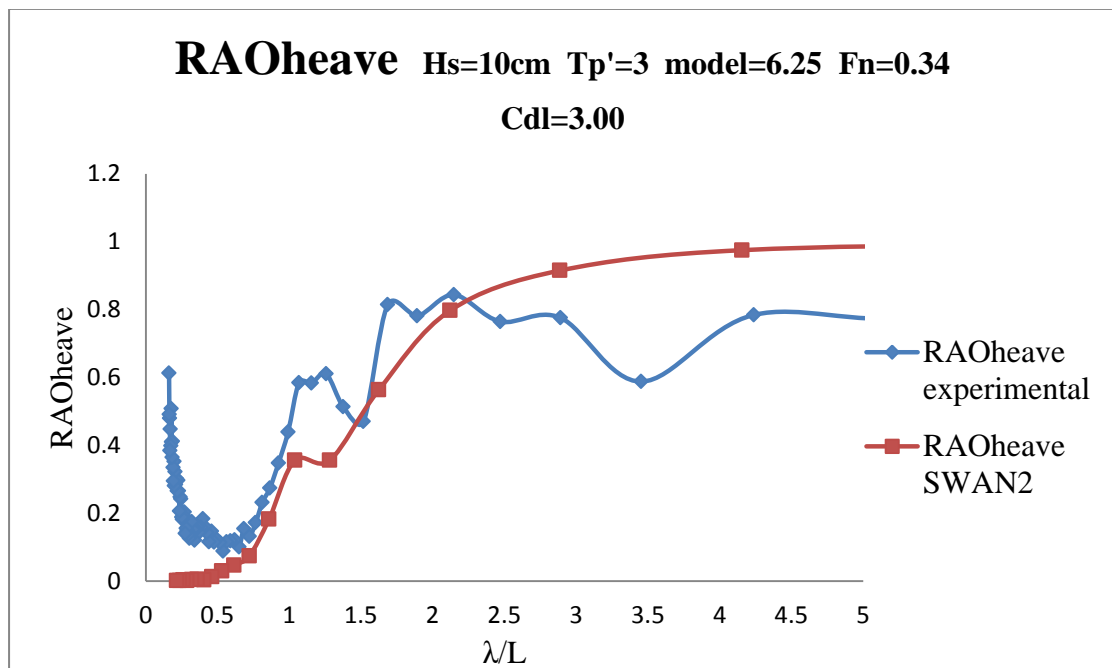


Σχήμα 6.9. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

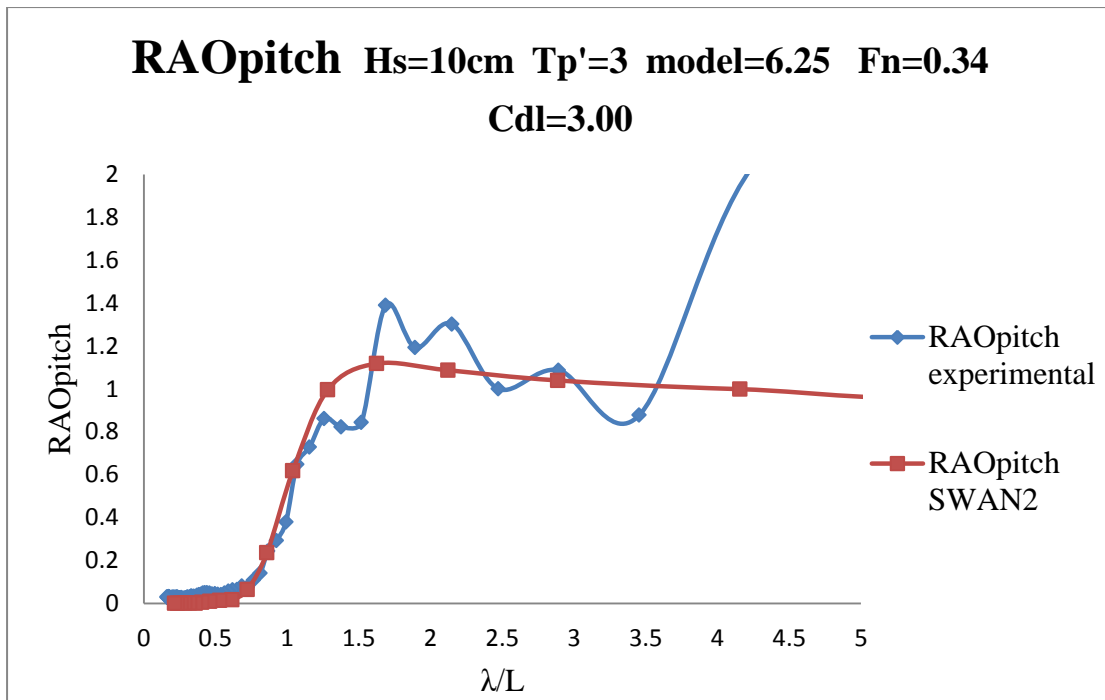


Σχήμα 6.10. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

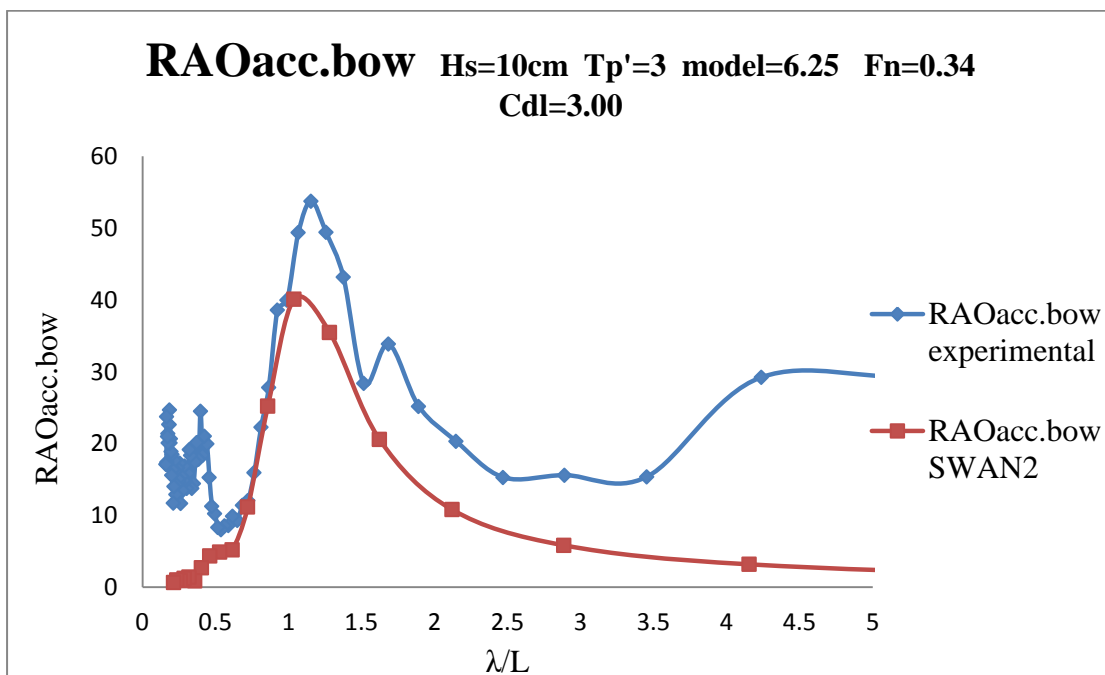
- Κύμα H10tp3.625



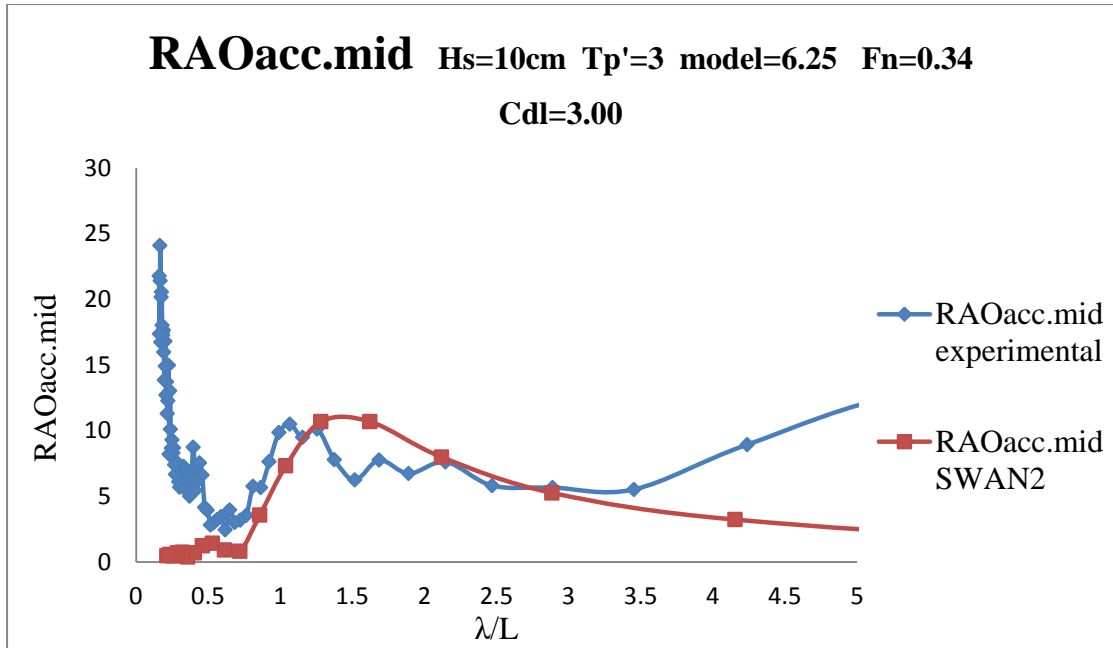
Σχήμα 6.11. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



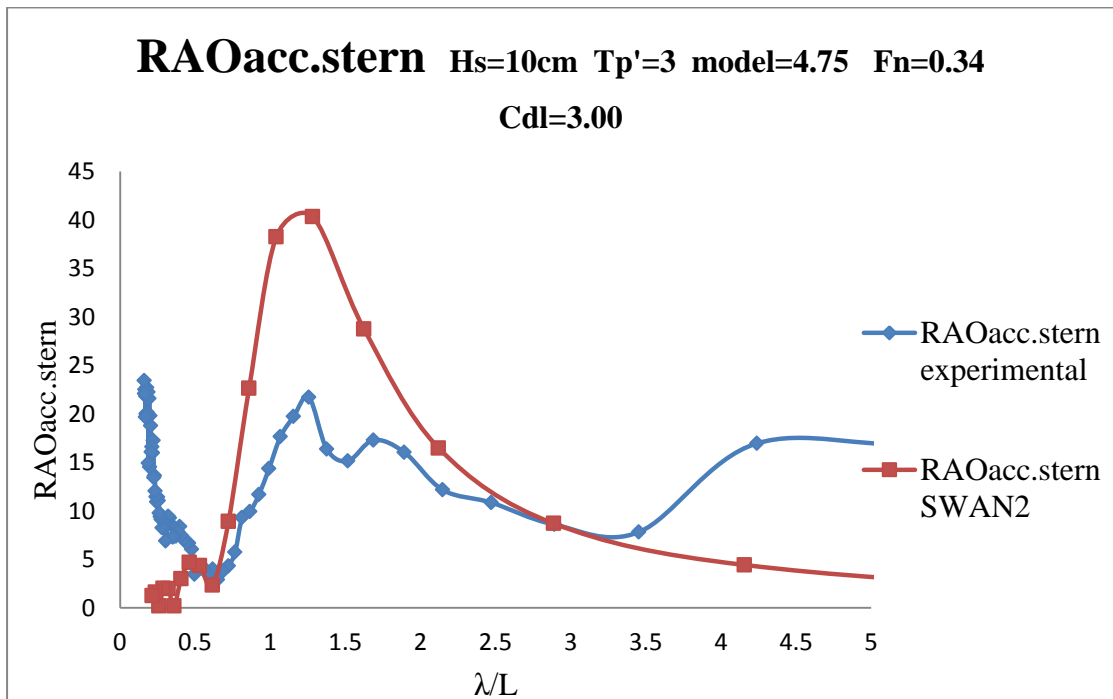
Σχήμα 6.12. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.13. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

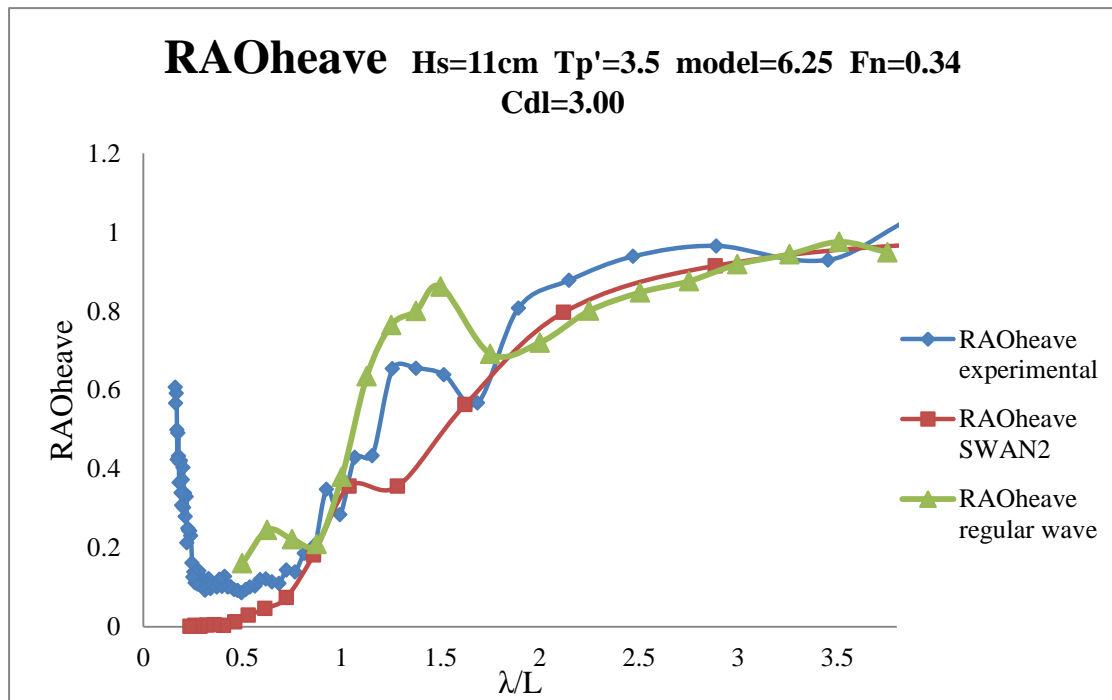


Σχήμα 6.14. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

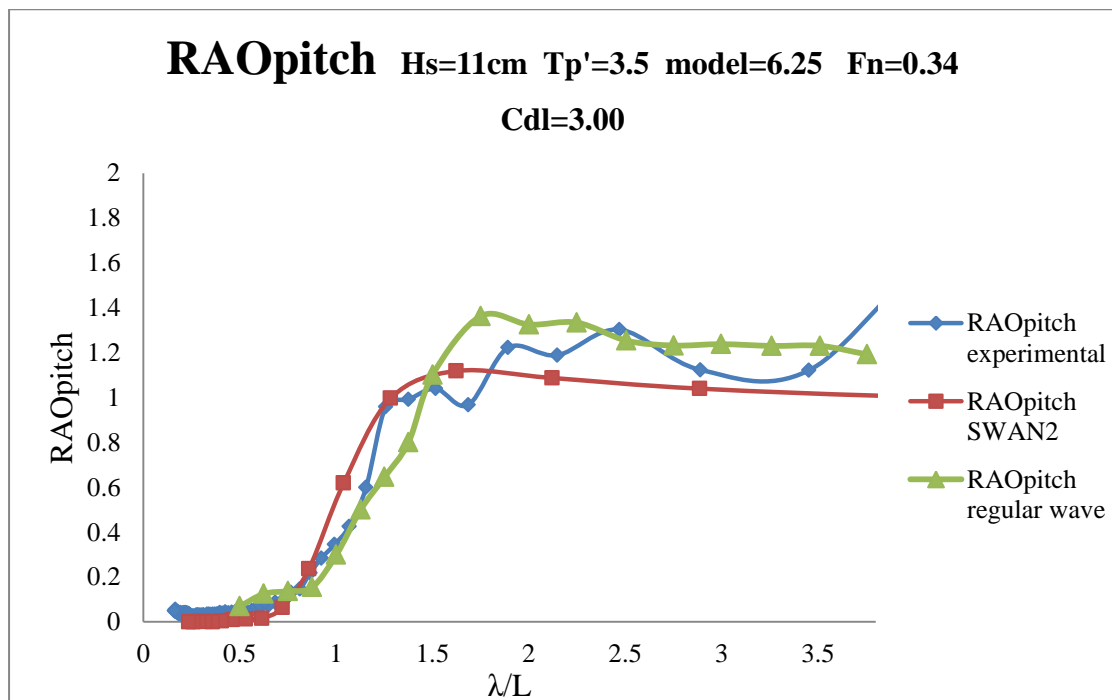


Σχήμα 6.15. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

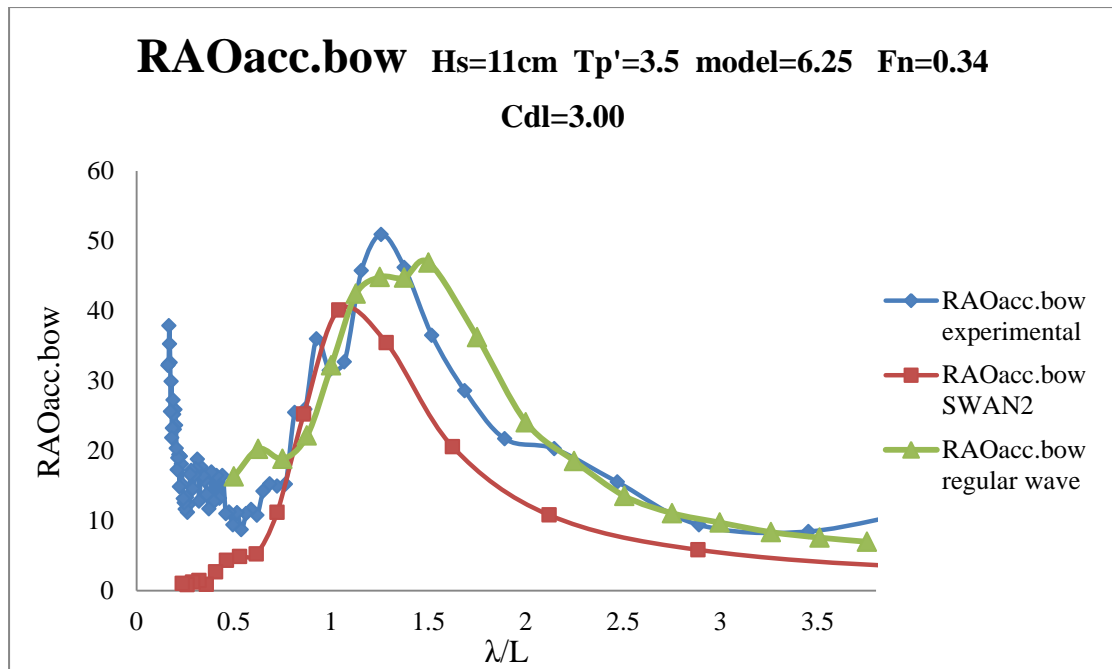
- Κύμα H11tp35.625



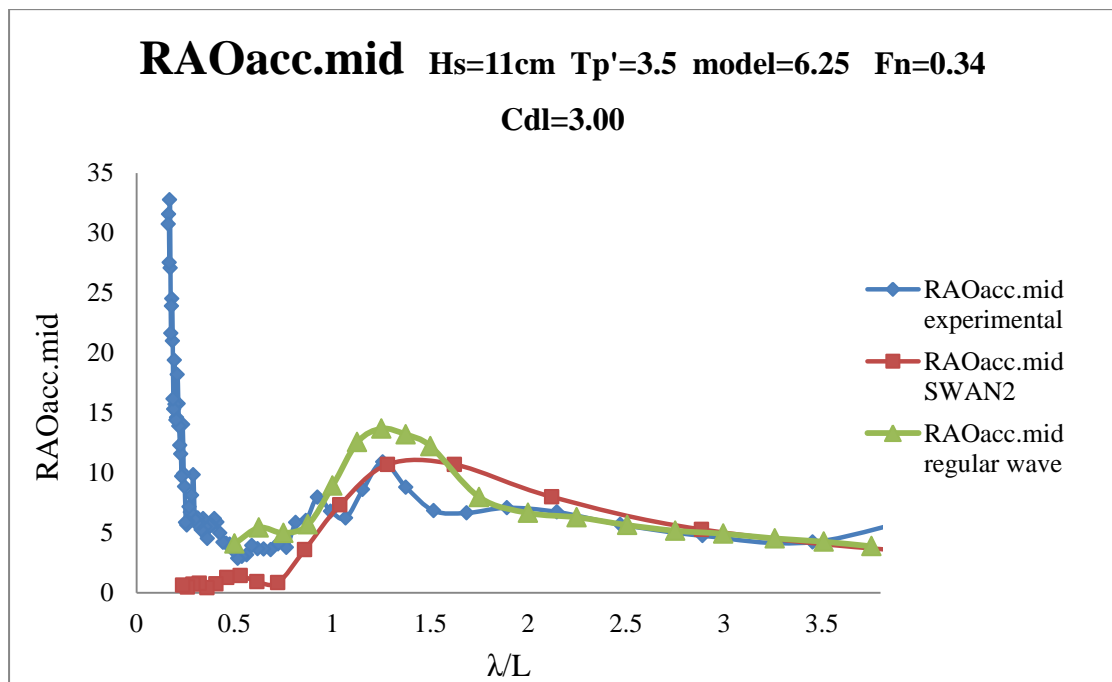
Σχήμα 6.16. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



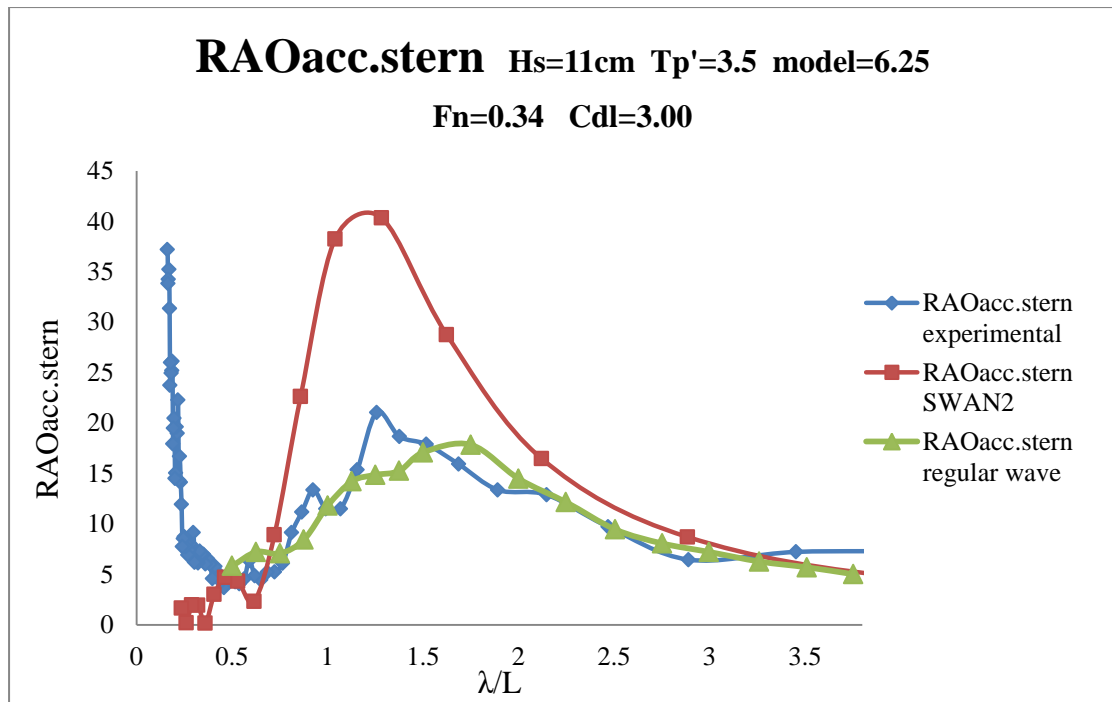
Σχήμα 6.17. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.18. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

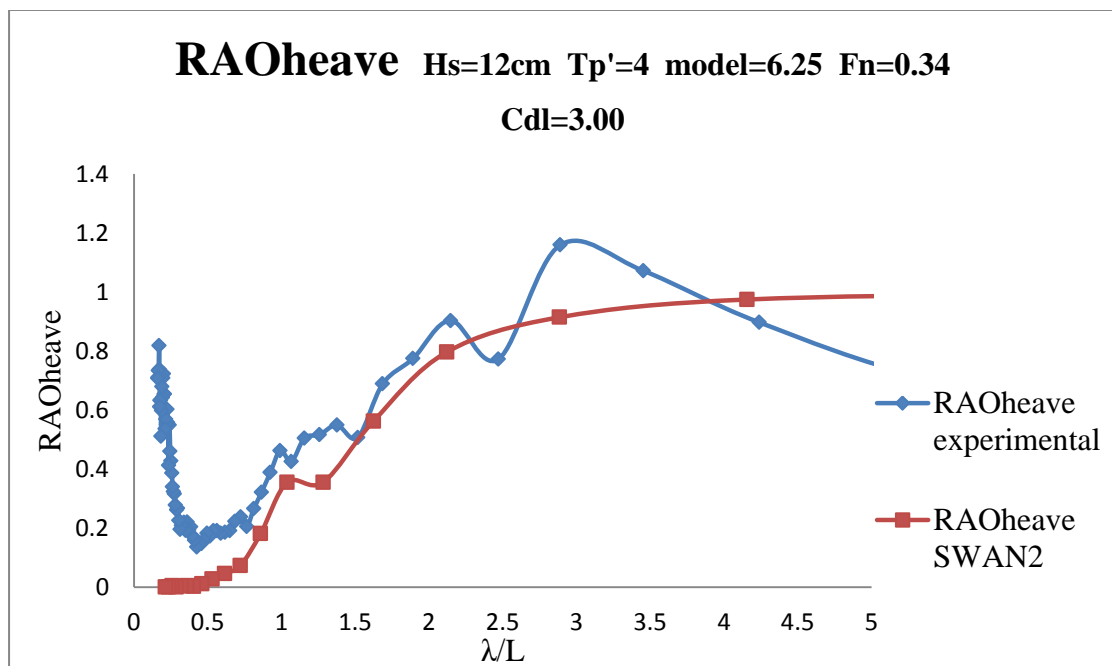


Σχήμα 6.19. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

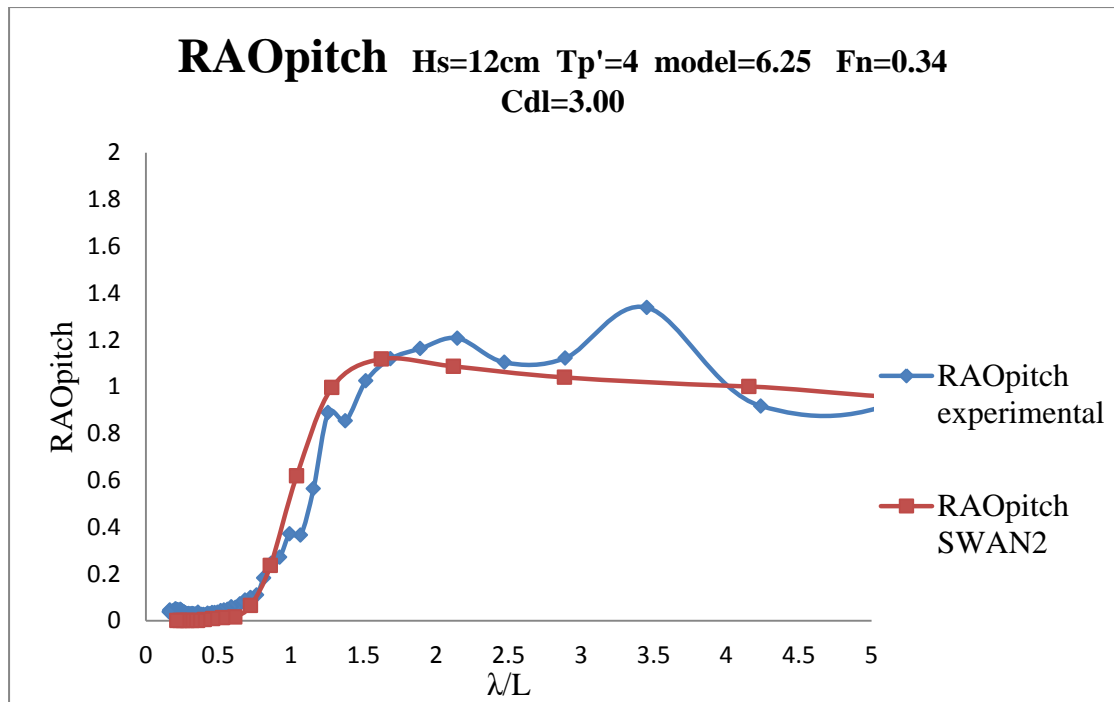


Σχήμα 6.20. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

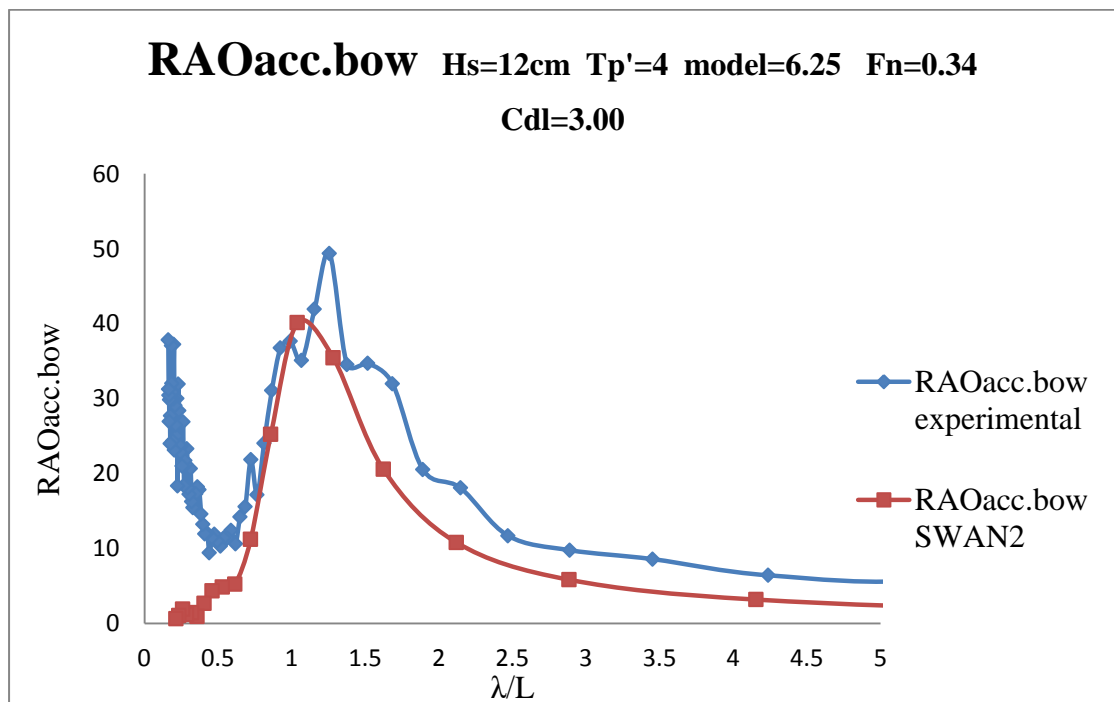
- Κύμα H12tp4.625



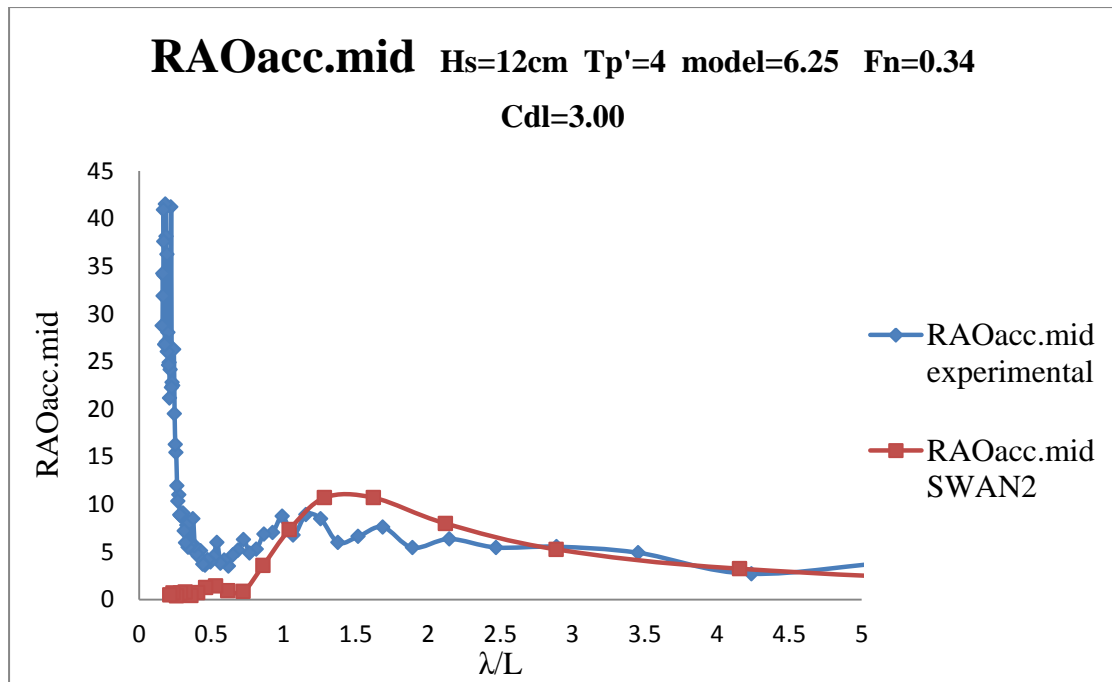
Σχήμα 6.21. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



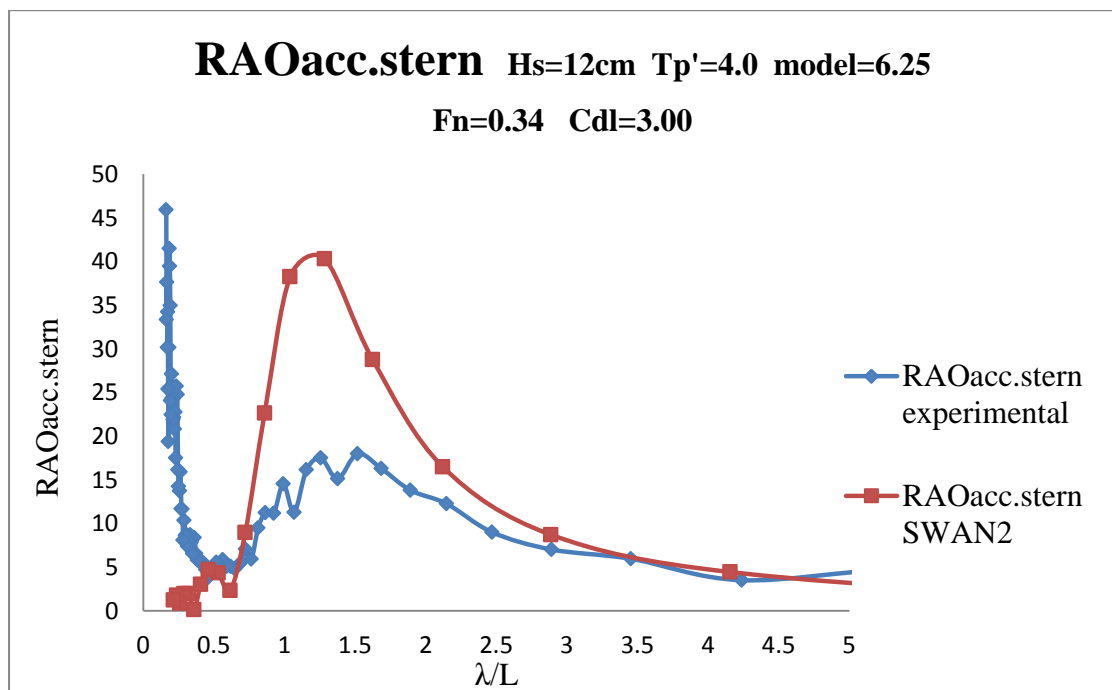
Σχήμα 6.22. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.23. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

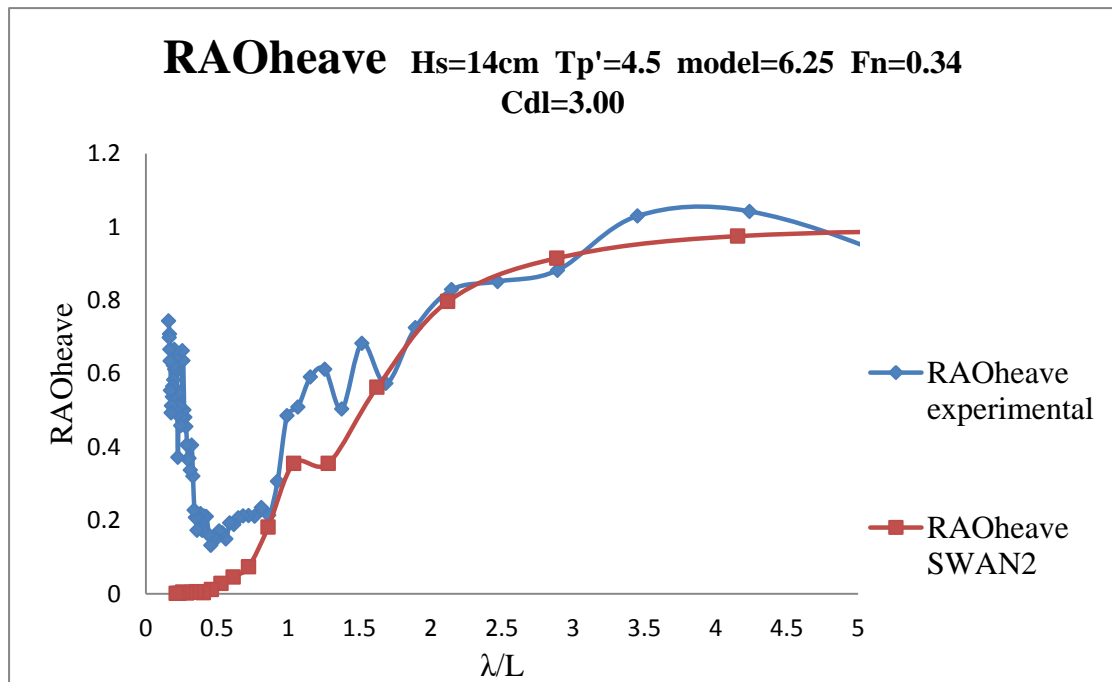


Σχήμα 6.24. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

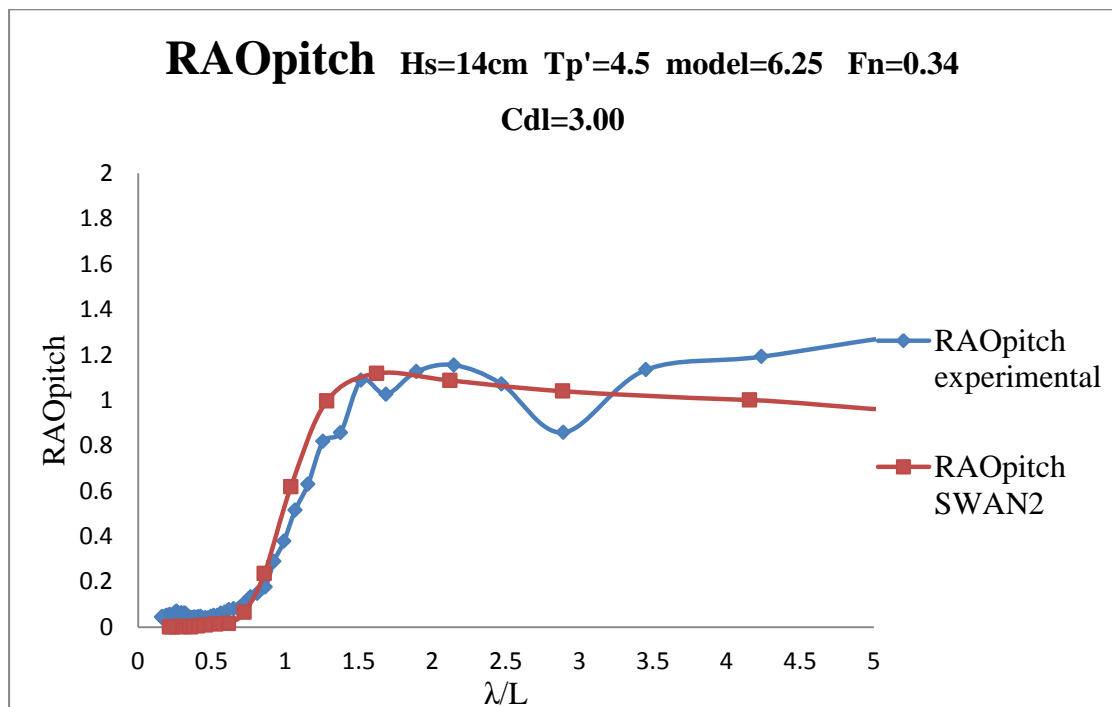


Σχήμα 6.25. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

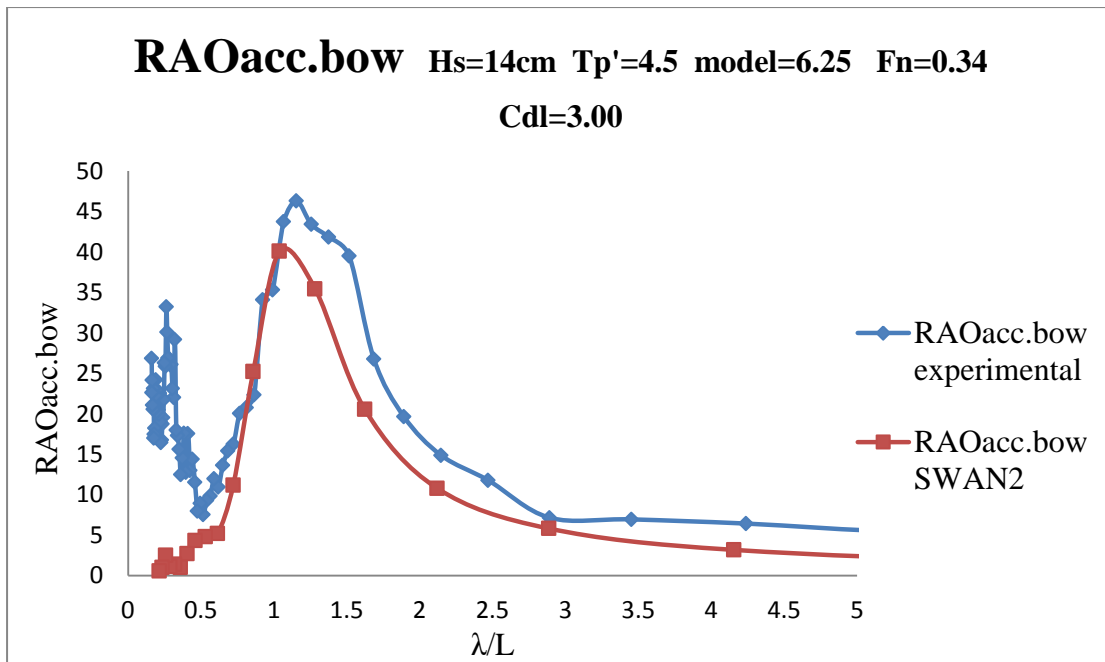
- Κύμα H14tp45.625



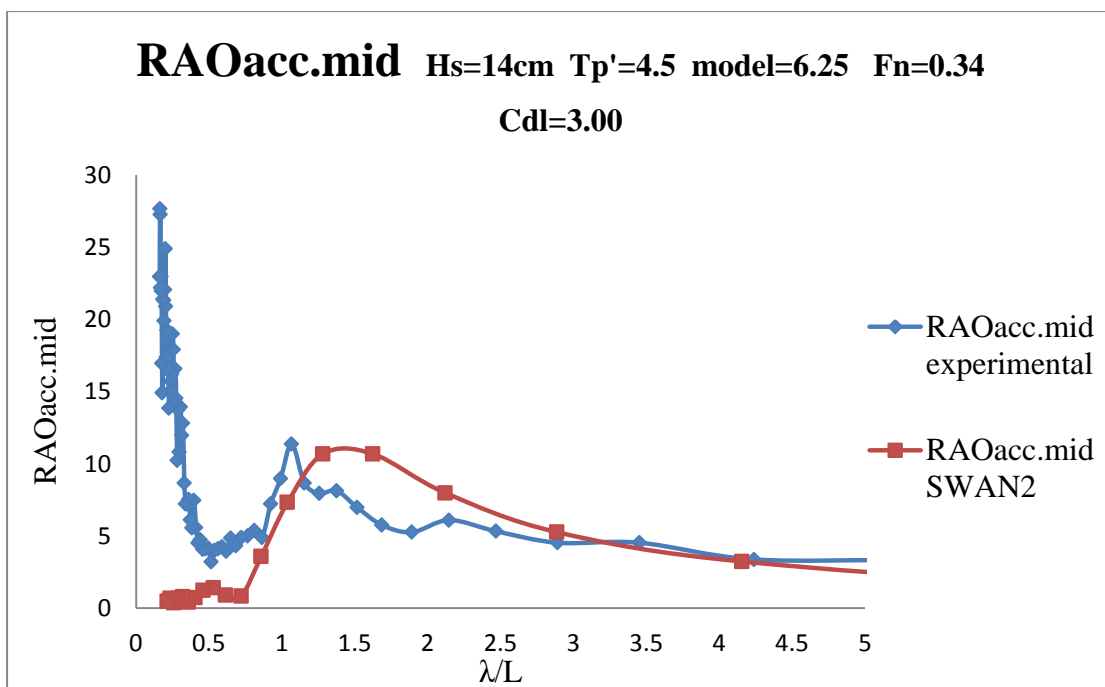
Σχήμα 6.26. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



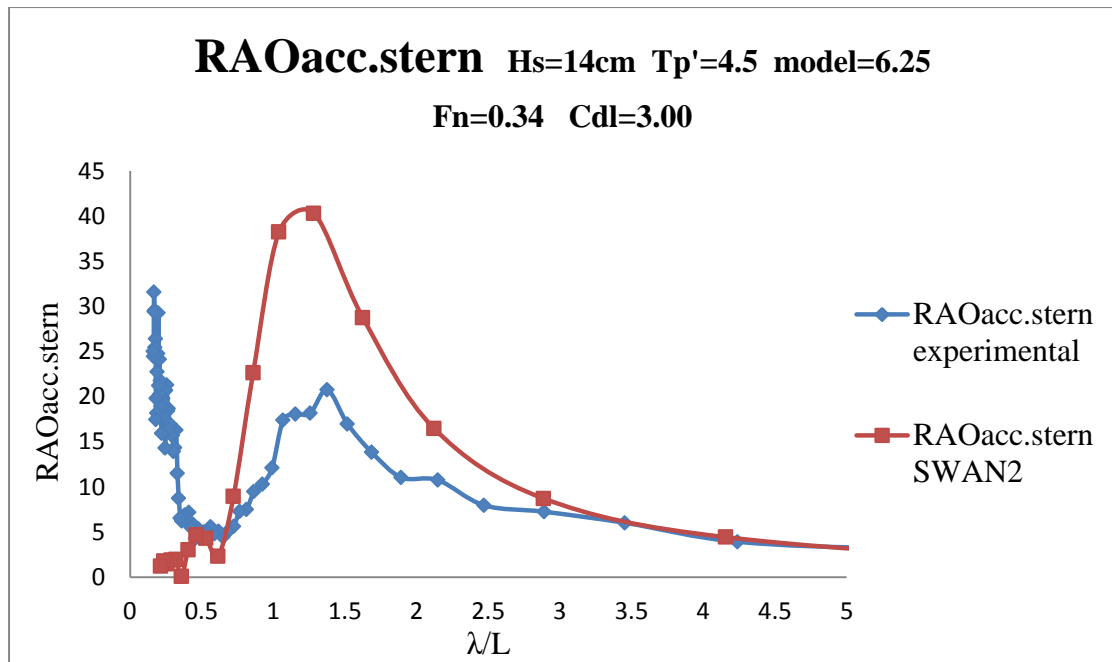
Σχήμα 6.26. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.28. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

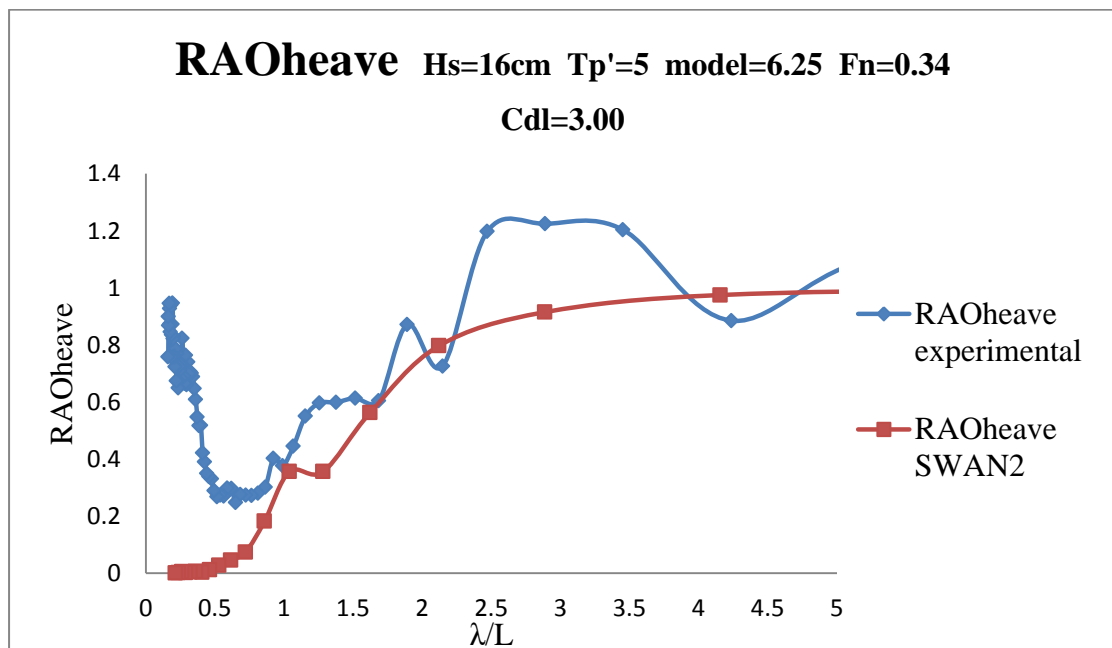


Σχήμα 6.29. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

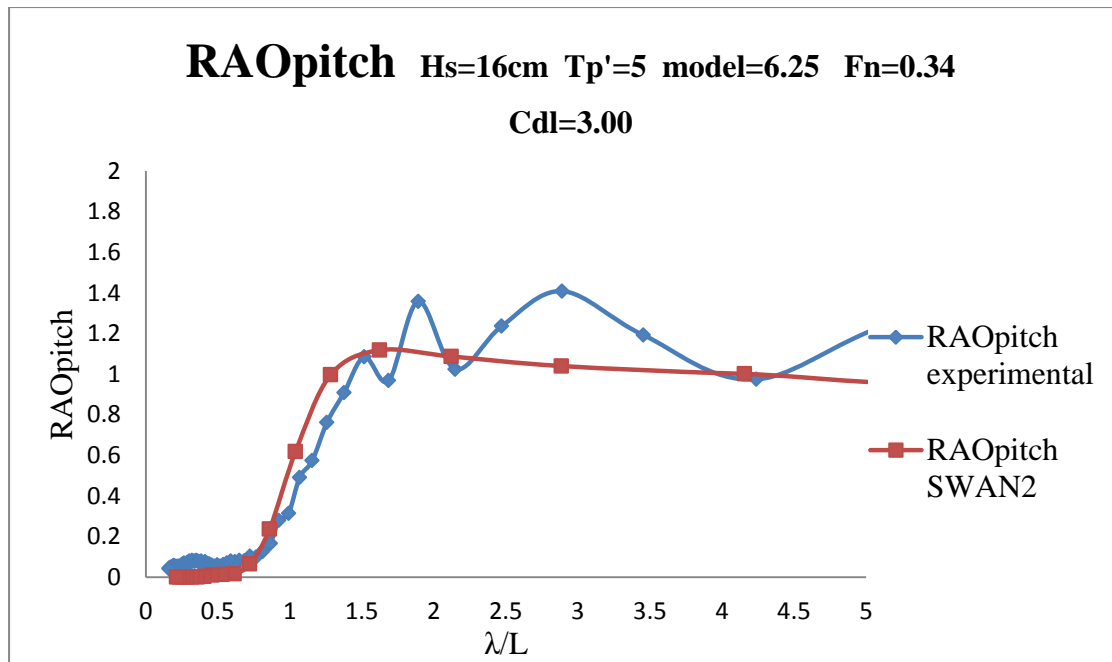


Σχήμα 6.30. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

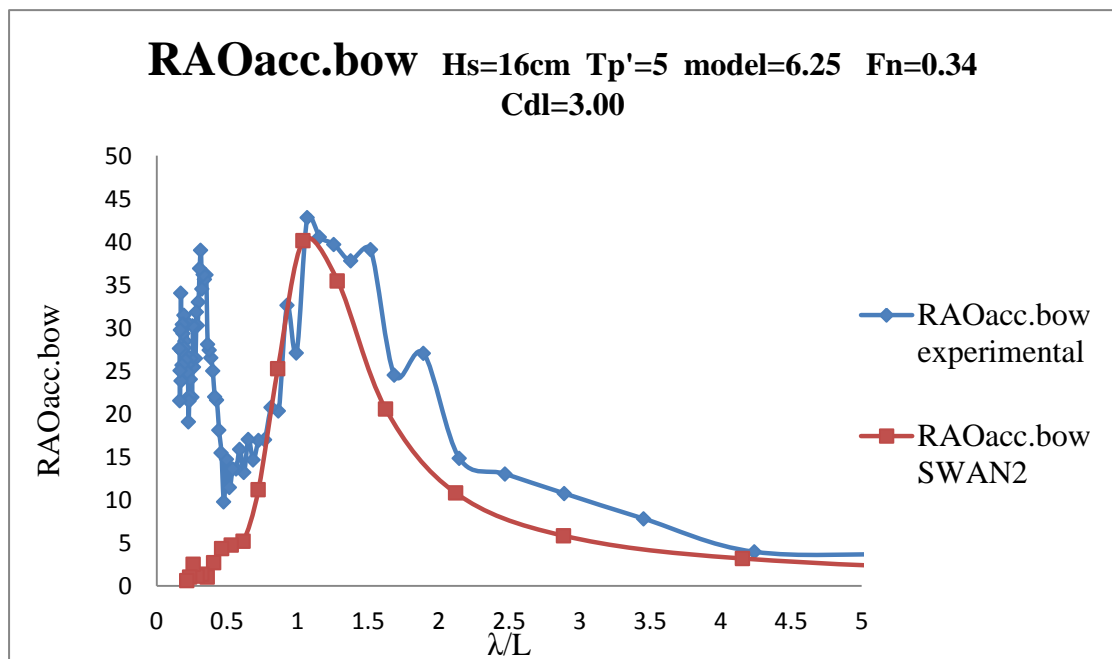
- Κύμα H16tp5.625



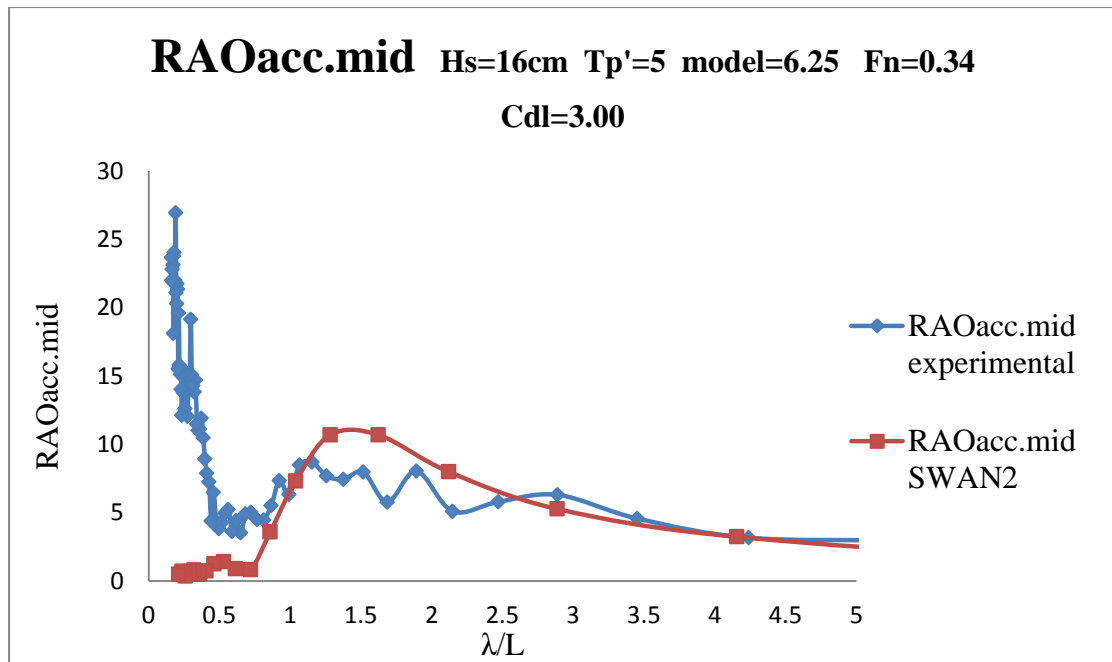
Σχήμα 6.31. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



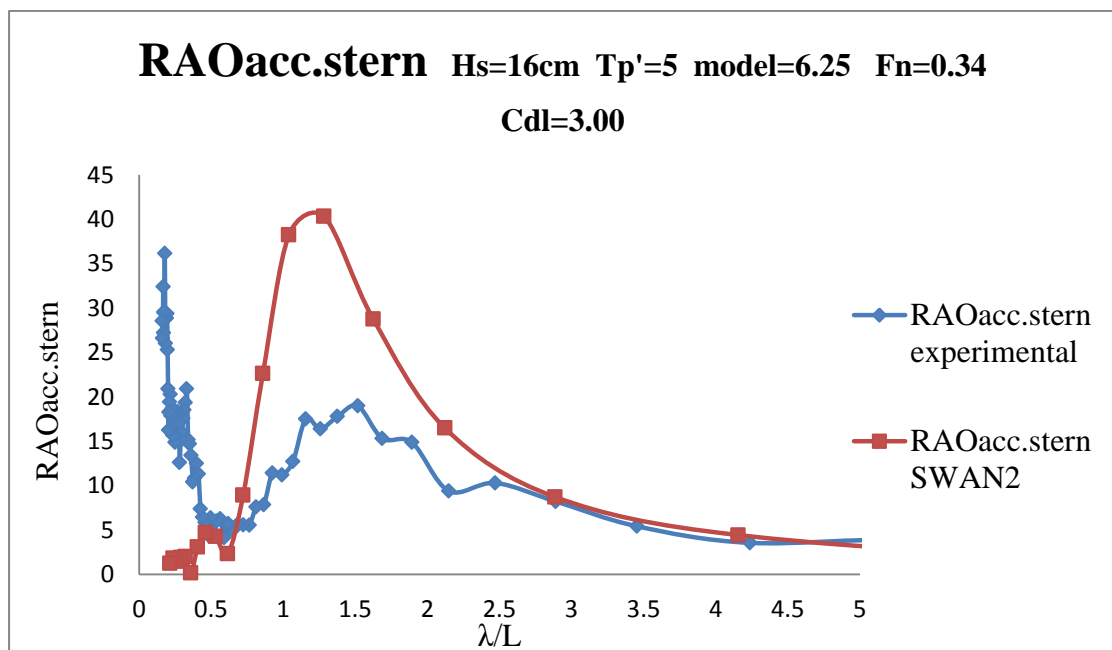
Σχήμα 6.32. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.33. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



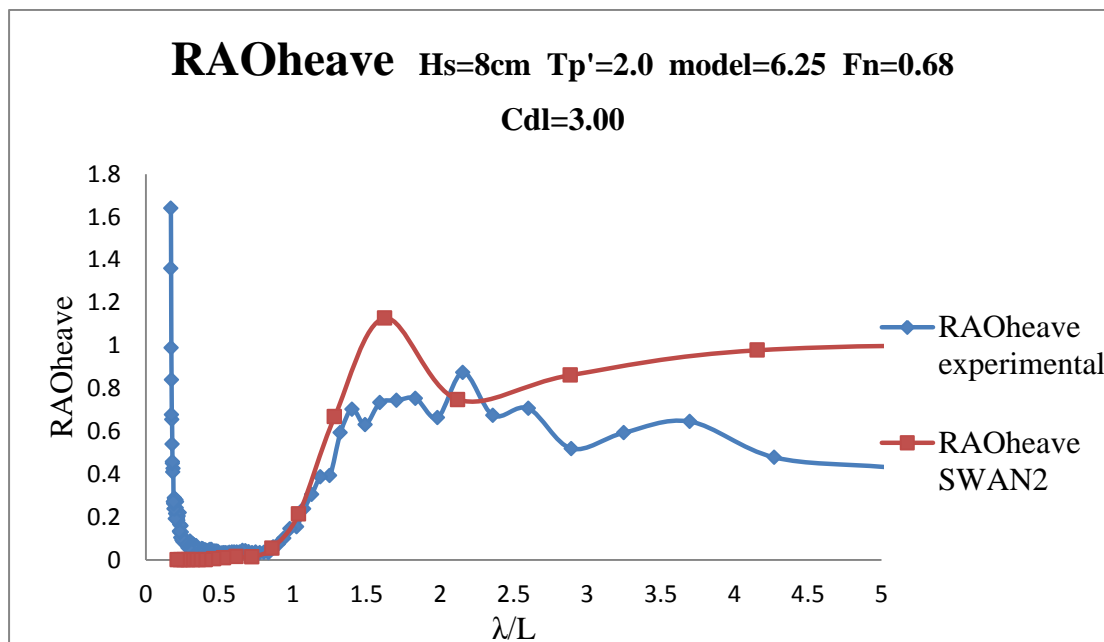
Σχήμα 6.34. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους



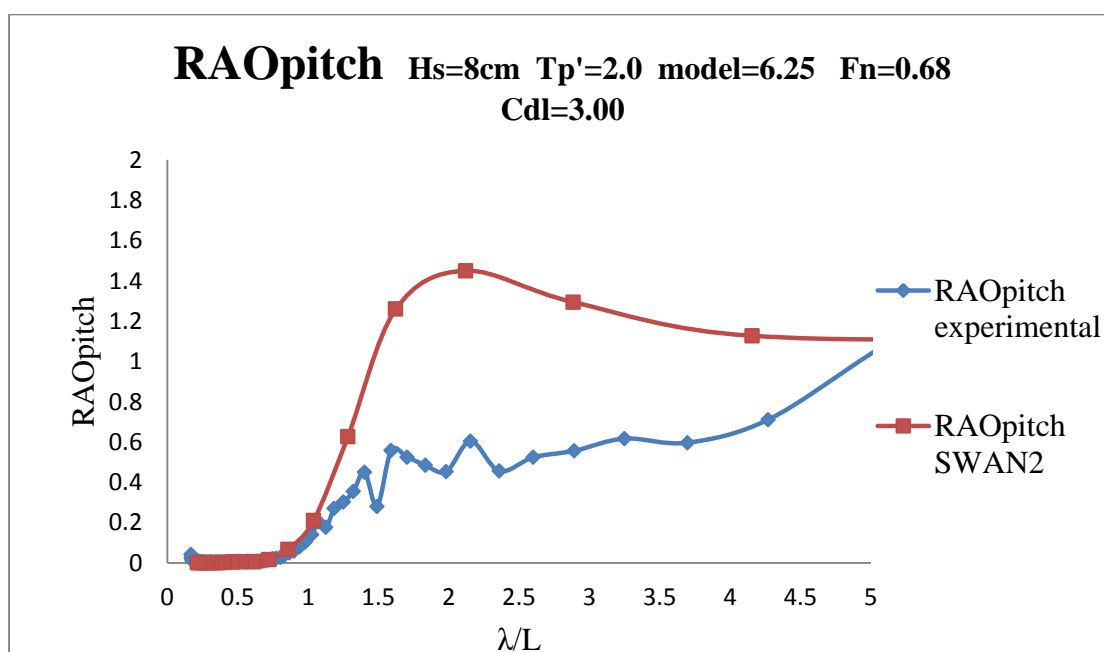
Σχήμα 6.35. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

Για την μεγάλη ταχύτητα, $F_n = 0.68$:

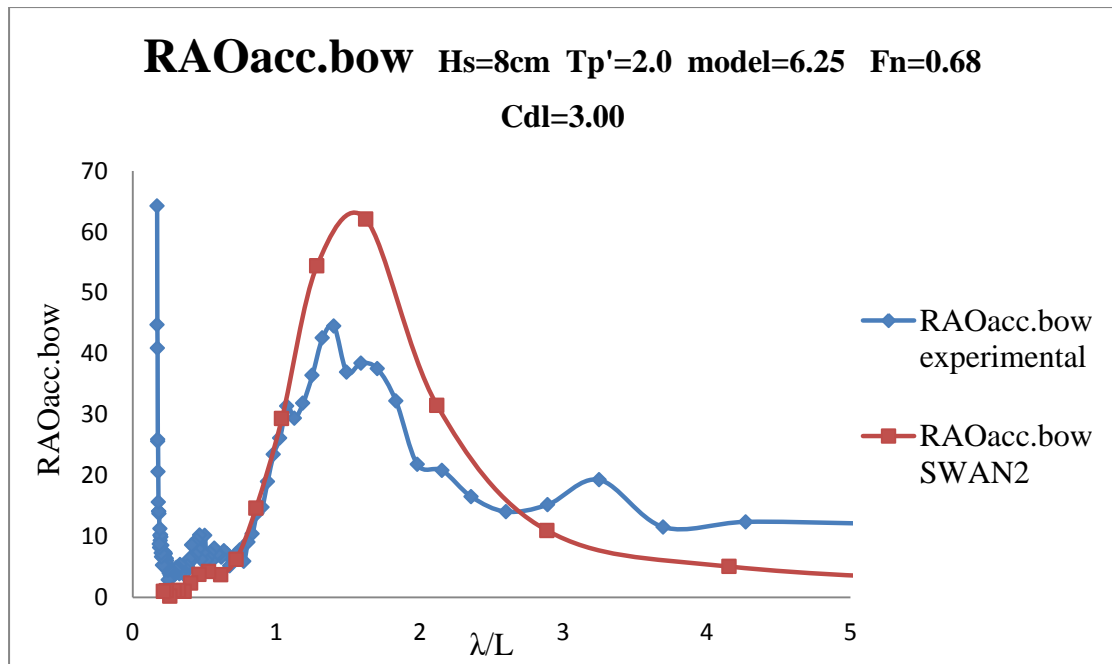
- Κύμα H8tp2.b



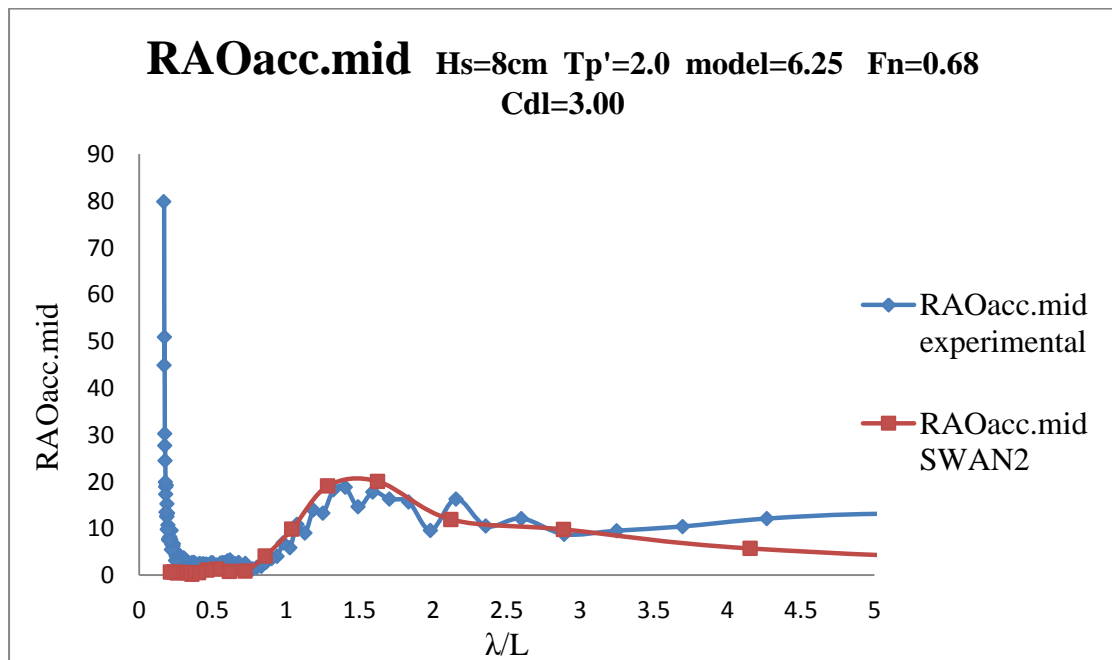
Σχήμα 6.36. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



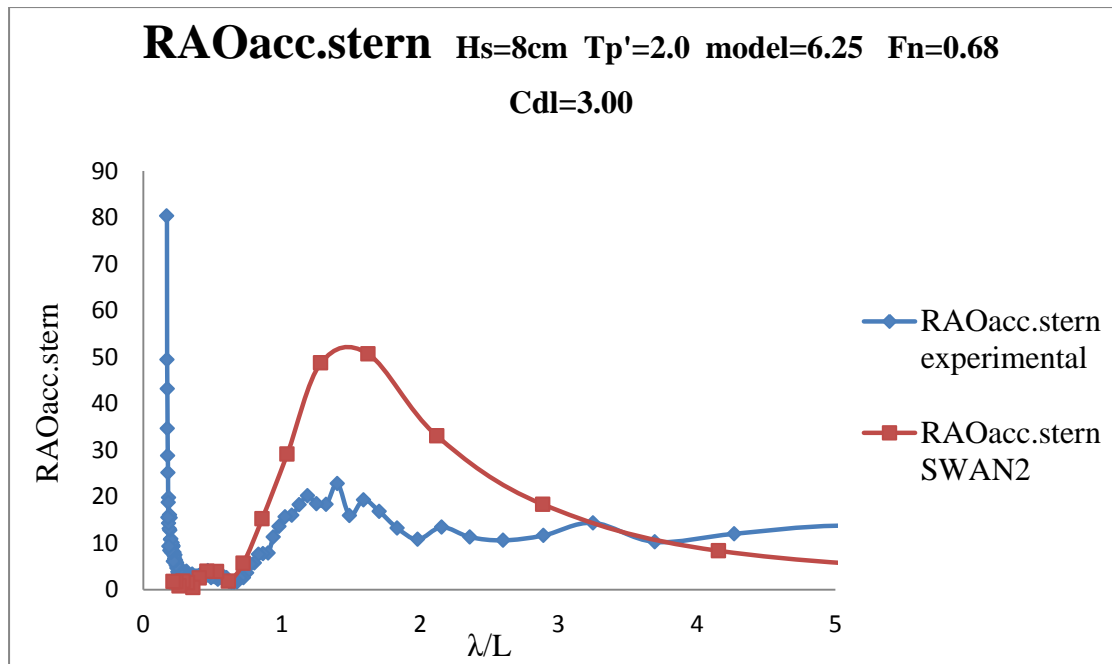
Σχήμα 6.37. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.38. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

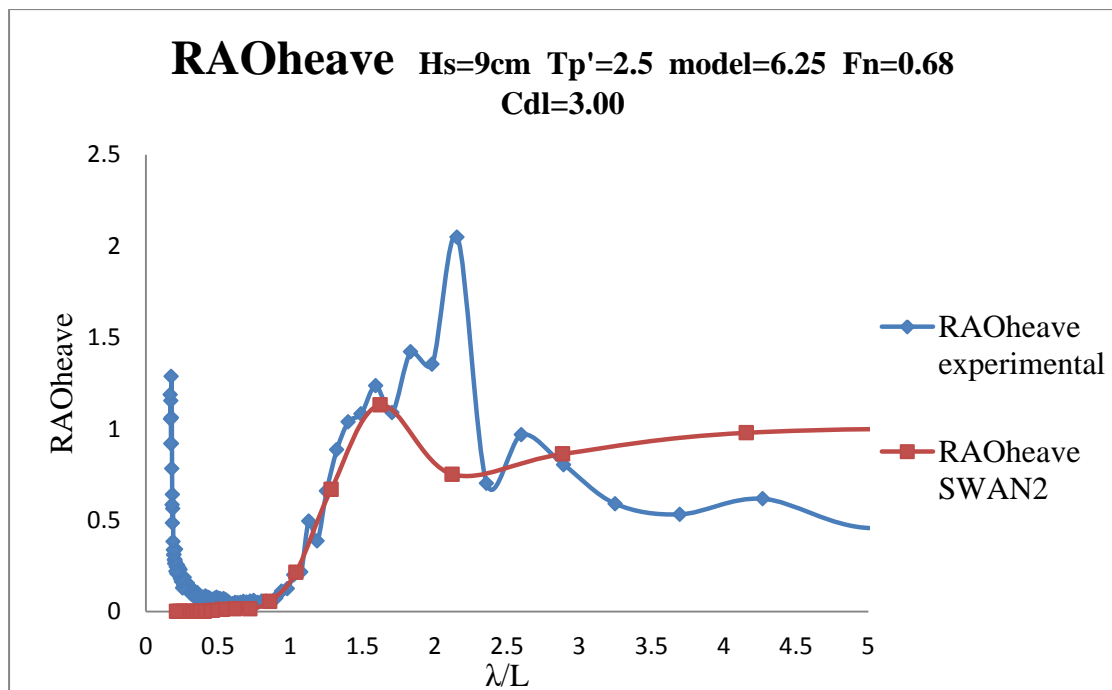


Σχήμα 6.39. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

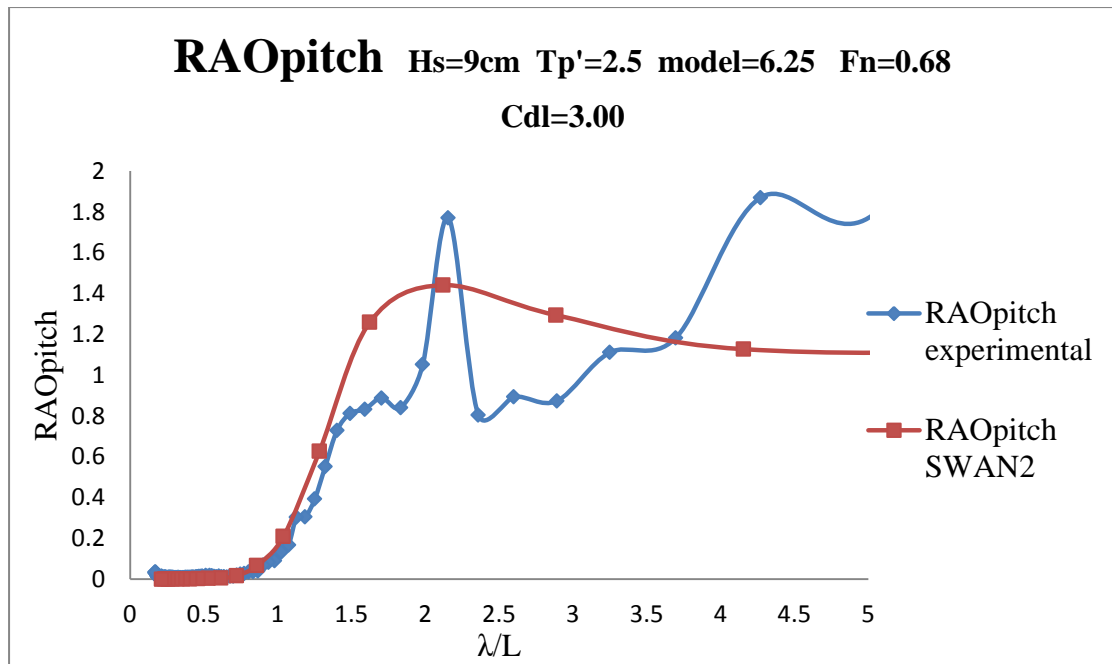


Σχήμα 6.40. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

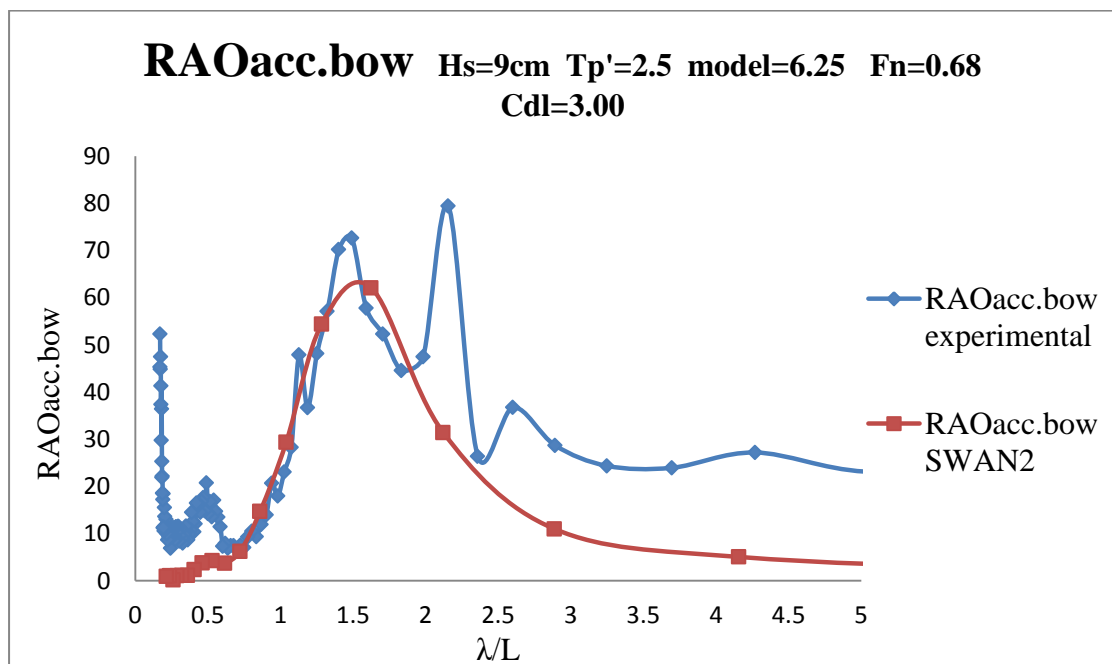
- Κύμα H9tp25.625



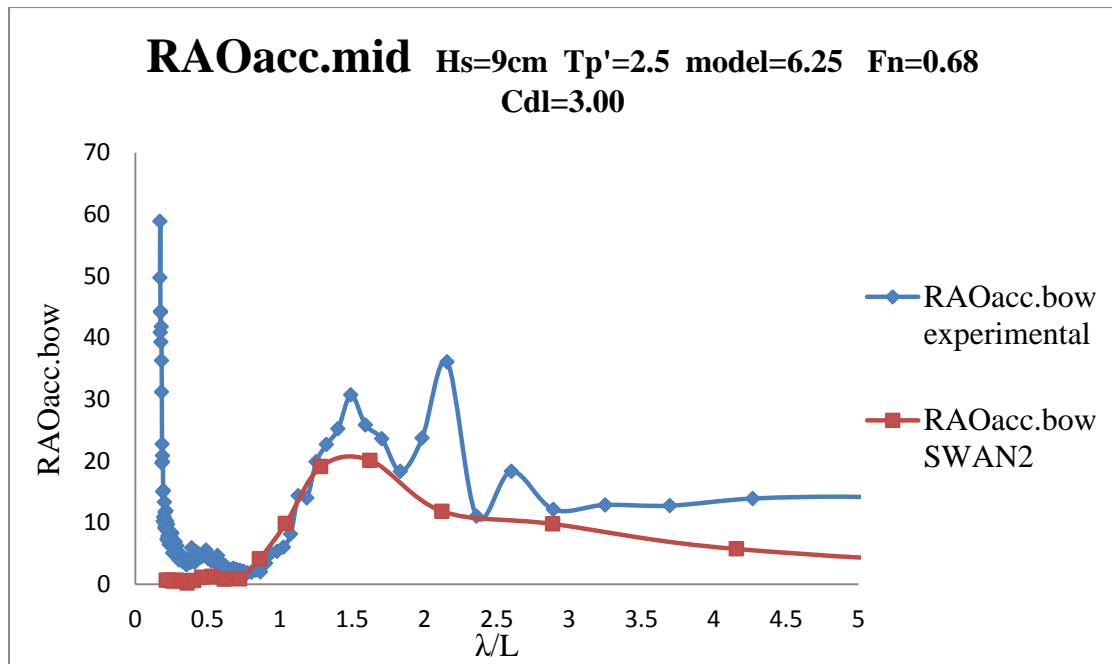
Σχήμα 6.41. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



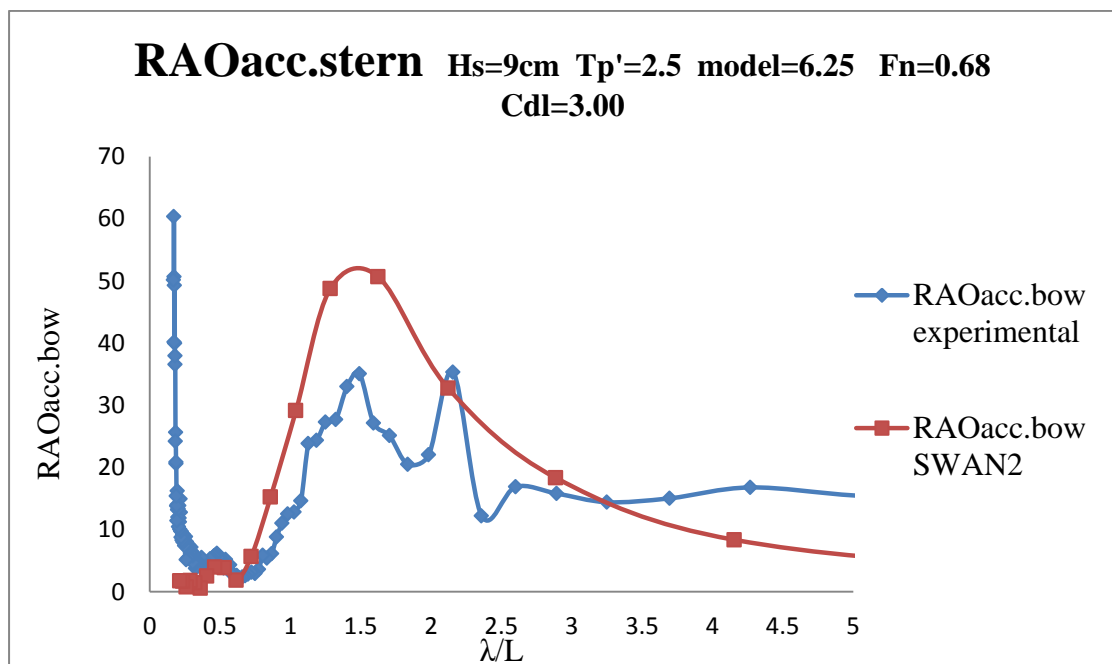
Σχήμα 6.42. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.43. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

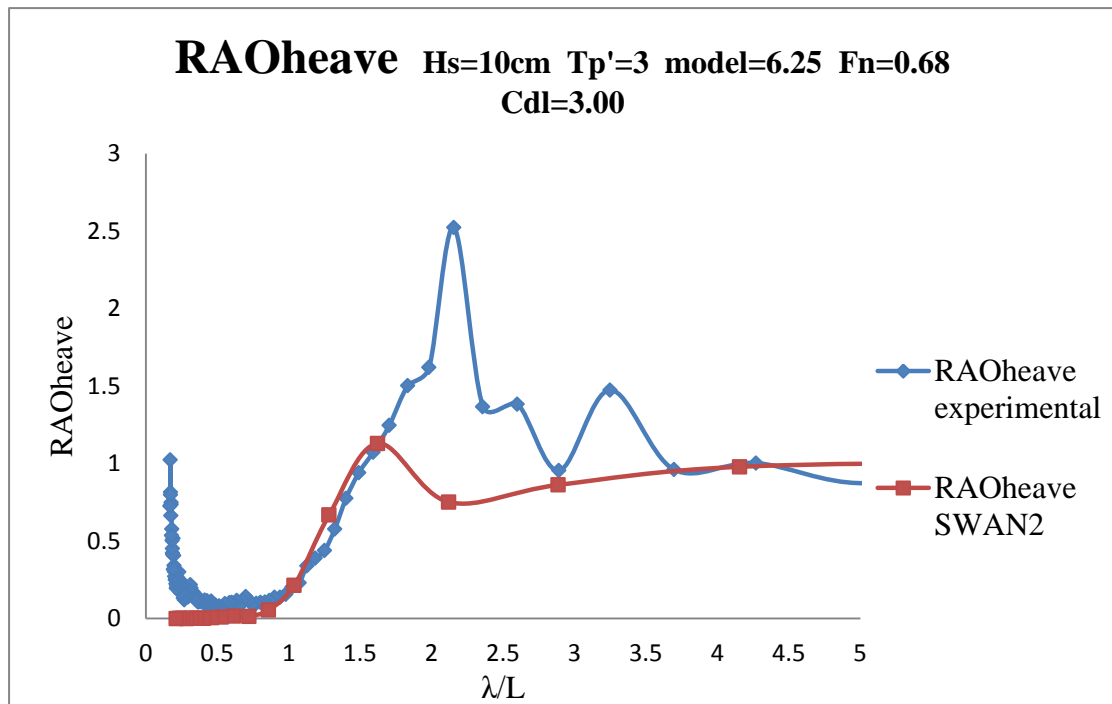


Σχήμα 6.44. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

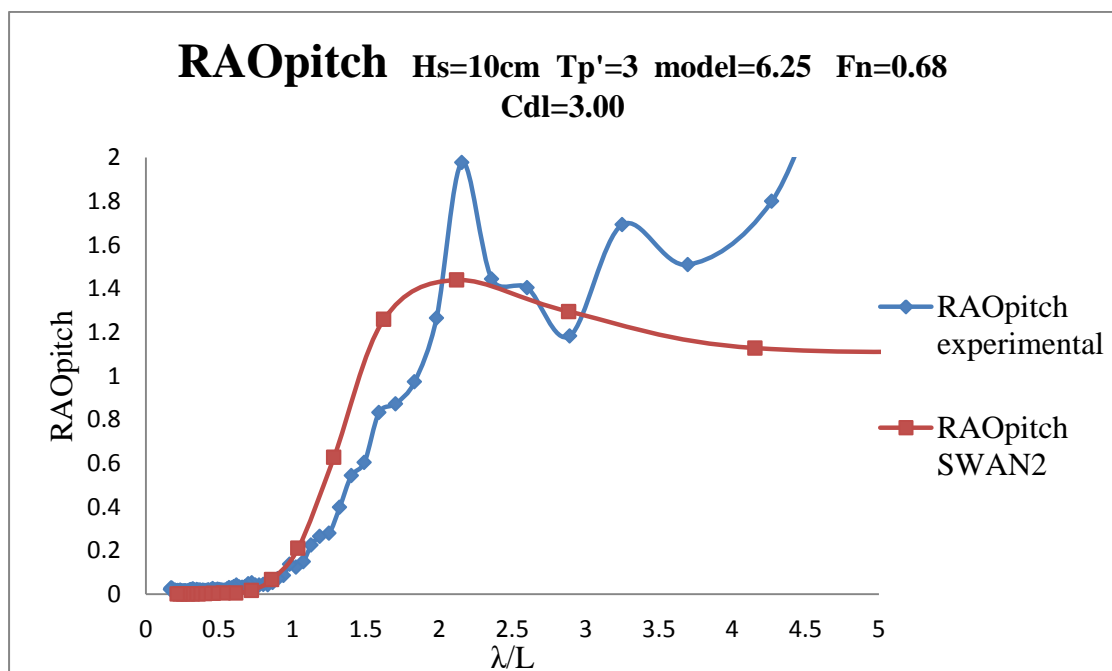


Σχήμα 6.45. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

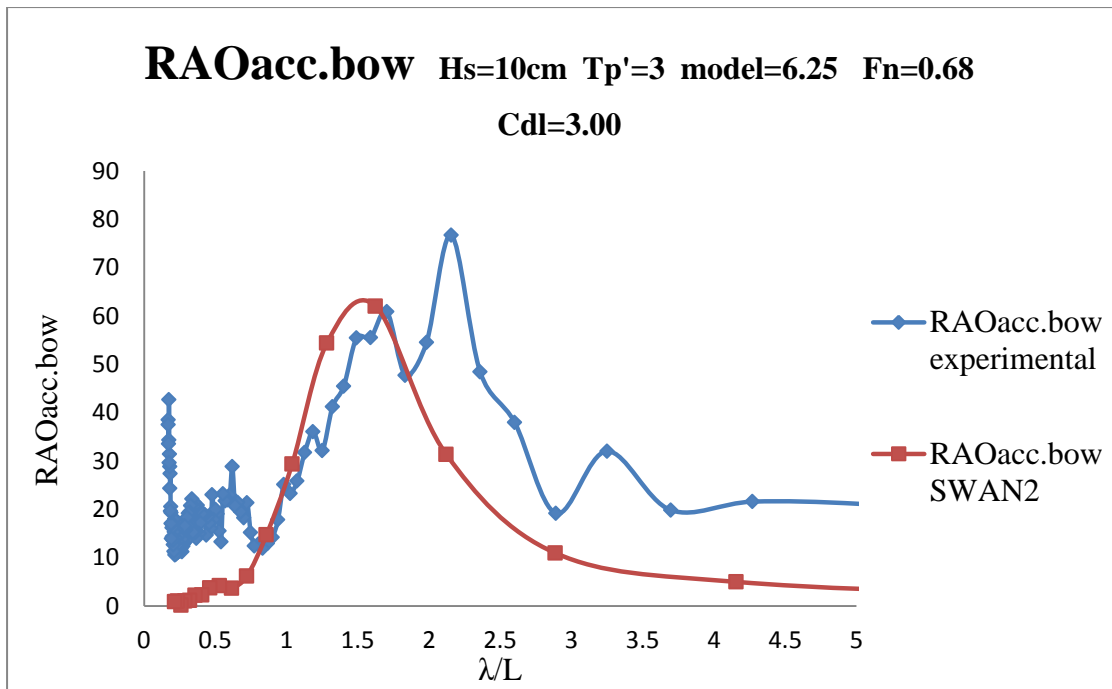
- Κύμα H10tp3.625



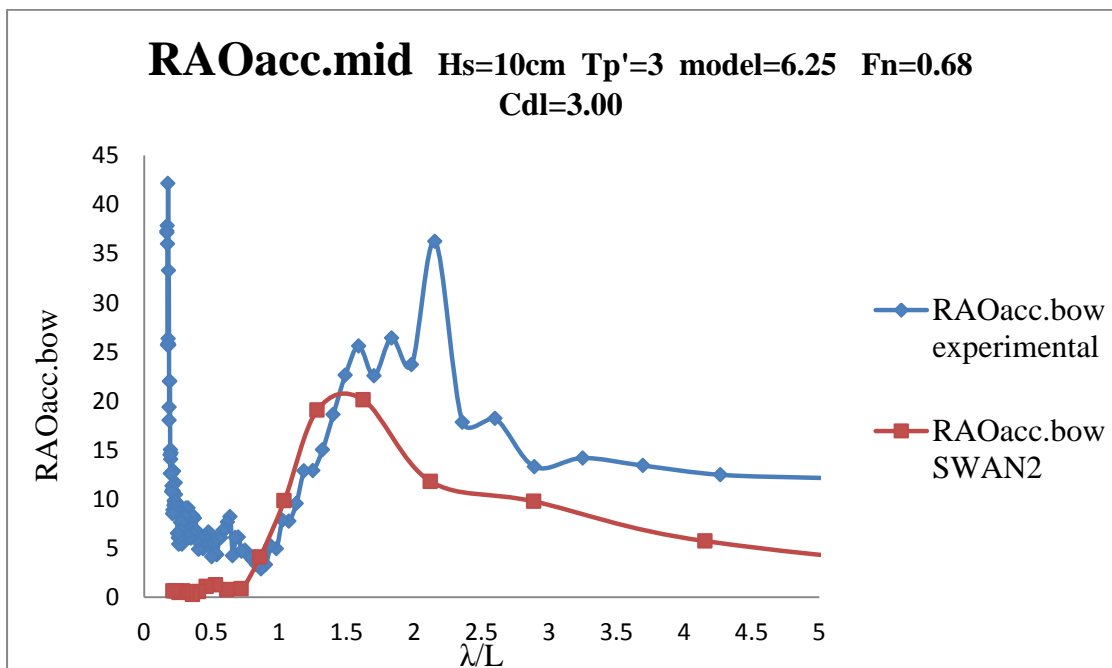
Σχήμα 6.46. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



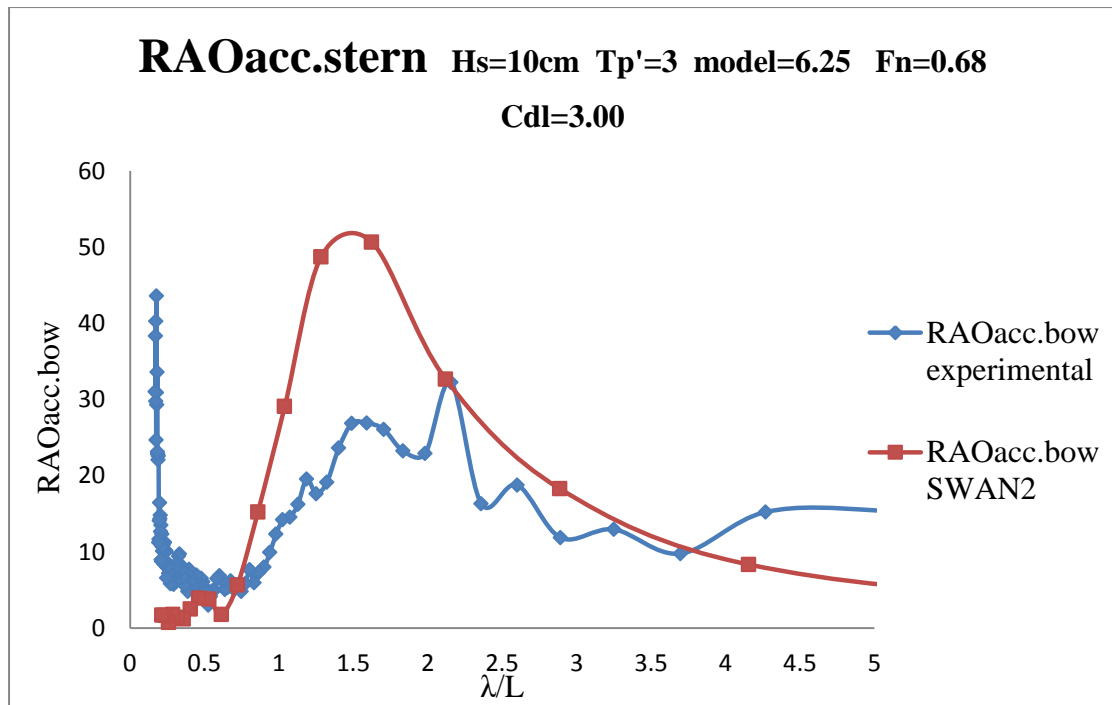
Σχήμα 6.47. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.48. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

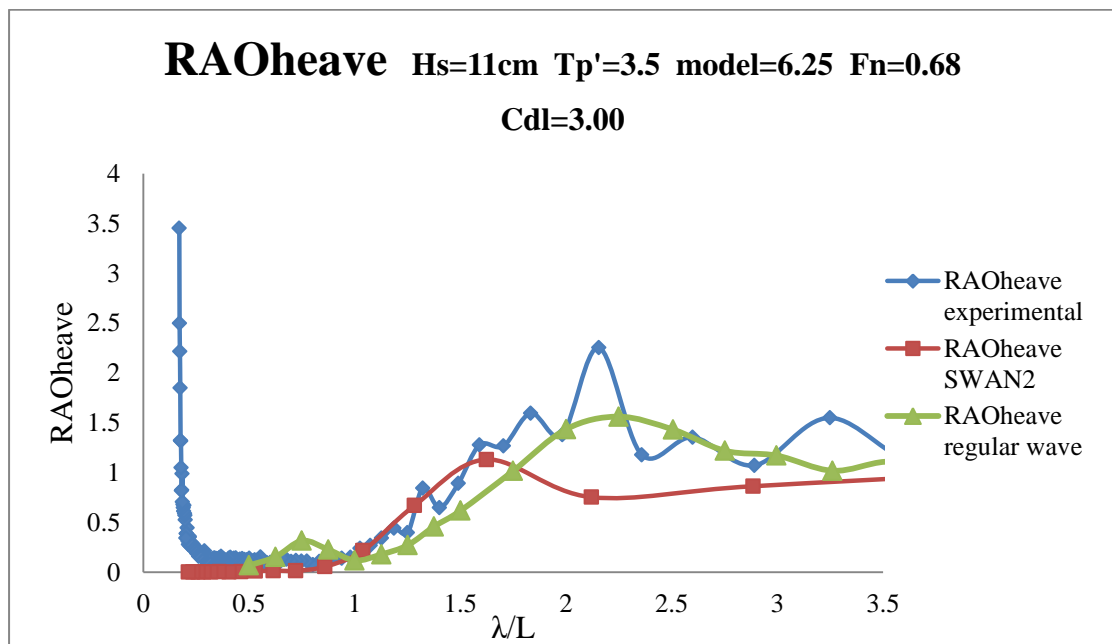


Σχήμα 6.49. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

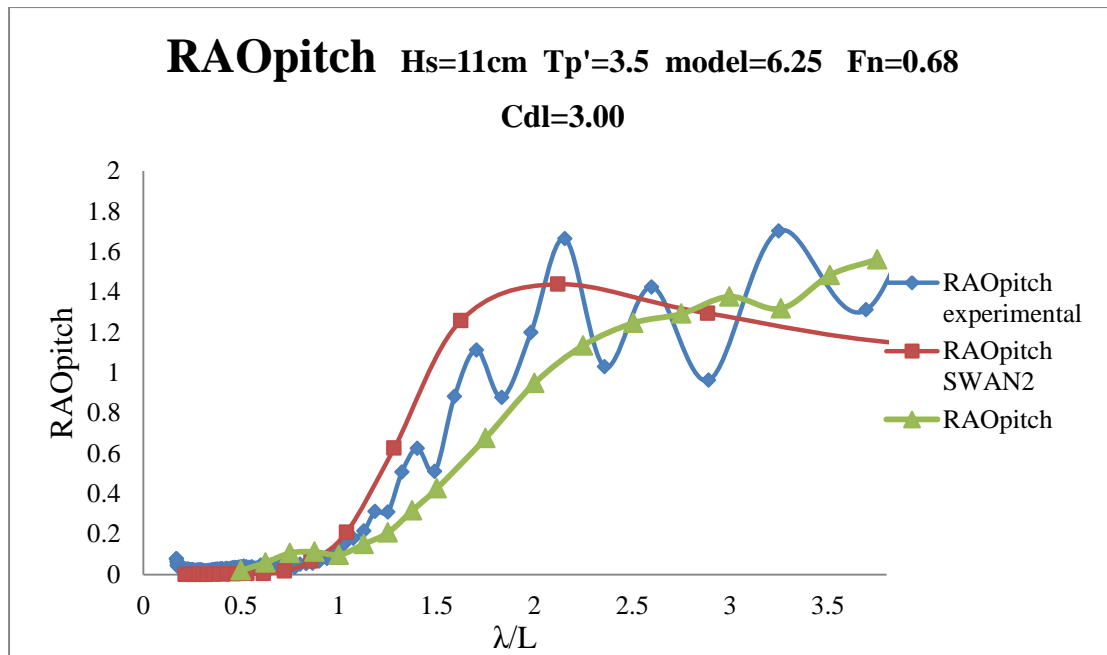


Σχήμα 6.50. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

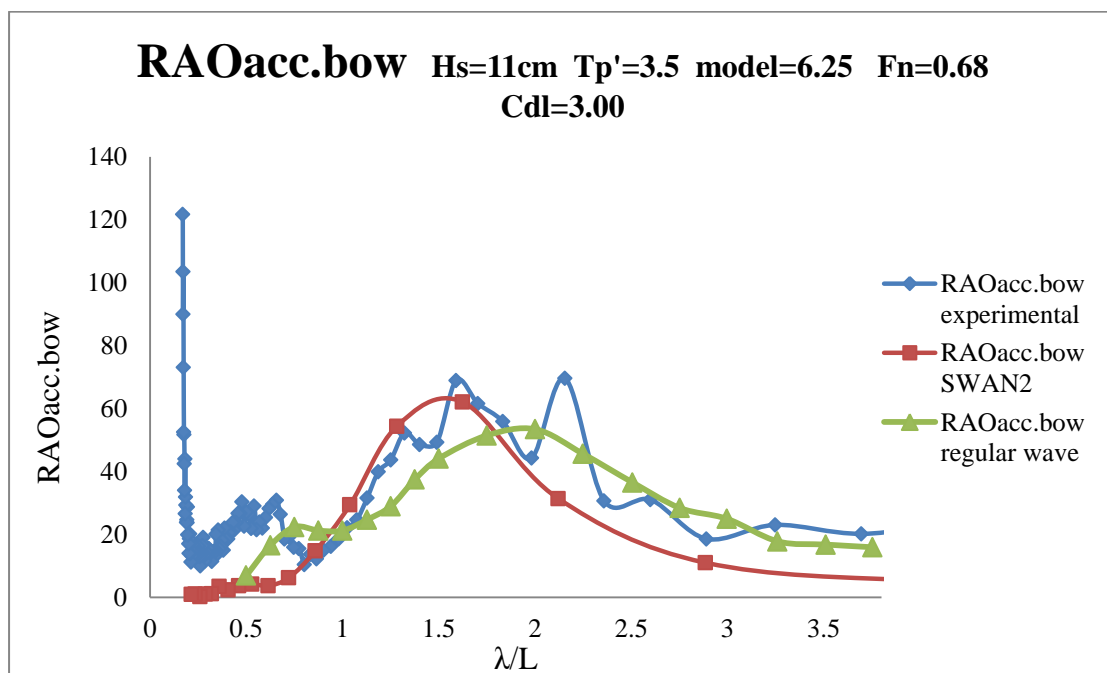
- Κύμα H11tp35.625



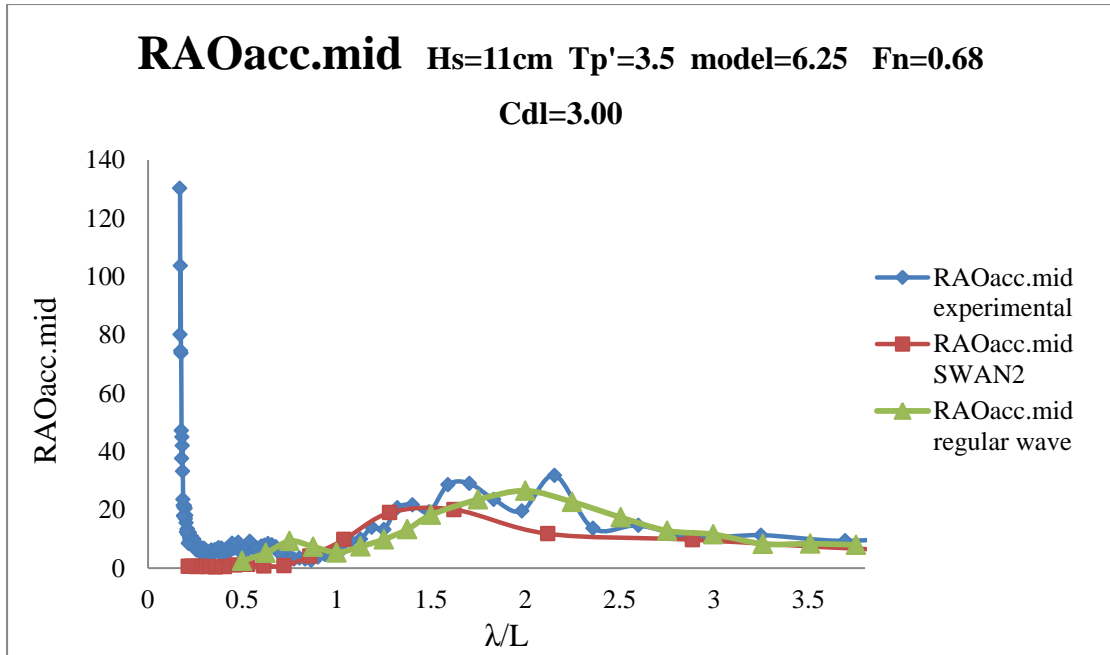
Σχήμα 6.51. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



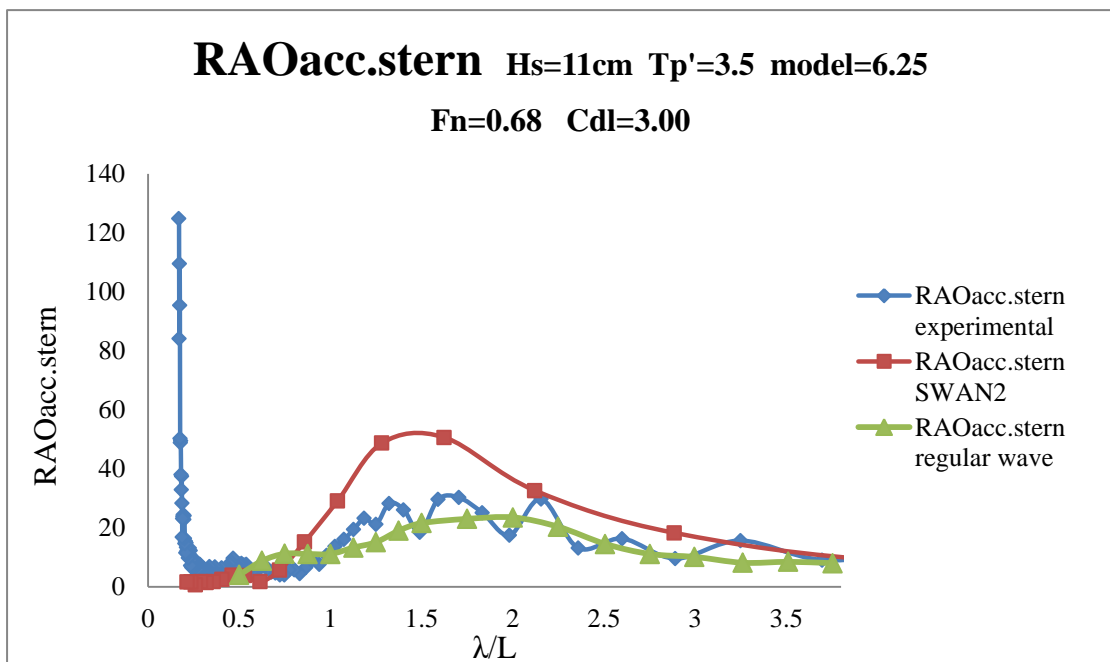
Σχήμα 6.52. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.53. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

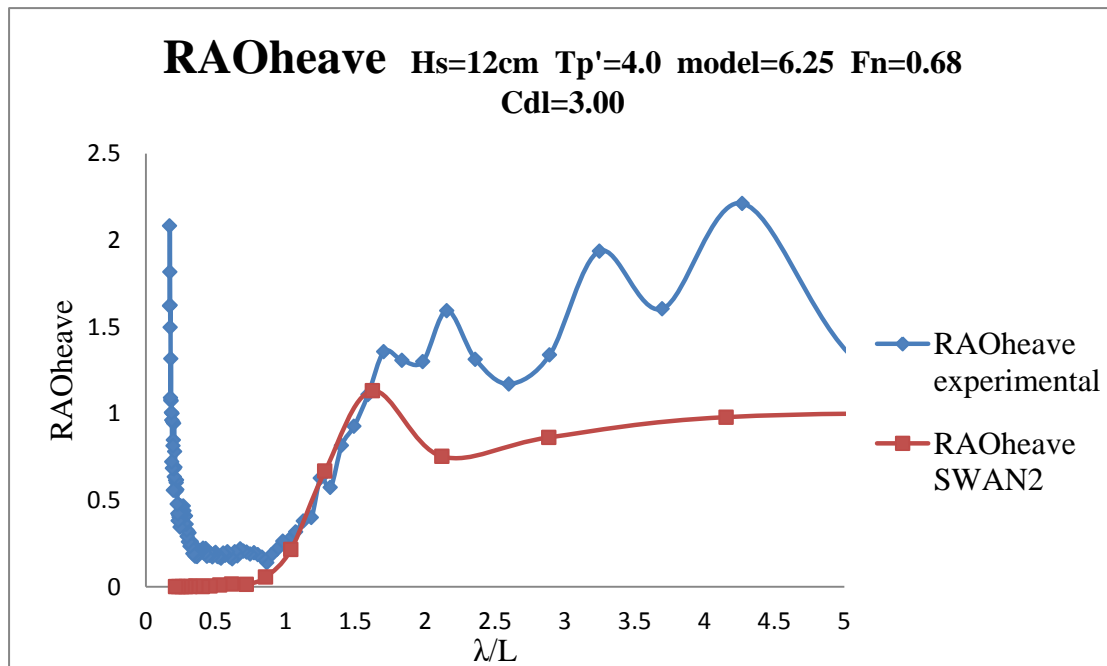


Σχήμα 6.54. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

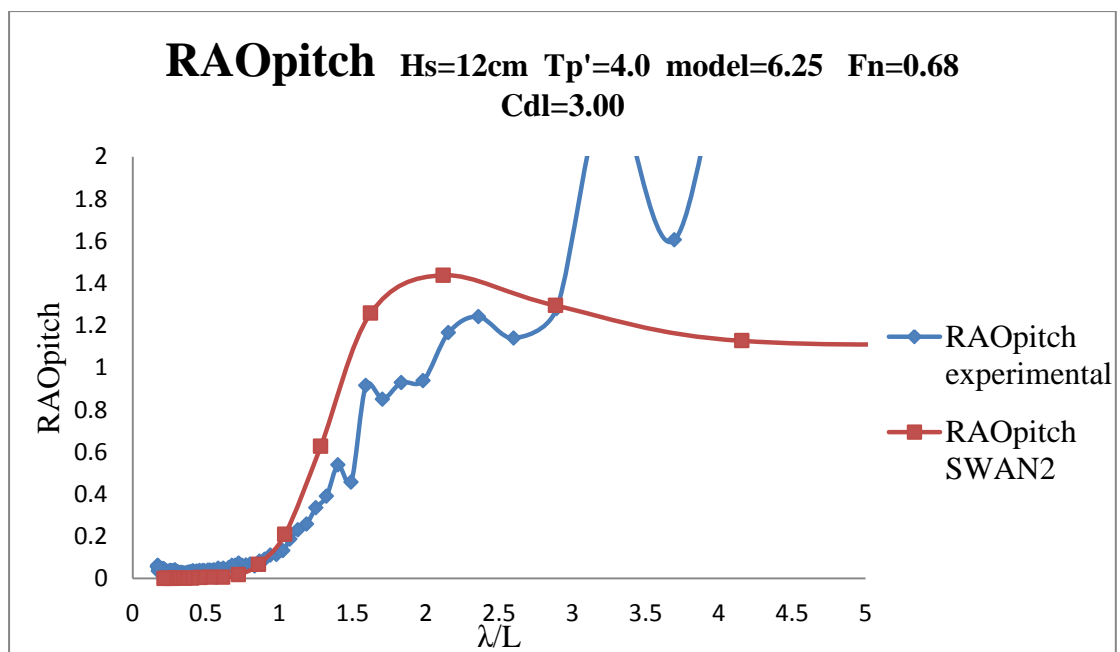


Σχήμα 6.55. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

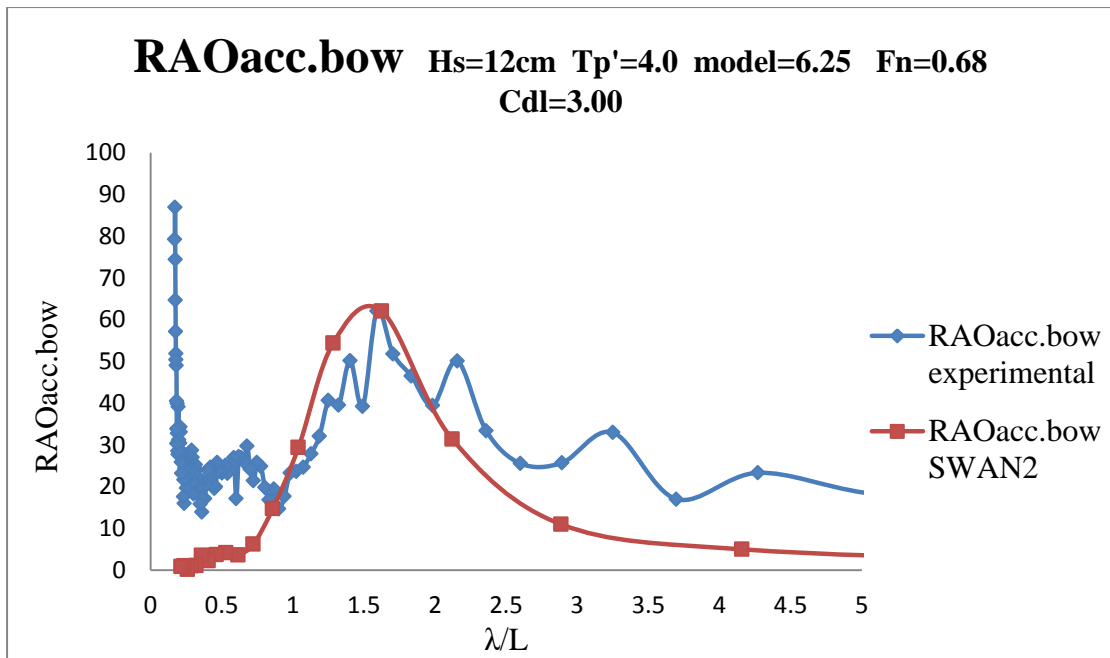
- Κύμα H12tp4.625



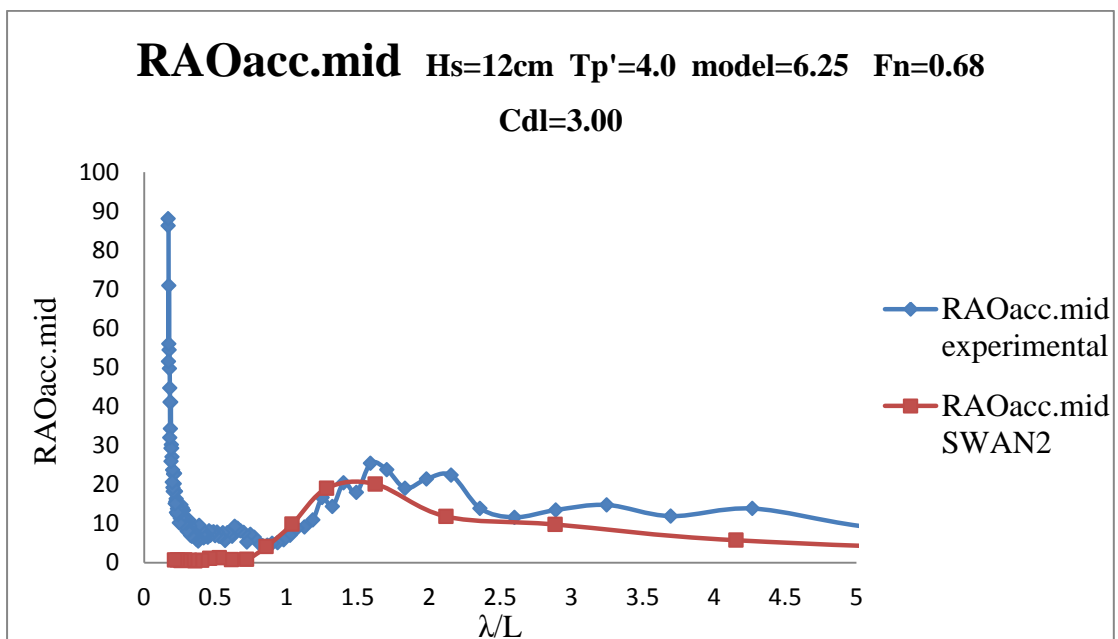
Σχήμα 6.56. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



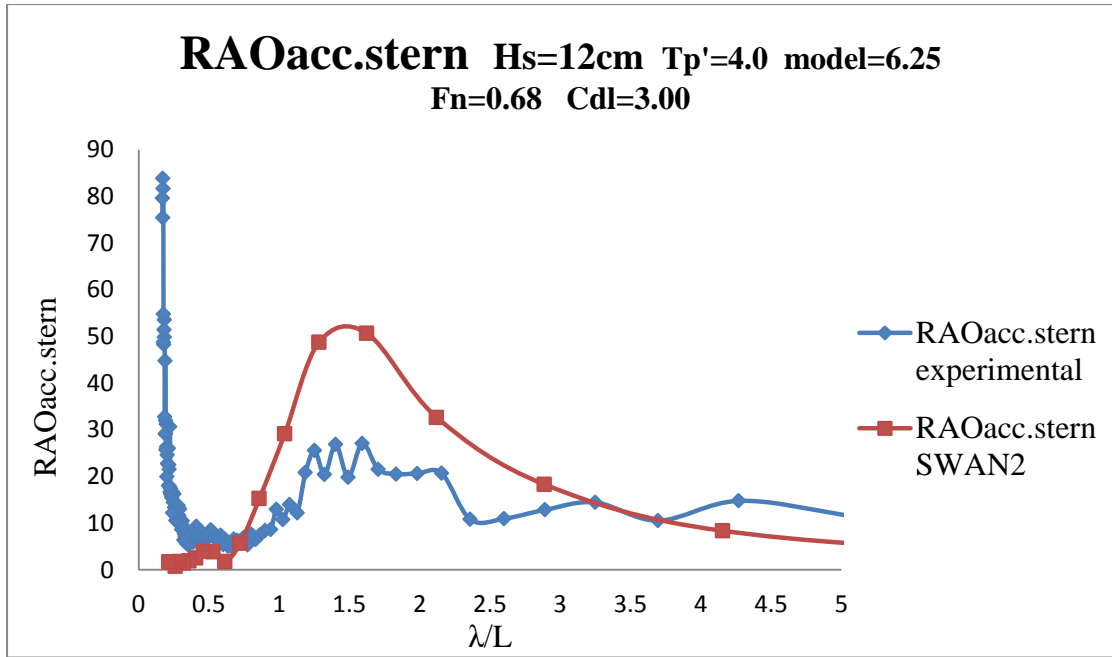
Σχήμα 6.57. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.58. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

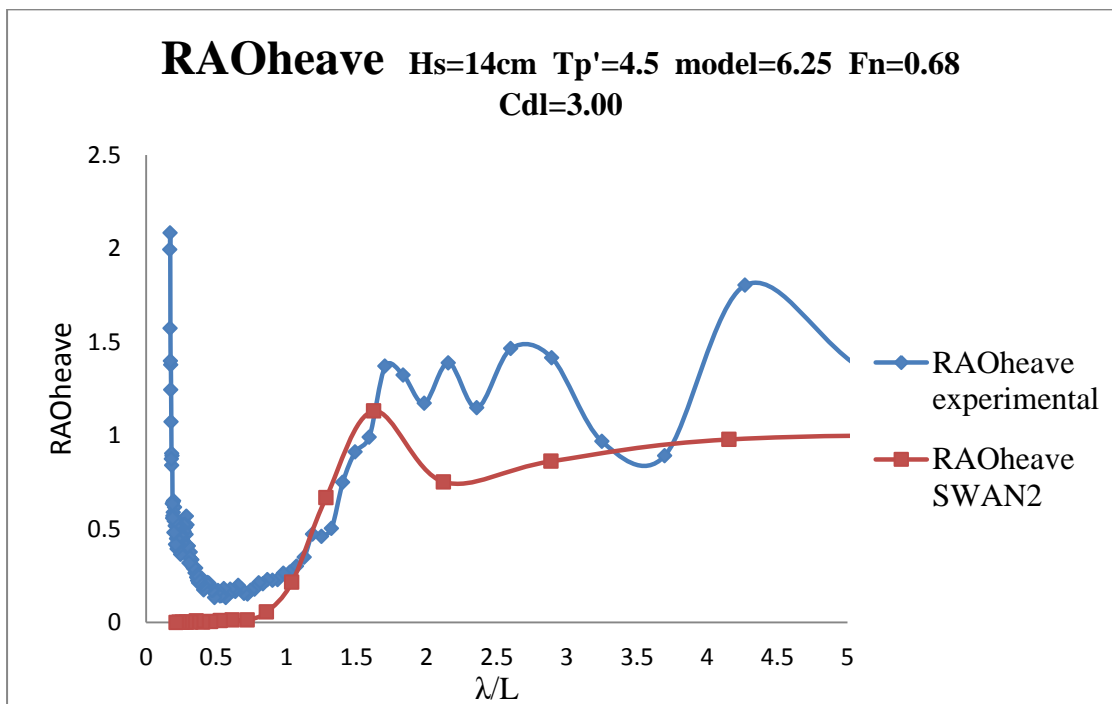


Σχήμα 6.59. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

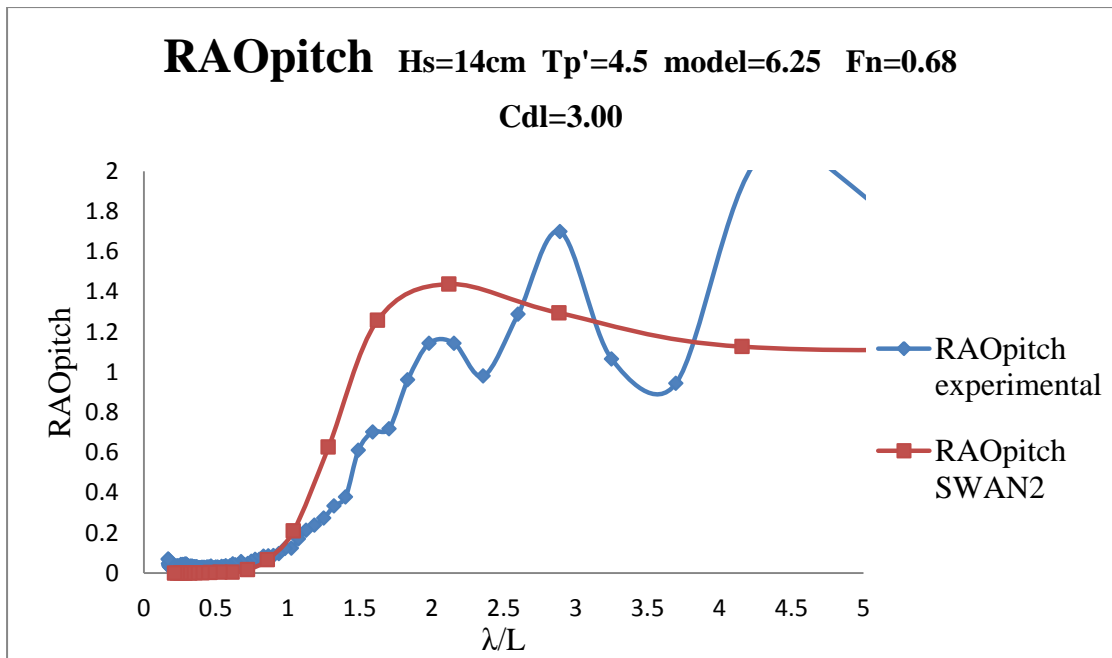


Σχήμα 6.60. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

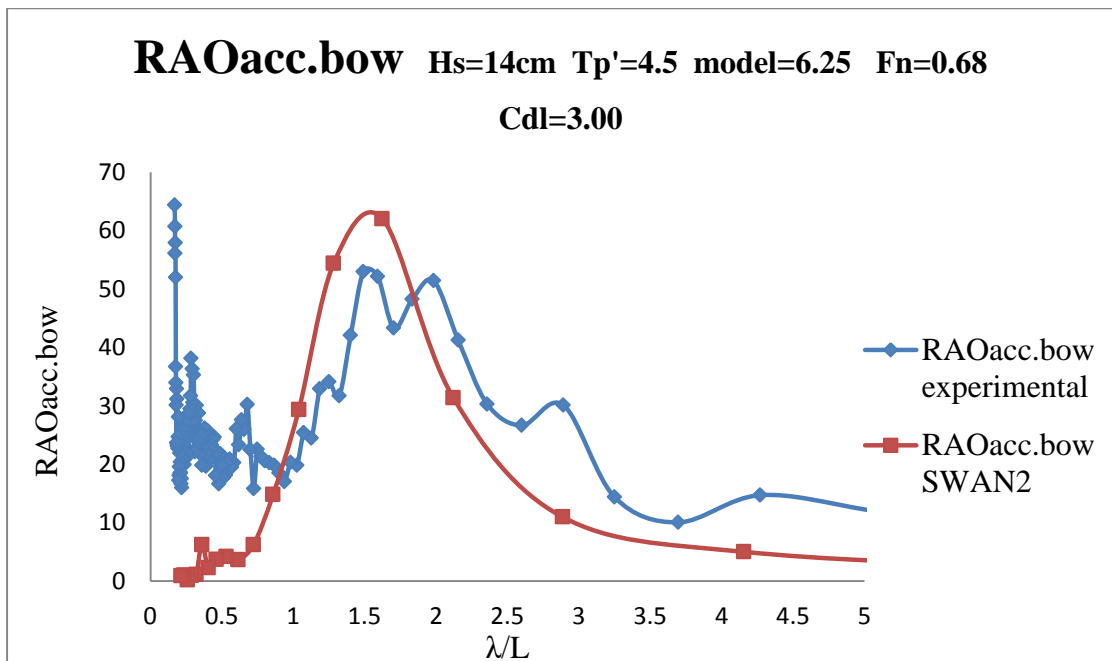
- Κύμα H14tp45.625



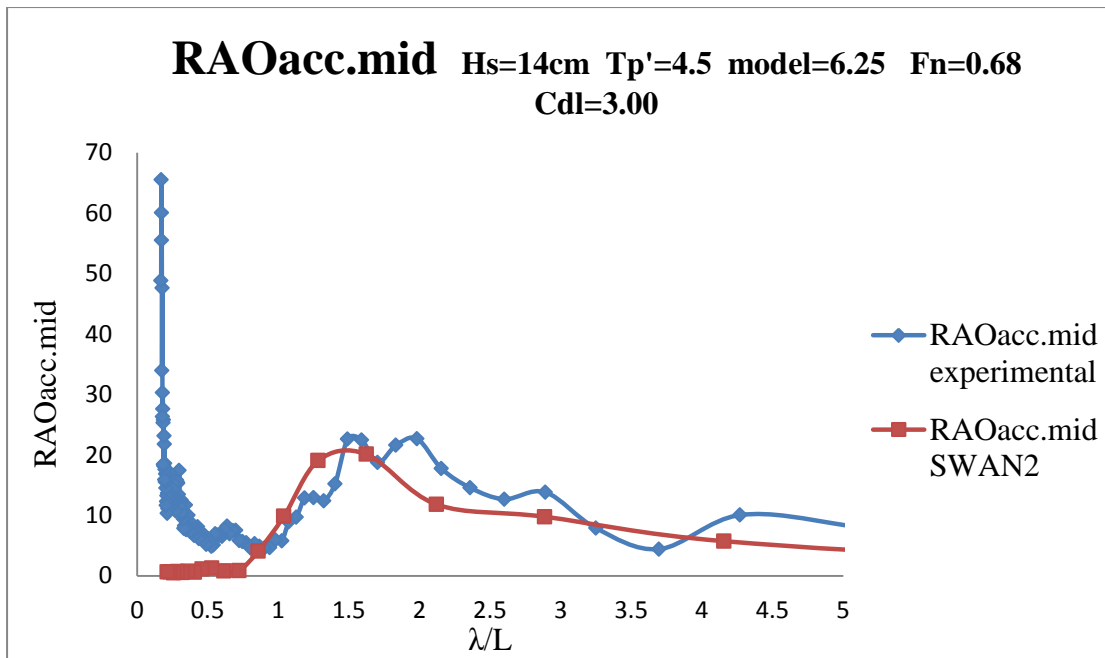
Σχήμα 6.61. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



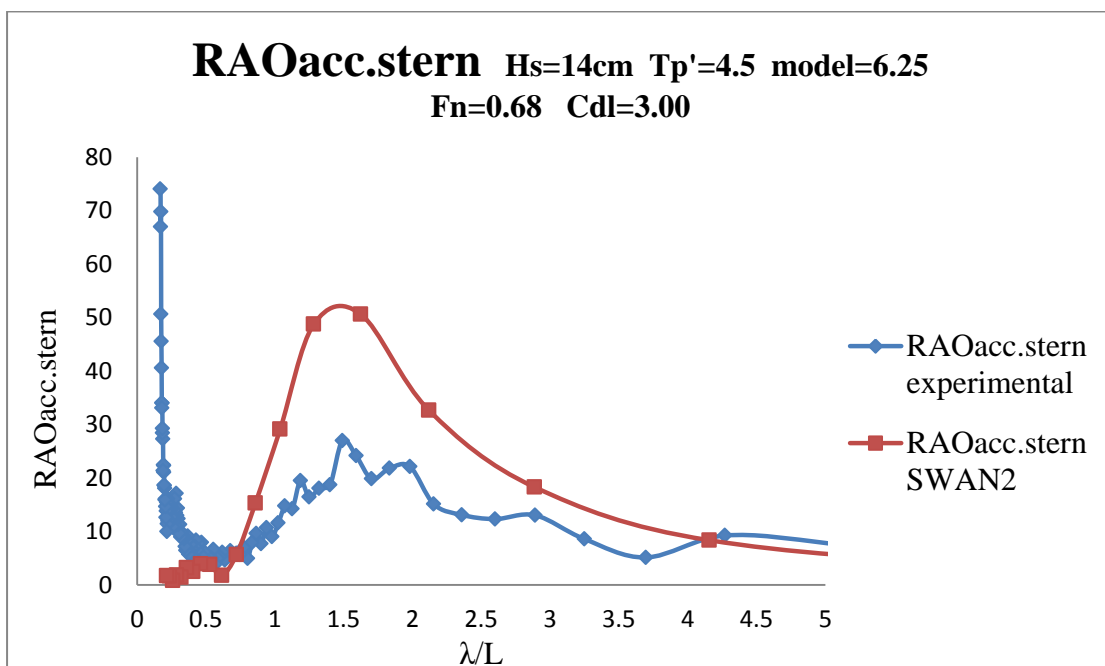
Σχήμα 6.62. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.63. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

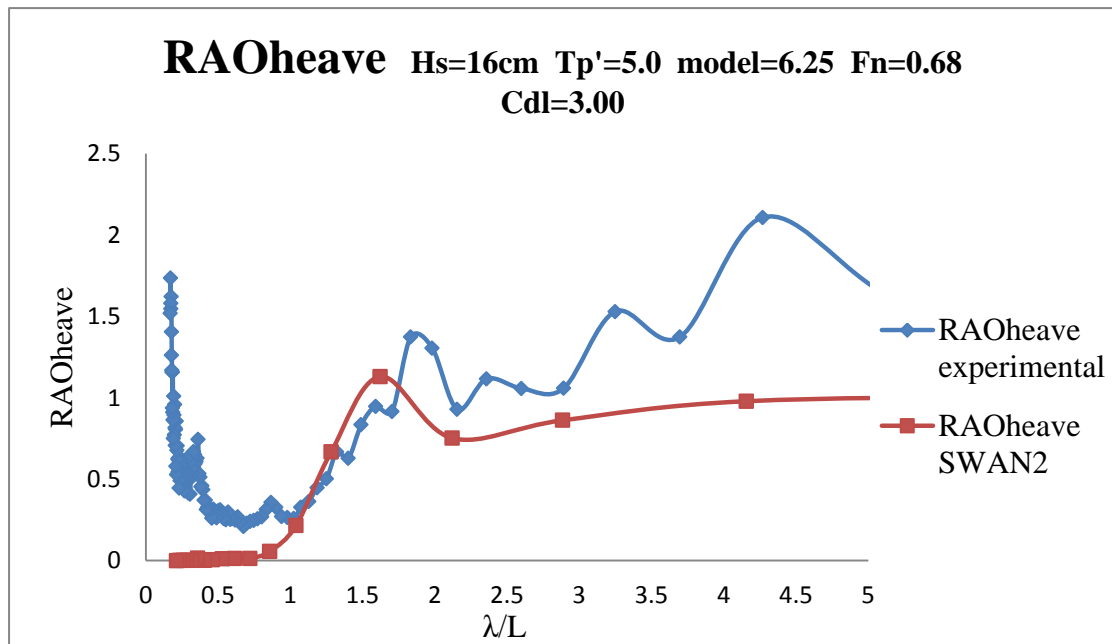


Σχήμα 6.64. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

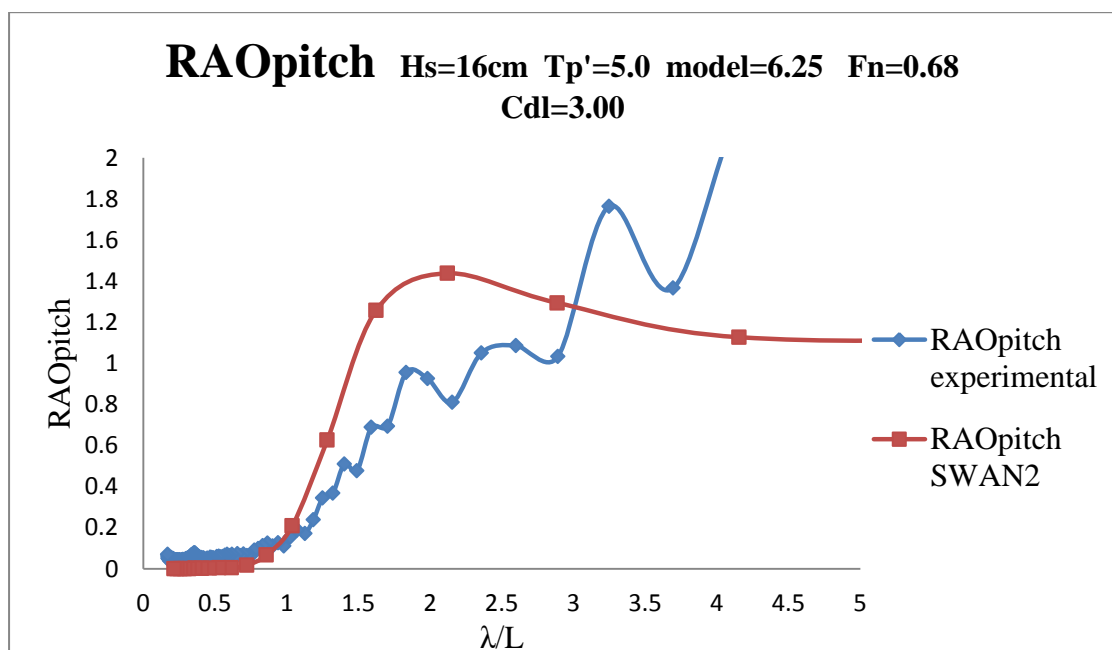


Σχήμα 6.65. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

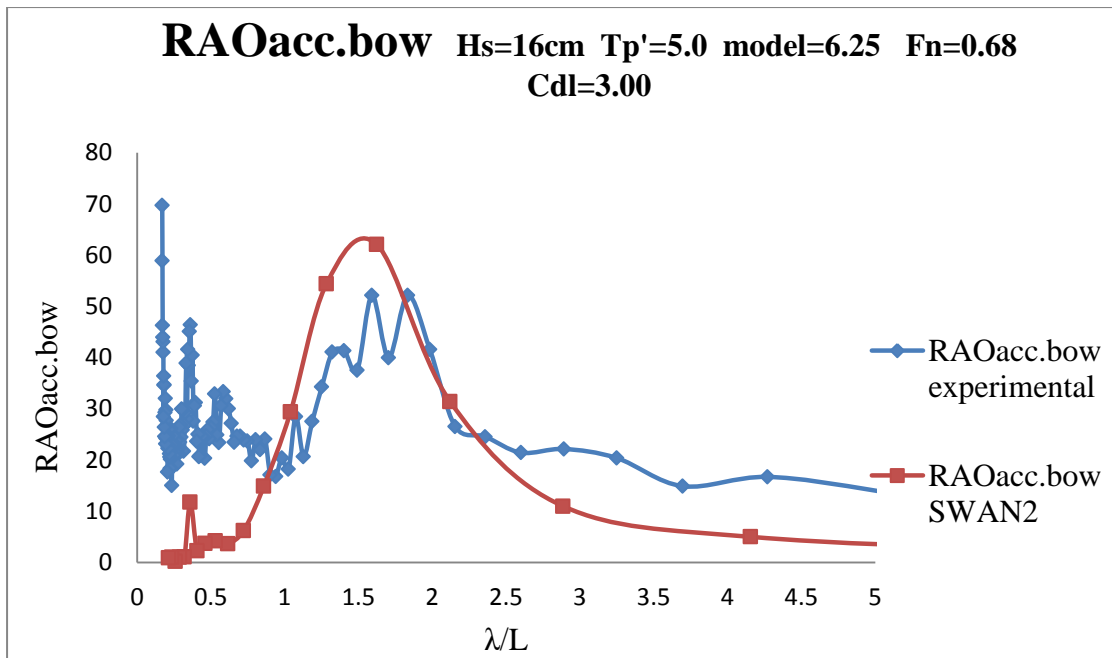
- Κύμα H16tp5.625



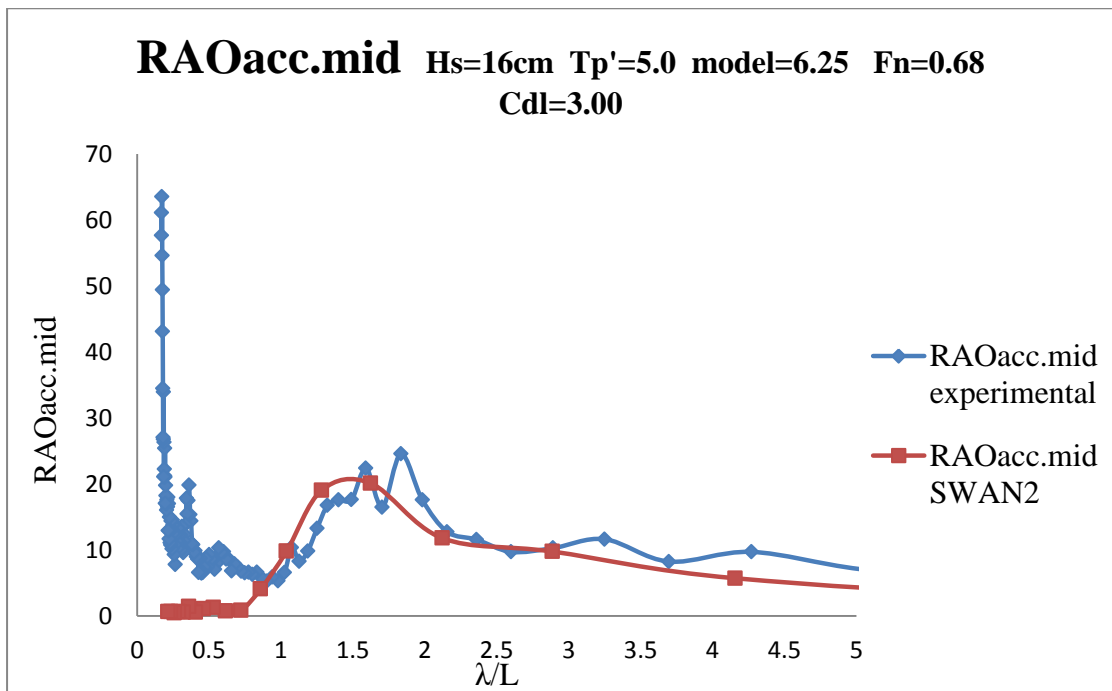
Σχήμα 6.66. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



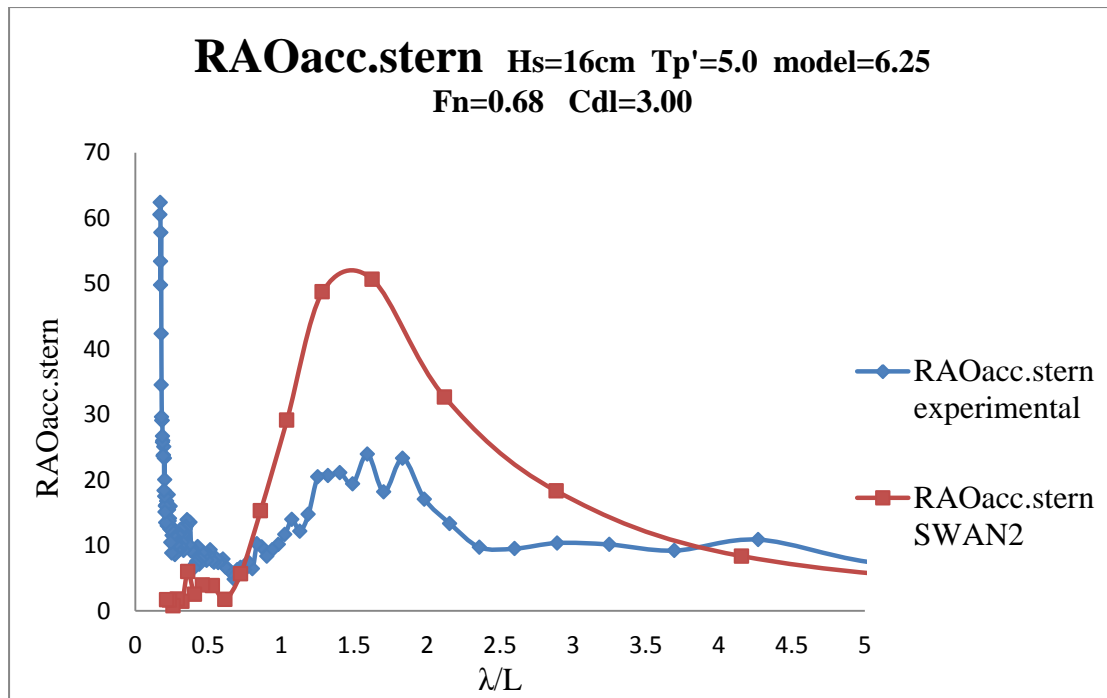
Σχήμα 6.67. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.68. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Σχήμα 6.69. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους



Σχήμα 6.70. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

Παρατηρήσεις

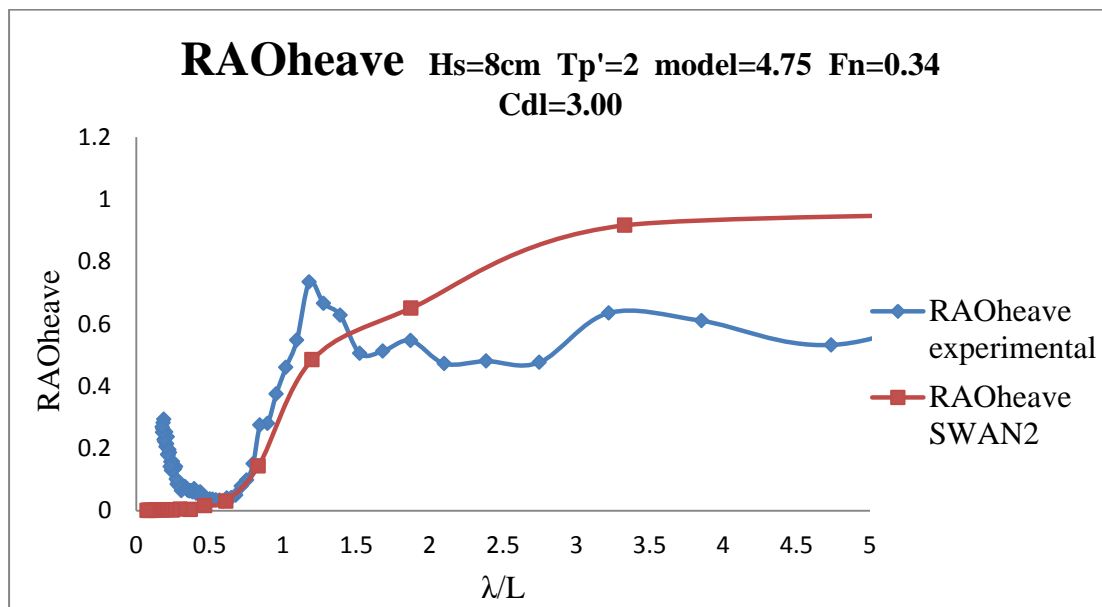
- Για την **κίνηση Heave**, παρατηρείται πολύ καλή προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων για λ/L έως 1.5 στην μικρή ταχύτητα και έως 2 για την μεγάλη ταχύτητα. Για $\lambda/L > 2$ στην μεγάλη ταχύτητα και για κύματα μεγαλύτερης περιόδου, παρατηρείται ότι ο κώδικας υποεκτιμά σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.
- Για την **κίνηση Pitch**, στην μικρή ταχύτητα, για λ/L έως 1.5 έχουμε πολύ καλή προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων από το SWAN2, ενώ για μεγαλύτερα λ/L προσεγγίζει αρκετά καλά στις περισσότερες περιπτώσεις. Για $F_n=0.68$, παρατηρείται πολύ καλή προσέγγιση για λ/L έως 1-1.5, αλλά μια υπερεκτίμηση για μεγαλύτερα λ/L .

- Για τις **επιταχύνσεις**, και στις δύο ταχύτητες παρατηρείται ότι ο κώδικας προσεγγίζει πολύ καλά τα πειραματικά αποτελέσματα στην πλώρη και στο κέντρο βάρους, ενώ στην πρύμνη ο κώδικας υπερεκτιμά.

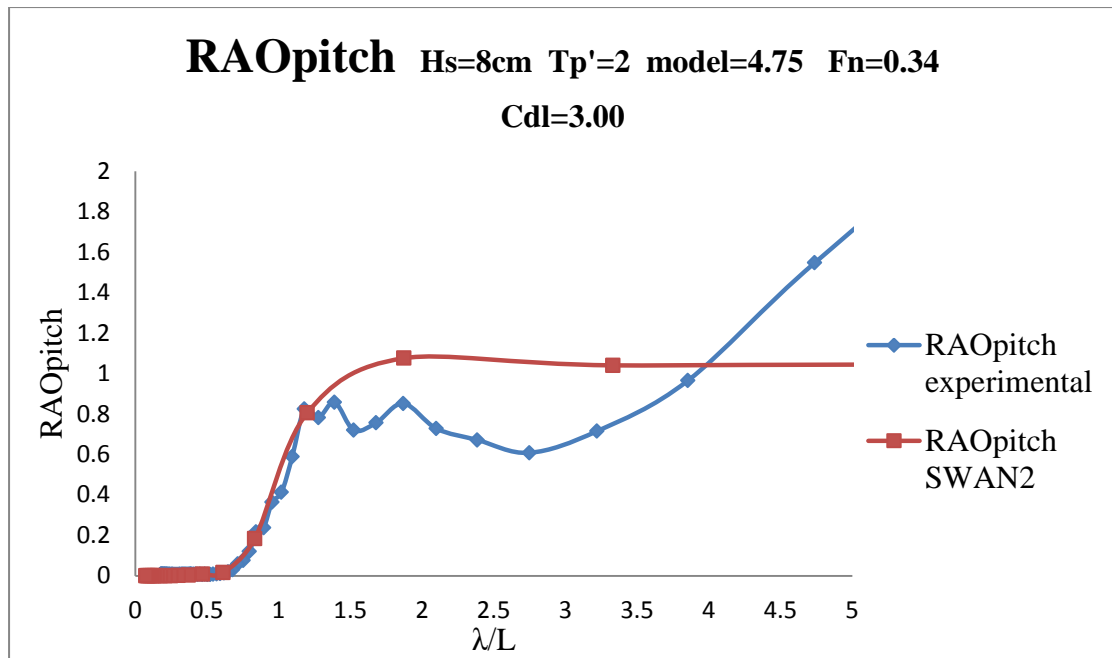
✓ Για το μοντέλο NTUA-154/99 ($L/B = 4.75$):

Για την μικρή ταχύτητα, $Fn = 0.34$:

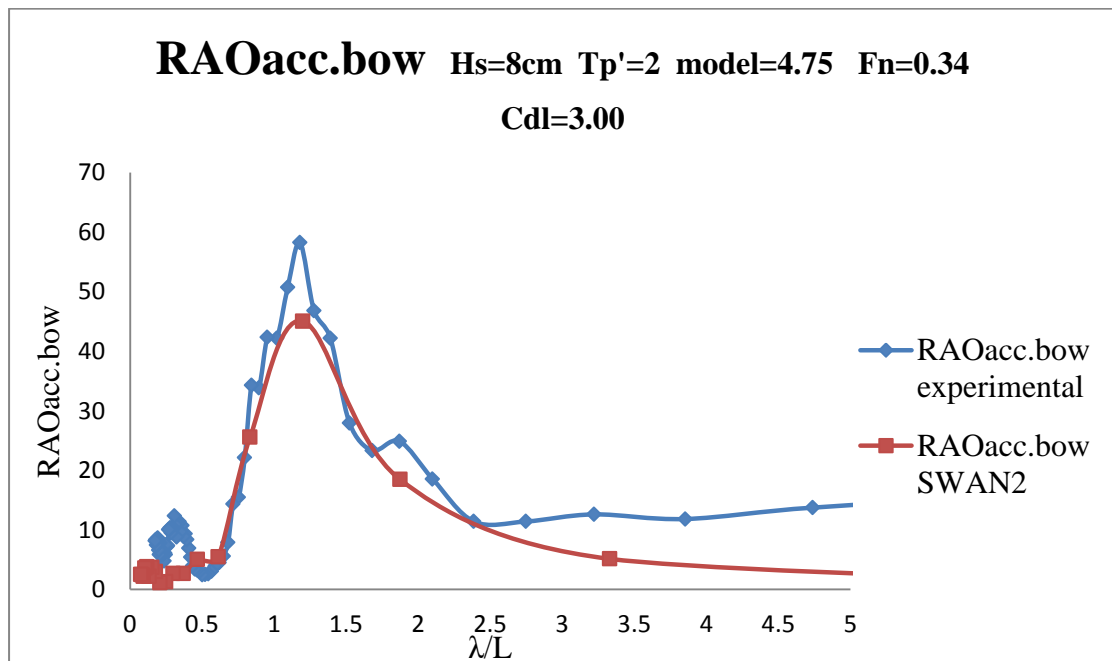
- H8tp2.c



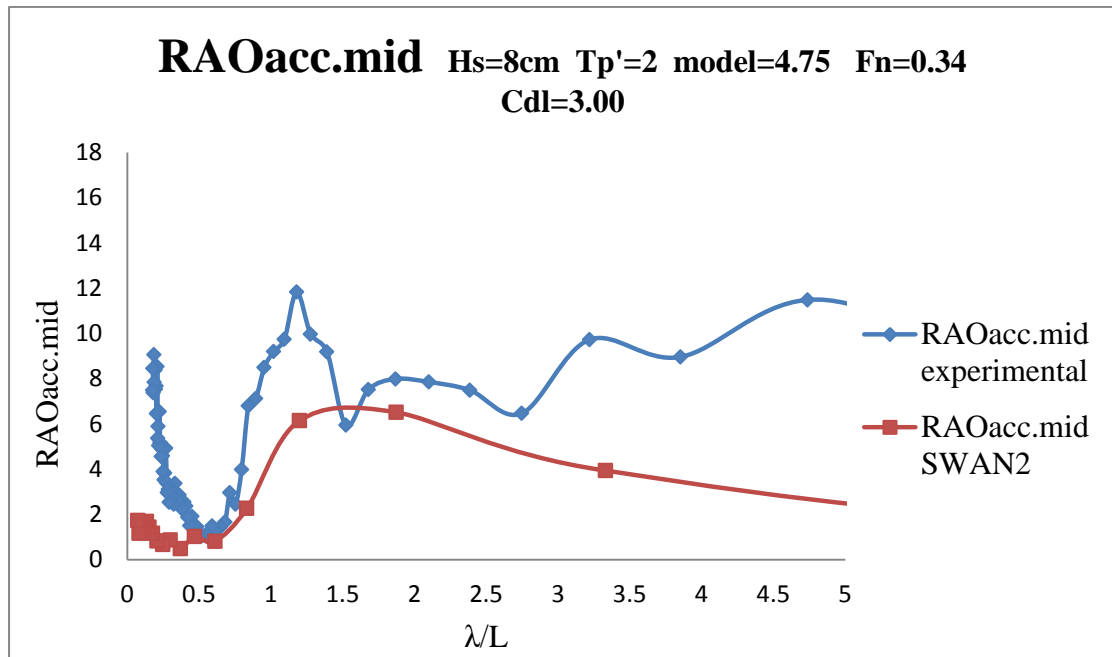
Σχήμα 6.71. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



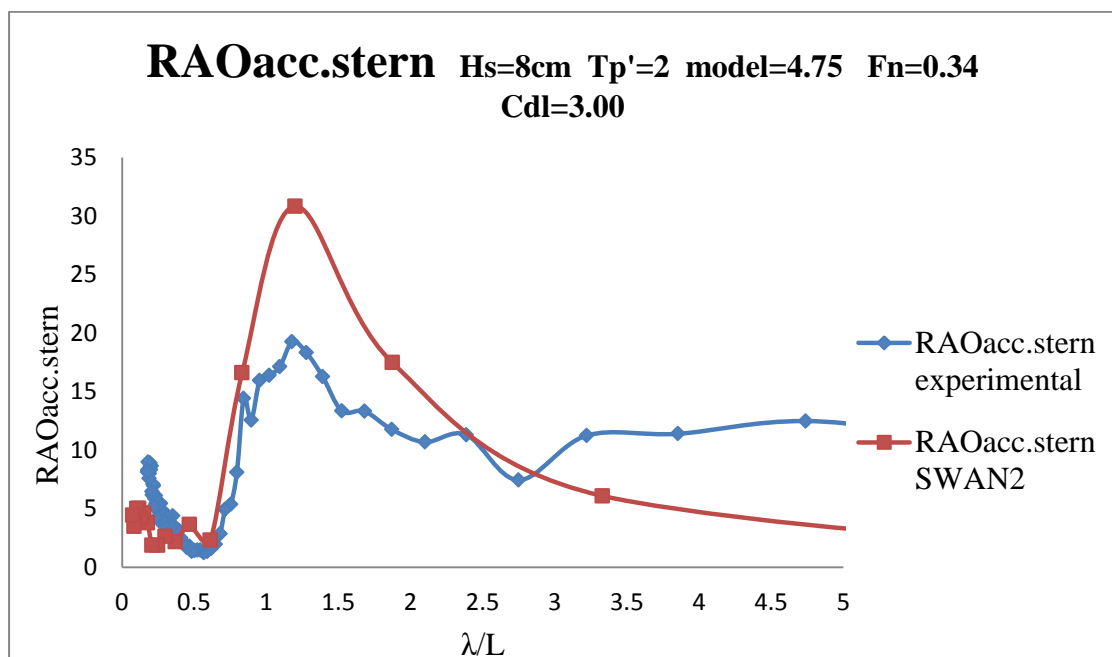
Σχήμα 6.72. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.73. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

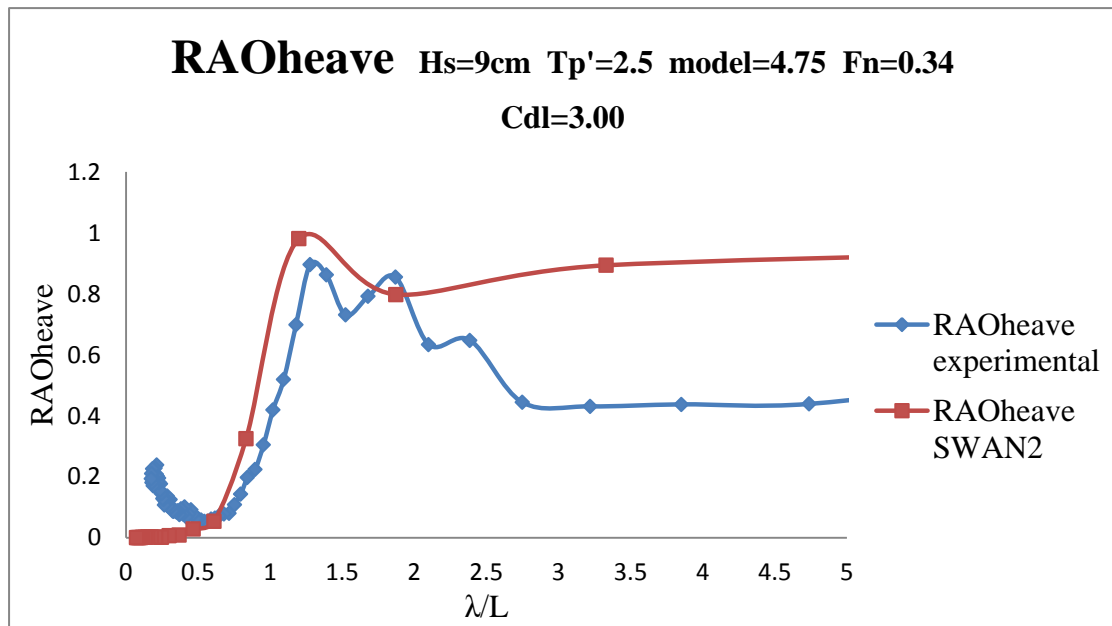


Σχήμα 6.74. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

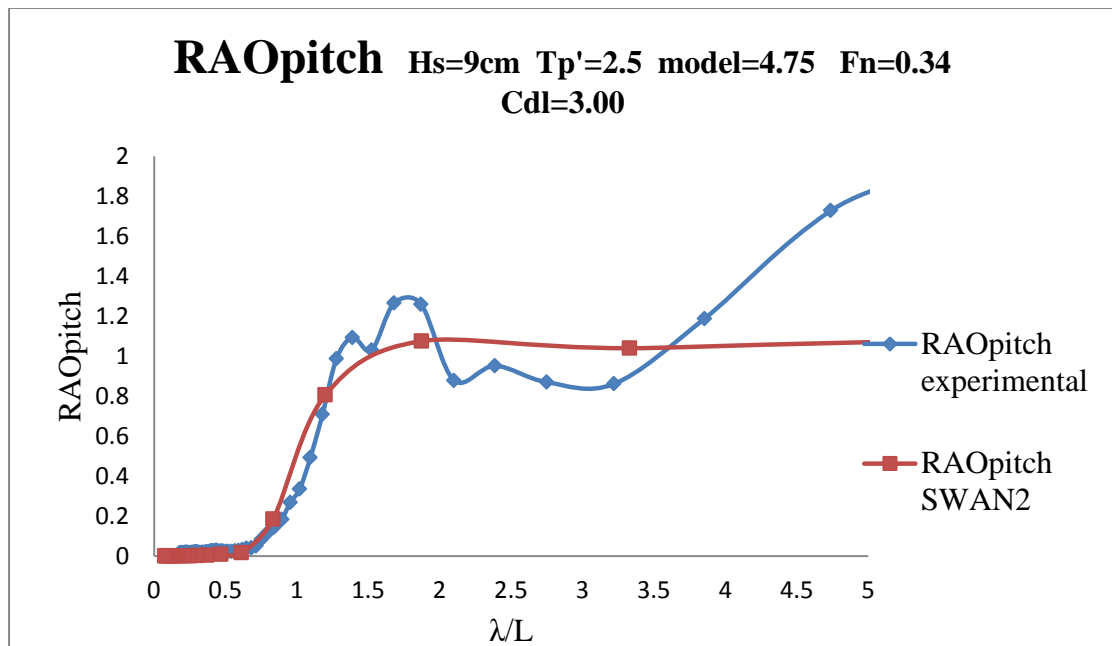


Σχήμα 6.75. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

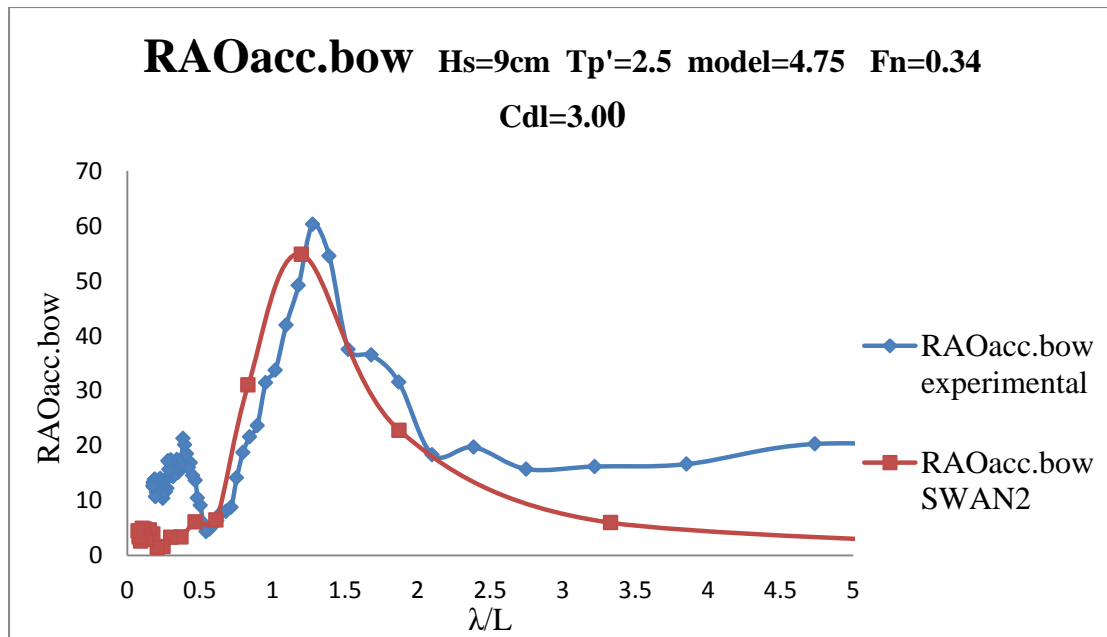
- H9tp25.475



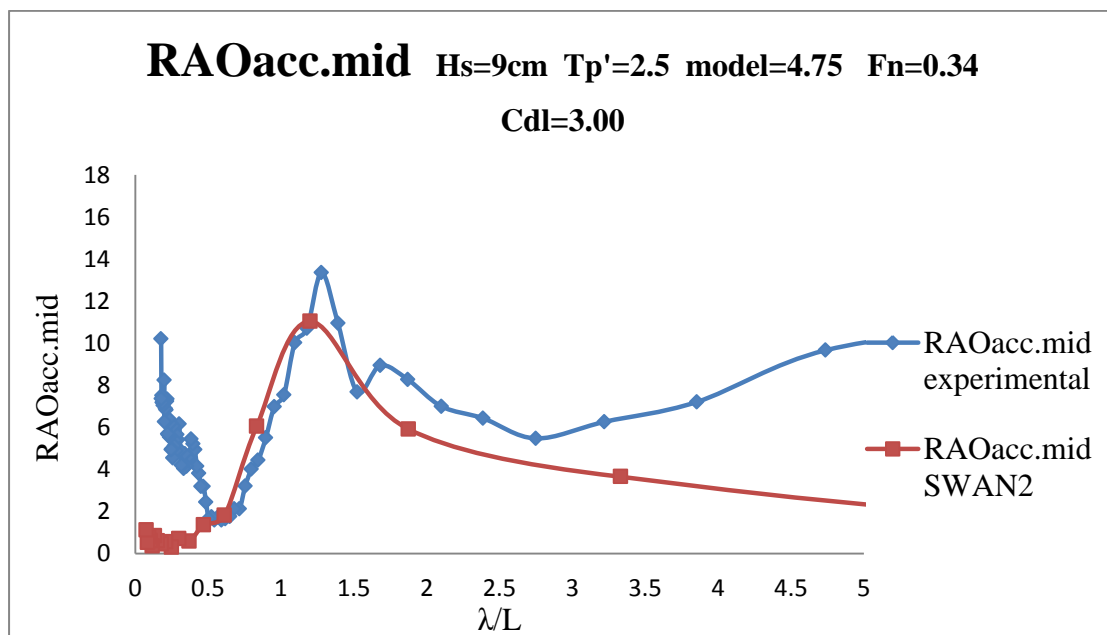
Σχήμα 6.76. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



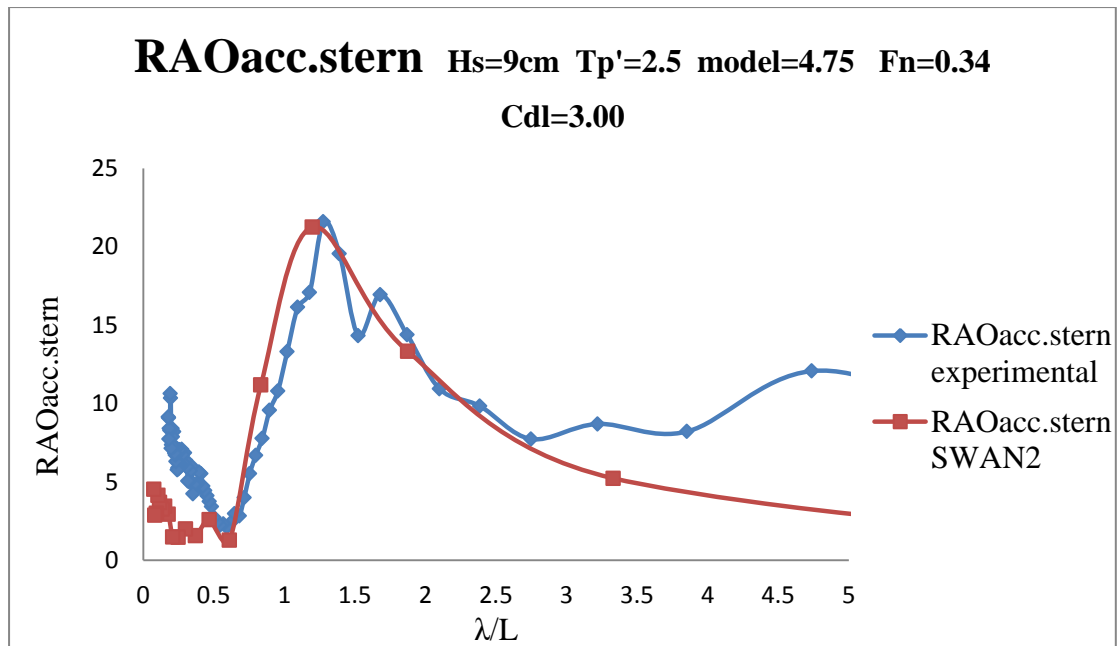
Σχήμα 6.77. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.78. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

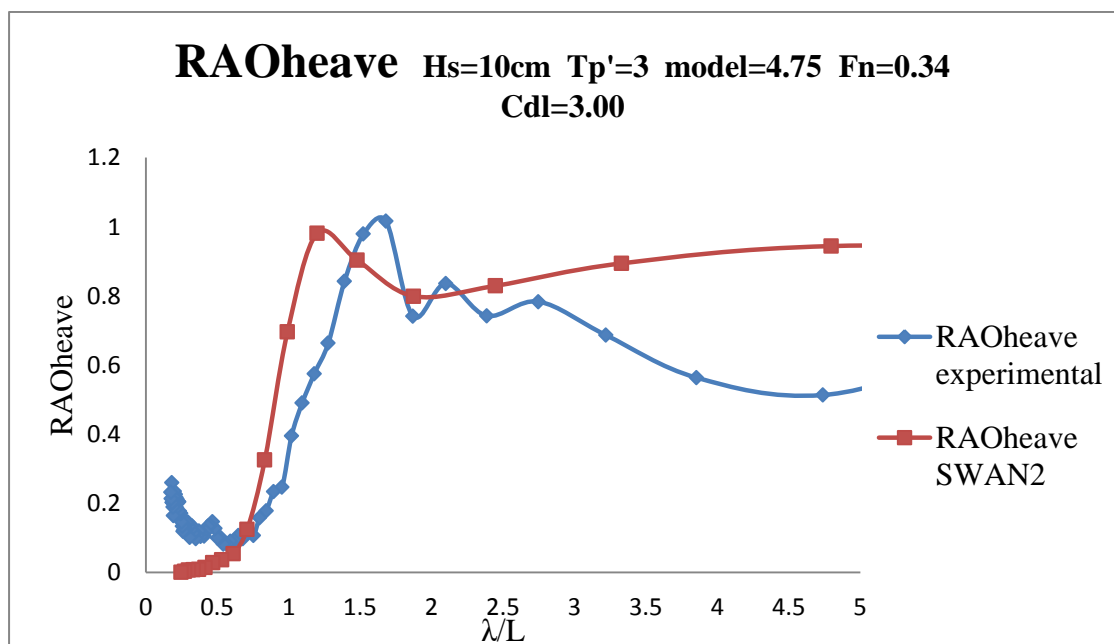


Σχήμα 6.79. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

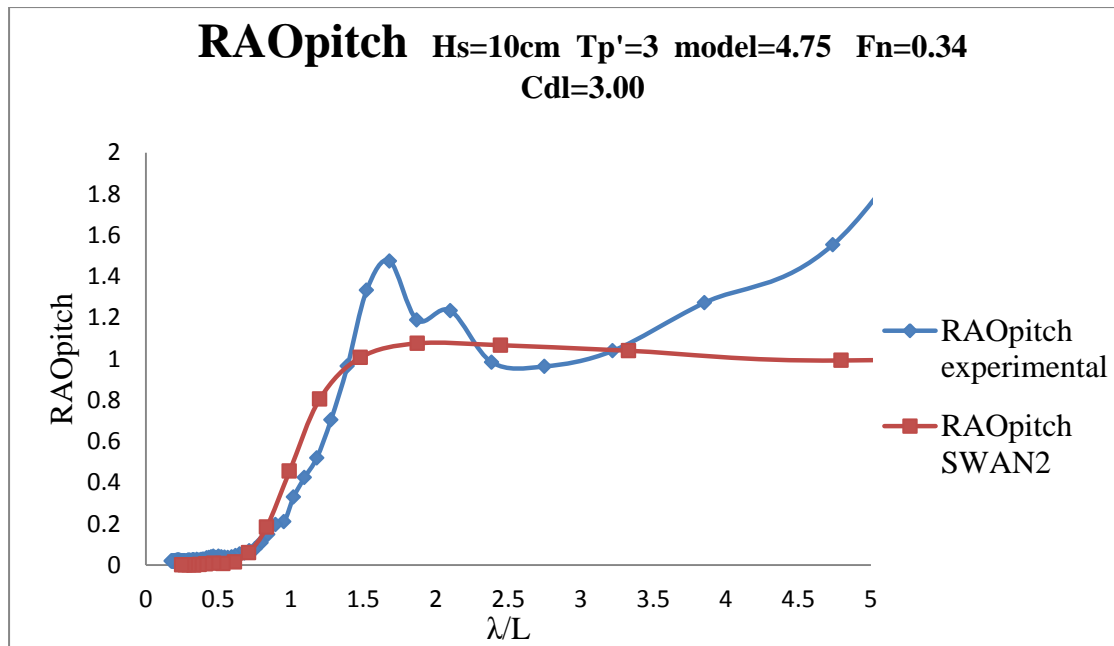


Σχήμα 6.80. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

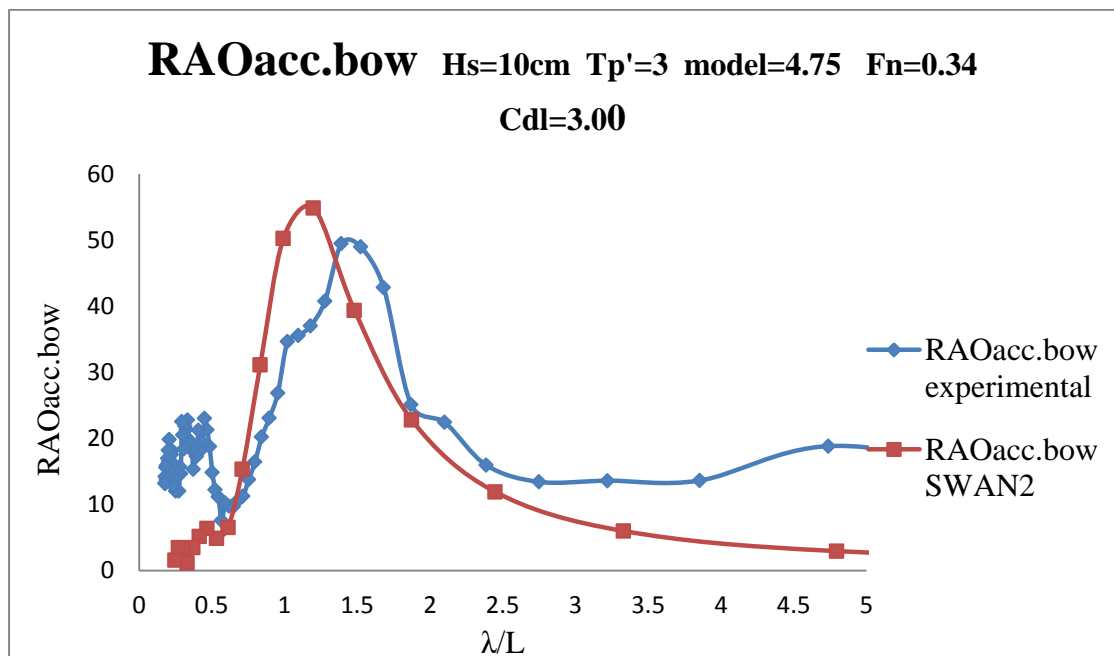
- H10tp3.475



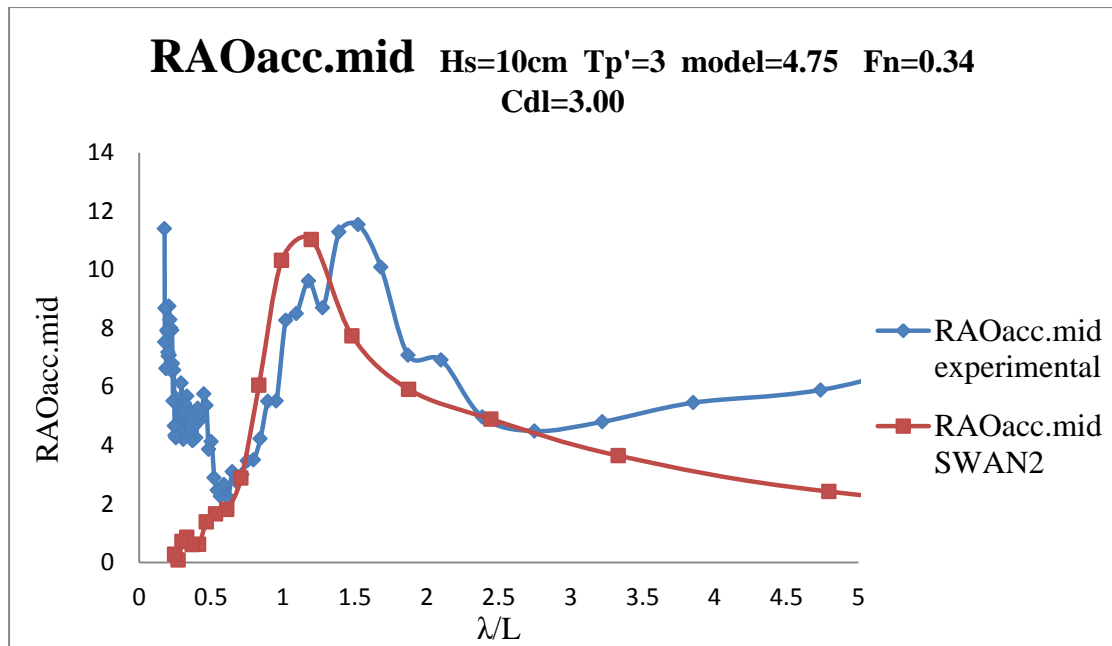
Σχήμα 6.81. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



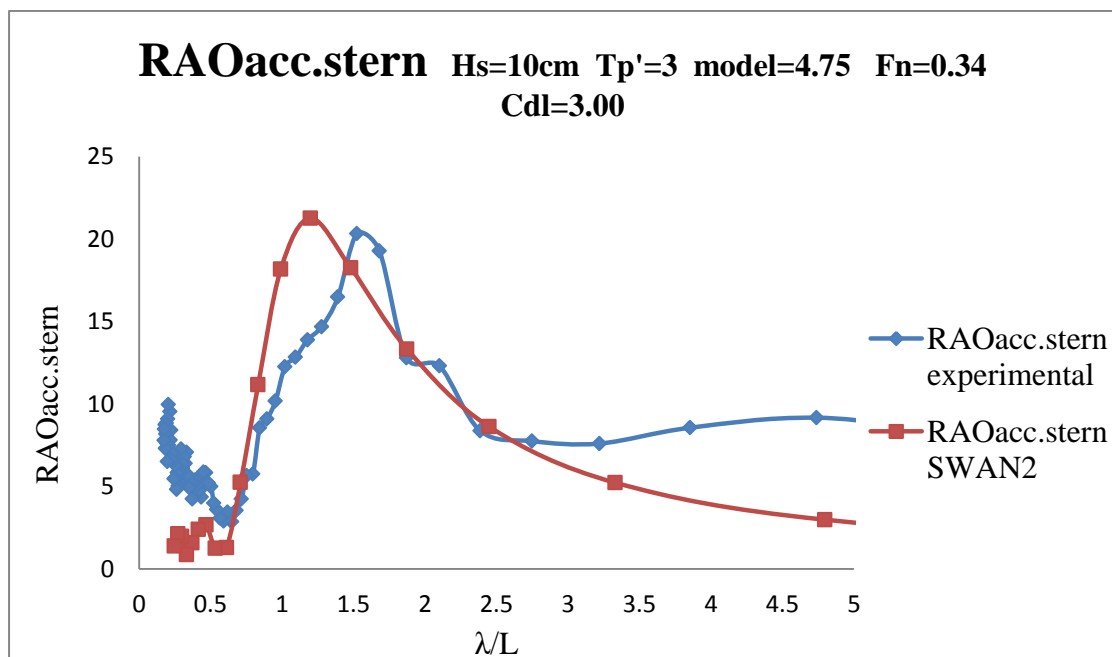
Σχήμα 6.82. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.83. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

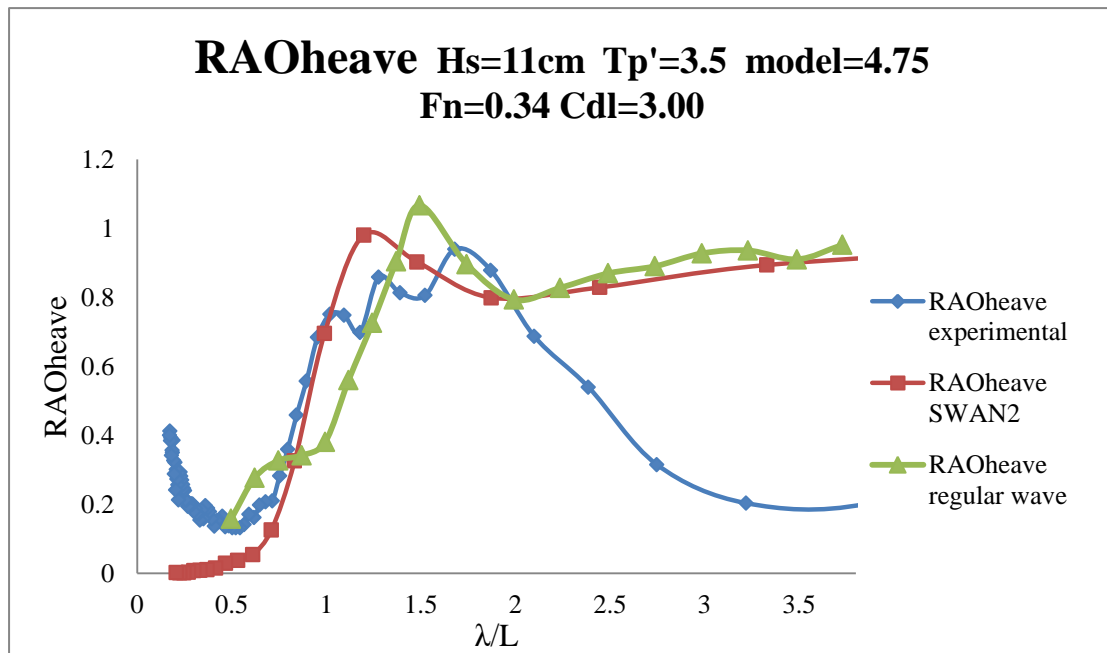


Σχήμα 6.84. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

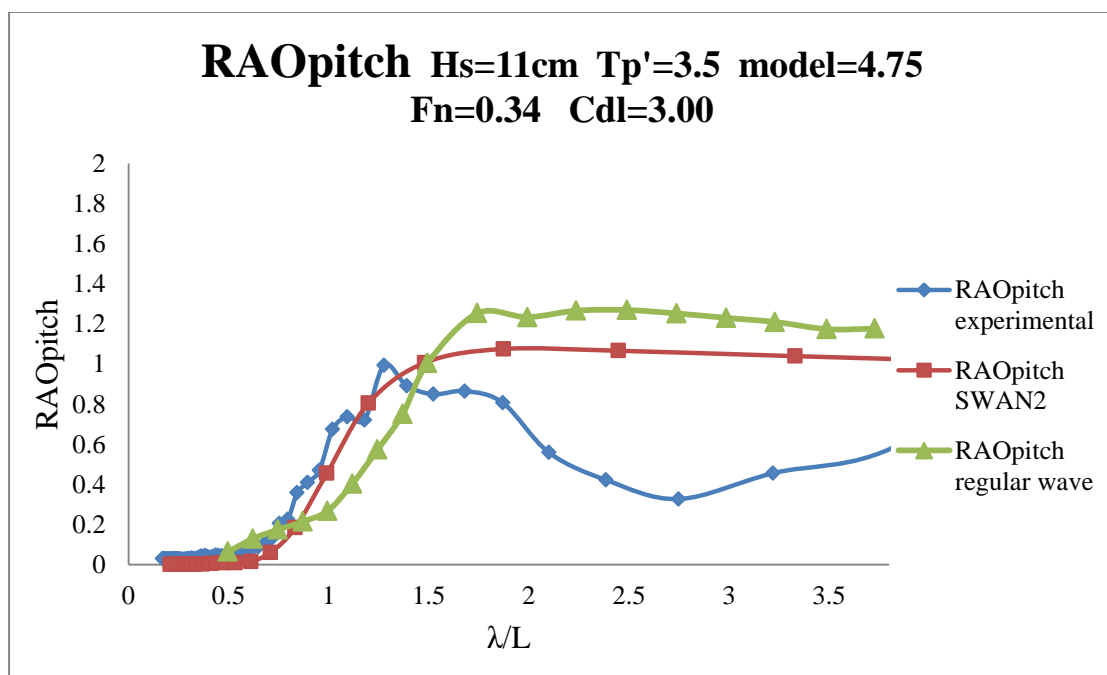


Σχήμα 6.85. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

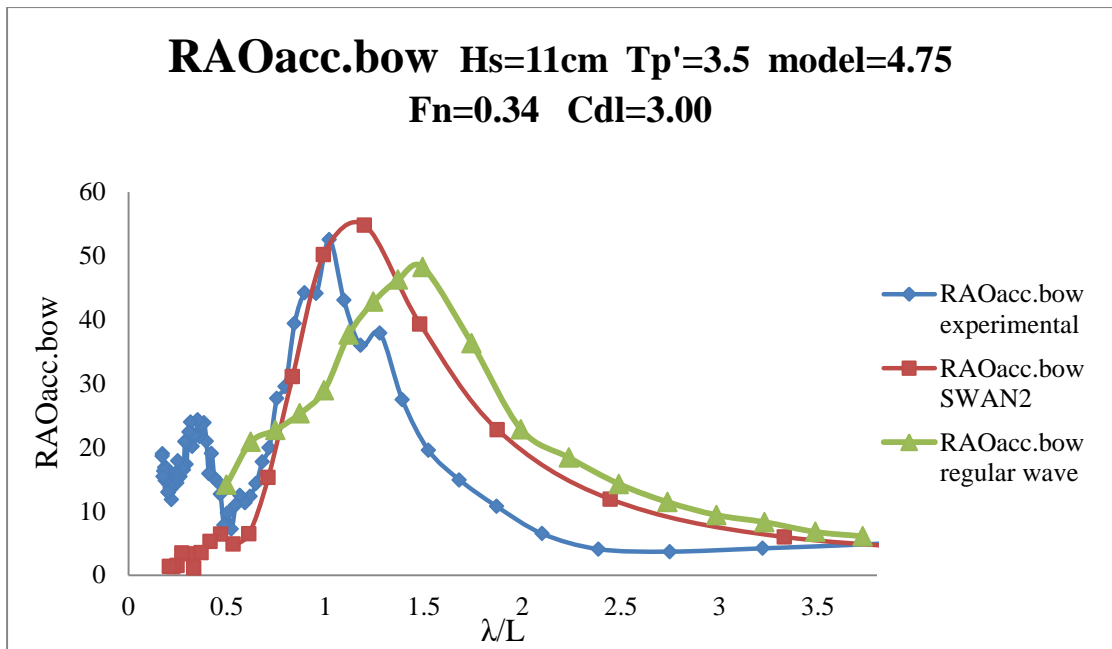
- H11tp35.475



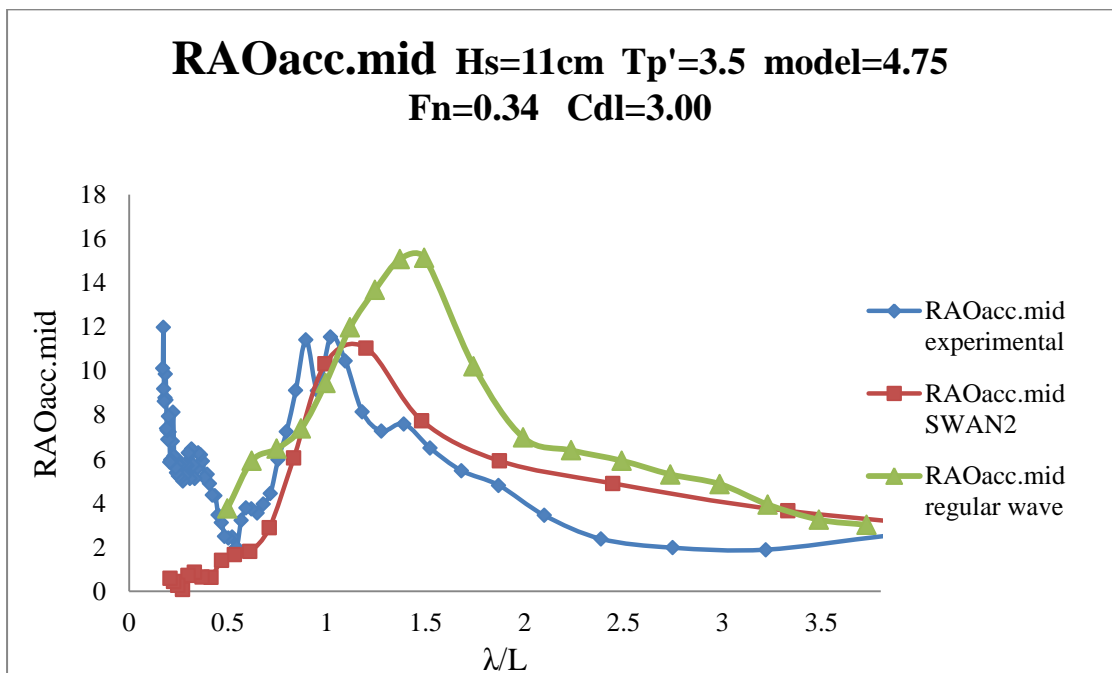
Σχήμα 6.86. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



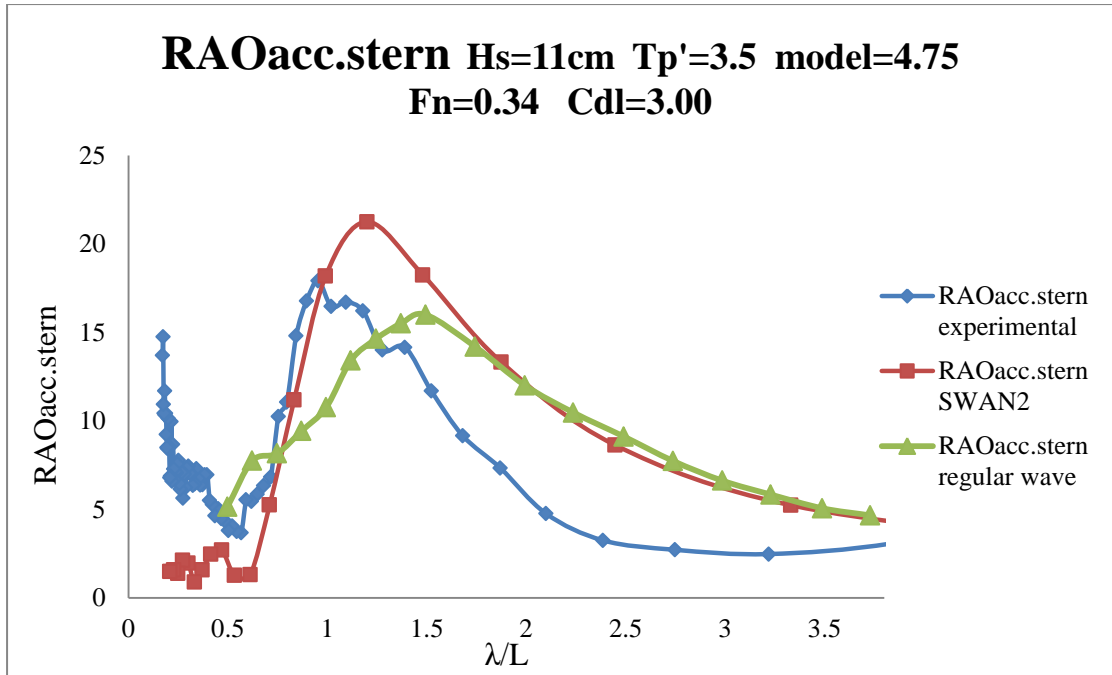
Σχήμα 6.87. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.88. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

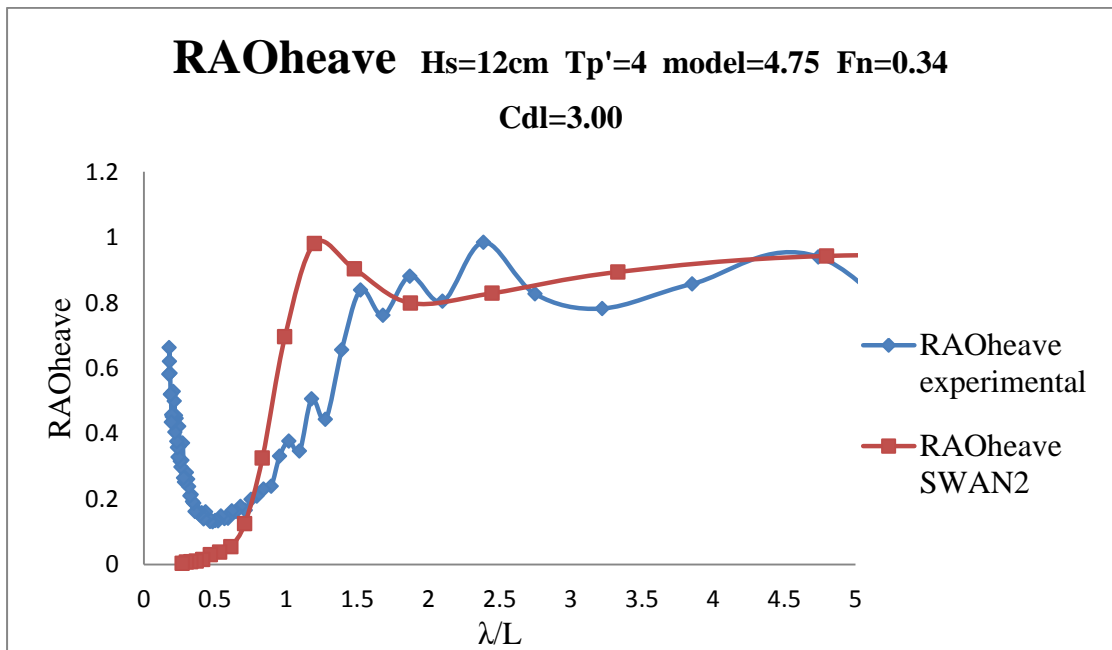


Σχήμα 6.89. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

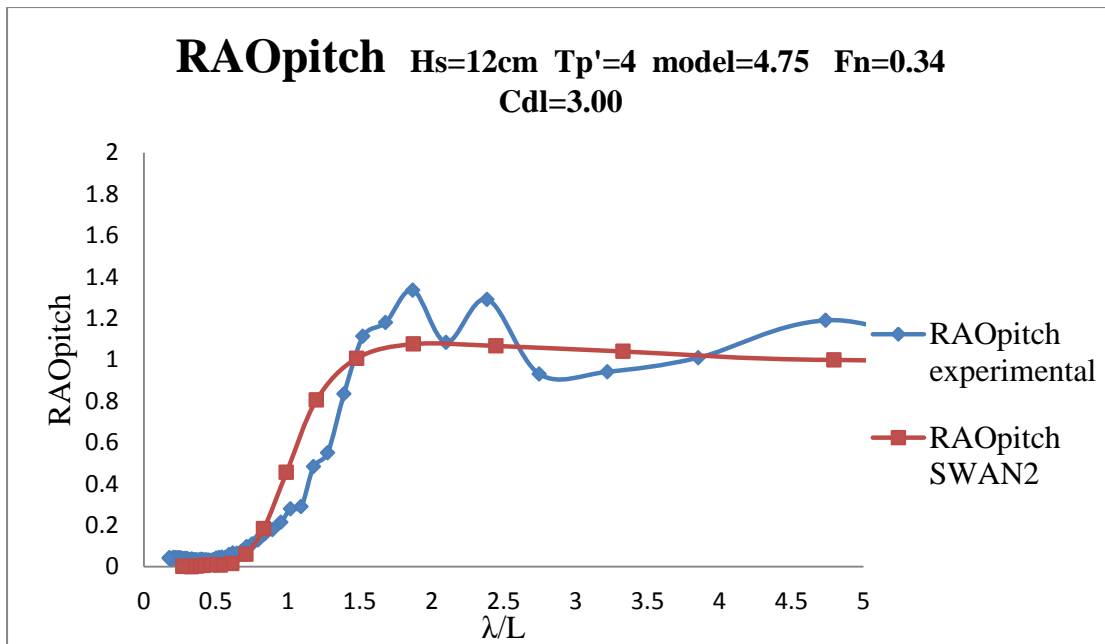


Σχήμα 6.90. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

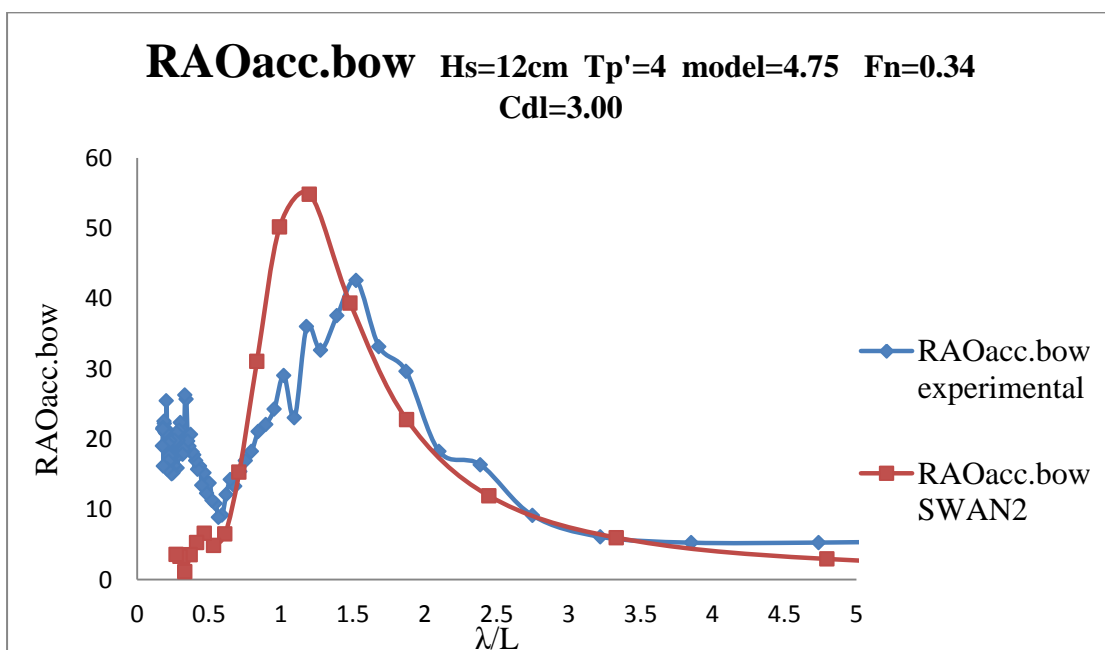
- H12tp4.475



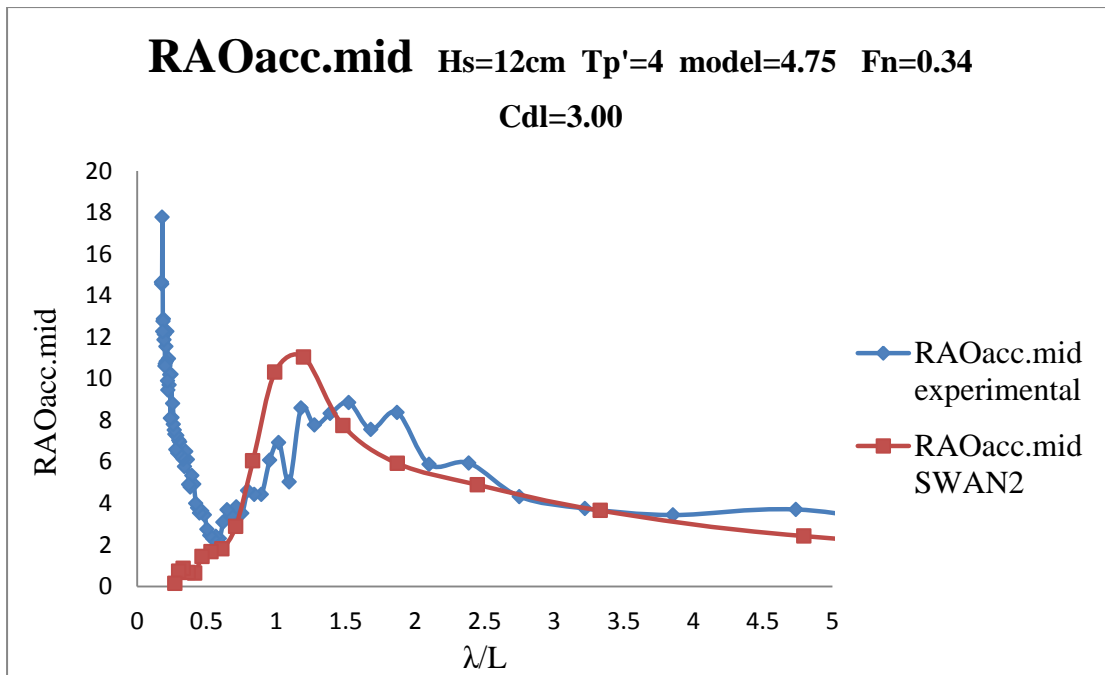
Σχήμα 6.91. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



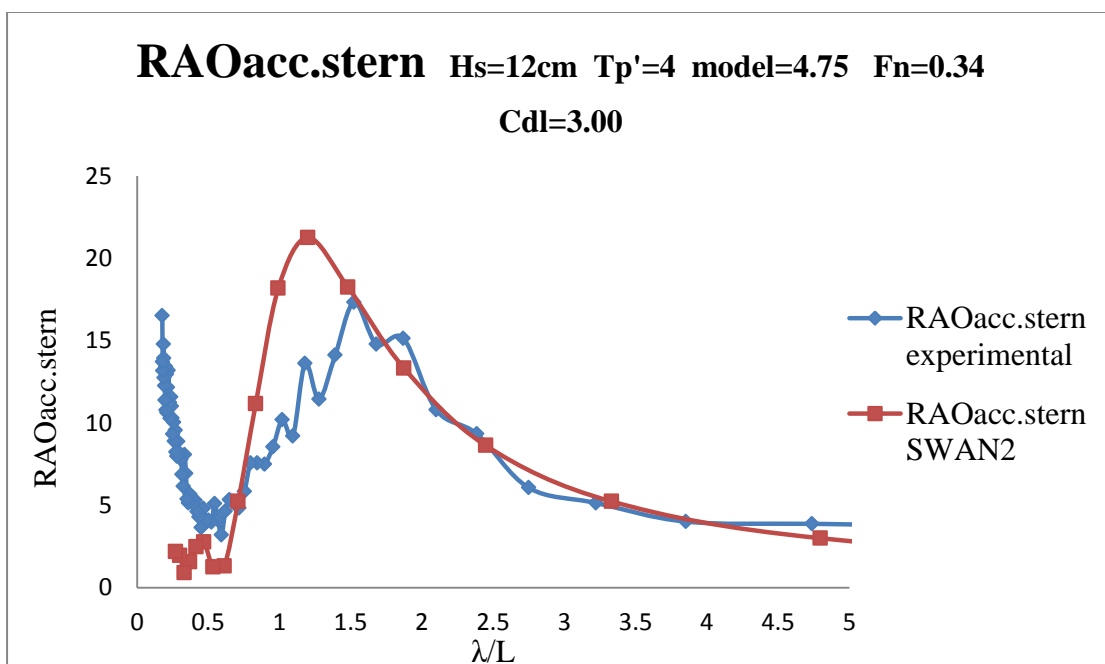
Σχήμα 6.92. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.93. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

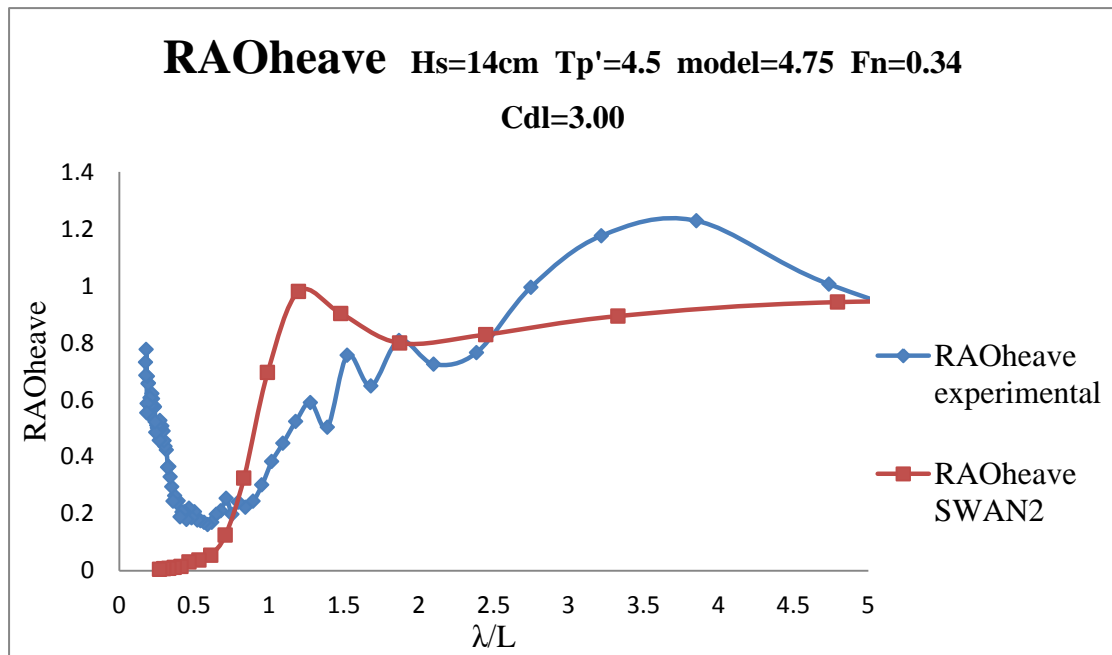


Σχήμα 6.94. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

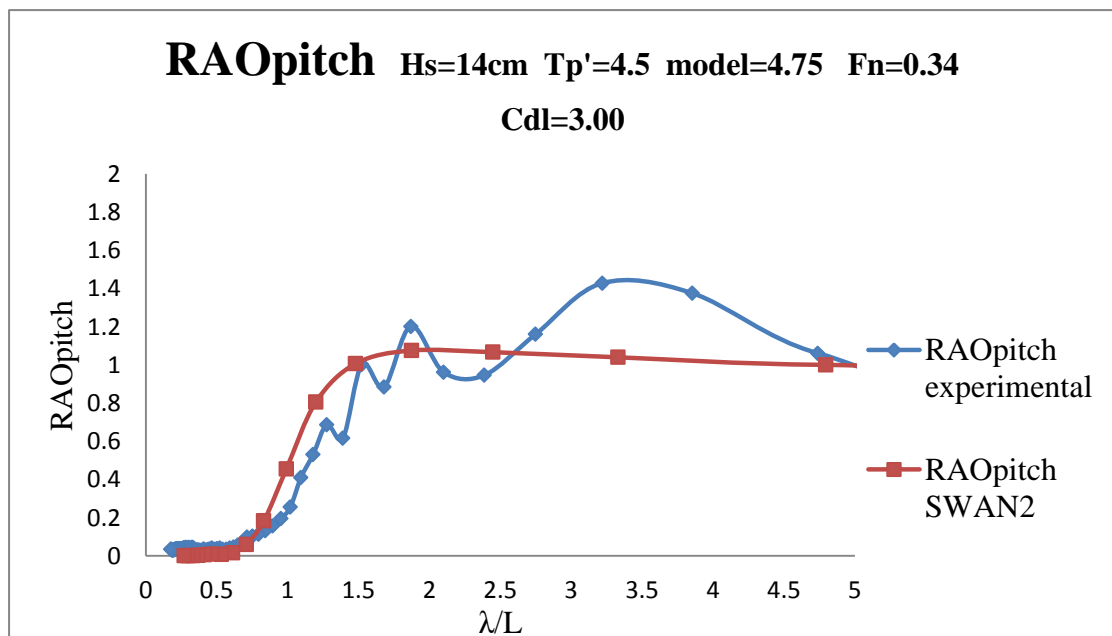


Σχήμα 6.95. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

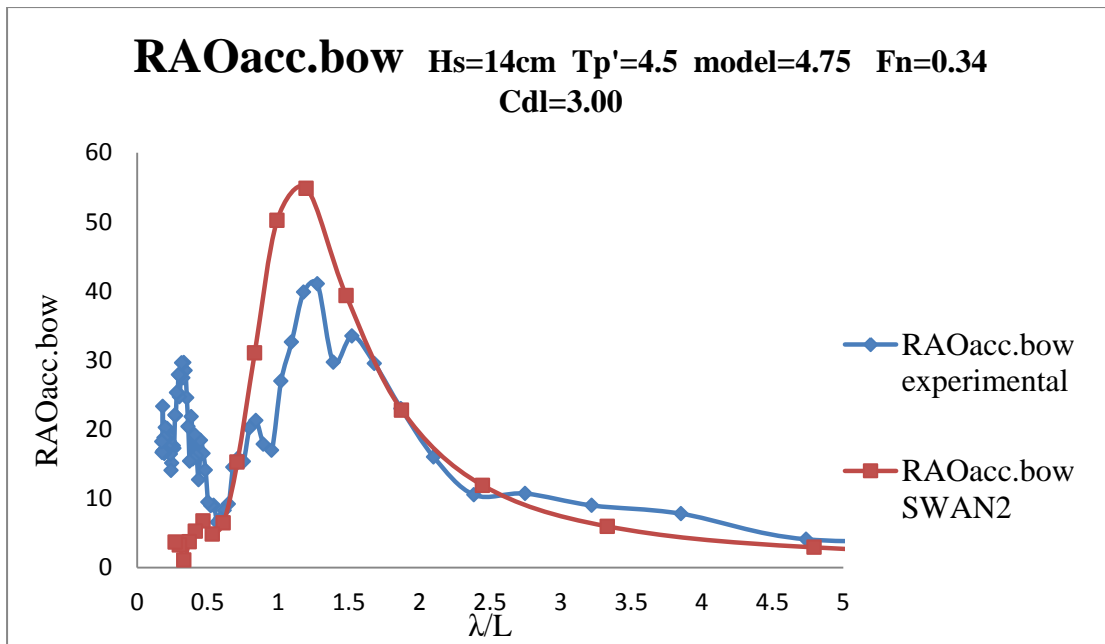
- H14tp45.475



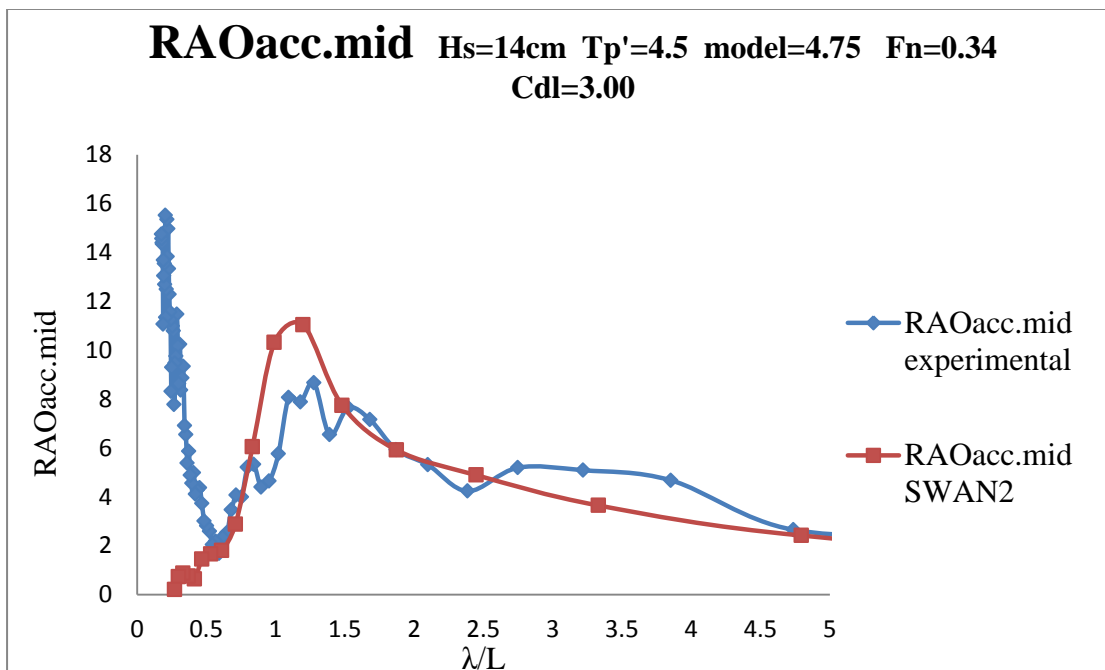
Σχήμα 6.96. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



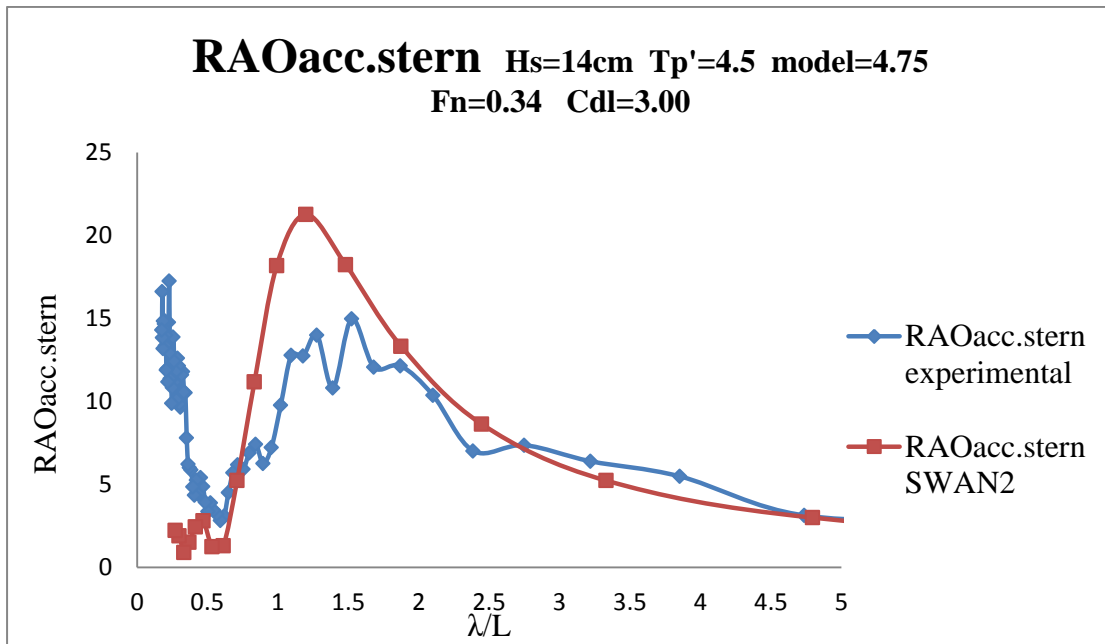
Σχήμα 6.97. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.98. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

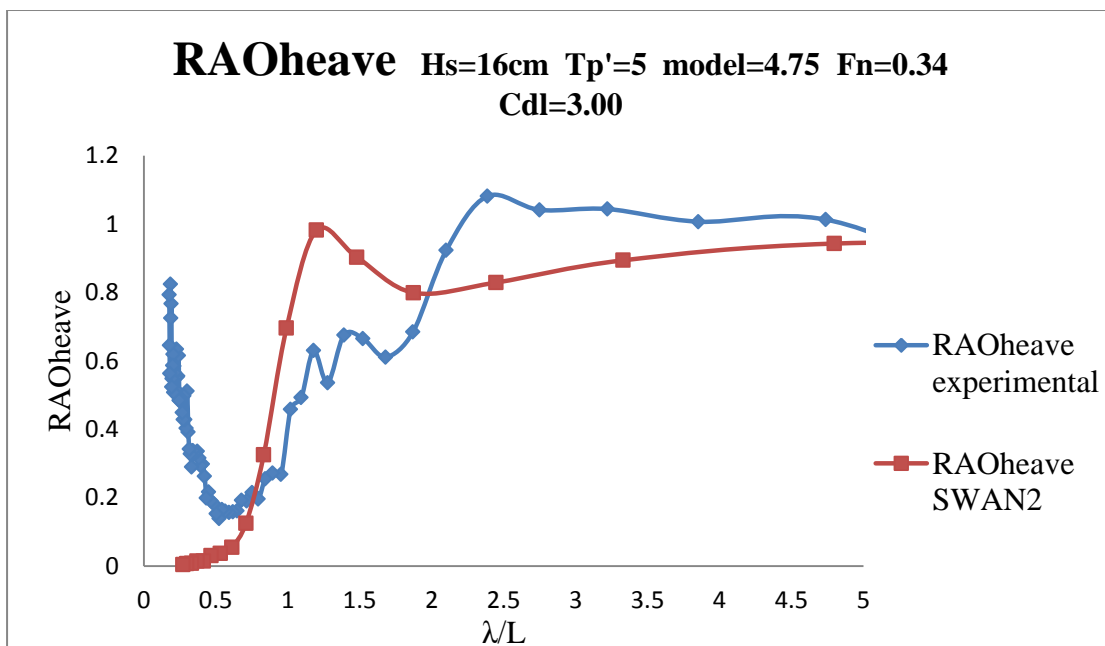


Σχήμα 6.99. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

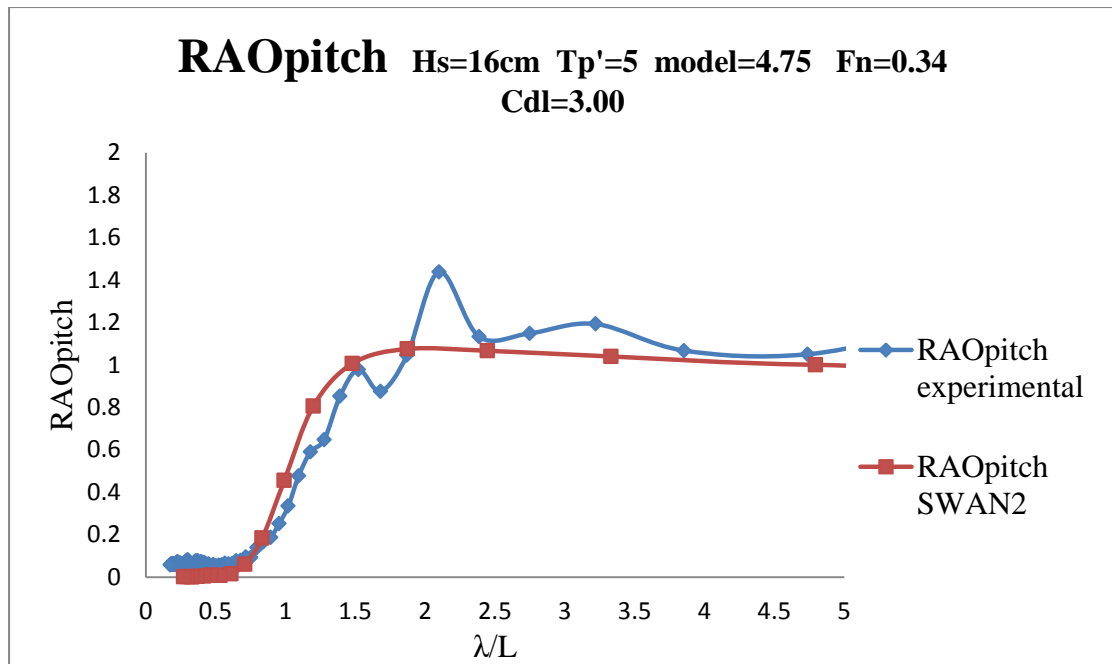


Σχήμα 6.100. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

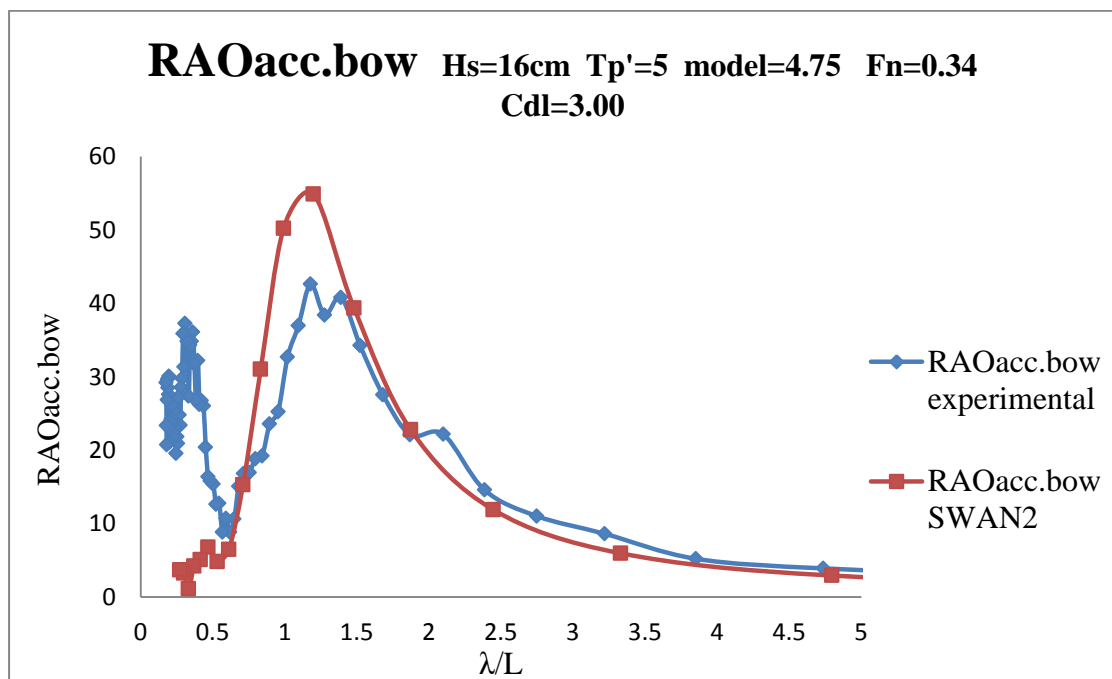
- H16tp5.475



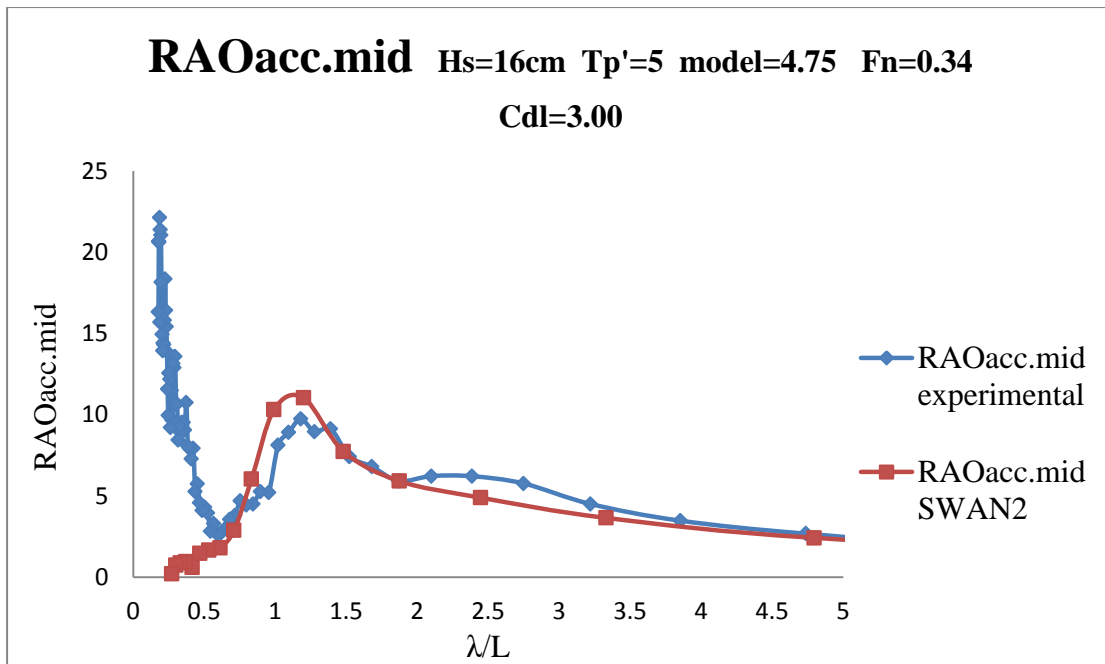
Σχήμα 6.101. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



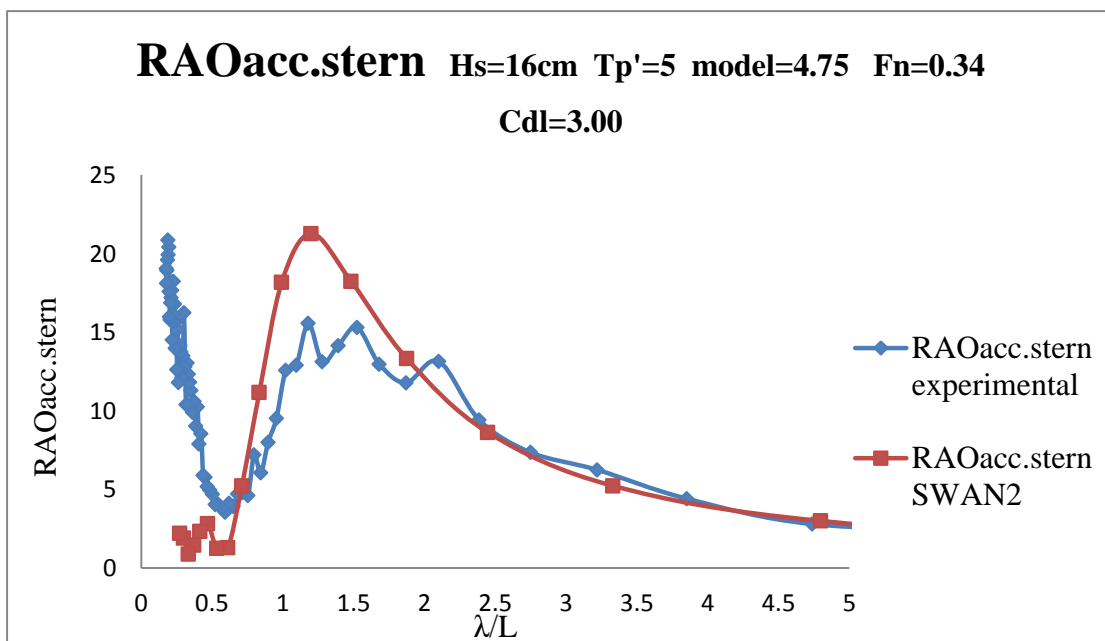
Σχήμα 6.102. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.103. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



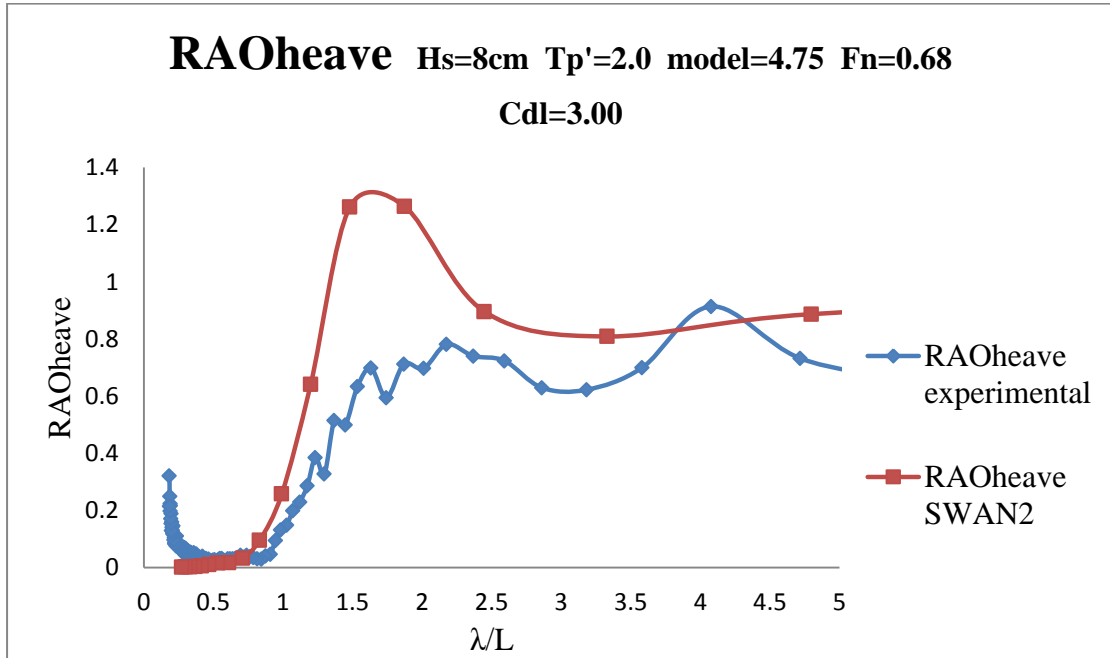
Σχήμα 6.104. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους



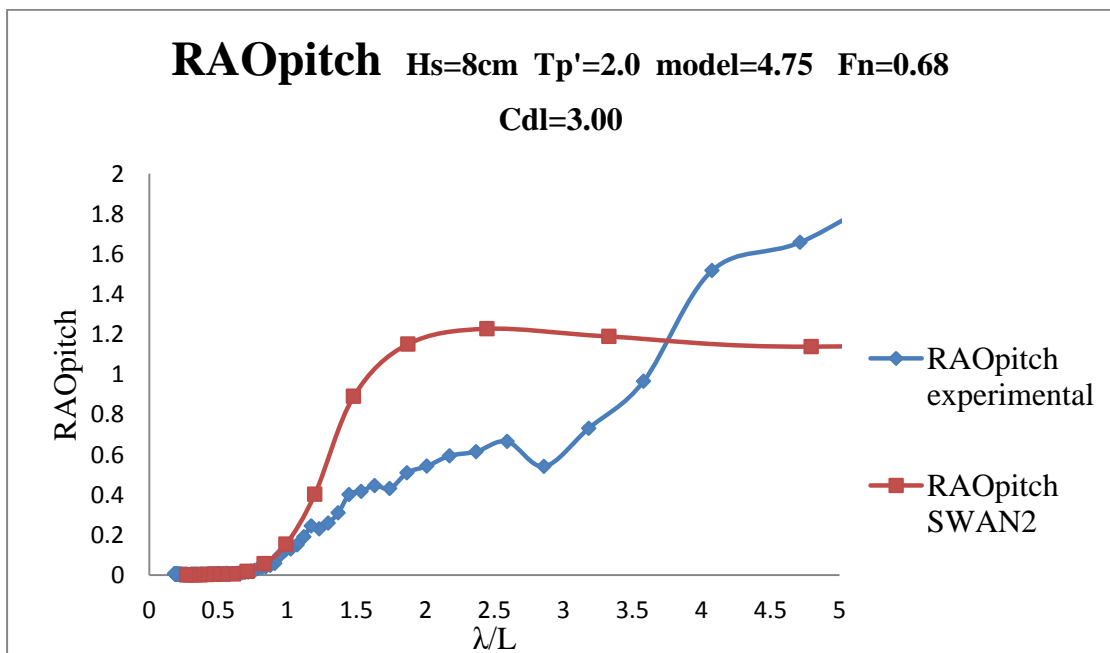
Σχήμα 6.105. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

Για την μεγάλη ταχύτητα, $F_n = 0.68$:

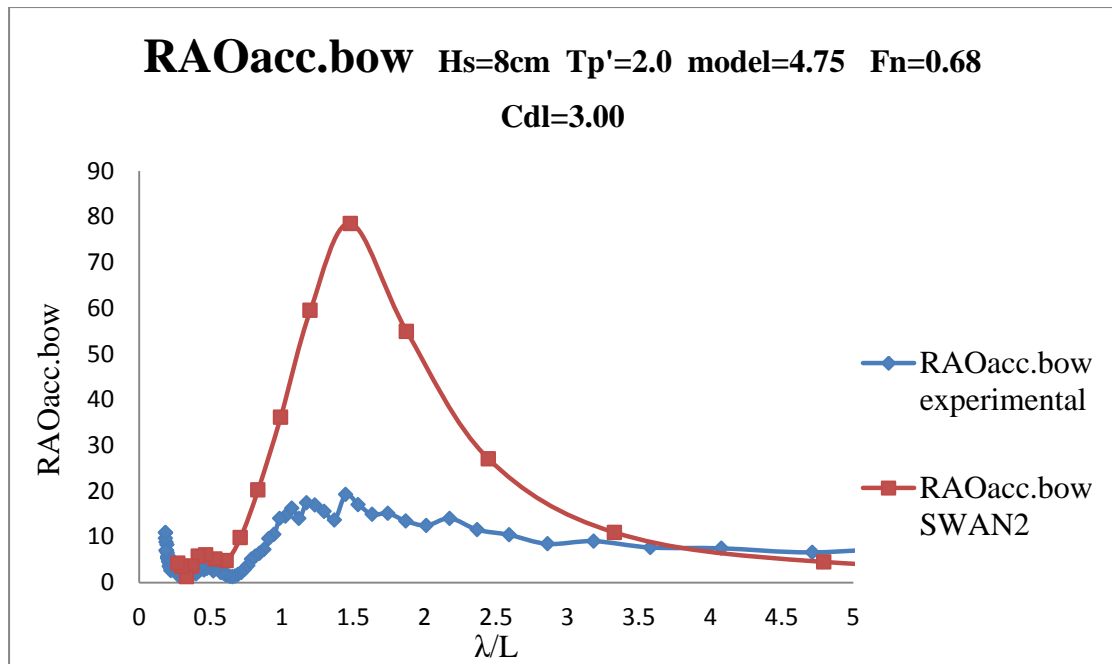
- H8tp2.c



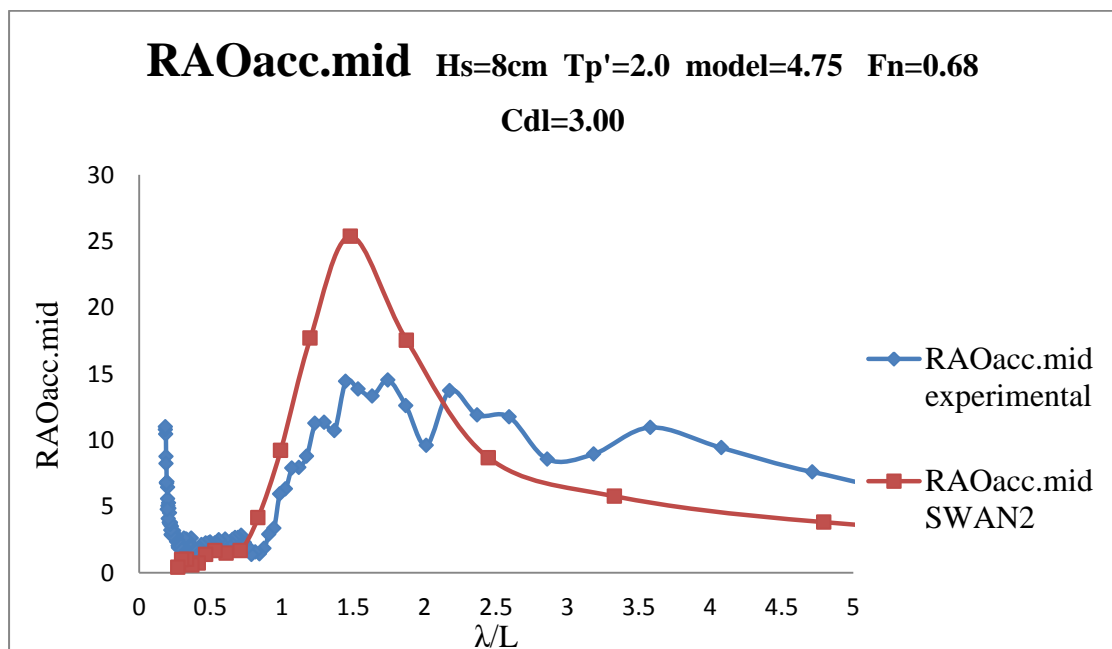
Σχήμα 6.106. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



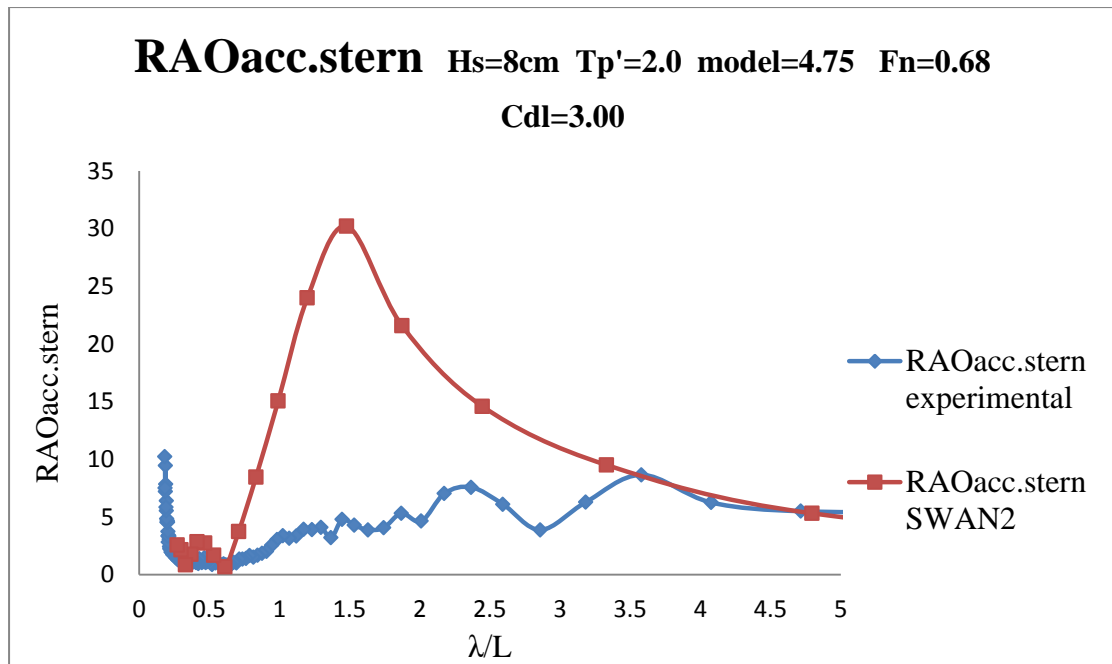
Σχήμα 6.107. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.108. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

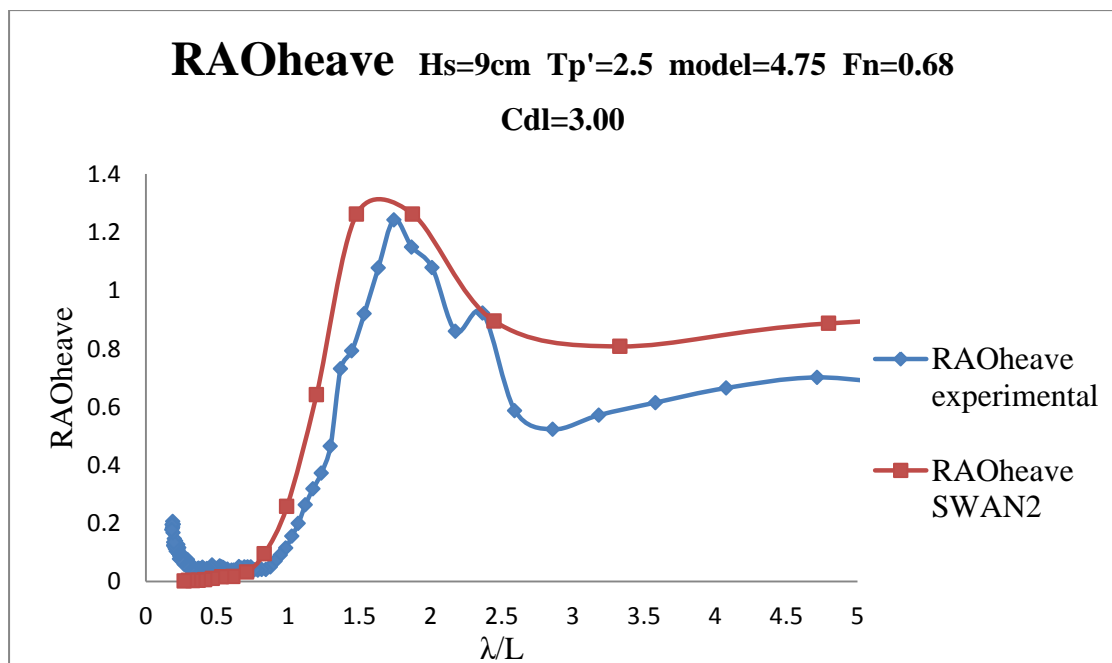


Σχήμα 6.109. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

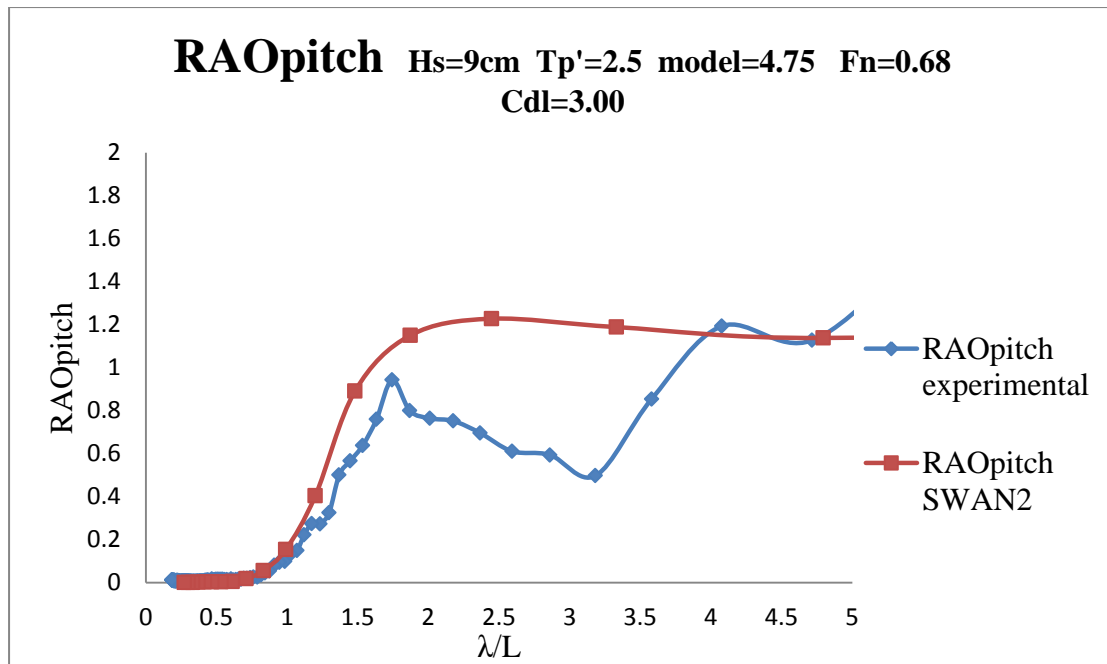


Σχήμα 6.110. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

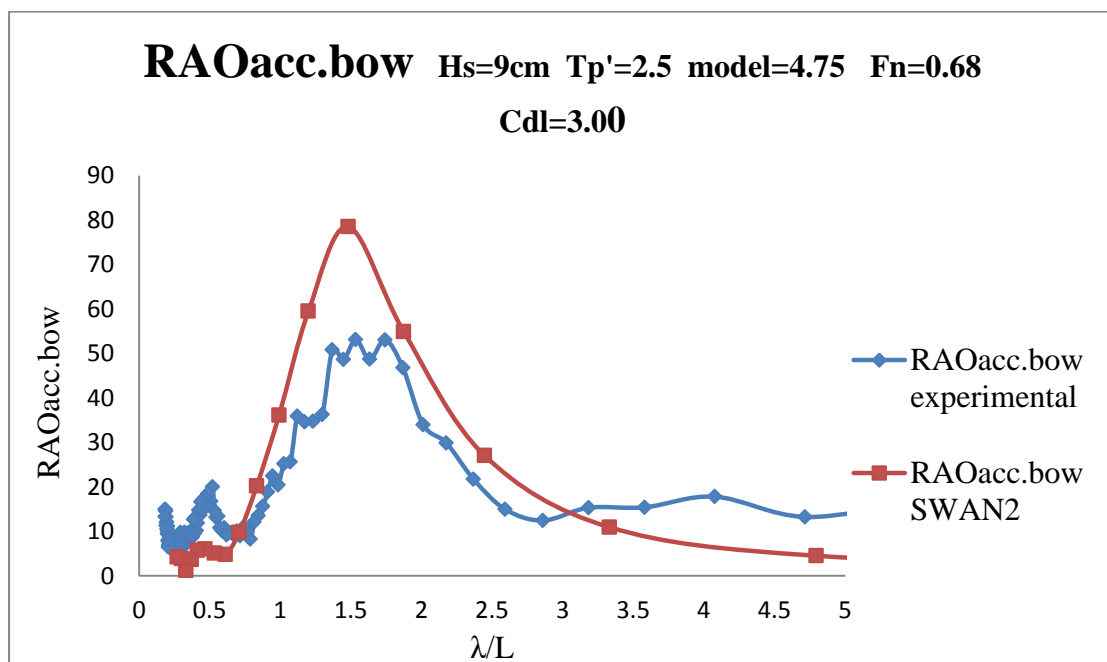
- Η9tp25.475



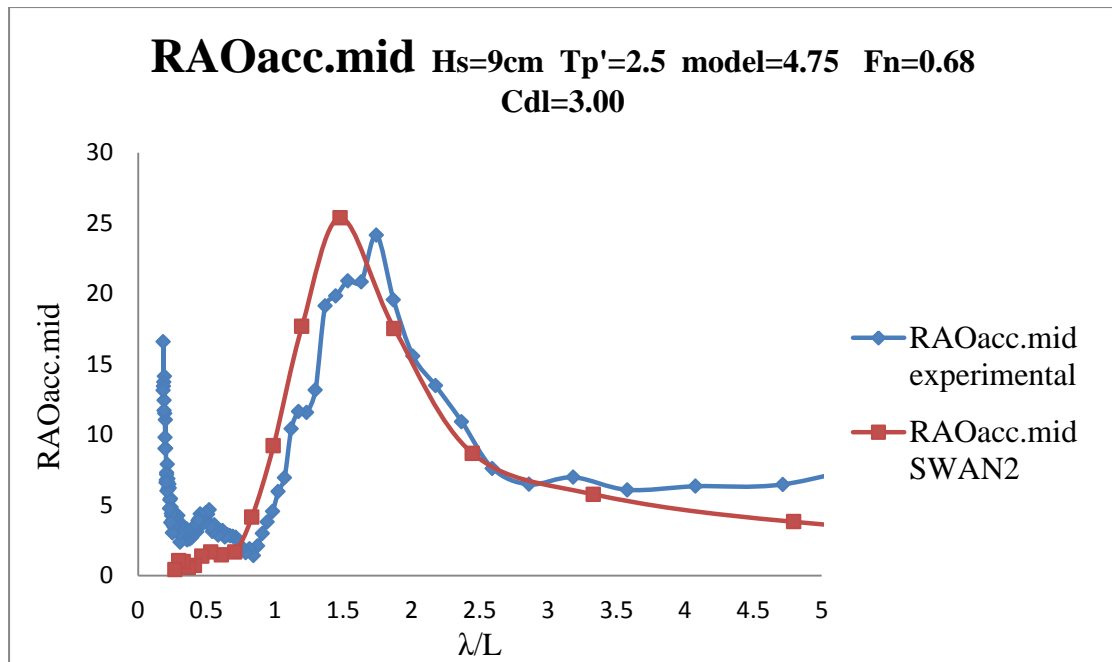
Σχήμα 6.111. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



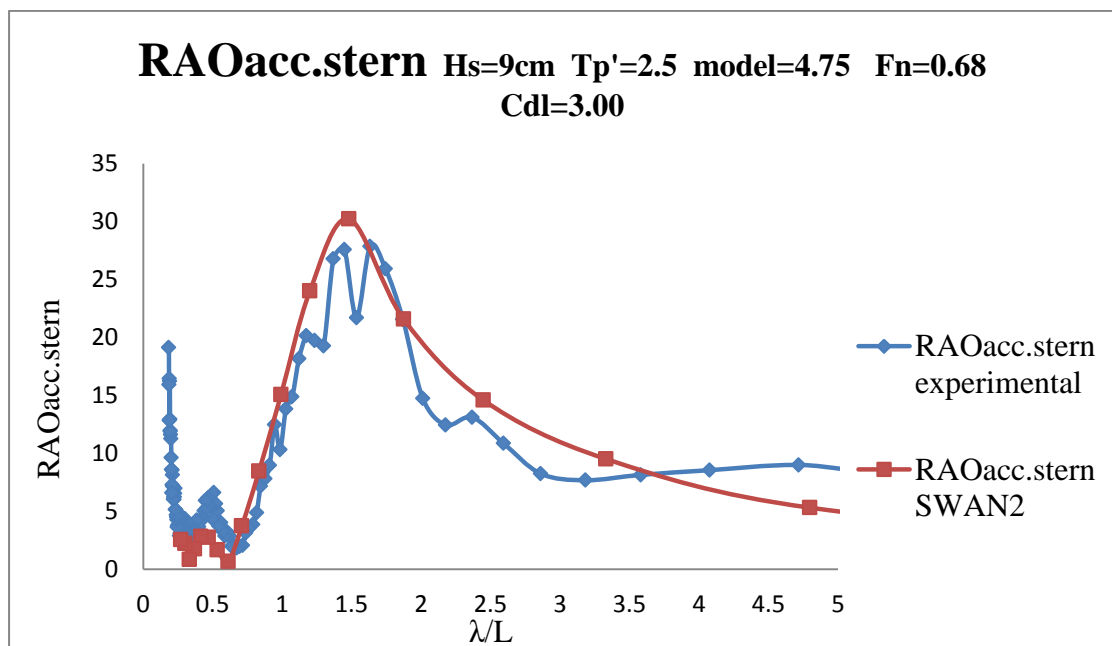
Σχήμα 6.112. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.113. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

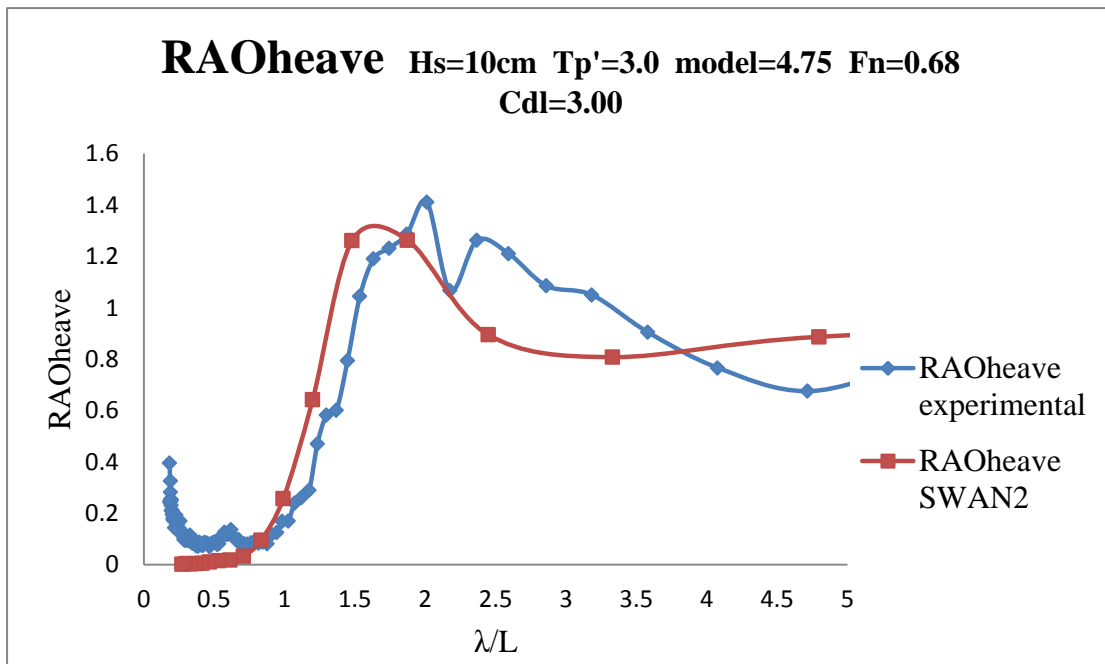


Σχήμα 6.114. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

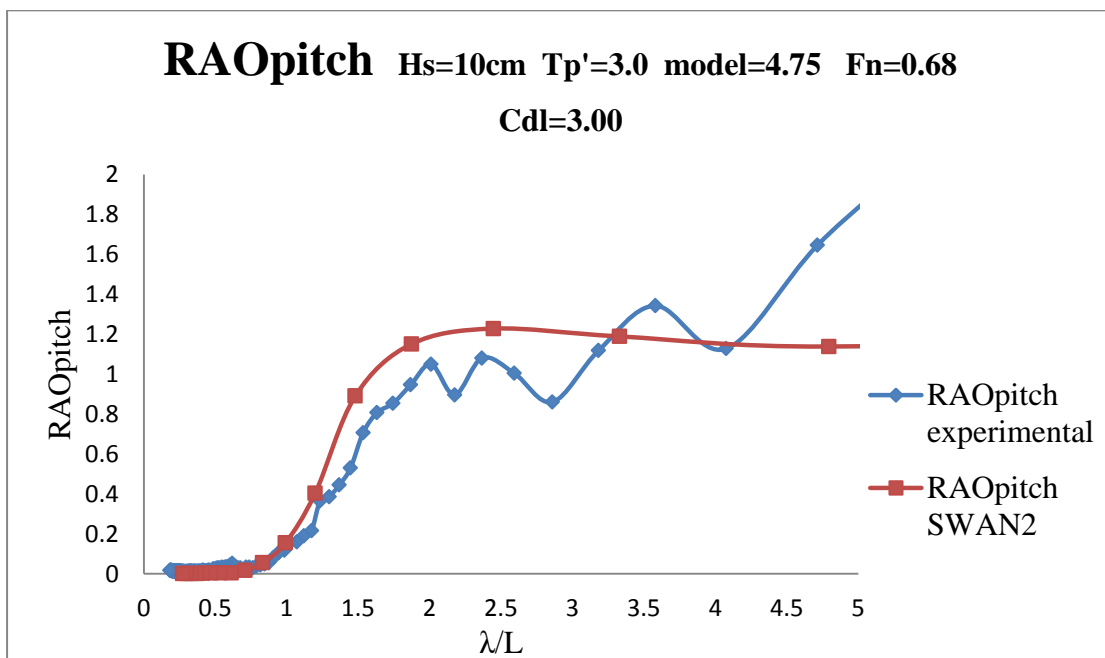


Σχήμα 6.115. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

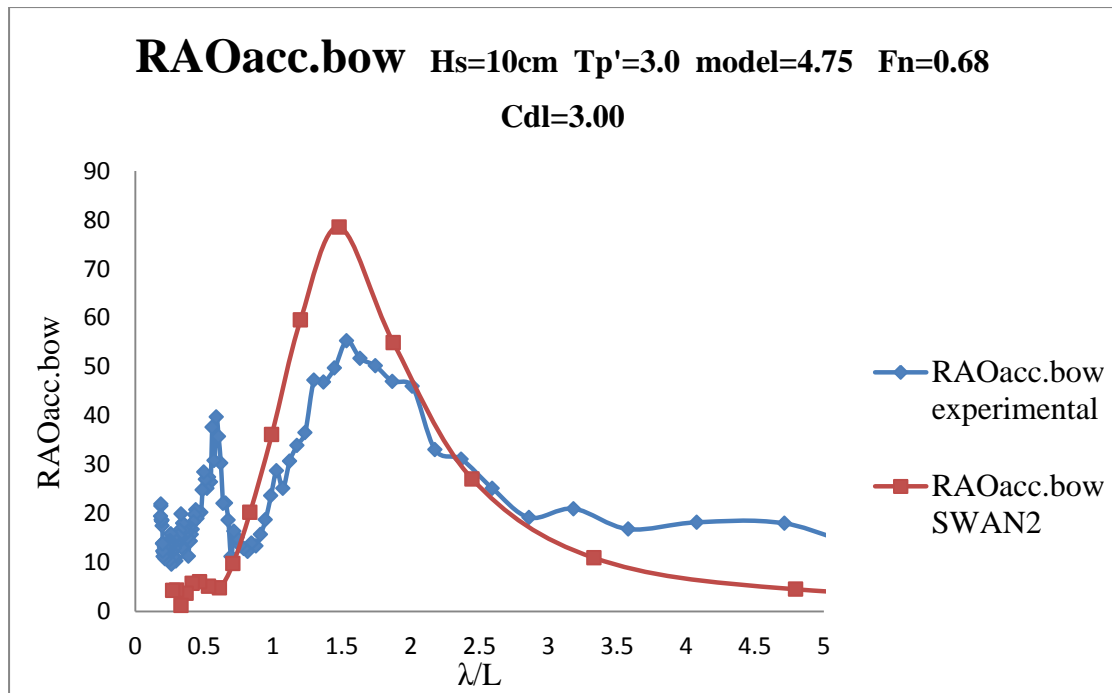
- H10tp3.475



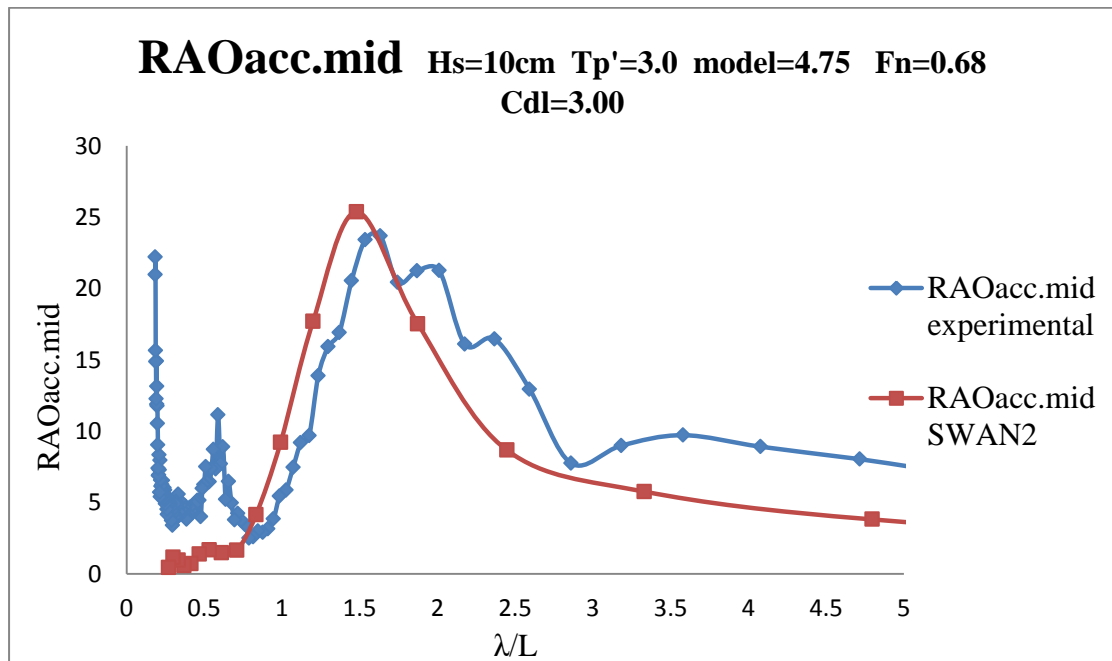
Σχήμα 6.116. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



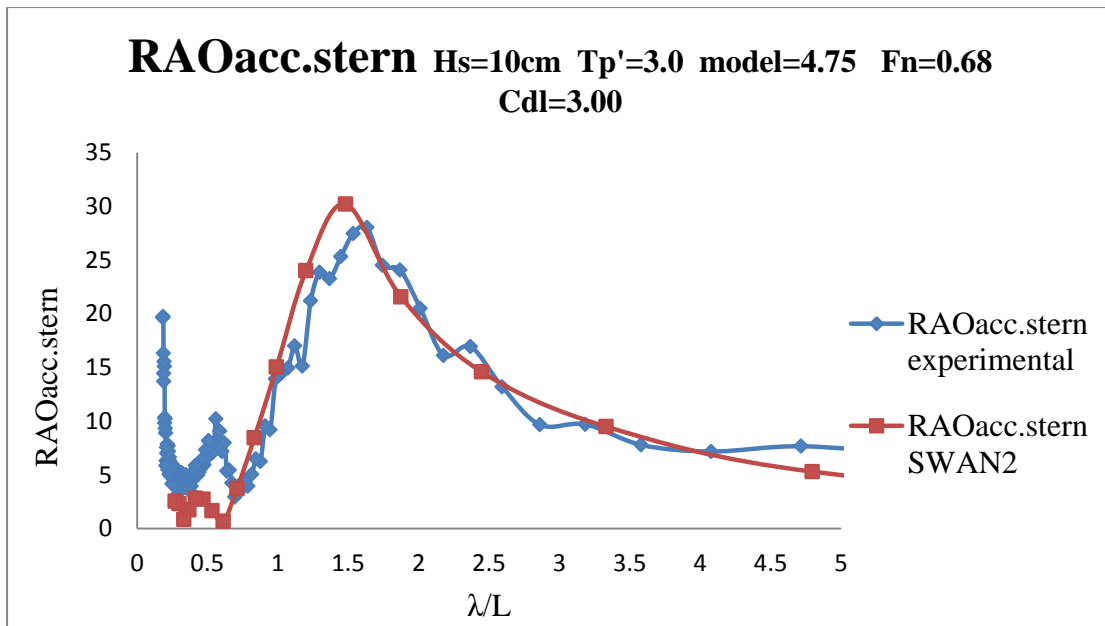
Σχήμα 6.117. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.118. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

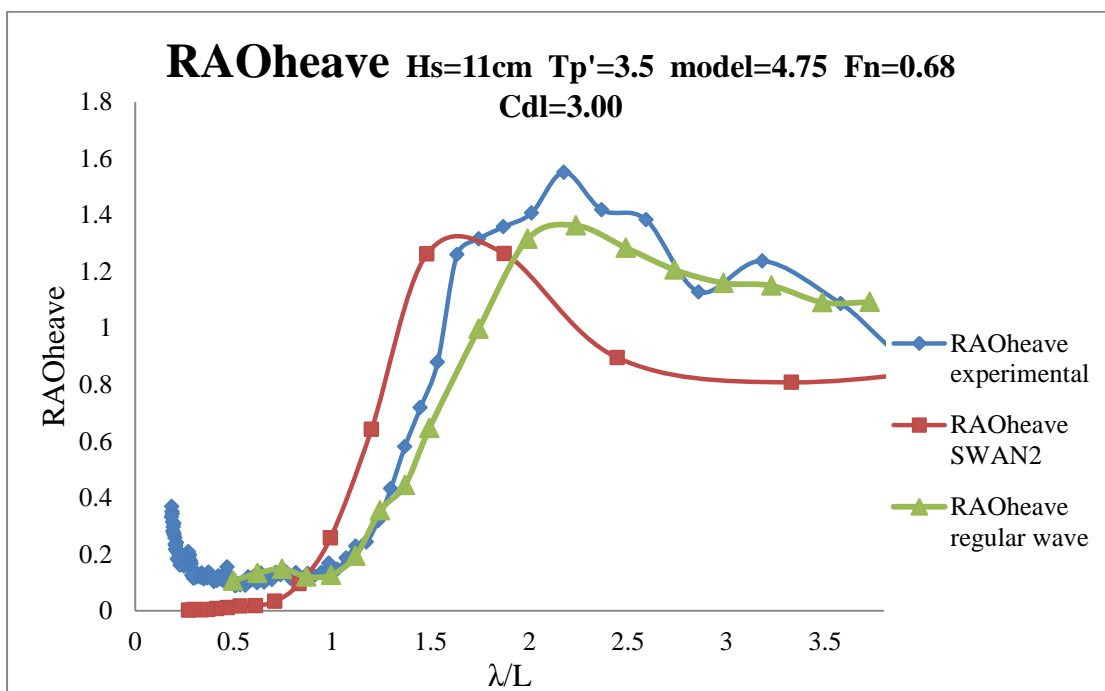


Σχήμα 6.119. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

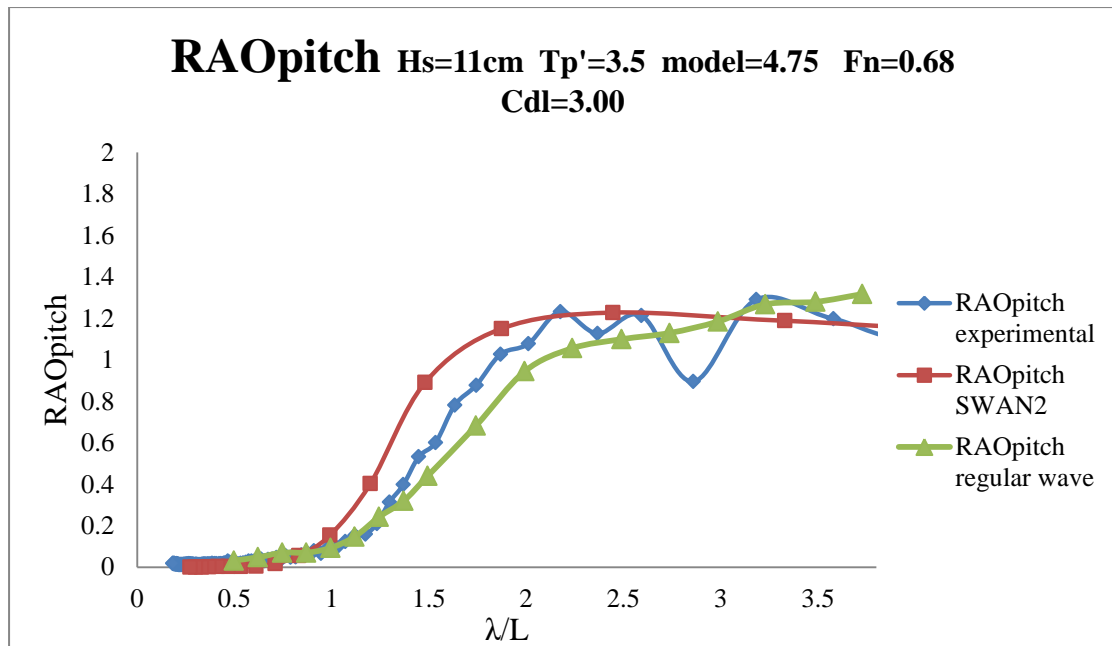


Σχήμα 6.120. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

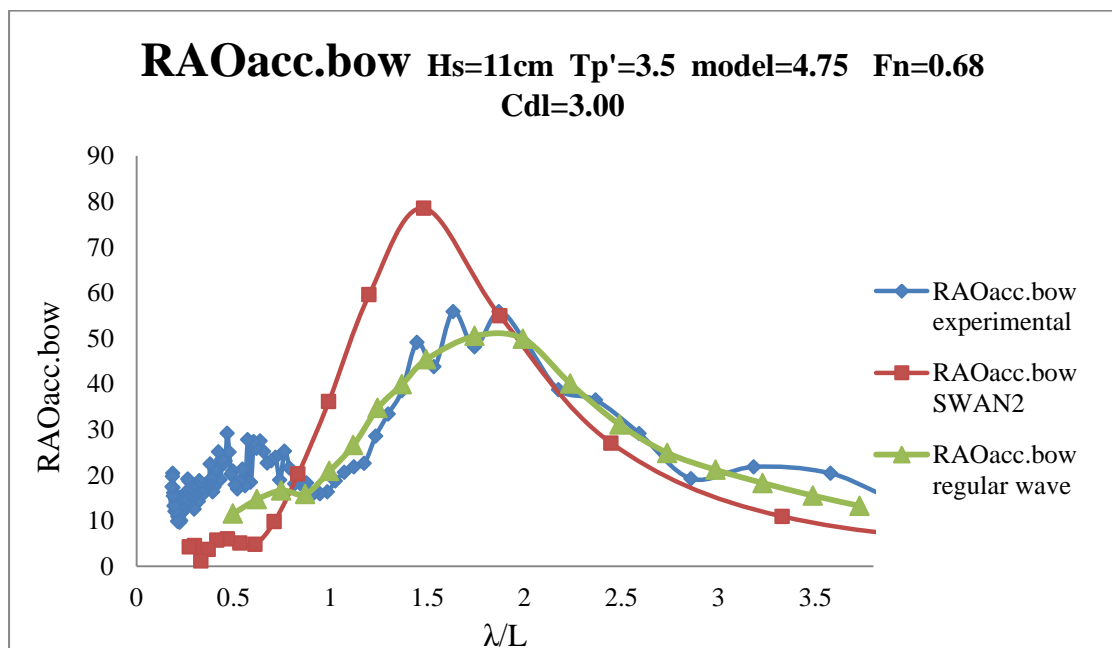
- H11tp35.475



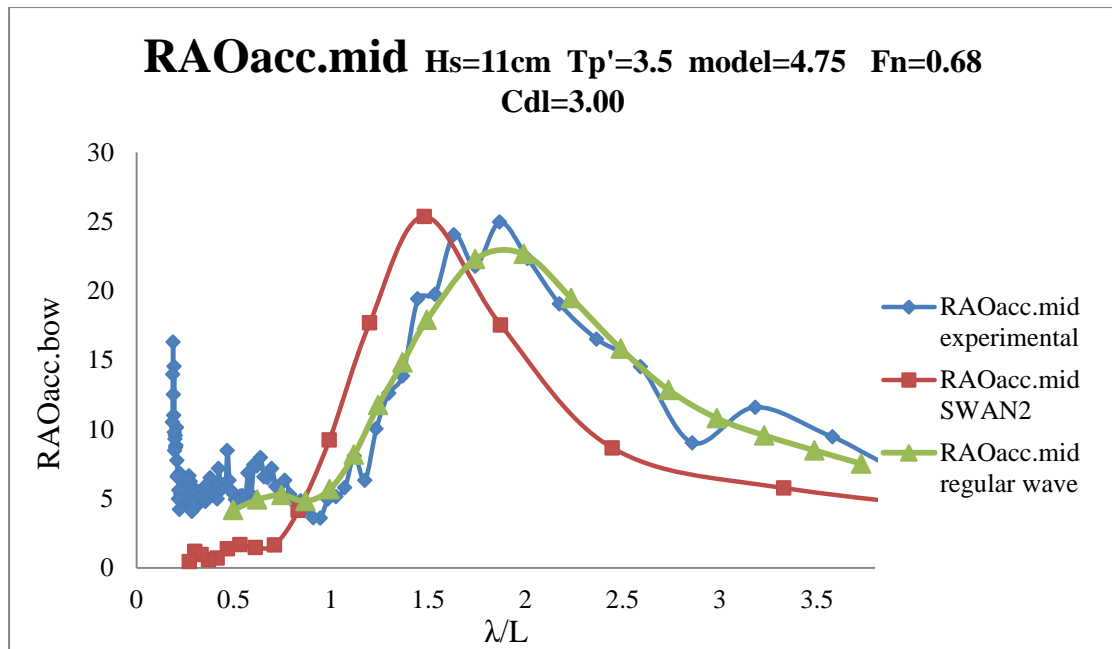
Σχήμα 6.121. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



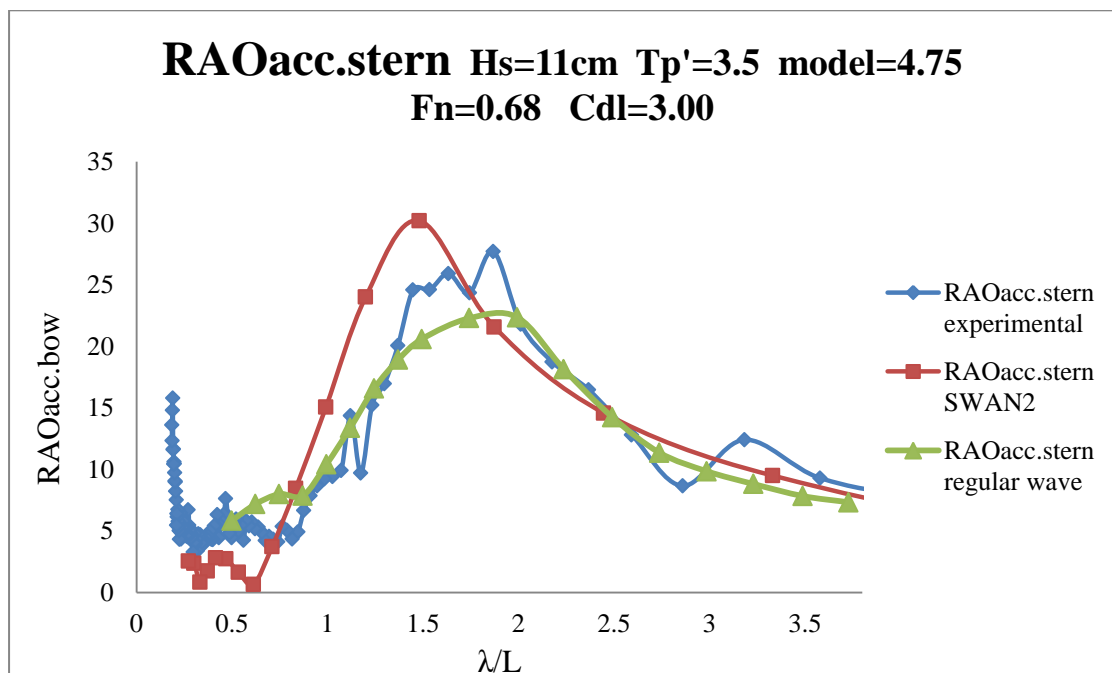
Σχήμα 6.122. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.123. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

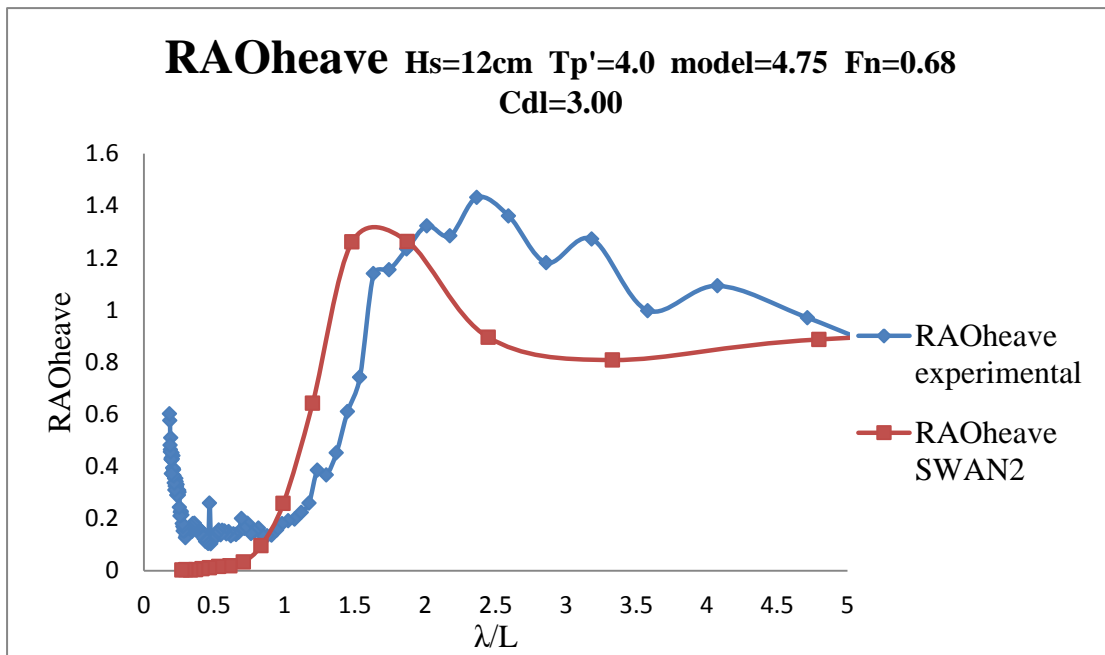


Σχήμα 6.124. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

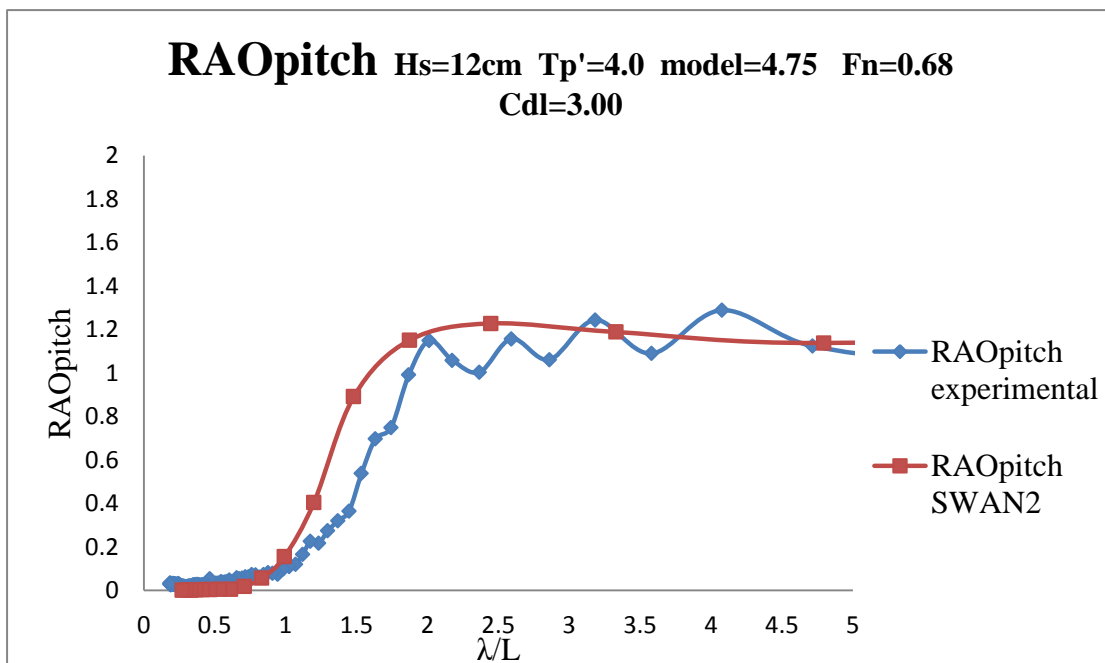


Σχήμα 6.125. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

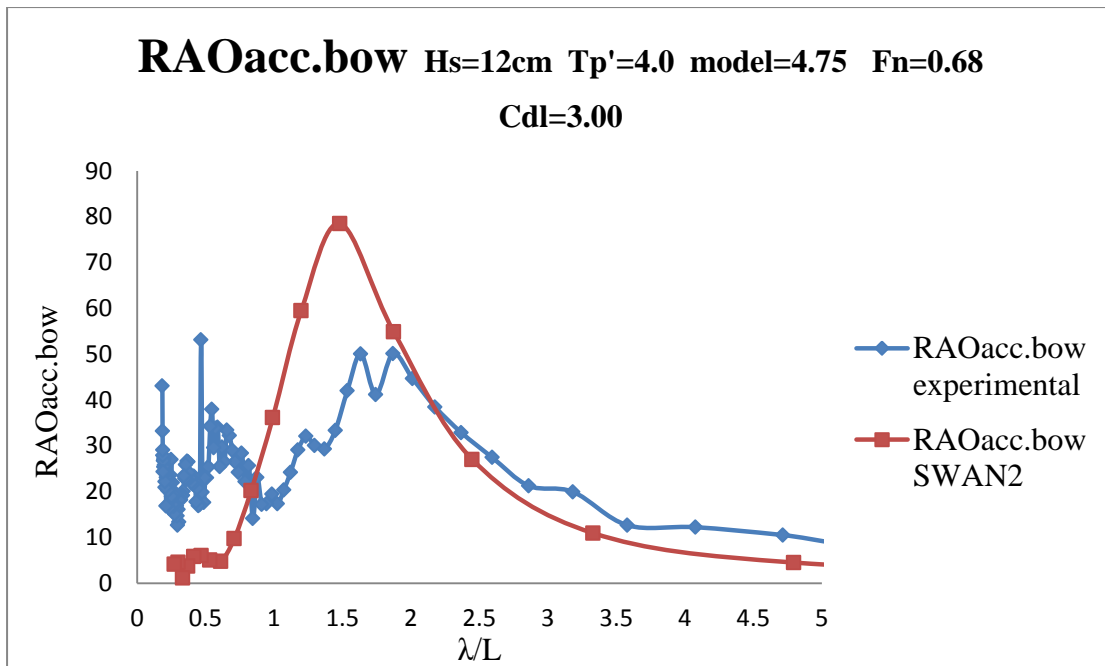
- H12tp4.475



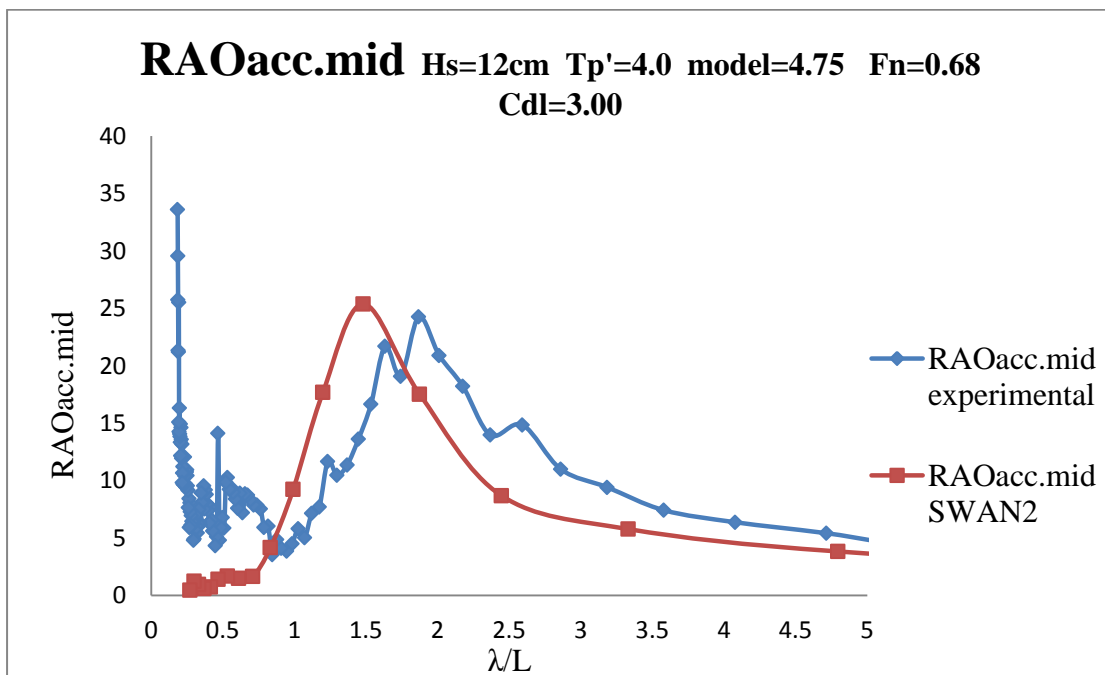
Σχήμα 6.126. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



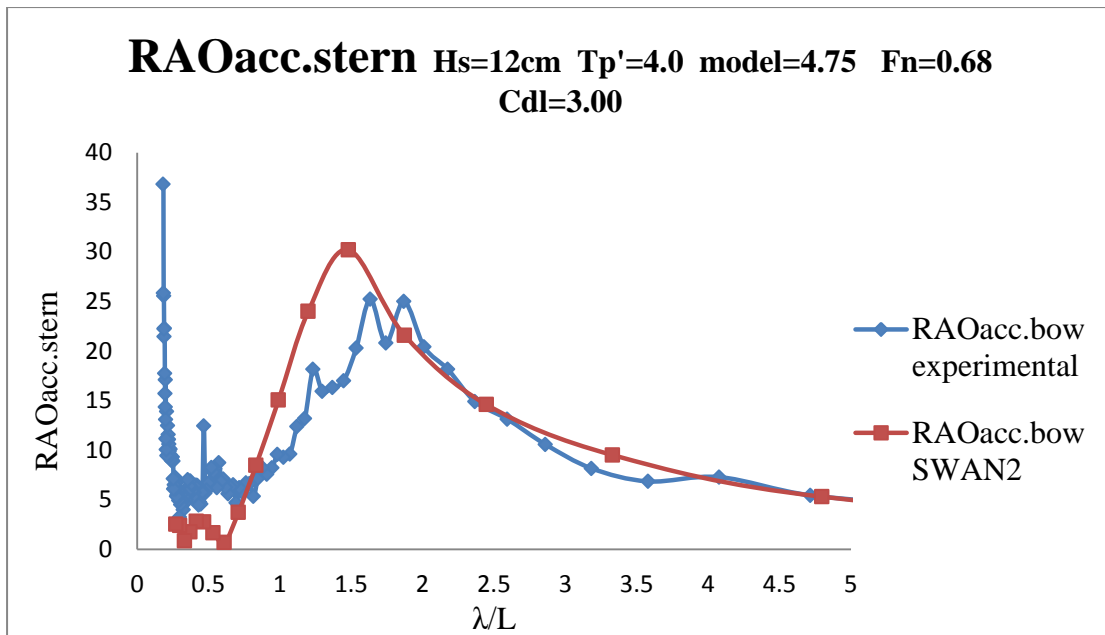
Σχήμα 6.127. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.128. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

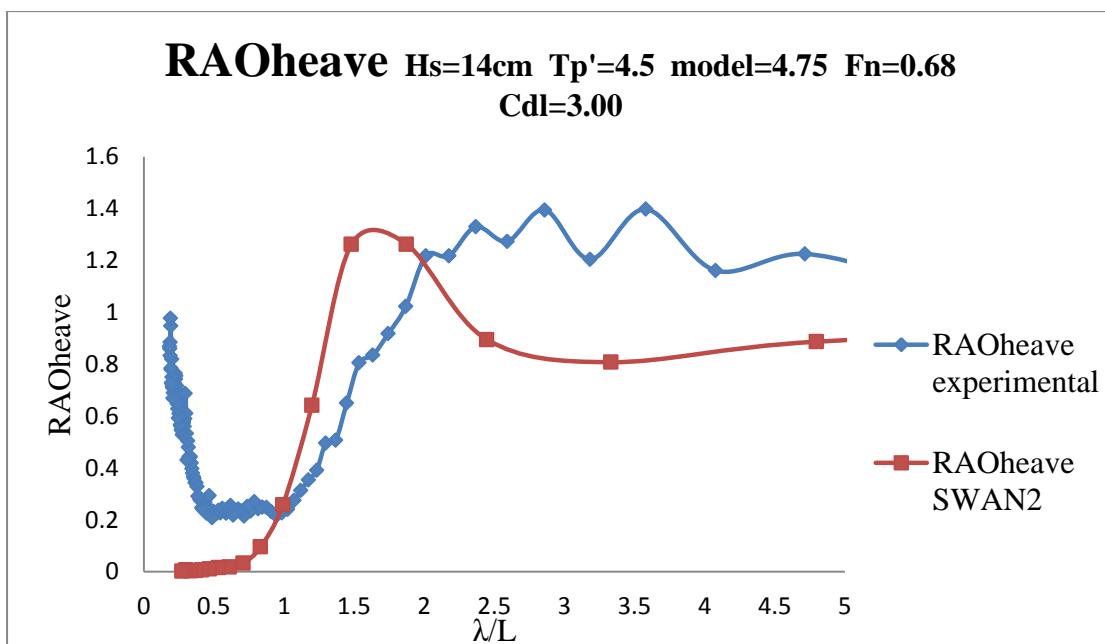


Σχήμα 6.129. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

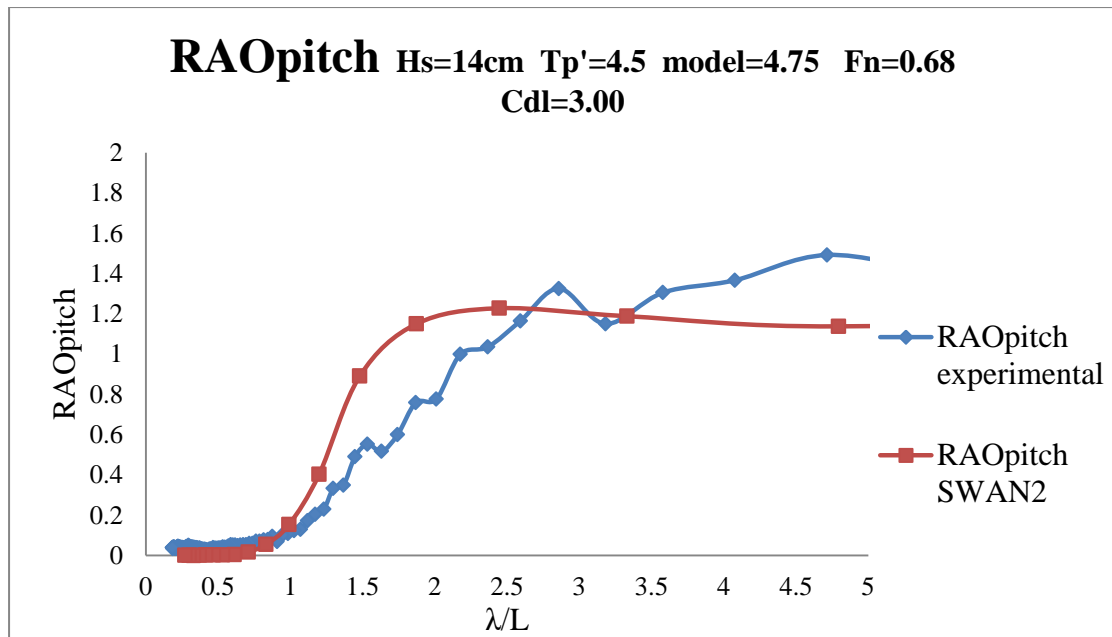


Σχήμα 6.130. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

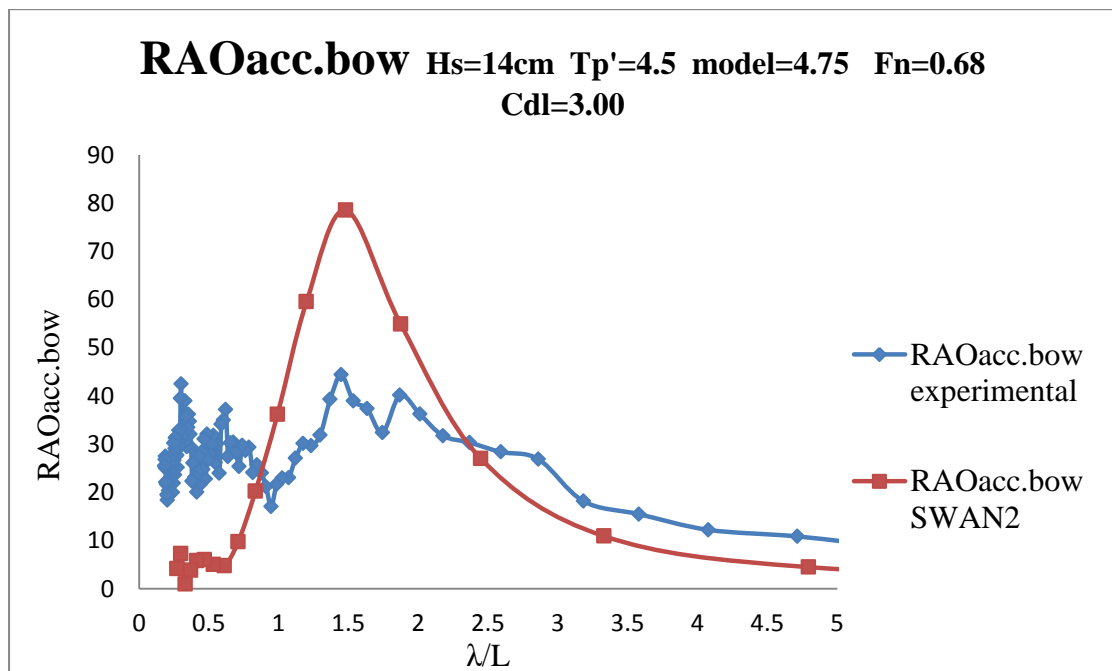
- H14tp45.475



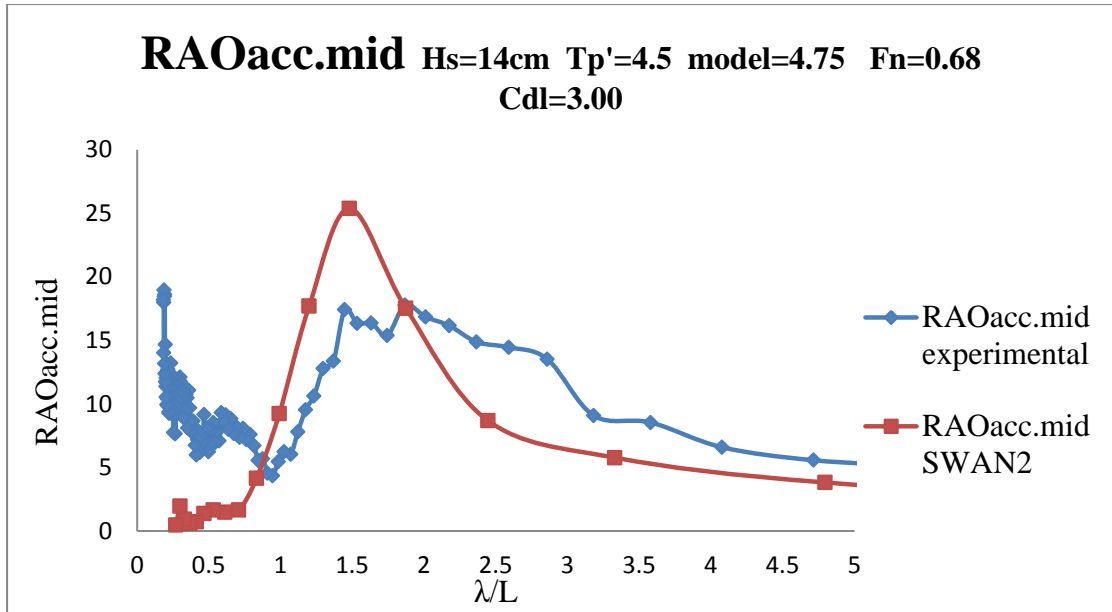
Σχήμα 6.131. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



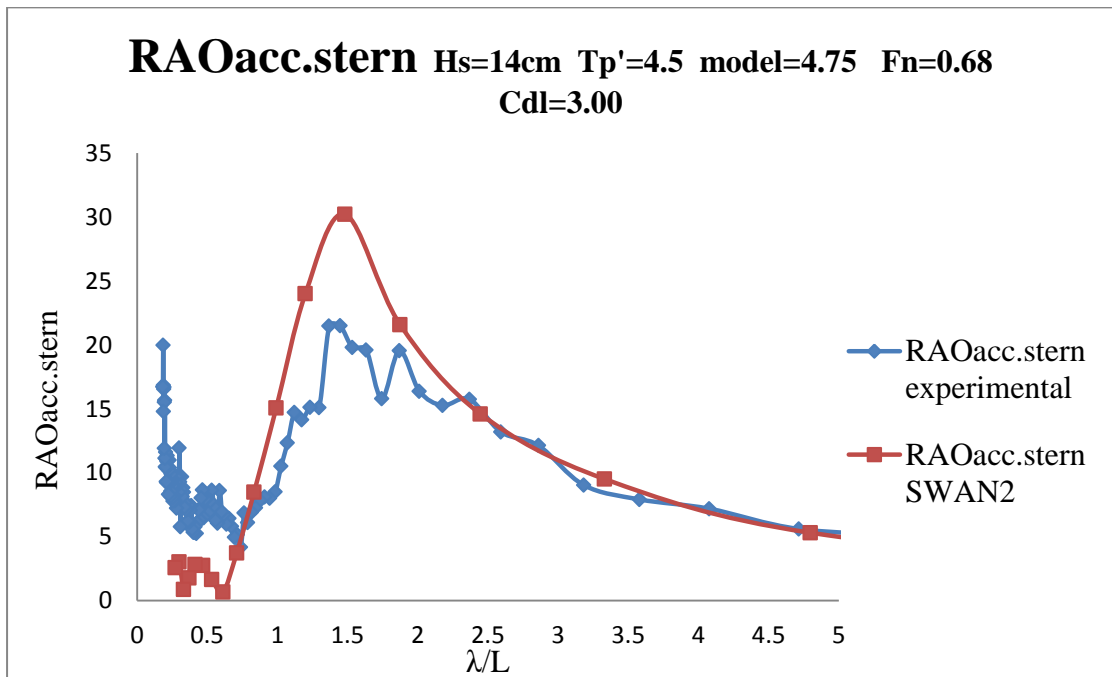
Σχήμα 6.132. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.133. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη

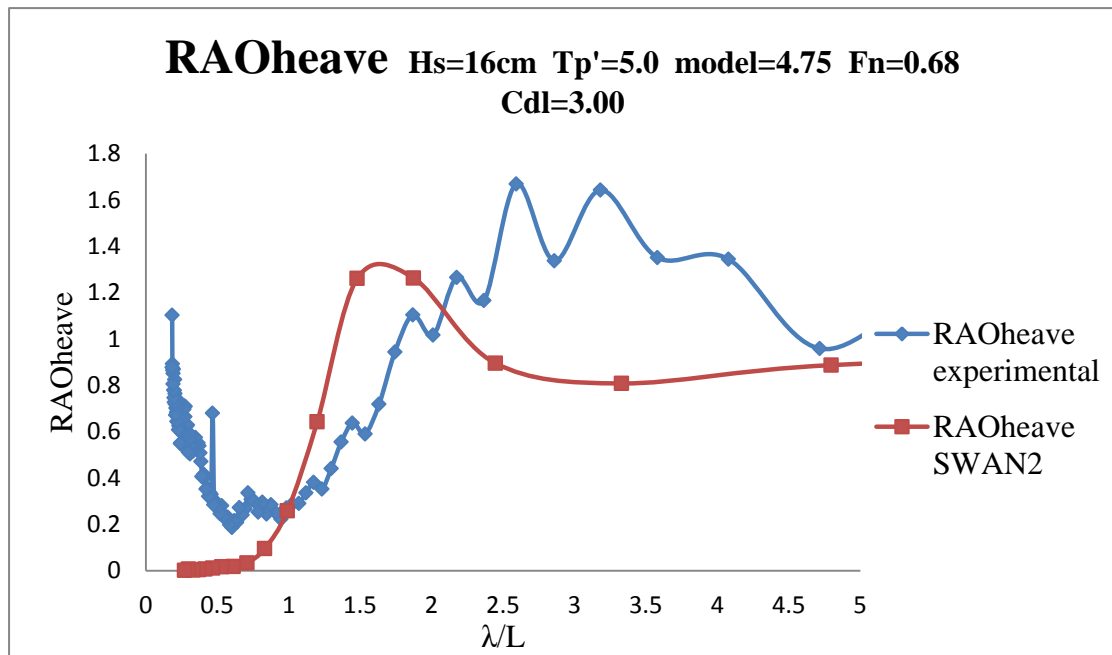


Σχήμα 6.134. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

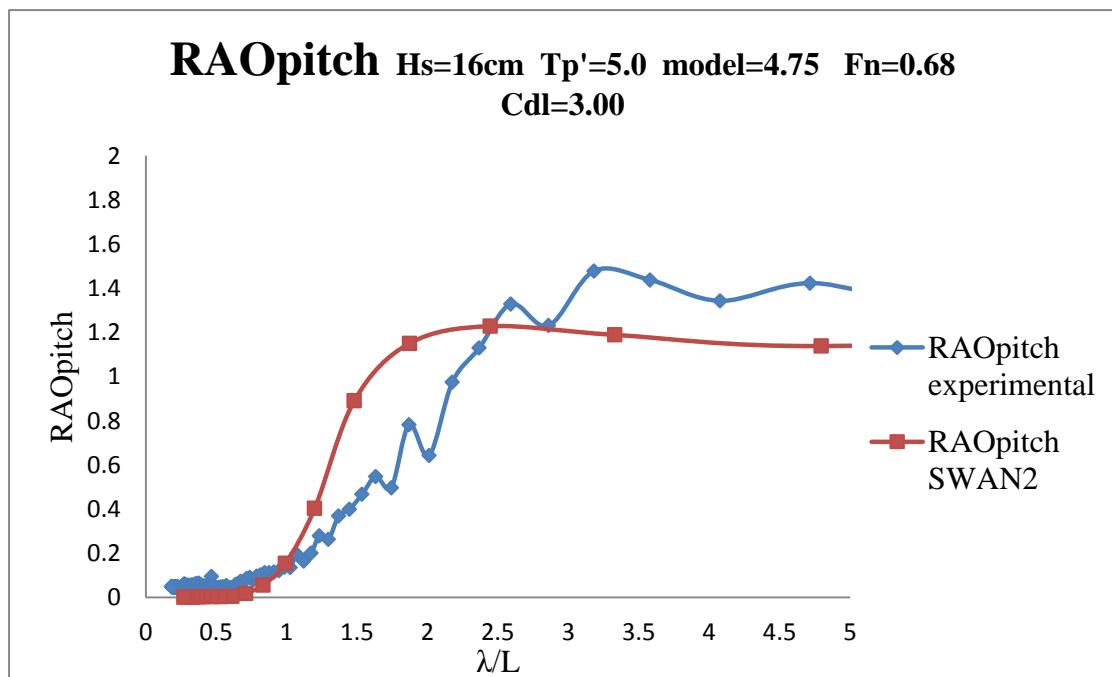


Σχήμα 6.135. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

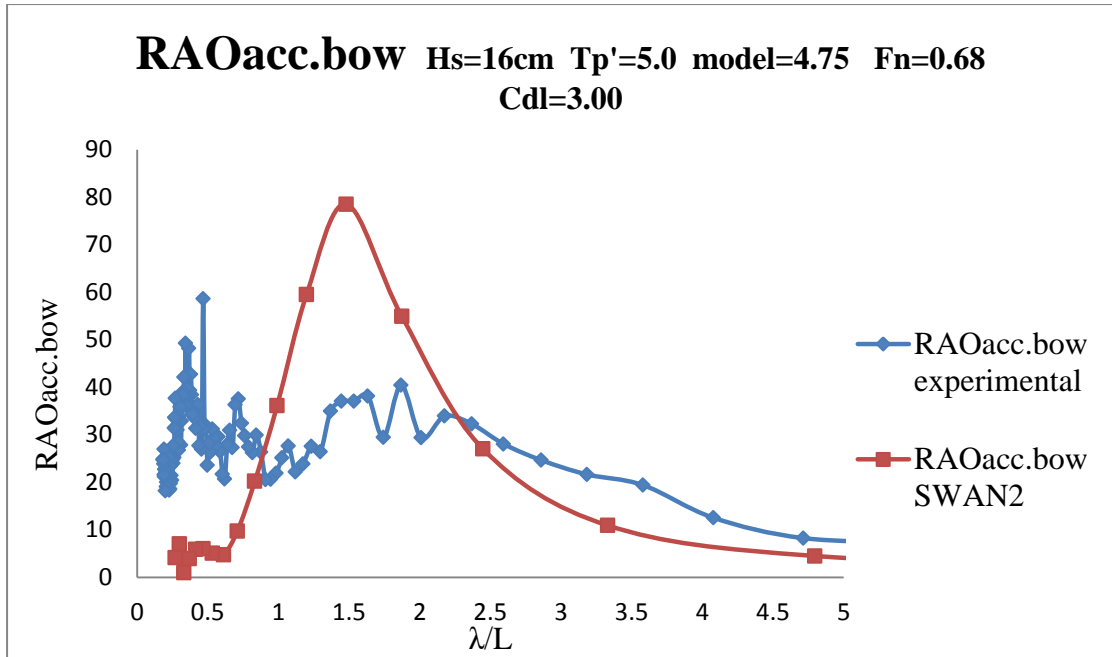
- H16tp5.475



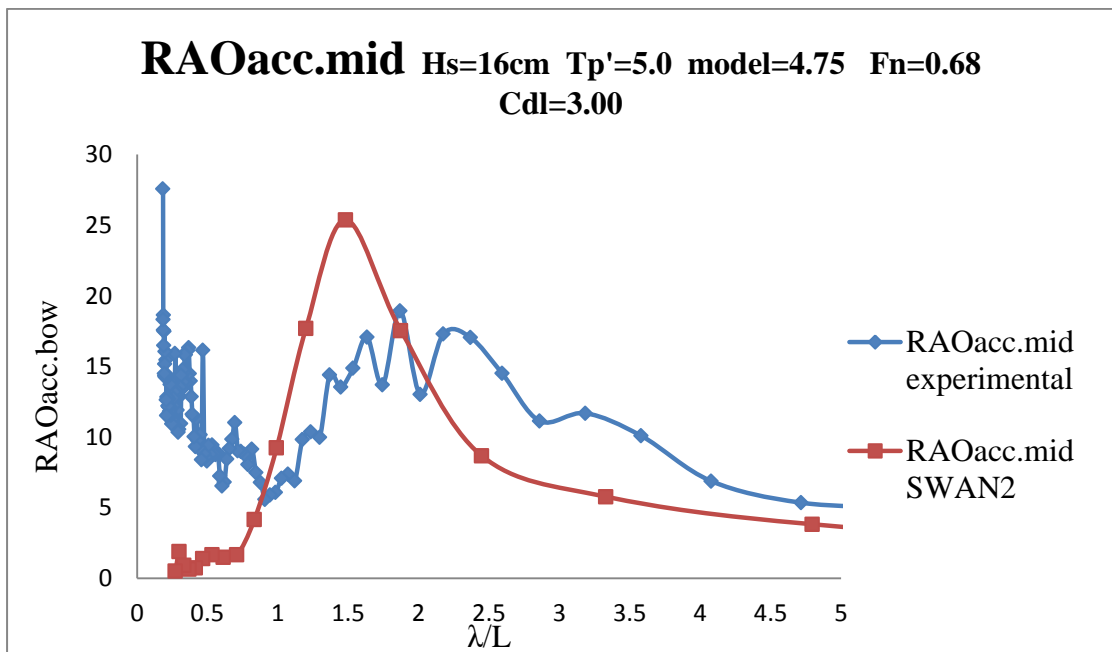
Σχήμα 6.136. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης κίνησης



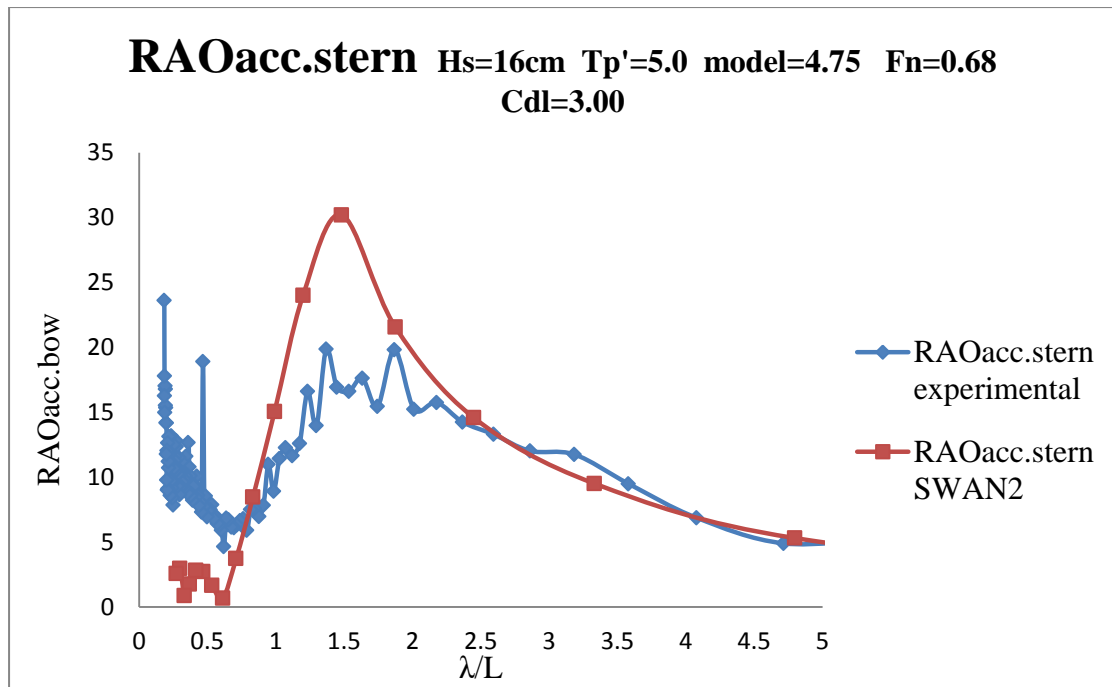
Σχήμα 6.137. Συντελεστής απόκρισης προνευτασμού



Σχήμα 6.138. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Σχήμα 6.139. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους



Σχήμα 6.140. Συντελεστής απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

Παρατηρήσεις

- Τα αποτελέσματα για την **κίνηση Heave** δείχνουν μια καλή προσέγγιση για $\lambda/L < 1.2$ για την μικρή ταχύτητα στα μικρότερα κύματα, ενώ στα μεγαλύτερα στην περιοχή $1 < \lambda/L < 1.5$, ο κώδικας υπερεκτιμά. Για την μεγάλη ταχύτητα, παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το κύμα τόσο αυξάνεται η απόκλιση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων.
- Για την **κίνηση Pitch**, στην μικρή ταχύτητα η προσέγγιση του κώδικα είναι ικανοποιητική για όλα τα κύματα και για $\lambda/L < 1.5$. Στην μεγάλη ταχύτητα, για την ίδια περιοχή λ/L , παρατηρείται σχετική απόκλιση στα δύο μεγαλύτερα κύματα, ενώ για $T_p' < 4$, υπάρχει ικανοποιητική προσέγγιση.

- Για τις **επιταχύνσεις**, παρατηρούμε ότι στην μικρή ταχύτητα, στις μικρότερες αδιάστατες περιόδους υπάρχει καλή εκτίμηση του κώδικα για την επιτάχυνση στην πλώρη, ενώ για την επιτάχυνση στην πρύμνη παρατηρείται υπερεκτίμηση και για το κέντρο βάρους υποεκτίμηση από τον κώδικα. Στην μεγάλη ταχύτητα, για $Tr' < 4.5$ παρατηρείται ικανοποιητική προσέγγιση για τις επιταχύνσεις σε κέντρο βάρους και πρύμνη, ενώ για μεγαλύτερες περιόδους ($Tr' = 4.5$ και 5), ο κώδικας υπερεκτιμά.

Γενικές παρατηρήσεις

- Σε όλες τις περιπτώσεις, η καμπύλη των αναλυτικών υπολογισμών έχει την ίδια μορφή με την καμπύλη των πειραματικών τιμών, προσεγγίζοντας με ικανοποιητικό τρόπο την κατανομή των RAO συναρτήσεως του λ/L .
- Για κάθε μοντέλο, οι τιμές των αναλυτικών RAO παρατηρείται ότι είναι όμοιες για κάθε μετρούμενο μέγεθος, στην μικρή και στην μεγάλη ταχύτητα, ανεξάρτητα από το κυματικό φάσμα που μελετάμε. Αυτό παρατηρήθηκε για διάφορα τρεξίματα του κώδικα με μεγαλύτερο χρόνο και βήμα προσομοίωσης.
- Για την ενδιάμεση αδιάστατη περίοδο $Tr' = 3.5$, έγινε κοινό πλοτάρισμα με τα RAO σε αρμονικούς κυματισμούς από προηγούμενα πειράματα. Διαπιστώθηκε ότι τα RAO αρμονικού κυματισμού έχουν όμοια κατανομή με τα RAO τυχαίου κυματισμού, με το peak τους να παρουσιάζεται σε μεγαλύτερα λ/L .
- Ο κώδικας δίνει πολύ καλά αποτελέσματα για τις κινήσεις Heave και Pitch και για τις δύο ταχύτητες, για $1 < \lambda/L < 2$.

- Ο κώδικας SWAN2 δίνει πολύ καλά αποτελέσματα - κοντά στα πειραματικά και κρίνεται αξιόπιστος, για ενδιάμεσες καταστάσεις θάλασσας.
- Σε αρκετά διαγράμματα, διακρίνονται υψηλές τιμές RAO για μικρά λ/L . Φαίνεται στον παρακάτω τύπο ότι χαμηλά λ/L , αντιστοιχούν σε υψηλά f , όπου το κύμα αρχίζει και χάνει την ενέργειά του:

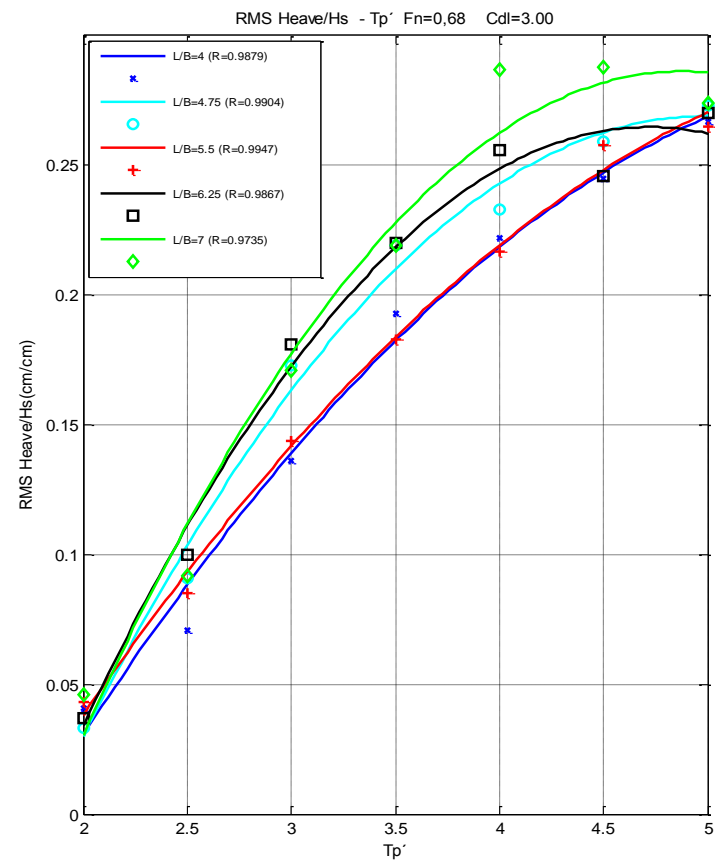
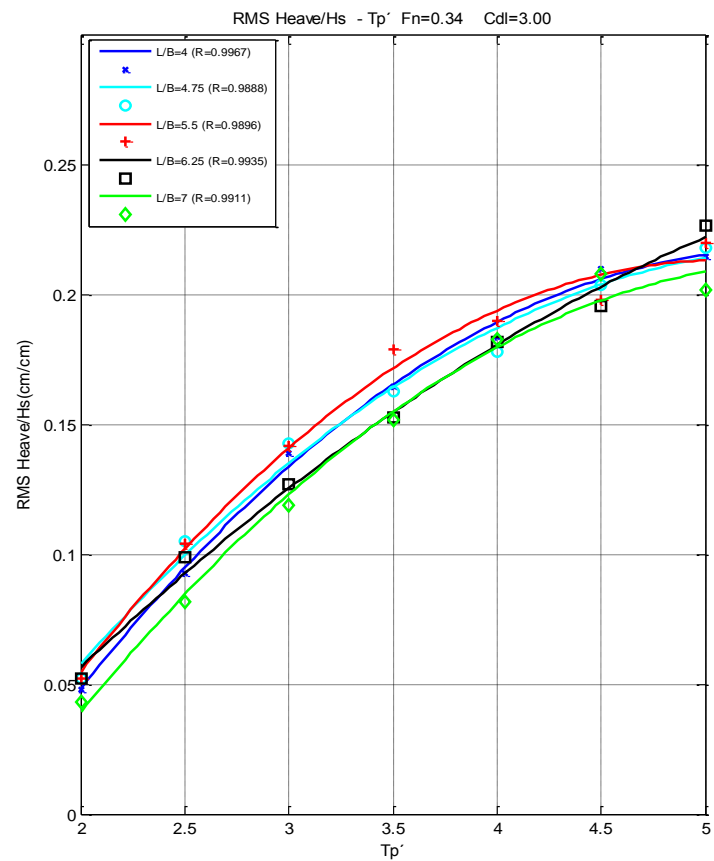
$$\omega^2 = kg \Rightarrow (2\pi f)^2 = kg \Rightarrow f = \sqrt{\frac{g/L}{2\pi\lambda/L}}$$

7. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΝΟΛΟΥ ΤΩΝ ΣΚΑΦΩΝ ΤΗΣ NTUA SERIES

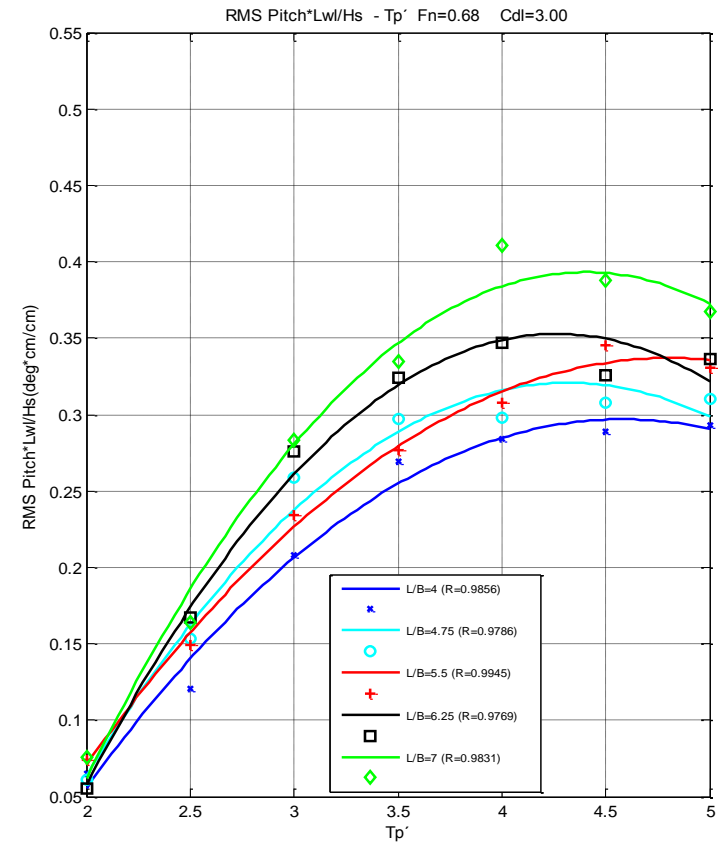
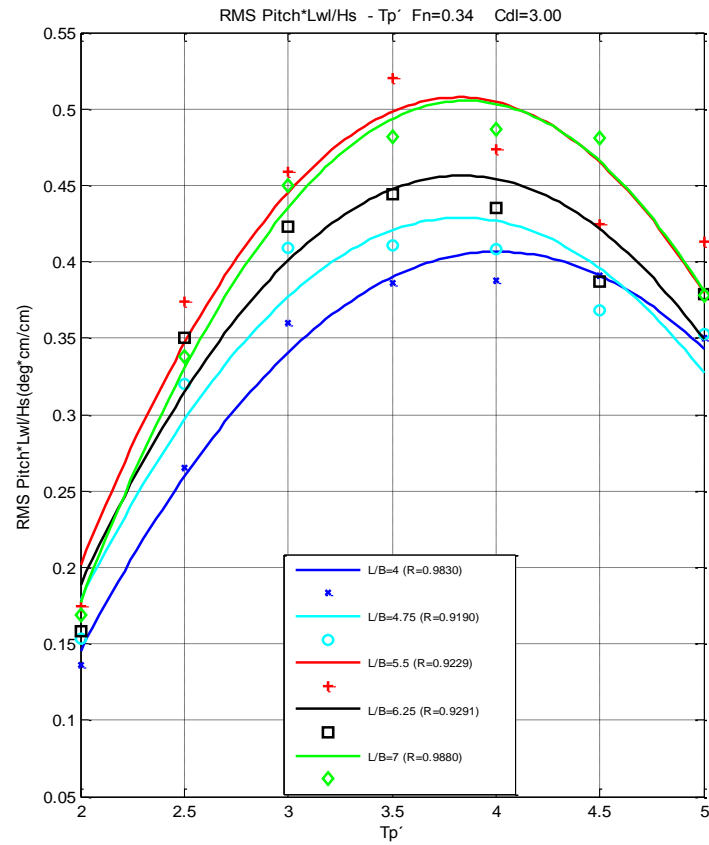
Με τα πειράματα που έγιναν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ολοκληρώθηκε η σειρά του Ε.Μ.Π. για την μέση κατάσταση φόρτωσης ($CdI=3.00$). Κρίθηκε ενδιαφέρουσα μια κοινή μελέτη και παρουσίαση των αποτελεσμάτων όλων των σκαφών. Στο πλαίσιο αυτό, συγκεντρώθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα για τα υπόλοιπα σκάφη της σειράς ($L/B=4$, $L/B=5.5$, $L/B=7$). Στην συνέχεια, κατασκευάστηκαν κώδικες στο MATLAB, όπου διάβαζαν τα δεδομένα και περνούσαν καμπύλες παρεμβολής (fitting curves) 2ου και 3ου βαθμού.

7.1 Curve fitting 2ου βαθμού

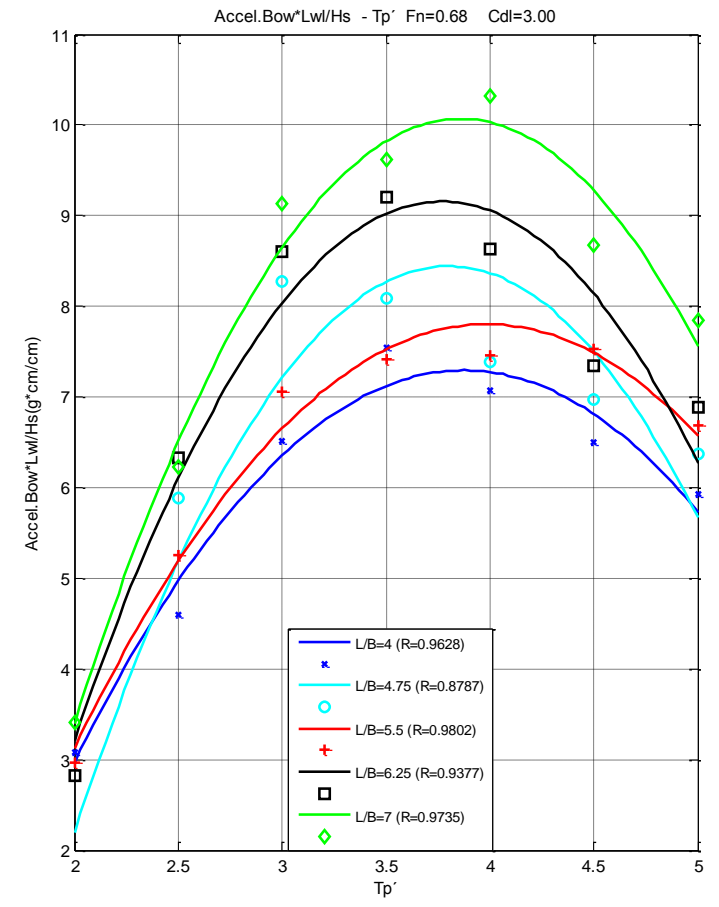
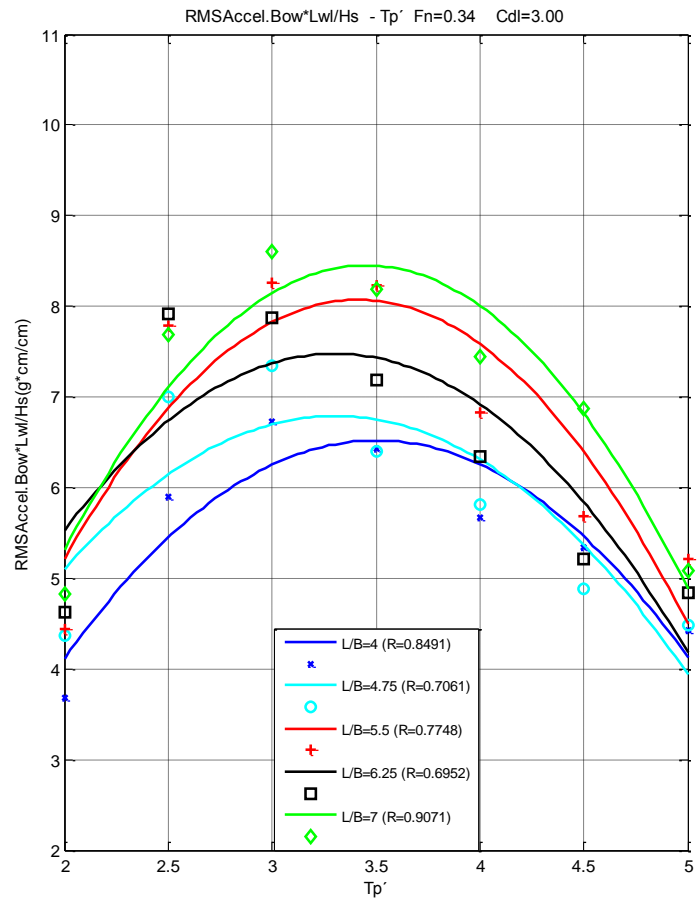
Με fitting 2ου βαθμού, προέκυψαν:



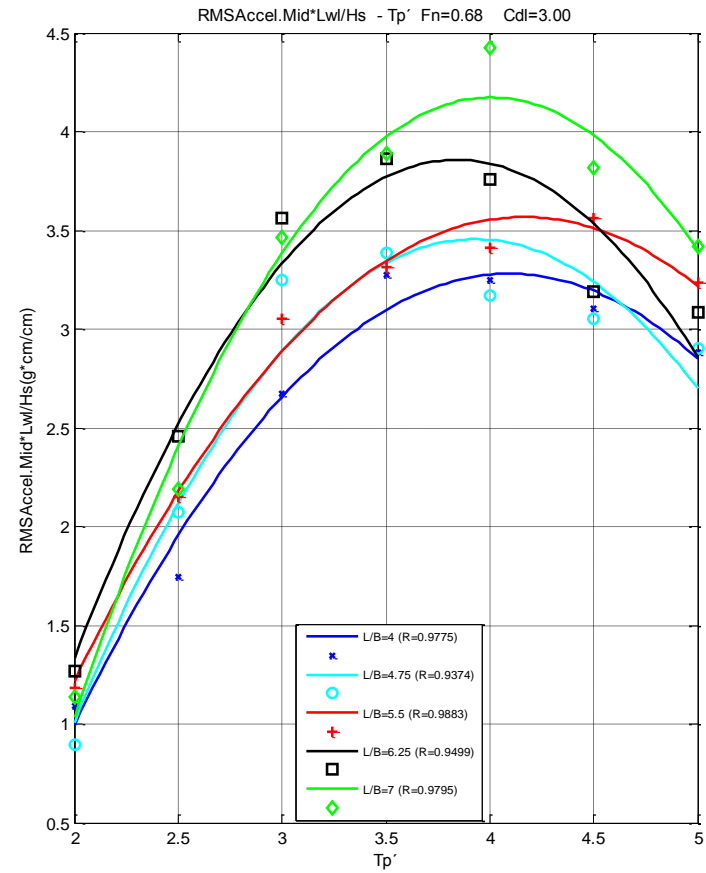
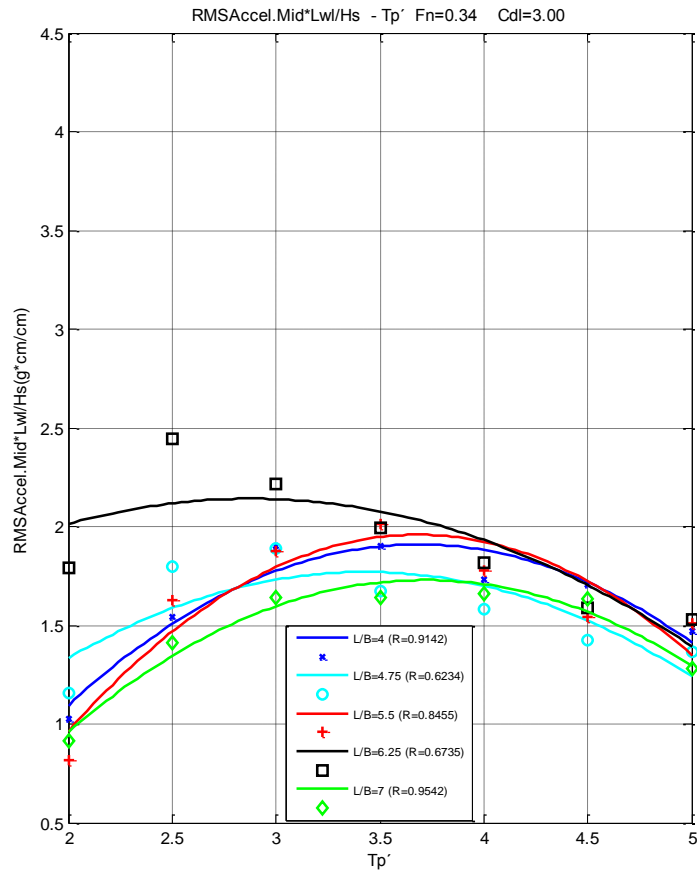
Σχήματα 7.1-7.2. Τιμές κατακόρυφης κίνησης



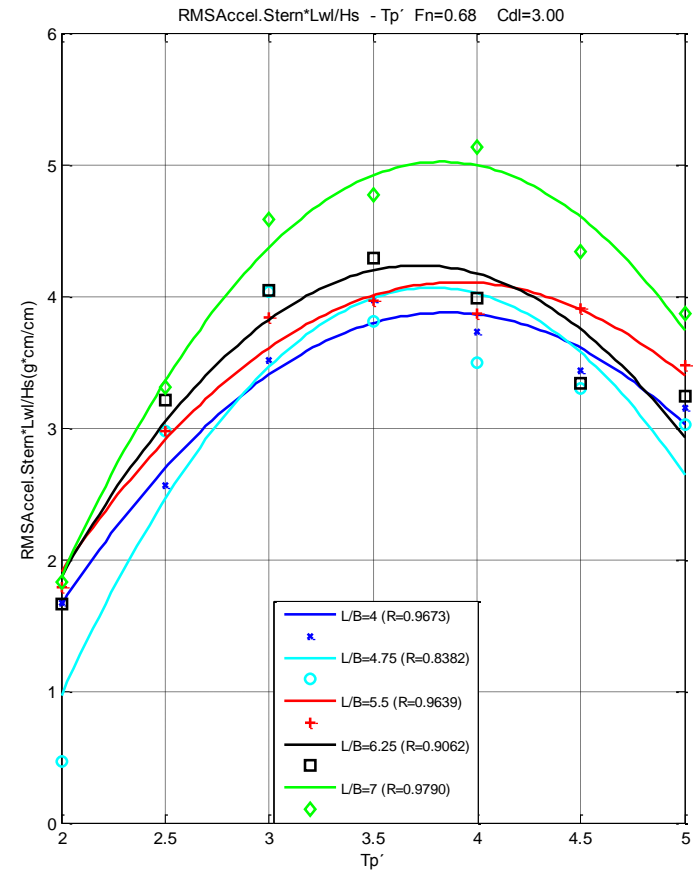
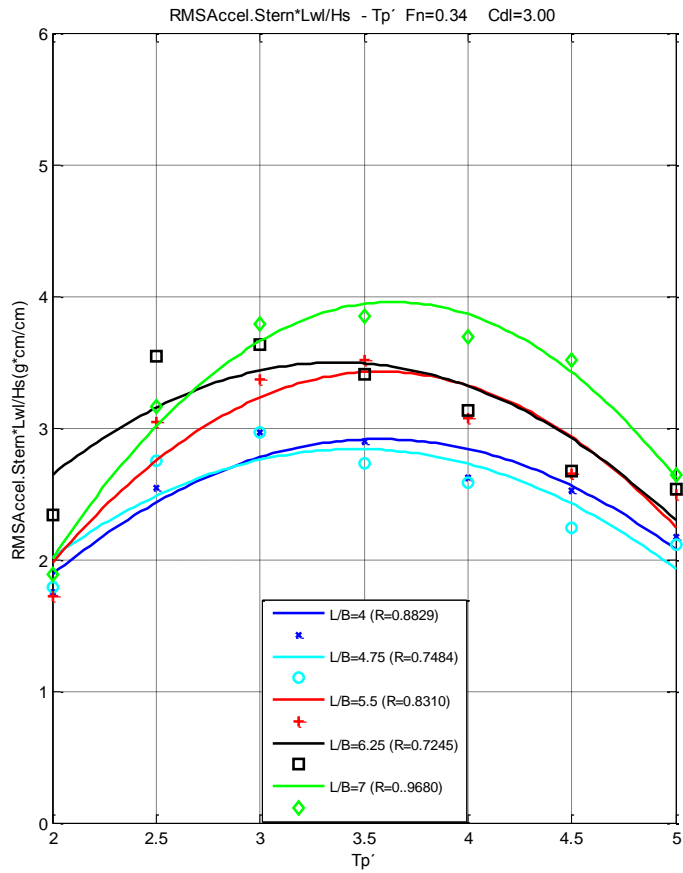
Σχήματα 7.3-7.4. Τιμές προνευτασμού



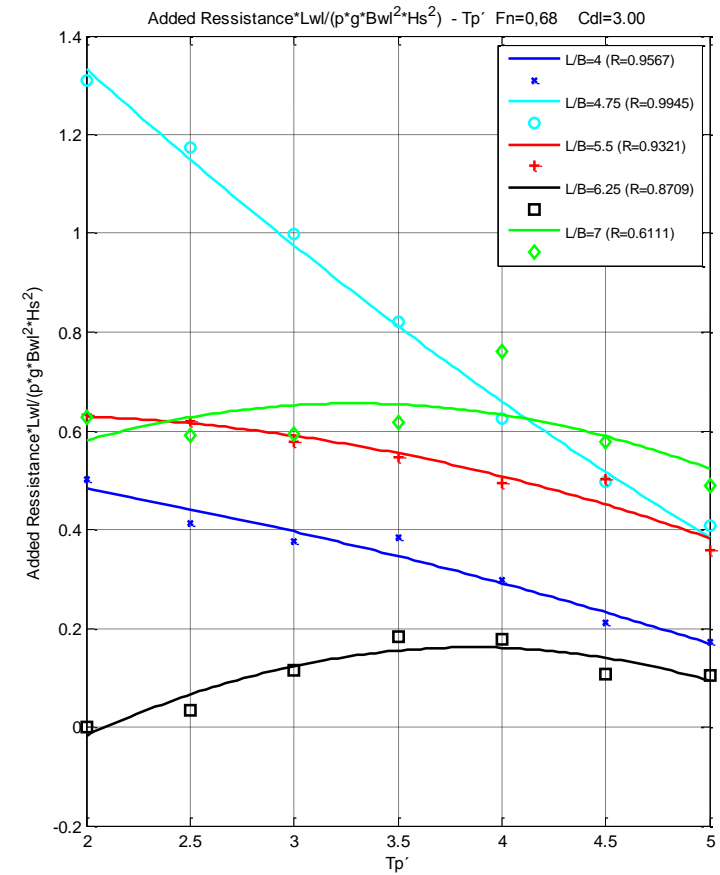
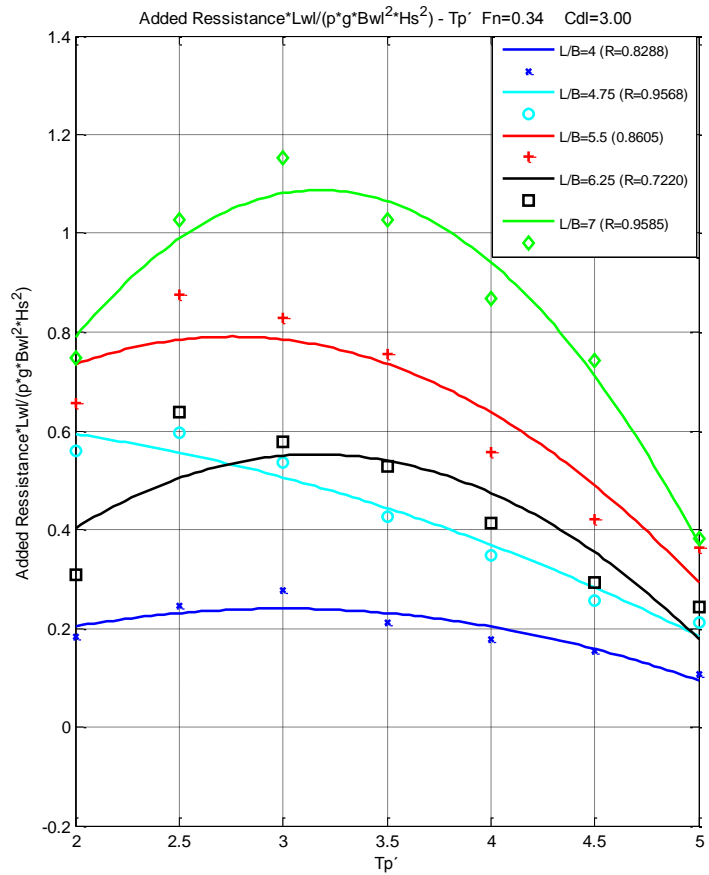
Σχήματα 7.5-7.6. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Σχήματα 7.7-7.8. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους

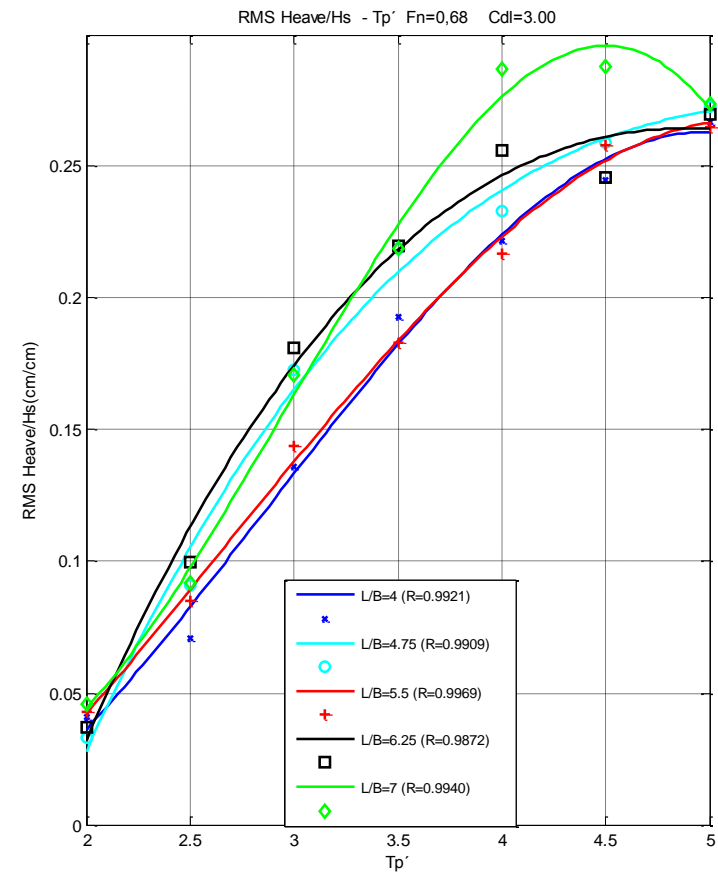
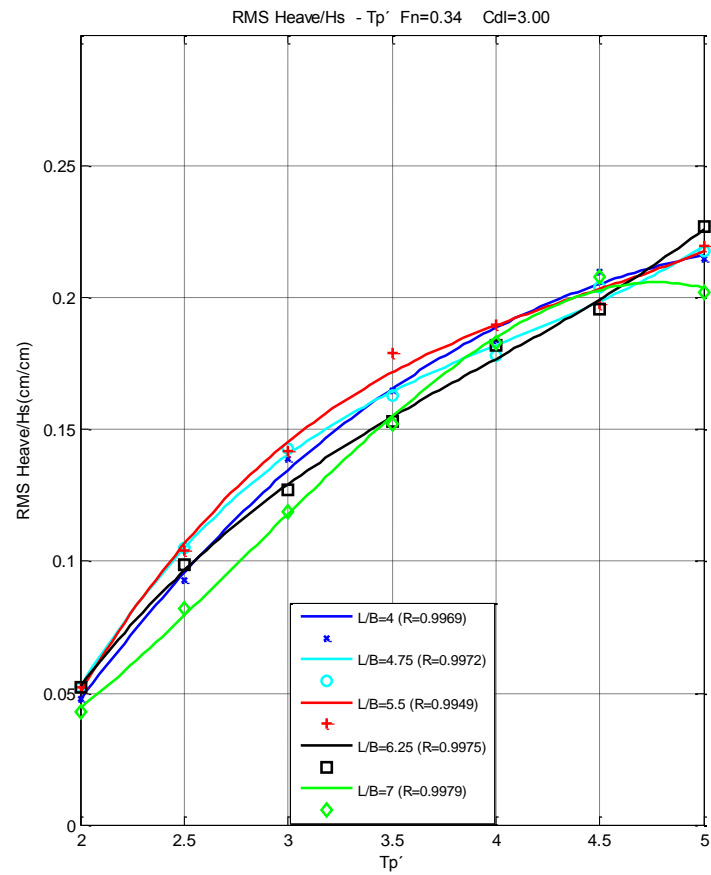


Σχήματα 7.9-7.10. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη

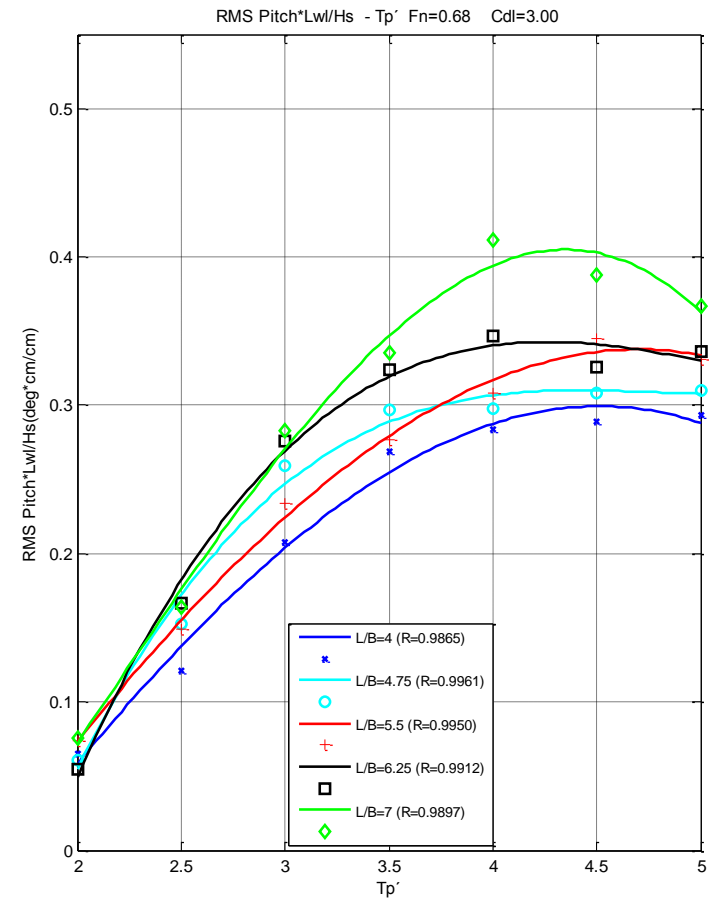
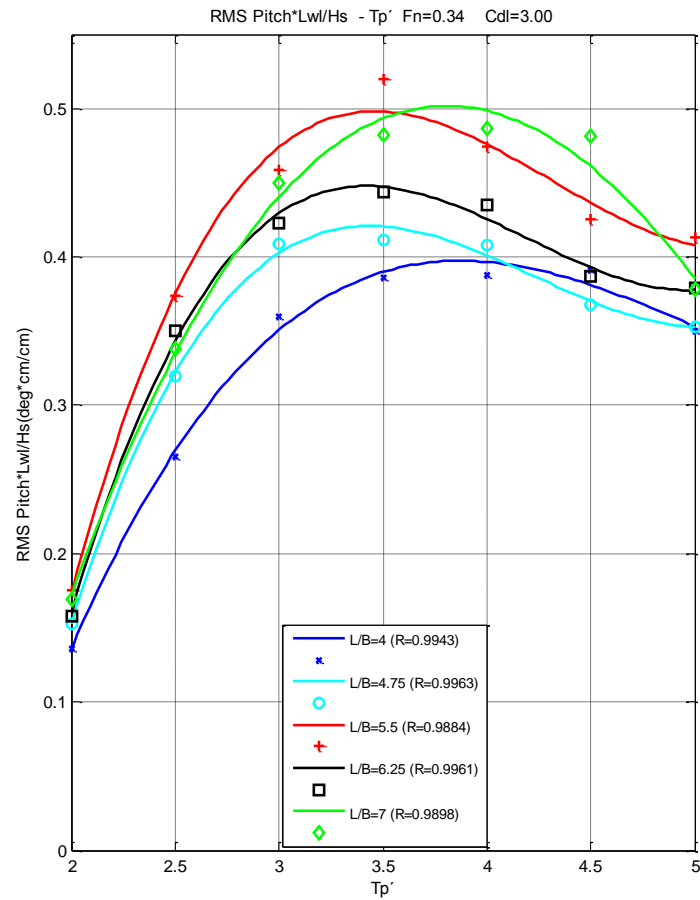


Σχήματα 7.11-7.12. Τιμές πρόσθετης αντίστασης

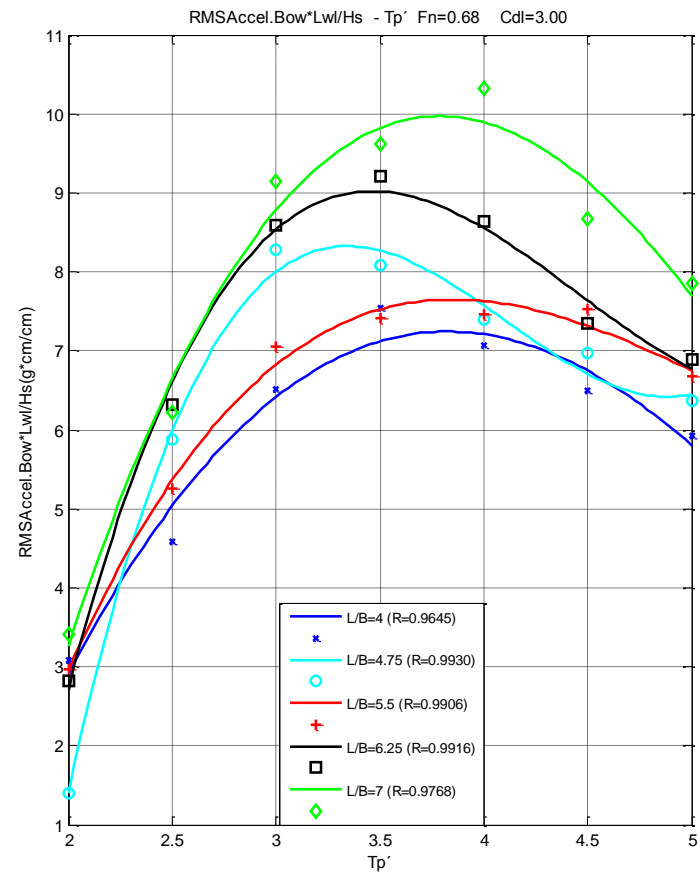
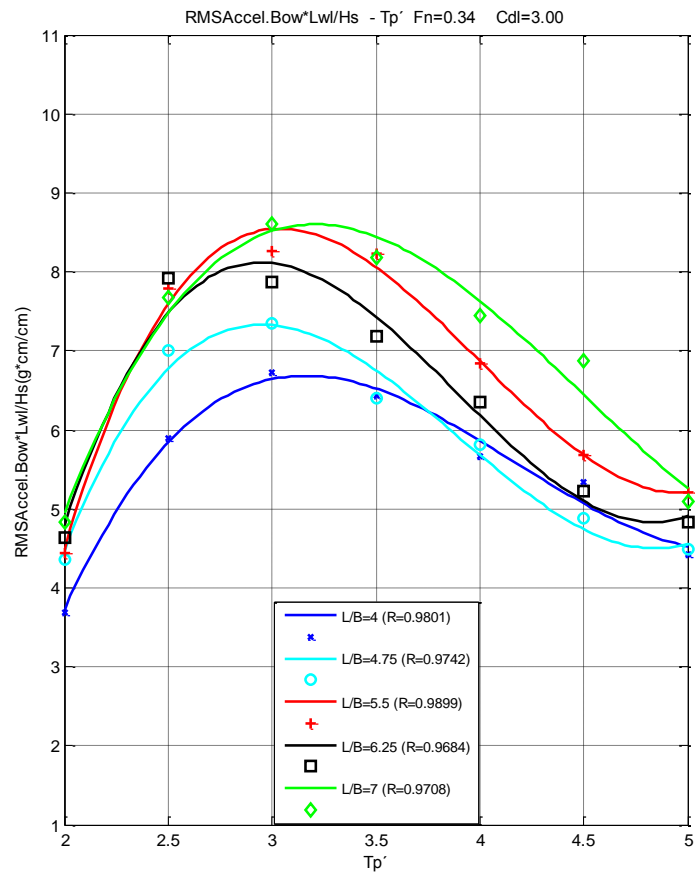
Ακολουθεί η προσέγγιση με καμπύλες 3ου βαθμού:



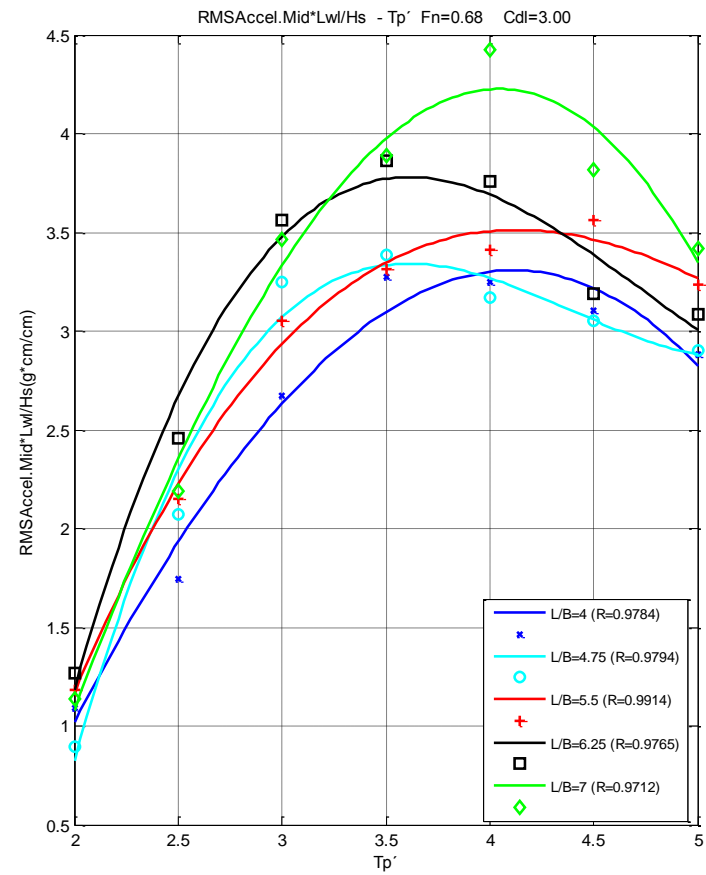
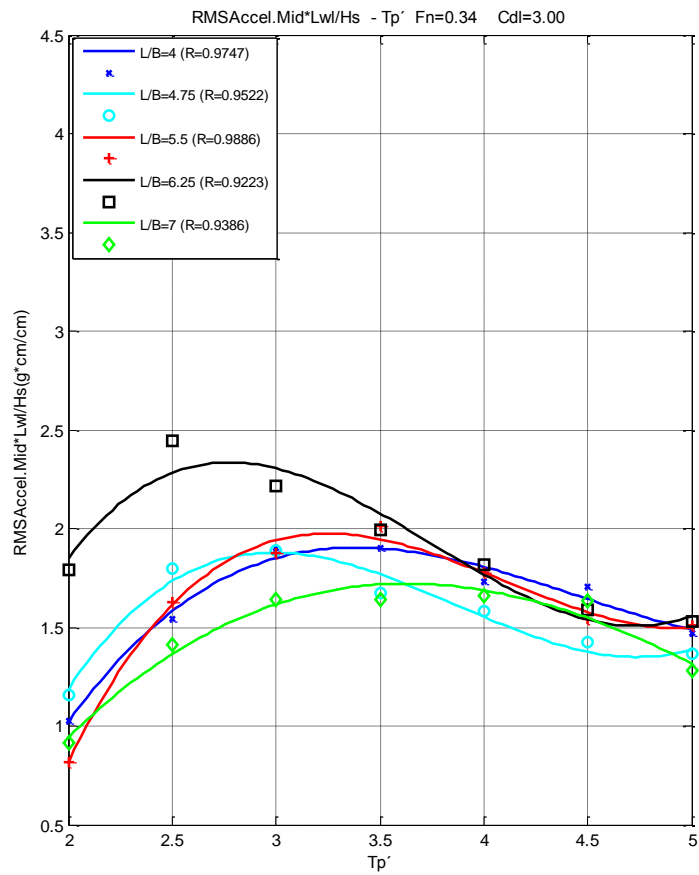
Σχήματα 7.13-7.14. Τιμές κατακόρυφης κίνησης



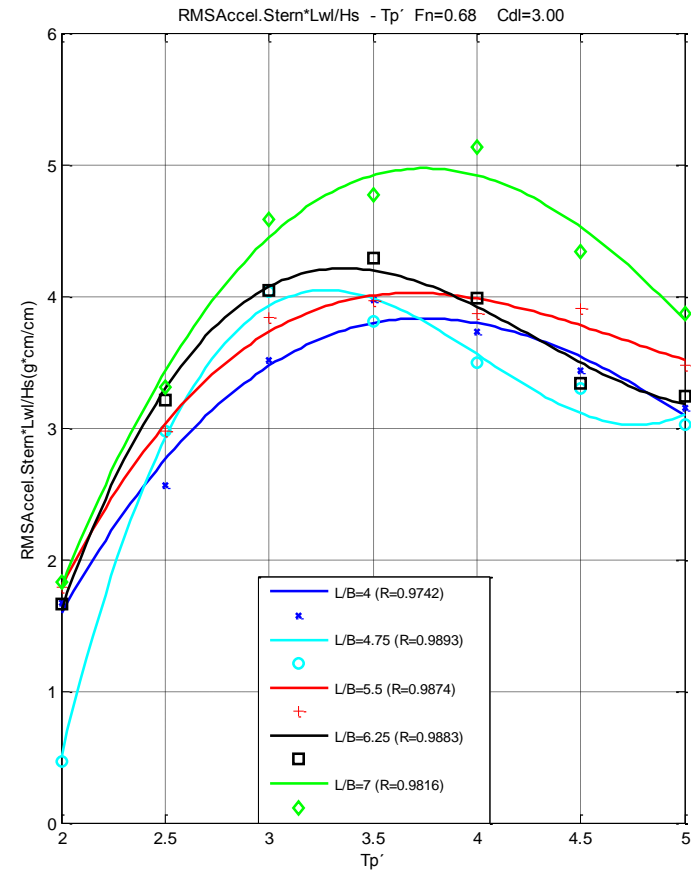
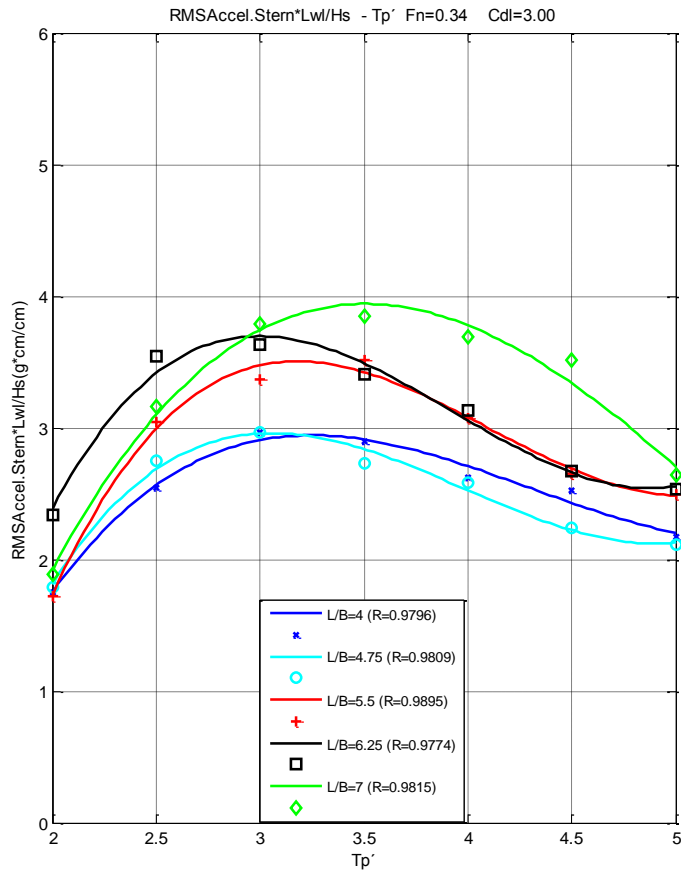
Σχήματα 7.15-7.16. Τιμές προνευτασμού



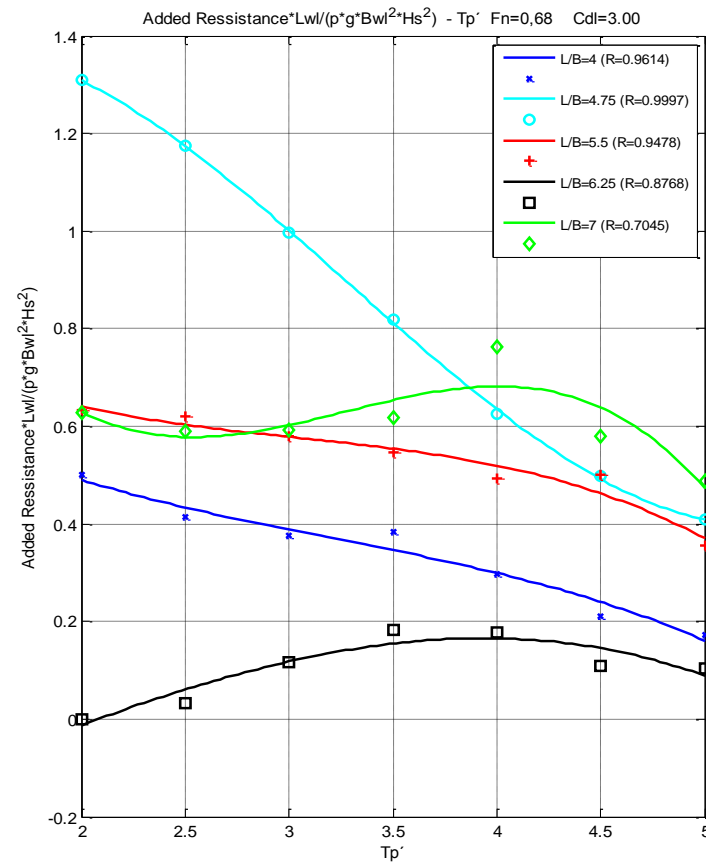
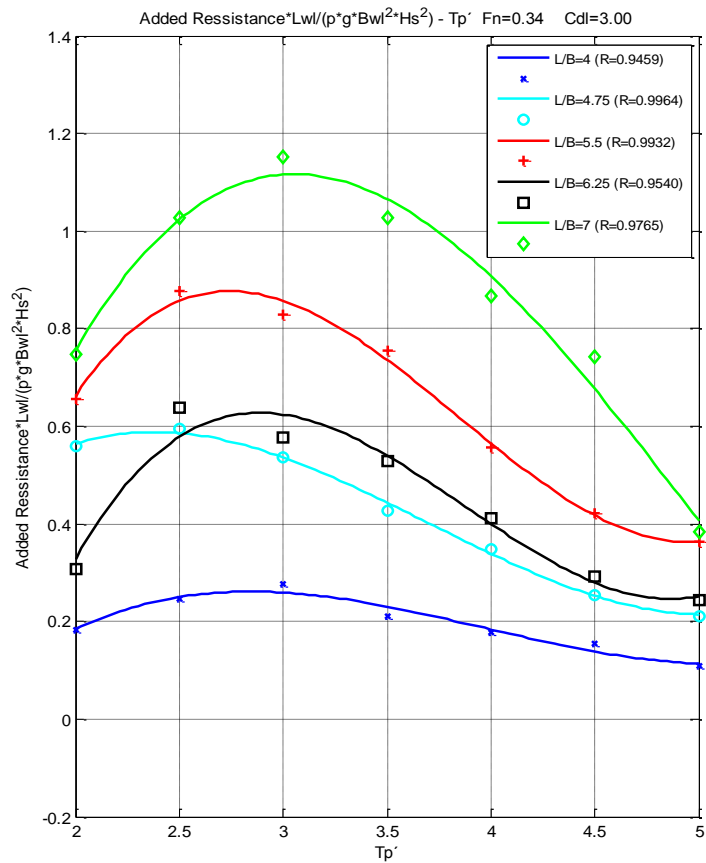
Σχήματα 7.17-7.18. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Σχήματα 7.19-7.20. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους



Σχήματα 7.21-7.22. Τιμές κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη



Σχήματα 7.23-7.24. Τιμές πρόσθετης αντίστασης

Παρατηρήσεις

- Το R αποτελεί δείκτη καλής προσέγγισης των πειραματικών αποτελεσμάτων από την καμπύλη. Στο fitting 2ου βαθμού από τις 60 καμπύλες στο σύνολο, προσέγγιση μικρότερη από 90% ($R < 0.9$), παρουσιάζουν 17 καμπύλες. Στο fitting 3ου βαθμού ο αριθμός των καμπυλών με $R < 0.9$, μειώνεται στις 2.
- Για την κίνηση **Heave**, παρατηρείται ότι στην μεγάλη ταχύτητα αυξάνει με ταχύτερο ρυθμό και έχει συνολικά μεγαλύτερες τιμές. Στην μικρή ταχύτητα, καλύτερη συμπεριφορά για μικρές αδιάστατες περιόδους ($2 < Tr' < 3.5$) έχει το μεγαλύτερο μοντέλο ($L/B=7$), ενώ για μεγαλύτερες περιόδους το μοντέλο $L/B=6.25$ έχει καλύτερες τιμές. Στην μεγάλη ταχύτητα, σε όλες τις αδιάστατες περιόδους κύματος, τα μικρότερα μοντέλα $L/B=4$ και $L/B=5.5$ παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά.
- Στην κίνηση **Pitch**, παρατηρούμε ότι στην μεγάλη ταχύτητα έχουμε μικρότερες τιμές. Επίσης, η μέγιστη τιμή (peak) για την μικρή ταχύτητα φαίνεται να παρουσιάζεται για $Tr'=3.5-4$, ενώ στην μεγάλη ταχύτητα παρουσιάζεται σε μεγαλύτερα κύματα $Tr'=4-4.5$. Καλύτερη συμπεριφορά και στις δύο ταχύτητες παρουσιάζει το μοντέλο $L/B=4$.
- Η κατακόρυφη επιτάχυνση στην **πλώρη** έχει μεγαλύτερες τιμές για την $F_n=0.68$, και μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης στην ίδια ταχύτητα. Το peak για την μικρή ταχύτητα παρουσιάζεται για την $Tr'=3.5$, ενώ για την μεγάλη ταχύτητα εμφανίζεται για $Tr'=3.5-4$. Το μοντέλο $L/B=4$ δείχνει την καλύτερη συμπεριφορά και στις δύο ταχύτητες.
- Στο **κέντρο βάρους**, η κατακόρυφη επιτάχυνση παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για $F_n=0.68$, και μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης. Το peak στην μικρή ταχύτητα εμφανίζεται για $Tr'=3-3.5$ και στην μεγάλη ταχύτητα για $F_n=3.5-4$. Επίσης, στην μικρή ταχύτητα, καλύτερη

συμπεριφορά παρουσιάζουν τα μοντέλα $L/B=7$ για $Tr' < 3.5$ και $L/B=4.75$ για $Tr' > 3.5$. Στην μεγάλη ταχύτητα, τα μοντέλα με την καλύτερη συμπεριφορά είναι το $L/B=4$ για $Tr' < 4$, και $L/B=4.75$ για $Tr' > 4$.

- Στην **πρύμνη**, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η επιτάχυνση παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές και ρυθμό αύξησης στην μεγάλη ταχύτητα. Το peak εμφανίζεται στο $Tr'=3-3.5$ για $Fn=0.34$ και στο $Tr'=3.5-4$ για $Fn=0.68$. Καλύτερη συμπεριφορά για $Fn=0.34$ παρουσιάζουν τα μοντέλα $L/B=4$ για $Tr' < 3$ και $L/B=4.75$ για $Tr' > 3$, ενώ για $Fn=0.68$, τα ίδια μοντέλα για τις περιοχές $Tr' < 3.5$ ($L/B=4$) και $Tr' > 3.5$ ($L/B=4.75$).
- Από τα διαγράμματα για την **πρόσθετη αντίσταση**, γίνεται αντιληπτό ότι στην μικρή ταχύτητα, υπάρχει peak κοντά στην περιοχή με αδιάστατες περιόδους $Tr'=3-3.5$ για τέσσερα από τα πέντε μοντέλα. Το μοντέλο με την μικρότερη αδιάστατη τιμή πρόσθετης αντίστασης είναι το $L/B=4$, ενώ στην μεγάλη ταχύτητα το $L/B=6.25$. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί η ευαισθησία της πρόσθετης αντίστασης στο πλάτος κυματισμού, καθώς είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους, ενώ οι δυναμικές αποκρίσεις ανάλογες του πλάτους κυματισμού.

- ✚ “Υδροδυναμική σχεδίαση μικρών σκαφών”, Θ.Α.Λουκάκης-Γ.Ι.Γρηγορόπουλος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1996
- ✚ “Εφαρμογές της δυναμικής συμπεριφοράς πλοίων σε κυματισμούς στη σχεδίαση και τη λειτουργία τους”, Θ.Α.Λουκάκης-Γ.Ι.Γρηγορόπουλος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2000
- ✚ “Μετρήσεις φυσικών μεγεθών με έμφαση στο θαλάσσιο περιβάλλον”, Γ.Ι.Γρηγορόπουλος, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2003
- ✚ “Εισαγωγή στην ναυπηγική και θαλάσσια τεχνολογία”, Γ.Ζαραφονίτης, Αθήνα 2005
- ✚ “Βασική θεωρία πλοίου”, τόμοι 1-2, Κ.Ι.Ράωσον-Ε.Σ.Τυππερ, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004
- ✚ “Δυναμική πλοίου”, Γ.Α.Αθανασούλης-Κ.Α.Μπελιμπασάκης, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2012
- ✚ “SWAN 2002 User Manual”, ,Boston Marine Consulting, MIT, Boston 2002
- ✚ “Αναλυτική και πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοου σκάφους σε κυματισμούς”, διπλωματική εργασία Θ.Περδικάρη, Αθήνα 2006
- ✚ “Υπολογισμοί δυναμικής συμπεριφοράς πλοίων σε κυματισμούς με μη-γραμμικό κώδικα”, διπλωματική εργασία Χ.Κατσίκη, Αθήνα 2009

- ✚ “Συγκριτική μελέτη δυναμικών αποκρίσεων σε κυματισμούς”, διπλωματική εργασία Θ.Πούλιου, Αθήνα 2008
- ✚ “Seakeeping Behavior of double-chine hull forms with variable L/B ratio in random waves”, G.J.Grigoropoulos and D.E.Liarokapis, FAST 2013
- ✚ “Dynamic Performance of the NTUA Double-Chine Series Hull Forms in Random Waves”, Gregory J. Grigoropoulos and Dimitra P. Damala, USA, FAST 2011
- ✚ “Resistance and Seakeeping Characteristics of a Systematic Series in the Pre-planing Condition (Part I)”, G.J. Grigoropoulos* and T. A. Loukakis
- ✚ “Dynamic Performance of the NTUA Double-Chine Series Hull Forms in Regular Waves”, Gregory J. Grigoropoulos -Dimitra P. Damala-Theodore A. Loukakis, The second Chesapeake power boat symposium, Annapolis, Maryland, March 2010
- ✚ “Resistance characteristics of semi-displacement mega yacht hull forms”, D.LBlount –J.A.McGrath, Vol 151, Part B2, Intl J Small Craft Tech, Jul-Dec 2009
- ✚ “Chapter 4: Computation of wave ship interactions”, P.D.Sclavounos, Department of Ocean Engineering, MIT 1996
- ✚ “E.E.L Wave Spectrum Synthesizer”, technical paper, Experimental and Electronic Laboratories, British Hovercraft Corporation Limited.
- ✚ “ITTC:Recommended Procedures and Guidelines. Testing and Extrapolation Methods, Loads and responses,Seakeeping, Seakeeping experiments”,2005

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Παρακάτω φαίνεται ένας εκ των κωδικών σε MATLAB που αναπτύχθηκαν για τις ανάγκες του κοινού πλοταρίσματος στο κεφάλαιο 7.

Ο παρακάτω κώδικας πλόταρε σε κοινό διάγραμμα τις .rms τιμές της κίνησης Heave για όλα τα σκάφη της Σειράς Ε.Μ.Π στην μέση κατάσταση φόρτωσης και για τις δύο ταχύτητες, με καμπύλη προσέγγισης 2ου βαθμού:

```
data1=load('Heave-Pitch.LB=4.dat');  
data2=load('Heave-Pitch.LB=5.5.dat');  
data3=load('Heave-Pitch.LB=7.dat');  
data4=load('Heave-Pitch.LB=4.75.txt');  
data5=load('Heave-Pitch.LB=6.25.dat');
```

```
X1=data1(:,1);  
Y1=data1(:,2);  
W1=data1(:,4);  
X2=data2(:,1);  
Y2=data2(:,2);  
W2=data2(:,4);  
X3=data3(:,1);  
Y3=data3(:,2);  
W3=data3(:,4);  
X4=data4(:,1);  
Y4=data4(:,2);  
W4=data4(:,4);  
X5=data5(:,1);  
Y5=data5(:,2);  
W5=data5(:,4);
```

```
t=linspace(2,5);  
p10=polyfit(X1,Y1,2);  
p11=polyfit(X1,W1,2);  
p20=polyfit(X2,Y2,2);  
p21=polyfit(X2,W2,2);  
p30=polyfit(X3,Y3,2);  
p31=polyfit(X3,W3,2);  
p40=polyfit(X4,Y4,2);  
p41=polyfit(X4,W4,2);  
p50=polyfit(X5,Y5,2);  
p51=polyfit(X5,W5,2);
```

```
P10 = polyval(p10,t);  
P11 = polyval(p11,t);  
P20 = polyval(p20,t);  
P21 = polyval(p21,t);  
P30 = polyval(p30,t);  
P31 = polyval(p31,t);  
P40 = polyval(p40,t);  
P41 = polyval(p41,t);  
P50 = polyval(p50,t);  
P51 = polyval(p51,t);
```

```
subplot(1,2,1)  
plot(t,P10,'b',X1,Y1,'bx')  
hold on  
plot(t,P40,'c',X4,Y4,'co')
```

```

plot(t,P20,'r',X2,Y2,'r+')
plot(t,P50,'k',X5,Y5,'ks')
plot(t,P30,'g',X3,Y3,'gd')
legend('L/B=4',"','L/B=4.75',"','L/B=5.5',"','L/B=6.25',"','L/B=7',"')
xlabel('Tp')
ylabel('RMS Heave/Hs(cm/cm)')
title('RMS Heave/Hs - Tp' Fn=0.34 Cdl=3.00')

```

```

subplot(1,2,2)
plot(t,P11,'b',X1,W1,'bx')
hold on
plot(t,P41,'c',X4,W4,'co')
plot(t,P21,'r',X2,W2,'r+')
plot(t,P51,'k',X5,W5,'ks')
plot(t,P31,'g',X3,W3,'gd')
legend('L/B=4',"','L/B=4.75',"','L/B=5.5',"','L/B=6.25',"','L/B=7',"')
xlabel('Tp')
ylabel('RMS Heave/Hs(cm/cm)')
title('RMS Heave/Hs - Tp' Fn=0,68 Cdl=3.00')

```

```

L1 = polyval(p10,X1);
L2 = polyval(p11,X1);
L3 = polyval(p20,X2);
L4 = polyval(p21,X2);
L5 = polyval(p30,X3);
L6 = polyval(p31,X3);
L7 = polyval(p40,X4);
L8 = polyval(p41,X4);

```


L9 = polyval(p50,X5);

L10 = polyval(p51,X5);

resid1=Y1-L1;

resid2=W1-L2;

resid3=Y2-L3;

resid4=W2-L4;

resid5=Y3-L5;

resid6=W3-L6;

resid7=Y4-L7;

resid8=W4-L8;

resid9=Y5-L9;

resid10=W5-L10;

SSresid1=sum(resid1.^2);

SSresid2=sum(resid2.^2);

SSresid3=sum(resid3.^2);

SSresid4=sum(resid4.^2);

SSresid5=sum(resid5.^2);

SSresid6=sum(resid6.^2);

SSresid7=sum(resid7.^2);

SSresid8=sum(resid8.^2);

SSresid9=sum(resid9.^2);

SSresid10=sum(resid10.^2);

SStotal1=(length(Y1)-1)*var(Y1);

SStotal2=(length(W1)-1)*var(W1);

SStotal3=(length(Y2)-1)*var(Y2);

$SS_{total4} = (\text{length}(W2) - 1) * \text{var}(W2);$
 $SS_{total5} = (\text{length}(Y3) - 1) * \text{var}(Y3);$
 $SS_{total6} = (\text{length}(W3) - 1) * \text{var}(W3);$
 $SS_{total7} = (\text{length}(Y4) - 1) * \text{var}(Y4);$
 $SS_{total8} = (\text{length}(W4) - 1) * \text{var}(W4);$
 $SS_{total9} = (\text{length}(Y5) - 1) * \text{var}(Y5);$
 $SS_{total10} = (\text{length}(W5) - 1) * \text{var}(W5);$

$rsq1 = 1 - SS_{resid1} / SS_{total1}$

$rsq1 =$

0.9967

$rsq2 = 1 - SS_{resid2} / SS_{total2}$

$rsq2 =$

0.9879

$rsq3 = 1 - SS_{resid3} / SS_{total3}$

$rsq3 =$

0.9896

$rsq4 = 1 - SS_{resid4} / SS_{total4}$

rsq4 =

0.9947

rsq5=1-SSresid5/SStotal5

rsq5 =

0.9911

rsq6=1-SSresid6/SStotal6

rsq6 =

0.9735

rsq7=1-SSresid7/SStotal7

rsq7 =

0.9888

rsq8=1-SSresid8/SStotal8

rsq8 =

0.9904

$$rsq9=1-SSresid9/SStotal9$$

$$rsq9 =$$

$$0.9935$$

$$rsq10=1-SSresid10/SStotal10$$

$$rsq10 =$$

$$0.9867$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Πίνακας ΙΙ.1. Αρχείο ".out" για το μοντέλο $L/B=6.25$, $Fn=0.34$. Steady condition.

```

*****
*
*                               SWAN2 2002  SOLVE                               *
*
*                               Copyright (c) 2002                               *
*                               Massachusetts Institute of Technology               *
*                               Boston Marine Consulting Inc.                     *
*
*****

-----
                        GRID INFORMATION
Name      :      lb625 CDL=3.00 Tp'=3.00 Fn=0.3
-----
Sheet#    NP1      NP2      NP      KP      MP
   1       18       74     1332      3       0
   2        4       38     152       3       0
   3       26        8     208       2       1
   4        8        8      64       1       0
-----

                        PRINCIPAL HYDROSTATIC PARTICULARS
density (kg/m^3)= 998.500 gravity (m/s^2)= 9.800
-----
waterline Length      (m) : 2.452E+0
waterline Beam        (m) : 3.724E-1
Maximum Draft         (m) : 1.049E-1
Displacement          (m^3) : 4.728E-2
Wetted Surface Area   (m^2) : 9.139E-1
LCB (from origin)    (m) : -5.024E-1
TCB (from origin)    (m) : 0.000E+0
VCB (from origin)    (m) : -3.711E-2
-----
waterplane Area       (m^2) : 7.185E-1
LCF (from origin)    (m) : -4.354E-1
Metacentric height    (m) : 1.120E-1
-----
Mass                  (kg) : 4.507E+1
Mass/density          (m^3) : 4.513E-2
LCG (from origin)    (m) : -4.980E-1
TCG (from origin)    (m) : 0.000E+0
VCG (from origin)    (m) : 0.000E+0
Radii of Gyration     (m) : 1.250E-1 (roll)
                    (m) : 6.158E-1 (pitch)
                    (m) : 6.158E-1 (yaw)
-----

                        STEADY FORCE AND RESPONSE
-----
Ship speed            (m/s) : 1.671E+0
Ship speed            (knots) : 3.245E+0
Wetted Surface Area   (m^2) : 9.139E-1
Rw                   (kN) : 1.081E-2
Cw                   : 8.484E-3
Sinkage              (m) : -5.458E-3
Trim at CG           (deg) : -8.107E-2
-----

```

Πίνακας II.2. Αρχείο “.out” για το μοντέλο L/B=6.25, Fn=0.68. Steady condition.

```

*****
*
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*                               *
*****

-----
                                GRID INFORMATION
Name       :    lb625 CDL=3.00 Tp'=3.00 Fn=0.6
-----
Sheet#    NP1     NP2     NP     KP     MP
   1       18     74    1332     3     0
   2        4     38     152     3     0
   3       26     8     208     2     1
   4        8     8      64     1     0
-----

PRINCIPAL HYDROSTATIC PARTICULARS
density (kg/m^3)= 998.500 gravity (m/s^2)= 9.800
-----
Waterline Length      (m) : 2.431E+0
Waterline Beam        (m) : 3.742E-1
Maximum Draft         (m) : 1.070E-1
Displacement          (m^3) : 4.847E-2
Wetted Surface Area   (m^2) : 9.038E-1
LCB (from origin)    (m) : -5.720E-1
TCB (from origin)    (m) : 0.000E+0
VCB (from origin)    (m) : -3.905E-2
-----
Waterplane Area       (m^2) : 7.059E-1
LCF (from origin)    (m) : -4.554E-1
Metacentric height    (m) : 1.069E-1
-----
Mass                  (kg) : 4.507E+1
Mass/density          (m^3) : 4.513E-2
LCG (from origin)    (m) : -4.980E-1
TCG (from origin)    (m) : 0.000E+0
VCG (from origin)    (m) : 0.000E+0
Radii of Gyration     (m) : 1.250E-1 (roll)
    (about CG)        (m) : 6.158E-1 (pitch)
    (about CG)        (m) : 6.158E-1 (yaw)
-----

STEADY FORCE AND RESPONSE
-----
Ship speed            (m/s) : 3.342E+0
Ship speed            (knots) : 6.489E+0
Wetted Surface Area   (m^2) : 9.038E-1
Rw                    (kN) : 1.798E-2
Cw                    : 3.567E-3
Sinkage               (m) : 1.203E-3
Trim at CG            (deg) : -8.457E-1
-----

```

Πίνακας II.3. Αρχείο ".out" για το μοντέλο $L/B=4.75$, $Fn=0.34$. Steady condition.

```

*****
*
*                      SWAN2 2002  SOLVE
*
*
*                      Copyright (c) 2002
*                      Massachusetts Institute of Technology
*                      Boston Marine Consulting Inc.
*
*****

-----
                          GRID INFORMATION
Name      :    1b475 CDL=3.00 Tp'=3.00 Fn=0.3
-----

Sheet#   NP1     NP2     NP     KP     MP
   1     18      74    1332     3      0
   2      5      38     190     3      0
   3     26      8      208     2      1
   4      8       8      64      1      0
-----

PRINCIPAL HYDROSTATIC PARTICULARS
density (kg/m^3)= 998.500 gravity (m/s^2)= 9.800
-----
waterline Length      (m) : 2.104E+0
waterline Beam        (m) : 4.176E-1
Maximum Draft         (m) : 8.308E-2
Displacement           (m^3) : 3.042E-2
Wetted Surface Area   (m^2) : 7.475E-1
LCB (from origin)     (m) : -3.062E-1
TCB (from origin)     (m) : 0.000E+0
VCB (from origin)     (m) : -2.754E-2
-----
waterplane Area       (m^2) : 6.518E-1
LCF (from origin)     (m) : -2.572E-1
Metacentric height    (m) : 2.301E-1
-----
Mass                   (kg) : 2.875E+1
Mass/density           (m^3) : 2.879E-2
LCG (from origin)     (m) : -3.000E-1
TCG (from origin)     (m) : 0.000E+0
VCG (from origin)     (m) : 0.000E+0
Radii of Gyration     (m) : 1.447E-1 (roll)
  (about CG)          (m) : 5.336E-1 (pitch)
  (about CG)          (m) : 5.336E-1 (yaw)
-----

STeadY FORCE AND RESPONSE
-----
ship speed             (m/s) : 1.556E+0
ship speed             (knots) : 3.021E+0
Wetted Surface Area   (m^2) : 7.475E-1
Rw                    (kN) : 6.693E-3
Cw                    : 7.408E-3
Sinkage                (m) : -2.344E-3
Trim at CG            (deg) : -3.788E-1
-----

```

Πίνακας II.4. Αρχείο ".out" για το μοντέλο L/B=4.75, Fn=0.68. Steady condition.

```
*****
*
*                               SWAN2 2002  SOLVE                               *
*
*                               Copyright (c) 2002                             *
*                               Massachusetts Institute of Technology               *
*                               Boston Marine Consulting Inc.                     *
*
*****

-----
                      GRID INFORMATION
Name      : 1b475 CDL=3.00 Tp'=3.00 Fn=0.3
-----
Sheet#   NP1   NP2   NP   KP   MP
   1     18   74  1332  3    0
   2      5   38   190  3    0
   3     26   8    208  2    1
   4      8   8     64  1    0
-----

PRINCIPAL HYDROSTATIC PARTICULARS
density (kg/m^3)= 998.500 gravity (m/s^2)= 9.800
-----
waterline Length      (m) : 2.085E+0
waterline Beam        (m) : 4.196E-1
Maximum Draft         (m) : 8.572E-2
Displacement          (m^3) : 3.206E-2
Wetted Surface Area  (m^2) : 7.425E-1
LCB (from origin)    (m) : -3.637E-1
TCB (from origin)    (m) : 0.000E+0
VCB (from origin)    (m) : -2.941E-2
-----
Waterplane Area       (m^2) : 6.435E-1
LCF (from origin)    (m) : -2.722E-1
Metacentric height    (m) : 2.262E-1
-----
Mass                  (kg) : 2.875E+1
Mass/density          (m^3) : 2.879E-2
LCG (from origin)    (m) : -3.000E-1
TCG (from origin)    (m) : 0.000E+0
VCG (from origin)    (m) : 0.000E+0
Radii of Gyration    (m) : 1.447E-1 (roll)
                    (m) : 5.336E-1 (pitch)
                    (m) : 5.336E-1 (yaw)
-----

STEADY FORCE AND RESPONSE
-----
Ship Speed            (m/s) : 3.112E+0
Ship Speed            (knots) : 6.043E+0
Wetted Surface Area  (m^2) : 7.425E-1
Rw                   (kN) : 1.154E-2
Cw                   : 3.214E-3
Sinkage              (m) : 1.900E-3
Trim at CG           (deg) : -1.047E+0
-----
```