



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΤΑΧΥΠΛΩΩΝ ΣΚΑΦΩΝ ΔΙΠΛΗΣ ΑΚΜΗΣ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ**



Αθήνα 2007

Γεώργιος Ρούσος
Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός

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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ ΣΚΑΦΩΝ ΔΙΠΛΗΣ ΑΚΜΗΣ ΣΕ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ***

Επιβλέπων Καθηγητής: ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ Ι. ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2007

Γεώργιος Ρούσσοσ
Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° Εισαγωγή	
1.1 Γενικά	3
1.2 Είδη κινήσεων	4
1.3 Ονοματολογία	5
1.4 Σχέσεις αναλογίας	6
1.5 Αρμονικοί κυματισμοί	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° Κύματα ανέμου και στοιχεία θεωρίας στοχαστικών διαδικασιών	
2.1 Γενικά	8
2.2 Τα φάσματα των κυμάτων ανέμου	9
2.3 Το φάσμα Pierson-Moskowitz ή Bretschneider σε διπαραμετρική μορφή	12
2.4 Θεωρία λωρίδων	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° Επίδραση της ταχύτητας στη δυναμική συμπεριφορά ενός ταχύπλου σκάφους	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° Παράμετροι Σχεδίασης ταχύπλων σκαφών που επιδρούν στη δυναμική τους συμπεριφορά	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° Δυναμική συμπεριφορά και λειτουργία πλοίου	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° Αξιολόγηση δυναμικής συμπεριφοράς πλοίου σε κυματισμούς	
6.1 Μεθοδολογίες αξιολόγησης	20
6.2 Κριτήρια δυναμικής συμπεριφοράς γενικής εφαρμογής	21
6.3 Κριτήρια δυναμικών αποκρίσεων	23
6.4 Κριτήρια απόδοσης προσωπικού-άνεσης επιβατών-ναυτίας	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7° Συστηματική Σειρά Ταχύπλων Ε.Μ.Π. – Πρότυπα Δοκιμών	
7.1 Γενικά	25
7.2 Συστηματική σειρά NTUA	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8° Πειραματική Μεθοδολογία	
8.1 Αντικείμενο Πειραματικών Δοκιμών	32
8.2 Στάδια πειραματικής διαδικασίας	34
8.2.1 Προετοιμασία Προτύπου	34
8.2.2 Αποφόρτιση	37
8.2.3 Βαθμονόμηση οργάνων μέτρησης	38
8.2.4 Τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων	39
8.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9° Αποτελέσματα σε τυχαίους κυματισμούς	
9.1 Γενικά	41
9.2 Διαγράμματα αποτελεσμάτων πειραμάτων σε τυχαίους κυματισμούς	42
9.3 Η επίδραση της ταχύτητας	99
9.4 Η επίδραση του εκτοπίσματος	107
9.5 Η επίδραση του λόγου μήκος προς πλάτος	115
9.6 Η επίδραση της αύξησης του ύψους κύματος σε σταθερή περίοδο κορυφής κύματος	128
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	138
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου σε θαλάσσιους κυματισμούς κατά τη σχεδίασή του, κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να καθοριστούν ή/και να βελτιωθούν τα όρια λειτουργίας του, σχετικά με την αντοχή της κατασκευής του, την ασφάλεια πλεύσεως, τη διατήρηση της υπηρεσιακής ταχύτητας, την άνεση των επιβαινόντων, τη σωστή λειτουργία μηχανημάτων ή οργάνων με τα οποία είναι εξοπλισμένο κ.ά.

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς του πλοίου σε κυματισμούς γίνεται αναλυτικά με τη χρήση προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή ή με πειράματα σε πρότυπο σε δεξαμενή δοκιμών. Τόσο οι αναλυτικοί υπολογισμοί όσο και τα πειράματα πραγματοποιούνται σε αρμονικούς και τυχαίους κυματισμούς.

Τα πειράματα δυναμικής συμπεριφοράς σε αρμονικούς κυματισμούς έχουν σκοπό να προσδιορίσουν τους αδιάστατους συντελεστές απόκρισης του προτύπου (Response Amplitude Operators, RAO) για τα διάφορα μεγέθη που ενδιαφέρει να υπολογιστούν. Οι αδιάστατοι συντελεστές απόκρισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με το φάσμα της διέγερσης εφαρμόζοντας την αρχή της υπέρθεσης για να προσδιοριστεί η φασματική κατανομή της απόκρισης απ'όπου με στατιστικές διαδικασίες μπορούν να υπολογιστούν μέγιστες πιθανές τιμές, τιμές R.M.S., μέσες τιμές, γεγονότα κ.ά.

Τα πειράματα δυναμικής συμπεριφοράς σε τυχαίους κυματισμούς πραγματοποιούνται για την αποτίμηση της συμπεριφοράς του πλοίου σε συγκεκριμένες καταστάσεις θάλασσας, με γνωστό φάσμα ενέργειας που δημιουργείται στη δεξαμενή με τη βοήθεια ειδικού προγραμματιζόμενου οργάνου που ελέγχει τον κυματιστήρα.

Οι δοκιμές σε αρμονικούς και σε τυχαίους κυματισμούς γίνονται συνήθως στις ταχύτητες που ενδιαφέρουν το σχεδιαστή και στην κατάσταση λειτουργίας του πλοίου. Το πρότυπο ερματίζεται κατάλληλα έτσι ώστε να ικανοποιείται η ίσαλος γραμμή ενώ η κατανομή των βαρών είναι τέτοια ώστε η ακτίνα αδρανείας κατά τον εγκάρσιο άξονα να είναι η σωστή, συνήθως $R_{yy} = 0.25L_{WL}$. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δυναμικής συμπεριφοράς καταγράφονται τα μεγέθη της κατακόρυφης κίνησης, της πρόνευσης, της πρόσθετης αντίστασης και της κατακόρυφης επιτάχυνσης σε τρία σημεία, πρωραία και πρυμναία κάθετος και στη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους.

1.2 Είδη κινήσεων

Η δυναμική συμπεριφορά των ταχύπλων σκαφών σε κυματισμούς αποτελεί ένα αρκετά σύνθετο και πολύπλοκο φαινόμενο και αυτό διότι το σκάφος έχει έξι βαθμούς ελευθερίας κινήσεων με αποτέλεσμα οι διεγείρουσες δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό λόγω των κυματισμών να το εξαναγκάζουν σε πολλά είδη κινήσεων ταυτοχρόνως. Οι βαθμοί ελευθερίας $\xi_i = \xi_i(t)$, $i=1 \dots 6$, παρουσιάζονται παρακάτω με τη ναυπηγική τους ονοματολογία τόσο στα ελληνικά όσο και στα αγγλικά:

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

Οι κινήσεις που εξετάζονται κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς για την αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός σκάφους είναι το Pitch και το Heave. Αυτό συμβαίνει, διότι οι τιμές αυτών των κινήσεων επιδρούν σημαντικά τόσο στις κατακόρυφες επιταχύνσεις κατά μήκος του πλοίου όσο και σε τυχαία συμβάντα (φαινόμενα σφυρόκρουσης, μετακίνηση φορτίου, ανάδυση έλικας, έλλειψη αστάθειας, κακή πηδαλιουχία, διαβροχή καταστρώματος κ.α.) που με τη σειρά τους επηρεάζουν την άνεση των επιβατών.

1.3 Ονοματολογία

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 βυθισμα [m]

ρ : πυκνότητα του νερού [kg/m^3]

g : 9.81 m/sec^2 , επιτάχυνση της βαρύτητας

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

ω_p : κυκλική συχνότητα κορυφής του φάσματος [rad/sec]

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

f : συχνότητα κύματος [Hz]

ζ_0 : πλάτος ανύψωσης κυματισμού

λ : μήκος κύματος [m]

$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$ κυματικός αριθμός

$$\omega^2 = g \cdot k, \text{ εξίσωση διασποράς}$$

$$T_p = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_p}, \text{ περίοδος κορυφής κύματος [sec]}$$

$$T_p' = \frac{T_p}{\sqrt{\frac{L_{BP}}{g}}}, \text{ αδιάστατη περίοδος}$$

$(m_0)^{1/2}$: η μέση τετραγωνική τιμή ή rms (root mean square)

RAO: συντελεστής απόκρισης (Response Amplitude Operator)

$$S(\omega)_{\text{response}} = RAO^2 \cdot S(\omega)_{\text{seastate}} \text{ αρχή γραμμικής υπέρθεσης}$$

1.4 Σχέσεις αναλογίας

Ακολουθεί πίνακας με τις σχέσεις αναλογίας των μεγεθών σε πραγματική κλίμακα (full scale: δείκτης s) και κλίμακα μοντέλου (model scale: δείκτης m). Οι σχέσεις αυτές ισχύουν τόσο για αρμονικούς, όσο και για τυχαίους κυματισμούς.

Scale	$\lambda = \frac{L_s}{L_m}$
-------	-----------------------------

Froude Number	$\frac{V_s}{\sqrt{g \cdot L_s}} = \frac{V_m}{\sqrt{g \cdot L_m}}$
---------------	---

Ταχύτητα	$\frac{V_s}{V_m} = \sqrt{\lambda}$
----------	------------------------------------

Επιταχύνσεις	$Acc_s = Acc_m$
--------------	-----------------

Πρόσθετη Αντίσταση	$R_{AWs} / R_{AWm} = \lambda^3 \cdot 1.025$
--------------------	---

Εκτόπισμα	$\Delta_s / \Delta_m = \lambda^3 \cdot 1.025$
-----------	---

Χρόνος	$T_s / T_m = \sqrt{\lambda}$
--------	------------------------------

Συχνότητα	$f_s / f_m = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$
-----------	--

1.5 Αρμονικοί κυματισμοί

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

όπου,

- ξ_o : πλάτος κατακόρυφης απόκρισης
- ζ_o : πλάτος ανύψωσης κυματισμού
- λ : μήκος κύματος
- θ : πλάτος δυναμικής διαγωγής
- α : πλάτος των επιταχύνσεων
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας

2. Κύματα ανέμου και στοιχεία θεωρίας στοχαστικών διαδικασιών

2.1 Γενικά

Ο άνεμος κατά το χρονικό διάστημα που φυσάει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας ή γενικότερα πάνω από κάθε υδάτινη επιφάνεια μεταφέρει στο νερό ένα μέρος από την ενέργειά του. Η μεταφορά αυτή ενέργειας γίνεται μέσω συνεκτικών δυνάμεων και δυνάμεων κάθετης πίεσης στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο ρευστών και έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία επιφανειακών κυματισμών στο νερό. Σε αντίθεση προς την εύκολη περιγραφή της επιφάνειας ενός απλού κύματος βαρύτητας, η μορφή της επιφάνειας των κυμάτων ανέμου δεν παρουσιάζει καμία κανονικότητα, αλλά μεταβάλλεται συνεχώς τοπικά και χρονικά, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να περιγράψουμε με τις συνηθισμένες αναλυτικές και προσδιοριστικές μεθόδους τα κύματα ανέμου (wind waves).

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

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

Ο μόνος γνωστός τρόπος πλήρους στατιστικής περιγραφής τέτοιων τυχαίων διεγέρσεων, είναι η θεωρία στοχαστικών διαδικασιών, που προέκυψε σαν επέκταση της θεωρίας των πιθανοτήτων και εφαρμόζεται στη μελέτη όλων των πρακτικών προβλημάτων που περιέχουν τέτοιες τυχαίες διεγέρσεις (π.χ. μεγάλων μεταλλικών κατασκευών που καταπονούνται από δυνάμεις ανέμου και πλοίων που καταπονούνται από κύματα ανέμου).

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

2.2 Τα φάσματα των κυμάτων ανέμου

Οι κυματισμοί της θάλασσας, που αποτελούν τη διέγερση της δυναμικής συμπεριφοράς των πλοίων, δημιουργούνται και συνήθως συνοδεύονται από άνεμο. Το μέγεθος των κυματισμών, η διεύθυνση μετάδοσής τους και η συνάρτηση πυκνότητας φάσματος (spectral density function or power spectrum) εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Ταχύτητα διεγείροντος ανέμου (wind speed)
- Διάρκεια πνοής του διεγείροντος ανέμου (wind duration)
- Ελεύθερη έκταση της επιφάνειας της θάλασσας πάνω στην οποία μπορούν να αναπτυχθούν οι κυματισμοί (wave fetch)

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

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

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

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

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

Για μια μεγαλύτερη εμβάθυνση στις ιδιότητες των φασμάτων και για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε διάφορα φάσματα μεταξύ τους, ορίζουμε τις ροπές m_n του φάσματος $S(\omega)$ μέσω των οποίων μπορούμε να εκφράσουμε όλα τα στατιστικά μεγέθη των κυματισμών:

Η νιοστή ροπή της $S(\omega)$ είναι:

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

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

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

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

- Διαδικασίες στενής λουρίδας

Η μορφή του φάσματος των διαδικασιών στενής λουρίδας παρουσιάζει μέγιστο σε κάποια συχνότητα ω_0 και η συνολική επιφάνεια του φάσματος, η «ενέργεια» της διαδικασίας, είναι συγκεντρωμένη κοντά σ' αυτή τη συχνότητα.

- Διαδικασίες πλατειάς λουρίδας

Η συνολική επιφάνεια του φάσματός τους εξαπλώνεται σε μια πλατειά περιοχή συχνοτήτων. Ένα μέτρο του μέσου πλάτους της $S(\omega)$ είναι ο συντελεστής πλάτους φάσματος ϵ . Οι συνηθισμένες φυσικές στοχαστικές διαδικασίες έχουν ενδιάμεσες τιμές (μεταξύ 0 και 1) του συντελεστή πλάτους φάσματος και οι θαλάσσιοι κυματισμοί καθώς και οι αποκρίσεις του πλοίου τείνουν προς διαδικασίες στενής λουρίδας.

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

πλήρως αναπτυγμένες θάλασσες (fully developed seas): Όταν ο άνεμος έχει πνεύσει σταθερός και ανεμπόδιστος για μακρύ χρονικό διάστημα, και έχουμε φτάσει σε μία κατάσταση ισορροπίας.

αναπτυσσόμενες θάλασσες (developing seas): Όταν ο άνεμος έχει πνεύσει για σχετικά μικρό χρονικό διάστημα.

αποσβενόμενες θάλασσες (decaying seas): Όταν έχει παύσει ή περιοριστεί η ταχύτητα του ανέμου, οπότε η ενέργεια των κυματισμών καταστρέφεται βαθμιαία λόγω συνεκτικών δυνάμεων.

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

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

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

Η καμπύλη της συνάρτησης πυκνότητας φάσματος ανεβαίνει απότομα, από τις μικρές τιμές της κυκλικής συχνότητας μέχρι ένα μέγιστο, που λέγεται κορυφή του φάσματος (spectral peak). Η συχνότητα ω_p που αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος λέγεται κυκλική συχνότητα κορυφής (spectral peak frequency). Μετά την κορυφή, η καμπύλη πέφτει ομαλά και καταλήγει στην ουρά (tail) του φάσματος, που έχει μικρές τιμές της $S(\omega)$ για μεγάλες τιμές της συχνότητας. Αποτελεί τώρα χαρακτηριστική ιδιότητα των θαλάσσιων κυμάτων ανέμου, ότι τα φάσματά τους στην αδιάστατη μορφή ταυτίζονται. Επομένως, αν γνωρίζουμε τα μεγέθη ω_p και $S(\omega)$ και την αδιάστατη μορφή της καμπύλης φασματικής πυκνότητας, ξέρουμε και το φάσμα κάθε κατάστασης θάλασσας (sea state).

2.3 Το φάσμα Pierson – Moskowitz ή Bretschneider σε διπαραμετρική μορφή

Η μορφή της συνάρτησης πυκνότητας φάσματος πλήρως αναπτυγμένων θαλασσών κατά Pierson-Moskowitz, δίνεται από τη σχέση:

$$S(\omega) = \frac{\alpha}{\omega^5} \exp \left\{ -\gamma \left(\frac{g}{U\omega} \right)^4 \right\}$$

όπου $\alpha = 0.0081 \cdot g^2$, $\gamma = 0.74$, U = ταχύτητα ανέμου σε οποιοδήποτε συμβιβασίμο σύστημα μονάδων.

Προφανώς, η παραπάνω οικογένεια φασμάτων είναι μονοπαραμετρική και οι καταστάσεις θάλασσας εξαρτώνται μόνο από την ταχύτητα του ανέμου. Το γεγονός αυτό προϋποθέτει ότι για μία συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου και ανεξάρτητα από τη διάρκεια πνοής και από το ελεύθερο μήκος, αντιστοιχεί μονοσήμαντα μία καθορισμένη πλήρως αναπτυγμένη θάλασσα. Η πραγματικότητα όμως είναι πιο πολύπλοκη και όπως έχει αποδείξει ο Phillips, πραγματικά πλήρως αναπτυγμένη θάλασσα δεν υπάρχει στον ωκεανό. Έτσι, 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, στη μορφή:

$$S(\omega) = \frac{\alpha}{\omega^5} \exp \{ -\beta \cdot \omega^{-4} \}$$

$$\text{όπου } \alpha = \frac{5}{16} \cdot \omega_p^4 (\overline{H}^{1/3})^2 \text{ και } \beta = \frac{5}{4} \cdot \omega_p^4$$

Επίσης, για πλήρως αναπτυγμένες θάλασσες μπορεί να βρεθεί ότι:

$$\omega_p = 0.4013 \cdot \left(\frac{g}{\overline{H}^{1/3}} \right)^{1/2}$$

Επομένως, αν γνωρίζουμε το σημαντικό ύψος κύματος για θάλασσες σε οποιοδήποτε στάδιο ανάπτυξης και την κυκλική συχνότητα κορυφής ω_p , μπορούμε να καθορίσουμε μονοσήμαντα τη συνάρτηση πυκνότητας φάσματος.

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

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

2.4 Θεωρία Λωρίδων

Η θεωρία λωρίδων (strip theory) εισήχθη στη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου από τον Korvin – Kroukonsky (Transaction SNAME 1955). Σύμφωνα με την κλασική θεωρία λωρίδων οι συνολικές, σ' ολόκληρο το πλοίο, αναπτυσσόμενες υδροδυναμικές δυνάμεις παράγονται με ολοκλήρωση κατά μήκος του πλοίου των συνολικών υδροδυναμικών δυνάμεων που αναπτύσσονται ανά λωρίδα (νομέα) του πλοίου, παραλείποντας τις αλληλεπιδράσεις της ροής μεταξύ των διαφόρων λωρίδων. Δηλαδή, ολοκληρώνουμε κατά μήκος του πλοίου υδροδυναμικά μεγέθη, που προκύπτουν από τη λύση διδιάστατων προβλημάτων. Συνέπεια της είναι φυσικά πως τα παραγόμενα εξαγόμενα είναι τόσο πιο κοντά στην πραγματικότητα, όσο ο λόγος της εγκάρσιας προς την επιμήκη διάσταση του πλοίου (B/L και T/L) και οι ρυθμοί μεταβολής των υδροδυναμικών μεγεθών κατά μήκος είναι μικρότεροι.

Η θεωρία λωρίδων αποτελεί τη βάση των περισσότερων μεθόδων για τον αναλυτικό υπολογισμό της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των συμβατικών πλοίων σε κυματισμούς και δίνει για αυτά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η θεωρία αυτή όμως πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή στα ταχύπλοα σκάφη για τους παρακάτω λόγους:

1. Στα μικρά ταχύπλοα η μορφή των νομέων μεταβάλλεται γρήγορα κατά μήκος του σκάφους, ενώ η θεωρία λωρίδων υποθέτει ότι κάθε τμήμα του σκάφους συμπεριφέρεται σαν τμήμα ενός πρίσματος απείρου μήκους.
2. Οι επιδράσεις του καθρέφτη της πρύμνης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη διόρθωση των αποτελεσμάτων της θεωρίας λωρίδων.
3. Οι μορφές Lewis προσφέρουν ικανοποιητική αναπαράσταση των νομέων γαστρών με στρογγυλό πυθμένα αλλά δεν μπορούν να καλύψουν μορφές με ακμή.
4. Η αρχή της γραμμικής υπέρθεσης εφαρμόζεται με δυσκολία, ιδιαίτερα, σε μεγάλο πλάτους κινήσεις οπότε βγαίνει η πλώρα από το νερό.
5. Κατά τον υπολογισμό των σχετικών κινήσεων ως προς το κύμα, το σκάφος θεωρείται ότι δεν επηρεάζει το κύμα και έτσι, τα αποτελέσματα είναι αναξιόπιστα πρύμνηθεν του πρωαίου 20% του μήκους του ταχύπλοου σκάφους.
6. Η δυναμική άνοση δεν λαμβάνεται υπόψη στη θεωρία λωρίδων, αλλά παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στις υψηλές ταχύτητες.

Σε κάθε περίπτωση, παρά τα παραπάνω προβλήματα, λογικά αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν με τη βοήθεια επαρκών διορθώσεων για τους τύπους των σκαφών και τις καταστάσεις θάλασσας. Οι διορθώσεις αυτές φαίνεται να επεκτείνουν τις υποθέσεις της θεωρίας λωρίδων πέραν των τεθέντων ορίων.

Οποσδήποτε, η θεωρία λωρίδων χωρίς μετατροπές, μπορεί να εφαρμοστεί με ικανοποιητική ακρίβεια στα σκάφη ημι-εκτοπίσματος που πλησιάζουν πιο πολύ τα συμβατικά. Όσον αφορά τις ολισθακάτους, η εμπειρία και η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά, συγκλίνει προς την άποψη ότι:

1. για μεν τις ταχύτητες πριν την έναρξη οποιασδήποτε ολίσθησης τα αποτελέσματα της θεωρίας λωρίδων χωρίς μετατροπές είναι ικανοποιητικά.
2. για τις μεγαλύτερες ταχύτητες, όπου υπάρχει ολίσθηση, η αριθμητική πρόβλεψη είναι πολύ συντηρητική (περίπου διπλάσια από την αντίστοιχη πειραματική).

3. Επίδραση της ταχύτητας στη δυναμική συμπεριφορά ενός ταχύπλοου σκάφους

Ο Savitsky (1966) παρουσίασε μια ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων για την υδροδυναμική συμπεριφορά ταχύπλοων σκαφών σε κυματισμούς. Ο Savitsky καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά των ολισθακάτων εμφανίζει δύο όψεις, μία για ταχύτητες με $\frac{V[kn]}{\sqrt{L[ft]}} < 2,5$ όπου τα σκάφη αυτά συμπεριφέρονται περίπου όπως

τα συμβατικά σκάφη εκτοπίσματος και μία για τις υψηλότερες ταχύτητες όπου, τόσο οι κινήσεις τους όσο και η πρόσθετη αντίσταση τους είναι περίπου ανεξάρτητες από την ταχύτητα και από το εάν οι κυματισμοί είναι μετωπικοί ή ακολουθούντες, αλλά εξαρτώνται κυρίως από το μήκος και το ύψος των κυματισμών. Οι κρουστικές επιταχύνσεις και οι επαγόμενες δυνάμεις αποτελούν σε αυτή την περίπτωση τον κρίσιμο υδροδυναμικό παράγοντα που αναγκάζει τα σκάφη αυτά να περιορίζουν την ταχύτητά τους σε κυματισμένες θάλασσες.

Η υδροδυναμική συμπεριφορά των ταχύπλοων σκαφών βασίζεται κυρίως στην κατακόρυφη κίνηση (heave), τον προνευτασμό (pitch), την πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς και τις επιταχύνσεις λόγω κρουστικών φορτίων. Παρακάτω αναλύονται οι παράγοντες αυτοί φανερώνοντας το πώς επηρεάζουν την υδροδυναμική συμπεριφορά ενός σκάφους ανάλογα με την αύξομείωση της ταχύτητας.

Κατακόρυφη Κίνηση (Heave) και Προνευτασμός (Pitch): Οι κινήσεις αυτές παίρνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους στις ταχύτητες όπου οι ολισθακάτοι συμπεριφέρονται σαν γάστρες εκτοπίσματος και η περίοδος συνάντησης του κύματος συμπίπτει με τη φυσική περίοδο σε κατακόρυφη κίνηση και/ή προνευτασμό, οπότε το σκάφος τείνει να ακολουθήσει το περίγραμμα του κύματος. Αντιθέτως, στις ταχύτητες ολίσθησης, όταν το σκάφος κινείται πάνω στις κορυφές του κύματος, οι κινήσεις είναι κατά προσέγγιση σταθερές με την ταχύτητα και, κατά το μάλλον ή ήττον, οι μισές σε μέγεθος από τις αντίστοιχες όταν το σκάφος πλέει σε ταχύτητες όπου κυριαρχεί το εκτόπισμα. Σ' αυτή την περίπτωση, οι κινήσεις φαίνεται ότι γίνονται μέγιστες όταν τα μήκη κύματος είναι διπλάσια ή τριπλάσια του μήκους του σκάφους, ενώ είναι σημαντικά μειωμένες για μήκη κύματος μικρότερα από το μισό του μήκους του σκάφους. Σε κάθε περίπτωση βέβαια θα πρέπει να αποφεύγεται το φαινόμενο του συντονισμού.

Διατοιχισμός (Roll): Η κίνηση αυτή παίρνει μεγάλες τιμές σε περιπτώσεις έντονων κυματισμών στις χαμηλές ταχύτητες πριν την ολίσθηση, ενώ στις υψηλότερες ταχύτητες όπου το σκάφος ολισθαίνει και κινείται κυρίως στις κορυφές του κύματος το φαινόμενο μπορεί να μην είναι τόσο έντονο. Στην περιοχή ταχυτήτων πριν την ολίσθηση, ο διατοιχισμός μπορεί να μειωθεί με αύξηση της υδροδυναμικής απόσβεσης διατοιχισμού που είναι εγγενώς μικρή ακόμη και για γάστρες με ακμή, με τη βοήθεια ενεργών αντιδιατοιχιστικών πτερυγίων.

Επιταχύνσεις λόγω κρουστικών φορτίων:

1. Όταν μειώνεται η γωνία ανύψωσης του πυθμένα, οι κρουστικές επιταχύνσεις αυξάνονται.
2. Οι κρουστικές επιταχύνσεις αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση της δυναμικής διαγωγής.
3. Οι κρουστικές επιταχύνσεις μειώνονται με το πλάτος του σκάφους.
4. Οι επιταχύνσεις αυξάνονται με το τετράγωνο της ταχύτητας και είναι ανάλογες με το σημαντικό ύψος των κυματισμών $H^{1/3}$.

Πρόσθετη αντίσταση (Added Resistance): Η πρόσθετη αντίσταση έχει την τάση να μειώνεται στις μεγάλες ταχύτητες και σε μικρά μήκη κύματος, όπου το σκάφος ολισθαίνει οπότε κυριαρχούν οι ανωστικές δυνάμεις με αποτέλεσμα αυτό να βρίσκεται κατά πολύ εκτός νερού και έτσι να υπάρχει μείωση της πρόσθετης αντίστασης.

4. 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 παραμέτρους σχεδίασης που ακολουθούν:

Γωνία Διαγωγής (Trim): Γενικά, η μείωση της γωνίας διαγωγής συνοδεύεται από μείωση της κατακόρυφης κίνησης και του προνευτασμού, της πρόσθετης αντίστασης και των κρουστικών επιταχύνσεων. Η μείωση όμως έχει και το μειονέκτημα ότι αυξάνεται η πρόσθετη αντίσταση σε ταχύτητες που αντιστοιχούν στην περιοχή μετά το τοπικό μέγιστο της καμπύλης αντίστασης.

Γωνία ανύψωσης του πυθμένα (Deadrise): Η αύξηση της γωνίας ανύψωσης του πυθμένα έχει, γενικά, ευνοϊκή επίδραση στην συμπεριφορά του σκάφους σε κύματα. Κυρίως η γωνία ανύψωσης του πυθμένα επηρεάζει τις κρουστικές επιταχύνσεις. Οι κινήσεις του σκάφους και η πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμένη θάλασσα περιορίζονται σε υψηλές ταχύτητες από τις μεγάλες γωνίες ανύψωσης του πυθμένα.

Λόγος μήκους προς πλάτος (L/B): Η αύξηση του λόγου μήκους προς πλάτος αυξάνει τα επίπεδα των επιταχύνσεων για όλες τις περιοχές ταχυτήτων, ενώ και οι κινήσεις στις υψηλότερες ταχύτητες είναι επίσης μεγαλύτερες.

Μορφή νομέων: Οι μορφές νομέων που συνιστώνται για τον περιορισμό του αφρού και τη βελτίωση της πηδαλιούχησης ενός ταχύπλοου σκάφους σε κυματισμούς, οδηγούν κανονικά σε ολισθακάτους με πυθμένα μορφής V, με κακά χαρακτηριστικά κρουστικών φορτίων και σφυροκρούσεων στην πλώρα. Τελικά, σαν ένας συμβιβασμός ανάμεσα στις δύο αυτές αντίθετες επιρροές θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν νομείς μορφής αντεστραμμένου κουδουνιού που δεν αυξάνουν πολύ την πρόσθετη αντίσταση, ενώ περιορίζουν τα κρουστικά φορτία και τις κρουστικές επιταχύνσεις.

Φόρτιση: Έχει αποδειχθεί ότι οι επιταχύνσεις μειώνονται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του συντελεστή φόρτισης. Επίσης, σε ταχύτητες μεγαλύτερες από αριθμό $F_n=0.60$, αύξηση του συντελεστή φόρτισης οδηγεί σε ελαφριά μείωση των κινήσεων του πλοίου καθώς και της πρόσθετης αντίστασης.

5. Δυναμική συμπεριφορά και λειτουργία πλοίου

Η σχεδίαση μιας νέας κατασκευής έχει πάντα ως βάση την ορθολογιστική τεχνοοικονομική αξιολόγηση, συγκρινόμενη με εναλλακτικές σχεδιάσεις. Αυτή η αξιολόγηση πρέπει να περιλαμβάνει και τον έλεγχο της αποτελεσματικής λειτουργίας του πλοίου σε κυματισμένη θάλασσα.

Σε μεγάλο βαθμό η δυναμική συμπεριφορά του πλοίου σε κυματισμούς είναι περιοριστική παράμετρος για τη λειτουργία του. Για παράδειγμα η ταχύτητα ενός πλοίου σε κυματισμένη θάλασσα μπορεί να περιοριστεί είτε από την διατιθέμενη ισχύ της κύριας μηχανής του (involuntary speed loss in waves), είτε από τον εκούσιο περιορισμό της ταχύτητας του (voluntary speed reduction) από τον καπετάνιο για να αποφύγει υπερβολικές κινήσεις / αποκρίσεις του πλοίου, π.χ. σφυρόκρουση πλώρης.

Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου σε κυματισμούς πραγματοποιείται, εκτός από τον υπολογισμό των δυναμικών αποκρίσεων της κατασκευής (σύστημα 6 βαθμών ελευθερίας) σε κάποια κατάσταση θάλασσας, και τον έλεγχο της ικανότητάς του να λειτουργεί και να διεκπεραιώνει επιτυχώς και ασφαλώς το σκοπό της σχεδίασής του, παρά τις οποιεσδήποτε αντίξοες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η αξιολόγηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός συγκεκριμένου πλοίου γίνεται σε σχέση με την αποστολή του, τις περιβαλλοντικές συνθήκες για τη συγκεκριμένη περιοχή όπου το πλοίο πρόκειται να λειτουργήσει και με βάση το απαιτούμενο επίπεδο αποδοτικότητας.

Η διαβάθμιση των επιπέδων λειτουργίας με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία, μπορεί να γίνει στις εξής κατηγορίες:

- Κατοικησιμότητα (Habitability)

Ο χαρακτηρισμός αυτός αναφέρεται στο περιβάλλον στο οποίο το πλήρωμα πρέπει να εκτελεί κατά το δυνατό αποδοτικά το καθήκον του. Οι απαιτήσεις για κατοικησιμότητα εξαρτώνται από την αποστολή και από τον τύπο του πλοίου.

- Λειτουργησιμότητα (Operability)

Ένα πλοίο είναι «λειτουργήσιμο» όταν εκπληρώνει το σκοπό της σχεδίασής του, δηλαδή: κανονική λειτουργία όλου του μηχανολογικού / ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και των οργάνων, εξασφάλιση της ασφάλειας του φορτίου, διατήρηση πορείας και ικανότητα ελιγμών στο θαλάσσιο περιβάλλον.

- Περιορισμένες λειτουργίες (Degraded operations)

Σε αυτή την περίπτωση τα βασικά συστήματα του πλοίου πρέπει να λειτουργούν, ενώ τα υπόλοιπα πρέπει να είναι προστατευμένα από βλάβες. Οι λειτουργίες γίνονται υπό περιορισμούς και ελέγχεται η δυναμική ευστάθεια του άθικτου πλοίου.

- Επιβιωσιμότητα (Survivability)

Η επιβιωσιμότητα του πλοίου είναι ένα επίπεδο παραπάνω από τη λειτουργησιμότητα και αναφέρεται στην ασφάλεια του πλοίου, των επιβατών και του πληρώματος σε άσχημες καιρικές συνθήκες και στην περίπτωση βλάβης. Στην περίπτωση βλάβης πρέπει να εξεταστεί και η δυναμική ευστάθεια του πλοίου σε κυματισμούς.

Για την επίτευξη των παραπάνω αντικειμένων υπάρχουν τρία βασικά βήματα που πρέπει να γίνουν κατά τη διάρκεια μιας σχεδίασης:

- Προσδιορισμός ή πρόβλεψη των καταστάσεων θάλασσας που πρόκειται να λειτουργήσει το πλοίο.
- Ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια για διάφορες αποκρίσεις του πλοίου που δεν πρέπει εν γένει να υπερβαίνονται για να είναι αποδεκτή και επιτυχής η σχεδίαση.
- Εναλλακτικές λύσεις στην περίπτωση που δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια.

Στο σημείο αυτό είναι προφανές ότι η εκτίμηση ή μέτρηση των δυναμικών αποκρίσεων είναι μια βασική παράμετρος στο πρόβλημα μας και αποτελεί το επόμενο στάδιο στη διαδικασία αξιολόγησης. Υπολογιστικές μέθοδοι, πειράματα σε πρότυπα και μετρήσεις σε φυσική κλίμακα, είναι οι διαθέσιμοι τρόποι προσδιορισμού των αποκρίσεων ενός πλοίου. Για σωστή ανάλυση χρησιμοποιούνται πιθανοθεωρητικές και στατιστικές μέθοδοι, επειδή το θαλάσσιο περιβάλλον από τη φύση του δεν μπορεί να αναλυθεί διαφορετικά.

Εκτός από την αποστολή που πρέπει να ικανοποιεί το πλοίο, εξίσου σημαντική και καθοριστική παράμετρος είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες, που αφενός καθορίζουν τα επίπεδα λειτουργίας ενός πλοίου και αφετέρου είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός τους για την εφαρμογή ενός κριτηρίου.

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να γίνει μια ανάλυση της λειτουργησιμότητας ενός πλοίου εφόσον οι τιμές των αποκρίσεων μετατραπούν σε απαιτήσεις που θα προσδιορίζουν την ευπάθεια της κατασκευής στις προδιαγραφμένες εξωτερικές διεγέρσεις. Τα όρια –κριτήρια θεσπίζονται για ολόκληρο το πεδίο λειτουργίας αλλά και στις περιοχές όπου υπάρχει ανάγκη για επιπλέον έλεγχο. Η μη ικανοποίηση τόσο των σχεδιαστικών όσο και των κριτηρίων λειτουργίας οδηγεί στην επανεξέταση της αρχικής σχεδίασης με ενδεχόμενες τροποποιήσεις-βελτιστοποιήσεις ή ακόμη και πλήρους αλλαγής της.

6. Αξιολόγηση δυναμικής συμπεριφοράς πλοίου σε κυματισμούς

6.1 Μεθοδολογίες αξιολόγησης

Υπάρχουν δύο γενικές μεθοδολογίες για την αποτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου, όπου και οι δύο παρέχουν στον σχεδιαστή βοηθητικές διευκρινήσεις για την επίδραση των κινήσεων του στην απόδοση των συστημάτων του.

- Η συγκριτική μέθοδος, όπου μια καινούργια σχεδίαση συγκρίνεται με μια υπάρχουσα με αποδεδειγμένα καλοθάλασσα χαρακτηριστικά. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ποιοτικά και ποσοτικά κριτήρια.
- Η απόλυτη μέθοδος, στην οποία θεσπίζονται αποδεκτά επίπεδα των κινήσεων του πλοίου με βάση την απόδοση του πληρώματος και του εξοπλισμού σε σχέση με την συνολική απόδοση του πλοίου. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται μόνο ποσοτικά κριτήρια.

Κατά την αξιολόγηση μιας σχεδίασης εξετάζουμε τις παρακάτω παραμέτρους:

Ταχύτητα

- Βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της γάστρας ώστε να έχει τη μικρότερη αντίσταση σε κυματισμούς.
- Βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της γάστρας ώστε να έχει την αποδοτικότερη πρόωση σε κυματισμούς.
- Βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της γάστρας ώστε να έχει καλή συμπεριφορά σε ελιγμούς σε τρικυμιώδη θάλασσα.
- Επιλογή γάστρας με την πιο καλοθάλασση συμπεριφορά στην ίδια ταχύτητα.

Οικονομία

- Μικρότερη κατανάλωση καυσίμου σε κυματισμένη θάλασσα.
- Επιλογή γάστρας με τις μικρότερες δυνατές αποκρίσεις ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα απώλειας φορτίου.

Λειτουργικότητα

- Κατάλληλη γάστρα ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ταχύτητα σε κυματισμούς συμπεριλαμβανόμενης και της ακούσιας μείωσης ταχύτητας.
- Επιλογή σχεδίασης ώστε να επιτυγχάνεται η πλέον καλοθάλασση απόδοση σε ανέμους και κυματισμούς.

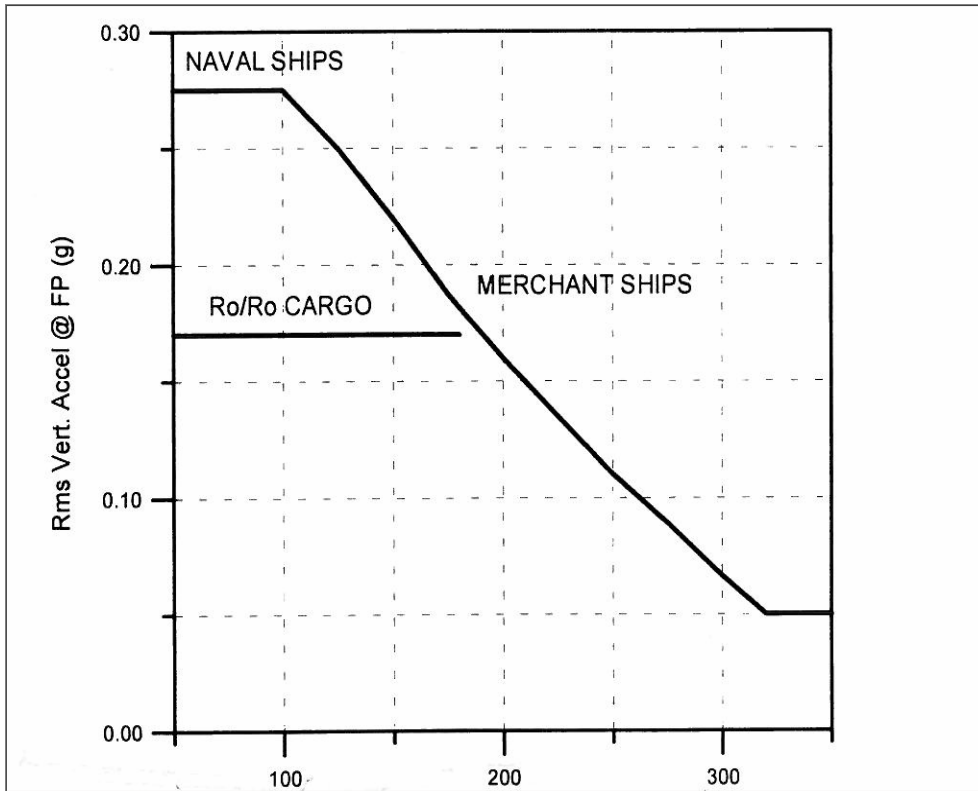
6.2 Κριτήρια δυναμικής συμπεριφοράς γενικής εφαρμογής

Ως κριτήρια γενικής εφαρμογής χαρακτηρίζονται τα αποδεκτά όρια τιμών (κριτηρίων) για τις δυναμικές αποκρίσεις, για την απόδοση προσωπικού / άνεση επιβατών και πρόωσης σε κυματισμούς, κάτω από τα οποία μπορεί ένα πλοίο να λειτουργεί ικανοποιητικά. Στην περίπτωση αυτή ως κριτήριο θεσπίζεται μια μόνο τιμή, η οποία έχει προσδιοριστεί με βάση τις πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί από μετρήσεις σε φυσική κλίμακα και έχουν εμπλουτιστεί με τα αποτελέσματα διεξαγωγής πειραμάτων σε πρότυπα.

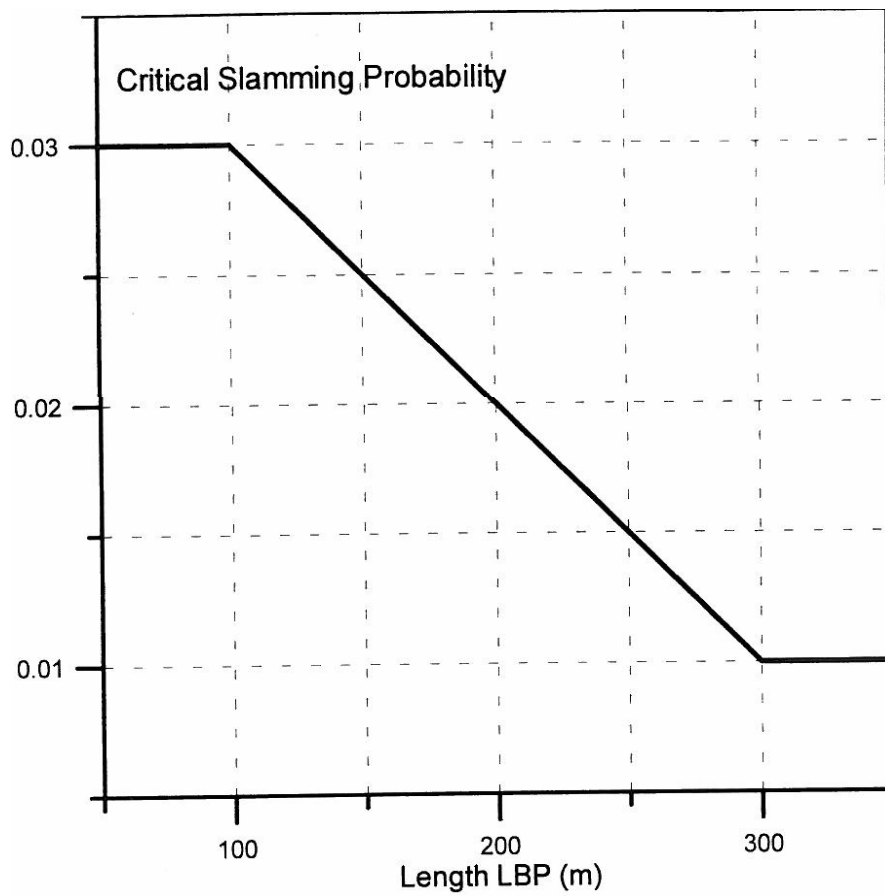
Τα βασικά γενικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία εκτίμησης της λειτουργησιμότητας ενός πλοίου συνοψίζονται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί. Η σφυρόκρουση και η διαβροχή του καταστρώματος αναφέρονται σε σχέση με την κρίσιμη πιθανότητα εμφάνισης (συμβάντα ανά κύκλους κύματος), τα υπόλοιπα μεγέθη είναι σε μέσες τετραγωνικές τιμές (rms).

Πίνακας 1: NORDIC

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ			
	Εμπορικά Πλοία	Πολεμικά Πλοία	Μικρά Ταχύπλοα
Κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη (rms)	Σχήμα 1	0.275g	0.65g
Κατακόρυφη επιτάχυνση στη γέφυρα (rms)	0.15g	0.2g	0.275g
Εγκάρσια επιτάχυνση στη γέφυρα (rms)	0.12g	0.1g	0.1g
Διατοιχισμός (rms)	6.0 deg	4.0 deg	4.0 deg
Σφυρόκρουση (κρίσιμη πιθ.)	Σχήμα 2	0.03	0.03
Διαβροχή (κρίσιμη πιθ.)	0.05	0.05	0.05



Σχήμα 1: Κριτήριο κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πωραία κάθετο (FP)



Σχήμα 2: Κρίσιμη πιθανότητα σφυρόκρουσης για εμπορικά πλοία

6.3 Κριτήρια δυναμικών αποκρίσεων

Κατακόρυφη επιτάχυνση

Η κατακόρυφη επιτάχυνση στην πρωαία κάθετο χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την σύγκριση μεταξύ εναλλακτικών σχεδιάσεων ή ακόμα ως κριτήριο για την μείωση της ταχύτητας ή την αλλαγή πορείας κατά τη διάρκεια πλεύσης. Επίσης, με το κριτήριο αυτό περιγράφεται η συνολική κατακόρυφη κίνηση στην περιοχή της πλώρης, όπου η διαβροχή του καταστρώματος ή η σφυρόκρουση στον πυθμένα της πλώρης μπορεί να λαμβάνουν κρίσιμες τιμές. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζονται οι τιμές της κατακόρυφης επιτάχυνσης που χρησιμοποιούνται ως κριτήρια λειτουργησιμότητας για τα εμπορικά σκάφη ως συνάρτηση του μήκους μεταξύ καθέτων.

Το κριτήριο για την κατακόρυφη επιτάχυνση στη γέφυρα σχετίζεται με τις βασικές εργασίες που λαμβάνουν χώρα εκεί, όπως πηδαλιουχία, παρατήρηση και πλοήγηση.

Εγκάρσια επιτάχυνση

Το κριτήριο που χρησιμοποιείται κυρίως για την εγκάρσια επιτάχυνση στη γέφυρα είναι 0.1g rms και αναφέρεται στην ασφάλεια και στην απόδοση του πληρώματος, σύμφωνα με τα κριτήρια του Αμερικάνικου Ναυτικού. Με βάση τις παρατηρήσεις σε φυσική κλίμακα οι καπετάνιοι και το πλήρωμα γέφυρας στα εμπορικά πλοία φαίνεται ότι αντέχουν σε λίγο μεγαλύτερη τιμή της εγκάρσιας επιτάχυνσης.

Διατοιχισμός

Το κριτήριο για τον διατοιχισμό στα εμπορικά πλοία βασίζεται σε μετρήσεις φυσικής κλίμακας στα ίδια πλοία με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρωαία κάθετο. Ένα όριο ασφαλείας για τον διατοιχισμό είναι η τιμή περί των 14° rms, ενώ η rms τιμή ως κριτήριο για τη λειτουργησιμότητα δεν πρέπει να ξεπερνάει τις 6°. Τέλος, η τιμή των 4° rms για το διατοιχισμό χρησιμοποιείται σαν κριτήριο για την αποτελεσματικότητα του πληρώματος.

Σφυρόκρουση πυθμένα, διαβροχή καταστρώματος και ανάδυση έλικας

Η κριτική πιθανότητα σφυρόκρουσης για τα εμπορικά πλοία παρουσιάζεται στο σχήμα 1.2, συναρτήσει του μήκους μεταξύ καθέτων. Σύμφωνα με τον Ochi (1964) μια κρούση του πυθμένα ενός πλοίου χαρακτηρίζεται σαν σφυρόκρουση, όταν το πρωαίο μέρος αναδύεται και η κατακόρυφη σχετική ταχύτητα ως προς την επιφάνεια του νερού στον συγκεκριμένο νομέα ξεπερνάει μια κρίσιμη τιμή που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{cr}=0.093 \cdot \sqrt{g \cdot L}$$

όπου g: η επιτάχυνση της βαρύτητας και L: το μήκος μεταξύ καθέτων.

6.4 Κριτήρια απόδοσης προσωπικού-άνεσης επιβατών-ναυτίας

Για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα τα κριτήρια που χρησιμοποιούνταν για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια, η αποδοτικότητα του πληρώματος καθώς και η άνεση των επιβατών, σχετίζονταν με τις αποκρίσεις του διατοιχισμού, του προνευτασμού και της κατακόρυφης και εγκάρσιας επιτάχυνσης. Τα όρια για τις τιμές της κατακόρυφης επιτάχυνσης, σε οποιαδήποτε θέση κατά μήκος του πλοίου, και του διατοιχισμού που σχετίζονται με ικανότητα διεκπεραίωσης κάποιας εργασίας (όπως αναφέρονται στο NORDIC project 1987) παρουσιάζονται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2

Κατακόρυφη Επιτάχυνση (rms)	Εγκάρσια Επιτάχυνση (rms)	Διατοιχισμός (rms)	Περιγραφή Εργασίας
0.20g	0.10g	6.0°	Ελαφριά χειρωνακτική εργασία
0.15g	0.07g	4.0°	Βαριά χειρωνακτική εργασία
0.10g	0.05g	3.0°	Πνευματική εργασία
0.05g	0.04g	2.5°	Επιβάτες σε επιβατηγά
0.02g	0.03g	2.0°	Επιβάτες σε κρουαζιερόπλοια

Τα τελευταία χρόνια καταβάλλεται σημαντική προσπάθεια από την πλευρά των ερευνητών για τον προσδιορισμό των αιτιών της ναυτίας που προκαλείται στους επιβάτες και για την θέσπιση κριτηρίων περιορισμού της. Στην κατεύθυνση αυτή έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα για την εκτίμηση της απόδοσης και της άνεσης του ανθρώπου όταν βρίσκεται υπό την επίδραση των κινήσεων του πλοίου, που σχετίζονται με φυσιολογικές επιπτώσεις των κινήσεών του, όπως:

- Πρόκληση ναυτίας (Motion Sickness Incidence)
- Διαταραχές στην κίνηση (Motion Induced Interruptions)
- Κόπωση (Motion Induced Fatigue)

7. Συστηματική Σειρά Ταχύπλοων Ε.Μ.Π. – Πρότυπα Δοκιμών

7.1 Γενικά

Τις τελευταίες δεκαετίες, μέσα στα πλαίσια της έρευνας για πρόβλεψη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός ταχύπλου σκάφους σε κυματισμούς, έχουν αναπτυχθεί από ορισμένα επιστημονικά κέντρα και πανεπιστήμια συστηματικές σειρές ταχύπλοων σκαφών. Στις σειρές αυτές έχουν γίνει όλα τα απαραίτητα πειράματα για τη συμπεριφορά των μοντέλων, κατ' αρχάς σε αντίσταση και ύστερα σε διάφορα είδη κυματισμών.

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

Συστηματικές σειρές σκαφών ημι-εκτοπίσματος

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

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

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

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

Συστηματικές σειρές σκαφών με απλή ακμή

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

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

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

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

Σκάφη με διπλή ακμή

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

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

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

- Υδροδυναμικά κρουστικά φορτία σε κυματισμούς
- Υδροστατικό εκτόπισμα

- Ολίσθηση σε μεγάλες ταχύτητες
- Ολίσθηση σε μικρές ταχύτητες
- Μετακεντρική ευστάθεια

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

7.2 Συστηματική σειρά NTUA

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

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

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

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

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

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

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

Το πατρικό σκάφος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3, έχει δύο ακμές που εκτείνονται από τον καθρέπτη έως περίπου το 70% του μήκους στην πλώρη. Η γάστρα έχει πλατύ καθρέπτη και κοίλες πλευρές στην περιοχή της πλώρης καθώς και μεταβλητή γωνία ανύψωσης πυθμένα η οποία ξεκινάει από 10° στον καθρέπτη και φτάνει έως και 70° στην πλώρη, σχήμα 4. Τα μέλη της σειράς προέκυψαν από το πατρικό κρατώντας την ίδια μορφή στη μέση τομή και μετατρέποντας κατάλληλα τα υπόλοιπα μεγέθη.

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

Έξι ισοβύθιστες καταστάσεις φόρτωσης επιλέχθηκαν και δοκιμάστηκαν, αντιστοιχούν σε $C_{DL} = 1.00, 1.61, 2.23, 3.00, 3.62$ και 4.23 και περιγράφονται στον πίνακα 1. Οι χαμηλές τιμές του λόγου C_{DL} αντιστοιχούν στις καταστάσεις λειτουργίας μεγάλων πλοίων, ενώ οι υψηλότερες σε μικρότερα επιβατηγά σκάφη και σκάφη αναψυχής.

Το μήκος των προτύπων έχει προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας την 21st I.T.T.C. High Speed Marine Vehicles Committee (Trondheim, 1996), σύμφωνα με την οποία τα πρότυπα πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο μέτρα. Επειδή, οι χαμηλές τιμές του λόγου C_{DL} δεν μπορούν να επιτευχθούν με τα πρότυπα των δύο περίπου μέτρων, για καθένα από αυτά κατασκευάστηκε ένα μεγαλύτερο με κλίμακα 3/5:1.

Η συστηματική σειρά γαστρών με διπλή ακμή του Ε.Μ.Π. έχει ολοκληρώσει τις δοκιμές αντίστασης αλλά όχι και τις εκτεταμένες δοκιμές υδροδυναμικής συμπεριφοράς σε κανονικό και τυχαίο κυματισμό. Στα πλαίσια της προσπάθειας για την ολοκλήρωση των δοκιμών υδροδυναμικής συμπεριφοράς έγιναν και τα πειράματα σε τυχαίους κυματισμούς στην παρούσα διπλωματική εργασία στο πατρικό σκάφος της σειράς NTUA-097/94 με λόγο L/B=5.50 και στο NTUA-116/96 με λόγο L/B=7.00.

Όλα τα πρότυπα της σειράς με τα κύρια χαρακτηριστικά τους στις έξι καταστάσεις φόρτωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3:

Πίνακας 3: Τα χαρακτηριστικά των δοκιμασμένων προτύπων της Συστηματικής Σειράς Ε.Μ.Π.

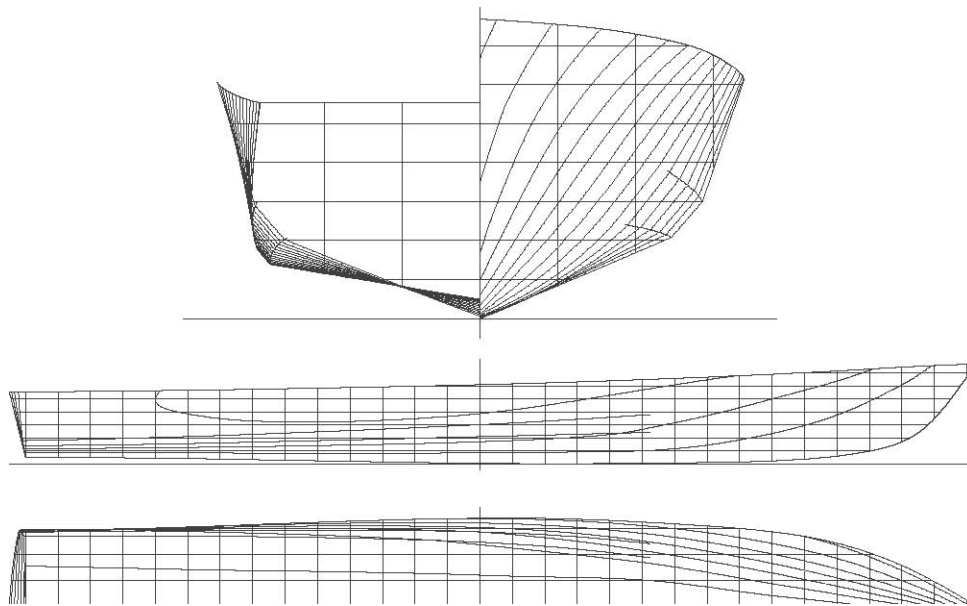
L/B	4.00-big (163/01)	4.00-small (113/95)	4.75-big (150/99A)	4.75-small (154/99)	5.50-big (118/96)	5.50-small (097/94)	6.25-big (164/01)	6.25-small (146/98)	7.00-big (166/01)	7.00-small (116/96)
L _{OA}	3.820 m	2.292 m	3.820 m	2.292 m	3.820 m	2.292 m	4.3417	2.605 m	4.8617	2.917 m
C _{DL}										
	3.392 1.323		3.415 1.348		3.430 1.365		3.968 1.718		4.457 2.083	
1.00	39.057		39.781		41.443		63.100		88.140	
	-0.389 0.080		-0.436 0.077		-0.480 0.077		-0.515 0.088		-0.651 0.097	
	3.445 1.738		3.468 1.696		3.497 1.635		4.029 2.022	2.418 0.728	4.530 2.453	2.718 0.883
1.61	66.097		67.118		69.103		105.405	22.767	150.095	32.421
	-0.461 0.099		-0.495 0.096		-0.511 0.097		-0.519 0.113	-0.311 0.068	-0.640 0.128	-0.384 0.077
	3.480 2.004		3.505 1.915	2.103 0.689	3.539 1.832	2.123 0.660	4.070 2.265	2.442 0.815		2.731 0.988
2.23	93.890		96.021	20.741	99.564	21.506	150.151	32.433		45.436
	-0.494 0.115		-0.511 0.114	-0.307 0.068	-0.490 0.117	-0.294 0.070	-0.500 0.137	-0.300 0.082		-0.369 0.093
	3.514 2.244	2.109 0.808	3.539 2.117	2.124 0.763		2.145 0.728	4.113 2.547	2.468 0.917		2.7830 1.1304
3.00	130.436	28.174	133.078	28.745		29.615	208.642	45.067		64.618
	-0.509 0.134	-0.305 0.080	-0.508 0.135	-0.301 0.081		-0.297 0.083	-0.472 0.165	-0.283 0.099		-0.345 0.116
		2.110 0.857		2.137 0.812		2.160 0.782		2.482 0.996		2.809 1.245
3.62		33.993		35.357		36.513		55.489		80.344
		-0.307 0.087		-0.300 0.086		-0.288 0.095		-0.311 0.114		-0.327 0.135
		2.123 0.903		2.150 0.859		2.175 0.834		2.509 1.074		2.834 1.355
4.23		40.462		42.039		43.530		66.752		96.134
		-0.305 0.096		-0.294 0.100		-0.280 0.106		-0.297 0.129		-0.309 0.152

Σημείωση:

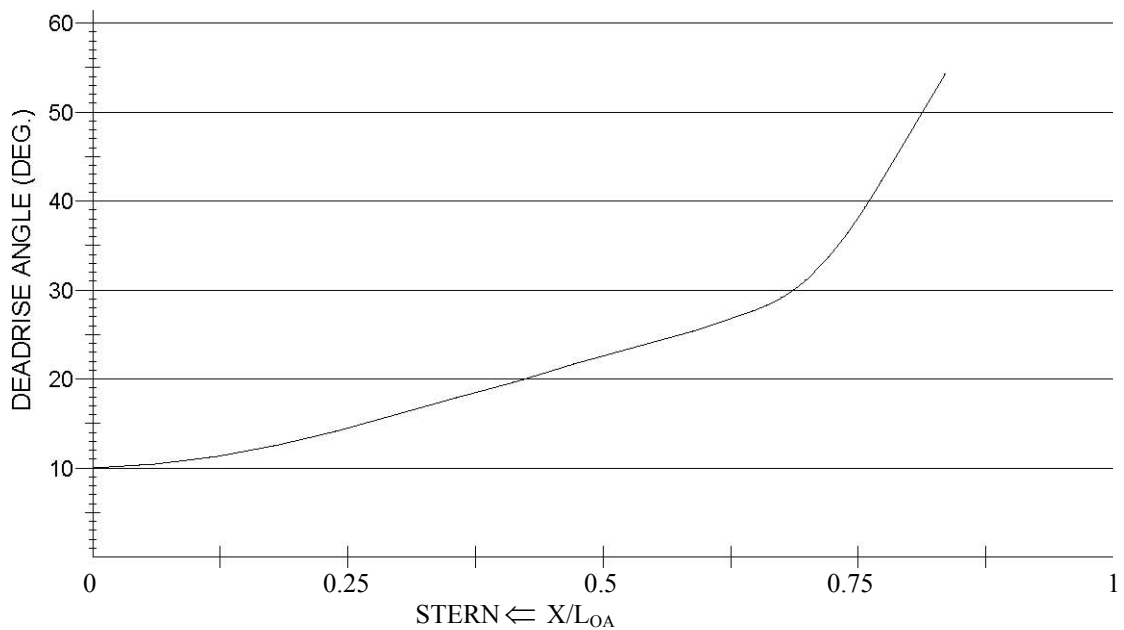
- Κάθε κελί του πίνακα περιέχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του μοντέλου:

L _{WL} [m]	WS [m ²]
Δ [Kgr]	
LCG [m]	T [m]

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



Σχήμα 3: Σχέδιο Γραμμών του πατρικού προτύπου της συστηματικής σειράς NTUA



Σχήμα 4: Γωνία ανύψωσης πυθμένα β (deadrise angle) συναρτήσει του λόγου μήκους θέσης γωνίας προς το ολικό μήκος x/L_{OA}

Στον Πίνακα 4 που ακολουθεί περιέχονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προτύπου Ν.Τ.Υ.Α – 097/94 με λόγο $L/B=5.50$:

Πίνακας 4

NTUA 097 / 94, $L/B = 5.5$	
ΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ	$L_{OA}=2.292$ m
ΜΗΚΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΘΕΤΩΝ	$L_{BP}=2.154$ m
ΜΗΚΟΣ ΑΝΩ ΑΚΜΗΣ	$L_{P2}=1.48$ m
ΜΗΚΟΣ ΚΑΤΩ ΑΚΜΗΣ	$L_{P1}=1.48$ m
ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΑΝΩ ΑΚΜΗΣ	$B_{P2}=0.360$ m (section 5)
ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΚΑΤΩ ΑΚΜΗΣ	$B_{P1}=0.322$ m (section 2)
ΑΝΥΨΩΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΠΡΥΜΝΗ	$\beta_0=9.5^\circ$ (section 0)
ΑΝΥΨΩΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ ΣΤΟ ΜΕΣΟΝ	$B_7=23^\circ$ (section 7)

Στον Πίνακα 5 που ακολουθεί περιέχονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προτύπου Ν.Τ.Υ.Α - 116/96 με λόγο $L/B=7.00$:

Πίνακας 5

NTUA 116 / 96, $L/B = 7.0$	
ΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ	$L_{OA}=2.917$ m
ΟΛΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ	$B_{OA}=0.416$ m
ΜΗΚΟΣ ΑΝΩ ΑΚΜΗΣ	$L_{P2}=1.884$ m
ΜΗΚΟΣ ΚΑΤΩ ΑΚΜΗΣ	$L_{P1}=1.884$ m
ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΑΝΩ ΑΚΜΗΣ	$B_{P2}=0.354$ m
ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΚΑΤΩ ΑΚΜΗΣ	$B_{P1}=0.322$ m
ΑΝΥΨΩΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΠΡΥΜΝΗ	$\beta_0=9.5^\circ$ (section 0)
ΑΝΥΨΩΣΗ ΠΥΘΜΕΝΑ ΣΤΟ ΜΕΣΟΝ	$B_7=23^\circ$ (section 7)

8. Πειραματική Μεθοδολογία

8.1 Αντικείμενο Πειραματικών Δοκιμών

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αφορά στην πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς σε τυχαίους κυματισμούς του πατρικού μοντέλου της συστηματικής σειράς NTUA-097/94 με λόγο $L/B=5.50$ καθώς και του μοντέλου NTUA-116/96 με λόγο $L/B=7.00$. Το σύνολο των πειραμάτων αυτών πραγματοποιήθηκε στην Πειραματική Δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π. Οι κύριες διαστάσεις της πειραματικής δεξαμενής έχουν ως εξής:

Μήκος = 91.00 m

Πλάτος = 4.55 m

Βάθος = 3.00 m

Η διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς του πατρικού μοντέλου της σειράς NTUA-097/94 της μικρής κλίμακας (small scale), με εκτόπισμα $\Delta = 29.615$ kg και συντελεστή εκτοπίσματος $C_{DL}=3.00$, έγινε για επτά καταστάσεις θάλασσας σε μία ταχύτητα με αριθμό Froude $F_n = 0.34$, που αντιστοιχεί σε ταχύτητα μοντέλου $V_m=1.559$ m/sec.

Τα πειράματα που διεξήχθησαν με το μοντέλο NTUA-116/96 της μικρής κλίμακας (small scale), με εκτόπισμα $\Delta = 64.618$ kg και συντελεστή εκτοπίσματος $C_{DL}=3.00$, έγιναν για οκτώ καταστάσεις θάλασσας σε δύο ταχύτητες με αριθμούς Froude $F_n = 0.34$ και $F_n = 0.68$, που αντιστοιχούν σε ταχύτητες μοντέλου $V_m=1.777$ m/sec $V_m=3.554$ m/sec αντιστοίχως.

Τα φάσματα των κυμάτων που παρήχθησαν από τον κυματιστήρα είχαν δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας το διπαραμετρικό φάσμα του Bretschneider, που ισχύει για ανοιχτές θάλασσες οποιουδήποτε βαθμού ανάπτυξης. Το φάσμα αυτό ορίζεται με τη βοήθεια δύο παραμέτρων: της συχνότητας κορυφής ω_p και του σημαντικού ύψους κύματος $H^{1/3}$ καθώς δίνεται από τη σχέση:

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

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 $H^{1/3}$. Ακόμη, φαίνονται τα ονόματα των αρχείων που περιέχουν την συνάρτηση πυκνότητας του φάσματος για κάθε κατάσταση θάλασσας καθώς και ο συντελεστής κλίμακας (scale factor) με τον οποίο παράχθηκαν.

Πίνακας 6: NTUA 097/94

Cdl=	3						
Scale=	50						
Lship=	107.25						
Lmodel=	2.145						
Tp'	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Tpship	6.61	8.27	9.92	11.57	13.23	14.88	16.53
Tpmodel	0.935	1.169	1.403	1.637	1.870	2.104	2.338
wp model	6.715	5.372	4.477	3.837	3.358	2.984	2.686
f model (Hz)	1.069	0.855	0.713	0.611	0.535	0.475	0.428
Hs model (m)	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16
File	h8tp2.s50	h9tp25.s50	h10tp3.s50	H11tp35.s50	h12tp4.s50	h14tp45.s50	h16tp5.s50
Scale Factor	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Fn=0.34	x	x	x	x	x	x	x

Πίνακας 7: NTUA 116/96

Cdl=	3							
Scale=	50							
Lship=	139.15							
Lmodel=	2.783							
Tp'	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
Tpship	5.65	7.53	9.42	11.30	13.18	15.06	16.95	18.83
Tpmodel	0.799	1.065	1.332	1.598	1.864	2.131	2.397	2.663
wp model	7.860	5.895	4.716	3.930	3.369	2.948	2.620	2.358
f model (Hz)	1.252	0.939	0.751	0.626	0.536	0.469	0.417	0.375
Hs model (m)	0.07	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.16
file	h07tp15.s50	h09tp20.s50	h10tp25.s50	h11tp30.s50	h12tp35.s50	h14tp40.s50	h16tp45.s50	h16tp50.s50
Scale Factor	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Fn=0.34	x	x	x	x	x	x	x	x

8.2 Στάδια πειραματικής διαδικασίας

Τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνουν την προετοιμασία του προτύπου που πρόκειται να υποστεί τα πειράματα, τη βαθμονόμηση των οργάνων που θα παίρνουν τις μετρήσεις και τον τρόπο διεξαγωγής των πειραμάτων.

8.2.1 Προετοιμασία Προτύπου

Τα βήματα προετοιμασίας από τα οποία περνάει ένα πρότυπο ώστε να μπορεί να δοκιμαστεί σε πειράματα Seakeeping είναι τα εξής:

- Εύρεση επιθυμητού εκτοπίσματος, ώστε αυτό να αντιστοιχεί στη γραμμή φόρτωσης η οποία θα πρέπει να είναι και χαραγμένη πάνω στο μοντέλο.
- Εύρεση της επιθυμητής διαγωγής ή εγκάρσιας κλίσης αυτού. Στην περίπτωση μας έπρεπε να είναι ισοβύθιστο.
- Εύρεση της κατάλληλης ακτίνας αδρανείας και περιόδου ιδιοταλάντωσης.

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

Εύρεση επιθυμητού εκτοπίσματος

Αρχικά, αφού είχε ήδη αποφασιστεί η επιθυμητή κατάσταση φόρτωσης για την οποία θα γίνονταν τα πειράματα, βρέθηκε η αντίστοιχη ίσαλος πλευσης η οποία ήταν ήδη χαραγμένη τόσο στο ένα πρότυπο όσο και στο άλλο, αφού είχαν γίνει στο παρελθόν σε αυτά πειράματα αντίστασης.

Ύστερα, τοποθετήθηκε η πλάκα πάνω στην οποία δένεται το δυναμόμετρο του φορείου και αποτελεί τον τρόπο σύνδεσης φορείου – μοντέλου. Αμέσως μετά, τοποθετήθηκαν τα επιταχυνσιόμετρα τα οποία χρησιμεύουν για τη μέτρηση των κατακόρυφων επιταχύνσεων. Πριν την τοποθέτηση βαθμονομήθηκαν, έτσι ώστε να καταστρωθεί η συνάρτηση μεταφοράς για καθένα από αυτά αφού οι μετρήσεις από το φορείο δίνονται σε Volts. Αποφασίστηκε να τοποθετηθούν τρία επιταχυνσιόμετρα, ένα στην πλώρη (Acc. Bow), ένα στο κέντρο βάρους του προτύπου (Acc. Mid) και ένα στην πρύμνη (Acc. Stern).

Για το πρότυπο NTUA-097/94 τα επιταχυνσιόμετρα απείχαν αποστάσεις διαμήκως (X) από τη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους, εγκαρσώς (Y) από την Base Line και κατακόρυφα (Z) από την ίσαλο πλευσης αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 8:

Πίνακας 8

ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΜΕΤΡΑ	X(m)	Y(m)	Z(m)
Acc. Bow	1.210	0.000	0.141
Acc. mid	0.000	0.210	0.141
Acc. stern	-0.730	0.000	0.141

(Θετικές τιμές πρόωραθεν της διαμήκους θέσης του κέντρου βάρους)

Στη συνέχεια τοποθετήσαμε το βάρος που αντιστοιχεί στο πόδι του δυναμόμετρου όταν αυτό θα είναι δεμένο στο φορείο της δεξαμενής κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, καθώς και όλα τα απαραίτητα βάρη ώστε να πετύχουμε το επιθυμητό εκτόπισμα. Ελήφθη υπόψη ακόμη και το βάρος των ειδικών πλαστικών ζελατίνων που θα τοποθετηθούν εκ των υστέρων ώστε να εμποδίζουν την εισροή νερού μέσα στο μοντέλο κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων. Μετά την τοποθέτηση των βαρών ζυγίστηκε το μοντέλο σε ζυγαριά ακριβείας ώστε να εξακριβωθεί ότι είχαν τοποθετηθεί τα σωστά βάρη. Επιτεύχθηκε το εκτόπισμα $\Delta = 64.618 \text{ kg}$ στο $C_{DL} = 3.00$ για το «NTUA-116/96» και το εκτόπισμα $\Delta = 29.615 \text{ kg}$ στο $C_{DL} = 3.00$ για το «NTUA-097/94».

Εύρεση γωνίας διαγωγής

Σε όλες τις καταστάσεις πειραμάτων είχαμε μηδενική γωνία διαγωγής, δηλαδή τα πρότυπα έπλεαν ισοβύθιστα. Για να εξασφαλίσουμε ισοβύθιστη κατάσταση, αφού είχαμε το επιθυμητό εκτόπισμα τοποθετήσαμε το μοντέλο μέσα στο νερό της δεξαμενής, το δέσαμε πάνω στο φορείο ώστε να είναι σταθερό και ελέγξαμε την ίσαλο πλευσης που είναι χαραγμένη πάνω στο μοντέλο για να δούμε αν τα βάρη είναι τοποθετημένα στη σωστή θέση μέσα στο μοντέλο. Έγινε η κατάλληλη μετακίνηση βαρών μέχρι που επιτεύχθηκε η ισοβύθιστη κατάσταση. Στο επόμενο στάδιο όμως θα φανεί αν τελικά τα βάρη είναι τοποθετημένα σωστά, γιατί θα πρέπει η κατανομή των βαρών ζυγοστάθμισης να είναι τέτοια που η ακτίνα αδράνειας γύρω από τον άξονα OZ να είναι η αντίστοιχη του πλοίου.

Εύρεση ακτίνας αδράνειας και περιόδου ιδιοταλάντωσης

Προκειμένου να υπολογιστεί πρακτικά η ακτίνα αδράνειας, το μοντέλο δένεται με ιμάντες από δύο εκκρεμείς ράβδους που είναι πακτωμένοι σε ειδικό χώρο στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, έτσι ώστε να εκτελεί ταλαντώσεις γύρω από το κέντρο βάρους του, περί τον κατακόρυφο άξονα.

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

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

όπου:

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

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

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

Δ : η μάζα του μοντέλου – ιμάντων ανάρτησης.

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

Γνωρίζουμε όμως ακόμα ότι $I_{ZZ} = r_{ZZ}^2 \cdot \Delta$, όπου r_{ZZ} η ακτίνα αδράνειας, η οποία από την ανάλυση της κατανομής υπαρχόντων πλοίων έχει προσδιοριστεί ότι είναι περίπου $0.25 L_{BP}$, κάτι που επαληθεύεται πρακτικά από την παραπάνω διαδικασία. Οπότε, αν αντικαταστήσουμε στον τύπο της περιόδου προκύπτει:

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

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

Για το μοντέλο NTUA-116/96 έχουμε:

$$\begin{aligned} R_{ZZ} &= 0.25 \cdot L_{BP} = 0.696 \text{ m} \\ l &= 4.037 \text{ m} \\ \alpha &= 0.750 \text{ m} \\ g &= 9.81 \text{ m/sec}^2 \end{aligned}$$

Οπότε η περίοδος ιδιοταλάντωσης T του μοντέλου NTUA-116/96 θα είναι:

$$T_{\theta} = 3.737 \text{ sec}$$

Για το μοντέλο NTUA-097/94 έχουμε:

$$\begin{aligned} R_{ZZ} &= 0.25 \cdot L_{BP} = 0.536 \text{ m} \\ l &= 4.026 \text{ m} \\ \alpha &= 0.750 \text{ m} \\ g &= 9.81 \text{ m/sec}^2 \end{aligned}$$

Οπότε η περίοδος ιδιοταλάντωσης T του μοντέλου NTUA-097/94 θα είναι:

$$T_{\theta} = 2.875 \text{ sec}$$

Μετά τους υπολογισμούς αυτούς χρονομετράται η ταλάντωση του μοντέλου σε 10 περιόδους, ώστε να βρεθεί αν συμπίπτει η πραγματική περίοδος με τη θεωρητική που υπολογίστηκε προηγουμένως. Αν η περίοδος δεν επιτευχθεί με τη συγκεκριμένη κατανομή βαρών, τότε γίνονται διαδοχικές μετακινήσεις των βαρών διατηρώντας το αλγεβρικό άθροισμα των ροπών σταθερό, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ύστερα από δοκιμές και χρονομετρήσεις της περιόδου η επιθυμητή τιμή. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να ξαναγίνει το 2^ο βήμα, ώστε να ελεγχθεί αν το σκάφος είναι πλέον ισοβύθιστο μετά τη μετακίνηση των βαρών.

Φυσικά η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να είναι η κατανομή βαρών τέτοια ώστε το μοντέλο μας να έχει την επιθυμητή περίοδο ιδιοταλάντωσης και συγχρόνως την ίσαλο πλεύσης ισοβύθιστη.

8.2.2 Αποφόρτιση

Κατά την εκτέλεση πειραμάτων σε ταχύπλοα σκάφη θεωρούμε ότι ο ελικοφόρος άξονας βρίσκεται υπό κλίση 6.5° ως προς την τρύπδα του σκάφους που συμπίπτει (κατά προσέγγιση) με τη βασική γραμμή αναφοράς. Επίσης, η αντίσταση που μετράται κατά την διάρκεια του πειράματος είναι η οριζόντια συνιστώσα της αντίστασης.

Στην πραγματικότητα, η έλικα ενεργεί παρέχοντας ώση κατά την κατεύθυνση του αξονικού συστήματος. Επομένως η οριζόντια συνιστώσα της έλικας T_H είναι αυτή που εξισορροπεί την αντίσταση του σκάφους R , ενώ η κατακόρυφη συνιστώσα T_V μειώνει το φαινόμενο εκτόπισμα του σκάφους κατά το μέγεθος:

$$T_V = T \cdot \sin(\tau + 6.5)$$

όπου:

- T = η ώση της έλικας
- τ = η δυναμική διαγωγή του σκάφους (λαμβάνεται θετική όταν είναι έμπρυσμη)

Λόγω του σημαντικού μεγέθους που παίρνει η T_V , η μετρούμενη αντίσταση του σκάφους πρέπει να λαμβάνεται για ένα εκτόπισμα μειωμένο κατά το μέγεθος $\delta\Delta$ που δίνεται από τη σχέση:

$$\delta\Delta = T_V = T_H \cdot \tan(\tau + 6.5) = R_T \cdot \tan(\tau + 6.5)$$

Για το μοντέλο NTUA-116/96 από πείραμα αντιστάσεως στην πειραματική δεξαμενή προέκυψε ο ακόλουθος Πίνακας 9:

Πίνακας 9

α/α	Ταχύτητα Προτύπου V_m [m/s]	Αντίσταση R_T [Kp]	Δυναμική Διαγωγή τ [deg]	Αποφόρτιση [kgf]
1	1.777	2.0945	-0.323	0.251
2	3.554	5.9324	-2.006	0.888

Οι συναρτήσεις μεταφοράς ήταν οι ακόλουθες:

Αντίσταση:

$$y = 2,582674 \cdot x + 0,0044236$$

Προνευτασμός:

$$y = -2,545315 \cdot x - 0,041743$$

8.2.3 Βαθμονόμηση οργάνων μέτρησης (Calibration)

Τα μεγέθη που ζητήθηκε να μετρηθούν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν τα εξής:

- Αντίσταση (Resistance)
- Κατακόρυφη κίνηση (Heave)
- Πρόνευση (Pitch)
- Κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη (Bow Acceleration)
- Κατακόρυφη επιτάχυνση στο κέντρο βάρους του προτύπου (Mid. Acceleration)
- Κατακόρυφη επιτάχυνση στην πρύμνη (Stern Acceleration)
- Μετρητής ανύψωσης κύματος αισθητήρα φορείου (Wave Car Probe)
- Μετρητής ανύψωσης κύματος αισθητήρας δεξαμενής (Wave Tank Probe)

Για το σκοπό αυτό, ήταν τοποθετημένα μόνιμα μέσα στο μοντέλο τα τρία επιταχυνσιόμετρα, στις θέσεις που έχουν προαναφερθεί για τη μέτρηση των κατακόρυφων επιταχύνσεων, ο αισθητήρας Wave Car Probe μόνιμως πακτωμένος πάνω στο κινητό φορείο και ο αισθητήρας Wave Tank Probe μόνιμως πακτωμένος σε συγκεκριμένο σημείο μέσα στη δεξαμενή. Όσον αφορά τις κινήσεις Heave, Pitch και την αντίσταση, αυτές μετρούνται μέσω του ειδικού οργάνου – δυναμόμετρου.

Πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι όμως απαραίτητη η βαθμονόμηση όλων των οργάνων μέτρησης, ώστε να ελεγχθεί αν λειτουργούν σωστά και να γίνει γνωστή η συνάρτηση μεταφοράς σύμφωνα με την οποία μπορούμε να μετατρέψουμε τα Volts που μετριοούνται όταν λαμβάνει χώρα το πείραμα, στις επιθυμητές για κάθε μέγεθος μονάδες. Η βαθμονόμηση θα πρέπει να επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα για την καλύτερη αξιοπιστία των πειραμάτων. Έτσι, στην περίπτωση μας ορισμένα από τα όργανα ήταν υποχρεωτικό να βαθμονομούνται καθημερινά ενώ κάποια άλλα όχι τόσο συχνά.

Ειδικότερα, η βαθμονόμηση των επιταχυνσιομέτρων έγινε πριν την εγκατάσταση τους στο μοντέλο, καθώς είναι πολύ σταθερά ως όργανα και οι μηδενικές τιμές που λαμβάναμε δειγματοληπτικά καθημερινά ήταν οι ίδιες. Αρκετά σταθερά ως προς τις καιρικές μεταβολές ήταν επίσης ο αισθητήρας του Heave, ο αισθητήρας του Pitch, καθώς και το όργανο μέτρησης της αντίστασης, με αποτέλεσμα να μετρούνται στην αρχή κάθε εβδομάδας πειραμάτων.

Αντιθέτως, οι δύο αισθητήρες της κατακόρυφης ανύψωσης των κυματισμών Wave Car Probe και Wave Tank Probe έχουν από κατασκευής μεγάλη ευαισθησία στις καιρικές μεταβολές, επομένως ήταν επιτακτική η ανάγκη για καθημερινή βαθμονόμηση και εύρεση της συνάρτησης μεταφοράς πριν την αρχή των πειραμάτων της εκάστοτε ημέρας.

8.2.4 Τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων

Τα πειράματα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής με την βοήθεια του προσωπικού του Εργαστηρίου.

Κάθε πρωί γινόταν έλεγχος του μοντέλου όσον αφορά το δέσιμό του πάνω στο φορείο, ενώ στο τέλος της εβδομάδας το μοντέλο έβγαινε εκτός νερού για να ελεγχθεί για τυχόν ρωγμές (cracks), έμενε εκτός για τις δύο ημέρες αργίας και ξανατοποθετούνταν στο νερό στην αρχή της εβδομάδας. Αφού το φορείο ήταν έτοιμο, ξεκινούσε η βαθμονόμηση των οργάνων όπως αυτή αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Συγκεκριμένα, γινόταν ανελλιπώς καθαρισμός των αισθητήρων ανύψωσης κύματος Wave Car Probe και Wave Tank Probe και ύστερα βαθμονόμηση τους. Πολλές φορές ακολουθούσε και βαθμονόμηση της αντίστασης ή των υπολοίπων οργάνων μέτρησης, συμπληρώνονταν το ειδικό Φύλλο Βαθμονομήσεων και υπολογιζόταν η συνάρτηση μεταφοράς με τη βοήθεια του Microsoft Excel.

Μετά το πέρας αυτών των προκαταρκτικών διαδικασιών δίναμε στον κυματιστήρα το επιθυμητό φάσμα σε μορφή αρχείου, το οποίο θα έπρεπε να είναι ήδη αποθηκευμένο στον υπολογιστή του κυματιστήρα και ο κυματιστήρας παρήγαγε τα δεδομένα κύματα. Όταν τα κύματα έφταναν στο άλλο άκρο της δεξαμενής όπου βρισκόταν το φορείο με το μοντέλο, ξεκινούσαμε το φορείο έχοντας δώσει 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 τελείωνε και το πείραμα.

Μετά από κάθε πείραμα ήταν αναγκαία η αναμονή περίπου δεκαπέντε (12) λεπτών μέχρι να ξεκινήσει το επόμενο πείραμα, ώστε να έχει ηρεμήσει το νερό της δεξαμενής από τους προηγούμενους κυματισμούς και σε κάθε επανάληψη του πειράματος ο κυματιστήρας να δημιουργηθεί κύμα από ηρεμία. Όλα τα πειράματα καθώς και οι λεπτομέρειες αυτών καταγράφονταν καθημερινά στο ειδικό Φύλλο Πειραμάτων Δυναμικής Συμπεριφοράς σε Κυματισμούς.

8.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Όπως έχει αναφερθεί, όλα τα όργανα των μετρήσεων καταγράφονται ως τάσεις μέσω ειδικού προγράμματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του φορείου. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητος κάποιος μετασχηματισμός ώστε να δοθούν τα αποτελέσματα από μονάδες μέτρησης βολτς 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», ανοίγει με το πρόγραμμα «Fortran PowerStation 4.0» και είναι επεξεργάσιμος από το υποπρόγραμμα «Microsoft Developer Studio».

Για να γίνει η ανάλυση κατά Fourier πρέπει να καταχωρηθούν μέσα στον κώδικα οι συναρτήσεις μεταφοράς για κάθε μέγεθος και το όνομα των αρχείων που θα πρέπει να αναλυθεί. Το πρόγραμμα δίνει τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης που διεξάγει σε δύο αρχεία. Το ένα είναι του τύπου «_.out» που έχει όλα τα μεγέθη σε φάσματα $S(f)$ για διάφορες συχνότητες f , ενώ το δεύτερο αρχείο είναι της μορφής «_.rms» και δίνει για όλα τα μεγέθη τις τιμές rms (root mean square) των αποκρίσεων, δηλαδή τις μέσες τετραγωνικές τιμές.

Με εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας έγινε όλη η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για κάθε κατάσταση θάλασσας στην οποία είχαν γίνει πειράματα. Τα αναλυμένα σε Fourier αποτελέσματα αντιγράφηκαν ύστερα σε Microsoft Excel αρχεία και έγιναν τα απαιτούμενα διαγράμματα. Επίσης, προκειμένου να κάνουμε σύγκριση των δύο μετρούμενων φασμάτων κύματος, από τους δύο αισθητήρες της κατακόρυφης ανύψωσης των κυματισμών Wave Car Probe και Wave Tank Probe, χρειάστηκε να τα μεταφέρουμε στο ίδιο σύστημα αναφοράς. Στο κινούμενο σύστημα έχουμε φάσμα $S(f_e)$ και συχνότητα f_e , ενώ στο ακίνητο το φάσμα είναι $S(f_o)$ και η συχνότητα f_o . Οι σχέσεις σύμφωνα με τις οποίες γίνεται η μεταφορά από το κινούμενο σύστημα αναφοράς δίνονται παρακάτω:

- Η κυκλική συχνότητα ω_0 στο ακίνητο σύστημα αναφοράς συναρτήσει του κινούμενου:

$$\omega_0 = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4 \cdot \omega_e \cdot \frac{V}{g}}}{2 \cdot \frac{V}{g}}$$

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

$$f_0 = \frac{\frac{-1}{2 \cdot \pi} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi}\right)^2 + 4 \cdot \frac{V}{g} \cdot \frac{f_e}{2 \cdot \pi}}}{2 \cdot \frac{V}{g}}$$

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

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

9. Αποτελέσματα σε τυχαίους κυματισμούς

9.1 Γενικά

Τα στοιχεία των δύο καταστάσεων φόρτωσης για τις οποίες έγιναν τα πειράματα συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες:

NTUA 116/96
$\Delta = 64.618 \text{ Kg}$
$C_{DL} = 3.00$
$LCG = -0.345 \text{ m}$
$Trim = 0.000 \text{ deg}$
$T = 0.116 \text{ m}$
$L_{WL} = 2.783 \text{ m}$
$WS = 1.1304 \text{ m}^2$

NTUA 097/94
$\Delta = 29.615 \text{ Kg}$
$C_{DL} = 3.00$
$LCG = -0.297 \text{ m}$
$Trim = 0.000 \text{ deg}$
$T = 0.083 \text{ m}$
$L_{WL} = 2.145 \text{ m}$
$WS = 0.728 \text{ m}^2$

Το μοντέλο NTUA 116/96 με $C_{DL}=3.00$ δοκιμάστηκε υπό κλίμακα πραγματικού πλοίου 1:50 με συχνότητα δειγματοληψίας 20 Hz, δηλαδή 20 μετρήσεις το δευτερόλεπτο, στους παρακάτω αριθμούς Froude:

Αριθμός Froude	Ταχύτητα V_m	Χρόνος μέτρησης τρεξίματος (run)	Αριθμός runs για κάθε κατάσταση	Συνολικός χρόνος πειραμάτων
0.34	1.777 m/sec	30 sec	9	270 sec
0.68	3.554 m/sec	13 sec	20	260sec

Το μοντέλο NTUA 097/94 με $C_{DL}=3.00$ δοκιμάστηκε υπό κλίμακα πραγματικού πλοίου 1:50 με συχνότητα δειγματοληψίας 100 Hz, στον παρακάτω αριθμό Froude:

Αριθμός Froude	Ταχύτητα V_m	Χρόνος μέτρησης τρεξίματος (run)	Αριθμός runs για κάθε κατάσταση	Συνολικός χρόνος πειραμάτων
0.34	1.559 m/sec	35 sec	8	280 sec

9.2 Διαγράμματα αποτελεσμάτων πειραμάτων σε τυχαίους κυματισμούς

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται για κάθε είδος τυχαίου κυματισμού σε κάθε ταχύτητα τα διαγράμματα των φασμάτων $S(f)$ συναρτήσει της συχνότητας f και είναι τα εξής:

- 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 που ήταν τοποθετημένος μέσα στη δεξαμενή κοντά στον κυματιστήρα (Wave Tank).

2) μετρημένο από τον κινούμενο μαζί με το μοντέλο αισθητήρα μετασηματισμένο από το κινούμενο σύστημα αναφοράς στο ακίνητο, ώστε να είναι άμεσα συγκρίσιμο με το σε ακινησία μετρημένο φάσμα (Wave Car).

3) το θεωρητικό φάσμα που είχε ζητηθεί να παραχθεί από τον κυματιστήρα σύμφωνα με την εξίσωση του Bretschneider.

- Φάσματα Κατακόρυφων επιταχύνσεων $S(f)$ σε επιτάχυνση βαρύτητας στο τετράγωνο ανά Hertz (g^2/Hz) συναρτήσει της συχνότητας f σε Hertz στις τρεις θέσεις:

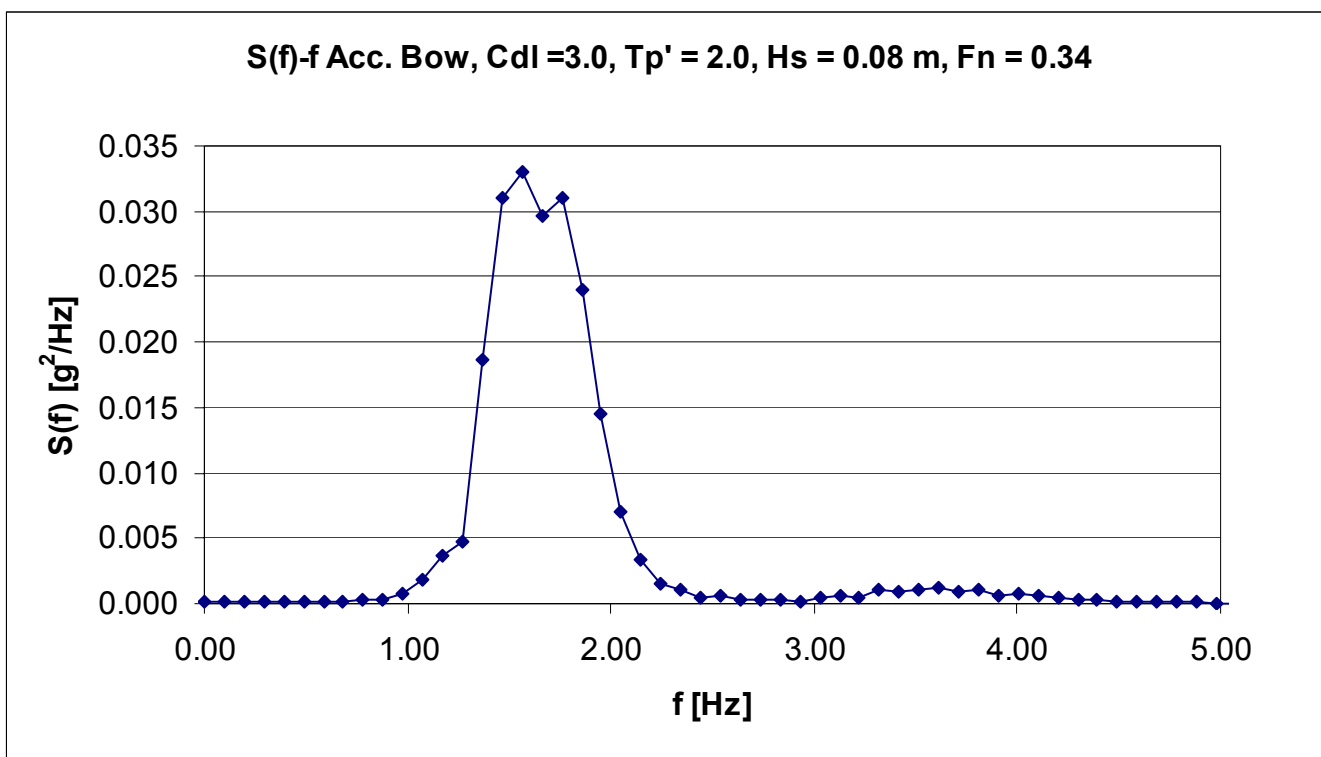
1.πρώραθεν

2.στη διαμήκη θέση κέντρου βάρους

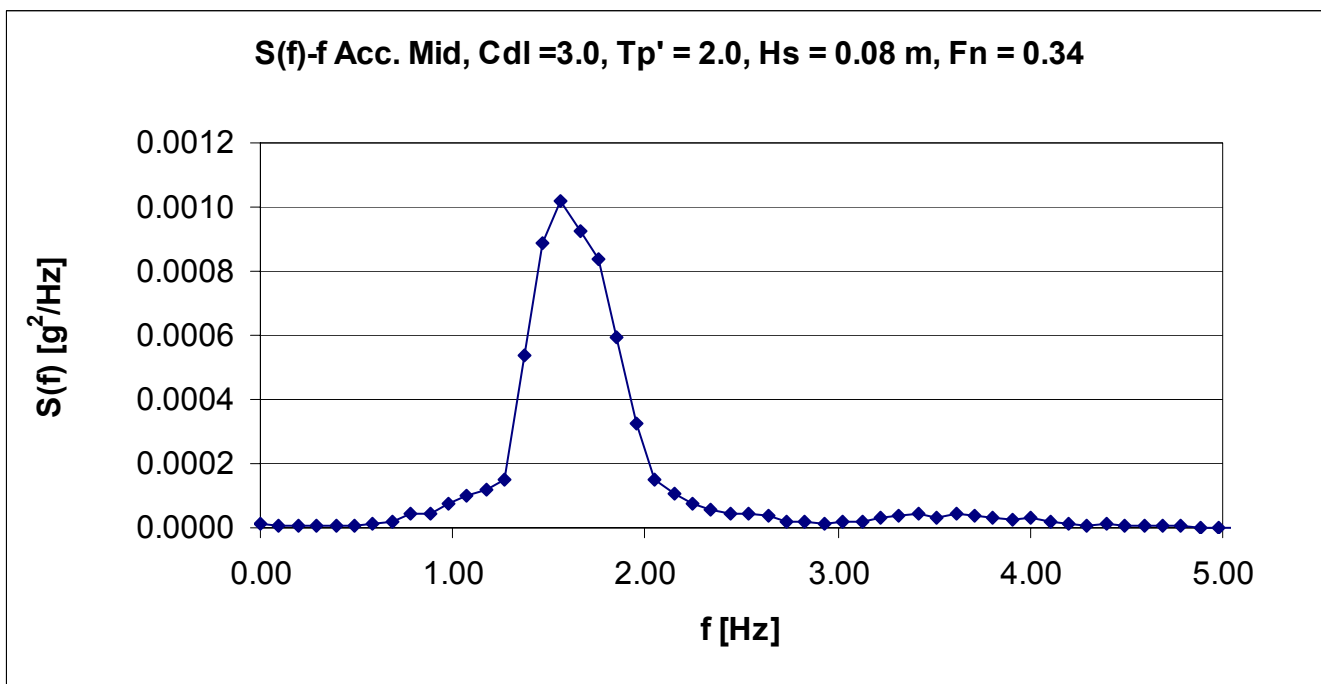
3.πρύμνηθεν

- 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.

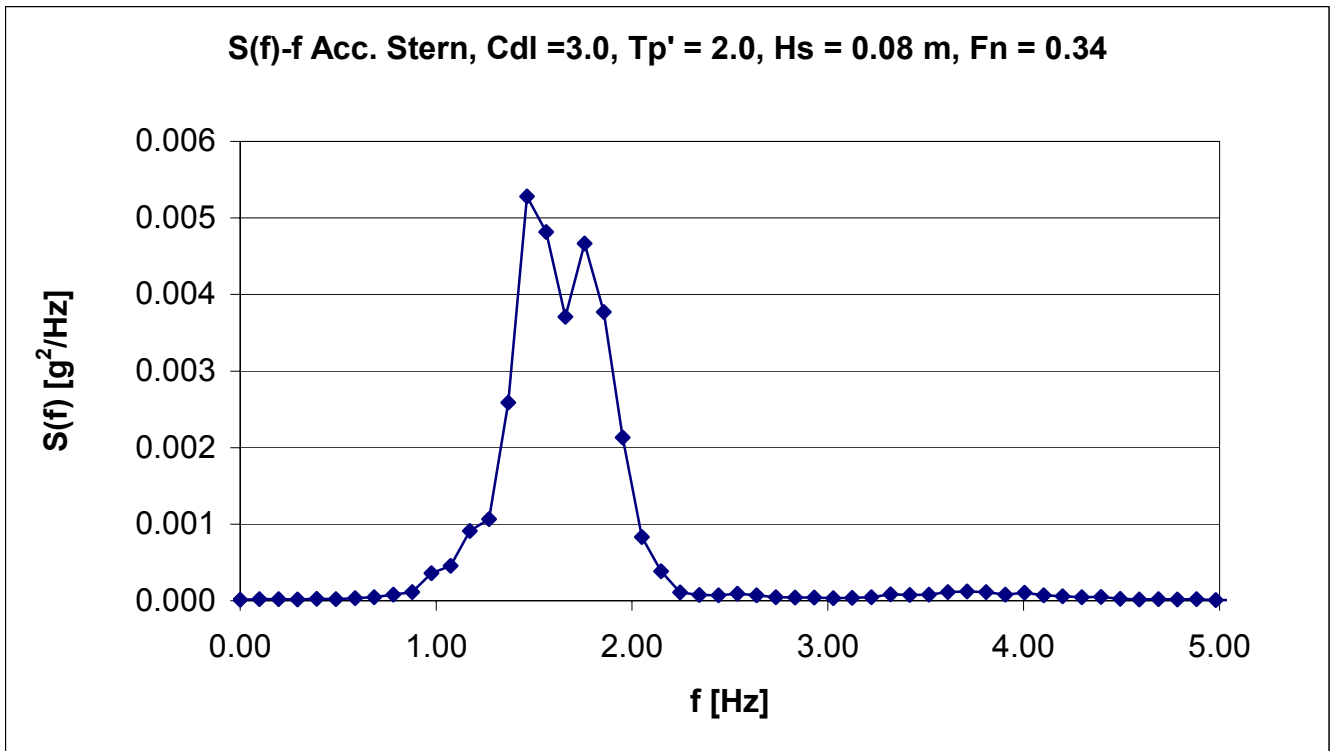
Αποτελέσματα μοντέλου NTUA 097/94 για $C_{dl} = 3.00$ και $F_n = 0.34$



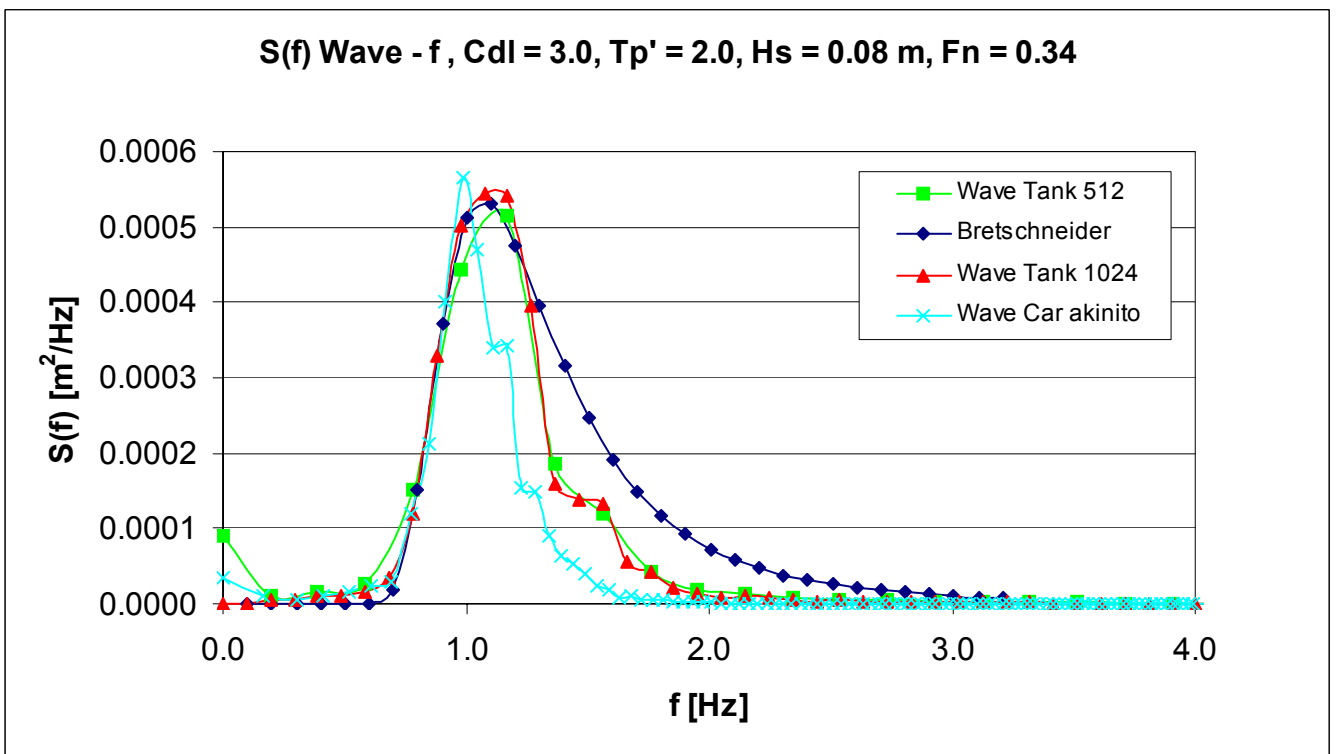
Σχήμα 1: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



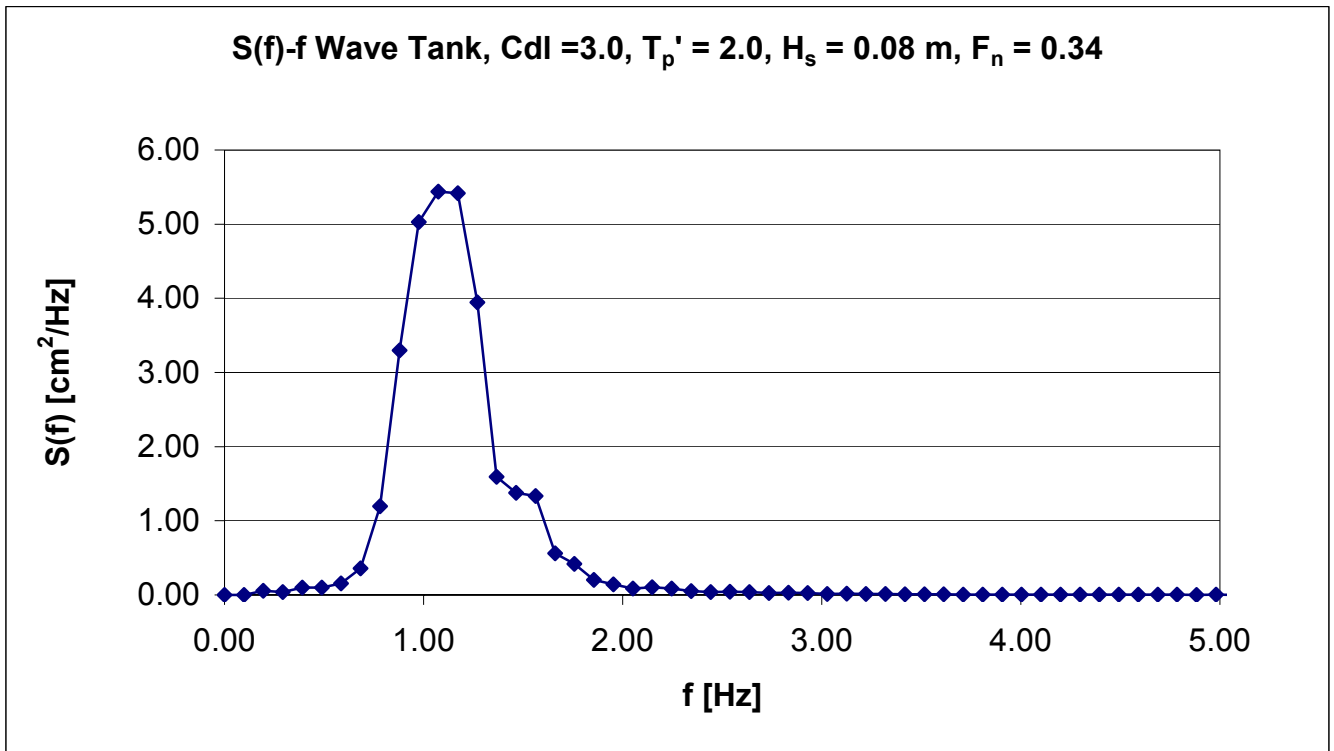
Σχήμα 2: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους



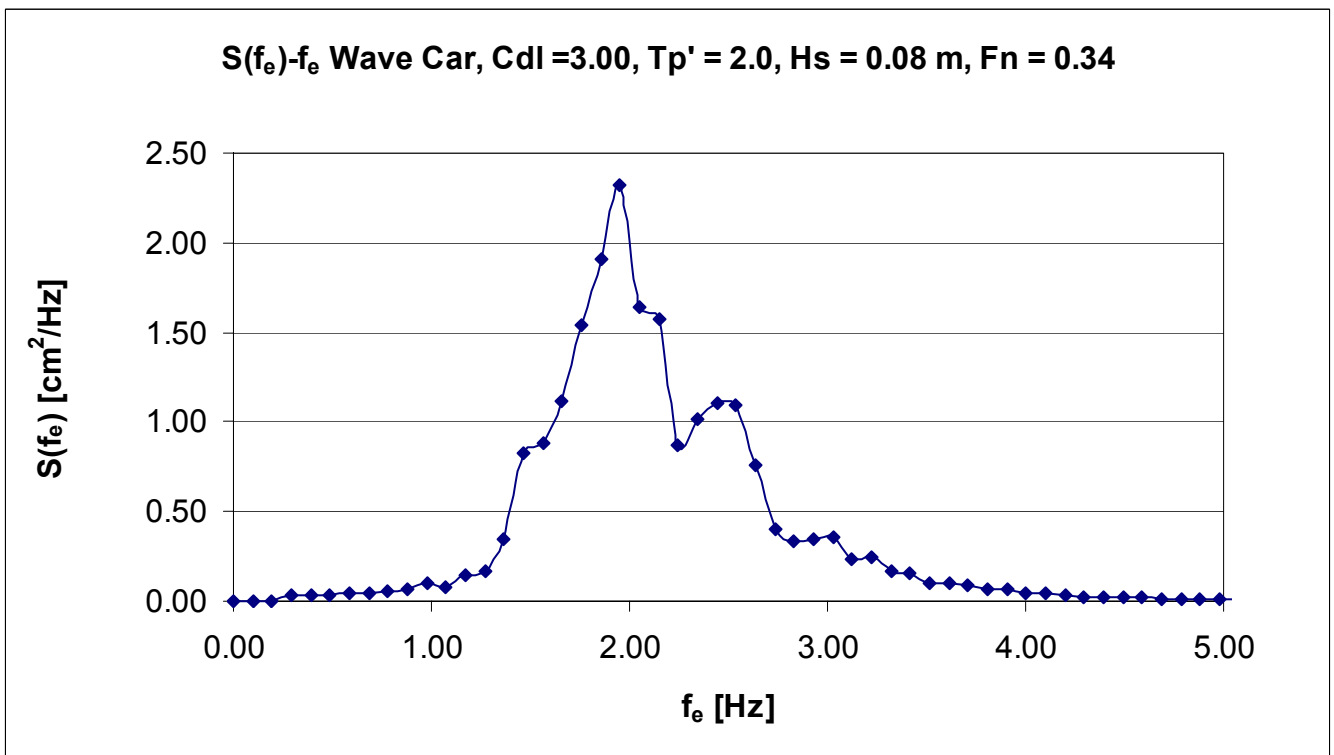
Σχήμα 3: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη



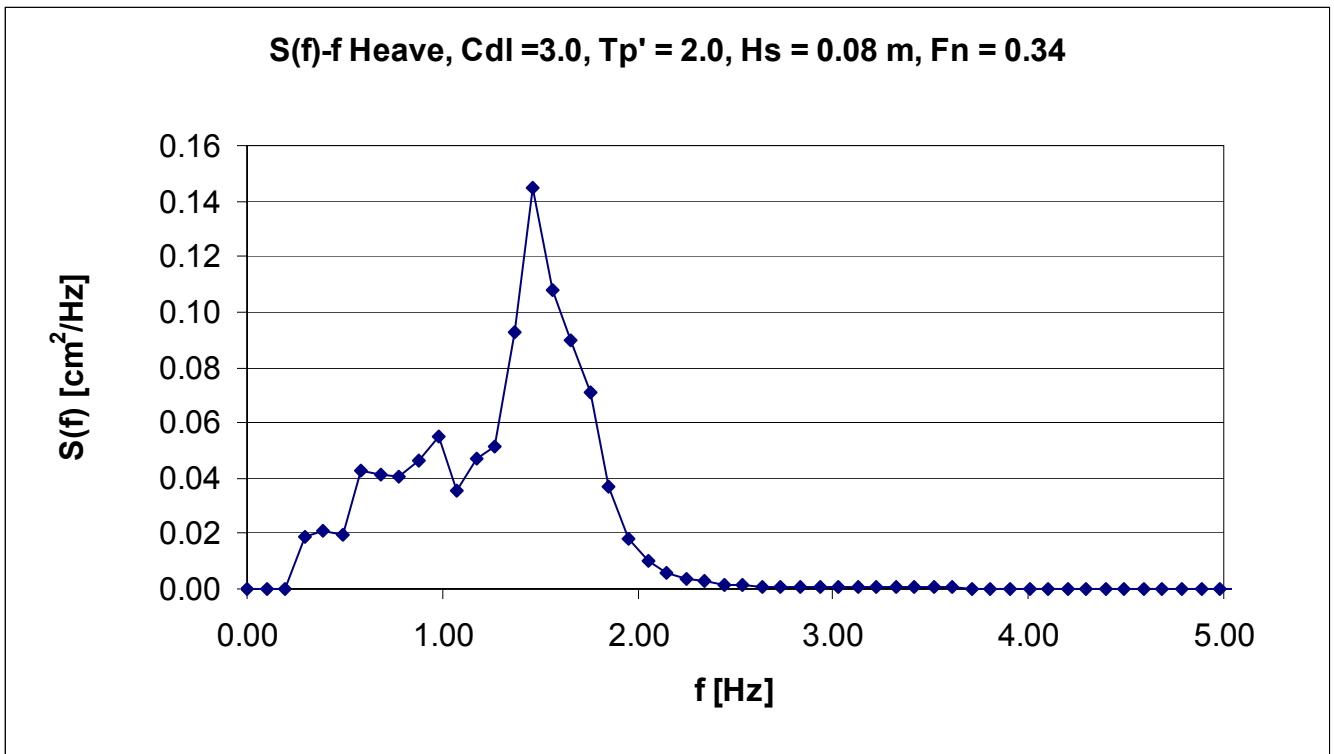
Σχήμα 4: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



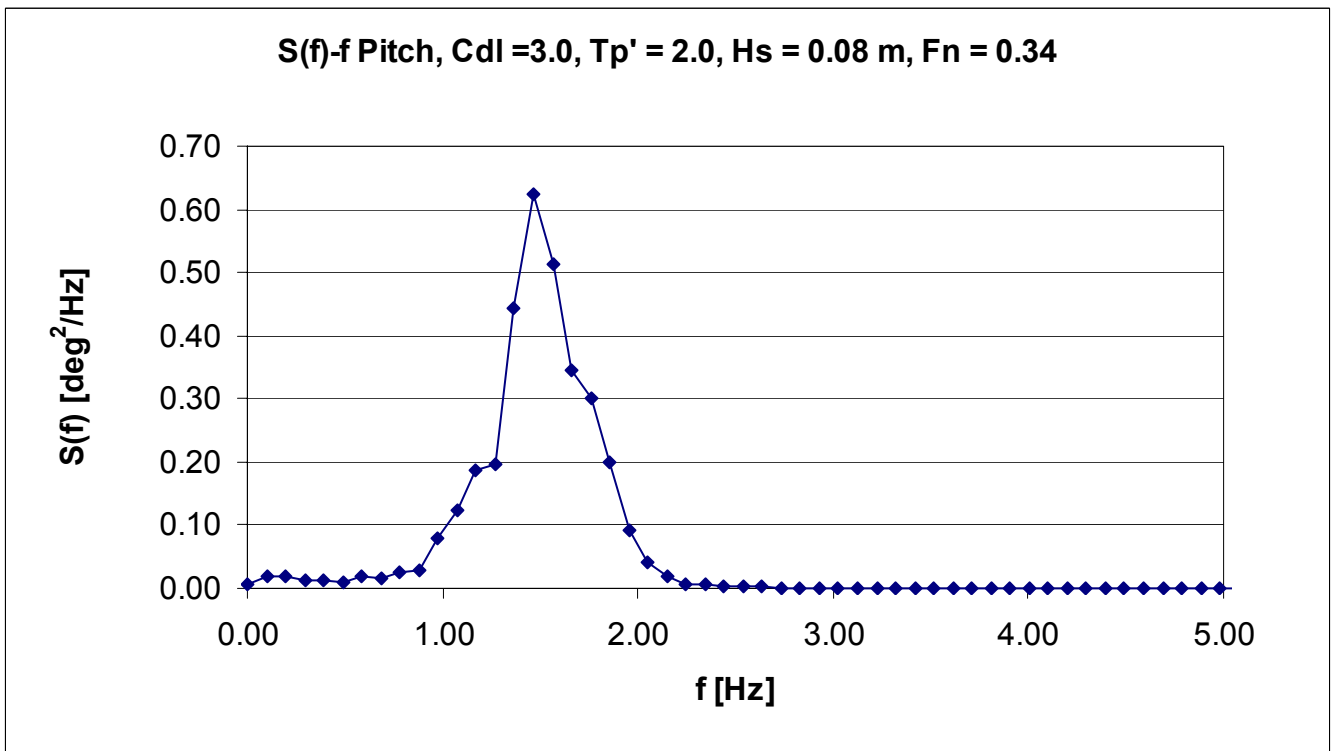
Σχήμα 5: Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος Wave Tank



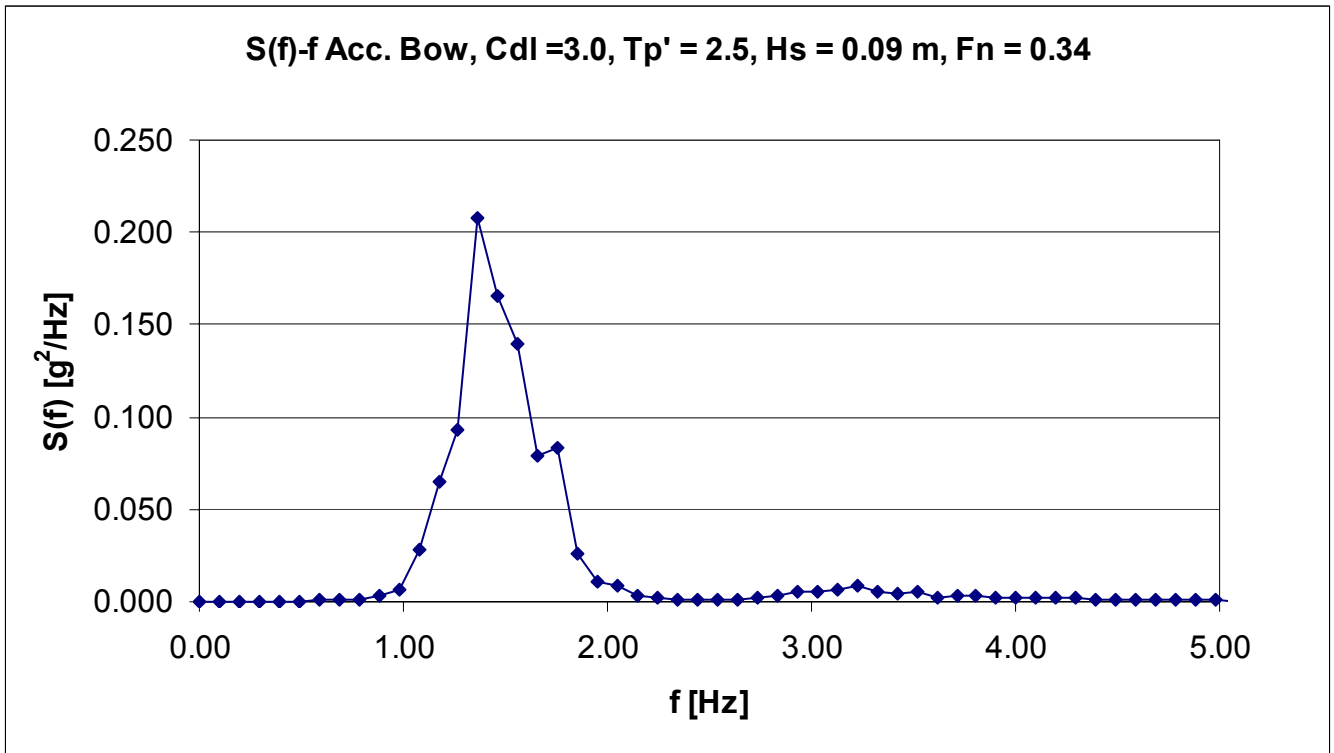
Σχήμα 6: Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος Wave Car



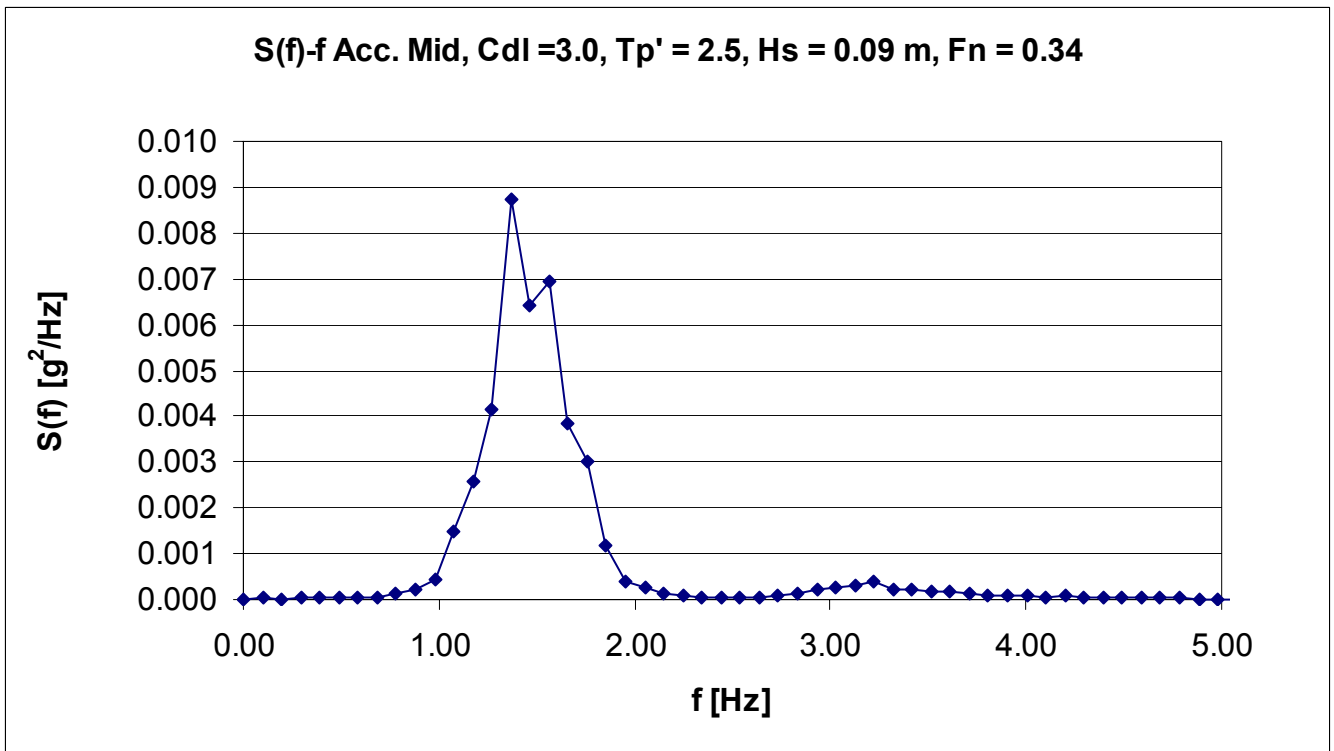
Σχήμα 7: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



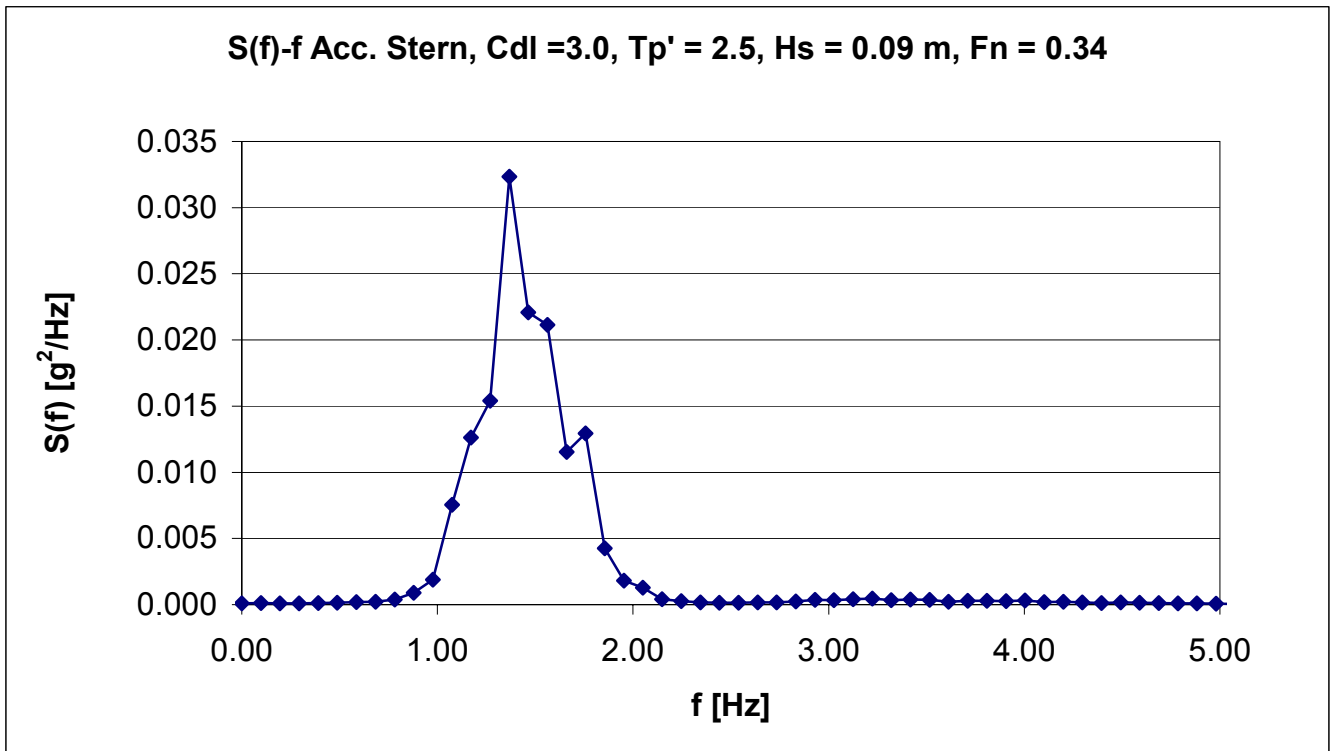
Σχήμα 8: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



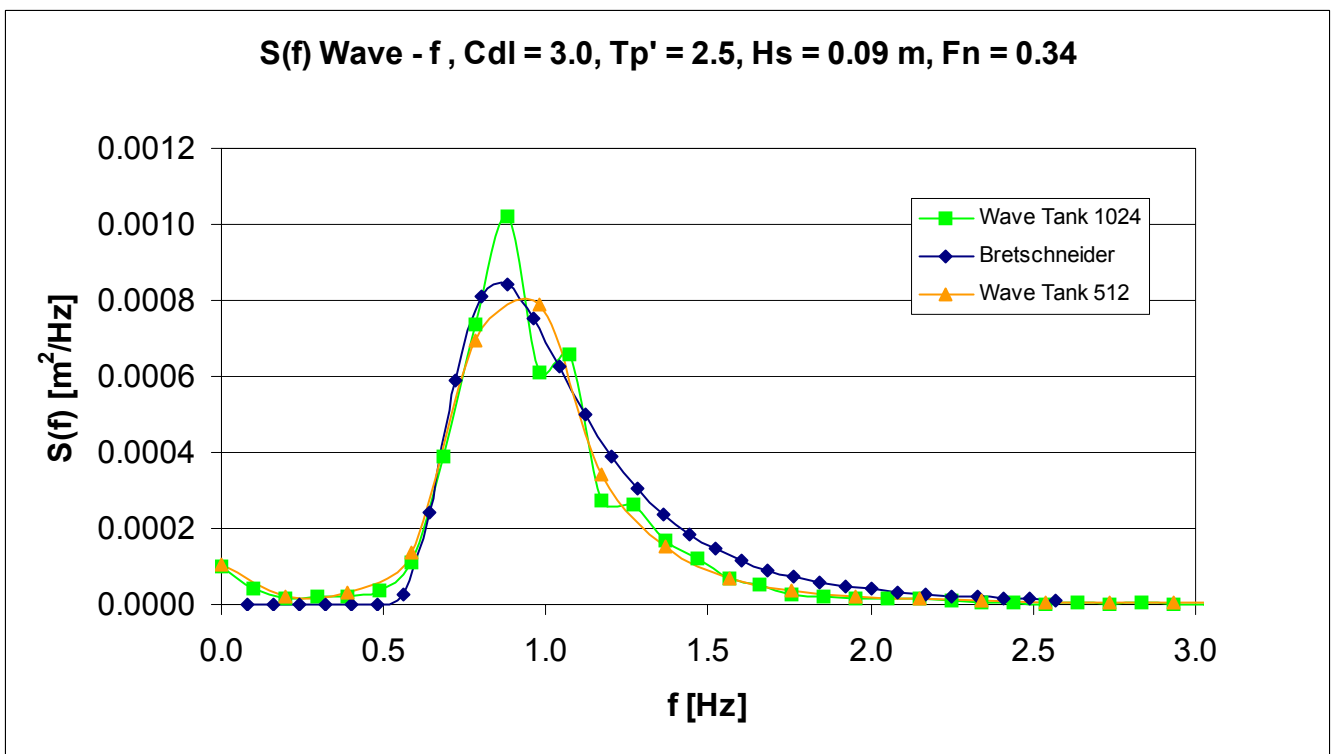
Σχήμα 9: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



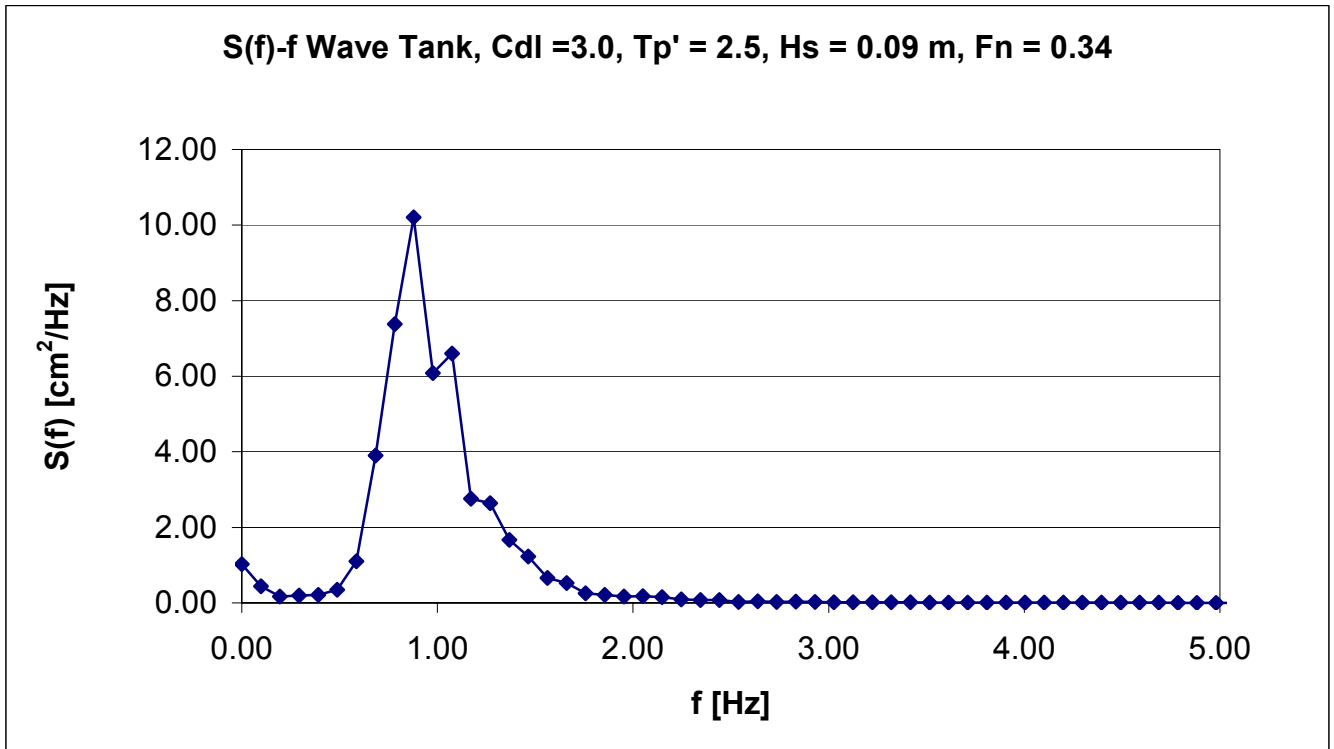
Σχήμα 10: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους



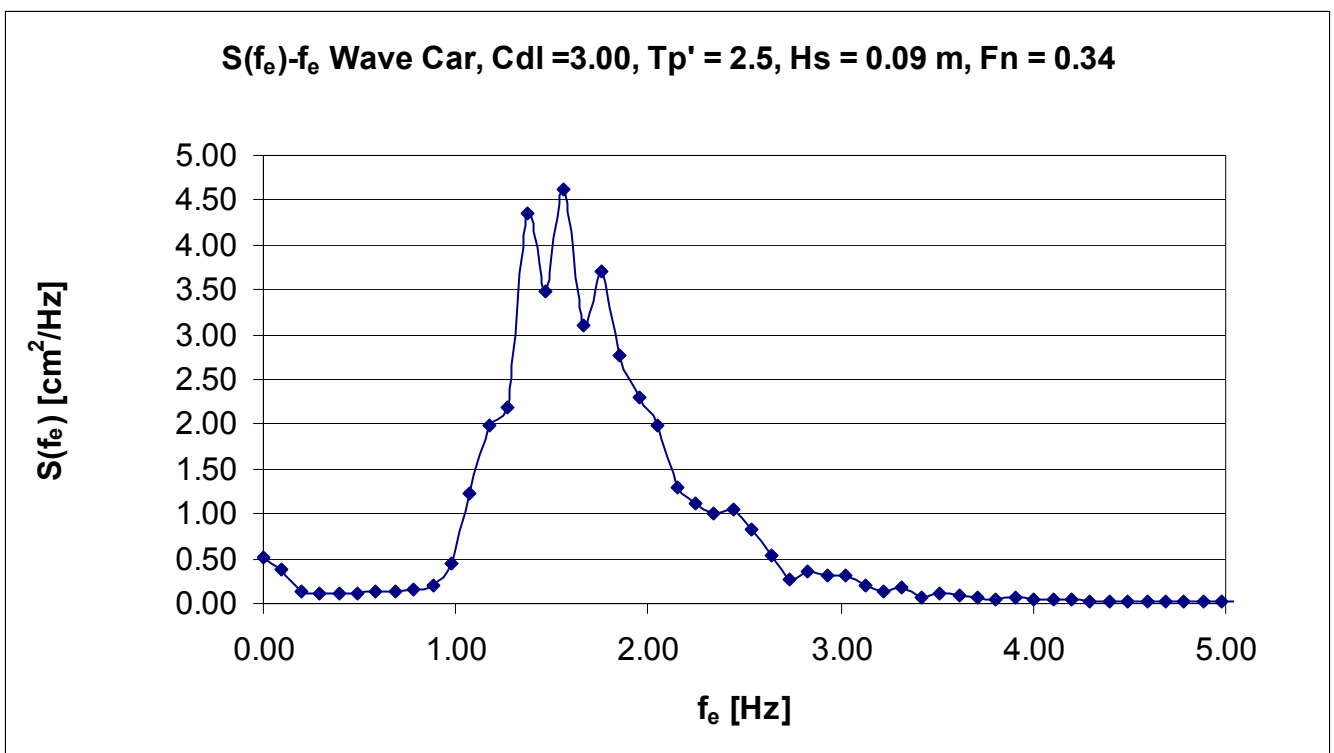
Σχήμα 11: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη



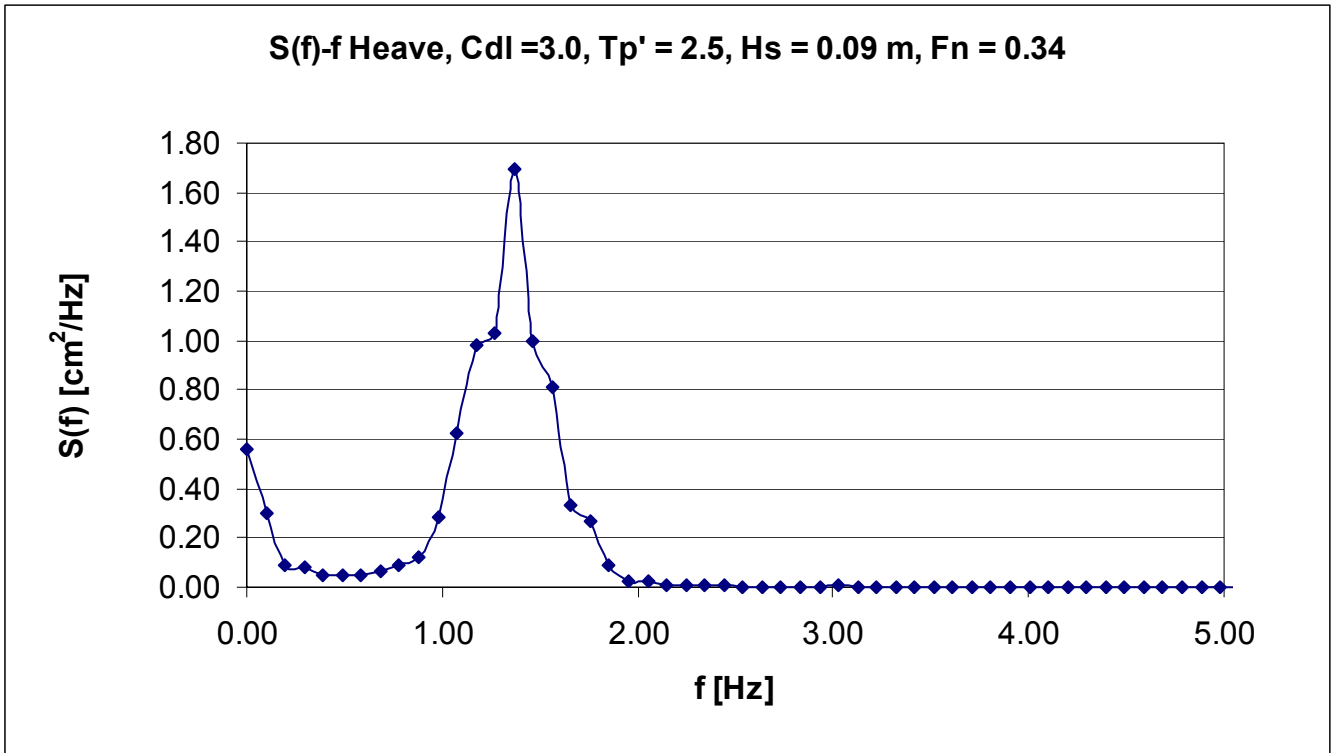
Σχήμα 12: Τροφοδοθηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



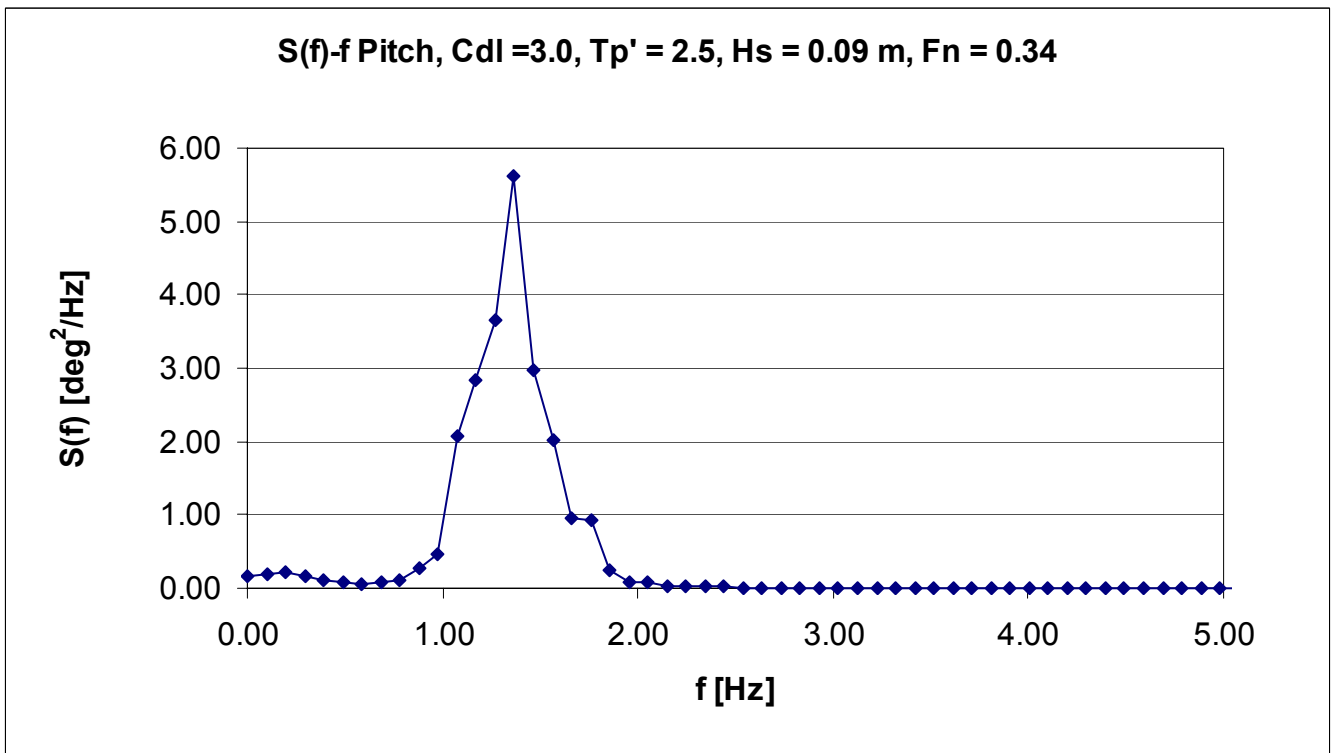
Σχήμα 13: Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος Wave Tank



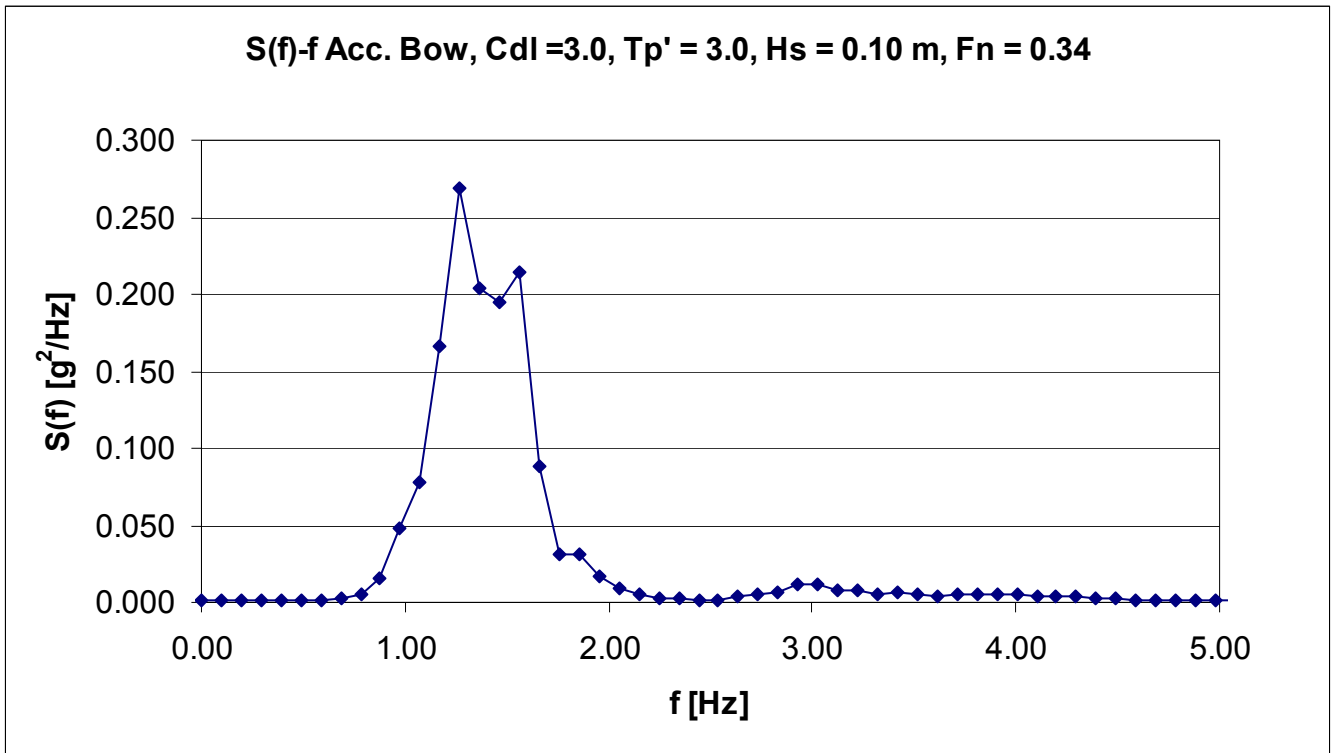
Σχήμα 14: Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος Wave Car



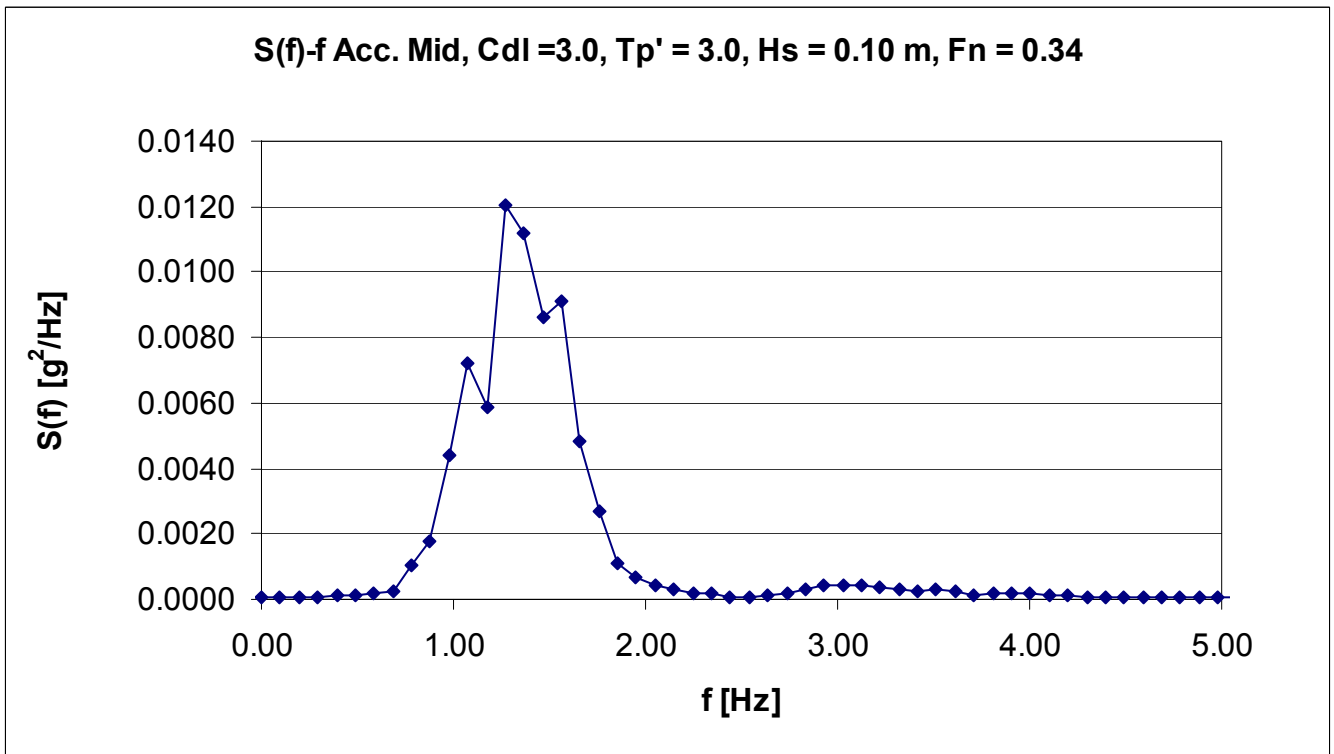
Σχήμα 15: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



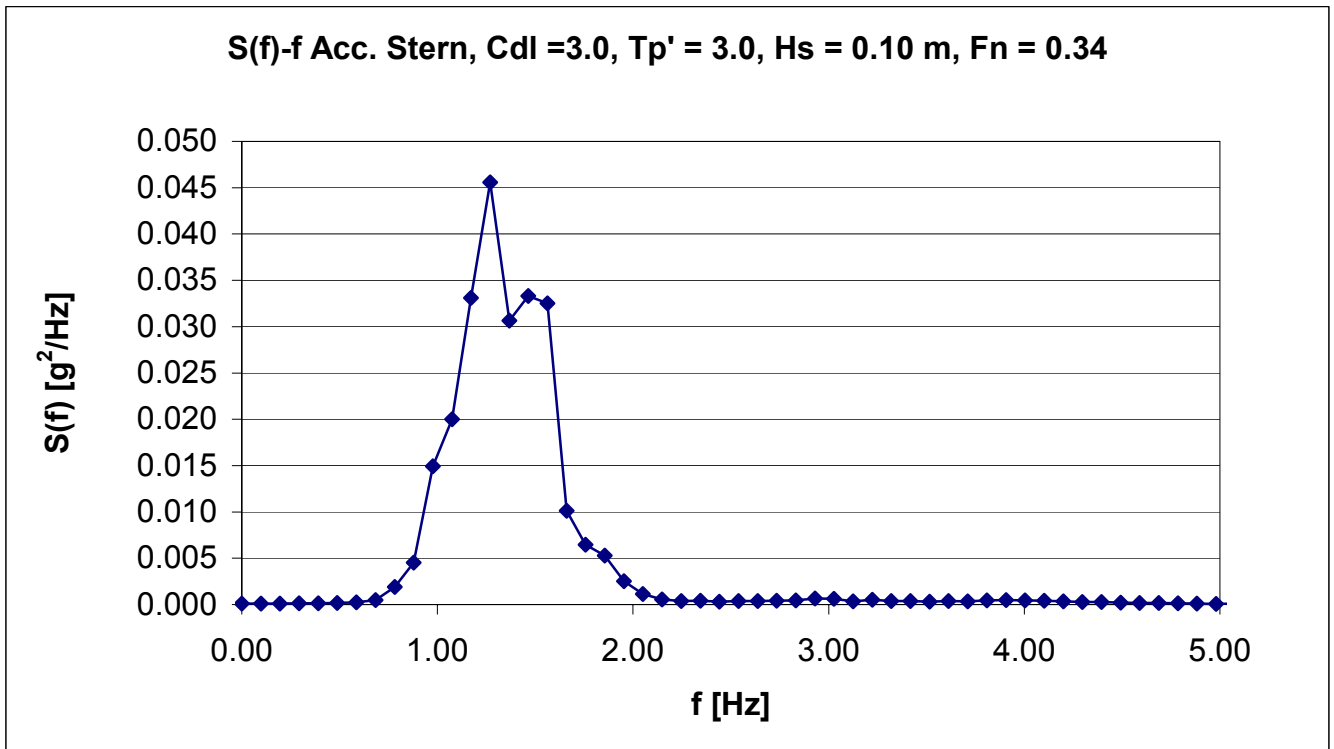
Σχήμα 16: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



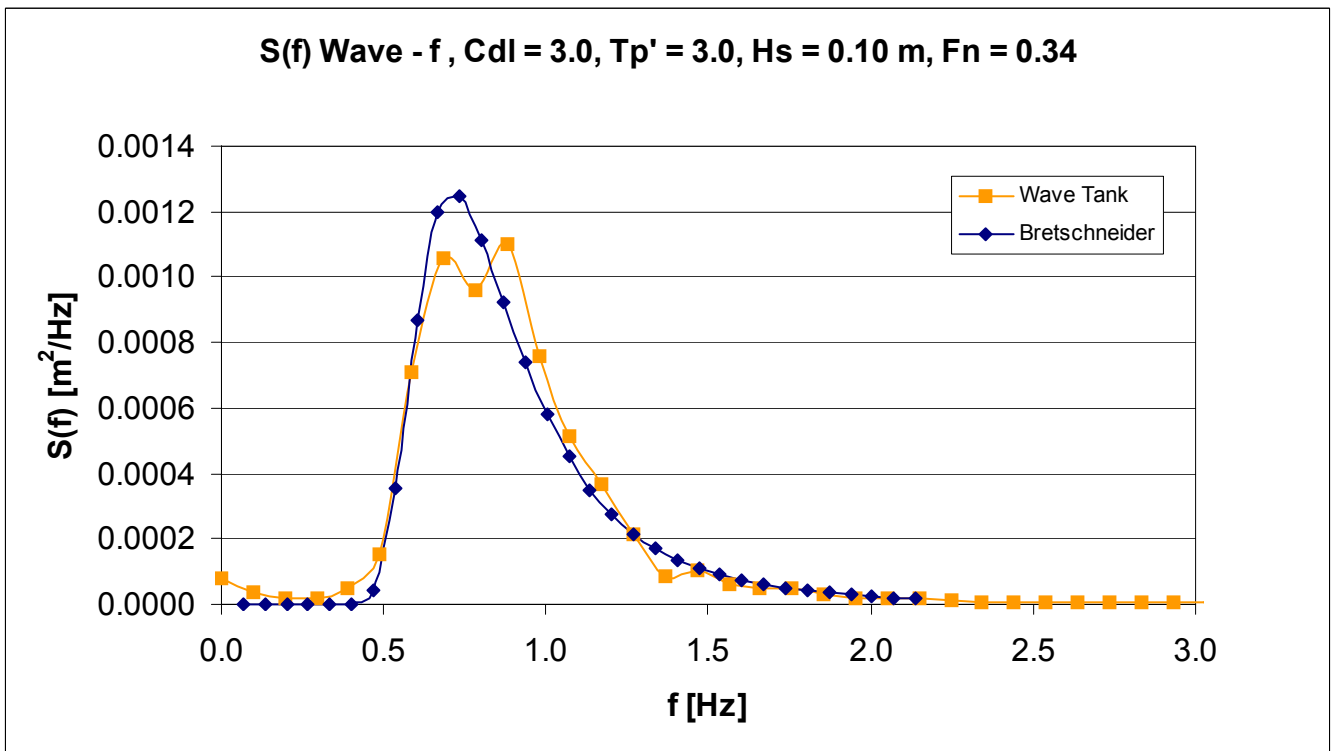
Σχήμα 17: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



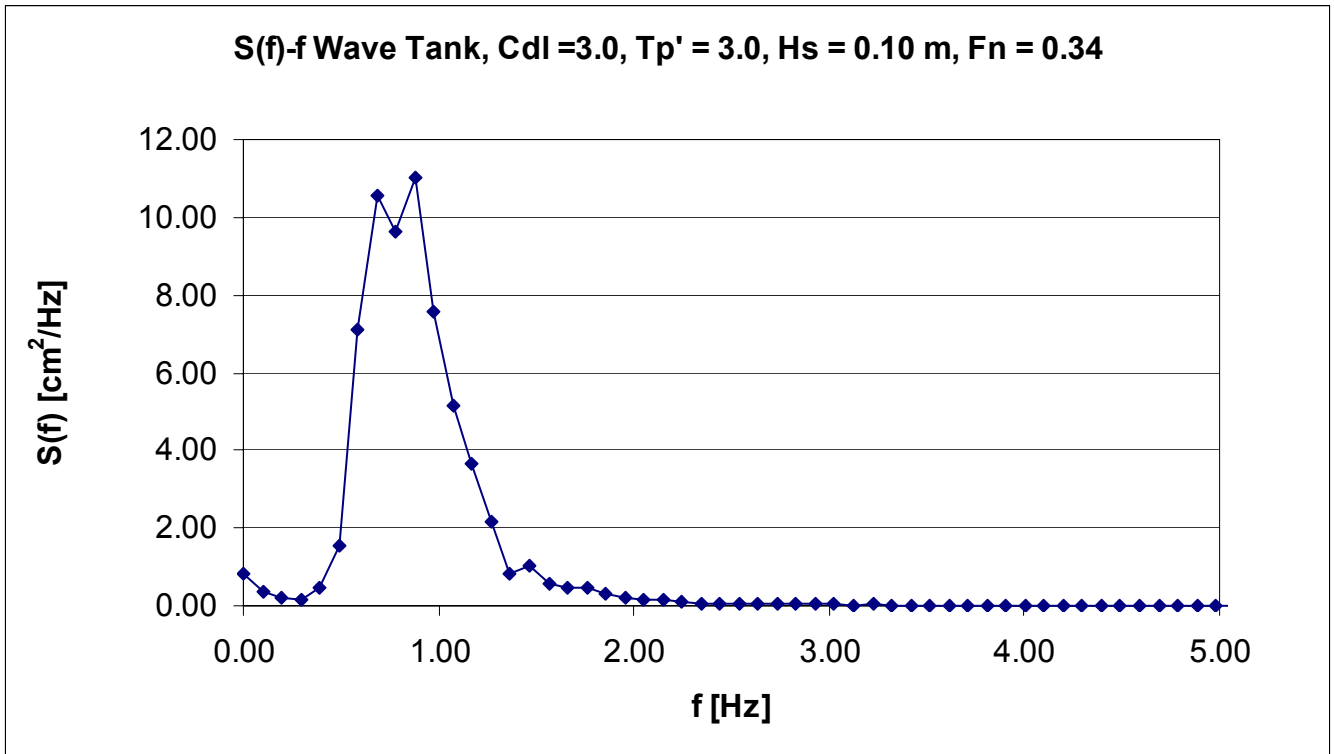
Σχήμα 18: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους



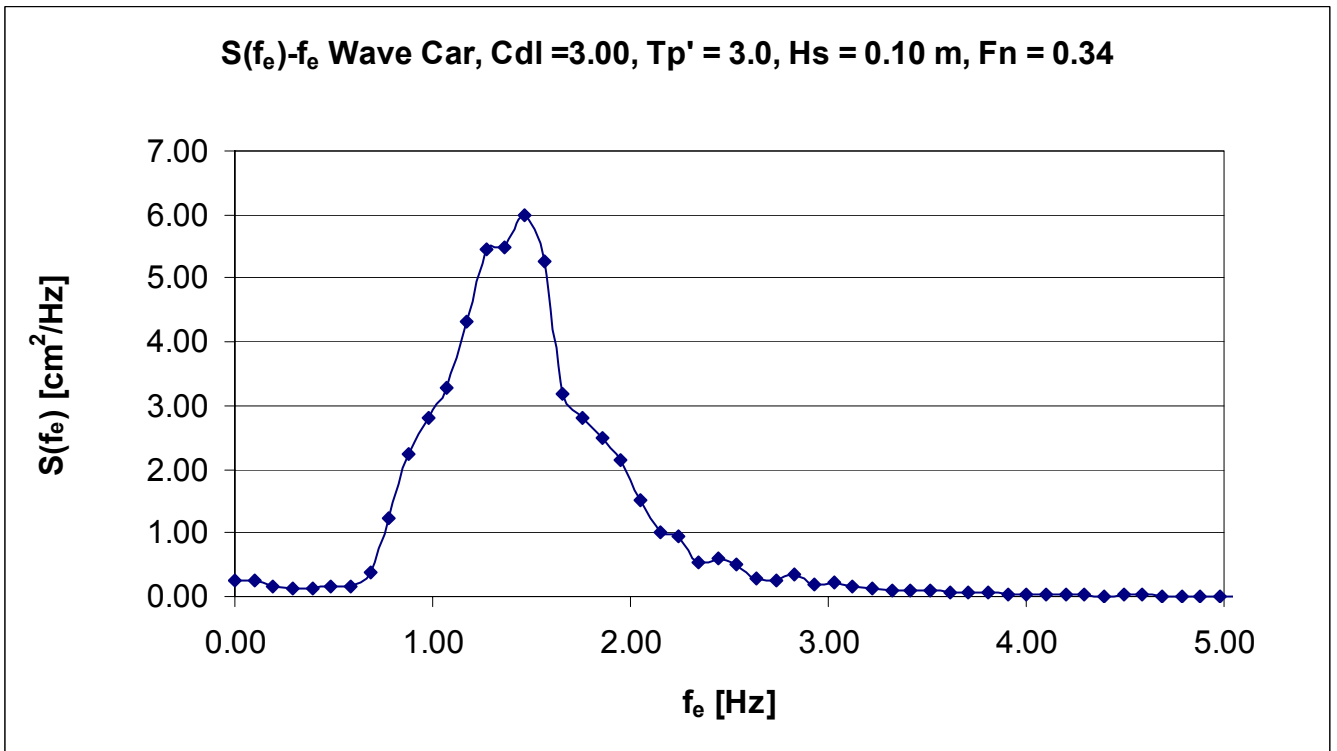
Σχήμα 19: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη



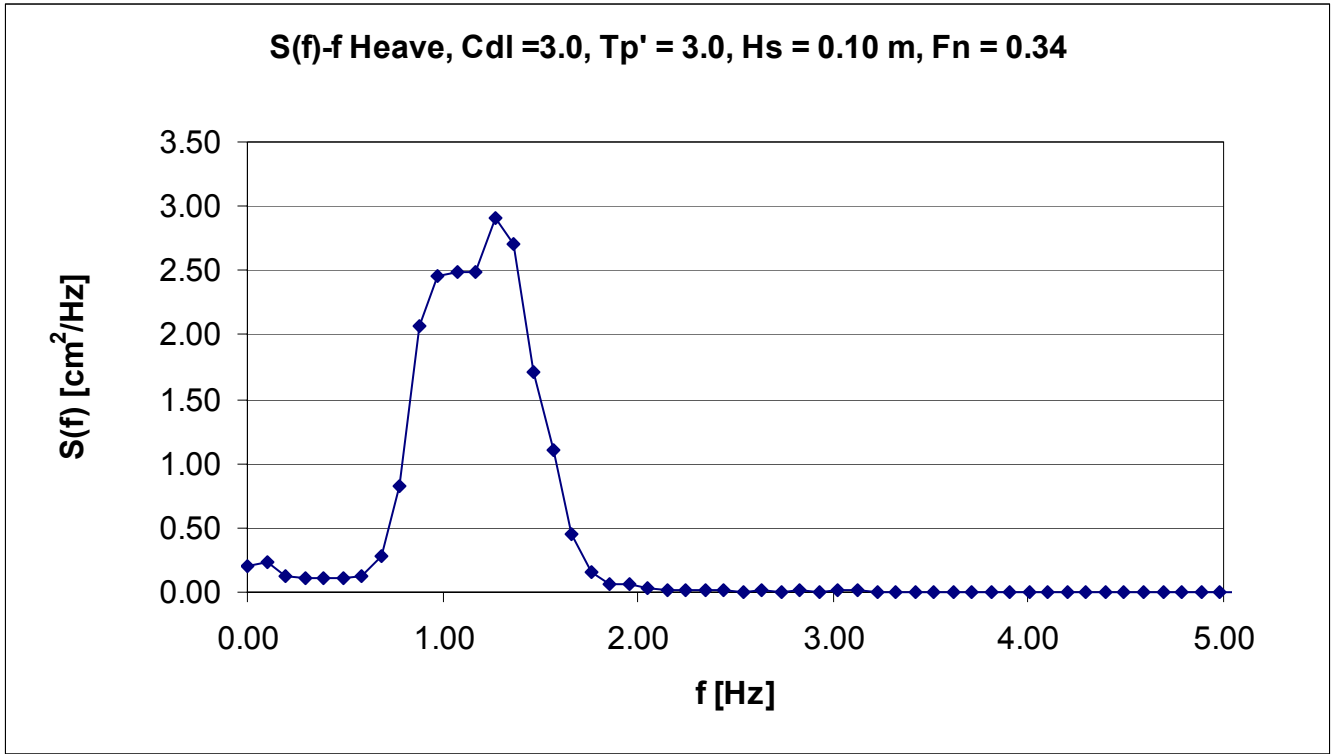
Σχήμα 20: Τροφοδοθηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



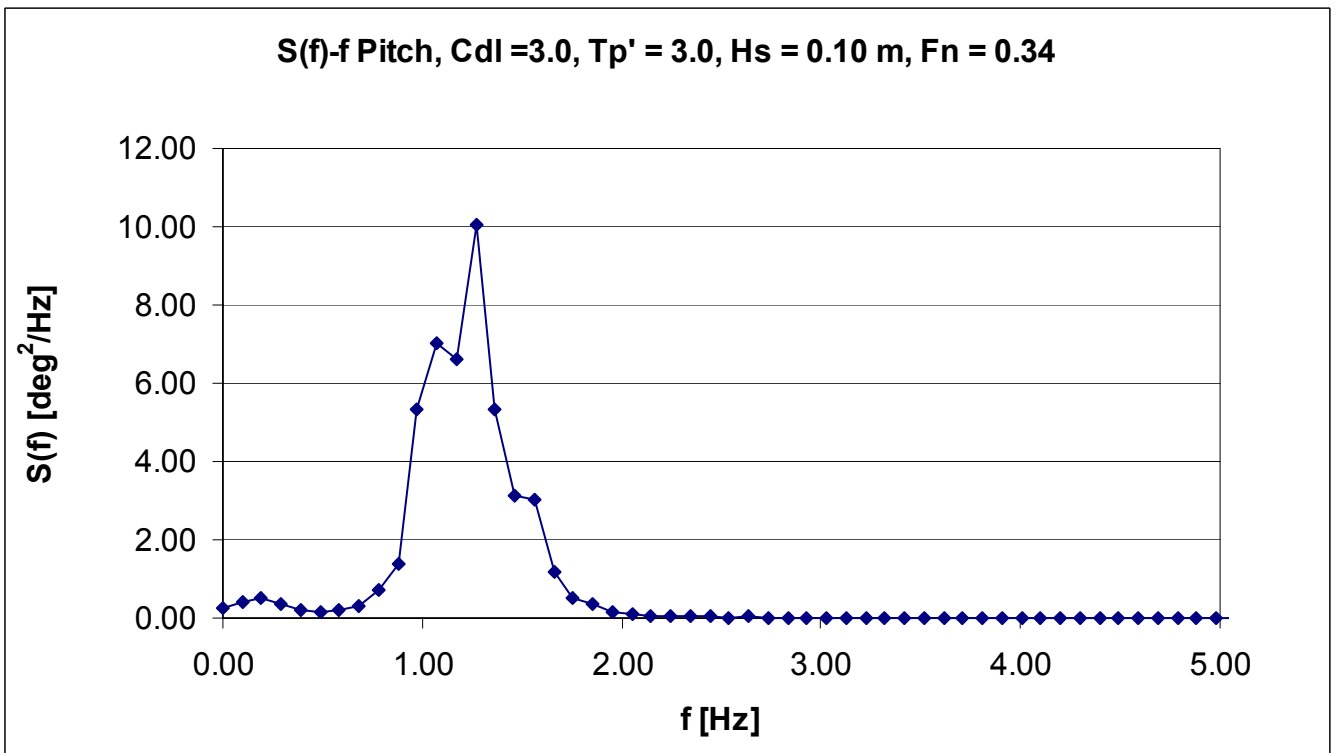
Σχήμα 21: Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος Wave Tank



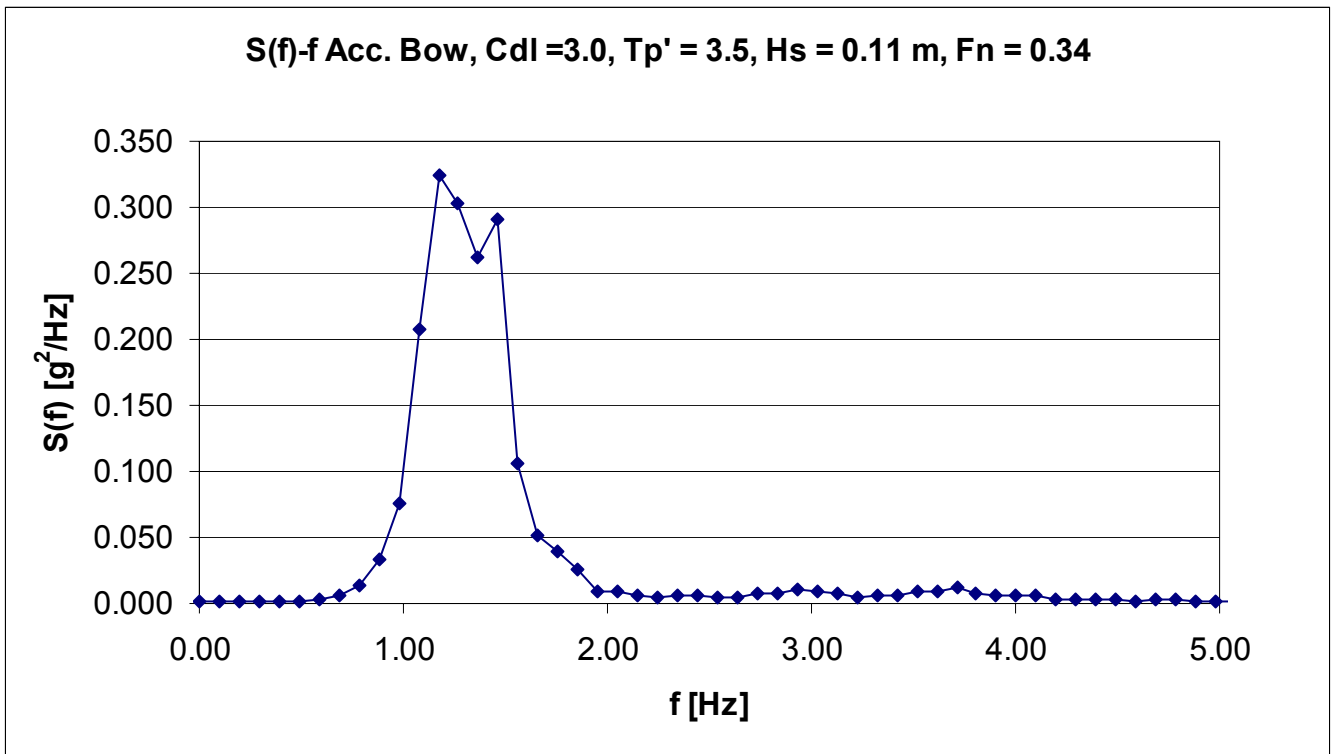
Σχήμα 22: Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος Wave Car



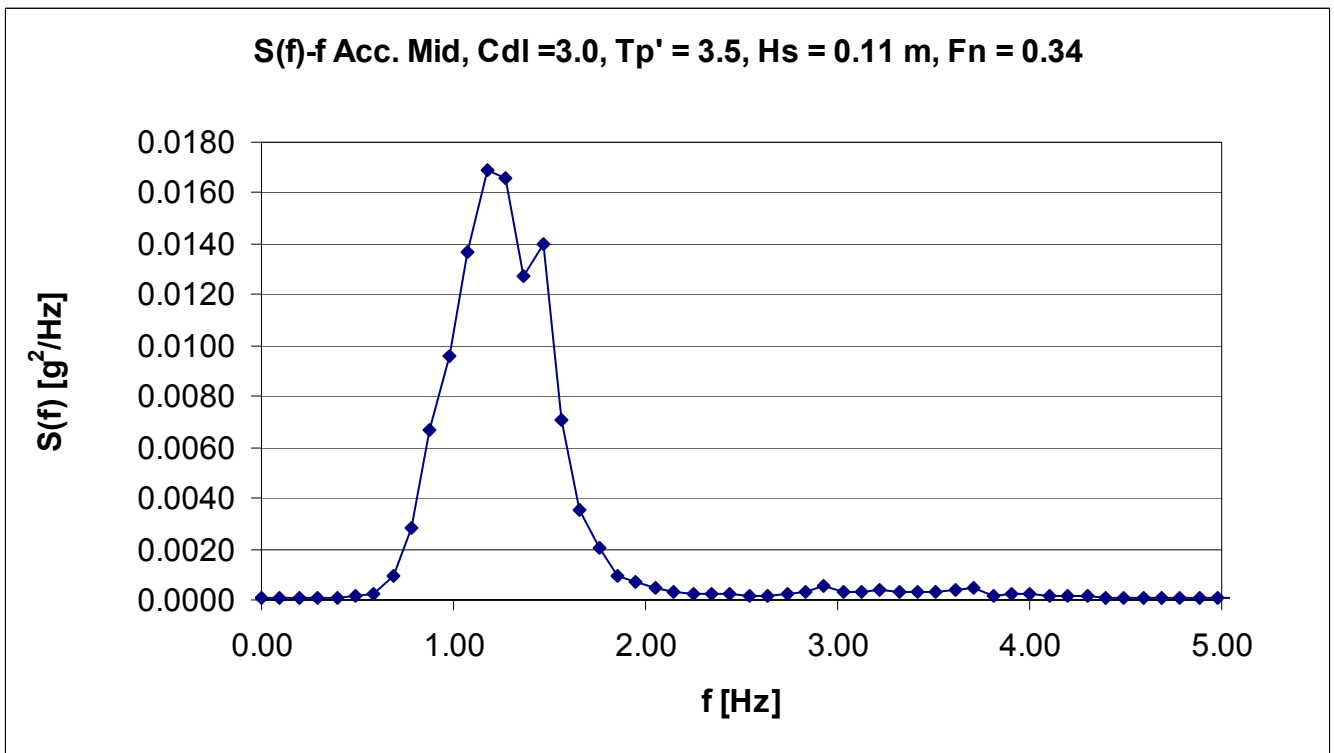
Σχήμα 23: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



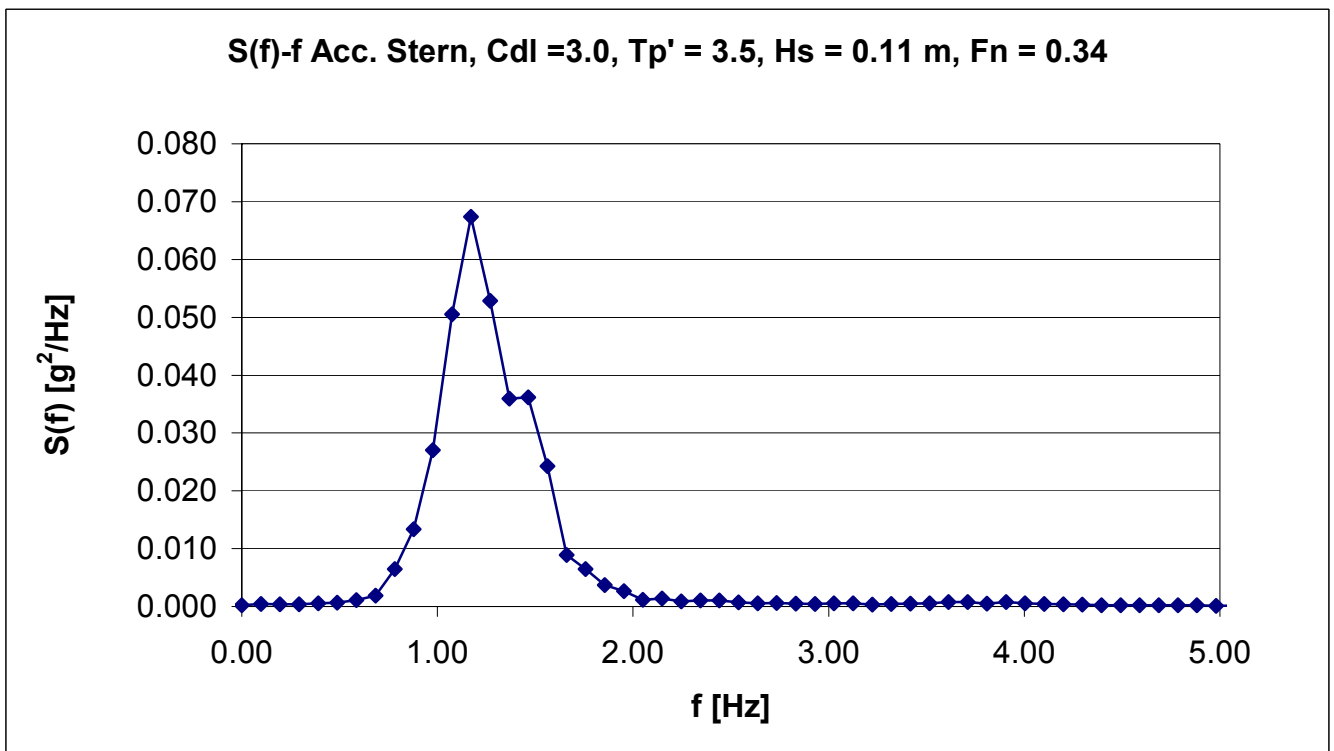
Σχήμα 24: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



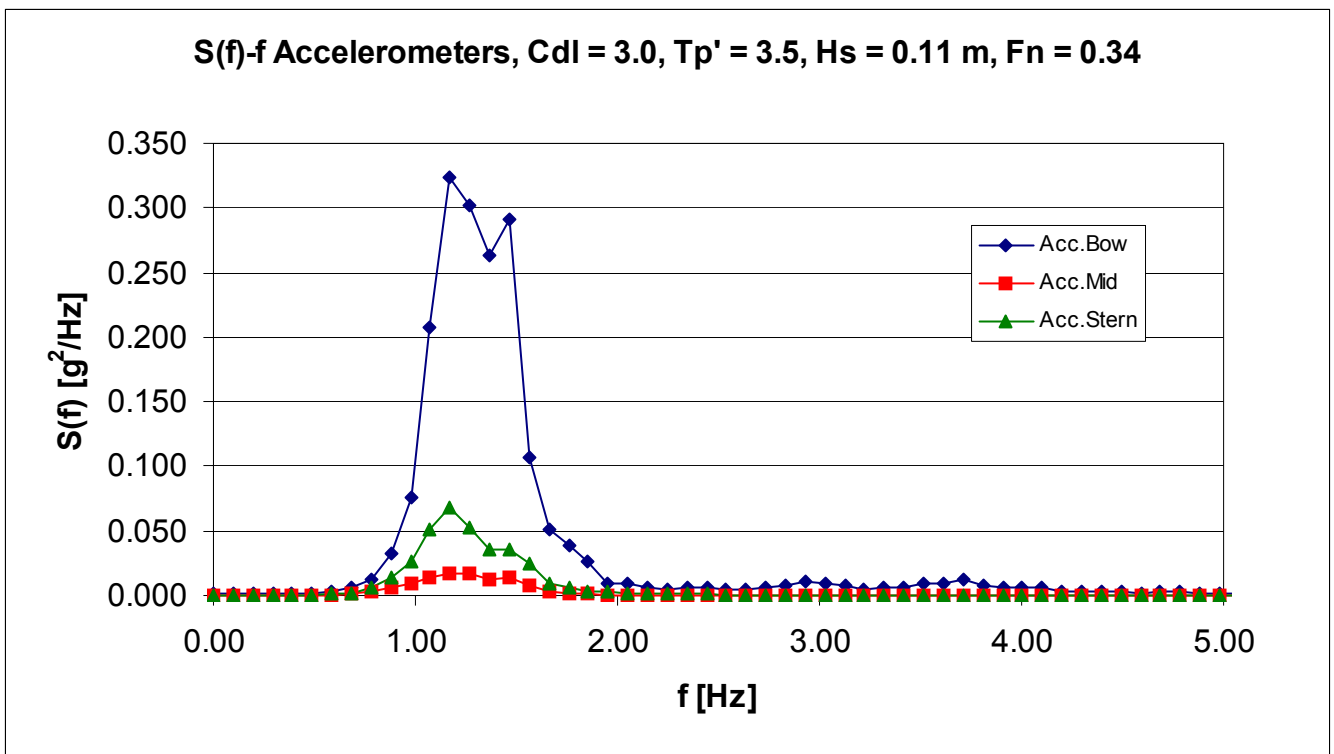
Σχήμα 25: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



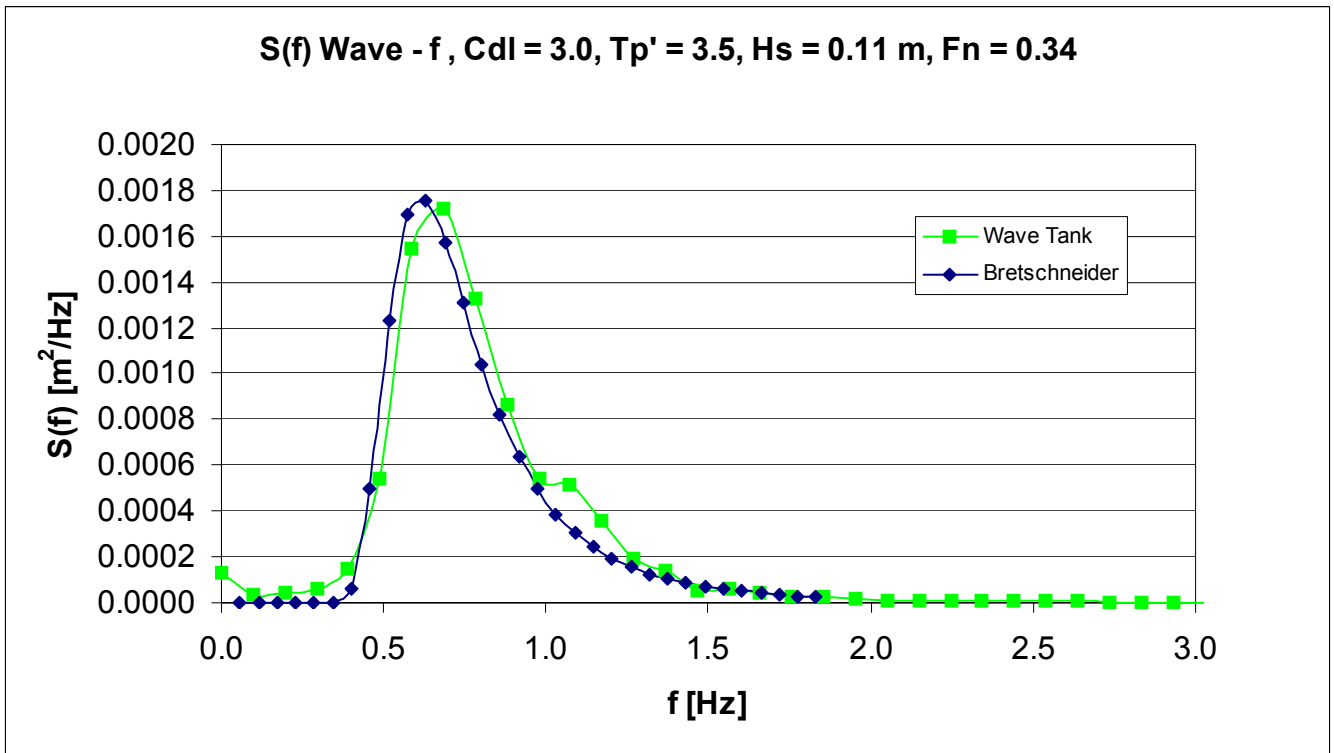
Σχήμα 26: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους



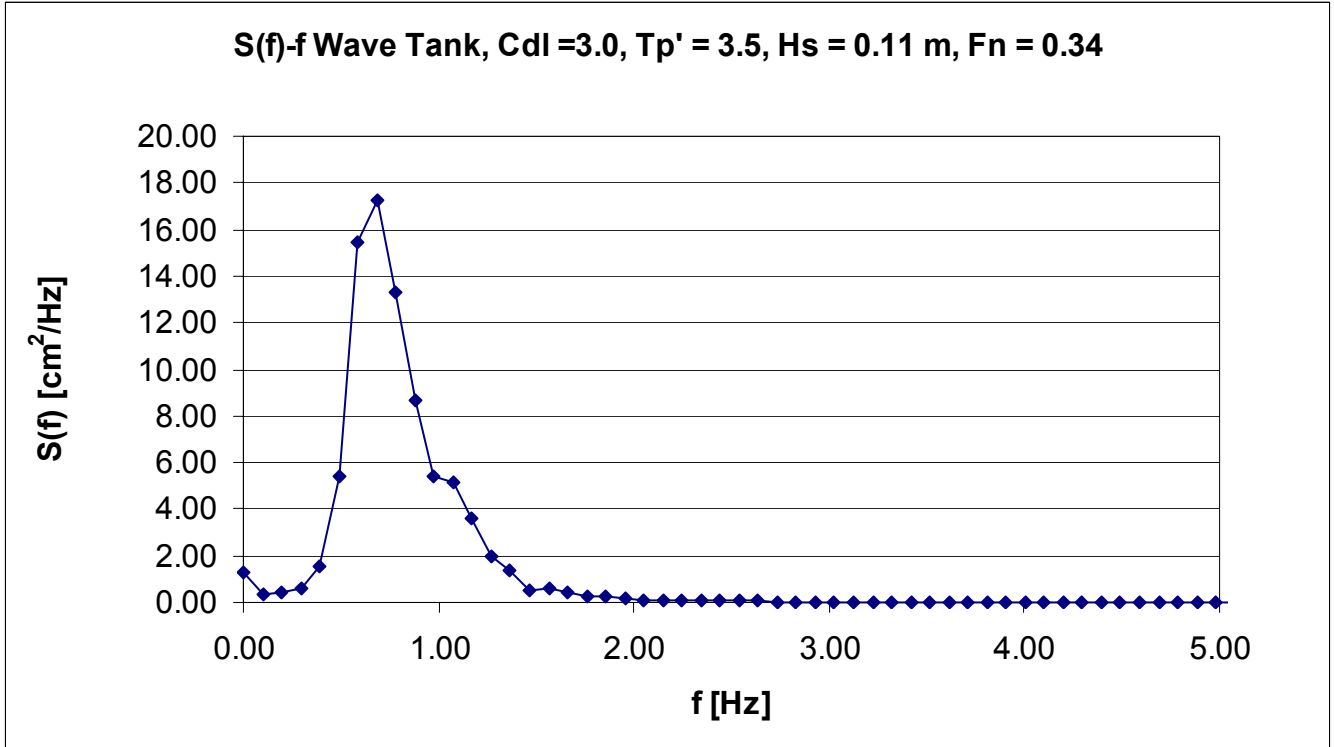
Σχήμα 27: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη



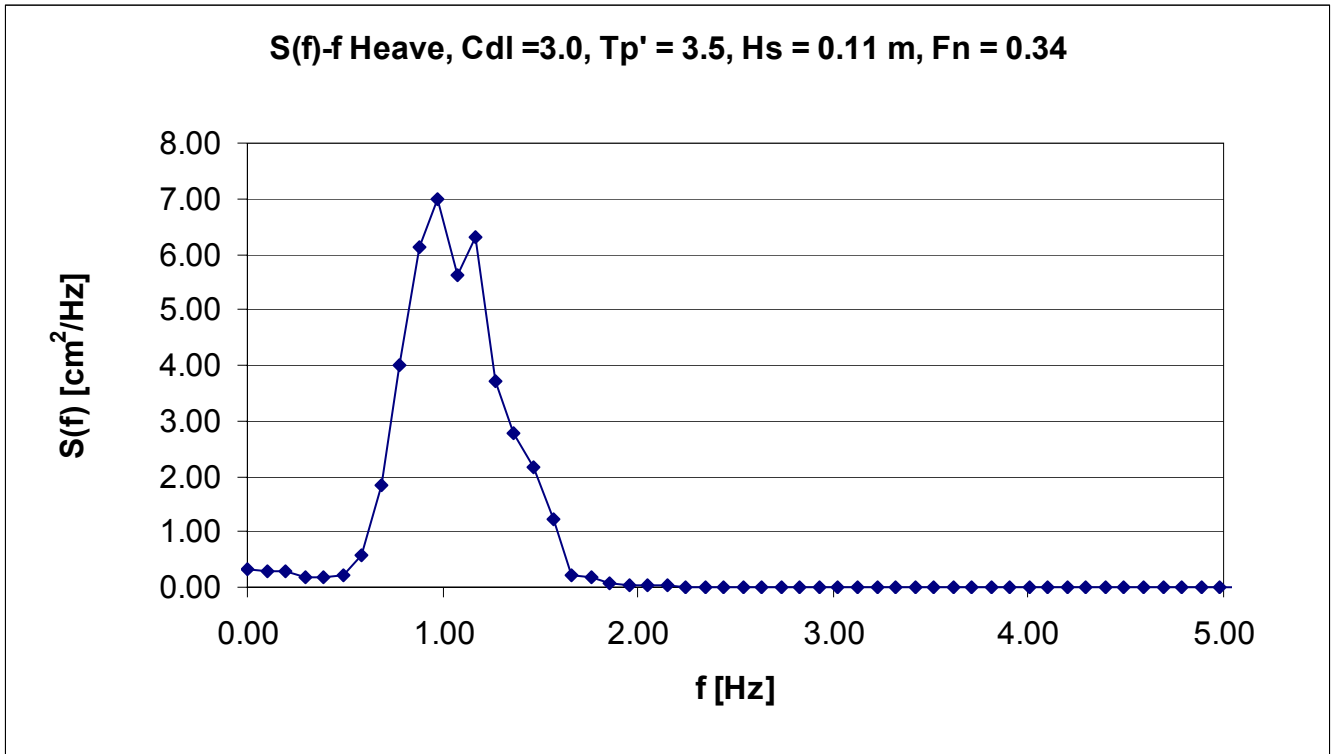
Σχήμα 28: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



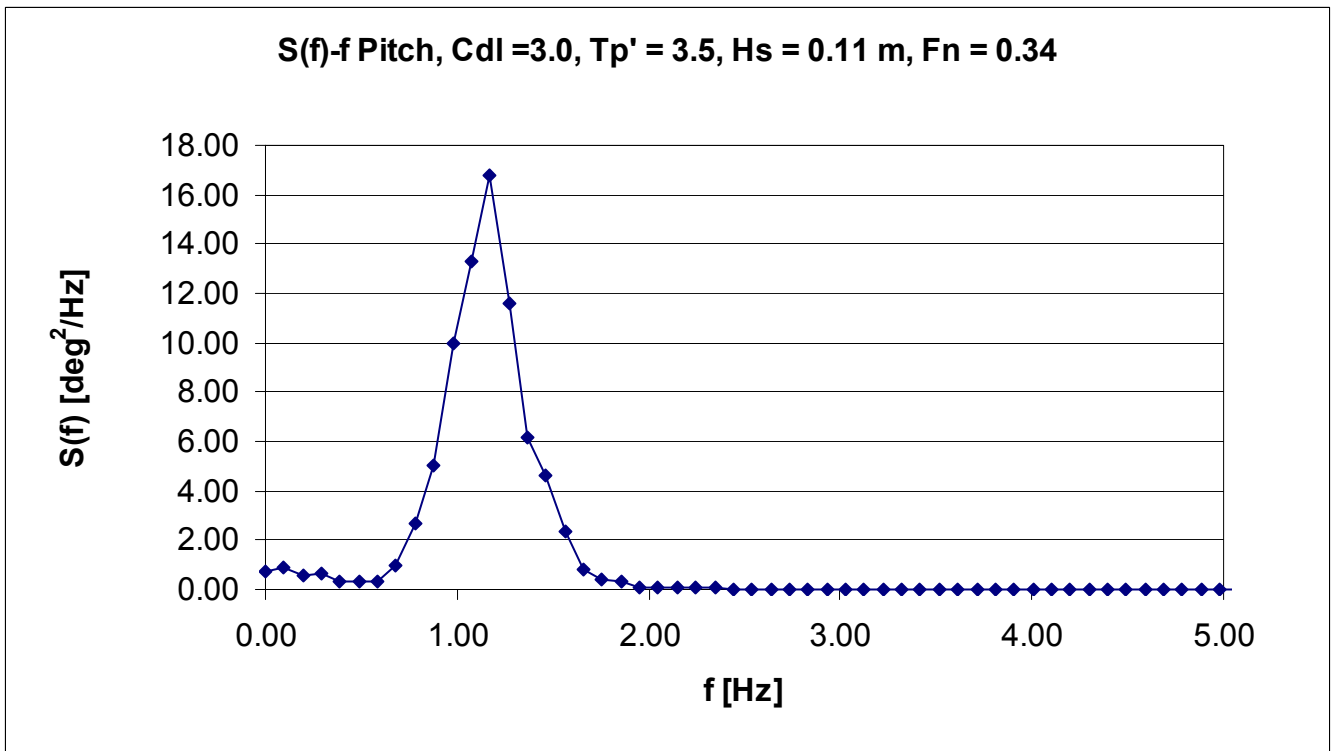
Σχήμα 29: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



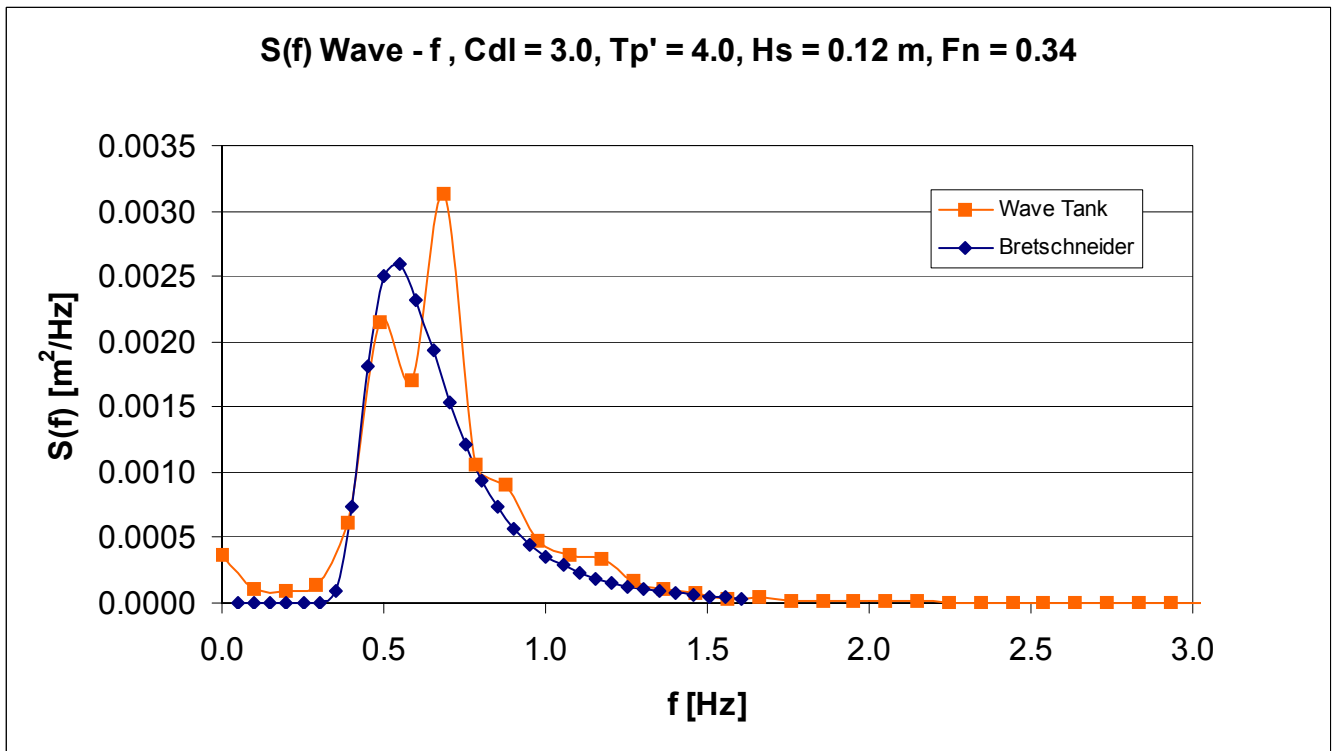
Σχήμα 30: Συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος Wave Tank



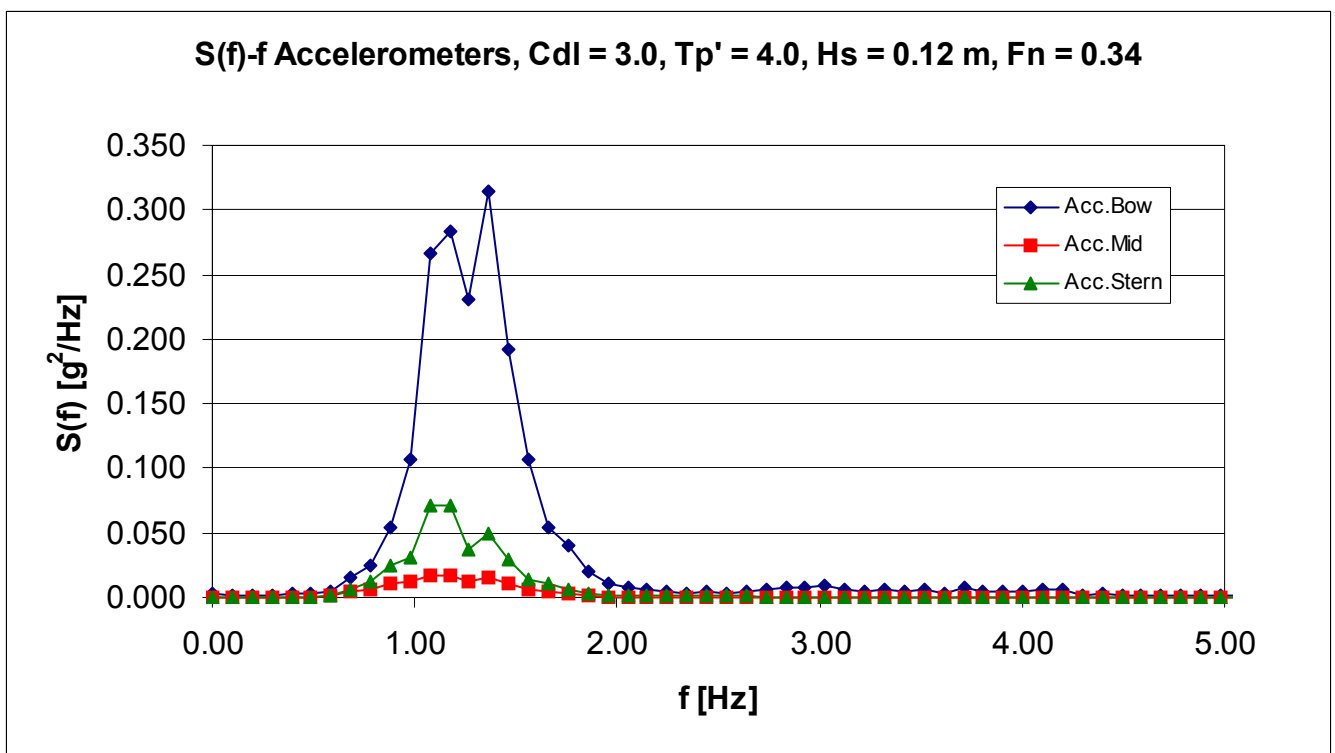
Σχήμα 31: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



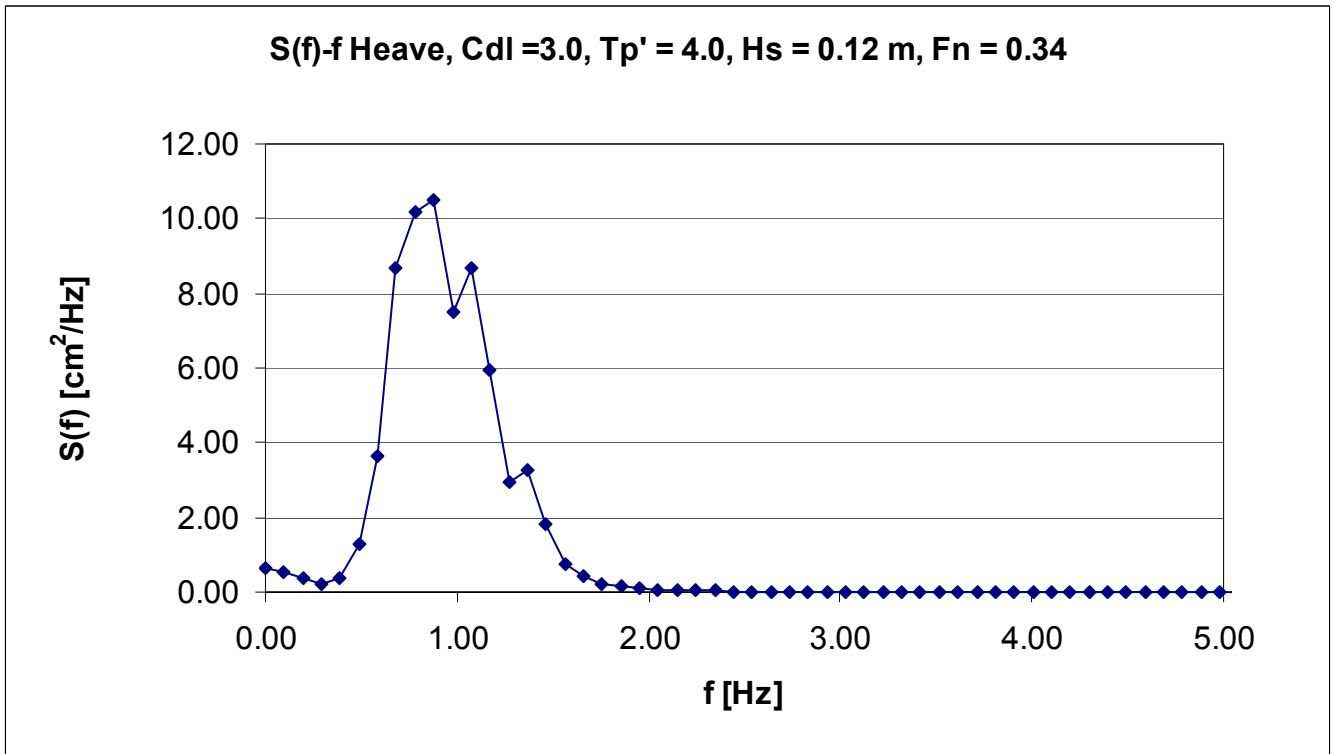
Σχήμα 32: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



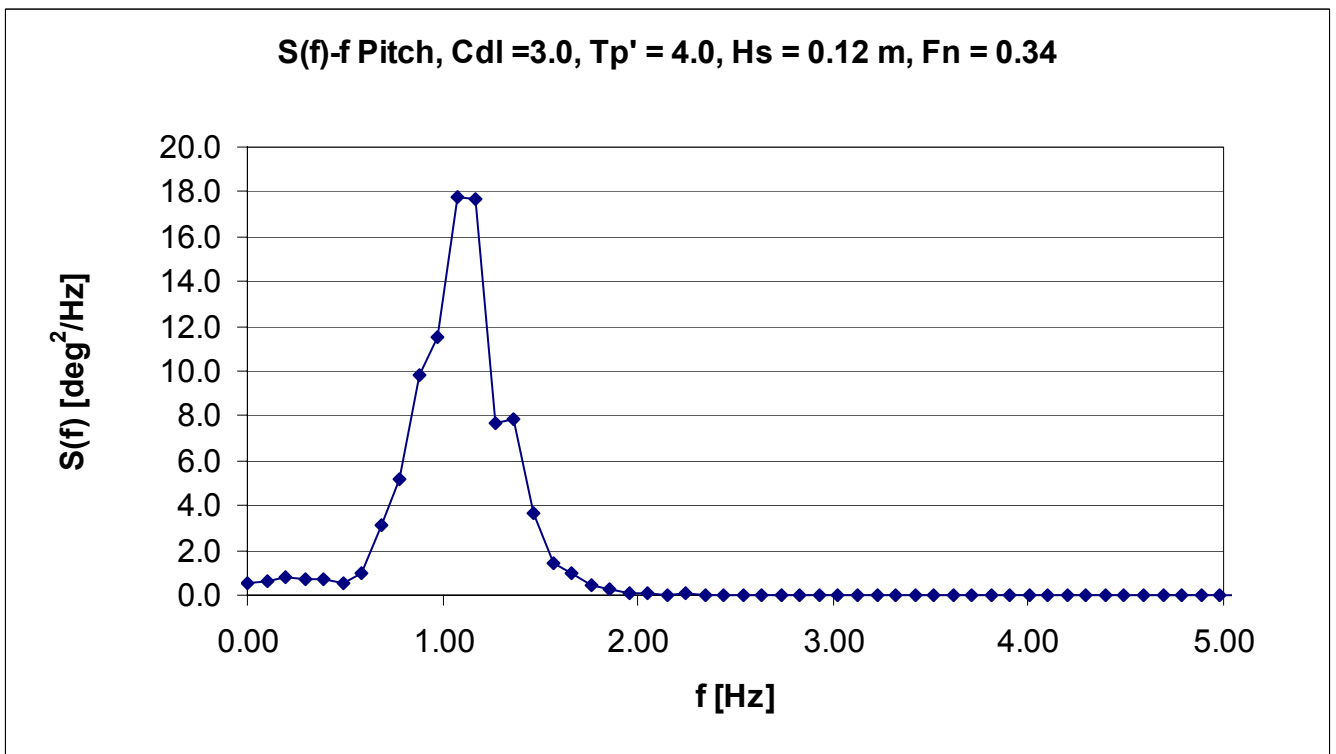
Σχήμα 33: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



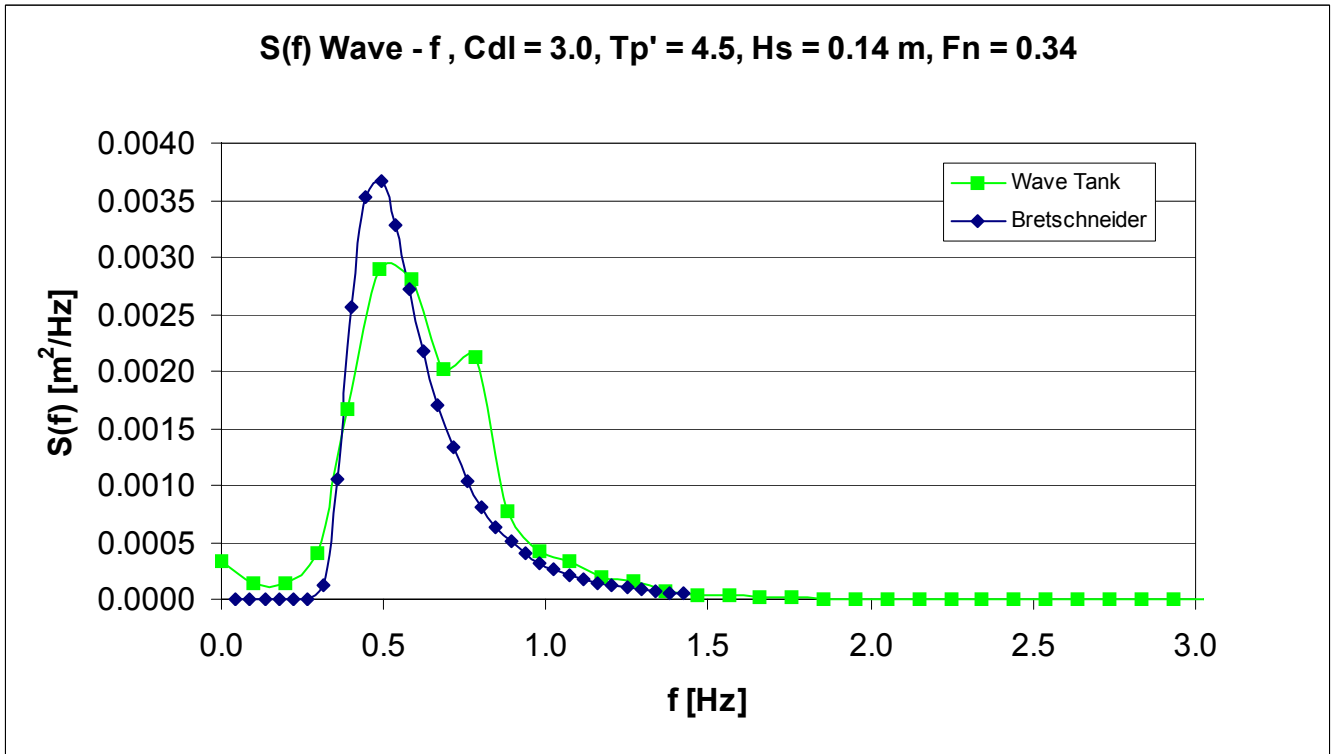
Σχήμα 34: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



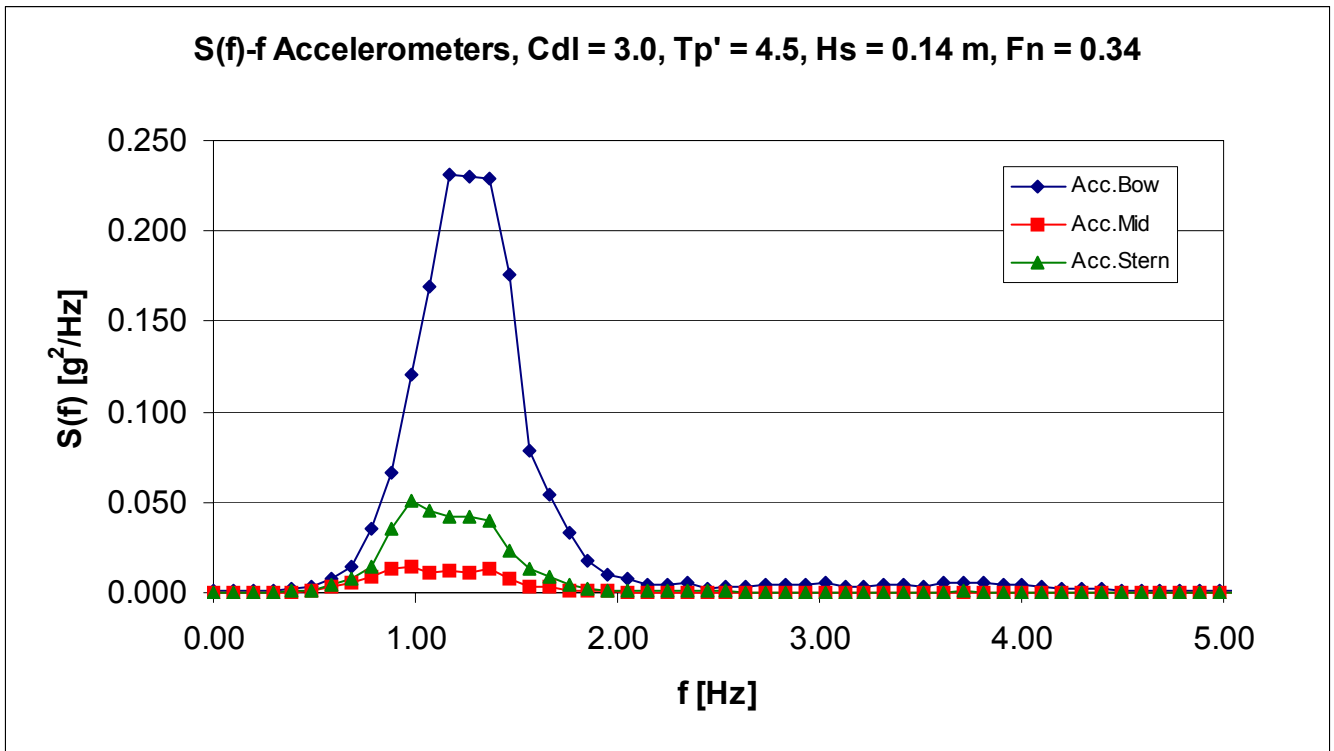
Σχήμα 35: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



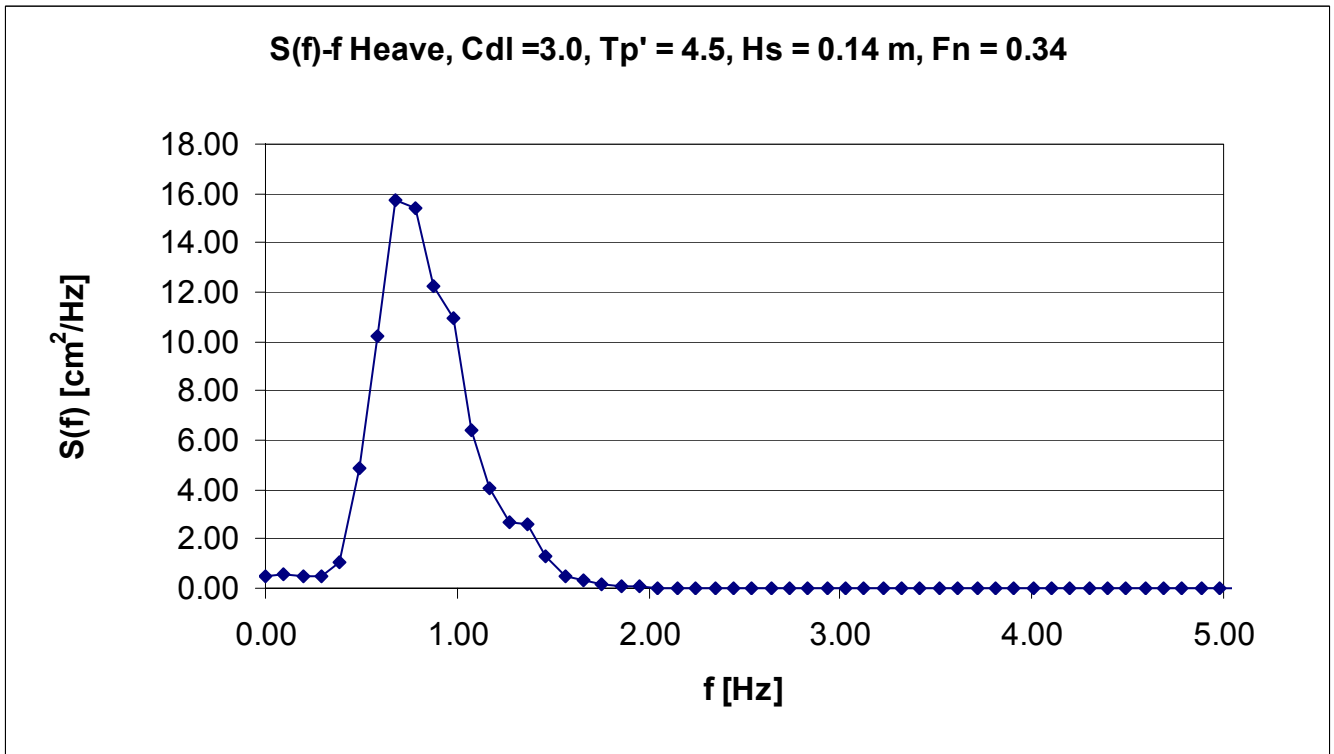
Σχήμα 36: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



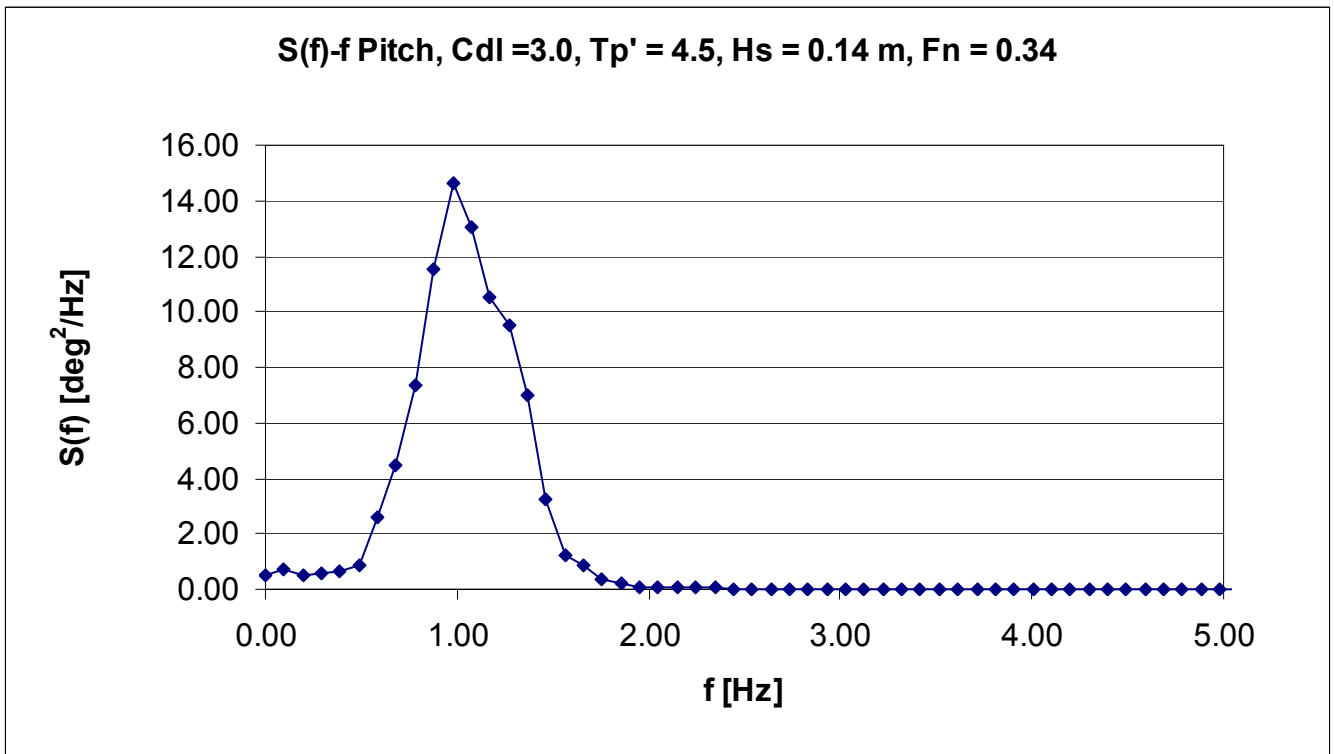
Σχήμα 37: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



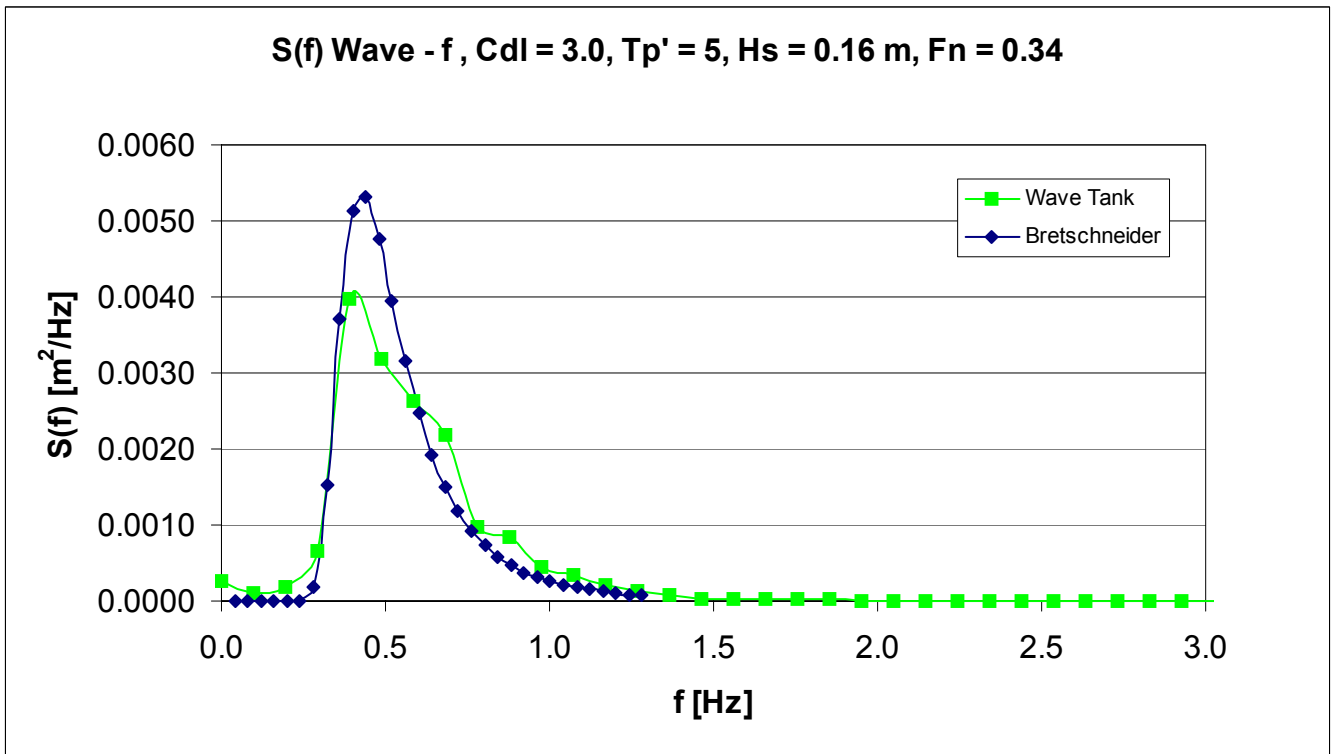
Σχήμα 38: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



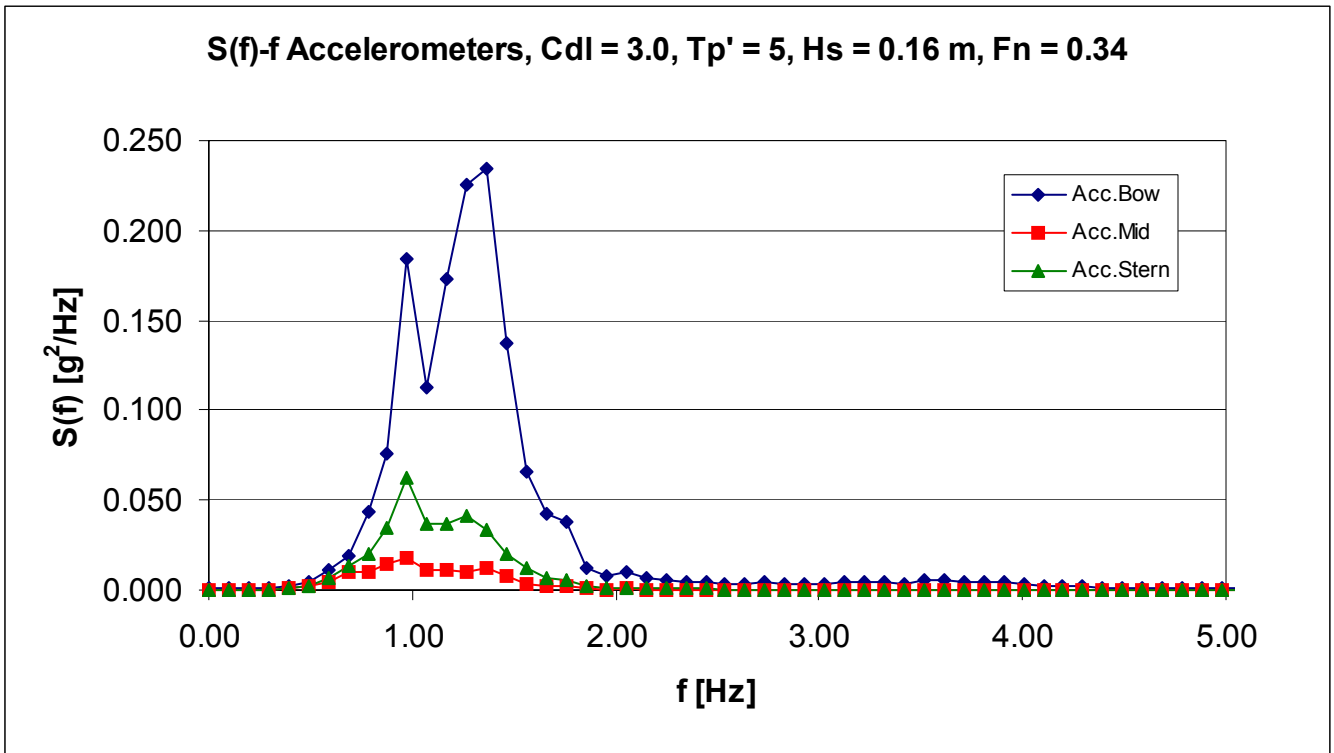
Σχήμα 39: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



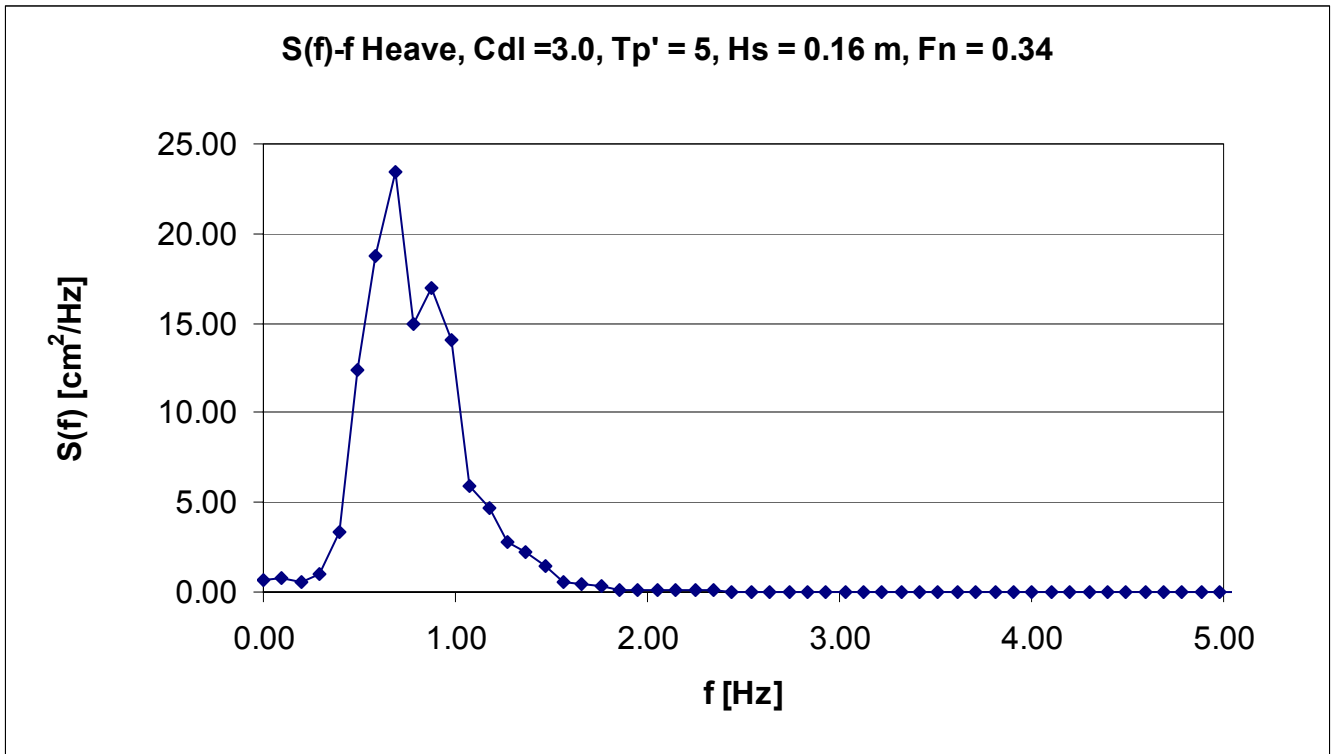
Σχήμα 40: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



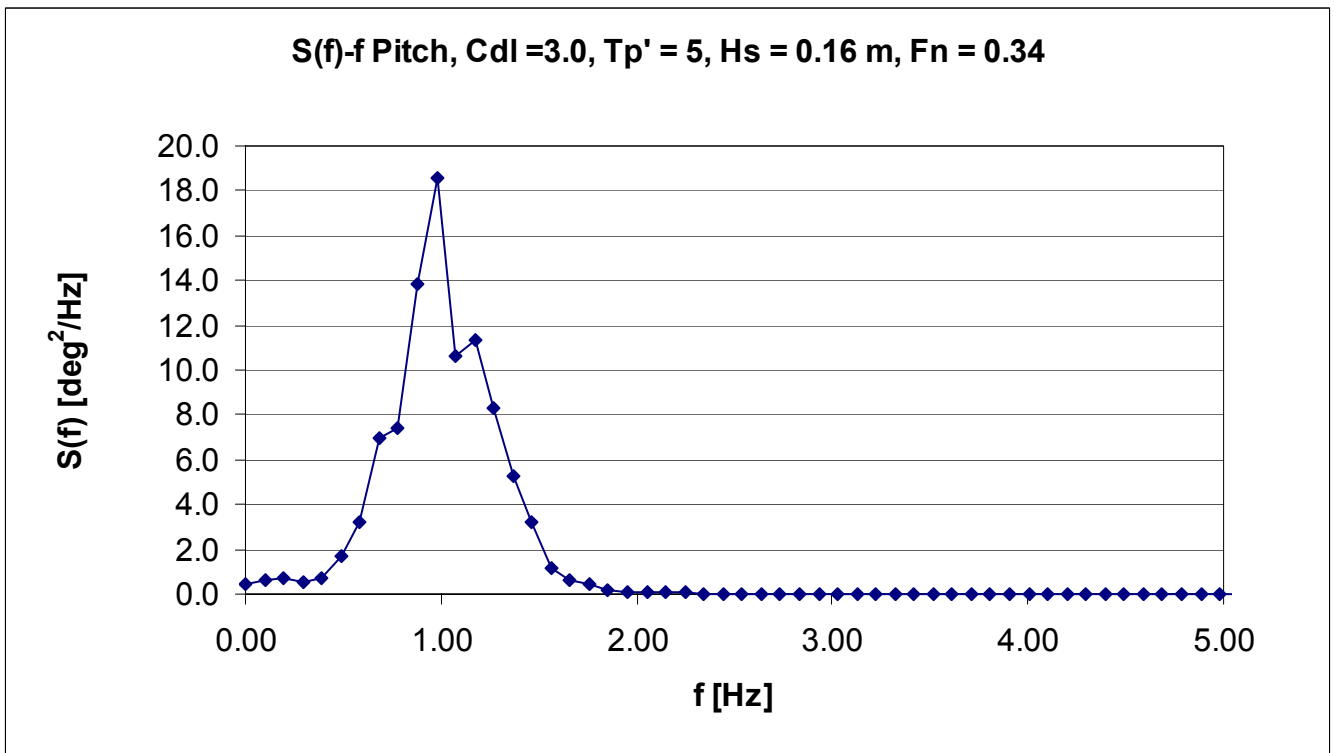
Σχήμα 41: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 42: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων

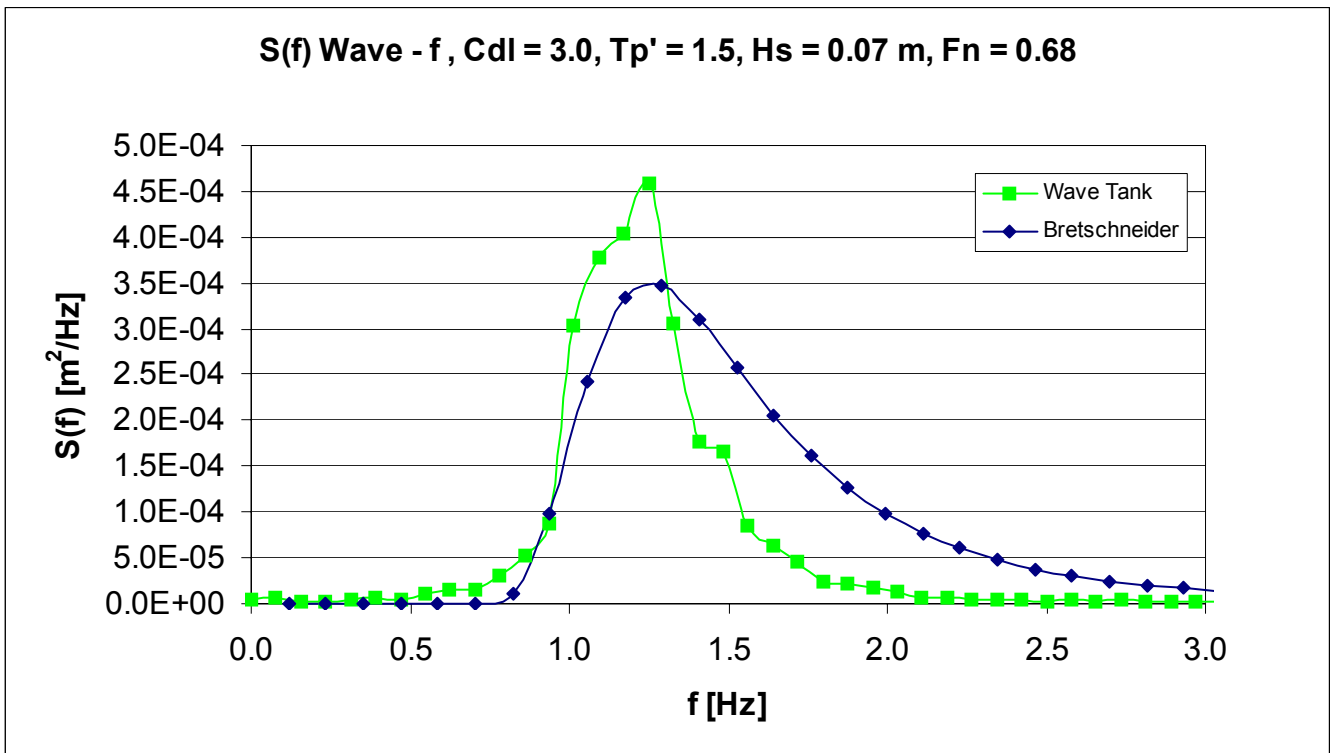


Σχήμα 43: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

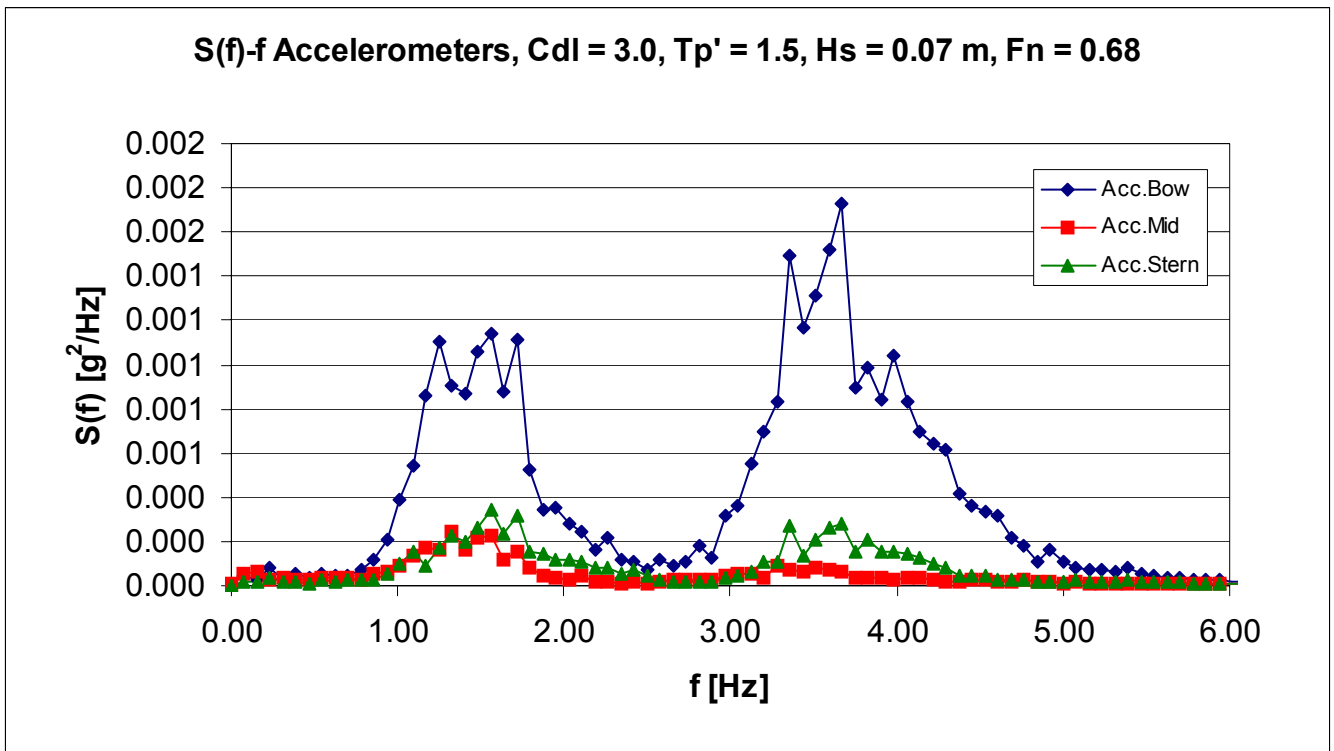


Σχήμα 44: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

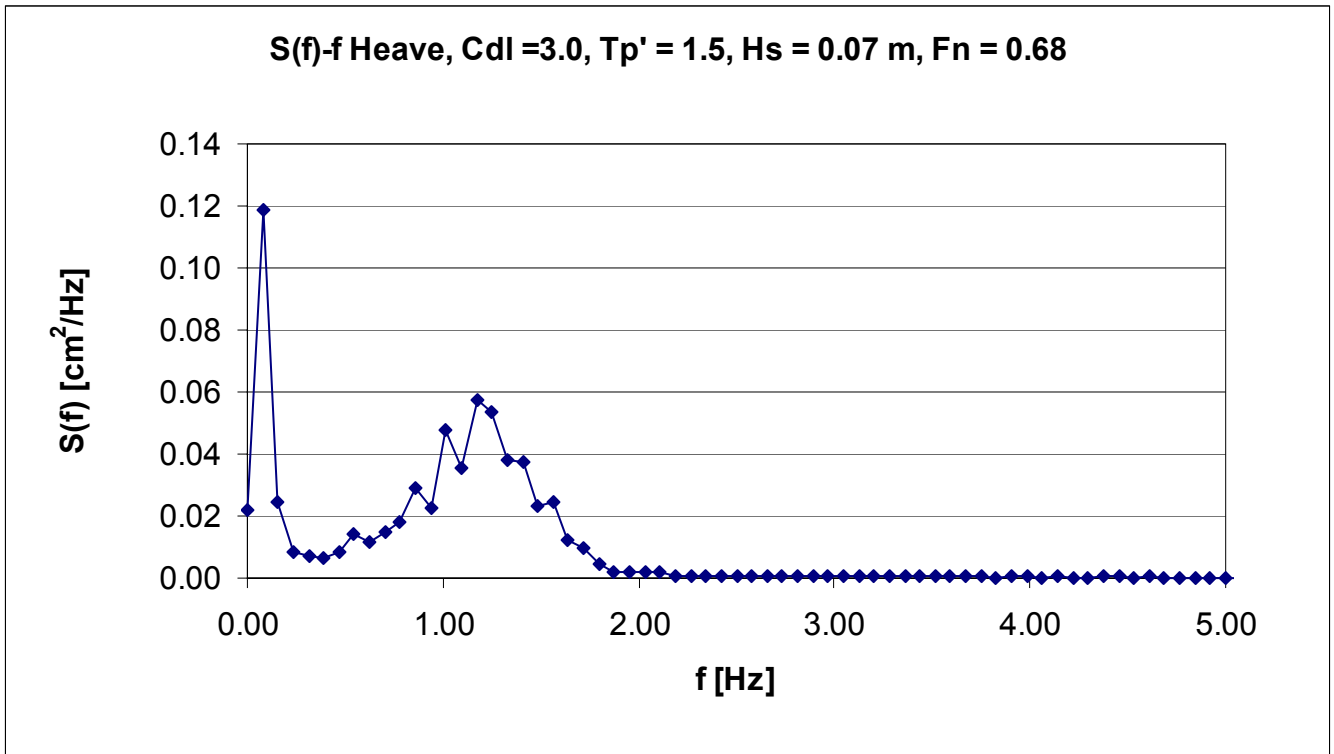
Αποτελέσματα NTUA 116/96 για $C_{dl} = 3.00$ και $F_n = 0.68$



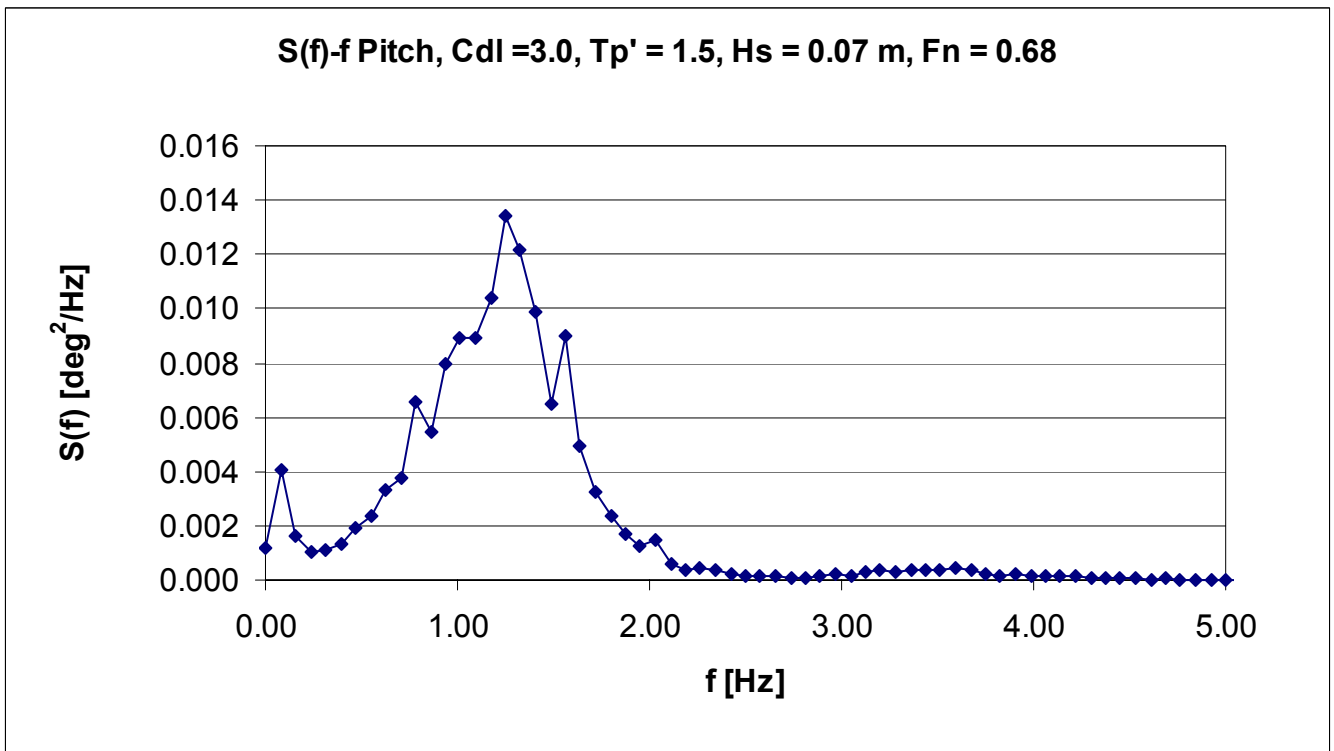
Σχήμα 45: Τροφοδοθηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



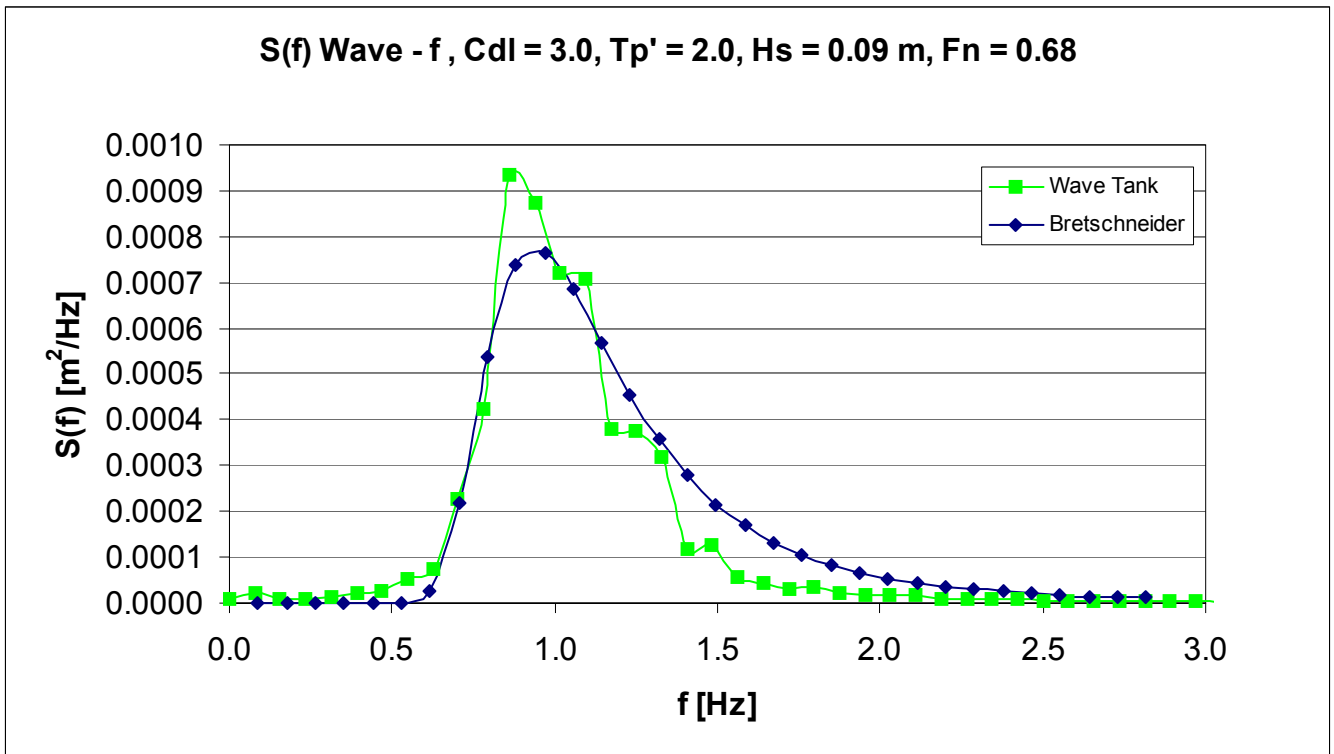
Σχήμα 46: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



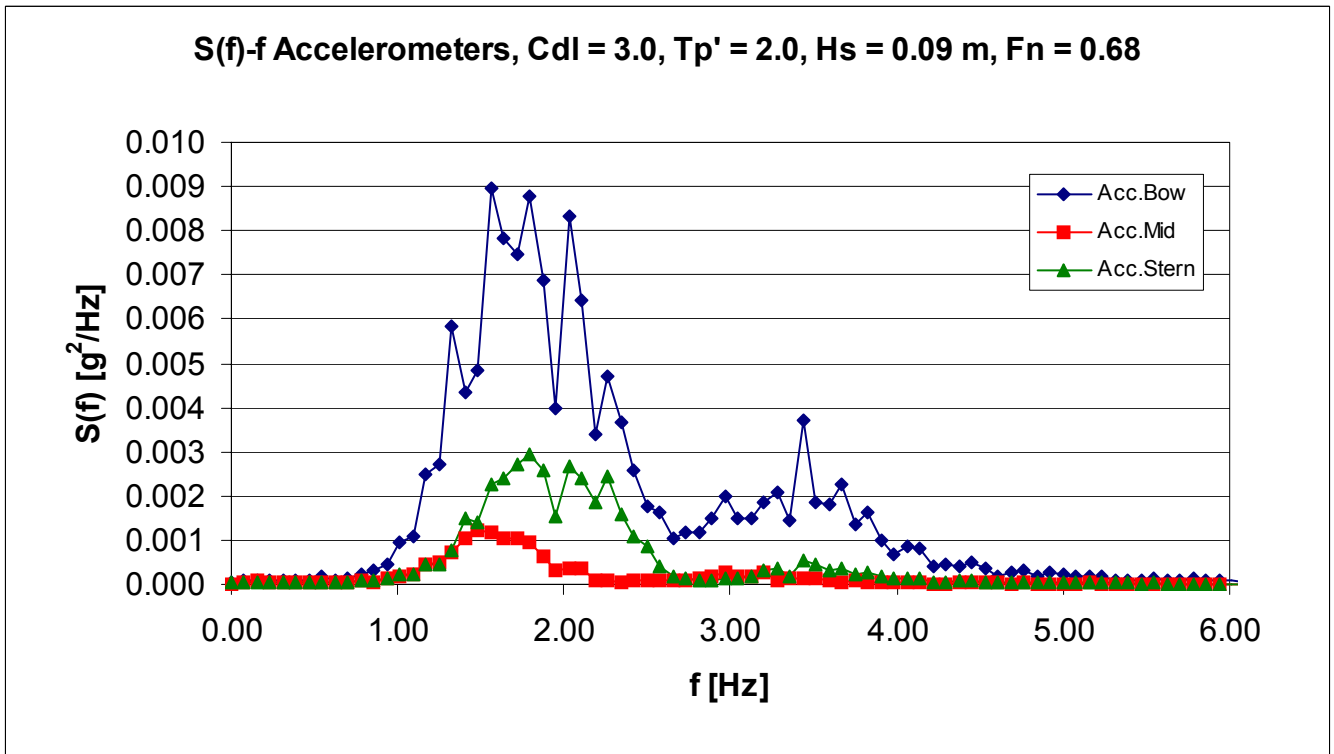
Σχήμα 47: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



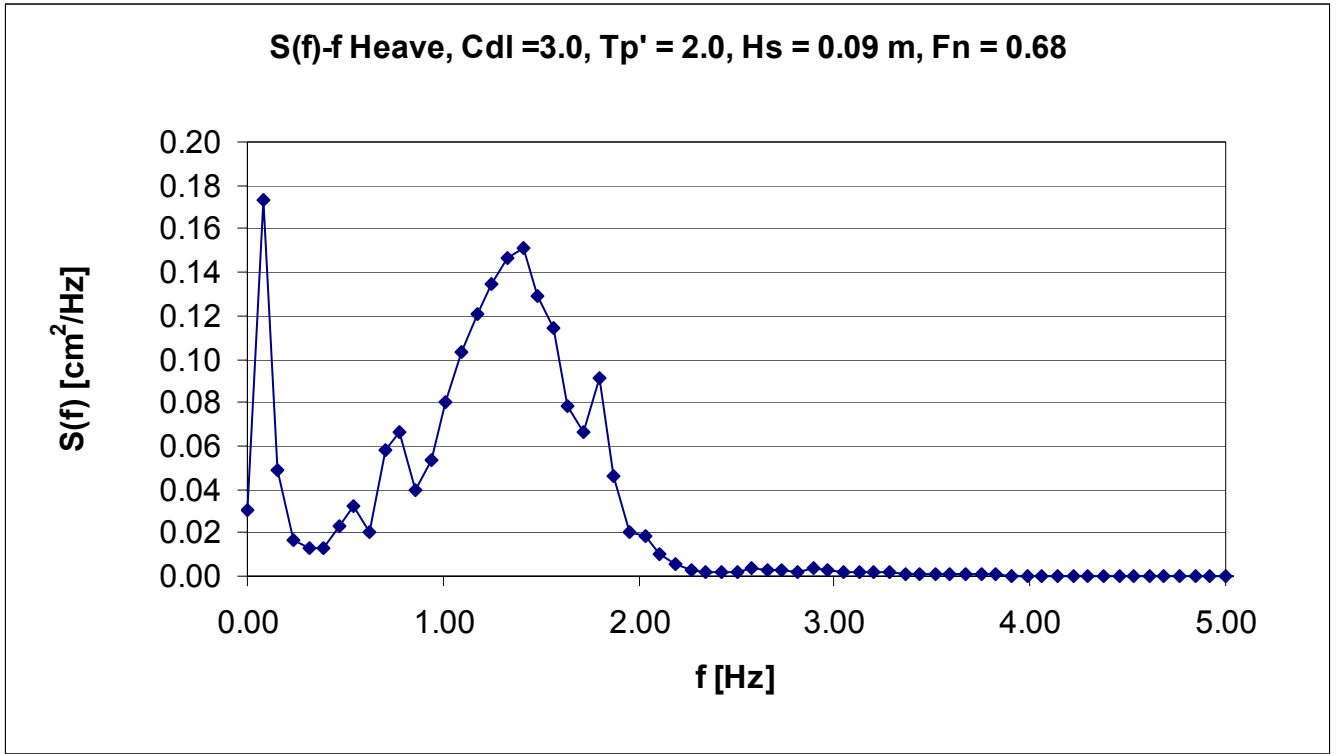
Σχήμα 48: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



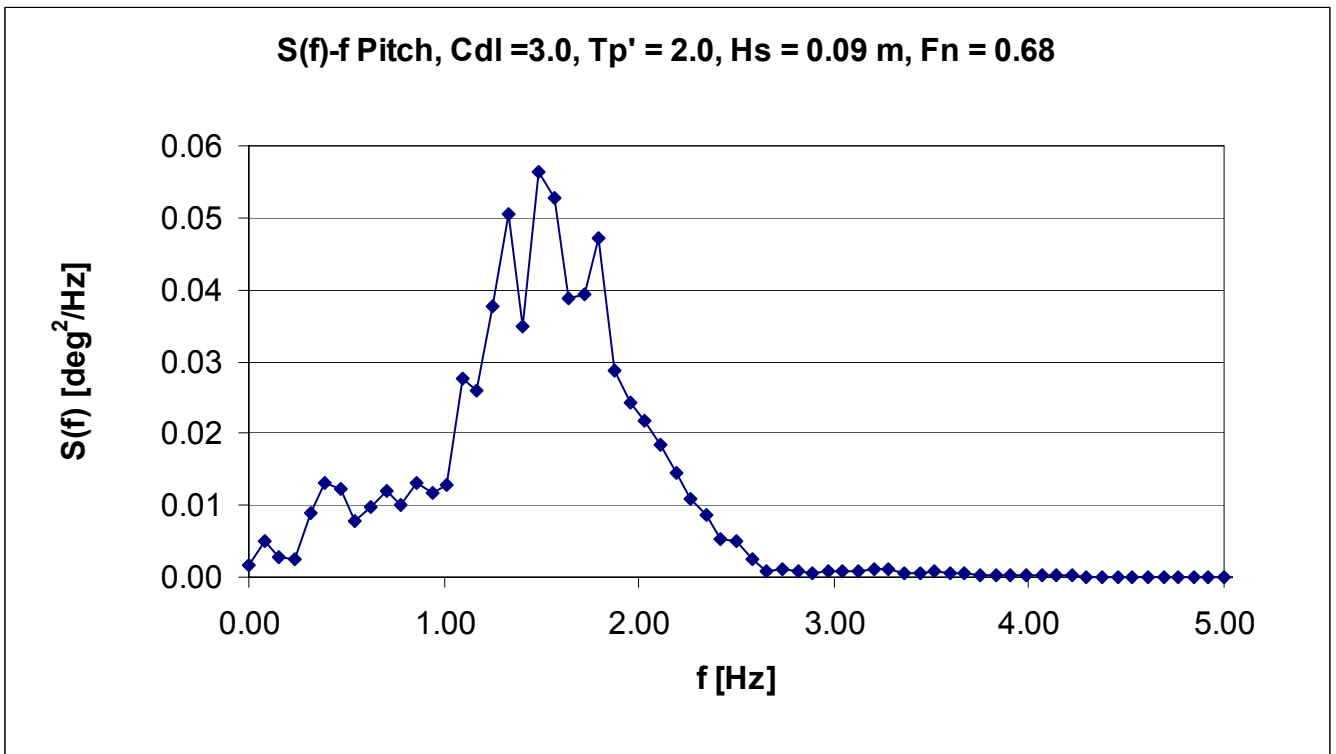
Σχήμα 49: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



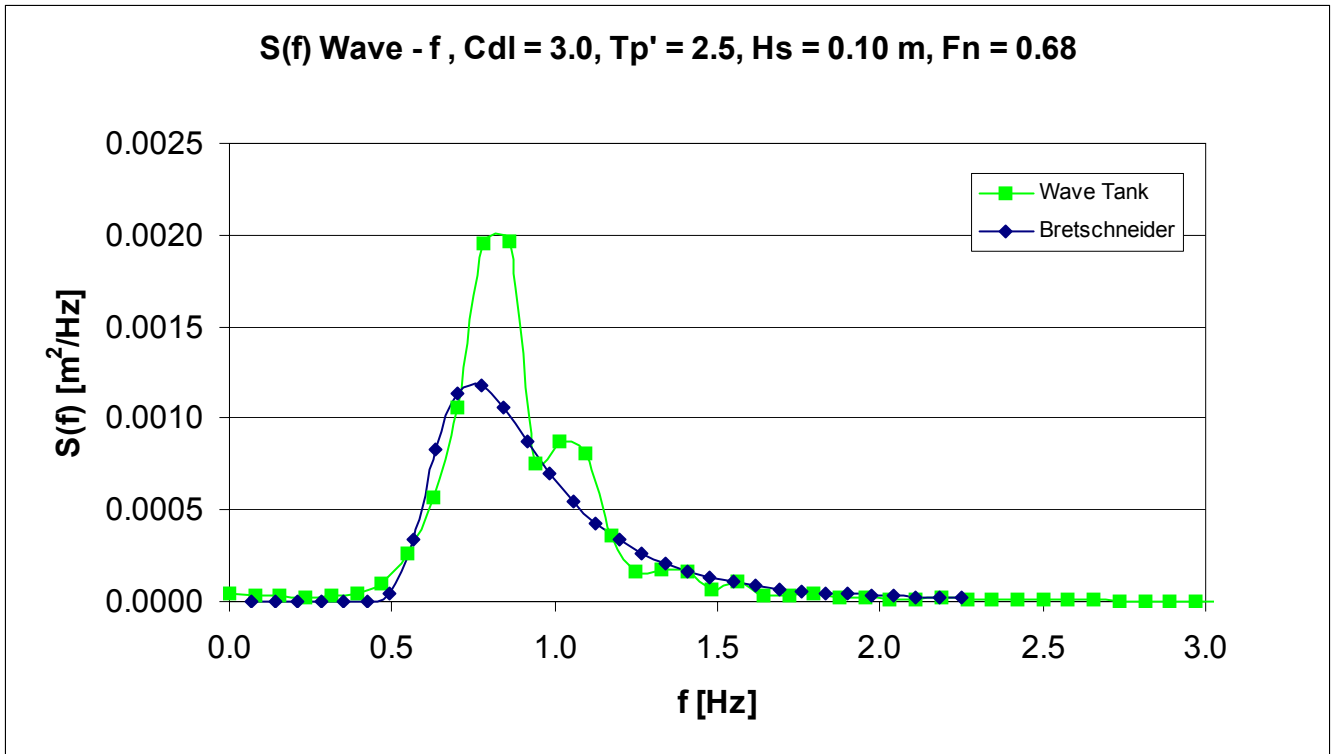
Σχήμα 50: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



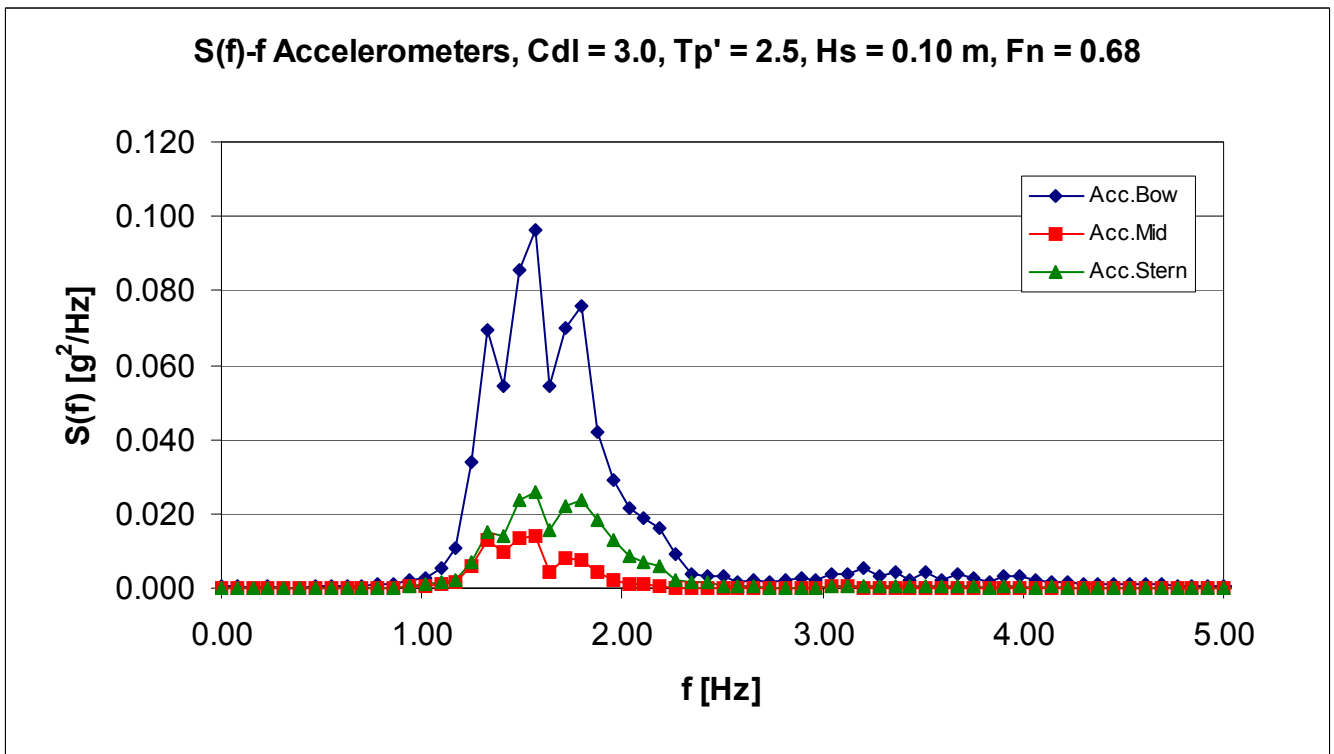
Σχήμα 51: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



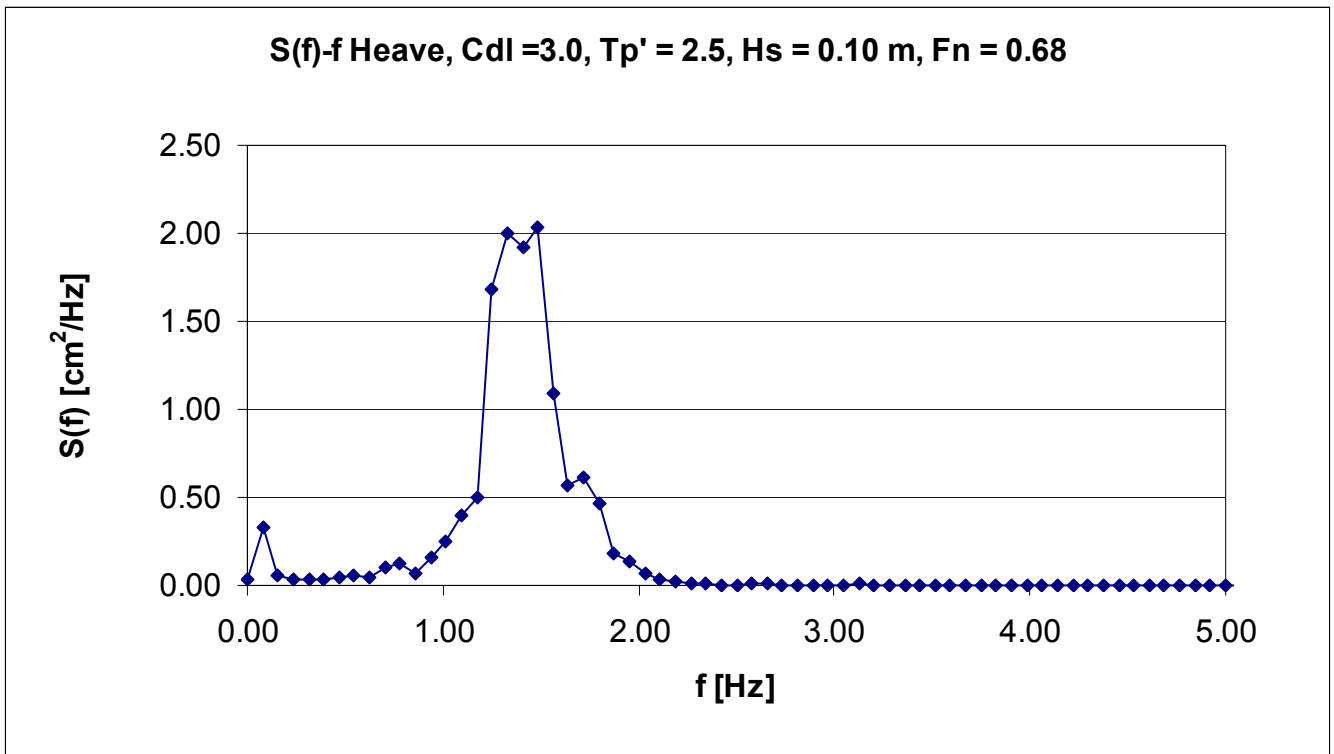
Σχήμα 52: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



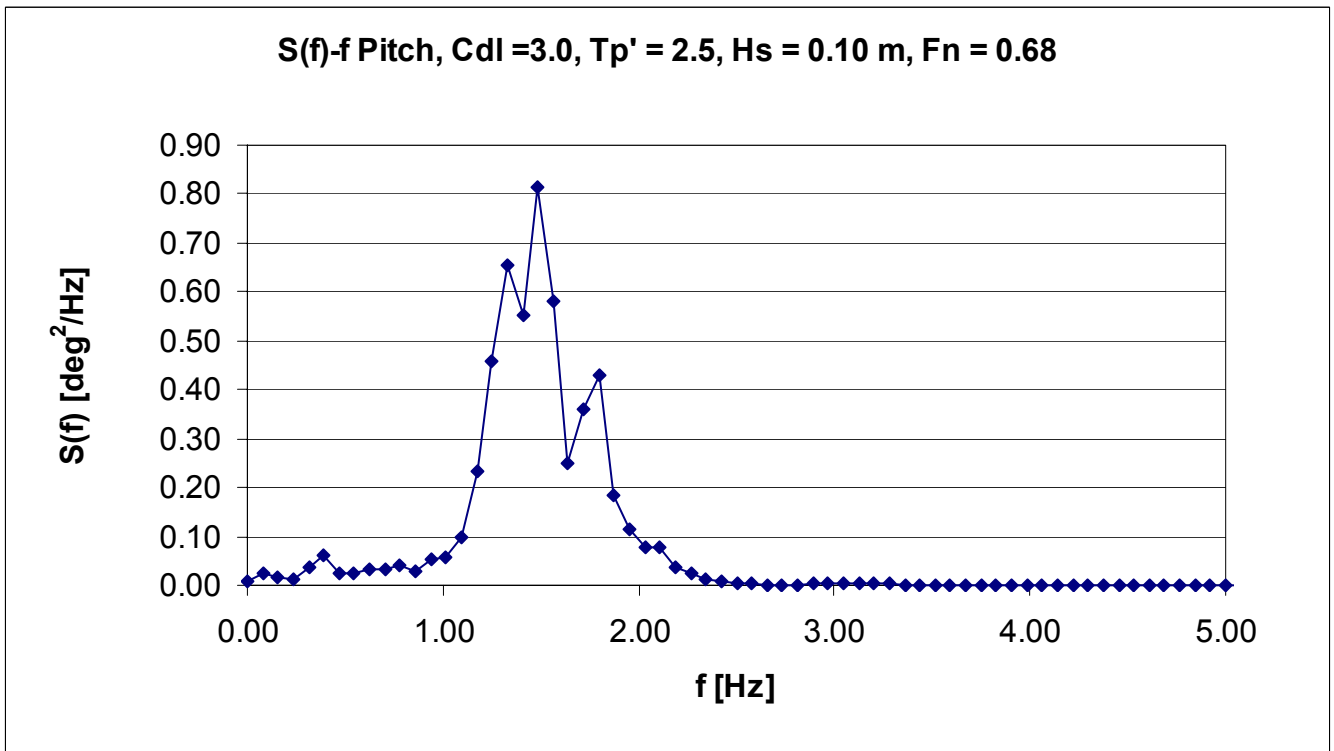
Σχήμα 53: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



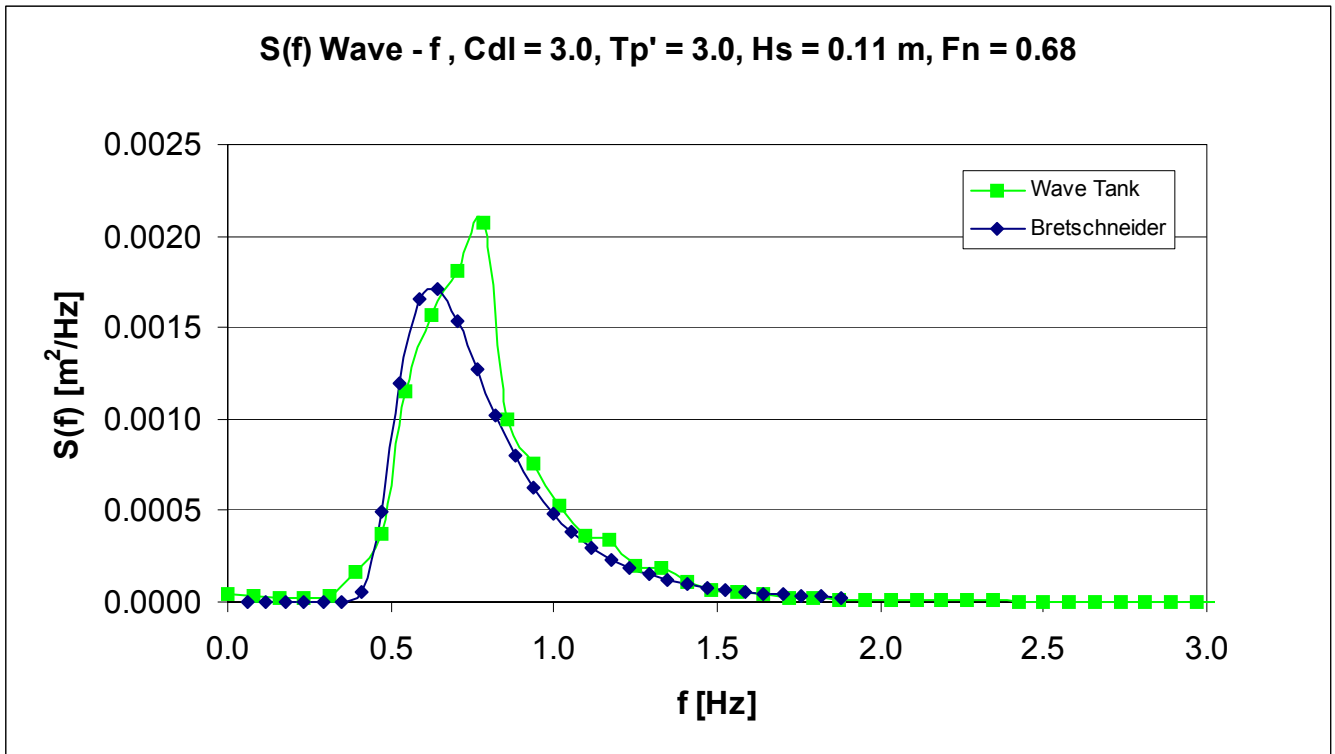
Σχήμα 54: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



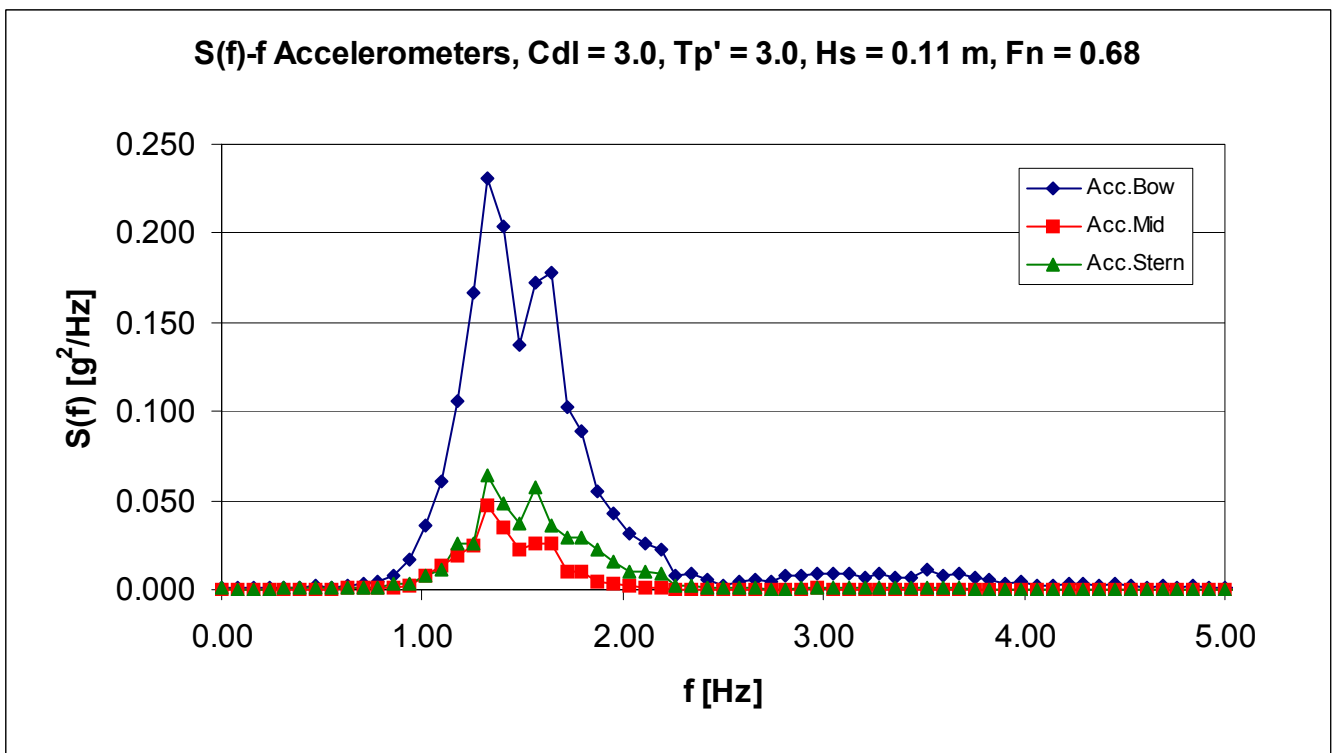
Σχήμα 55: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



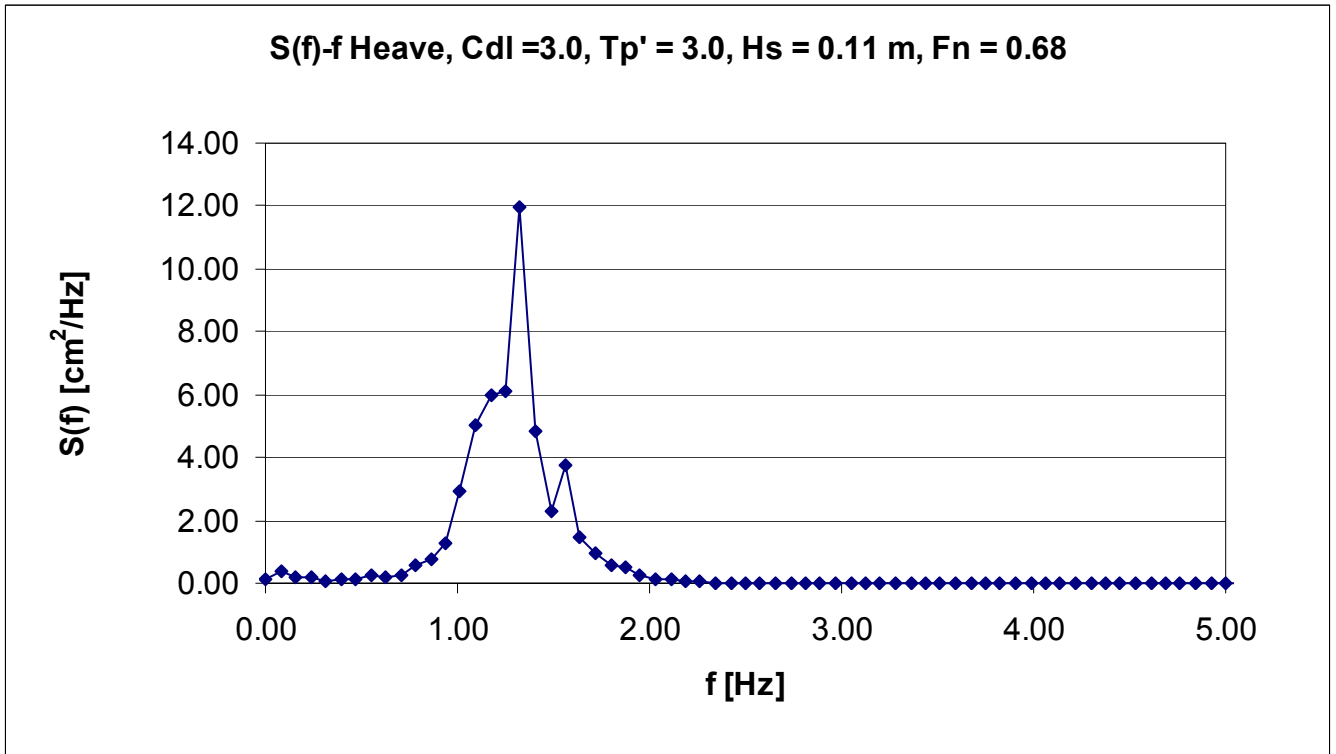
Σχήμα 56: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



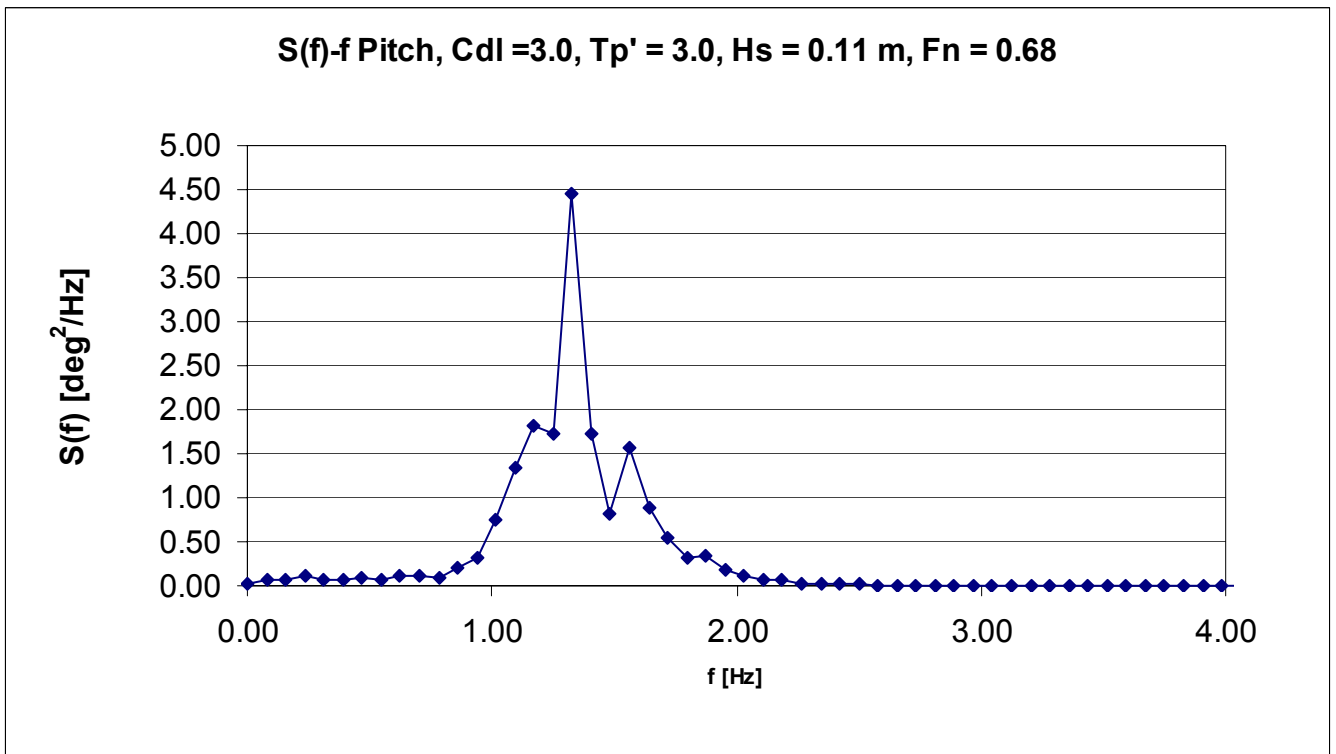
Σχήμα 57: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



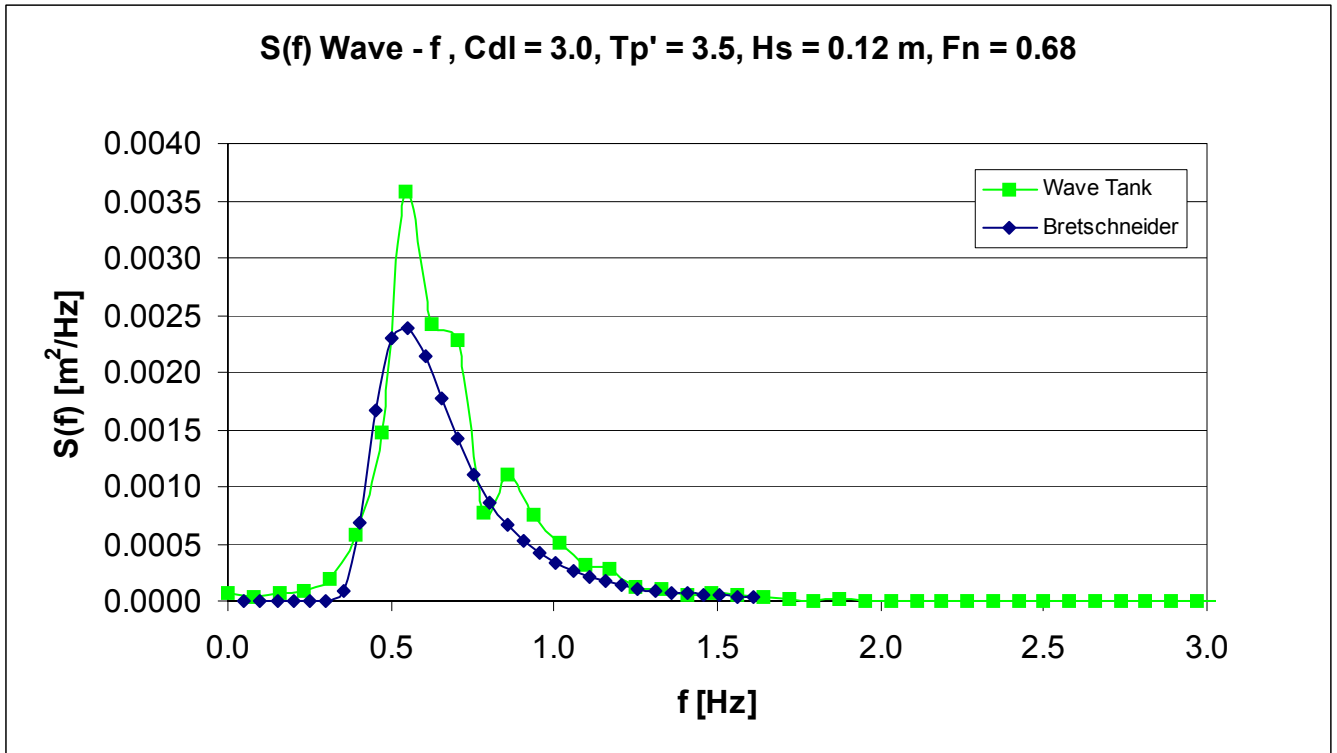
Σχήμα 58: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



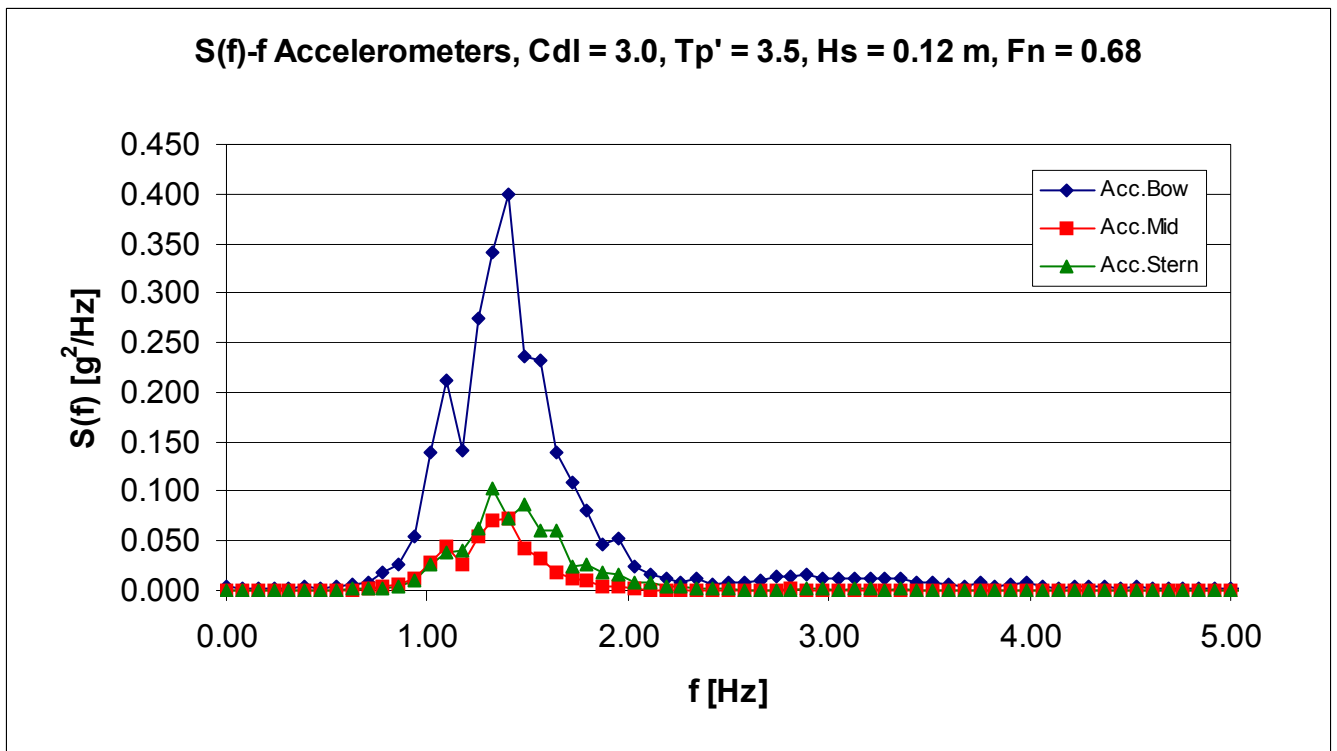
Σχήμα 59: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



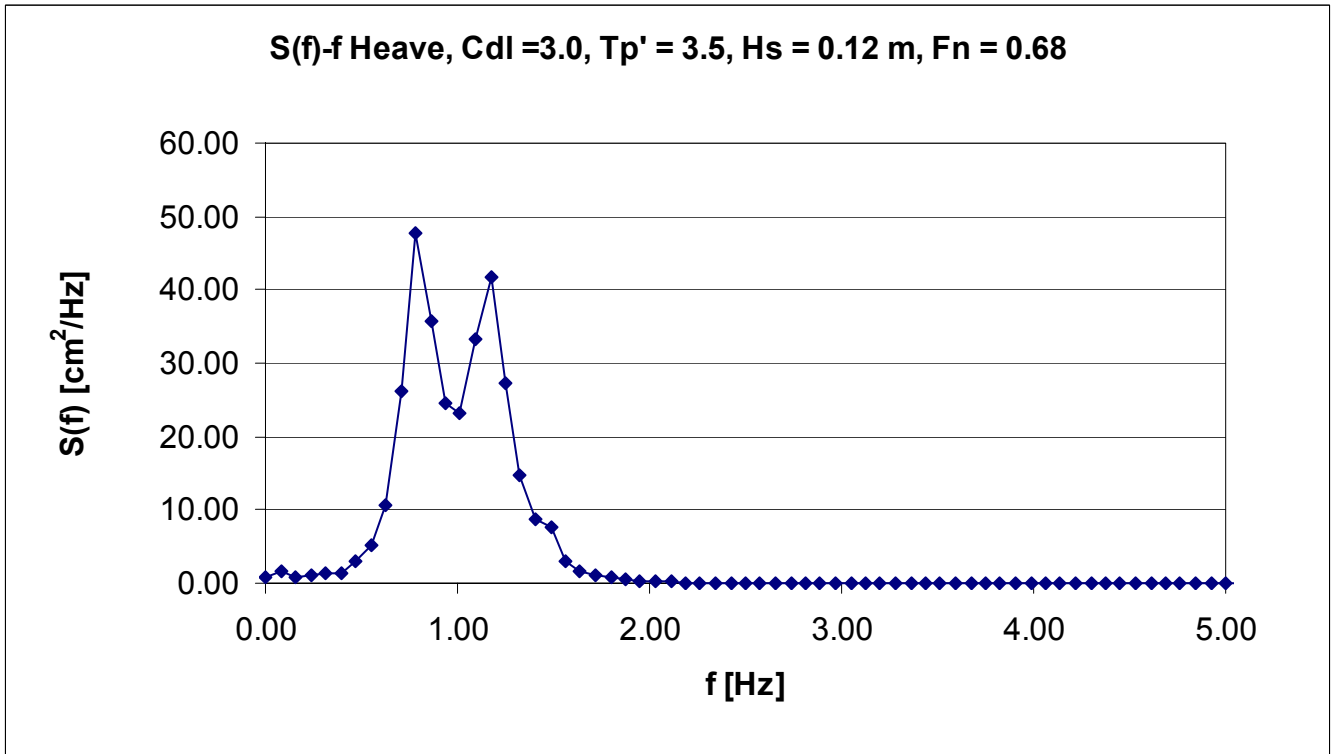
Σχήμα 60: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



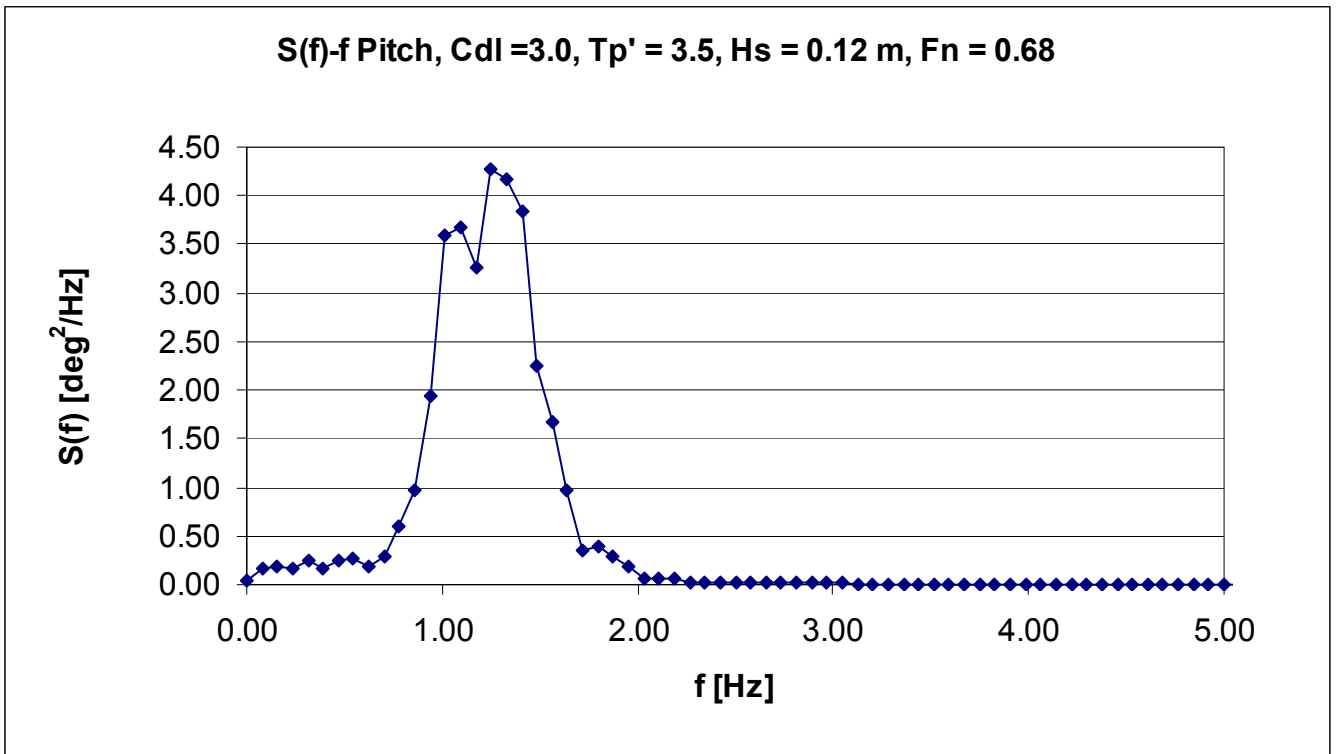
Σχήμα 61: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



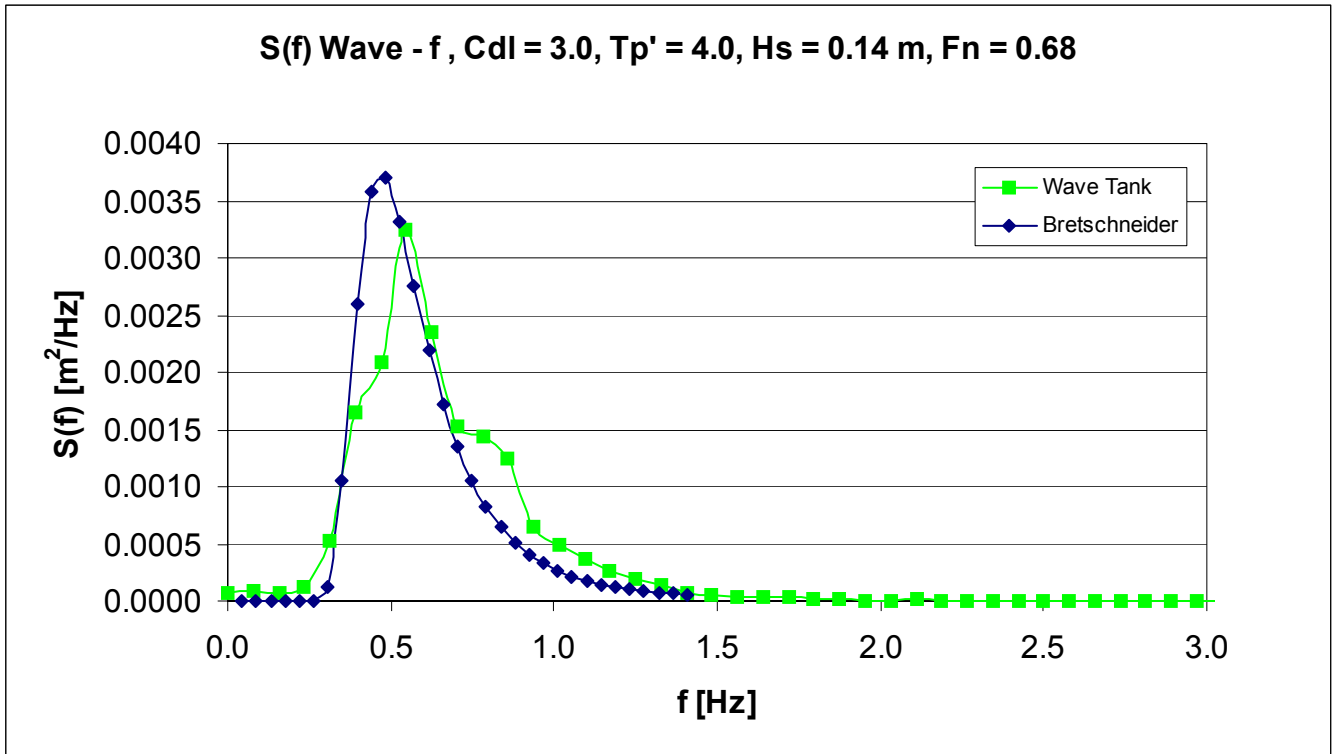
Σχήμα 62: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



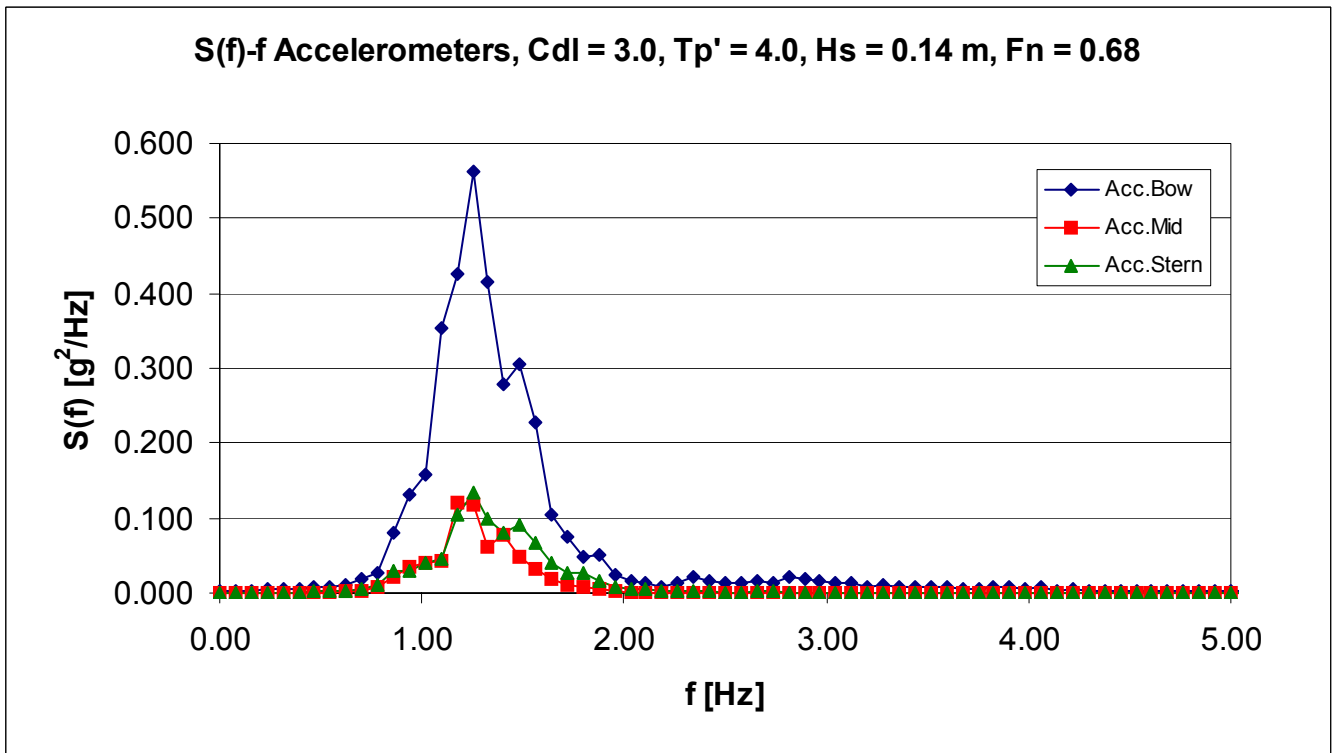
Σχήμα 63: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



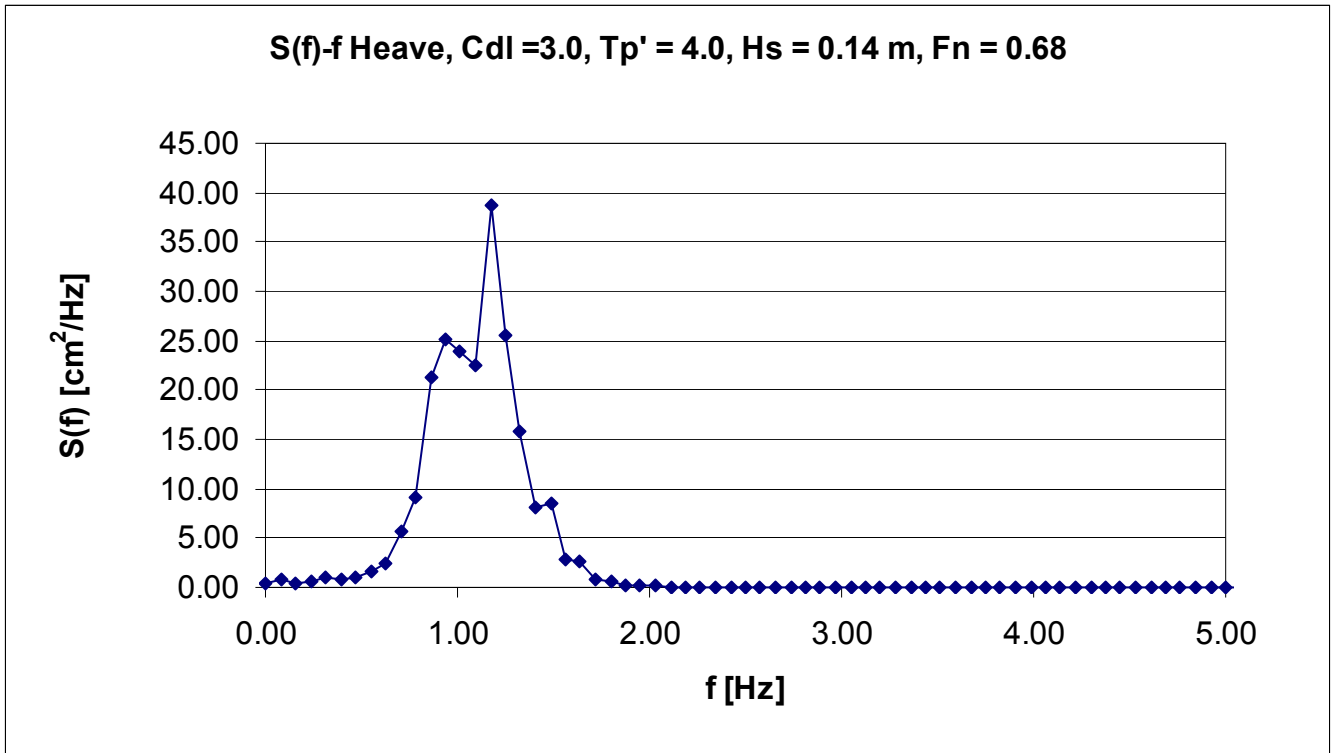
Σχήμα 64: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



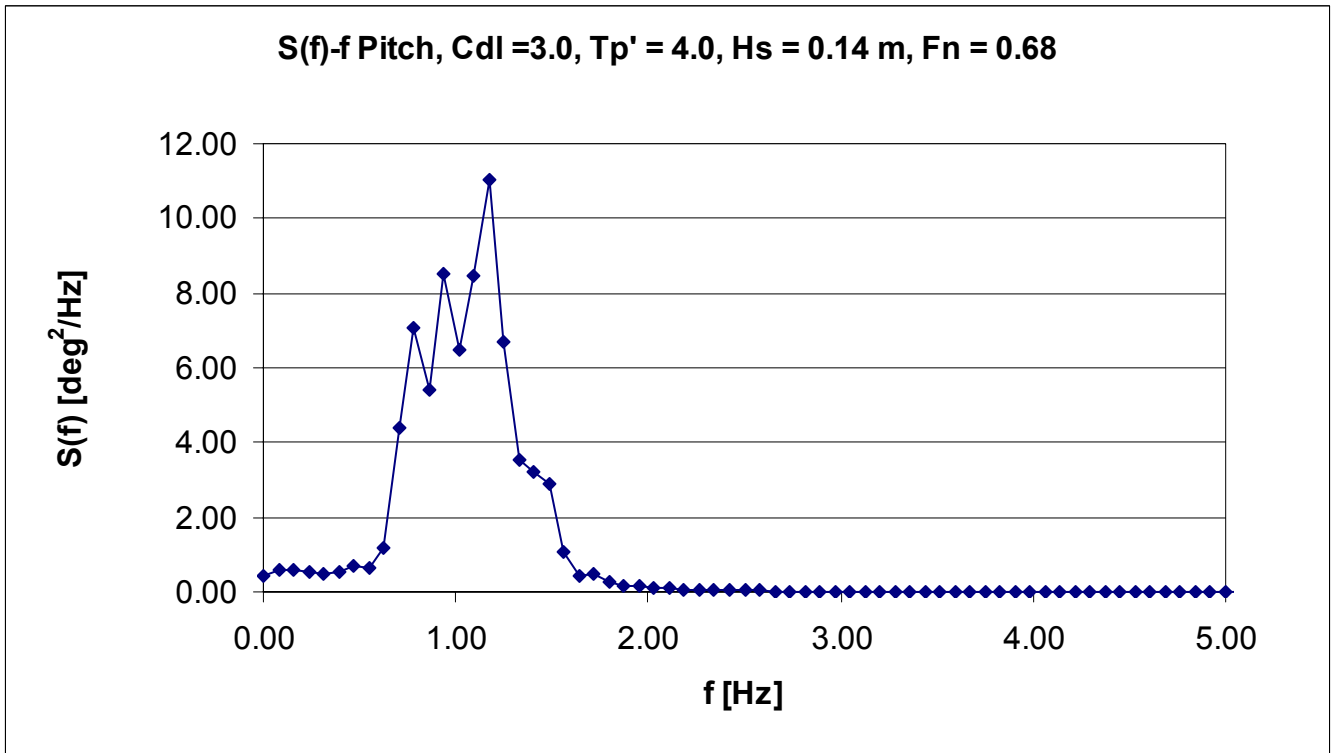
Σχήμα 65: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



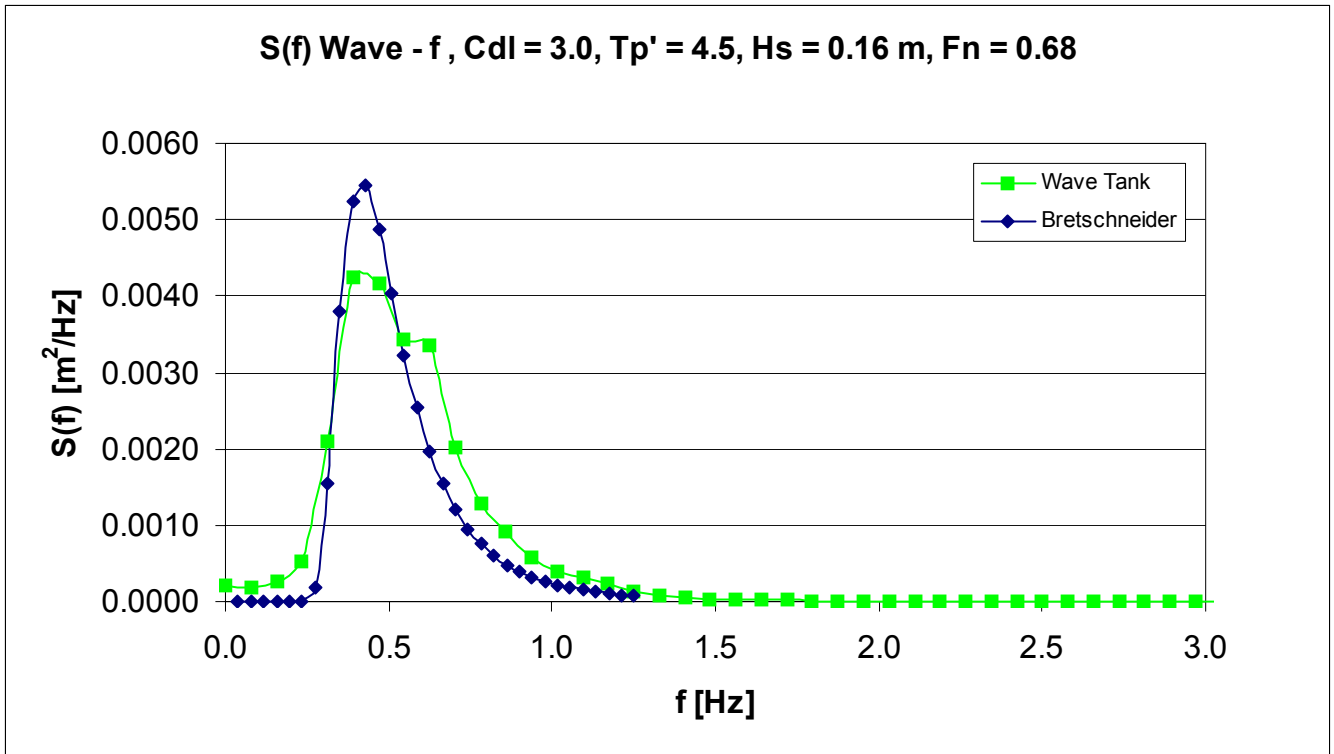
Σχήμα 66: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



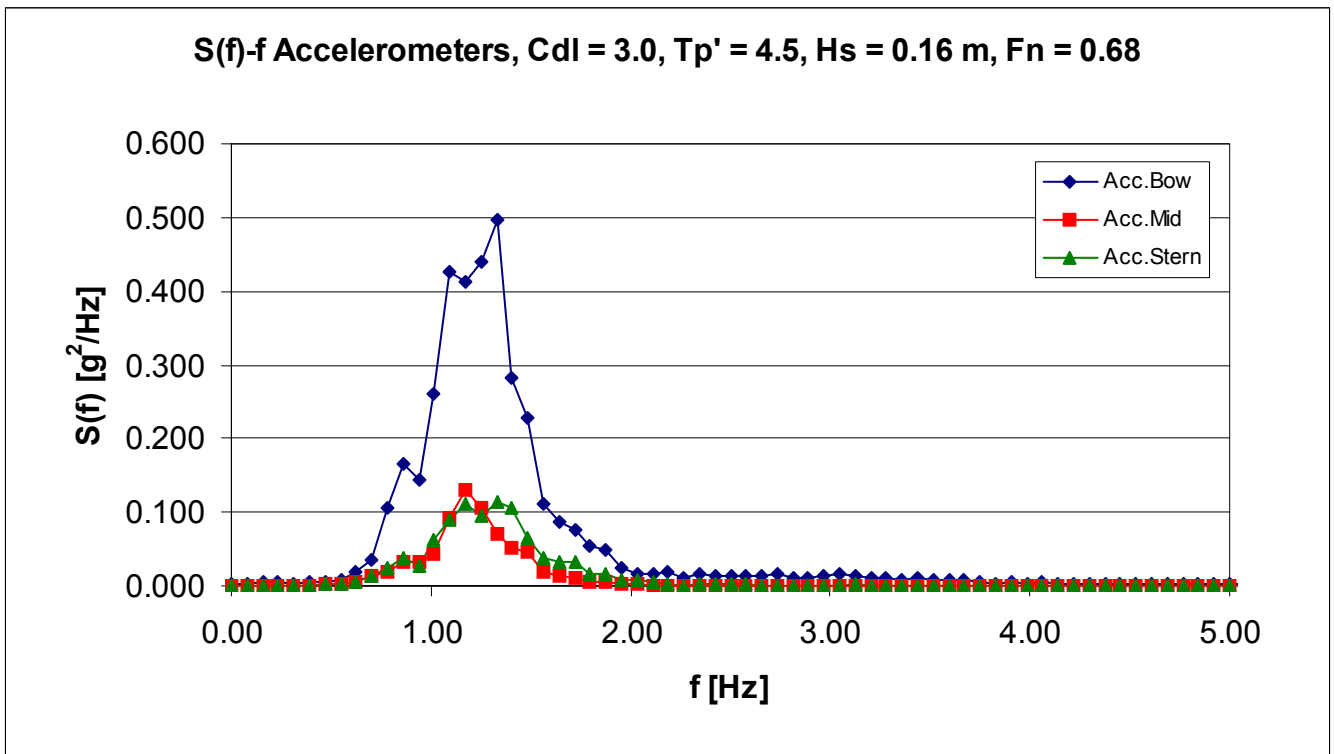
Σχήμα 67: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



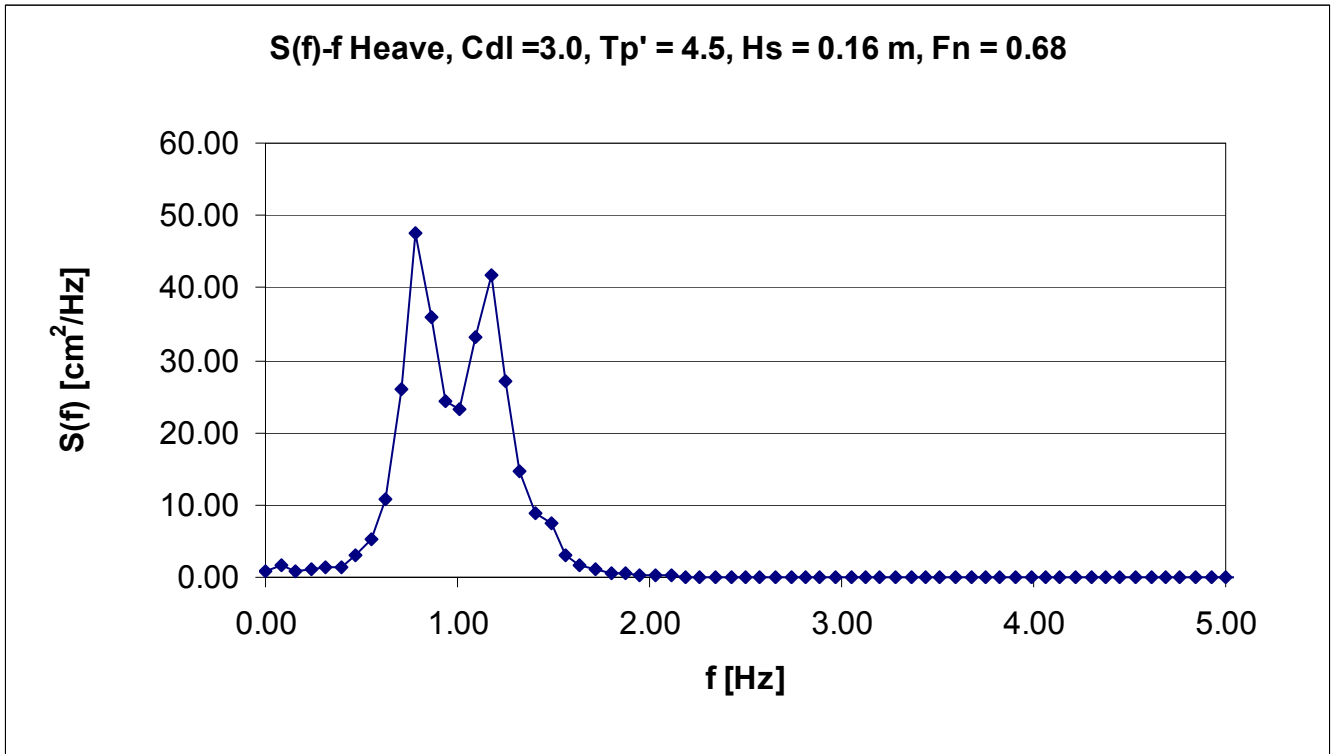
Σχήμα 68: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



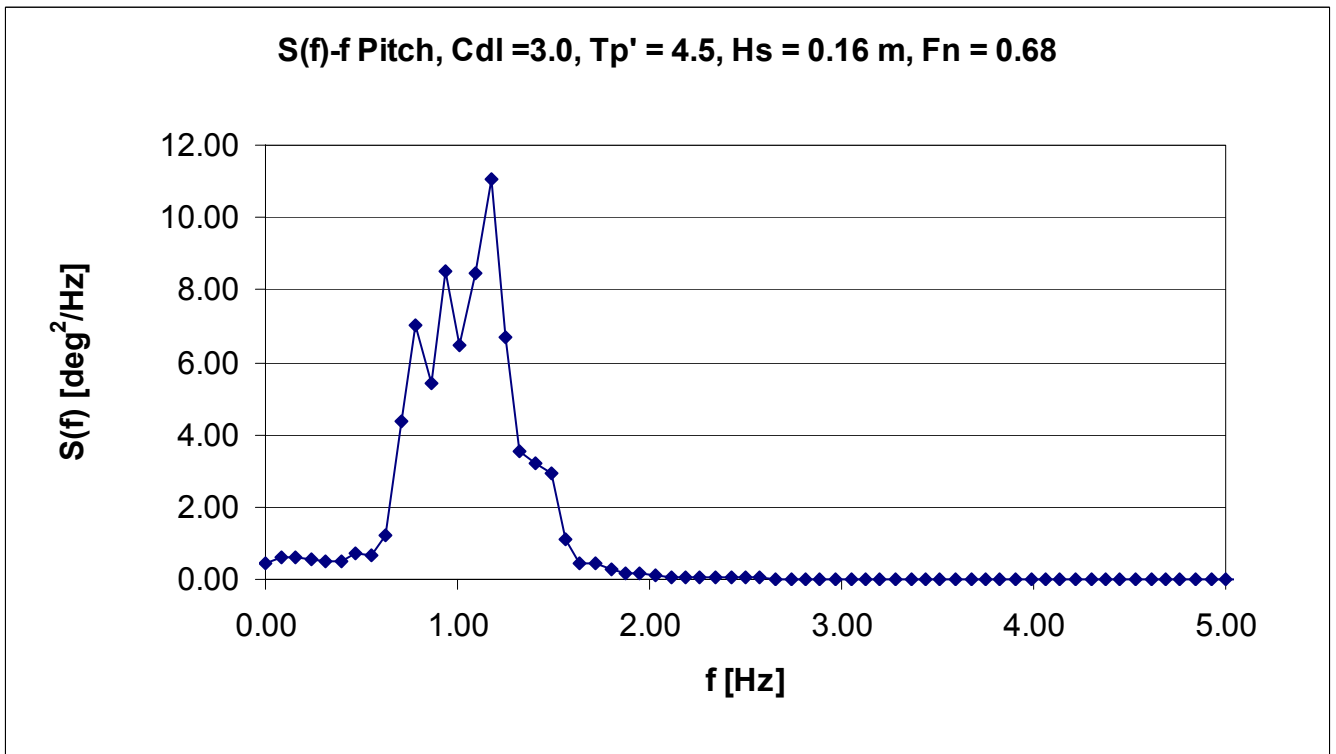
Σχήμα 69: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



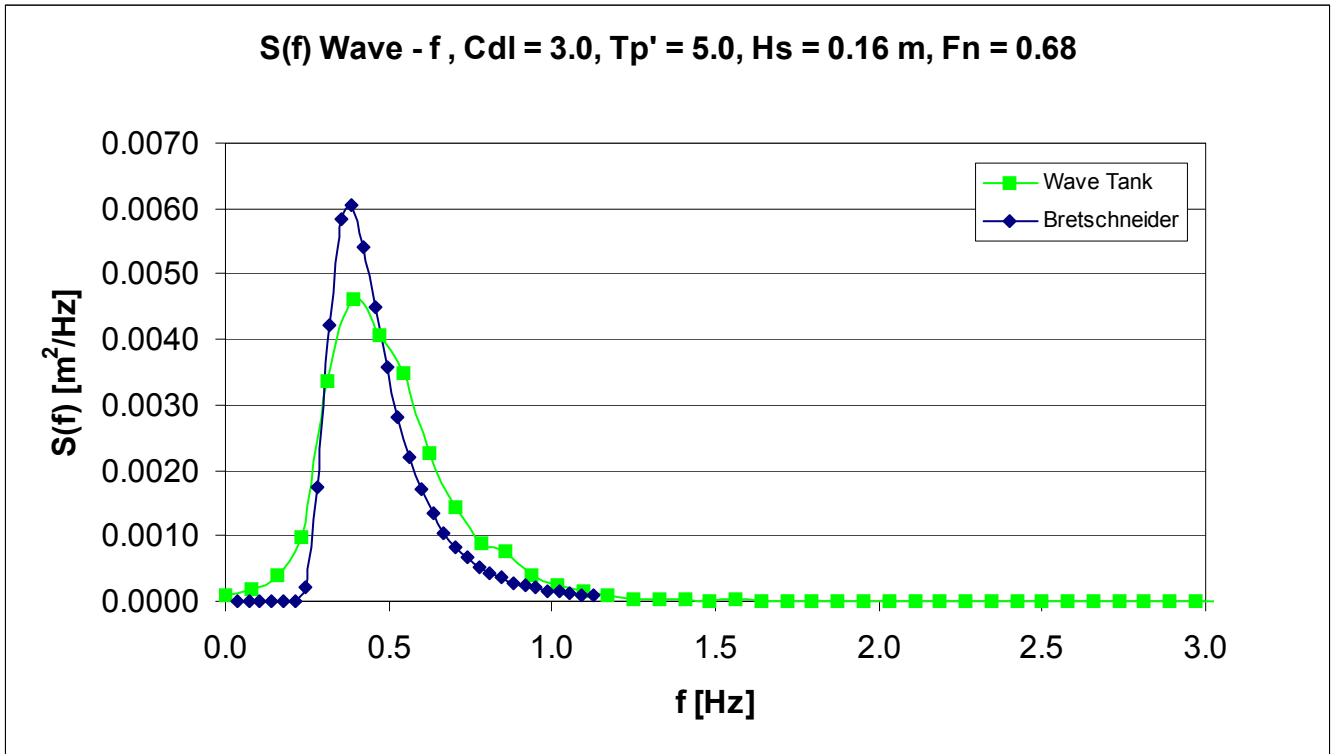
Σχήμα 70: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



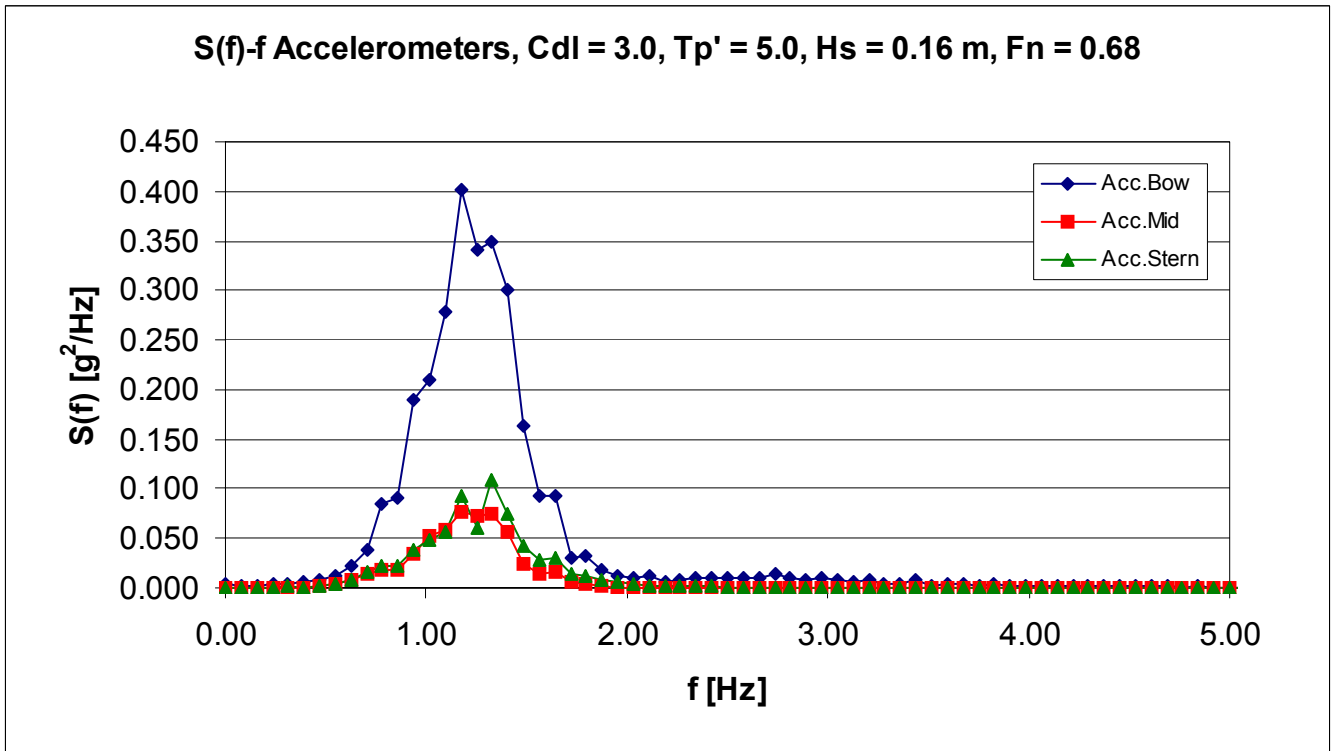
Σχήμα 71: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



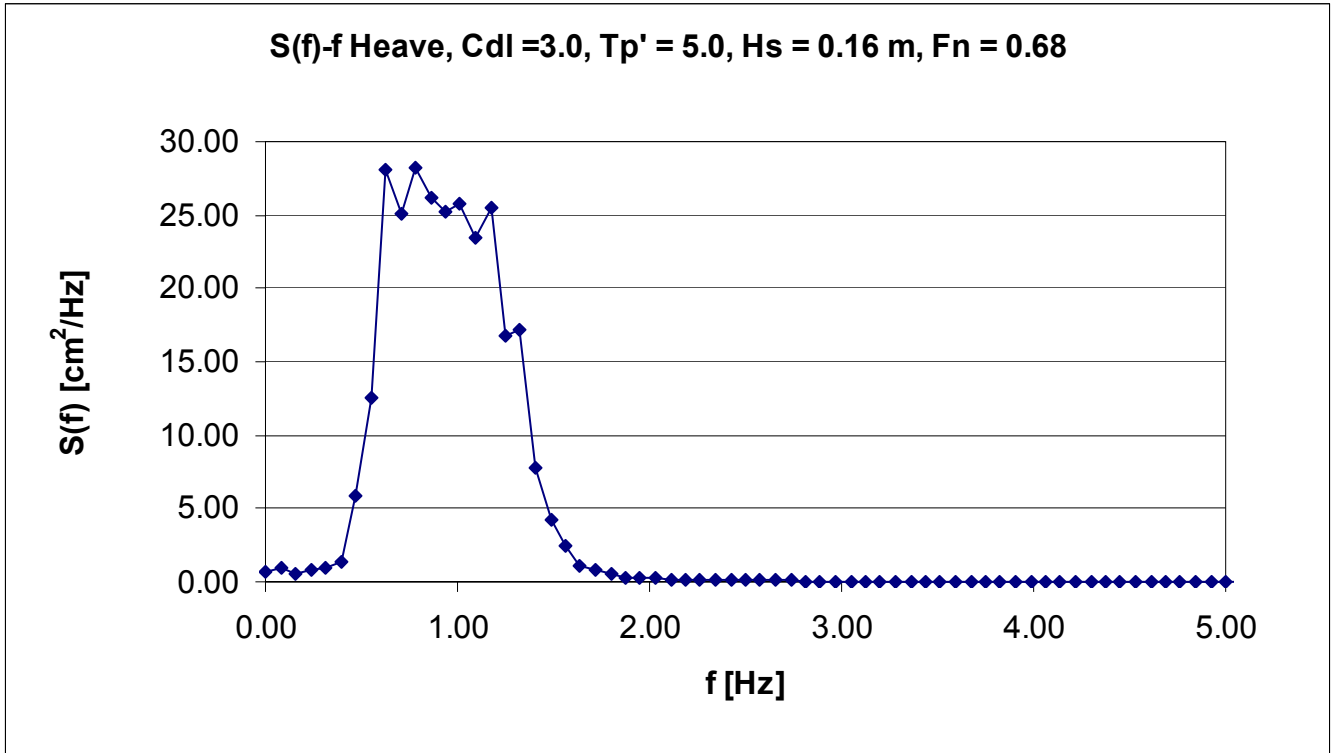
Σχήμα 72: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



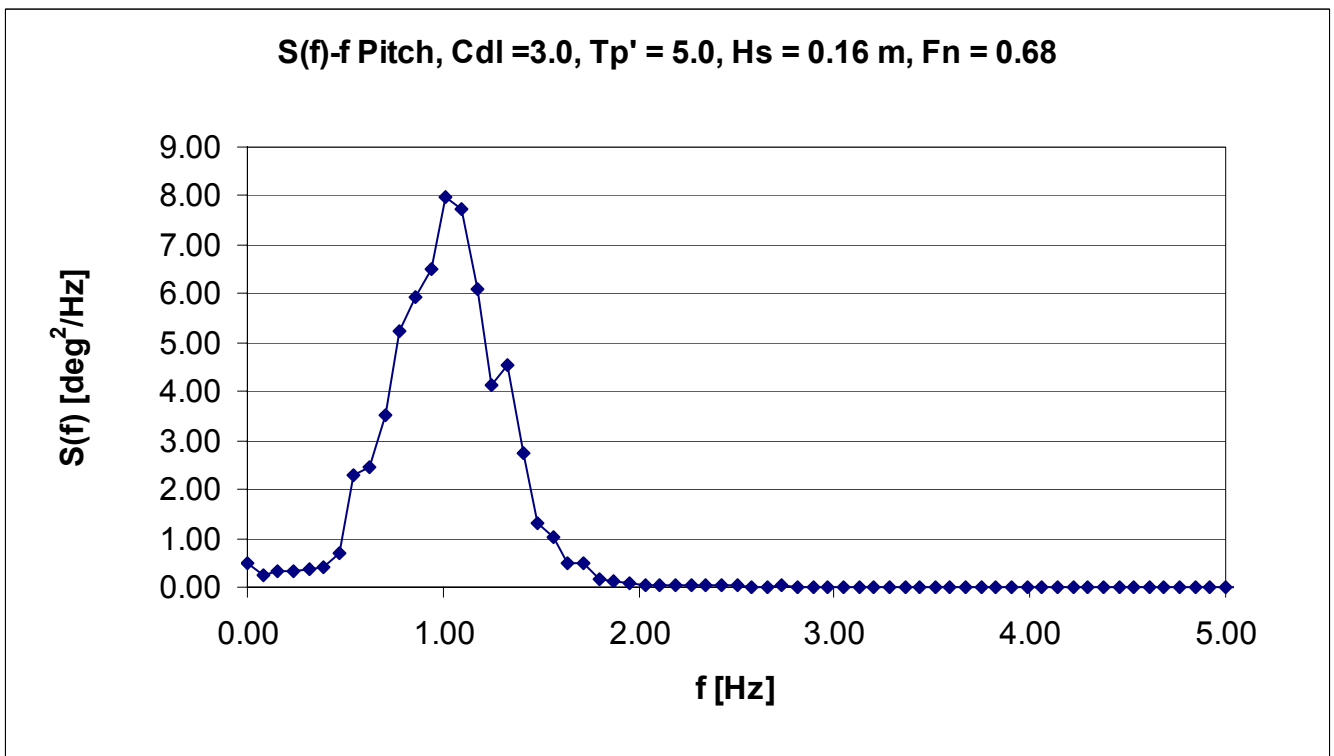
Σχήμα 73: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 74: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων

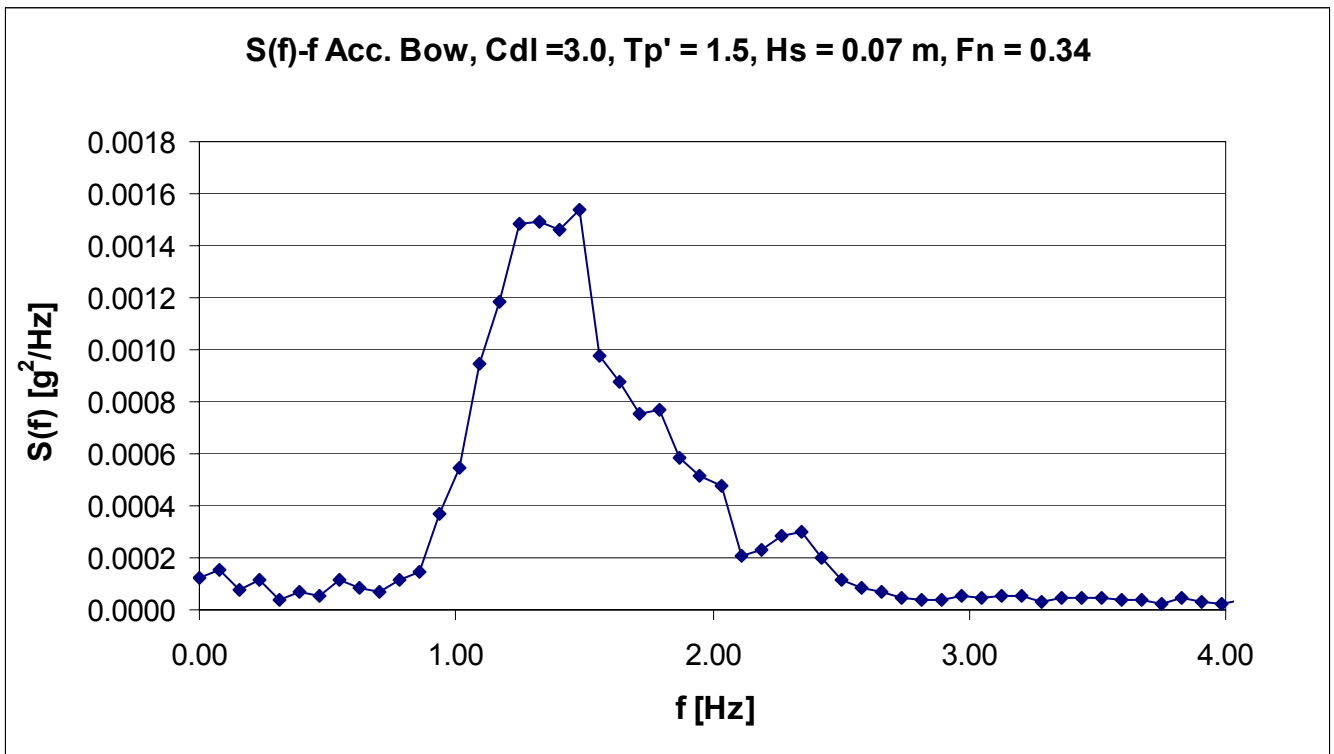


Σχήμα 75: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης

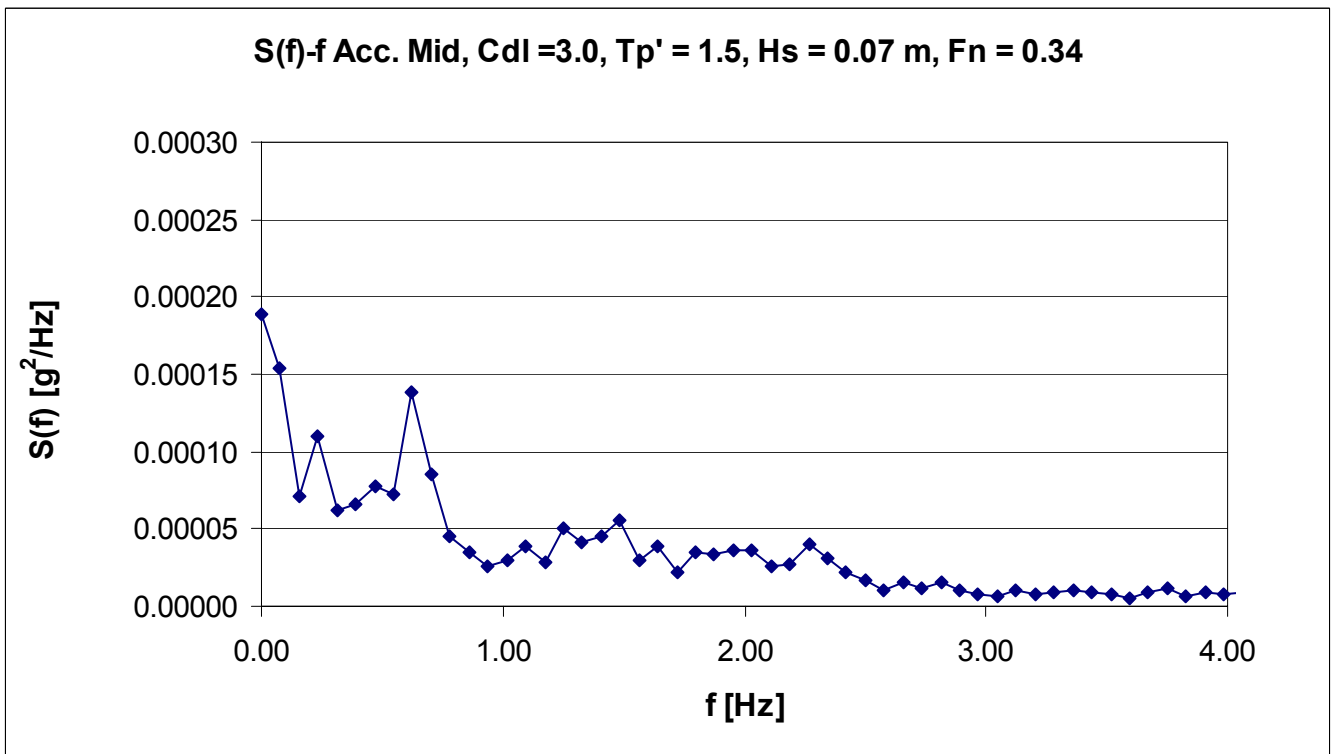


Σχήμα 76: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

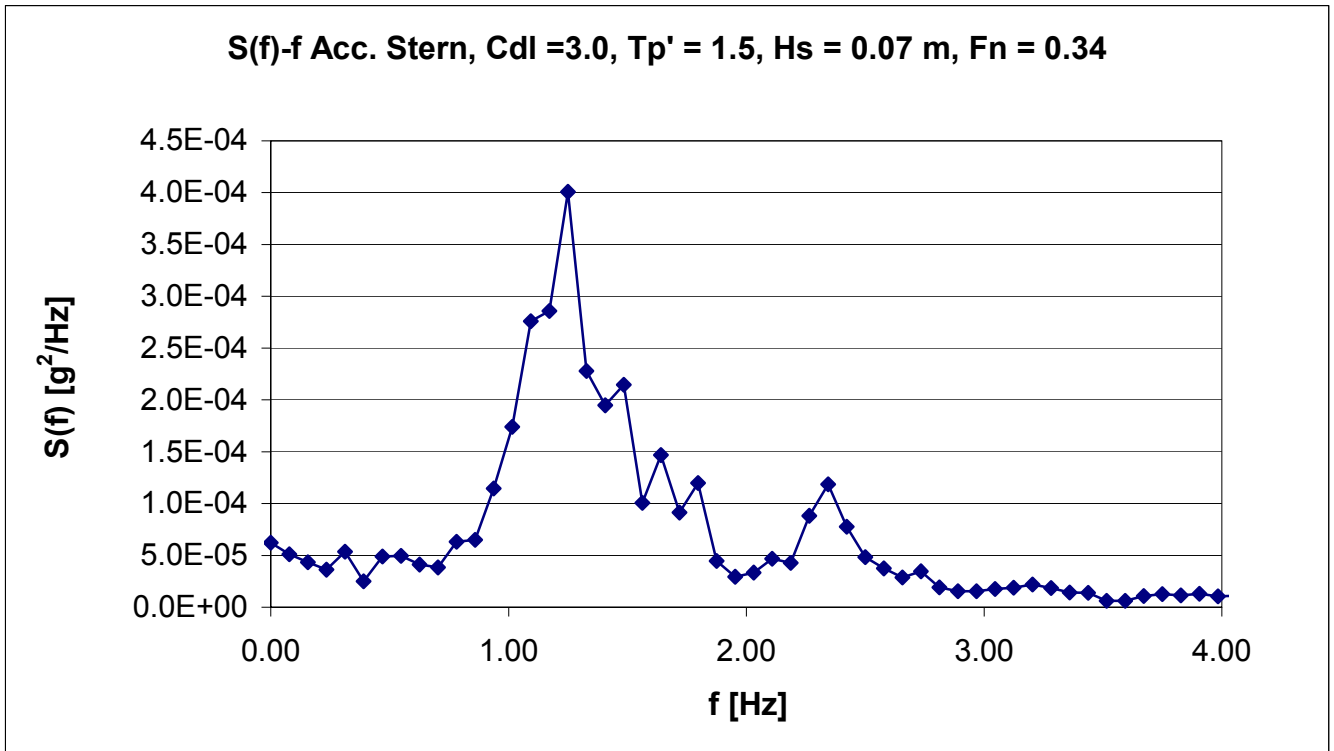
Αποτελέσματα NTUA 116/96 για Cdl = 3.00 και Fn = 0.34



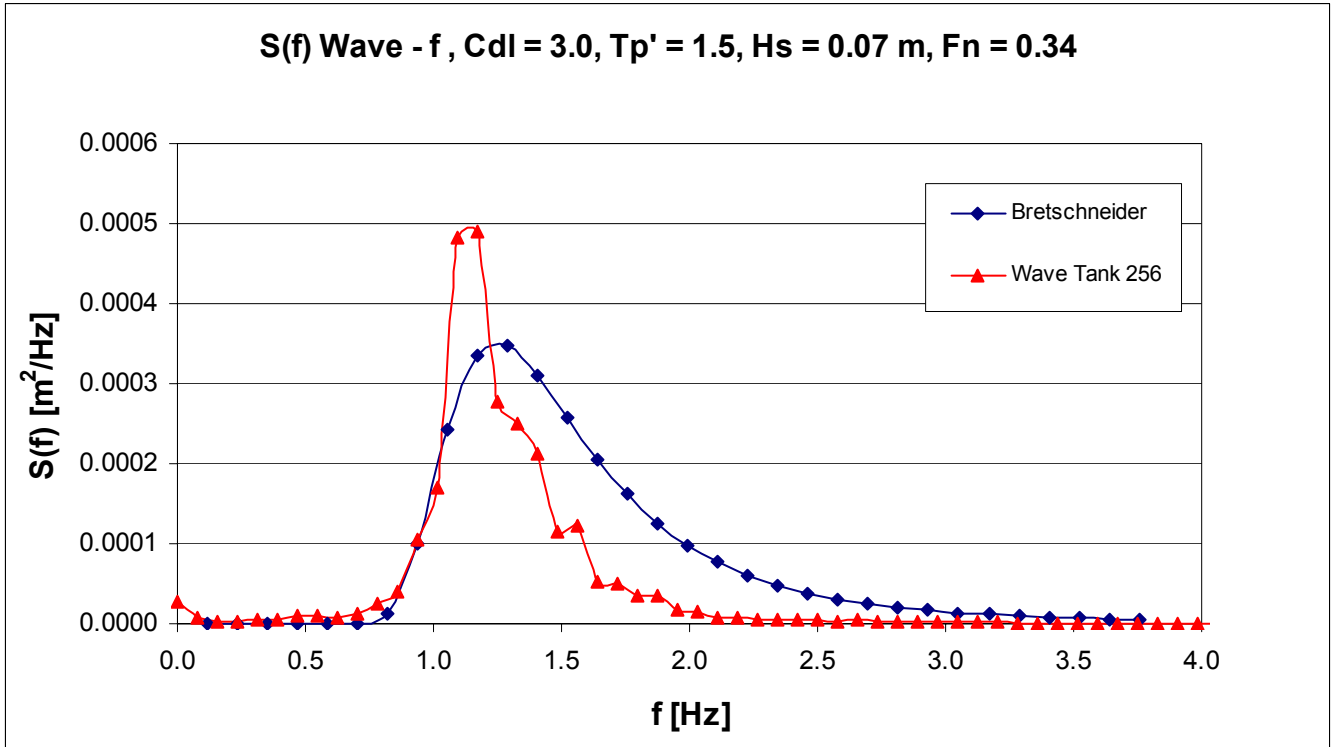
Σχήμα 77: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



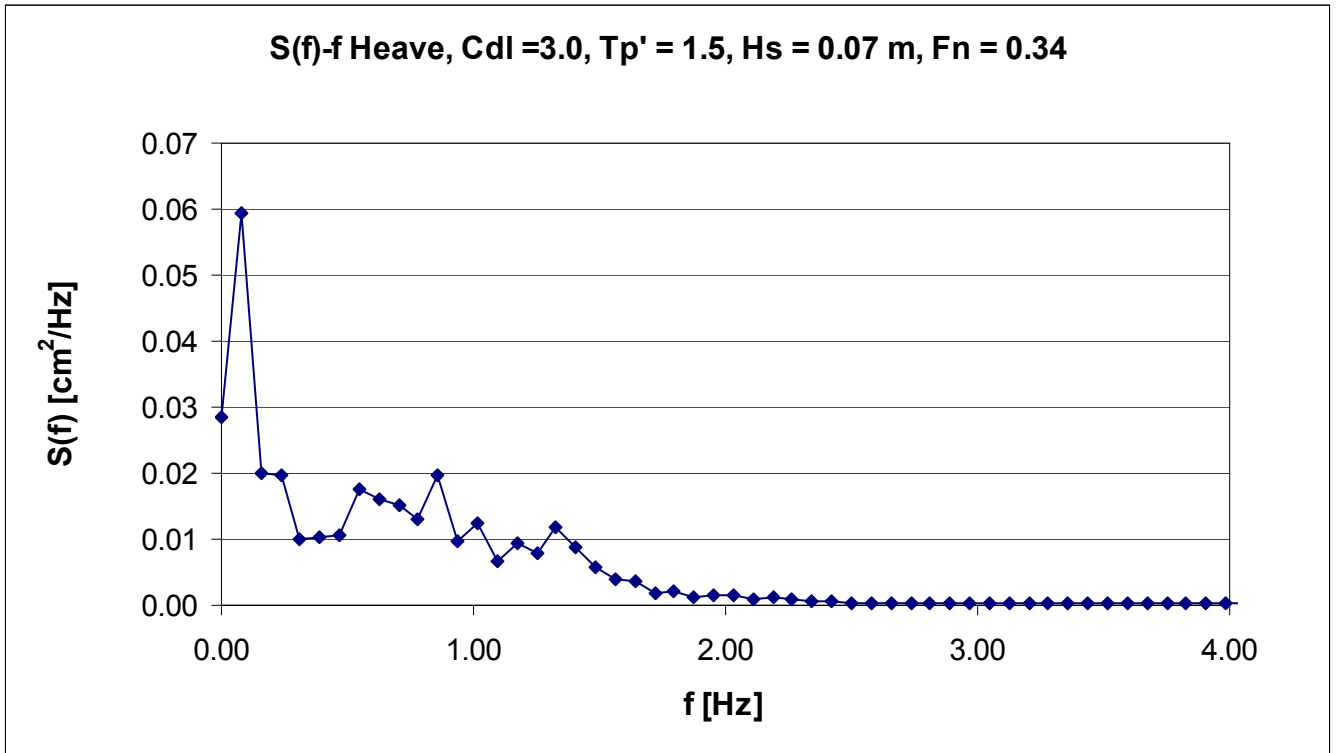
Σχήμα 78: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους



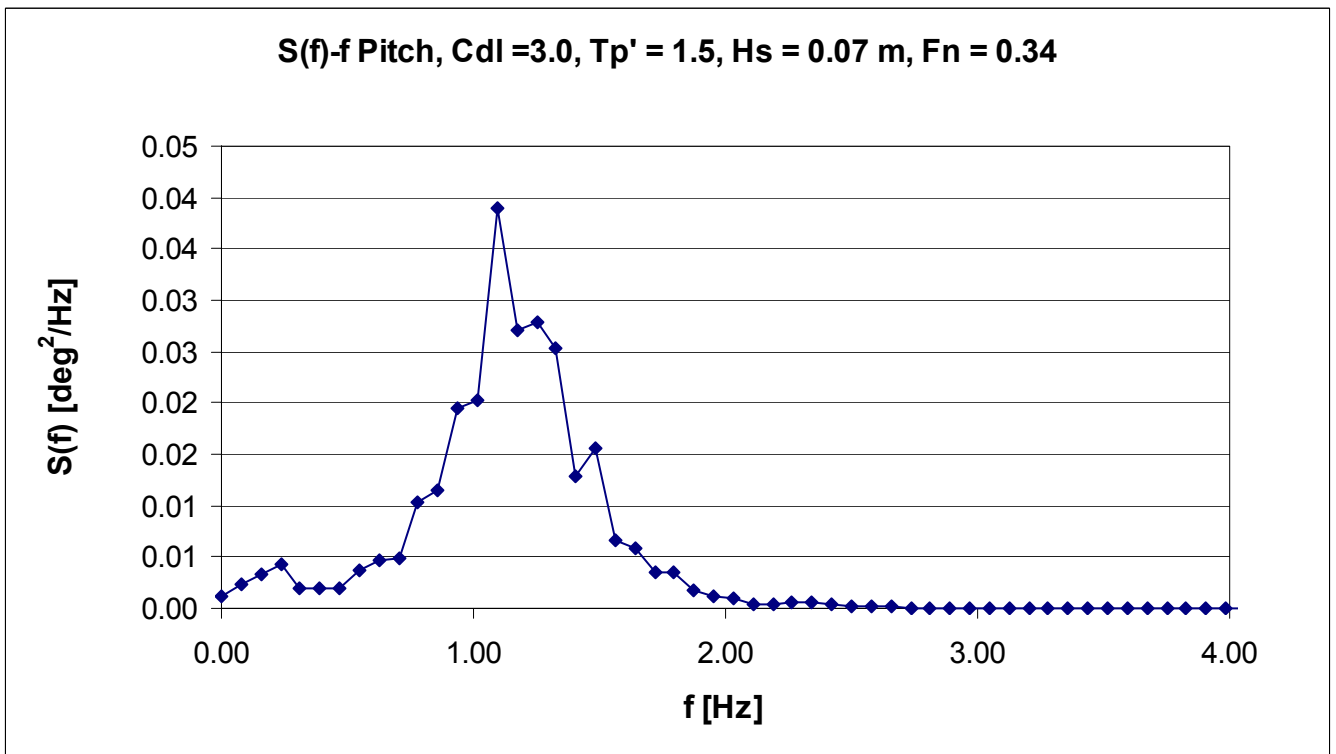
Σχήμα 79: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη



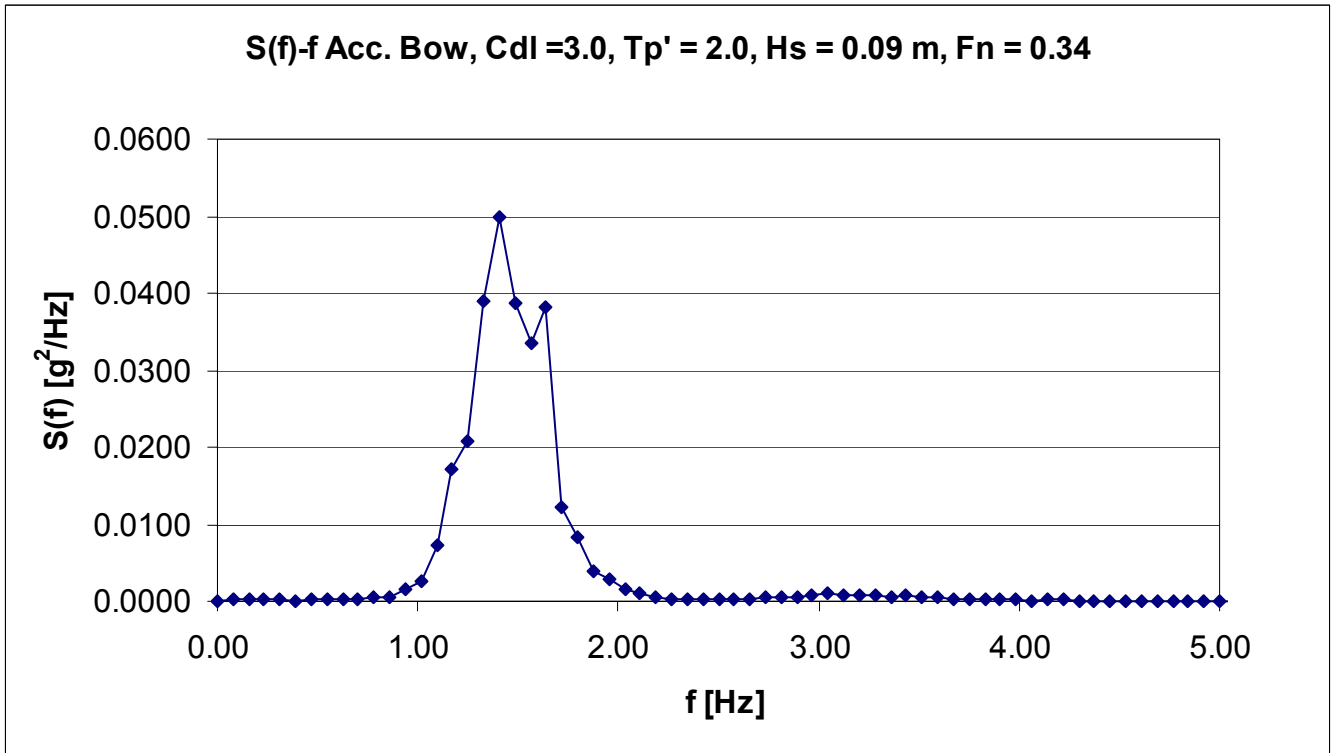
Σχήμα 80: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



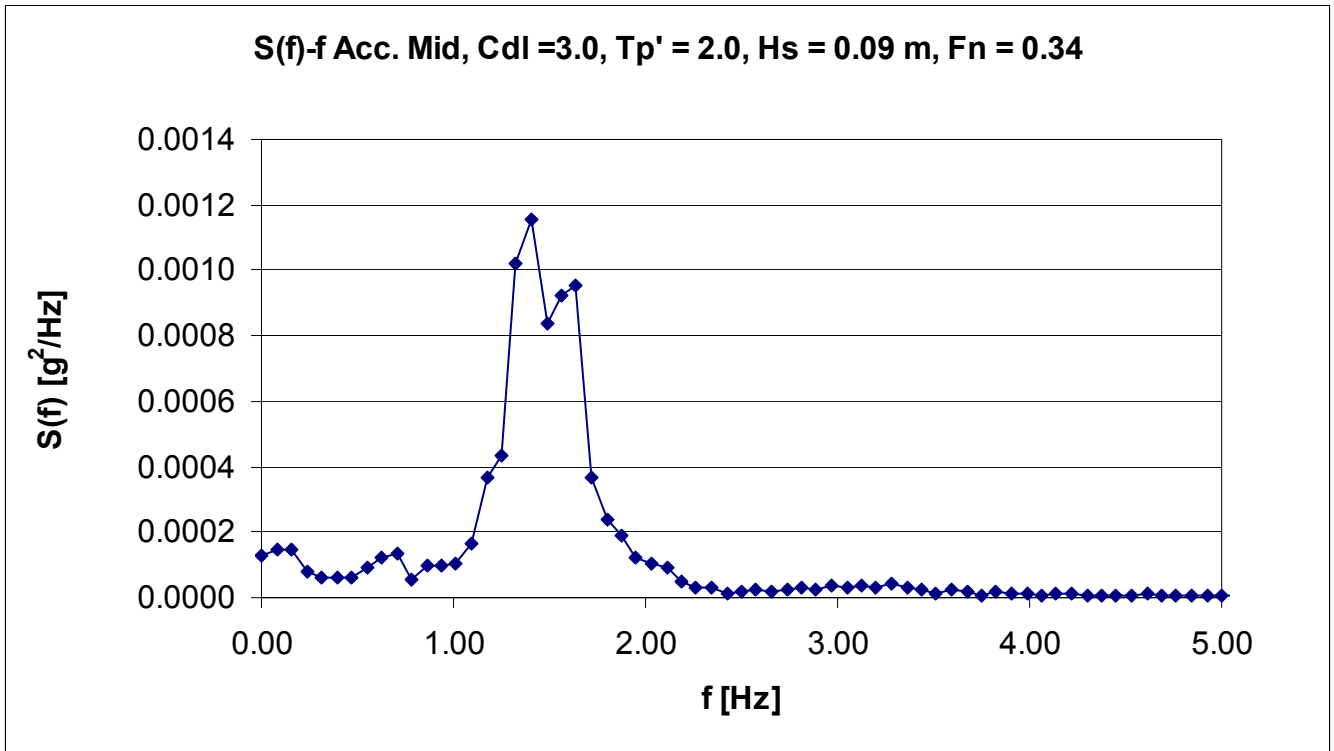
Σχήμα 81: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



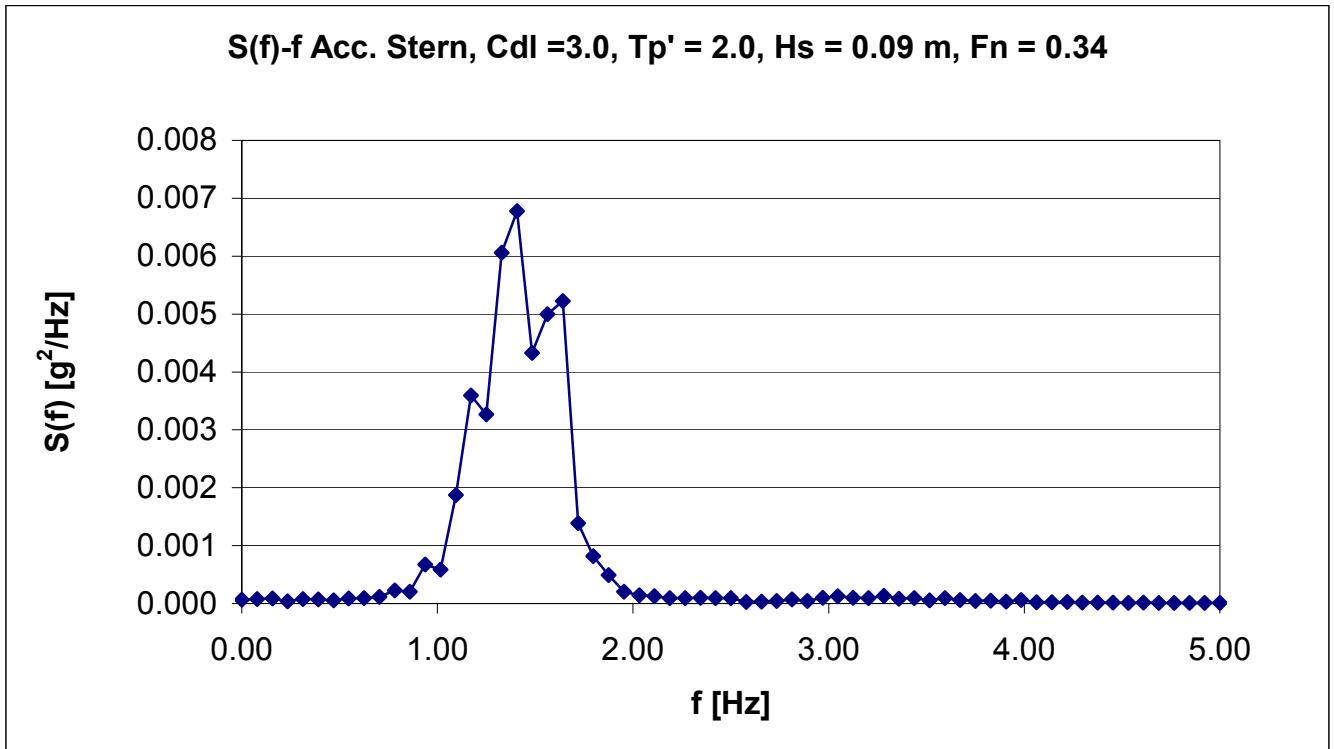
Σχήμα 82: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



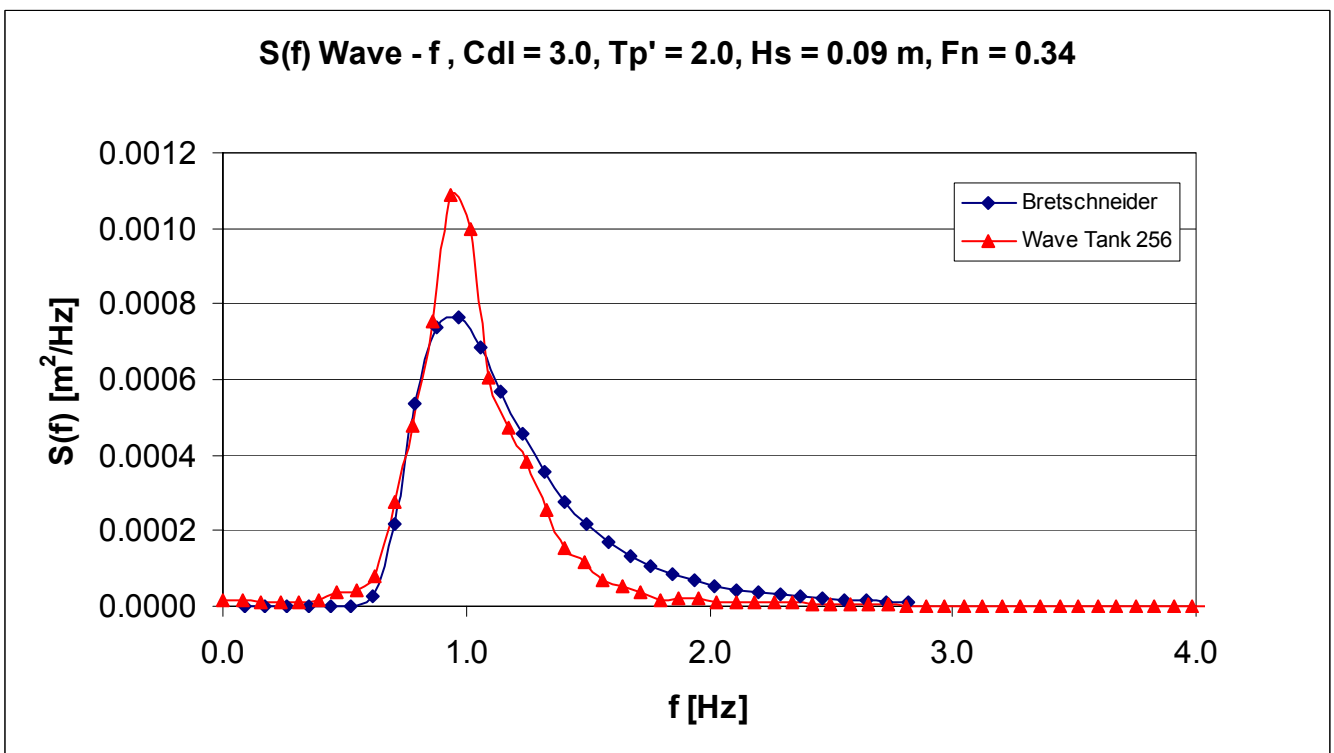
Σχήμα 83: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



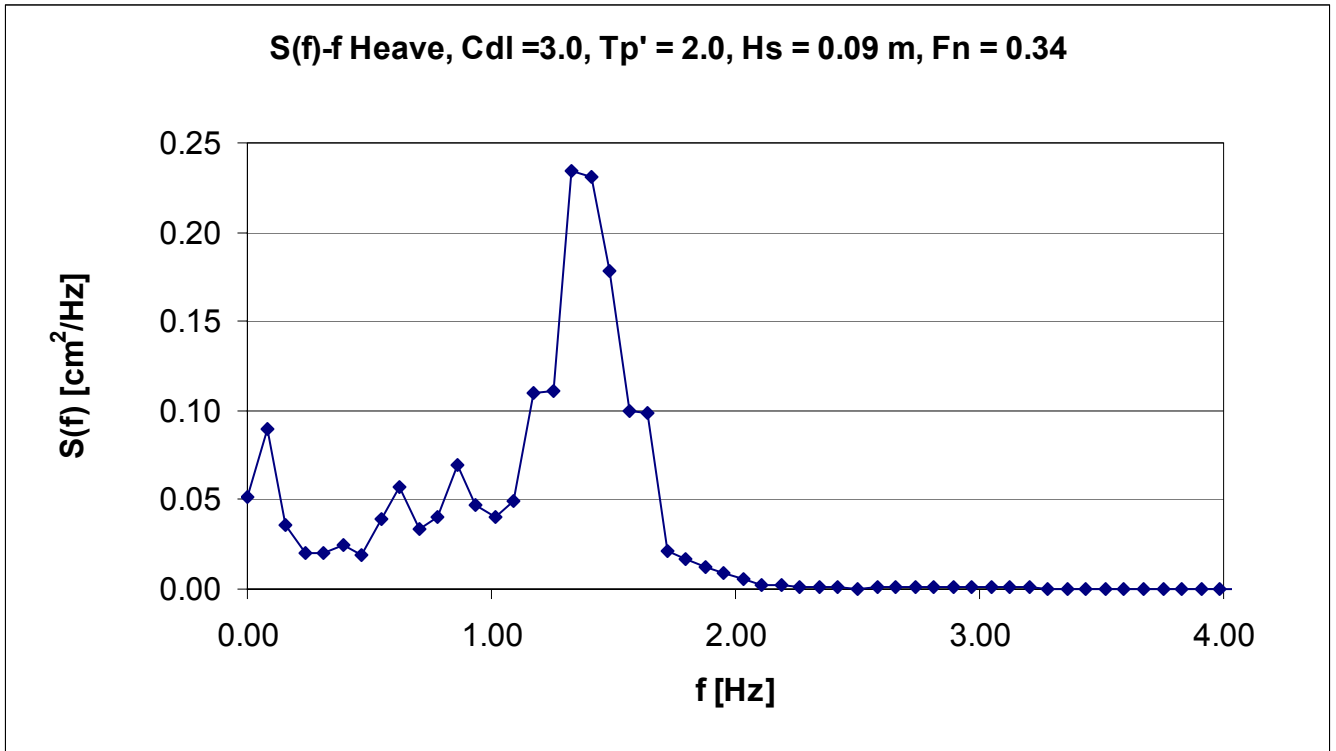
Σχήμα 84: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους



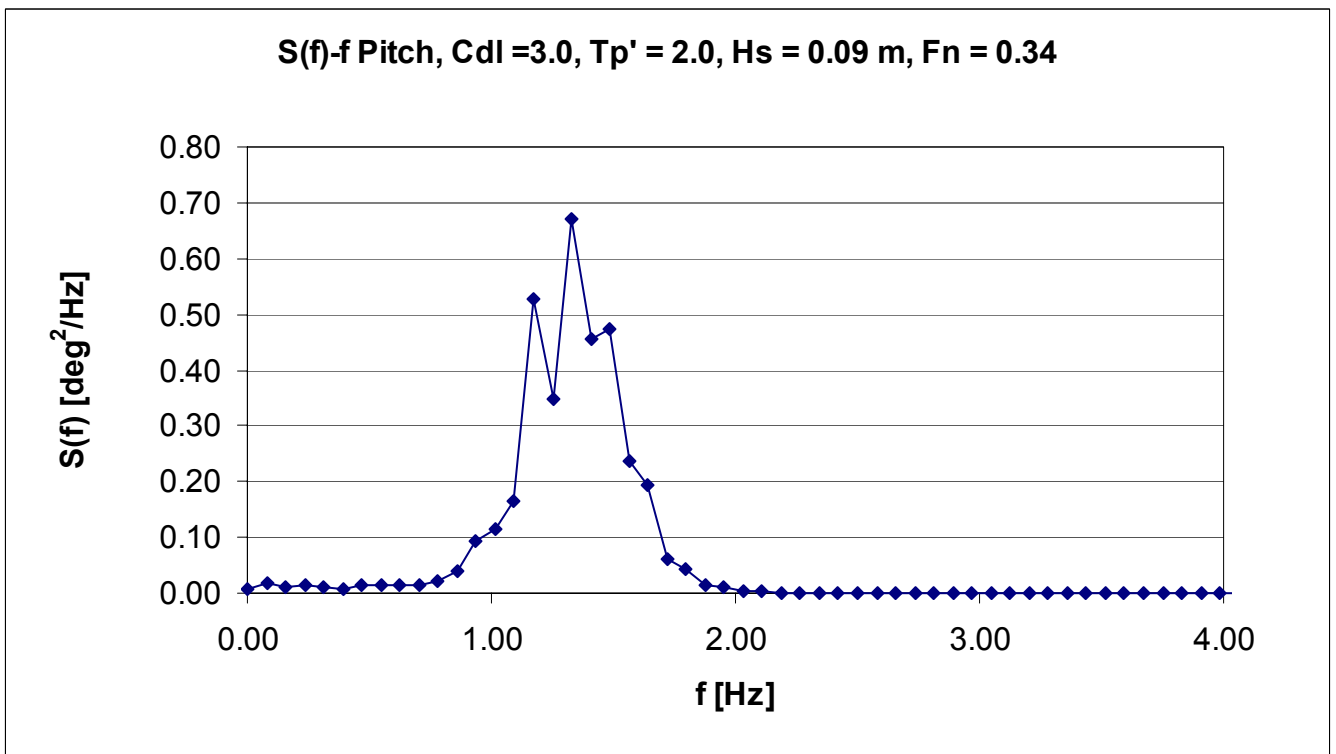
Σχήμα 85: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη



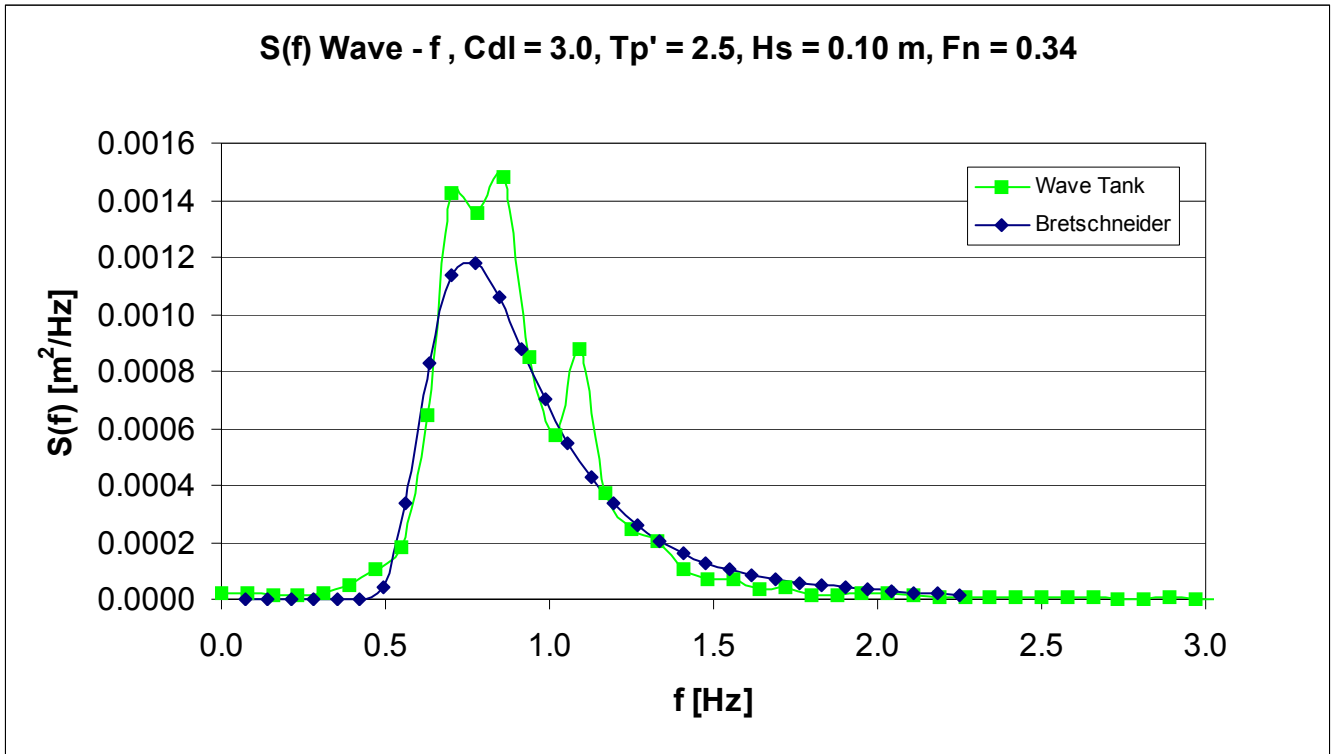
Σχήμα 86: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



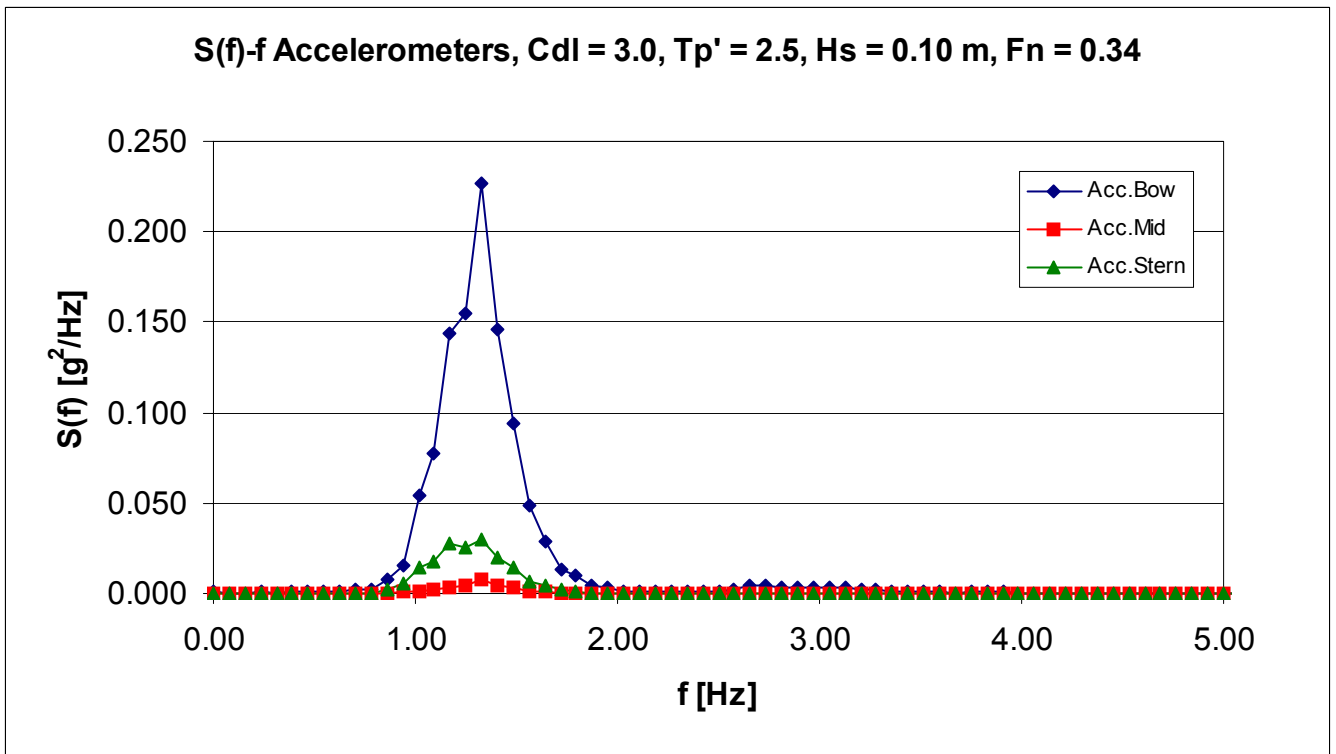
Σχήμα 87: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



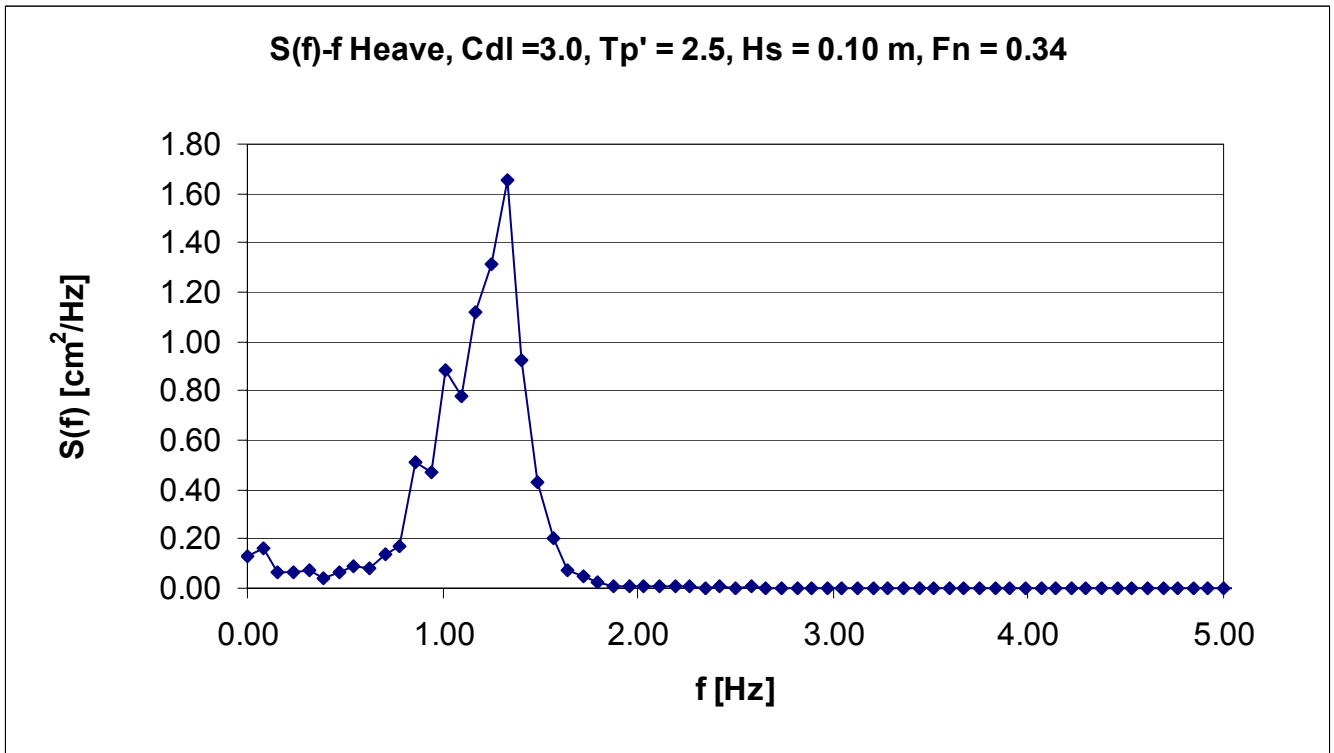
Σχήμα 88: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



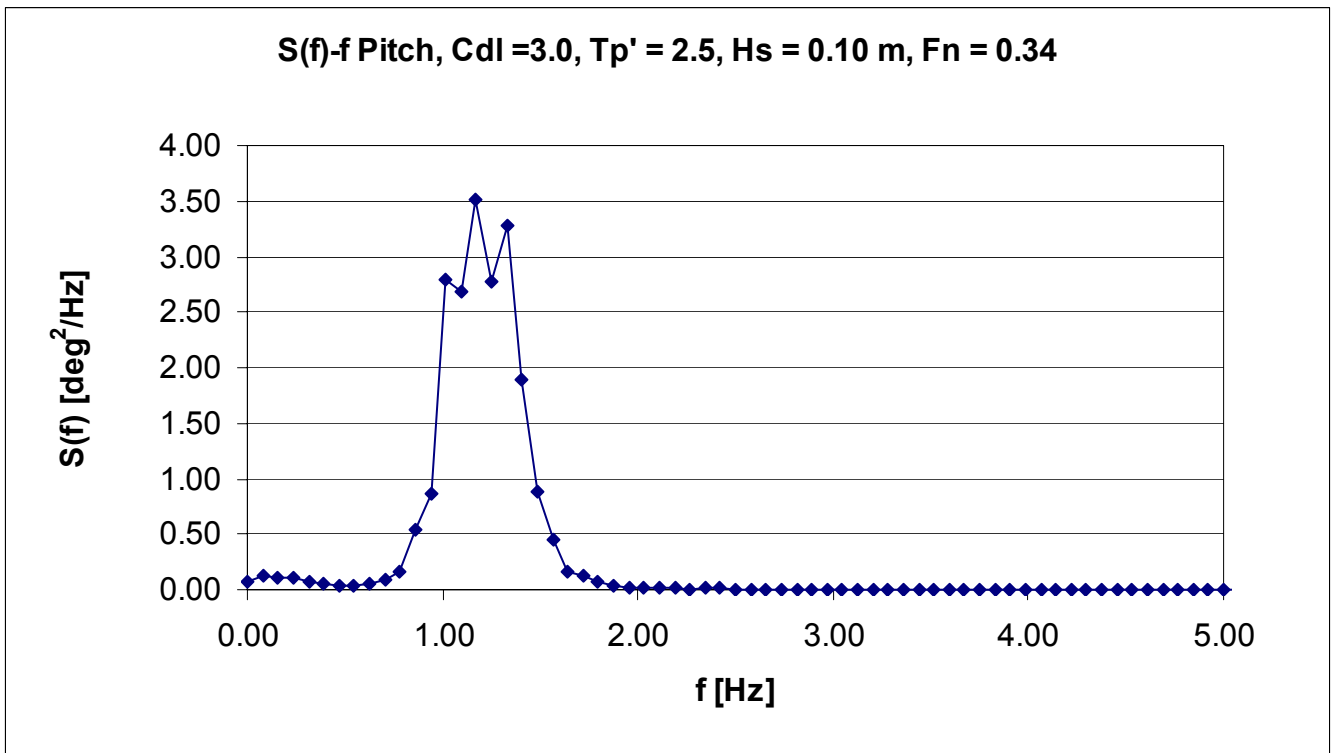
Σχήμα 89: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



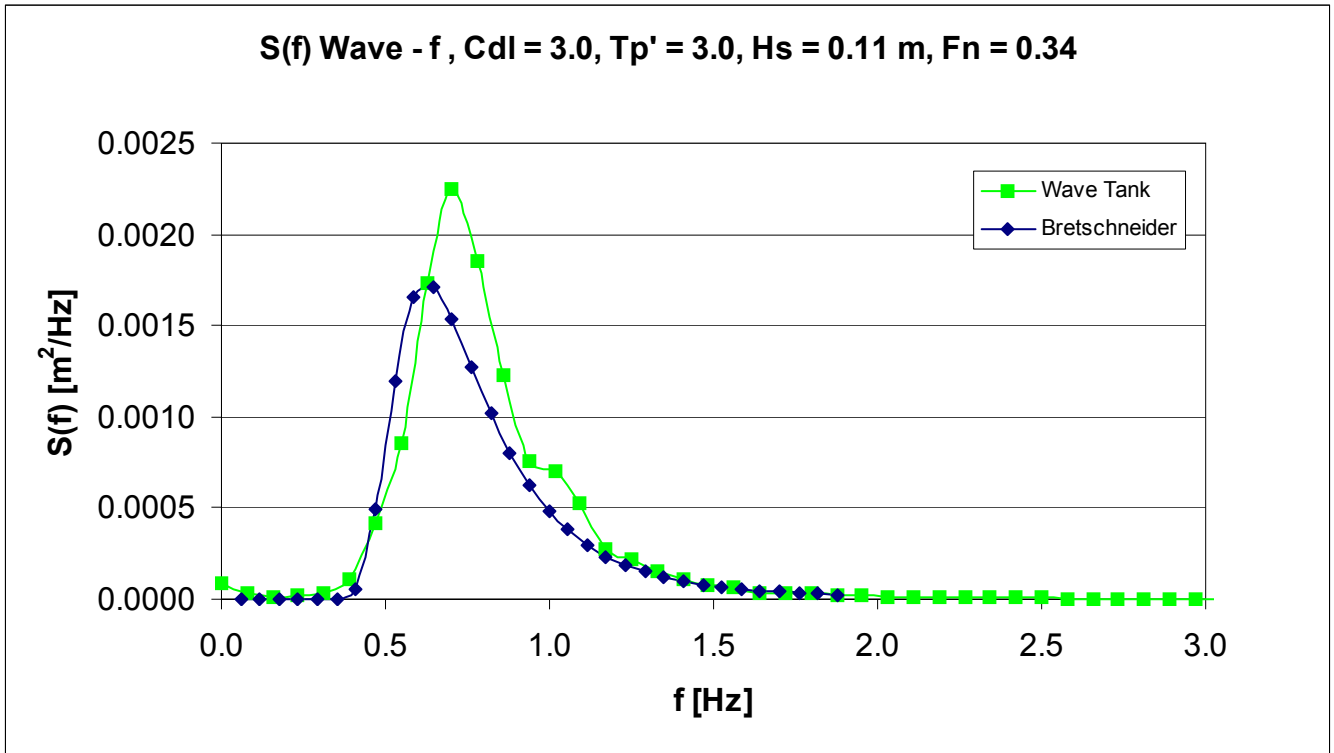
Σχήμα 90: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



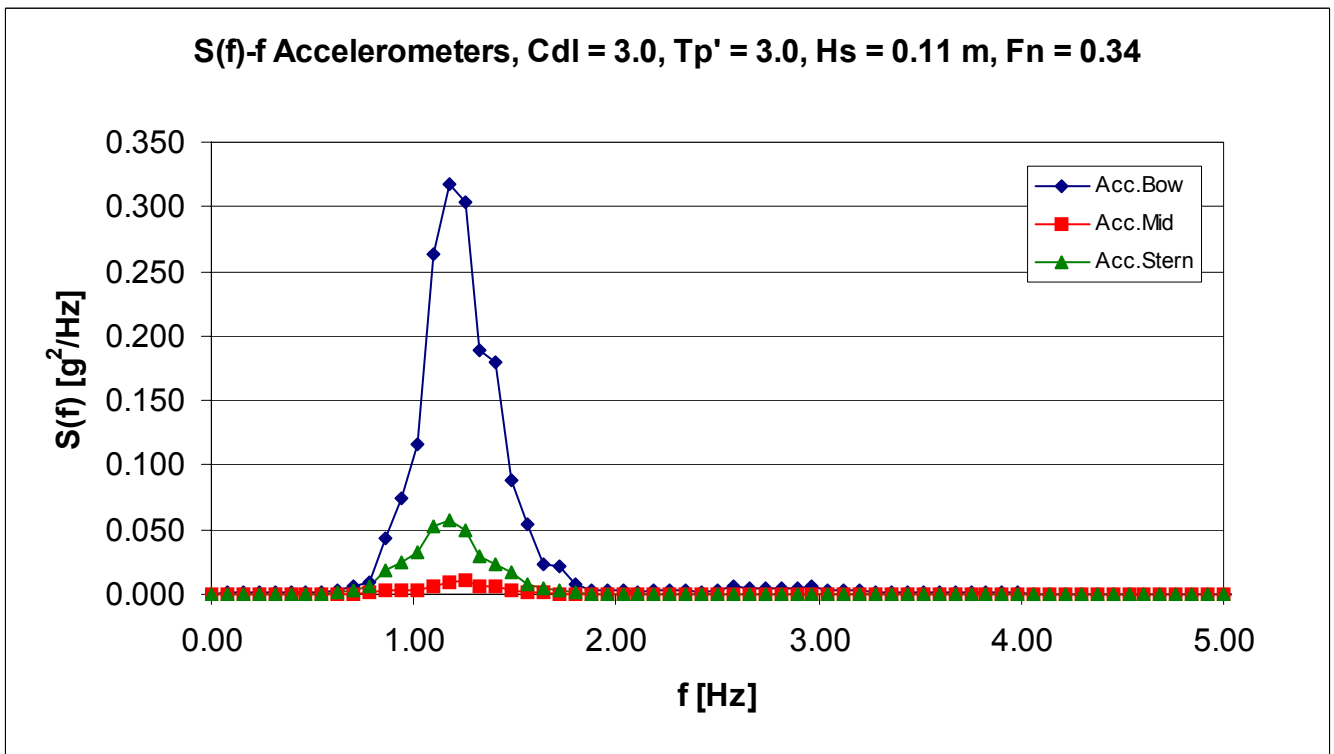
Σχήμα 91: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



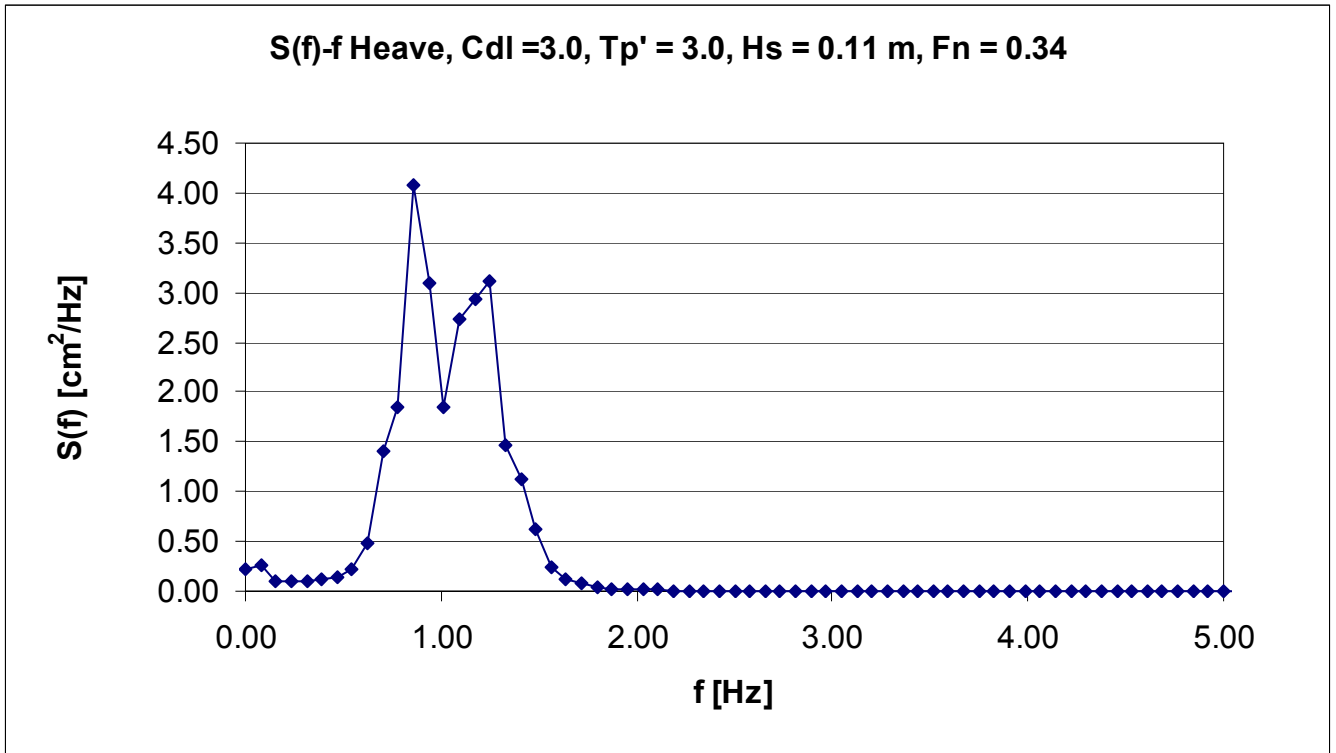
Σχήμα 92: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



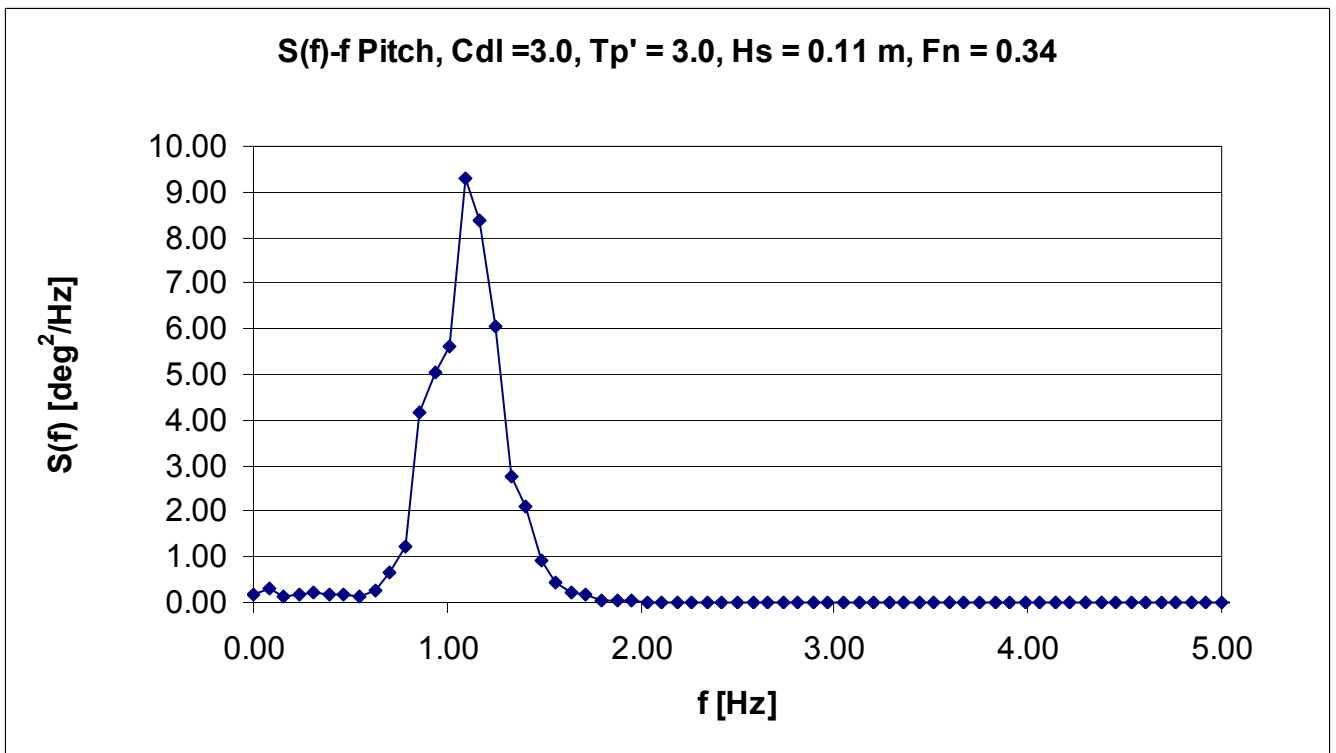
Σχήμα 93: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



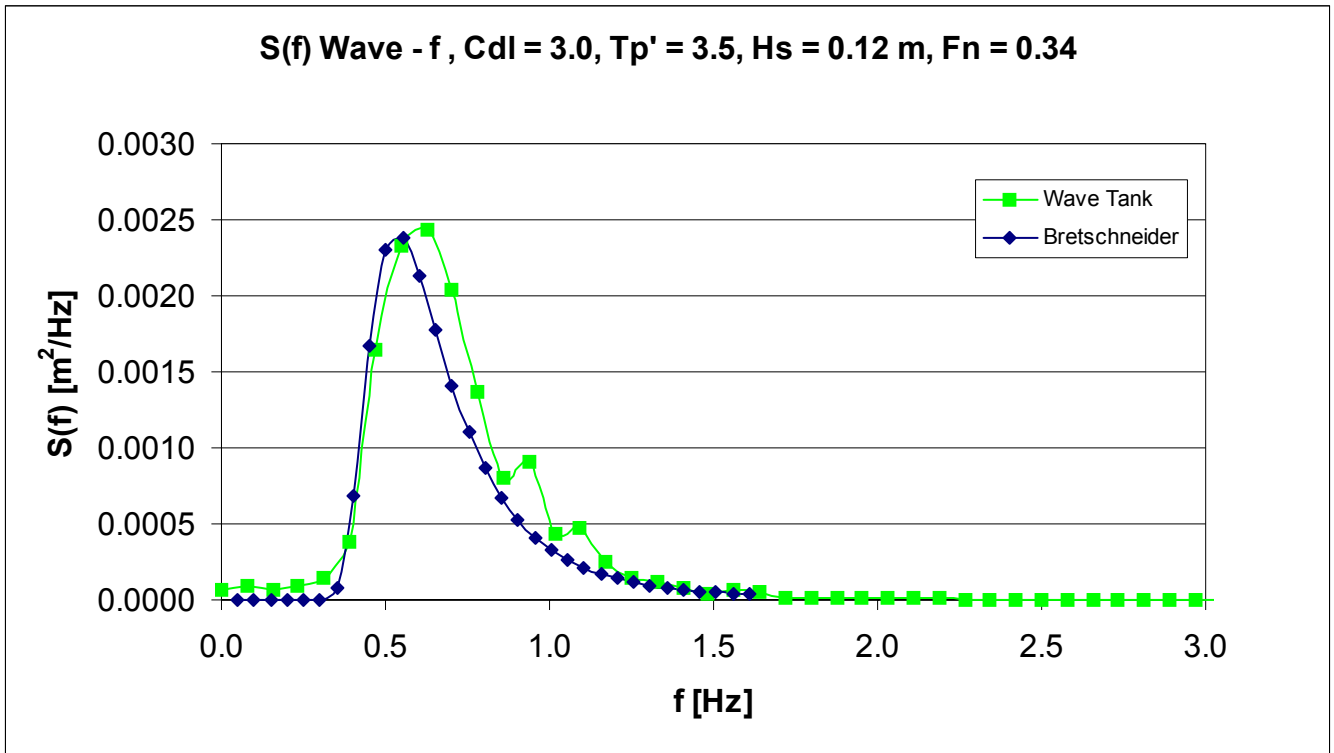
Σχήμα 94: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



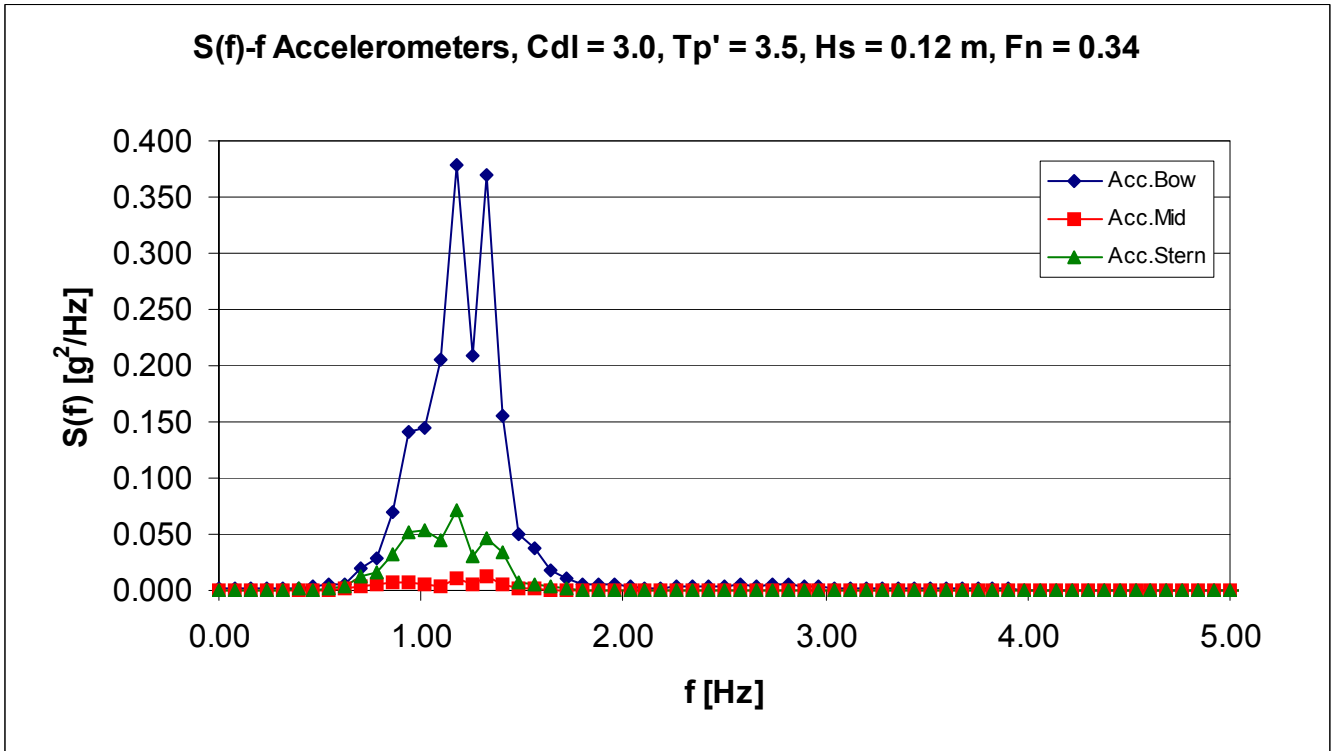
Σχήμα 95: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



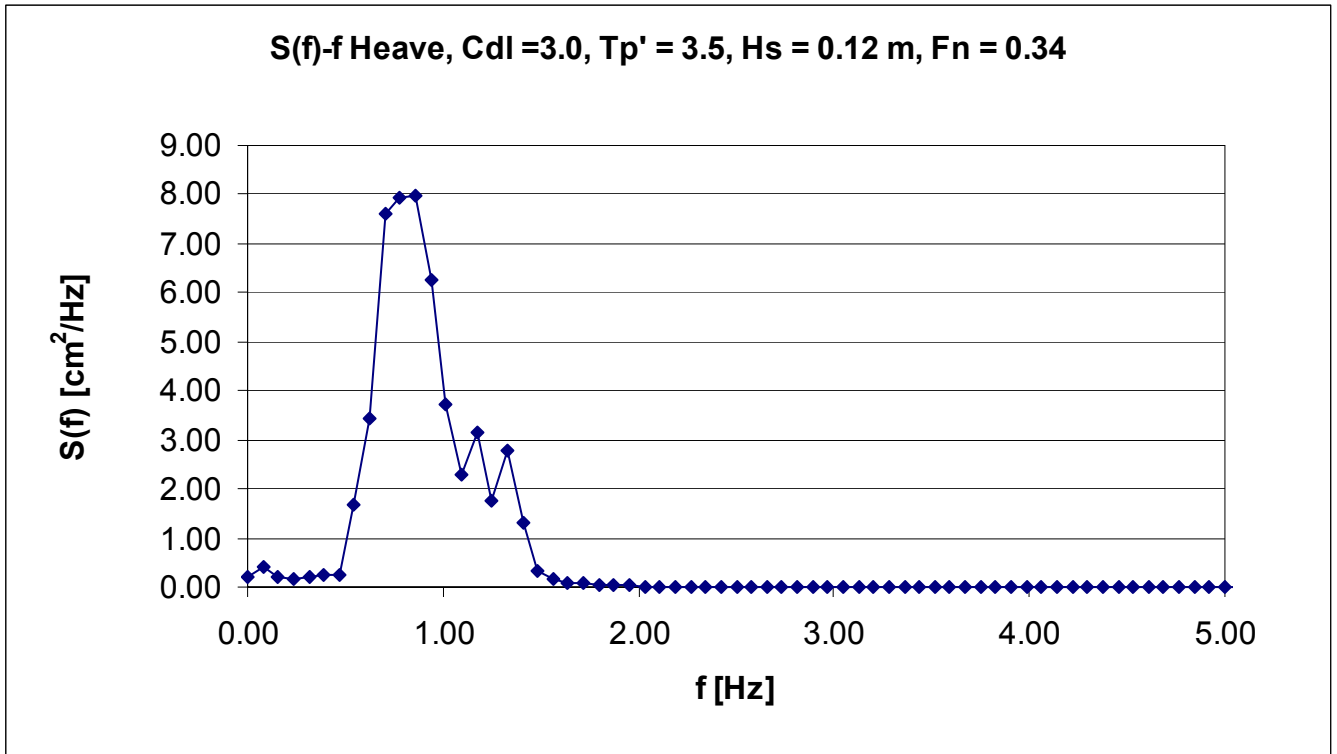
Σχήμα 96: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



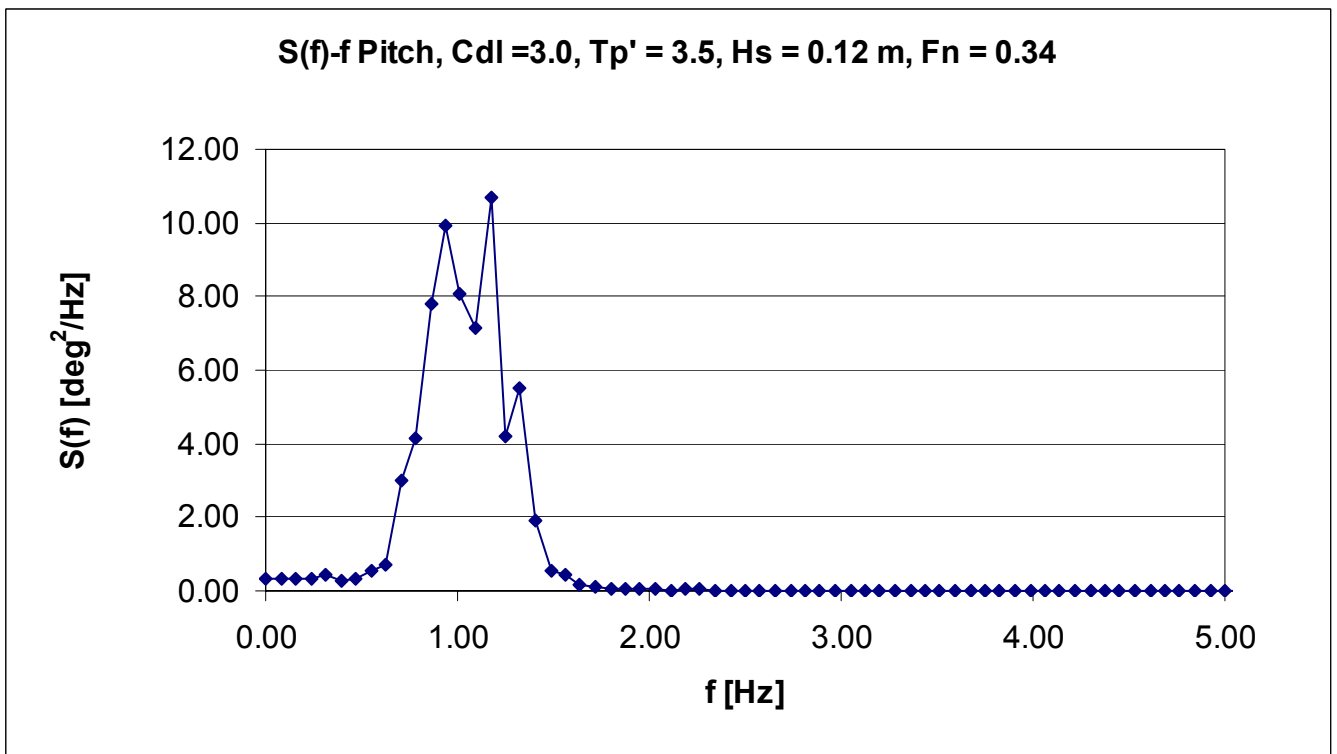
Σχήμα 97: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



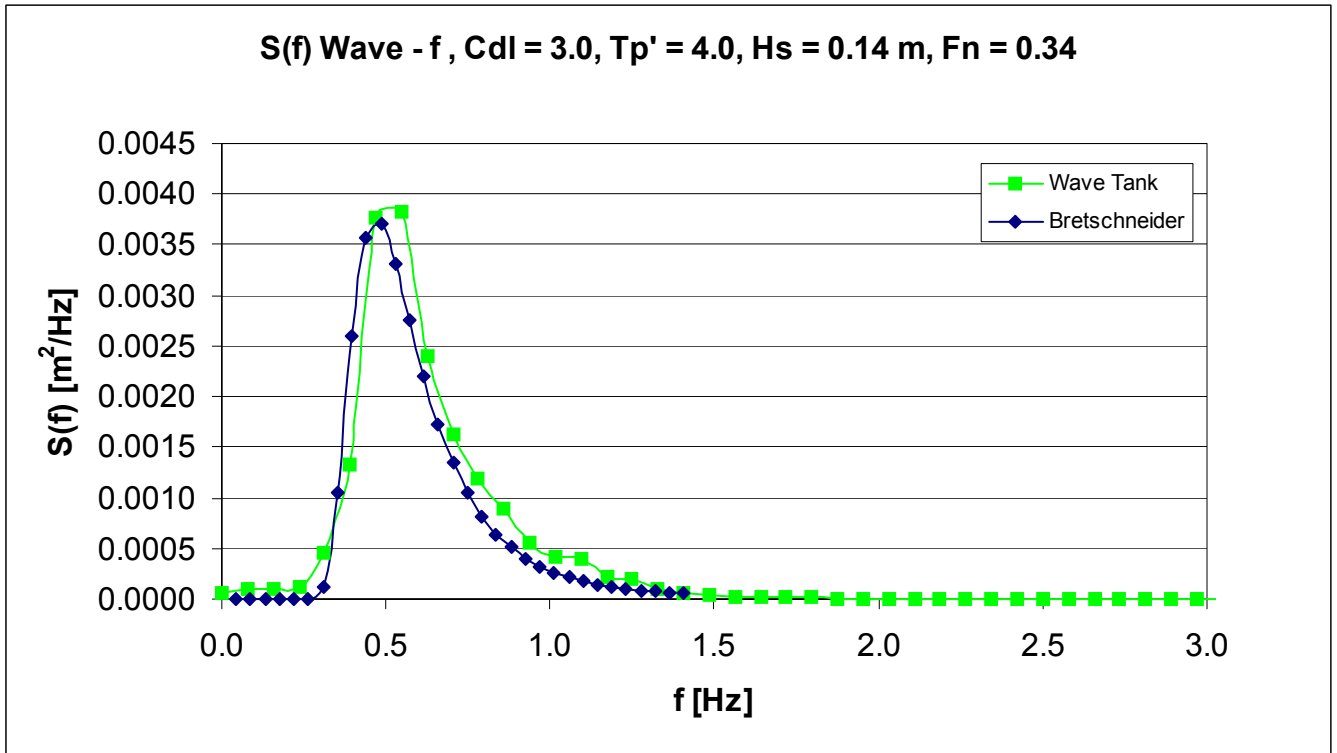
Σχήμα 98: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



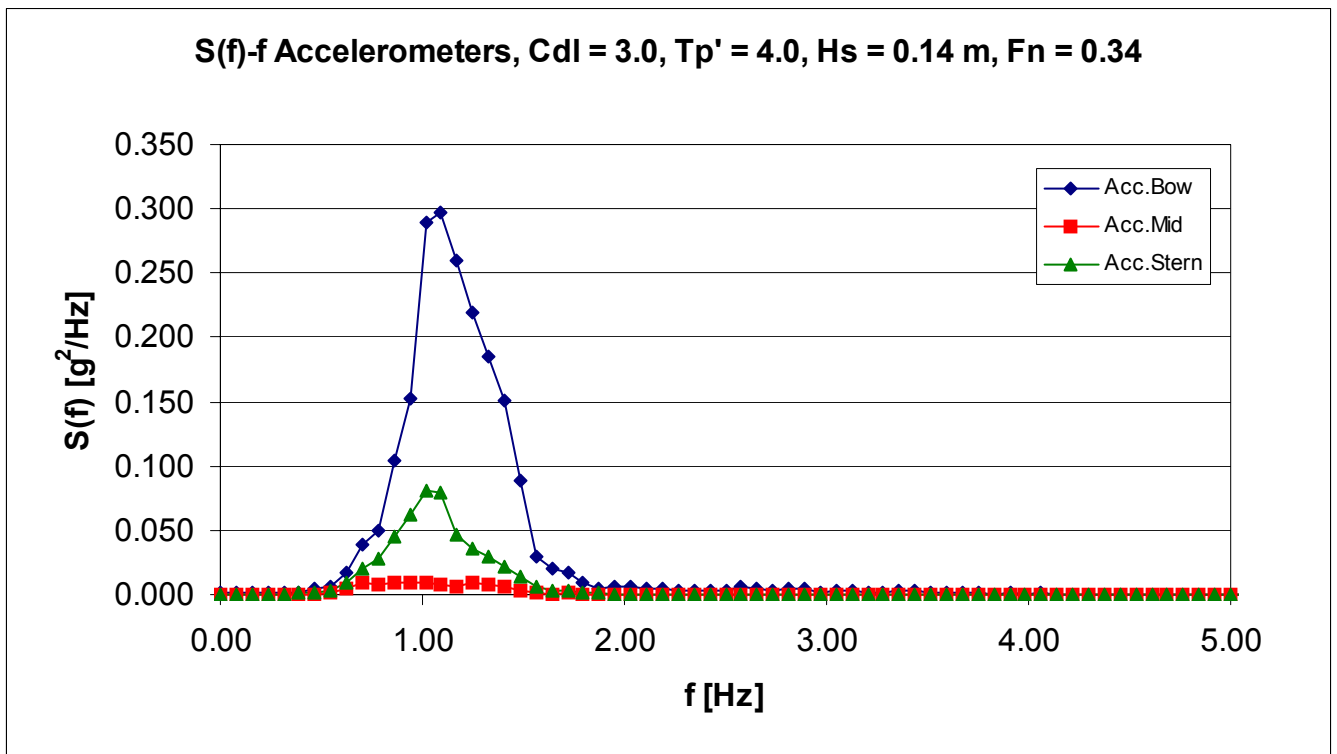
Σχήμα 99: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



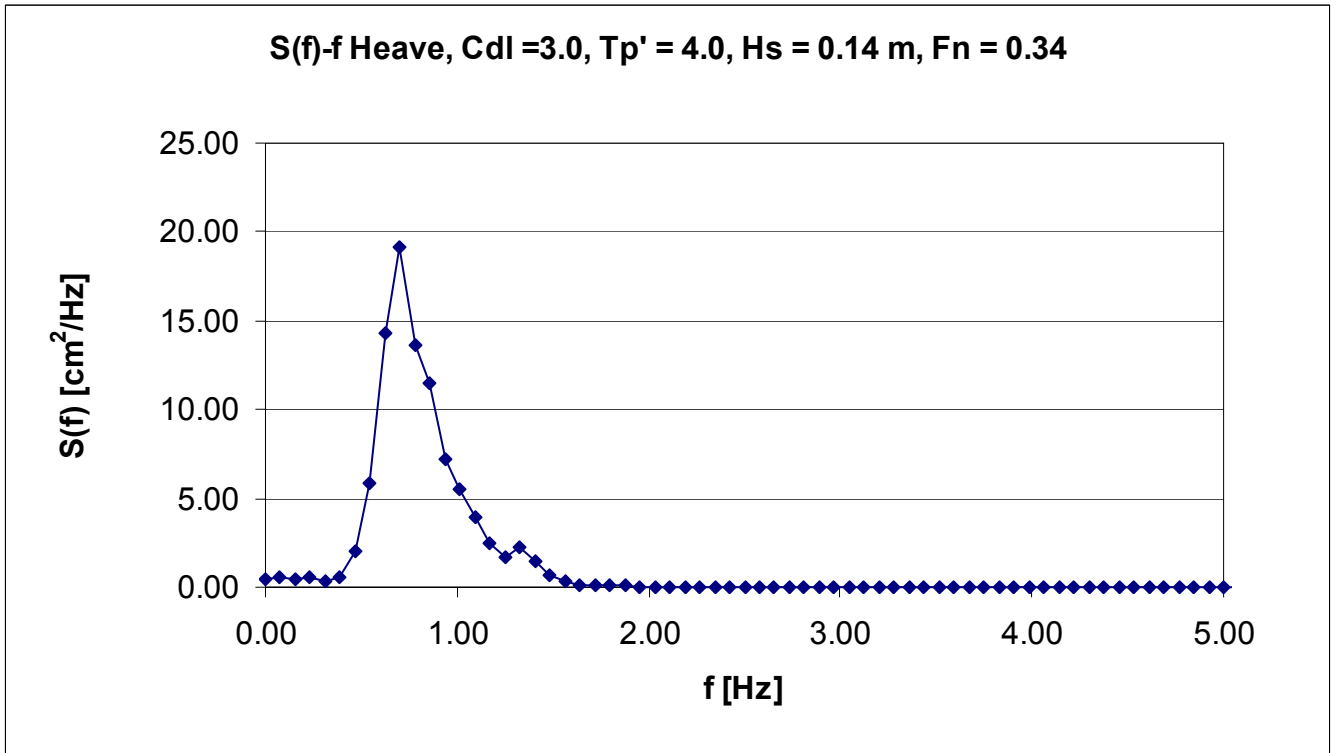
Σχήμα 100: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



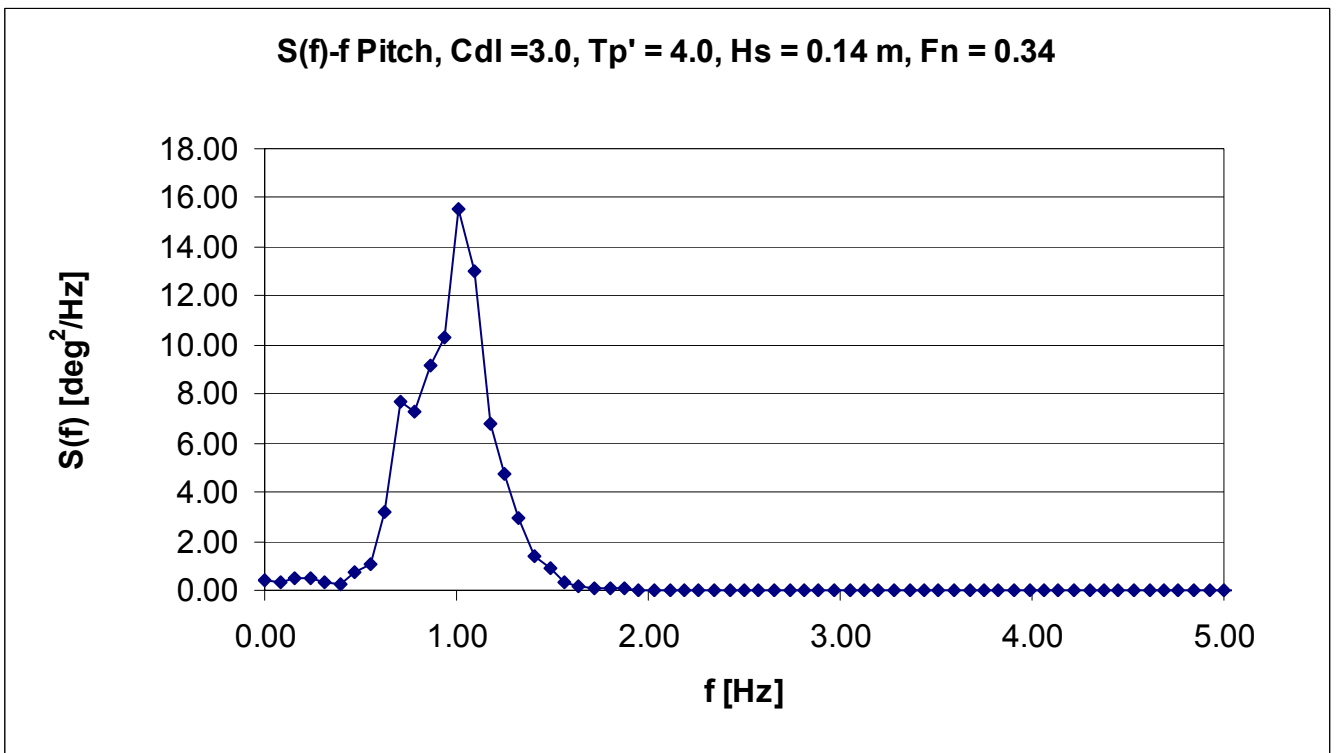
Σχήμα 101: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



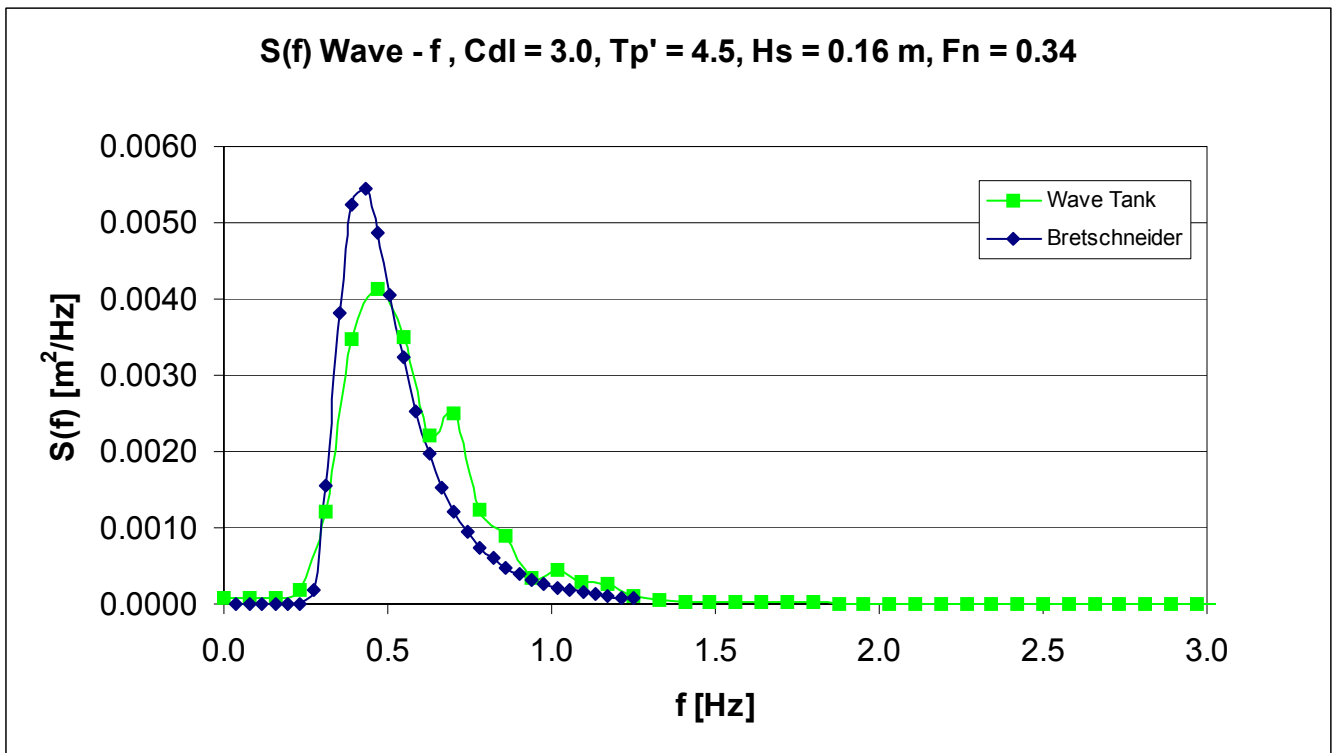
Σχήμα 102: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



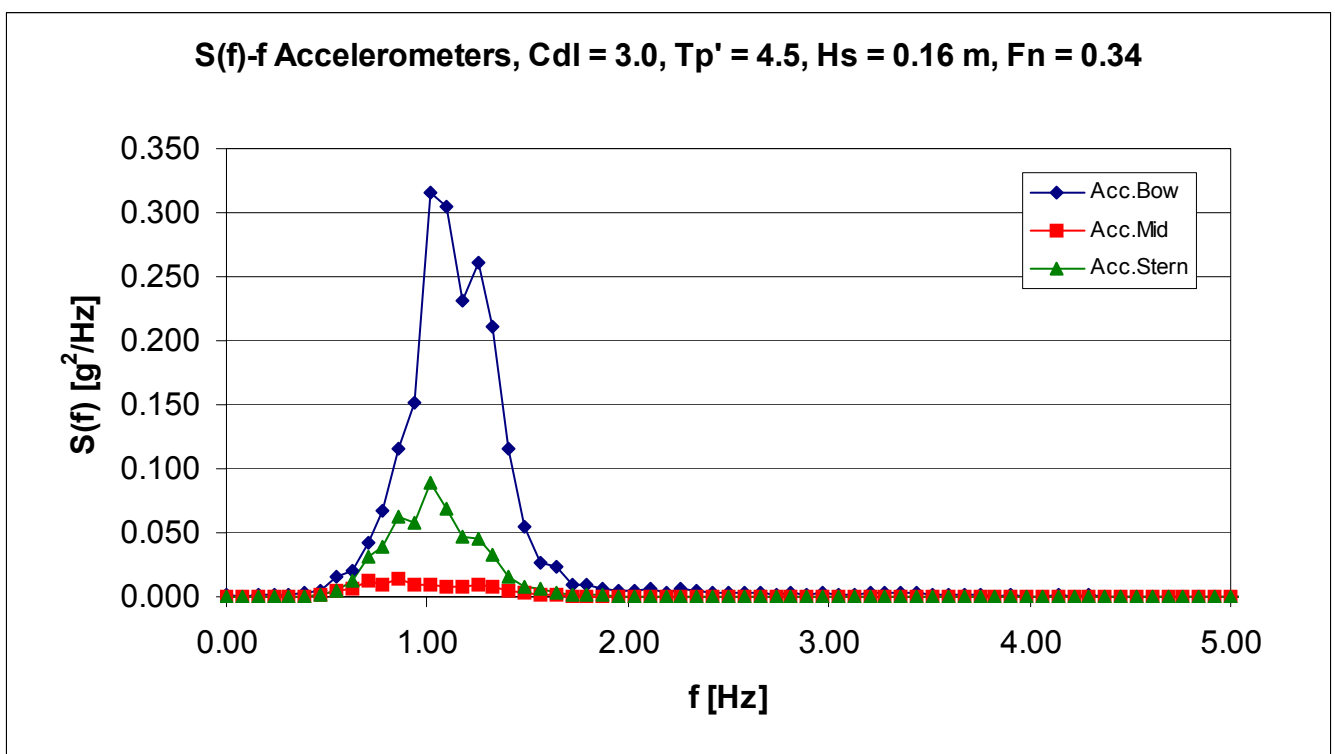
Σχήμα 103: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



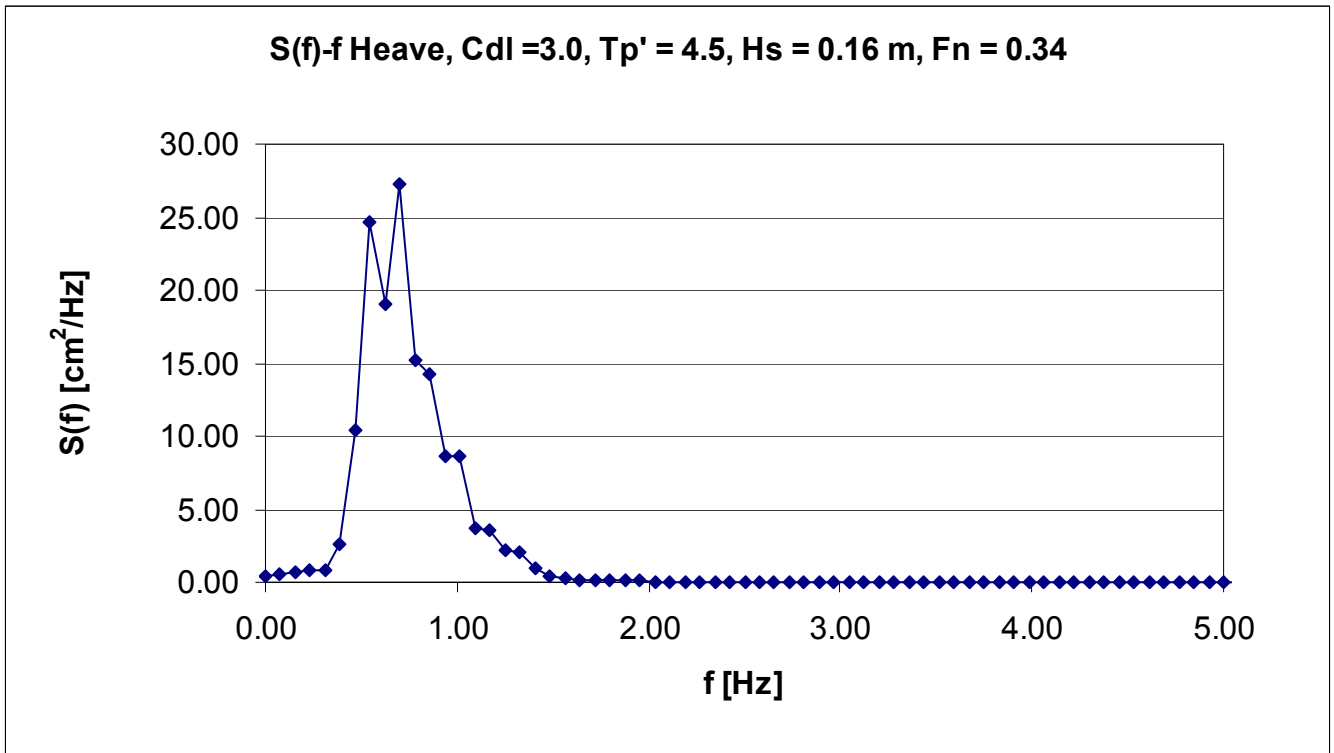
Σχήμα 104: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



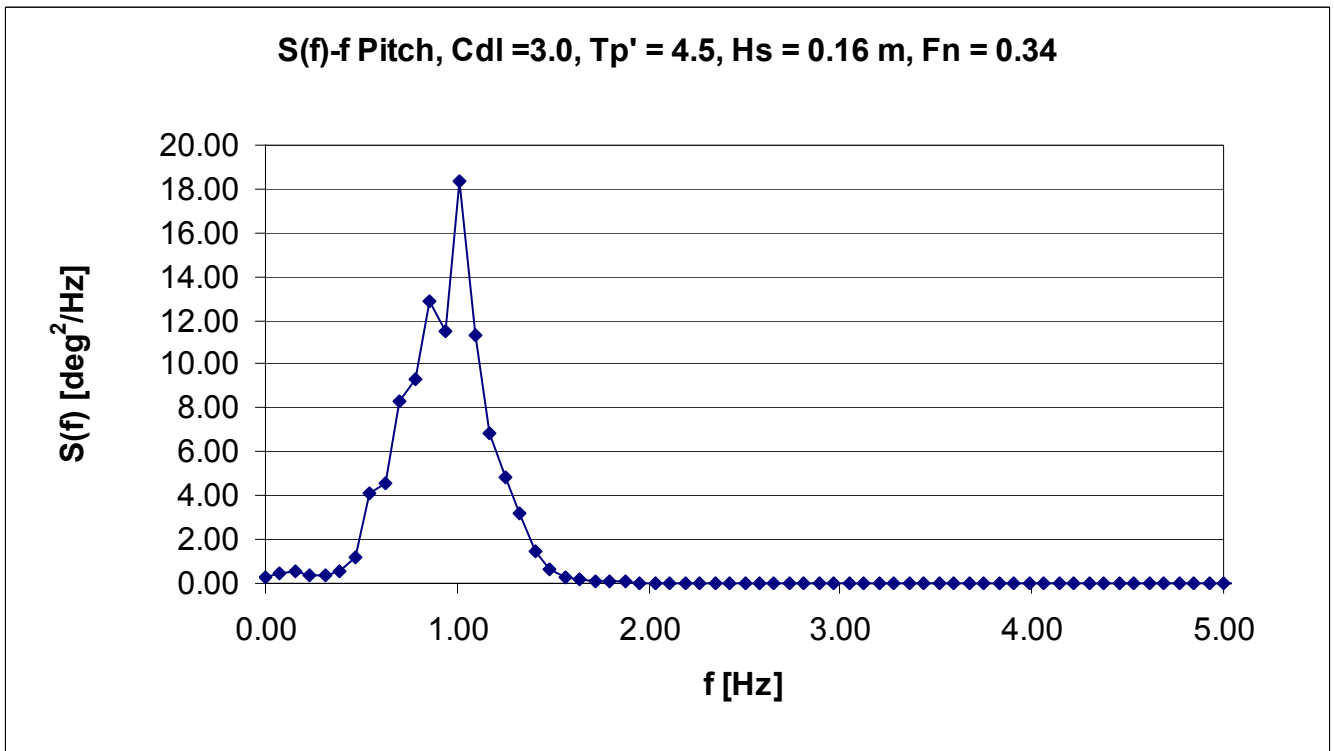
Σχήμα 105: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



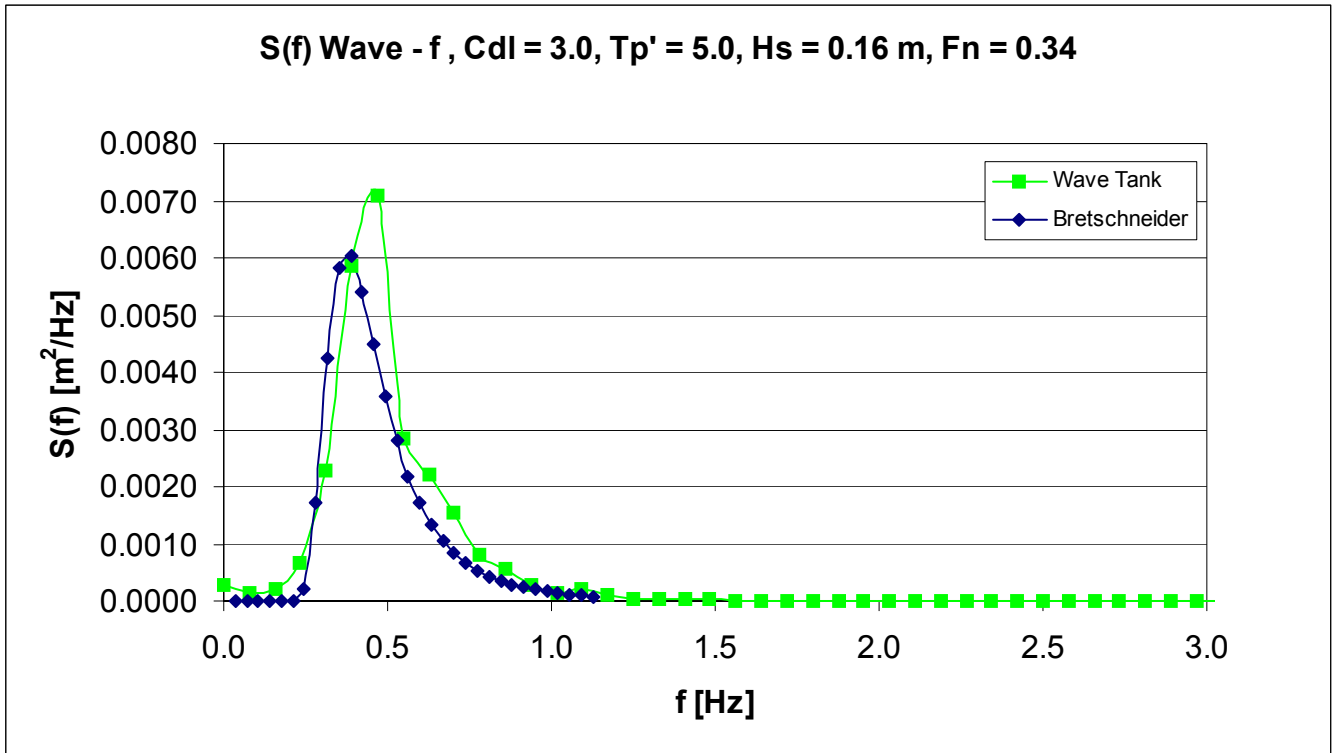
Σχήμα 106: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



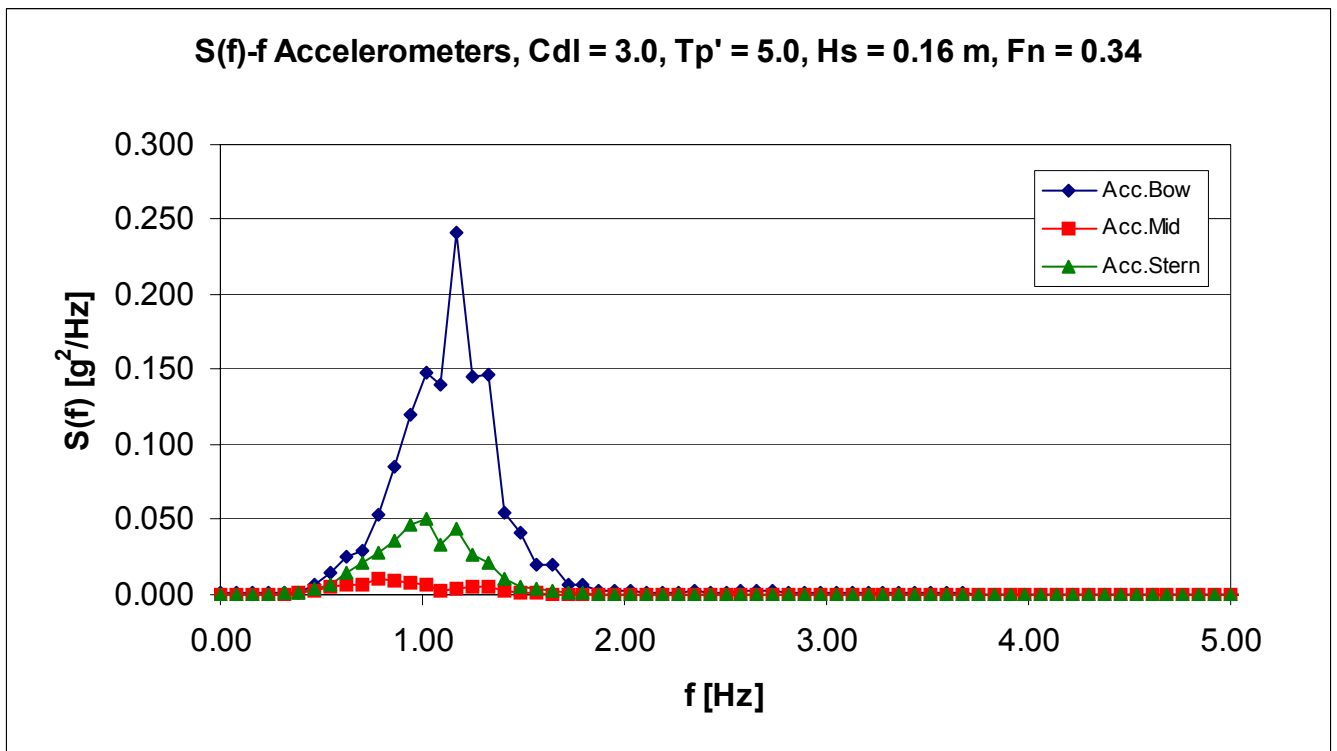
Σχήμα 107: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



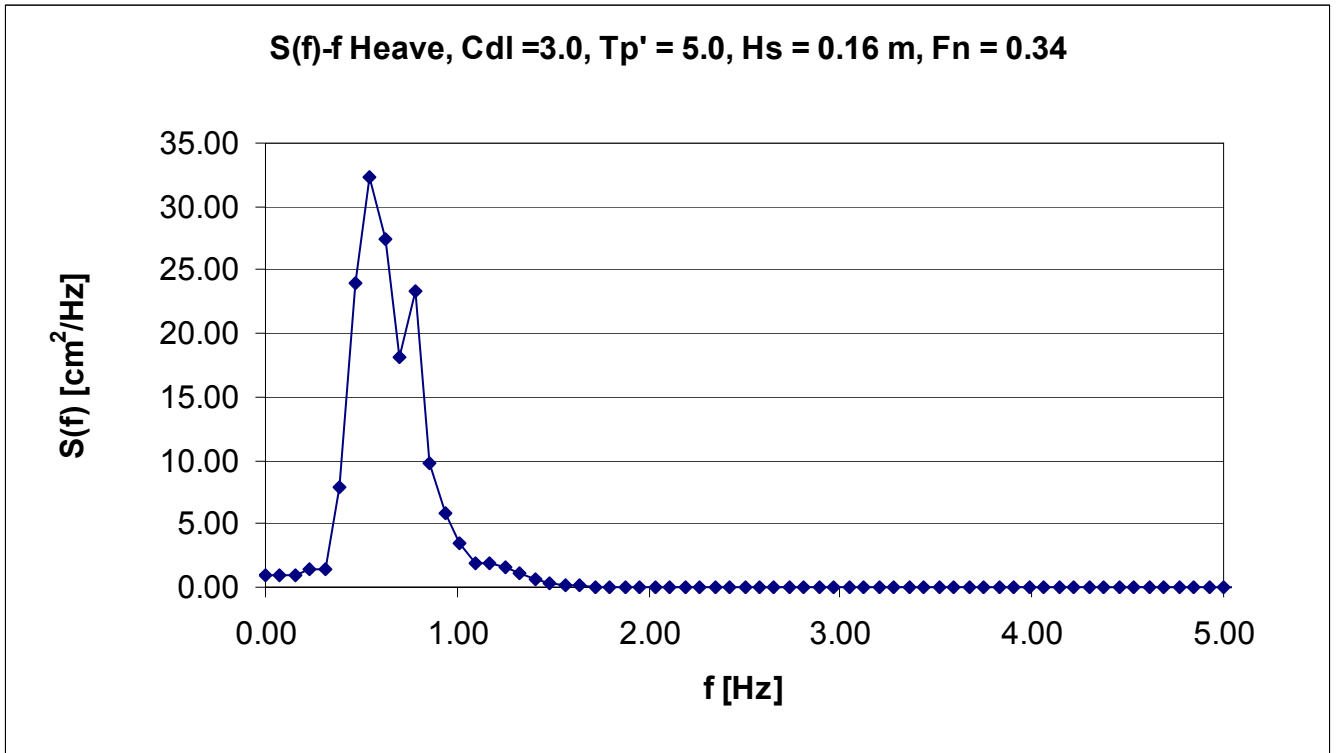
Σχήμα 108: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



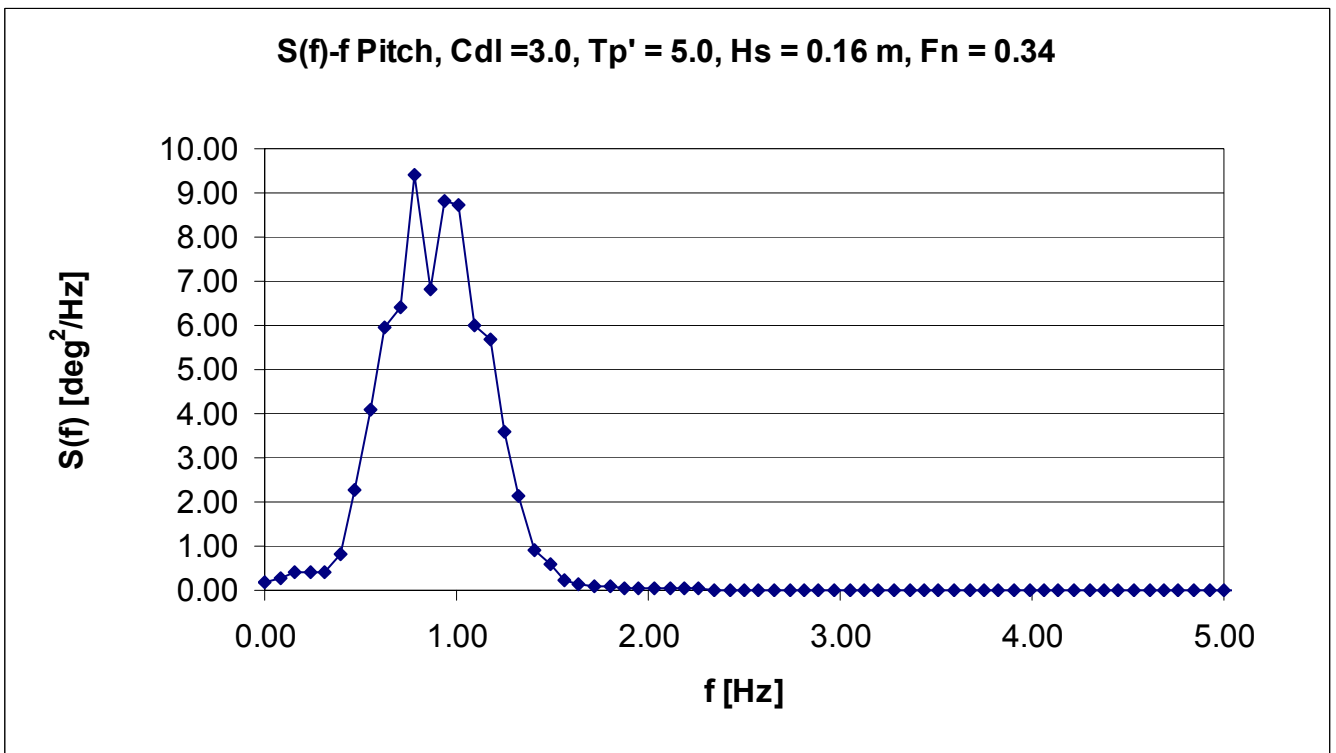
Σχήμα 109: Τροφοδοτηθείσα και καταγραφείσα συνάρτηση φασματικής πυκνότητας κύματος



Σχήμα 110: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος τριών κατακόρυφων επιταχύνσεων



Σχήμα 111: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



Σχήμα 112: Συνάρτηση πυκνότητας φάσματος προνευτασμού

9.3 Η επίδραση της ταχύτητας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται, για το μοντέλο NTUA 116/96 με $C_{DL}=3.00$, συγκριτικά διαγράμματα στους δύο αριθμούς $F_n = 0.34$ και $F_n = 0.68$ των rms τιμών της κάθε απόκρισης, για αυξανόμενη περίοδο κορυφής και αυξανόμενο σημαντικό ύψος κύματος. Στη συνέχεια ακολουθεί σχολιασμός της επίδρασης της ταχύτητας για ίδια αδιάστατη περίοδο και σημαντικό ύψος κύματος.

Όπως έχει αναφερθεί, για την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε ανάλυση κατά Fourier με τη βοήθεια ειδικού κώδικα γραμμένου σε Fortran. Το πρόγραμμα δίνει για όλα τα μεγέθη τις μέσες τετραγωνικές τιμές των αποκρίσεων rms. Η πρόσθετη αντίσταση υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τη μέση τιμή της συνολικής αντίστασης από τη γνωστή σχέση:

$$R_{AW} = R_{WAVE_{TOTAL}} - R_{CALMWATER}$$

Παρατηρούμε ότι το σημαντικό ύψος κύματος, που μετρήθηκε και υπολογίστηκε από τη σχέση $H^{1/3} = 4 \cdot RMS_{WAVE}$ διαφέρει από το αρχικά επιδιωκόμενο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας διορθωτικός συντελεστής κ , που είναι ο λόγος της επιδιωκόμενης τιμής προς την πραγματική τιμή μέτρησης. Τα μεγέθη τροποποιήθηκαν με τις παρακάτω σχέσεις για να γίνει η αναγωγή τους στις πραγματικές τιμές:

$$RMS_{διορθωμένο} = RMS_{μέτρησης} \cdot \kappa$$

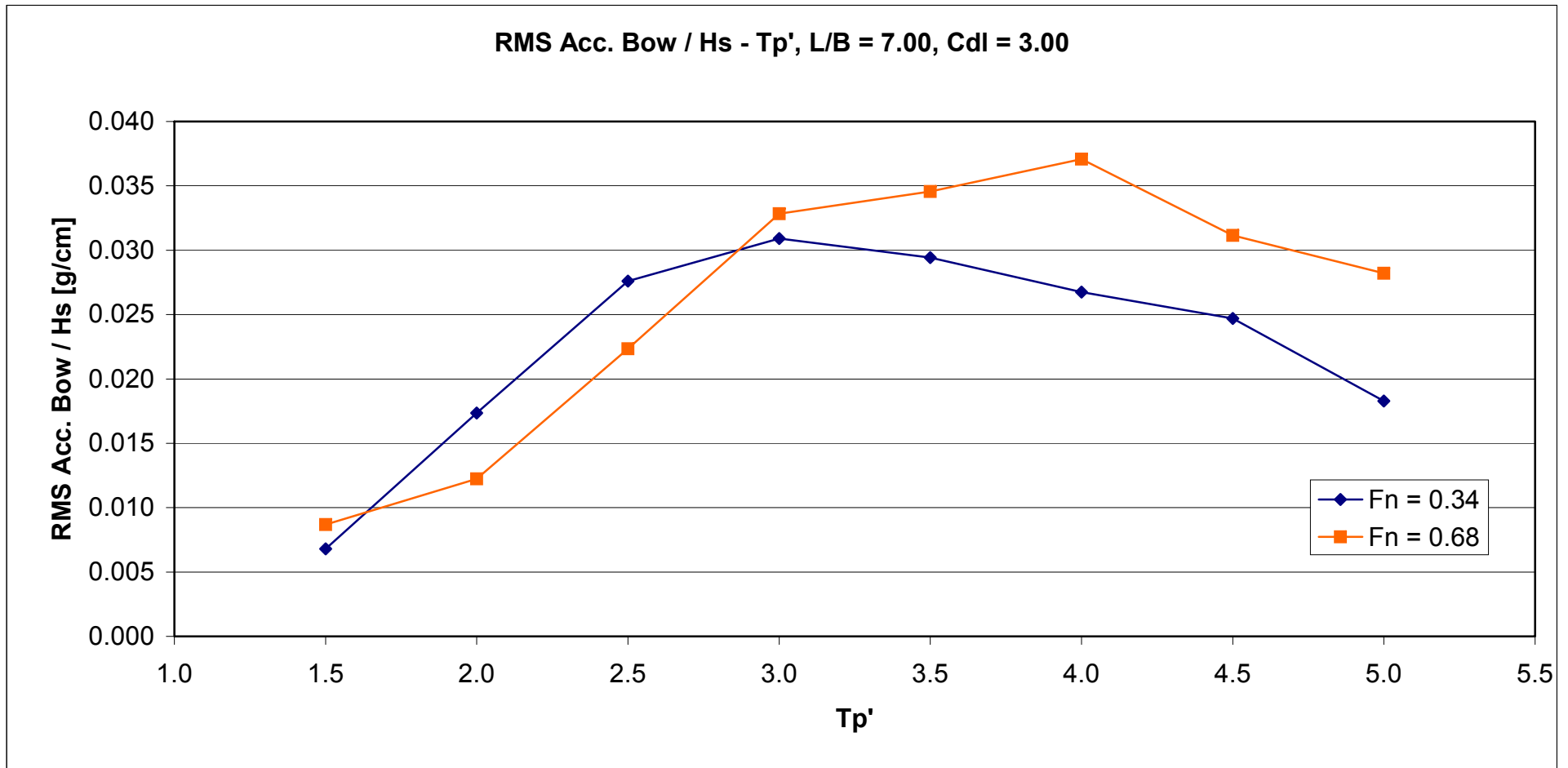
$$R_{AW\ διορθωμένο} = R_{AW\ μέτρησης} \cdot \kappa^2$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ακόλουθα διαγράμματα:

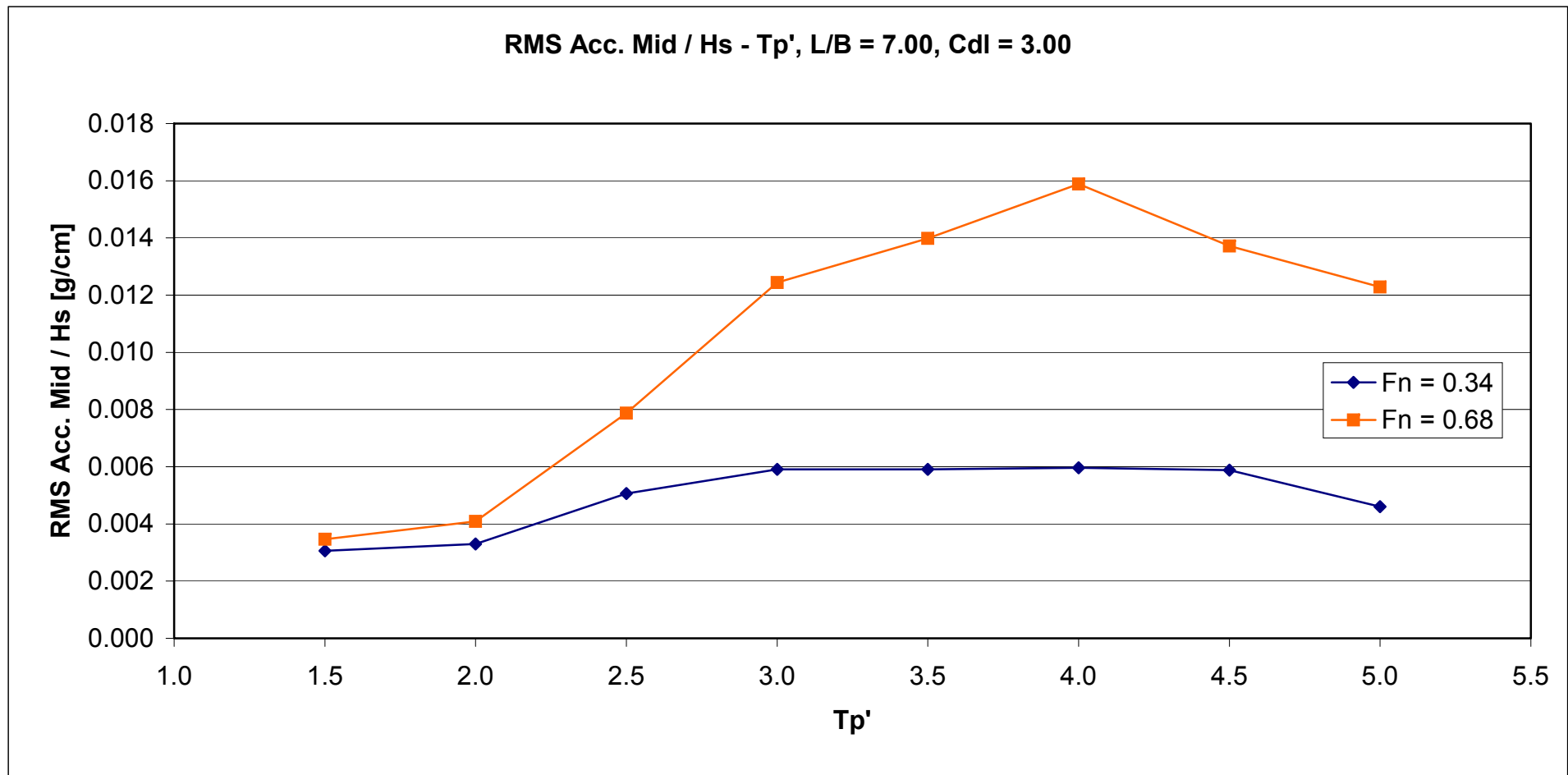
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Acceleration Bow) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}).
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Acceleration Mid.) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}).
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρύμνη (Acceleration Stern) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] 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) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [deg/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}).

- Τιμή πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένη με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s^2 [kr/cm²] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}).

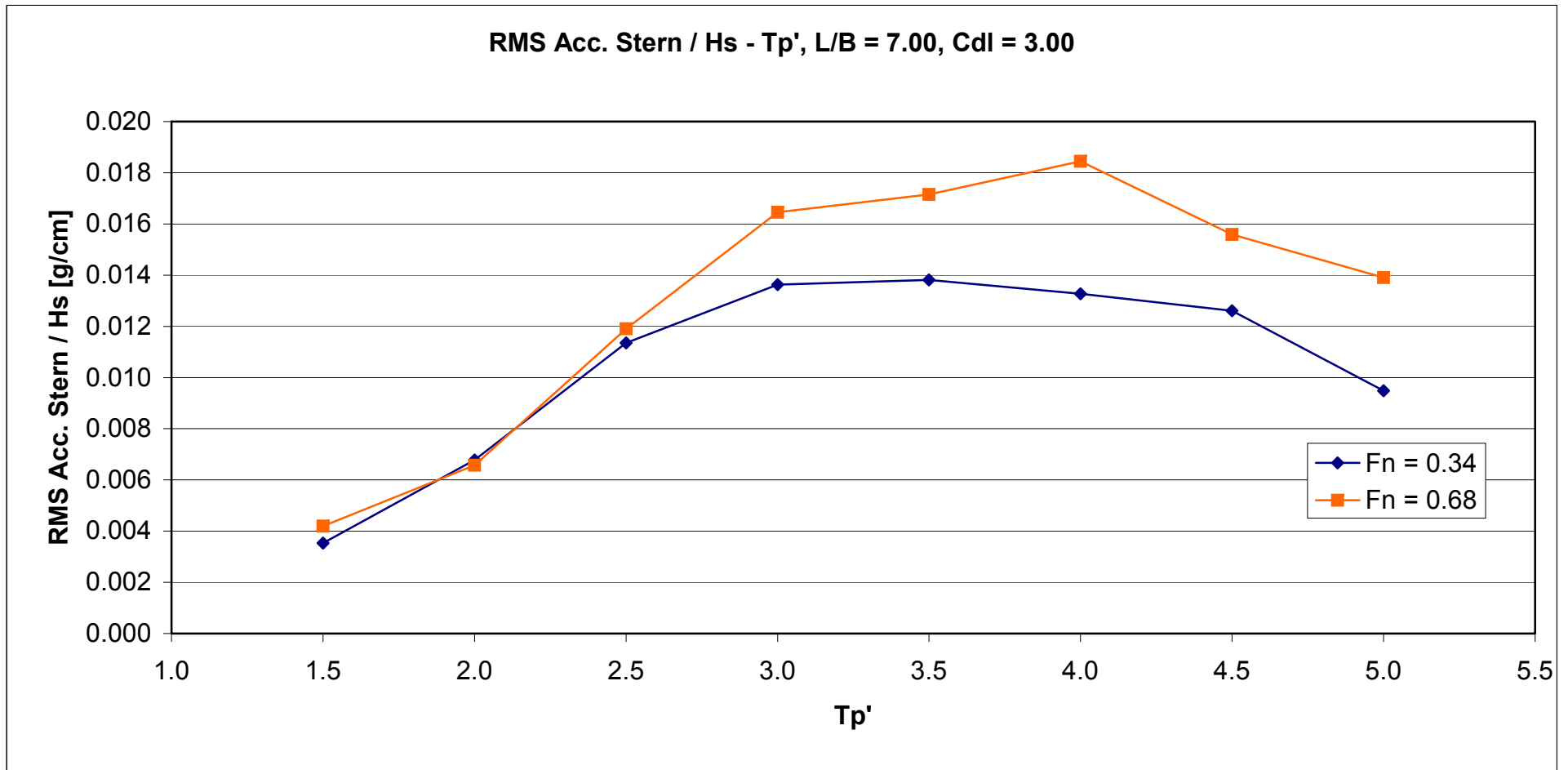
Γενικό συμπέρασμα: Το σκάφος όταν πλέει στη μεγάλη ταχύτητα με $F_n = 0.68$, έχει λίγο πιο μεγάλες αποκρίσεις στις κατακόρυφες επιταχύνσεις (Vertical Accelerations) στις μεγάλες αδιάστατες περιόδους και παρόμοιες αποκρίσεις στις μικρές περιόδους σε σχέση με τη μικρότερη ταχύτητα που αντιστοιχεί σε $F_n = 0.34$. Το ίδιο ισχύει και για την κατακόρυφη κίνηση (Heave), ενώ κατά την ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα (Pitch) έχει εμφανώς μικρότερες αποκρίσεις. Τέλος, το σκάφος στη μεγαλύτερη ταχύτητα έχει μειωμένη πρόσθετη αντίσταση.



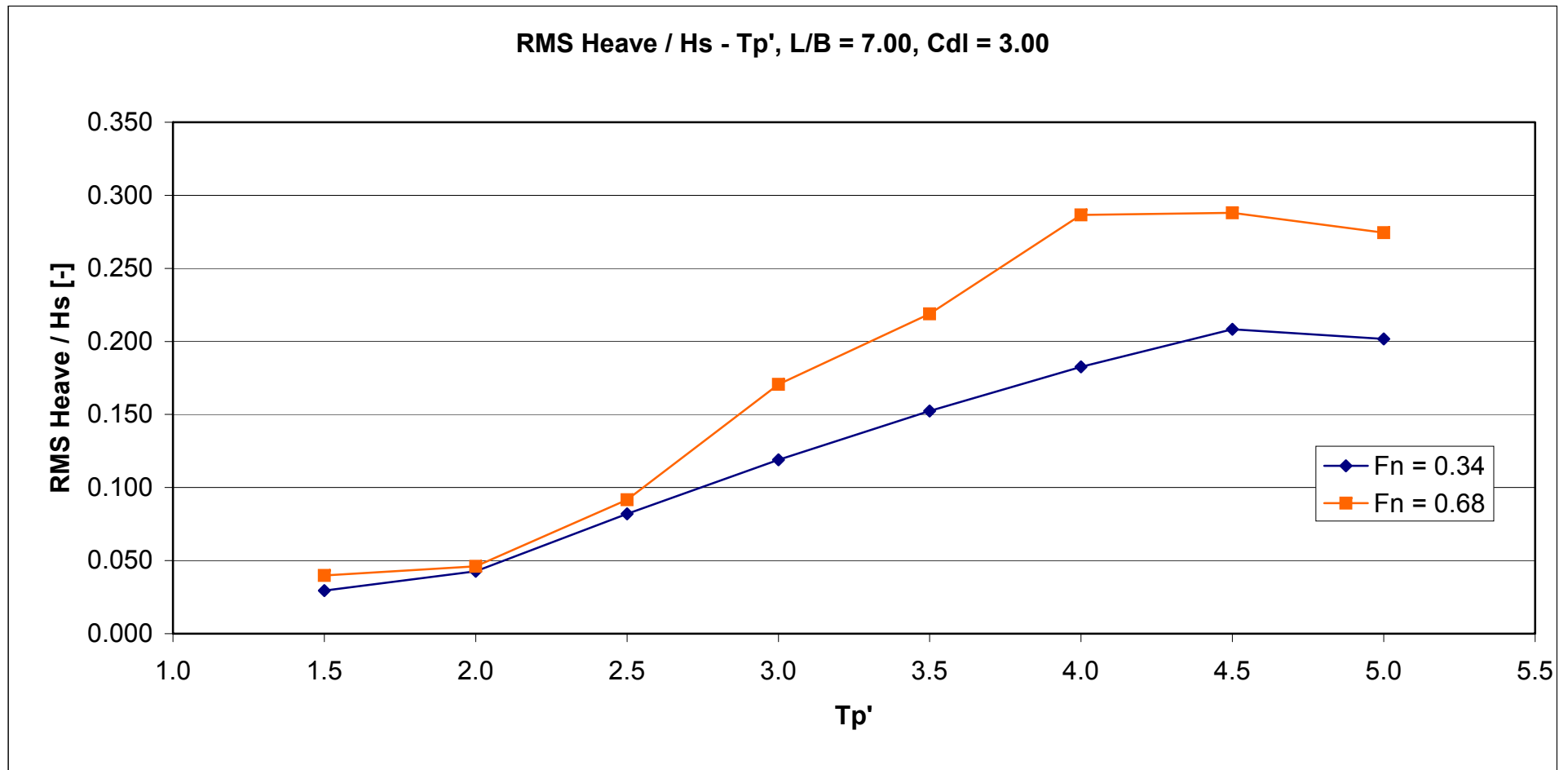
Σχήμα 113: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Acceleration Bow) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



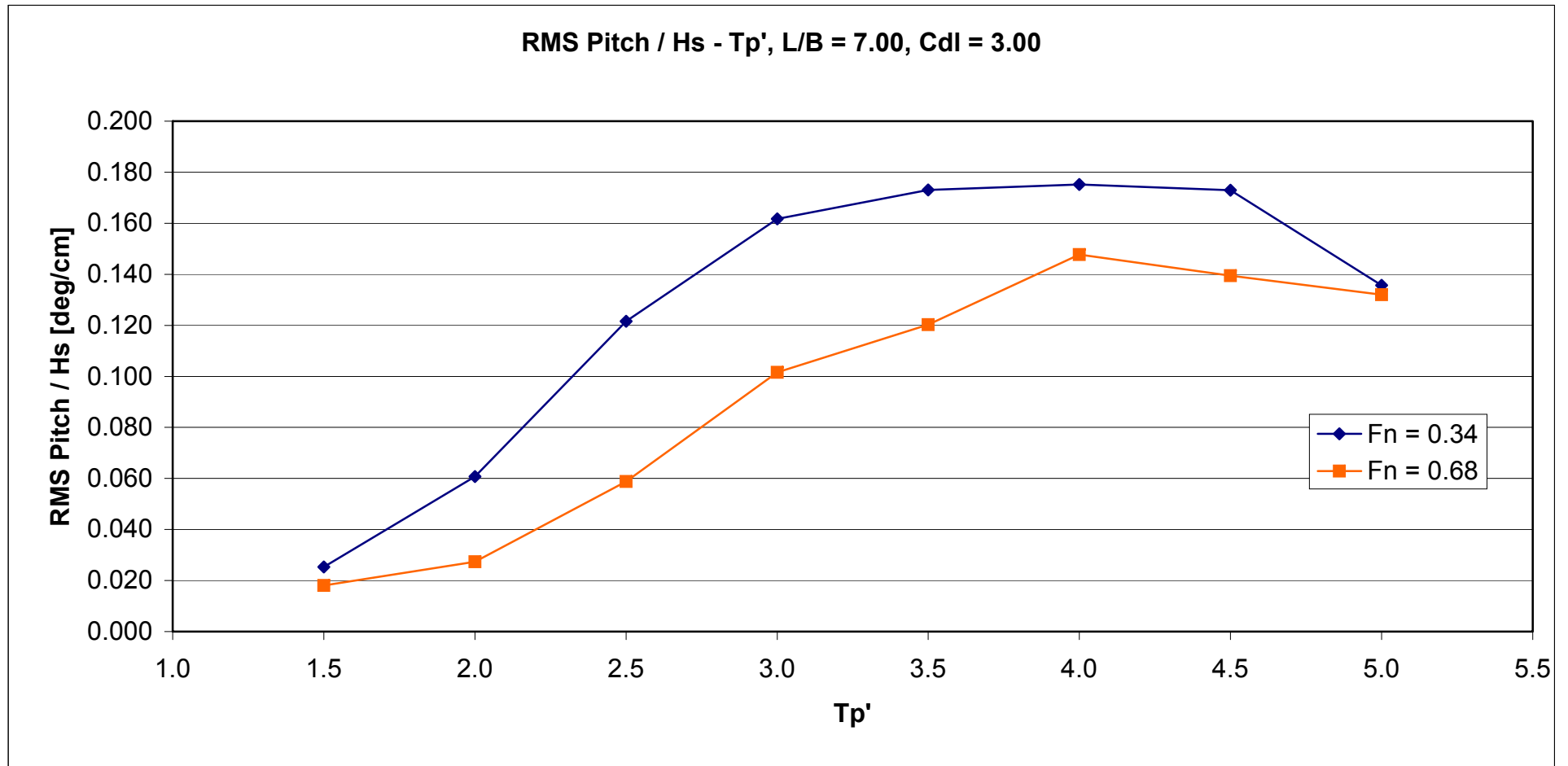
Σχήμα 114: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Acceleration Mid.) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



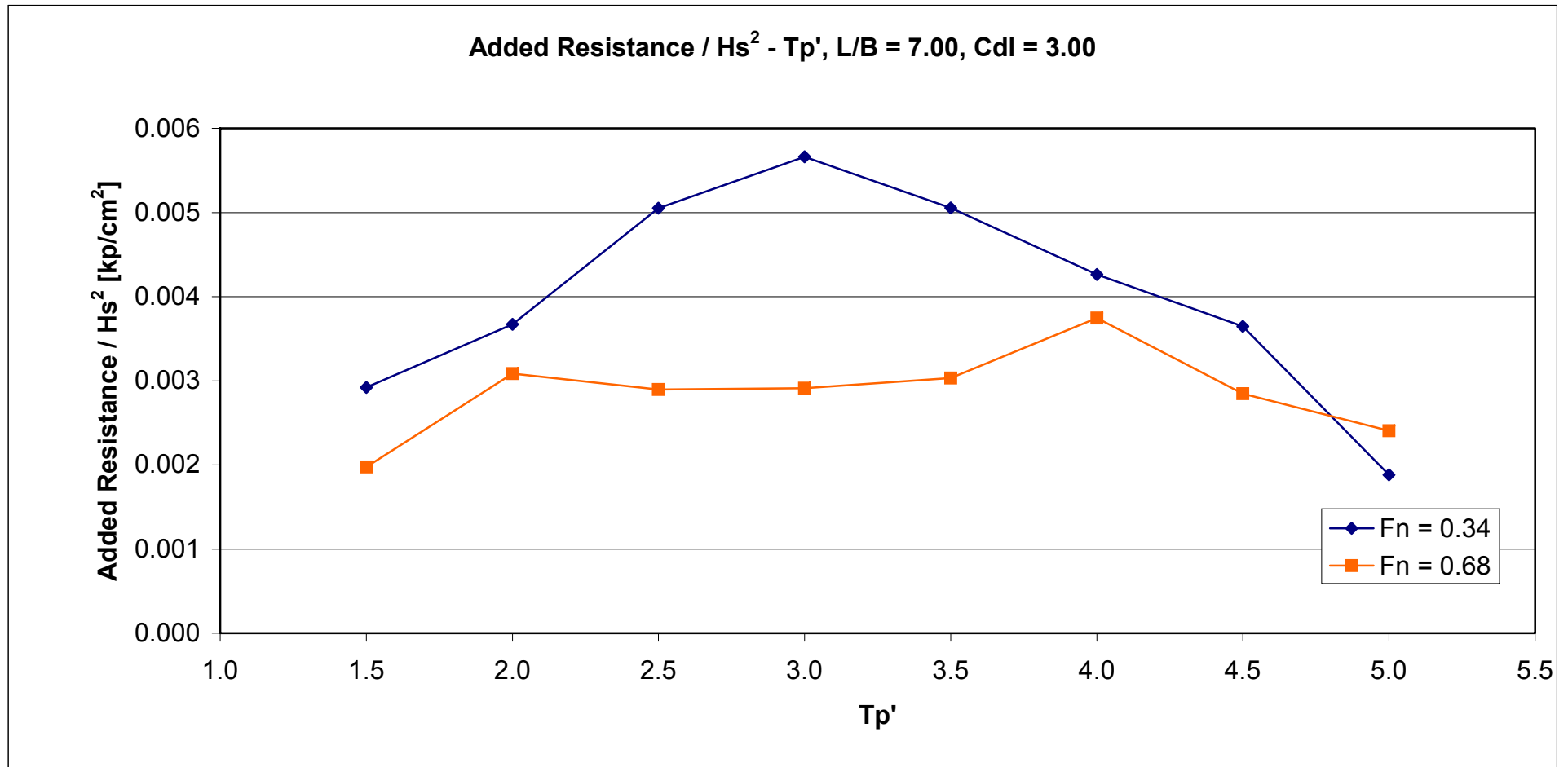
Σχήμα 115: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρύμνη (Acceleration Stern) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 116: RMS τιμή Κατακόρυφης Κίνησης (Heave) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [cm/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 117: RMS τιμή Κίνησης Προνευτασμού (Pitch) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [deg/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 118: Τιμή πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένη με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s^2 [kp/cm²] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')

9.4 Η επίδραση του εκτοπίσματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται, για το μοντέλο NTUA 097/94 με $C_{DL}=3.00$ και το NTUA 118/96 με $C_{DL}=1.61$ σε αριθμό $Fn = 0.34$ συγκριτικά διαγράμματα των rms τιμών της κάθε απόκρισης, για αυξανόμενη περίοδο κορυφής και αυξανόμενο σημαντικό ύψος κύματος. Στη συνέχεια ακολουθεί σχολιασμός της επίδρασης του εκτοπίσματος για ίδια αδιάστατη περίοδο και σημαντικό ύψος κύματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ακόλουθα διαγράμματα:

- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Acceleration Bow) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}).
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Acceleration Mid.) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}).
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρύμνη (Acceleration Stern) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] 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) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [deg/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}).
- Τιμή πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένη με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s^2 [kp/cm²] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}).

Όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή είναι σε κλίμακα του μοντέλου μεγάλης κλίμακας (big scale), που είναι τα 5/3 του μικρότερου (small scale). Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα για τον μεγαλύτερο συντελεστή εκτοπίσματος, που είχαν προκύψει από πειράματα στο μοντέλο μικρής κλίμακας, έχουν αναχθεί στην κλίμακα του μεγάλου μοντέλου. Η αναγωγή αυτή γίνεται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

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

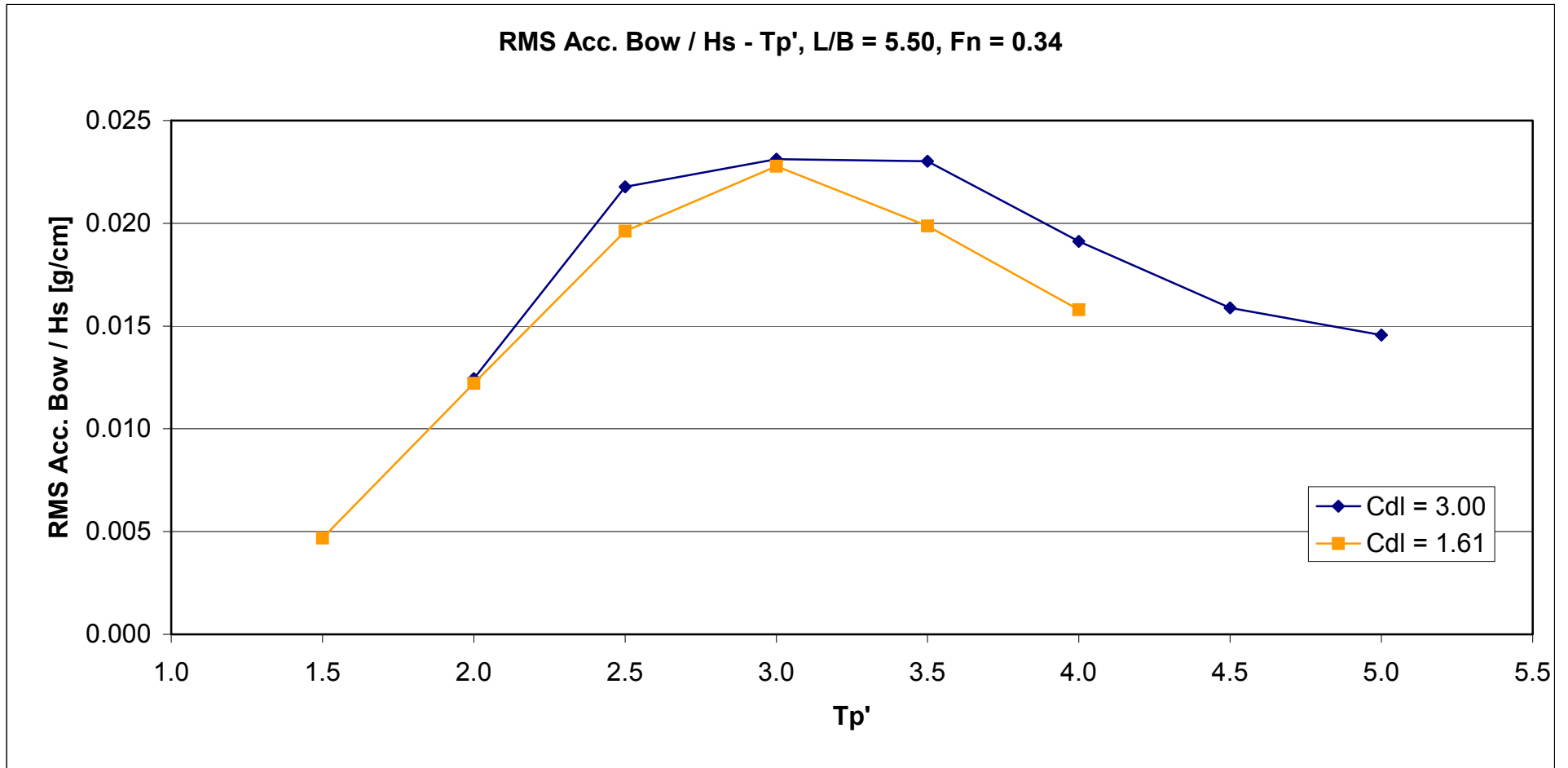
$$\text{RMS κατακόρυφων επιταχύνσεων (g): } \text{RMS}_{\text{big}} = \text{RMS}_{\text{small}}$$

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

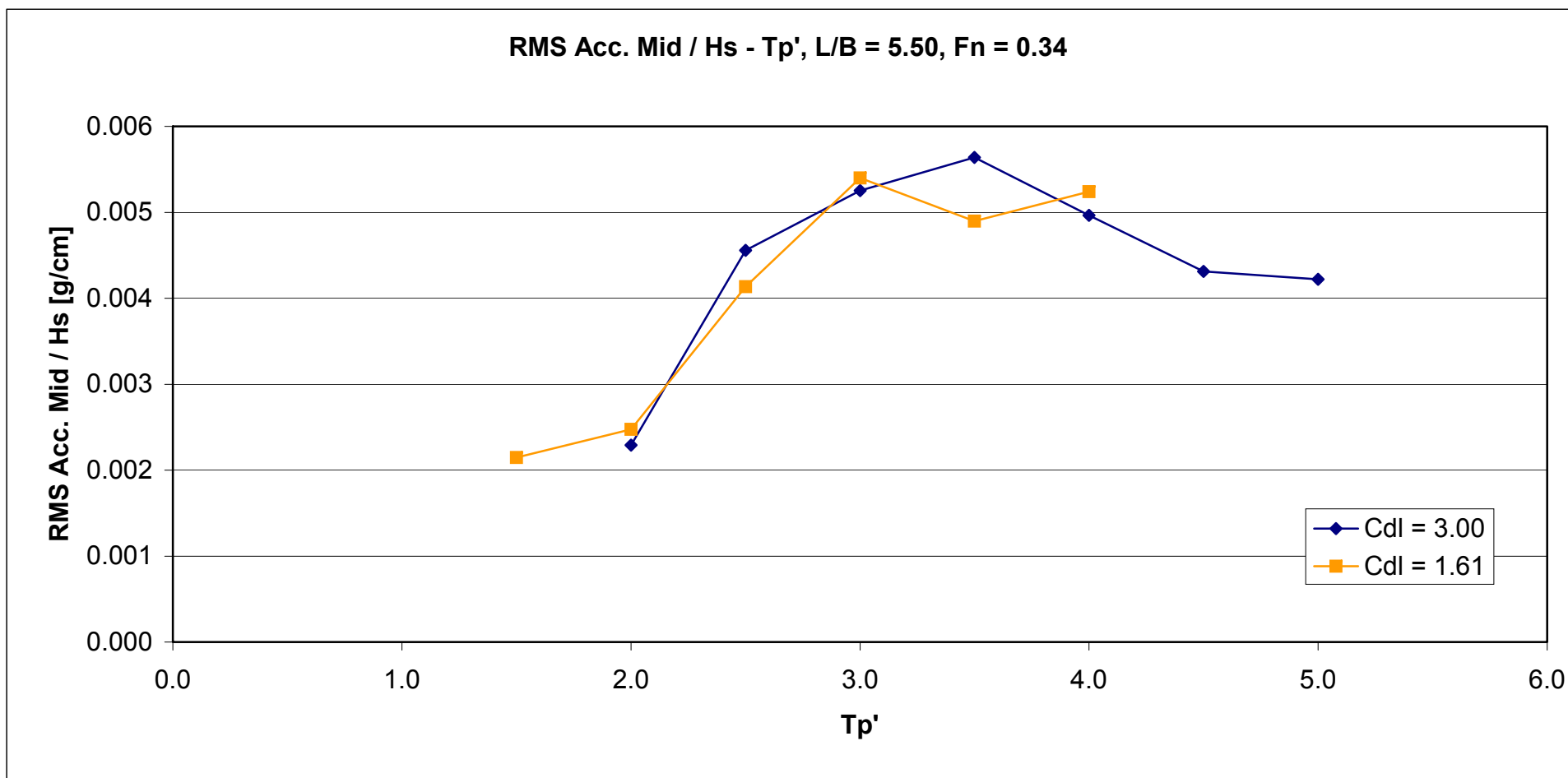
RMS προνευτασμού (cm): $RMS_{big} = RMS_{small}$

Πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς (kp): $R_{AW\ big} = \lambda^3 \cdot R_{AW\ small}$

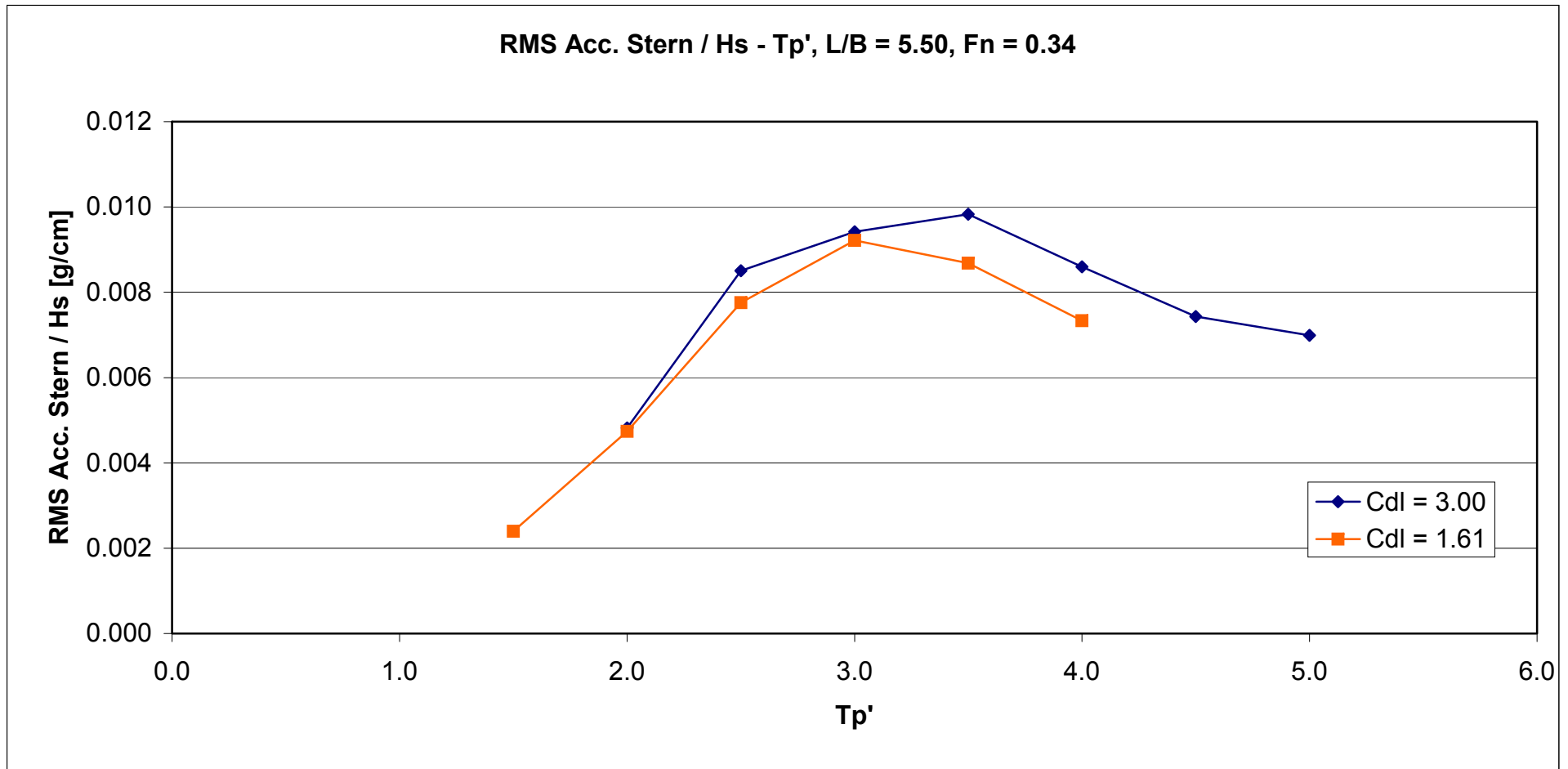
Γενικό συμπέρασμα: Από τα παρακάτω διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το εκτόπισμα $C_{DL} = 3.00$ στο πατρικό μοντέλο με $L/B = 5.50$ και $Fn = 0.34$ παρουσιάζει λίγο μεγαλύτερες αποκρίσεις στις κατακόρυφες επιταχύνσεις (Vertical Accelerations) στην πλώρη και στην πρύμνη σε σχέση με το μικρότερο εκτόπισμα $C_{DL} = 1.61$. Το ίδιο ισχύει για την κατακόρυφη κίνηση (Heave) και για την ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα (Pitch). Τέλος, το σκάφος στο μεγαλύτερο εκτόπισμα έχει υψηλότερες τιμές πρόσθετης αντίστασης σε σχέση με το μικρότερο εκτόπισμα.



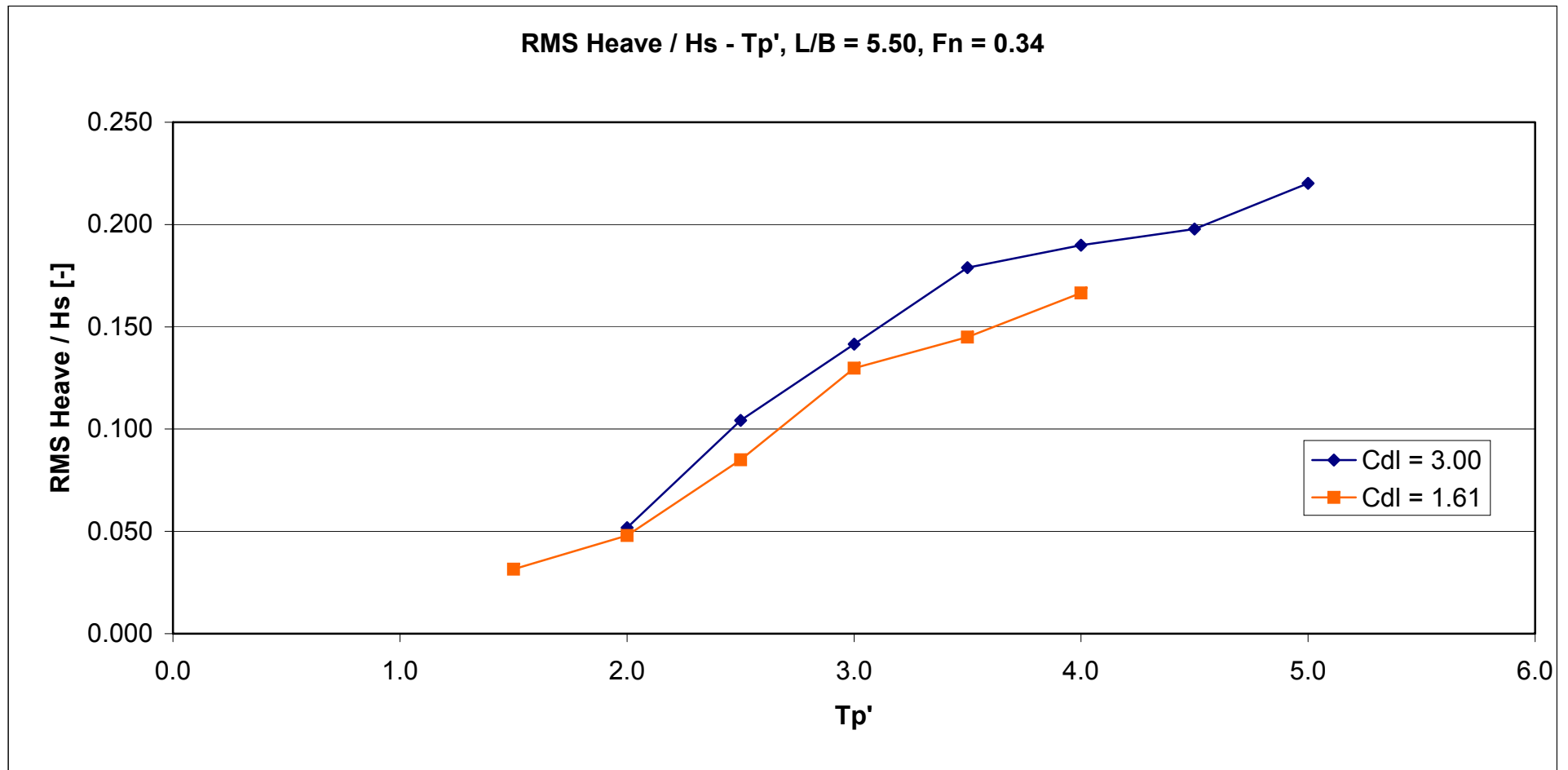
Σχήμα 119: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Acceleration Bow) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak})



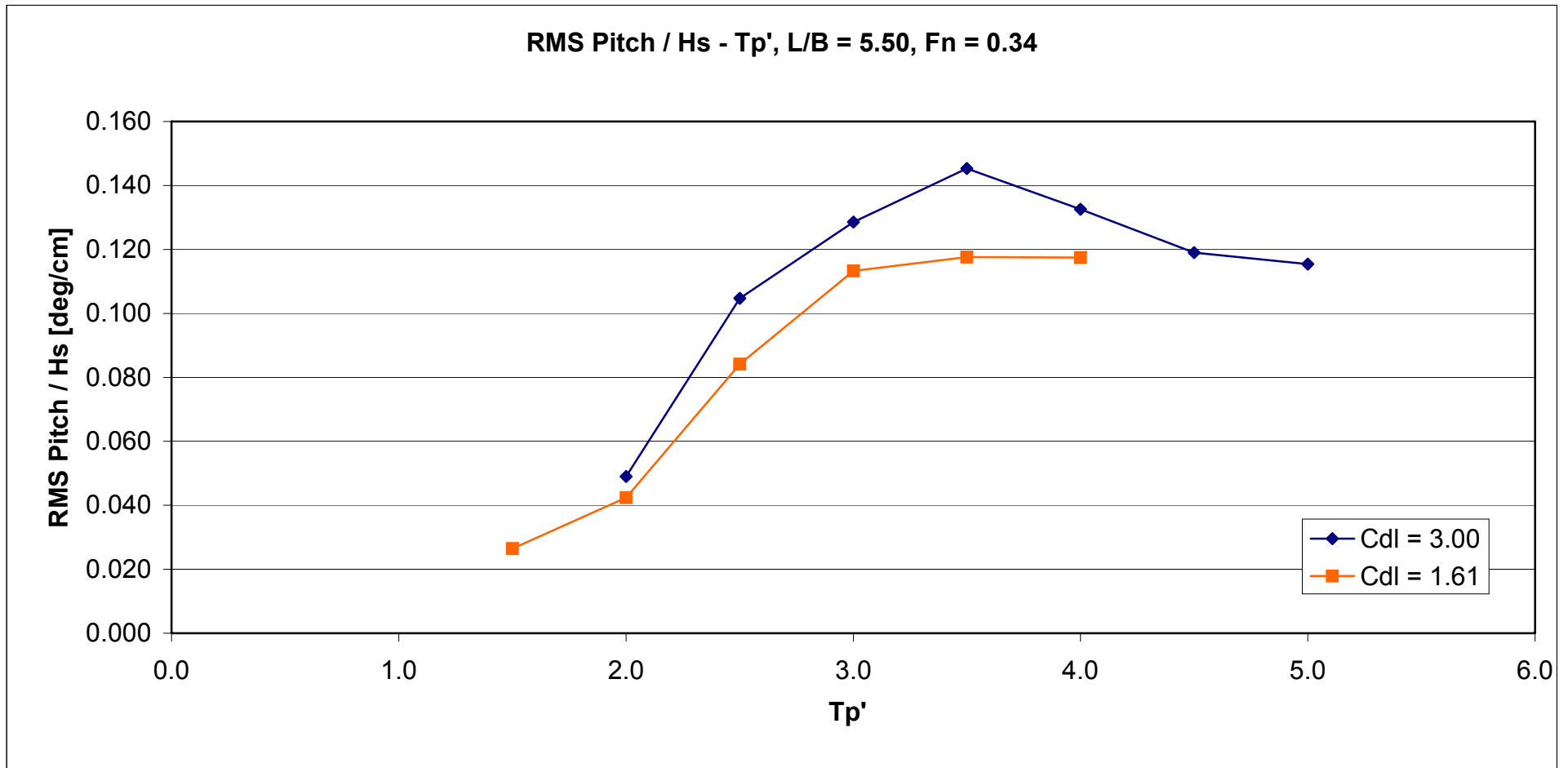
Σχήμα 120: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Acceleration Mid.) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



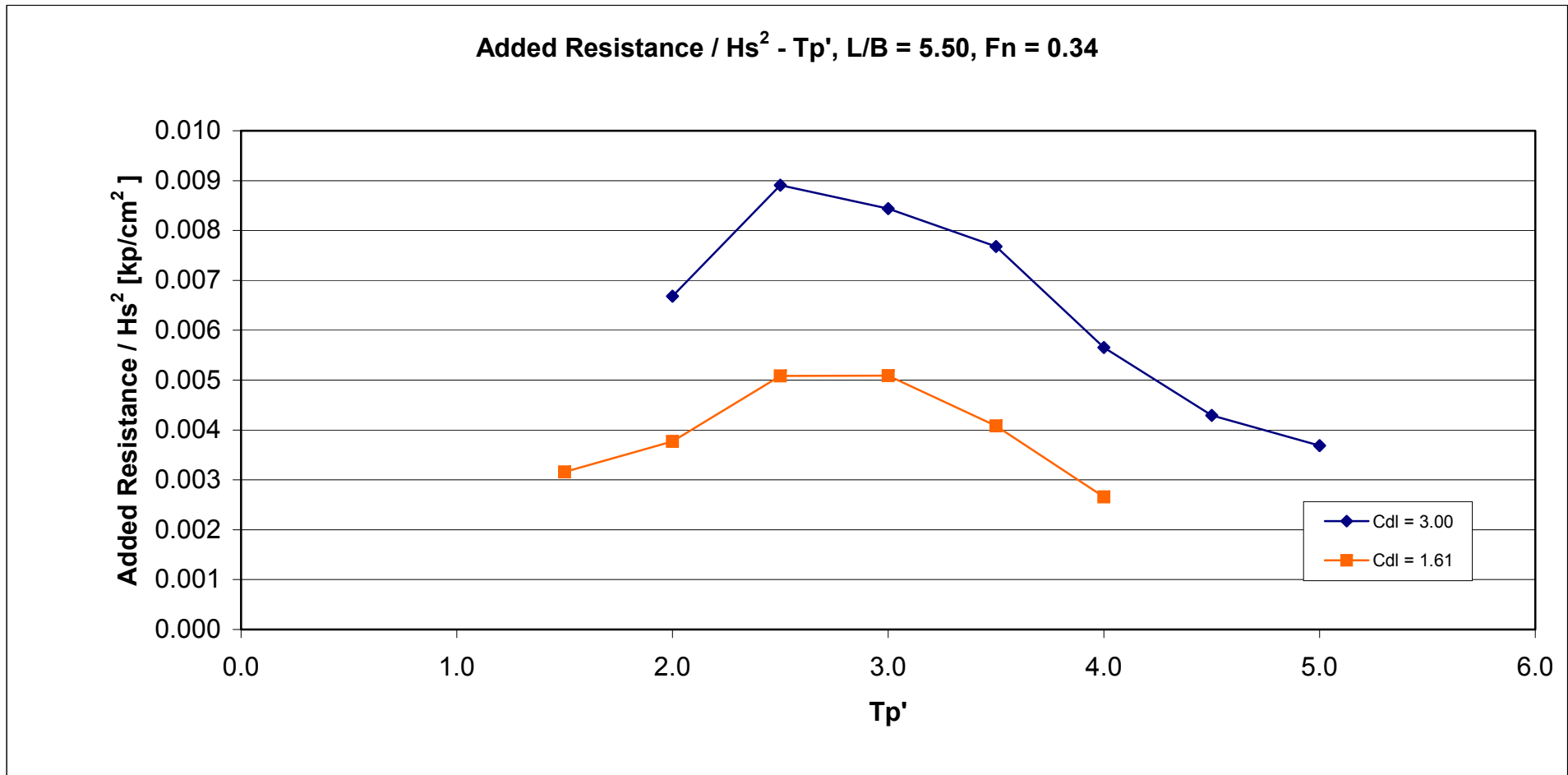
Σχήμα 121: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρύμνη (Acceleration Stern) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 122: RMS τιμή Κατακόρυφης Κίνησης (Heave) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [cm/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 123: RMS τιμή Κίνησης Προνευτασμού (Pitch) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [deg/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 124: Τιμή πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένη με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s^2 [kp/cm²] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak})

9.5 Η επίδραση του λόγου μήκος προς πλάτος

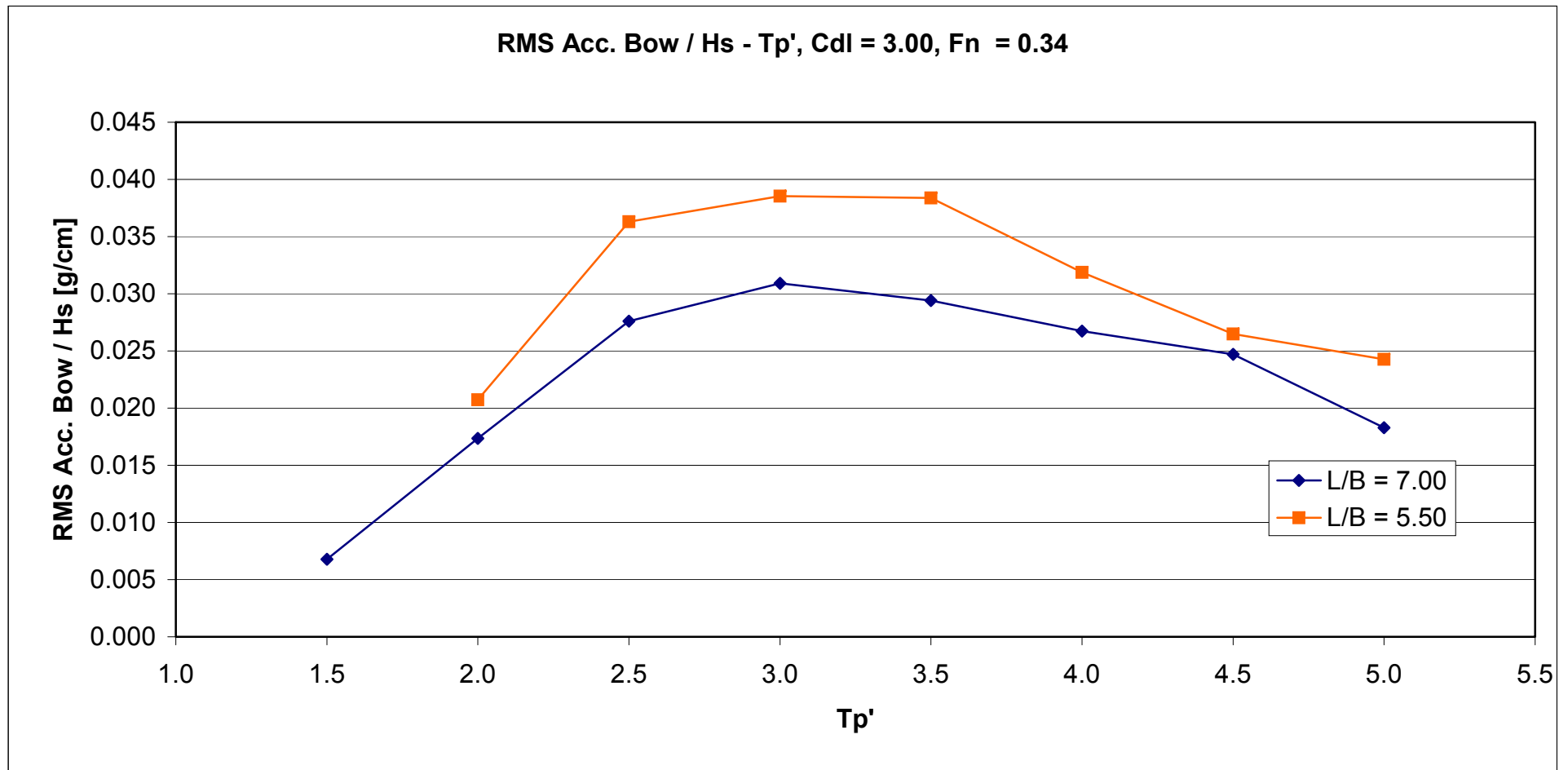
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται, για το μοντέλο NTUA 097/94 με λόγο $L/B = 5.50$ και το NTUA 116/96 με λόγο $L/B = 7.00$ σε $C_{DL}=3.00$ και αριθμό $Fn = 0.34$ τα συγκριτικά διαγράμματα των rms τιμών της κάθε απόκρισης, για αυξανόμενη περίοδο κορυφής και αυξανόμενο σημαντικό ύψος κύματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ακόλουθα διαγράμματα:

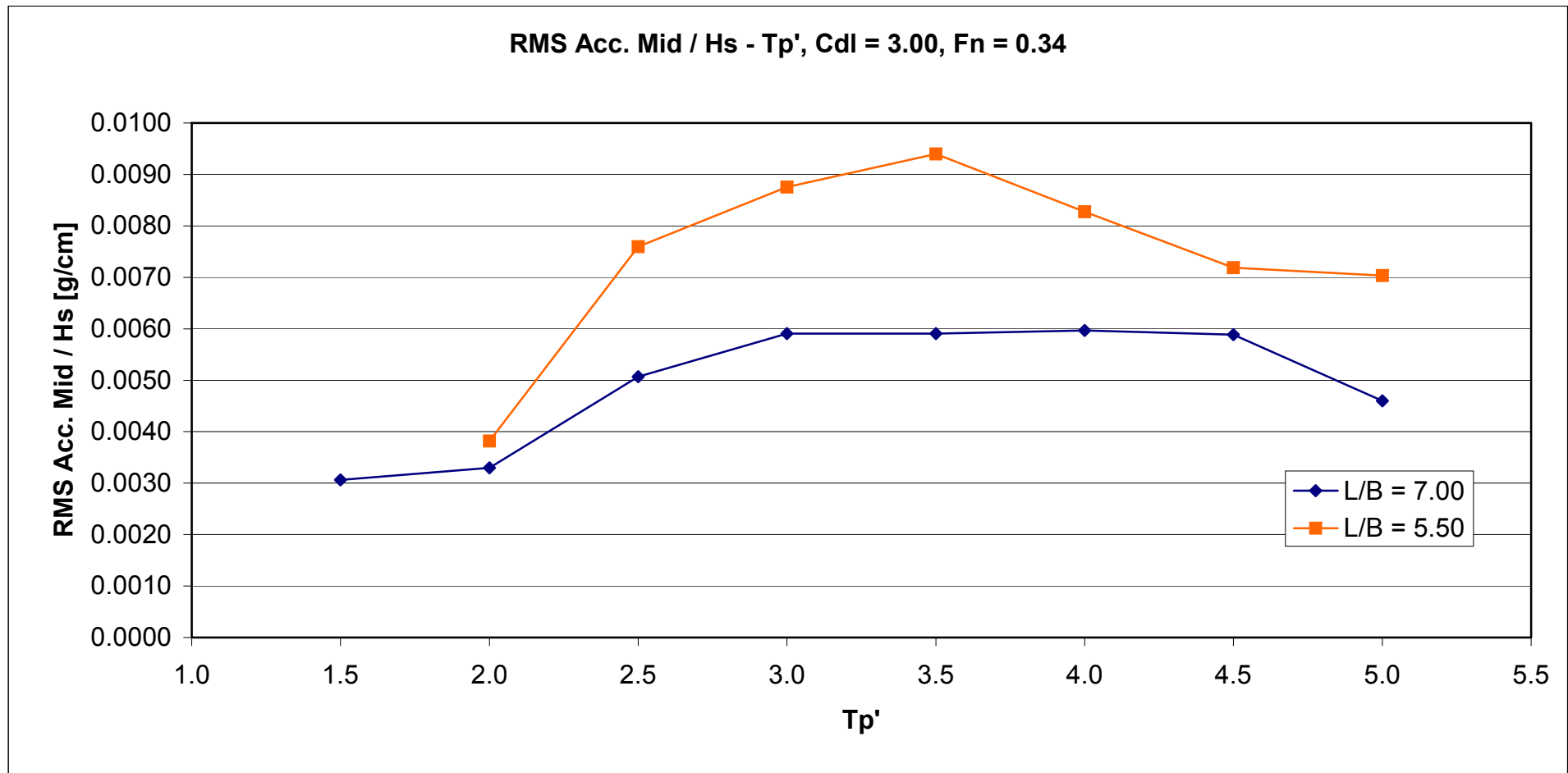
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Acceleration Bow) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}').
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Acceleration Mid.) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}').
- RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρύμνη (Acceleration Stern) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] 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) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [deg/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}').
- Τιμή πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένη με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s^2 [kp/cm²] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}').

Γενικό συμπέρασμα: Από τα διαγράμματα των σχημάτων 125 έως 130 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το πατρικό μοντέλο με $L/B = 5.50$ και εκτόπισμα $C_{DL} = 3.00$ σε $Fn = 0.34$ παρουσιάζει μεγαλύτερες αποκρίσεις στις κατακόρυφες επιταχύνσεις (Vertical Accelerations) σε σχέση με το μοντέλο που έχει $L/B = 7.00$. Το ίδιο ισχύει για την κατακόρυφη κίνηση (Heave), με εξαίρεση την απόκριση στην αδιάστατη περίοδο $Tr' = 4.5$, και για την ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα (Pitch). Τέλος, το σκάφος με μεγαλύτερο L/B έχει υψηλότερες τιμές πρόσθετης αντίστασης στις αδιάστατες περιόδους από $Tr' = 3.0$ έως $Tr' = 4.5$, ενώ στις υπόλοιπες παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές σε σχέση με το μικρότερο L/B .

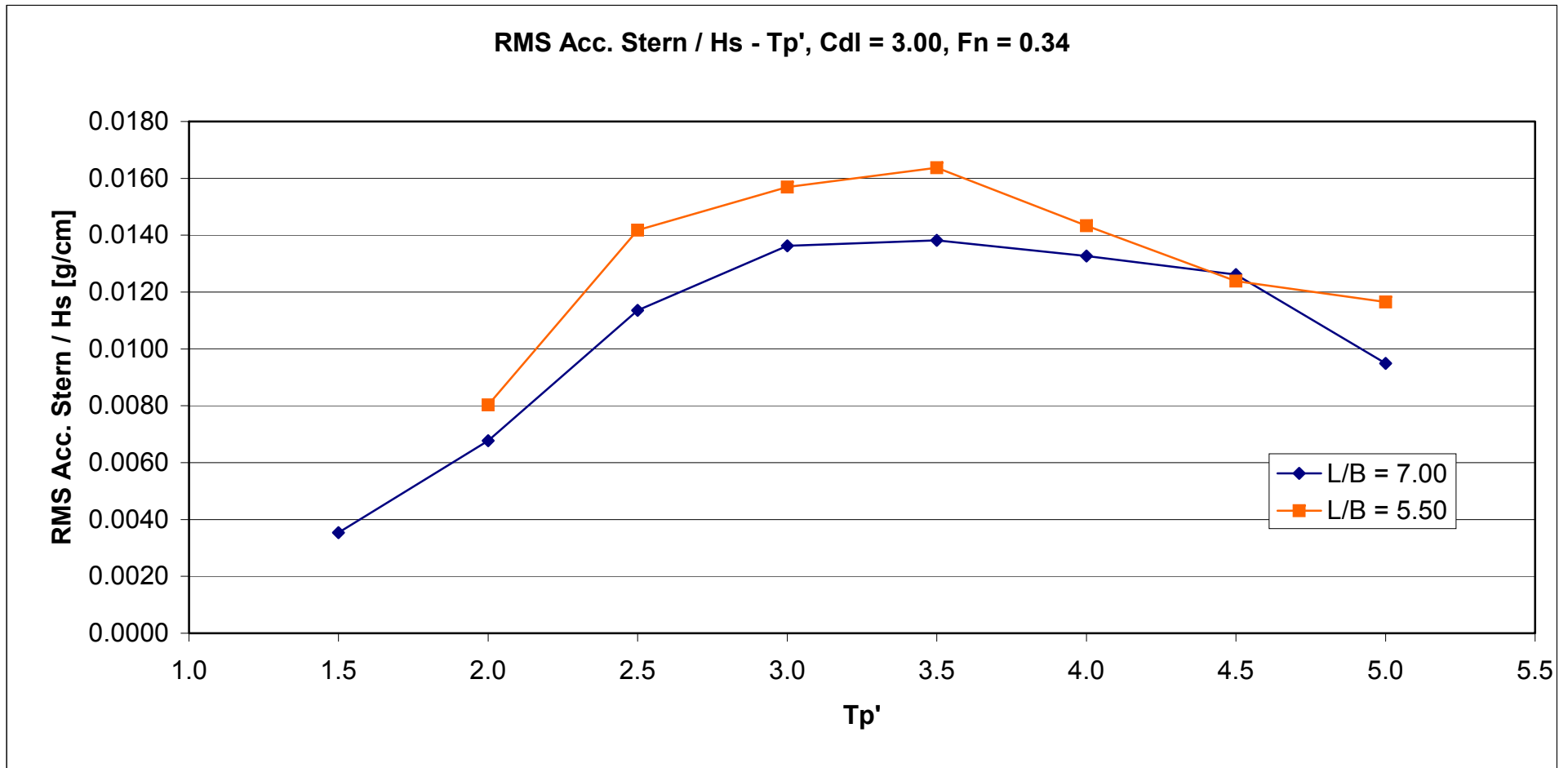
Για λόγους πληρότητας συμπεριλαμβάνονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα των σχημάτων 131 έως 136 λαμβάνοντας υπόψιν ότι τα μοντέλα έχουν διαφορετικό μήκος L_{WL} . Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα για το μεγαλύτερο λόγο L/B έχουν αναχθεί στο πατρικό μοντέλο. Η αναγωγή αυτή γίνεται θεωρώντας $\lambda = L_{WL\ 5.50} / L_{WL\ 7.00}$.



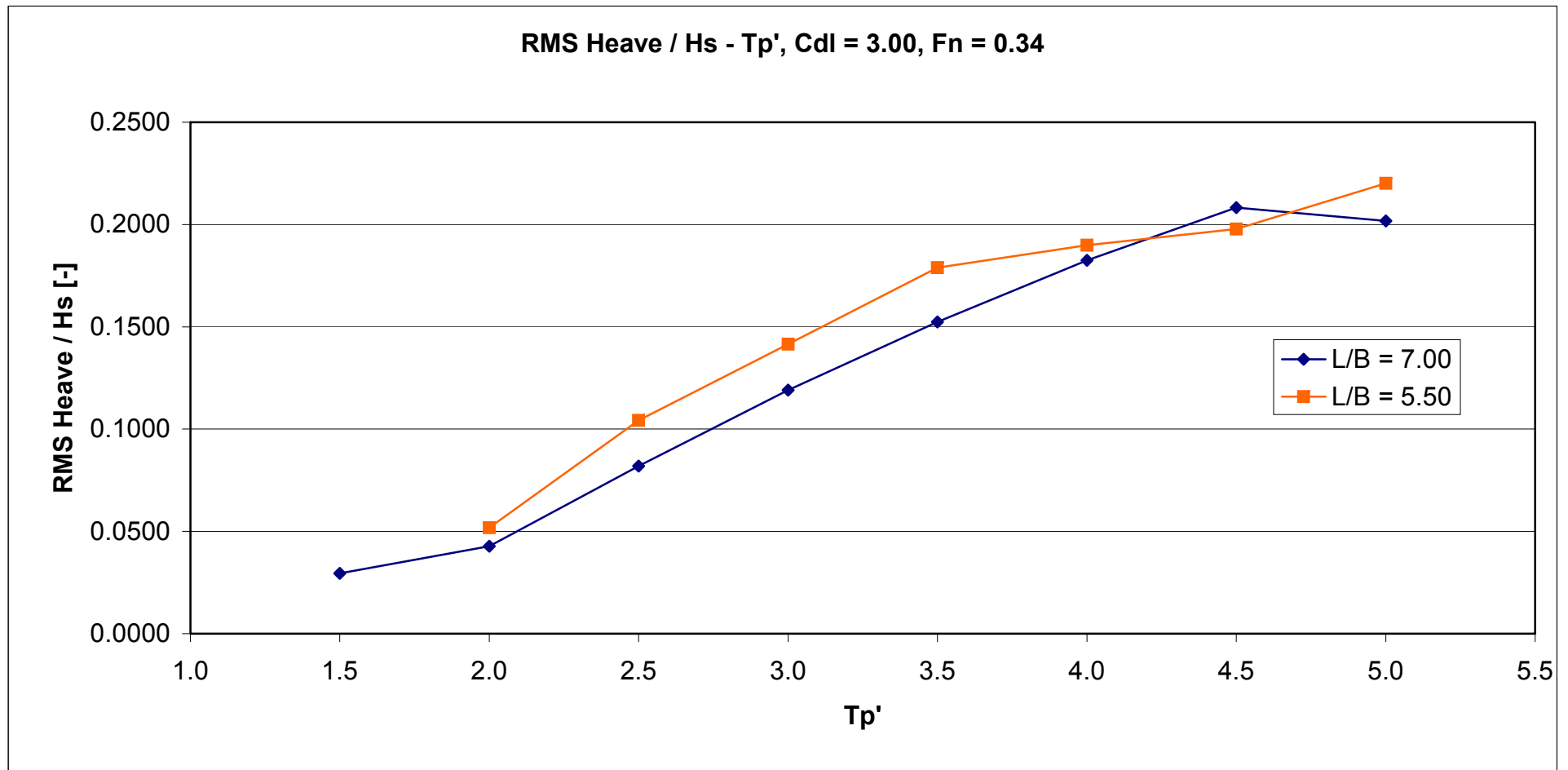
Σχήμα 125: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Acceleration Bow) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak})



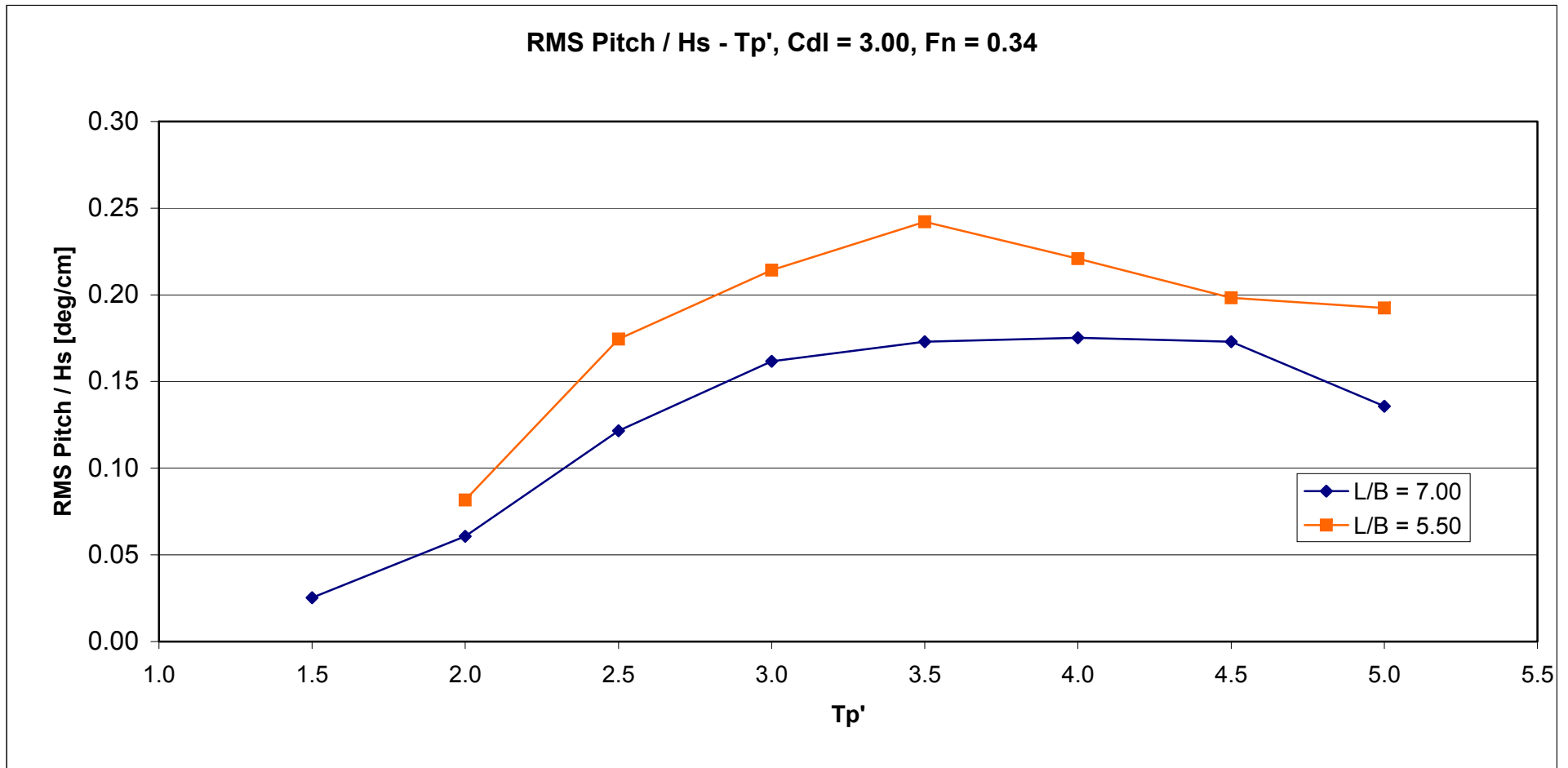
Σχήμα 126: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Acceleration Mid.) διατεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak})



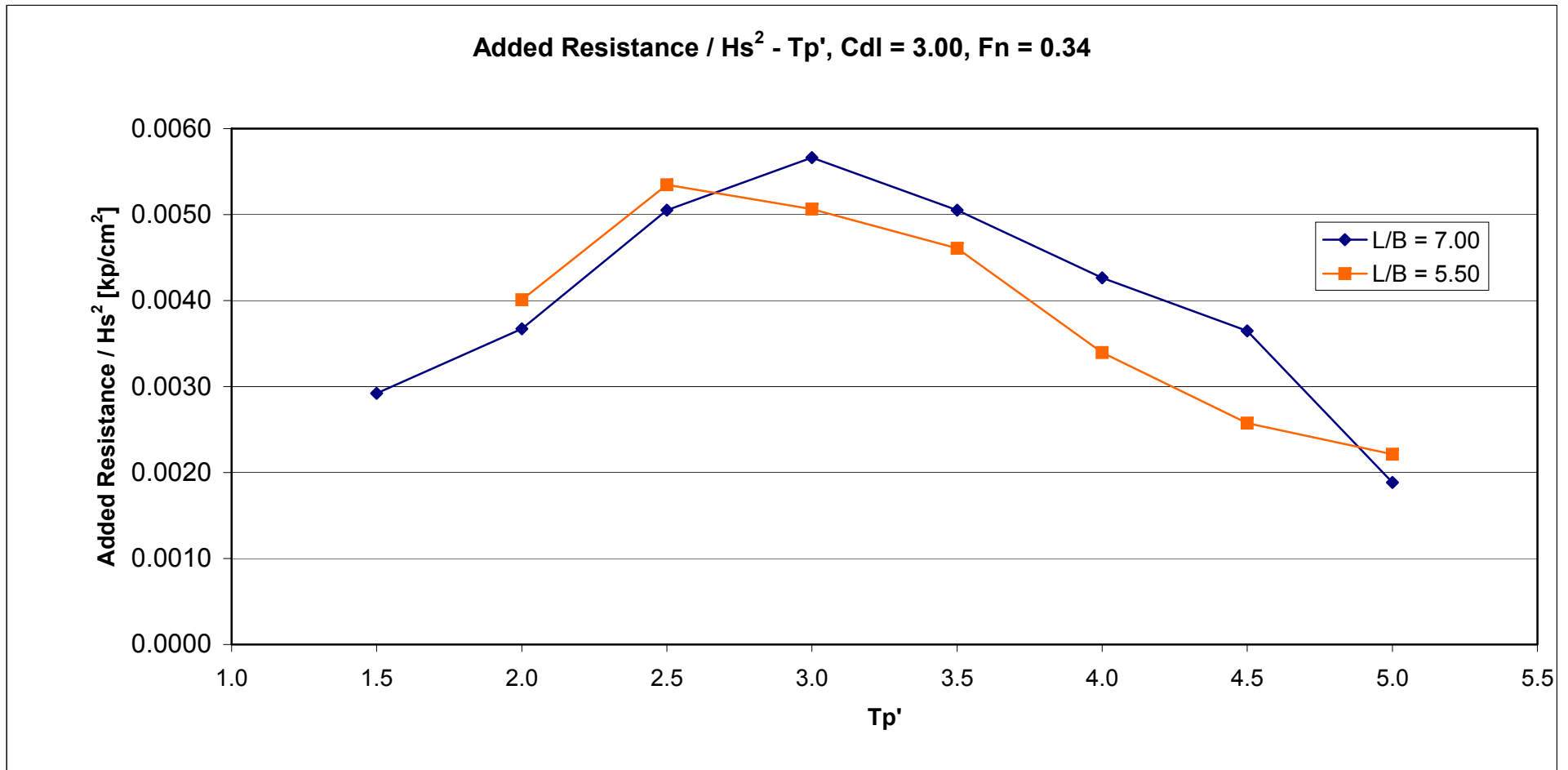
Σχήμα 127: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρύμνη (Acceleration Stern) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak})



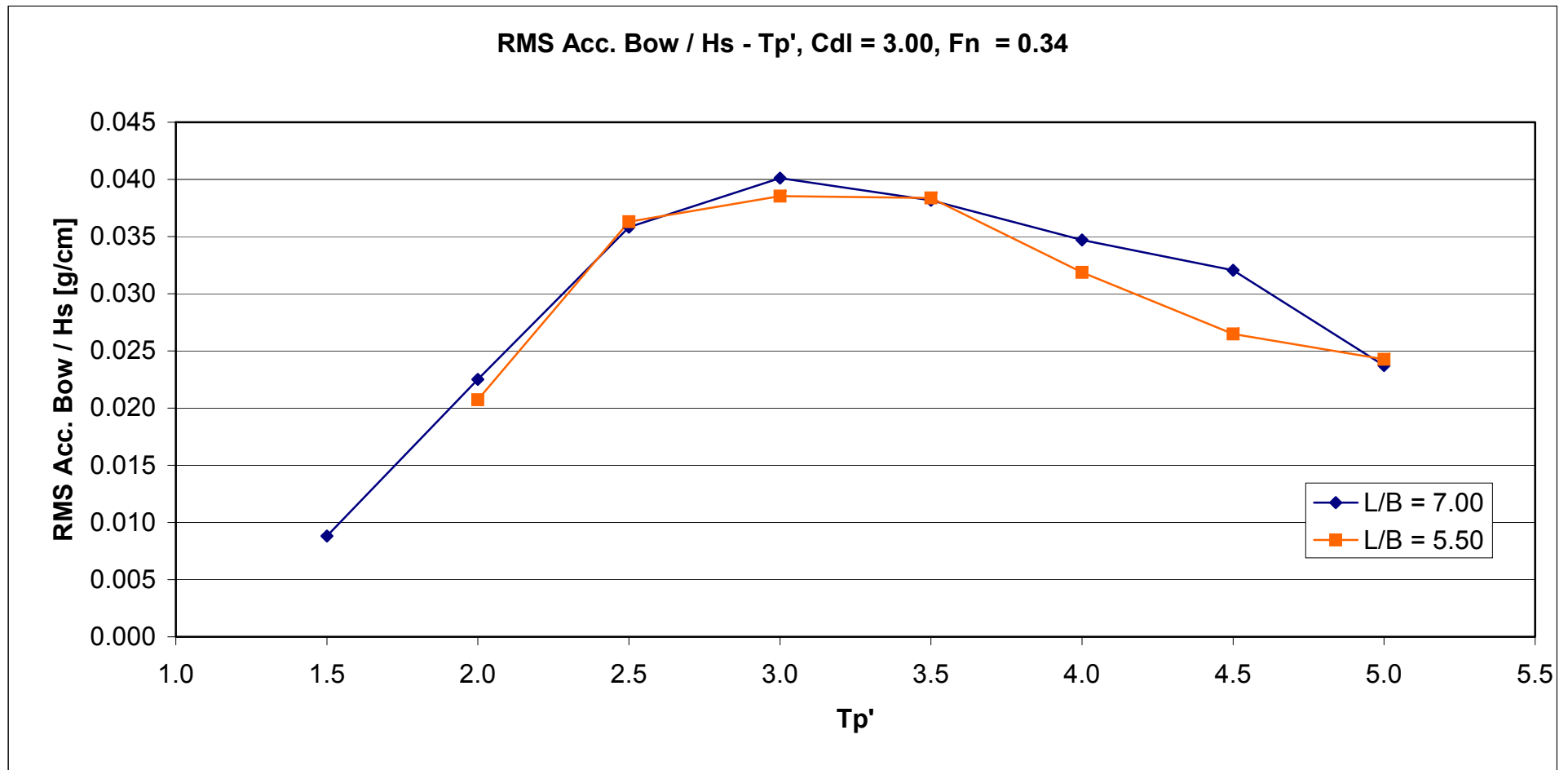
Σχήμα 128: RMS τιμή Κατακόρυφης Κίνησης (Heave) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [cm/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ($T_{peak'}$)



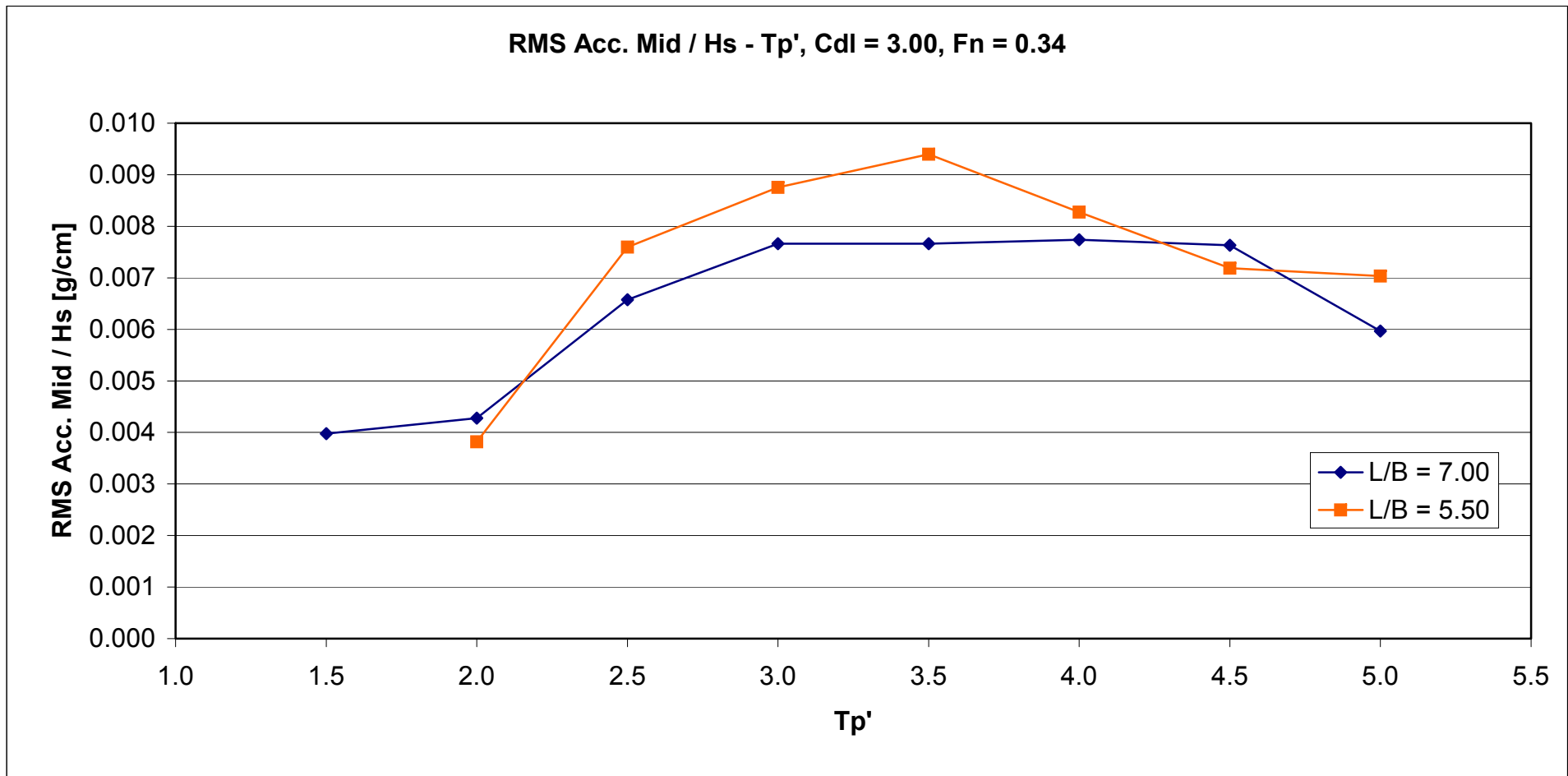
Σχήμα 129: RMS τιμή Κίνησης Προνευτασμού (Pitch) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [deg/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



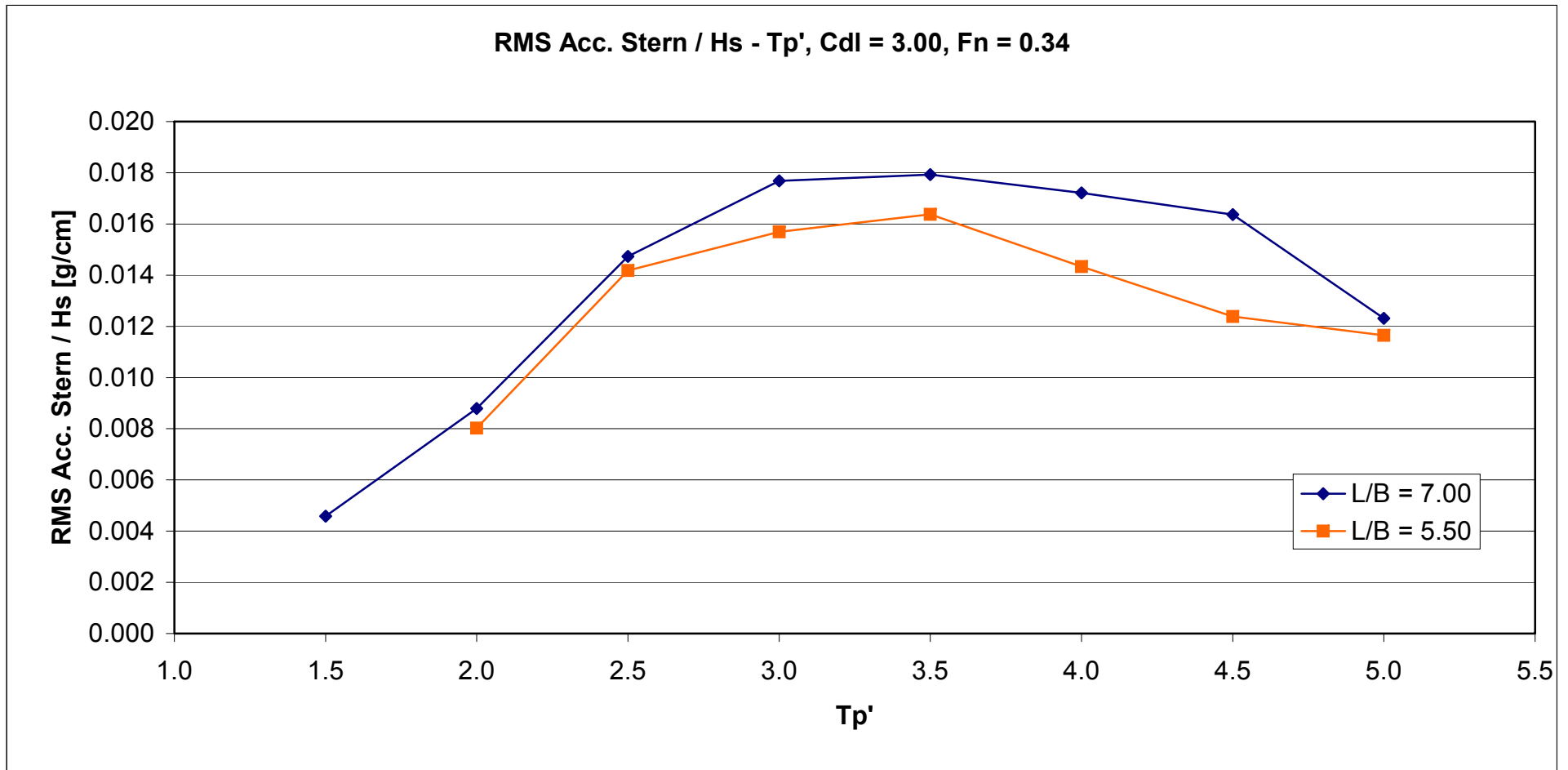
Σχήμα 130: Τιμή πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένη με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s^2 [kp/cm²] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



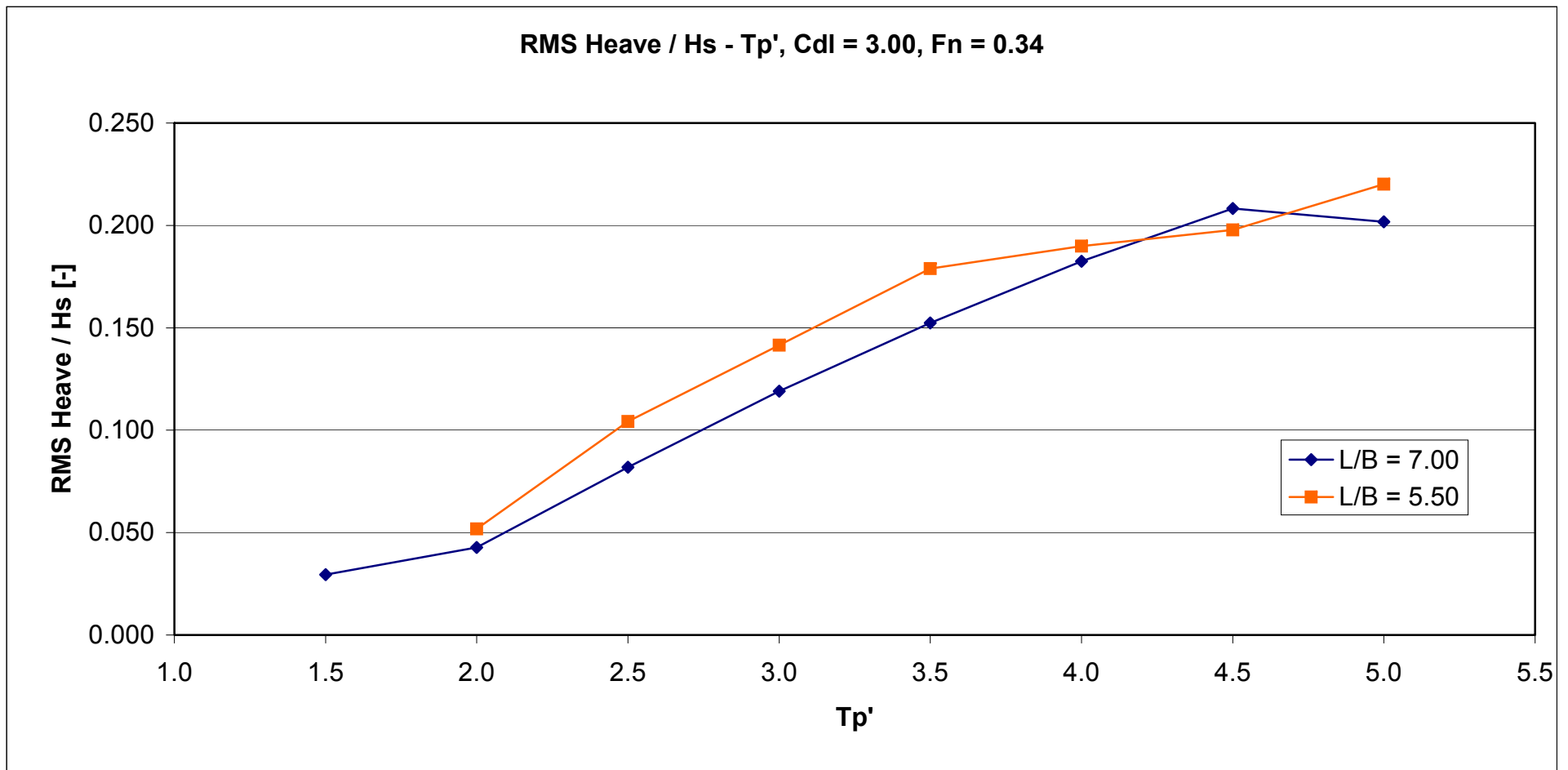
Σχήμα 131: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Acceleration Bow) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



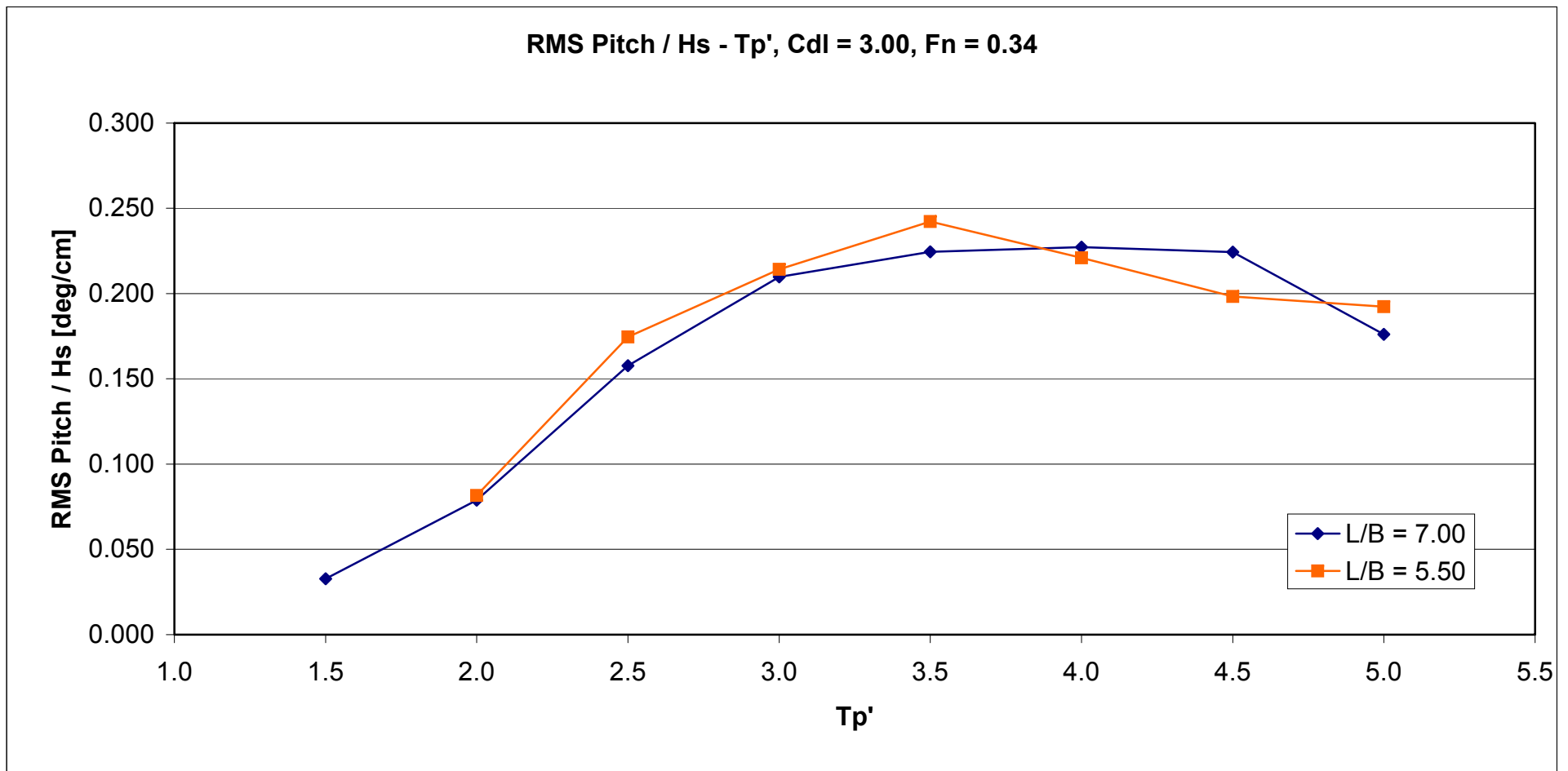
Σχήμα 132: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Acceleration Mid.) διατεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak})



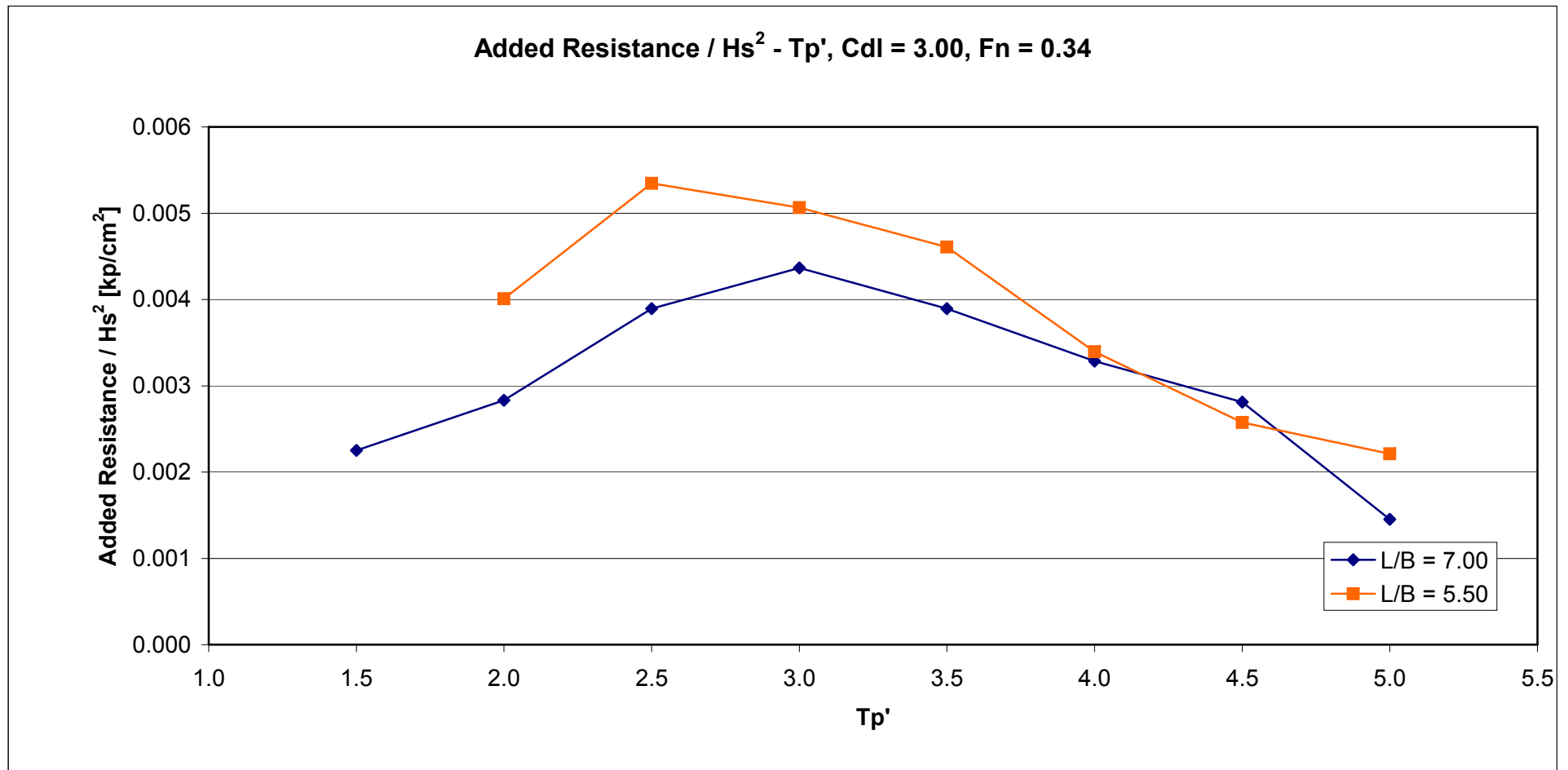
Σχήμα 133: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρύμνη (Acceleration Stern) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 134: RMS τιμή Κατακόρυφης Κίνησης (Heave) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [cm/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 135: RMS τιμή Κίνησης Προνευτασμού (Pitch) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [deg/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



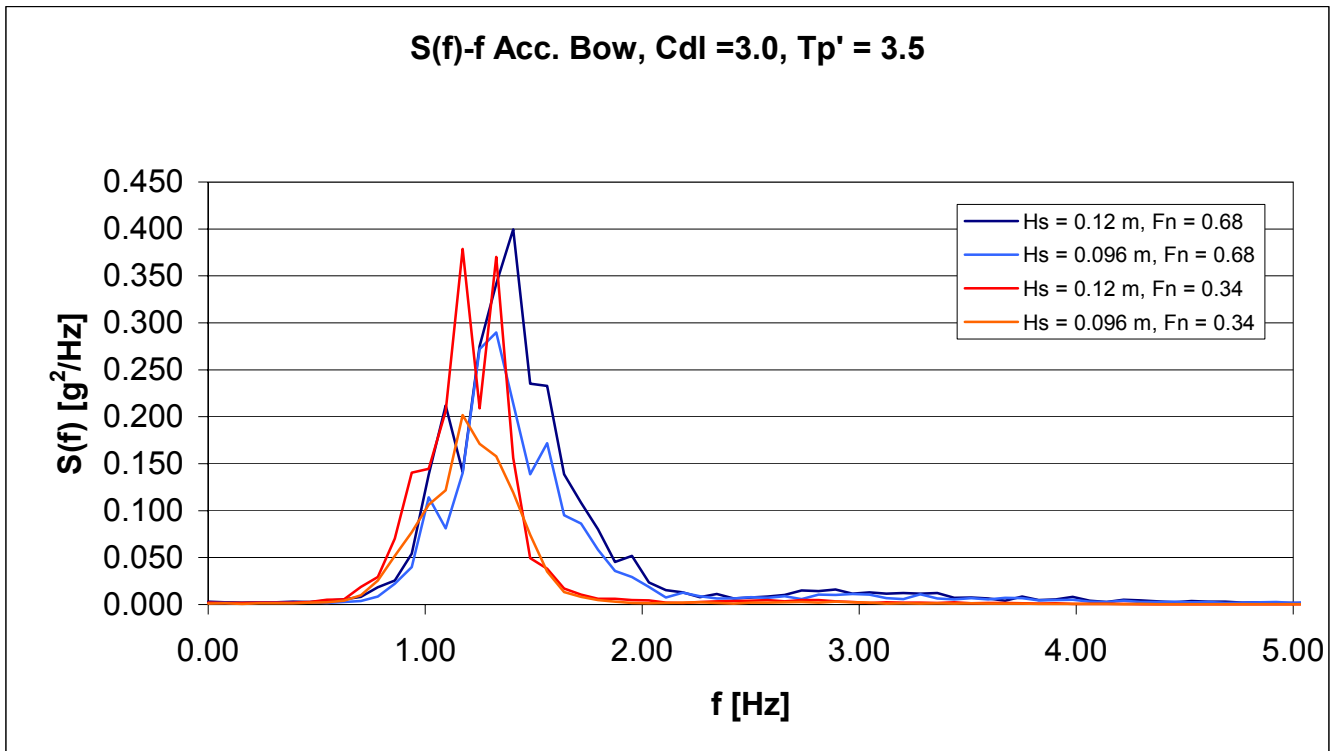
Σχήμα 136: Τιμή πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένη με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s^2 [kp/cm²] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')

9.6 Η επίδραση της αύξησης του ύψους κύματος σε σταθερή περίοδο κορυφής

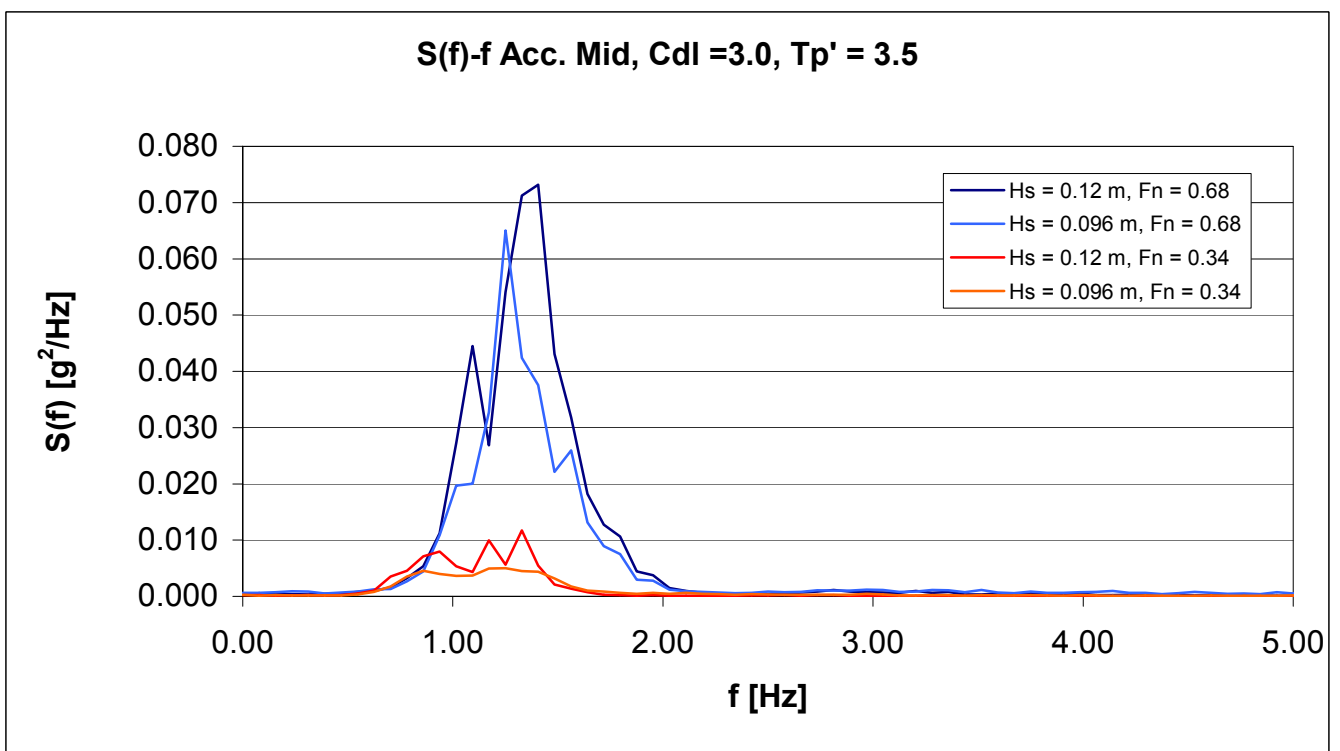
Κατά την περίοδο διεξαγωγής των πειραμάτων αποφασίστηκε στην αδιάστατη περίοδο $T_p' = 3.5$, που αντιστοιχεί σε περίοδο κορυφής σε κλίμακα μοντέλου $T_p = 1.864$ sec, να γίνουν πειράματα σε δύο σημαντικά ύψη κύματος. Το θεωρητικό φάσμα είχε σημαντικό ύψος 0.12 m αλλά τα πειράματα έγιναν με συντελεστή κλίμακας (scale factor) 0.8, ο οποίος μας έδωσε σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 0.096$ m. Παρακάτω ακολουθούν τα εξής διαγράμματα όπου φαίνονται συγκριτικά τα φάσματα των αποκρίσεων:

- 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. πρόραθεν
 2. στη διαμήκη θέση κέντρου βάρους
 3. πρύμνηθεν
- 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.

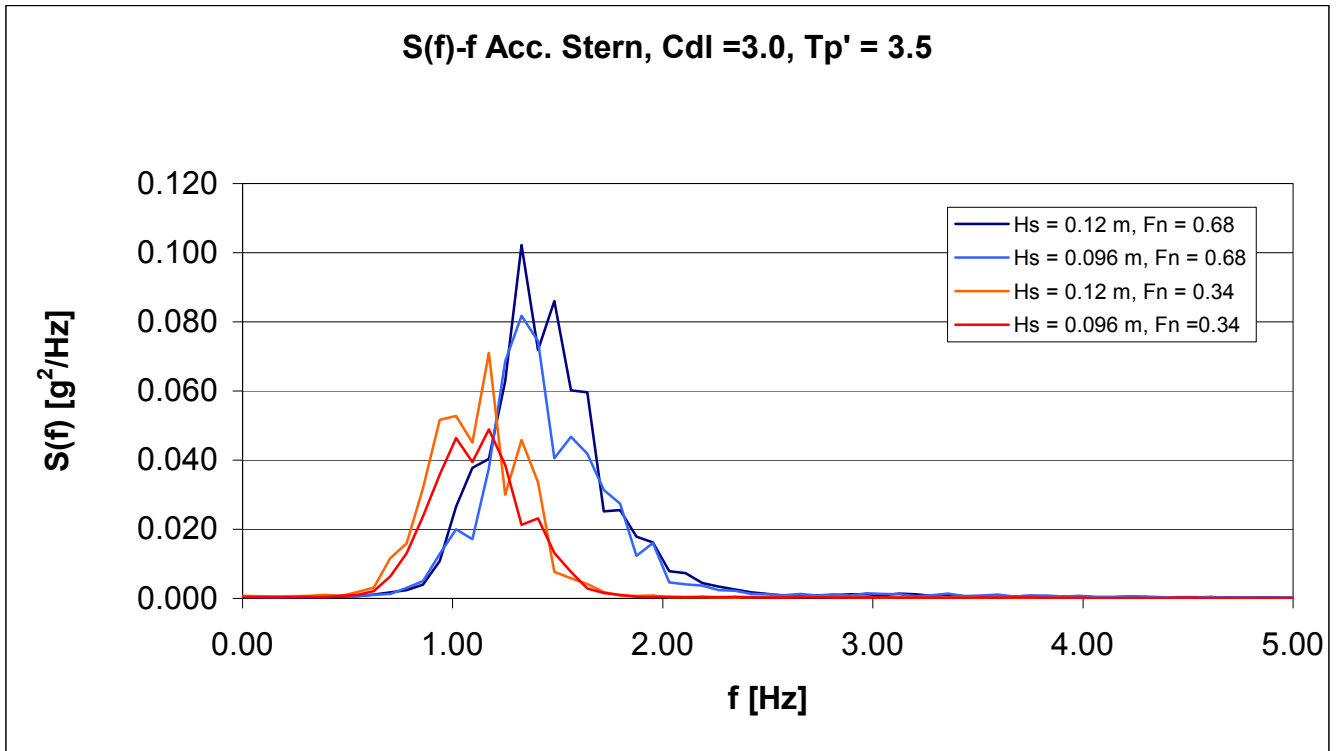
Γενικό συμπέρασμα: Από τα παρακάτω διαγράμματα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι κατακόρυφες επιταχύνσεις (Vertical Accelerations) και η κατακόρυφη κίνηση (Heave) έχουν μεγαλύτερες αποκρίσεις στη ταχύτητα που αντιστοιχεί σε $Fn = 0.68$ σε σχέση με την μικρότερη ταχύτητα. Αντίθετα, οι αποκρίσεις του προνευτασμού είναι μεγαλύτερες για τη ταχύτητα που αντιστοιχεί σε $Fn = 0.34$. Τέλος, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι κατά τη σύγκριση των φασμάτων σε σταθερή περίοδο κορυφής με αύξηση του σημαντικού ύψους κύματος η κατάσταση με το μεγαλύτερο σημαντικό ύψος κύματος θα δίνει μεγαλύτερες τιμές αποκρίσεων σε όλες τις καταγραφείσες κινήσεις.



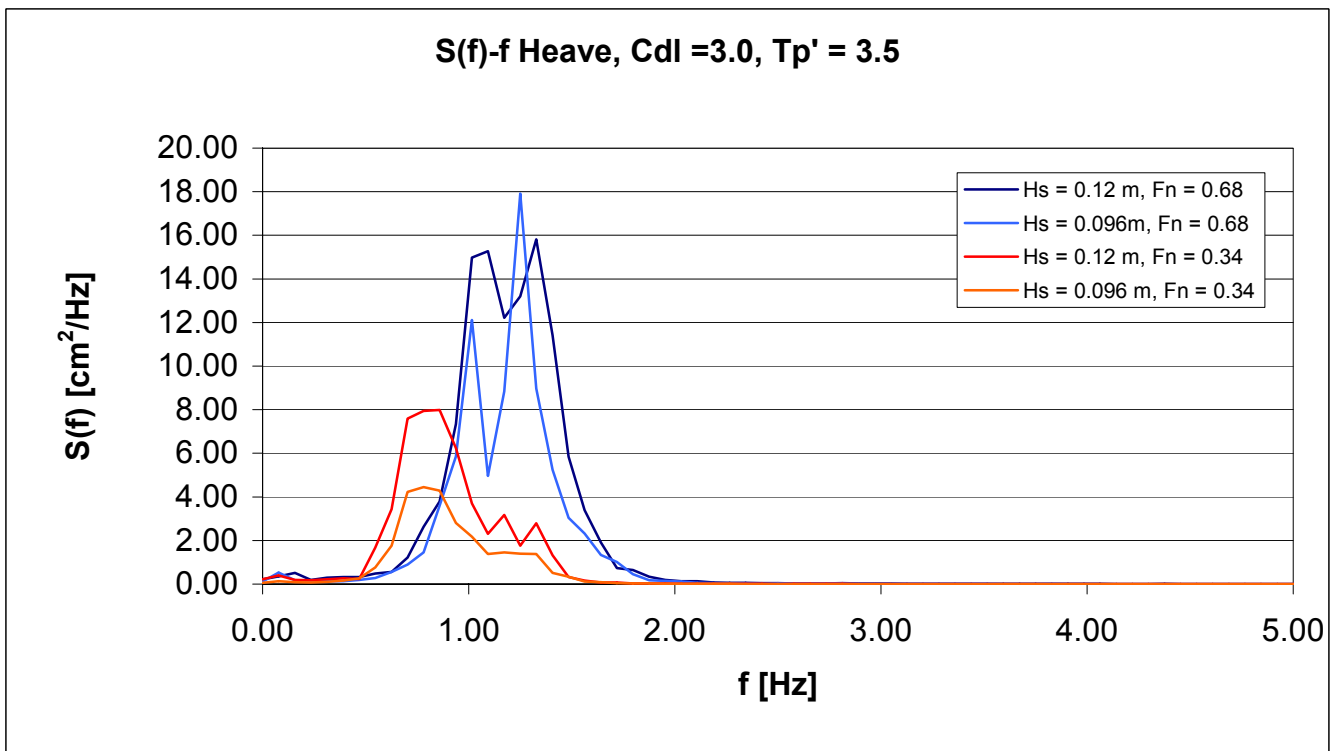
Σχήμα 137: Συναρτήσεις πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



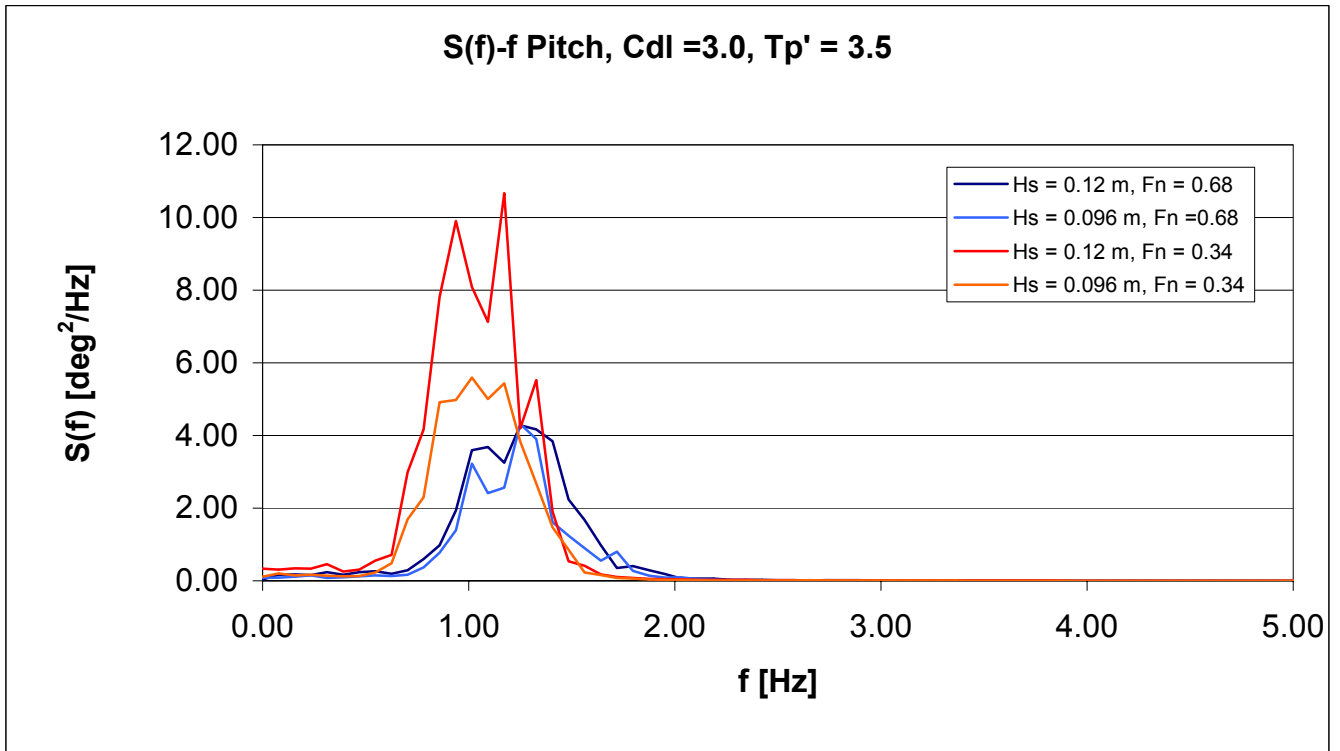
Σχήμα 138: Συναρτήσεις πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους



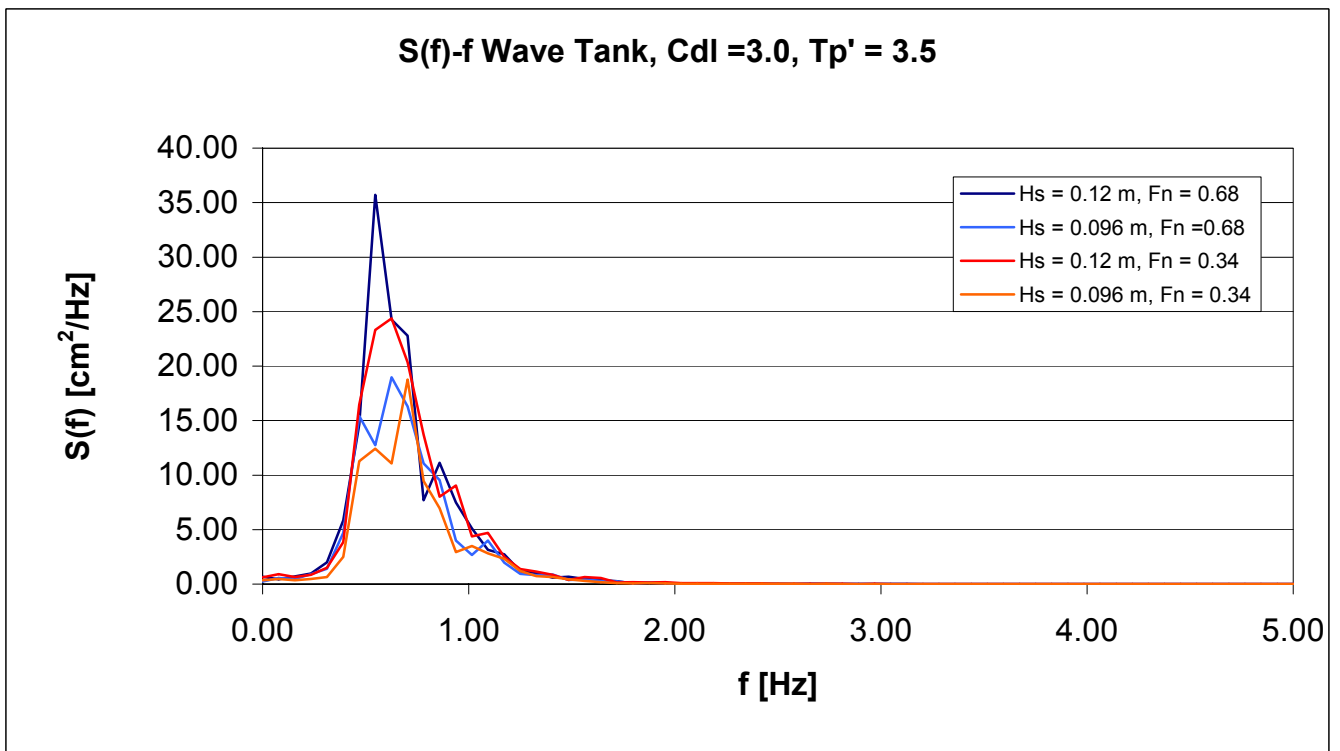
Σχήμα 139: Συναρτήσεις πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη



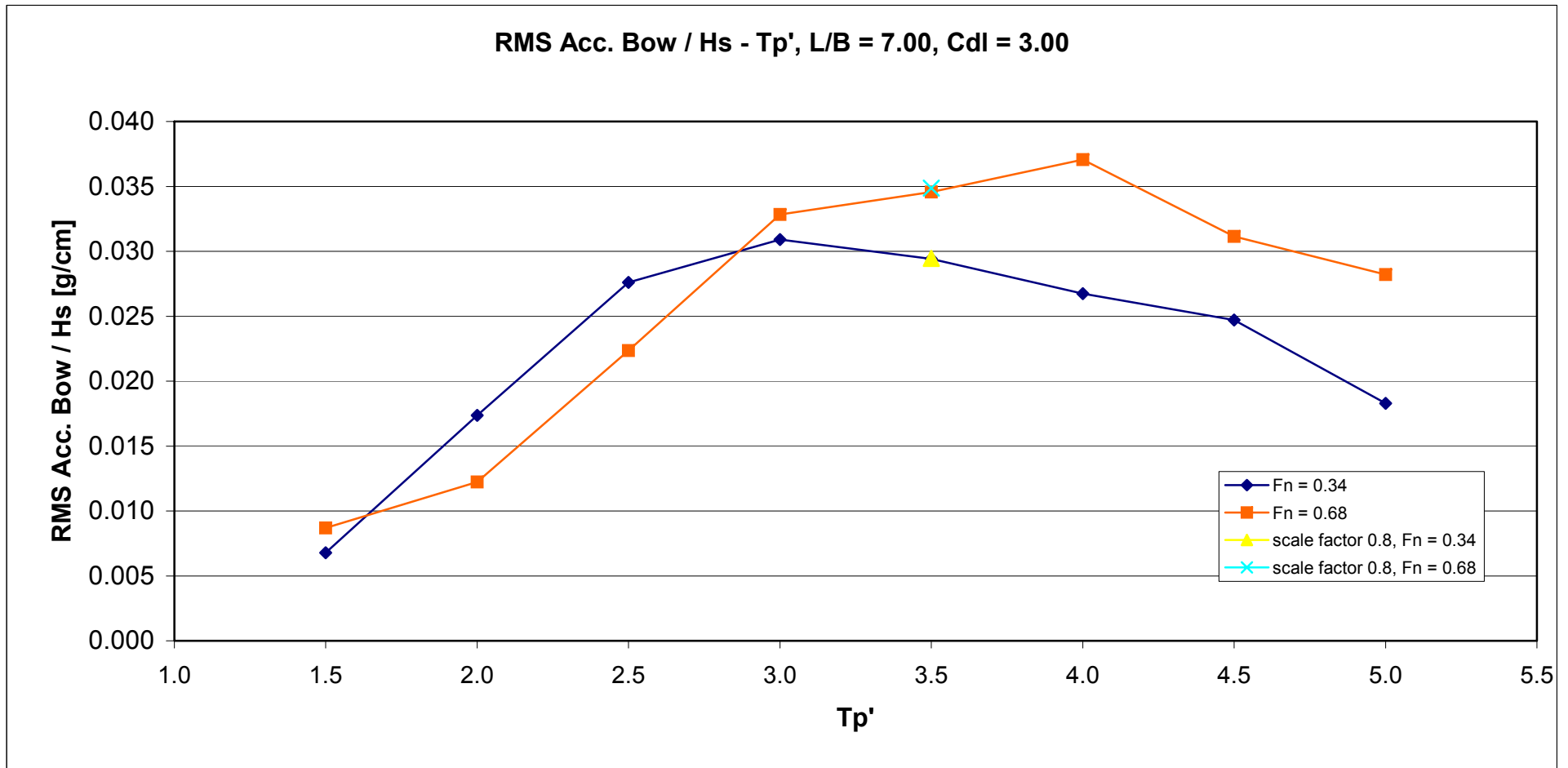
Σχήμα 140: Συναρτήσεις πυκνότητας φάσματος κατακόρυφης κίνησης



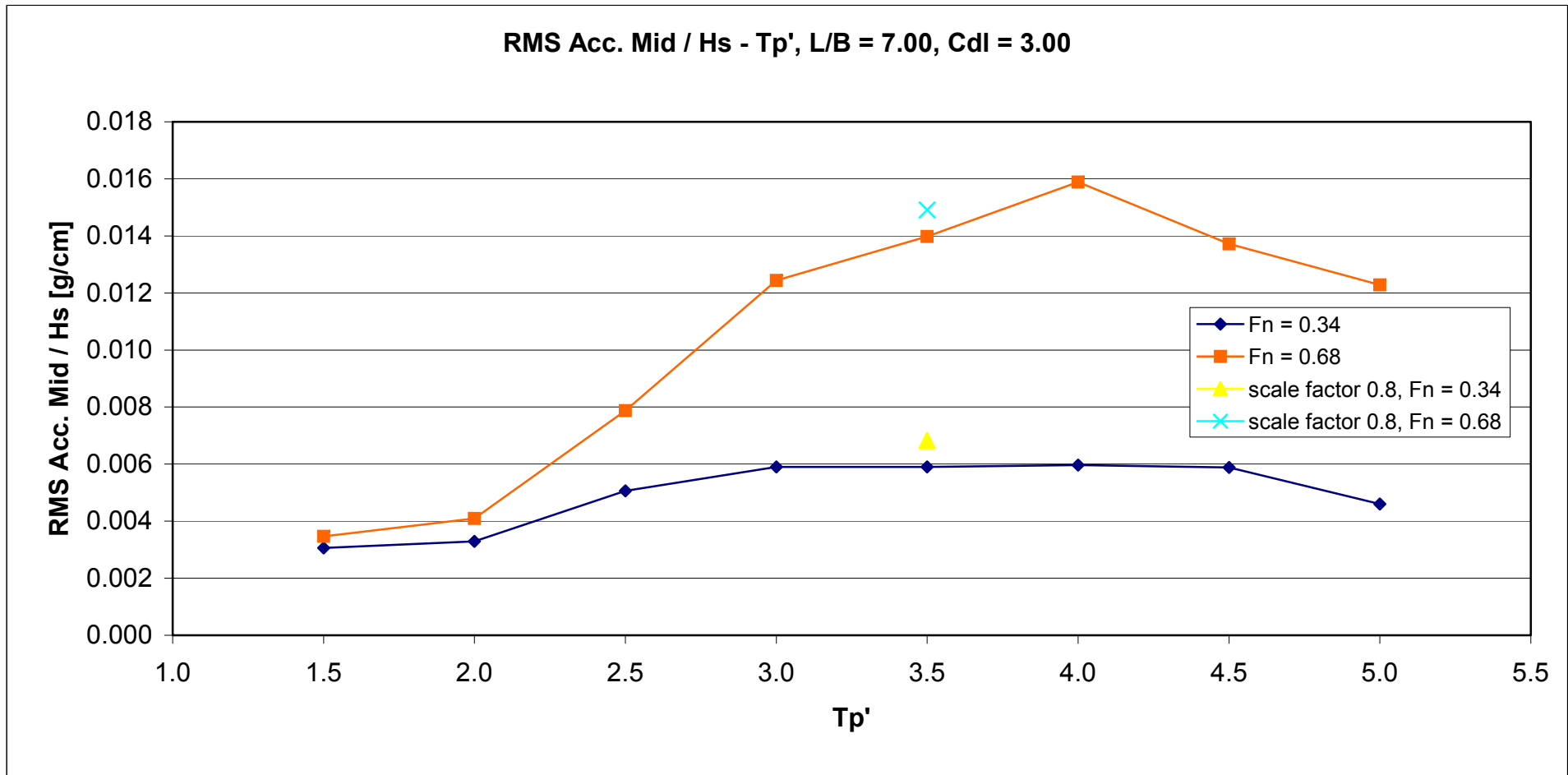
Σχήμα 141: Συναρτήσεις πυκνότητας φάσματος προνευτασμού



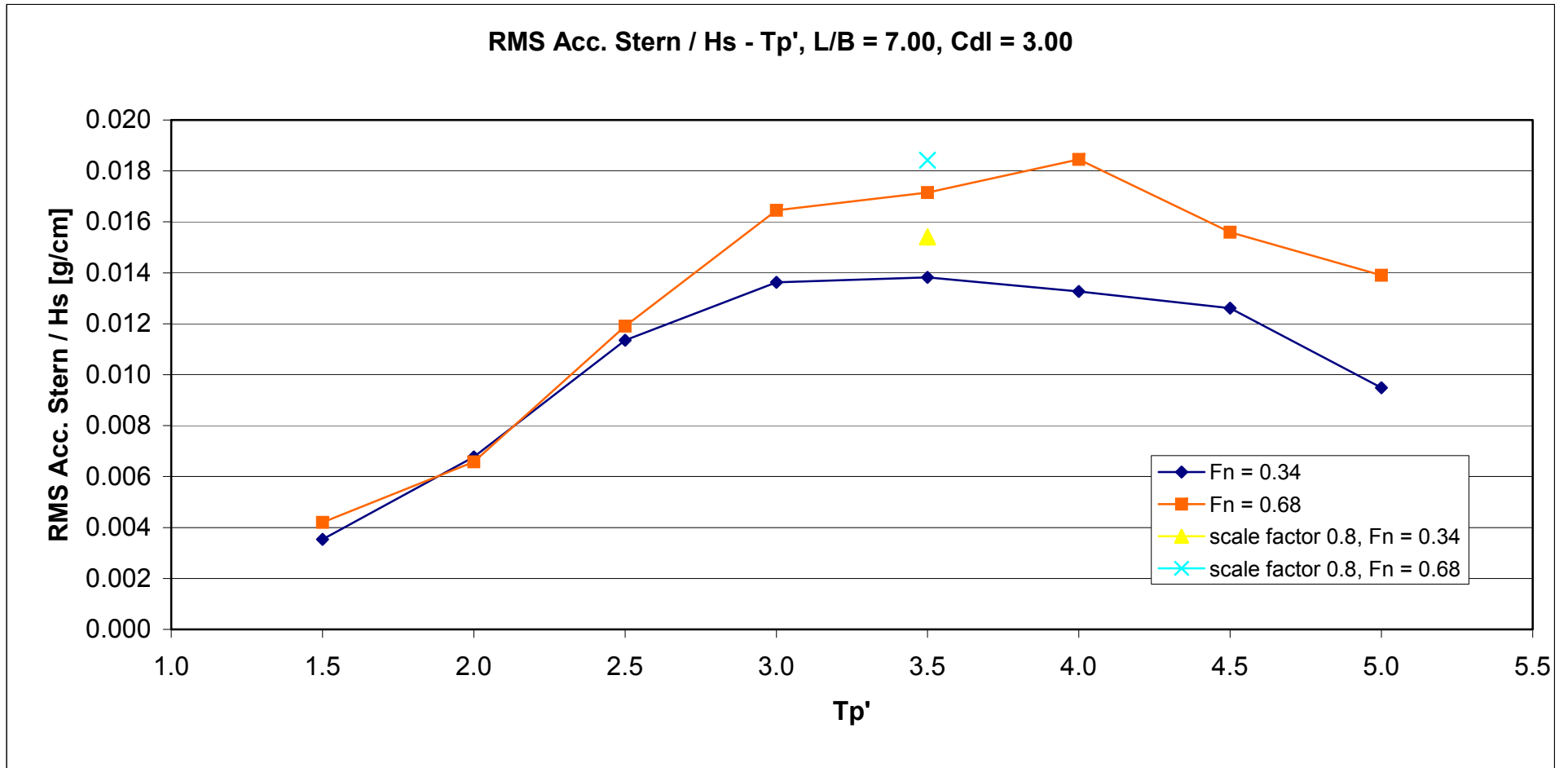
Σχήμα 142: Συναρτήσεις φασματικής πυκνότητας κύματος



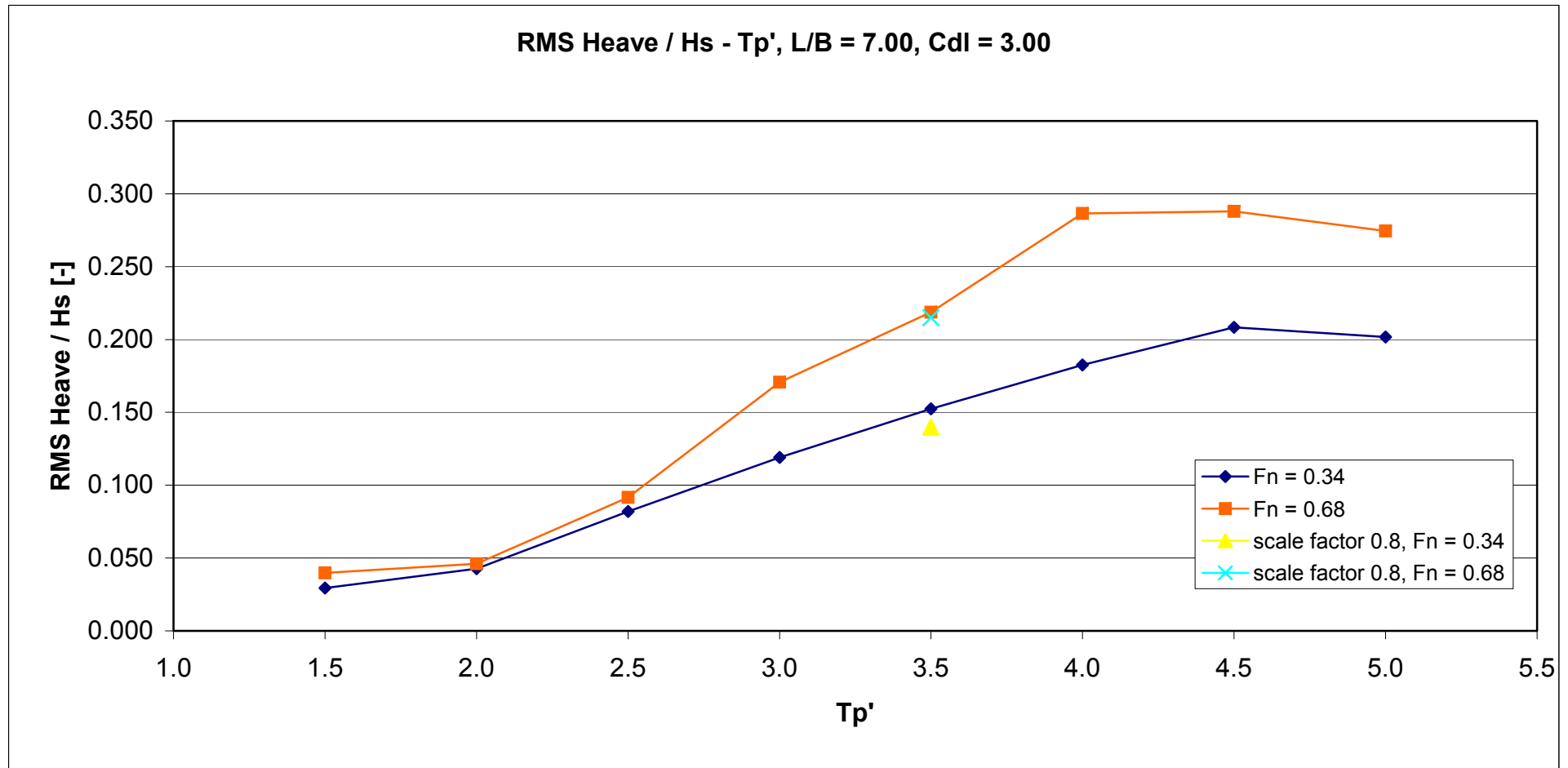
Σχήμα 143: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πλώρη (Acceleration Bow) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



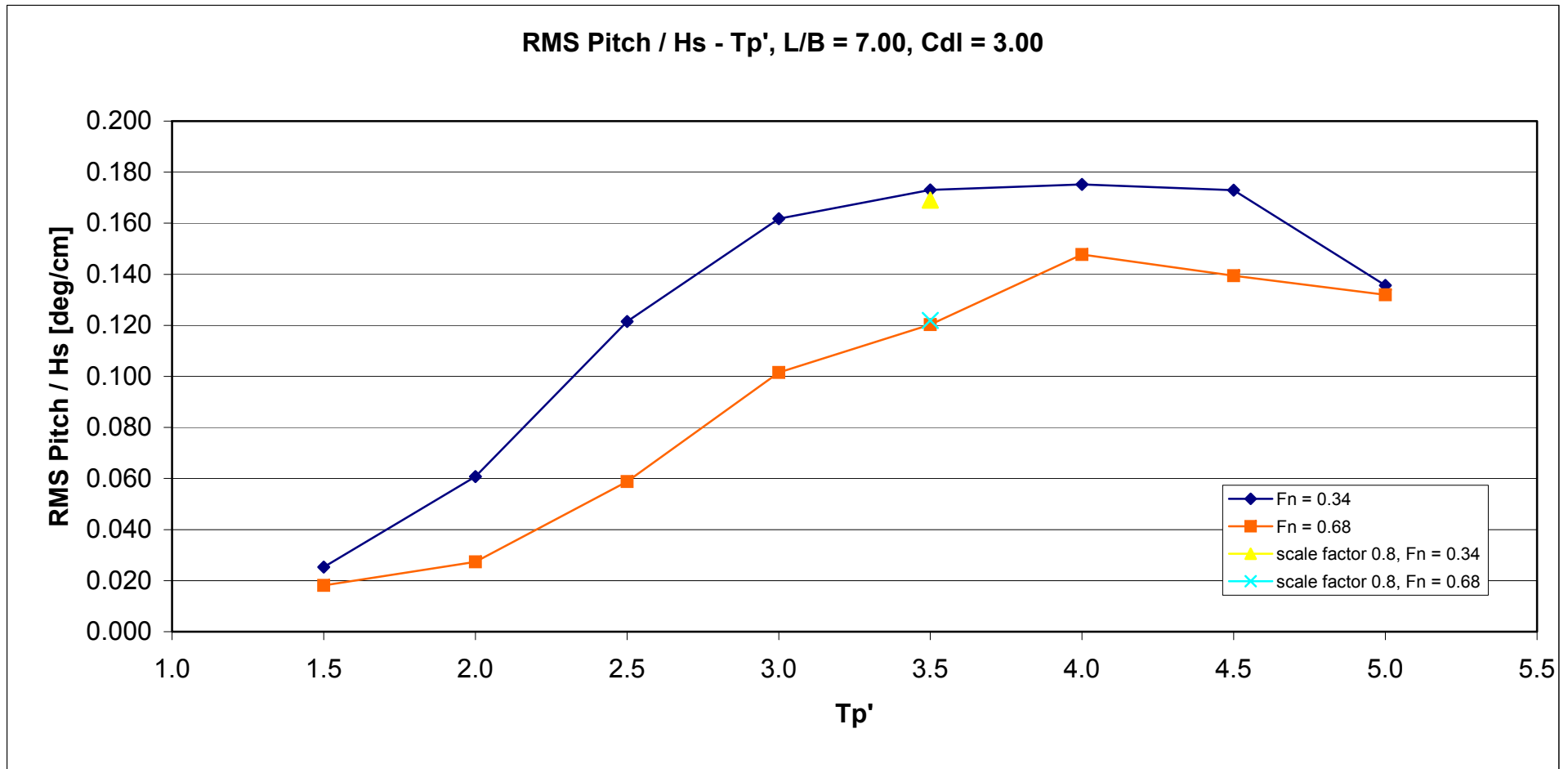
Σχήμα 144: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στο κέντρο βάρους (Acceleration Mid.) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



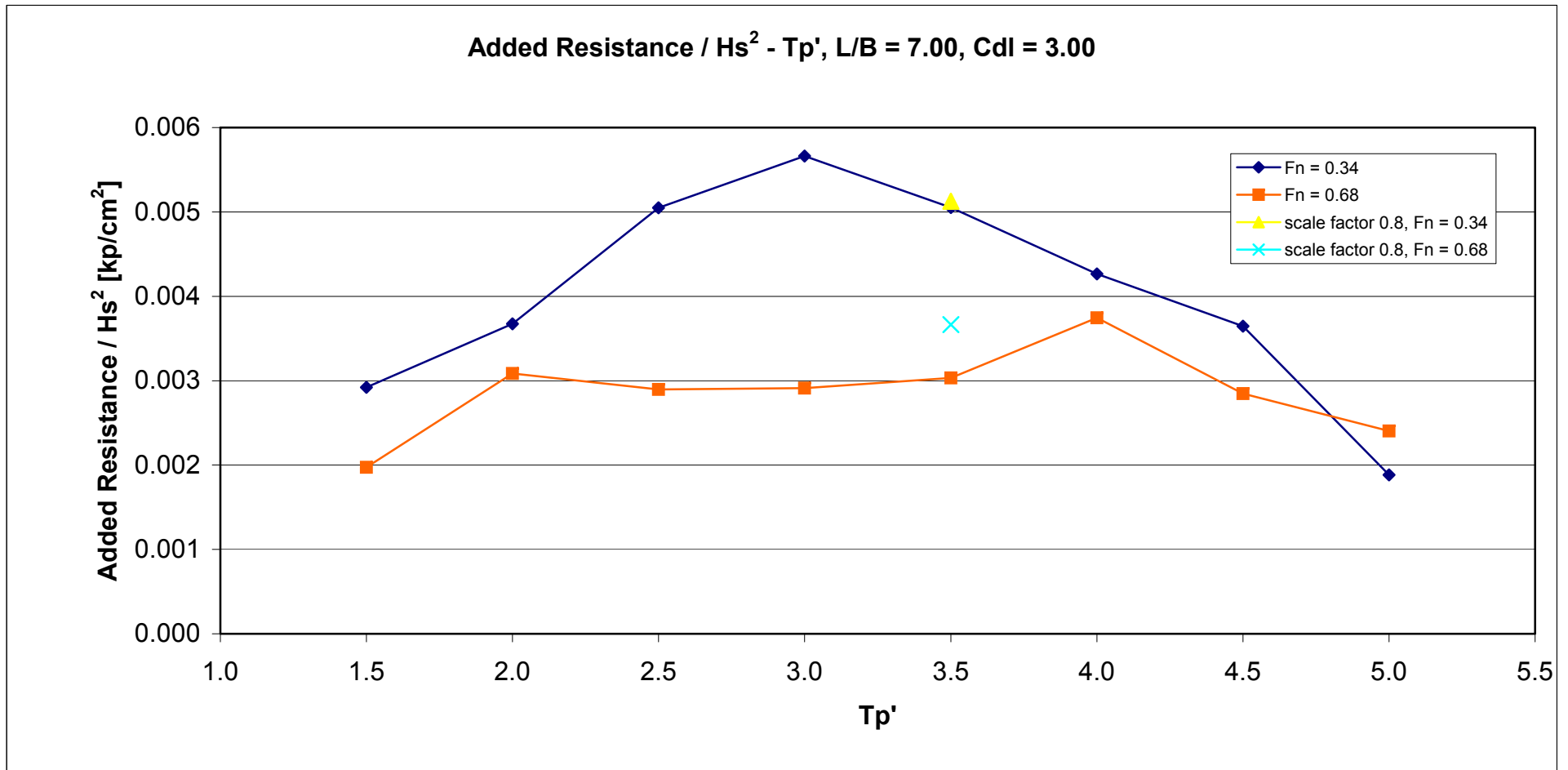
Σχήμα 145: RMS τιμή Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην πρύμνη (Acceleration Stern) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [g/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 146: RMS τιμή Κατακόρυφης Κίνησης (Heave) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [cm/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 147: RMS τιμή Κίνησης Προνευτασμού (Pitch) διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s [deg/cm] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')



Σχήμα 148: Τιμή πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένη με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s^2 [kp/cm²] συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής (T_{peak}')

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

“Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών”: Θ.Α. Λουκάκης, Γ.Ι. Γρηγορόπουλος, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1996

“Υδροδυναμική και Δυναμική Θαλασσιών Συστημάτων”: Θ.Α. Λουκάκης, Γ. Αθανασούλης, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997

“Εφαρμογές της Δυναμικής Συμπεριφοράς Πλοίων σε Κυματισμούς”: Θ.Α. Λουκάκης, Γ.Ι. Γρηγορόπουλος, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2000

“Αναλυτική και Πειραματική Διερεύνηση της Δυναμικής Συμπεριφοράς Ταχύπλοων Σκαφών σε Κυματισμούς”, Διπλωματική Εργασία: Θ.Κ. Περδικάρη, Αθήνα 2006

“Υδροδυναμική Πλοίου, Αντίσταση-Πρόωση (Σημειώσεις)”: Θ.Α. Λουκάκης, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2001

“Υδροδυναμική Πλοίου, Κύματα Ανέμου και Στοιχεία Θεωρίας Στοχαστικών Διαδικασιών”: Θ.Α. Λουκάκης, Γ. Αθανασούλης, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004

“Resistance and Seakeeping Characteristics of a Systematic Series in the Pre-Planning Condition, Part I”: Θ.Α. Λουκάκης, Γ.Ι. Γρηγορόπουλος, SNAME 2002

“Επίδραση της Δυναμικής Συμπεριφοράς ενός Πλοίου στην Λειτουργία του σε Συνθήκες Υπηρεσίας”: Θ.Α. Λουκάκης, Δ.Π. Δαμάλα, Αθήνα 2004

“Πειραματική Διερεύνηση της Δυναμικής Συμπεριφοράς Ταχύπλοων Σκαφών σε Θαλάσσιους Κυματισμούς”, Διπλωματική Εργασία: Η.Λ. Λατσός, Αθήνα 1994