



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ: «ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΑΧΥΠΛΟΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ ΜΕ ΔΙΠΛΗ
ΑΚΜΗ ΚΑΙ ΛΟΓΟ $L/B=4.0$ ΣΕ ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ



ΑΓΗΣΙΛΑΟΣ ΝΙΚΗΦΟΡΟΥ – ΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ

2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ: «ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ
ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΑΧΥΠΛΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ ΜΕ ΔΙΠΛΗ
ΑΚΜΗ ΚΑΙ ΛΟΓΟ $L/B=4$ ΣΕ ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ

ΑΓΗΣΙΛΑΟΣ ΝΙΚΗΦΟΡΟΥ – ΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΘΗΝΑ

2019

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γρηγόρη Γρηγορόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντας την παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και για την βοήθειά του και τις υποδείξεις, σε οποιαδήποτε απορία μου.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διευθυντή της πειραματικής δεξαμενής κ. Γεώργιο Τζαμπίρα για την παραχώρηση της δεξαμενής για την εκτέλεση των πειραμάτων.

Δε θα μπορούσα να παραβλέψω το προσωπικό της δεξαμενής, χάρις στο οποίο ολοκληρώθηκε η εργασία αυτή, σε άψογο κλίμα συνεννόησης και συνεργασίας. Πολλές ευχαριστίες λοιπόν, στον κ. Ιωάννη Τραχανά, Ε.Τ.Ε.Π. και τον κ. Φώτιο Κασάπη, μέλος Ε.Ε.ΔΙ.Π, για την συμβολή τους στην εκτέλεση των πειραμάτων καθώς και στον κ. Δημήτριο Λιαροκάπη, Ε.Τ.Ε.Π. για την υποστήριξη σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας. Επίσης ευχαριστώ πολύ τον κ. Γιώργο Μυλωνά, Ε.Τ.Ε.Π. και τον κ. Δημοσθένη Τριπερίνα, Ε.Τ.Ε.Π.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, Γρηγόρη και Ευσταθία και τα αδέρφια μου, Σωτήρη και Ανδρόνικο για την ενθάρρυνση τους και τη βοήθεια τους κατά την διάρκεια του μεταπτυχιακού καθώς επίσης την Ελένη, για τη βοήθειά της στη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

Αγησίλαος Νικηφόρου - Τασόπουλος

Ιούνιος, 2019



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του μοντέλου διπλής ακμής 163/01, της συστηματικής σειράς ταχύπλων σκαφών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με λόγο μήκους προς πλάτους ίσο με $L/B=4.0$.

Με τον όρο δυναμική συμπεριφορά (seakeeping) περιγράφεται η ικανότητα ενός σκάφους να πλέει με ασφάλεια και χωρίς ιδιαίτερη καταπόνηση στο θαλάσσιο περιβάλλον, αποκτώντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη διάρκεια χρήσης και συνεπώς, καλύτερη οικονομική εκμετάλλευση του πλοίου. Επίσης, συνίσταται στην ανάλυση των χαρακτηριστικών κινήσεων και της πρόσθετης αντίστασης στους κυματισμούς αυτούς. Τα πειράματα έλαβαν χώρα στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του ΕΜΠ. Σκοπός της εργασίας είναι ο εμπλουτισμός της βάσης δεδομένων του Πολυτεχνείου, έτσι ώστε να είναι εύκολη η ανάκτηση πληροφοριών από τον μελλοντικό μελετητή καθώς και η δυνατότητα σύγκρισης όμοιων με τη σειρά σκαφών.

Το πρότυπο μελετήθηκε με σταθερό συντελεστή εκτοπίσματος $c_{DL}=1.61$, σε ταχύτητα, που αντιστοιχεί σε αριθμό Froude $Fn=0.34$ σε τυχαίους κυματισμούς, οι οποίοι προσομοιώνουν πραγματικές καταστάσεις θάλασσας. Το φασματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτό του Bretschneider.

Στην εργασία παρουσιάζονται τα φάσματα κυματισμού - αποκρίσεων σε επτά καταστάσεις θάλασσας. Οι αποκρίσεις περιλαμβάνουν την κατακόρυφη κίνηση (heave), την κίνηση προνευτασμού (pitch) και τις απόλυτες κατακόρυφες επιταχύνσεις σε τρεις θέσεις του προτύπου στην πλώρη, στο κέντρο βάρους και στην πρύμνη. Ακόμα, οι δυναμικές αποκρίσεις παρουσιάζονται υπό μορφή RMS τιμών, ενώ η πρόσθετη αντίσταση δίνεται σε μέση τιμή. Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση των τιμών RMS με τις αντίστοιχες τιμές παλαιότερων πειραμάτων σε κοινές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση συγκρίνονται τα RMS των αποκρίσεων που εξήχθησαν μέσω των πειραμάτων του προτύπου 163/01 με τα αποτελέσματα για το ίδιο μοντέλο αλλά σε διαφορετική κατάσταση φόρτωσης, με συντελεστή εκτοπίσματος $c_{DL}=3.00$, ενώ στη δεύτερη περίπτωση τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά διαφορετικού μοντέλου, με διαφορετικό λόγο μήκους προς πλάτος, $L/B=5.5$, στον ίδιο συντελεστή εκτοπίσματος. Τέλος, συγκρίνονται τα πειραματικά φάσματα των αποκρίσεων με αντίστοιχα φάσματα, τα οποία προέκυψαν με τη χρήση των αδιάστατων συντελεστών απόκρισης (Response Amplitude Operator – RAO) σε αρμονικούς κυματισμούς του ίδιου μοντέλου, από παλαιότερα πειράματα.

ABSTRACT

In the current master thesis, the dynamic performance of the double chin model 163/01 of the systematic series of the National Technical University of Athens high speed boats was studied with a length to width ratio equal to $L / B = 4.0$.

Seakeeping describes the ability of a boat to sail safely and without considerable strain in the marine environment, thereby obtaining longer use and hence better economic exploitation of the ship. It also consists of the analysis of the characteristic movements and the additional resistance to waves. The experiments took place in the experimental tank of the Laboratory for Ship & Marine Hydrodynamics (LSMH) of the NTUA. The scope of the current thesis is to enrich the database of the University in order to facilitate the retrieval of information for future researchers as well as to enable the comparison of similar series of vessels.

The model was studied with a fixed displacement factor $c_{DL} = 1.61$, at a speed corresponding to a Froude number $F_n = 0.34$ in random waves, which simulates real sea conditions. The spectral model used was that of Bretschneider.

The thesis presents the wave-response spectra in seven different sea states. These responses include heave, pitch and absolute vertical accelerations at three positions of the model, namely in the bow, center of gravity and stern. In addition, the dynamic responses are presented in the form of RMS values, while the additional resistance in form of an average value. The RMS values are compared with the corresponding values of earlier experiments under the same conditions. More specifically, in the first case the RMS of the responses that were obtained from the model 163/01 experiments were compared with the results for the same model but in a different loading condition with a $c_{DL} = 3.00$ displacement coefficient, whereas in the second case the results were compared with those of a model with length to width ratio $L / B = 5.5$, with the same displacement coefficient. Finally, the experimental spectra of responses were compared with the corresponding theoretical ones which were obtained from earlier experiments using the non-dimensional Response Amplitude Operator (RAO) in harmonic waves of the same model.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Μέρος Α.....	1
1 ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ	2
1.1 Βασική θεωρία κυματισμών.....	2
1.2 Παράγοντες γέννησης κυματισμού.....	2
1.3 Χαρακτηριστικά στοιχεία κυμάτων.....	3
1.4 Αρμονικοί κυματισμοί.....	4
1.5 Τυχαίοι κυματισμοί.....	4
1.6 Φαινόμενα και στατιστικά μεγέθη στοχαστικών διαδικασιών	5
1.7 Φαινόμενα μεγέθη.....	6
1.8 Στατιστικά μεγέθη	7
1.9 Φάσμα στοχαστικών διαδικασιών.....	8
1.10 Είδη κινήσεων	10
1.11 Θεωρία λωρίδων.....	11
1.12 Αποκρίσεις / RAO (Response Amplitude Operator).....	12
1.13 Πρόσθετη αντίσταση.....	14
2 ΤΑΧΥΠΛΟΑ ΣΚΑΦΗ	15
2.1 Ιστορική αναδρομή	15
2.2 Παράμετροι σχεδίασης ταχύπλων σκαφών.....	18
2.3 Κύριες γάστρες ταχύπλων σκαφών.....	19
2.3.1 Ολισθάκατοι.....	19
2.3.2 Γάστρες ημι-εκτοπίσματος.....	20
3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ ΣΚΑΦΩΝ.....	21
3.1 Συστηματικές σειρές στρογγυλού πυθμένα	21
3.2 Συστηματικές σειρές με ακμή	23
3.3 Συστηματικές σειρές με διπλή ακμή.....	24
4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ Ε.Μ.Π.	25
4.1 Εισαγωγή.....	25
4.2 Ανάπτυξη.....	25
4.3 Γραμμές.....	26
4.4 Κύριες παράμετροι.....	27
5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	29
5.1 Στάδιο προετοιμασίας προτύπου	30
5.1.1 Εύρεση επιθυμητού εκτοπίσματος.....	30
5.1.2 Εύρεση επιθυμητή γωνίας διαγωγής και εγκάρσιας κλίσης	31

5.1.3	Προσδιορισμός ακτίνας αδρανείας και περιόδου ιδιοταλάντωσης.....	31
5.1.4	Αποφόρτιση	32
5.2	Βαθμονόμηση μετρητικών οργάνων.....	33
5.2.1	Ανύψωση κύματος μέσω Wave Tank Probe	33
5.2.2	Ανύψωση κύματος μέσω Wave Gen Probe	33
5.2.3	Κατακόρυφη κίνηση και πρόνευση.....	33
5.2.4	Πρόσθετη αντίσταση κυματισμών	34
5.2.5	Απολύτες κατακόρυφες επιταχύνσεις	34
5.3	Τυχαίοι κυματισμοί	34
5.4	Διεξαγωγή πειραματικής διαδικασίας.....	35
5.5	Ανάλυση μετρήσεων	36
6	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	38
6.1	Διαγράμματα φασμάτων	38
6.2	Παρατηρήσεις	53
6.3	Διαγράμματα RMS.....	53
6.4	Σύγκριση RMS σε διαφορετικό c_{DL}	57
6.5	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	60
6.6	Σύγκριση RMS προτύπων με ίδιο c_{DL} αλλά διαφορετικό L/B	61
6.7	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	64
6.8	Σύγκριση φασμάτων μέσω RAO.....	65
6.9	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	87
	Βιβλιογραφικές αναφορές	88
	Μέρος Β.....	90
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	91
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	96
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.....	103

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 2.1 Τορπιλάκατος Ταίαροα, κατασκευής 1883 της John I Thornycroft	15
Εικόνα 2.2 Turbinia, έτος κατασκευής 1894, μήκος 100ft και ταχύτητα 34.5kn	17
Εικόνα 2.3 Το Turbinia σήμερα στο Newcastle Discovery Museum	17
Εικόνα 5.1 Κώδικας Fortran για την ανάλυση των αποτελεσμάτων	36

Περιεχόμενα Εικόνων Παραρτήματος II

Εικόνα Π II. 1 Προετοιμασία μοντέλου 163/01	96
Εικόνα Π II. 2 Μέτρηση περιόδου ιδιοταλάντωσης	96
Εικόνα Π II. 3 Λίγο πριν την πρώτο πείραμα	97
Εικόνα Π II. 4 Μεταφορά του προτύπου εντός της δεξαμενής	98
Εικόνα Π II. 5 Ένωση του προτύπου με το φορείο	99
Εικόνα Π II. 6 Ομοίως από άλλη οπτική γωνία	100
Εικόνα Π II. 7 Το φορείο και το προσδεδμεμένο μοντέλο 163/01 έτοιμο για πείραμα	101
Εικόνα Π II. 8 Εν δράσει	101
Εικόνα Π II. 9 Φορείο και ενδείξεις μετρητικών οργάνων	102

Περιεχόμενα Εικόνων Παραρτήματος III

Εικόνα Π III. 1 Δεξαμενή εργαστηρίου, άδεια λόγω συντήρησης	103
Εικόνα Π III. 2 Κυματιστήρας	104
Εικόνα Π III. 3 Μέσα στη δεξαμενή	104
Εικόνα Π III. 4 Γέμισμα δεξαμενής	105

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 4.1 Τιμές L/B και c_{DL} για την ανάπτυξη της σειράς	27
Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά των μοντέλων σειράς NTUA	28
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά προτύπου 163/01 σειράς NTUA	29
Πίνακας 5.2 Καταστάσεις θάλασσας τυχαίων κυματισμών	29
Πίνακας 5.3 Ανάλυση του επιθυμητού εκτοπίσματος	30
Πίνακας 5.4 Πειραματικές καταστάσεις θάλασσας	35
Πίνακας 6.1 Αναμενόμενες και πραγματικές τιμές RMS για σημαντικό ύψος κύματος H_s ..	54
Πίνακας 6.2 Πραγματικές τιμές RMS για όλα τα μετρούμενα μεγέθη	54
Πίνακας 6.3 Σύγκριση RMS για $H_s=7$ cm και $T_p'=1.5$	68
Πίνακας 6.4 Σύγκριση RMS για $H_s=8$ cm και $T_p'=2.0$	71
Πίνακας 6.5 Σύγκριση RMS για $H_s=9$ cm και $T_p'=2.5$	74
Πίνακας 6.6 Σύγκριση RMS για $H_s=10$ cm και $T_p'=3.0$	77
Πίνακας 6.7 Σύγκριση RMS για $H_s=11$ cm και $T_p'=3.5$	80
Πίνακας 6.8 Σύγκριση RMS για $H_s=12$ cm και $T_p'=4.0$	83
Πίνακας 6.9 Σύγκριση RMS για $H_s=14$ cm και $T_p'=4.5$	86

Περιεχόμενα Πινάκων Παραρτήματος I

Πίνακας Π I. 1 Βαθμονομήσεις και αρχεία για $H_s=11$ cm και $T_p'=3.5$	91
Πίνακας Π I. 2 Αποκρίσεις στο πεδίο των συχνοτήτων για $H_s=11$ cm και $T_p'=3.5$	95

Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 6.1 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank...	39
Διάγραμμα 6.2 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave	39
Διάγραμμα 6.3 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch	40
Διάγραμμα 6.4 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων ..	40
Διάγραμμα 6.5 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank...	41
Διάγραμμα 6.6 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave	41
Διάγραμμα 6.7 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch	42
Διάγραμμα 6.8 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων ..	42
Διάγραμμα 6.9 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank...	43
Διάγραμμα 6.10 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave	43
Διάγραμμα 6.11 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch	44
Διάγραμμα 6.12 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων	44
Διάγραμμα 6.13 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank.	45
Διάγραμμα 6.14 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave	45
Διάγραμμα 6.15 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch	46
Διάγραμμα 6.16 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων	46
Διάγραμμα 6.17 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank.	47
Διάγραμμα 6.18 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave	47
Διάγραμμα 6.19 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch	48
Διάγραμμα 6.20 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων	48
Διάγραμμα 6.21 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank.	49
Διάγραμμα 6.22 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave	49
Διάγραμμα 6.23 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch	50
Διάγραμμα 6.24 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων	50
Διάγραμμα 6.25 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank.	51
Διάγραμμα 6.26 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave	51
Διάγραμμα 6.27 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch	52
Διάγραμμα 6.28 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων	52
Διάγραμμα 6.29 Τιμές RMS της κατακόρυφης κίνησης, heave, διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s	55
Διάγραμμα 6.30 Τιμές RMS της κίνησης προνευτασμού, pitch, διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s	55
Διάγραμμα 6.31 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στις τρεις θέσεις (πλώρη, κέντρο βάρους, πρύμνη) διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s	56
Διάγραμμα 6.32 Τιμές της πρόσθετης αντίστασης διαιρεμένες με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s	56
Διάγραμμα 6.33 Τιμές RMS της κατακόρυφης κίνησης, heave, διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος	57
Διάγραμμα 6.34 Τιμές RMS της κίνησης προνευτασμού, pitch, διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος	57
Διάγραμμα 6.35 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πρύμνη διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος.....	58
Διάγραμμα 6.36 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην θέση κέντρου βάρους, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος.....	58
Διάγραμμα 6.37 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πλώρη, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος.....	59
Διάγραμμα 6.38 Τιμές της πρόσθετης αντίστασης διαιρεμένες με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος.....	59

Διάγραμμα 6.39 Τιμές RMS της κατακόρυφης κίνησης, heave, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο διαφορετικούς λόγους L/B	61
Διάγραμμα 6.40 Τιμές RMS προνευτασμού, pitch, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο διαφορετικούς λόγους L/B	61
Διάγραμμα 6.41 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πρύμνη, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο λόγους L/B	62
Διάγραμμα 6.42 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην θέση του κέντρου βάρους, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο λόγους L/B .	62
Διάγραμμα 6.43 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πλώρη, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο λόγους L/B	63
Διάγραμμα 6.44 Τιμές της πρόσθετης αντίστασης διαιρεμένες με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s , για τους δύο λόγους L/B	63
Διάγραμμα 6.45 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave	66
Διάγραμμα 6.46 Σύγκριση φασμάτων προνευτασμού, pitch.....	66
Διάγραμμα 6.47 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη....	67
Διάγραμμα 6.48 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην θέση του κέντρου βάρους	67
Διάγραμμα 6.49 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη ..	68
Διάγραμμα 6.50 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave	69
Διάγραμμα 6.51 Σύγκριση φασμάτων προνευτασμού, pitch.....	69
Διάγραμμα 6.52 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη....	70
Διάγραμμα 6.53 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην θέση του κέντρου βάρους	70
Διάγραμμα 6.54 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη ..	71
Διάγραμμα 6.55 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave	72
Διάγραμμα 6.56 Σύγκριση φασμάτων προνευτασμού, pitch.....	72
Διάγραμμα 6.57 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη....	73
Διάγραμμα 6.58 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στη θέση του κέντρου βάρους	73
Διάγραμμα 6.59 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη ..	74
Διάγραμμα 6.60 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave	75
Διάγραμμα 6.61 Σύγκριση φασμάτων προνευτασμού, pitch.....	75
Διάγραμμα 6.62 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη....	76
Διάγραμμα 6.63 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην θέση του κέντρου βάρους	76
Διάγραμμα 6.64 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη ..	77
Διάγραμμα 6.65 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave	78
Διάγραμμα 6.66 Σύγκριση φασμάτων προνευτασμού, pitch.....	78
Διάγραμμα 6.67 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη....	79
Διάγραμμα 6.68 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην θέση του κέντρου βάρους	79
Διάγραμμα 6.69 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη ..	80
Διάγραμμα 6.70 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave	81
Διάγραμμα 6.71 Σύγκριση φασμάτων προνευτασμού, pitch.....	81
Διάγραμμα 6.72 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη....	82
Διάγραμμα 6.73 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης, στην θέση του κέντρου βάρους	82
Διάγραμμα 6.74 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη ..	83
Διάγραμμα 6.75 Σύγκριση φασμάτων της κατακόρυφης κίνησης, heave.....	84
Διάγραμμα 6.76 Σύγκριση φασμάτων του προνευτασμού, pitch.....	84
Διάγραμμα 6.77 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη....	85

Διάγραμμα 6.78 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην θέση του κέντρου βάρους	85
Διάγραμμα 6.79 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρύμνη ..	86

Μέρος Α

Θεωρία και Πειραματική Διαδικασία

1 ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ

1.1 Βασική θεωρία κυματισμών

Η διαταραχή της θαλάσσιας μάζας οφείλεται σε κάποιο γενεσιουργό αίτιο που προέρχεται από εσωτερικές ή εξωτερικές δυνάμεις. Εσωτερικές δυνάμεις όπως είναι η διαφορά θερμοκρασίας ή η διαφορά πυκνότητας λόγω αλατότητας των θαλάσσιων μαζών. Εξωτερικές δυνάμεις όπως είναι η κίνηση ενός πλοίου, οι σεισμικές δονήσεις (τσουνάμια), οι γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης, η έλξη της σελήνης που δημιουργεί την αστρονομική παλίρροια. Σημαντικό και με μεγάλη συχνότητα γενεσιουργό αίτιο της διαταραχής είναι η επίδραση του ανέμου στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Οι κινήσεις των μορίων του νερού προκαλούν ανωμαλίες στη θαλάσσια επιφάνεια που διαρκώς μεγαλώνουν με τη ροή του ανέμου. Μετά την ανάπτυξη των ανωμαλιών αρχίζει η μεταφορά ενέργειας από το πεδίο ροής του ανέμου στο πεδίο ροής των κυμάτων. Μέρος της ενέργειας αυτής δημιουργεί την κυματοειδή κίνηση των υγρών σωματιδίων. Προοδευτικά, η ενέργεια που μεταβιβάζεται από τις αέριες στις θαλάσσιες μάζες έχει σαν συνέπεια τα μόρια του νερού να κινούνται ταχύτερα και η διαταραχή της θάλασσας να κινείται προς όλες τις διευθύνσεις και κυρίως κατά την κυρίαρχη διεύθυνση πνοής του ανέμου.

Εκτός από τις γενεσιουργές δυνάμεις υπάρχουν και οι δυνάμεις επαναφοράς, οι οποίες τείνουν να αποκαταστήσουν την ισορροπία των υγρών μορίων. Τέτοιες δυνάμεις είναι η δύναμη Coriolis (λόγω περιστροφής της γης) και η επιφανειακή τάση. Η κυριότερη επαναφέρουσα δύναμη είναι η έλξη της βαρύτητας της γης.

Η μεγάλη κινητικότητα των υδάτινων σωματιδίων, σε συνδυασμό με τη ταυτόχρονη δράση των δυνάμεων απομάκρυνσης των σωματιδίων της θαλάσσιας μάζας από τη θέση ηρεμίας τους (γενεσιουργές δυνάμεις) και των δυνάμεων επαναφοράς των σωματιδίων στις αρχικές θέσεις τους (επαναφέρουσες δυνάμεις), προκαλούν κάτω από ορισμένες συνθήκες τη δημιουργία κινήσεων ταλάντωσης στα σωματίδια. Η συνισταμένη διαταραχή της θαλάσσιας μάζας από τις ταλαντώσεις των σωματιδίων οδηγεί στο θαλάσσιο κυματισμό.

1.2 Παράγοντες γέννησης κυματισμού

Προκειμένου να γεννηθεί και να αναπτυχθεί ένας κυματισμός στην ανοιχτή θάλασσα είναι απαραίτητοι τρεις παράγοντες:

- η ταχύτητα του ανέμου
- η διάρκεια πνοής του ανέμου
- η θαλάσσια έκταση, το ανάπτυγμα πελάγους (fetch) δηλαδή η περιοχή του πελάγους μέσα στην οποία παράγονται και αναπτύσσονται κυματισμοί υπό την επίδραση ανέμου σταθερής ταχύτητας.

Με βάση τις παραμέτρους αυτές τα κύματα μπορούν να διακριθούν στις εξής κατηγορίες :

1. Αναπτυσσόμενα κύματα που δημιουργούνται από τη μακρά πνοή ανέμου κατά μήκος περιορισμένου αναπτύγματος πελάγους (fetch-limited).
2. Αναπτυσσόμενα κύματα που δημιουργούνται από την πνοή ανέμου σύντομης διάρκειας κατά μήκος μεγάλου αναπτύγματος πελάγους.
3. Κύματα πλήρως αναπτυγμένης θάλασσας, τα οποία δημιουργούνται από πνοή ανέμου μακράς διάρκειας κατά μήκος μεγάλου αναπτύγματος πελάγους.

1.3 Χαρακτηριστικά στοιχεία κυμάτων

Τα κυριότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά προοδευτικών κυμάτων ορίζονται αναλυτικά ως εξής :

- Ύψος κύματος: η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής και της κοιλάδας του κύματος και συμβολίζεται με H .
- Μήκος κύματος: η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλιών της ταλάντωσης και μετράται κατά μήκος της διεύθυνσης μετάδοσης του κύματος. Συμβολίζεται με λ .
- Περίοδος κύματος: το χρονικό διάστημα μεταξύ της διέλευσης δύο διαδοχικών κορυφών κύματος από την ίδια θέση ή ο χρόνος μιας πλήρους ταλάντωσης των σωματιδίων. Συμβολίζεται με T .
- Κυκλική συχνότητα κύματος: το αντίστροφο της περιόδου του κύματος

Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά για τον καθορισμό του κύματος είναι:

- Διεύθυνση μετάδοσης κύματος: η διεύθυνση κατά την οποία ταξιδεύουν οι κορυφές του.
- Ταχύτητα μετάδοσης κύματος: η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύουν οι κορυφές του κύματος κατά τη διεύθυνσή του. Συμβολίζεται με c και είναι εξ ορισμού $c = \lambda/T$
- Καμπυλότητα ή κυρτότητα κύματος: ο λόγος του ύψους κύματος προς το μήκος κύματος και συμβολίζεται με $\gamma = H/\lambda$
- Κορυφή κύματος: το υψηλότερο σημείο του πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.
- Κοιλία κύματος: το χαμηλότερο σημείο κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.
- Διατομή κύματος: η κατακόρυφη διατομή του κατά τη διεύθυνση μετάδοσης.

1.4 Αρμονικοί κυματισμοί

Η περιγραφή τους είναι πολύ εύκολη καθώς η μορφή τους είναι ημιτονοειδής ή συνημιτονοειδής. Η συχνότητα f ισούται με:

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

η περίοδός τους

$$T = 1/f$$

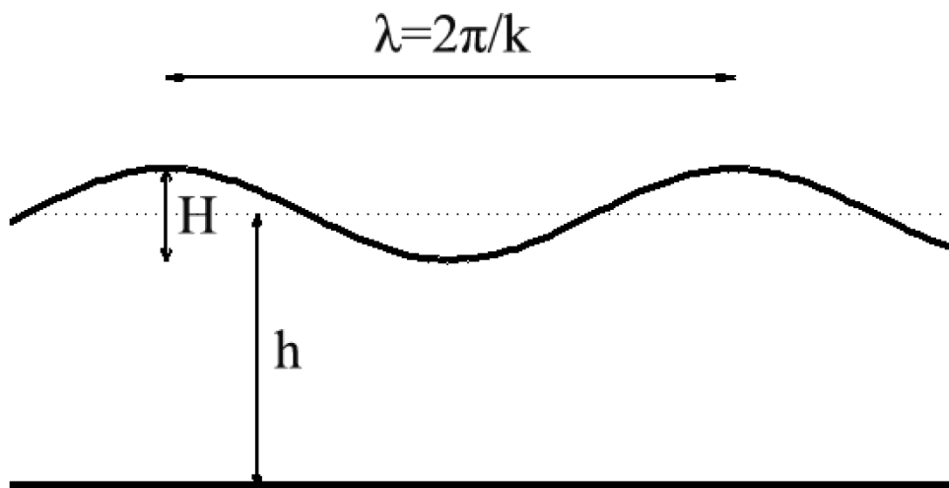
Ενώ η κυκλική συχνότητα και ο κυματαριθμός του κυματισμού ορίζονται από τις σχέσεις:

$$\omega = 2\pi/T$$

και

$$k = 2\pi/\lambda$$

Όπου λ , το μήκος κύματος.



Σχήμα 1.1 Μορφή αρμονικού κυματισμού

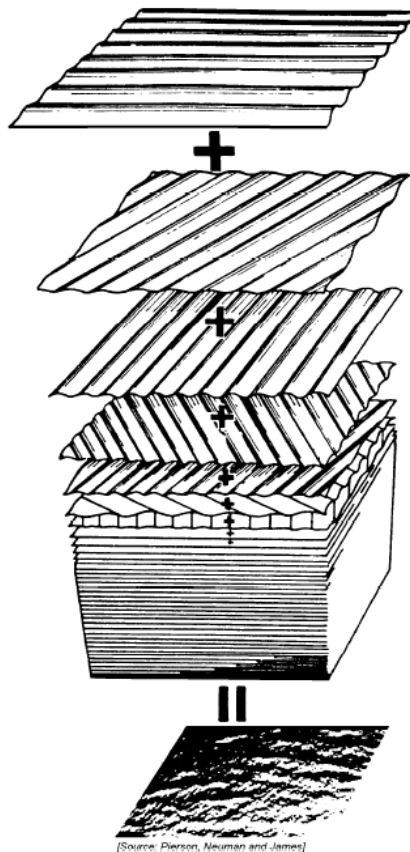
1.5 Τυχαίοι κυματισμοί

Οι τυχαίοι κυματισμοί, βάσει των οποίων θα γίνουν τα πειράματα δυναμικής συμπεριφοράς, περιγράφουν το θαλάσσιο περιβάλλον με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια συγκριτικά με τους αρμονικούς. Εξαιτίας της μη-κανονικής μορφής των κυμάτων καθώς αυτή μεταβάλλεται τόσο χρονικά όσο και χωρικά, είναι αδύνατη η περιγραφή τους με βάση την προσδιοριστική διαδικασία καθότι δεν υπάρχει επαναληψιμότητα. 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. Στοχαστική διαδικασία ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία ενώ οι συνθήκες του πειράματος παραμένουν σταθερές, τα αποτελέσματα είναι

ανόμοια και διαφορετικής μορφής. Έτσι, είμαστε σε θέση να περιγράψουμε και να αναλύσουμε με ακρίβεια μια δεδομένη κατάσταση θάλασσας.

Η ανύψωση της θαλάσσιας επιφάνειας απεικονίζεται με τη βοήθεια του μοντέλου των Longuet – Higgins. Σύμφωνα με αυτό, το σύνθετο κυματικό προφίλ προκύπτει από την επαλληλία ημιτονικών κυμάτων πλήθους i της μορφής:

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



Σχήμα 1.2 Μοντέλο Longuet-Higgins

1.6 Φαινόμενα και στατιστικά μεγέθη στοχαστικών διαδικασιών

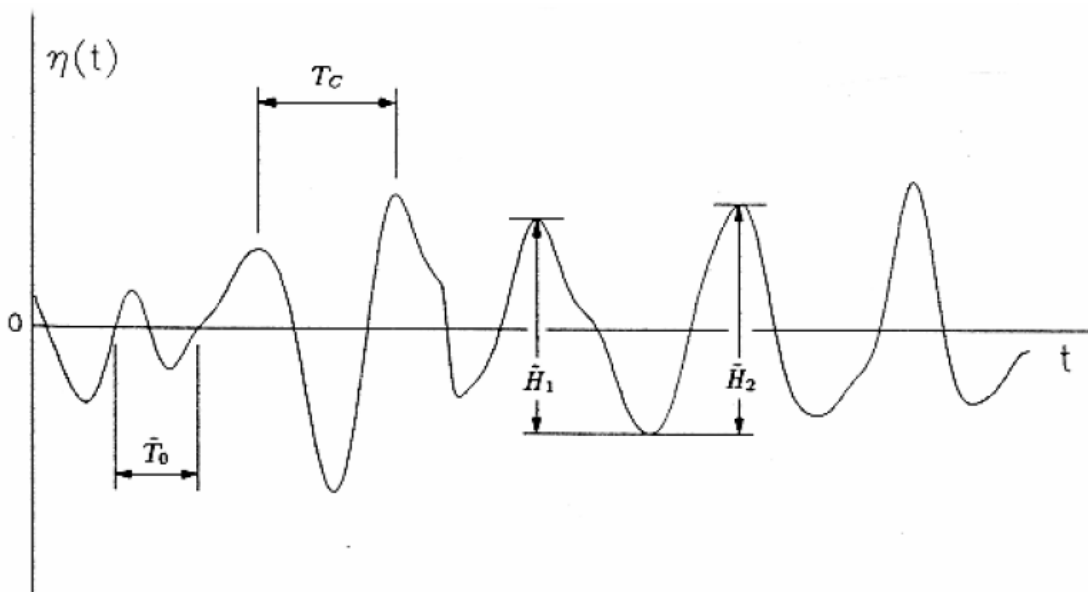
Η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας λόγω ανεμογενών κυματισμών είναι μία κυματομορφή με έντονα ακανόνιστο σχήμα. Η κυματομορφή αυτή άλλοτε μετράται και καταγράφεται με τη βοήθεια κάποιου μετρητικού οργάνου, και άλλοτε απλώς παρατηρείται απ' ευθείας οπτικά. Και στις δύο περιπτώσεις είναι δυνατόν να εκτιμηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά, δηλαδή το ύψος, το μήκος, η περίοδος και η κύρια κατεύθυνση διάδοσης των κυματισμών. Όταν τα χαρακτηριστικά αυτά εκτιμώνται από την καταγραφή ενός μετρητικού οργάνου ονομάζονται αντικειμενικά ή μετρούμενα, ενώ όταν εκτιμώνται από απλή οπτική παρατήρηση ονομάζονται υποκειμενικά ή φαινόμενα. Στη συνέχεια συνοψίζονται οι ορισμοί των διαφόρων κυματικών παραμέτρων και εξετάζονται οι μεταξύ τους σχέσεις. Ορίζονται επίσης οι έννοιες της κατάστασης θάλασσας και του κυματικού κλίματος.

1.7 Φαινόμενα μεγέθη

Ο όρος "φαινόμενα μεγέθη" υποδηλώνει μεγέθη που "φαίνονται" απ' ευθείας (χωρίς, δηλαδή, παραπέρα επεξεργασία) σε μια καταγραφή της ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας. Δεδομένου ότι η ανύψωση, συμβολίζεται με η , είναι συνάρτηση τόσο του χρόνου t όσο και της οριζόντιας θέσης \tilde{x} του σημείου μέτρησης, διακρίνουμε φαινόμενα μεγέθη χρόνου και φαινόμενα μεγέθη χώρου. Στην συνέχεια δίνεται ο ορισμός για τα σημαντικότερα από αυτά.

Αν $\tilde{x} = \text{σταθερό}$, τότε $\eta = \eta(t)$, ορίζονται τα παρακάτω φαινόμενα μεγέθη χρόνου:

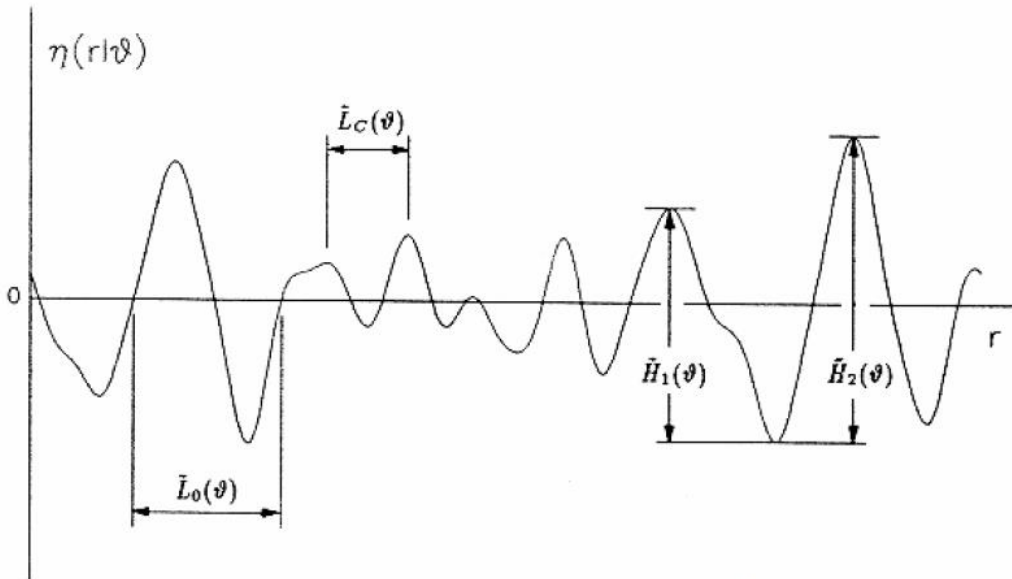
- Φαινόμενο ύψος κύματος, \tilde{H} : η (απόλυτη) κατακόρυφη απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και της επόμενης κοιλάδας (\tilde{H}_1), ή μιας κοιλάδας και της επόμενης κορυφής (\tilde{H}_2) της συνάρτησης ανύψωσης $\eta(t)$.
- Φαινόμενη περίοδος μηδενικής υπέρβασης, (\tilde{T}_0): το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών υπερβάσεων του επιπέδου ηρεμίας από τη συνάρτηση ανύψωσης $\eta(t)$.
- Φαινόμενη περίοδος κορυφών (\tilde{T}_c): το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών της συνάρτησης ανύψωσης $\eta(t)$.



Σχήμα 1.3 Φαινόμενα κυματικά μεγέθη χρόνου σε μια διαδικασία

Όσον αφορά τα φαινόμενα μεγέθη χώρου, ορισμένα από τα πιο σημαντικά είναι:

- Φαινόμενο ύψος κύματος κατά την κατεύθυνση θ , $\tilde{H}(\theta)$
- Φαινόμενο μήκος κύματος κατά την κατεύθυνση θ , $\tilde{L}(\theta)$
- Φαινόμενη κλίση κύματος κατά την κατεύθυνση θ , $\tilde{\beta}(\theta) = \tilde{H}(\theta)/\tilde{L}(\theta)$



Σχήμα 1.4 Φαινόμενα κυματικά μεγέθη χώρου σε μια διαδικασία

Οι τιμές των φαινομένων μεγεθών μεταβάλλονται κατά μήκος μιας καταγραφής. Σύμφωνα με την στατιστική θεωρία των ανεμογενών κυματισμών, όλα τα ανωτέρω μεγέθη θεωρούνται ως τυχαίες μεταβλητές και περιγράφονται στατιστικά, δηλαδή με τη βοήθεια συναρτήσεων κατανομής πιθανότητας.

1.8 Στατιστικά μεγέθη

Όπως με τα φαινόμενα μεγέθη χρόνου και χώρου, είναι εφικτός ο ορισμός στατιστικών μεγεθών χρόνου και χώρου, τα πιο σημαντικά εκ των οποίων είναι:

- Μέσο ύψος κύματος \bar{H} και τυπική απόκλιση του ύψους κύματος H_{rms}

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{H}_j \quad H_{rms} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{H}_j^2$$

- Σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$ το οποίο ορίζεται ως η μέση τιμή του 1/3 των υψηλότερων τιμών του φαινομένου ύψους κύματος κατά μήκος μιας καταγραφής

$$H_{1/3} = \frac{1}{[N/3]} \sum_{j=1}^{[N/3]} \tilde{H}_j$$

- Μέση περίοδος κύματος
- Μέσο μήκος κύματος

Στην περίπτωση που οι τιμές κύματος ληφθούν ως τιμές χώρου, τότε τα στατιστικά μεγέθη εξαρτώνται και από την κατεύθυνση διάδοσης θ . Εάν το $H_{1/3}$ παρουσιάζει έντονο ολικό μέγιστο για κάποια κατεύθυνση Θ_0 , τότε η κατεύθυνση αυτή

λέγεται κύρια κατεύθυνση διάδοσης κύματος. Εάν παρουσιάζονται παραπάνω από ένα μέγιστα, τότε αντίστοιχα έχουμε δύο ή περισσότερες κύριες κατευθύνσεις διάδοσης.

1.9 Φάσμα στοχαστικών διαδικασιών

Τα στοχαστικά (ή φασματικά) μεγέθη που αναφέρθηκαν προηγουμένως, μπορούν να εκφραστούν με βάση το φάσμα $S(\omega, \theta)$ του πεδίου κύματος. Το φάσμα περιγράφει την πιθανοθεωρητική δομή του κυματικού πεδίου και σε κάθε στατιστικό μέγεθος αντιστοιχεί ένα στοχαστικό μέγεθος. Τα στατιστικά μεγέθη χρόνου μπορούν να εκφραστούν μέσω των φασματικών μεγεθών από το φάσμα συχνότητας:

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

και τις σχέσεις που ακολουθούν:

- Μέσο ύψος κύματος $E(H) = 2.5\sqrt{m_0}$
- Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 4\sqrt{m_0}$
- Μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης $E[T_0] = T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$
- Μέση περίοδος κορυφών $E[T_c] = T_{24} = 2\pi \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$
- $\sigma_\chi = rms = \sqrt{m_0}$

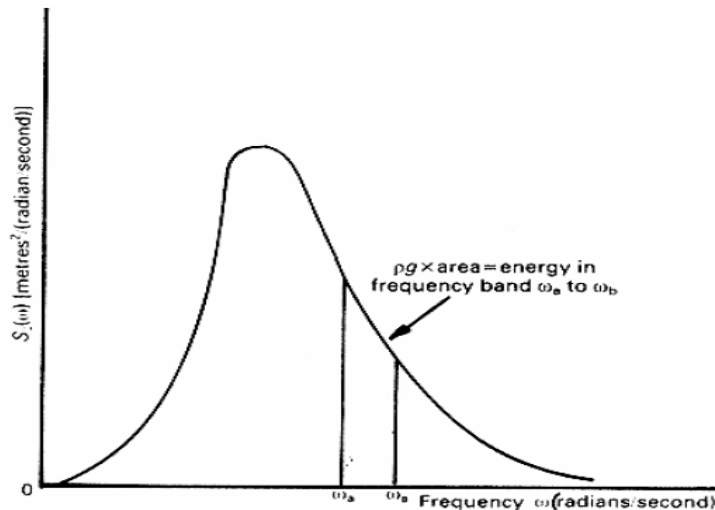
Όπου:

m_0, m_2, m_4 : φασματικές ροπές που υπολογίζονται μέσω της σχέσης:

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

$E[\cdot]$: ο τελεστής μέσης τιμή ολότητας

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

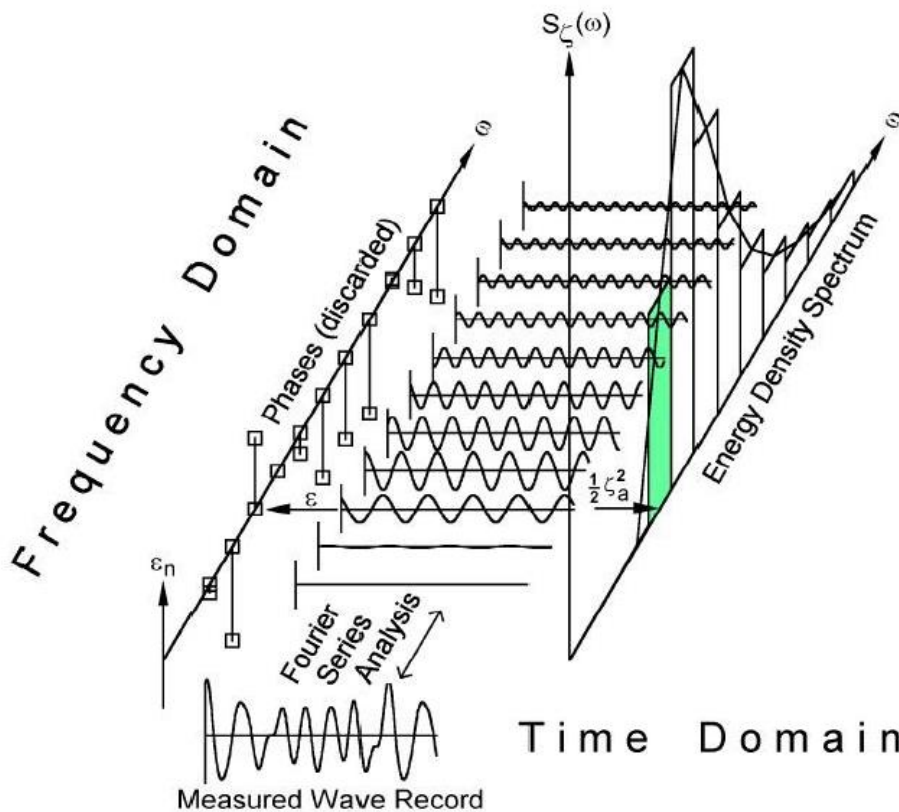


Σχήμα 1.5 Μορφή φάσματος

Όταν το φάσμα καλύπτει μικρό εύρος συχνοτήτων δηλαδή η διαδικασία θεωρείται στενής λωρίδας και θα μελετηθεί στην επόμενη ενότητα, ισχύουν ακόμα οι σχέσεις:

$$E(H) = \bar{H}, H_s = H_{1/3}$$

Στην εικόνα που ακολουθεί, παριστάνεται 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.



Σχήμα 1.6 Παραγωγή φάσματος $S(\omega)$ τυχαίου κυματισμού μέσω αρμονικών συνιστωσών

Αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν και για τα φασματικά μεγέθη χώρου τα οποία αντιστοιχούν σε στοχαστικά μεγέθη χώρου. Κατά την κύρια κατεύθυνση διάδοσης ισχύει:

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

και εκφράζει την κατανομή της κυματικής ενέργειας στις διαφορετικές κατευθύνσεις.

Η θεωρία των στοχαστικών διαδικασιών μας επιτρέπει να ορίσουμε την έννοια της "κατάστασης θάλασσας" η οποία χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι τα στατιστικά μεγέθη των κυματισμών παραμένουν (σχεδόν) σταθερά ή πληρέστερα και πως το φάσμα $S(\omega, \theta)$ του κυματικού πεδίου παραμένει σχεδόν αμετάβλητο.

Για την περιγραφή των τυχαίων κυματισμών έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα όπως το φάσμα Johnswar και Pierson-Moskowitz τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως στην κλειστές, ρηχές θάλασσες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα πειράματα αφορούν τυχαίους κυματισμούς πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας. Το φάσμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το φάσμα Bretschneider (1959), το οποίο ορίζεται ως εξής:

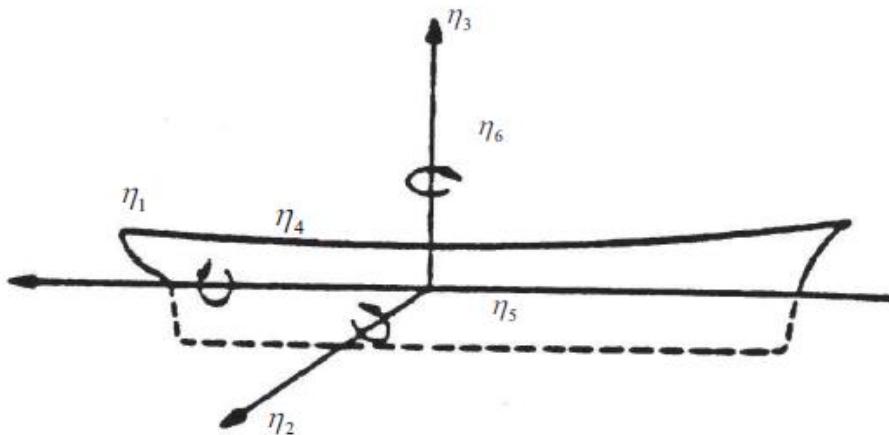
$$S(\omega) = \frac{5}{16} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^5 \frac{H_{1/3}^2}{\omega_p} \exp\left\{-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right\}$$

Με:

ω_p : η συχνότητα κορυφής του φάσματος

$H_{1/3}$: το σημαντικό ύψος κύματος

1.10 Είδη κινήσεων



η_1 = surge η_3 = heave η_5 = pitch

η_2 = sway η_4 = roll η_6 = yaw

Σχήμα 1.7 Είδη κινήσεων

Η δυναμική συμπεριφορά ενός πλοίου αποτελεί σύνθετο και περίπλοκο πρόβλημα διότι έχει 6 βαθμούς ελευθερίας με αποτέλεσμα οι δυνάμεις που του ασκούνται να το εξαναγκάζουν σε πολλές κινήσεις ταυτογχρόνως. Οι κινήσεις χωρίζονται σε μεταφορικές και περιστροφικές και είναι:

Μεταφορικές

ξ1 Διαμήκης οριζόντια ταλάντωση	Surge
ξ2 Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση	Sway
ξ3 Κατακόρυφη ταλάντωση	Heave

Περιστροφικές

ξ4 Ταλάντωση περί τον διαμήκη άξονα - Διατοιχισμός	Roll
ξ5 Ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα - Πρόνευση	Pitch
ξ6 Ταλάντωση περί τον κατακόρυφο άξονα	Yaw

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

1.11 Θεωρία λωρίδων

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την εκτίμηση των κινήσεων ενός συμβατικού πλοίου είναι η θεωρία λωρίδων. Στη συγκεκριμένη μέθοδος, η βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας αναπαράσεται ως σειρά δισδιάστατων εγκάρσιων λωρίδων μικρού μήκους. Συνεπώς, τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της γάστρας είναι αποτέλεσμα της υπέρθεσης των δισδιάστατων χαρακτηριστικών καθεμίας λωρίδας. Έτσι, αμελούνται οι τρισδιάστατες επιδράσεις της αλληλεπίδρασης των λωρίδων, η επίδραση της μεταβαλλόμενης μορφής της λωρίδας κατά μήκος της και η ροή κυκλοφορίας στην πρύμνη και στην πρόρα του πλοίου. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις προϋποθέσεις τις οποίες βασίζεται η εν λόγω θεωρία:

- Το σκάφος είναι λεπτόγραμμο με μεγάλη ακαμψία.
- Οι κινήσεις του πλοίου είναι μικρές.
- Η ταχύτητα του πλοίου είναι σχετικά μικρή και δεν υπάρχει άνωση ολίσθησης.
- Οι τομές του καταλήγουν σε κατακόρυφες πλευρές.
- Οι κυματισμοί διαδίδονται σε βαθύ νερό.
- Η ύπαρξη της γάστρας έχει μηδενική επιρροή στους κυματισμούς (υπόθεση Froude-Krylov).

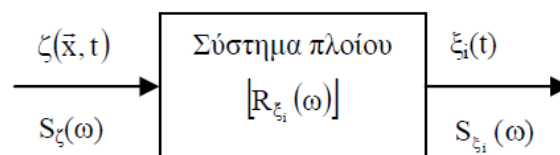
Στην περίπτωση όπου είναι επιθυμητός ο υπολογισμός της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός ταχύπλοου σκάφους, η θεωρία λωρίδων θα πρέπει να χρησιμοποιείται προσεκτικά για τους εξής λόγους:

- Η μορφή των νομέων μεταβάλλεται απότομα κατά μήκος τους σκάφους.
- Οι επιδράσεις του καθρέφτη της πρύμνης επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα, συνεπώς θα πρέπει να γίνεται διόρθωση των αποτελεσμάτων.
- Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά κάθε λωρίδας 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 μπορούν να περιγραφούν ικανοποιητικά από μορφές Lewis, δε συμβαίνει όμως το ίδιο και με τα ταχύπλοα.
- Το σκάφος θεωρείται πως δεν επηρεάζει τους κυματισμούς και επομένως τα αποτελέσματα δεν είναι αξιόπιστα.
- 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.σ
- Στη θεωρία λωρίδων θεωρείται πως δεν υπάρχει άνωση λόγω χαμηλής ταχύτητας.
- Η αρχή της γραμμικής υπέρθεσης εφαρμόζεται με δυσκολία ιδιαίτερα σε μεγάλου πλάτους κινήσεις οπότε βγαίνει η πλώρα από το νερό.

Για τους παραπάνω λόγους, θα πρέπει να γίνονται οι κατάλληλες διορθώσεις κατά την εφαρμογή της θεωρίας σε σκάφη ημι-εκτοπίσματος ενώ όταν χρησιμοποιείται σε ολισθακάτους τότε τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά μόνο στις ταχύτητες στις οποίες δεν έχει επέλθει ολίσθηση.

1.12 Αποκρίσεις / RAO (Response Amplitude Operator)

Η εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός πλοίου σε κυματισμούς γίνεται με τη χρήση των αδιάστατων συντελεστών απόκρισης (Response Amplitude Operator – RAO). Το πλοίο θεωρείται ως γραμμικό σύστημα για κάθε δυναμική απόκριση (αρχή γραμμικής υπέρθεσης). Επομένως το φάσμα της απόκριση υπολογίζεται εύκολα μέσω της συνάρτησης μεταφοράς και του γνωστού φάσματος της διέγερσης.



Σχήμα 1.8 Δυναμική απόκριση του πλοίου

Ισχύει η σχέση:

$$S_{\xi_i}(\omega_0) = |R_{\xi_i}(\omega_0)|^2 S_z(\omega_0)$$

Όπου:

S_{ξ_i} : φάσμα απόκρισης

S_{ζ} : φάσμα ανύψωσης θάλασσας

Τα RAO για τις διαφορετικές αποκρίσεις υπολογίζονται ως εξής:

Heave

$$RAO_{heave} = \frac{\xi_3}{\zeta_\alpha}$$

ζ_α : πλάτος κύματος

Pitch

$$RAO_{pitch} = \frac{\xi_5 \cdot \lambda}{360 \cdot \zeta_\alpha}$$

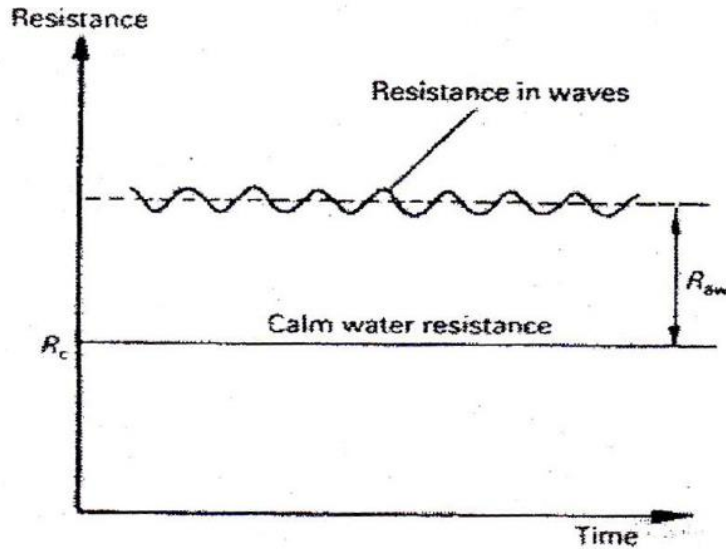
λ : μήκος κύματος

Accelerations

$$RAO_{acc} = \frac{a \cdot L_{wl}}{\zeta_\alpha}$$

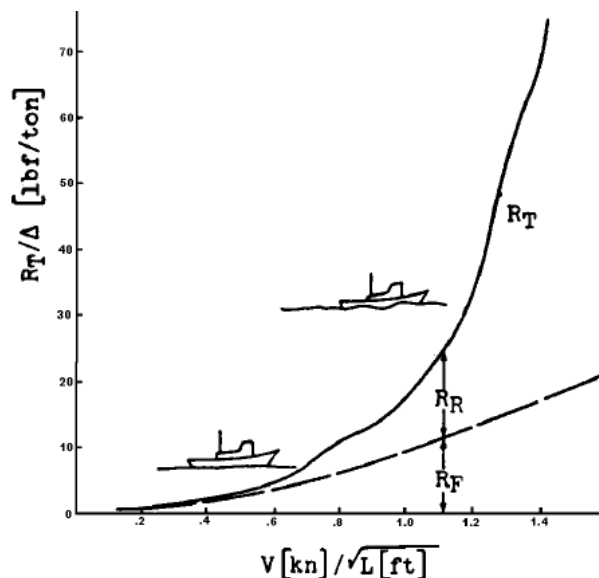
1.13 Πρόσθετη αντίσταση

Βασικές παράμετροι για την ταχύτητα ενός πλοίου είναι η απόδοση της έλικας, η ισχύς της μηχανής και η αντίσταση του. Για δεδομένη ισχύς μηχανής, η απόδοση της έλικας μειώνεται σε έντονες καιρικές συνθήκες με την αύξηση της αντίστασης λόγω της ενέργειας των κυμάτων και τον άνεμο, έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας του σκάφους. Η ολική αντίσταση του σκάφους κατά την πλεύση σε κυματισμούς, όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί, αποτελείται από δύο συνιστώσες: την αντίσταση σε ήρεμο νερό (calm water resistance) και την πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς (added wave resistance).



Σχήμα 1.9 Συνιστώσες αντίστασης σκάφους

Ενώ στην παρακάτω φαίνεται η αύξηση της αντίστασης με την αύξηση της ταχύτητας του σκάφους.



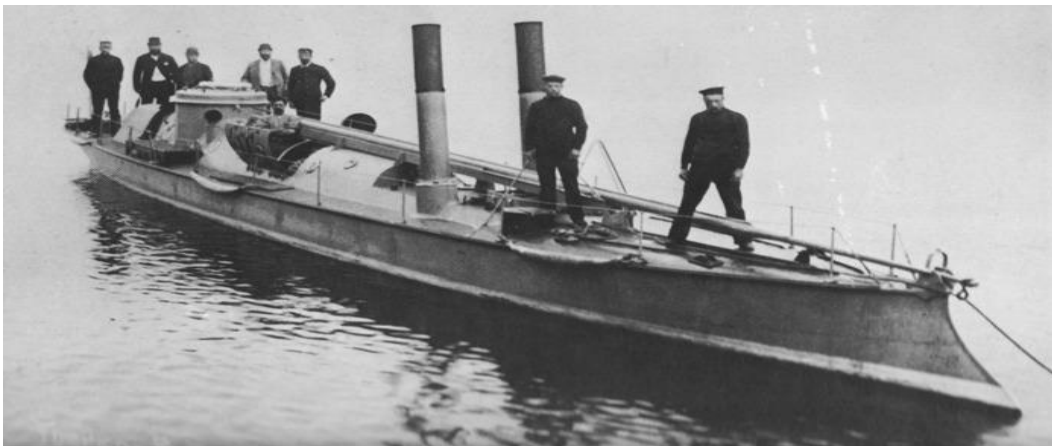
Σχήμα 1.10 Καμπύλη αντίστασης-ταχύτητας σκάφους

2 ΤΑΧΥΠΛΟΑ ΣΚΑΦΗ

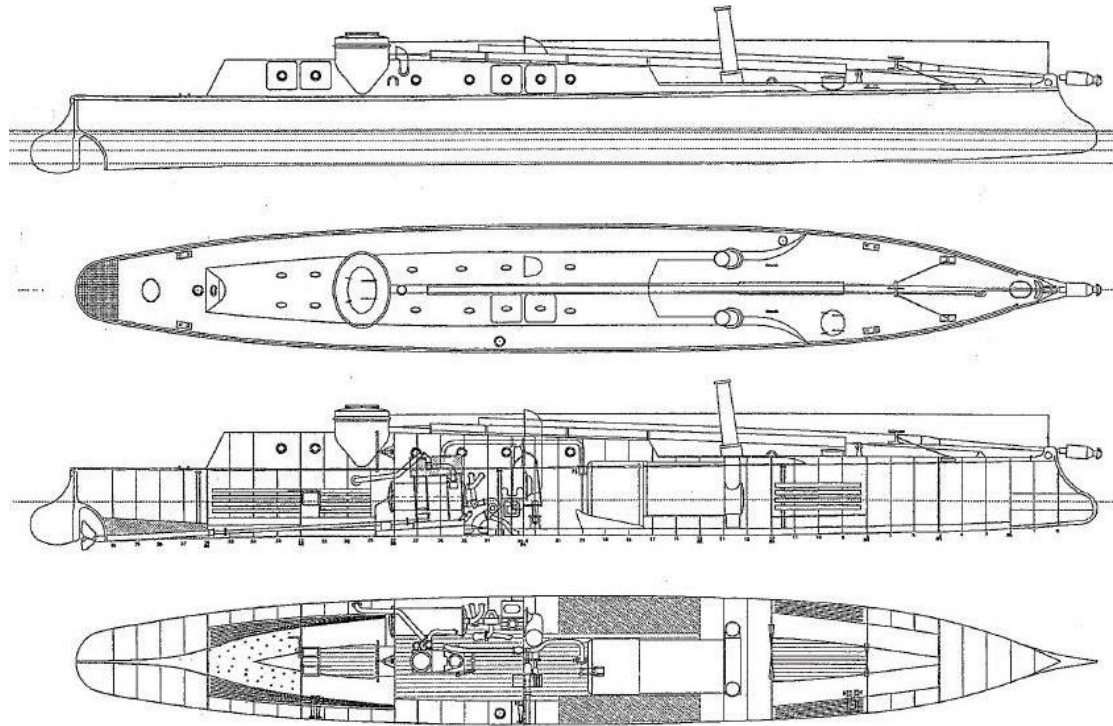
2.1 Ιστορική αναδρομή

Οι πρώτες προσπάθειες για την ανάπτυξη νέων ασφαλών τύπων πλοίων με ικανοποιητική συμπεριφορά στους θαλάσσιους κυματισμούς, μη συμβατικών, που θα συνδύαζαν την υψηλή ταχύτητα και τη μεγάλη μεταφορική ικανότητα με την, όσο το δυνατόν, χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου, ξεκίνησαν στα μέσα του 19^{ου} αιώνα.

Από τις πρώτες κατασκευές ταχύπλοων σκαφών που έχουν καταγραφεί, περίοπτη θέση καταλαμβάνουν αυτά της αγγλικής εταιρείας John I Thornycroft Ltd. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί η κατασκευή πλοίου μήκους 83 ft και τελική ταχύτητα 21 kn με έτος κατασκευής το 1873. Η ταχύτητα των 21 kn, λαμβάνοντας το μήκος ισάλου ίσο με 83 ft, αντιστοιχεί σε $F_n=0.686$ αν και ο πραγματικός αριθμός Froude, ίσως να ήταν μεγαλύτερος, καθότι τα 83 ft αντιστοιχούν στο συνολικό μήκος του πλοίου. Στα επόμενα έτη, κατασκευάστηκαν από την ίδια εταιρεία, μικρές τορπιλάκατοι όπως το Defender και το Tairaroa, με μήκος 63ft, πλάτος 7ft και 6in, βύθισμα 3ft και 4in και ταχύτητες που έφταναν του 17.5 kn ($F_n\sim 0.655$). Δύο σκάφη που κατασκευάστηκαν το 1887 και 1896 και κινούνταν με τη βοήθεια ατμομηχανών, έφτασαν την ταχύτητα των 26 και 30 κόμβων αντιστοίχως.

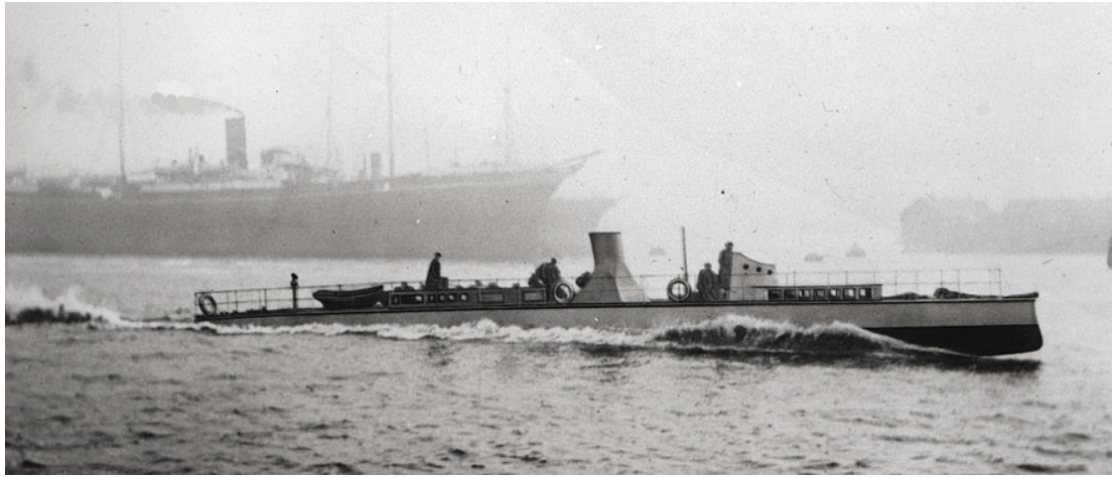


Εικόνα 2.1 Τορπιλάκατος Tairaroa, κατασκευής 1883 της John I Thornycroft



Σχήμα 2.1 Τορπιλάκατος, τύπος 168, κατασκευής 1883 της John I Thornycroft

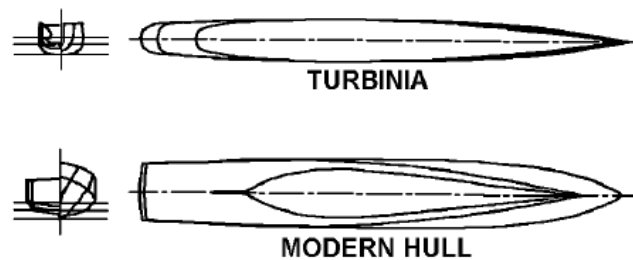
Το πρώτο ταχύπλοο σκάφος, με τη σημερινή ορολογία, είναι αναμφίβολα το Turbinia του Sir Charles Algernon Parsons, ενός πρωτοπόρου για την εποχή με ιδιαίτερη έμφαση στην εξέλιξη των αμοστροβίλων. Ο Sir Charles Algernon Parsons εφηύρε το σύγχρονο αμοστρόβιλο το 1884 και προβλεποντας τις δυνατότητές του, δημιούργησε την Parsons Marine Steam Turbine Company το 1893. Το Turbinia κατασκευάστηκε στην Μ. Βρετανία το έτος 1894 στα ναυπηγεία του Brown & Hood στο Wallsend και αποτέλεσε την απαρχή μιας νέας εποχής που χαρακτηρίζεται από τεχνολογική ανάπτυξη και η οποία έριξε το βάρος της κυρίως στην αύξηση της ταχύτητας. Είναι το πρώτο πλοίο που χρησιμοποίησε αμοστρόβιλο και κατάφερε, ύστερα από πολλές δοκιμές στη διάταξη του μέσου πρόωσης, να φτάσει τους 34.5 kn. Αρχικά, τα αποτελέσματα ήταν απογοητευτικά, καθώς έφτανε μέχρι τους 20 kn. Η μικρή ταχύτητα, συγκριτικά με την προσδοκώμενη, ήταν απόρροια της σπηλαίωσης που εμφανιζόταν και που είχε ως αποτέλεσμα η έλικα να μη μπορεί να απορροφά το σύνολο της ισχύος του κινητήρα. Η επίλυση του προβλήματος επήλθε με την προσθήκη τριών αμοστροβίλων, ενός υψηλής, ενός μεσαίας, και ενός χαμηλής πίεσης που χρησιμοποιούσαν τον ίδιο άτμο. Κάθε στρόβιλος κινούσε έναν άξονα, ο καθένας από τους οποίους έφερε τρεις έλικες. Με ταχύτητα 34.5 kn κατάφερε να ταξιδεύει με αριθμό Froude μεγαλύτερο της μονάδας. Η λεπτόγραμμη γάστρα του σκάφους, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη τέτοιας ταχύτητας. Με συνολικό μήκος $L=31.93$ m και πλάτος $B=2.7$ m, ο λόγος μήκους προς πλάτους ήταν κατά πολύ μεγαλύτερος από τα πλοία της εποχής αλλά και από πολλά σημερινά. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Turbinia, σε συνδυασμό με τη μεγάλη συγκέντρωση ισχύος, έδιναν στο πλοίο την απαιτούμενη ισχύ εξοικονομώντας βάρος και όγκο μηχανοστασίου συγκριτικά δίνοντας τεράστιο πλεόνακτο έναντι των πλοίων εκείνης της εποχής.



Εικόνα 2.2 Turbinia, έτος κατασκευής 1894, μήκος 100ft και ταχύτητα 34.5kn



Εικόνα 2.3 Το Turbinia σήμερα στο Newcastle Discovery Museum



Σχήμα 2.2 Σύγκριση γραμμών Turbinia και σύγχρονου ταχύπλοου σκάφους

Τα ταχύπλοα σκάφη βρήκαν σύντομα πεδίο εφαρμογής στο πολεμικό ναυτικό πολλών κρατών κατά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο ενώ γνώρισαν μεγάλη ανάπτυξη κατά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Σήμερα, τα μονόγαστρα ταχύπλοα σκάφη είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα σαν σκάφη αναφυχής αλλά και ως αγωνιστικά σκάφη. Τα τελευταία 20 χρόνια ταχύπλοα σκάφη κατασκευάζονται για χρήση ως ταχύπλοα Επιβατηγά Οχηματαγωγά.

2.2 Παράμετροι σχεδίασης ταχύπλοων σκαφών

Κατά τη σχεδίαση ταχύπλοων σκαφών θα πρέπει να ληφθούν ορισμένες παράμετροι οι οποίες επιδρούν θετικά ή αρνητικά την υδροδυναμική συμπεριφορά αυτών σε κυματισμούς.

Μορφή νομέων

Με σκοπό την βελτίωση της πηδαλιουχίας σε κυματισμούς, επιλέγεται η μορφή νομέων “V”. Τα ταχύπλοα με αυτήν τη μορφή νομέων όμως, παρουσιάζουν έντονες σφυροκρούσεις και κρουστικά φορτία. Οι νομείς τέτοιας μορφής μπορούν να είναι είτε κοίλοι, είτε κυρτοί, είτε ευθείς στον πυθμένα. Η τελευταία επιλογή θεωρείται ως η καλύτερη εκ των τριών προαναφερθέντων. Ένας άλλος τύπος νομέων είναι αυτός του αντεστραμμένου κουδουνιού ο οποίος δεν αυξάνει πολύ την πρόσθετη αντίσταση ενώ τα κρουστικά φορτία περιορίζονται αισθητά.

Γωνία ανύψωσης πυθμένα

Η γωνία ανύψωσης πυθμένα επηρεάζει κυρίως τις κρουστικές επιταχύνσεις. Η αύξησή της, συνεπάγεται με μείωση των κινήσεων του σκάφους και της πρόσθετης αντίστασης σε έντονους κυματισμούς και σε υψηλές ταχύτητες. Συνεπώς η αύξηση της γωνίας ανύψωσης πυθμένα επιδρά θετικά στην συμπεριφορά του σκάφους.

Λόγος L/B

Η αύξηση του λόγου μήκους προς πλάτος έχει δείξει πως αυξάνει τις επιταχύνσεις σε όλο το εύρος ταχυτήτων ενώ ειδικά σε υψηλές ταχύτητες, οι κινήσεις είναι πολύ μεγαλύτερες.

Γωνία διαγωγής (trim)

Η όσο το δυνατόν μικρότερη γωνία διαγωγής είναι επιθυμητή κατά τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός ταχύπλοου καθώς μειώνει την πρόσθετη αντίσταση, τον προνευτασμό, την κατακόρυφη κίνηση και τις κρουστικές επιταχύνσεις. Εντούτοις, σε ταχύτητες που αντιστοιχούν στην περιοχή μετά το τοπικό μέγιστο της καμπύλης αντίστασης, η πρόσθετη αντίσταση αυξάνεται.

Συντελεστής φόρτισης

Σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά, αποτελεί ο συντελεστής φόρτισης c_{DL} . Η αύξηση των τιμών αυτού οδηγεί σε μείωση των επιταχύνσεων ενώ σε ταχύτητες με $F_n=0.6$ μειώνεται και η πρόσθετη αντίσταση.

2.3 Κύριες γάστρες ταχύπλων σκαφών

Οι γάστρες των ταχύπλων σκαφών χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Ολισθακάτους
- Ημι-εκτοπίσματος

Μελετώντας κάθε τύπο γάστρας, μπορούν να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε σχεδίασης. Η επιλογή της σχεδίασης κάθε φορά εξαρτάται από την χρήση αλλά και τις συνθήκες στις οποίες θα λειτουργεί.

Το μέγεθος φυσικά κάθε ταχύπλου πλοίου είναι και ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τον τύπο της γάστρας που θα επιλεγεί. Μεγάλα και γρήγορα σκάφη απαιτούν και πολύ μεγάλες αλλά και ακριβές μηχανές, μεγάλη κατανάλωση καυσίμου αλλά και μεγάλο λειτουργικό κόστος.

Η μέγιστη ταχύτητα τους εξαρτάται και προσδιορίζεται από τον αριθμό Froude (F_n), ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$F_n = \frac{V}{(gL)^{1/2}}$$

V: η ταχύτητα του πλοίου (kn)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας

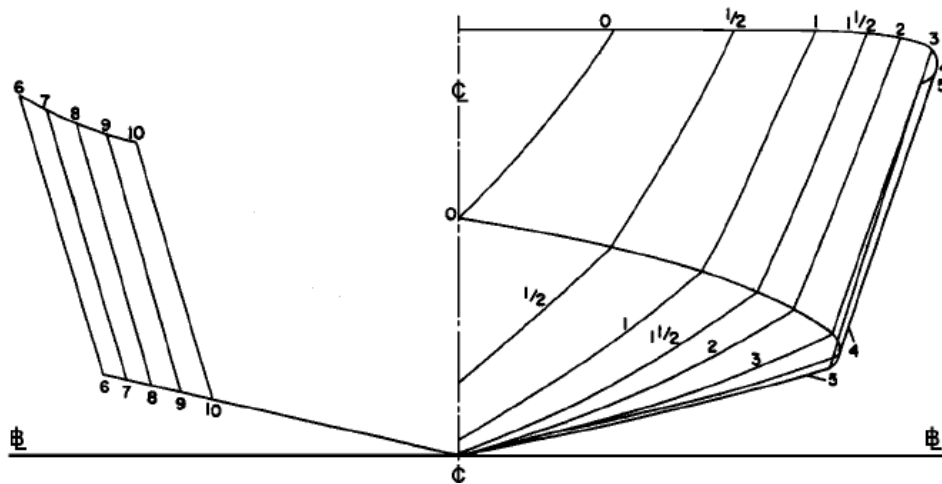
L: το μήκος του πλοίου

2.3.1 Ολισθάκατοι

Οι ολισθάκατοι (planing hulls) αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο ταχύπλων σκαφών. Είναι σκάφη μικρού μεγέθους και μεγάλης ταχύτητας. Το μήκος τους φθάνει μέχρι περίπου τα 50 μέτρα και λειτουργούν σε ταχύτητες που αντιστοιχούν $F_n > 1.0$ εξού και το όνομά τους. Οι ολισθάκατοι χρησιμοποιούνται ως εφαρμογή σε σκάφη περιπολίας, ψαρέματος, σκάφη υπηρεσίας, ασθενοφόρα και για αγωνιστικά σκάφη

Καθότι η αποκόλληση της ροής τόσο στην πρύμνη όσο και κατά μήκος των πλευρών είναι επιθυμητή σε τέτοια σκάφη, σε αντίθεση με τα συμβατικά, οι γάστρες τους κατασκευάζονται με πρύμνη καθρέφτη και οξείες ακμές. Ακόμα, με στόχο να εμποδιστεί η ανάπτυξη αρνητικών δυναμικών πιέσεων στον πυθμένα, έχουν ευθείες διαμήκεις τομές ενώ αποφεύγεται η ύπαρξη κυρτών νομέων. Επίσης, οι γάστρες αυτές χαρακτηρίζονται από λεπτές γραμμές στην είσοδο για τη μείωση της αντίστασης στις μικρές ταχύτητες καθώς και από ανυψωμένο πυθμένα που αυξάνεται γρήγορα στην πρόρα ούτως ώστε να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερα κρουστικά φορτία σε έντονες καταστάσεις θάλασσας. Μειονέκτημα αποτελεί η ύπαρξη σφυροκρούσεων στην πρόρα και η δυσμενέστερες κινήσεις σε κυματισμούς. Πρέπει να αναφερθεί η ύπαρξη, αν και πιο σπάνια, ολισθακάτων με στρογγυλό πυθμένα οι οποίες όπως και αυτές με ακμή, χαρακτηρίζονται από πρύμνη καθρέφτη. Η ανωστική δύναμη σε αυτές τις γάστρες είναι μικρότερη με αποτέλεσμα οι γάστρες με ακμή να είναι αυτές που προτιμώνται.

Καθώς η ολισθάκατος ανυψώνεται, η αντίσταση ελαττώνεται όσο η βρεχόμενη επιφάνεια μειώνεται, με αποτέλεσμα να είναι ικανή να αναπτύξει πολύ μεγάλες ταχύτητες συγκριτικά με το συνολικό της μήκος.



Σχήμα 2.3 Πρότυπο πλοίο της Σειράς 62

Άλλες παρόμοιες σειρές είναι η ολλανδική σειρά 62, η αμερικάνικη σειρά 65, και οι ρώσικες σειρές BK και MBK.

2.3.2 Γάστρες ημι-εκτοπίσματος

Αυτού του είδους οι γάστρες περιλαμβάνουν συνήθη πλοία εργασίας, γενικά αλιευτικά σκάφη, σκάφη αναψυχής και μικρών πολεμικών σκαφών. Με ταχύτητες και αριθμό Froude που κυμαίνεται μεταξύ 0.5 - 1.3. Όταν επιτευχθεί η πιό οικονομική ταχύτητα απαιτείται ένα σοβαρό ποσό ισχύος για να γίνει μια γάστρα ημιεκτοπίσματος ταχύτερη. Όταν αυτού του είδους οι γάστρες επιτύχουν υψηλότερες ταχύτητες η πρύμνη θα αποκτήσει αντίσταση στο νερό και θα δημιουργήσει ένα μεγάλο κύμα προωαία και πρυμναία. Κατα την πλεύση τους αντιμετωπίζουν σημαντική δυναμική άνωση αν και δεν ολισθαίνουν. Για $Fn > 0.7$ εμφανίζεται δυναμική άνωση που αυξάνεται με την ταχύτητα κατά τον ίδιο τρόπο που μειώνεται η υδροστατική άνωση.

Τα σκαφη ημι-εκτοπίσματος έχουν στρογγυλό πυθμένα και χαρακτηρίζονται από:

- Κυρτή μορφή των προωαίων νομέων
- Μεγάλη γωνία ανύψωσης πυθμένα στο προωαίο τμήμα του σκάφους
- Ευθείες ισάλους στην περιοχή της πλώρας με μικρές γωνίες εισόδου
- Ευθείες ή ελαφρά κυρτές διαμήκεις τομές στο πρυμναίο ήμισυ του σκάφους που ανυψώνονται οδεύοντας προς την πρύμνη
- Κεντρική τρόπδια στο πρυμναίο μέρος
- Πρύμνη καθρέφτη

Για $Fn < 0.8$ συνηθίζονται στρογγυλεμένοι νομείς και κυρτές διαμήκεις τομές, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες προτιμούνται ευθείες διαμήκεις τομές και σχεδόν ευθείς νομείς.

3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ ΣΚΑΦΩΝ

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

Οι σειρές που έχουν αναπτυχθεί ποικίλουν ως προς την γεωμετρία της γάστρας και ως προς τις παραμέτρους σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκαν. Έτσι, υπάρχουν συστηματικές σειρές για σκάφη με στρογγυλό πυθμένα, σκάφη με μία ακμή, σκάφη με δύο ακμές. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά κάποιων γνωστών σειρών ενώ στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικότερα η συστηματική σειρά που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π.

3.1 Συστηματικές σειρές στρογγυλού πυθμένα

Συστηματική σειρά NPL

Η πιο γνωστή σειρά ταχύπλοων σκαφών της κατηγορίας αυτής, είναι η Συστηματική Σειρά της NPL (National Physical Laboratory), της Μ. Βρετανίας. Αποτελείται από 22 πρότυπα που προέρχονται από το «πατρικό» πλοίο της σειράς, κρατώντας σταθερούς τους συντελεστές μορφής ($c_B=0.397$, $c_P=0.693$ και $c_M=0.573$) και μεταβάλλοντας τους λόγους των κύριων διαστάσεων (L/B , B/T) ενώ η θέση του κέντρου άντωσης παραμένει σταθερή στο 6.4% του μήκους πρύμνηθεν του μέσου νομέα. Οι γάστρες της σειράς χαρακτηρίζονται από ευθείες ισάλους στην είσοδο, στρογγυλούς νομείς στην πρύμνη και ευθείες διαμήκεις τομές που τελειώνουν απότομα στην πρύμνη καθρέπτη. Δέκα ακόμη πρότυπα κατασκευάστηκαν μεταβάλλοντας τη θέση του κέντρου άντωσης και δοκιμάστηκαν σε αριθμούς Froude 0.3 ~ 1.2.

Συστηματική σειρά 63

Η σειρά αυτή βασίστηκε σε πειράματα πέντε πρότυπων γαστρών με στρογγυλό πυθμένα που έγιναν στο Davidson Laboratory του Stevens Institute of Technology και παρουσιάστηκαν το 1963 από τον Beys. Το πατρικό πρότυπο της σειράς αυτής είχε λόγο $L/B = 4$ ενώ τα υπόλοιπα τέσσερα προέκυψαν πολλαπλασιάζοντας το μήκος και το πλάτος με κατάλληλους συντελεστές έτσι ώστε ο λόγος L/B να πάρει τις τιμές 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0.

Συστηματική σειρά 64

Παρουσιάστηκε από τον Yeh και αποτελείται από 27 πρότυπα, με σταθερό μήκος ($L=3.048$ m) τα οποία δοκιμάστηκαν σε ταχύτητες έως $F_n=1.5$, στην πειραματική δεξαμενή του Naval Ship Research & Development Center. Η ιδιαίτερα λεπτόγραμμη μορφή της γάστρας τους αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα των προτύπων αυτής της σειράς. Οι ισάλοι της πλήρης έχουν μικρή γωνία εισόδου και κυρτούς νομείς με μεγάλη

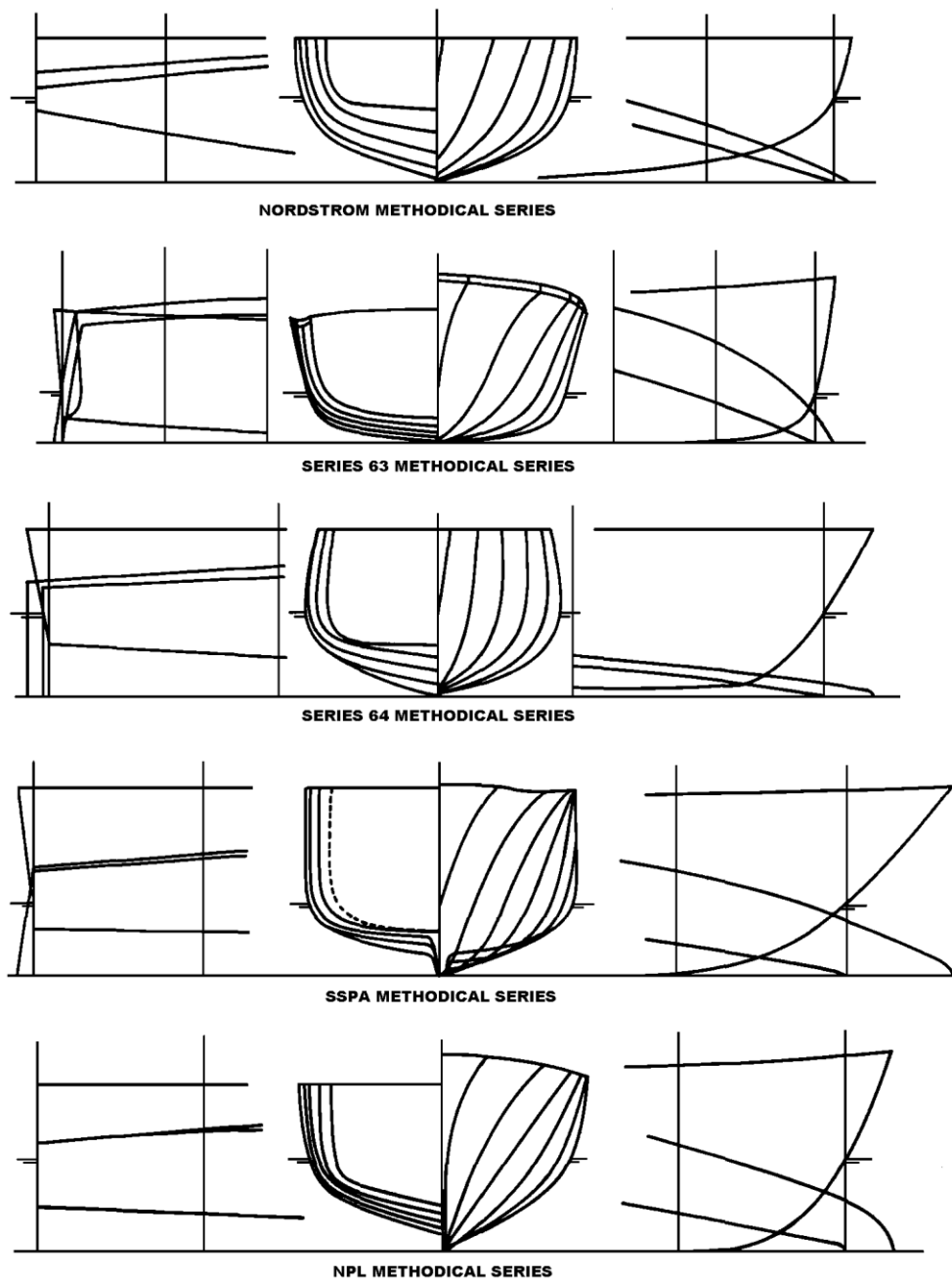
γωνία ανύψωσης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.8. Η πρύμνη έχει καθρέφτη με μορφή «στρογγυλεμένης ακμής» και σημαντική βρεχόμενη επιφάνεια ενώ στα έξαλα παρατηρείται έντονη εσοχή. Η ανάπτυξη των γραμμών κάθε μέλους της Σειράς 64 βασίζεται σε τρεις κύριες μεταβλητές σχεδίασης: τον συντελεστή γάστρας ($c_B = 0.35, 0.45, 0.55$), τον λόγο πλάτους προς βύθισμα ($B/T = 2, 3$ και 4) και τον συντελεστή λυγηρότητας $\lambda = L/V^{1/3}$, ο οποίος εκφράζει την οξύτητα της γάστρας, στην περιοχή από 8 έως 12.5. Ο πρισματικός συντελεστής c_P κρατήθηκε σταθερός και ίσος με 0.63. Όλα τα πρότυπα έχουν μεγάλο λόγο μήκους προς πλάτος $L/B = 8.45- 18.26$, που τα καθιστούν ακραία για πρακτικές εφαρμογές.

Συστηματική σειρά VTT

Αναπτύχθηκε από το ομώνυμο κέντρο ερευνών στο Esroo της Φιλανδίας και παρουσιάστηκε το 1991. Πρόκειται για σειρά πέντε προτύπων και ικανοποιεί τις απαιτήσεις μικρού βυθίσματος για λειτουργία στην περιοχή των φιλανδικών ακτών και δυνατότητας τοποθέτησης συστήματος waterjet.

Συστηματική σειρά SSPA

Αναπτύχθηκε από τον σουηδικό οργανισμό SSPA, κυρίως για ταχεία μικρά πολεμικά σκάφη και τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάστηκαν από τους Lindgren και Williams το 1968. Η σειρά αποτελείται από εννέα πρότυπα τα οποία έχουν σταθερά τα c_B, c_x, LCB και LCF . Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διερευνήθηκε η επίδραση του συντελεστή λυγηρότητας ($\frac{L}{V^{1/3}}$) και λόγου πλάτους προς βυθίσματος ($\frac{B}{T}$) στην αντίσταση, για ταχύτητες μέχρι και $F_n = 0.4 \sim 1.2$.



Σχήμα 3.1 Συστηματικές σειρές πλοίων ημι-εκτοπίσματος, στρογγυλού πυθμένα

3.2 Συστηματικές σειρές με ακμή

Συστηματική σειρά 62

Η σειρά αυτή παρουσιάστηκε από τους E.P.Clement και D.L.Blount το 1963 και αναφέρεται σε ταχύπλοα σκάφη με ακμή (hard chine). Αποτελείται από πέντε πρότυπα με λόγους μήκος προς πλάτος $L/B=2.0\sim 7.0$. Για καθένα από τα πέντε πρότυπα έγιναν δοκιμές σε τέσσερις καταστάσεις φόρτωσης και σε τέσσερις διαμήκεις θέσεις κέντρου βάρους. Άλλα χαρακτηριστικά των προτύπων της σειράς 62 είναι:

- σταθερή γωνία κίνησης πυθμένα (deadrise) από το μέσο του πλοίου και προς τη πρύμνη, ίση με $\beta=12.5^\circ$
- πλάτος ακμής στην πρύμνη ίσο με 65% του μεγίστου πλάτους ακμής
- κυρτές γραμμές προωραίων νομέων

Σειρά Keuning–Gerritsma

Η σειρά αυτή αποτελεί βελτιωμένη έκδοση της σειράς 62 με αύξηση της γωνίας κίνησης πυθμένα από 12.5° σε 25° . Στη σειρά αυτή είναι βασισμένο το πρότυπο Deer–V που είχε αποτελέσει αντικείμενο σχεδίασης και μελέτης του Εργαστηρίου Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π.

3.3 Συστηματικές σειρές με διπλή ακμή

Σειρά κατά Savitsky

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

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

4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ ΤΑΧΥΠΛΩΩΝ Ε.Μ.Π.

4.1 Εισαγωγή

Η σειρά NTUA που αναπτύχθηκε από το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στην αγγλική γλώσσα γνωστού ως National Technical University of Athens, περιλαμβάνει πρότυπα με διπλή ακμή, πεπλατυμένο καθρέπτη στην πρύμνη και «δίπλωμα» του V προς την πλώρα που δημιουργεί αύξηση γωνίας ανύψωσης πυθμένα (warp) στην επιφάνεια ολίσθησης. Η σειρά αυτή δημιουργήθηκε έτσι ώστε να μπορεί να βασιστεί σε αυτήν ένας μελετητής για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό μεγάλου μονόγαστρου πλοίου ή σκάφους αναψυχής που θα λειτουργεί σε μεγάλες ταχύτητες αλλά όχι σε ταχύτητες ολίσθησης.

4.2 Ανάπτυξη

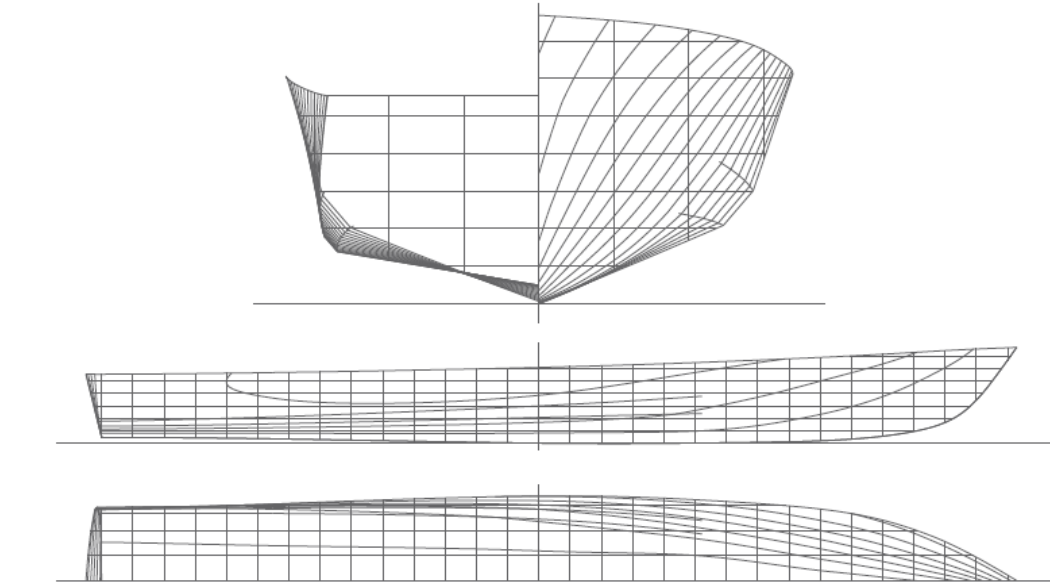
Η προσπάθεια για την ανάπτυξη μια νέας συστηματικής σειράς από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ξεκίνησε από τον Καθηγητή του Ε.Μ.Π. Θεόδωρο Λουκάκη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. Γρηγόριο Γρηγορόπουλο το 1994. Την χρονιά εκείνη κατασκευάστηκε το πατρικό σκάφος της σειράς, το «NTUA/097-94» με λόγο $L/B = 5.50$. Η μορφή της γάστρας είναι συνδυασμός της γάστρας της σειράς 62 και της γάστρας των Savitsky, Roper και Benen, χαρακτηριστικά των οποίων είναι η διπλή ακμή και ο πεπλατυμένος καθρέπτης στην πρύμνη. Για τον έλεγχο, η προαναφερθείσα γάστρα, μαζί με άλλα τέσσερα πρότυπα γνωστών σειρών με το ίδιο μήκος, έλαβε μέρος σε πειράματα αντίστασης, καθώς και σε άλλα τέσσερα πρότυπα γνωστών σειρών με το ίδιο μήκος ($L = 2.29\text{m}$). Τα πρότυπα αυτά ήταν τα εξής:

- Σκάφος Σειράς 62 με μία ακμή των Clement & Blount, 1965
- Σκάφος μορφής βαθέος V (Deep V) με μία ακμή των Keuning & Gerritsma, 1982
- Σκάφος με διπλή ακμή και πλατύ καθρέπτη των Savitsky, Roper και Benen, 1972
- Σκάφος με εξομαλυμένες τις δύο ακμές (Rounded bilge) και πλατύ καθρέπτη των Γρηγορόπουλου και Λουκάκη, 1995

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν μειωμένη αντίσταση του προτύπου της διπλής ακμής και πλατιού καθρέπτη των Γρηγορόπουλου και Λουκάκη, σε σύγκριση με τα άλλα πρότυπα στην προ ολίσθησης περιοχή. Ακόμη, έδειξε ότι οι αντιδιαβροχικές λωρίδες σε αυτό προσέθεταν αντίσταση αντί να αφαιρούν παρόλο που στα άλλα βελτίωναν τα χαρακτηριστικά της αντίστασης. Τα εξαιρετικά αυτά αποτελέσματα σε συνδυασμό με τα πολύ καλά αποτελέσματα δυναμικής συμπεριφοράς (seakeeping), οδήγησαν στην απόφαση, το πρότυπο αυτό, να αποτελέσει το πατρικό σκάφος της συστηματικής σειράς NTUA.

4.3 Γραμμές

Η μορφή των γραμμών της σειράς του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Σχήμα 4.1 Σχήμα γραμμών πατρικού πλοίου Σειράς NTUA

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν προηγούμενα. Αρχικά μπορούμε να παρατηρήσουμε τους κοίλους νομείς στην πρόρα, τη σταδιακή μετάβαση σε κυρτούς στο διάστημα μέχρι το μέσον του σκάφους και τελικά τη διαμόρφωση σε ευθύγραμμους στην πρύμνη. Οι ακμές εκτείνονται περίπου στο 70% του μήκους του σκάφους, κάτι που κρίνεται επαρκές καθώς σε κατάσταση ολίσθησης αφενός μειώνεται το μήκος ισάλου λόγω ανύψωσης του σκάφους και αφετέρου δημιουργείται έμπρυσμη δυναμική διαγωγή που απομακρύνει το πρωραίο μέρος της γάστρας από την επιφάνεια της θάλασσας. Κατά συνέπεια δεν απαιτείται εκτενέστερη προέκταση των ακμών πρόραθεν, καθώς δεν θα μπορούσαν να είναι λειτουργικές. Άλλη παρατήρηση που μπορεί να γίνει αφορά το πλάτος ισάλου στο πρυμναίο τμήμα που παραμένει περίπου σταθερό και ίσο με το μέγιστο στο μέσο του σκάφους και οδηγεί στον πλατύ καθρέπτη που περιγράφηκε νωρίτερα. Αντίθετα το πλάτος του καταστρώματος μεταβάλλεται μέσω της μεταβολής της γωνίας flare στο κατάστρωμα. Τέλος πρέπει να σημειωθεί πως η γωνία ανύψωσης πυθμένα είναι αύξουσα κατά μήκος με τιμές που ξεκινούν από τις 10° στην πρύμνη και καταλήγουν ως και τις 70° στην πλώρη. Η ταχεία και συνεχής αύξηση της γωνίας ανύψωσης πυθμένα παρουσιάζει ομοιότητες με την κατηγορία των ολισθακάτων ενώ η ομαλή μορφή των νομέων πρόραθεν θυμίζει τη γεωμετρία των πλοίων εκτοπίσματος. Η διαμόρφωση της πρύμνης καθρέπτη αποτελεί χαρακτηριστικό σχεδίασης ολισθακάτων, και παρότι οι ταχύτητες είναι μικρότερες το φαινόμενο της δυναμικής αναρρόφησης υφίσταται με τα θετικά αποτελέσματα που περιγράφηκαν νωρίτερα. Το φαινόμενο αυτό επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής της βύθισης του καθρέπτη που επιτρέπει κάτι τέτοιο στην ταχύτητα πλεύσης.

4.4 Κύριες παράμετροι

Για την ανάπτυξη της σειράς, αποφασίστηκε σαν κύρια παράμετρος ο λόγος L/B . Δεύτερη παράμετρος, ορίστηκε ο συντελεστής εκτοπίσματος $c_{DL} = \frac{\nabla}{(0.1L_{WL})^3}$, ο οποίος είναι παρόμοιος με τον συντελεστή λυγηρότητας $\lambda = \frac{L}{\nabla^{\frac{1}{3}}}$, και εκφράζει την κατάσταση φόρτωσης του μοντέλου βάσει εκτοπίσματος.

Όπου:

∇ : όγκος εκτοπίσματος του σκάφους

L_{WL} : μήκος ισάλου

Οι τιμές του λόγου L/B και του συντελεστή εκτοπίσματος c_{DL} που επιλέχθηκαν φαίνονται στον επόμενο Πίνακα.

L/B	c_{DL}
4.00	1.00
4.75	1.61
5.00	2.23
5.50	3.00
6.25	3.62
7.00	4.23

Πίνακας 4.1 Τιμές L/B και c_{DL} για την ανάπτυξη της σειράς

Για μικρές τιμές c_{DL} , δηλαδή για χαμηλά εκτοπίσματα, η εκτέλεση πειραμάτων στα μοντέλα της σειράς ήταν αδύνατη. Για το λόγο αυτό, κάθε γάστρα της σειράς διαθέτει αντίστοιχο αντίγραφο σε μεγαλύτερη κλίμακα (5:3). Στη συνέχεια τα αποτελέσματα μπορούν εύκολα να αναχθούν στις μικρότερες γάστρες.

Η σημαντική συστηματική σειρά αυτή, είναι ολοκληρωμένη όσον αφορά τα πειράματα της αντίστασης αλλά όχι και ως προς την υδροδυναμική συμπεριφορά. Στα πλαίσια συμπλήρωσης αυτής της βάσης δεδομένων επιχειρήθηκε η πειραματική διερεύνηση seakeeping του μοντέλου 163/01, κάτι που αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

L/B	4.00-big (163/01) 3.820 m	4.00-small (113/95) 2.292 m	4.75-big (150/99A) 3.820 m	4.75-small (154/99) 2.292 m	5.50-big (118/96) 3.820 m	5.50-small (097/94) 2.292 m	6.25-big (164/01) 4.3417	6.25-small (146/98) 2.605 m	7.00-big (166/01) 4.8617	7.00-small (116/96) 2.917 m
C_{01}	3.3915 1.32296		3.4147 1.34795		3.4300 1.36522		3.9683 1.71757		4.4570 2.083	
1.00	39.057		39.781		41.443		63.100		88.140	
	-0.3887 0.080		-0.4357 0.0770		-0.4795 0.0766		-0.5151 0.0880		-0.7660 0.0966	
	3.4453 1.73802		3.4681 1.69619		3.4970 1.63517		4.0293 2.02227		4.5302 2.4528	2.7181 0.88301
1.61	66.097		67.118		69.103		105.405		150.095	32.420
	-0.4613 0.099		-0.4954 0.0962		-0.5108 0.0966		-0.5185 0.1130		-0.7550 0.1275	-0.3905 0.0765
	3.4803 2.00428		3.5046 1.91518		3.5389 1.8320		4.0703 2.26491			2.7310 0.9876
2.23	93.890		96.021		99.564		150.151			45.436
	-0.4936 0.1150		-0.5108 0.1137		-0.5083 0.1165		-0.5001 0.1372			-0.3686 0.0932
	3.5142 2.24366		3.5392 2.11683		2.1343 0.77624		4.1130 2.5471			2.7830 1.1304
3.00	130.436		133.078		29.143		208.642			64.618
	-0.5049 0.1338		-0.5081 0.1343		-0.3013 0.0760		-0.4720 0.1670			-0.3451 0.1164
					2.1488 0.82664					2.8094 1.2445
3.62					35.934					80.344
					-0.2948 0.0857					-0.3269 0.1345
					2.1615 0.87376					2.8338 1.35476
4.23					42.730					96.134
					-0.3046 0.0957					-0.3093 0.1520

L _{WL} [m]	WS [m ²]
D [kgf]	
LCG [m]	T [m]

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά των μοντέλων σειράς NTUA

5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η δυναμική συμπεριφορά (seakeeping) του μοντέλου της συστηματικής σειράς του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου NTUA/163-01, το οποίο κατασκευάστηκε εξ'ολοκλήρου από προσωπικό του εργαστηρίου, με λόγο $L/B=4.0$. Τα χαρακτηριστικά του προτύπου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πρότυπο 163/01		
Ολικό μήκος L_{oa}	3.82	m
Μήκος ισάλου L_{wl}	3.4453	m
Πλάτος B	0.695	m
Βύθισμα T	0.099	m
Εκτόπισμα Δ	66.097	kg
Θέση κέντρου βάρους LCG	-0.4613	m
Βρεχόμενη επιφάνεια WS	1.73802	m ²
Ταχύτητα V	1.976	m/sec

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά προτύπου 163/01 σειράς NTUA

Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε ταχύτητα προτύπου, ρυμουλκούμενο από το φορείο της δεξαμενής, με αριθμό Froude $Fn=0.34$ (~1.976 m/s) σε επτά συνολικά καταστάσεις θάλασσας, με συντελεστή φόρτωσης $c_{DL}=1.61$.

Καταστάσεις θάλασσας		
A/A	Tp'	H_s model (cm)
1	1.5	7.00
2	2.0	8.00
3	2.5	9.00
4	3.0	10.00
5	3.5	11.00
6	4.0	12.00
7	4.5	14.00

Πίνακας 5.2 Καταστάσεις θάλασσας τυχαιών κυματισμών

Οι μετρήσεις των πειραμάτων έλαβαν χώρα στην δεξαμενή του κτηρίου Αεροδυναμικής, Ναυπηγικής και Υδροδυναμικών Μηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, οι διαστάσεις της οποίας είναι:

$$L= 91.0 \text{ m}$$

$$T= 3.0 \text{ m}$$

$$B= 4.6 \text{ m}$$

Το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας αποτελείται απο τέσσερα επιμέρους στάδια:

- Την προετοιμασία του προτύπου NTUA 163/01
- Τη δημιουργία των κυματισμών που θα χρησιμοποιηθούν
- Τη βαθμονόμηση των μετρητικών οργάνων
- Την διεξαγωγή των απαραίτητων πειραμάτων

5.1 Στάδιο προετοιμασίας προτύπου

5.1.1 Εύρεση επιθυμητού εκτοπίσματος

Αρχικά, το πρότυπο υπεβλήθη σε μικροεπιδιορθώσεις σε ορισμένα σημεία, οι οποίες θεωρήθηκαν απαραίτητες για τη σωστή και ασφαλή διεξαγωγή των πειραμάτων στη δεξαμενή. Εν συνεχεία, επιτεύχθη το επιθυμητό εκτόπισμα του μοντέλου, σύμφωνα με το συντελεστή φόρτωση ($c_{DL}=1.61$), προσθέτοντας βαρίδια και μετρώντας σε ζυγαριά ακριβείας εντός του χώρου της δεξαμενής. Στον υπολογισμό της πρόσθετης μάζας, συμπεριλήφθηκαν τα επιταχυνσιόμετρα, η πλάκα στο κέντρο βάρους και του δυναμομέτρου, ο οδηγός στην πλώρη και τέλος τα πλαστικά που χρησιμοποιήθηκαν για την αποφυγή διαβροχής του εσωτερικού του προτύπου από τους έντονους κυματισμούς των πειραμάτων. Από τον πίνακα των υδροστατικών, το συνολικό εκτόπισμα του μοντέλου πρέπει να είναι 66.097 kg.

Πρόσθετες μάζες		
A/A	Μάζα	(kg)
1	Μοντέλο	35.500
2	Πλάκα	2.105
3	Οδηγός	0.100
4	Δυναμόμετρο	7.360
5	Επιταχυνσιόμετρα	0.200
6	Επιπλέον πλαστικό	0.600
7	Βαρίδια	20.232

Πίνακας 5.3 Ανάλυση του επιθυμητού εκτοπίσματος

5.1.2 Εύρεση επιθυμητή γωνίας διαγωγής και εγκάρσιας κλίσης

Επόμενο βήμα, η εύρεση της επιθυμητής γωνίας διαγωγής και της εγκάρσιας κλίσης. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία η γωνία διαγωγής είναι μηδενική και δεν παρουσιάζει εγκάρσια κλίση. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίον τα βάρη τοποθετήθηκαν με τέτοιον τρόπο στο μοντέλο έτσι ώστε να βρίσκεται σε ισοβύθιστη κατάσταση. Αυτό έγινε εφικτό με την τοποθέτηση του προτύπου εντός της δεξαμενής και την πρόσδεση του με το φορείο ώστε να είναι σταθερό. Έπειτα, προστέθηκαν τα βάρη ελέγχοντας την ίσαλο πλεύσης.

5.1.3 Προσδιορισμός ακτίνας αδρανείας και περιόδου ιδιοταλάντωσης

Προκείμενου να υπολογιστεί πρακτικά η ακτίνα αδρανείας το πρότυπο δένεται με ιμάντες από δύο εκκρεμείς ράβδους που είναι πακτωμένοι σε ειδικό χώρο στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, έτσι ώστε να μπορεί να ταλαντωθεί ελεύθερα. Ο υπολογισμός της περιόδου ιδιοταλάντωσης έγινε σύμφωνα με την σχέση:

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

Όπου:

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

ℓ : μήκος στελεχών-ιμάντων

α : ημιαπόσταση στελεχών από κέντρο βάρους μοντέλου

Δ : η μάζα του μοντέλου και των ιμάντων ανάρτησης

Όμως:

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

r_{zz} : ακτίνα αδρανείας και ίση με $0.25 \cdot L_{BP}$

Συνεπώς η πρώτη σχέση γίνεται:

$$T = 2\pi \cdot 0.25 \cdot L_{BP} \sqrt{\frac{\ell}{\alpha^2 \cdot g}}$$

Για το μοντέλο NTUA 163/01:

$$L_{BP}=3.4453 \text{ m}$$

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

$$\ell=4.01 \text{ m}$$

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

Άρα η ιδιοπερίοδος του μοντέλου είναι:

$$T = 4.61 \text{ s}$$

Μετά τον παραπάνω υπολογισμό, χρονομετρείται το διάστημα 10 ταλαντώσεων έτσι ώστε η θεωρητική ιδιοπερίοδος να συμπέσει με την πραγματική. Σε περίπτωση που δεν συμβεί αυτό, τα προστιθέμενα βάρη μετακινούνται και επαλαμβάνεται η χρονομέτρηση. Για να διατηρηθεί η ισοβύθιστη κατάσταση, το διάστημα μετακίνησης των βαριδίων τόσο μπροστά όσο και πίσω από το κέντρο βάρους είναι ίσο ενώ το αλγεβρικό άθροισμα των ροπών παραμένει σταθερό.

5.1.4 Αποφόρτιση

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° 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

$$T_V = T_H \cdot \tan(\tau - 6.5) = R \cdot \tan(\tau + 6.5)$$

τ : η διαγωγή (trim) που αποκτά το σκάφος σε διάφορες ταχύτητες, θετική όταν είναι έμπροη.

Για να υπολογίσουμε τις αποφορτίσεις του μοντέλου μας, ανατρέχουμε στα αποτελέσματα πειραμάτων αντίστασης που έχουν πραγματοποιηθεί παλαιότερα σε ήρεμο νερό για διάφορες ταχύτητες. Για αριθμό Froude $Fn=0.34$ υπολογίστηκαν με γραμμική τόσο η διαγωγή όσο και η αντίσταση του σκάφους:

Fn	τ (°)	R (kp)
0.258	0.122	1.356
0.344	0.279	2.341

Τελικά:

$$T_V = 0.272 \text{ kp}$$

Τα οποία αφαιρέθηκαν από το συνολικό εκτόπισμα.

5.2 Βαθμονόμηση μετρητικών οργάνων

Τα μεγέθη που μετρήθηκαν στα πειράματα ήταν:

- Ανύψωση κύματος
- Κατακόρυφη κίνηση (heave)
- Πρόνευση (pitch)
- Απόλυτη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη στο κέντρο βάρους και στην πρύμνη
- Πρόσθετη αντίσταση

Για τη μέτρηση της ανύψωση κύματος χρησιμοποιήθηκαν δύο μετρητές, ένας ακίνητος στο τέλος της δεξαμενής κοντά στον κυματιστήρα Wave Tank Probe και ένας προσδεδεδεμένος στο φορείο Wave Gen Probe. Οι κινήσεις καθώς και η πρόσθετη αντίσταση, μετρήθηκαν μέσω δυναμομέτρου που βρίσκεται στο φορείο. Τέλος οι επιταχύνσεις μετρήθηκαν μέσω επιταχυνσιομέτρων τοποθετημένα στις τρεις διαφορετικές θέσεις. Όλα τα όργανα μετράνε μεταβολές της τάσης (Volts) και οι οποίες μέσω ενισχυτών εμφανίζονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του φορείου. Η συχνότητα καταγραφής ορίστηκε ίση με 20 Hz. Πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν απαραίτητη η βαθμονόμηση των οργάνων έτσι ώστε να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία τους, να καταστρωθούν οι συναρτήσεις μεταφορά τους με σκοπό την μετατροπή του μετρούμενου ηλεκτρικού σήματος στις επιθυμητές μονάδες. Εξαιτίας αυξημένης ευαισθησίας σε μικρές εναλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών, σε ορισμένα μετρητικά όργανα ήταν επιτακτική η ανάγκη για συχνότερη βαθμονόμησης.

5.2.1 Ανύψωση κύματος μέσω Wave Tank Probe

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα κίνησης κύματος γινόταν καθημερινά πριν από την διεξαγωγή του προγραμματισμένου πειράματος σε ήρεμο νερό καθότι θεωρείται πολύ ευαίσθητο όργανο.

5.2.2 Ανύψωση κύματος μέσω Wave Gen Probe

Η βαθμονόμηση του συγκεκριμένου οργάνου έγινε μια φορά πριν την έναρξη των πειραμάτων αν και λόγω προβλημάτων δεν χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του.

5.2.3 Κατακόρυφη κίνηση και πρόνευση

Ο αισθητήρας της κατακόρυφης κίνησης και της πρόνευσης είναι αρκετά σταθερά για αυτό, οι βαθμονομήσεις έγιναν μια φορά πριν τα πειράματα.

5.2.4 Πρόσθετη αντίσταση κυματισμών

Η βαθμονόμηση του δυναμομέτρου έγινε τρεις φορές πριν και κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

5.2.5 Απολύτες κατακόρυφες επιταχύνσεις

Τα επιταχυνσιόμετρα είναι πολύ αξιόπιστα και σταθερά όργανα για αυτό η βαθμονόμηση τους έγινε μια και μοναδική φορά πριν την έναρξη των πειραμάτων.

5.3 Τυχαίοι κυματισμοί

Τα φάσματα των κυμάτων που παράχθηκαν από τον κυματιστήρα, δημιουργήθηκαν με χρήση του διπαραμετρικού φάσματος Bretschneider το οποίο ορίζεται με την βοήθεια δύο παραμέτρων, της συχνότητας κορυφής ω_p και του σημαντικού ύψους κύματος H_s .

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

Το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε, ήταν το WG210416 και η διάρκεια μέτρησης του εκάστοτε κυματισμού ήταν ίση με 600 sec με συχνότητα δειγματοληψίας 20 Hz. Η επικοινωνία του κινούμενου φορείου με τον κυματιστήρα γινόταν μέσω Η/Υ ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με αυτόν του κυματιστήρα. Με το πέρας αυτού του χρονικού διαστήματος και το σταμάτημα του κυματιστήρα, ήταν απαραίτητη η ύπαρξη ενός 20λεπτου διαλείμματος προτού μετρηθεί το επόμενο φάσμα ώστε να μειωθεί η κυματική ενέργεια, δηλαδή να ηρεμήσει το νερό της δεξαμενής.

Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται οι αδιάστατες περίοδοι T_p' , οι περίοδοι κορυφής T_p , οι κυκλικές συχνότητες κορυφής ω_p , οι συχνότητες f_p και τα σημαντικά ύψη κύματος για κάθε κατάσταση κύματος $H_{1/3} = H_s$. Επιπλέον, φαίνεται ο συντελεστής κλίμακας (scale factor) με τον οποίον παράχθηκαν στον κυματιστήρα.

Πειραματικές καταστάσεις θάλασσας							
A/A	Tp'	Tp_{ship} (sec)	Tp_{model} (sec)	ωp (rad/sec)	f model (Hz)	H_s model (cm)	Scale factor
1	1.5	6.286	0.889	7.065	1.125	7.00	1.1
2	2.0	8.381	1.185	5.298	0.844	8.00	1.1
3	2.5	10.476	1.482	4.239	0.675	9.00	1.1
4	3.0	12.571	1.778	3.532	0.562	10.00	1.1
5	3.5	14.667	2.074	3.028	0.482	11.00	1.1
6	4.0	16.762	2.370	2.649	0.422	12.00	1.1
7	4.5	18.857	2.667	2.355	0.375	14.00	1.1

Πίνακας 5.4 Πειραματικές καταστάσεις θάλασσας

Ο συντελεστής κλίμακας επιλέχθη αυθαίρετα, ύστερα από σύγκριση των τιμών RMS ενός θεωρητικού με το αντίστοιχο παραγόμενο κύμα, μιας πειραματικής κατάστασης θάλασσας με scale factor ίσο με 1.

Το μέγεθος Tp' ονομάζεται αδιάστατη περίοδος κορυφής του κύματος και δίνεται από τη σχέση:

$$Tp' = \frac{Tp}{\sqrt{\frac{L_{BP}}{g}}}$$

5.4 Διεξαγωγή πειραματικής διαδικασίας

Τα πειράματα, όπως έγινε αναφορά σε προηγούμενη ενότητα, ξεκινούσαν με τη βαθμονόμηση των μετρητικών οργάνων. Τα αποτελέσματα καταγράφονταν σε Φύλλο Βαθμονομήσεως και στη συνέχεια τα δεδομένα χρησιμοποιούνταν με τη βοήθεια του Excel ούτως ώστε να βγουν οι συναρτήσεις μεταφοράς για την μετατροπή των Volts στις επιθυμητές μονάδες. Στη συνέχεια το μοντέλο 163/01 προσδενόταν στο φορείο και γινόταν η σύνδεση των μετρητικών οργάνων. Επόμενο βήμα, η έναρξη του κυματιστήρα και η παραγωγή του φάσματος μέσω του προγράμματος WG210416 στον Η/Υ του φορείου. Για την παραγωγή φασμάτων, το συγκεκριμένο πρόγραμμα ζητάει από τον χρήστη ορισμένες παραμέτρους:

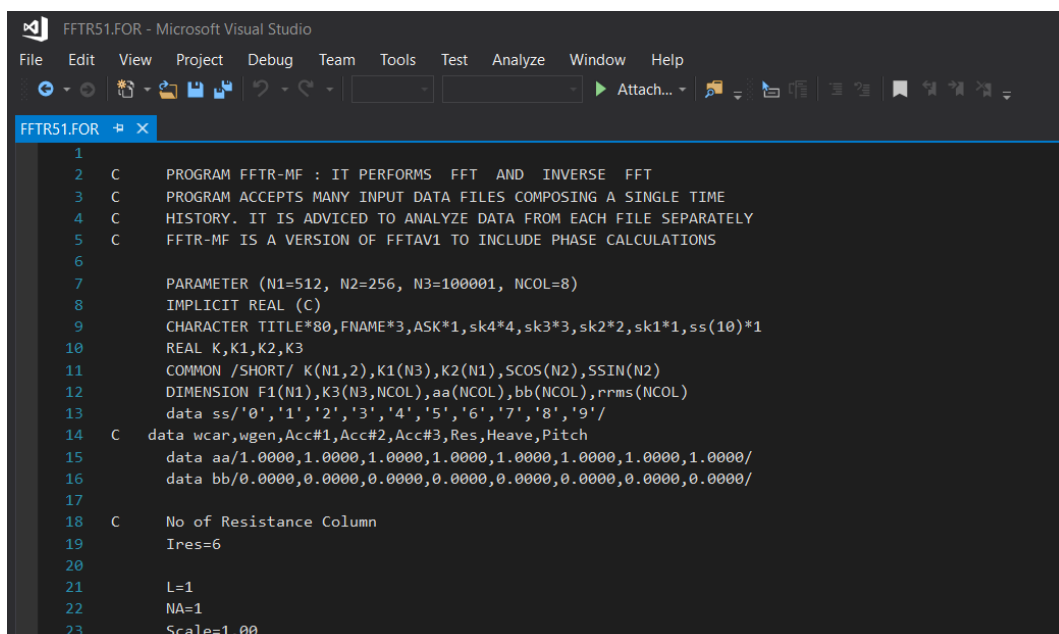
- Το είδος της κάρτας γραφικών
- Τον τύπο του κύματος (ημιτονικό, τυχαίο ή παροδικό)
- Αν η κυματομορφή θα χρησιμοποιηθεί για οδήγηση του κυματιστήρα ή για ανάλυση των χαρακτηριστικών της στον υπολογιστή
- Αν είναι τρέξιμο βαθμονόμησης του κυματιστήρα
- Το όνομα του αρχείου που αποθηκεύονται τα αποτελέσματα του τρεξίματος

- Τον τύπο φάσματος που θα χρησιμοποιηθεί (φάσμα Bretschneider)
- Το πλήθος των σημείων που θα περιγράφουν το παραπάνω φάσμα
- Το σημαντικό ύψος κύματος [m]
- Την περίοδο κορυφής κύματος [sec]

Με την εισαγωγή των παραπάνω παραμέτρων καθώς και του scale factor που θα χρησιμοποιηθεί, ο κυματιστήρας τίθονταν σε εφαρμογή και παραγόταν το επιθυμητό φάσμα. Μόλις αυτό έφθανε στην άλλη άκρη της δεξαμενής, όπου βρισκόταν το πρότυπο, το φορείο ήταν έτοιμο να ξεκινήσει. Τη στιγμή που το φορείο έφθανε στην μελετούμενη ταχύτητα, στην προκειμένη περίπτωση για $F_n=0.34$, 1.976 m/sec, ξεκινούσε η λήψη μετρήσεων των οργάνων. Για την παραγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων της δυναμικής συμπεριφοράς του μοντέλου, θεωρείται η ύπαρξη χρονοϊστορίας διάρκειας 360 sec. Όμως, η διάρκεια της κάθε μέτρησης είναι 26 sec, συνεπώς, όπως είναι κατανοητό, ήταν αδύνατη η δημιουργία της χρονοϊστορίας με μία μέτρηση. Για το λόγο αυτό, σε κάθε φάσμα έγιναν 14 μετρήσεις στη συγκεκριμένη ταχύτητα. Μεταξύ των μετρήσεων, υπήρξαν υποχρεωτικά διαλείμματα διάρκειας 20 λεπτών, έτσι ώστε να ηρεμήσει το νερό εντός της δεξαμενής.

5.5 Ανάλυση μετρήσεων

Τα αποτελέσματα κάθε μέτρησης αποθηκεύονταν στον Η/Υ του φορείου σε αρχείο με ονομασία DY_#.DAT. Στο αρχείο μετατρέπονται τα δεδομένα σε τιμές των αποκρίσεων μέσω των συναρτήσεων μεταφοράς. Με την ολοκλήρωση της χρονικής ιστορίας των 360 sec τα αποτελέσματα των αισθητήριων οργάνων ήταν έτοιμα για επεξεργασία. Προς τούτο, χρησιμοποιήθηκε κώδικας σε Fortran ανεπτυγμένου στο εργαστήριο, με ονομασία FFTR51.FOR.



```

1
2 C PROGRAM FFTR-MF : IT PERFORMS FFT AND INVERSE FFT
3 C PROGRAM ACCEPTS MANY INPUT DATA FILES COMPOSING A SINGLE TIME
4 C HISTORY. IT IS ADVISED TO ANALYZE DATA FROM EACH FILE SEPARATELY
5 C FFTR-MF IS A VERSION OF FFTAV1 TO INCLUDE PHASE CALCULATIONS
6
7 PARAMETER (N1=512, N2=256, N3=100001, NCOL=8)
8 IMPLICIT REAL (C)
9 CHARACTER TITLE*80, FNAME*3, ASK*1, sk4*4, sk3*3, sk2*2, sk1*1, ss(10)*1
10 REAL K, K1, K2, K3
11 COMMON /SHORT/ K(N1,2), K1(N3), K2(N1), SCOS(N2), SSIN(N2)
12 DIMENSION F1(N1), K3(N3, NCOL), aa(NCOL), bb(NCOL), rrms(NCOL)
13 data ss/'0', '1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8', '9'/
14 C data wcar, wgen, Acc#1, Acc#2, Acc#3, Res, Heave, Pitch
15 data aa/1.0000, 1.0000, 1.0000, 1.0000, 1.0000, 1.0000, 1.0000, 1.0000/
16 data bb/0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000/
17
18 C No of Resistance Column
19 Ires=6
20
21 L=1
22 NA=1
23 Scale=1.00

```

Εικόνα 5.1 Κώδικας Fortran για την ανάλυση των αποτελεσμάτων

Στον κώδικα προβλέπεται δυνατότητα συρραφής των αποτελεσμάτων των 14 runs κάθε φάσματος και η συνολική επεξεργασία αυτών, για την παραγωγή των φασμάτων heave, pitch, επιταχύνσεων στα τρία διαφορετικά σημεία του μοντέλου στο

πεδίο συχνοτήτων, οι αντίστοιχες τιμές rms τους και της πρόσθετης αντίστασης. Η εφαρμογή ζητούσε το αρχείο έναρξης, το αρχείο λήξης και το πλήθος των σημείων για ανάλυση.

Το τελικό αποτέλεσμα ήταν η δημιουργία δύο αρχείων:

- Αρχείο «DY_out», το οποίο περιείχε τα δεδομένα των φασμάτων συναρτήσει της συχνότητας f , όλων των μεγεθών εκτός φυσικά της πρόσθετης αντίστασης
- Αρχείο «DY_rms», το οποίο περιείχε τις rms τιμές όλων των μετρούμενων μεγεθών

Η διαδικασία επαναλήφθηκε για όλα τα μετρούμενα φάσματα.

6 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

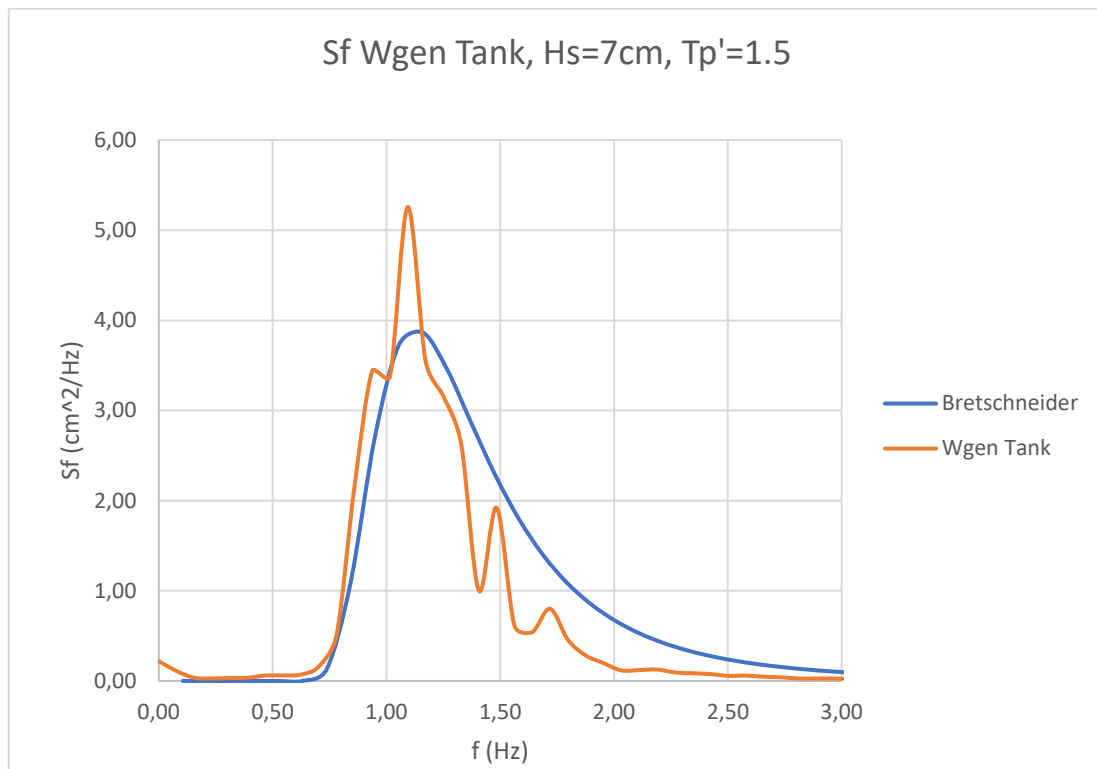
6.1 Διαγράμματα φασμάτων

Στο εδάφιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αρχείων DY_.out σε μορφή διαγράμματος με τη βοήθεια του *Microsoft Excel*, για όλες τις καταστάσεις θάλασσας που μελετούνται.

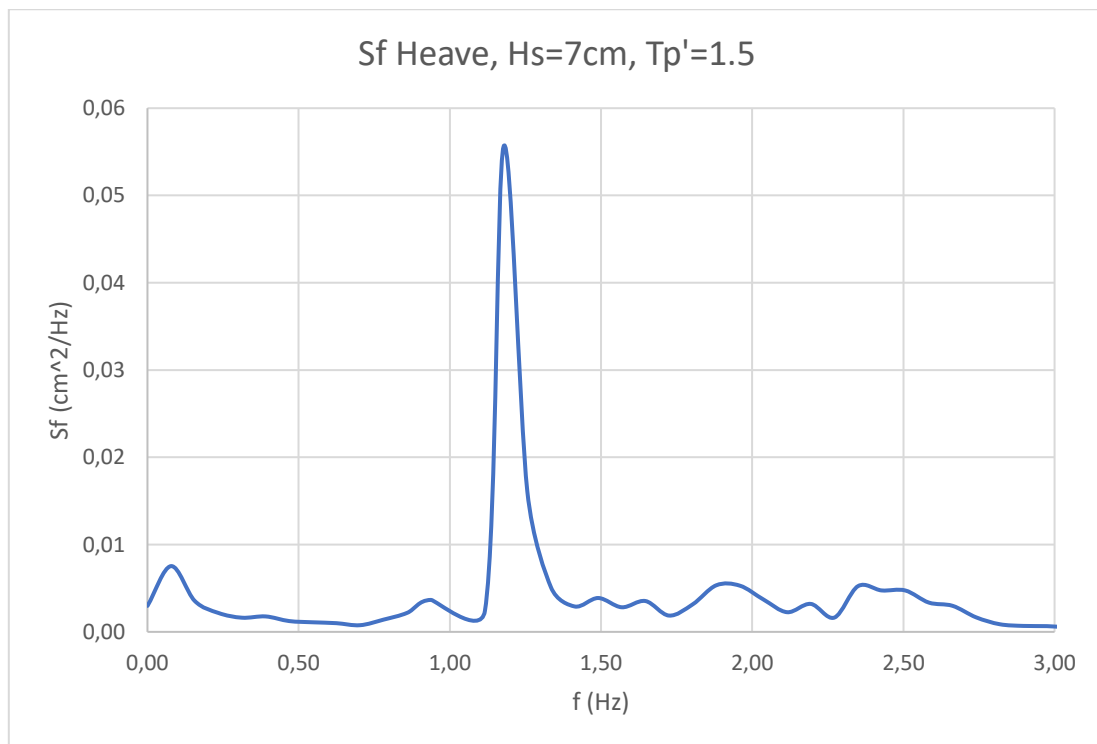
Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται:

- Τα διαγράμματα φάσματος κυματισμού μετρημένα από τον ακίνητο αισθητήρα Wave Tank Probe σε cm^2/Hz συναρτήσει της συχνότητας σε Hz
- Τα διαγράμματα φάσματος της κατακόρυφης κίνησης του μελετούμενου μοντέλου, heave, σε cm^2/Hz συναρτήσει της συχνότητας σε Hz
- Τα διαγράμματα φάσματος της πρόνευσης, pitch, σε deg^2/Hz συναρτήσει της συχνότητας σε Hz
- Τα διαγράμματα φάσματος των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πλώρη, στη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους και στην πρύμνη του προτύπου συναρτήσει της συχνότητας σε Hz

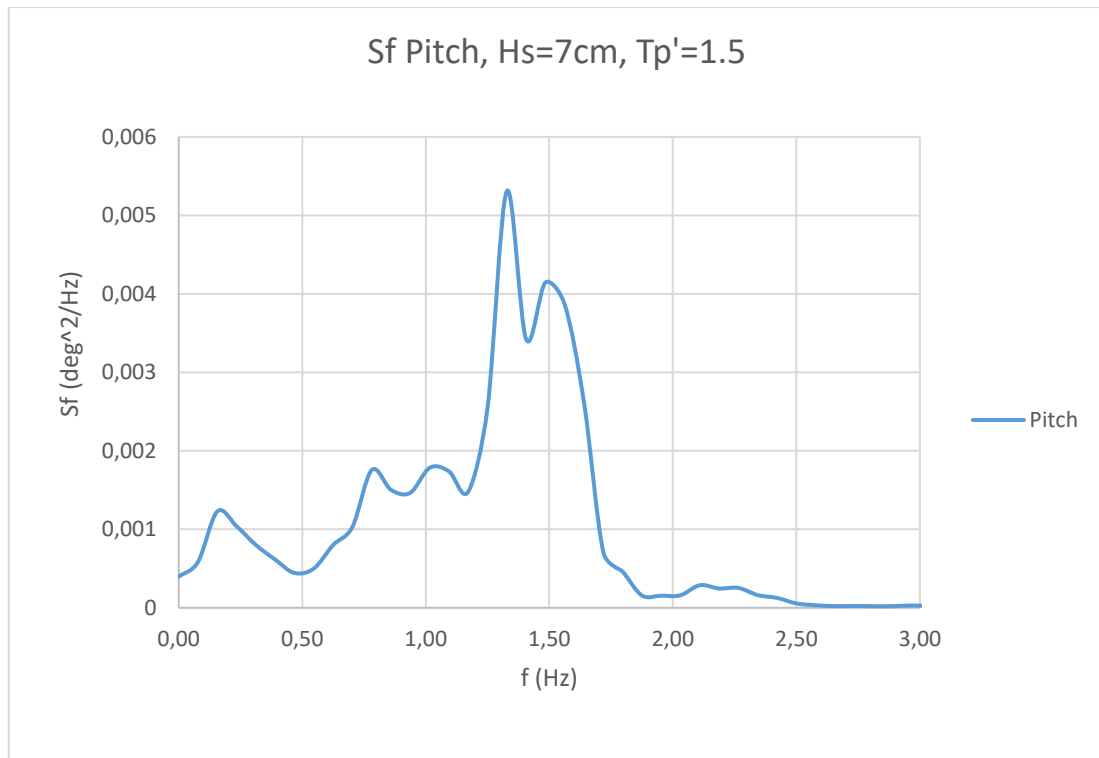
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 7$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 1.5$



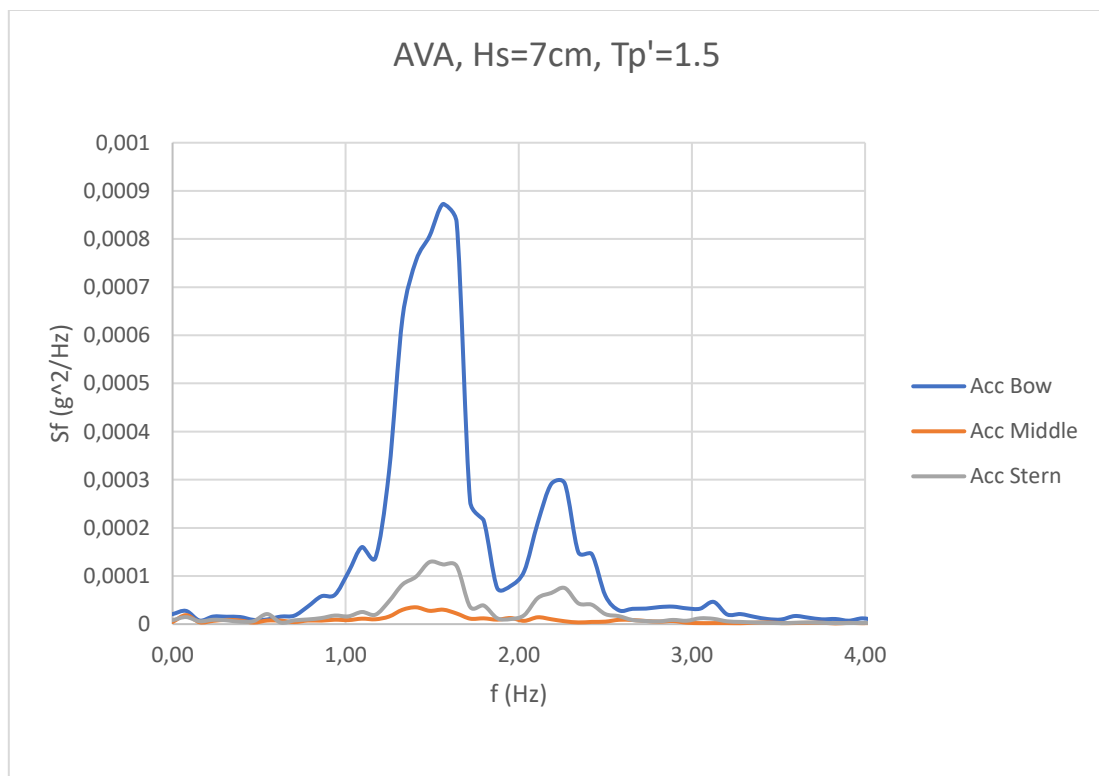
Διάγραμμα 6.1 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank



Διάγραμμα 6.2 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave

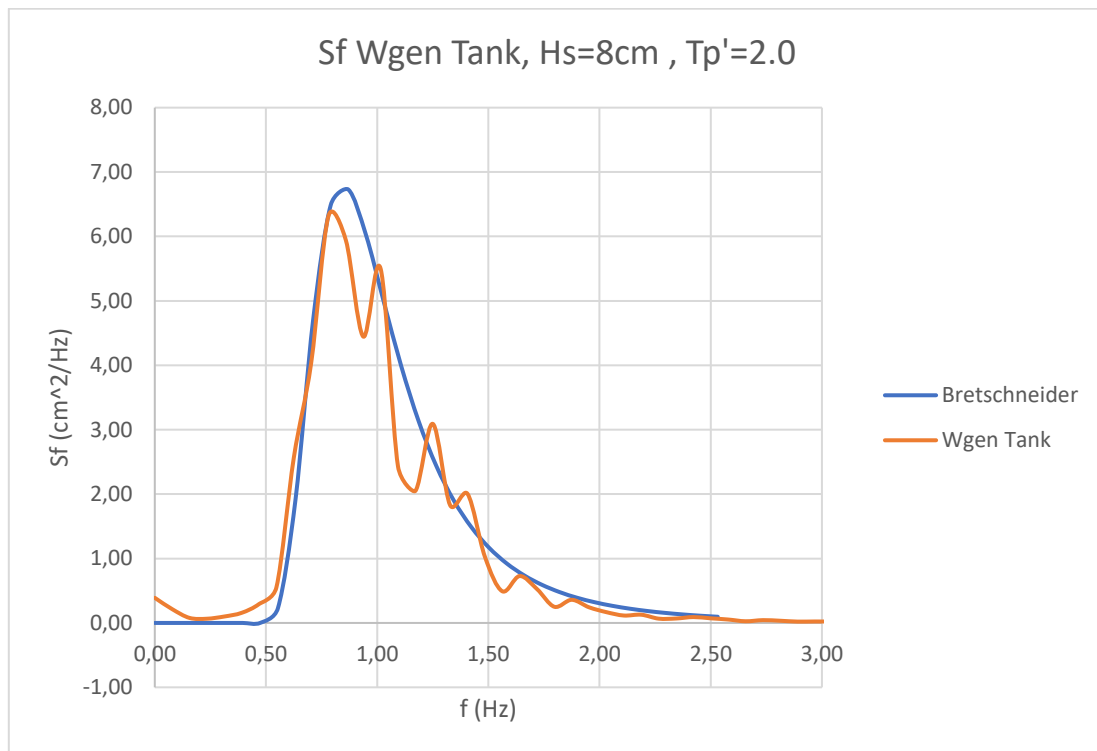


Διάγραμμα 6.3 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch

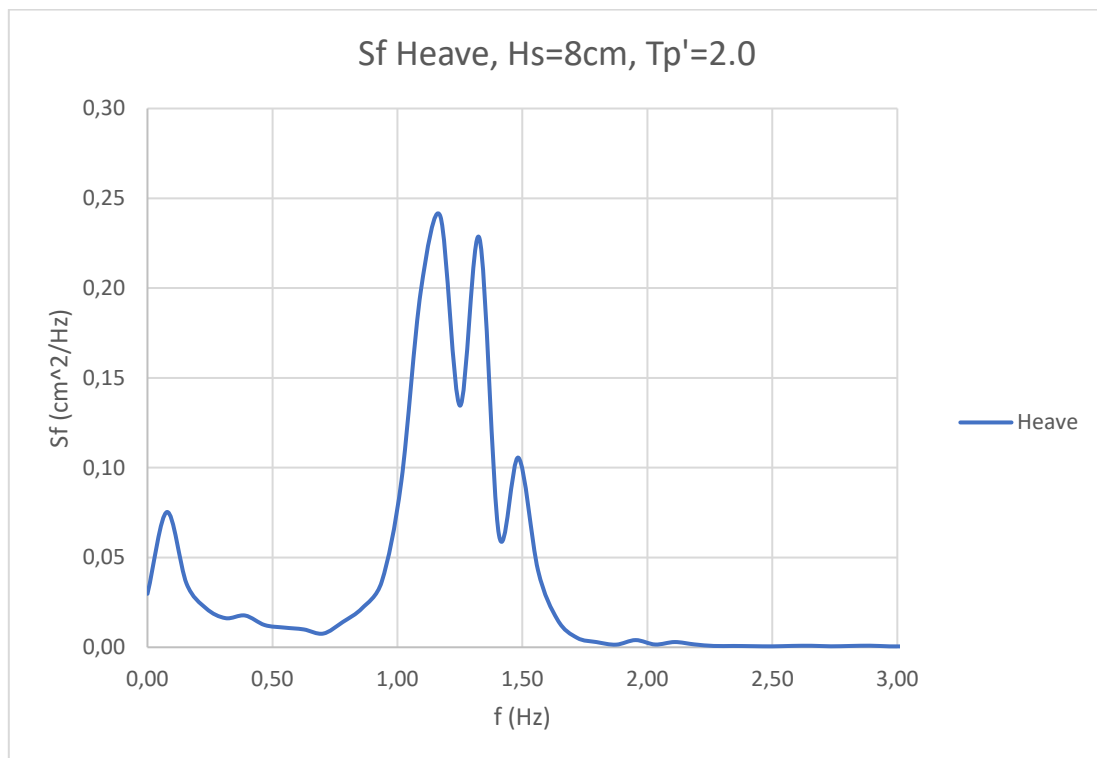


Διάγραμμα 6.4 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων

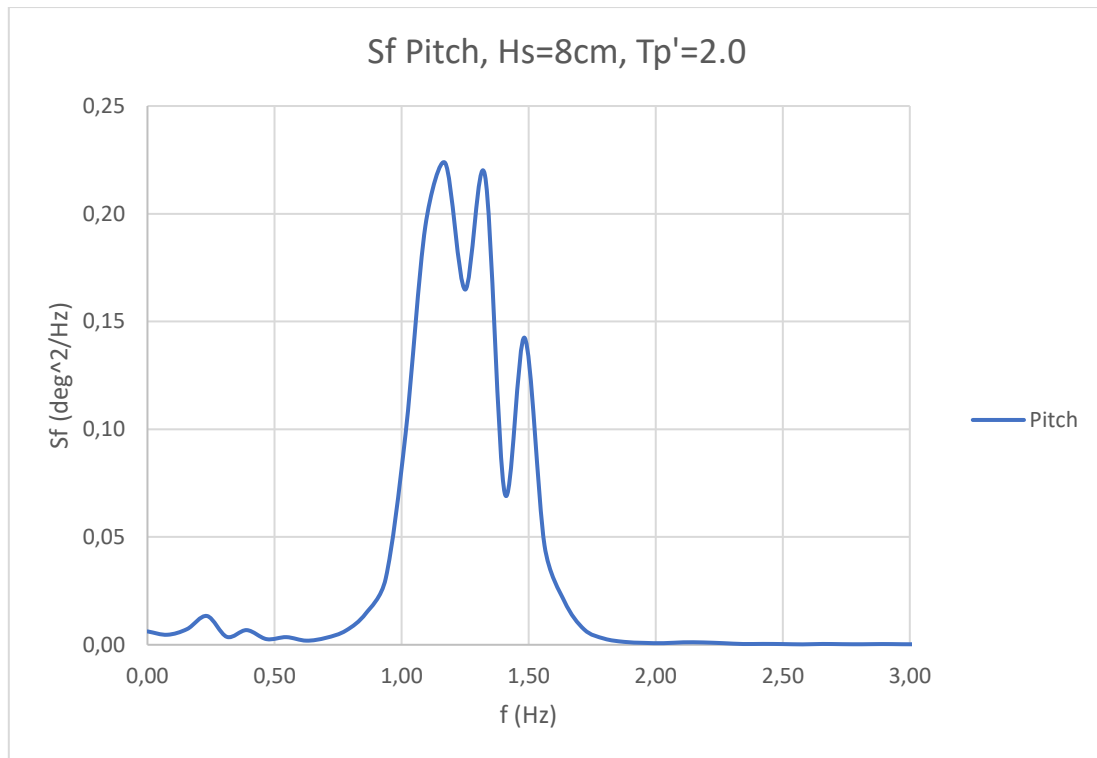
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 8 \text{ cm}$, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 2.0$



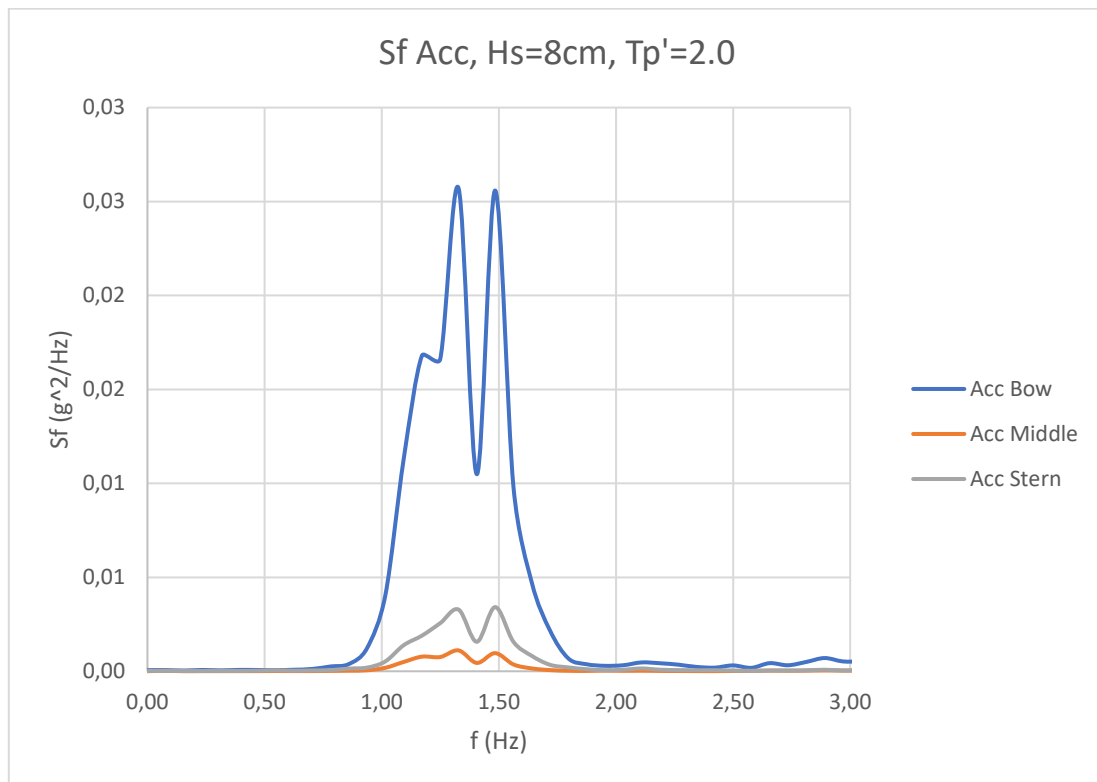
Διάγραμμα 6.5 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank



Διάγραμμα 6.6 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave

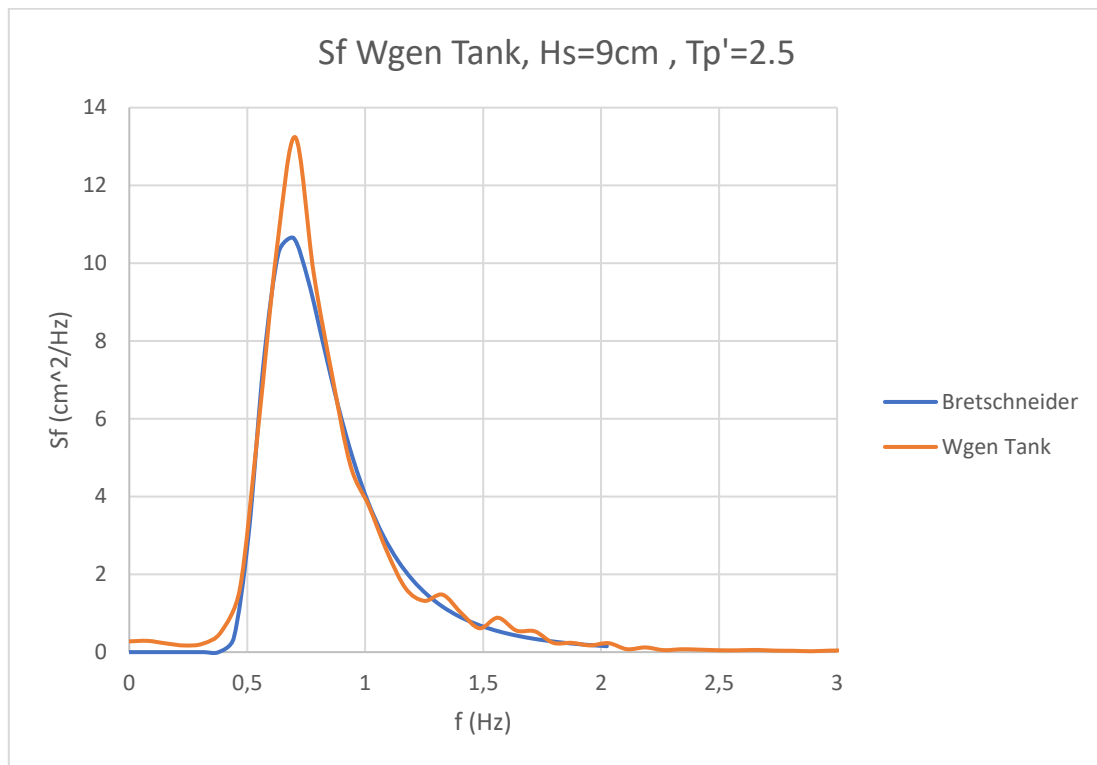


Διάγραμμα 6.7 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch

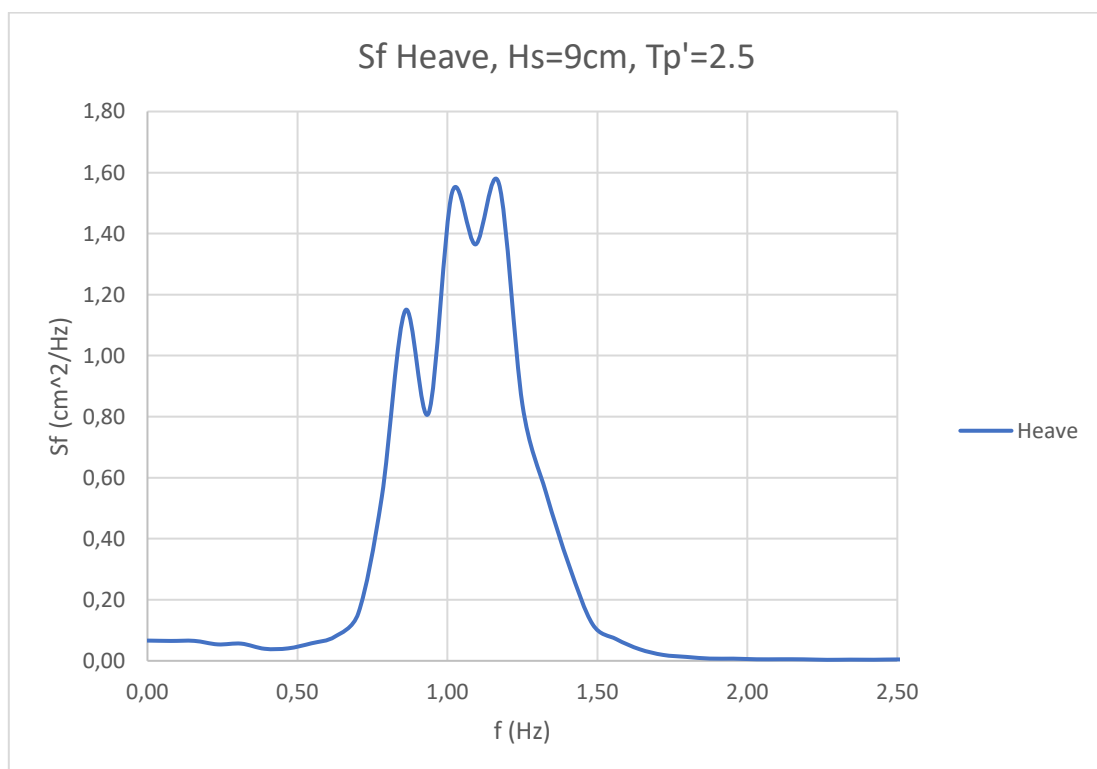


Διάγραμμα 6.8 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων

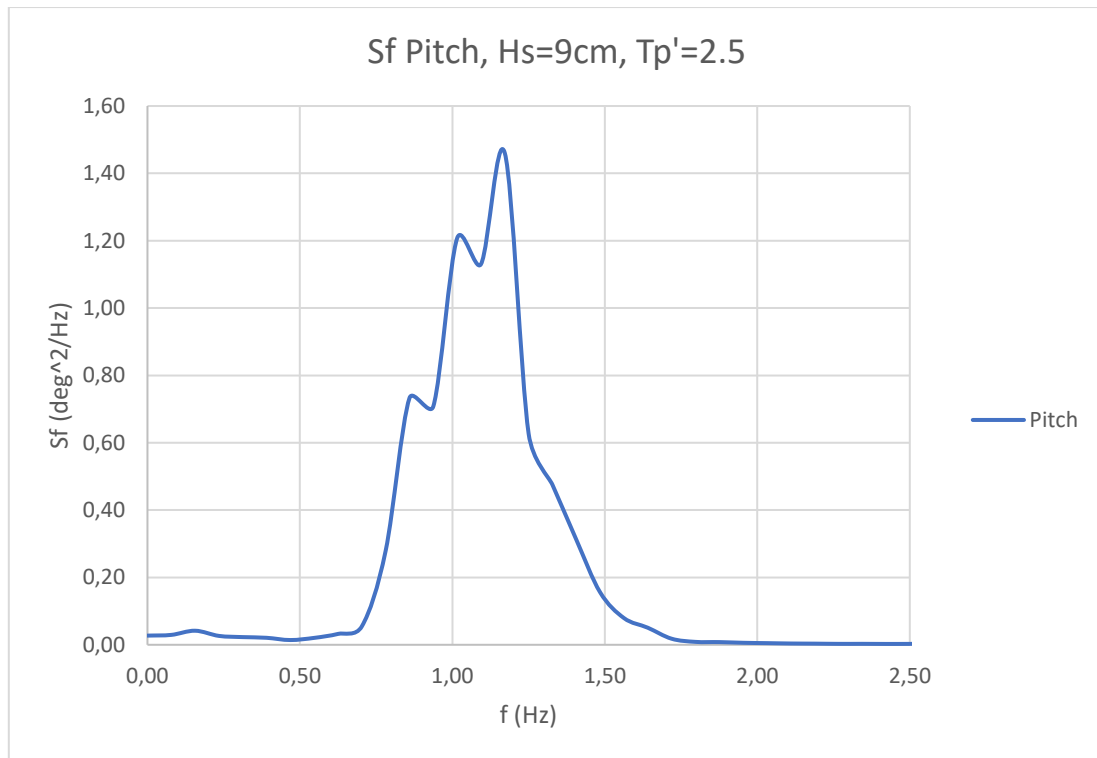
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 9$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 2.5$



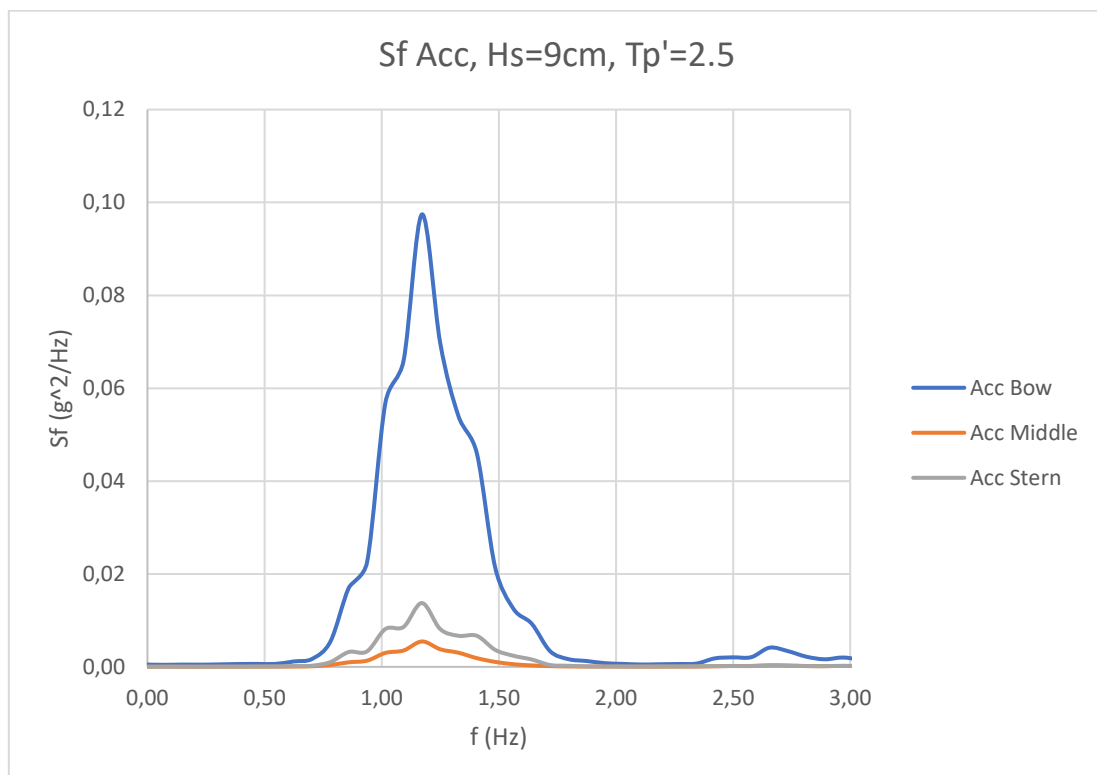
Διάγραμμα 6.9 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank



Διάγραμμα 6.10 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave

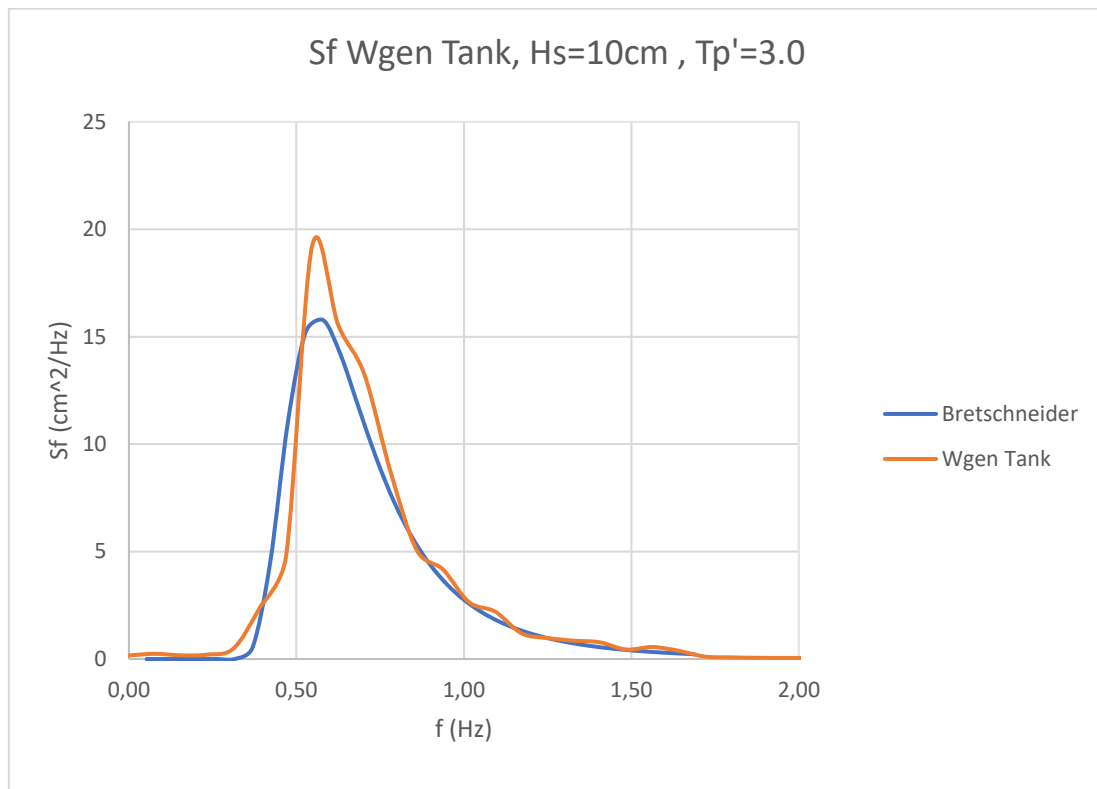


Διάγραμμα 6.11 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch

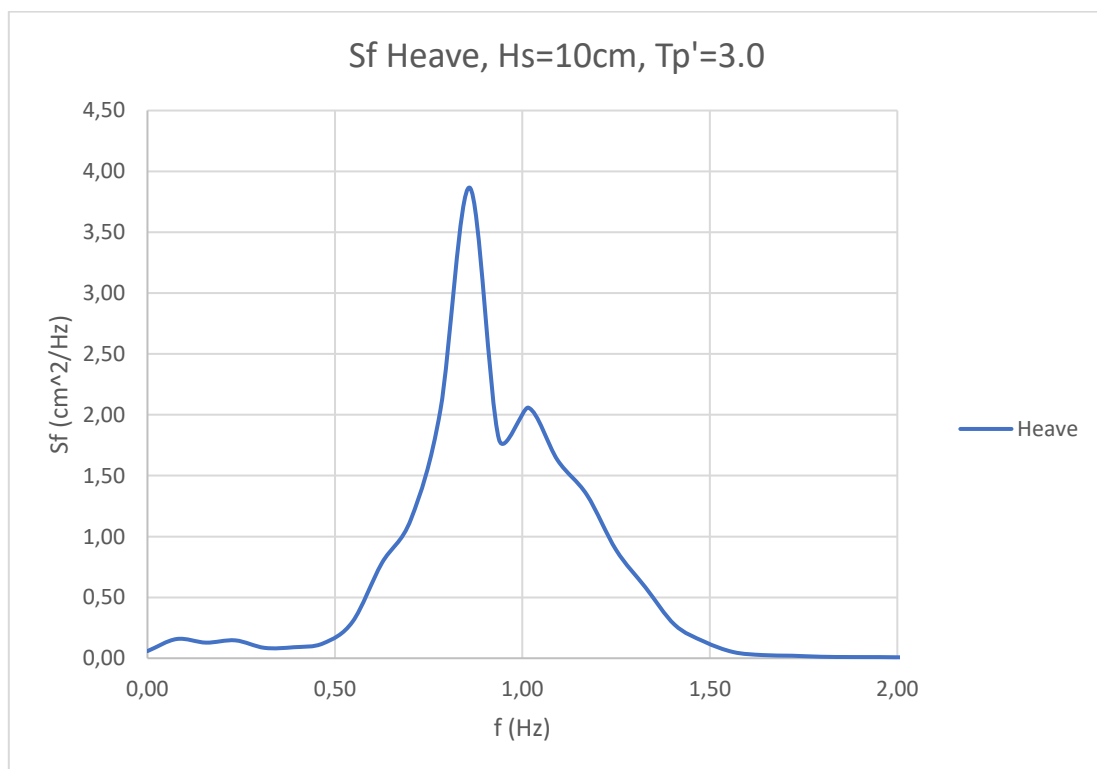


Διάγραμμα 6.12 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων

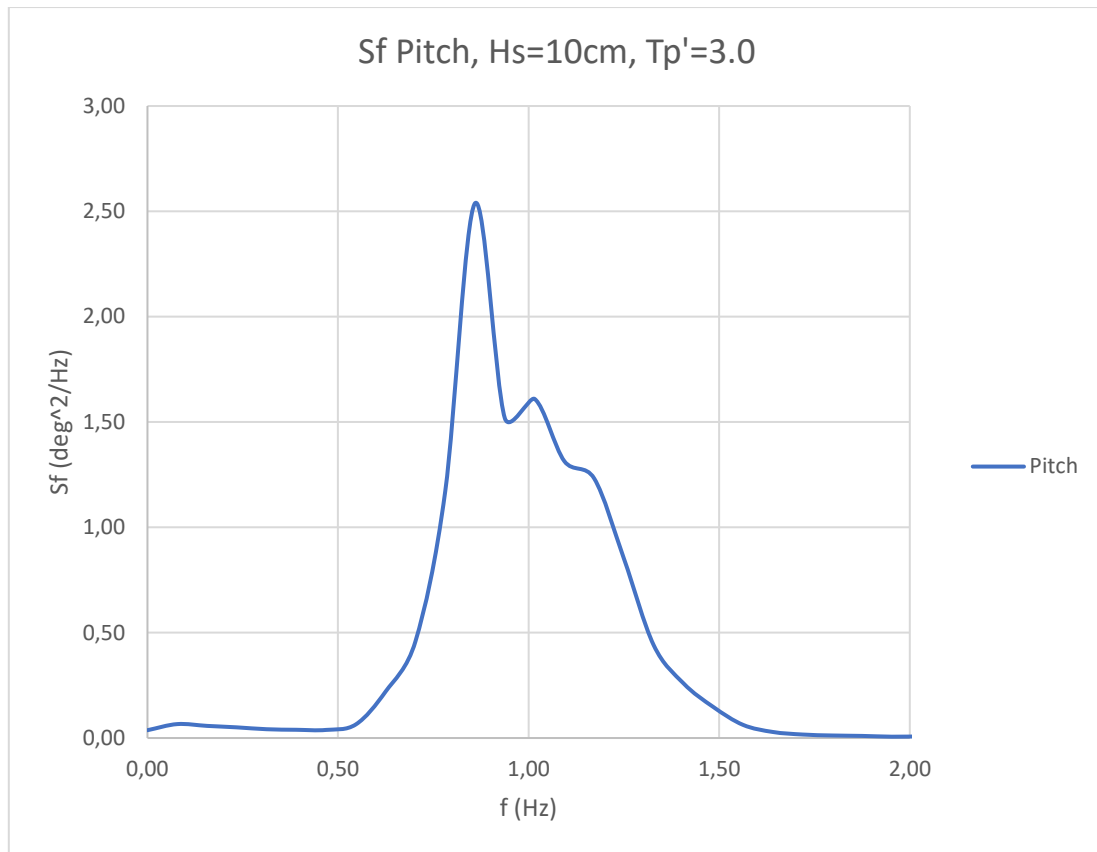
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 10$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 3.0$



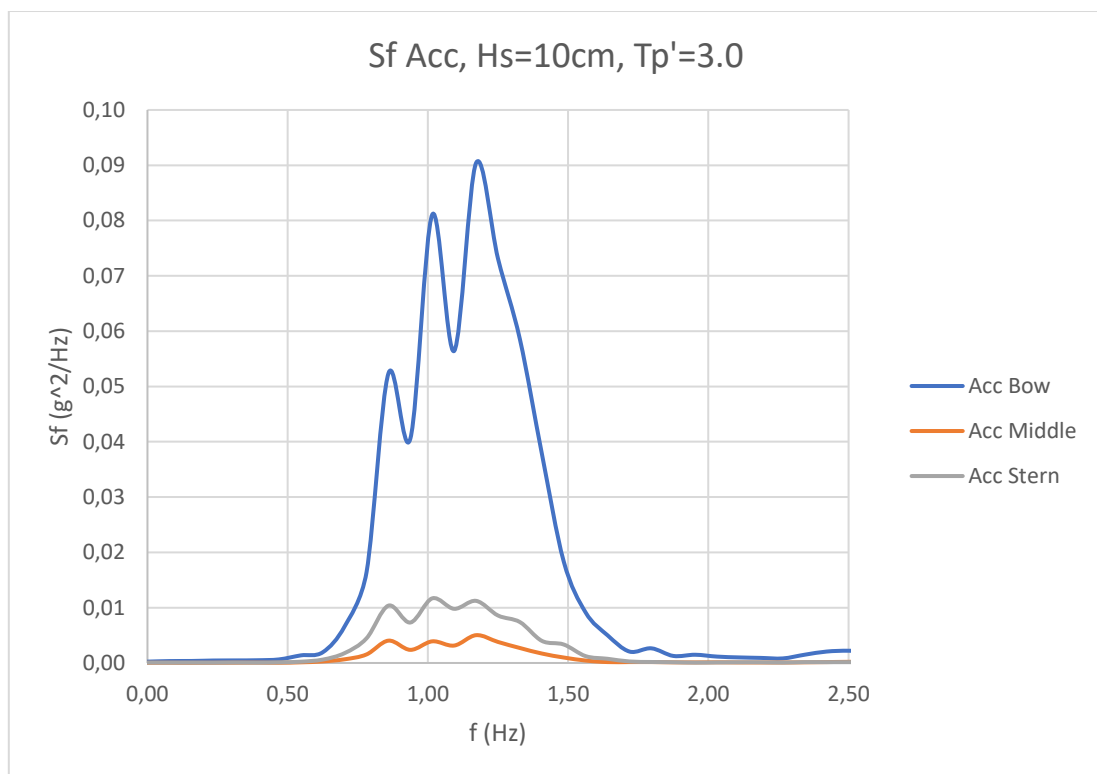
Διάγραμμα 6.13 Θεωρητικό φάσμα κύματος, *Bretschneider*, και μετρούμενο, *Wgen Tank*



Διάγραμμα 6.14 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, *heave*

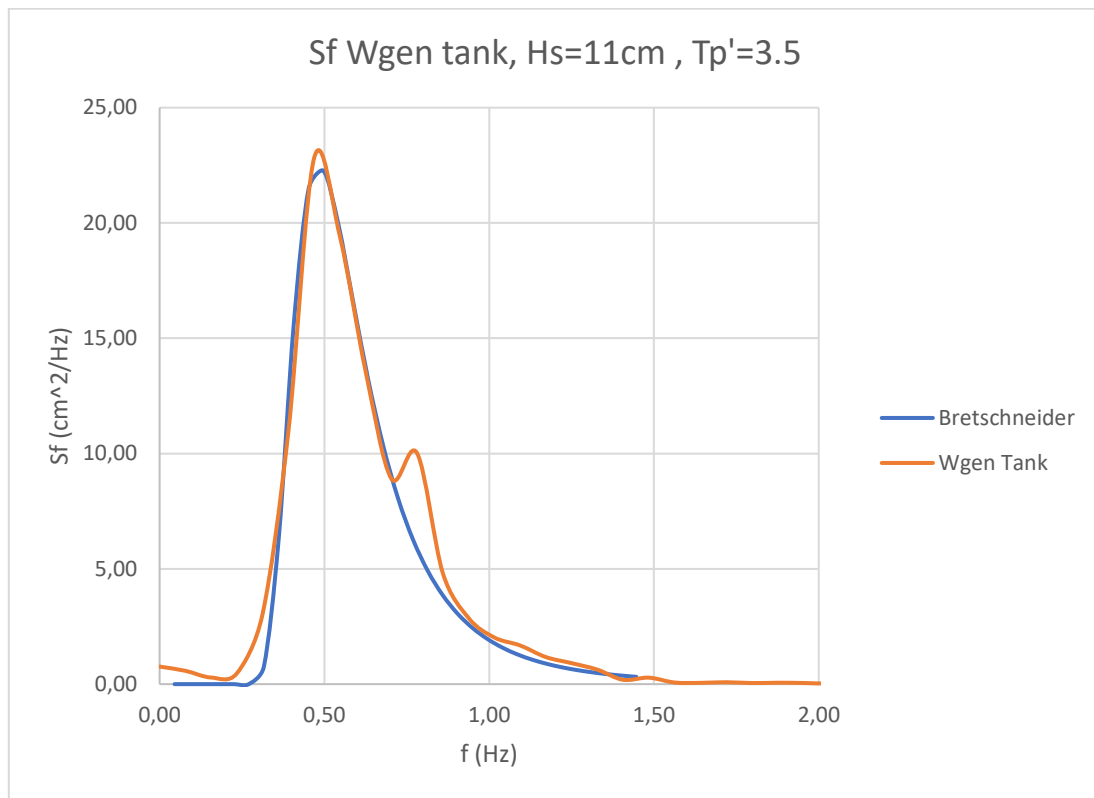


Διάγραμμα 6.15 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch

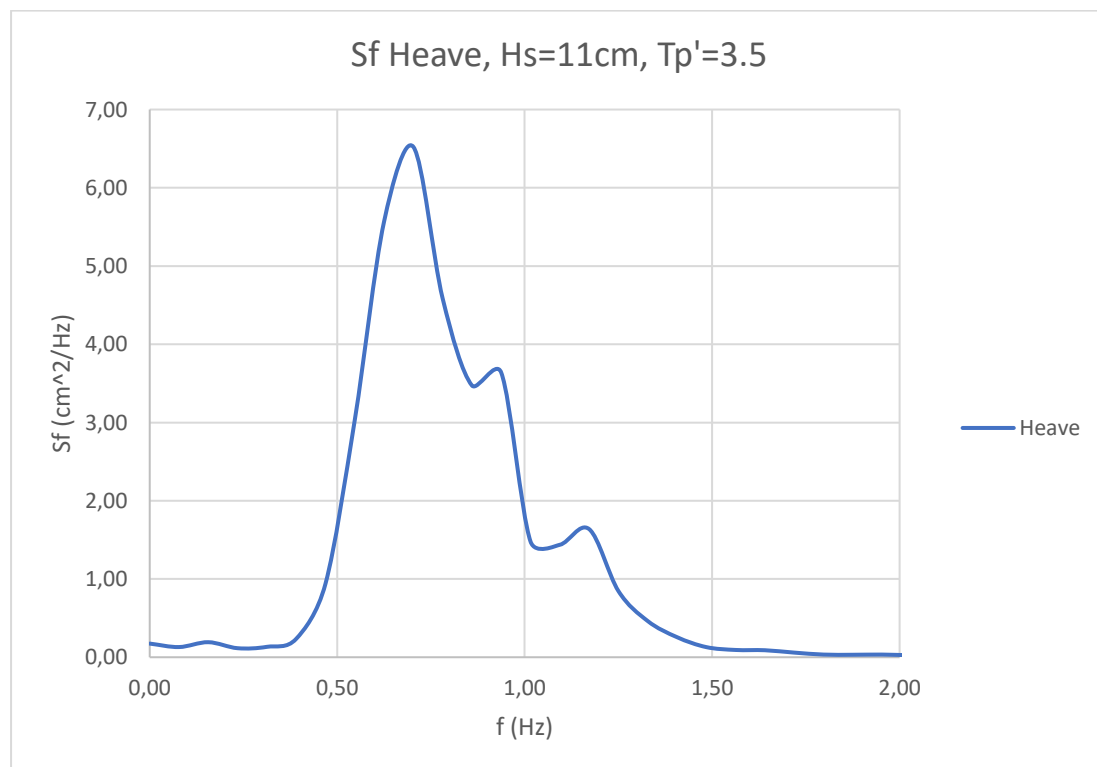


Διάγραμμα 6.16 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων

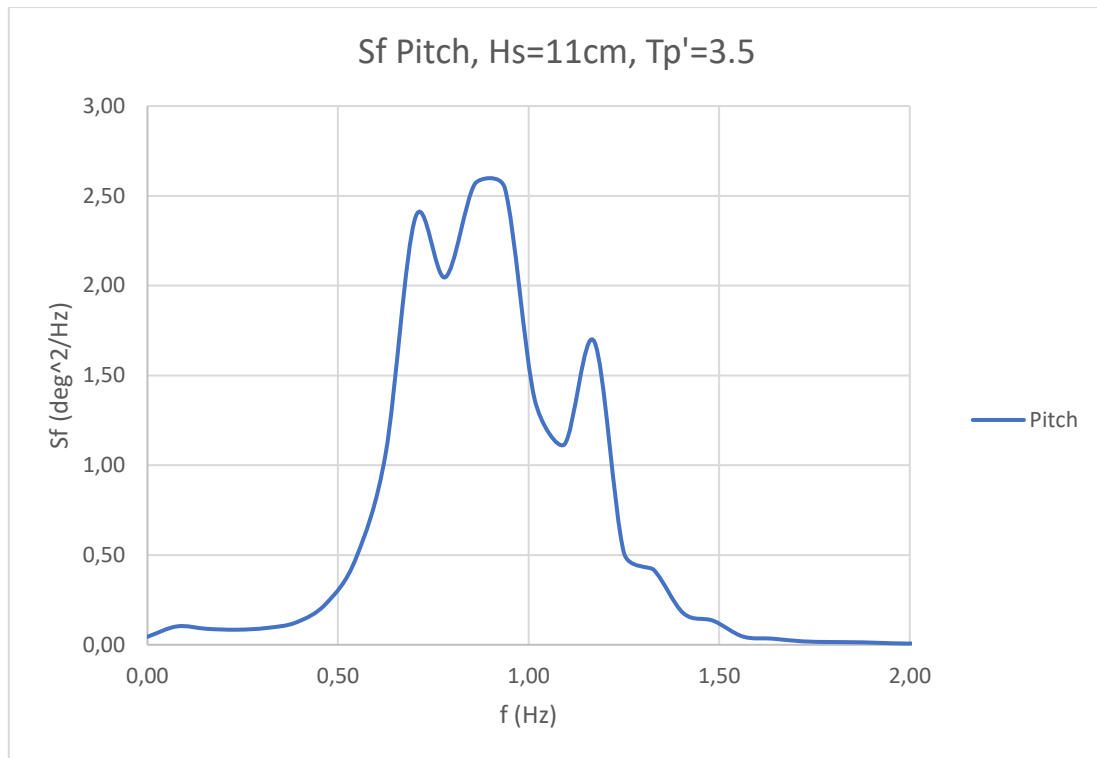
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 11$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 3.5$



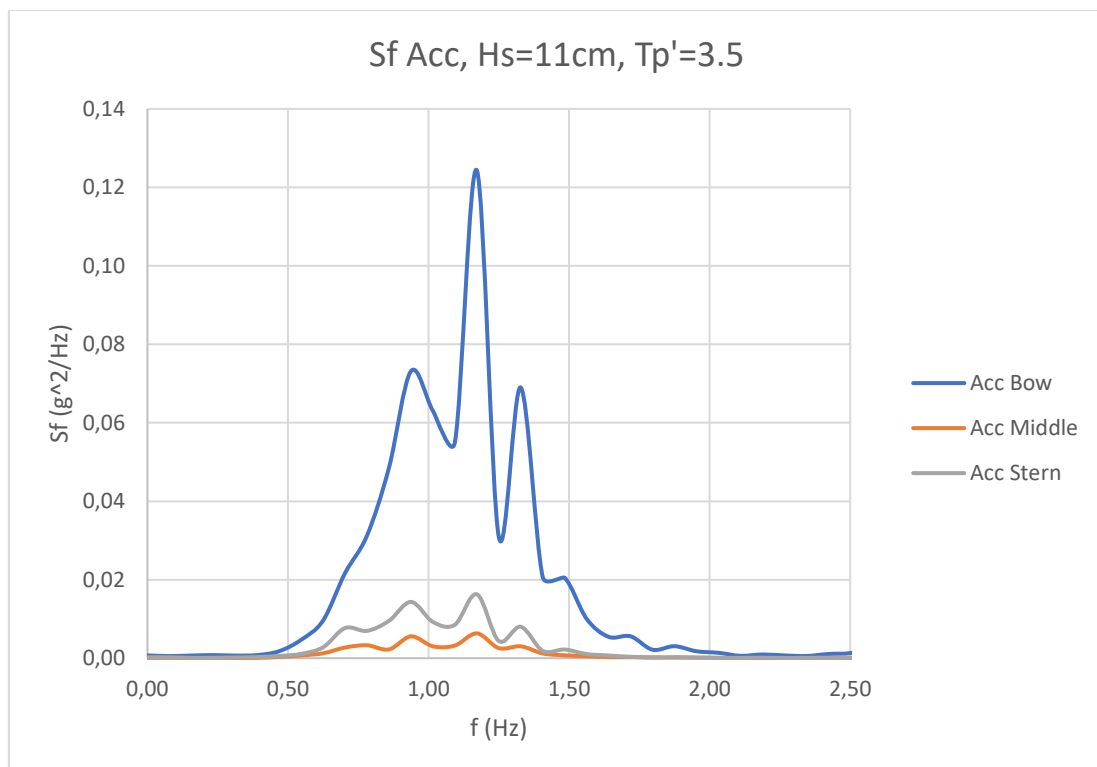
Διάγραμμα 6.17 Θεωρητικό φάσμα κύματος, Bretschneider, και μετρούμενο, Wgen Tank



Διάγραμμα 6.18 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, heave

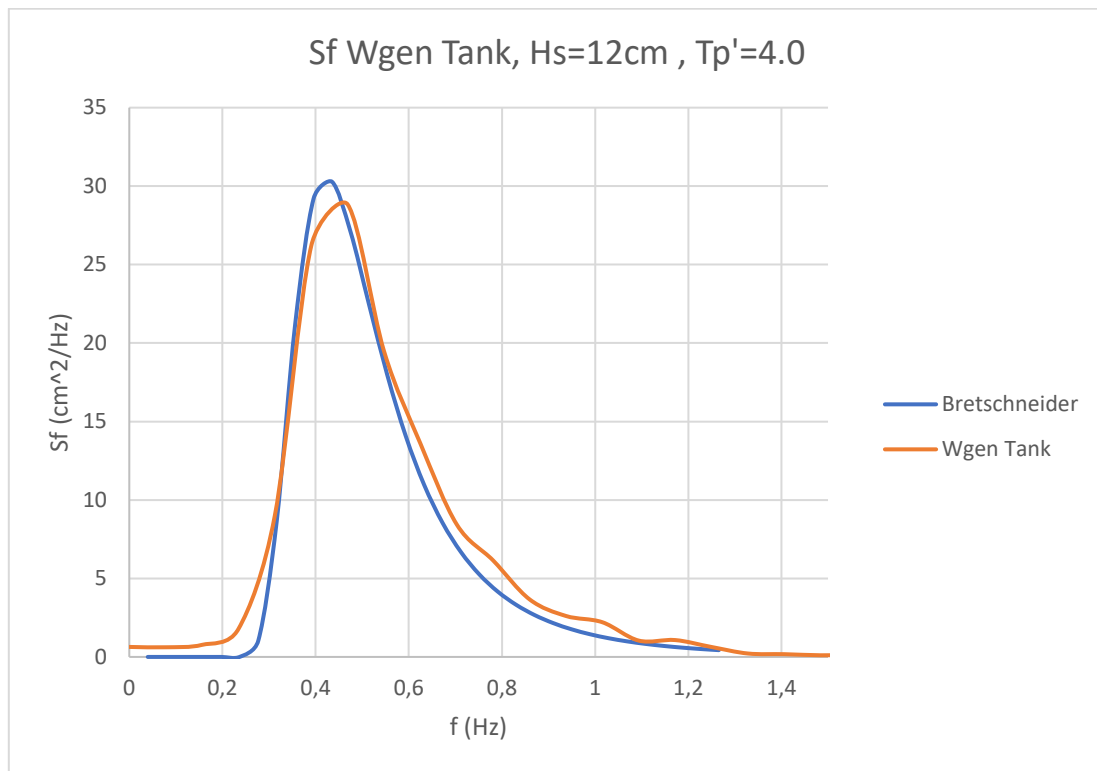


Διάγραμμα 6.19 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch

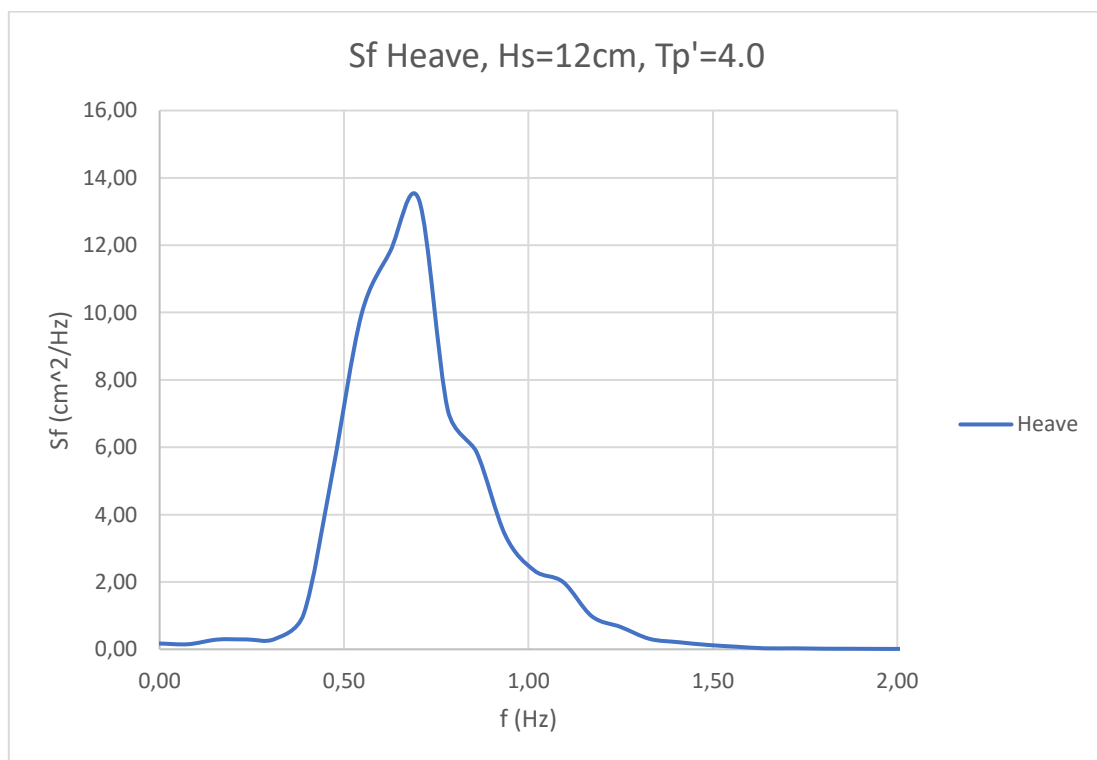


Διάγραμμα 6.20 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων

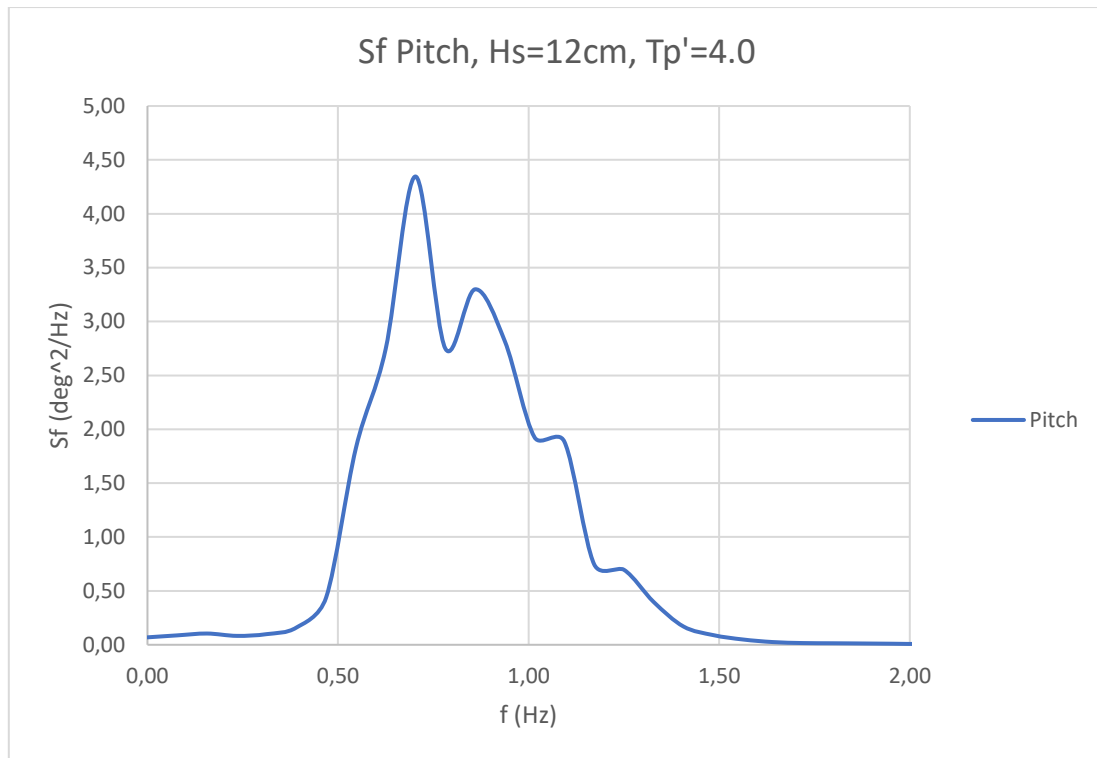
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 12$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 4.0$



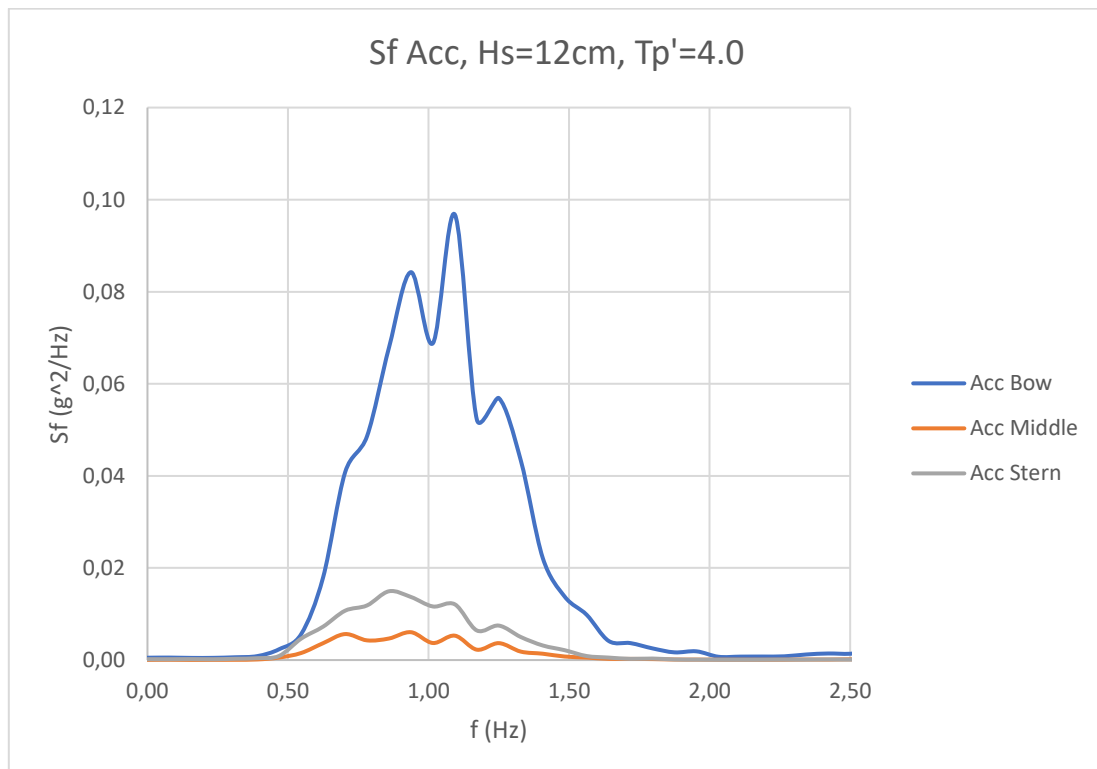
Διάγραμμα 6.21 Θεωρητικό φάσμα κύματος, *Bretschneider*, και μετρούμενο, *Wgen Tank*



Διάγραμμα 6.22 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, *heave*

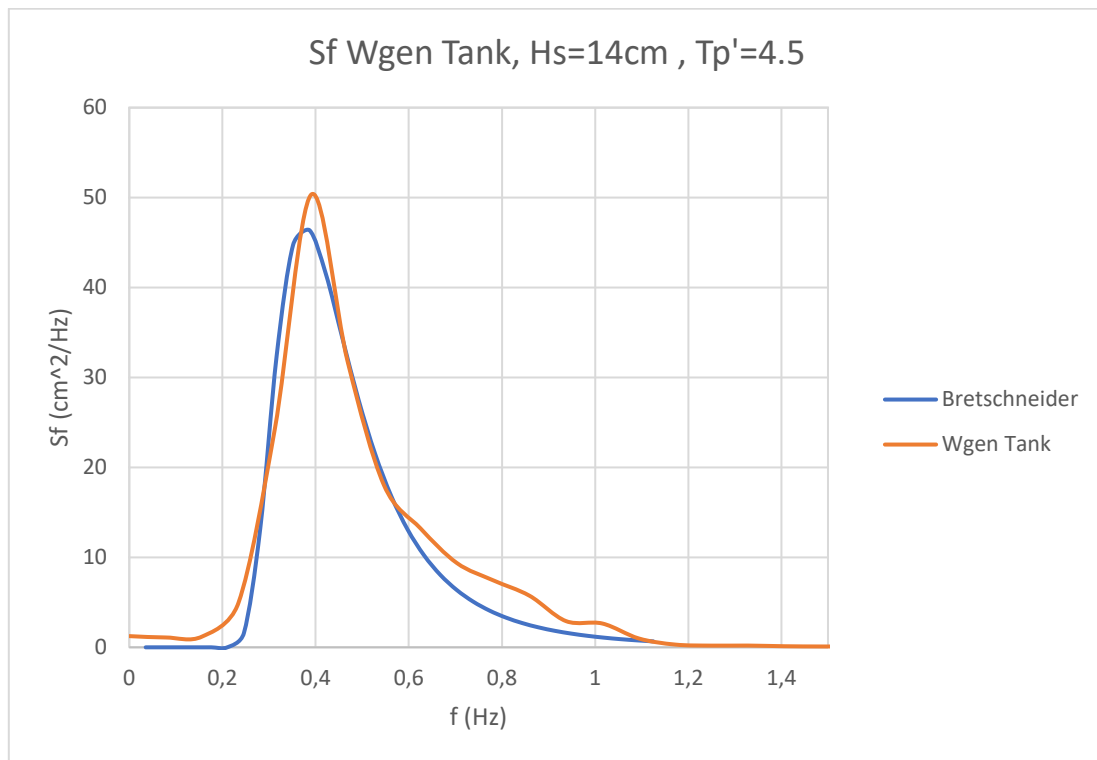


Διάγραμμα 6.23 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch

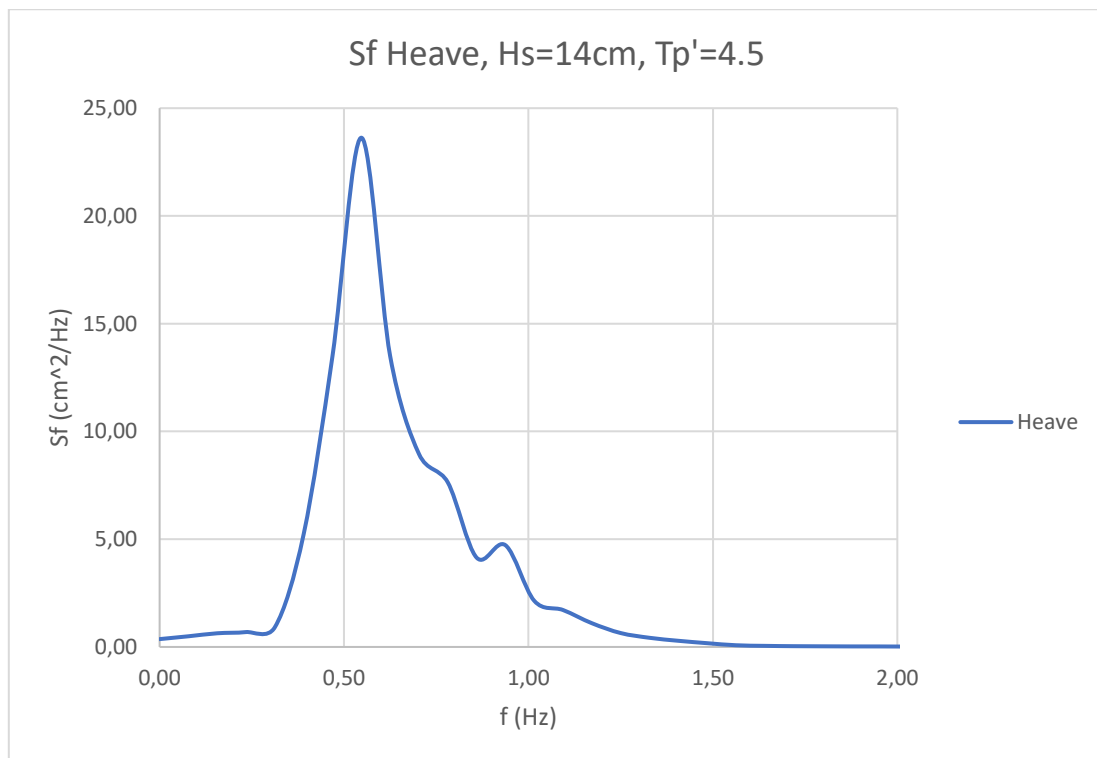


Διάγραμμα 6.24 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων

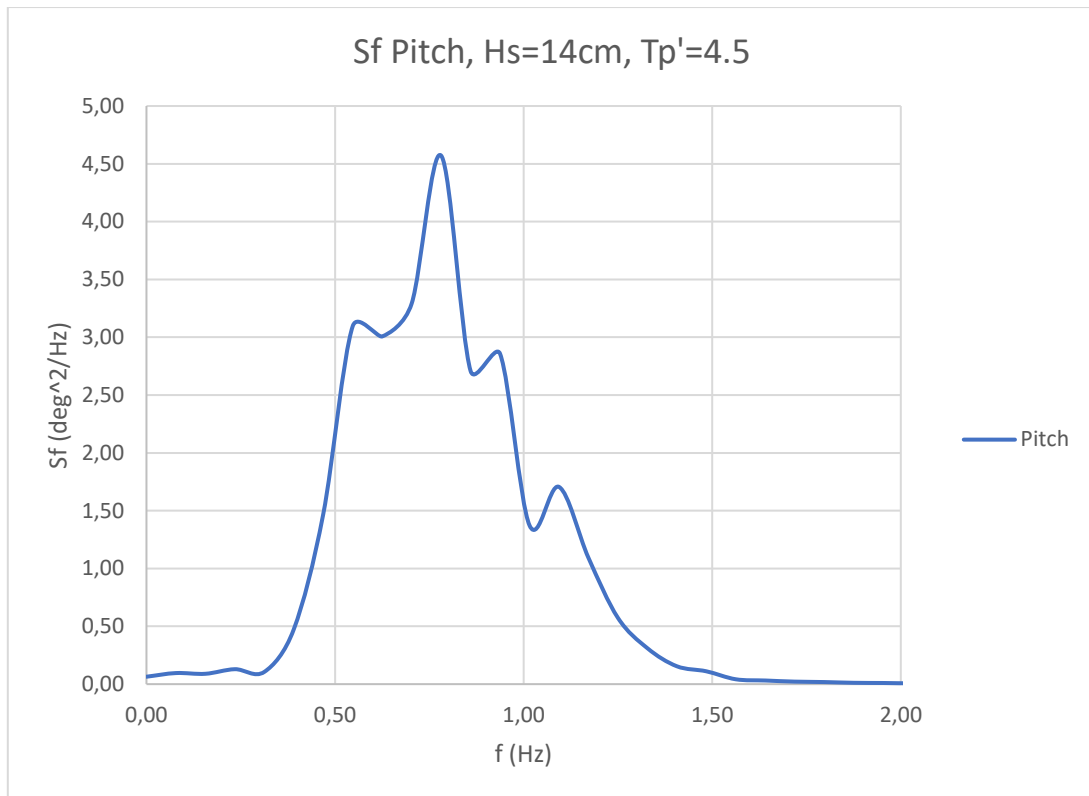
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 14$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 4.5$



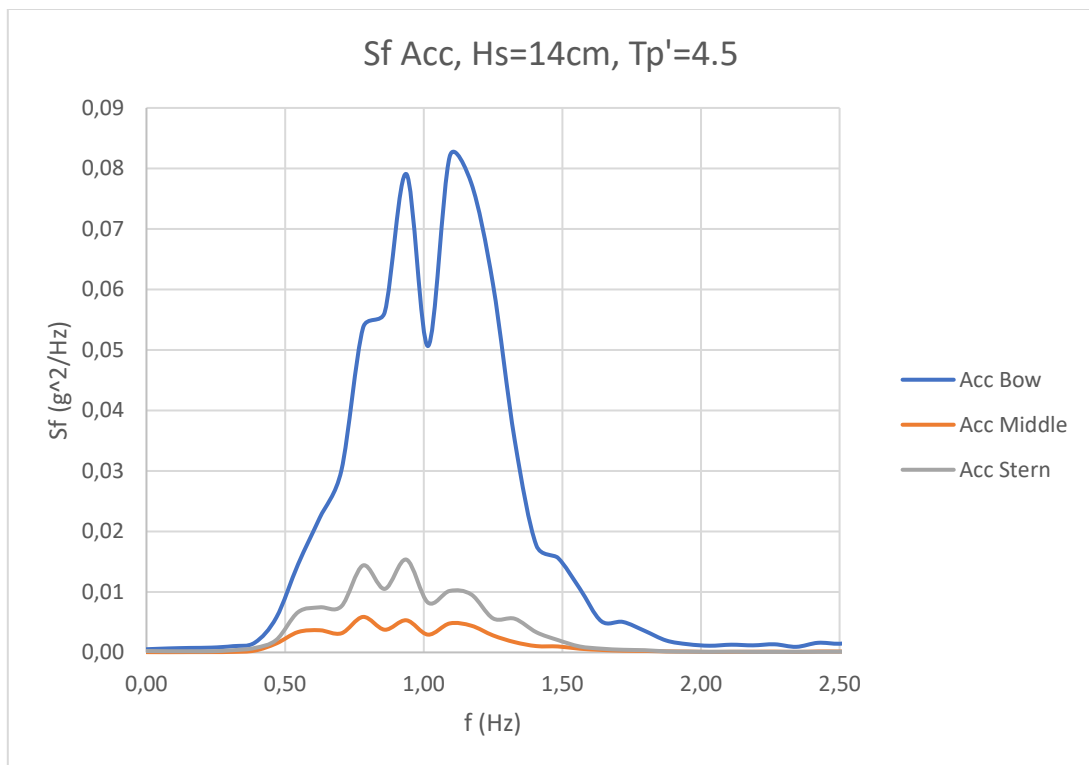
Διάγραμμα 6.25 Θεωρητικό φάσμα κύματος, *Bretschneider*, και μετρούμενο, *Wgen Tank*



Διάγραμμα 6.26 Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης κίνησης, *heave*



Διάγραμμα 6.27 Πυκνότητα φάσματος κίνησης προνευτασμού, pitch



Διάγραμμα 6.28 Πυκνότητα φασμάτων των τριών απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων

6.2 Παρατηρήσεις

1. Όπως ήδη αναφέρθηκε στην ενότητα των βαθμονομήσεων, τα αποτελέσματα του κινούμενου αισθητήριου οργάνου Wave Gen probe δεν ήταν αξιόπιστα για αυτό και δεν παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα φάσματος.
2. Η μεγαλύτερη απόλυτη κατακόρυφη επιτάχυνση σε όλες τις καταστάσεις θάλασσας είναι στο σημείο της πλήρους όπως είναι λογικό, ακολουθεί η επιτάχυνση στην πρύμνη και μικρότερη από όλες στη διαμήκης θέση του κέντρου βάρους καθότι δεν επηρεάζεται από την κίνηση πρόνευσης.
3. Βασική παράμετρος για την σύγκριση των φασμάτων των κυμάτων μεταξύ τους ήταν η αδιάστατη περίοδος T_p' , ώστε να γίνεται σύγκριση ανεξαρτήτου του μοντέλου δοκιμών.
4. Στα παραπάνω φάσματα, η ανάλυση Fourier έγινε με 512 σημεία.

6.3 Διαγράμματα RMS

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται οι τιμές RMS όλων των μεγεθών, όπως προέκυψαν έπειτα από την επεξεργασία των δεδομένων σε μορφή διαγράμματος συναρτήσεως της αδιάστατης περιόδου κορυφής T_p' .

Η παρουσίαση των RMS τιμών διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , σε συνάρτηση με την αδιάστατη περίοδο κορυφής, δίνει τη δυνατότητα συγκρίσεως των αποτελεσμάτων του μελετούμενου προτύπου 163/01, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν ή πρόκειται να προκύψουν σε πειραματικές διαδικασίες διαφορετικών μοντέλων με διαφορετικό λόγο L/B ή διαφορετικό συντελεστή εκτοπίσματος c_{DL} , σε διαφορετικές καταστάσεις θάλασσας. Αυτός είναι και ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας· ο εμπλουτισμός της βιβλιοθήκης του ΕΝΘΥ για μελλοντική χρήση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών για την καλύτερη δυναμική συμπεριφορά των μοντέλων της σειράς του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ως γνωστόν από την θεωρία:

$$H_s = 4 \cdot \sqrt{m_0} = 4 \cdot RMS$$

Έπειτα από την επεξεργασία των εξαγόμενων αρχείων και τη μελέτη των τιμών RMS, διαπιστώνεται η απουσία ύπαρξης συμφωνίας με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Η διόρθωση του συγκεκριμένου προβλήματος προέκυψε ύστερα από τον πολλαπλασιασμό των πειραματικών τιμών RMS, με το λόγο της αναμενόμενης και της πραγματικής τιμής RMS της ανύψωσης του κύματος:

$$RMS_{αναμενόμενο} = RMS_{πραγματικό} \cdot k$$

$$k = \frac{RMS_{αναμενόμενο}}{RMS_{πραγματικό}}$$

A/A	RMS _{αναμενόμενο}	RMS _{πραγματικό}	k
1	1.75	1.5753	1.1077
2	2.00	1.9089	1.0477
3	2.25	2.4103	0.9335
4	2.50	2.5798	0.9691
5	2.75	2.9174	0.9426
6	3.00	3.1686	0.9468
7	3.50	3.7165	0.9418

Πίνακας 6.1 Αναμενόμενες και πραγματικές τιμές RMS για σημαντικό ύψος κύματος H_s

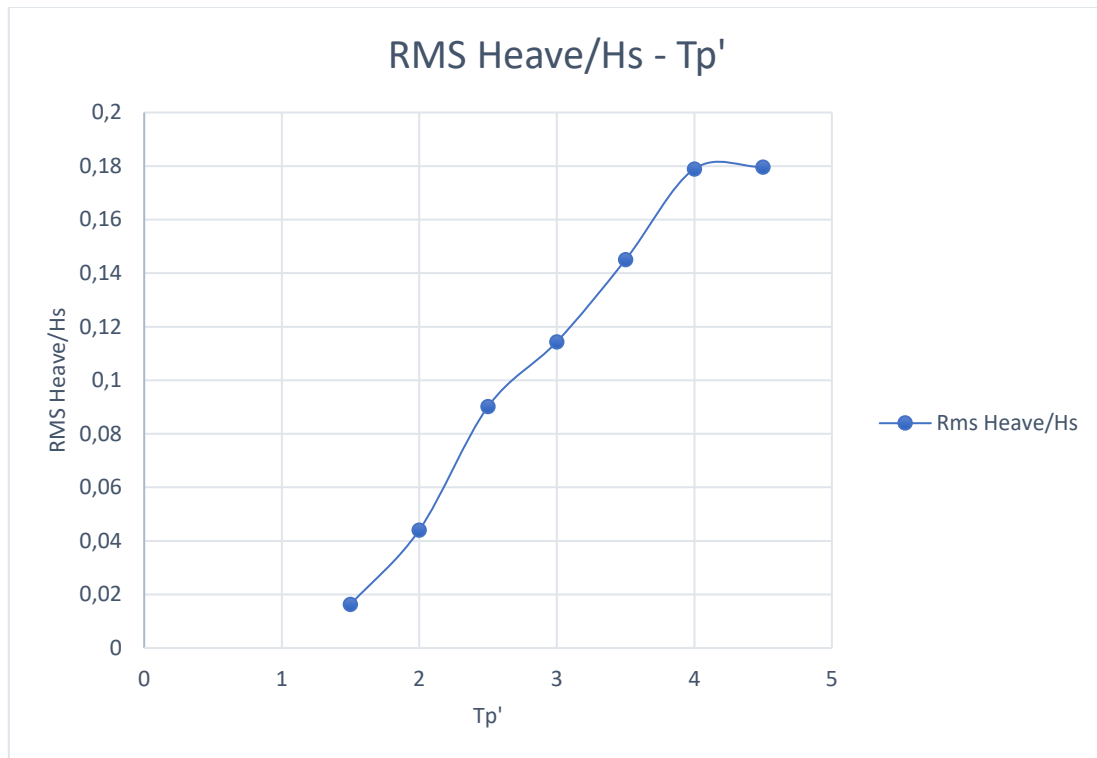
Τα διαγράμματα που ακολουθούν είναι:

- Οι τιμές RMS της κατακόρυφης κίνησης heave διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος H_s με μονάδες cm/cm
- Οι τιμές RMS της πρόνευσης, pitch, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s με μονάδες deg/cm
- Οι τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος με μονάδες g/cm
- Οι τιμές της πρόσθετης αντίστασης διαιρεμένες με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος με μονάδες kp/cm²

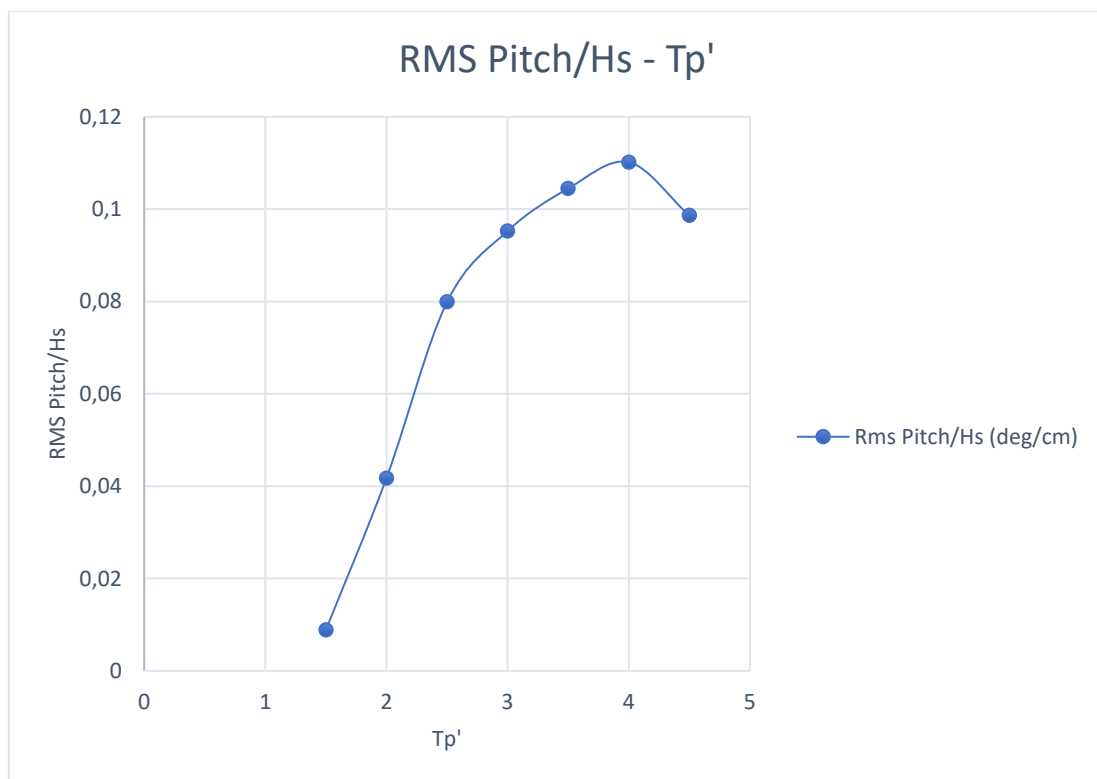
Οι τιμές αυτών, φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

A/A	Tr'	Hs	Acc Bow/Hs	Acc middle/Hs	Acc stern/Hs	Heave/Hs	Pitch/Hs	Res/Hs ²
		(cm)	(g/cm)	(g/cm)	(g/cm)	(cm/cm)	(deg/cm)	(kp/cm ²)
1	1.5	07	0.003703	0.001060	0.001661	0.012478	0.016267	0.001428
2	2.0	08	0.013647	0.002894	0.005160	0.010525	0.04407	0.002522
3	2.5	09	0.021004	0.004958	0.007810	0.009355	0.090165	0.003721
4	3.0	10	0.020825	0.005029	0.007995	0.007722	0.114369	0.002985
5	3.5	11	0.019418	0.004987	0.007858	0.006346	0.145018	0.002538
6	4.0	12	0.018115	0.004908	0.007590	0.005405	0.178928	0.002191
7	4.5	14	0.015317	0.004218	0.006404	0.003931	0.179638	0.001582

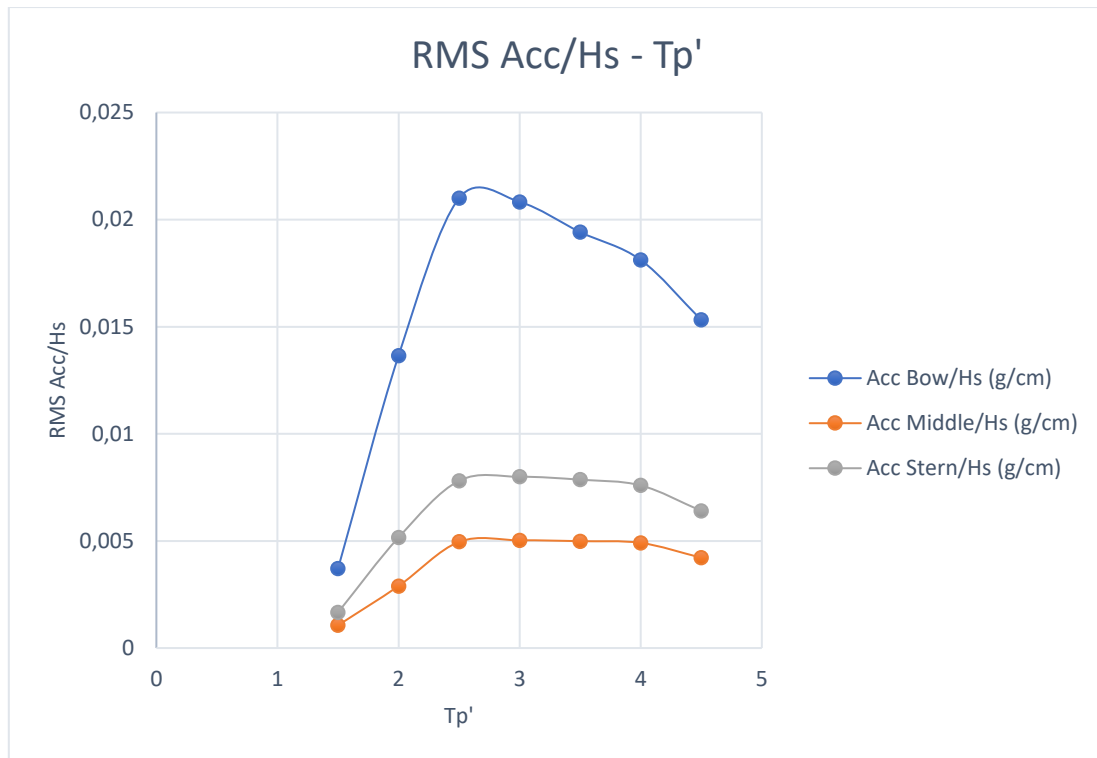
Πίνακας 6.2 Πραγματικές τιμές RMS για όλα τα μετρούμενα μεγέθη



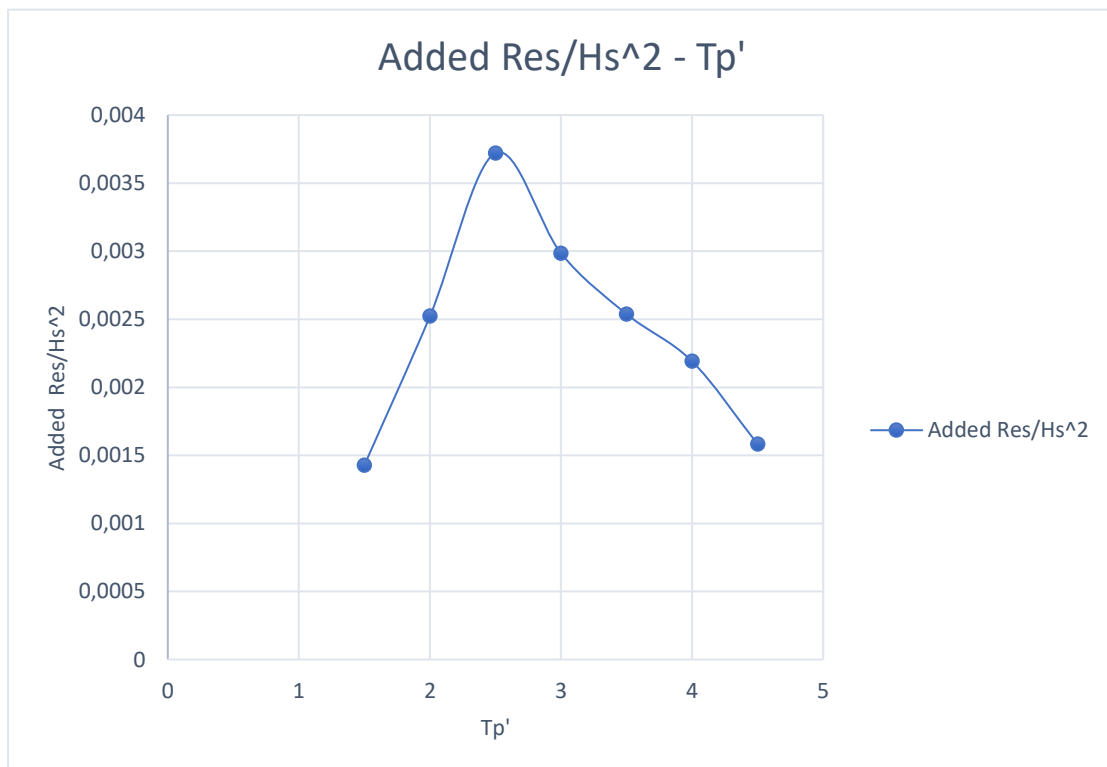
Διάγραμμα 6.29 Τιμές RMS της κατακόρυφης κίνησης, heave, διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s



Διάγραμμα 6.30 Τιμές RMS της κίνησης προνευτασμού, pitch, διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s



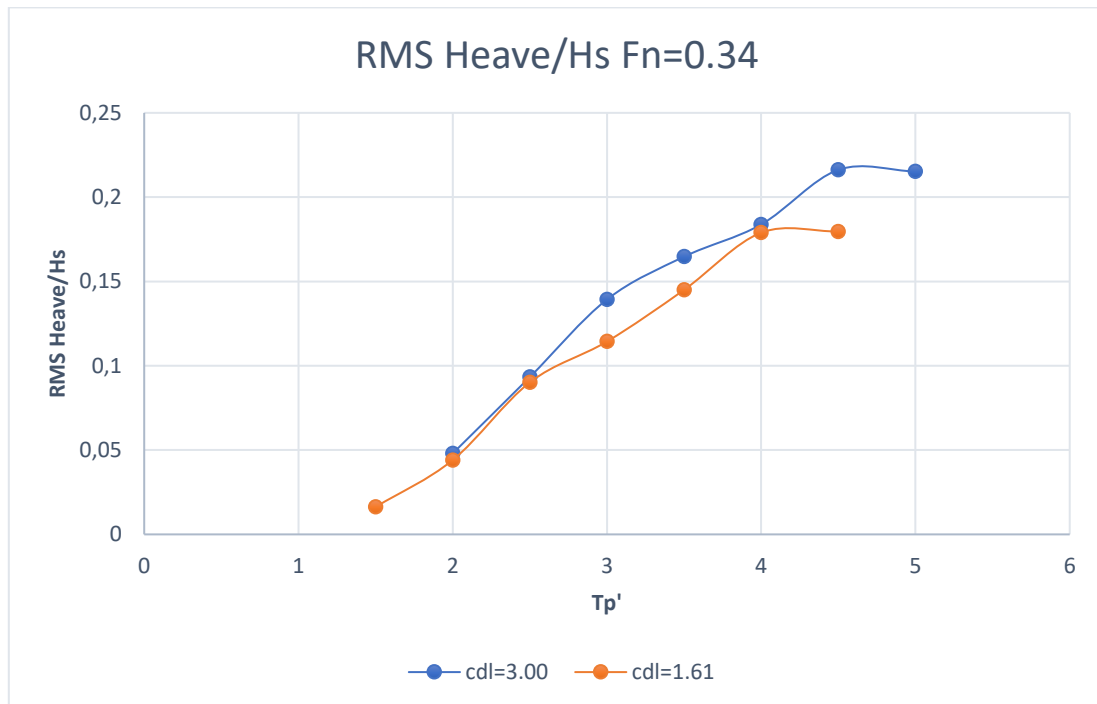
Διάγραμμα 6.31 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στις τρεις θέσεις (πλώρη, κέντρο βάρους, πρύμνη) διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s



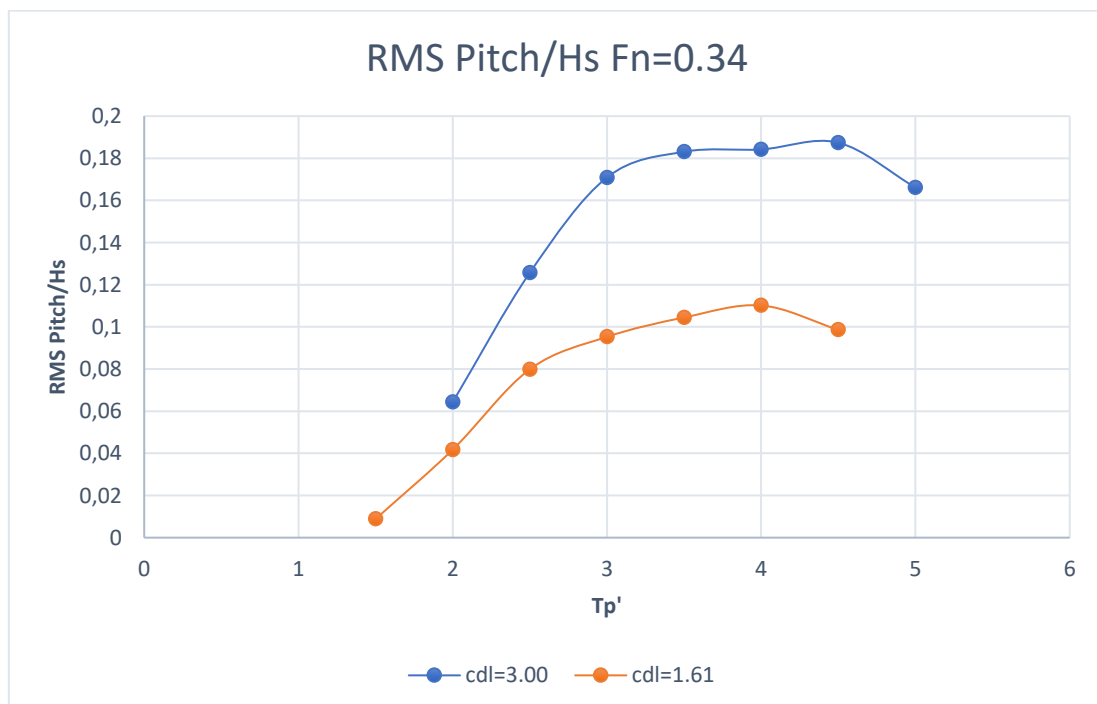
Διάγραμμα 6.32 Τιμές της πρόσθετης αντίστασης διαιρεμένες με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s

6.4 Σύγκριση RMS σε διαφορετικό c_{DL}

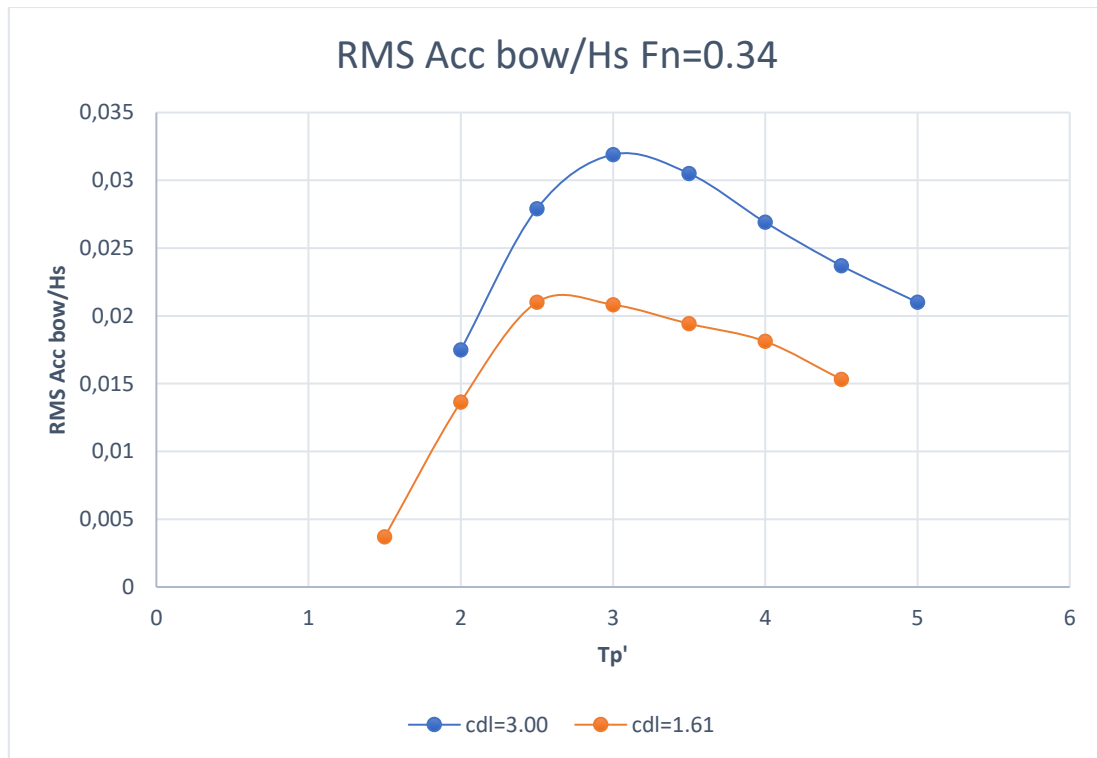
Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση των RMS του προτύπου 163/01 με $L/B=4.0$, σε δύο διαφορετικούς συντελεστές εκτοπίσματος c_{DL} , 1.61 και 3.00.



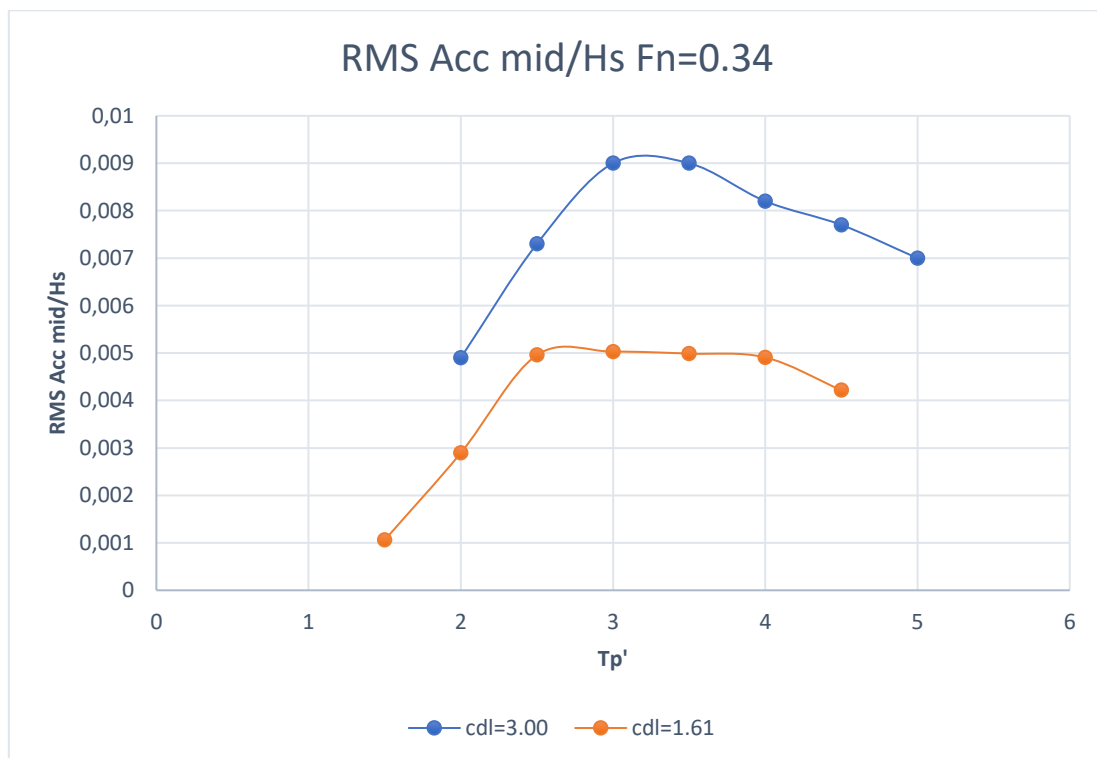
Διάγραμμα 6.33 Τιμές RMS της κατακόρυφης κίνησης, heave, διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος



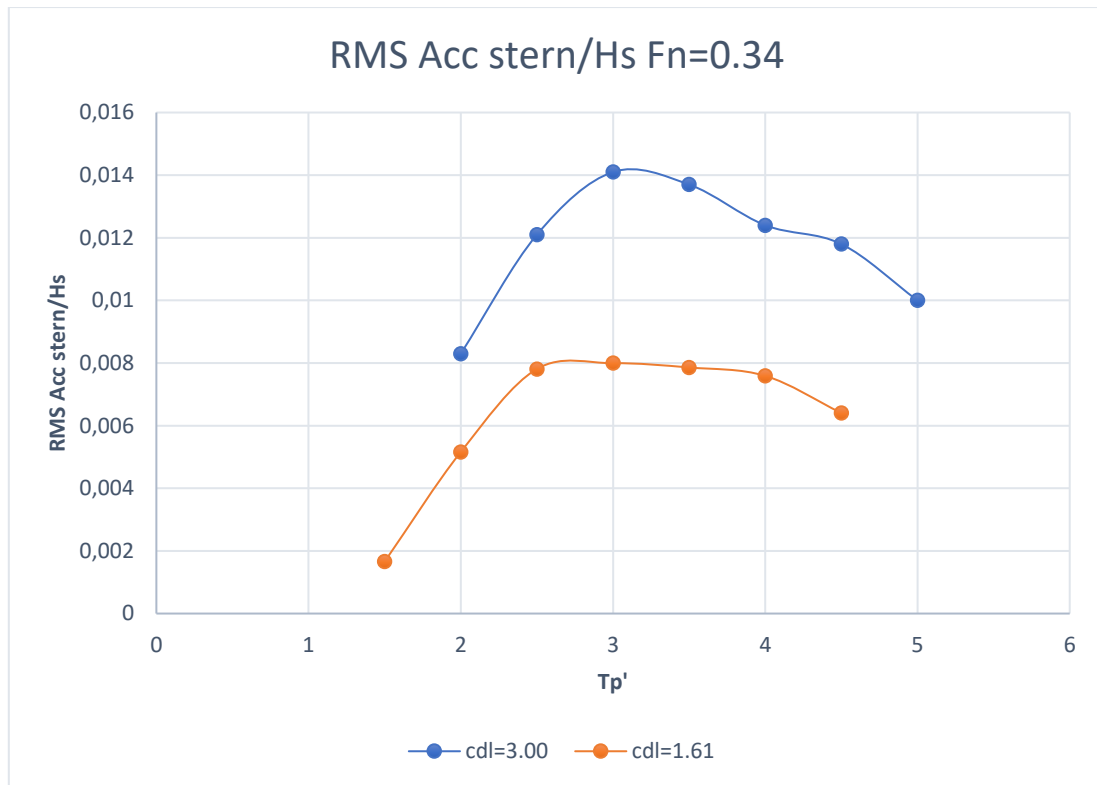
Διάγραμμα 6.34 Τιμές RMS της κίνησης προνευτασμού, pitch, διαιρεμένη με το σημαντικό ύψος κύματος H_s για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος



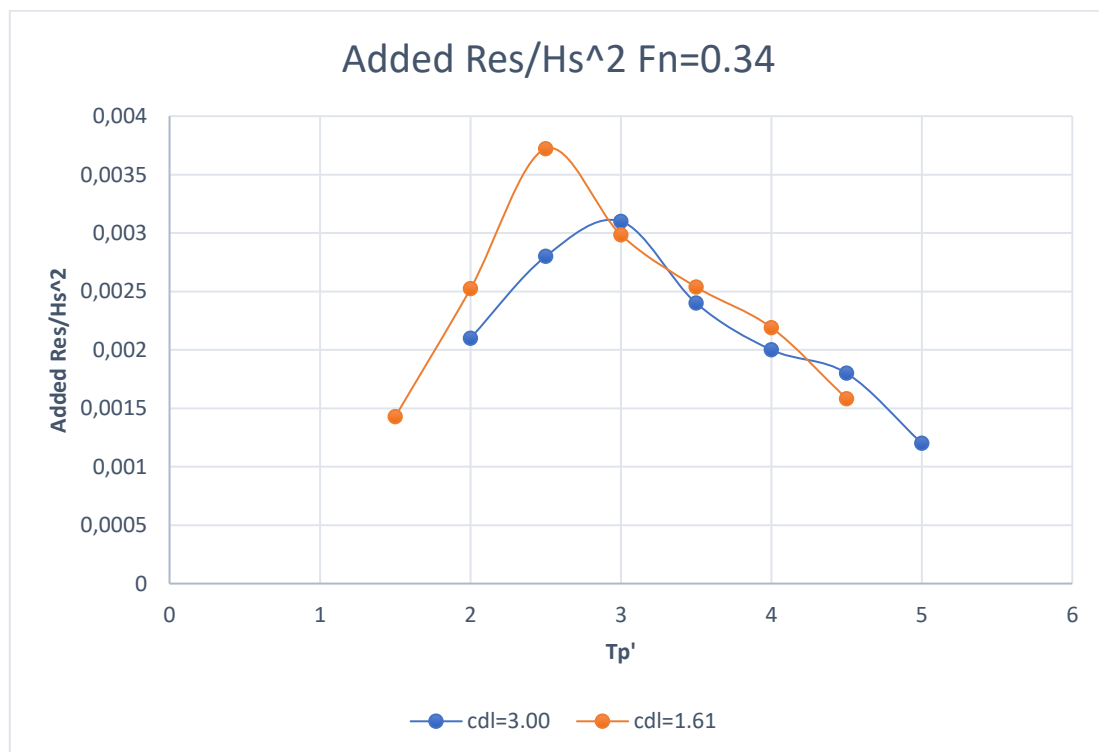
Διάγραμμα 6.35 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πρύμνη διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος



Διάγραμμα 6.36 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην θέση κέντρου βάρους, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος



Διάγραμμα 6.37 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πλώρη, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος



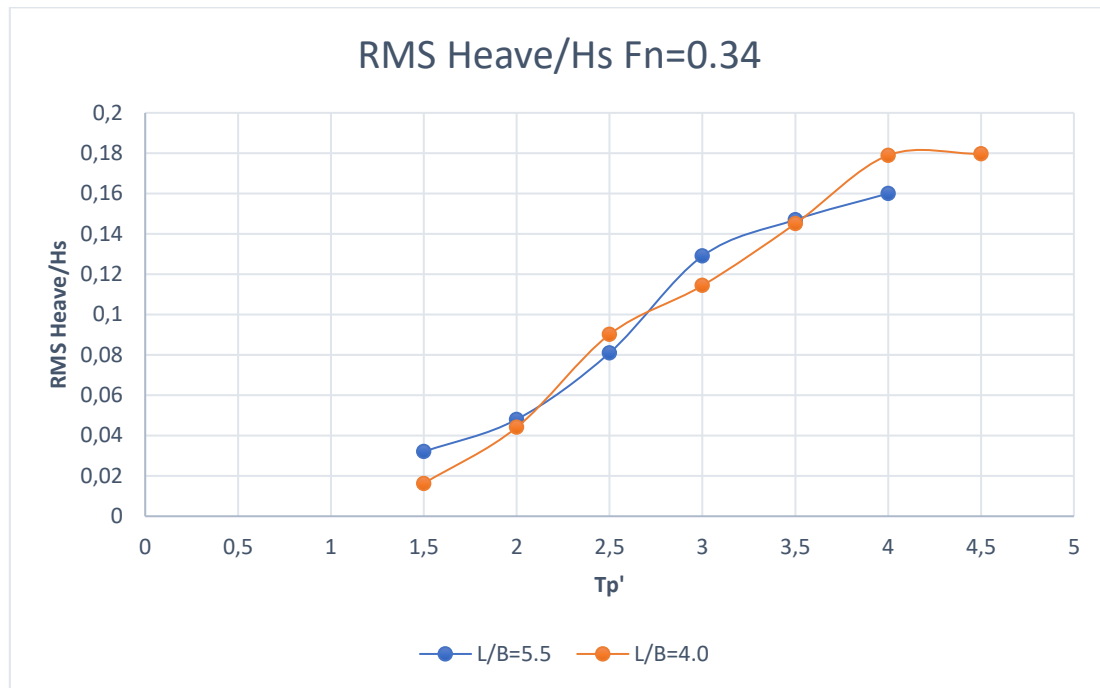
Διάγραμμα 6.38 Τιμές της πρόσθετης αντίστασης διαιρεμένες με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος

6.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

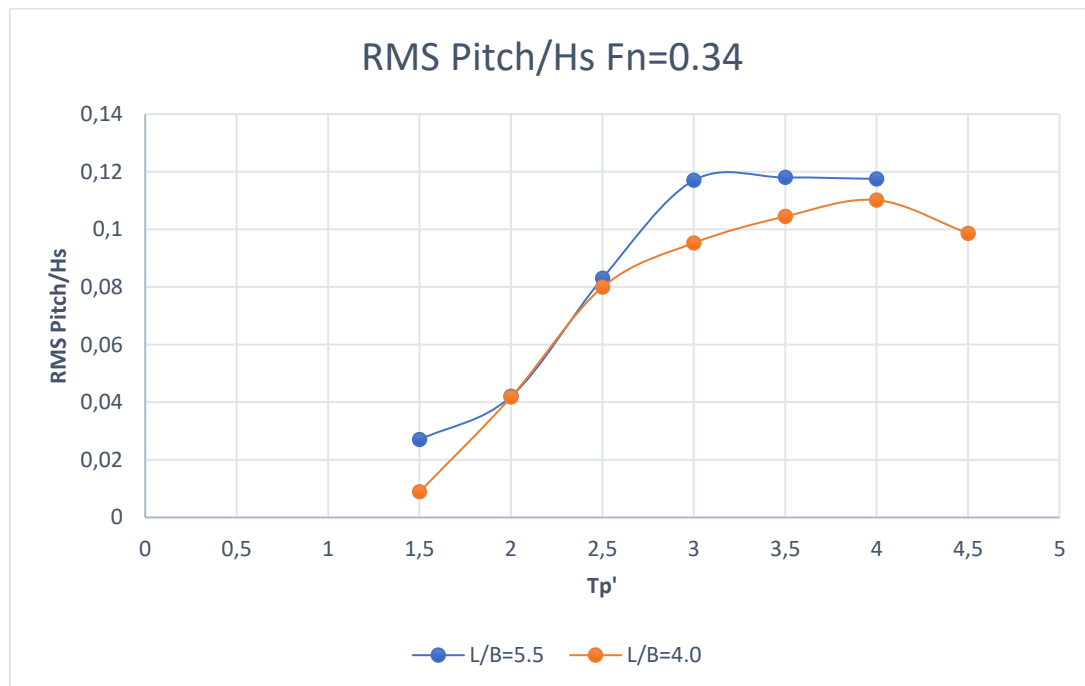
- Κατακόρυφη κίνηση, heave: Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, τα RMS για τους δύο συντελεστές εκτοπίσματος, είναι πολύ κοντά για τιμές αδιάστατης περιόδου Tr' έως 4, ενώ στη συνέχεια φαίνεται ότι οι τιμές για $C_{DL}=3.00$ αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό.
- Προνευτασμός, pitch: Στο διάγραμμα σύγκρισης των τιμών RMS πρόνευσης, οι τιμές για τον συντελεστή $C_{DL}=3.00$ είναι ξεκάθαρα πιο υψηλές σε όλο το εύρος των αδιάστατων περιόδων κύματος.
- Απολύτες κατακόρυφες επιταχύνσεις: Παρότι οι απόλυτες κατακόρυφες επιταχύνσεις στις τρεις θέσεις του ταχύπλου συγκρίθηκαν ξεχωριστά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα ίδια. Παρατηρούνται πιο χαμηλές τιμές στο μικρό συντελεστή σε σχέση με αυτές στο μεγάλο. Επίσης, για τιμές κύματος μεγαλύτερες του 3, παρατηρείται μείωση στις τιμές και των δύο συντελεστών.
- Πρόσθετη αντίσταση: Από τη σύγκριση, είναι φανερό πως οι τιμές της πρόσθετης αντίστασης για τους δύο διαφορετικούς συντελεστές c_{DL} δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους εκτός από την τιμή για $Tr'=2.5$.
- Τα δεδομένα των RMS σε $c_{DL}=3.00$, αποκτήθηκαν από παλαιότερη παρόμοια διπλωματική εργασία του ΕΜΠ, του φοιτητή Τσιορτού Κωνσταντίνου, με τίτλο «Πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλων σκαφών με διπλή ακμή σε τυχαίους κυματισμούς»

6.6 Σύγκριση RMS προτύπων με ίδιο c_{DL} αλλά διαφορετικό L/B

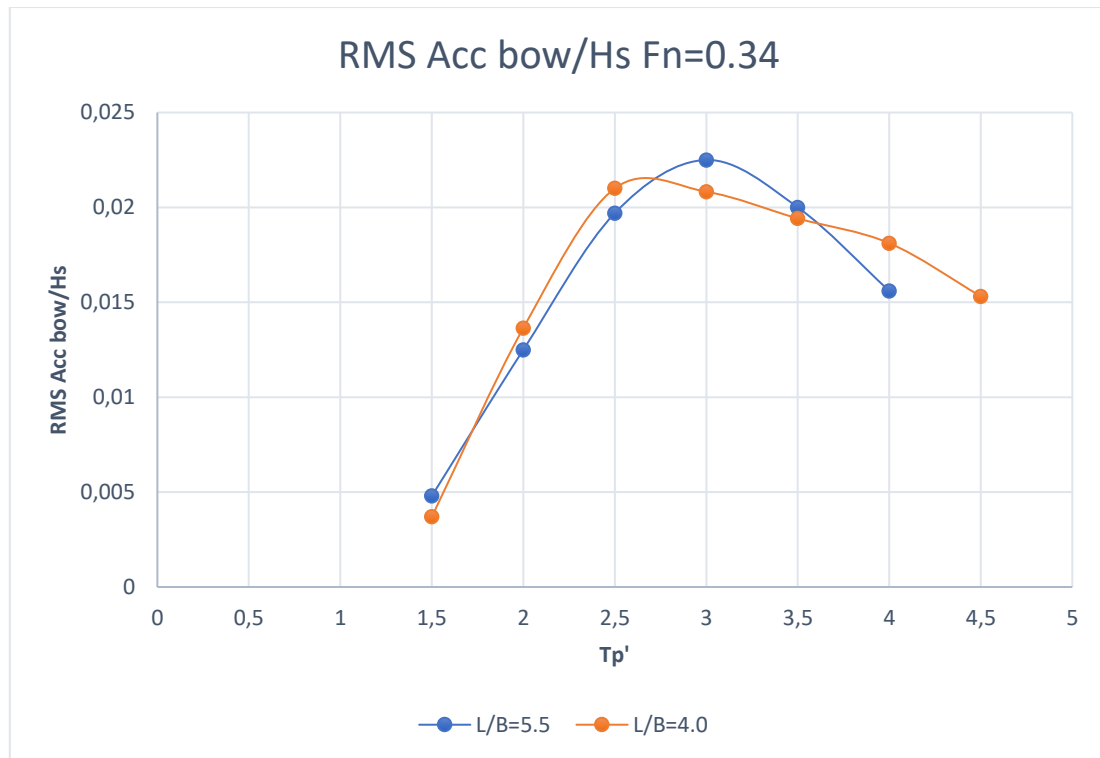
Παρακάτω γίνεται σύγκριση των RMS των προτύπων 163/01 με $L/B=4.0$ και του 118/96 με $L/B=5.5$ με τον ίδιο συντελεστή εκτοπίσματος $c_{DL}=1.61$.



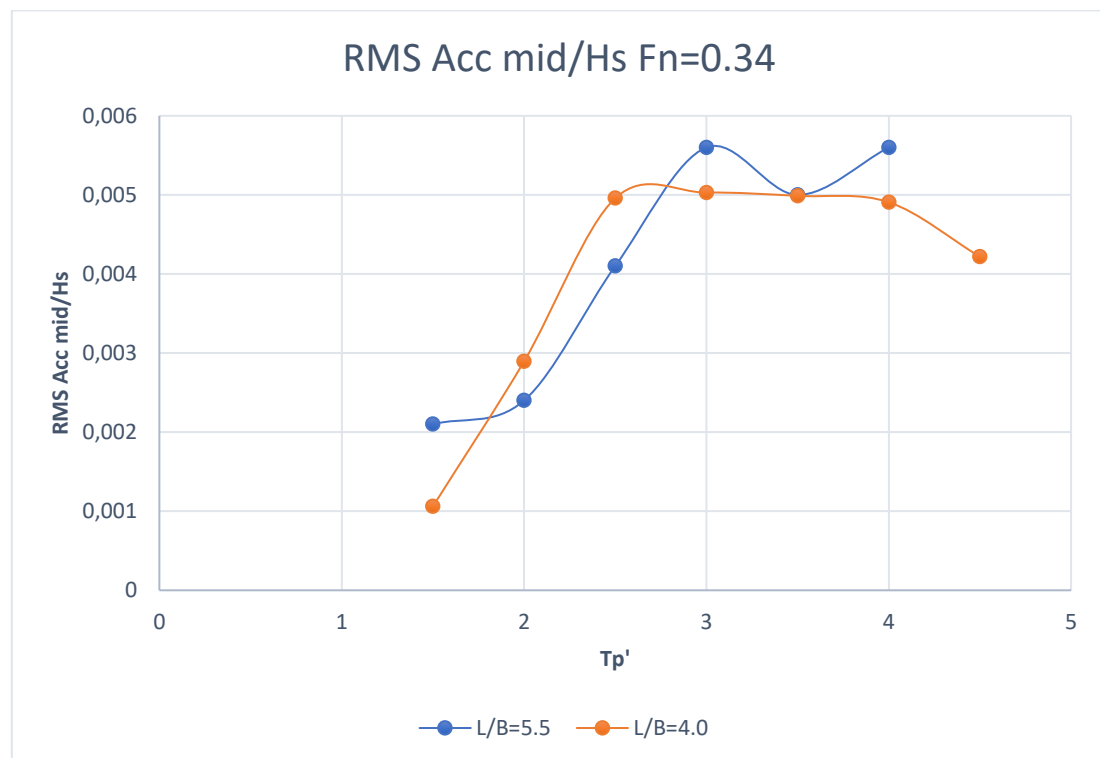
Διάγραμμα 6.39 Τιμές RMS της κατακόρυφης κίνησης, heave, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο διαφορετικούς λόγους L/B



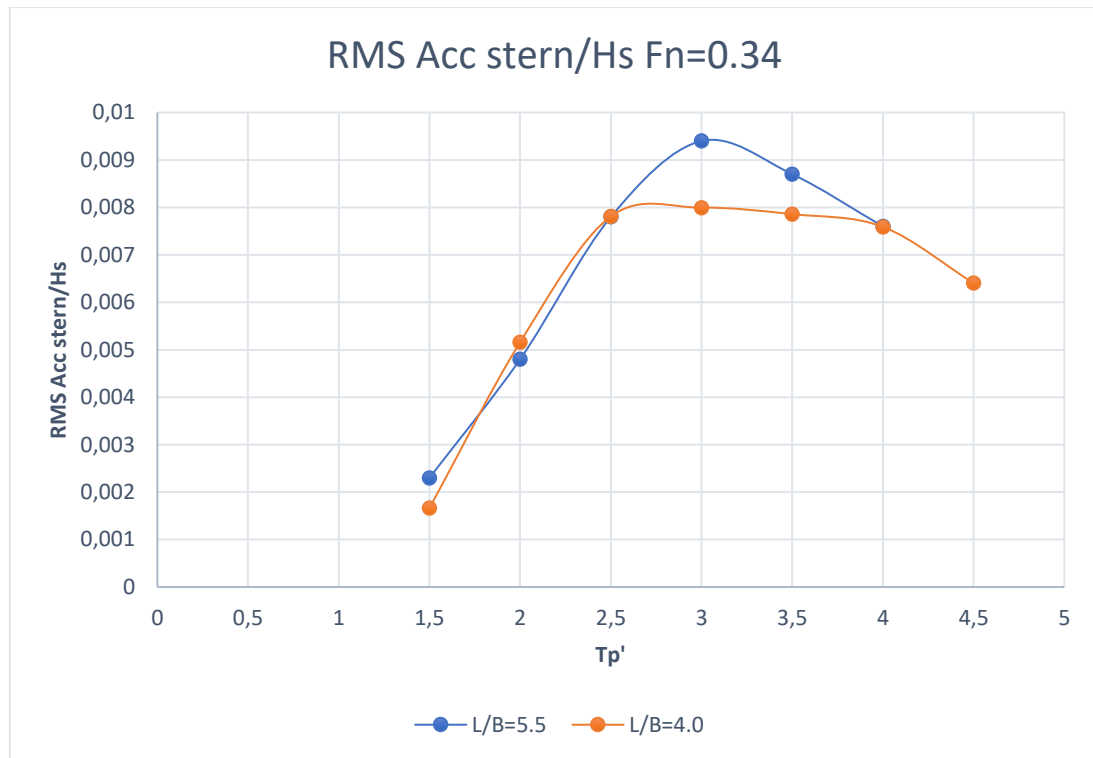
Διάγραμμα 6.40 Τιμές RMS προνευτασμού, pitch, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο διαφορετικούς λόγους L/B



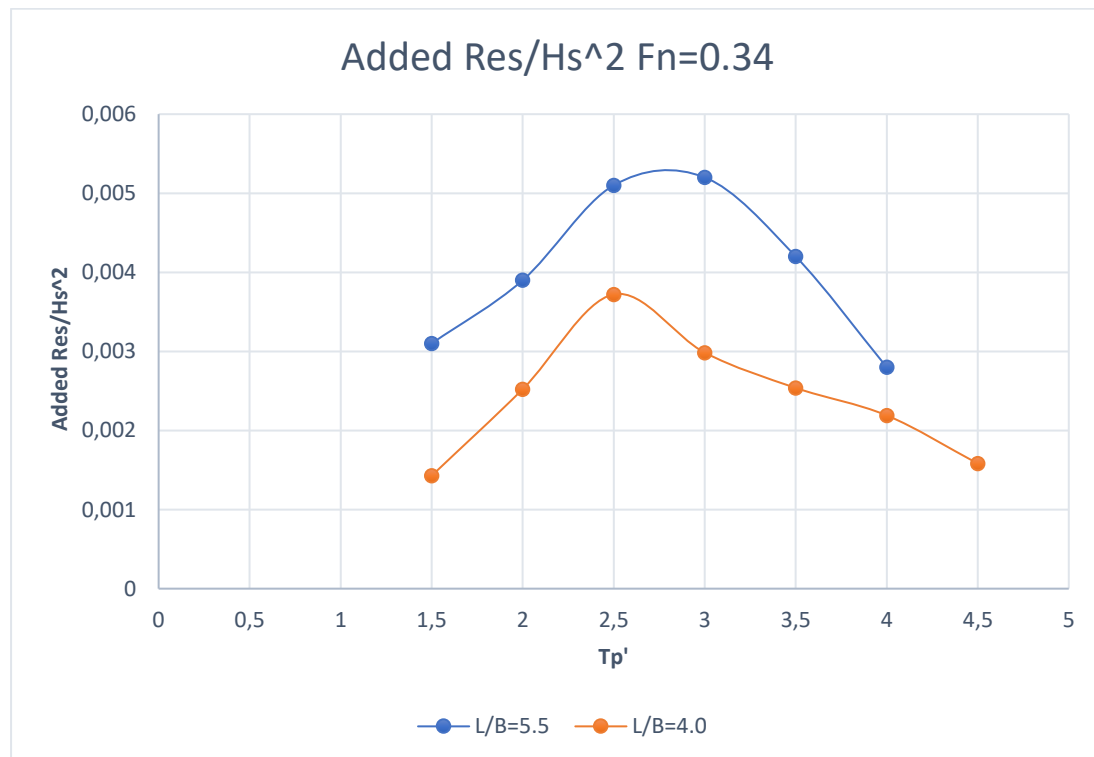
Διάγραμμα 6.41 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πρύμνη, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο λόγους L/B



Διάγραμμα 6.42 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην θέση του κέντρου βάρους, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο λόγους L/B



Διάγραμμα 6.43 Τιμές RMS των απόλυτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πλώρη, διαιρεμένες με το σημαντικό ύψος κύματος H_s , για τους δύο λόγους L/B



Διάγραμμα 6.44 Τιμές της πρόσθετης αντίστασης διαιρεμένες με το τετράγωνο του σημαντικού ύψους κύματος H_s , για τους δύο λόγους L/B

6.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

- Κατακόρυφη κίνηση, heave: Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, τα RMS για τα δύο διαφορετικά πρότυπα, είναι πολύ κοντά αυξανόμενα με την αύξηση της αδιάστατης περιόδου κορυφής T_p' .
- Πρόνευσμα, pitch: Στο διάγραμμα σύγκρισης των τιμών RMS πρόνευσης, οι τιμές είναι πολύ κοντά μέχρι έως την τιμή $T_p'=2.5$, ενώ στη συνέχεια, οι τιμές RMS για $L/B=5.50$ είναι φανερά μεγαλύτερες.
- Απολύτες κατακόρυφες επιταχύνσεις: Παρότι οι απόλυτες κατακόρυφες επιταχύνσεις στις τρεις θέσεις του ταχύπλοου συγκρίθηκαν ξεχωριστά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα ίδια. Παρατηρούνται πιο χαμηλές τιμές στο μικρό L/B σε σχέση με αυτές του προτύπου με $L/B=5.50$.
- Πρόσθετη αντίσταση: Από τη σύγκριση, είναι φανερό πως οι τιμές της πρόσθετης αντίστασης για υψηλότερο λόγο L/B είναι υψηλότερες από τις τιμές του προτύπου 163/01 με $L/B=4.0$ στην ίδια ταχύτητα.
- Τα δεδομένα των RMS σε $L/B=5.5$ αποκτήθηκαν από παλαιότερη παρόμοια διπλωματική εργασία του ΕΜΠ της φοιτήτριας Περδικάρης Κ. Θεανούς, με τίτλο «Αναλυτική και πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοου σκάφους σε κυματισμούς»

6.8 Σύγκριση φασμάτων μέσω RAO

Στα πλαίσια της διπλωματικής, ζητήθηκε ακόμη, η σύγκριση των πειραματικών φασμάτων πυκνότητας του μοντέλου 163/01 για τις κινήσεις και τις απόλυτες κατακόρυφες επιταχύνσεις της ενότητας 5.1, με τα φάσματα που προκύπτουν μέσω των συναρτήσεων μεταφοράς RAO για αρμονικούς κυματισμούς. Τα RAO προέκυψαν από παλαιότερα πειράματα του ίδιου μοντέλου, με την ίδια ταχύτητα, $F_n=0.34$.

Οι μετρήσεις των θαλάσσιων κυματισμών αναφέρονται σε σταθερή θέση στο χώρο και άρα το φάσμα των θαλασσιών κυματισμών εκφράζεται ως συνάρτηση της φυσικής κυκλικής συχνότητας του κύματος ω_0 και όχι της συχνότητας συνάντησης ω , που γίνεται αισθητή από το πλοίο. Επομένως, για να γίνει η σύγκριση, θα πρέπει αρχικά να αναχθούν τα φάσματα, στην ίδια ανεξάρτητη μεταβλητή. Στην προκειμένη περίπτωση έγινε μετατροπή του φάσματος των θαλασσιών κυματισμών από τις συχνότητες f_0 στις αντίστοιχες συχνότητες συνάντησης f μέσω των κυκλικών τους ταχυτήτων ω_0 και ω . Η σχέση που συνδέει τις δύο μεταβλητές (για βαθύ νερό) είναι η κάτωθι:

$$\omega = \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} U_1 \cos\beta$$

Όπου $\beta=180^\circ$, για μετωπικούς κυματισμούς.

Η σχέση που συνδέει το $S(f_0)$ με το $S(f)$:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \left(\frac{|d\omega|^{-1}}{d\omega_0} \right) S_{\eta\eta}(\omega_0)$$

Και για βαθύ νερό:

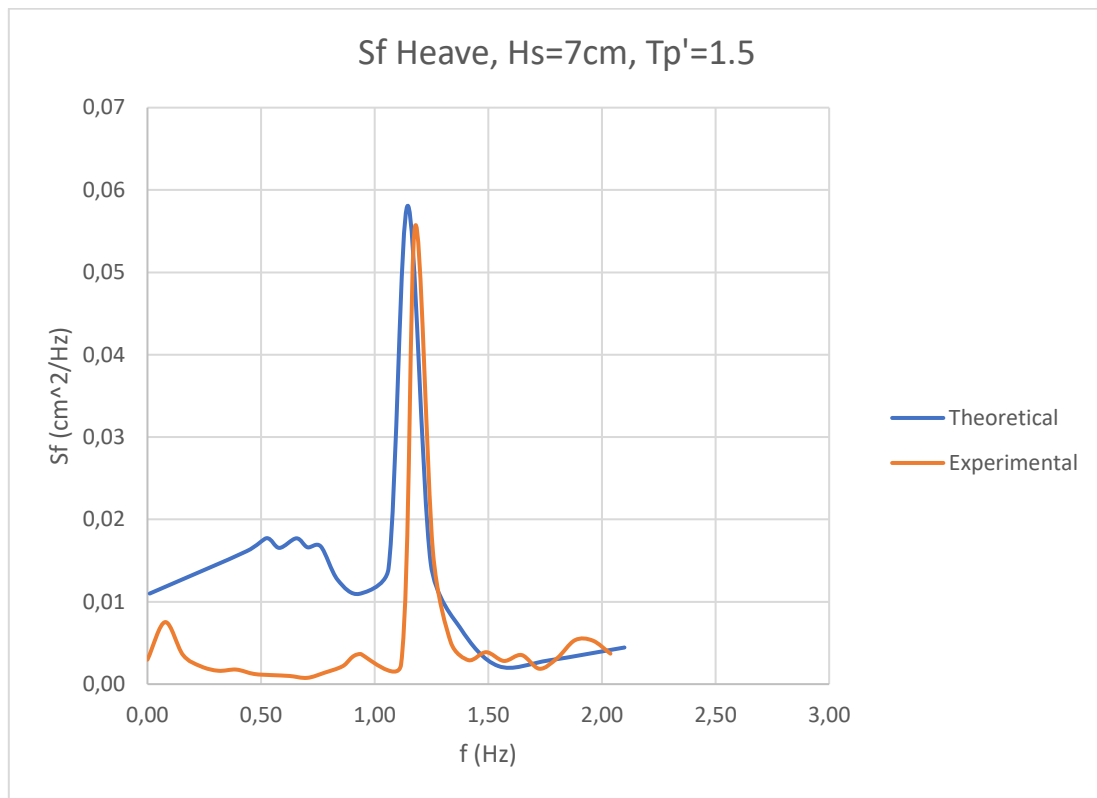
$$S(\omega) = \left| 1 - \frac{2\omega_0^2}{g} U_1 \cos\beta \right|^{-1} S(\omega_0)$$

Αφού έγινε η μετατροπή των κυκλικών συχνοτήτων, υπολογίστηκαν τα θεωρητικά φάσματα των μεγεθών (κατακόρυφη κίνηση, προνευτασμός, απόλυτες κατακόρυφες επιταχύνσεις στα τρία σημεία του σκάφους) με τη χρήση της σχέσης που αναφέρθηκε στο σχετικό εδάφιο των RAO:

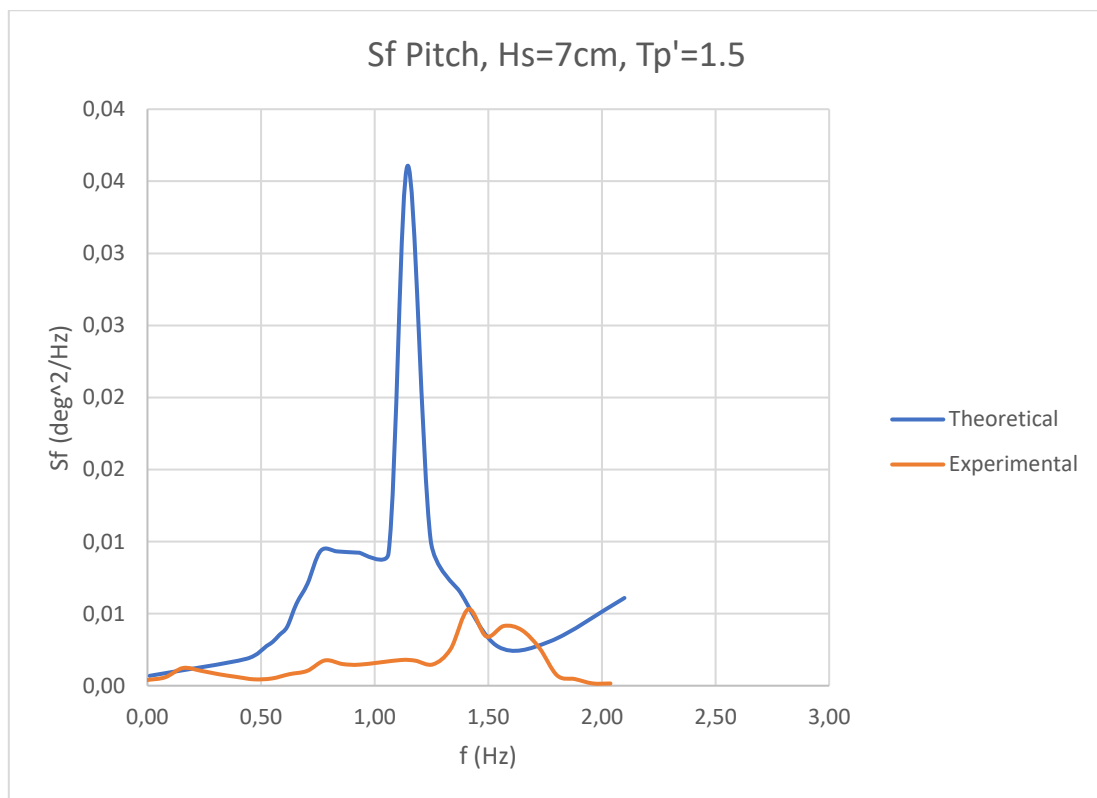
$$S_{\xi_i}(\omega) = |R_{\xi_i}(\omega)|^2 S_z(\omega)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα θεωρητικά (μέσω RAO) και τα πειραματικά, που μετρήθηκαν στην δεξαμενή, φάσματα των μεγεθών για καθεμία από τις επτά καταστάσεις θάλασσας. Στο σημείο αυτό, πρέπει να επισημανθεί πως επειδή τα δοσμένα αποτελέσματα των αρμονικών κυμάτων ξεκινάνε από συχνότητα f με τιμή κοντά στα 0.5 Hz, έγινε προσθήκη, σε συνεννόηση με τον επιβλέποντα καθηγητή, δύο σημείων μικρότερων συχνοτήτων ακολουθώντας τη μορφή της καμπύλης στην περιοχή αυτήν, έτσι ώστε να καλύπτεται ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων και φυσικά να είναι όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματική η σύγκριση των RMS τιμών των μεγεθών.

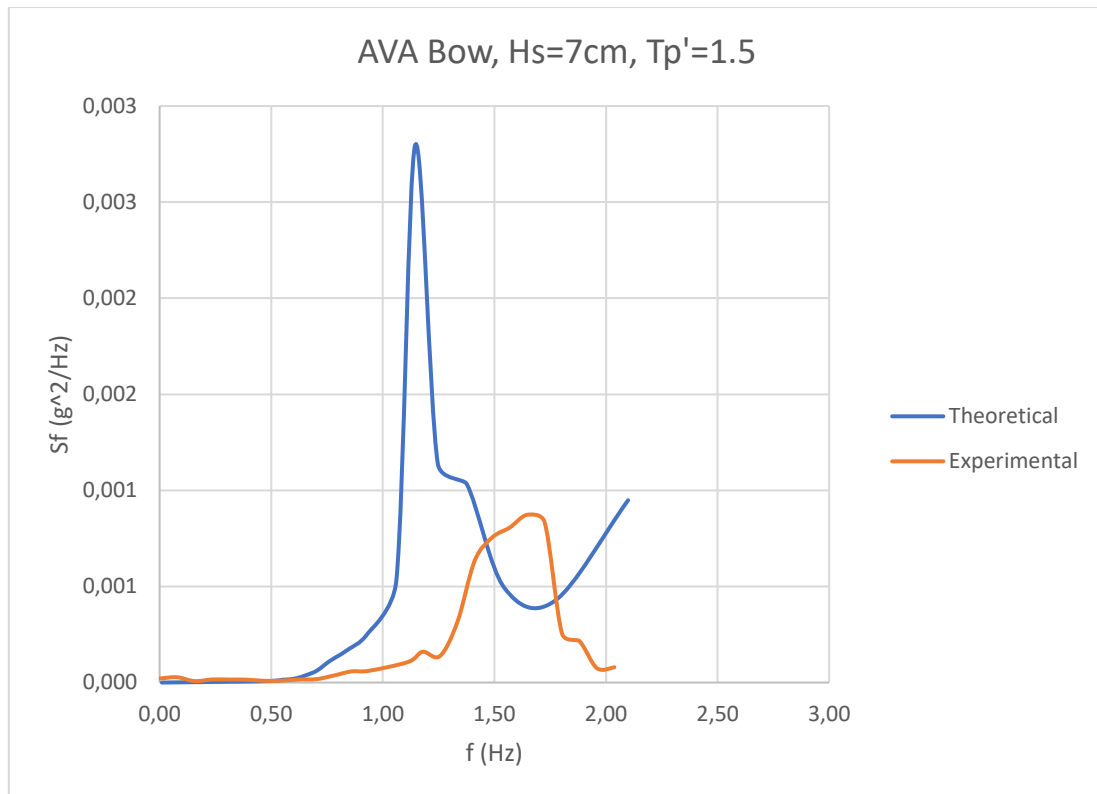
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 7$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 1.5$



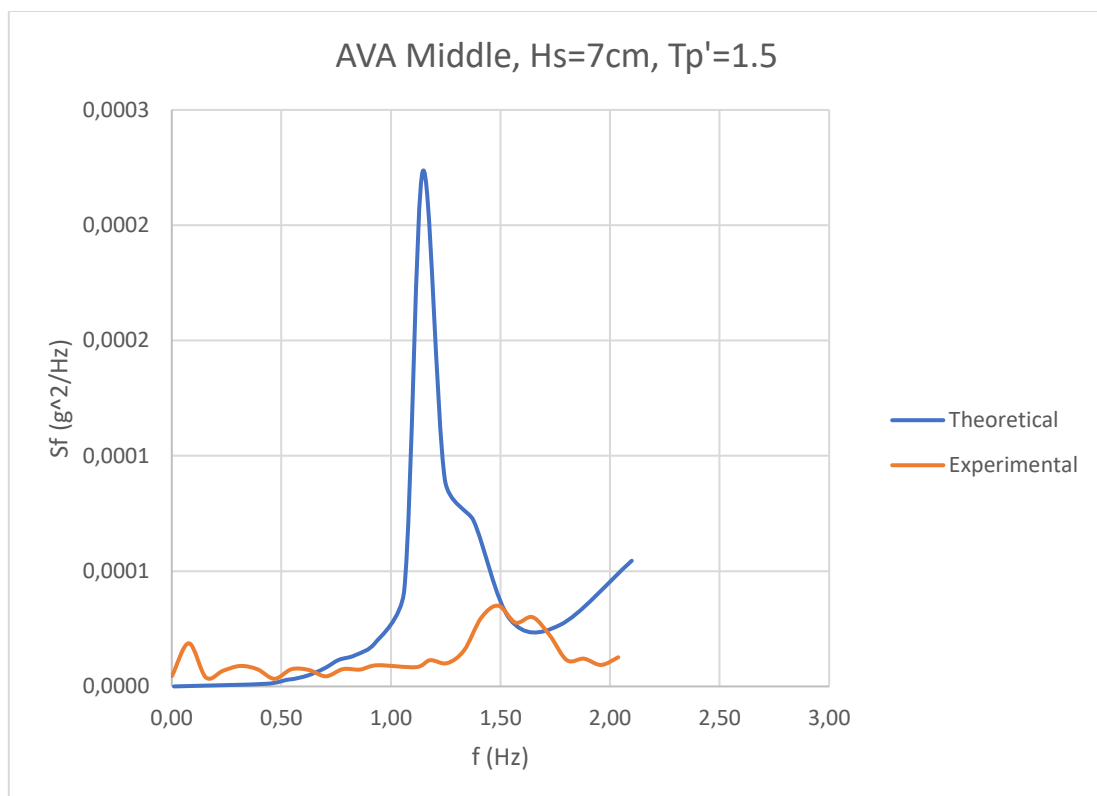
Διάγραμμα 6.45 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave



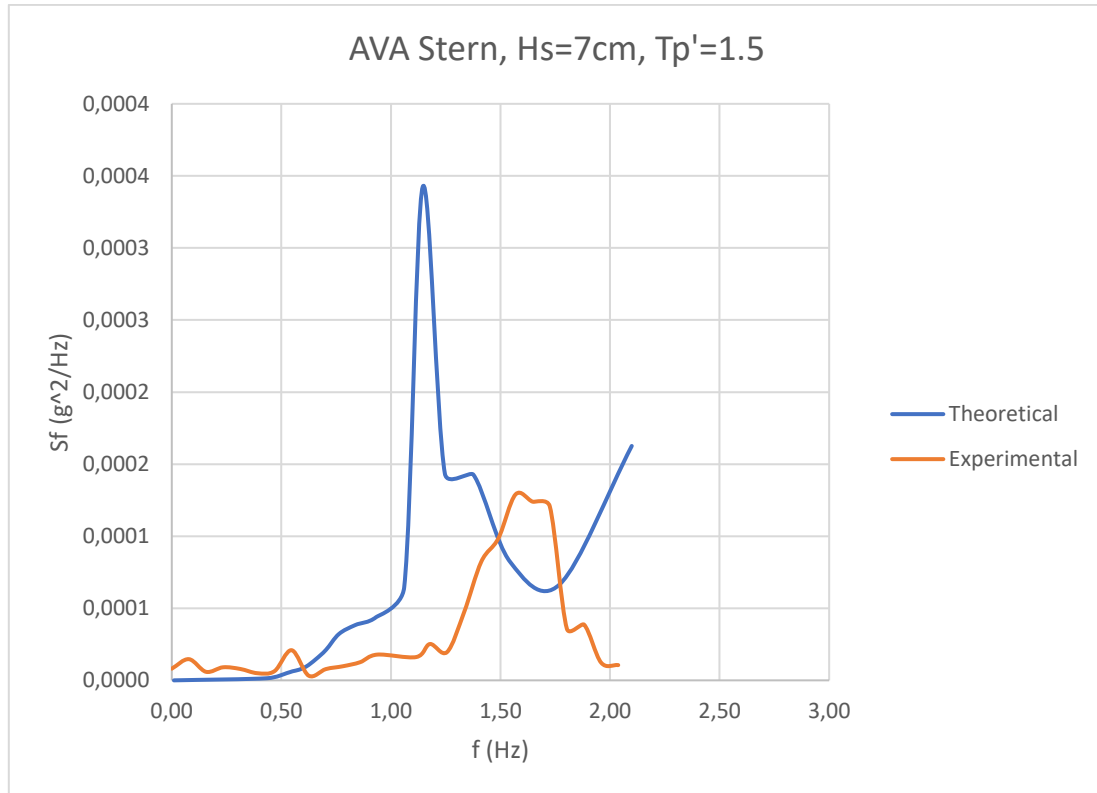
Διάγραμμα 6.46 Σύγκριση φασμάτων προνευσμού, pitch



Διάγραμμα 6.47 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Διάγραμμα 6.48 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην θέση του κέντρου βάρους

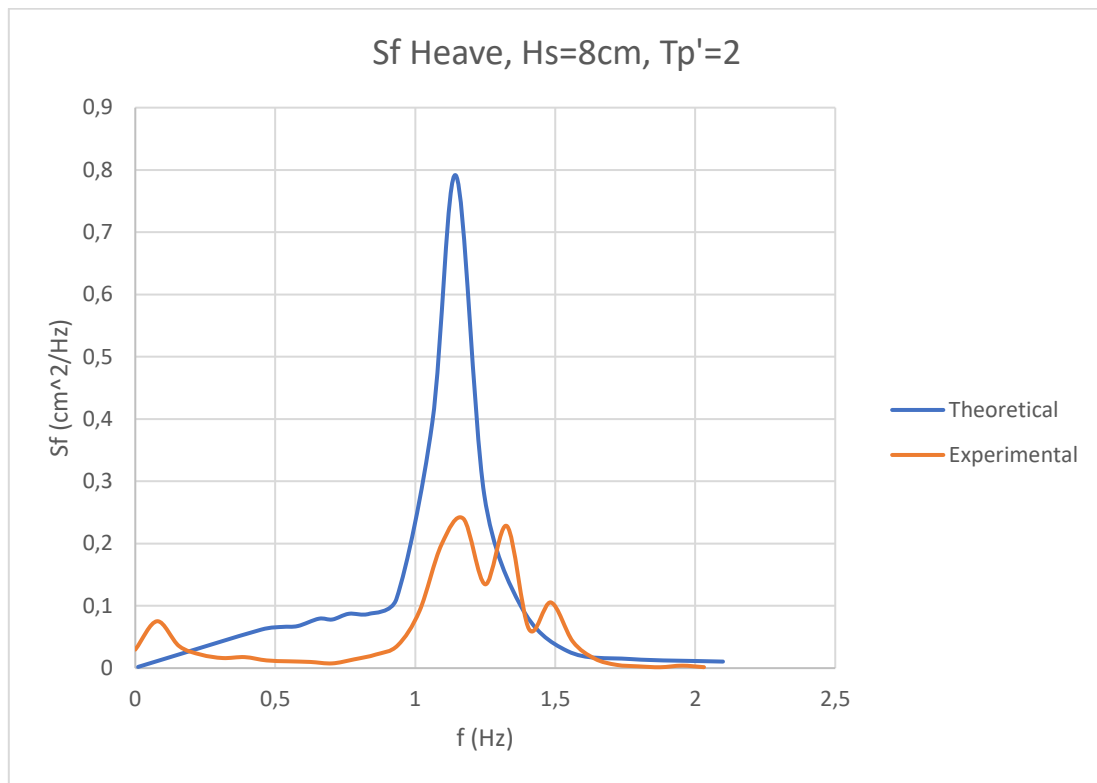


Διάγραμμα 6.49 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρόμνη

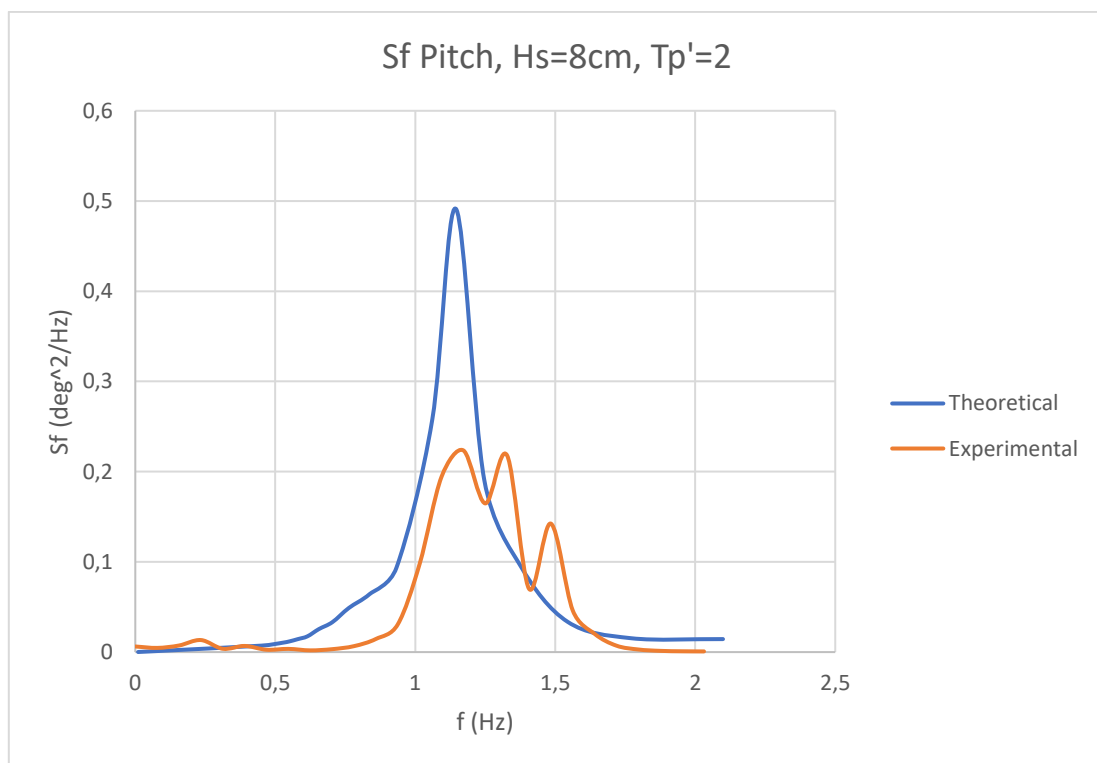
	Experimental	Theoretical	Διαφορά %
Heave	0.1111	0.1574	29.40
Pitch	0.0574	0.1143	49.76
Acc Bow	0.0241	0.0299	19.30
Acc Middle	0.0070	0.0081	13.31
Acc Stern	0.0106	0.0114	6.85

Πίνακας 6.3 Σύγκριση RMS για $H_s=7\text{ cm}$ και $T_p'=1.5$

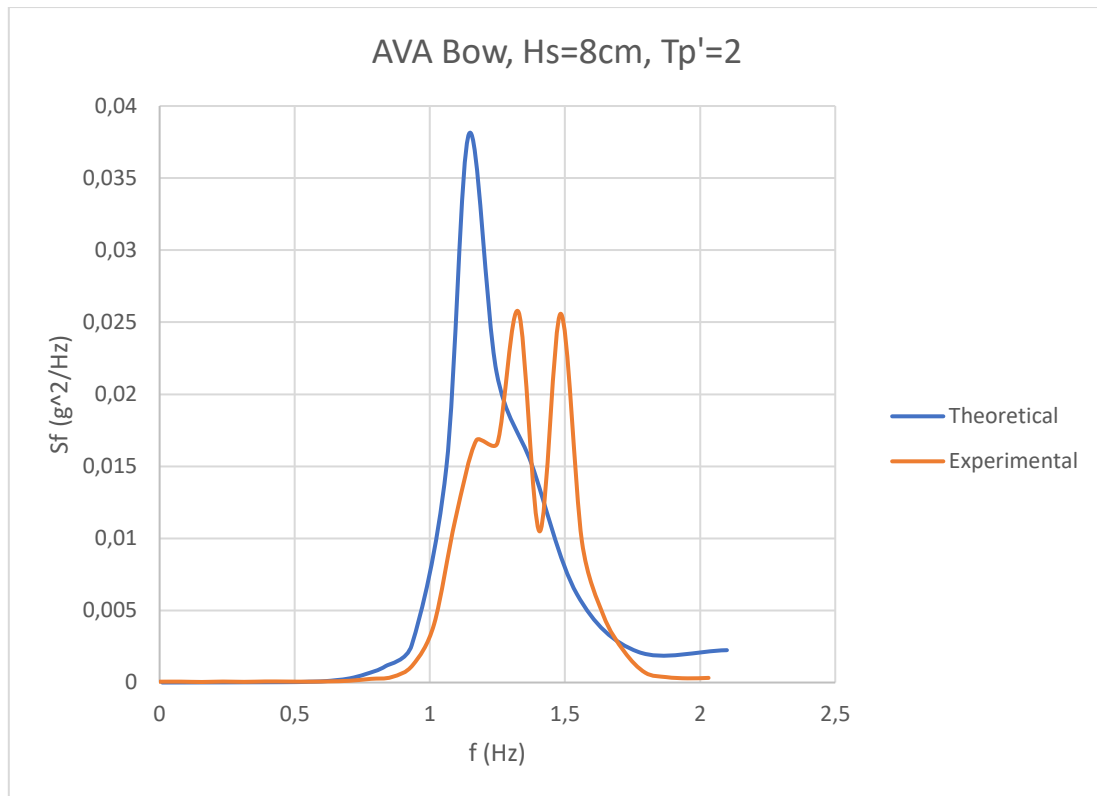
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 8$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 2.0$



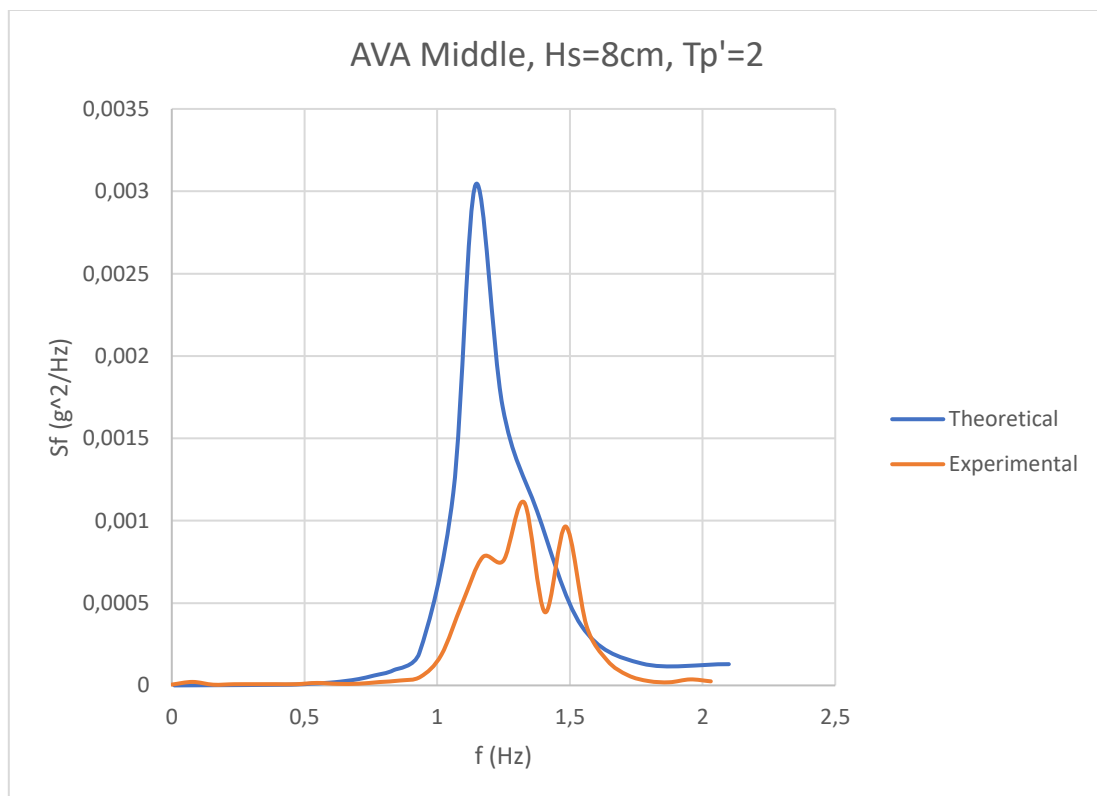
Διάγραμμα 6.50 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave



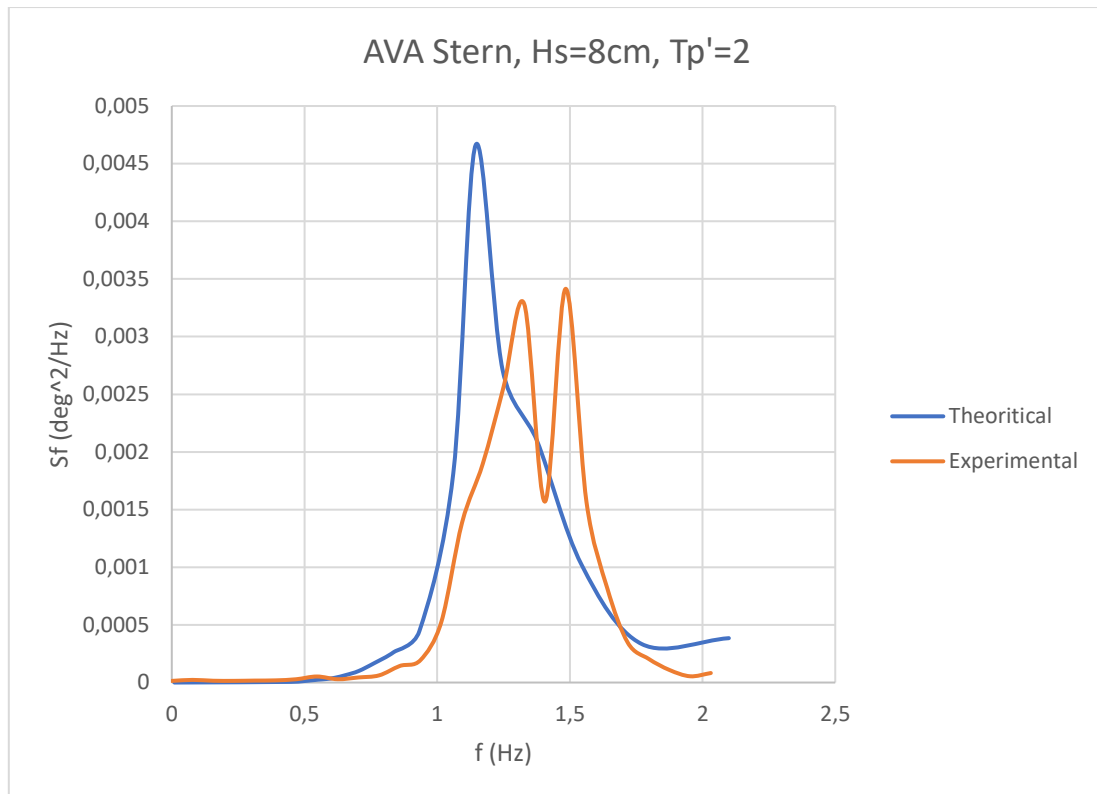
Διάγραμμα 6.51 Σύγκριση φασμάτων προνευσμού, pitch



Διάγραμμα 6.52 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Διάγραμμα 6.53 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην θέση του κέντρου βάρους

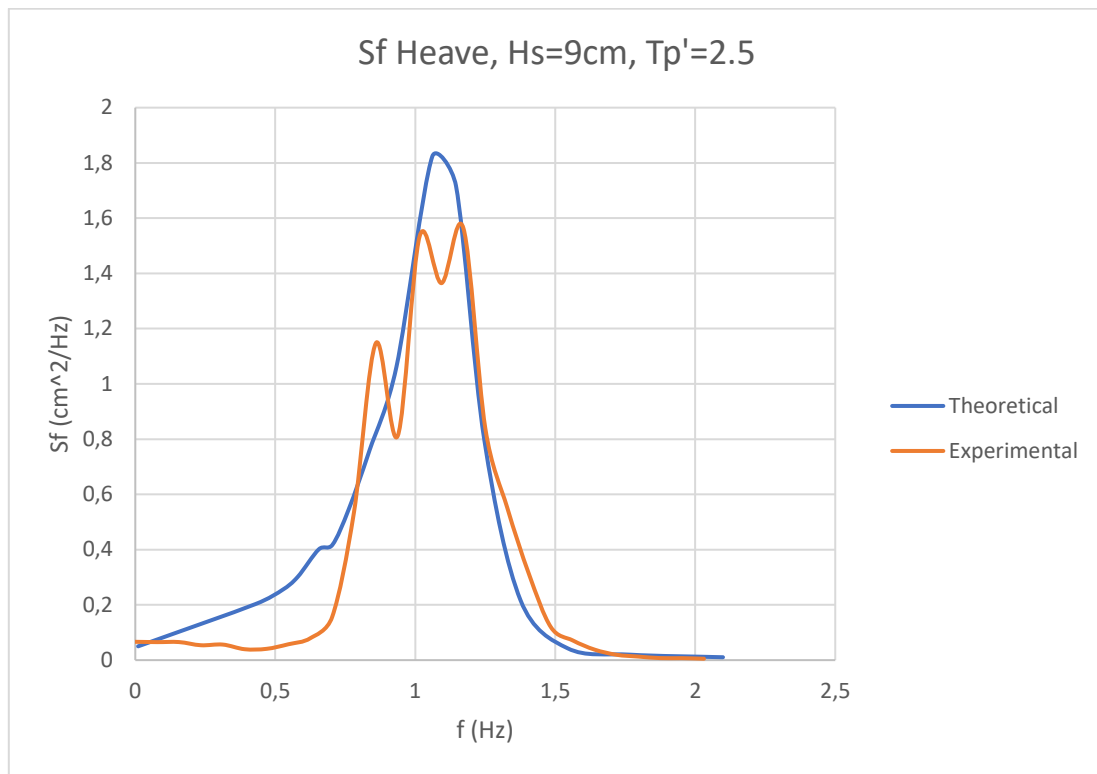


Διάγραμμα 6.54 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρόμνη

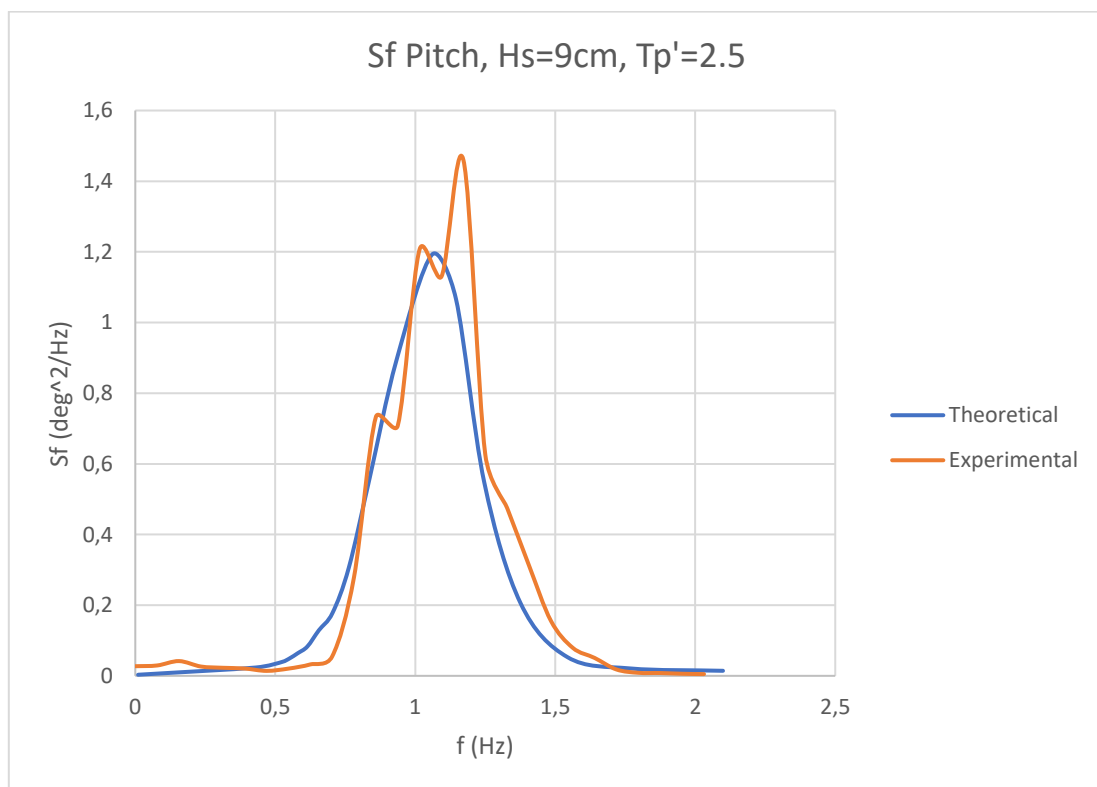
	Experimental	Theoretical	Διαφορά %
Heave	0.3365	0.4576	29.55
Pitch	0.3188	0.3823	17.25
Acc Bow	0.1042	0.1086	4.07
Acc Middle	0.0221	0.0297	25.75
Acc Stern	0.0394	0.0399	1.37

Πίνακας 6.4 Σύγκριση RMS για $H_s=8\text{ cm}$ και $T_p'=2.0$

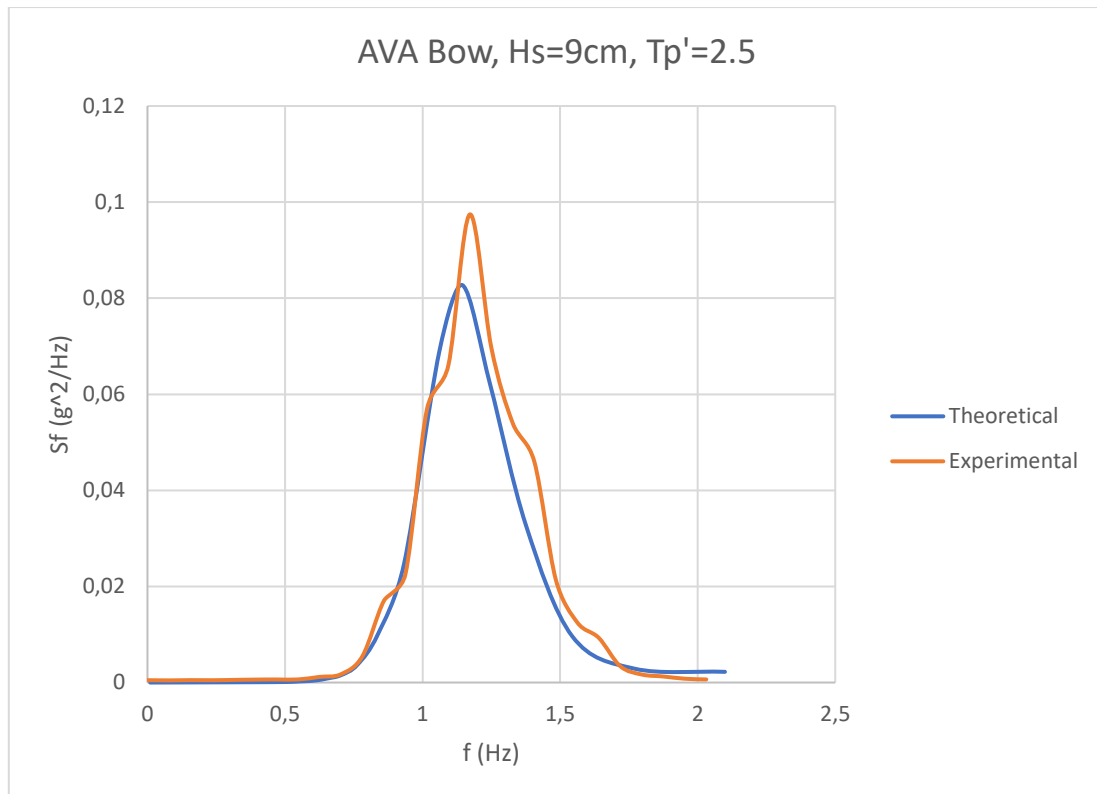
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 9$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 2.5$



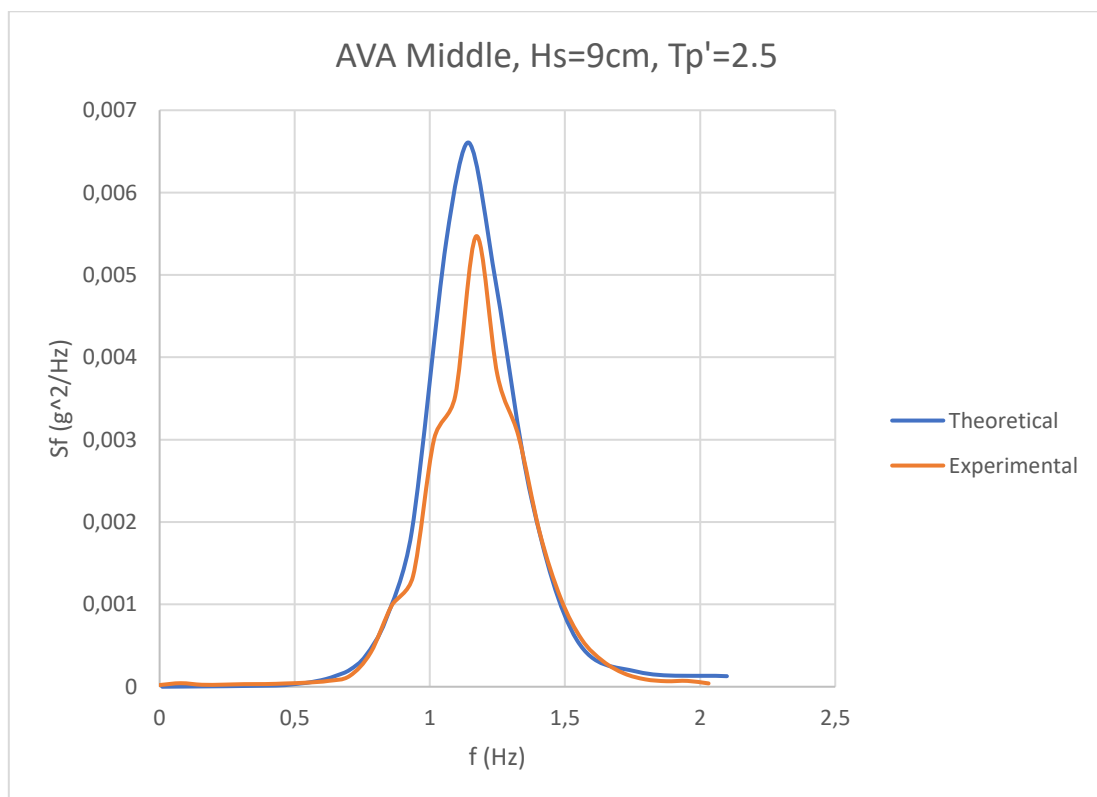
Διάγραμμα 6.55 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave



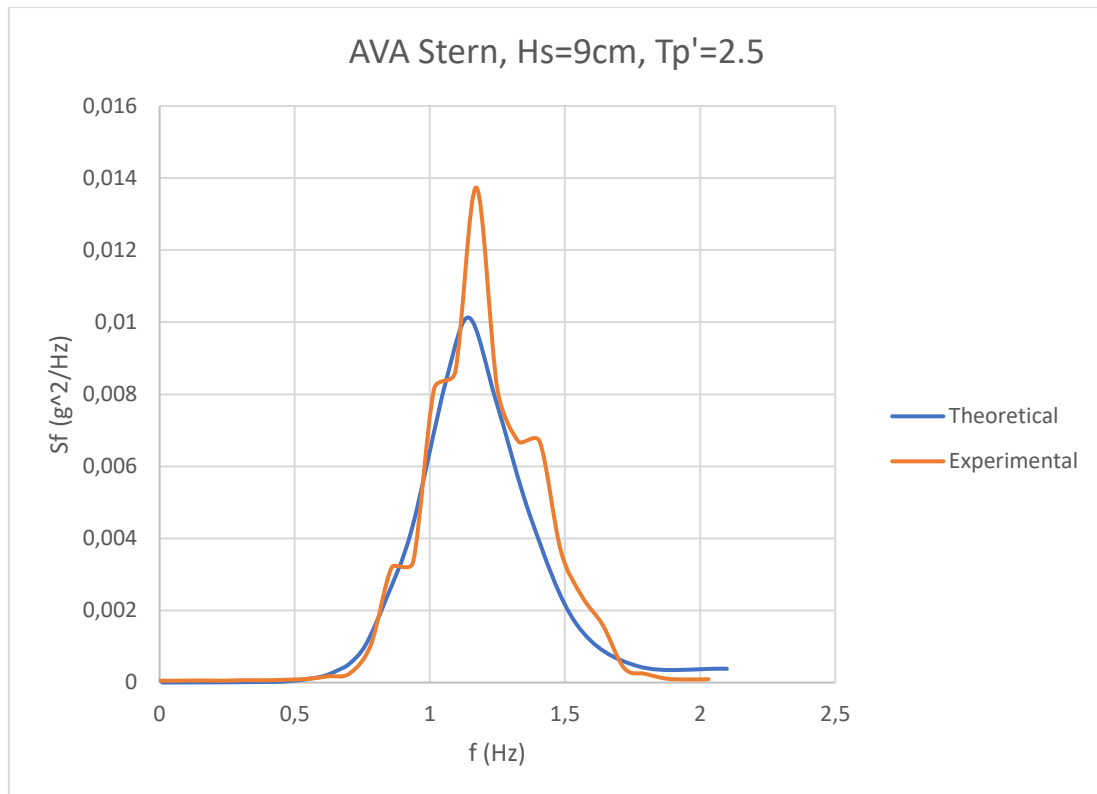
Διάγραμμα 6.56 Σύγκριση φασμάτων προνευσμού, pitch



Διάγραμμα 6.57 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Διάγραμμα 6.58 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στη θέση του κέντρου βάρους

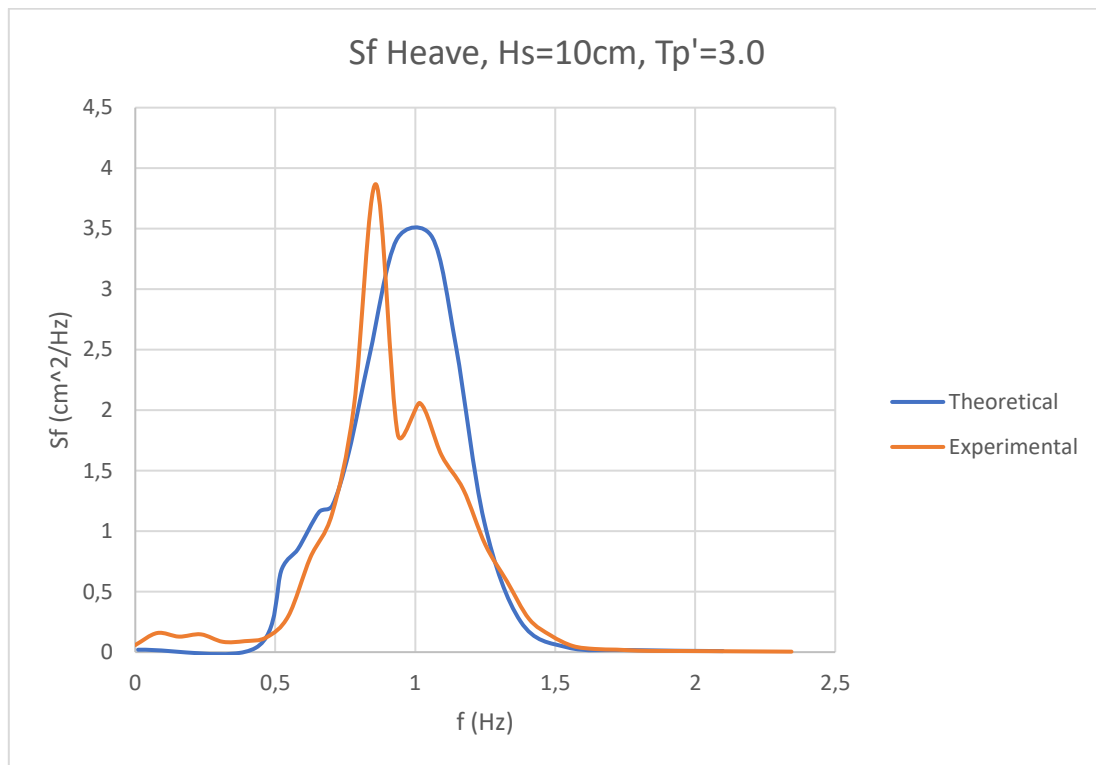


Διάγραμμα 6.59 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρόμνη

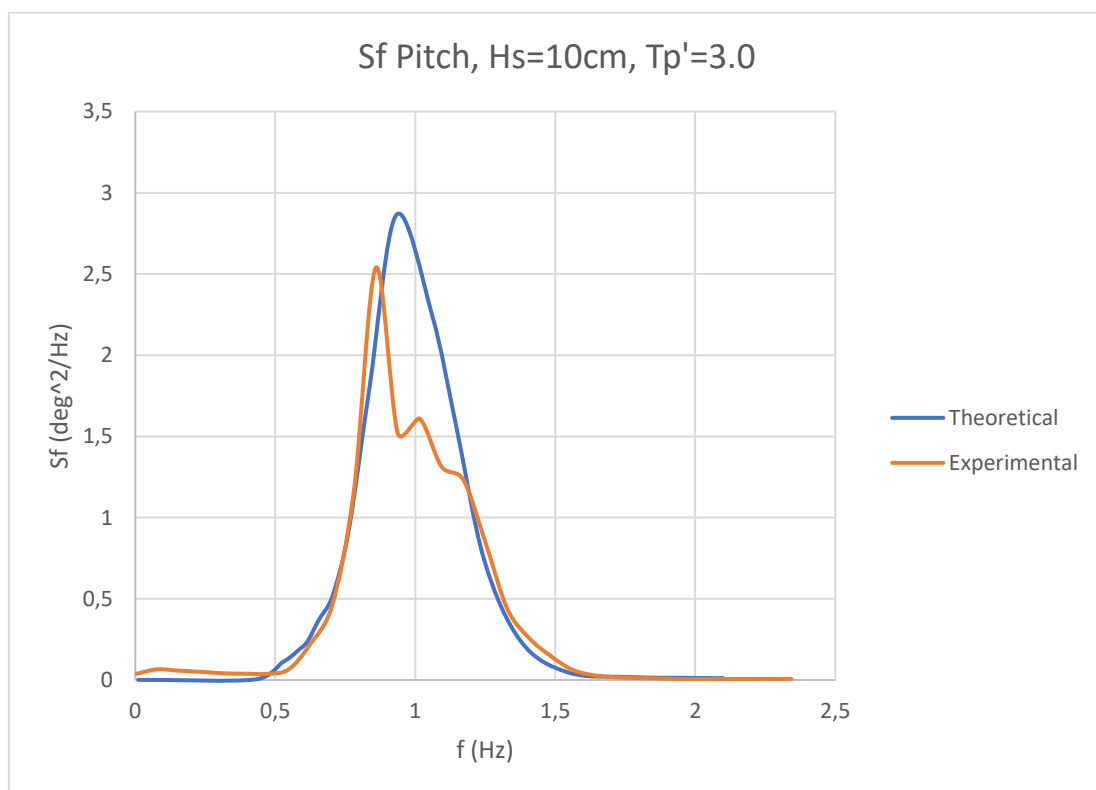
	Experimental	Theoretical	Διαφορά %
Heave	0.8693	0.8825	5.90
Pitch	0.7704	0.7268	5.58
Acc Bow	0.2025	0.1820	11.21
Acc Middle	0.0478	0.0504	5.29
Acc Stern	0.0753	0.0675	11.44

Πίνακας 6.5 Σύγκριση RMS για $H_s=9\text{ cm}$ και $T_p'=2.5$

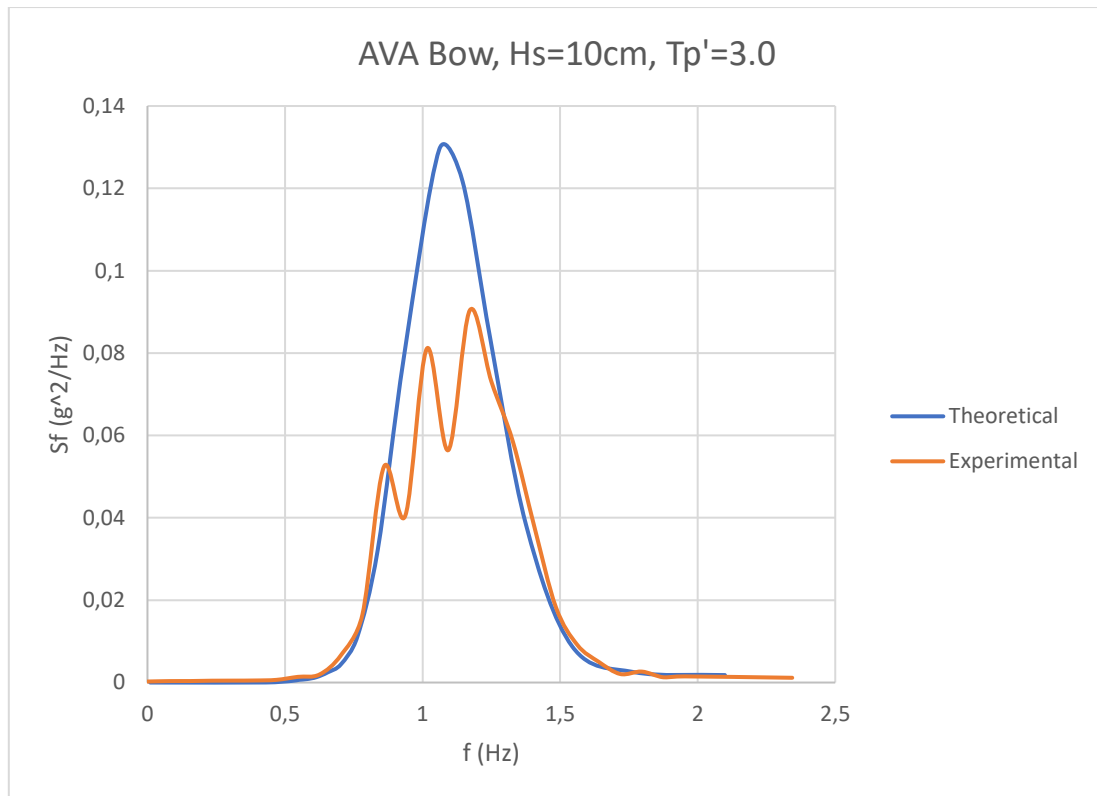
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 10$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 3.0$



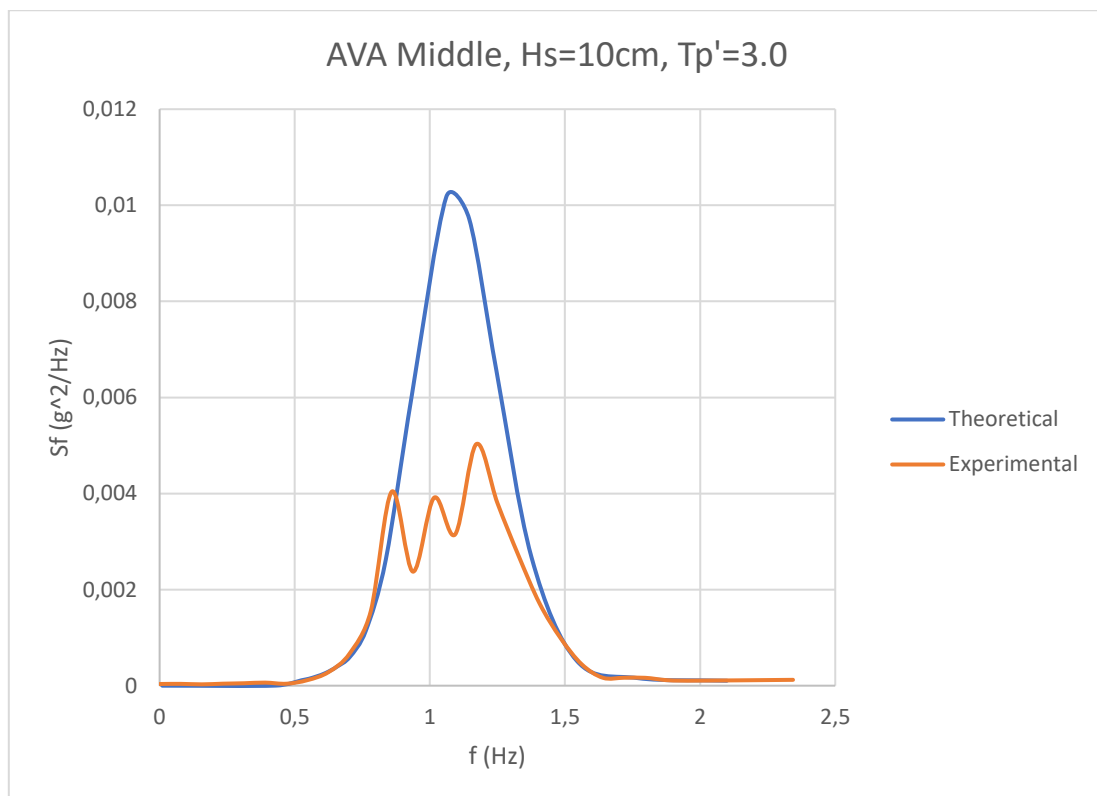
Διάγραμμα 6.60 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave



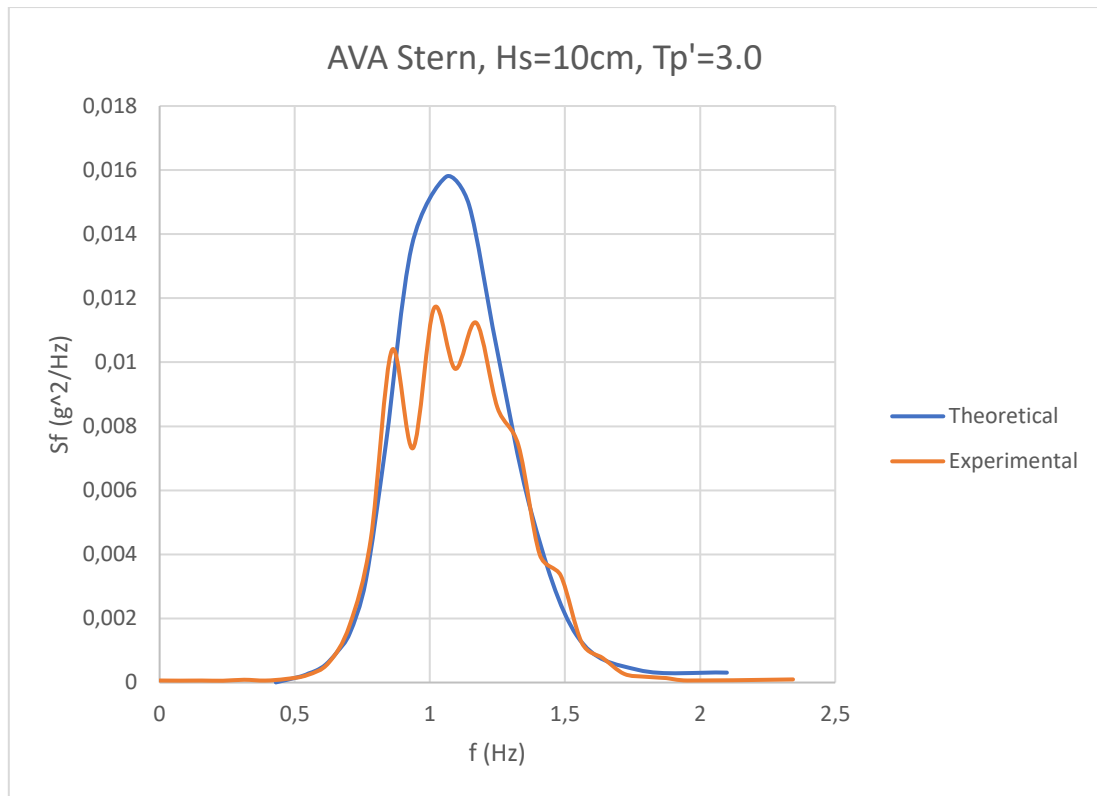
Διάγραμμα 6.61 Σύγκριση φασμάτων προνευστασμού, pitch



Διάγραμμα 6.62 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Διάγραμμα 6.63 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην θέση του κέντρου βάρους

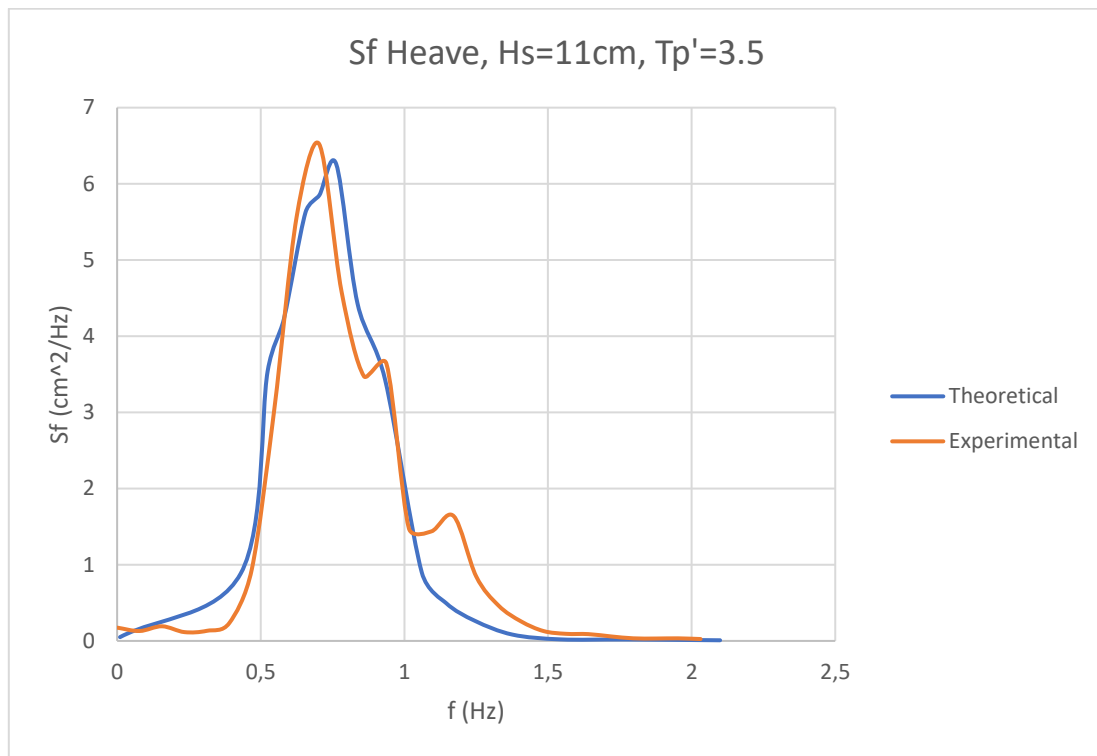


Διάγραμμα 6.64 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρόμνη

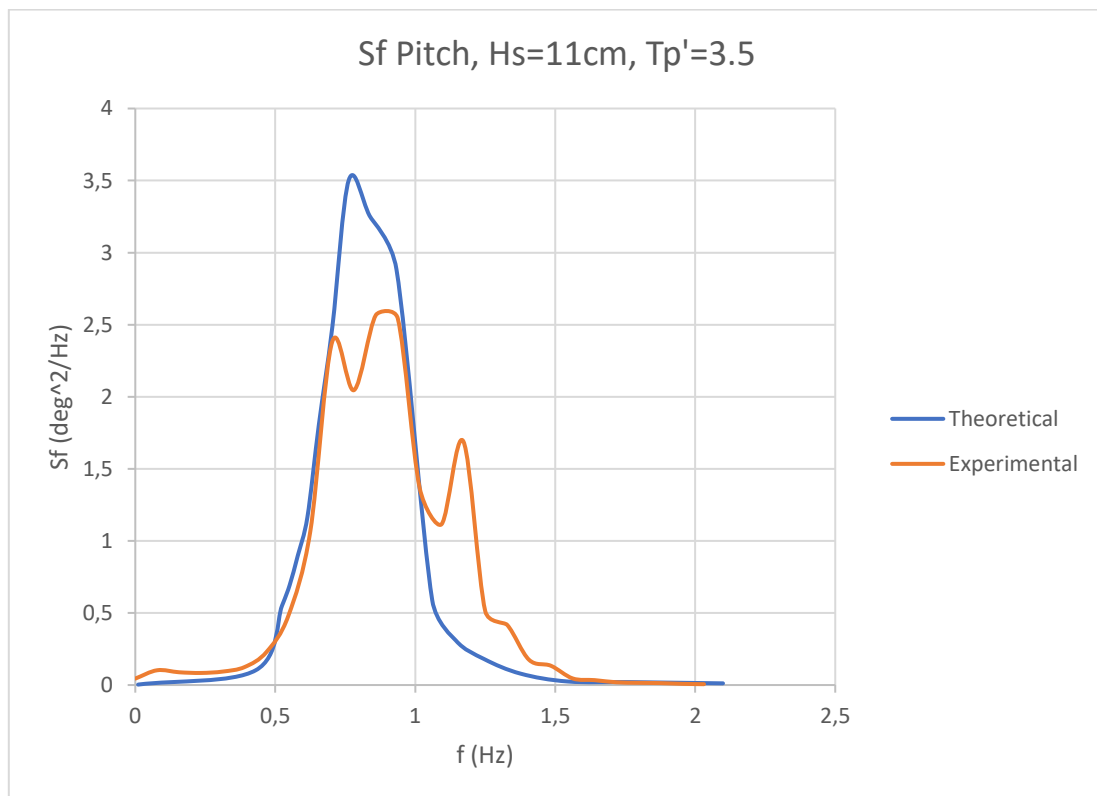
	Experimental	Theoretical	Διαφορά %
Heave	1.1802	1.2942	9.72
Pitch	0.9832	1.0588	7.40
Acc Bow	0.2149	0.2347	8.45
Acc Middle	0.0519	0.0655	20.84
Acc Stern	0.0825	0.0890	7.31

Πίνακας 6.6 Σύγκριση RMS για $H_s=10\text{ cm}$ και $T_p'=3.0$

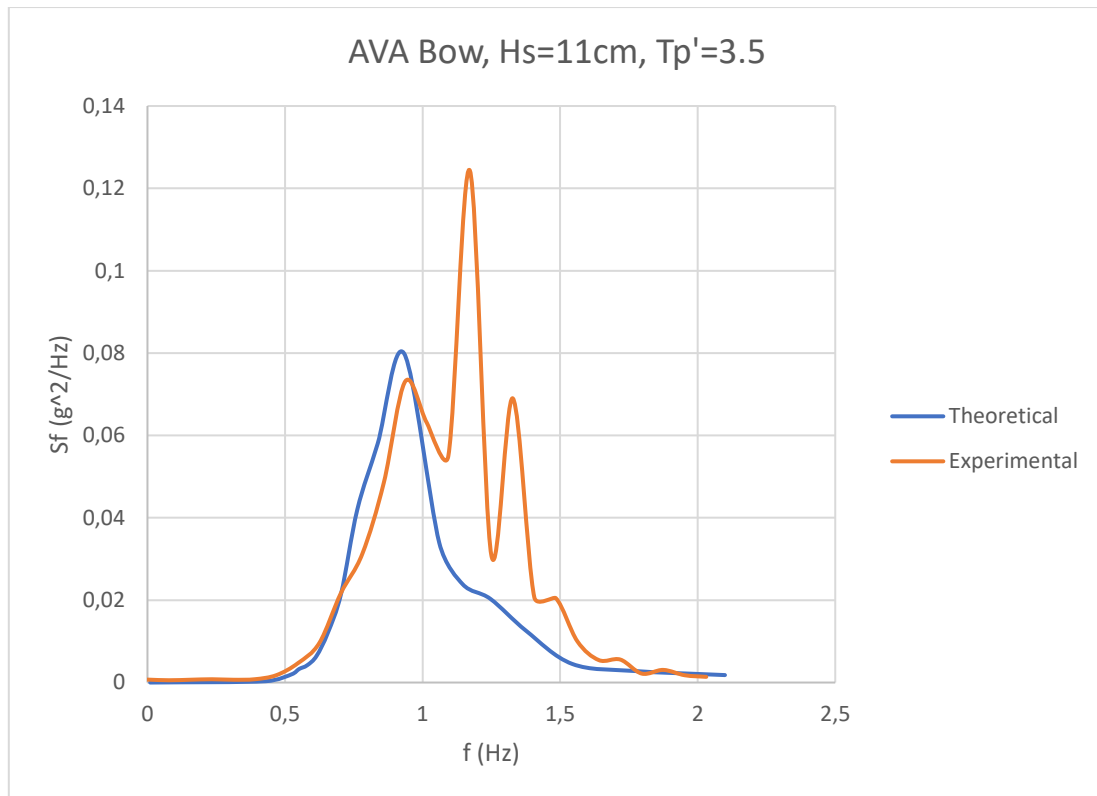
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 11$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 3.5$



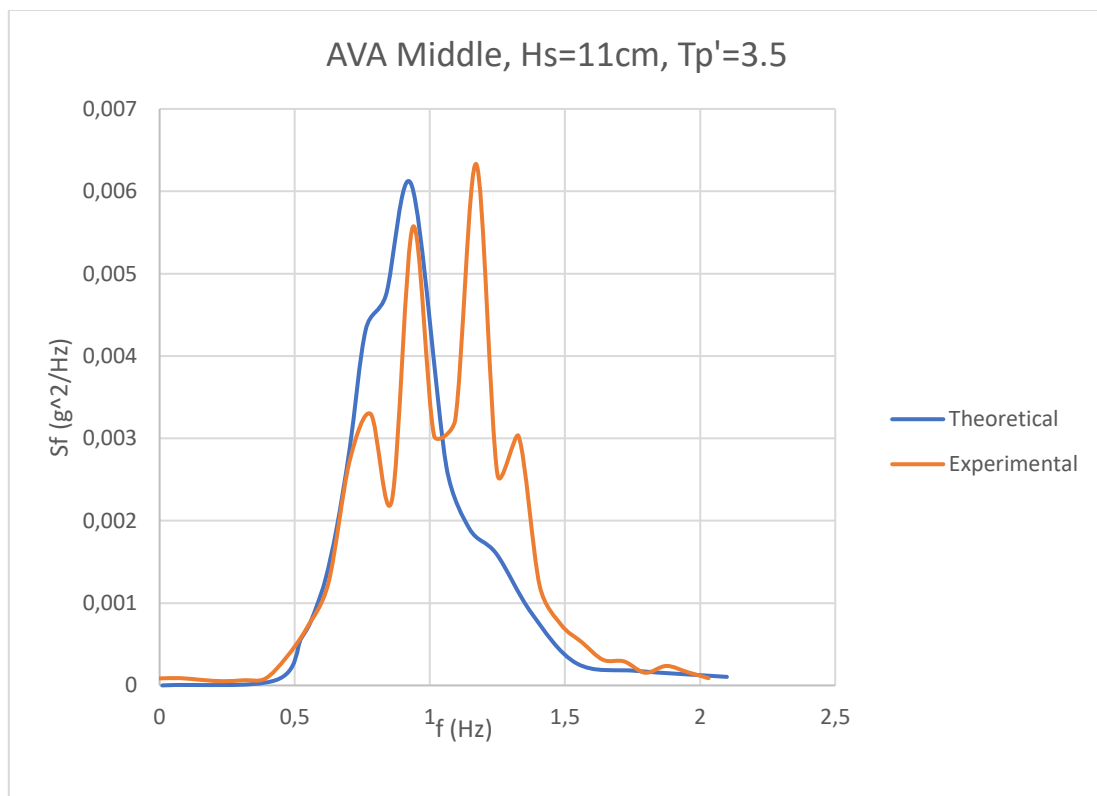
Διάγραμμα 6.65 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave



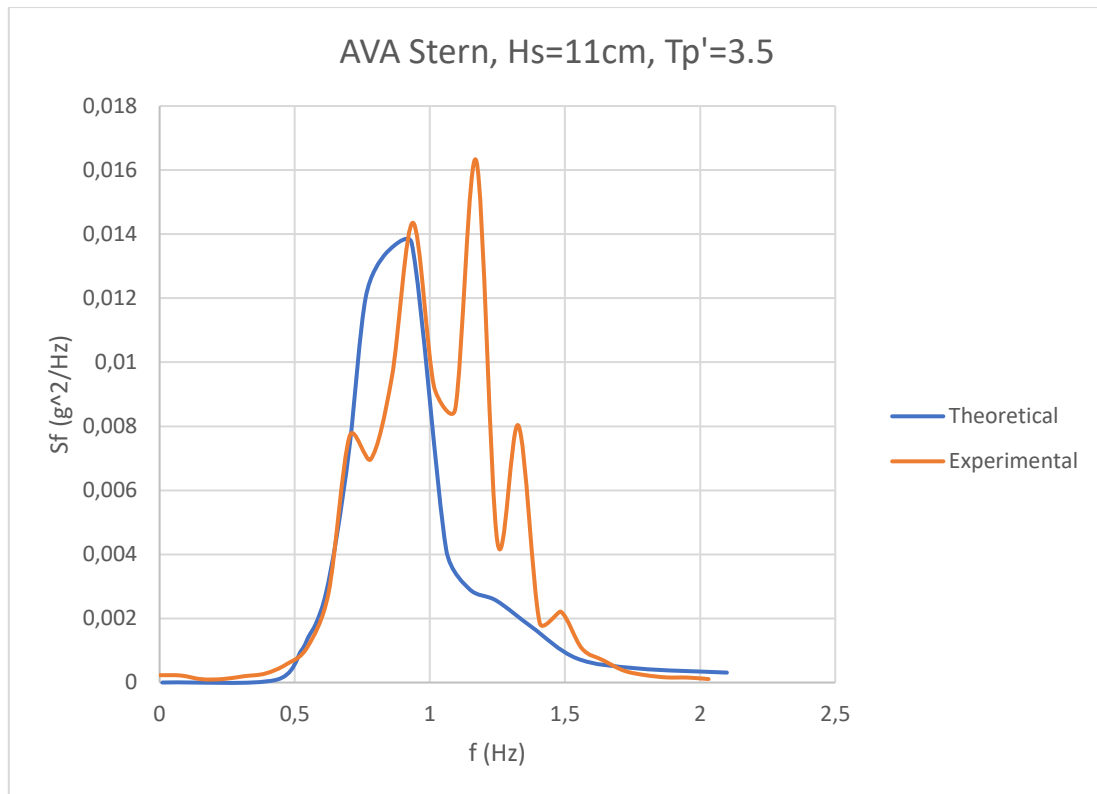
Διάγραμμα 6.66 Σύγκριση φασμάτων προνευσμού, pitch



Διάγραμμα 6.67 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Διάγραμμα 6.68 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην θέση του κέντρου βάρους

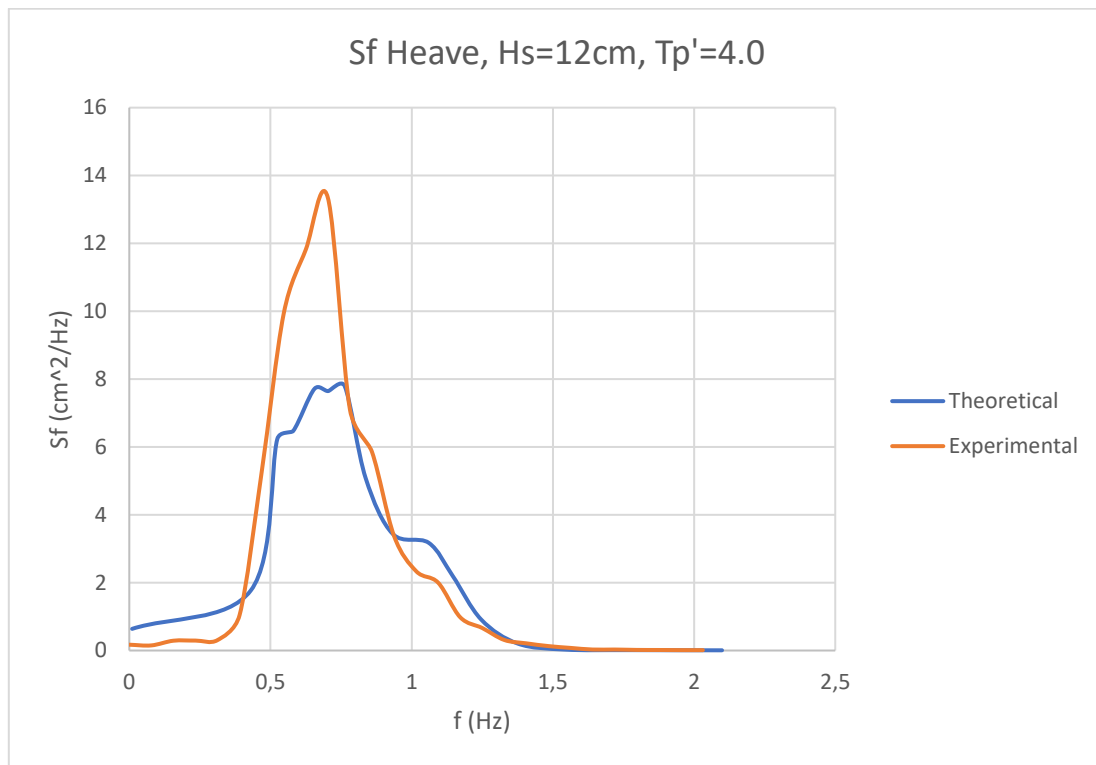


Διάγραμμα 6.69 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρόμνη

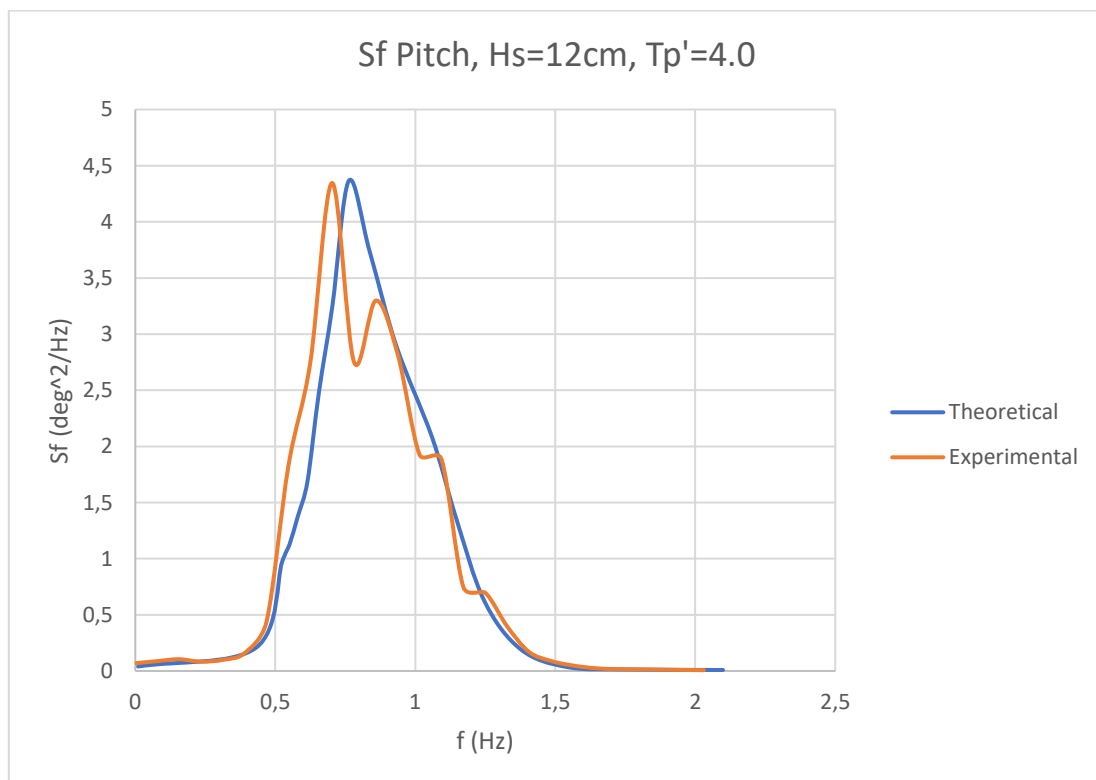
	Experimental	Theoretical	Διαφορά %
Heave	1.6681	1.5415	0.04
Pitch	1.1676	1.1321	1.07
Acc Bow	0.2228	0.1730	28.38
Acc Middle	0.0563	0.0505	10.50
Acc Stern	0.0885	0.0757	16.16

Πίνακας 6.7 Σύγκριση RMS για $H_s=11\text{ cm}$ και $T_p'=3.5$

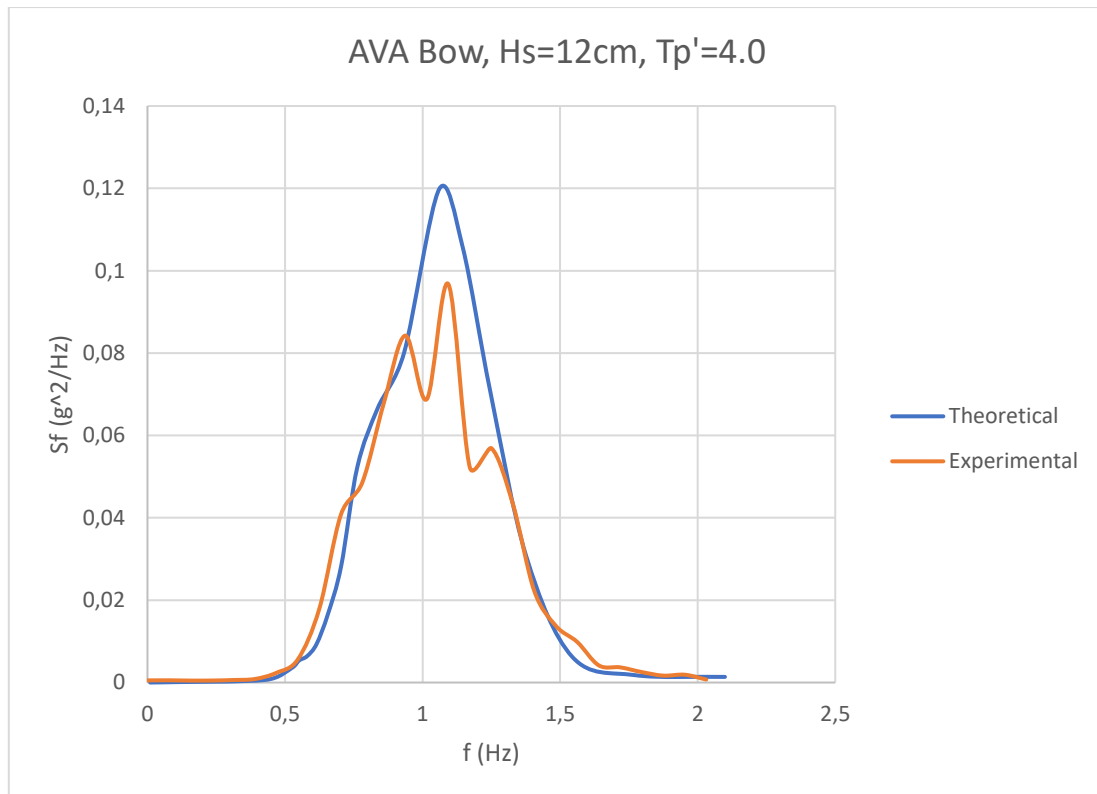
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 12$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 4.0$



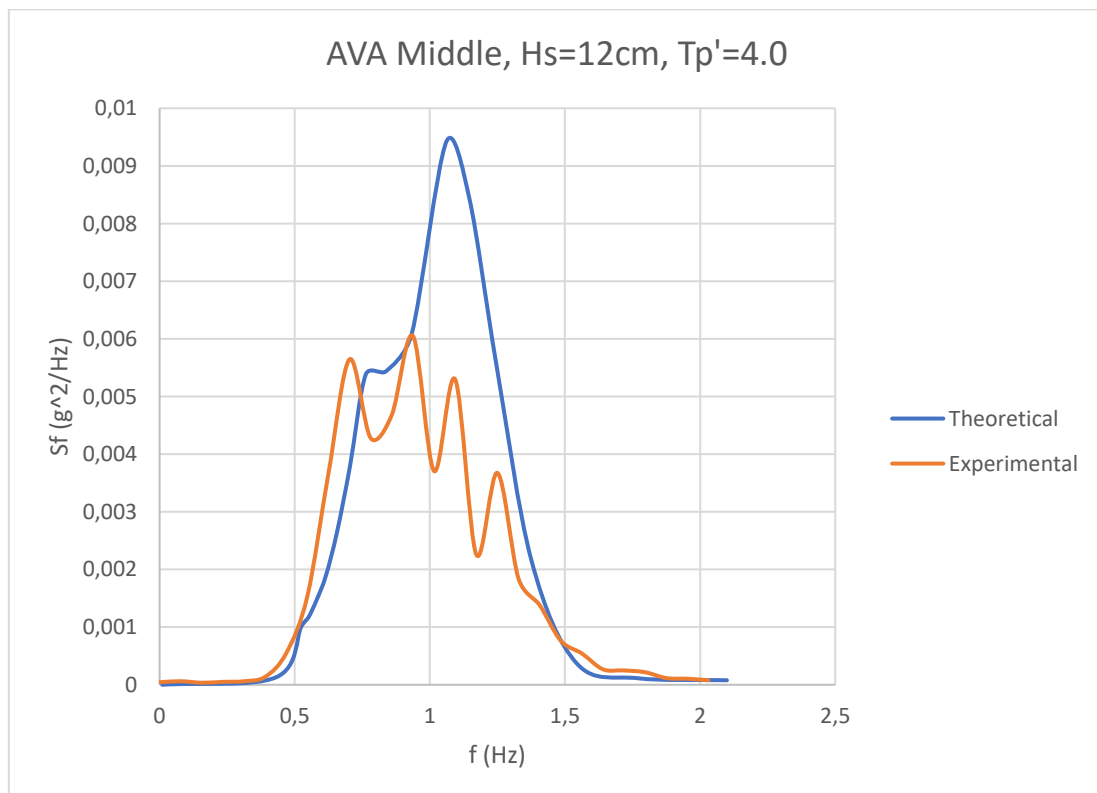
Διάγραμμα 6.70 Σύγκριση φασμάτων κατακόρυφης κίνησης, heave



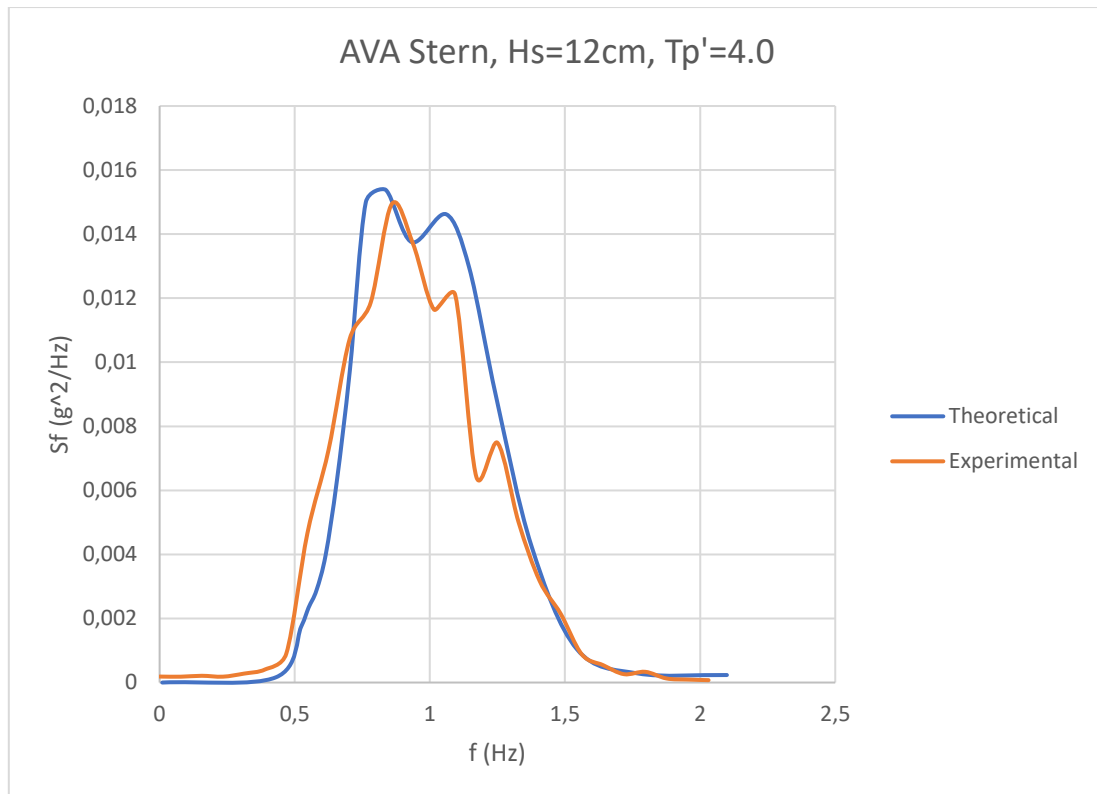
Διάγραμμα 6.71 Σύγκριση φασμάτων προνευσμού, pitch



Διάγραμμα 6.72 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Διάγραμμα 6.73 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης, στην θέση του κέντρου βάρους

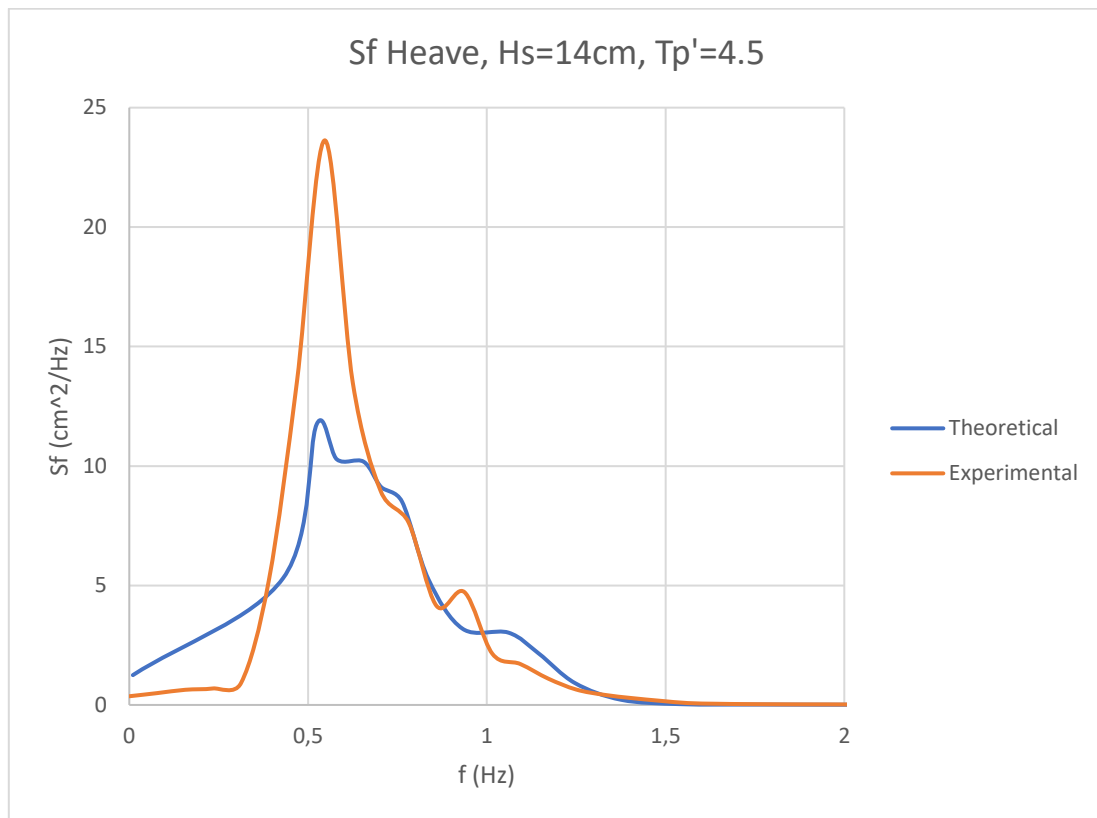


Διάγραμμα 6.74 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρόμνη

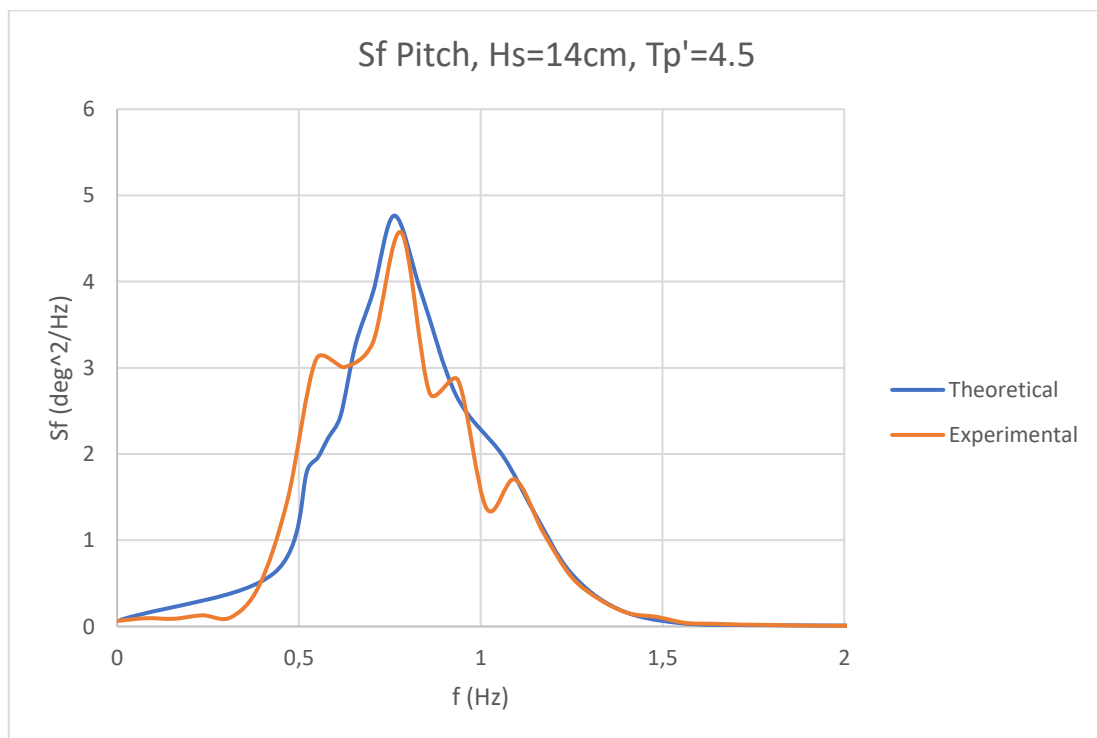
	Experimental	Theoretical	Διαφορά %
Heave	2.2678	1.8610	8.80
Pitch	1.3964	1.3522	0.39
Acc Bow	0.2296	0.2403	4.74
Acc Middle	0.0622	0.0694	11.05
Acc Stern	0.0962	0.0981	2.54

Πίνακας 6.8 Σύγκριση RMS για $H_s=12\text{ cm}$ και $T_p'=4.0$

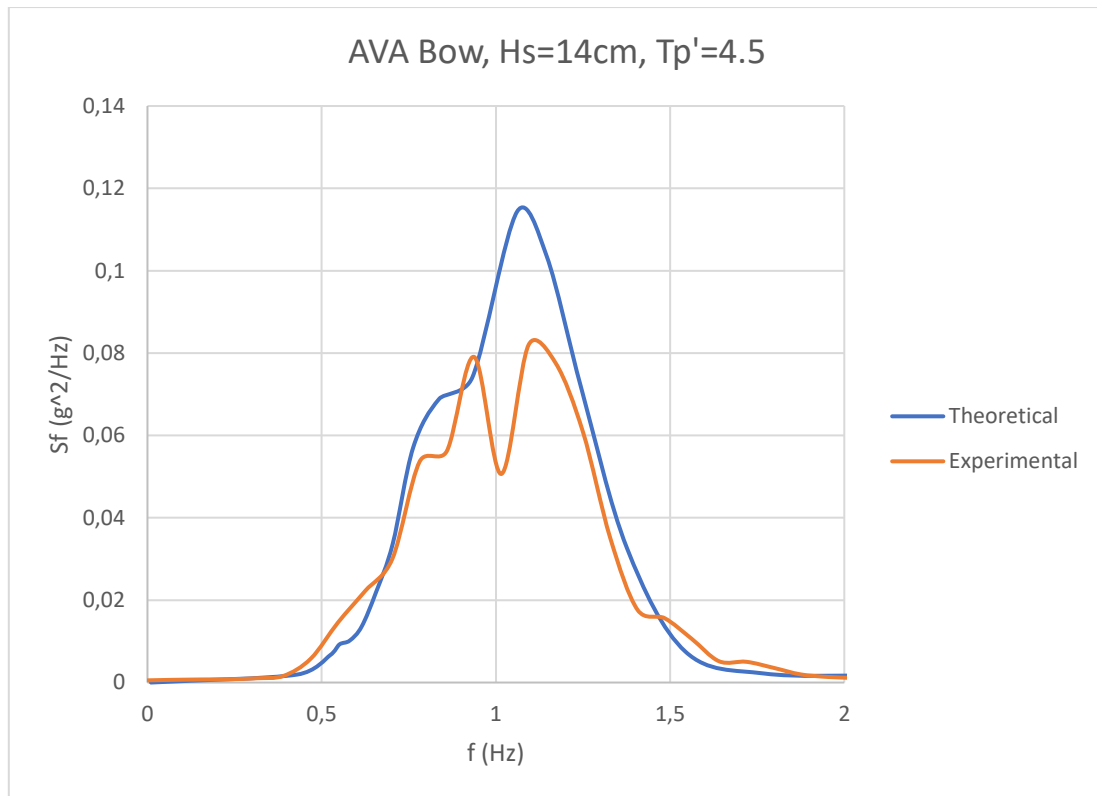
Σημαντικό ύψος κύματος $H_s = 14$ cm, Αδιάστατη περίοδος κορυφής $T_p' = 4.5$



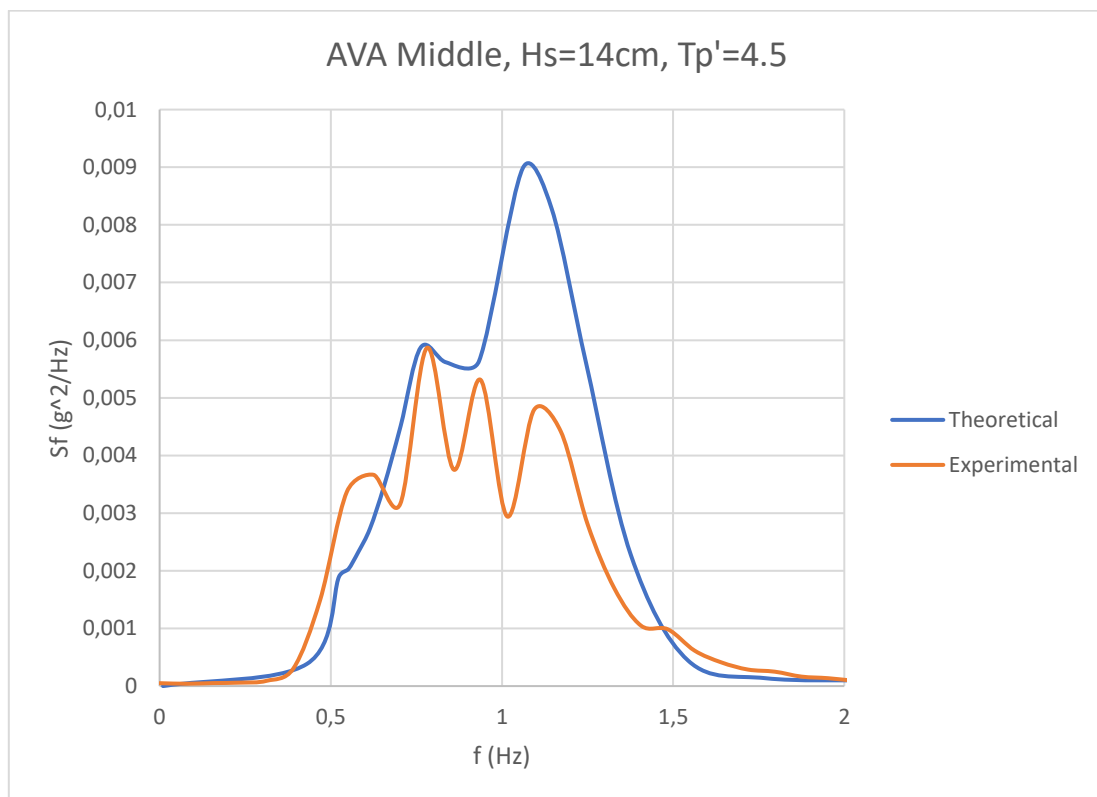
Διάγραμμα 6.75 Σύγκριση φασμάτων της κατακόρυφης κίνησης, heave



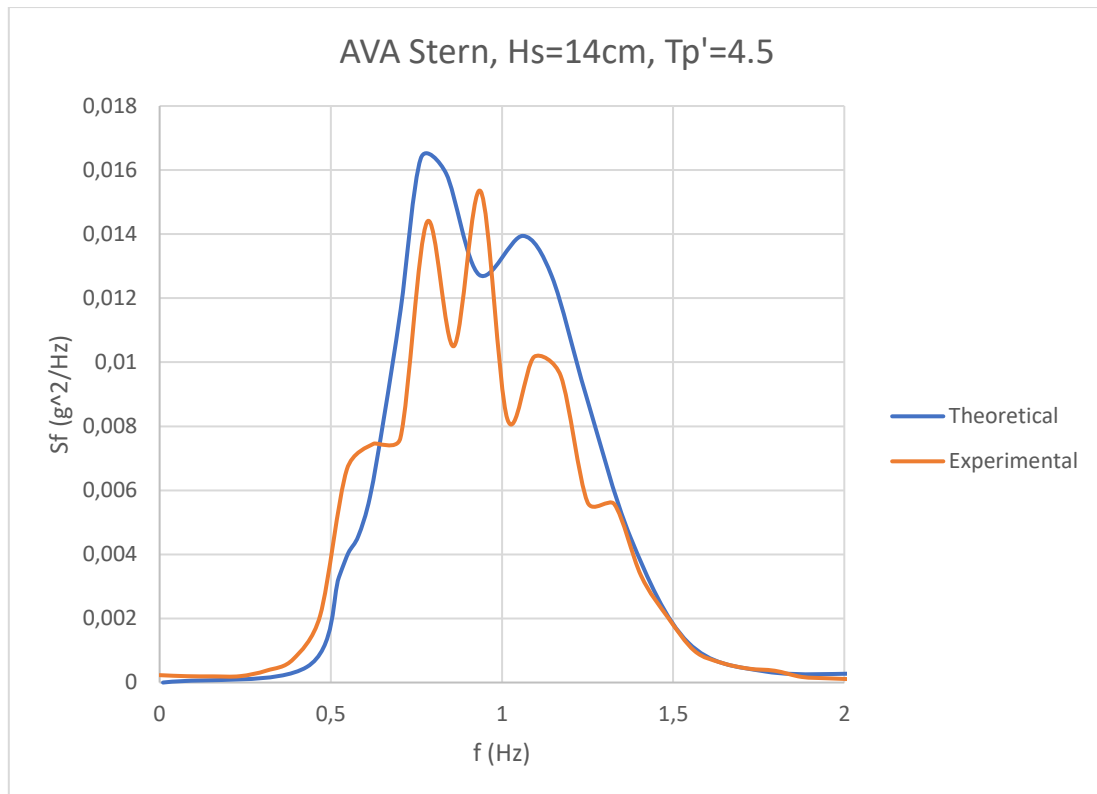
Διάγραμμα 6.76 Σύγκριση φασμάτων του προνευτασμού, pitch



Διάγραμμα 6.77 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη



Διάγραμμα 6.78 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην θέση του κέντρου βάρους



Διάγραμμα 6.79 Σύγκριση φασμάτων απόλυτης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πρόμνη

	Experimental	Theoretical	Διαφορά %
Heave	2.6705	2.02304	6.65
Pitch	1.4661	1.411332	2.30
Acc Bow	0.2277	0.241626	6.41
Acc Middle	0.0627	0.070408	12.59
Acc Stern	0.0952	0.100087	6.18

Πίνακας 6.9 Σύγκριση RMS για $H_s=14\text{ cm}$ και $T_p'=4.5$

6.9 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

- Σε όλες τις περιπτώσεις, η καμπύλη των φασμάτων μέσω RAO έχει την ίδια μορφή με την καμπύλη των πειραματικών τιμών.

- Με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων φαίνεται η ύπαρξη αποκλίσεων μεταξύ των αποτελεσμάτων από τυχαίους κυματισμούς και αποτελεσμάτων μέσω των RAO από ημιτονικούς κυματισμούς. Αυτό είναι λογικό διότι η θεωρία γραμμικής υπέρθεσης έχει ως προϋπόθεση μικρά ύψη κύματος και γραμμική συμπεριφορά των αποκρίσεων του πλοίου. Φυσικά, αν δεν υπήρχε διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων σε ημιτονικούς και τυχαίους κυματισμούς, η μελέτη των σκαφών θα γινόταν μόνο μέσω των RAO των αρμονικών κυμάτων.

- Όπως φαίνεται από τη σύγκριση των RMS τιμών των μελετούμενων μεγεθών, στις καταστάσεις θάλασσας με μικρό σημαντικό ύψος κύματος και σχετικά μεγάλη συχνότητα, η διαφορά είναι πολύ μεγάλη μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων μέσω των RAO αρμονικών κυματισμών. Αυτό δεν είναι κάτι που μας προβληματίζει γιατί στις υψηλές συχνότητες η μη γραμμική συμπεριφορά του πλοίου είναι εντονότερη, ενώ επιπλέον, το ενεργειακό περιεχόμενο των τυχαίων κυματισμών στις υψηλότερες συχνότητες είναι περιορισμένο και επισφαλές.

Βιβλιογραφικές αναφορές

1. Μουτζούρης, Κ.Ι. Θαλάσσια Υδραυλική. Αθήνα, 2009.
2. Γ. Σ. Τριανταφύλλου, Θεωρία θαλάσσιων κυματισμών, Αθήνα 2018
3. Michael Brorsen. Non-linear Waves. s.l.: Aalborg University, 2007.
4. Θ.Α. Λουκάκης, Γ.Ι. Γρηγορόπουλος, “Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1996
5. Γ.Ι. Γρηγορόπουλος, “Δυναμική Συμπεριφορά πλοίων σε κυματισμούς”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2004.
6. J.M. Lloyd, “Seakeeping: Ship behaviour in rough weather”, Ellis Horwood Limited 1989.
7. Gregory Grigoropoulos, Dimitra Damala, Theodore Loukakis, “Dynamic Performance of the NTUA Double – Chine Series Hull Forms in Regular Waves”, Annapolis, Maryland March 2010.
8. Γ.Ι. Γρηγορόπουλος, Δήμητρα Δαμάλα, “Dynamic Performance of the NTUA Double – Chine Series Hull Forms in Random Waves”, Honolulu, Hawaii, USA September 2011.
9. American Institute of Marine Underwriters Technical Services Committee. High Speed Craft.
<http://www.aimuedu.org/aimupapers/hsc.pdf>
(τελευταία επίσκεψη 14/04/2019)
10. Daniel Savitsky, “ON THE SUBJECT OF HIGH-SPEED MONOHULLS”, Presented to the Greek Section of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Athens, Greece, October, 2003
11. Bluebird Marine Systems
http://www.bluebird-electric.net/bluebird_history/Turbinia_Steam_Turbine_Boat.htm
(τελευταία επίσκεψη 14/04/2019)
12. Γ.Α. Αθανασούλης, Κ.Α. Μπελιμπασάκης, “Δυναμική Πλοίου”, Αθήνα 2012
13. Papanikolaou, A.,D., Types of Small Craft, 25th WEGEMT Graduate School on Small Craft Technology, Athens 1997.
14. Βασίλειος Τέφας, “Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς σε κυματισμούς ταχύπλοων σκαφών με διπλή ακμή” - Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2009.

-
15. Γεώργιος Ρούσος, “Πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοων σκαφών διπλής ακμής σε κυματισμούς” - Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2007.
 16. Τσιορτός Κωνσταντίνος, “Πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοων σκαφών διπλής ακμής σε τυχαίους κυματισμούς ” - Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2017.
 17. Περδικάρη Κ. Θεανώ, “Αναλυτική και πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοου σκάφους σε κυματισμούς” - Διπλωματική Εργασία, Αθήνα 2006.

Μέρος Β

Παραρτήματα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Στο παράρτημα αυτό, παρουσιάζονται ενδεικτικά τα πειραματικά αποτελέσματα του μοντέλου 163/01 σε κυματισμό με σημαντικό ύψος κύματος $H_s=11\text{cm}$ και αδιάστατη περίοδο κύματος $T_p'=3.5$.

A/A	ΑΡΧΕΙΟ	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ	
1	DY_1.dat	WAVE TANK	$y=3.7716x+0.2702$
2	DY_2.dat	WAVE CARRIAGE	$y=-9.8738s+47.16$
3	DY_3.dat	HEAVE	$y=-4.5522x+26.027$
4	DY_4.dat	PITCH	$y=-2.286x-0.2005$
5	DY_5.dat	ACC BOW	$y=2.01203x-5.02766$
6	DY_6.dat	ACC MIDDLE	$y=2.00774x-4.98844$
7	DY_7.dat	ACC STERN	$y=2.00797x-5.02393$
8	DY_8.dat	RESISTANCE	$y=2.7358x-0.44$
9	DY_9.dat		
10	DY_10.dat		
11	DY_11.dat		
12	DY_12.dat		
13	DY_13.dat		
14	DY_14.dat		

Πίνακας Π Ι. 1 Βαθμονομήσεις και αρχεία για $H_s=11\text{ cm}$ και $T_p'=3.5$

f	Wave tank	Heave	Pitch	Acc. Bow	Acc. Middle	Acc. Stern
Hz	cm^2/Hz	cm^2/Hz	deg^2/Hz	g^2/Hz	g^2/Hz	g^2/Hz
0.00E+00	1.68E-01	5.88E-02	3.71E-02	2.43E-04	3.51E-05	6.34E-05
7.81E-02	2.43E-01	1.58E-01	6.60E-02	3.46E-04	3.81E-05	5.90E-05
1.56E-01	1.72E-01	1.28E-01	5.76E-02	3.63E-04	2.82E-05	6.25E-05
2.34E-01	2.06E-01	1.47E-01	5.06E-02	4.43E-04	4.17E-05	5.64E-05
3.13E-01	4.94E-01	8.53E-02	4.18E-02	4.62E-04	5.09E-05	8.60E-05
3.91E-01	2.39E+00	9.06E-02	3.91E-02	4.94E-04	6.43E-05	6.10E-05
4.69E-01	4.76E+00	1.22E-01	3.84E-02	6.45E-04	4.10E-05	1.13E-04
5.47E-01	1.92E+01	2.99E-01	6.47E-02	1.38E-03	1.15E-04	2.34E-04
6.25E-01	1.55E+01	7.81E-01	2.21E-01	1.94E-03	2.83E-04	6.11E-04
7.03E-01	1.32E+01	1.14E+00	4.59E-01	6.62E-03	6.69E-04	1.79E-03
7.81E-01	8.71E+00	2.04E+00	1.17E+00	1.64E-02	1.55E-03	4.47E-03
8.59E-01	5.06E+00	3.87E+00	2.54E+00	5.24E-02	4.04E-03	1.04E-02
9.38E-01	4.17E+00	1.80E+00	1.52E+00	4.06E-02	2.37E-03	7.32E-03

1.02E+00	2.64E+00	2.06E+00	1.61E+00	8.11E-02	3.91E-03	1.17E-02
1.09E+00	2.20E+00	1.63E+00	1.31E+00	5.64E-02	3.15E-03	9.79E-03
1.17E+00	1.20E+00	1.34E+00	1.23E+00	9.04E-02	5.03E-03	1.12E-02
1.25E+00	9.75E-01	8.89E-01	8.51E-01	7.31E-02	3.80E-03	8.58E-03
1.33E+00	8.54E-01	5.83E-01	4.41E-01	5.85E-02	2.71E-03	7.40E-03
1.41E+00	7.78E-01	2.75E-01	2.59E-01	3.79E-02	1.71E-03	4.00E-03
1.48E+00	4.42E-01	1.37E-01	1.47E-01	1.83E-02	9.85E-04	3.34E-03
1.56E+00	5.58E-01	5.08E-02	6.24E-02	9.13E-03	4.42E-04	1.24E-03
1.64E+00	3.85E-01	2.60E-02	2.87E-02	5.00E-03	1.64E-04	7.59E-04
1.72E+00	1.15E-01	2.08E-02	1.65E-02	2.07E-03	1.66E-04	2.72E-04
1.80E+00	7.68E-02	1.22E-02	1.19E-02	2.65E-03	1.64E-04	1.81E-04
1.88E+00	5.77E-02	9.79E-03	1.00E-02	1.28E-03	1.16E-04	1.39E-04
1.95E+00	5.17E-02	9.45E-03	6.33E-03	1.49E-03	1.04E-04	6.30E-05
2.03E+00	4.72E-02	6.67E-03	7.37E-03	1.15E-03	1.22E-04	9.68E-05
2.11E+00	3.87E-02	6.50E-03	5.19E-03	1.01E-03	9.65E-05	1.23E-04
2.19E+00	3.99E-02	4.93E-03	4.76E-03	9.17E-04	9.49E-05	1.22E-04
2.27E+00	2.91E-02	5.05E-03	4.15E-03	8.27E-04	8.82E-05	7.55E-05
2.34E+00	3.34E-02	4.01E-03	3.77E-03	1.50E-03	1.20E-04	1.54E-04
2.42E+00	3.86E-02	4.04E-03	4.71E-03	2.07E-03	1.60E-04	1.46E-04
2.50E+00	2.21E-02	5.06E-03	3.89E-03	2.22E-03	2.10E-04	1.53E-04
2.58E+00	1.71E-02	4.20E-03	3.70E-03	2.02E-03	2.10E-04	1.46E-04
2.66E+00	1.00E-02	4.21E-03	3.50E-03	2.03E-03	1.73E-04	1.62E-04
2.73E+00	1.14E-02	3.64E-03	3.17E-03	2.28E-03	2.00E-04	1.47E-04
2.81E+00	1.28E-02	3.13E-03	1.98E-03	1.45E-03	1.48E-04	1.35E-04
2.89E+00	8.69E-03	3.64E-03	2.59E-03	1.74E-03	1.46E-04	1.53E-04
2.97E+00	8.07E-03	2.16E-03	2.19E-03	1.22E-03	9.78E-05	1.43E-04
3.05E+00	9.42E-03	2.08E-03	1.99E-03	1.55E-03	1.20E-04	1.52E-04
3.13E+00	9.66E-03	1.75E-03	1.73E-03	9.43E-04	7.00E-05	1.32E-04
3.20E+00	8.02E-03	1.45E-03	1.76E-03	9.35E-04	6.36E-05	1.09E-04
3.28E+00	8.28E-03	1.41E-03	1.41E-03	7.98E-04	3.55E-05	1.04E-04
3.36E+00	7.37E-03	1.12E-03	1.37E-03	7.15E-04	3.37E-05	9.65E-05
3.44E+00	5.21E-03	1.34E-03	1.30E-03	5.58E-04	2.86E-05	8.98E-05

3.52E+00	5.07E-03	1.11E-03	1.06E-03	5.98E-04	2.92E-05	7.97E-05
3.59E+00	5.09E-03	9.73E-04	1.21E-03	3.97E-04	1.64E-05	5.66E-05
3.67E+00	4.72E-03	8.86E-04	1.10E-03	3.21E-04	1.59E-05	5.51E-05
3.75E+00	3.87E-03	8.46E-04	9.94E-04	3.05E-04	1.91E-05	4.18E-05
3.83E+00	4.74E-03	7.49E-04	9.65E-04	3.08E-04	1.60E-05	3.84E-05
3.91E+00	4.03E-03	7.84E-04	9.74E-04	2.34E-04	1.50E-05	2.70E-05
3.98E+00	4.48E-03	7.13E-04	9.08E-04	2.24E-04	1.58E-05	2.59E-05
4.06E+00	3.86E-03	7.27E-04	9.12E-04	2.04E-04	1.42E-05	3.30E-05
4.14E+00	3.13E-03	6.82E-04	7.47E-04	1.93E-04	1.16E-05	2.64E-05
4.22E+00	3.39E-03	6.61E-04	7.80E-04	2.12E-04	1.49E-05	1.58E-05
4.30E+00	3.43E-03	6.21E-04	7.07E-04	1.55E-04	1.45E-05	1.87E-05
4.38E+00	3.13E-03	5.95E-04	6.60E-04	1.28E-04	8.40E-06	1.27E-05
4.45E+00	2.88E-03	5.96E-04	6.62E-04	1.14E-04	1.10E-05	1.15E-05
4.53E+00	3.14E-03	5.37E-04	6.32E-04	1.03E-04	1.27E-05	1.53E-05
4.61E+00	2.92E-03	5.85E-04	6.17E-04	1.07E-04	1.21E-05	1.12E-05
4.69E+00	3.18E-03	4.86E-04	6.12E-04	1.34E-04	1.80E-05	1.35E-05
4.77E+00	2.85E-03	5.64E-04	6.04E-04	1.12E-04	1.48E-05	1.29E-05
4.84E+00	2.55E-03	5.16E-04	5.60E-04	1.14E-04	1.72E-05	1.11E-05
4.92E+00	2.64E-03	4.92E-04	5.53E-04	8.11E-05	1.95E-05	8.20E-06
5.00E+00	2.60E-03	4.66E-04	5.67E-04	1.00E-04	1.53E-05	1.11E-05
5.08E+00	2.57E-03	4.30E-04	5.21E-04	1.17E-04	1.24E-05	6.82E-06
5.16E+00	2.31E-03	4.23E-04	5.12E-04	9.77E-05	1.66E-05	7.78E-06
5.23E+00	2.55E-03	4.59E-04	4.98E-04	5.40E-05	8.39E-06	9.13E-06
5.31E+00	2.41E-03	4.25E-04	4.81E-04	8.07E-05	1.11E-05	1.10E-05
5.39E+00	2.17E-03	4.06E-04	5.00E-04	6.17E-05	8.19E-06	7.41E-06
5.47E+00	2.23E-03	4.20E-04	4.18E-04	8.09E-05	5.10E-06	8.69E-06
5.55E+00	1.92E-03	3.78E-04	4.78E-04	4.04E-05	6.88E-06	8.07E-06
5.63E+00	2.24E-03	3.92E-04	4.48E-04	4.21E-05	1.01E-05	5.46E-06
5.70E+00	2.30E-03	3.60E-04	4.24E-04	4.36E-05	3.53E-06	5.96E-06
5.78E+00	1.94E-03	4.15E-04	4.15E-04	3.05E-05	6.47E-06	4.10E-06
5.86E+00	1.95E-03	3.22E-04	4.31E-04	4.09E-05	4.88E-06	4.94E-06
5.94E+00	1.88E-03	3.56E-04	3.97E-04	3.20E-05	6.13E-06	3.84E-06

6.02E+00	2.02E-03	3.38E-04	4.02E-04	3.16E-05	4.58E-06	4.72E-06
6.09E+00	1.81E-03	3.60E-04	3.99E-04	3.37E-05	6.06E-06	2.96E-06
6.17E+00	1.73E-03	3.14E-04	3.87E-04	3.59E-05	3.58E-06	5.16E-06
6.25E+00	1.62E-03	3.38E-04	3.81E-04	3.16E-05	3.69E-06	5.29E-06
6.33E+00	1.88E-03	3.16E-04	3.63E-04	3.35E-05	4.99E-06	5.09E-06
6.41E+00	1.71E-03	3.00E-04	3.58E-04	2.41E-05	3.93E-06	3.93E-06
6.48E+00	1.52E-03	2.84E-04	3.52E-04	2.57E-05	4.06E-06	3.47E-06
6.56E+00	1.53E-03	3.01E-04	3.44E-04	2.19E-05	4.06E-06	4.55E-06
6.64E+00	1.51E-03	2.80E-04	3.44E-04	2.47E-05	3.17E-06	2.76E-06
6.72E+00	1.82E-03	3.13E-04	3.63E-04	2.33E-05	4.56E-06	2.29E-06
6.80E+00	1.53E-03	2.86E-04	3.27E-04	2.21E-05	3.39E-06	4.14E-06
6.88E+00	1.66E-03	2.83E-04	3.37E-04	1.82E-05	3.74E-06	3.45E-06
6.95E+00	1.71E-03	2.83E-04	3.43E-04	2.05E-05	1.63E-06	3.30E-06
7.03E+00	1.44E-03	2.74E-04	3.05E-04	2.38E-05	3.15E-06	3.37E-06
7.11E+00	1.56E-03	2.78E-04	3.19E-04	1.68E-05	2.95E-06	2.51E-06
7.19E+00	1.61E-03	2.71E-04	3.30E-04	2.11E-05	2.78E-06	2.98E-06
7.27E+00	1.41E-03	2.80E-04	3.01E-04	2.04E-05	2.73E-06	3.57E-06
7.34E+00	1.52E-03	2.55E-04	3.06E-04	2.03E-05	2.32E-06	1.82E-06
7.42E+00	1.53E-03	2.47E-04	3.02E-04	1.79E-05	2.52E-06	2.90E-06
7.50E+00	1.45E-03	2.51E-04	2.77E-04	1.50E-05	2.54E-06	2.65E-06
7.58E+00	1.54E-03	2.95E-04	3.03E-04	1.55E-05	2.53E-06	2.25E-06
7.66E+00	1.41E-03	2.71E-04	2.85E-04	1.25E-05	2.45E-06	2.33E-06
7.73E+00	1.39E-03	2.40E-04	2.98E-04	1.58E-05	2.92E-06	3.13E-06
7.81E+00	1.34E-03	2.20E-04	2.88E-04	1.04E-05	2.22E-06	2.94E-06
7.89E+00	1.58E-03	2.33E-04	2.70E-04	8.84E-06	2.23E-06	2.76E-06
7.97E+00	1.52E-03	2.21E-04	2.79E-04	1.21E-05	2.39E-06	2.90E-06
8.05E+00	1.27E-03	2.28E-04	2.76E-04	1.27E-05	1.79E-06	2.80E-06
8.13E+00	1.51E-03	2.37E-04	2.64E-04	1.28E-05	2.17E-06	2.44E-06
8.20E+00	1.47E-03	2.27E-04	2.80E-04	9.67E-06	1.59E-06	2.97E-06
8.28E+00	1.24E-03	2.18E-04	2.86E-04	1.18E-05	1.46E-06	2.41E-06
8.36E+00	1.53E-03	2.24E-04	2.61E-04	1.18E-05	2.13E-06	2.53E-06
8.44E+00	1.33E-03	2.41E-04	2.74E-04	1.20E-05	2.18E-06	2.45E-06

8.52E+00	1.51E-03	2.26E-04	2.82E-04	1.14E-05	1.88E-06	3.57E-06
8.59E+00	1.31E-03	2.49E-04	2.55E-04	8.94E-06	1.77E-06	2.40E-06
8.67E+00	1.60E-03	2.08E-04	2.88E-04	1.23E-05	1.44E-06	3.64E-06
8.75E+00	1.28E-03	2.20E-04	2.52E-04	9.08E-06	2.36E-06	3.61E-06
8.83E+00	1.46E-03	2.07E-04	2.66E-04	1.06E-05	1.95E-06	3.16E-06
8.91E+00	1.90E-03	2.50E-04	2.53E-04	1.20E-05	1.81E-06	2.96E-06
8.98E+00	1.74E-03	2.14E-04	2.56E-04	9.67E-06	2.44E-06	1.99E-06
9.06E+00	1.91E-03	2.20E-04	2.74E-04	1.10E-05	3.14E-06	2.90E-06
9.14E+00	2.05E-03	2.27E-04	2.62E-04	7.70E-06	1.84E-06	2.09E-06
9.22E+00	2.09E-03	2.27E-04	2.41E-04	1.01E-05	2.18E-06	2.74E-06
9.30E+00	1.66E-03	2.15E-04	2.69E-04	1.06E-05	1.88E-06	2.58E-06
9.38E+00	2.24E-03	2.04E-04	2.52E-04	8.48E-06	1.88E-06	2.76E-06
9.45E+00	2.42E-03	2.15E-04	2.35E-04	7.85E-06	2.92E-06	3.14E-06
9.53E+00	2.81E-03	1.99E-04	2.63E-04	8.34E-06	2.57E-06	3.20E-06
9.61E+00	2.34E-03	2.36E-04	2.62E-04	1.05E-05	3.32E-06	2.60E-06
9.69E+00	3.85E-03	2.28E-04	2.58E-04	8.24E-06	2.79E-06	2.50E-06
9.77E+00	4.04E-03	2.17E-04	2.50E-04	1.17E-05	2.93E-06	3.88E-06
9.84E+00	3.29E-03	2.04E-04	2.59E-04	1.09E-05	2.92E-06	3.58E-06
9.92E+00	7.05E-03	2.90E-04	2.49E-04	9.63E-06	3.88E-06	2.88E-06

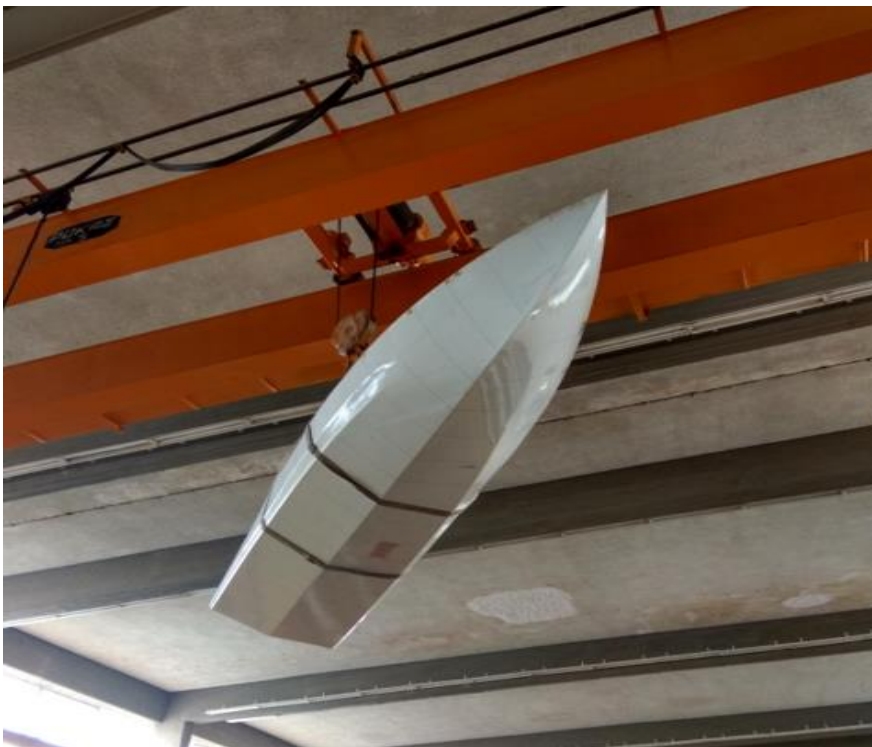
Πίνακας Π Ι. 2 Αποκρίσεις στο πεδίο των συχνοτήτων για $H_s=11$ cm και $T_p'=3.5$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Στο παράρτημα αυτό, παρουσιάζεται φωτογραφικό υλικό που τραβήχτηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων της διπλωματικής.



Εικόνα Π ΙΙ. 1 Προετοιμασία μοντέλου 163/01



Εικόνα Π ΙΙ. 2 Μέτρηση περιόδου ιδιοταλάντωσης



***Εικόνα Π Η. 3** Λίγο πριν την πρώτο πείραμα*



Εικόνα Π ΙΙ. 4 Μεταφορά του προτύπου εντός της δεξαμενής



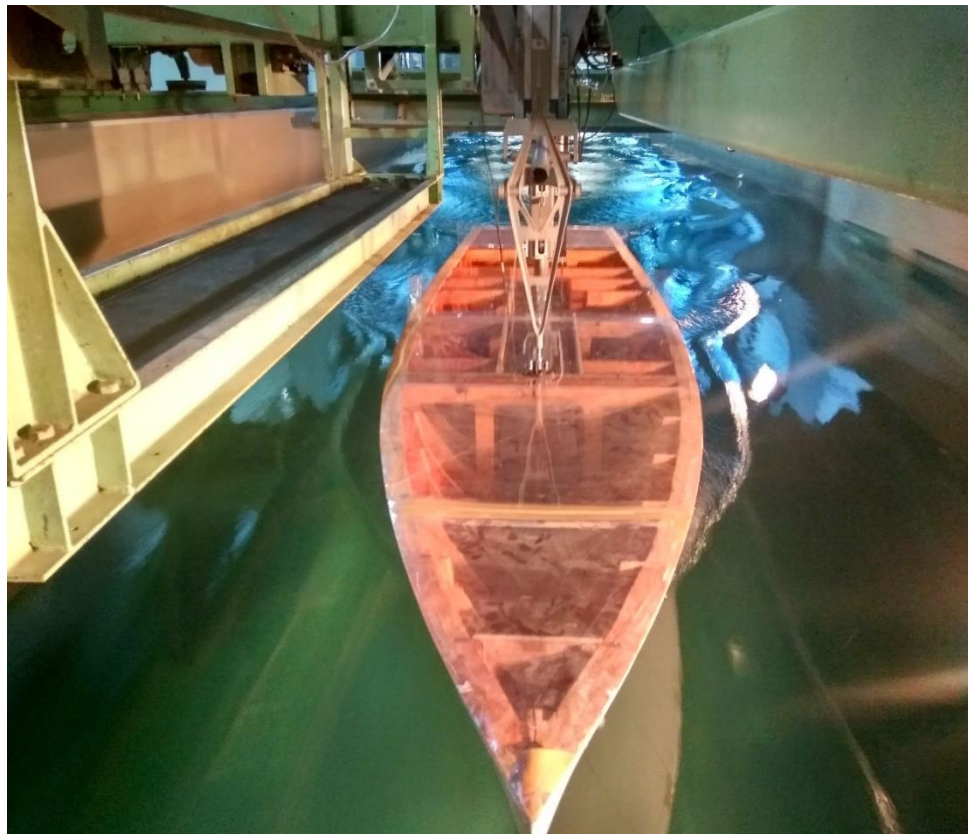
***Εικόνα Π ΙΙ. 5** Ένωση του προτύπου με το φορείο*



***Εικόνα ΙΙ ΙΙ. 6** Ομοίως από άλλη οπτική γωνία*



***Εικόνα Π ΙΙ. 7** Το φορείο και το προσδεδεμένο μοντέλο 163/01 έτοιμο για πείραμα*



***Εικόνα Π ΙΙ. 8** Εν δράσει*



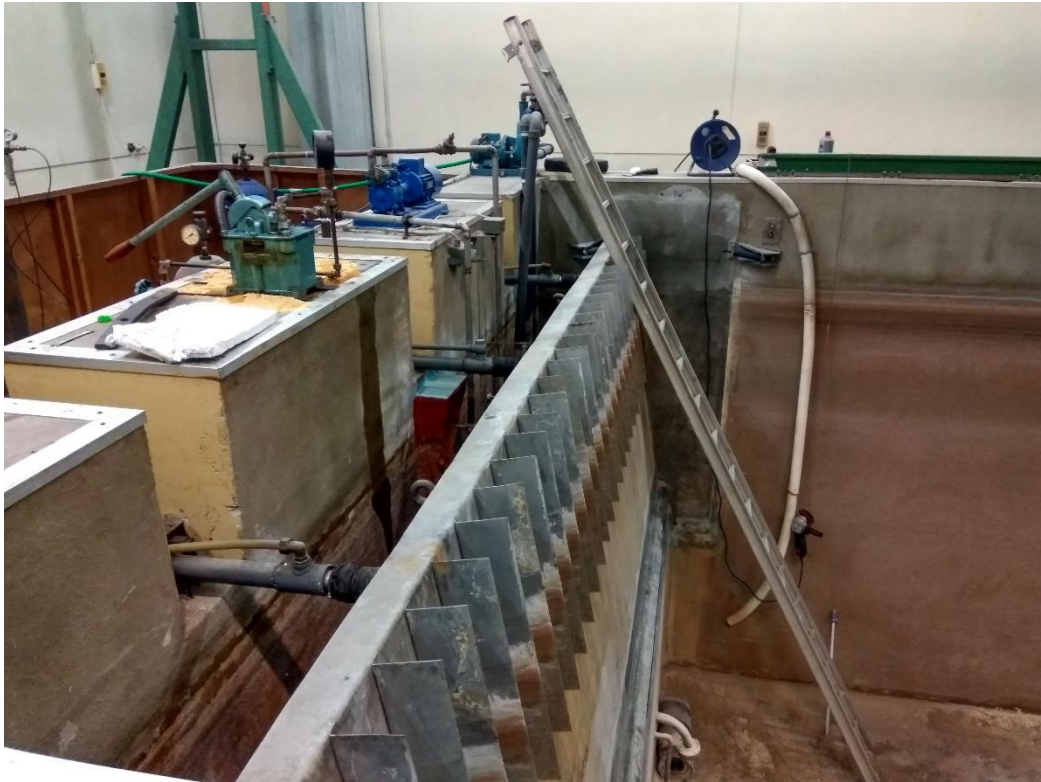
***Εικόνα Π ΙΙ. 9** Φορείο και ενδείξεις μετρητικών οργάνων*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

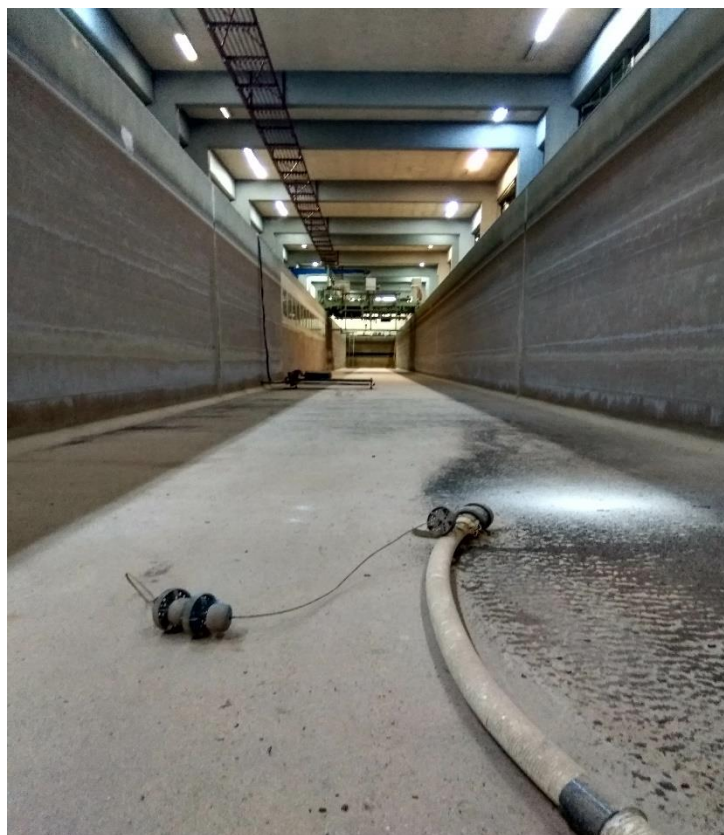
Τα πειράματα ξεκίνησαν με καθυστέρηση σχεδόν ένα μήνα, καθώς προέκυψε πρόβλημα στον κυματιστήρα. Πριν την επιδιόρθωση, έπρεπε να αδειάσει η δεξαμενή. Ύστερα από κοπιαστική και σκληρή δουλειά του προσωπικού του εργαστηρίου και ενός απειροελάχιστου ποσοστού συμμετοχής του συγγραφέα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, οι εργασίες επιδιόρθωσης και συντήρησης ολοκληρώθηκαν επιτυχώς.



***Εικόνα Π ΙΙΙ. 1** Δεξαμενή εργαστηρίου, άδεια λόγω συντήρησης*



***Εικόνα Π ΙΙΙ. 2** Κυματιστήρας*



***Εικόνα Π ΙΙΙ. 3** Μέσα στη δεξαμενή*



Εικόνα Π ΙΙΙ. 4 Γέμισμα δεξαμενής