



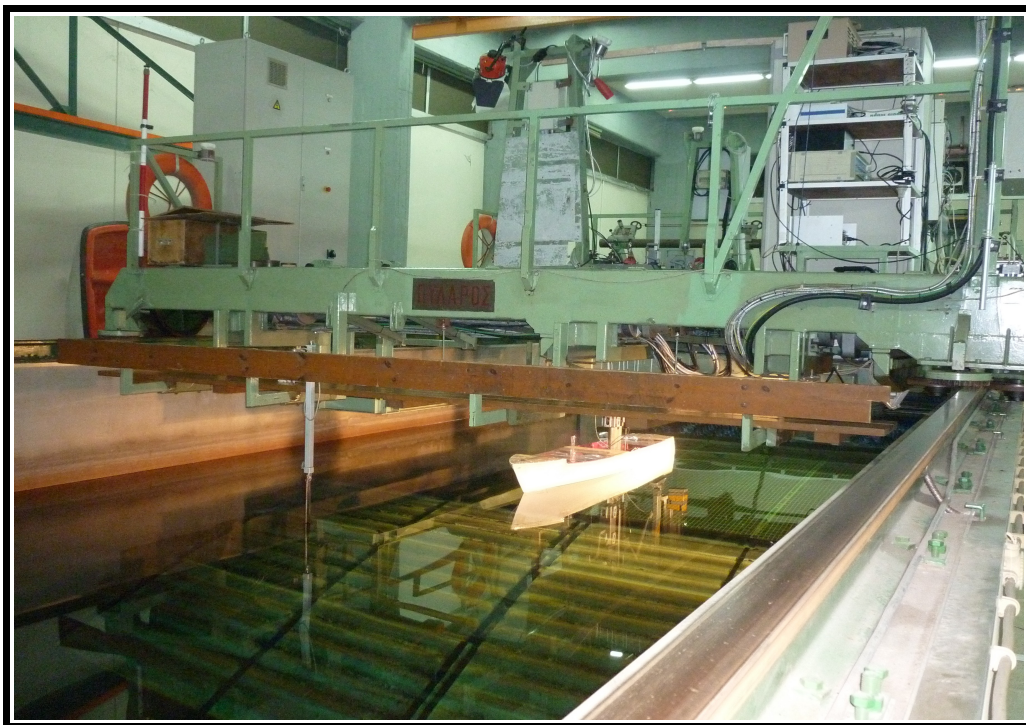
**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**“ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ”**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ**  
**ΤΑΧΥΠΛΩΩΝ ΣΚΑΦΩΝ ΜΕ ΔΙΠΛΗ ΑΚΜΗ ΣΕ ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ**



**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:**  
**ΣΚΟΥΝΤΖΟΥΡΗΣ ΦΩΤΙΟΣ**

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

**ΑΘΗΝΑ**  
**ΙΟΥΛΙΟΣ 2012**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ – ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς σε κυματισμούς (seakeeping) ταχυπλόων σκαφών με γάστρα διπλής ακμής. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην Πειραματική Δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Το μοντέλο υπό κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ανήκει στη συστηματική σειρά ταχυπλόων σκαφών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, ενώ οι τυχαίοι κυματισμοί που μελετήθηκαν προσομοιώνουν πραγματικές καταστάσεις θάλασσας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Γρηγόρη Γρηγορόπουλο για την αμέριστη βοήθειά του καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα κυρία Δήμητρα Δαμάλα για τις χρήσιμες υποδείξεις και διορθώσεις της.

Τέλος, θερμές ευχαριστίες στο προσωπικό της δεξαμενής κ.κ. Γιάννη Τραχανά και Φώτη Κασάπη, καθώς και στον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτρη Λιαροκάπη για την καθοριστική συνδρομή τους και την προθυμία τους κατά την εκτέλεση των πειραμάτων.

Σκουντζούρης Φώτιος  
Ιούλιος 2012

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Κεφάλαιο 1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ</b>	
1.1. Είδη κινήσεων.....	4
1.2. Θεωρία κυματισμών	
1.2.1. Εισαγωγή.....	5
1.2.2. Αρμονικοί κυματισμοί.....	5
1.2.3. Τυχαίοι κυματισμοί	
1.2.3.1. Μοντέλο Longuet – Higgins.....	6
1.2.3.2. Φαινόμενα – στατιστικά μεγέθη.....	7
1.2.3.3. Φάσμα στοχαστικής διαδικασίας.....	8
1.3. Θεωρία λωρίδων.....	11
1.4. Αποκρίσεις σκάφους.....	14
1.5. Πρόσθετη αντίσταση.....	15
<b>Κεφάλαιο 2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ ΣΚΑΦΩΝ</b>	
2.1. Εισαγωγή.....	16
2.2. Κατηγορίες συστηματικών σειρών.....	16
2.3. Συστηματική σειρά NTUA.....	17
2.4. Προσαρμογή αποτελεσμάτων Seakeeping συστηματικών σειρών.....	18
<b>Κεφάλαιο 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b>	
3.1. Αντικείμενο.....	19
3.2. Πειραματικές παράμετροι	
3.2.1. Προετοιμασία προτύπου.....	20
3.2.1.1. Επίτευξη επιθυμητού εκτοπίσματος.....	21
3.2.1.2. Εύρεση επιθυμητής διαγωγής (trim) και εγκάρσιας κλίσης.....	21
3.2.1.3. Ακτίνα αδρανείας – περίοδος ιδιοταλάντωσης.....	21
3.2.1.4. Υπολογισμός αποφόρτισης.....	22
3.2.2. Βαθμονόμηση μετρητικών διατάξεων.....	23
3.2.3. Πειραματικές καταστάσεις θάλασσας.....	25
3.3. Διεξαγωγή πειράματος.....	27
<b>Κεφάλαιο 4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>28</b>
<b>Κεφάλαιο 5. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ</b>	
5.1. Διαγράμματα φασμάτων κυματισμού – αποκρίσεων.....	29
5.2. Διαγράμματα τιμών RMS αποκρίσεων.....	52
5.3. Διαγράμματα πρόσθετης αντίστασης.....	58
5.4. Διαγράμματα συναρτήσεων μεταφοράς (RAO) και σύγκριση με αποτελέσματα ημιτονικών κυματισμών.....	59
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>95</b>

# Κεφάλαιο 1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

## 1.1. ΕΙΔΗ ΚΙΝΗΣΕΩΝ

Η κίνηση κάθε πλέοντος σκάφους χαρακτηρίζεται συνολικά από 6 βαθμούς ελευθερίας: τρεις **μεταφορικές** κατά μήκος των αξόνων  $x$ ,  $y$ ,  $z$  και τρεις **περιστροφικές** περί αυτών (Σχήμα 1.1).

### Μεταφορικές

$\xi_1$  Διαμήκης οριζόντια ταλάντωση (Surge)

$\xi_2$  Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση (Sway)

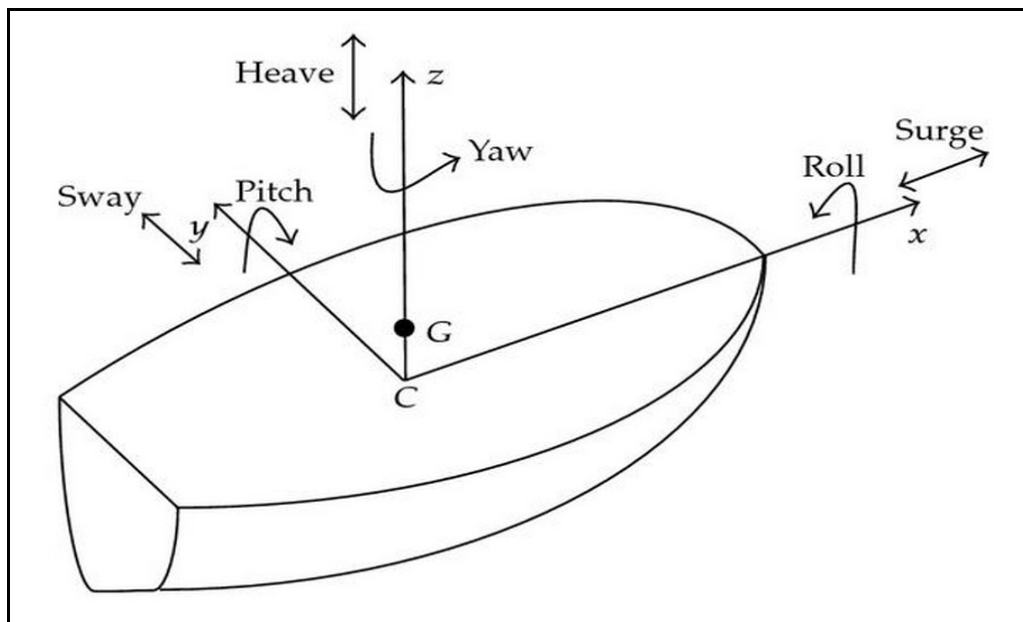
$\xi_3$  Κατακόρυφη ταλάντωση (Heave)

### Περιστροφικές

$\xi_4$  Ταλάντωση περί το διαμήκη άξονα/Διατοιχισμός (Roll)

$\xi_5$  Ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα/Προνευτασμός (Pitch)

$\xi_6$  Ταλάντωση περί τον κατακόρυφο άξονα (Yaw)



Σχήμα 1.1. Βαθμοί ελευθερίας σκάφους.

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

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

- Heave
- Pitch
- Καμπτική ροπή μέσου νομέα (midship bending moment)
- Πρόσθετη αντίσταση (added resistance)
- Κάθετες επιταχύνσεις (vertical accelerations) σε επιλεγμένα σημεία του σκάφους
- Σχετικές κινήσεις (relative motions)

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

## **1.2. ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ**

### **1.2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

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

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

Ο μηχανισμός δημιουργίας θαλάσσιων κυμάτων είναι εξαιρετικά πολύπλοκος. Υπάρχει άπειρη ποικιλία ως προς το είδος των κυματισμών, ενώ κάθε προσπάθεια καταγραφής τους αποκαλύπτει ακανόνιστη αλληλουχία κορυφών και κοιλάδων σε διάφορες διευθύνσεις με τυχαία εξέλιξη στο πεδίο του χρόνου. Συνεπώς, η ακριβής περιγραφή ενεργειακού φάσματος δεδομένης θαλάσσιας περιοχής είναι εξαιρετικά δύσκολη.

Για το λόγο αυτό, ο μόνος τρόπος μιας ολοκληρωμένης στατιστικής ανάλυσης των κυματικών διεγέρσεων είναι τα πιθανοθεωρητικά μοντέλα στοχαστικών διαδικασιών. Έτσι είμαστε σε θέση να περιγράψουμε και να αναλύσουμε με ακρίβεια μια δεδομένη κατάσταση θάλασσας.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στα δύο κύρια είδη κυματισμών.

### **1.2.2. ΑΡΜΟΝΙΚΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ**

Η μορφή τους είναι απλή ημιτονοειδής ή συνημιτονοειδής. Κύριες παράμετροι περιγραφής τους είναι η περίοδος  $T$ , η συχνότητα  $f$ , το μήκος κύματος  $\lambda$  και το ύψος κύματος  $H$ . Με τη βοήθεια της εξίσωσης διασποράς βρίσκουμε ότι η συχνότητα δίνεται από τη σχέση 1.1:

$$f = \sqrt{\frac{g}{2\pi\lambda}} \quad (1.1)$$

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

Οι κυματισμοί αυτοί δε θα μας απασχολήσουν στα πειράματά μας.

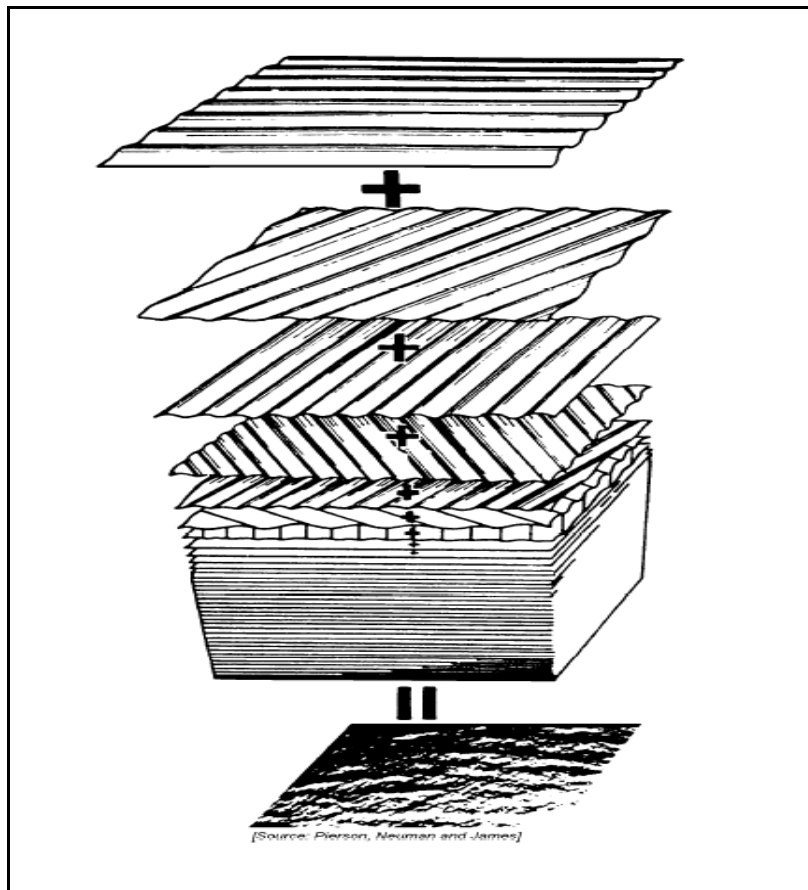
### 1.2.3. ΤΥΧΑΙΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ

#### 1.2.3.1. ΜΟΝΤΕΛΟ LONGUET - HIGGINS

Οι τυχαίοι κυματισμοί, βάσει των οποίων θα γίνουν τα πειράματα δυναμικής συμπεριφοράς, περιγράφουν το θαλάσσιο περιβάλλον με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τους αρμονικούς. Για την μελέτη τους χρησιμοποιούνται στοχαστικές μεθοδοι. Η ανύψωση της θαλάσσιας επιφάνειας απεικονίζεται με τη βοήθεια του μοντέλου των Longuet – Higgins. Σύμφωνα με αυτό, το σύνθετο κυματικό προφίλ (Σχήμα 1.2) προκύπτει από την επαλληλία ημιτονικών κυμάτων πλήθους  $i$  της μορφής

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

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



Σχήμα 1.2. Περιγραφή προφίλ τυχαίων κυματισμών με επαλληλία ημιτονικών κυμάτων.

### 1.2.3.2. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ – ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

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

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

Η συνάρτηση ανύψωσης θαλάσσιας επιφάνειας (συμβολίζεται με  $\eta$ ) παριστάνεται με δύο τρόπους:

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

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

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

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

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

Το σημαντικό ύψος κύματος ορίζεται ως εξής: Υποθέτουμε ότι σε μια χρονική καταγραφή θαλασσίου περιβάλλοντος προκύπτουν  $N$  φαινόμενα ύψη κύματος. Αν τα διατάξουμε κατά σειρά από το μικρότερο στο μεγαλύτερο και πάρουμε τη μέση τιμή του  $1/3$  των υψηλότερων, προκύπτει το σημαντικό ύψος κύματος (σχέση 1.2):

$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (1.2)$$

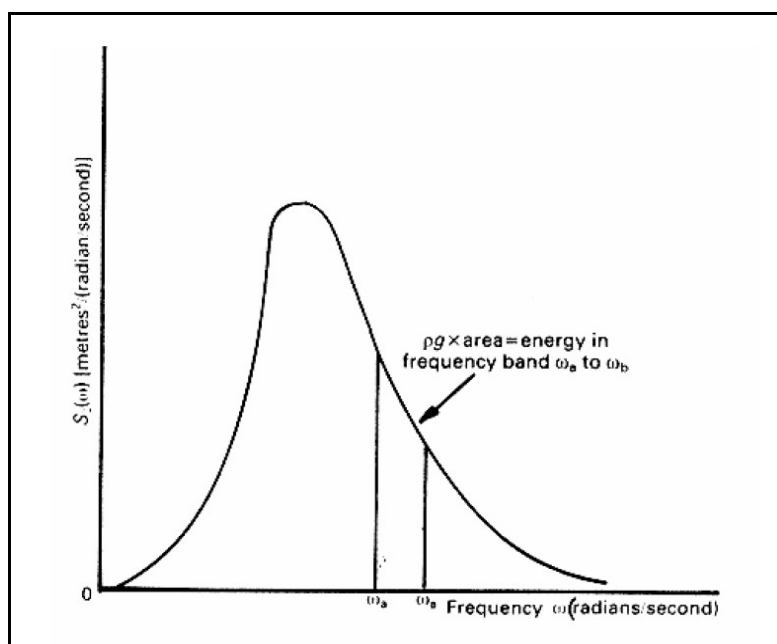
Στην περίπτωση που οι τιμές κύματος ληφθούν ως τιμές χώρου, τότε τα στατιστικά μεγέθη εξαρτώνται και από την κατεύθυνση διάδοσης  $\theta$ . Εάν το  $H_{1/3}$  παρουσιάζει έντονο ολικό μέγιστο για κάποια κατεύθυνση  $\theta_0$ , τότε η κατεύθυνση αυτή λέγεται **κύρια κατεύθυνση διάδοσης κύματος**. Εάν παρουσιάζονται παραπάνω από ένα μέγιστα, τότε αντίστοιχα έχουμε δύο ή περισσότερες κύριες κατευθύνσεις διάδοσης.

### 1.2.3.3. ΦΑΣΜΑ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

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

Τα φασματικά μεγέθη που αντιστοιχούν στα στατιστικά μεγέθη χρόνου εκφράζονται με τη βοήθεια του σημειακού φάσματος κυκλικής συχνότητας  $S(\omega)$  ή  $S(f)$ , σχέση 1.3 και σχήμα 1.3:

$$S(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega, \theta) d\theta \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.3. Συνάρτηση φάσματος  $S(\omega)$ .

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

Διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

**αναπτυσσόμενες θάλασσες:** Η θαλάσσια επιφάνεια δεν έχει απορροφήσει πλήρως τη διαθέσιμη ενέργεια ανέμου.

**πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες:** Το κυματικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη απορροφηθείσα ενέργεια ανέμου.

**αποσβενόμενες θάλασσες:** Η ενέργεια χάνεται σταδιακά λόγω απωλειών.



## Χαρακτηριστικά μεγέθη φάσματος

Οι σχέσεις 1.4 – 1.7 δίδουν τα κυριότερα στατιστικά μεγέθη του κυματικού φάσματος:

### Μέσο ύψος κύματος

$$\bar{H}=2.5\sqrt{m_0} \quad (1.4)$$

### Σημαντικό ύψος κύματος

$$H_{1/3}=H_S=4\sqrt{m_0} \quad (1.5)$$

### Μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης

$$T_{02}=2\pi\sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (1.6)$$

### Μέση περίοδος κορυφών

$$T_{24}=2\pi\sqrt{\frac{m_2}{m_4}} \quad (1.7)$$

Οι ποσότητες  $m_0$ ,  $m_2$ ,  $m_4$  ονομάζονται **φασματικές ροπές** και προκύπτουν από τη σχέση 1.8:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (1.8)$$

Για  $n=0$  έχουμε ότι

$$m_0 = \int S(\omega) d\omega \quad (1.9)$$

και

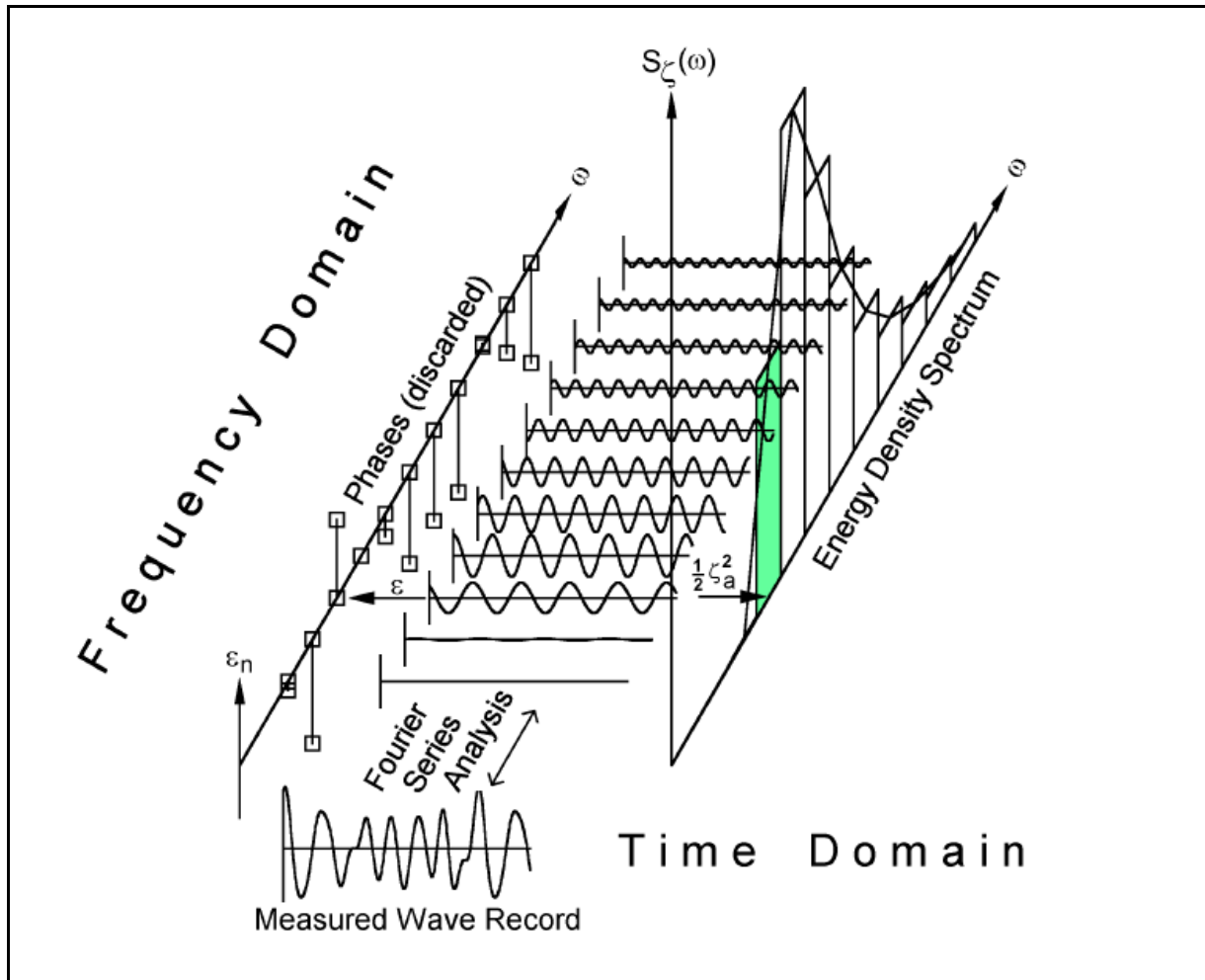
$$\sigma_x = \text{rms} = \sqrt{m_0} \quad (1.10)$$

είναι η **τυπική απόκλιση** ή αλλιώς η ρίζα της μέσης τετραγωνικής τιμής του φάσματος (**root mean square – rms**).

Συνεπώς η μέση τετραγωνική τιμή ( $\text{rms}^2$ ) ισούται ο εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της φασματικής συνάρτησης.

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

Στο Σχήμα 1.4 παριστάνεται γραφικά ο τρόπος με τον οποίον το φάσμα  $S(\omega)$  περιγράφει την κατανομή ενέργειας στις επιμέρους αρμονικές. Το σύνθετο κυματικό περιβάλλον που προκύπτει αναλύεται μέσω μετασχηματισμού Fourier, κάτι που θα εξηγήσουμε σε επόμενη ενότητα.



Σχήμα 1.4. Παραγωγή φάσματος  $S(\omega)$  τυχαίου κυματισμού μέσω αρμονικών συνιστωσών.

Παρόμοιες σχέσεις με τις προαναφερθείσες ισχύουν και για τα φασματικά μεγέθη χώρου, όπου εκεί έχουμε το φάσμα κατεύθυνσης  $\theta$  (σχέση 1.11):

$$S(\theta) = \int_0^{\infty} S(\omega, \theta) d\omega \quad (1.11)$$

Όπως προαναφέρθηκε, στην περίπτωση αυτή μπορεί να έχουμε είτε μια κύρια κατεύθυνση διάδοσης (ένα ολικό μέγιστο  $\Theta_0$ ) είτε περισσότερες (διάφορα τοπικά μέγιστα).

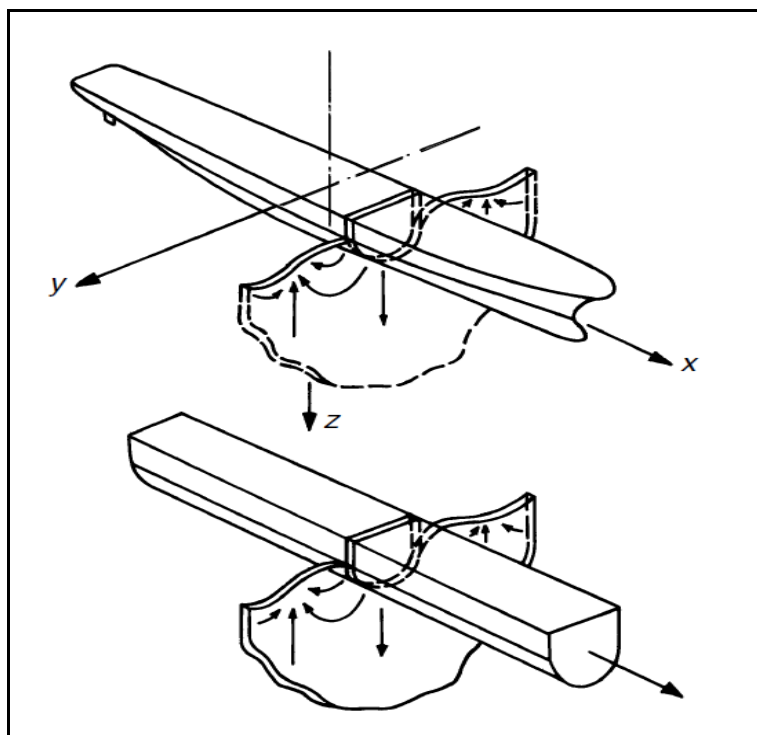
Τα πειράματα που διεξήχθησαν στη δεξαμενή αφορούσαν τυχαίους κυματισμούς σε πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες. Για την περιγραφή των τυχαίων κυματισμών έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα, όπως το Pierson-Moskowitz, το Bretschneider, το Johnswap κλπ.

Συγκεκριμένα εξετάστηκαν τυχαίοι μετωπικοί κυματισμοί που περιγράφονται από το φάσμα Bretschneider (σχέση 1.12). Το φάσμα αυτό περιγράφει ανοιχτές θάλασσες οποιοδήποτε βαθμού ανάπτυξης και ονομάζεται διπαραμετρικό διότι ορίζεται με τη βοήθεια δυο παραμέτρων, της συχνότητας κορυφής  $\omega_p$  και του σημαντικού ύψους κύματος  $H_{1/3}$ :

$$S(\omega) = \left\{ \frac{5}{16} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^5 \frac{(H_{1/3})^2}{\omega_p} \exp \left[ -\frac{5}{4} \left( \frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right] \right\} \quad (1.12)$$

### 1.3. ΘΕΩΡΙΑ ΛΩΡΙΔΩΝ

Η θεωρία λωρίδων (strip theory) αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού αποκρίσεων σε κυματισμούς. Βασικό χαρακτηριστικό της εφαρμογής της είναι ο χωρισμός της γάστρας κατά το διάμηκες σε εγκάρσιες λωρίδες μικρού μήκους. Κάθε λωρίδα θεωρούμε ότι αποτελεί τμήμα αντίστοιχου ιδεατού πρίσματος (Σχήμα 1.5). Κάθε λωρίδα αποτελεί στην ουσία διάστημα μεταξύ νομέων.



Σχήμα 1.5. Θεώρηση λωρίδας ως τμήμα πρίσματος στα πλαίσια της strip theory.

Η διαδικασία επίλυσης έχει ως εξής:

- 1) Υπολογισμός των υδροδυναμικών συντελεστών της κάθε λωρίδας (δισδιάστατο πρόβλημα).
- 2) Ολοκλήρωση των υδροδυναμικών συντελεστών κατά μήκος του πλοίου και υπολογισμός των συντελεστών στις εξισώσεις απόκρισης
- 3) Επίλυση των εξισώσεων

Οι υπολογισμοί γίνονται με την προϋπόθεση ότι αμελούνται οι αλληλεπιδράσεις της ροής μεταξύ των λωρίδων.

Κύριες προϋποθέσεις εφαρμογής της θεωρίας λωρίδων είναι οι εξής:

- 1) Γάστρες λεπτόγραμμες (slender) με μεγάλη ακαμψία (rigid body)
- 2) Μικρή ταχύτητα πλεύσης χωρίς την ανάπτυξη σημαντικών υδροδυναμικών δυνάμεων (γάστρες εκτοπίσματος/ημικετοπίσματος)
- 3) Μικρές κινήσεις σκάφους
- 4) Κατακόρυφα τοιχώματα γάστρας στην ίσαλο πλεύσης
- 5) Διάδοση κυματισμών σε βαθύ νερό (deep water)
- 6) Οι κυματισμοί δεν διαταράσσονται από την παρουσία της γάστρας (υπόθεση Froude - Kriloff)

Η θεωρία λωρίδων εφαρμόζεται με ικανοποιητική ακρίβεια για συμβατικά πλοία. Όσον αφορά τα ταχύπλοα σκάφη, η εφαρμογή της θα πρέπει να λαμβάνει οπωσδήποτε υπόψη τα παρακάτω:

- 1) Στα μικρά ταχύπλοα η μορφή των νομέων μεταβάλλεται γρήγορα κατά μήκος του σκάφους, ενώ η θεωρία λωρίδων θεωρεί ότι κάθε τμήμα του πλοίου συμπεριφέρεται σαν τμήμα ενός πρίσματος απείρου μήκους (διδιάστατο πρόβλημα).
- 2) Η πρύμνη “καθρέφτης” των ταχυπλών σκαφών εισάγει σημαντικές αλλοιώσεις στα αποτελέσματα της θεωρίας λωρίδων.
- 3) Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά κάθε λωρίδας (δισδιάστατο πρόβλημα) μπορούν να υπολογιστούν με σύμμορφη απεικόνιση κυλίνδρου σε κάθε τομή γάστρας. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται οικογένειες απεικονίσεων νομέων όπως η διπαραμέτρική οικογένεια Lewis. Οι νομείς συμβατικών σκάφων στρογγυλού πυθμένα (round bilge) μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά από μορφές Lewis, δε συμβαίνει όμως το ίδιο και με τα ταχύπλοα.

4) Η έξοδος της πλώρας των ταχυπλόων από το νερό κατά την πλεύση σε κυματισμούς (ως τυχαίο συμβάν) καθιστά επισφαλή την υπόθεση της γραμμικής υπέρθεσης των αποκρίσεων.

5) Στη θεωρία λωρίδων θεωρούμε ότι η γάστρα δεν επηρεάζει τους κυματισμούς, συνεπώς στα ταχύπλοα λαμβάνουμε αναξιόπιστα αποτελέσματα είναι αναξιόπιστα πρύμνηθεν του πρωραίου τμήματος.

6) Στις ταχύτητες ολίσθησης έχουμε ανάπτυξη σημαντικής υδροδυναμικής άνωσης, η οποία στη θεωρία λωρίδων δε λαμβάνεται υπόψιν.

Σε κάθε περίπτωση, η θεωρία λωρίδων μπορεί με τις κατάλληλες διορθώσεις να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα για οποιονδήποτε τύπο σκάφους. Έτσι επεκτείνεται το πεδίο εφαρμογής της παρά τις περιοριστικές προϋποθέσεις που διατυπώθηκαν προηγουμένως.

Όσον αφορά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της θεωρίας λωρίδων με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα seakeeping, διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

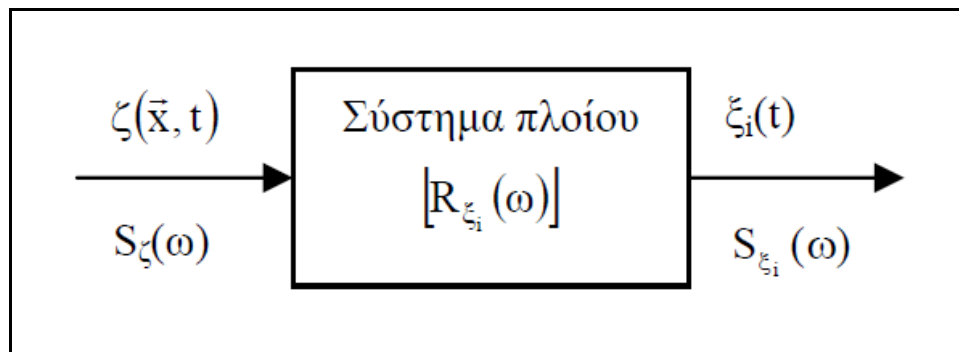
1) Σε συμβατικές γάστρες (καθώς και σε γάστρες ημιεκτοπίσματος) οι αποκρίσεις που υπολογίζονται από τη θεωρία λωρίδων είναι παραπλήσιες των πειραματικώς υπολογιζόμενων.

2) Σε ολισθακάτους επιτυγχάνεται ικανοποιητική προσέγγιση πειράματος - θεωρίας για ταχύτητες στην περιοχή προολίσθησης ( $Fr < 0,5$ ). Για μεγαλύτερες ταχύτητες η αναλυτική πρόβλεψη παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με το πειραματικό αποτέλεσμα.

#### 1.4. ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΣΚΑΦΟΥΣ

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

Συγκεκριμένα, το πλοίο θεωρείται ως γραμμικό σύστημα για κάθε δυναμική απόκριση (αρχή γραμμικής υπέρθεσης). Καθώς λοιπόν έχουμε διέγερση από κάποιον κυματισμό φάσματος  $S_z(\omega)$ , το φάσμα συγκεκριμένης απόκρισης  $S_{\xi_i}(\omega)$  εξαρτάται από τη συνάρτηση μεταφοράς  $R_{\xi_i}(\omega)$  ως προς την απόκριση αυτή (Σχήμα 1.6):



Σχήμα 1.6. Συσχέτιση διέγερσης – απόκρισης μέσω συνάρτησης μεταφοράς  $R_{\xi_i}(\omega)$  (RAO).

Η γραμμικότητα απόκρισης - διέγερσης περιγράφεται μέσω της γενικής σχέσης

$$S_{\xi_i}(\omega) = \text{RAO}^2 * S_z(\omega) \quad (1.13)$$

Η υπόθεση αυτή προϋποθέτει ότι κατά την πλεύση διαμέσου των κυματισμών οι αλλαγές στα ύψα του πλοίου είναι αμελητέες και συνεπώς τα πλάτη των σχετικών κινήσεων είναι μικρά.

Τα RAO των αποκρίσεων έχουν ως εξής:

Heave

$$\text{RAO Heave} = \xi_3 / \zeta_a \quad (1.14)$$

όπου  $\zeta_a$  το πλάτος του κύματος

Pitch

$$\text{RAO Pitch} = \xi_5 * \lambda / (360 * \zeta_a) \quad (1.15)$$

όπου  $\lambda$  το μήκος του κύματος

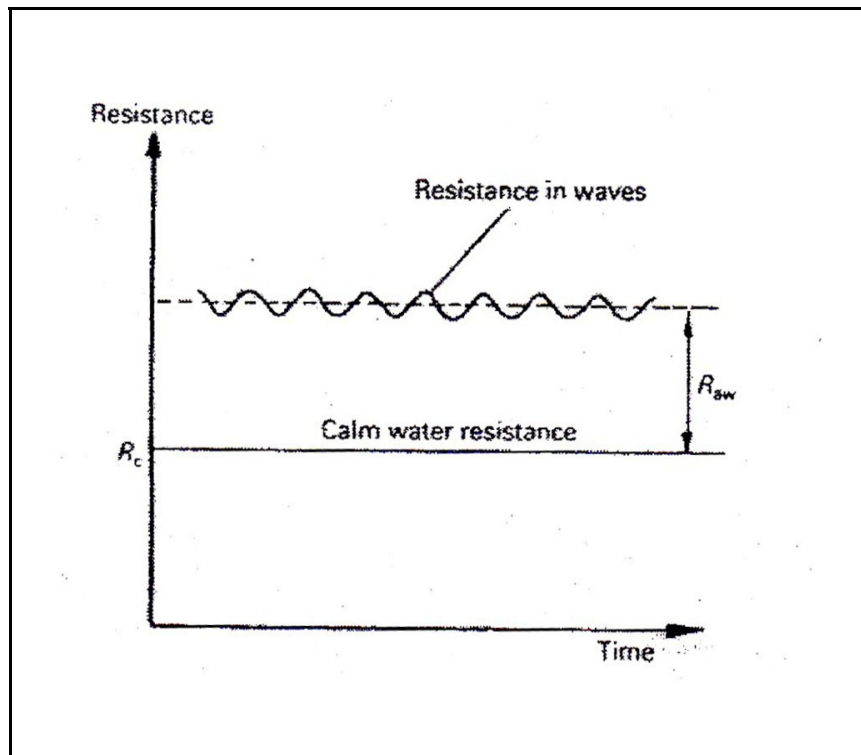
Επιταχύνσεις

$$\text{RAO Acc} = a * Lwl / \zeta_a \quad (1.16)$$

όπου  $Lwl$  το μήκος της ισάλου του μοντέλου.

## 1.5. ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η ολική αντίσταση του σκάφους κατά την πλεύση σε κυματισμούς (Σχήμα 1.7) αποτελείται από δύο συνιστώσες: την αντίσταση σε ήρεμο νερό (calm water resistance) και την πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς (added wave resistance).



Σχήμα 1.7. Ολική αντίσταση σκάφους.

Ο αισθητήρας Resistance μετράει τιμές ολικής αντίστασης, ενώ κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων ζητούνται διαγράμματα της πρόσθετης αντίστασης για διάφορες καταστάσεις θάλασσας (συναρτήσει της ταχύτητας). Συνεπώς θα πρέπει να αφαιρεθούν τα αντίστοιχα μεγέθη της αντίστασης σε ήρεμο νερό από εκείνα της ολικής. Τα αποτελέσματα σε ήρεμο νερό για το μοντέλο μας υπάρχουν ήδη έτοιμα από παλαιότερα πειράματα και μπορούμε εύκολα να τα χρησιμοποιήσουμε.

## **Κεφάλαιο 2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΤΑΧΥΠΛΩΩΝ ΣΚΑΦΩΝ**

### **2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Είναι γνωστό ότι η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός σκάφους σε κυματισμούς μπορεί να εκτιμηθεί είτε με χρήση κατάλληλου λογισμικού είτε μέσω πειραματικής διαδικασίας. Στα πλαίσια της προσπάθειας αυτής, αναπτύχθηκαν από ορισμένα ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια οι λεγόμενες συστηματικές σειρές ταχυπλών σκαφών. Ως “συστηματική σειρά” καλείται μια συγκεκριμένη οικογένεια γαστρών με ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά.

Στις σειρές αυτές έχουν γίνει όλα τα απαραίτητα πειράματα συμπεριφοράς, τόσο για τη μέτρηση της αντίστασης σε ήρεμο νερό όσο και για την εύρεση των αποκρίσεων σε συγκεκριμένες καταστάσεις θάλασσας. Στόχος είναι η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων επί της υδροδυναμικής συμπεριφοράς, ούτως ώστε να χρησιμοποιούνται έτοιμα αποτελέσματα seakeeping κατά την προκαταρκτική σχεδίαση σκαφών με ίδια ή παρόμοια γάστρα. Συνεπώς δε χρειάζεται να γίνει εκ νέου πειραματική διερεύνηση.

Επιπλέον μπορεί να ελεγχθεί εάν μία δεδομένη γάστρα, βασισμένη σε συστηματικές σειρές, είναι κατάλληλη για συγκεκριμένη θαλάσσια περιοχή στην οποία προορίζεται να χρησιμοποιηθεί. Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να προχωρήσουμε στις απαιτούμενες αλλαγές σε περίπτωση που η σχεδίαση της γάστρας κριθεί ακατάλληλη.

### **2.2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΩΝ ΣΕΙΡΩΝ**

Οι συστηματικές σειρές ταχυπλών σκαφών που έχουν αναπτυχθεί ως σήμερα αφορούν γάστρες μορφής V. Χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Στρογγυλού πυθμένα (rounded bilge)
- Απλής ακμής (single chine)
- Διπλής ακμής (double chine)

Χαρακτηριστικοί εκπρόσωποι της πρώτης κατηγορίας αποτελούν οι συστηματικές σειρές NPL του National Physical Laboratory και 63 του Stevens Institute of Technology, καθώς και η σειρά SSPA (κυρίως για μικρά πολεμικά σκάφη).

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν η συστηματική σειρά 62 των Clement/Blount και η σειρά Keuning – Gerritsma.

Τέλος, στην κατηγορία των γαστρών διπλής ακμής ανήκουν η συστηματική σειρά Savitsky και η συστηματική σειρά NTUA, στην οποία θα αναφερθούμε εκτενέστερα στη συνέχεια.



### 2.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ ΝΤΥΑ

Το 1972 οι Savitsky, Roper και Bener πρότειναν μια νέα σχεδίαση ολισθακάτου υψηλών ταχυτήτων με προοπτικές πολύ ικανοποιητικής συμπεριφοράς σε κυματισμούς. Κύρια χαρακτηριστικά της γάστρας αυτής ήταν τα εξής:

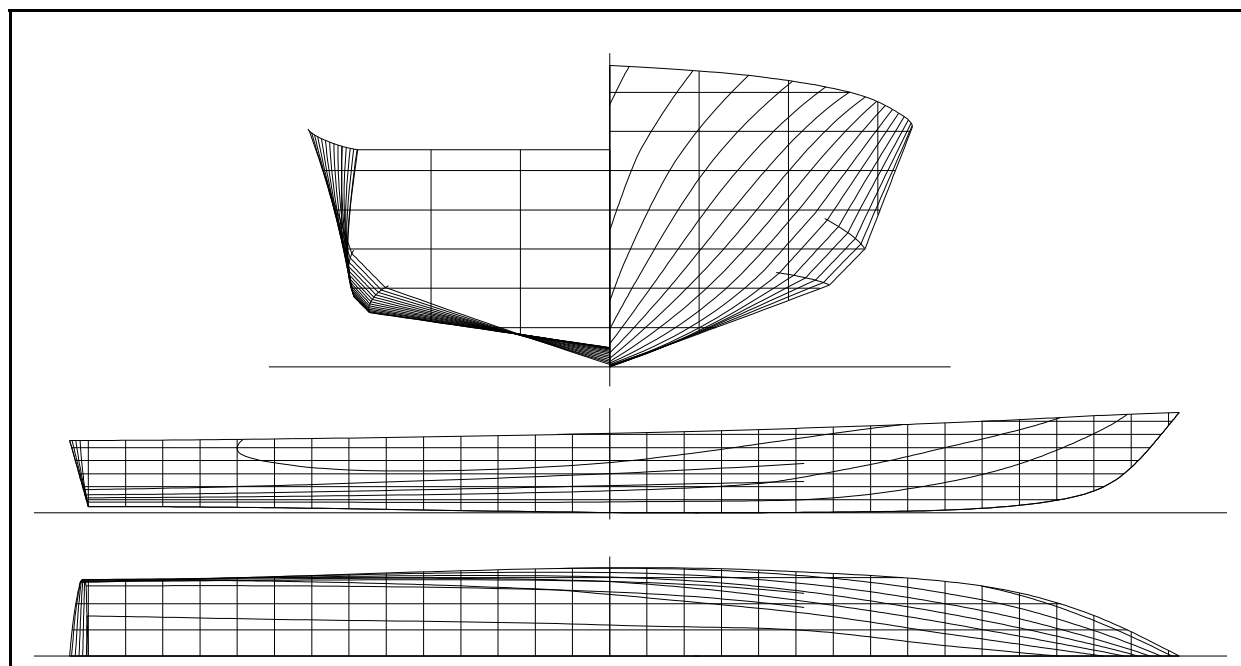
- διπλή ακμή
- πλατύς πρυμναίος καθρέπτης (transom)
- δίπλωμα της μορφής V των πρωραίων νομέων
- μεταβλητή (warped) επιφάνεια ολίσθησης γάστρας
- λεπτόγραμμη πλώρη

Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά αποτελούν γνωρίσματα της περίφημης συστηματικής σειράς του Savitsky. Οι υδροδυναμικές αρετές της σειράς αυτής αποτέλεσαν εφελθτήριο για την ανάπτυξη αντίστοιχης συστηματικής σειράς ταχυπλόων από το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του ΕΜΠ κατά τη δεκαετία του '80 από τους κ.κ. καθηγητές Θ.Λουκάκη και Γ.Γρηγορόπουλο.

Ως πατρικό σκάφος της συστηματικής σειράς του ΕΜΠ επιλέχθηκε το μοντέλο NTUA-097/94 (Σχήμα 2.1) Κατασκευάστηκε το 1994 και βασίστηκε στην πρόταση του Savitsky για γάστρα διπλής ακμής. Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του συγκεκριμένου σκάφους αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

Η επιλογή του NTUA-097/94 ως πατρικού σκάφους της σειράς έγινε λόγω των πολύ καλών αποτελεσμάτων που ελήφθησαν τόσο από πειράματα αντίστασης σε ήρεμο νερό, όσο και από κάποια πρώιμα πειράματα seakeeping. Ως κύρια παράμετρος ανάπτυξης της σειράς βάση του συγκεκριμένου μοντέλου επιλέχθηκε ο λόγος μήκους προς πλάτος ( $L/B$ ), με τιμές 4.00, 4.75, 5.50, 6.25, 7.00 (Η τιμή 5.50 αντιστοιχεί στο 097/94).

Βάσει λοιπόν του λόγου αυτού αναπτύσσονται τα υπόλοιπα τέσσερα μοντέλα της σειράς με τον εξής τρόπο: η μέση τομή τους παραμένει ίδια με του πατρικού, αλλά έχουμε κατάλληλη τροποποίηση των πρωραίων/πρυμναίων νομέων για τα διάφορα  $L/B$ .



Σχήμα 2.1. Σχέδιο γραμμών του πατρικού σκάφους 097/94 της συστηματικής σειράς NTUA.

Η δεύτερη σημαντική παράμετρος της σειράς NTUA είναι ο λεγόμενος συντελεστής εκτοπίσματος (σχέση 2.1):

$$C_{DL} = \frac{\nabla}{(0.1L_{WL})^3} \quad (2.1)$$

Το μέγεθος αυτό είναι παρεμφερές του ναυπηγικού συντελεστή λυγηρότητας και εκφράζει την κατάσταση φόρτωσης του μοντέλου βάσει εκτοπίσματος. Με τον τρόπο αυτό, κάθε γάστρα της συστηματικής σειράς δοκιμάζεται σε έξι διαφορετικές συνθήκες φόρτωσης που αντιστοιχούν σε τιμές  $C_{DL}$  1.00, 1.61, 2.23, 3.00, 3.62, 4.23. Έτσι μελετάμε μια ευρεία γκάμα εκτοπισμάτων, ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες ακόμη και μεγάλων ταχυπλόων σκαφών.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Για μικρούς  $C_{DL}$  (χαμηλά εκτοπίσματα), η εκτέλεση πειραμάτων στα μοντέλα της σειράς ήταν αδύνατη. Έτσι λοιπόν, κάθε γάστρα της σειράς διαθέτει αντίστοιχο αντίγραφο σε μεγαλύτερη κλίμακα (5:3), και εκτελούμε το πείραμα για τους μικρούς συντελεστές φόρτωσης. Στη συνέχεια τα αποτελέσματα μπορούν εύκολα να αναχθούν στις μικρότερες γάστρες.

## **2.4. ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ SEAKEERING ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΩΝ ΣΕΙΡΩΝ**

Όπως προαναφέρθηκε, στόχος των πειραμάτων seakeeping σε γάστρες μιας συστηματικής σειράς είναι η δημιουργία μιας βάσης πληροφοριών. Η βάση αυτή περιέχει πειραματικά αποτελέσματα δυναμικής συμπεριφοράς τα οποία αποτελούν χρησιμότατο εργαλείο κατά την προκαταρκτική σχεδίαση γαστρών παρόμοιων με τις “συστηματικές”. Τα αποτελέσματα αυτά είναι αδιαστατοποιημένα τόσο ως προς το μήκος του πλοίου  $L_{WL}$  όσο και ως προς το σημαντικό ύψος κύματος  $H_{1/3}$ .

Συνεπώς, αν θέλουμε να μελετήσουμε μια γάστρα γεωμετρικά όμοια με κάποια από τις “συστηματικές” (για συγκεκριμένη κατάσταση θάλασσας), δεν έχουμε παρά να τροποποιήσουμε τα αντίστοιχα αδιαστατοποιημένα αποτελέσματα εισάγοντας το μήκος του πλοίου και το σημαντικό ύψος κύματος. Έτσι μπορούμε να έχουμε μια γρήγορη και αξιόπιστη εικόνα για τη δυναμική συμπεριφορά της γάστρας που εξετάζουμε (τουλάχιστον σε προκαταρκτικό επίπεδο). Επιπλέον, μπορούμε να προβούμε σε αλλαγές επί της σχεδίασης στην περίπτωση που η δυναμική συμπεριφορά δεν είναι κριτηριακά ικανοποιητική.

Στα πλαίσια συμπλήρωσης αυτής της βάσης δεδομένων επιχειρήθηκε η πειραματική διερεύνηση seakeeping της πατρικής γάστρας 097/94, κάτι που αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

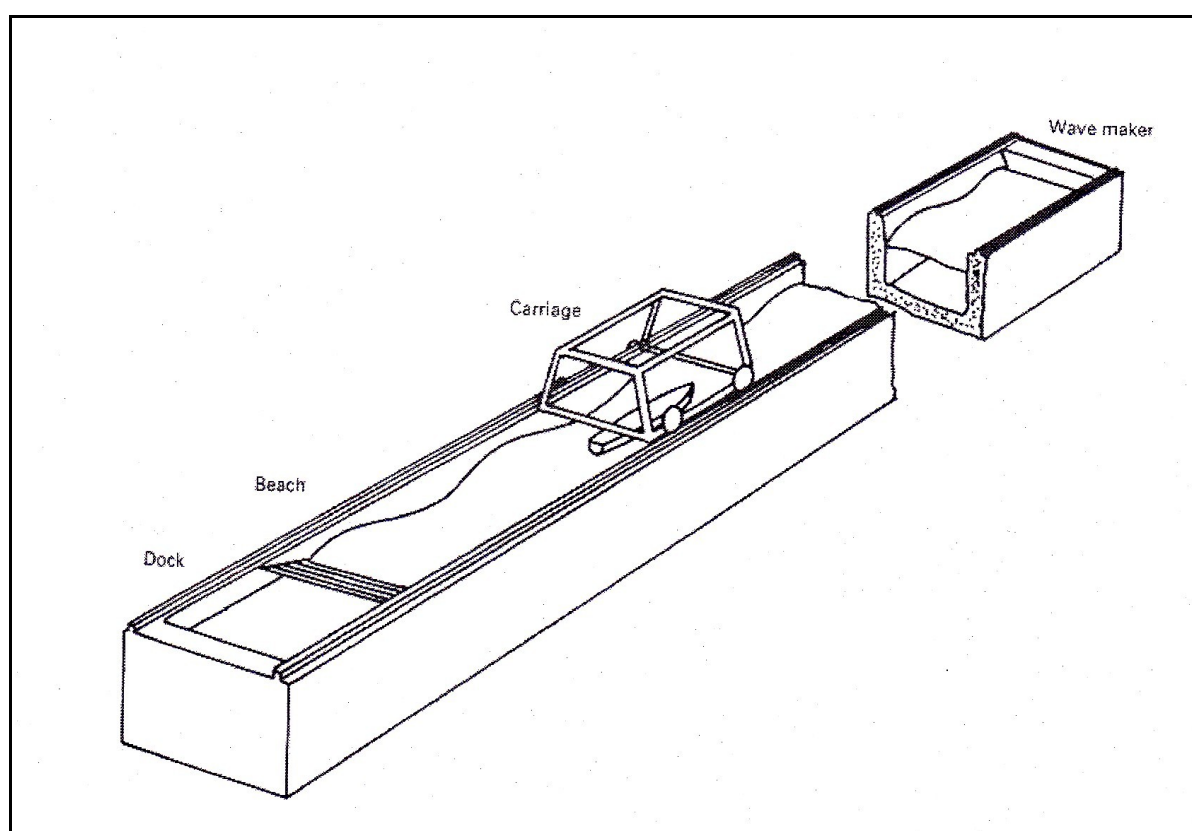
## Κεφάλαιο 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### 3.1. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Αντικείμενο της πειραματικής διαδικασίας αποτέλεσε η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του προτύπου 097/94 (συστηματική σειρά NTUA) σε τυχαίους μετωπικούς κυματισμούς.

Το μοντέλο μελετάται σε συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης ( $C_{DL}=3.00$ ), ρυμουλκούμενο από το φορείο της δεξαμενής σε δύο ταχύτητες που αντιστοιχούν σε αριθμό Froude 0,34 ( $V=1,5596\text{m/sec}$ ) και 0,68 ( $V=3,119\text{m/sec}$ ). Συνολικά, πραγματοποιούνται πειράματα σε τέσσερις καταστάσεις θάλασσας στη μικρή ταχύτητα και επτά στη μεγάλη (έντεκα περιπτώσεις συνολικά).

Τα πειράματα διεξήχθησαν στη δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του ΕΜΠ (Σχήμα 3.1):



Σχήμα 3.1. Σκαρίφημα πειραματικής δεξαμενής ΕΜΠ.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου 097/94 παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1:

### Πρότυπο 097/94 (L/B=5.50 small)

Εκτόπισμα $\Delta$	29.615kg
Ολικό μήκος $L_{OA}$	2.292m
Μήκος μεταξύ καθέτων $L_{BP}$	2.145m
Βύθισμα $T$	0.083m
Βρεχόμενη επιφάνεια $WS$	0.728m <sup>2</sup>
Διαμήκης θέση κέντρου βάρους $LCG$	- 0.297m
Μήκος άνω ακμής $L_{p2}$	1.48m
Μήκος κάτω ακμής $L_{p1}$	1.48m
Μέγιστο πλάτος άνω ακμής $B_{p2}$	0.36m (νομέας 5)
Μέγιστο πλάτος κάτω ακμής $B_{p1}$	0.322m (νομέας 0)
Ανύψωση πυθμένα στην πρύμνη $\beta_0$	9.5° (νομέας 0)
Ανύψωση πυθμένα στο μέσον $\beta_7$	23° (νομέας 7)

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά μοντέλου 097/94.

## **3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ**

Τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνουν:

- 1) προετοιμασία προτύπου
- 2) βαθμονόμηση μετρητικών διατάξεων

### **3.2.1. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΡΟΤΥΠΟΥ**

Τα στάδια προετοιμασίας του προτύπου για πειράματα seakeeping είναι τα εξής:

- 1) Επίτευξη επιθυμητού εκτοπίσματος (κατάσταση φόρτωσης για  $C_{DL}=3.00$ )
- 2) Εύρεση επιθυμητής διαγωγής (trim) και εγκάρσιας κλίσης
- 3) Προσδιορισμός ακτίνας αδρανείας και περιόδου ιδιοταλάντωσης

### **3.2.1.1. ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΕΠΙΘΥΜΗΤΟΥ ΕΚΤΟΠΙΣΜΑΤΟΣ**

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

Ύστερα τοποθετούμε την πλάκα πρόσδεσης του δυναμόμετρου στο κέντρο βάρους του μοντέλου. Επί της πλάκας τοποθετήθηκε βάρος ίσο με το βάρος του δυναμόμετρου R-47 (7,360kg).

Στη συνέχεια βαθμονομήσαμε τα τρία επιταχυνσιόμετρα ώστε να λάβουμε τις αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς, ώστε να μετατρέπουμε τα μετρούμενα Volts σε ενδείξεις επιτάχυνσης. Τοποθετήσαμε από ένα επιταχυνσιόμετρο στην πλώρα, στο κέντρο βάρους και στην πρύμνη αντίστοιχα. Η γραμμή αυτή έχει προχαραχθεί στη γάστρα του μοντέλου από προηγούμενα πειράματα αντίστασης.

### **3.2.1.2. ΕΥΡΕΣΗ ΕΠΙΘΥΜΗΤΗΣ ΔΙΑΓΩΓΗΣ (TRIM) ΚΑΙ ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ**

Στα πειράματα seakeeping το μοντέλο μας έχει μηδενική γωνία διαγωγής, ενώ δεν παρουσιάζει εγκάρσια κλίση.

### **3.2.1.3. ΑΚΤΙΝΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΙΔΙΟΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ**

Ο υπολογισμός της ιδιοπεριόδου του μοντέλου αποτελεί ένδειξη σωστής κατανομής βαρών. Για τον προσδιορισμό της δένουμε το μοντέλο σε ιμάντες προσαρμοσμένους σε δύο αιωρούμενα στελέχη στο χώρο του εργαστηρίου.

Η θεωρητικά υπολογιζόμενη περίοδος ιδιοταλάντωσης του μοντέλου περί τον κατακόρυφο άξονα δίδεται από τη σχέση 3.1:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I_{zz}}{\Delta a^2 g}} \quad (3.1)$$

όπου

$I_{zz}$ : ροπή αδρανείας περί τον άξονα zz

$l$ : ολικό μήκος στελεχών – ιμάντων (4m)

$\Delta$ : εκτόπισμα μοντέλου

$a$ : ημιαπόσταση στελεχών από κέντρο βάρους μοντέλου (0,75m)

Η ροπή αδρανείας δίνεται από τη σχέση 3.2:

$$I_{zz} = r_{zz}^2 \Delta \quad (3.2)$$

όπου  $r_{zz}$  η ακτίνα αδρανείας.

Έχει υπολογισθεί εμπειρικά μέσω ομοίων πλοίων ότι η ακτίνα αδρανείας είναι περίπου  $0,25 L_{BP}$ . Συνεπώς η σχέση 3.1 γίνεται

$$T = \frac{2\pi r_{zz}}{\alpha} \sqrt{\frac{I}{g}} \quad (3.2)$$

Για το μοντέλο 097/94 έχουμε  $r_{zz}=0,536m$ , συνεπώς από τη σχέση προκύπτει ότι

$$T=2,867sec$$

Για τον πειραματικό προσδιορισμό της ιδιοπεριόδου, εκτρέπουμε το μοντέλο από τη θέση ισορροπίας του και το αφήνουμε να εκτελέσει 10 ταλαντώσεις περί τον κατακόρυφο άξονα. Η μετρούμενη ιδιοπερίοδος θα πρέπει να είναι παραπλήσια της θεωρητικής που υπολογίστηκε προηγουμένως. Η χρονομέτρηση επαναλαμβάνεται κάποιες φορές ώστε το αποτέλεσμα να είναι αξιόπιστο.

Προκύπτει ότι  $T=29,5/10=2,95sec$  περίπου, τιμή που κρίνεται ικανοποιητική.

**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ:** Σε περίπτωση που υπήρχε μεγάλη απόκλιση μεταξύ θεωρητικής και μετρούμενης τιμής θα έπρεπε να γίνουν μετακινήσεις των βαρών του μοντέλου και να επαναληφθεί η χρονομέτρηση. Η μετακίνηση αυτή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το αλγεβρικό άθροισμα των ροπών να διατηρείται σταθερό. Εξυπακούεται ότι μετά από κάθε μετακίνηση βαρών θα πρέπει να ελέγχεται αν το σκάφος παραμένει σε ισοβύθιστη κατάσταση.

#### **3.2.1.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΦΟΡΤΙΣΗΣ**

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

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

όπου

$$T_V=T_H \tan(\tau-6,5^\circ) = R \tan(\tau+6,5^\circ) \quad (3.3)$$

με  $\tau$  συμβολίζεται η διαγωγή (trim) που αποκτά το σκάφος σε διάφορες ταχύτητες (θεωρείται θετική όταν είναι έμπρωρη).

Για να υπολογίσουμε τις αποφορτίσεις του μοντέλου μας, ανατρέχουμε στα αποτελέσματα πειραμάτων αντίστασης που έχουν πραγματοποιηθεί παλαιότερα σε ήρεμο νερό και για διάφορες ταχύτητες.

Με γραμμική παρεμβολή βρίσκουμε τις τιμές αντίστασης διαγωγής και για τις δυο ταχύτητες του πειράματός μας (πίνακας 3.2):

Speed (m/sec)	Calm Water Resistance R (kp)	Trim (deg)
1,5596	1,019	-0,356
3,119	2,768	-1,893

Πίνακας 3.2.

Εφαρμόζοντας τη σχέση για τις τιμές του παραπάνω πίνακα (όπου εδώ το  $\tau$  εισάγεται με θετικό πρόσημο στην περίπτωση της έμπρυμνης διαγωγής) προκύπτει αποφόρτιση **0,121kg** στην μικρή ταχύτητα και **0,404kg** στη μεγάλη.

### 3.2.2. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

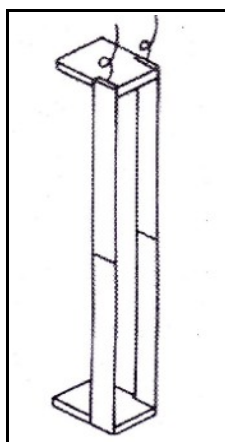
Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων μετρήθηκαν τα εξής μεγέθη:

- 1) Ανύψωση κύματος
- 2) Κατακόρυφες επιταχύνσεις μοντέλου (πλώρη, κέντρο βάρους, πρύμνη)
- 3) Αντίσταση (Resistance), κατακόρυφη κίνηση (Heave), προνευτασμός (Pitch) μοντέλου

Η μέτρηση της ανύψωσης κύματος πραγματοποιείται με τη βοήθεια **ακίνητου αισθητήρα** (Wave Tank Probe), προσδεδωμένου σε σταθερό σημείο στη δεξαμενή. Λαμβάνει μετρήσεις μέσω διπλού μεταλλικού στελέχους βυθιζόμενου στο νερό (Σχήμα 3.2).

Όσον αφορά την αρχή λειτουργίας τους, τα δύο τμήματα του μεταλλικού στελέχους μπορούν να θεωρηθούν ως οπλισμοί πυκνωτή με το νερό σα διηλεκτρικό μέσο. Συνεπώς η μετρούμενη χωρητικότητα δίνει ένα μέτρο του βάθους της βύθισης.

Ο αισθητήρα ανύψωσης κύματος είναι πολύ ευαίσθητος στις καιρικές μεταβολές, συνεπώς επιβάλλεται η καθημερινή βαθμονόμησή του (πριν την εκτέλεση κάθε σειράς πειραμάτων). Επιπλέον, η επιφανειακή τάση του νερού μπορεί να προσθέσει μετρητικό φάσμα κοντά στο μεταλλικό στέλεχος. Ωστόσο το σφάλμα λόγω της επίδρασης αυτής δεν είναι σημαντικό.



Σχήμα 3.2. Μεταλλικό στέλεχος ακίνητου αισθητήρα ανύψωσης κύματος.

Οι κατακόρυφες επιταχύνσεις του μοντέλου μετρώνται από τρία **επιταχυνσιόμετρα** τύπου Kistler τοποθετημένα στην πλώρη (Acc 1), στο κέντρο βάρους (Acc 2) και στην πρύμνη. Η βαθμονόμησή τους γίνεται μόνο μια φορά (πριν την τοποθέτησή τους στο μοντέλο) καθώς πρόκειται για πολύ σταθερά και αξιόπιστα όργανα.

Η μέτρηση της αντίστασης και των κινήσεων heave, pitch γίνεται με τη βοήθεια των αισθητήρων του **δυναμόμετρου R-47**, βάρους 7,360kg, το οποίο προσδένεται σε ειδική πλάκα στο κέντρο βάρους του μοντέλου.

Όλοι οι παραπάνω αισθητήρες δίνουν ηλεκτρικό σήμα (Volts) στην έξοδό τους. Η καταγραφή των μετρήσεων είναι ανάλογη της συχνότητας δειγματοληψίας που ορίζουμε. Συγκεκριμένα ορίσαμε να λαμβάνονται πειραματικές μετρήσεις συχνότητας 20Hz, δηλαδή ανά 0,05sec. Το σήμα υποβάλλεται σε ενίσχυση και καταγράφεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του φορείου.

Η **βαθμονόμηση** των οργάνων αποτελεί θεμελιώδες κομμάτι της πειραματικής διαδικασίας. Είναι απαραίτητο να ελέγχεται έτσι η σωστή λειτουργία τους και να καταστρώνονται οι συναρτήσεις μεταφοράς για τη μετατροπή των Volts σε τιμές φυσικών μεγεθών (μετατόπιση, επιτάχυνση). Η διαδικασία βαθμονόμησης εκτελείται σε τακτά χρονικά διαστήματα για την καλύτερη αξιοπιστία των πειραμάτων, καθώς κάποιες από τις μετρούμενες ποσότητες είναι πιο ευαίσθητες στις μεταβολές του περιβάλλοντος.

Συγκεκριμένα, η βαθμονόμηση του αισθητήρα ανύψωσης κύματος γινόταν κάθε μέρα, πριν την εκτέλεση του προγραμματισμένου πειράματος. Η βαθμονόμηση του αισθητήρα Heave γινόταν μια φορά τη βδομάδα (στην αρχή κάθε σειράς πειραμάτων), ενώ το Pitch βαθμονομούνταν μέρα παρά μέρα. Τέλος, η βαθμονόμηση του αισθητήρα της αντίστασης γινόταν επίσης κάθε μέρα.



### 3.2.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Τα χαρακτηριστικά των καταστάσεων θάλασσας στις οποίες δοκιμάζεται η συμπεριφορά του μοντέλου παρουσιάζονται στους πίνακες 3.2 και 3.3:

Fr=0,34

Τp'	2	4	4,5	5
Τp ship	6,61	13,23	14,88	16,53
Τp model (sec)	0,935	1,870	2,104	2,338
F model (Hz)	1,069	0,535	0,475	0,428
Hs model (m)	0,08	0,12	0,14	0,16
WGEN	"280212"	"080411"	"080411"	"280212"
File Name	H8tp2.z50	H12tp4.s50	H14tp45.s50	H16tp5.z50
Scale Factor	0,8	1,055	1,07	1,07

Πίνακας 3.2.

Fr=0,68

Τp'	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Τp ship	6,61	8,84	9,92	11,57	13,23	14,88	16,53
Τp model (sec)	0,935	1,25	1,4	1,64	1,870	2,104	2,338
F model (Hz)	1,069	0,8	0,71	0,61	0,535	0,475	0,428
Hs model (m)	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,14	0,16
WGEN	"280212"	"010312"	"010312"	"280212"	"080411"	"080411"	"280212"
File Name	H8tp2.z50	H9tp25.m50	H10tp3.k50	H11tp35.z50	H12tp4.s50	H14tp45.s50	H16tp5.z50
Scale Factor	0,8	1,07	1	1	1,055	1,07	1,07

Πίνακας 3.3.

## Παρατηρήσεις

1) Η κλίμακα του μοντέλου μας (scale) είναι 1:50, συνεπώς η αναγωγή των διαφόρων μεγεθών αφορά γάστρα μήκους  $2,145 \cdot 50 = 107,25\text{m}$ .

Συγκεκριμένα, τα μεγέθη που εξετάζονται σε κλίμακα μοντέλου ανάγονται σε κλίμακα πλοίου πολλαπλασιάζοντας με τις τιμές της τρίτης στήλης του πίνακα 3.4, όπου R η τιμή της κλίμακας.

Μέγεθος	Περιγραφή	Πολλαπλασιασμός με
Μάζα	Εκτόπισμα πλοίου	$R^3$
Μήκος	Διαστάσεις πλοίου, Heave, μήκος κύματος	R
Χρόνος	Περίοδος κύματος - αποκρίσεων	$R^{1/2}$
Ταχύτητα	Ταχύτητα πλεύσης	$R^{1/2}$
Επιτάχυνση	Κατακόρυφες επιταχύνσεις πλώρας/κέντρου βάρους/πρύμνης, επιτάχυνση βαρύτητας	1
Συχνότητα	Συχνότητα κύματος/συνάντησης	$1/R^{1/2}$

Πίνακας 3.4.

2) Το μέγεθος  $T_{p'}$  ονομάζεται **αδιάστατη περίοδος κορυφής** και δίδεται από τη σχέση 3.4:

$$T_{p'} = \frac{T_p}{\sqrt{\frac{L_{BP}}{g}}} \quad (3.4)$$

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων συναρτήσει της  $T_{p'}$  (Κεφάλαιο 5) επιτρέπει την άμεση αξιολόγηση και σύγκριση μεταξύ τους ανεξαρτήτως διαστάσεων γάστρας.

### 3.3. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Όπως προαφέρθηκε, η βαθμονόμηση των οργάνων αποτελούσε το πρώτο μας μέλημα πριν τη διεξαγωγή κάθε σειράς πειραμάτων. Αποτελεί αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, ειδικά όσον αφορά το Pitch. Στην περίπτωση αυτή το δυναμόμετρο έπρεπε να απσυνδέεται από το μοντέλο, να ανυψώνεται με γερανό και να βαθμονομείται χωριστά. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι χρειάστηκε αρκετή χειρωνακτική εργασία.

Τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων καταγράφονταν σε ειδικό φύλλο και σχεδιάζονταν οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς στο Microsoft Excel.

Μετά το πέρας της βαθμονόμησης, φορτώνουμε στον υπολογιστή του κυματιστήρα το επιθυμητό φάσμα σε μορφή αρχείου (Πίνακες 3.1, 3.2). Το όνομα του αρχείου καθώς και οι παράμετροι του κυματισμού (scale factor κλπ) δίδονται σε παράθυρο command prompt της εφαρμογής WGEN. Ο χειρισμός του απομακρυσμένου υπολογιστή του κυματιστήρα γινόταν με τη βοήθεια remote control στην επιφάνεια εργασίας του υπολογιστή του φορείου.

Μόλις τα παραγόμενα κύματα έφταναν στο αρχικά ακίνητο μοντέλο, δίναμε στο φορείο την επιθυμητή ταχύτητα και ξεκινούσε το πείραμα.

Τόσο για τη μικρή ταχύτητα όσο και για τη μεγάλη, μελετήθηκε χρονική ιστορία συνολικής διάρκειας **300sec**. Επειδή όμως το μοντέλο στο συγκεκριμένο διάστημα (με τις συγκεκριμένες ταχύτητες) θα κάλυπται πολύ περισσότερη απόσταση απο το διαθέσιμο μήκος δεξαμενής, η χρονική ιστορία διασπάται σε επιμέρους μικρότερες (runs). **Έτσι για τα πειράματα σε  $Fr=0.34$  έχουμε 10 runs των 30sec το καθένα, ενώ για  $Fr=0,68$  έχουμε 22runs των 14sec έκαστο.**

Μετά το πέρας κάθε πειράματος ήταν απαραίτητη η αναμονή 20 λεπτών ώστε να ηρεμήσει το νερό της δεξαμενής.

## Κεφάλαιο 4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα πειραματικά αποτελέσματα καταγράφονται ως Volts σε αρχεία .dat στο φάκελο **Data** του υπολογιστή του φορείου. Για την επεξεργασία των αρχείων αυτών χρησιμοποιείται αρχείο Fortran με την ονομασία ffr52.for. Το αρχείο αυτό μετατρέπει τα αποτελέσματα από Volts στις κατάλληλες μονάδες, ενώ με την εφαρμογή μετασχηματισμού Fourier μας δίδει τα φάσματα τόσο των κυματισμών όσο και των αποκρίσεων.

Κατά την εκτέλεση του προγράμματος μας ζητούνται τα αρχεία έναρξης και λήξης (πχ dat45 έως dat55). Αμέσως μετά ακολουθεί ο προσδιορισμός των σημείων για την ανάλυση κάθε data ώστε να πραγματοποιηθεί ο μετασχηματισμός Fourier. Έτσι το πρόγραμμα “συρράπτει” τα επιμέρους dat ώστε να αναλυθεί η συνολική χρονική ιστορία των 300sec.

Τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης εμφανίζονται σε δύο αρχεία:

- **Αρχείο τύπου “.out”** με τα φάσματα  $S(f)$  - συναρτήσεως της συχνότητας  $f$  - των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν (εκτός της αντίστασης)
- **Αρχείο τύπου “.rms”** με τις rms τιμές των αποκρίσεων όλων των μεγεθών. Στο συγκεκριμένο αρχείο αναγράφεται και η μέση τιμή της ολικής αντίστασης.

Στην περίπτωση που ενδιαφερόμαστε να μελετήσουμε τις τιμές των αποκρίσεων και του κυματισμού σε όλα τα σημεία της χρονικής ιστορίας, δημιουργείται και **τρίτο αρχείο τύπου “.zm”**.

Στη συνέχεια τα αποτελέσματα απεικονίστηκαν σε διαγράμματα Microsoft Excel ώστε να εξαχθούν τα συμπεράσματα για τη δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου μας.

## 5. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

### 5.1. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΑΣΜΑΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ - ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ

Στα διαγράμματα 5.1 - παρουσιάζονται τα διαγράμματα κυματισμών και τα αποτελέσματα αποκρίσεων του μοντέλου.

Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται τα εξής διαγράμματα:

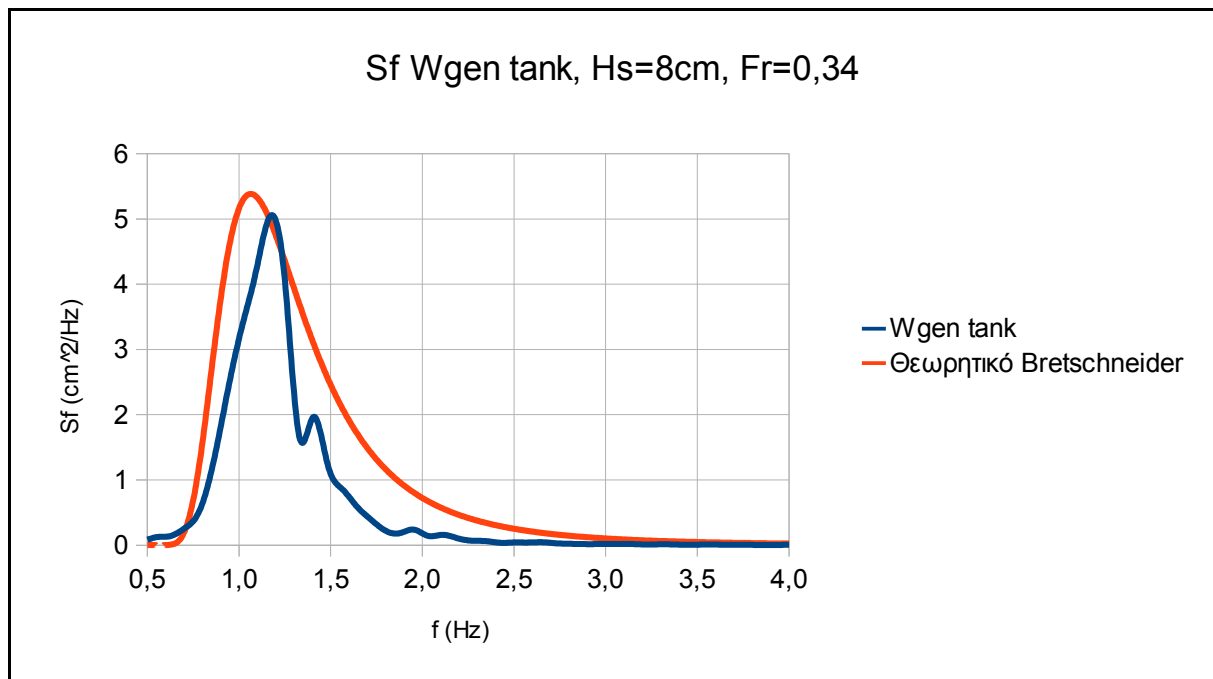
**1) Πυκνότητα φάσματος  $S(f)$  κυματισμού ( $\text{cm}^2/\text{Hz}$ ), Διαγράμματα 5.1, 5.5, 5.9, 5.13, 5.17, 5.21, 5.25, 5.29, 5.33, 5.37, 5.41.**

**2) Πυκνότητα φάσματος  $S(f)$  κατακόρυφων επιταχύνσεων ( $\text{g}^2/\text{Hz}$ ) σε τρεις θέσεις επί του μοντέλου: πρώραθεν, κέντρο βάρους, πρύμνηθεν, Διαγράμματα 5.2, 5.6, 5.10, 5.14, 5.18, 5.22, 5.26, 5.30, 5.34, 5.38, 5.42.**

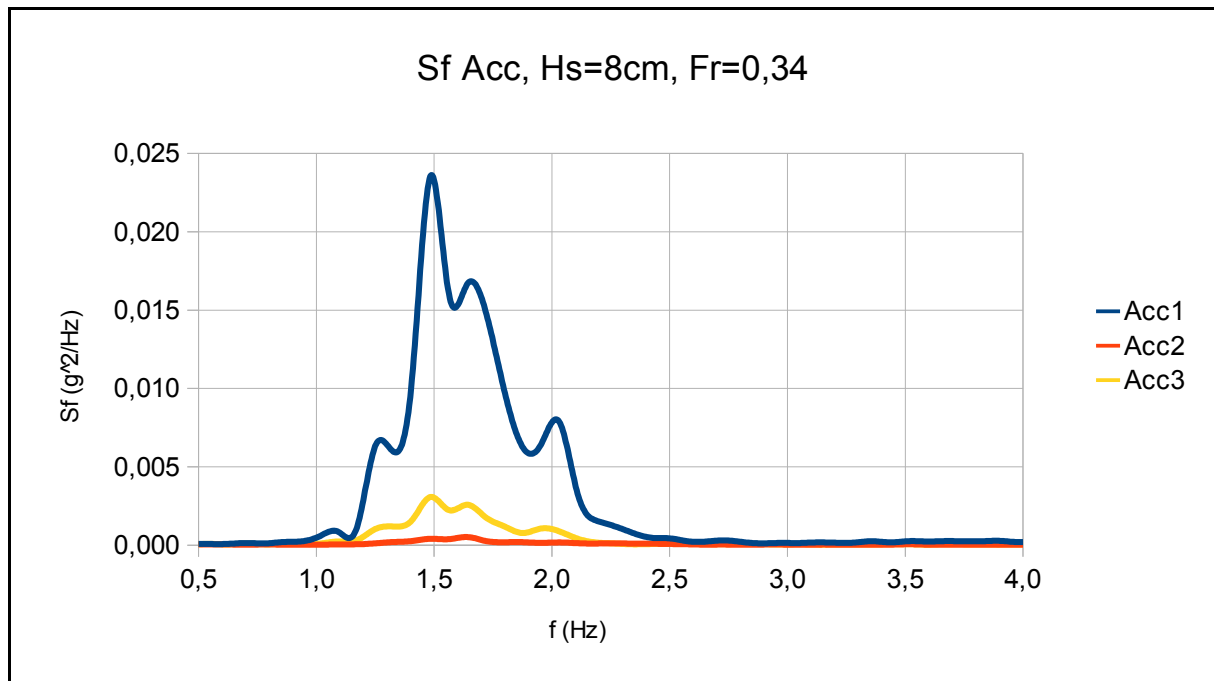
**3) Πυκνότητα φάσματος  $S(f)$  Heave ( $\text{cm}^2/\text{Hz}$ ), Διαγράμματα 5.3, 5.7, 5.11, 5.15, 5.19, 5.23, 5.27, 5.31, 5.35, 5.39, 5.43.**

**4) Πυκνότητα φάσματος  $S(f)$  Pitch ( $\text{deg}^2/\text{Hz}$ ), Διαγράμματα 5.4, 5.8, 5.12, 5.16, 5.20, 5.24, 5.29, 5.33, 5.37, 5.41, 5.44.**

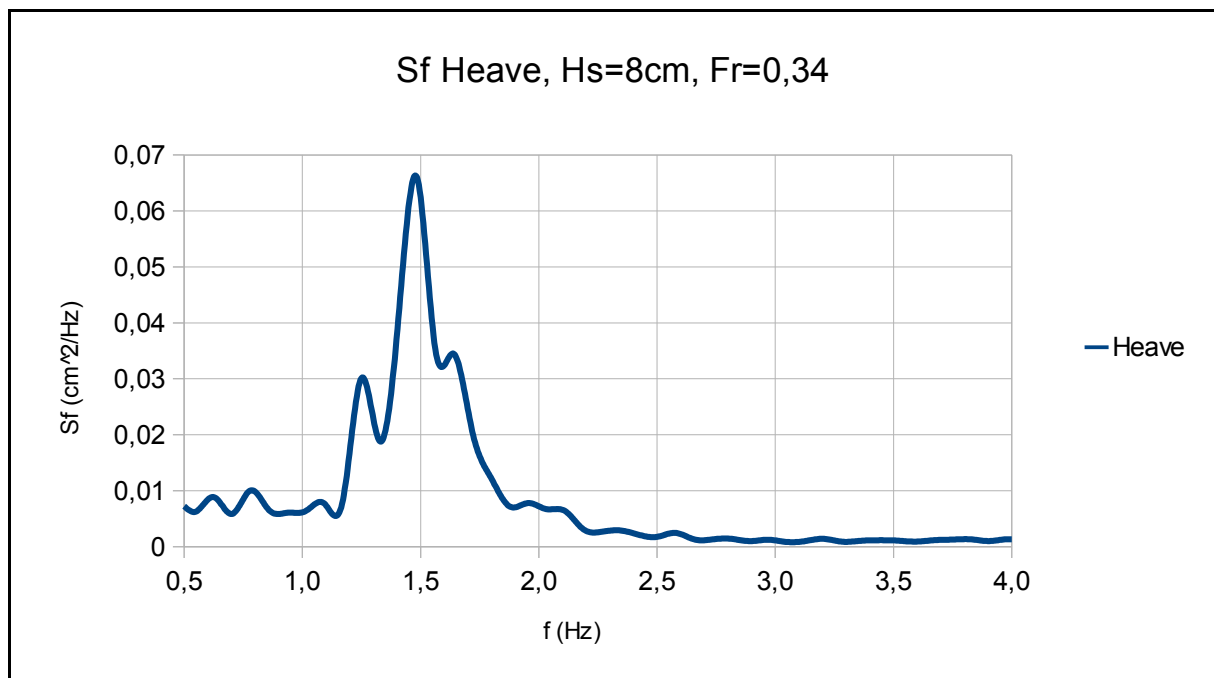
Το φάσμα του κυματισμού αναφέρεται σε απόλυτο (ακίνητο) σύστημα αναφοράς, ενώ τα φάσματα των αποκρίσεων σε σχετικό (κινούμενο), καθότι οι αντίστοιχοι αισθητήρες βρίσκονται επί του κινούμενου φορείου.



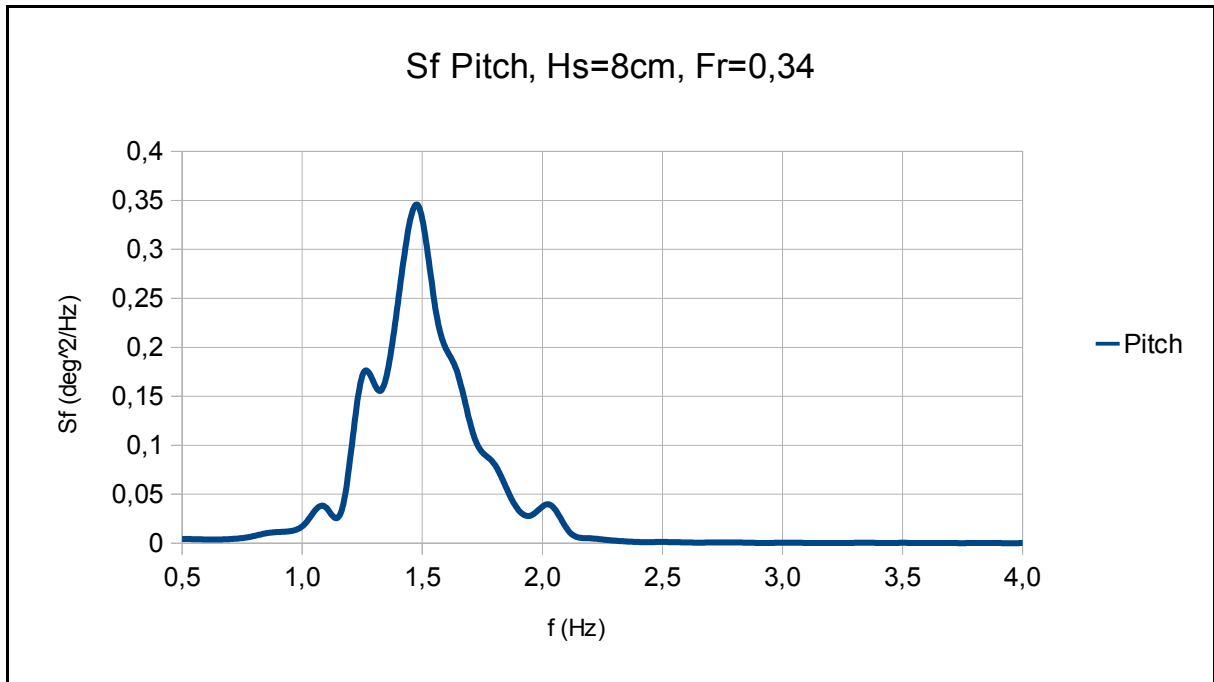
Διάγραμμα 5.1.



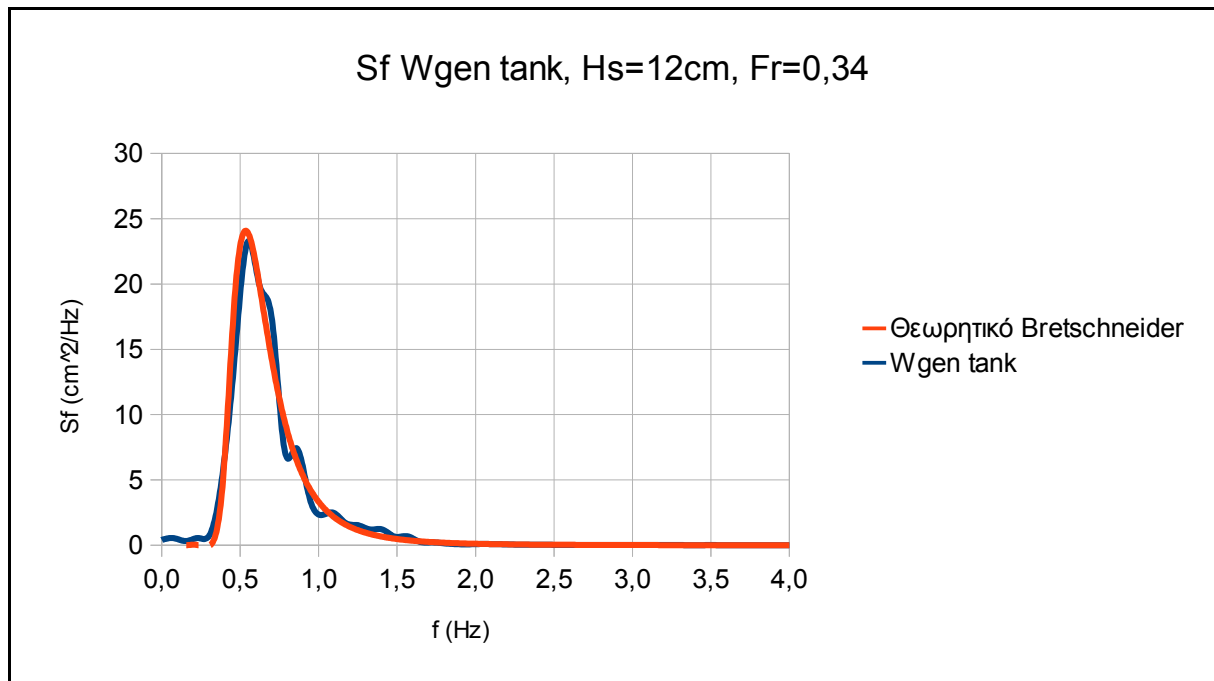
Διάγραμμα 5.2.



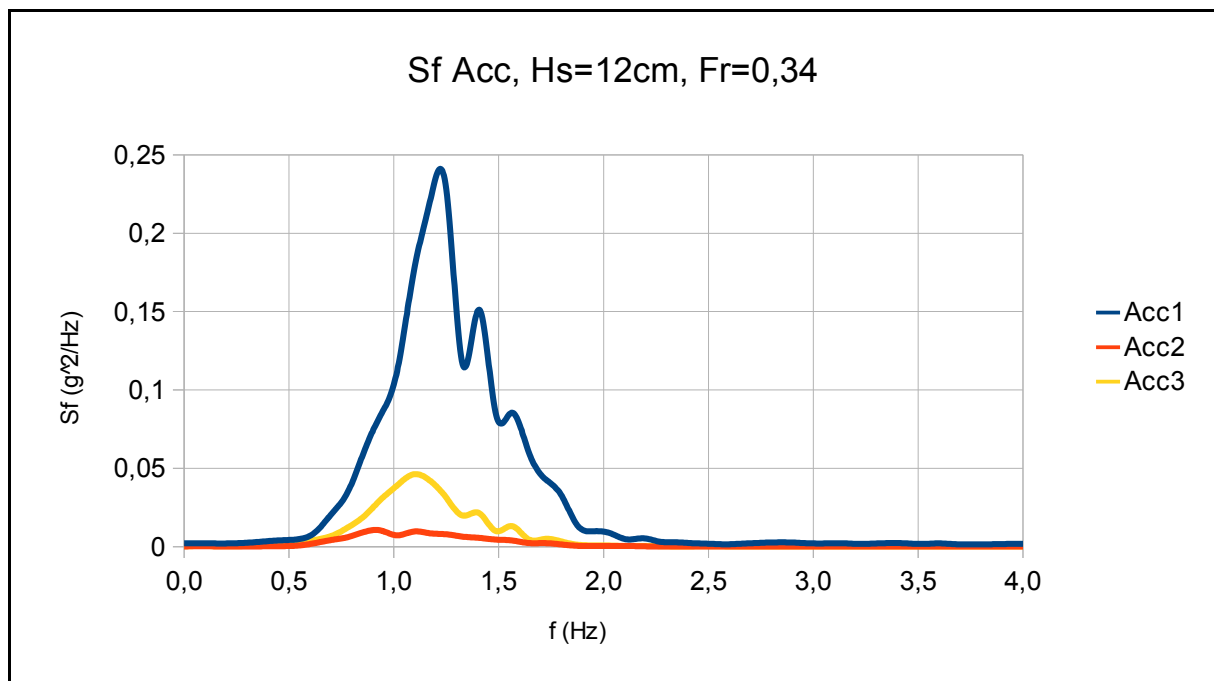
Διάγραμμα 5.3.



Διάγραμμα 5.4.

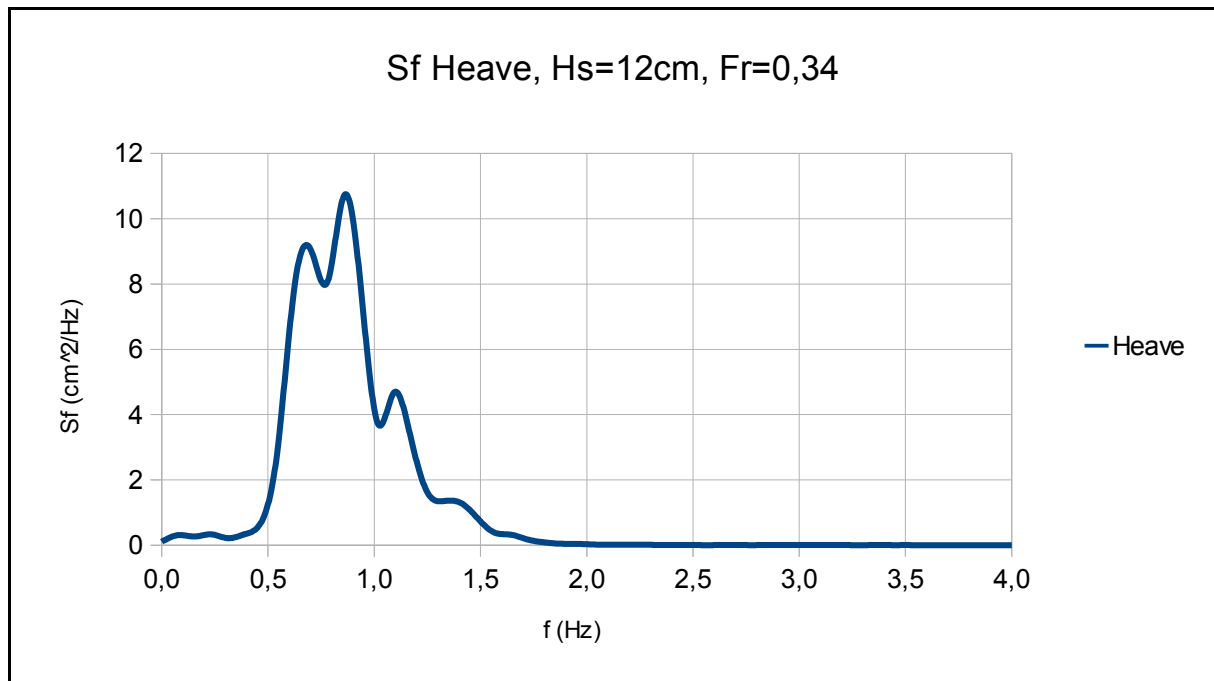


Διάγραμμα 5.5.

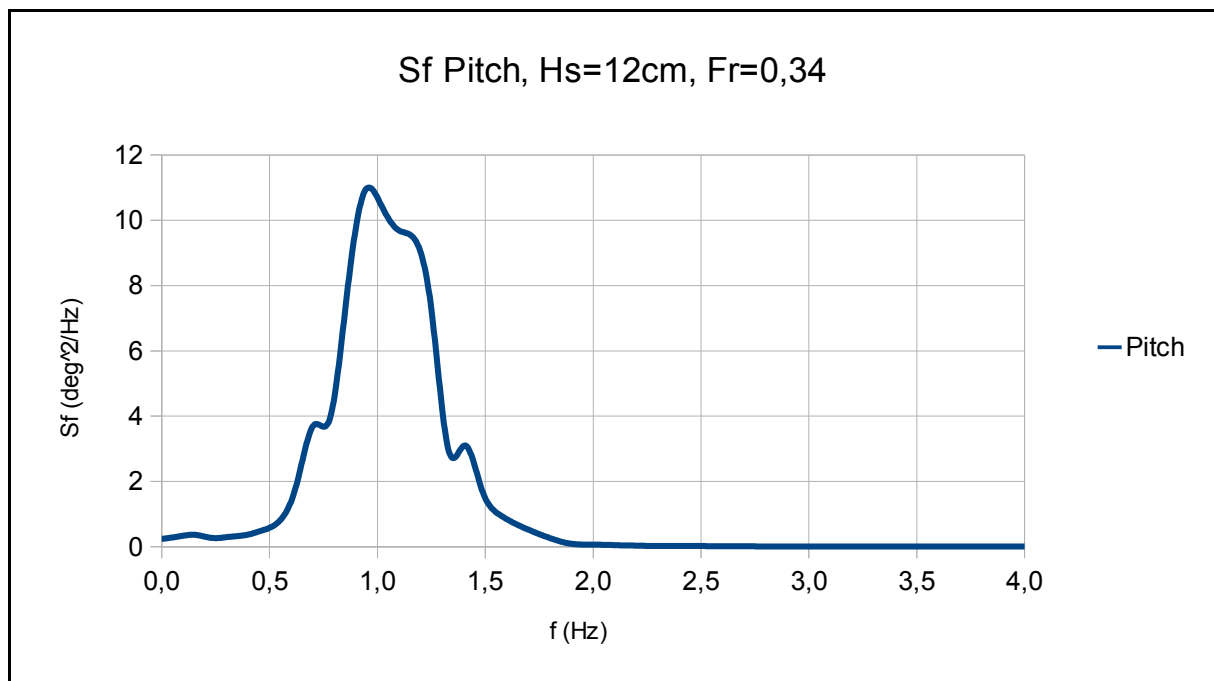


Διάγραμμα 5.6.

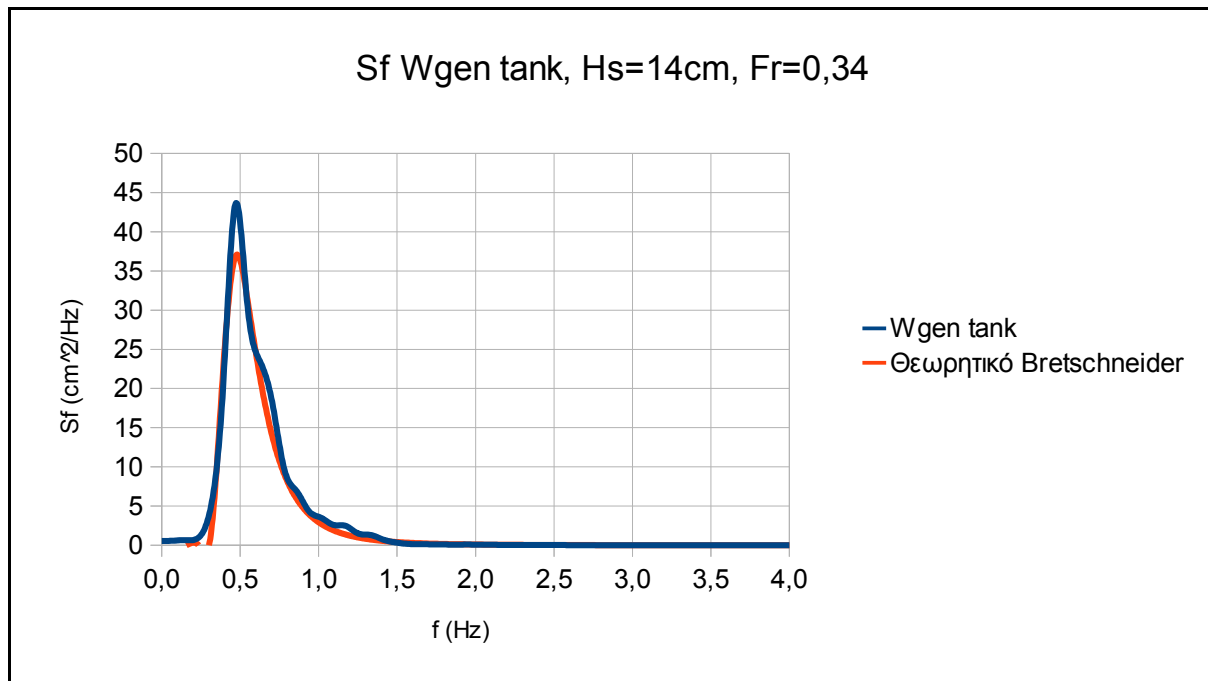




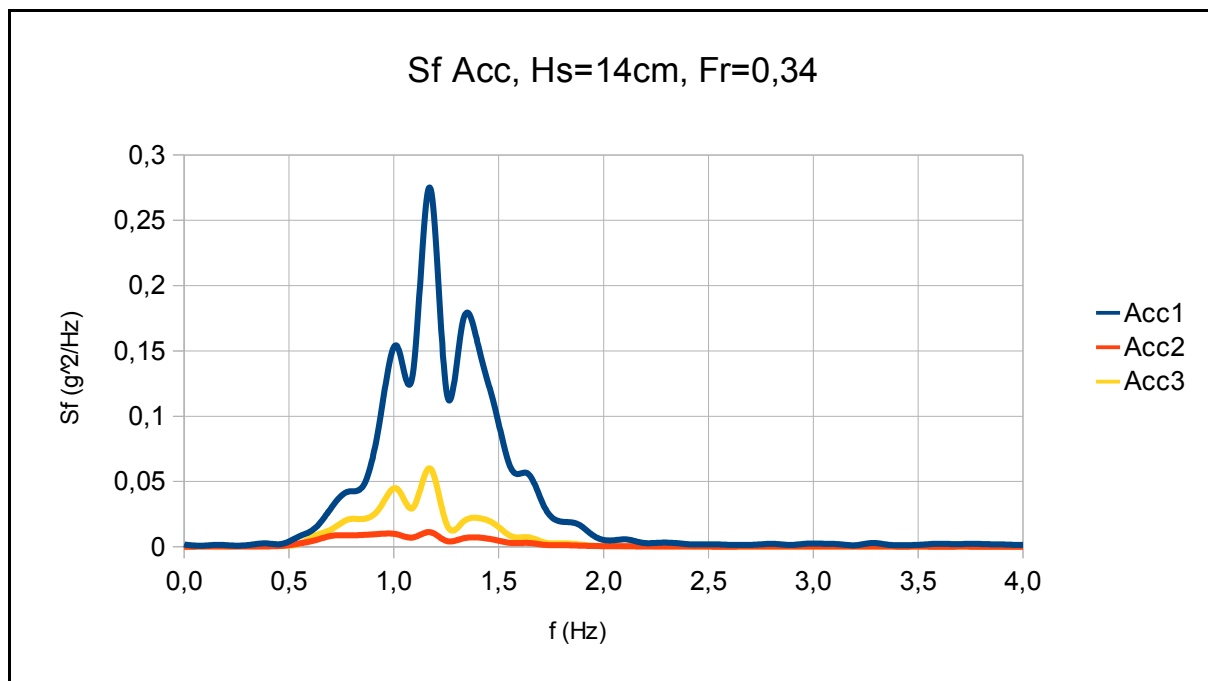
Διάγραμμα 5.7.



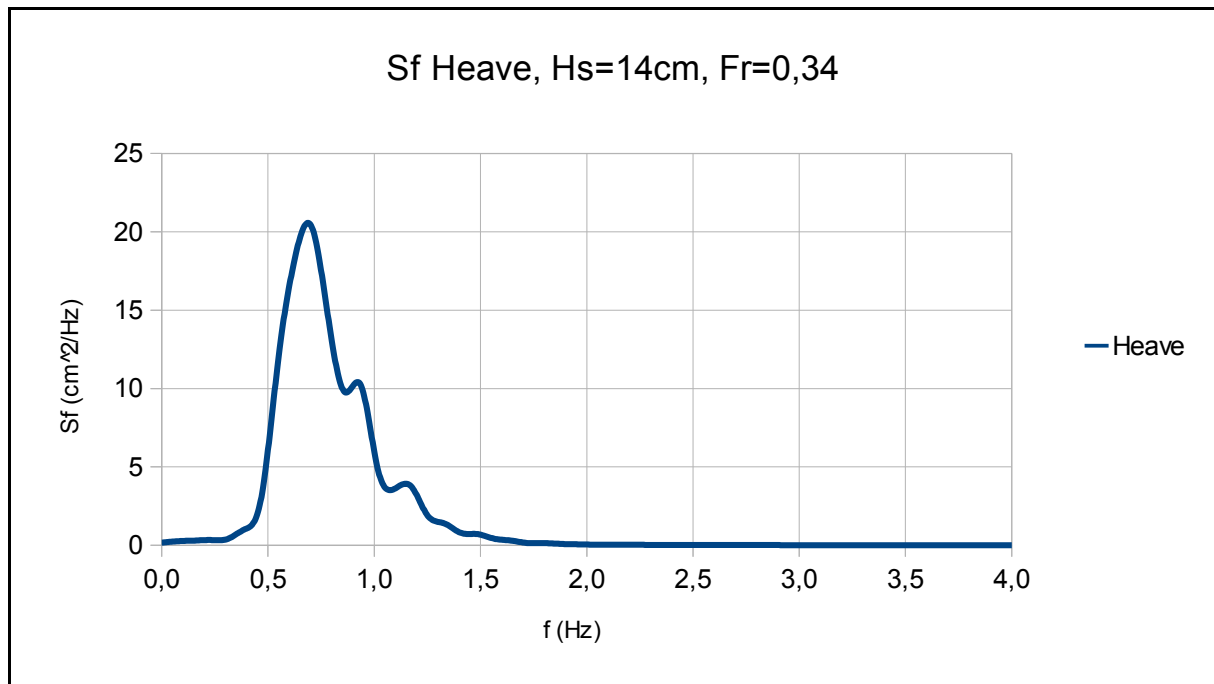
Διάγραμμα 5.8.



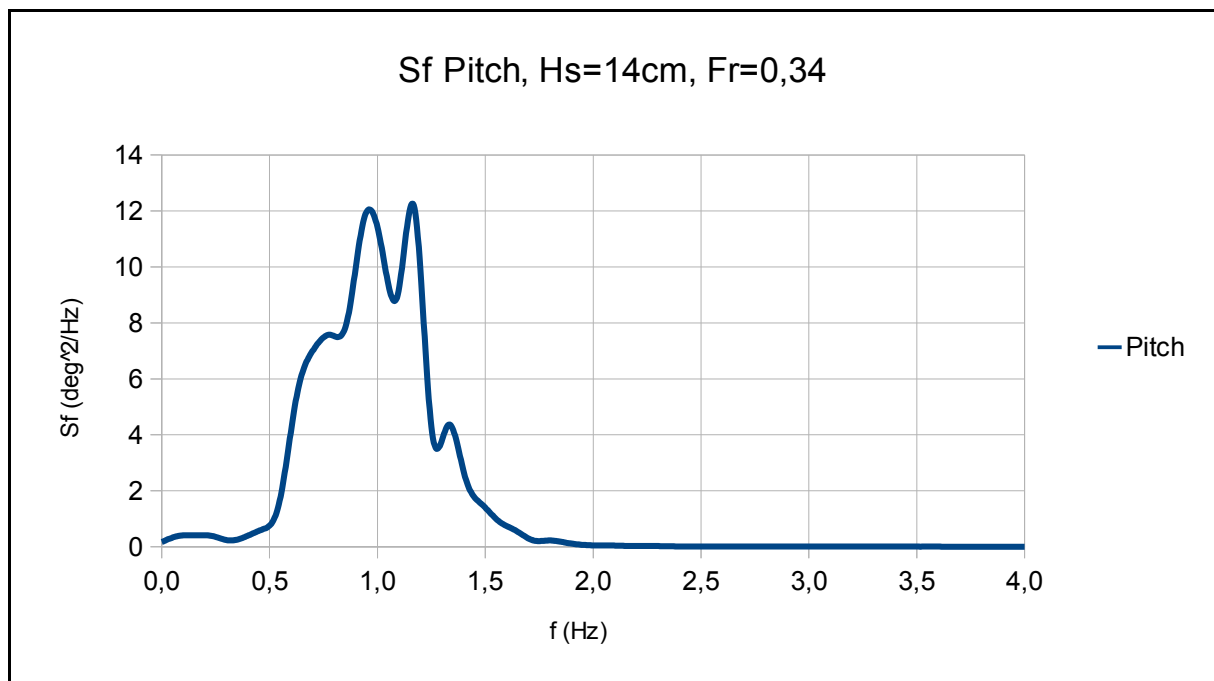
Διάγραμμα 5.9.



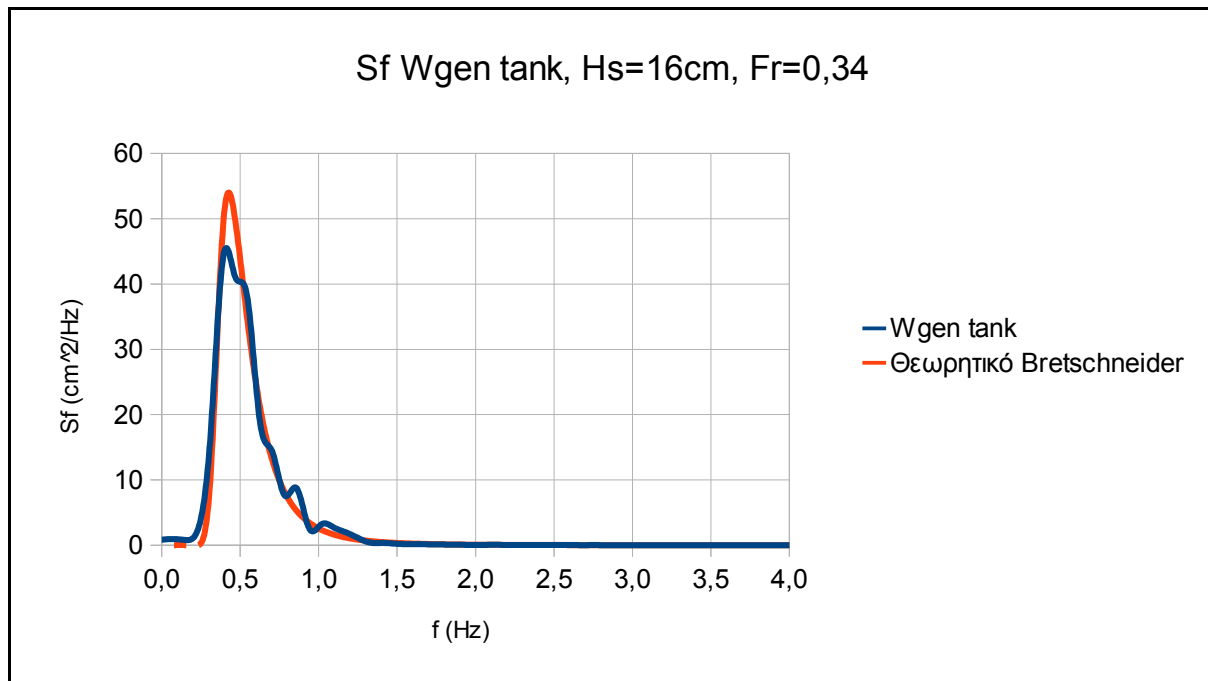
Διάγραμμα 5.10.



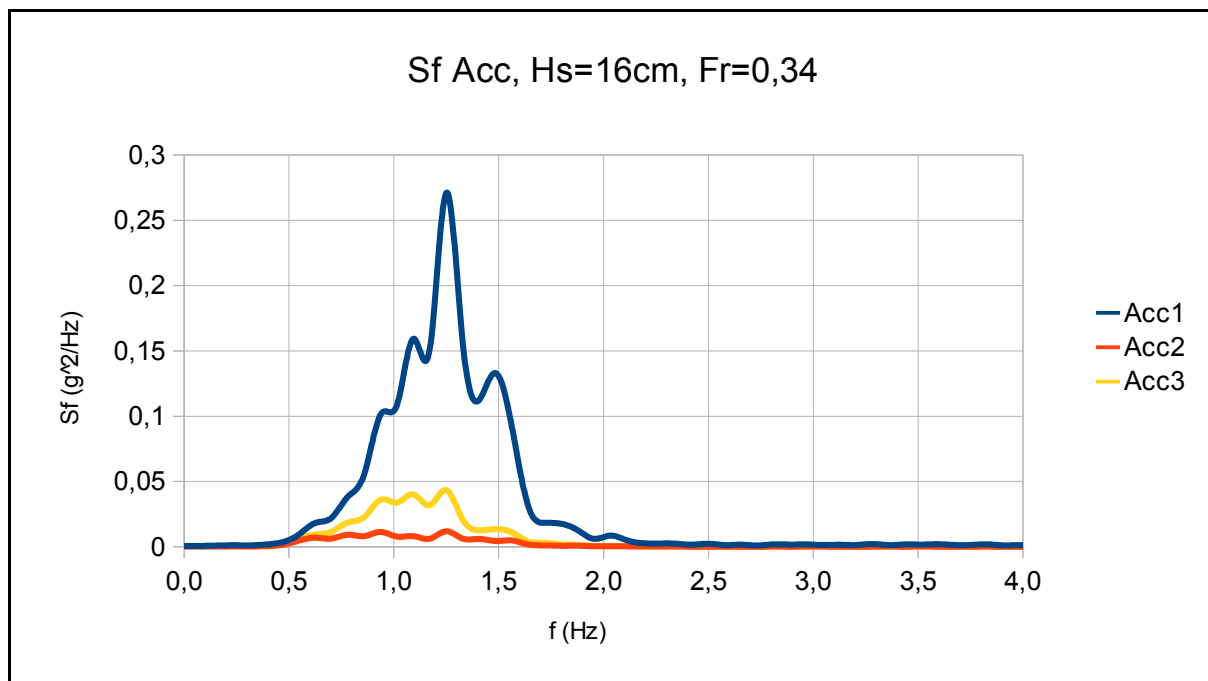
Διάγραμμα 5.11.



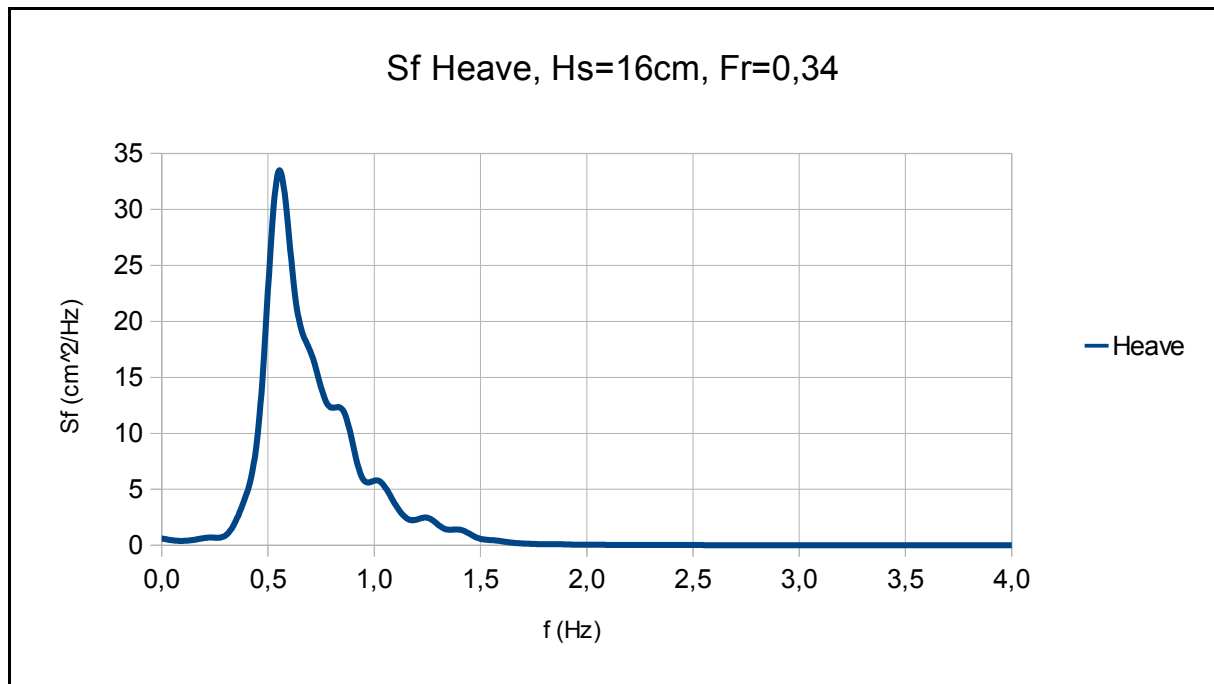
Διάγραμμα 5.12.



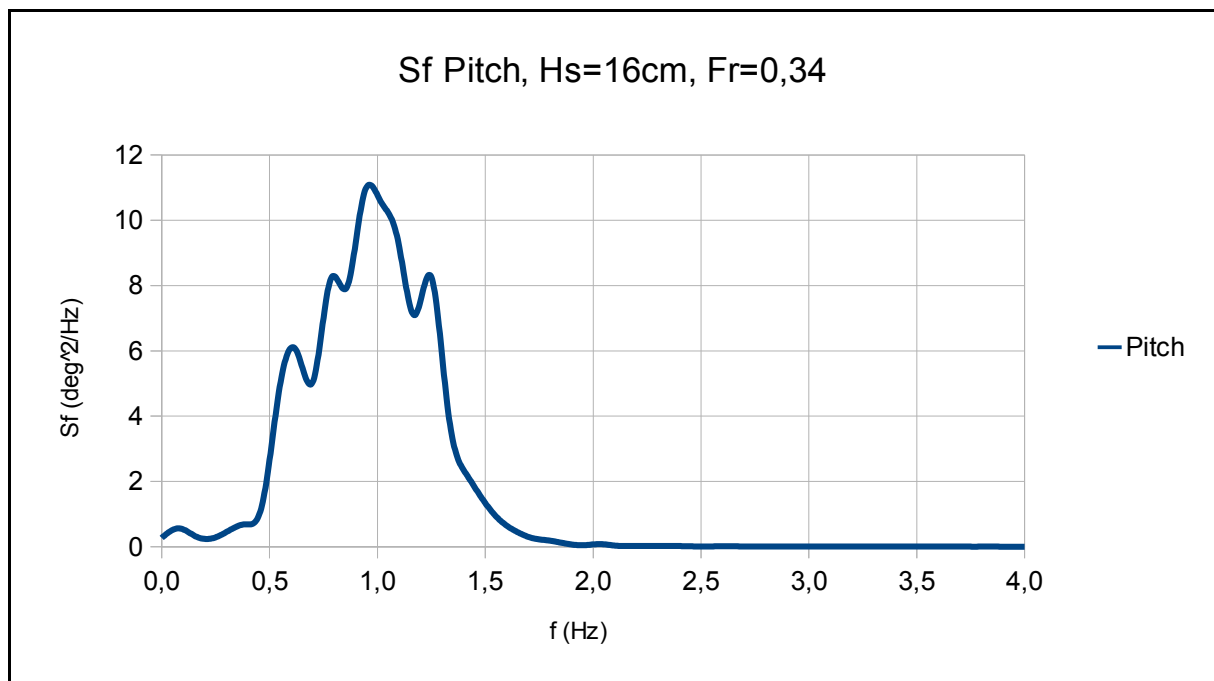
Διάγραμμα 5.13.



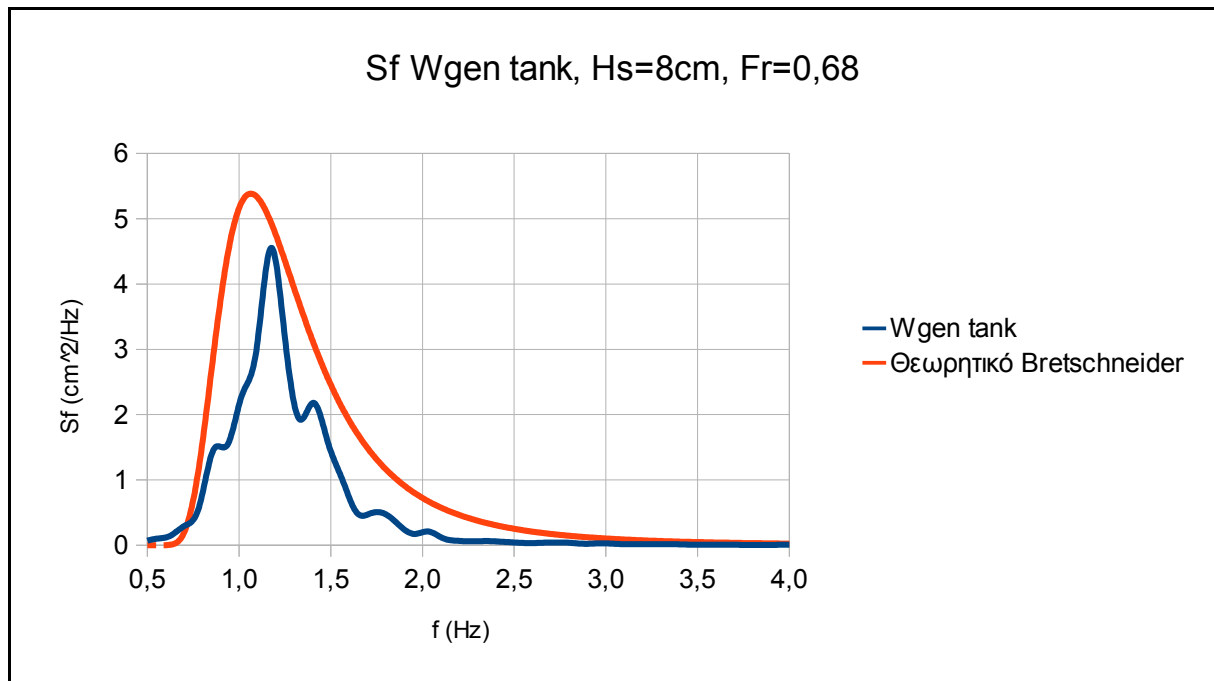
Διάγραμμα 5.14.



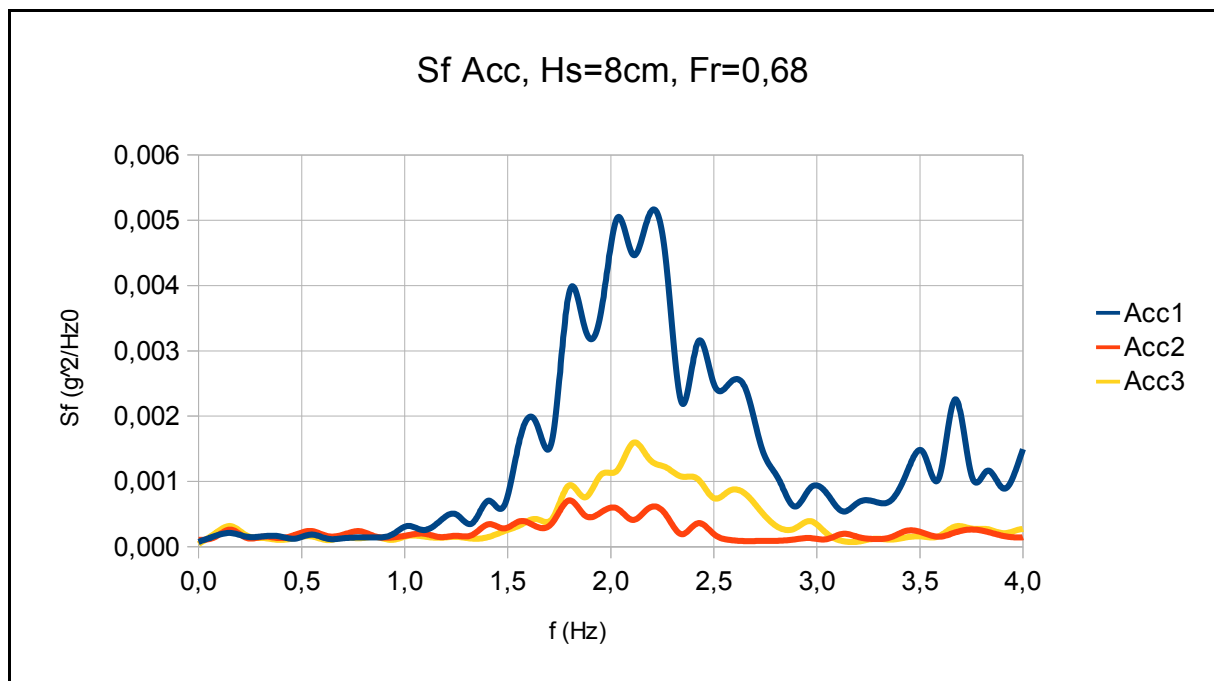
Διάγραμμα 5.15.



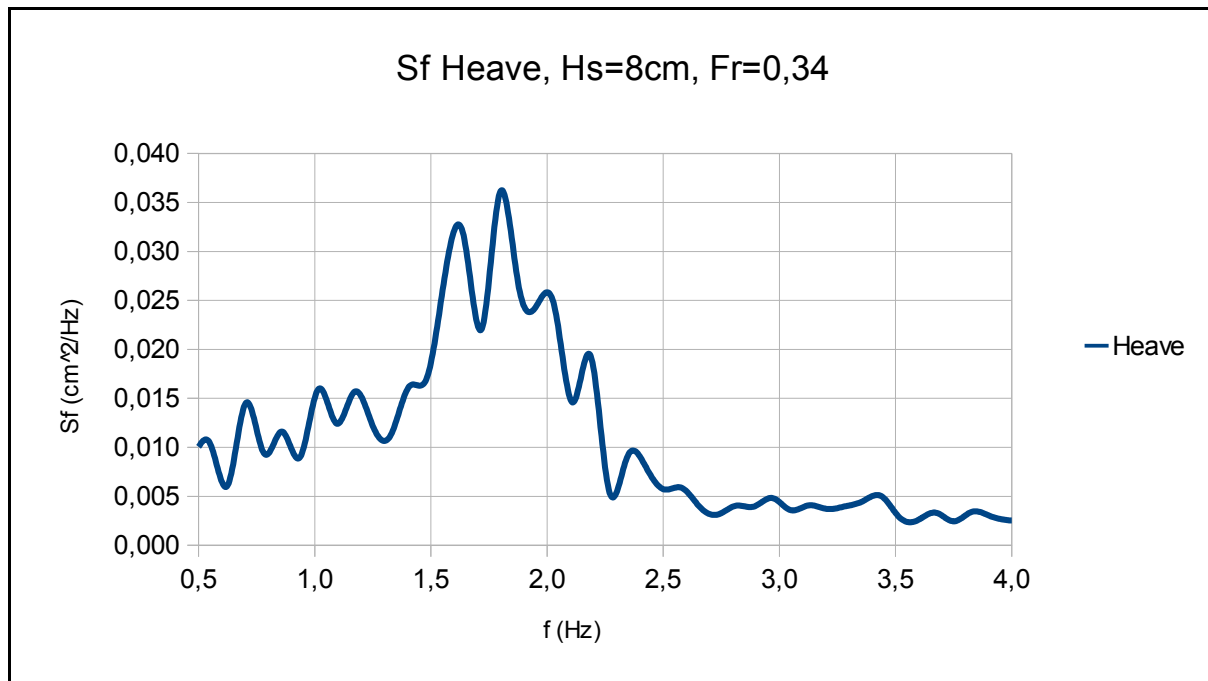
Διάγραμμα 5.16.



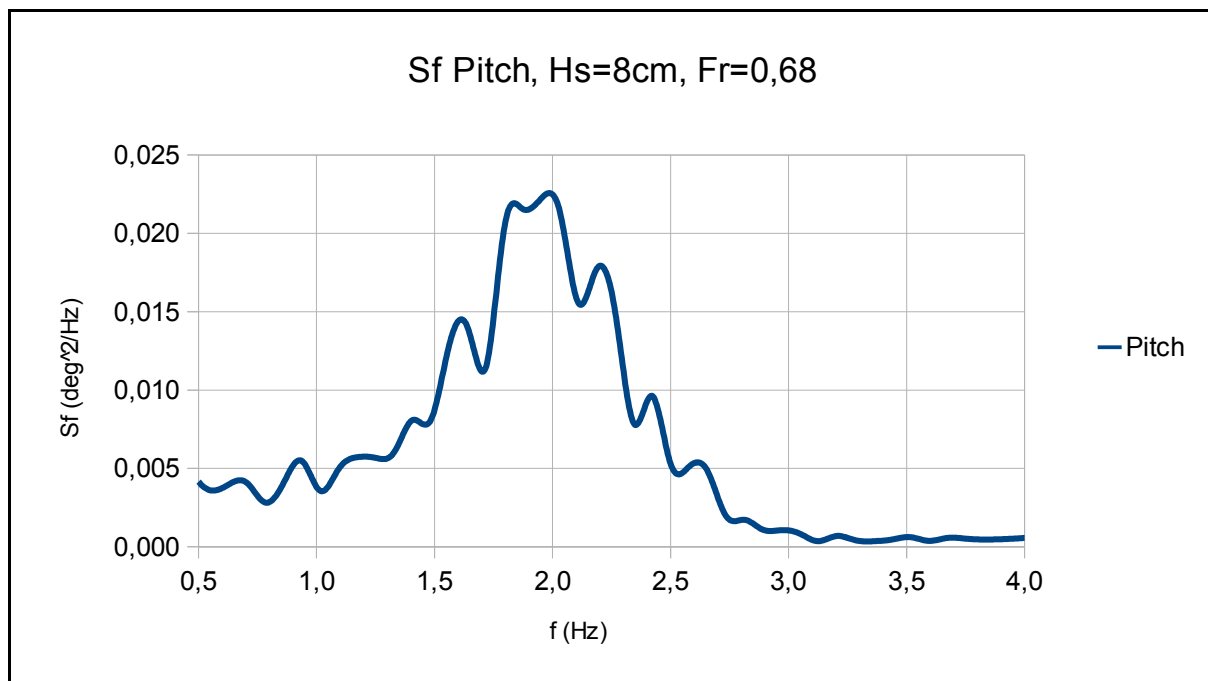
Διάγραμμα 5.17.



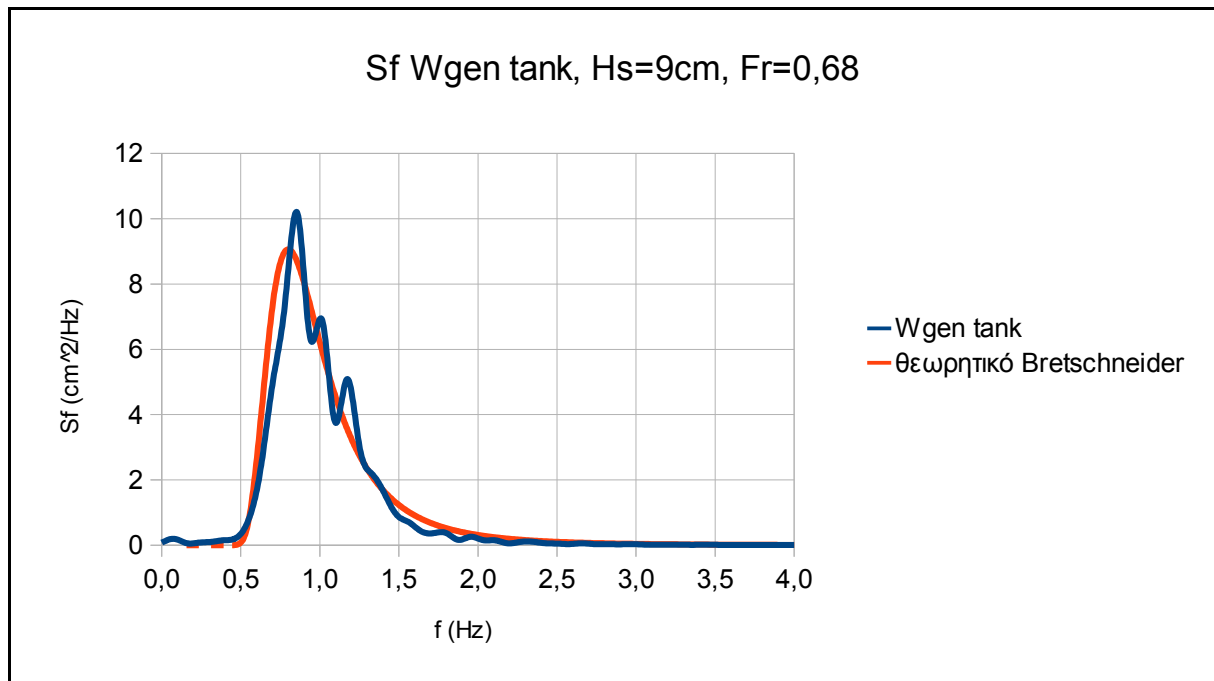
Διάγραμμα 5.18.



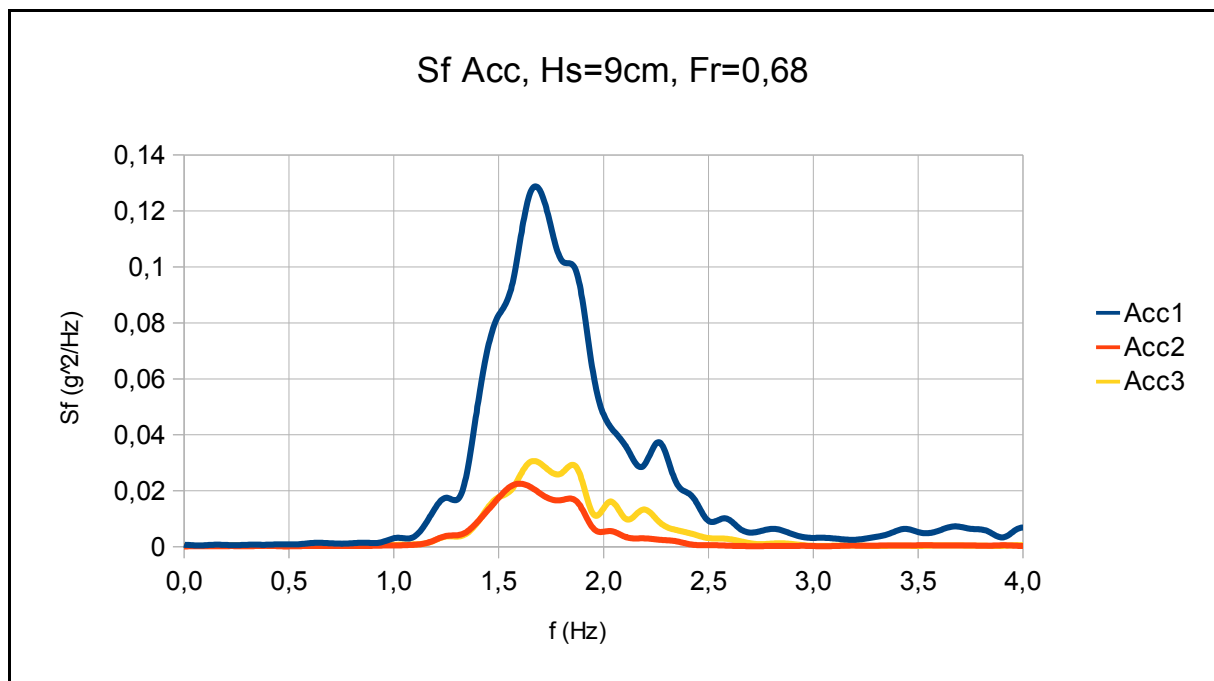
Διάγραμμα 5.19.



Διάγραμμα 5.20.

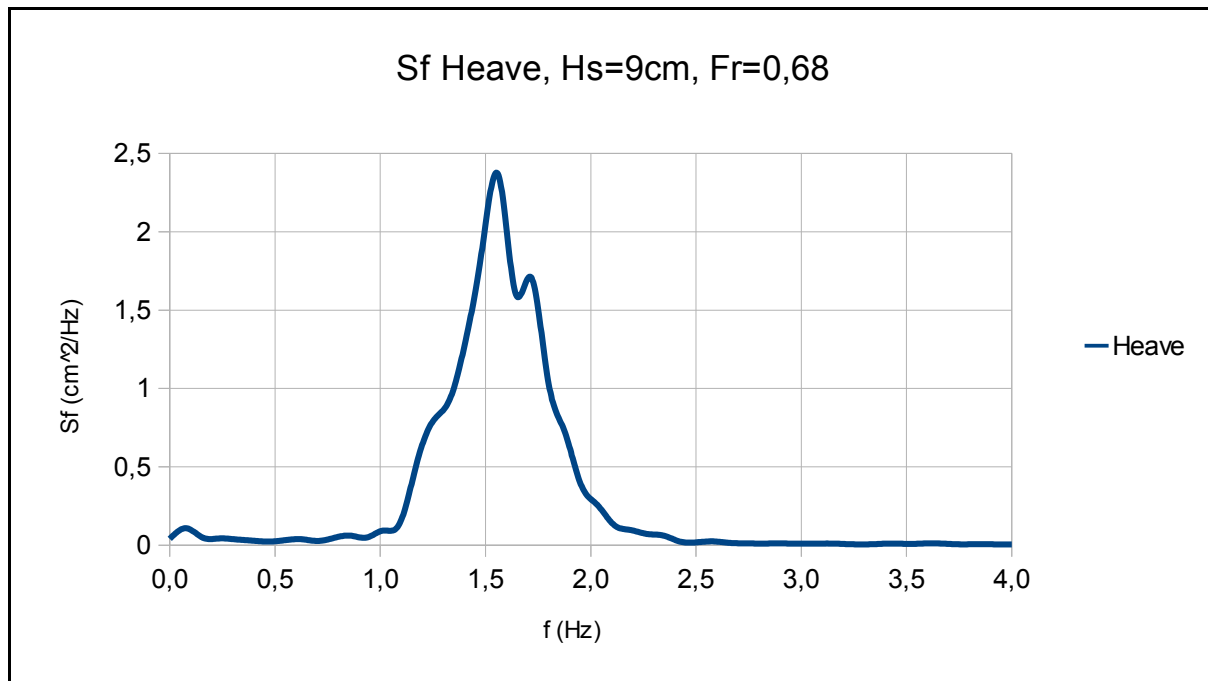


Διάγραμμα 5.21.

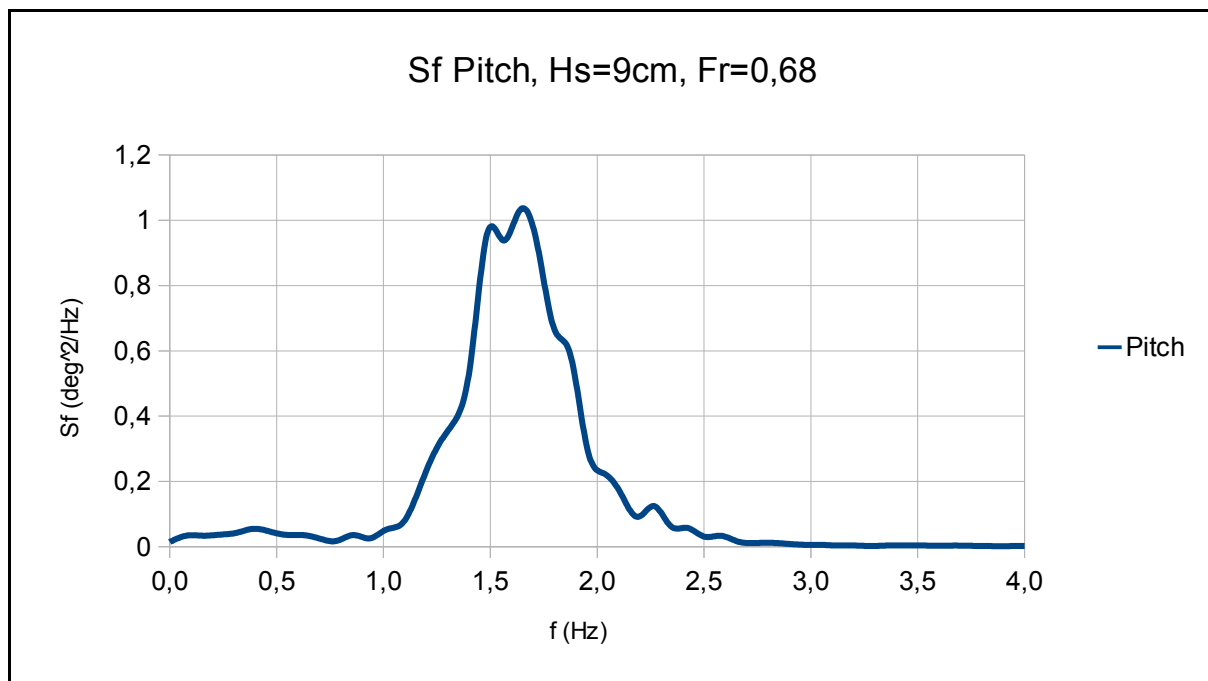


Διάγραμμα 5.22.

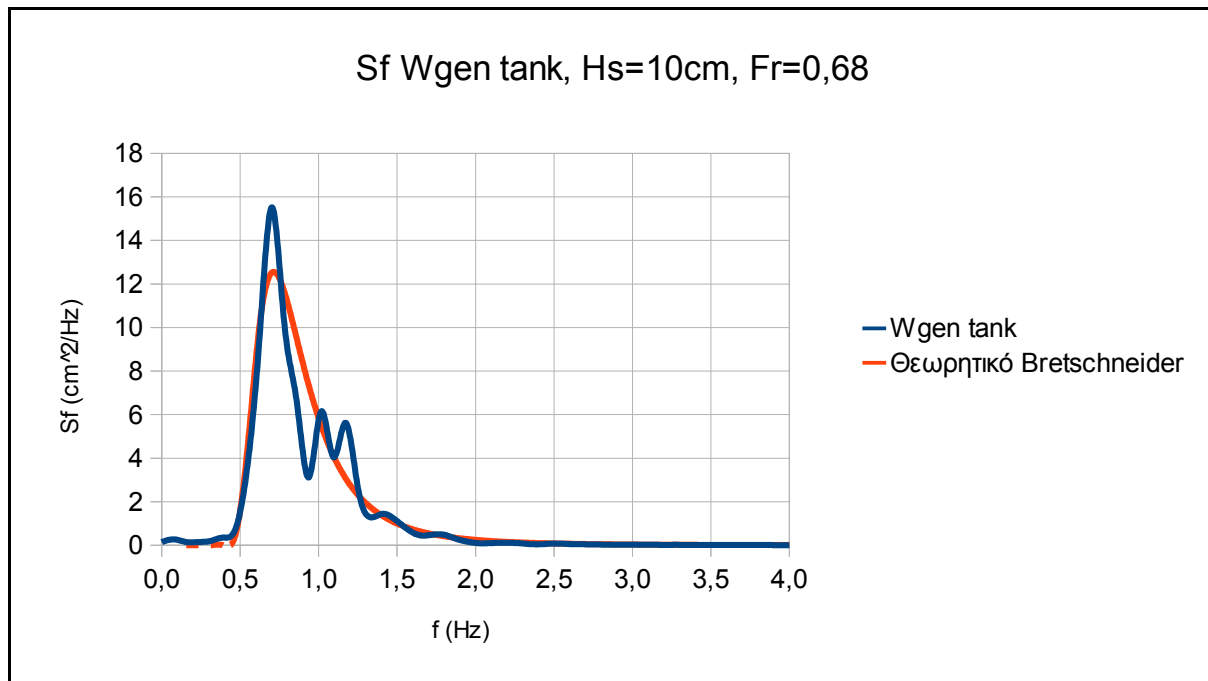




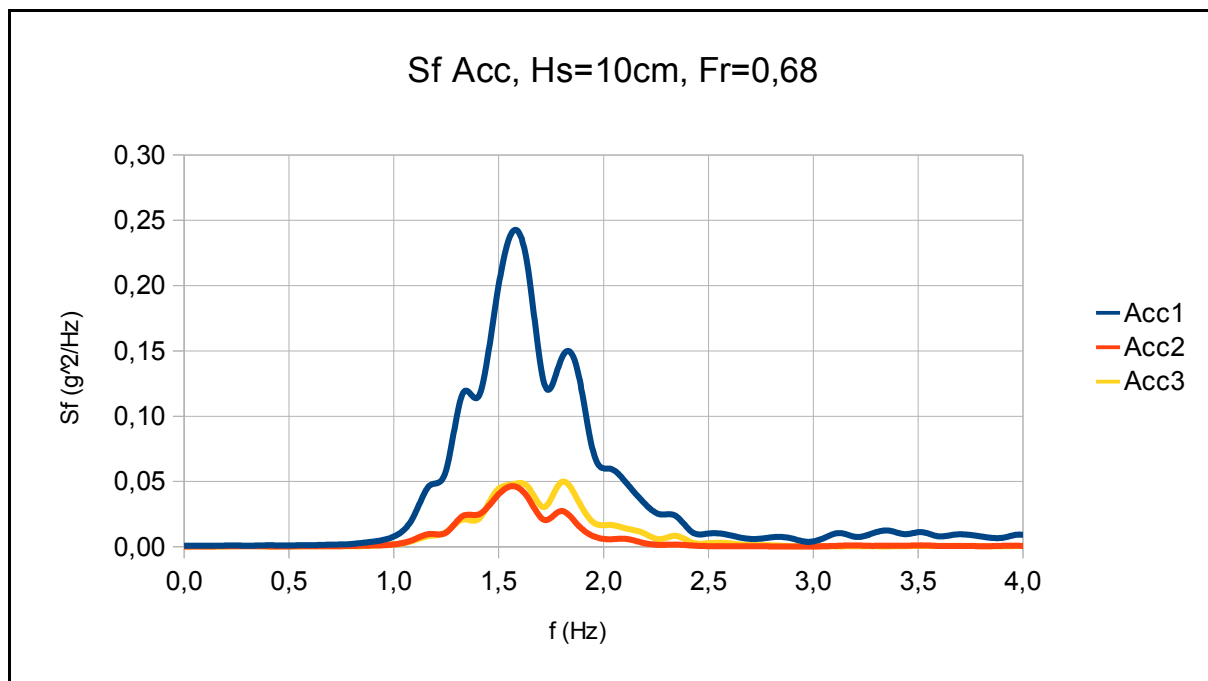
Διάγραμμα 5.23.



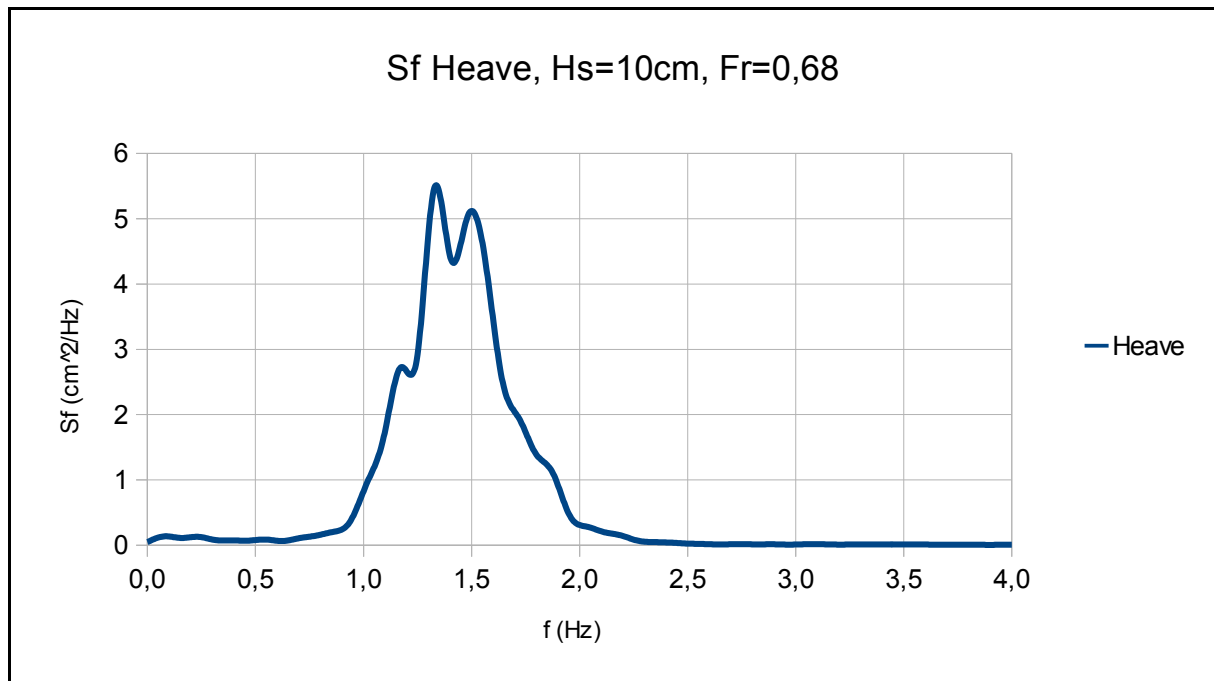
Διάγραμμα 5.24.



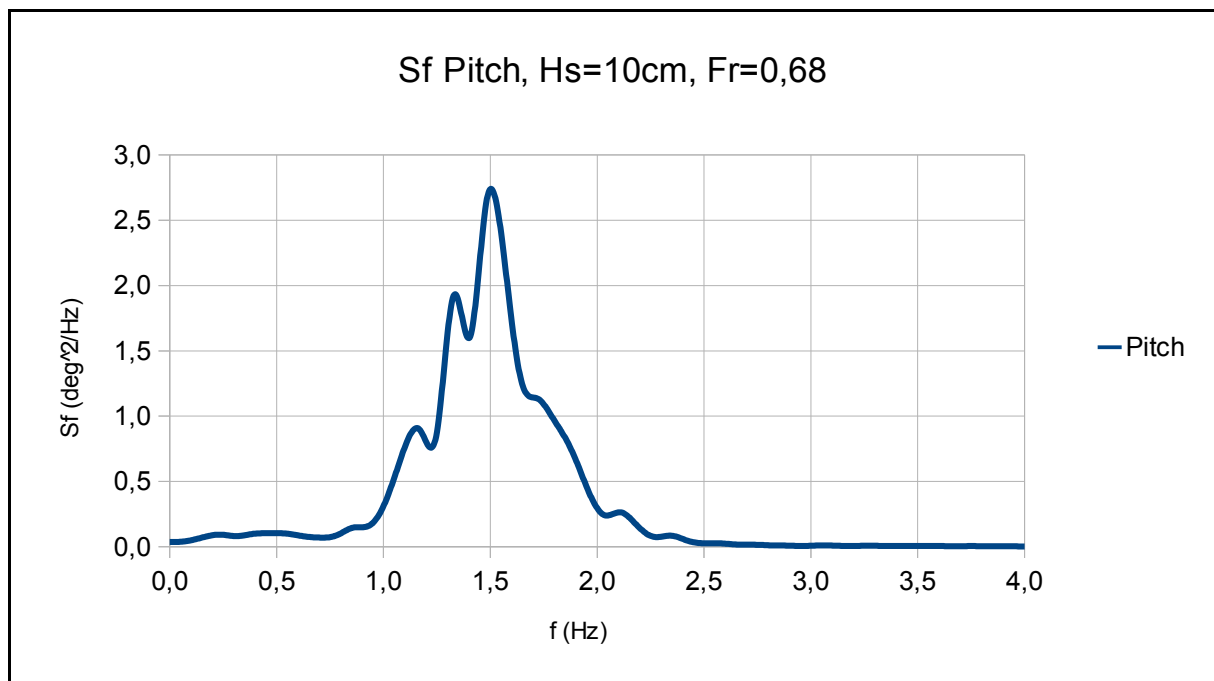
Διάγραμμα 5.25.



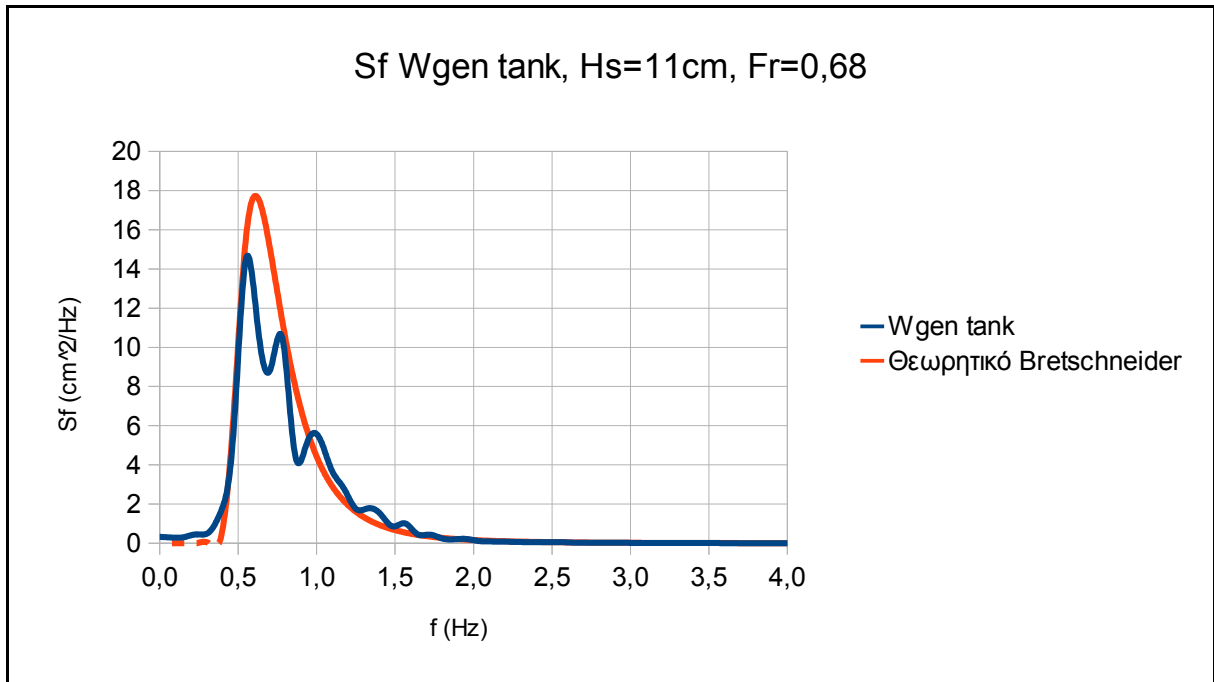
Διάγραμμα 5.26.



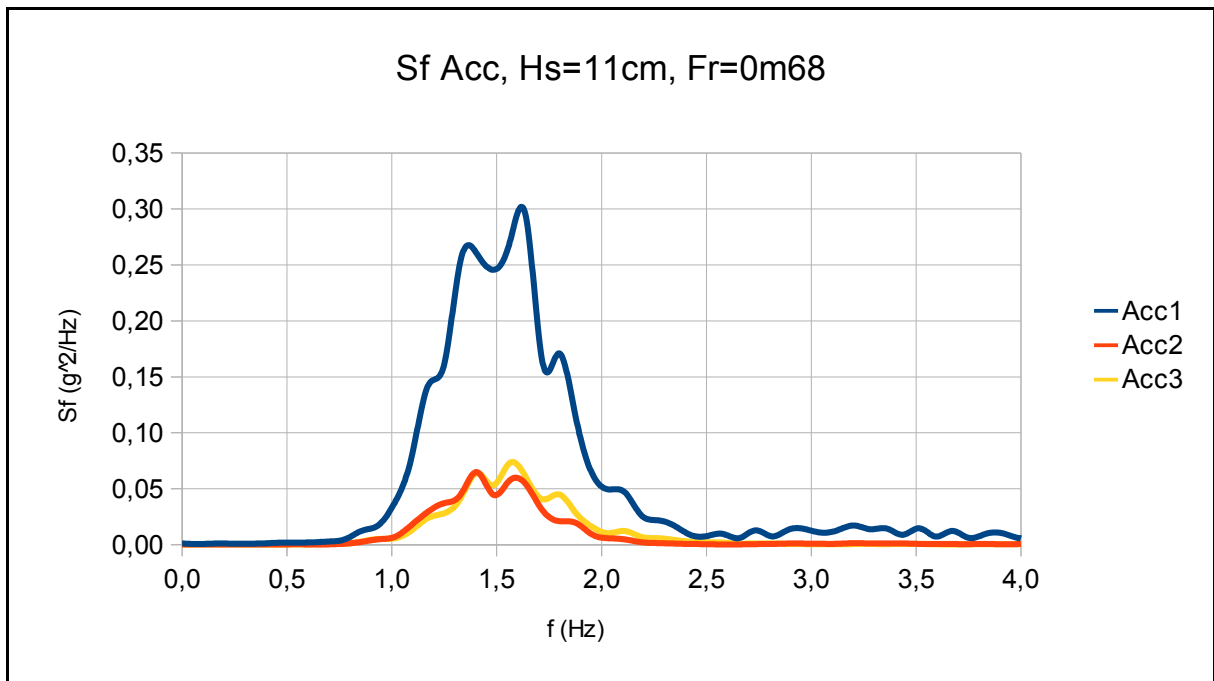
Διάγραμμα 5.27.



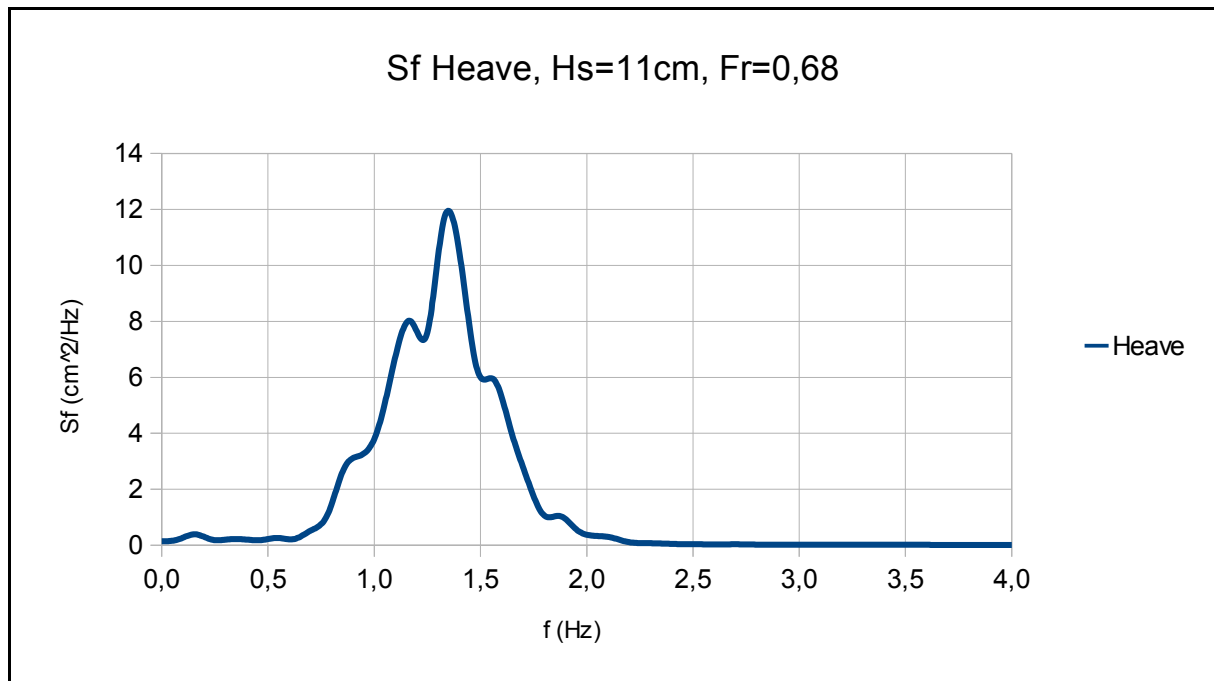
Διάγραμμα 5.28.



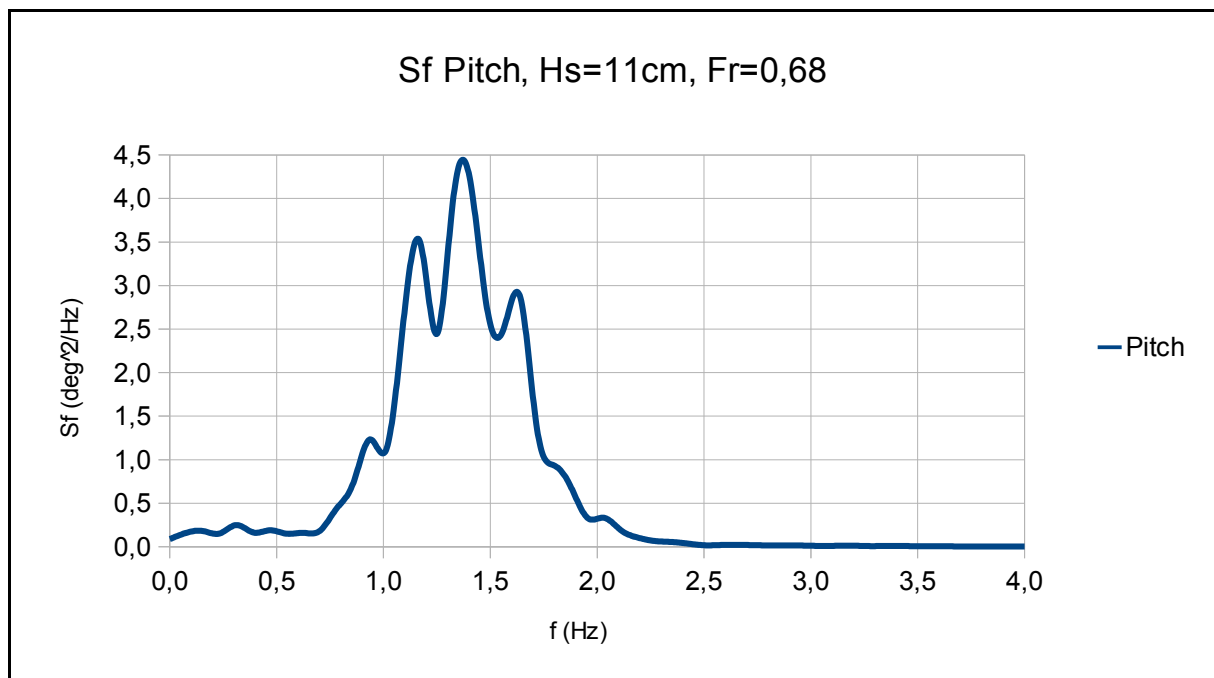
Διάγραμμα 5.29.



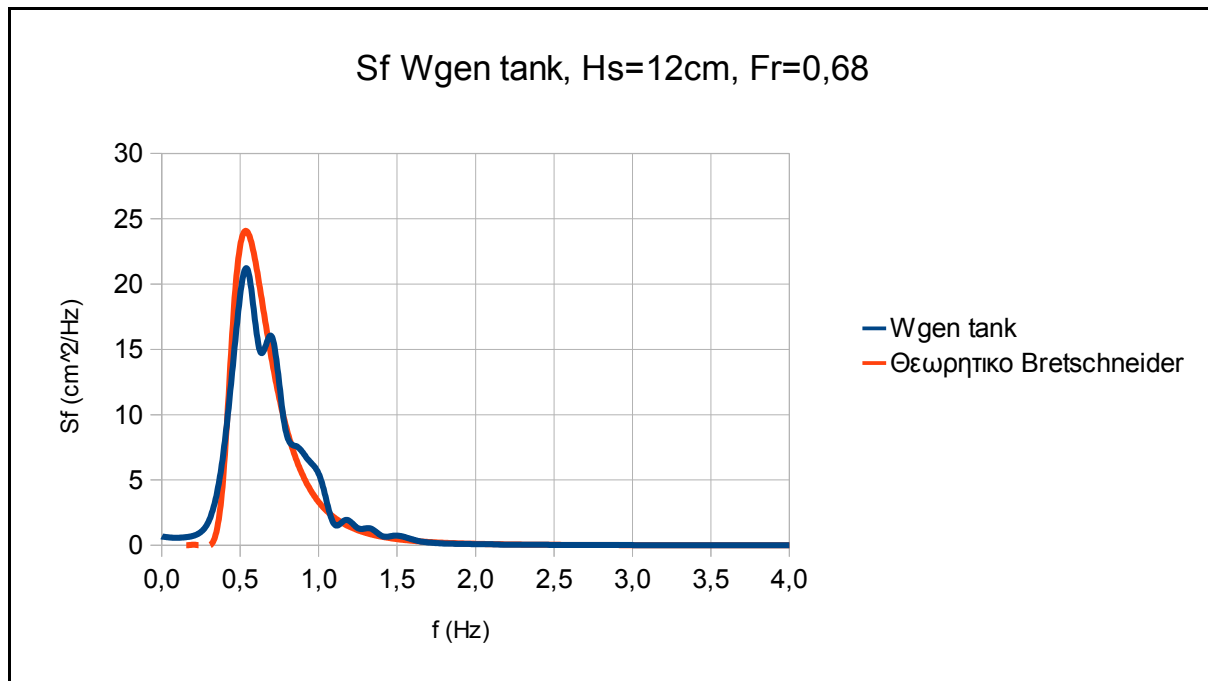
Διάγραμμα 5.30.



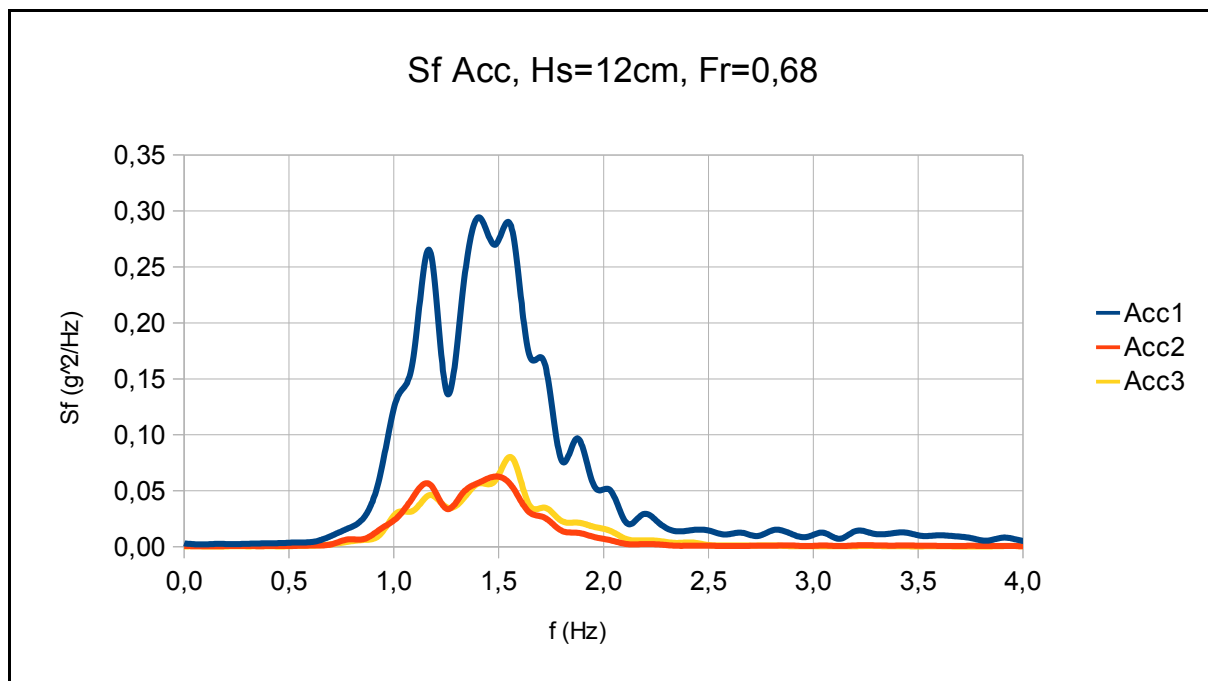
Διάγραμμα 5.31.



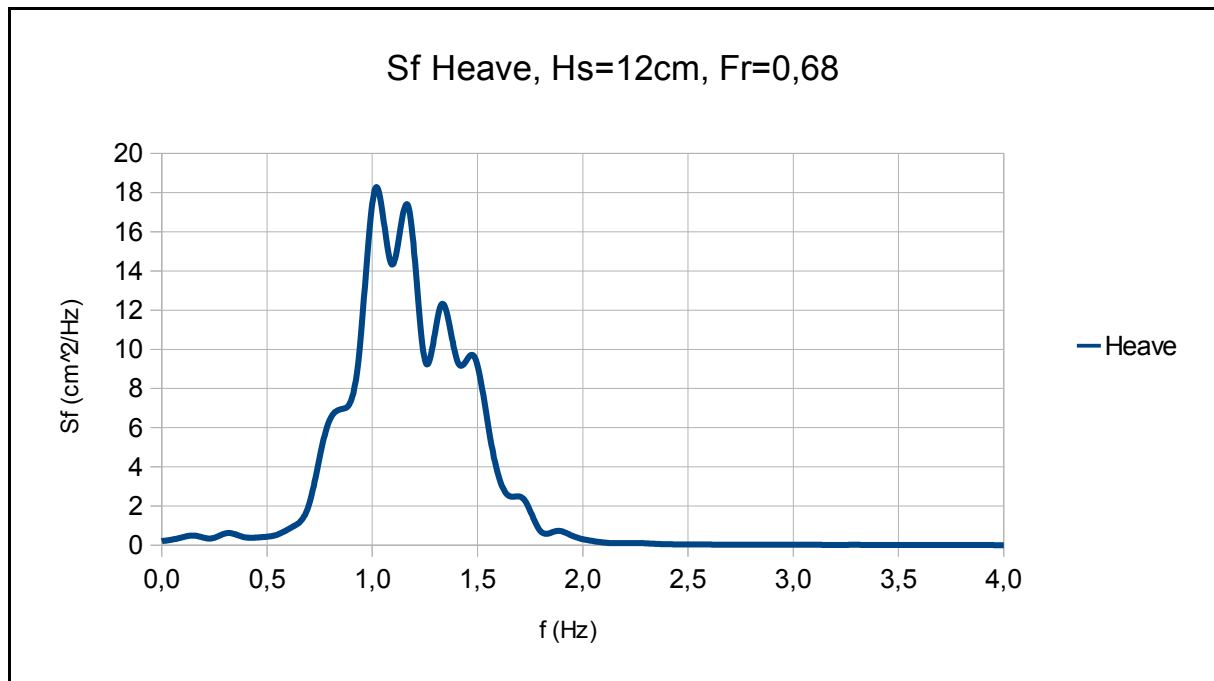
Διάγραμμα 5.32.



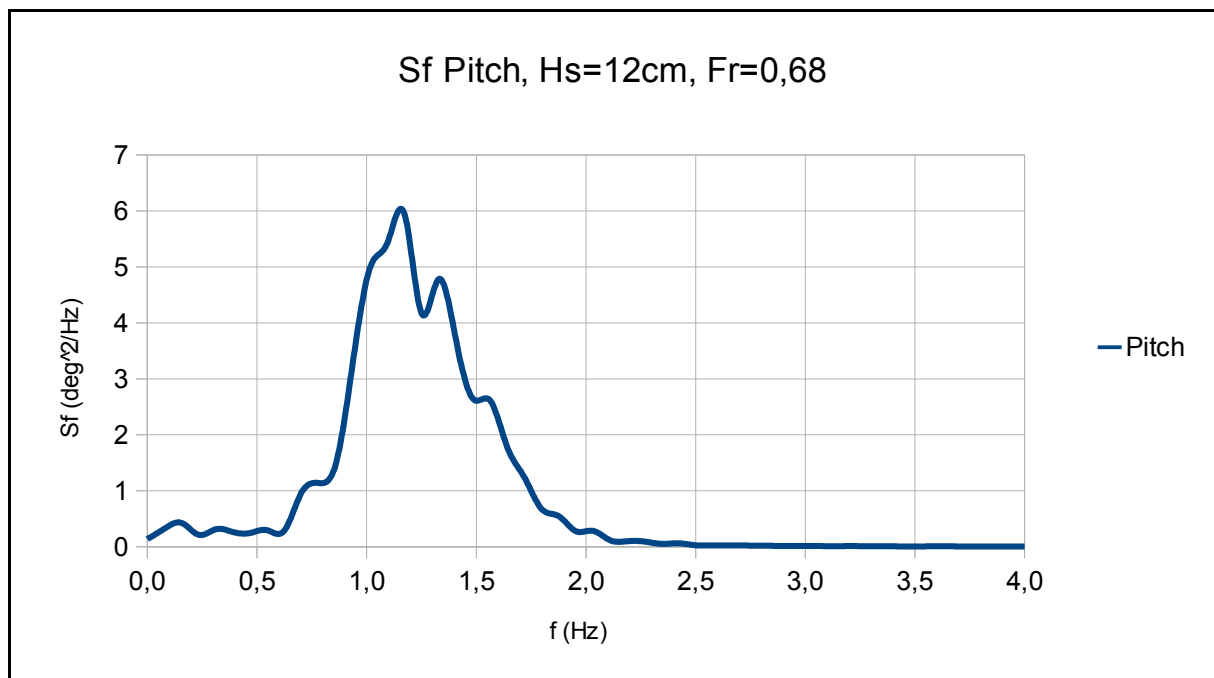
Διάγραμμα 5.33.



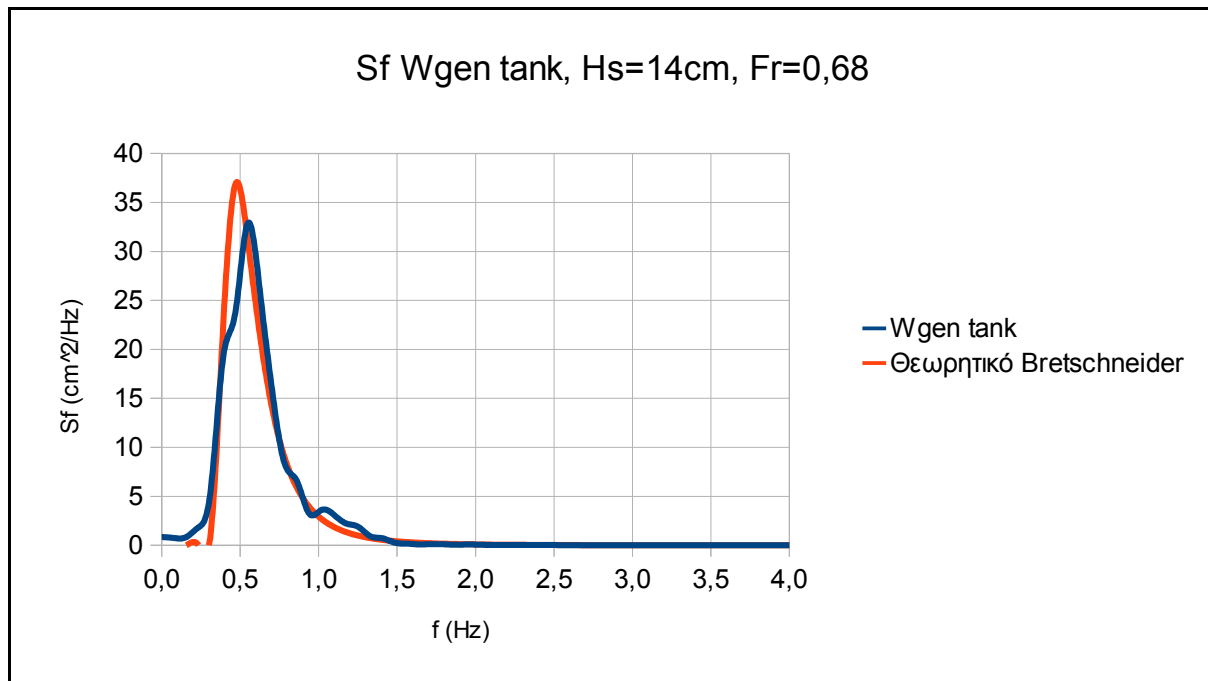
Διάγραμμα 5.34.



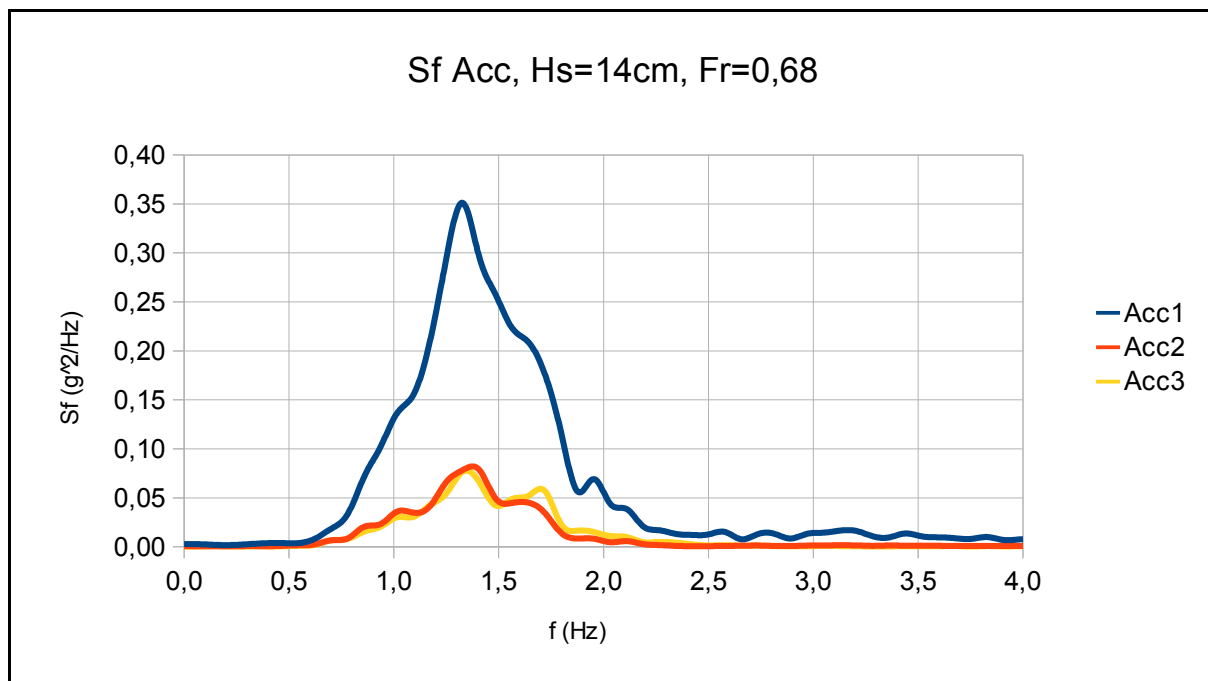
Διάγραμμα 5.35.



Διάγραμμα 5.36.

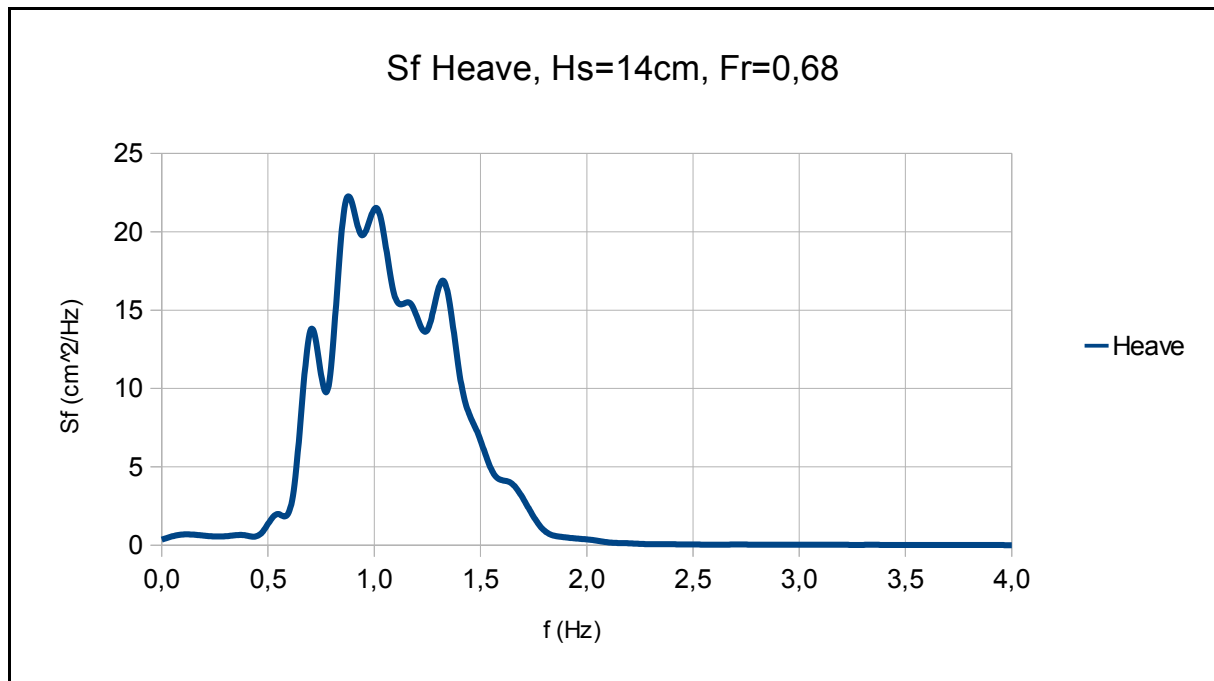


Διάγραμμα 5.37.

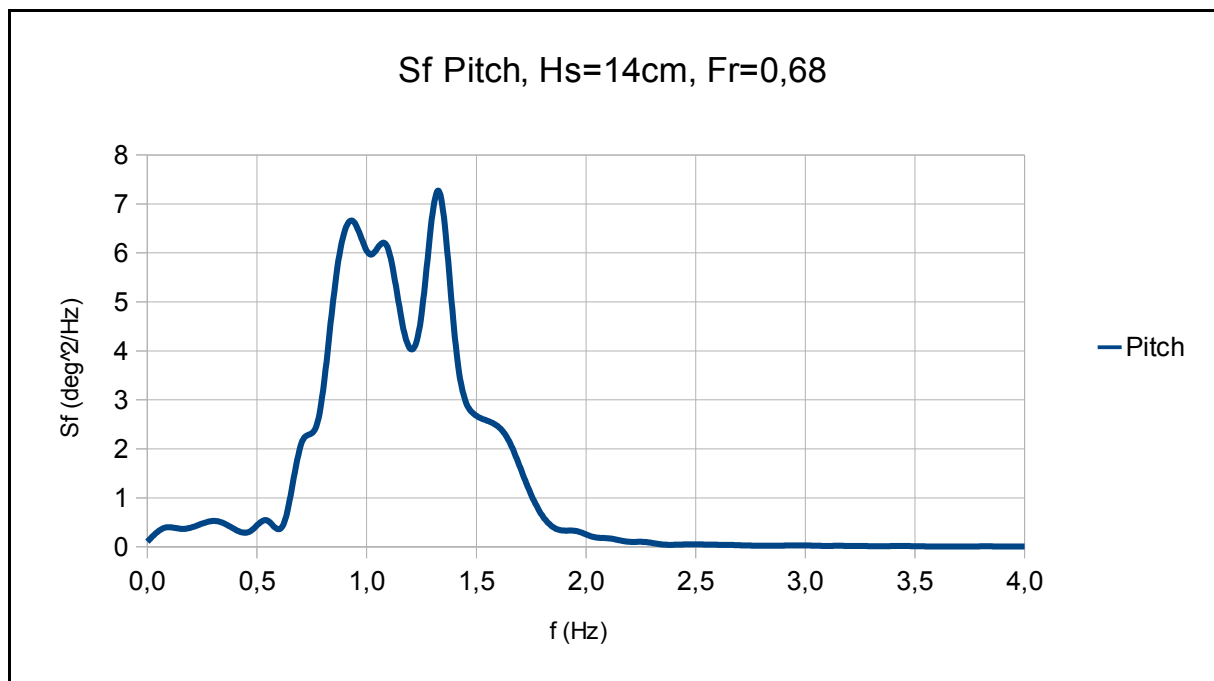


Διάγραμμα 5.38.

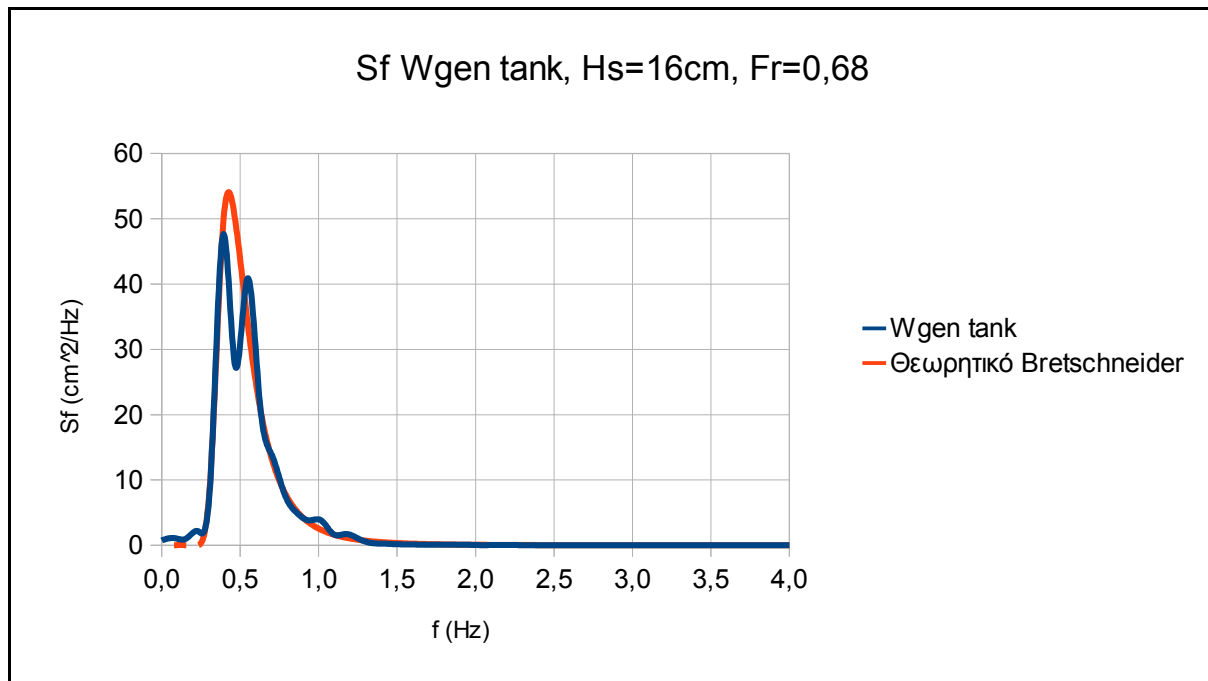




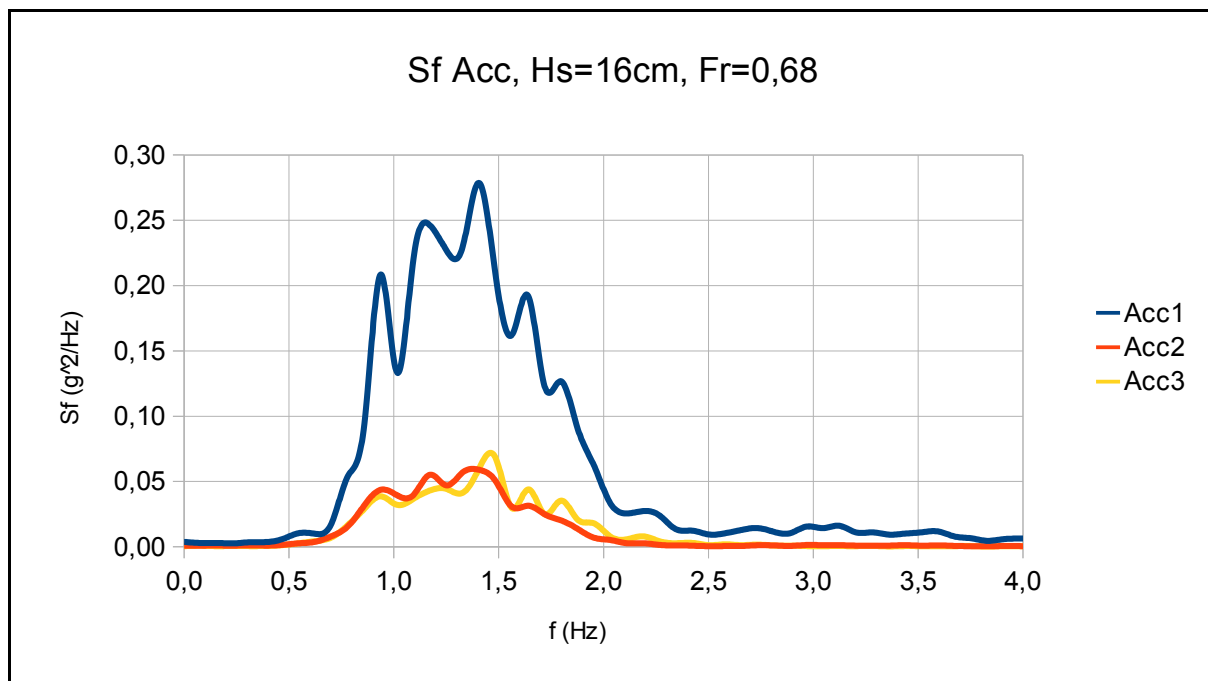
Διάγραμμα 5.39.



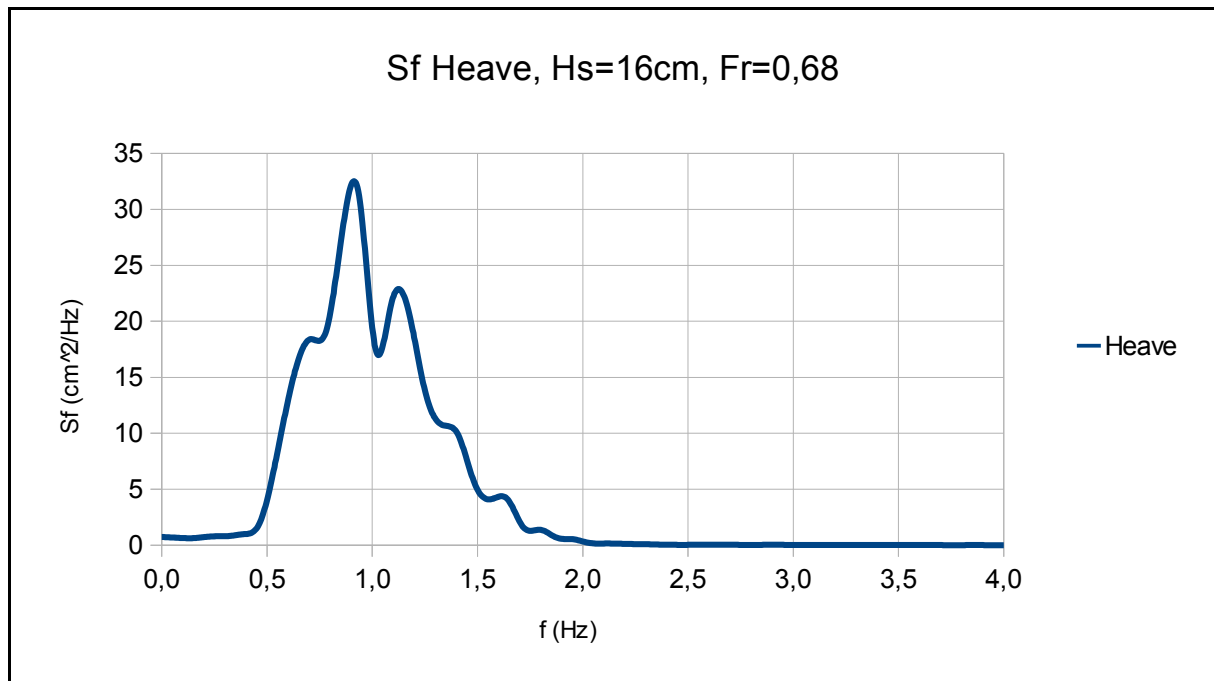
Διάγραμμα 5.40.



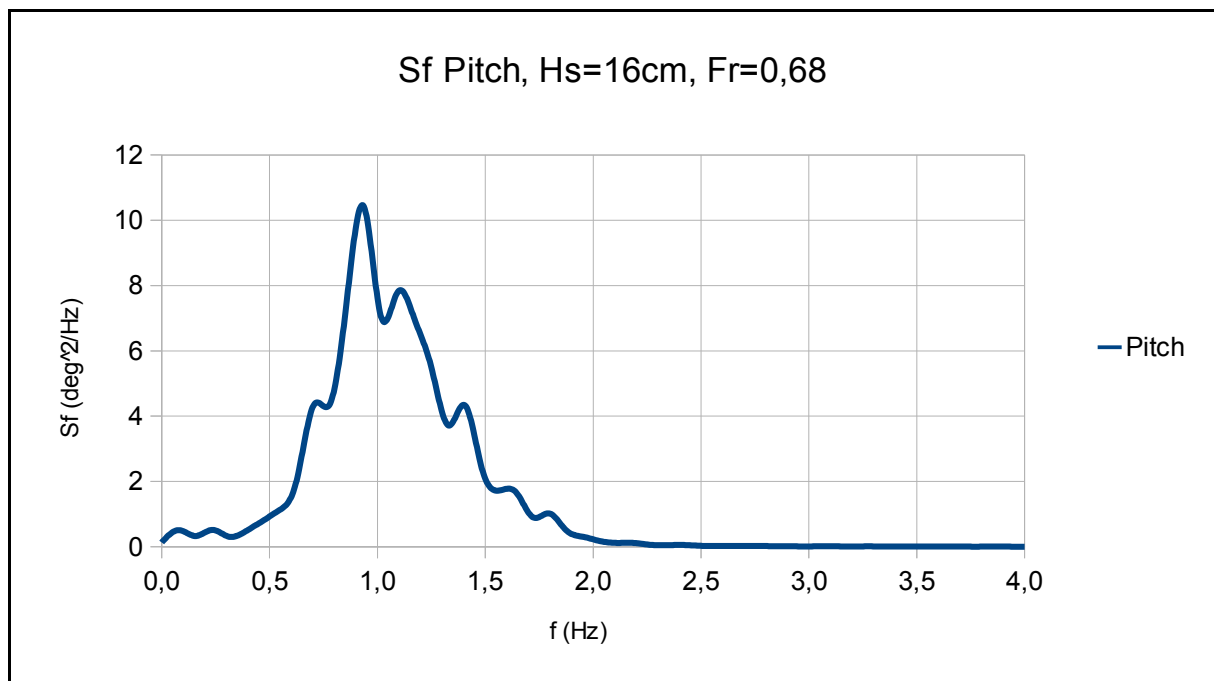
Διάγραμμα 5.41.



Διάγραμμα 5.42.



Διάγραμμα 5.43.



Διάγραμμα 5.44.

## 5.2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΙΜΩΝ RMS ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ

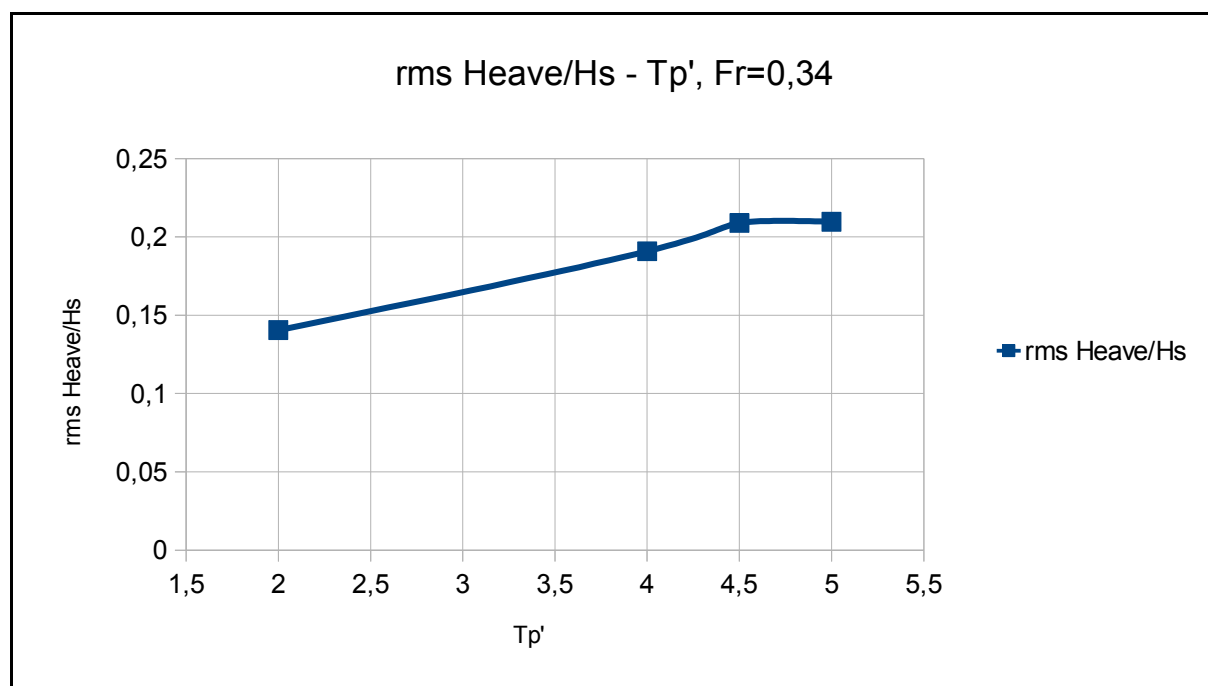
Εδώ παρουσιάζονται τα εξής διαγράμματα για τις δύο ταχύτητες:

**1) RMS τιμή Heave** διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  (cm/cm) συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $T_p'$ ), διαγράμματα 5.45, 5.50.

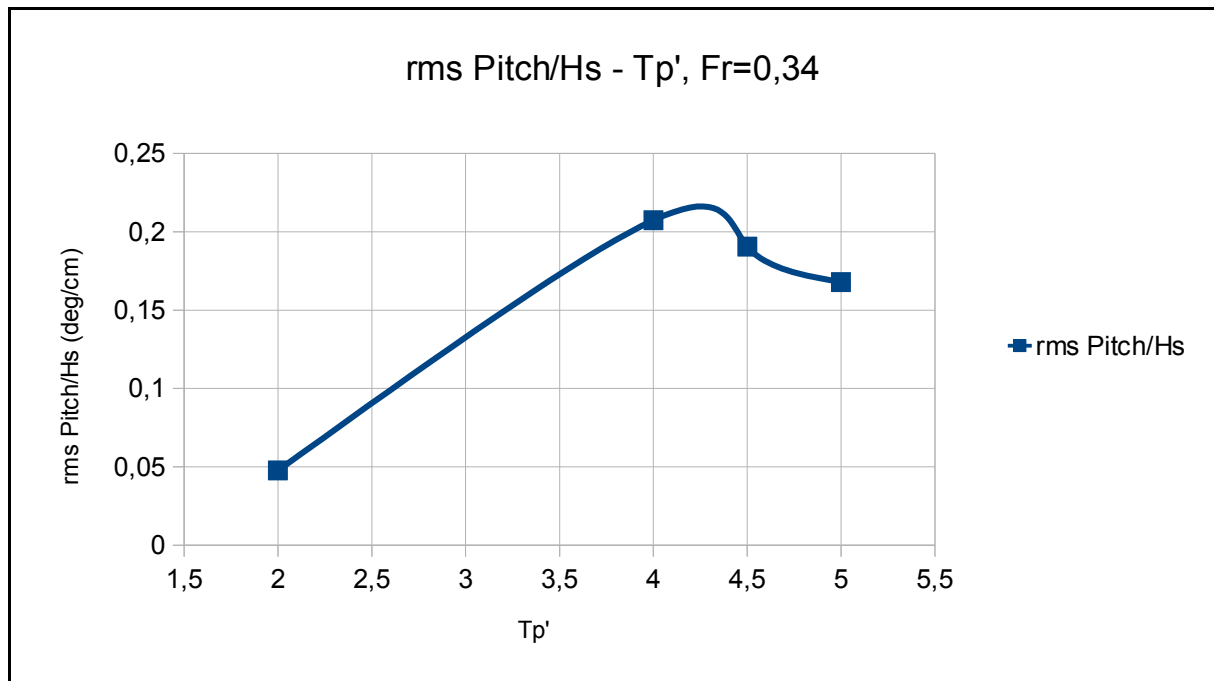
**2) RMS τιμή Pitch** διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  (deg/cm) συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $T_p'$ ), διαγράμματα 5.46, 5.51.

**3) RMS τιμές κατακόρυφων επιταχύνσεων** (bow, mid, stern) διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s$  (g/cm) συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $T_p'$ ), διαγράμματα 5.47 – 5.49, 5.52 – 5.54.

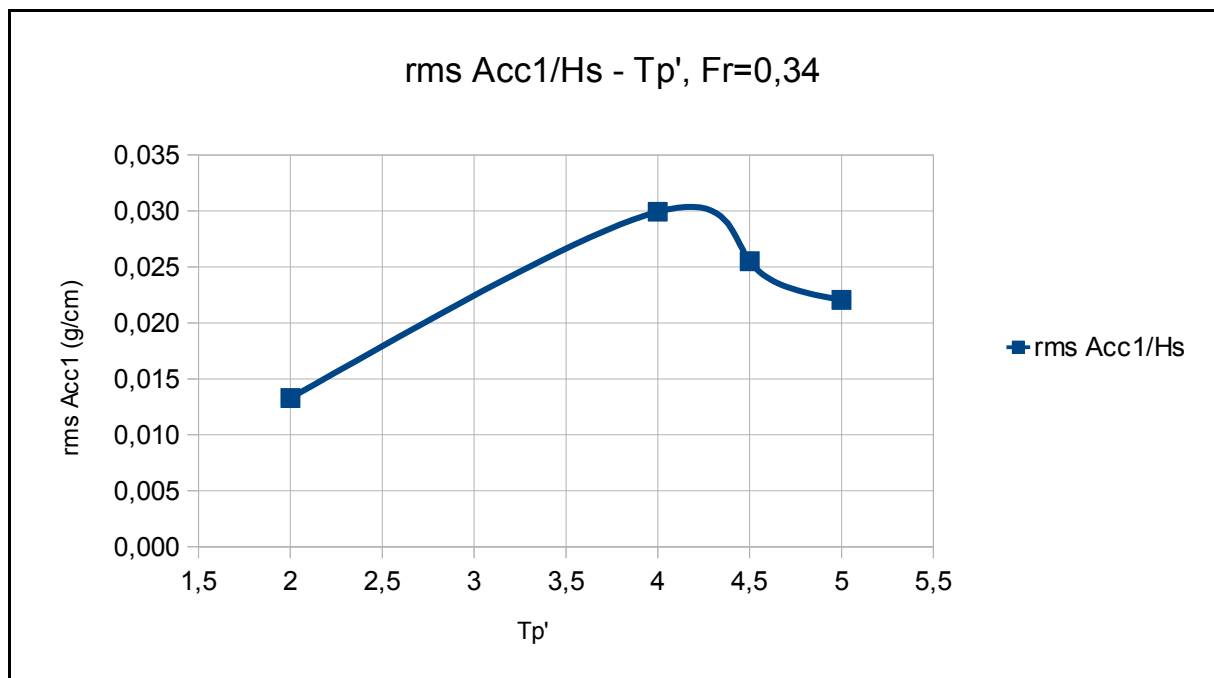
Χρησιμοποιούμε την αδιάστατη περίοδο κορυφής  $T_p'$  ώστε να εκτιμώνται τα αποτελέσματα ανεξαρτήτως διαστάσεων προτύπου. Επιπλέον, η αναγωγή ως προς  $H_s$  γίνεται ώστε να έχουμε καλύτερη συγκριτική εποπτεία απόκρισης – διέγερσης.



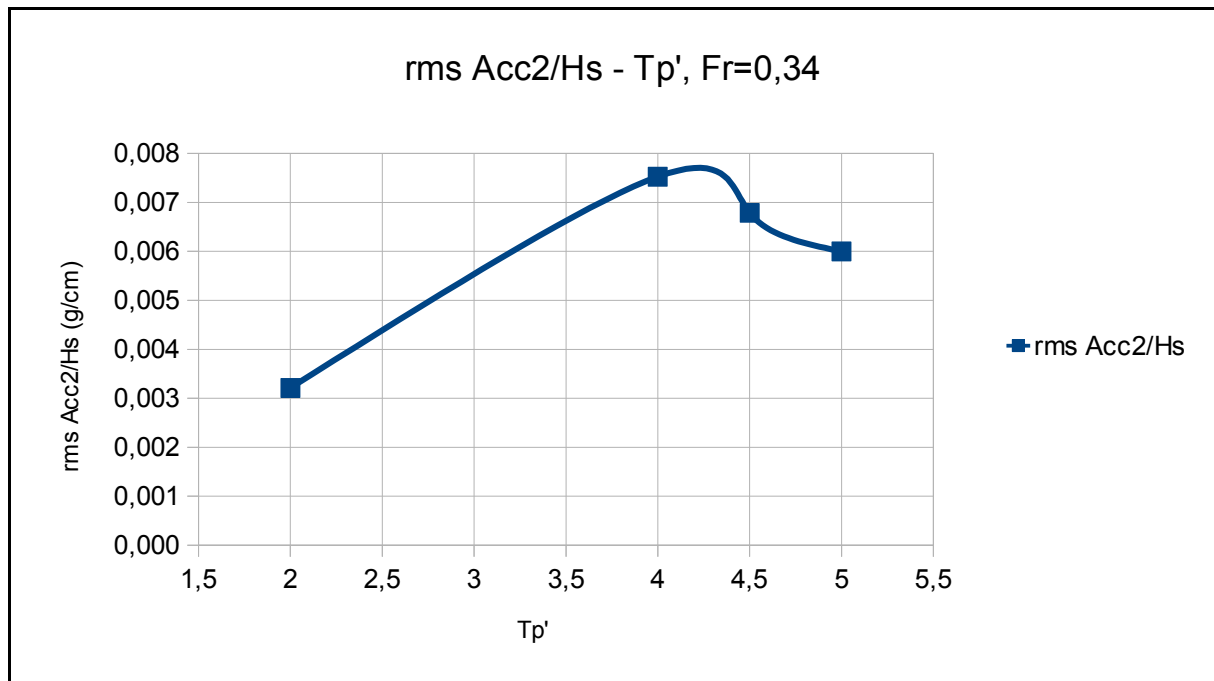
Διάγραμμα 5.45.



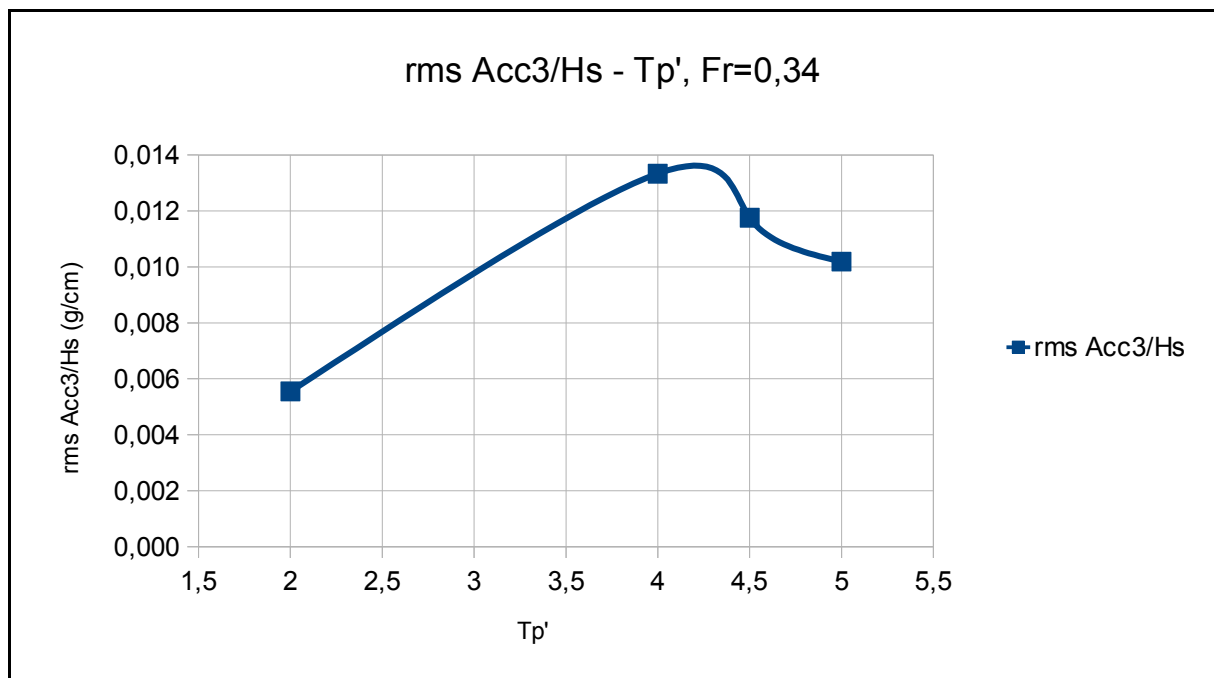
Διάγραμμα 5.46.



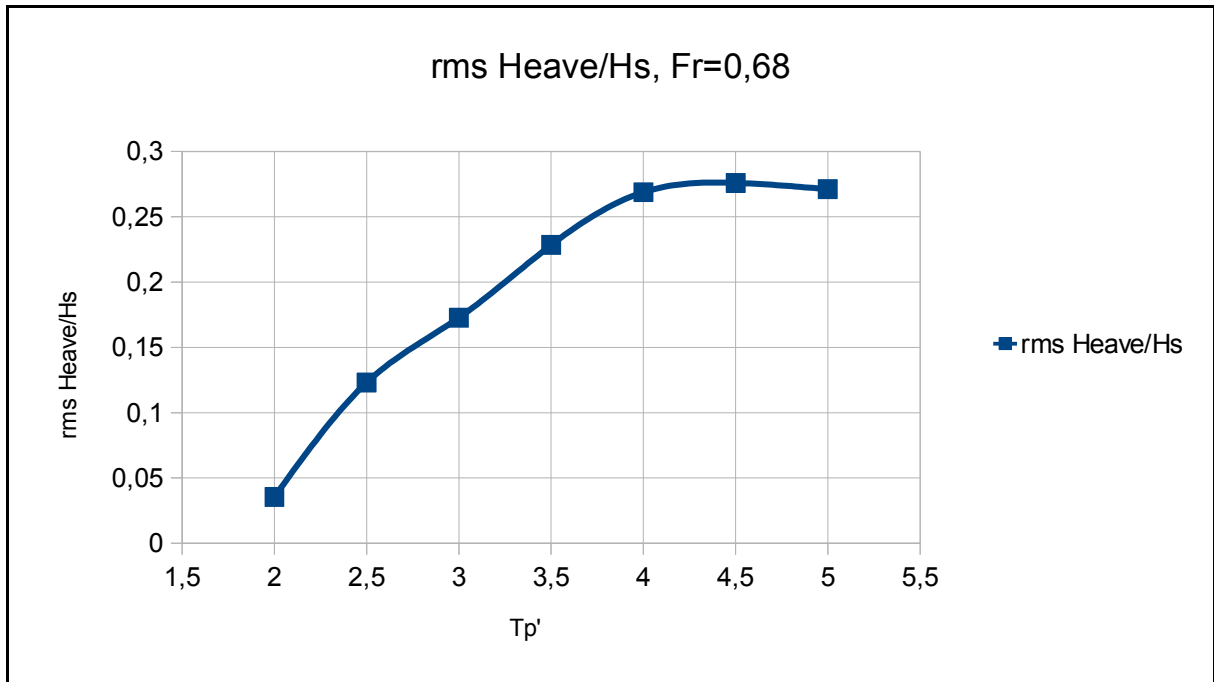
Διάγραμμα 5.47.



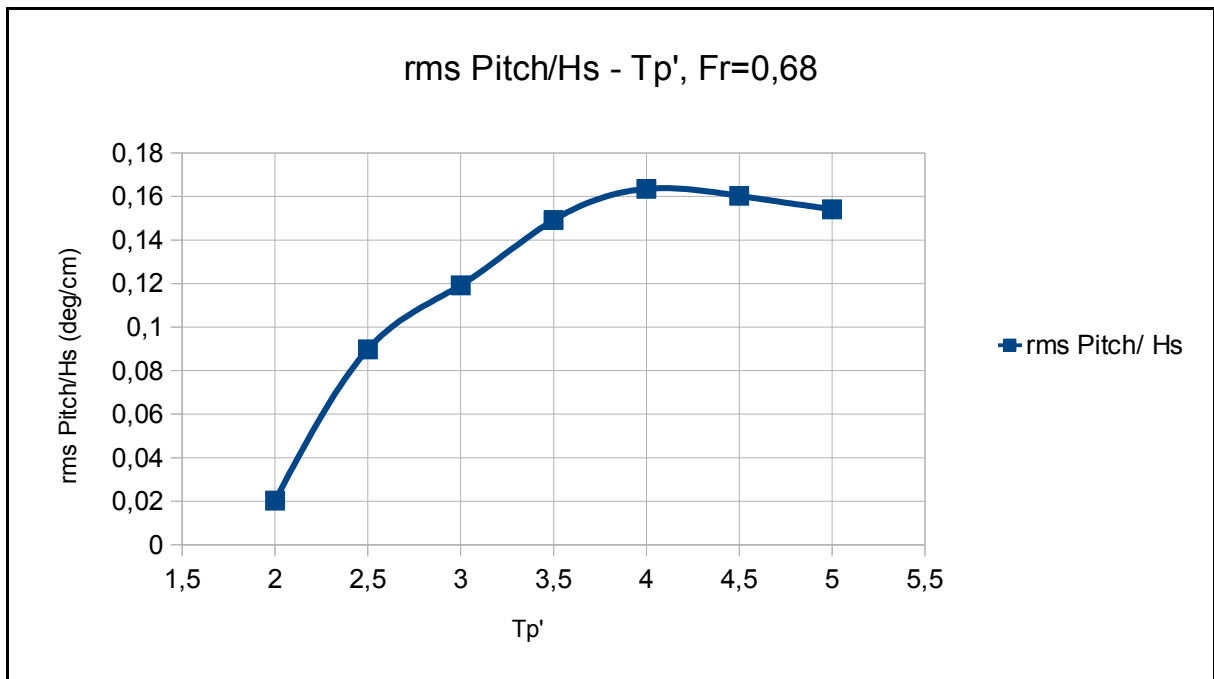
Διάγραμμα 5.48.



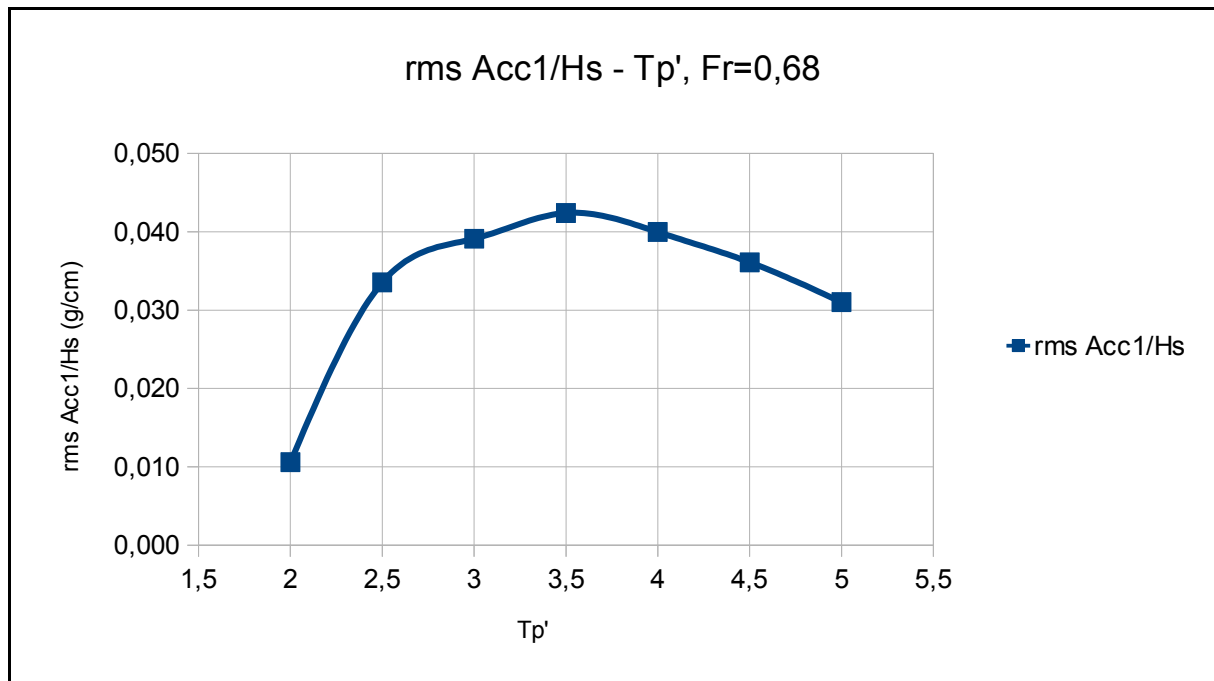
Διάγραμμα 5.49.



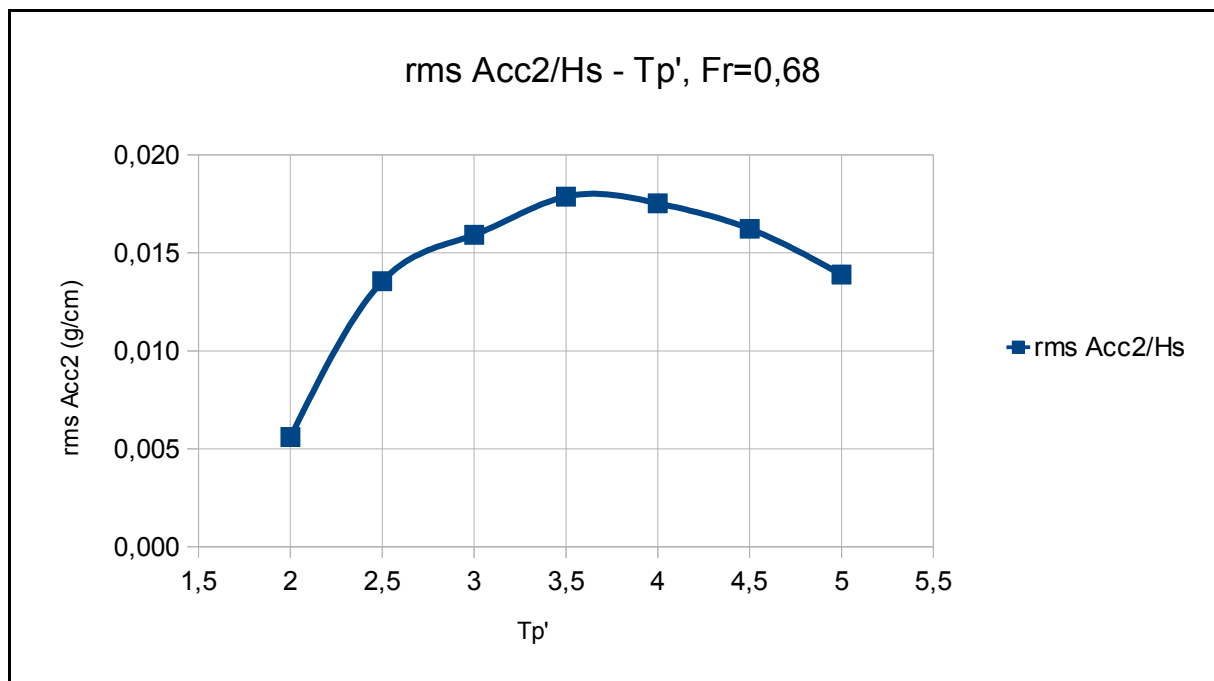
Διάγραμμα 5.50.



Διάγραμμα 5.51.

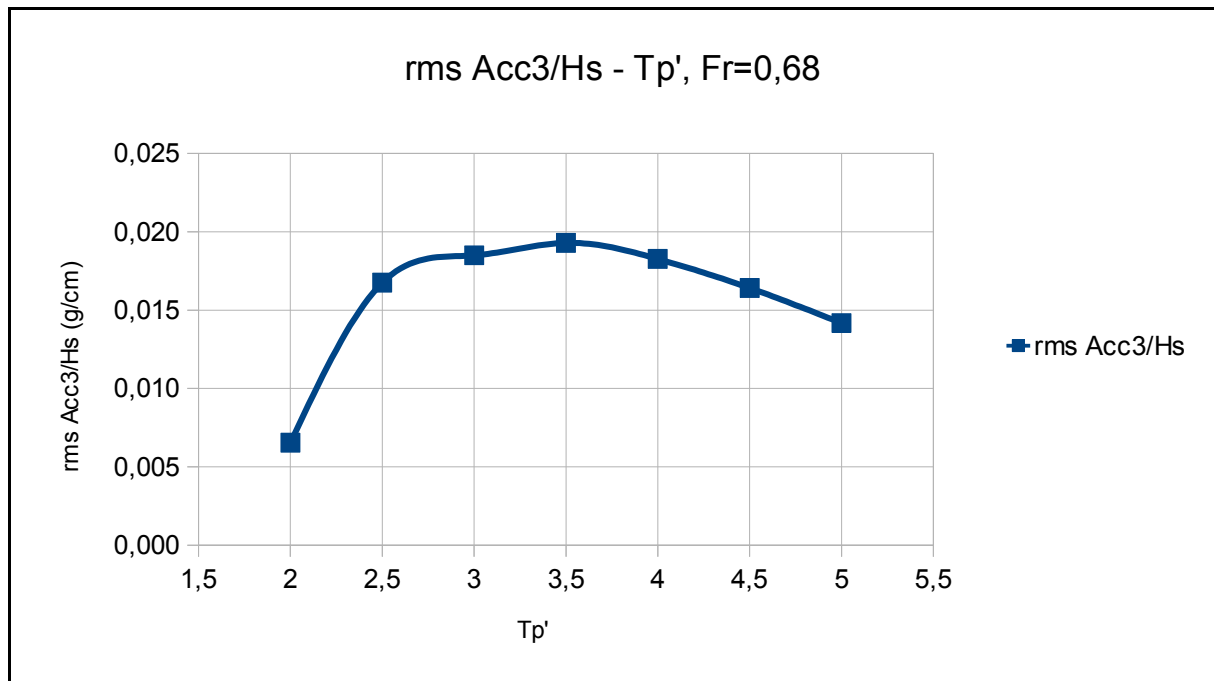


Διάγραμμα 5.52.



Διάγραμμα 5.53.

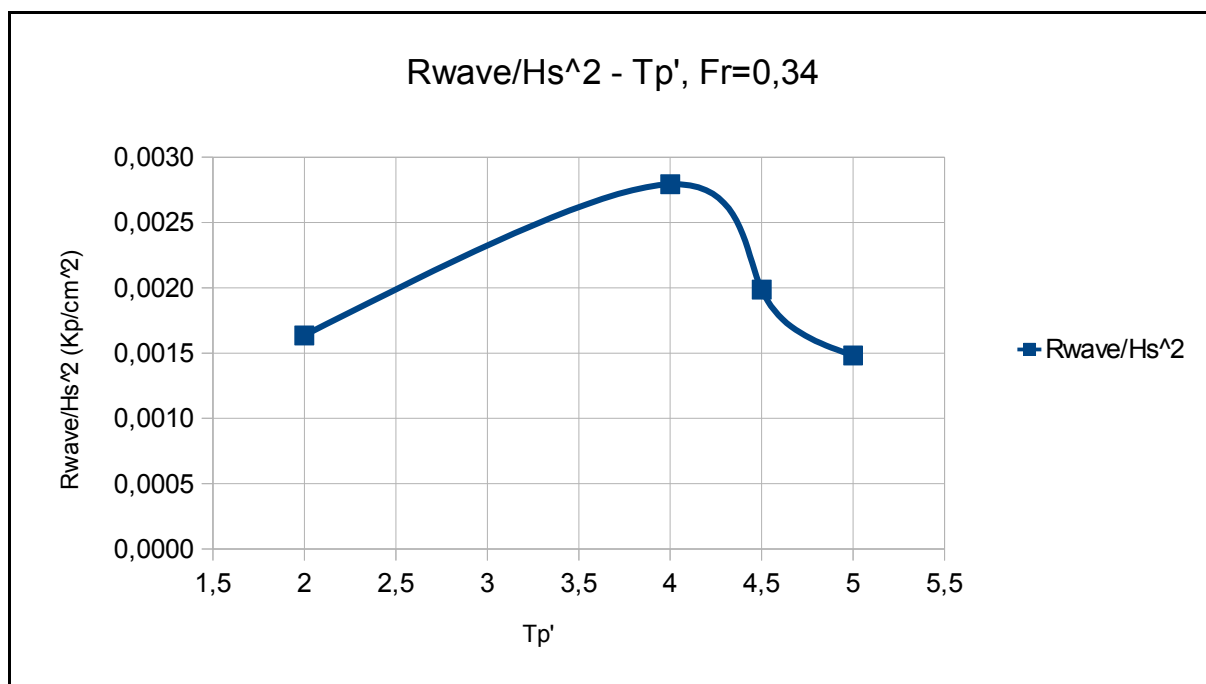




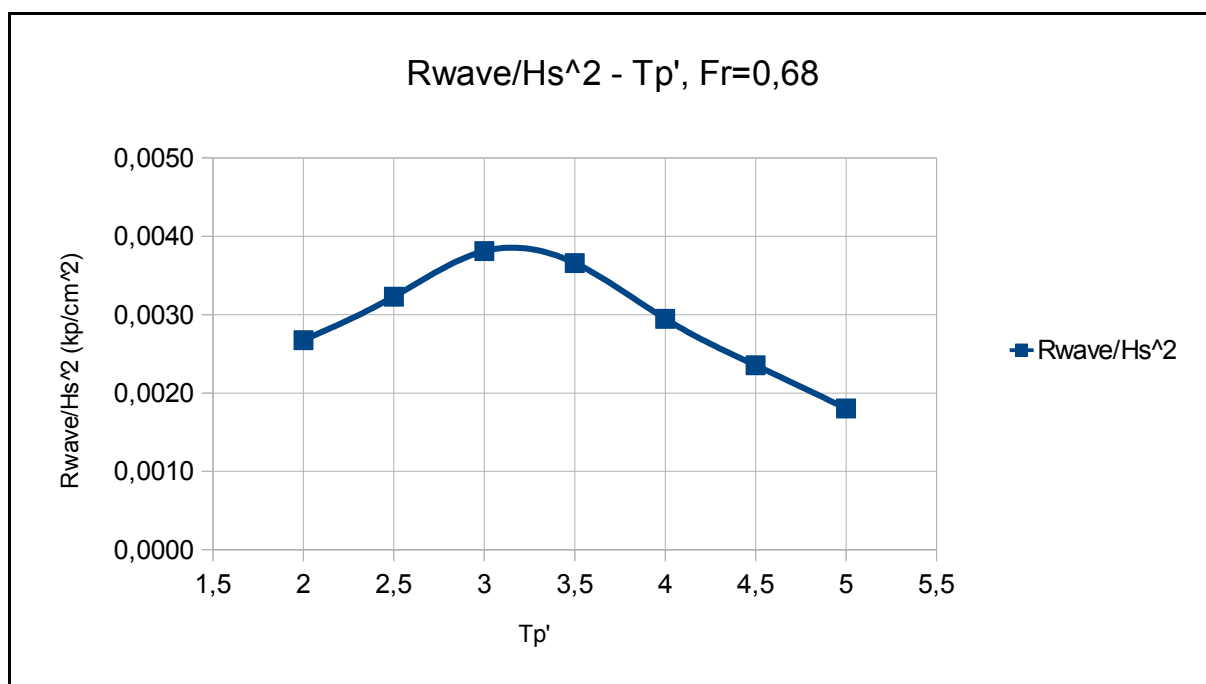
Διάγραμμα 5.54.

### 5.3. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Στα διαγράμματα 5.55, 5.56 απεικονίζονται (και για τις δύο ταχύτητες) οι τιμές πρόσθετης αντίστασης (Added Resistance) διαιρεμένης με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος  $H_s$  ( $\text{kp/cm}^2$ ) συναρτήσει της αδιάστατης περιόδου κορυφής ( $T_p'$ ).



Διάγραμμα 5.55.



Διάγραμμα 5.56.

#### **5.4. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (RAO) ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΗΜΙΤΟΝΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ**

Στην παράγραφο αυτή θα συγκρίνουμε διαγραμματικά μεταξύ τους:

- Τις συναρτήσεις μεταφοράς (RAO) που προέκυψαν από πειράματα ημιτονικών κυματισμών του μοντέλου 097/94

- Τις αντίστοιχες συναρτήσεις RAO που προέκυψαν από εφαρμογή της γραμμικής θεωρίας (Κεφάλαιο 1) για τους τυχαίους κυματισμούς των πειραμάτων μας.

Σε πρώτη φάση, είναι αναγκαίο να μετατραπούν τα κινούμενα φάσματα  $S(f_e)$  και συχνότητας  $f_e$  για τις αποκρίσεις Heave, Pitch και Vertical Accelerations σε ακίνητα φάσματα  $S(f_0)$  συχνότητας  $f_0$  μέσω των σχέσεων 5.1, 5.2:

$$f_0 = \frac{-\frac{1}{2\pi} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 + 4 \frac{V}{g} \frac{f_e}{2\pi}}}{\frac{2V}{g}} \quad (5.1)$$

$$S(f_0) = S(f_e) \left(1 + \frac{4\pi f_0}{g} V\right) \quad (5.2)$$

όπου  $V$  η ταχύτητα του σκάφους και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η σύμβαση των προσήμων έχει ως εξής:

(+) για μετωπικούς κυματισμούς

(-) για ακολουθούντες κυματισμούς

Στη μετατροπή μας χρησιμοποιούμε το θετικό πρόσημο για μετωπικούς κυματισμούς.

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τα RAO μέσω των σχέσεων της γραμμικής υπέρθεσης (ο δείκτης 0 παραλείπεται για λόγους απλότητας):

### **RAO Heave**

$$S_{heave}(f) = RAO_{heave}^2 S_{\zeta w}(f) \quad (5.3)$$

όπου  $S_{\zeta w}(f)$  το φάσμα του κυματισμού σε  $cm^2/Hz$ .

Η σχέση 5.3 ως προς  $RAO_{heave}$  δίνει

$$RAO_{heave} = \sqrt{\frac{S_{heave}(f)}{S_{\zeta w}(f)}} \quad (5.4)$$

### **RAO Pitch**

$$S_{pitch}(f) = RAO_{pitch}^2 S_{\alpha w}(f) \quad (5.5)$$

όπου  $S_{\alpha w}(f)$  το φάσμα του κυματισμού σε  $rad^2/Hz$  και

$$S_{\alpha w}(f) = k^2 S_{\zeta w}(f) \quad (5.6)$$

όπου  $k=\omega^2/g$  ο κυματικός αριθμός.

Συνεπώς έχουμε

$$RAO_{pitch} = \frac{1}{k^2} \sqrt{\frac{S_{pitch}(f)}{S_{\zeta w}(f)}} \quad (5.7)$$

### **RAO Accelerations**

$$S_{Acc}(f) = \frac{1}{L_{WL}^2} RAO_{Acc}^2 S_{\zeta w}(f) \quad (5.8)$$

όπου  $L_{WL}$  το μήκος ισάλου του μοντέλου ( $L_{BP}$ ).

Συνεπώς έχουμε

$$RAO_{Acc} = L_{WL} \sqrt{\frac{S_{Acc}(f)}{S_{\zeta w}(f)}} \quad (5.9)$$

Τα αποτελέσματα των RAO ημιτονικών κυματισμών με τα οποία θα γίνει η σύγκριση παρουσιάζονται στους πίνακες 5.3 – 5.4:

**Fn=0.34**

			bow	mid	stern
<b><math>\lambda/LwL</math></b>	<b>RAOheave</b>	<b>RAO pitch</b>	<b>RAO acc1</b>	<b>RAO acc2</b>	<b>RAO acc3</b>
3,796	0,968	1,163	6,153	3,779	4,963
3,549	0,925	1,106	6,205	3,874	5,184
3,297	0,966	1,191	7,541	4,464	6,207
3,046	0,943	1,208	8,776	4,794	7,171
2,789	0,922	1,192	9,669	5,125	7,961
2,535	0,883	1,212	12,037	5,616	9,505
2,281	0,850	1,270	15,979	6,386	11,781
2,023	0,765	1,212	19,869	6,581	13,348
1,772	0,698	1,231	28,230	7,310	16,337
1,521	0,868	1,157	43,933	11,540	21,511
1,393	0,854	0,989	48,223	13,057	20,431
1,267	0,713	0,705	45,123	12,501	18,703
1,138	0,523	0,486	39,449	10,455	16,309
1,015	0,413	0,361	32,689	8,494	13,874
0,876	0,385	0,300	28,578	7,287	12,147
0,760	0,322	0,219	25,828	6,139	10,592
0,634	0,256	0,158	22,496	5,195	9,450
0,506	0,126	0,071	13,132	2,605	5,535

Πίνακας 5.3. Αποτελέσματα RAO σε ημιτονικούς κυματισμούς ( $Fr=0,34$ ).

**Fn=0.68**

			bow	mid	stern
<b><math>\lambda/LwL</math></b>	<b>RAOheave</b>	<b>RAO pitch</b>	<b>RAO acc1</b>	<b>RAO acc2</b>	<b>RAO acc3</b>
3,796	1,151	1,461	13,239	7,450	8,320
3,549	1,070	1,354	14,888	8,002	8,728
3,297	1,104	1,366	17,182	8,981	9,624
3,046	1,220	1,368	21,886	10,957	11,533
2,789	1,163	1,239	23,291	11,741	11,804
2,535	1,268	1,220	30,238	14,903	15,195
2,281	1,369	1,195	38,926	19,161	19,682
2,023	1,332	1,058	47,607	22,241	23,813
1,772	1,032	0,776	49,213	21,161	24,610
1,521	0,702	0,534	46,571	18,390	23,896
1,393	0,471	0,373	40,436	14,664	21,434
1,267	0,328	0,262	33,838	11,183	18,119
1,138	0,205	0,177	28,338	8,286	15,685
1,015	0,202	0,142	24,630	6,972	13,250
0,887	0,206	0,117	21,340	6,405	11,595
0,760	0,138	0,079	18,125	4,952	10,099
0,634	0,095	0,045	13,536	3,550	7,474
0,506	0,110	0,038	13,901	3,657	7,659

Πίνακας 5.4. Αποτελέσματα RAO σε ημιτονικούς κυματισμούς ( $Fr=0,68$ ).

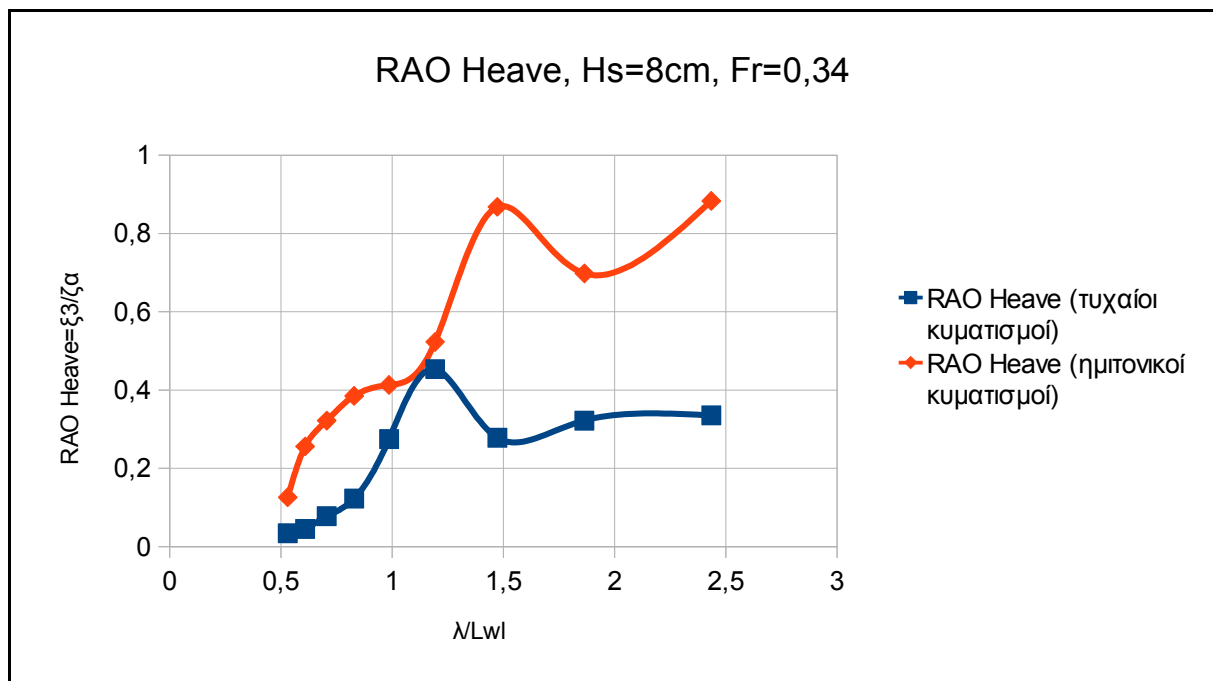
Στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς – καθώς και η σχετική σύγκριση τυχαίων/ημιτονικών κυματισμών – όσον αφορά τις εξής αποκρίσεις:

- **RAO Heave**, διαγράμματα 5.57, 5.62, 5.67, 5.72, 5.77, 5.82, 5.87, 5.92, 5.97, 5.105, 5.112.

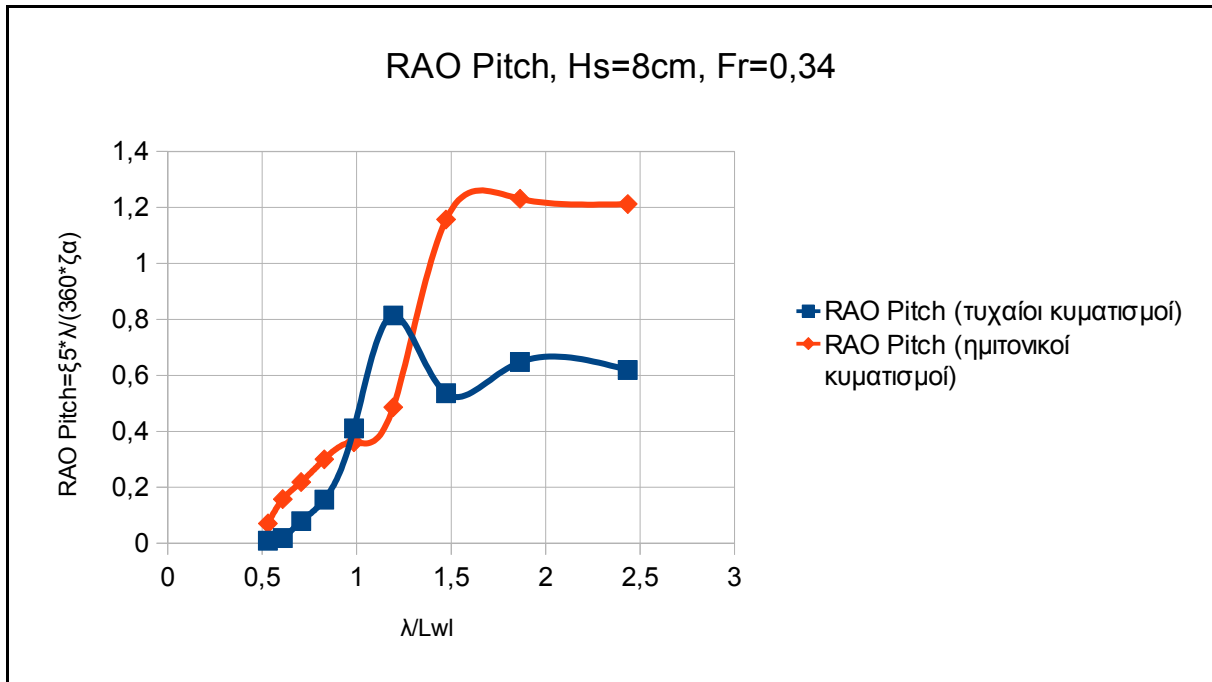
- **RAO Pitch**, διαγράμματα 5.58, 5.63, 5.68, 5.73, 5.78, 5.83, 5.88, 5.93, 5.98, 5.103, 5.108, 5.113.

- **RAO Acc1 (bow), Acc2 (mid), Acc3 (Stern)**, διαγράμματα 5.59 – 5.61, 5.64 – 5.66, 5.69 – 5.71, 5.74 – 5.76, 5.79 – 5.81, 5.84 – 5.86, 5.89 – 5.91, 5.94 – 5.96, 5.99 – 5.101, 5.104 – 5.106, 5.109 – 5.111, 5.114 – 5.116.

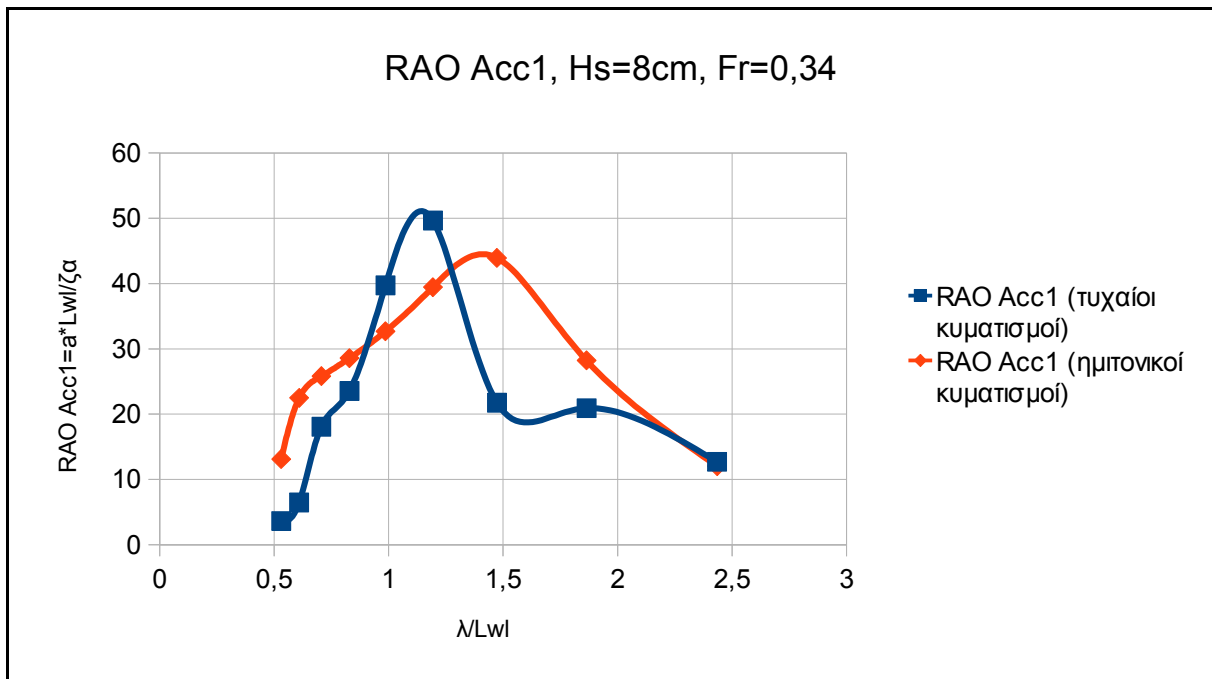
Όλες οι συναρτήσεις μεταφοράς παριστάνονται συναρτήσει του λόγου  $\lambda/Lwl$  (μήκος κύματος/μήκος ισάλου μοντέλου).



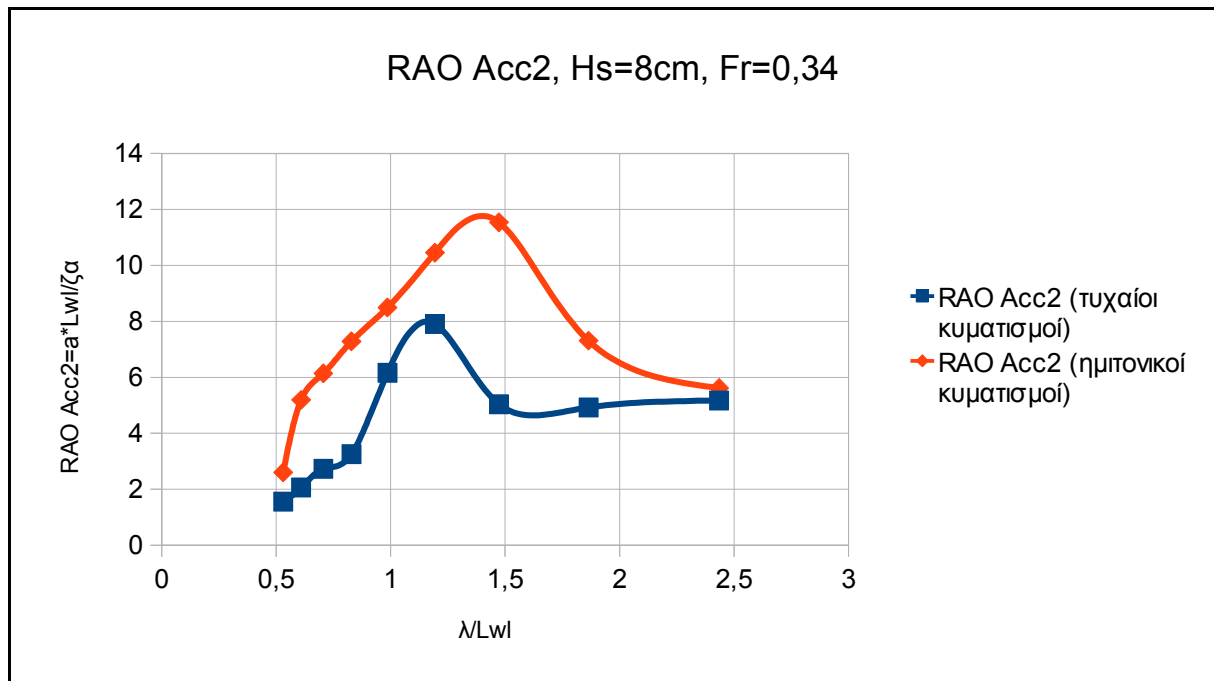
Διάγραμμα 5.57.



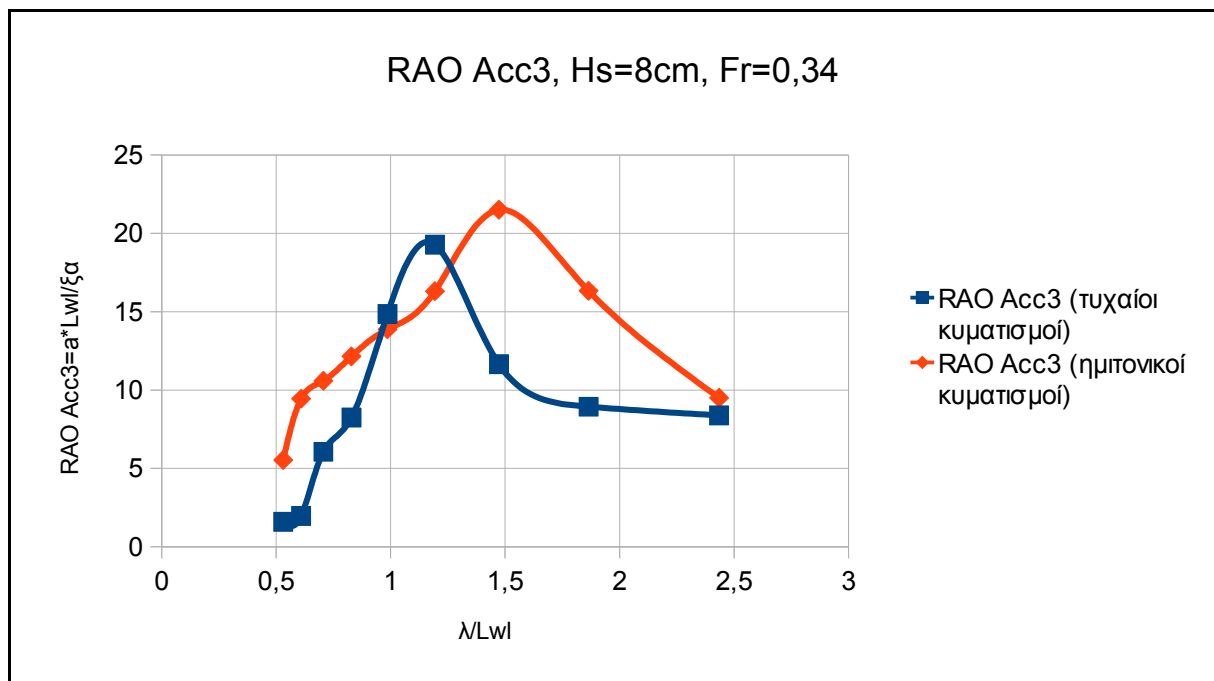
Διάγραμμα 5.58.



Διάγραμμα 5.59.

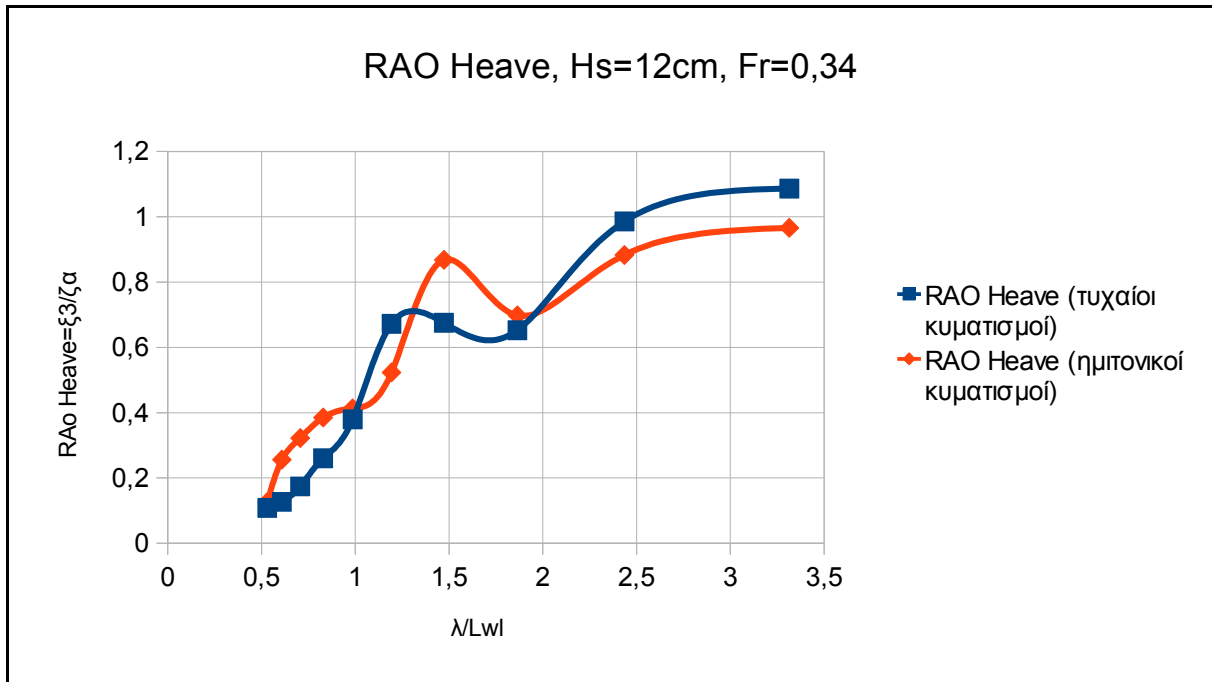


Διάγραμμα 5.60.

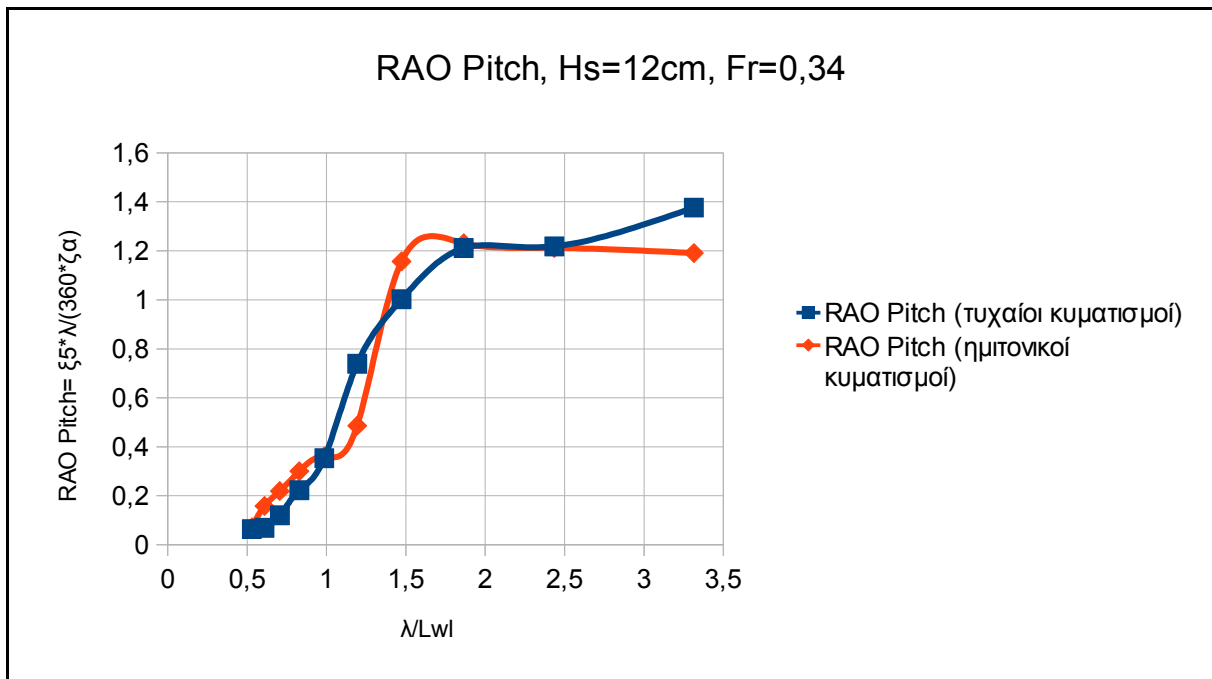


Διάγραμμα 5.61.

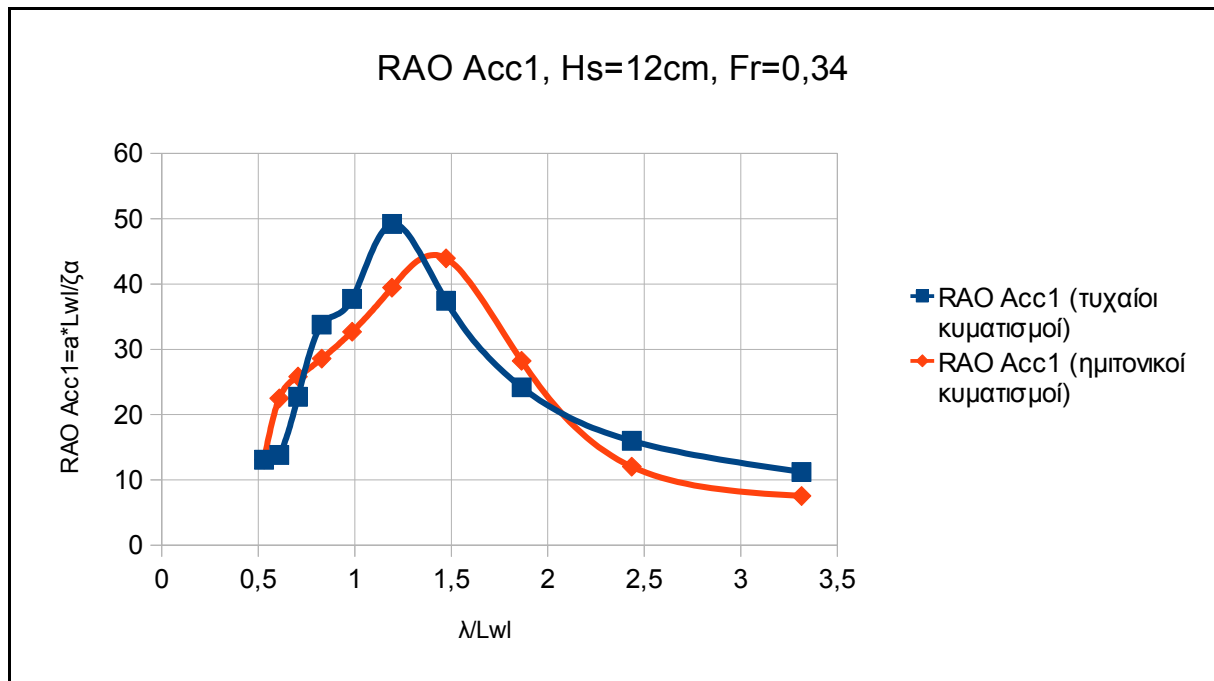




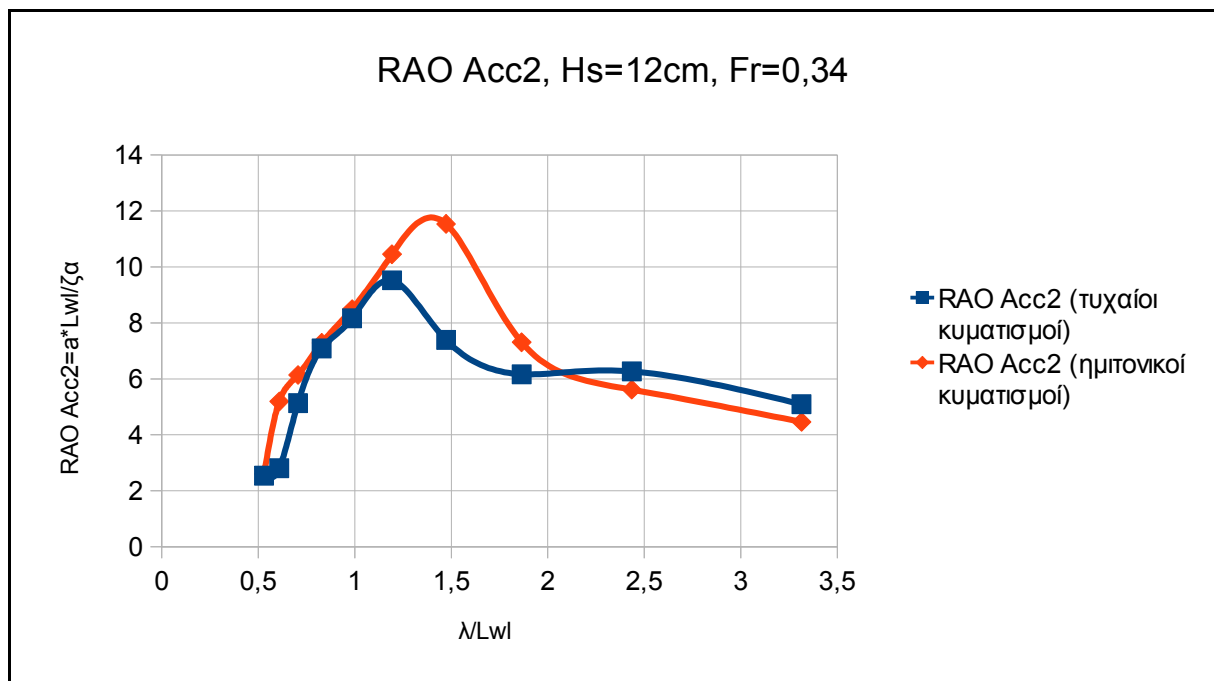
Διάγραμμα 5.62.



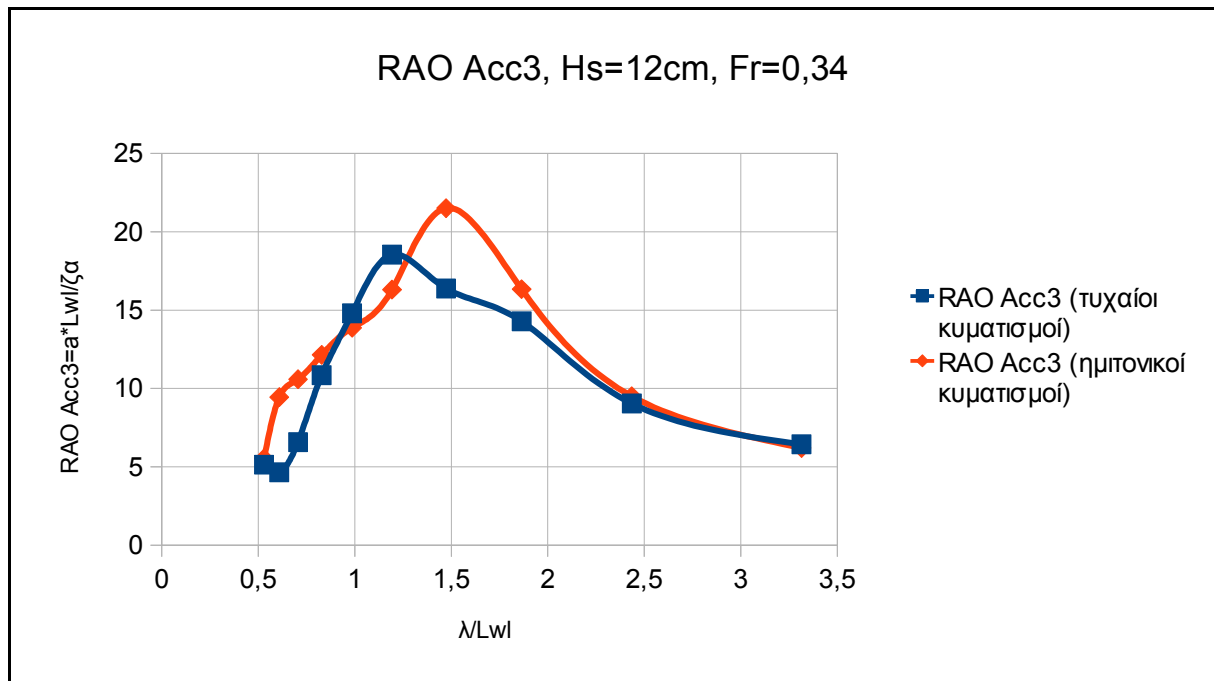
Διάγραμμα 5.63.



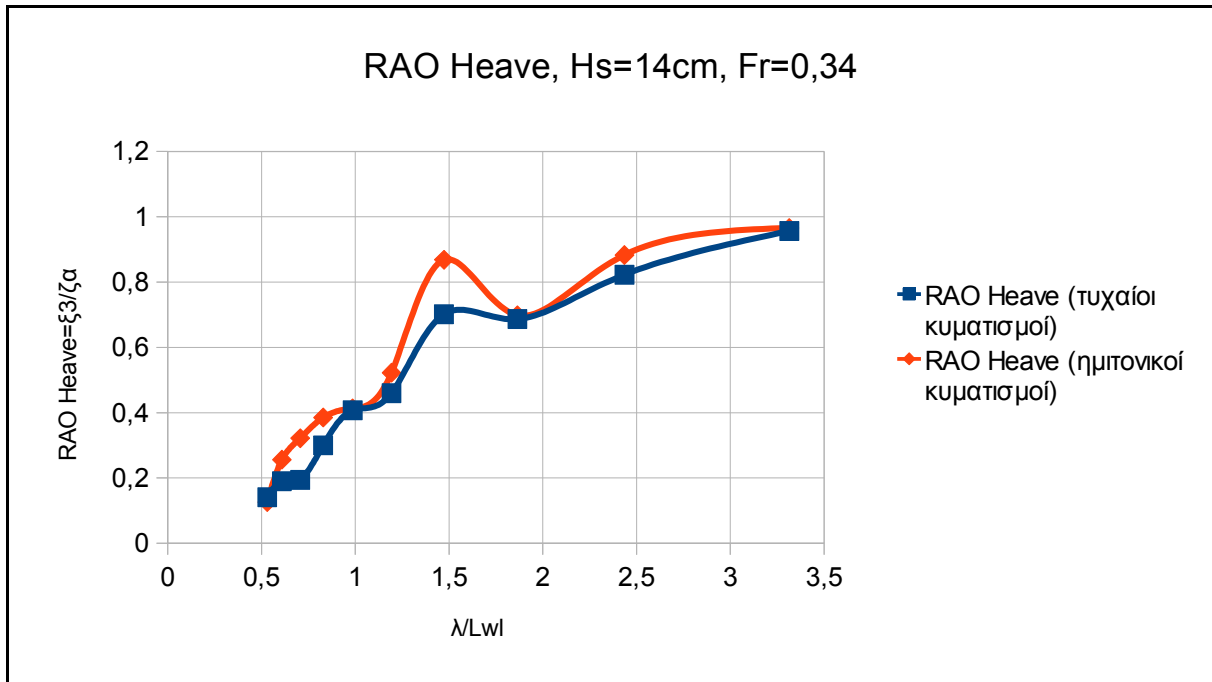
Διάγραμμα 5.64.



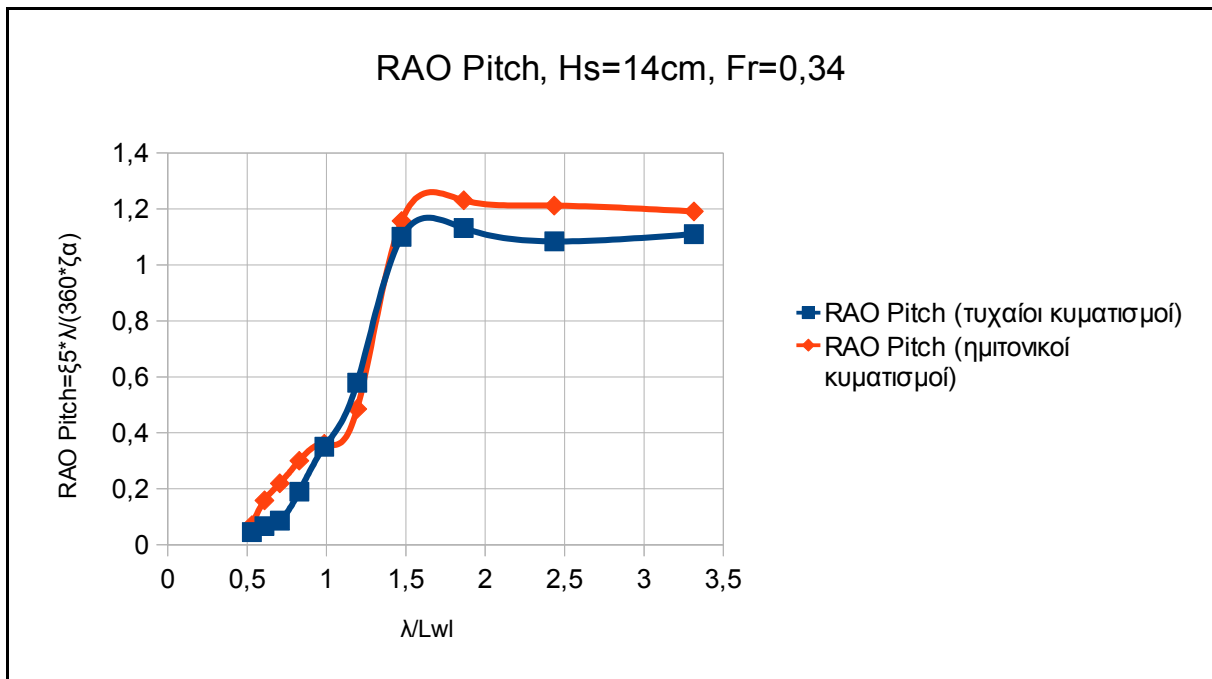
Διάγραμμα 5.65.



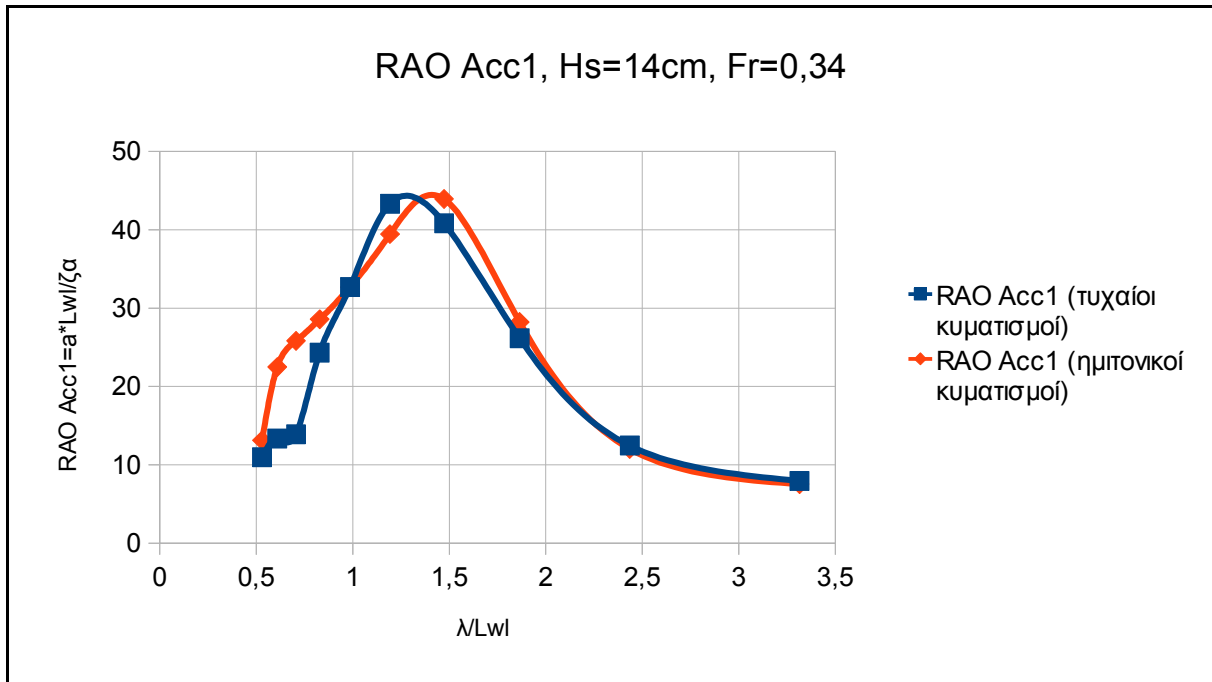
Διάγραμμα 5.66.



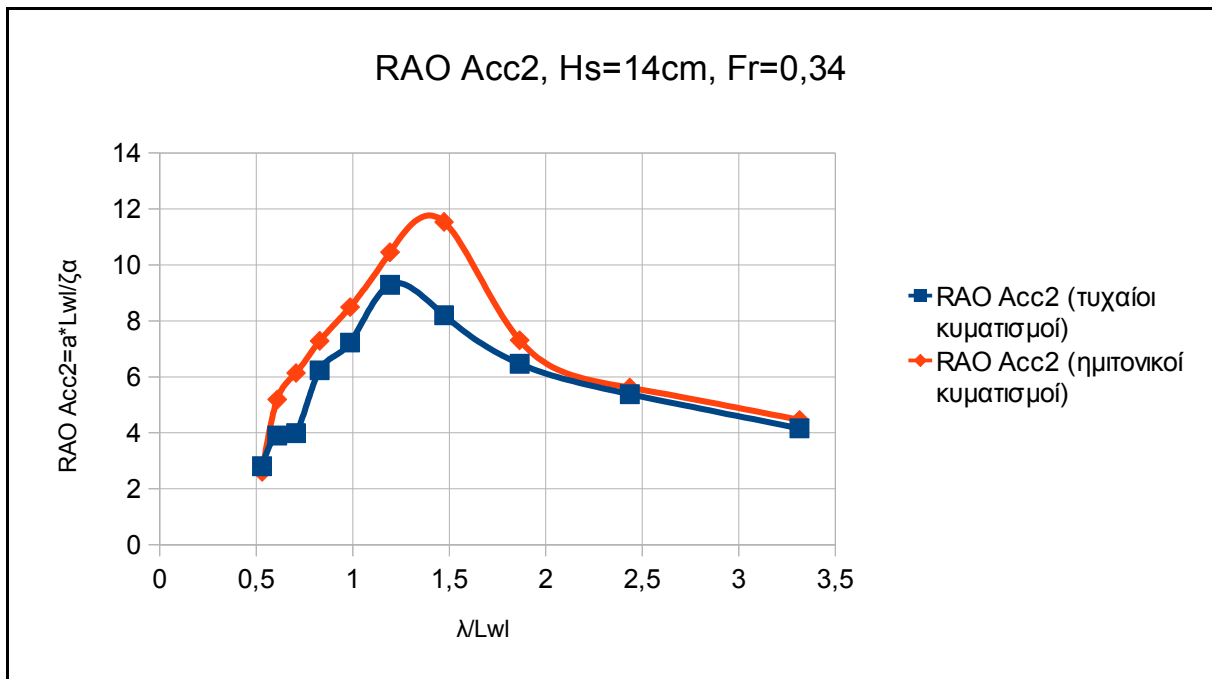
Διάγραμμα 5.67.



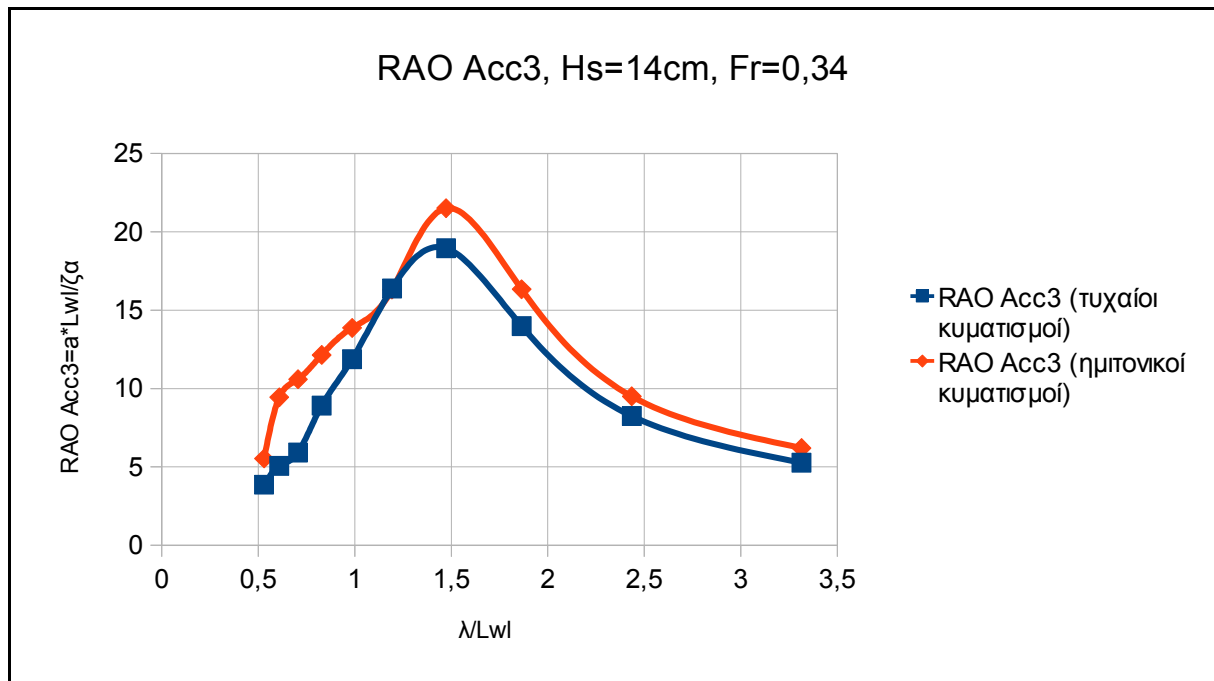
Διάγραμμα 5.68.



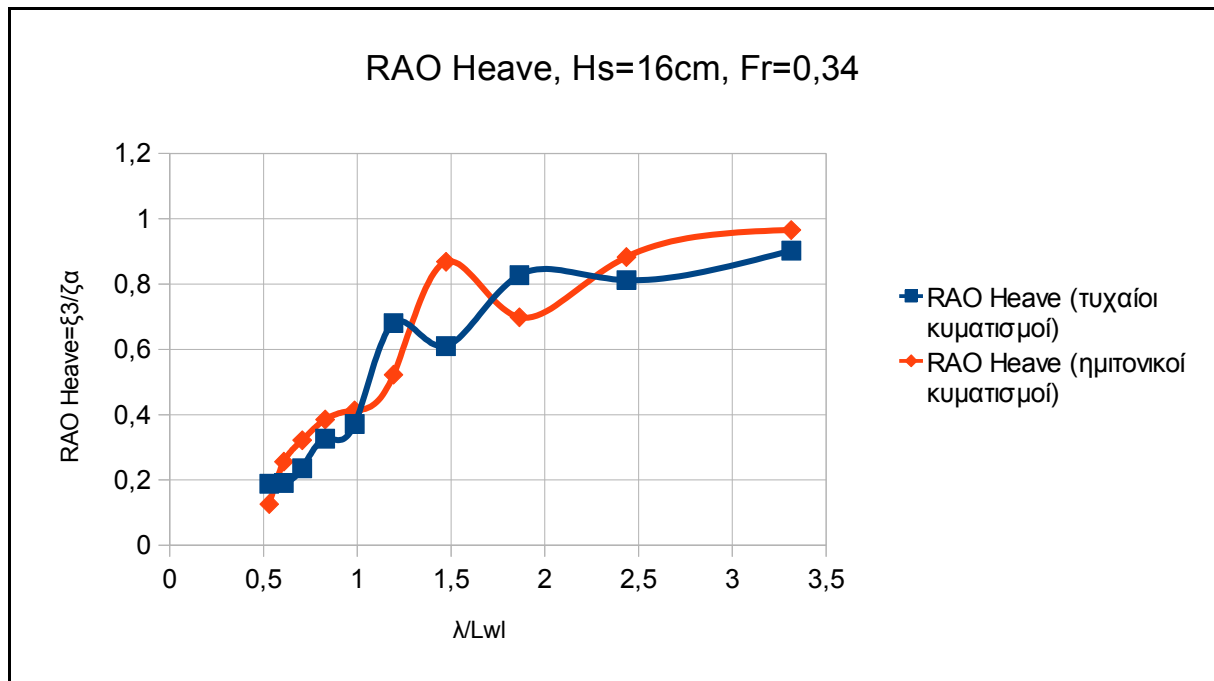
Διάγραμμα 5.69.



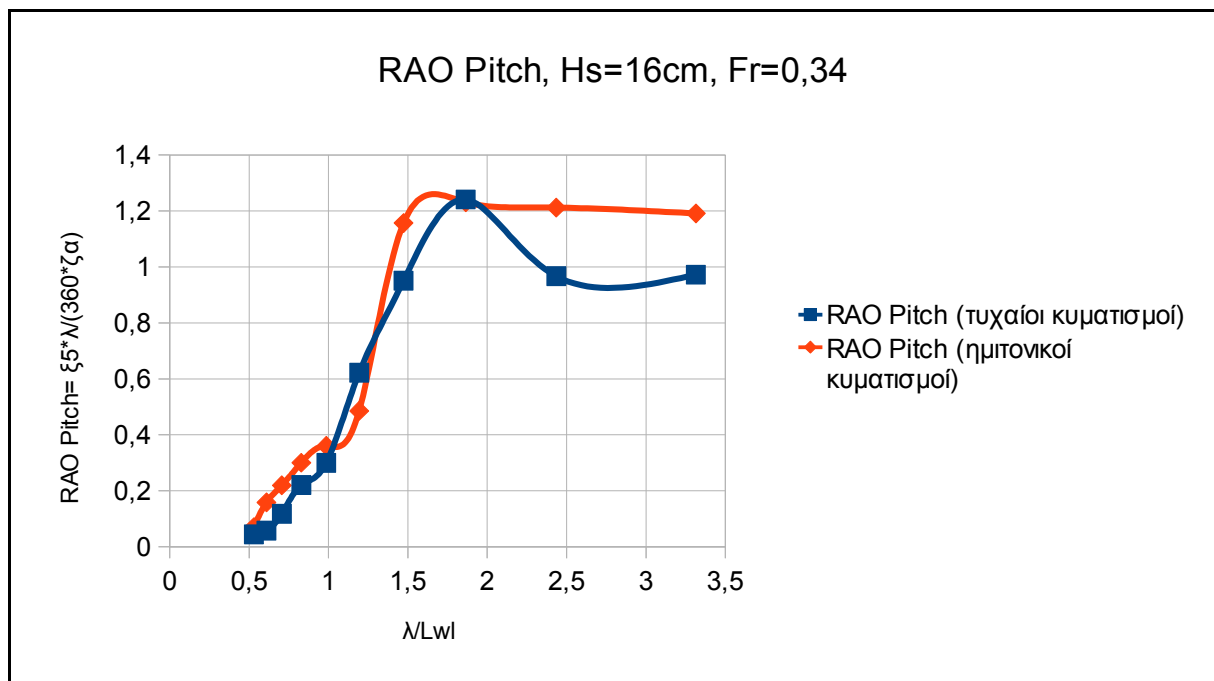
Διάγραμμα 5.70.



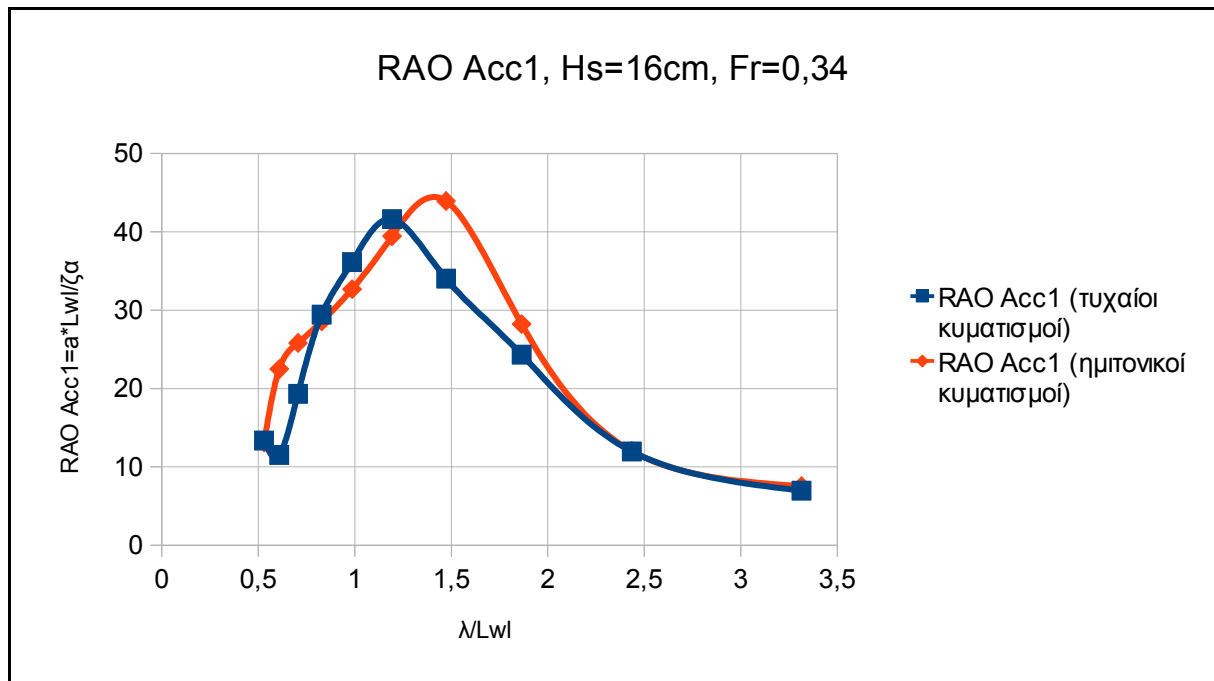
Διάγραμμα 5.71.



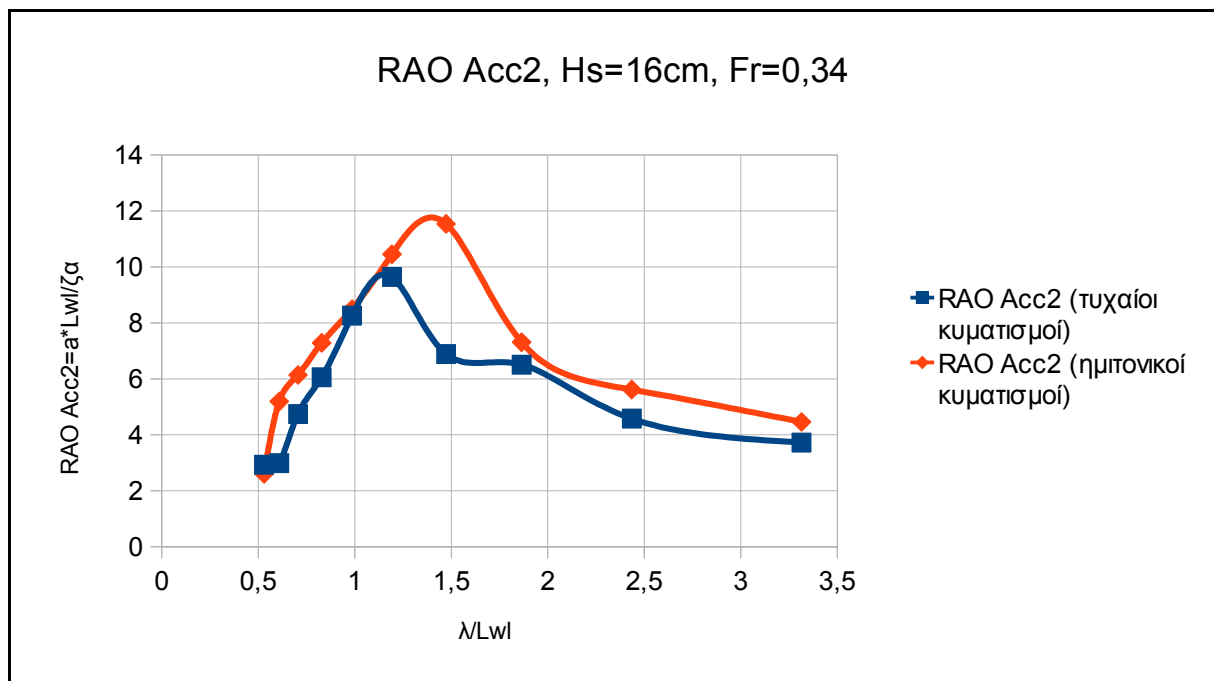
Διάγραμμα 5.72.



Διάγραμμα 5.73.

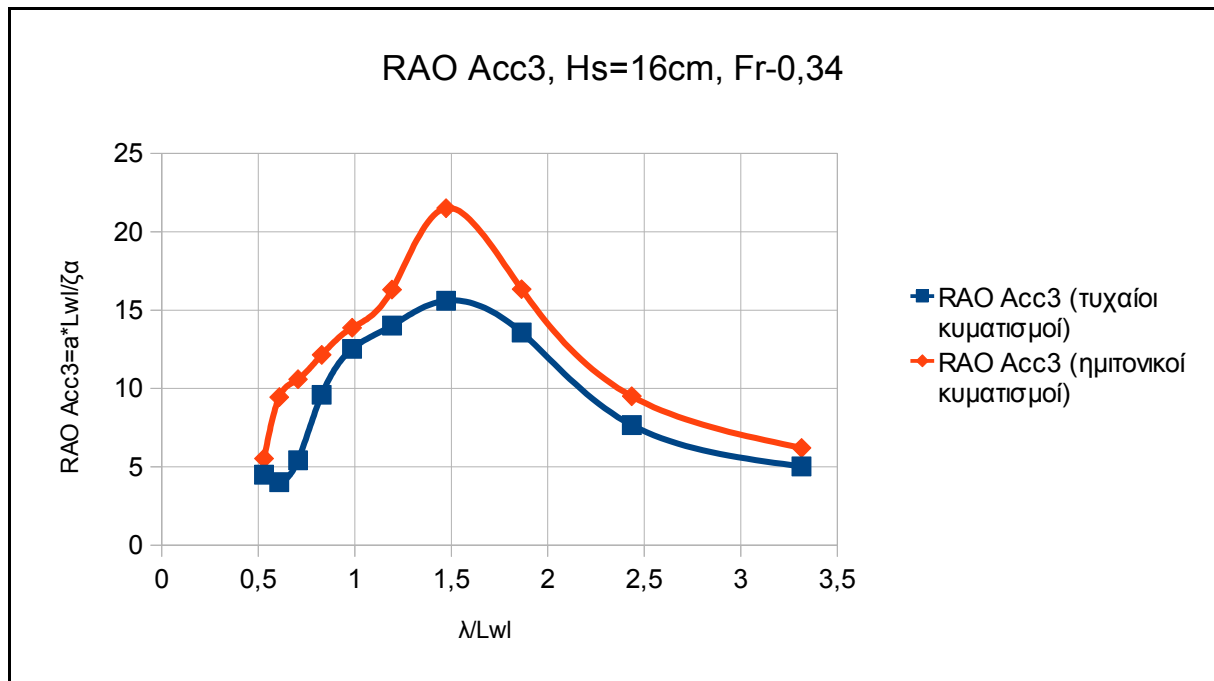


Διάγραμμα 5.74.

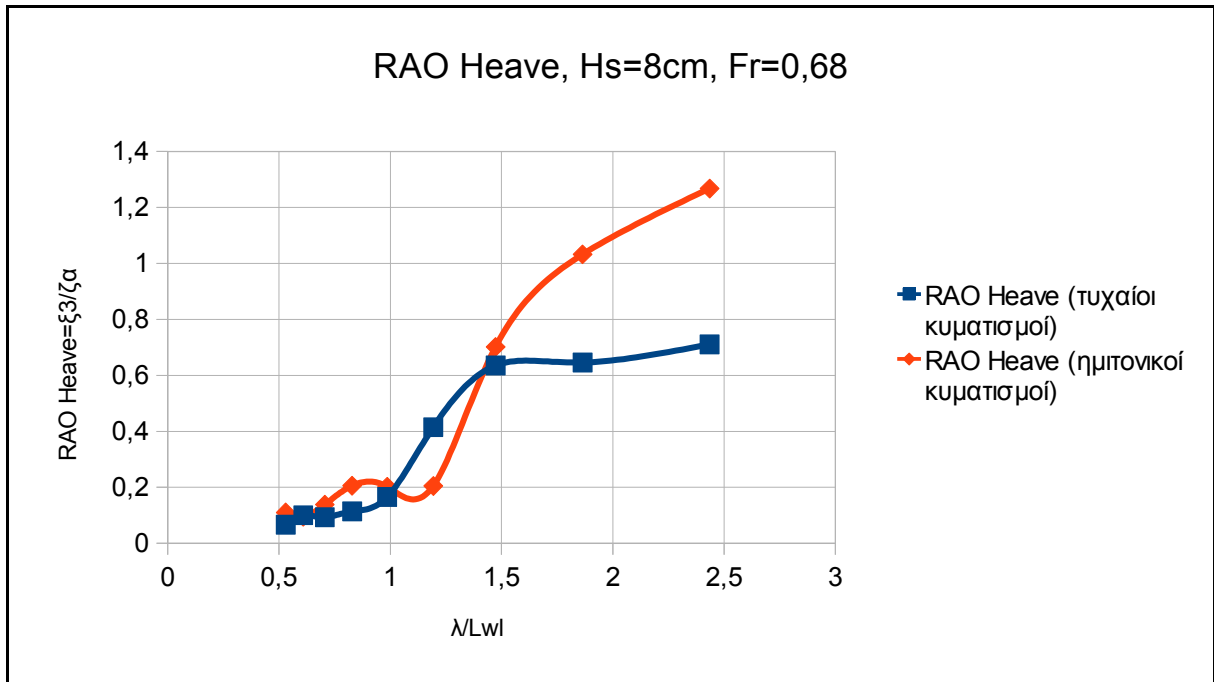


Διάγραμμα 5.75.

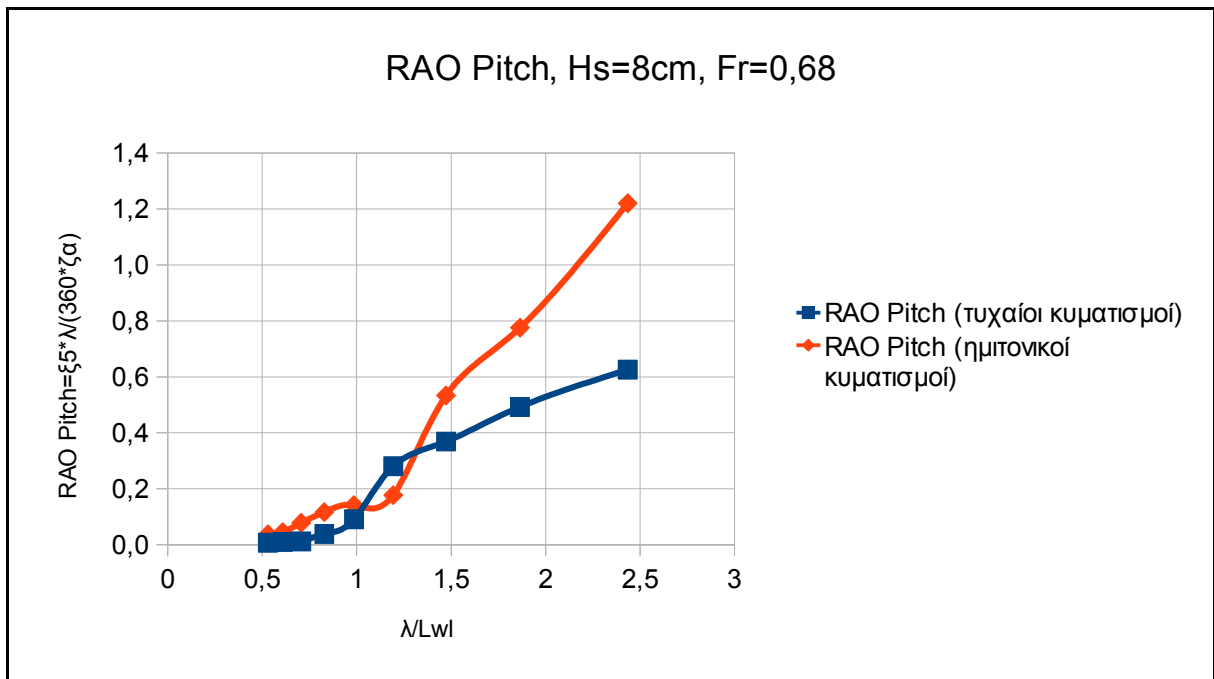




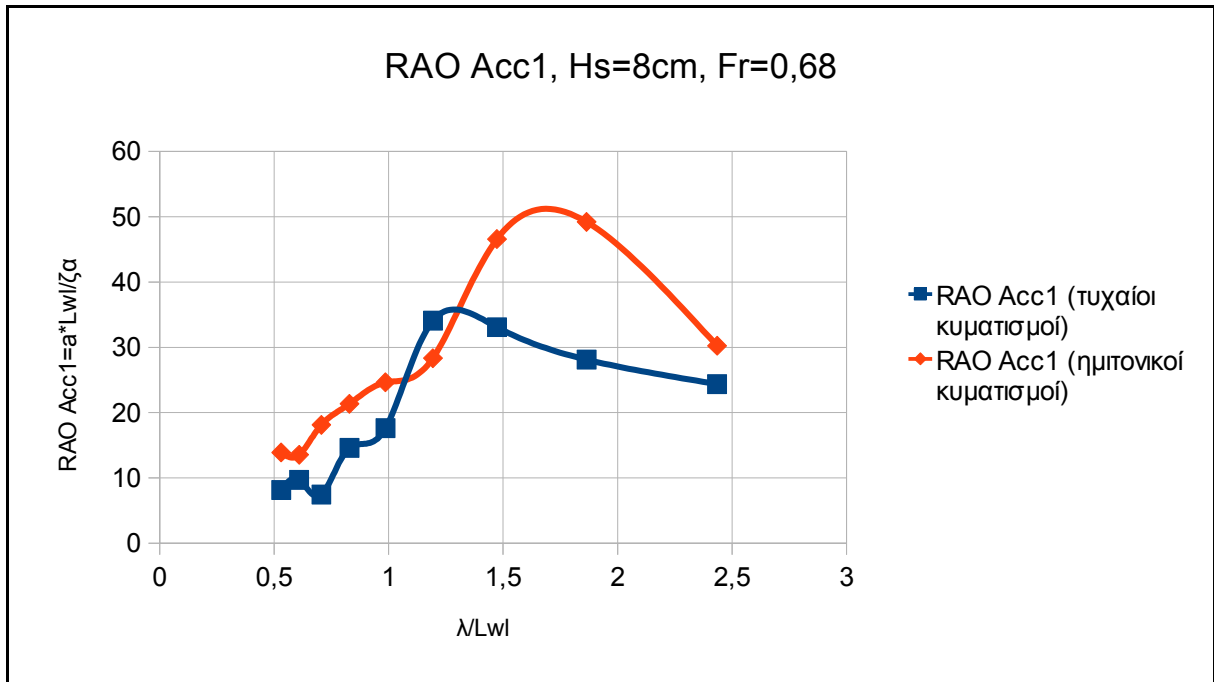
Διάγραμμα 5.76.



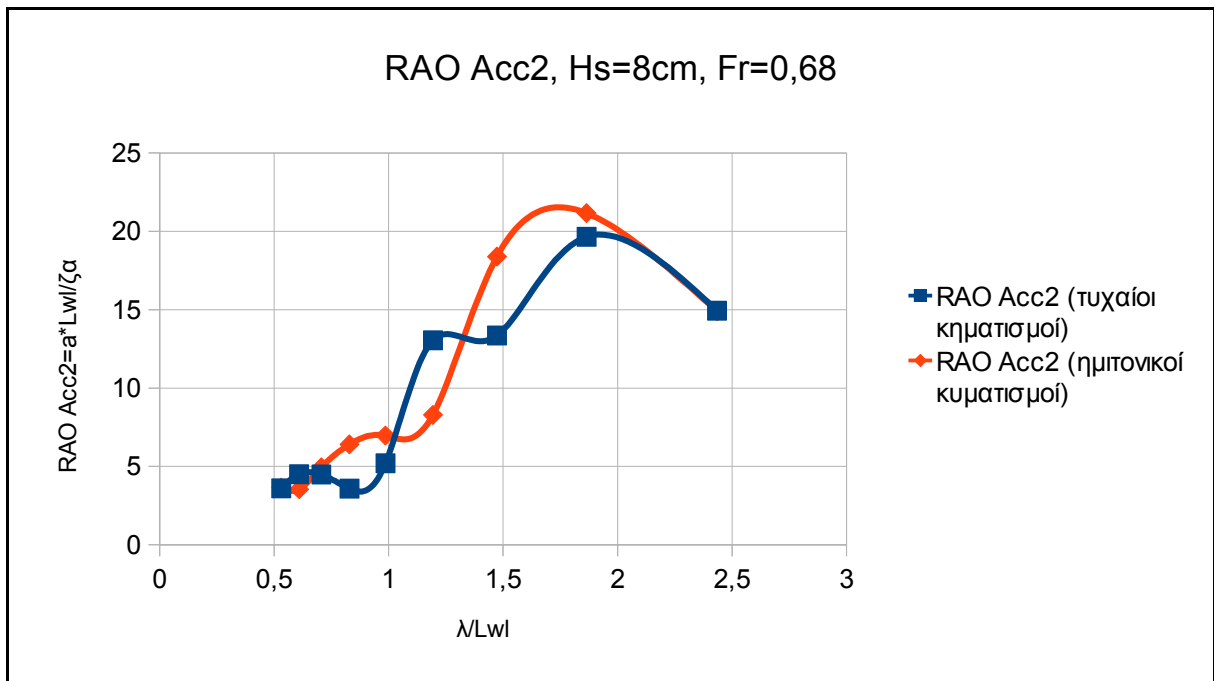
Διάγραμμα 5.77.



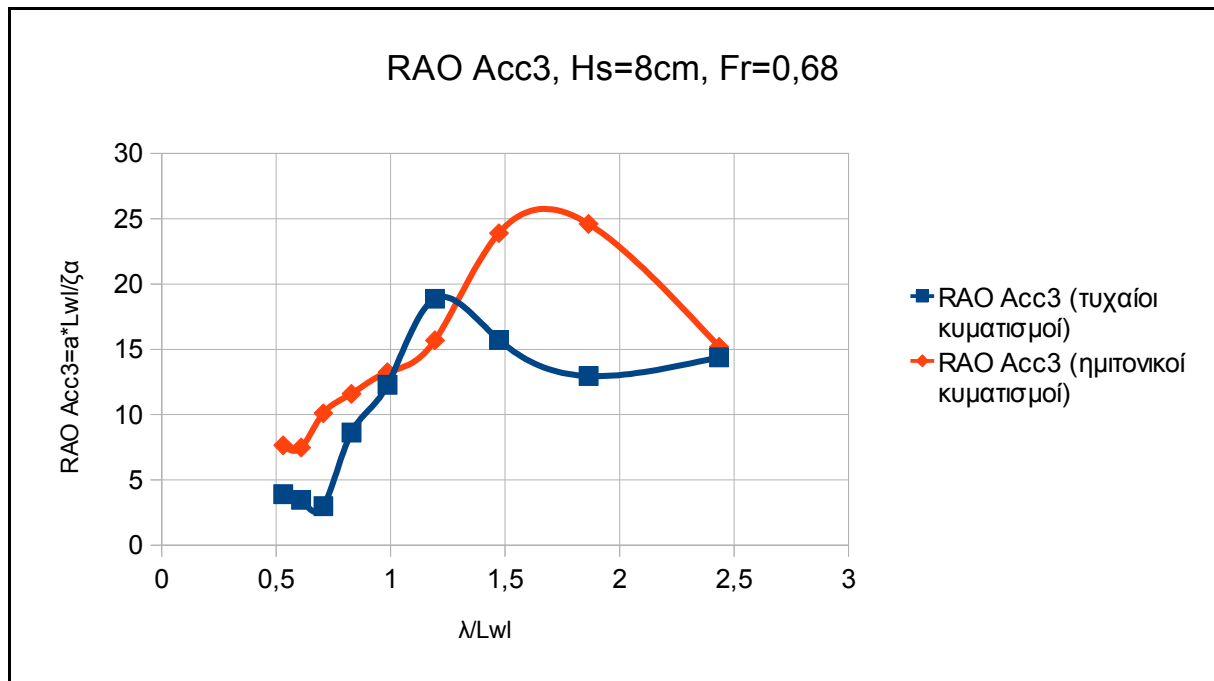
Διάγραμμα 5.78.



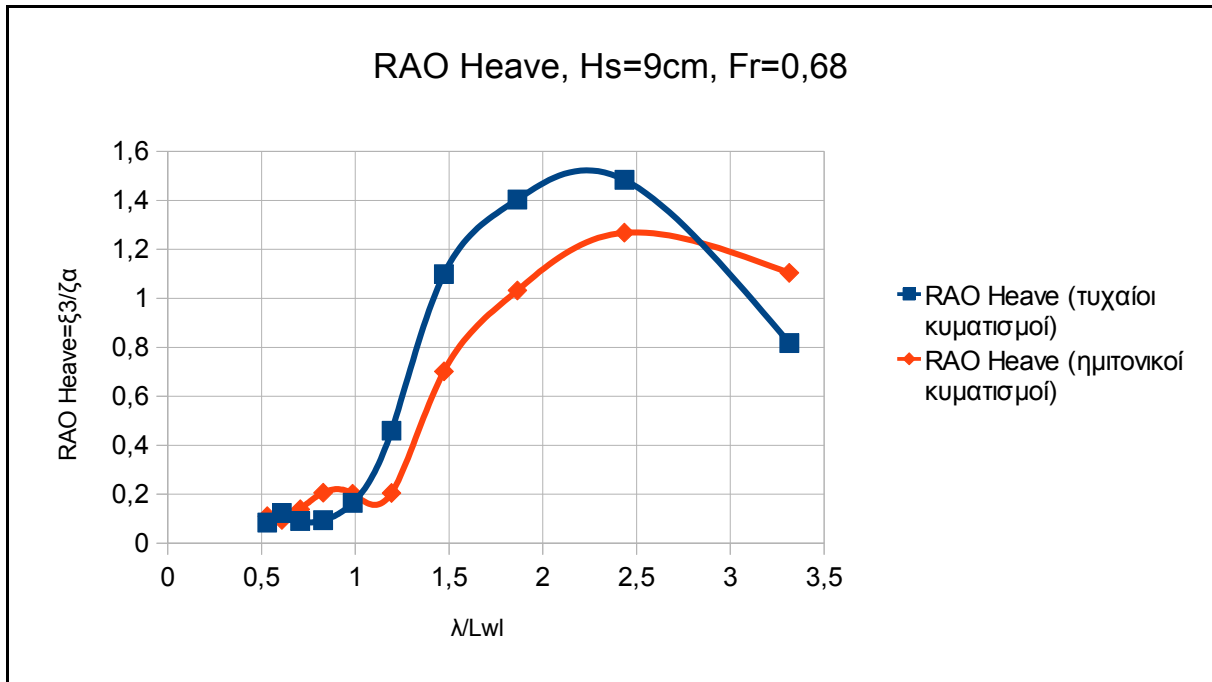
Διάγραμμα 5.79.



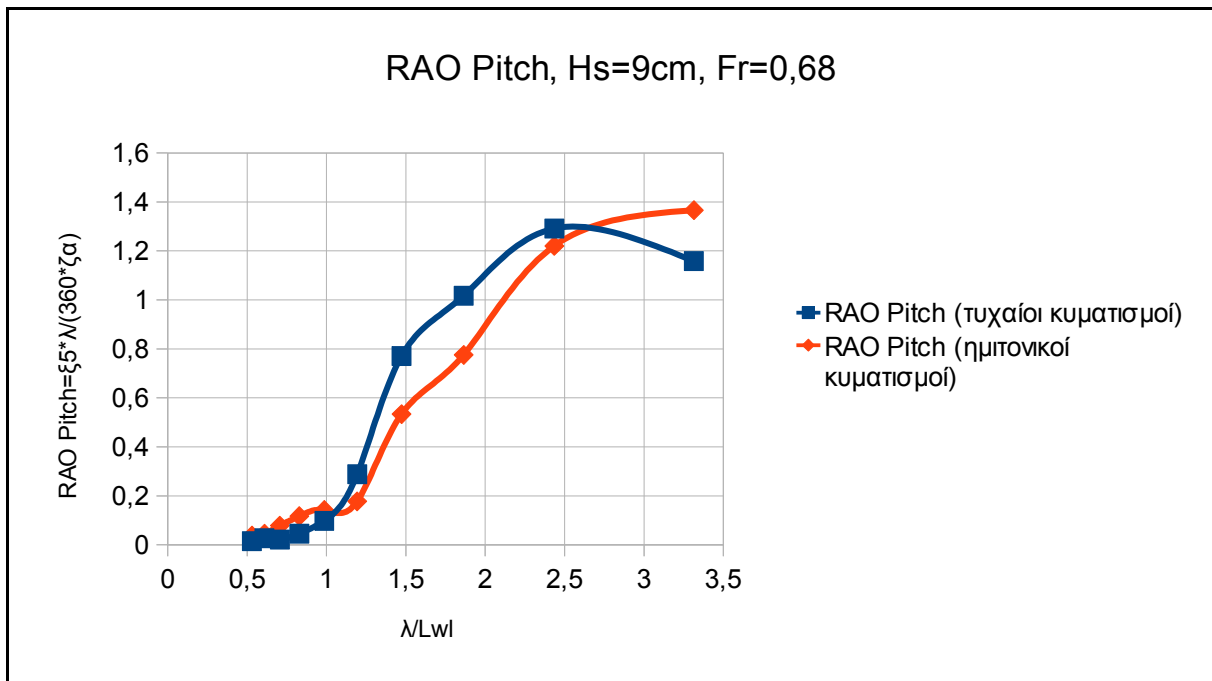
Διάγραμμα 5.80.



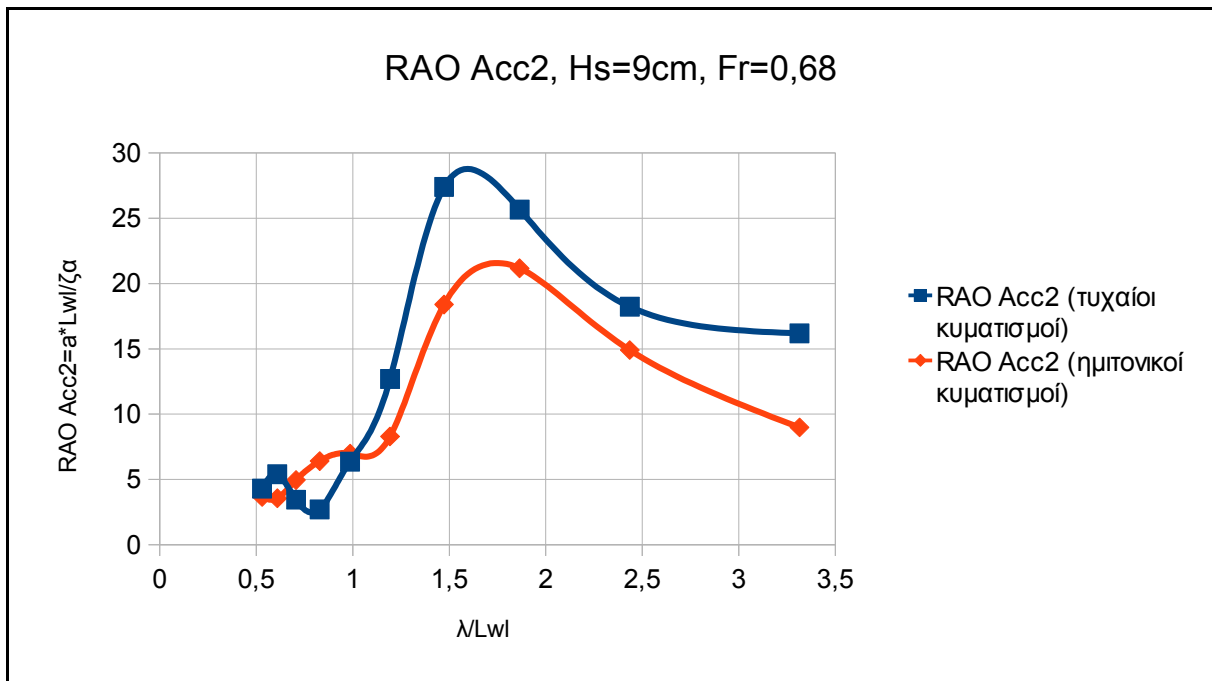
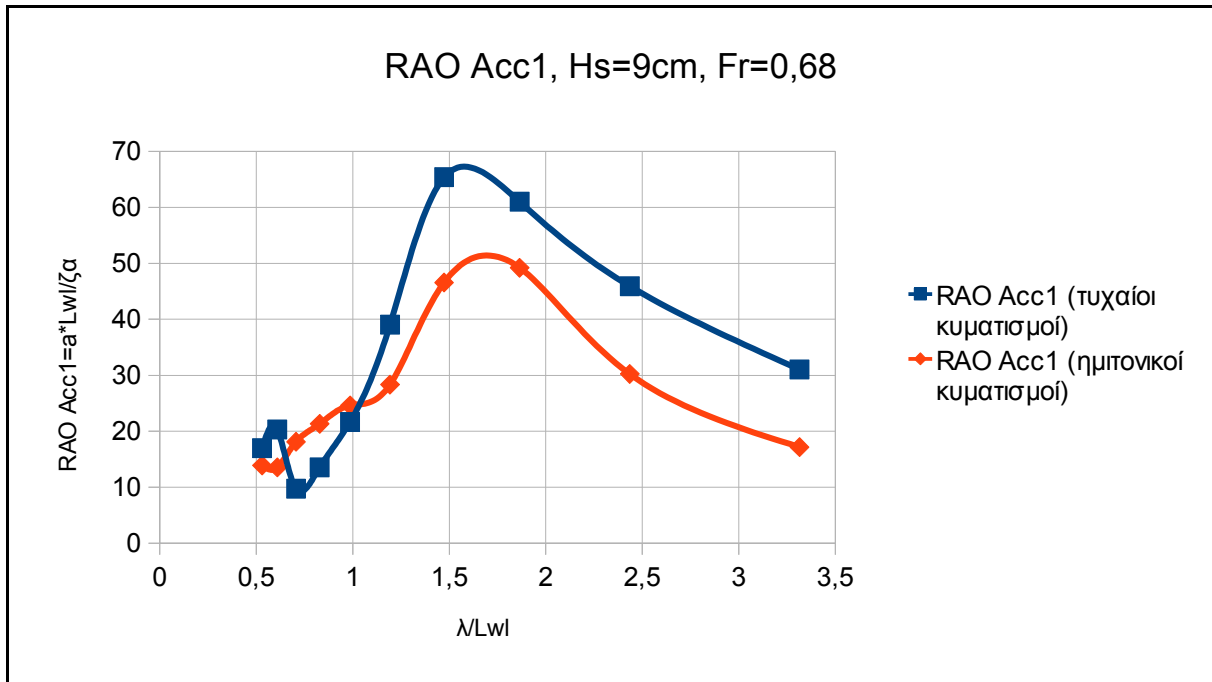
Διάγραμμα 5.81.

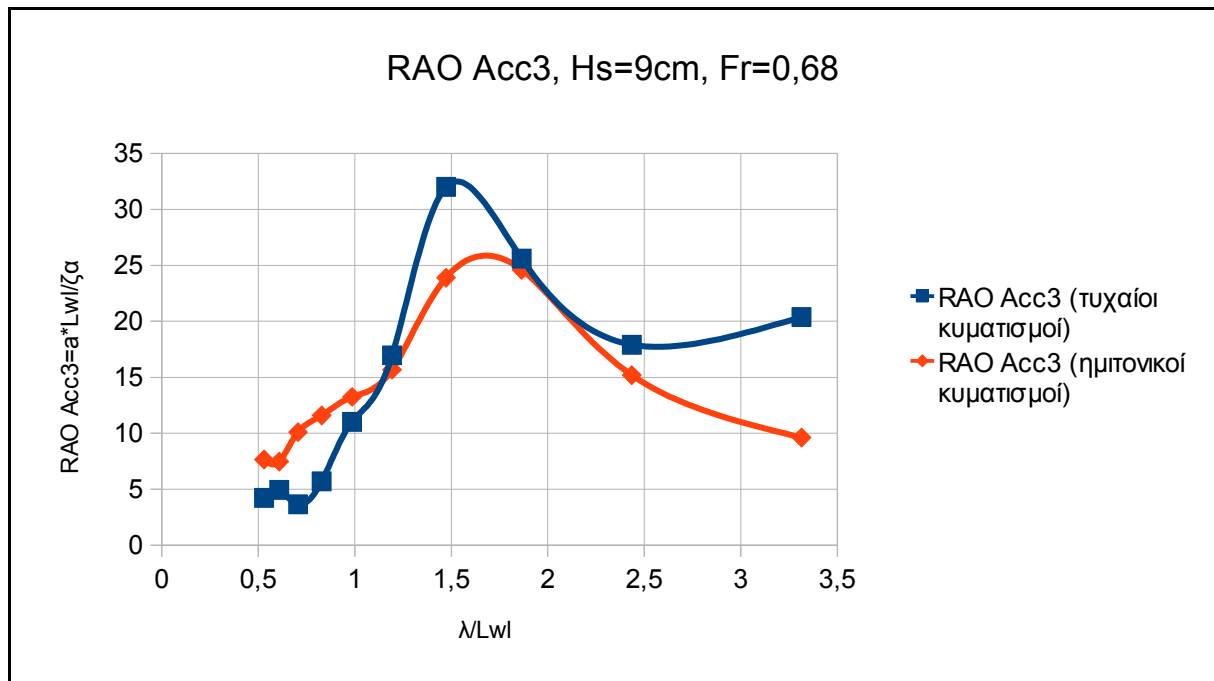


Διάγραμμα 5.82.

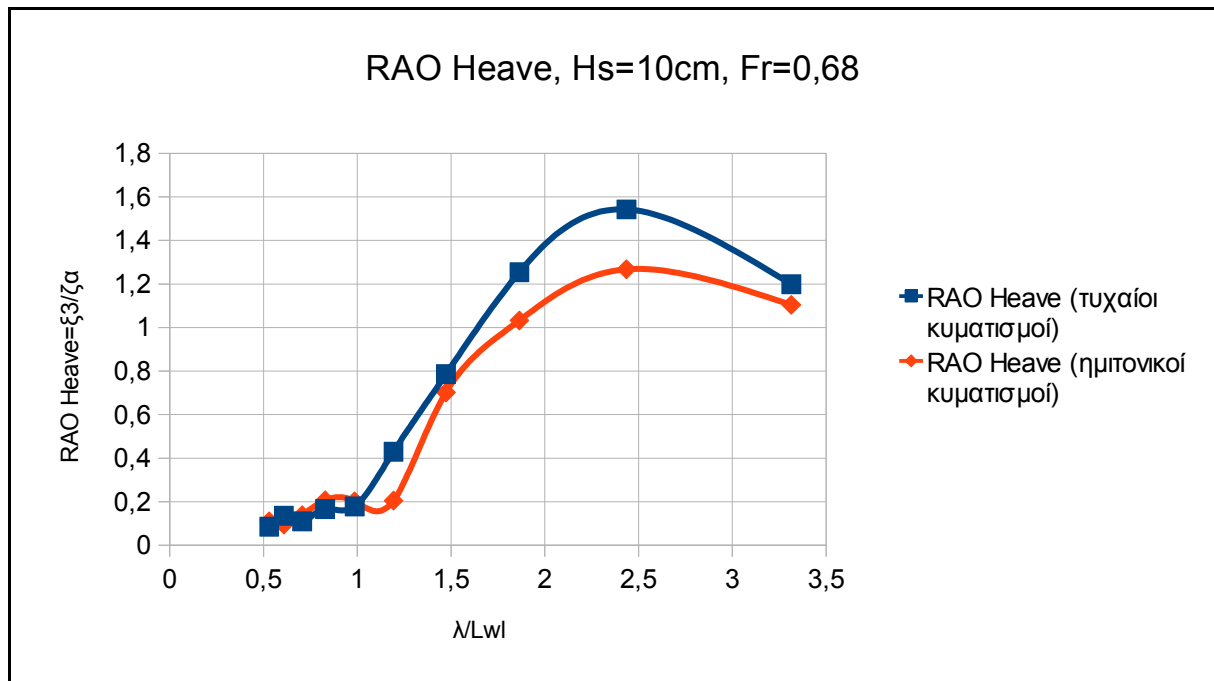


Διάγραμμα 5.83.

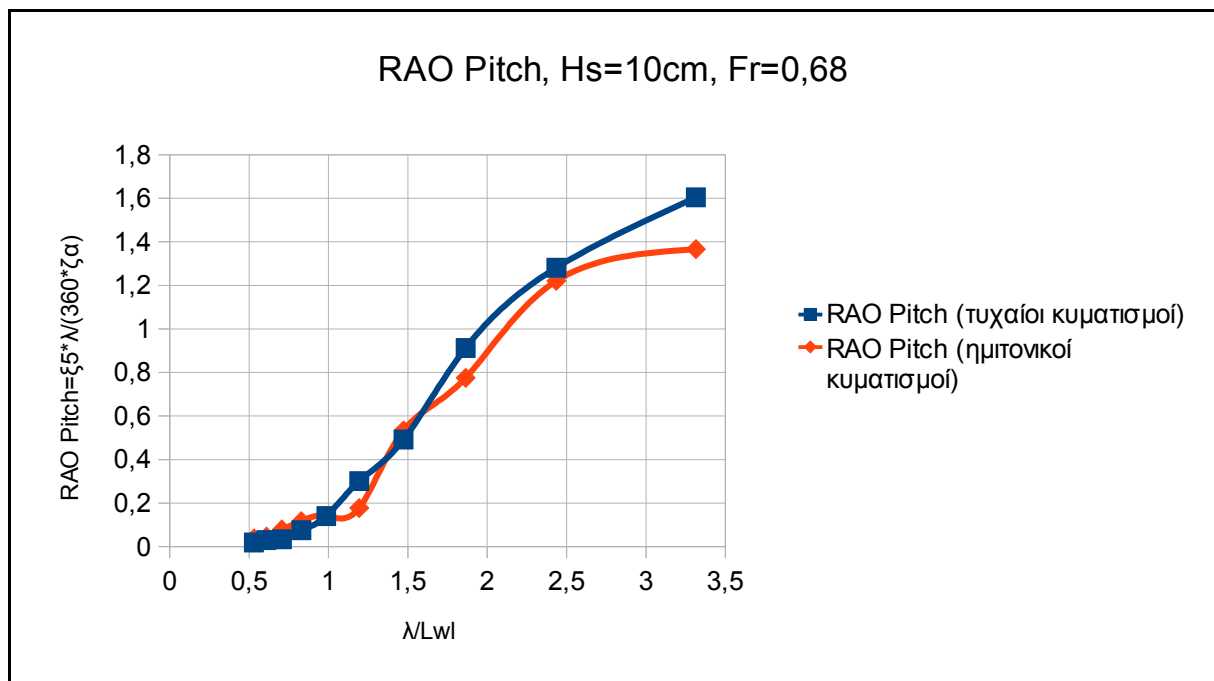




Διάγραμμα 5.86.

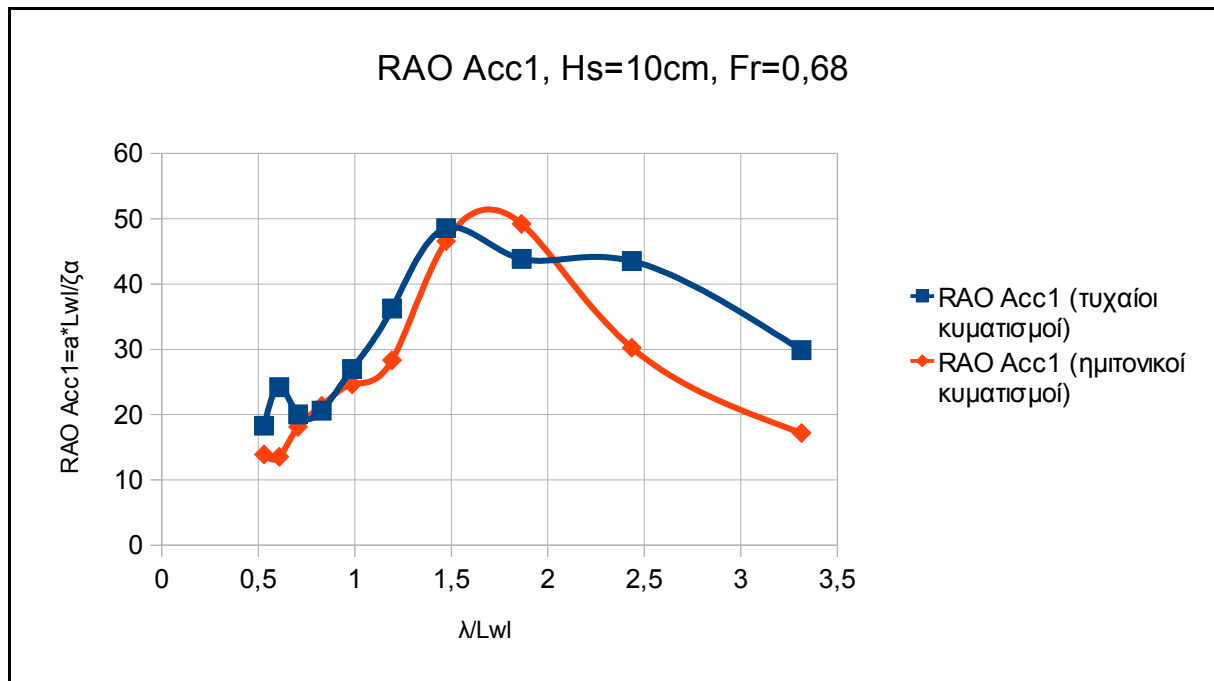


Διάγραμμα 5.87.

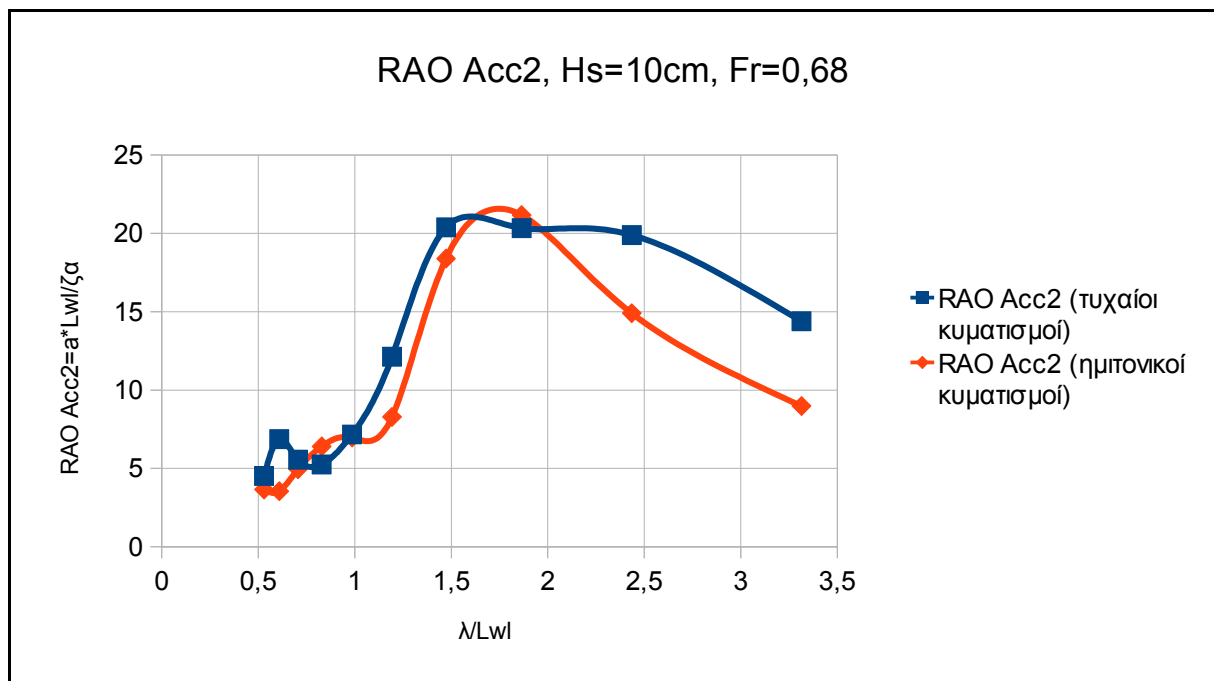


Διάγραμμα 5.88.

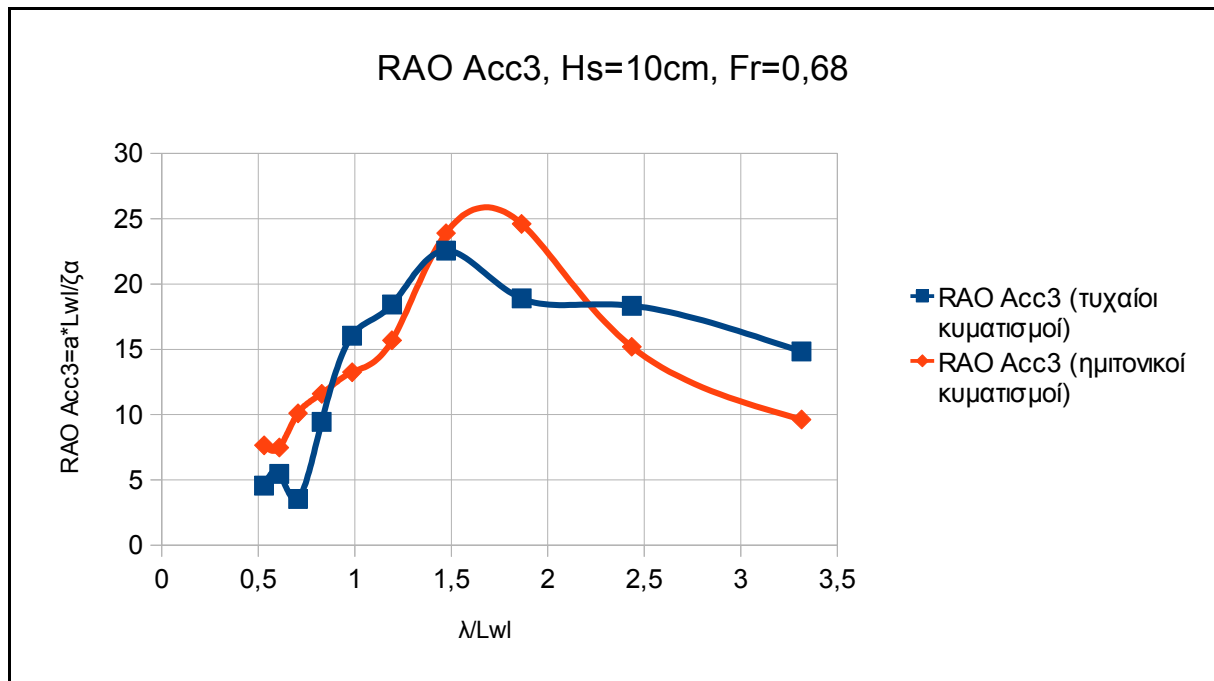




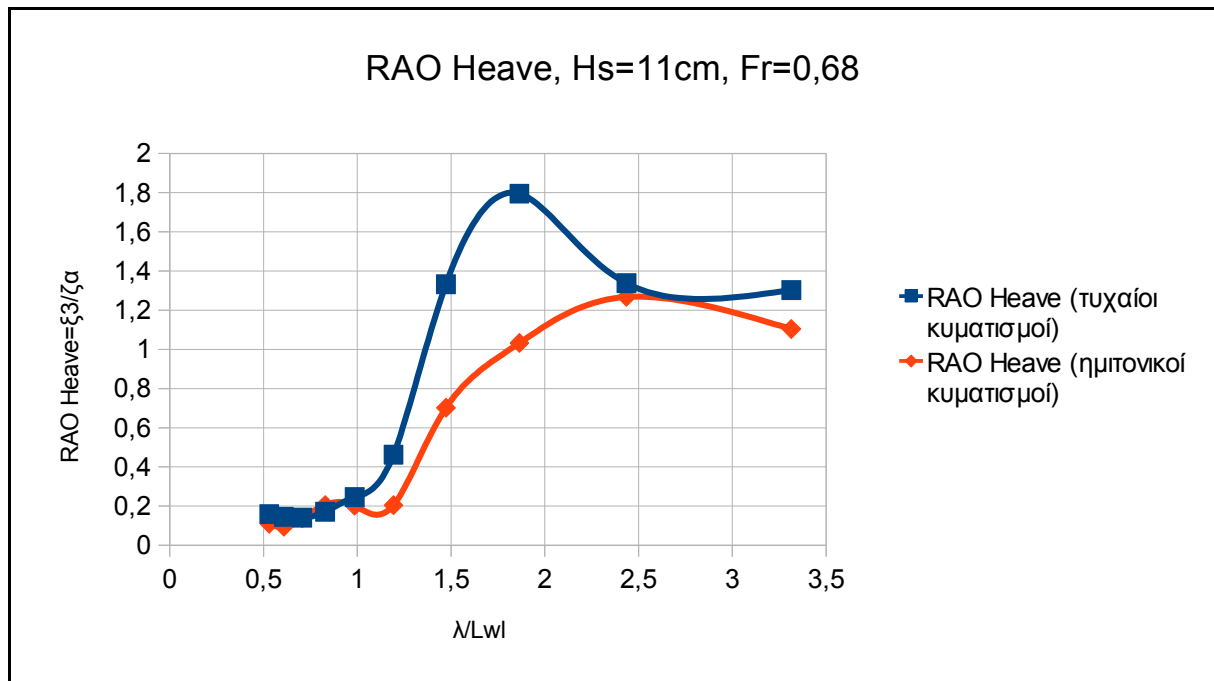
Διάγραμμα 5.89.



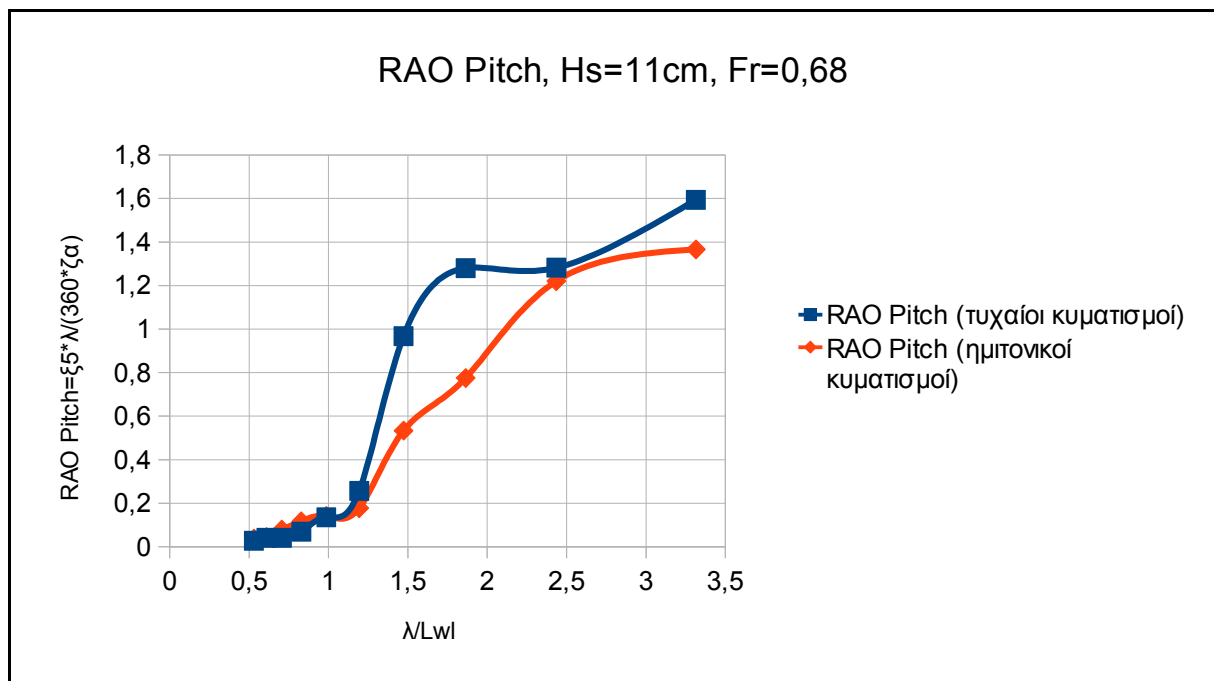
Διάγραμμα 5.90.



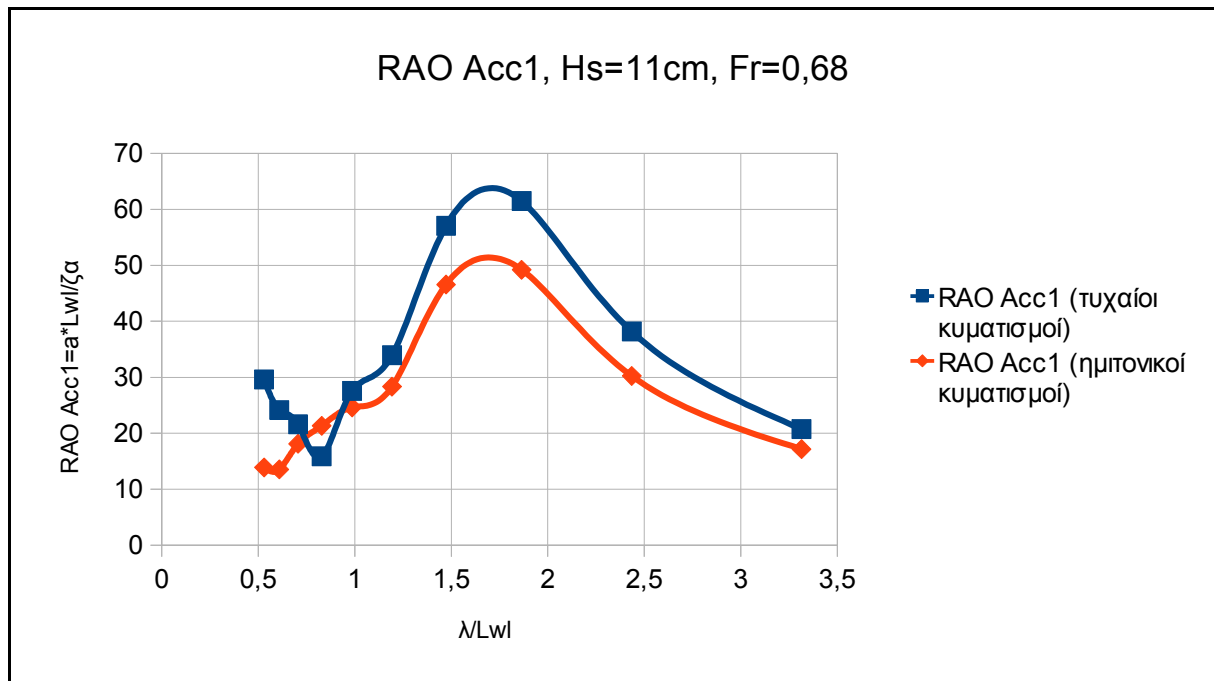
Διάγραμμα 5.91.



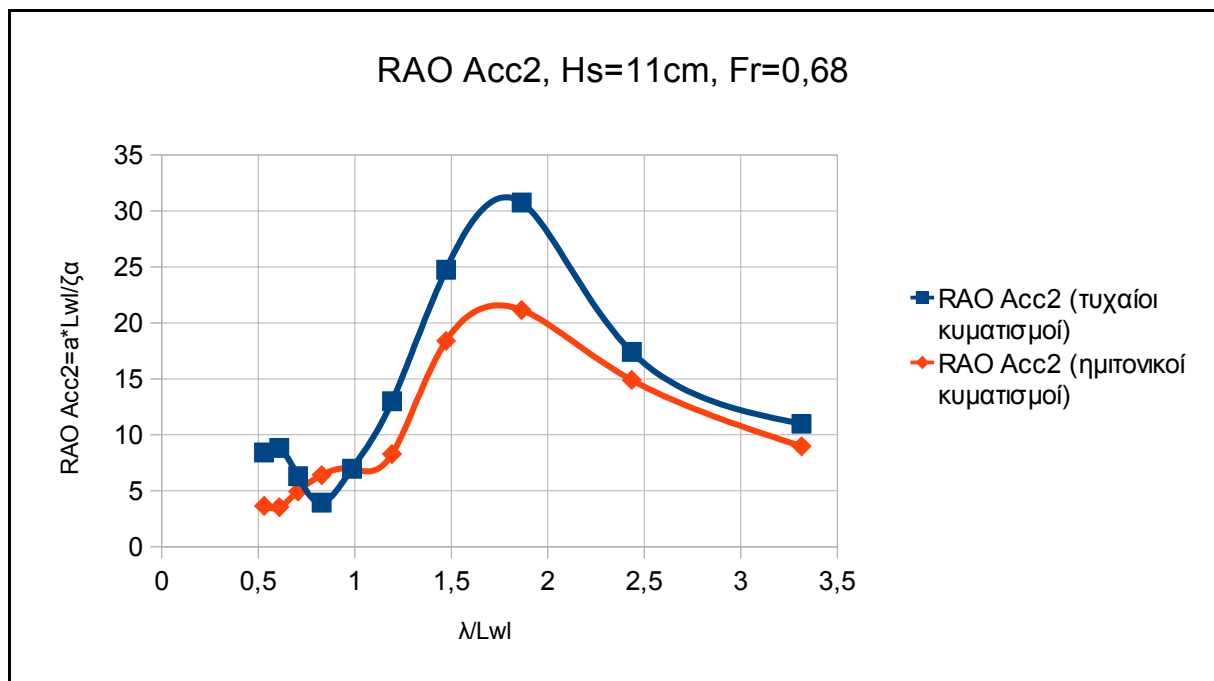
Διάγραμμα 5.92.



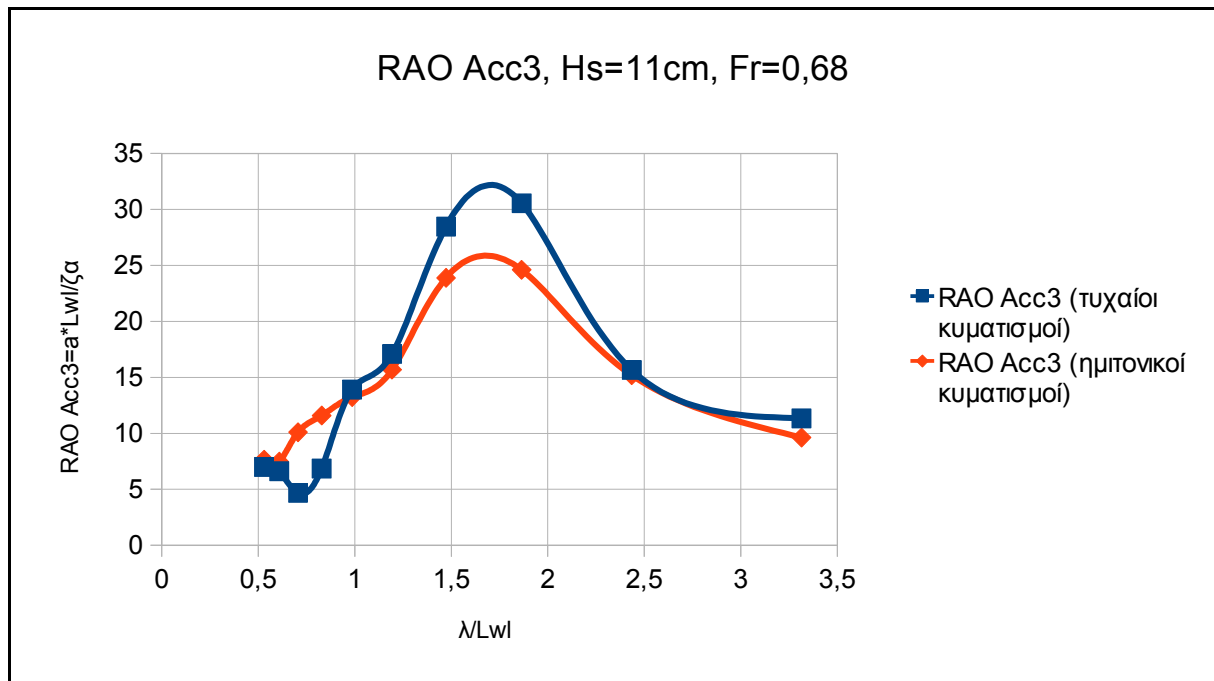
Διάγραμμα 5.93.



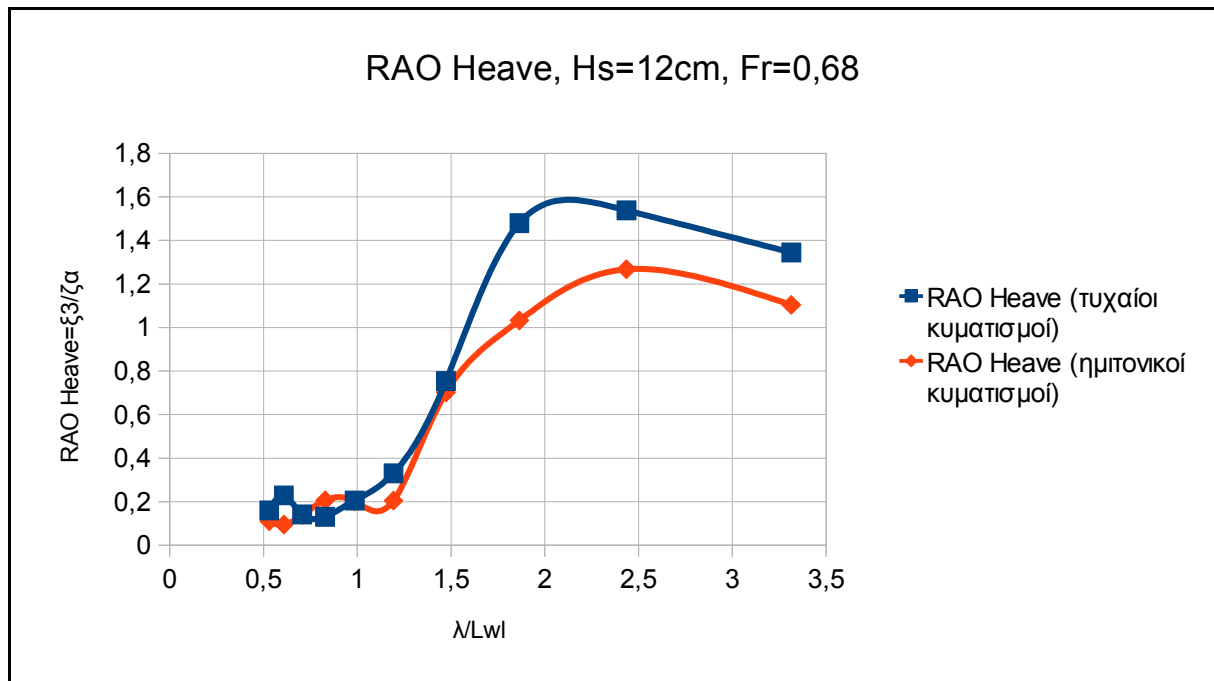
Διάγραμμα 5.94.



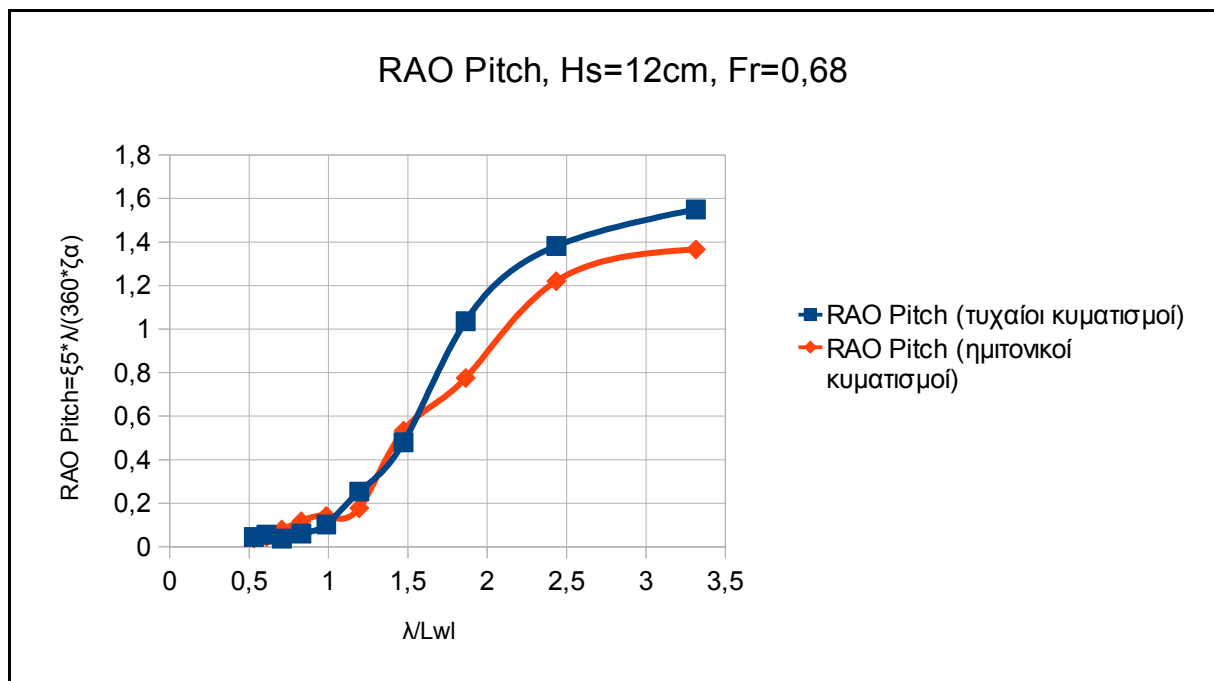
Διάγραμμα 5.95.



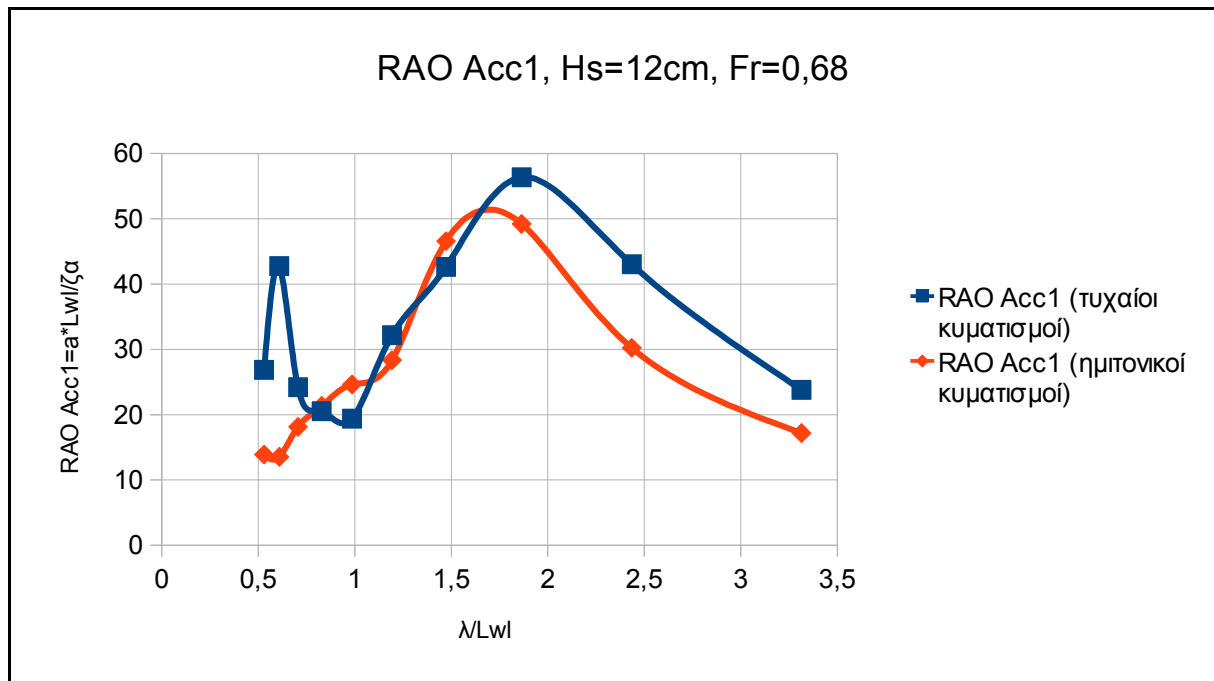
Διάγραμμα 5.96.



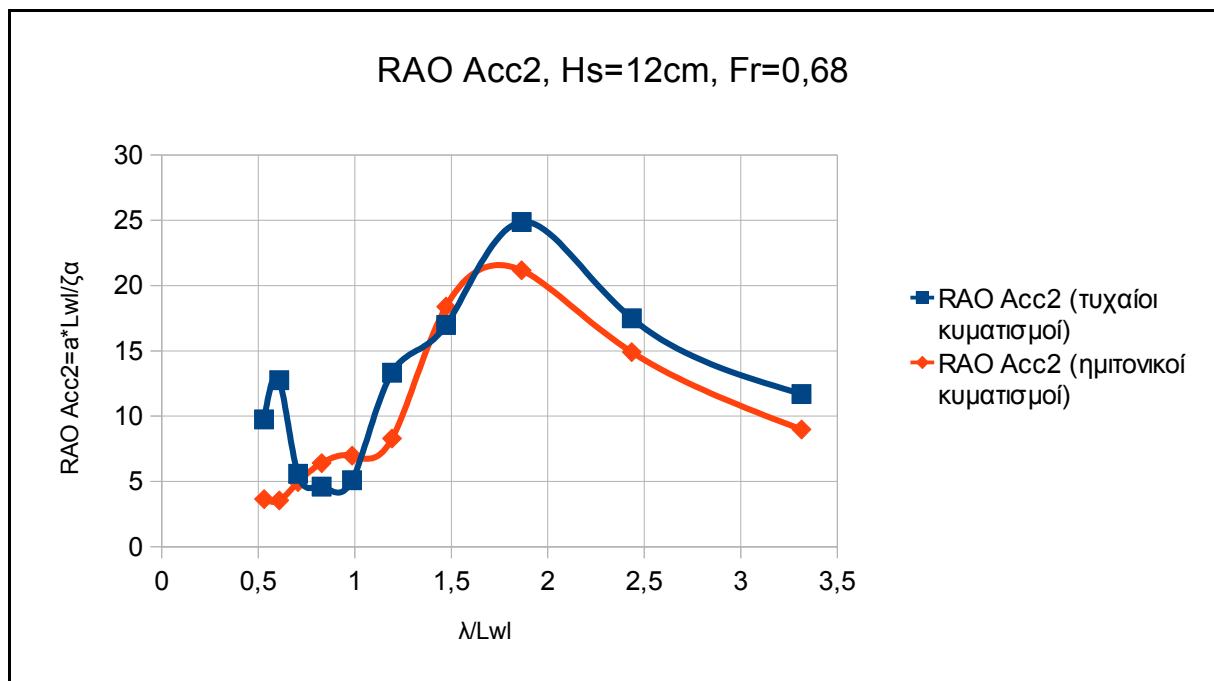
Διάγραμμα 5.97.



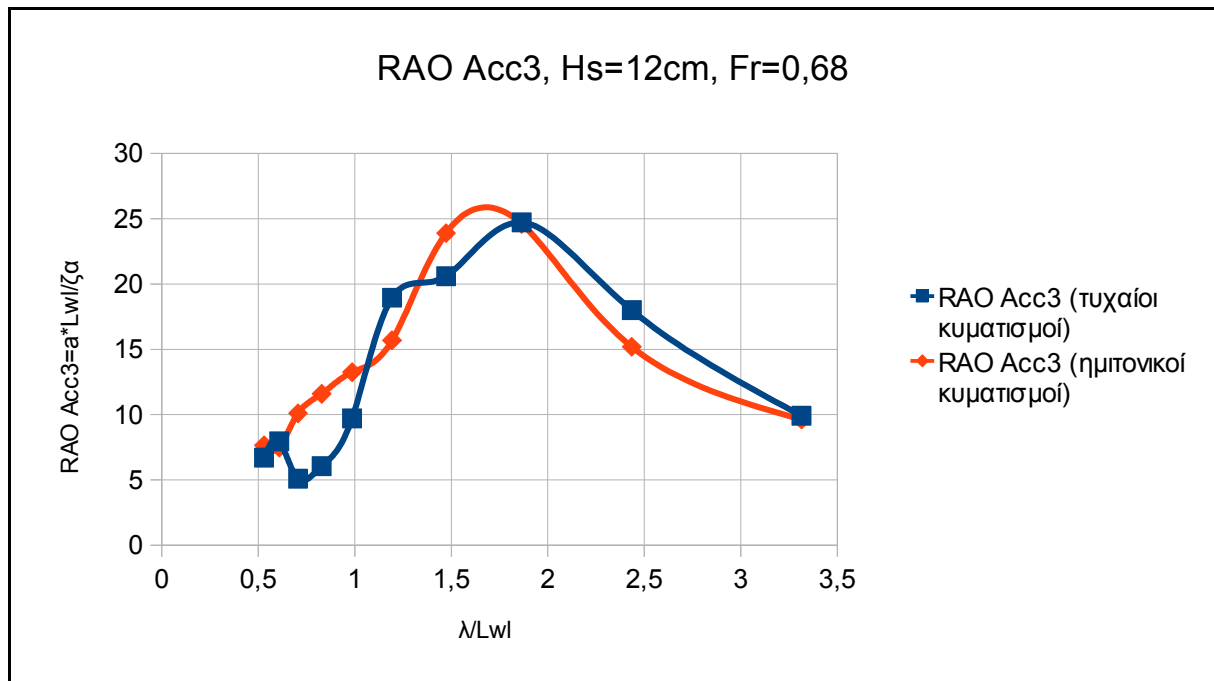
Διάγραμμα 5.98.



Διάγραμμα 5.99.

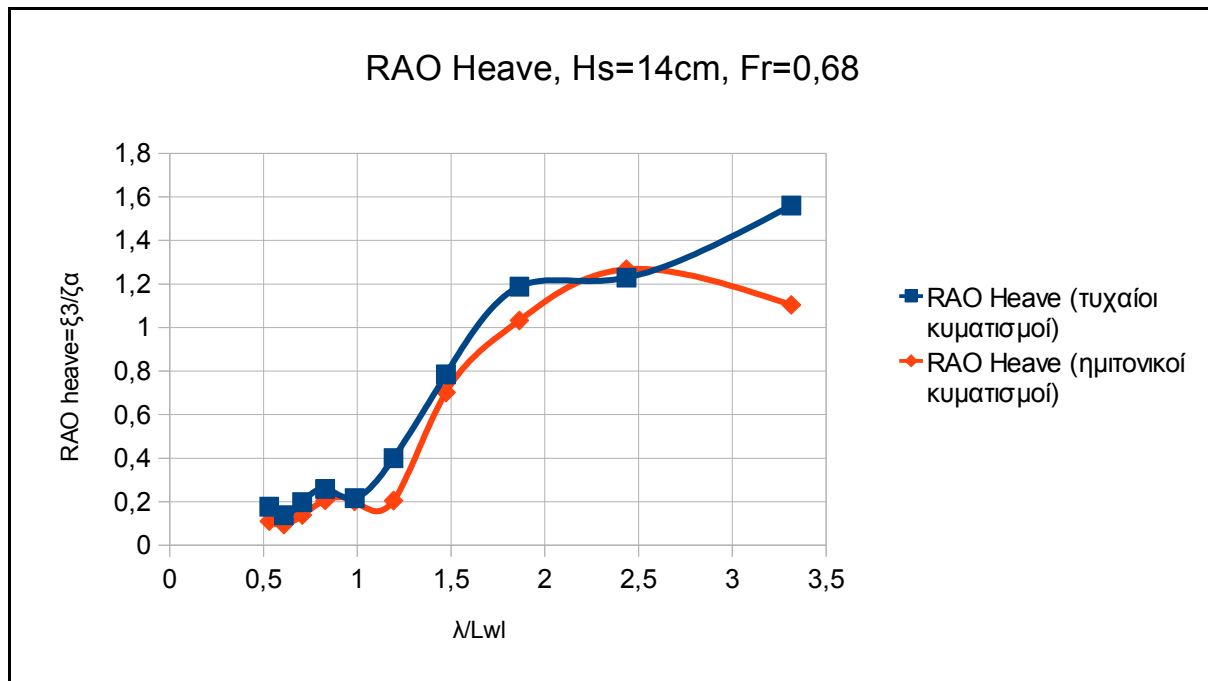


Διάγραμμα 5.100.

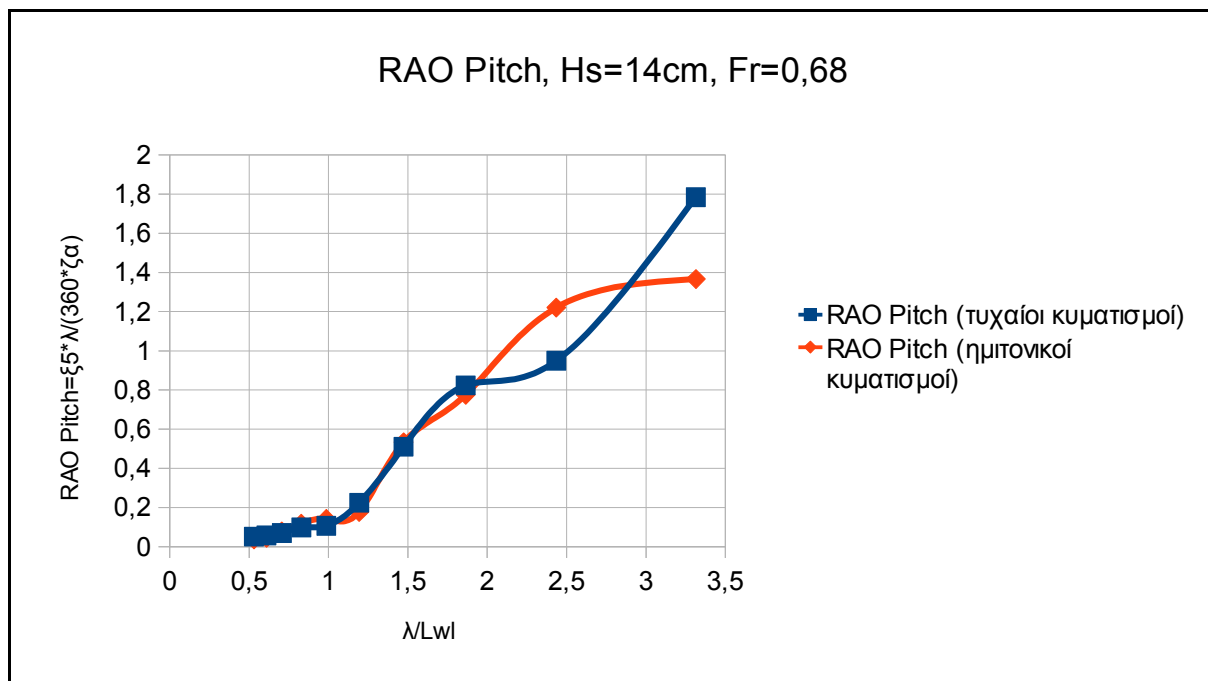


Διάγραμμα 5.101.

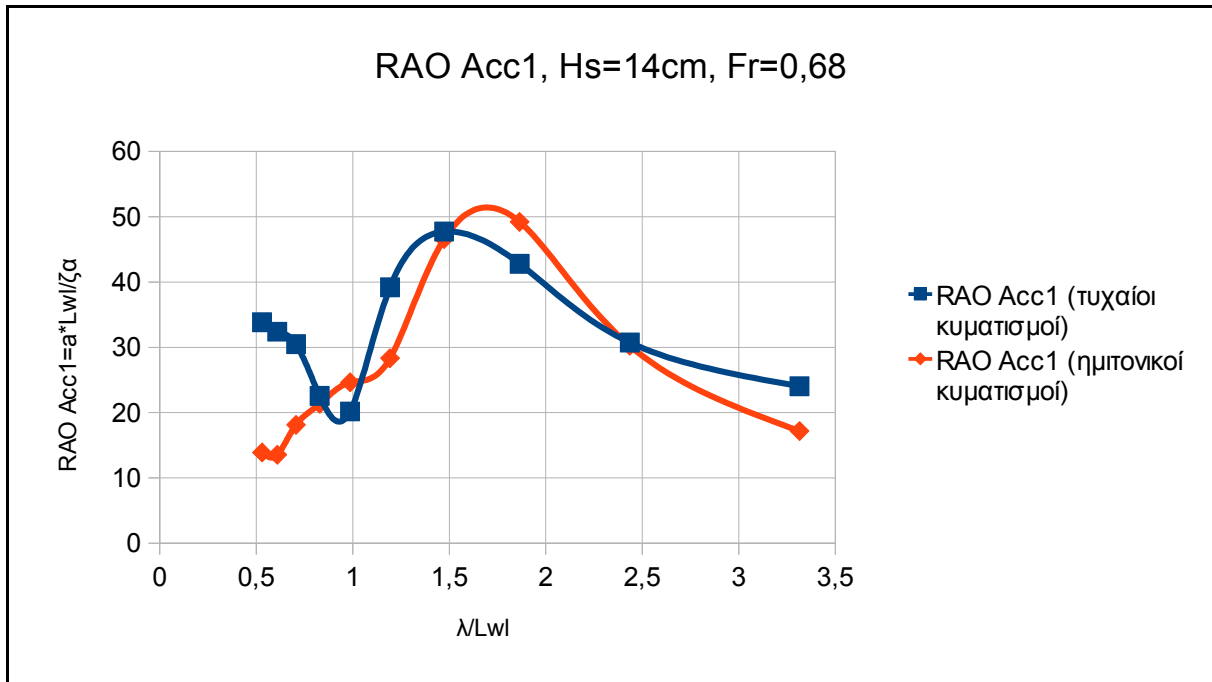




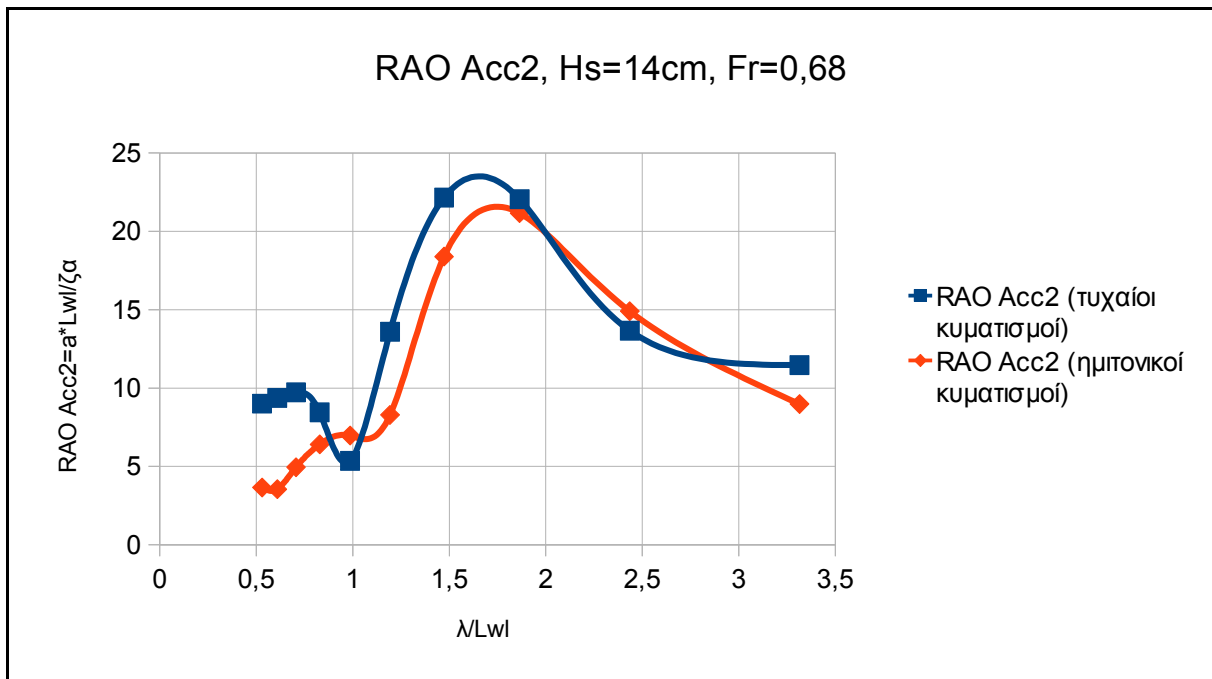
Διάγραμμα 5.102.



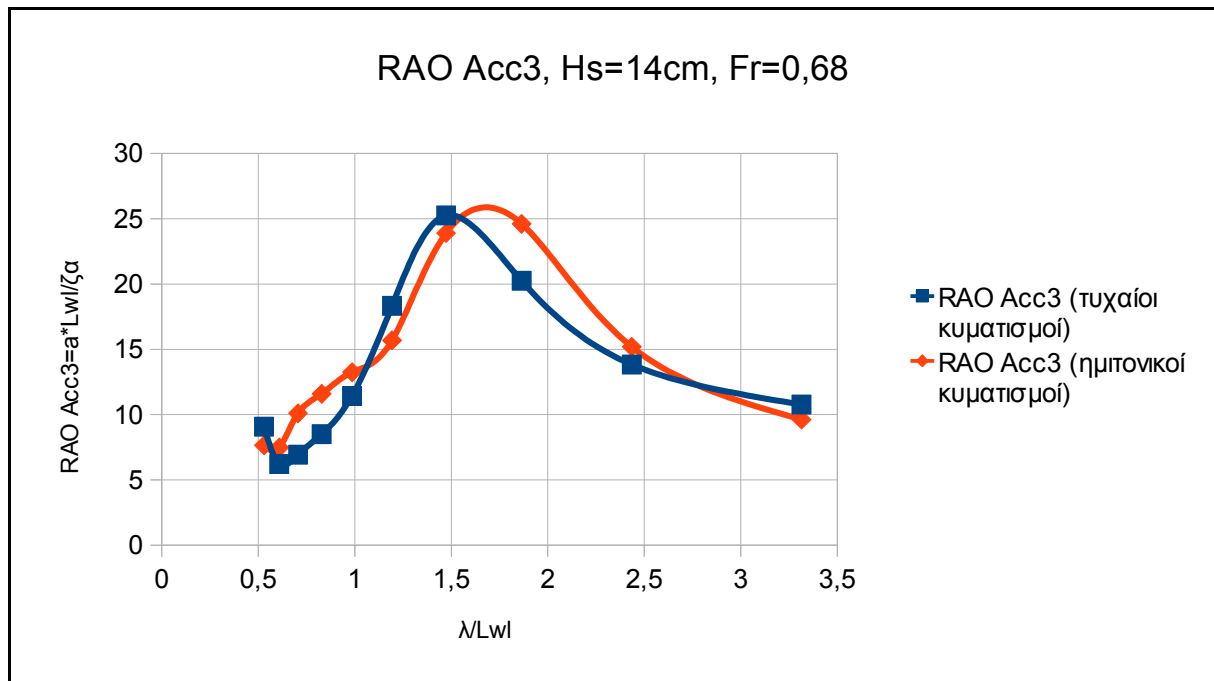
Διάγραμμα 5.103.



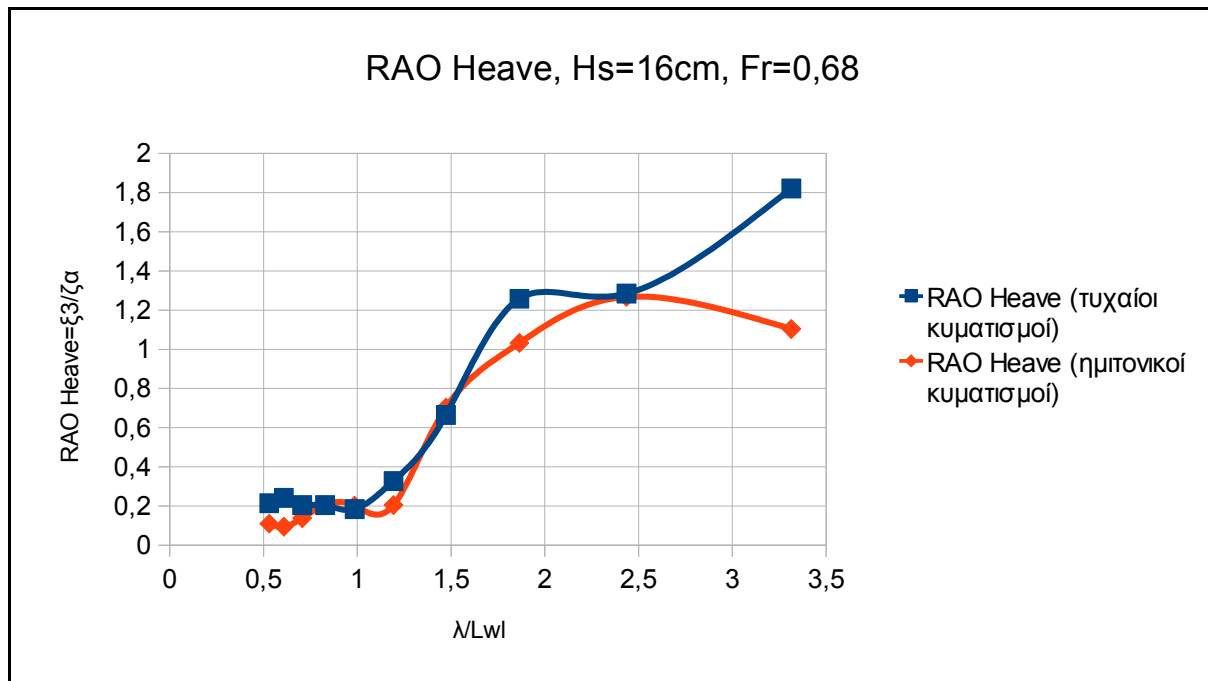
Διάγραμμα 5.104.



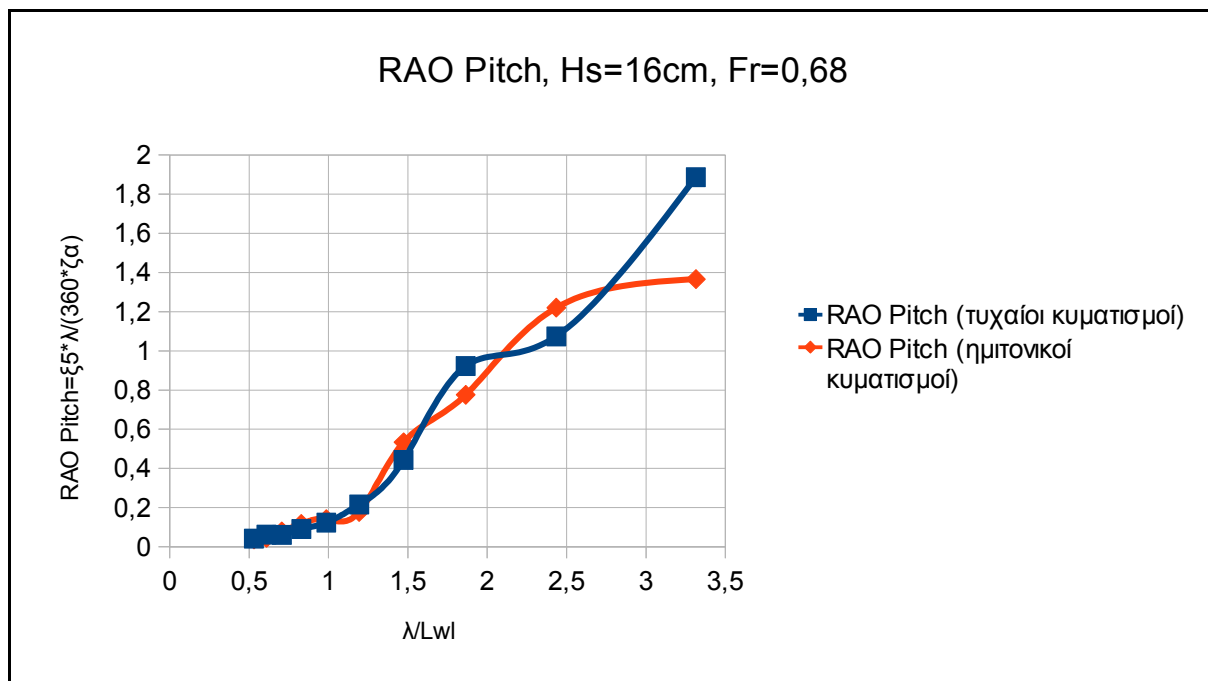
Διάγραμμα 5.105.



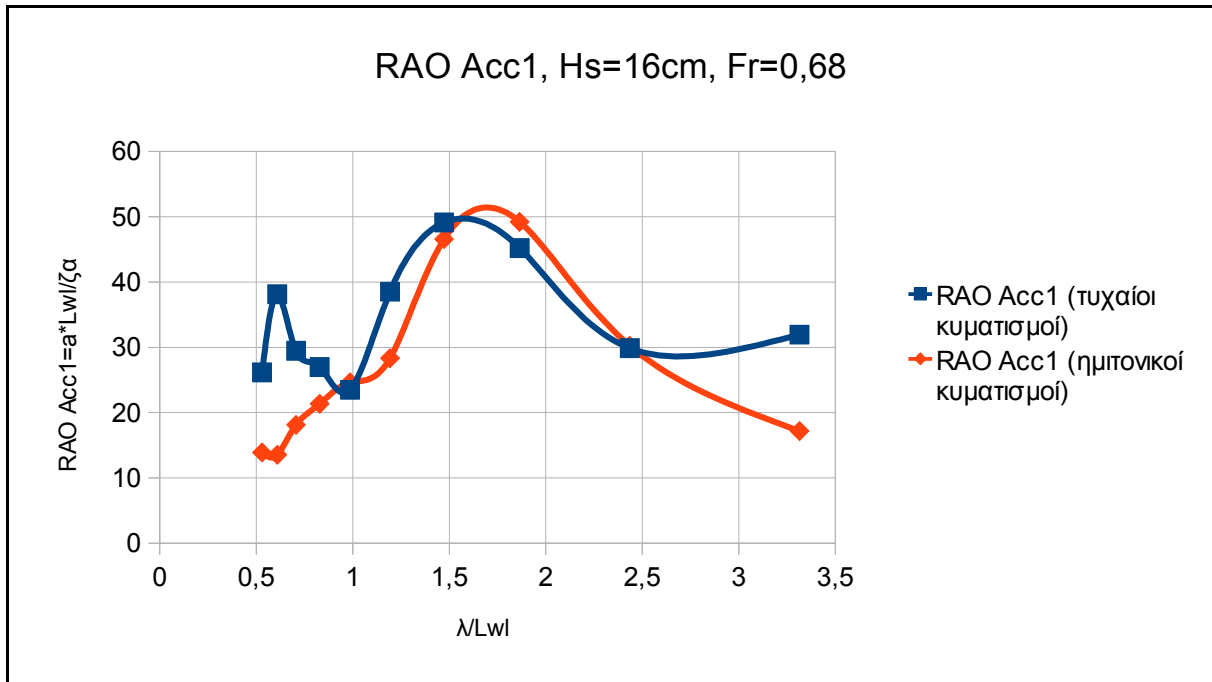
Διάγραμμα 5.106.



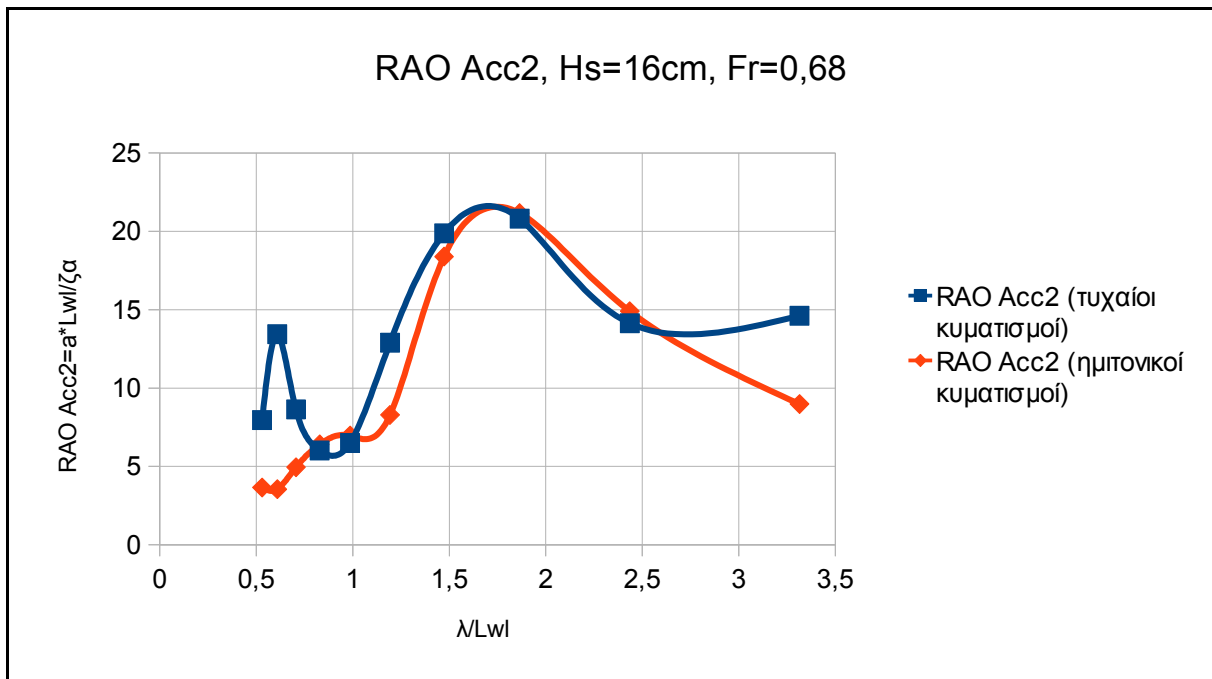
Διάγραμμα 5.107.



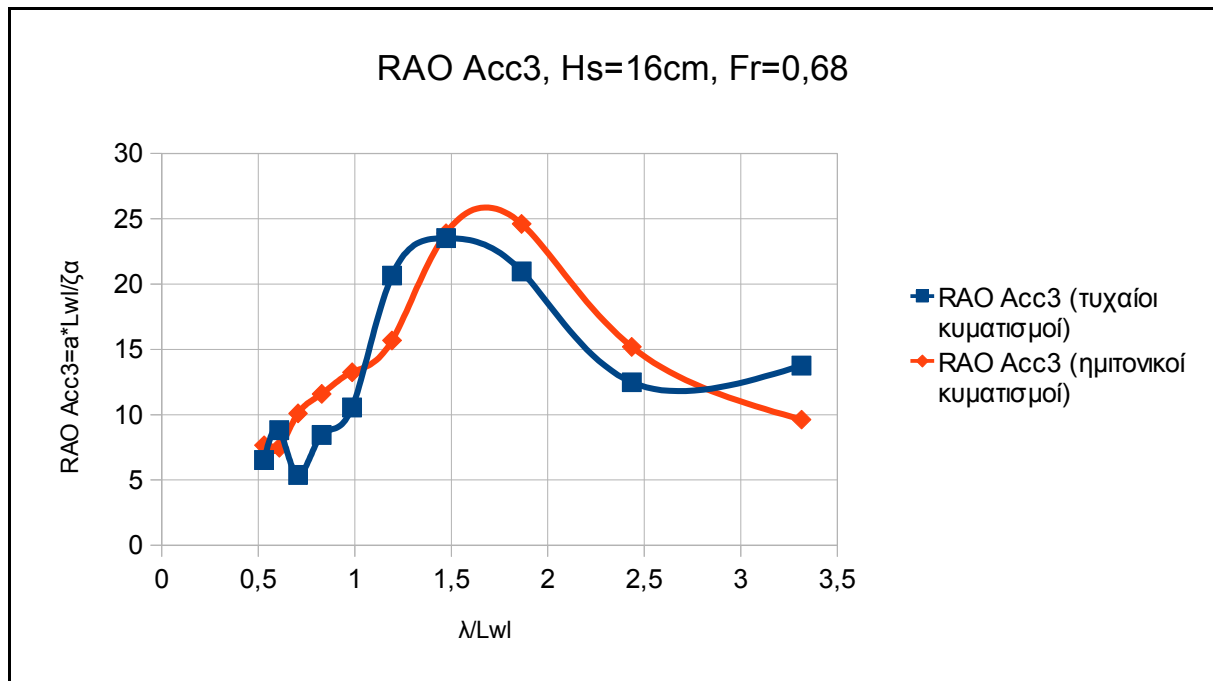
Διάγραμμα 5.108.



Διάγραμμα 5.109.



Διάγραμμα 5.110.



Διάγραμμα 5.111.

### Συμπεράσματα

1) Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αποκαλύπτει την ύπαρξη αποκλίσεων μεταξύ των RAO από τυχαίους και των RAO από ημιτονικούς κυματισμούς. Αυτό είναι λογικό διότι όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 1 η θεωρία γραμμικής υπέρθεσης έχει ως προϋπόθεση μικρές αλλαγές στα ύφαλα του πλοίου κατά την πλεύση σε κυματισμούς, και συνεπώς σχεδόν σταθερή αλλαγή επιφάνεια ισάλου και όγκο εκτοπίσματος.

2) Οι αποκλίσεις είναι πιο εμφανείς στη μεγάλη ταχύτητα, όπου το μοντέλο πλέει σε κατάσταση ημιολίσθησης ( $Fr > 0,5$ ).

3) Τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας αναφέρονται σε γάστρες ημιολίσθησης σχετικά μεγάλου μεγέθους και εκτοπίσματος (υψηλό  $C_{DL}$ ). Αντίστοιχα πειράματα με το ίδιο μοντέλο σε μικρότερα εκτοπίσματα δείχνουν ότι οι αποκλίσεις αυτές επιτείνονται. (Βλ. Βιβλιογραφία, αρ.4).

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- 1) Γρηγόρης Γρηγορόπουλος, “Δυναμική Συμπεριφορά πλοίων σε κυματισμούς – Σημειώσεις σπουδαστών ΔΠΜΣ”, Αθήνα 2004.
- 2) J.M.Lloyd, “Seakeeping: Ship behaviour in rough weather”, Ellis Horwood Limited 1989.
- 3) Gregory Grigoropoulos, Dimitra Damala, Theodore Loukakis, “Dynamic Performance of the NTUA Double – Chine Series Hull Forms in Regular Waves”, Annapolis, Maryland March 2010.
- 4) Gregory Grigoropoulos, Dimitra Damala, “Dynamic Performance of the NTUA Double – Chine Series Hull Forms in Random Waves”, Honolulu, Hawaii, USA September 2011.
- 5) Daniel Savitsky, “On the subject of high – speed monohulls”, Athens, Greece October 2003.
- 6) Βασίλειος Τέφας, “Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς σε κυματισμούς ταχύπλοων σκαφών με διπλή ακμή” - Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2009.
- 7) Σταύρος Αμπαβής, “Δυνατότητες δρομολόγησης μονόγαστρων πλοίων νέας τεχνολογίας στις ελληνικές θάλασσες” - Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 1999.
- 8) Γεώργιος Ρούσσοις, “Πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοων σκαφών διπλής ακμής σε κυματισμούς” - Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2007.

