



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

«Υπολογισμοί της υδροδυναμικής συμπεριφοράς
σε ήρεμο νερό και κυματισμούς ταχυπλόου με
διπλή ακμή και $L/B=2.50$. Δοκιμές στην
πειραματική δεξαμενή.»

ΜΑΡΙΑ – ΓΕΩΡΓΙΑ (ΤΖΩΡΤΖΙΝΑ) ΓΚΑΝΙΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων καθηγητής: Γρηγόριος Ι. Γρηγορόπουλος

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά σε ήρεμο νερό και η συμπεριφορά σε κυματισμούς ενός ταχυπλόου της συστηματικής σειράς του Ε.Μ.Π. και συγκεκριμένα του προτύπου με $L/B = 2.50$. Αρχικά, ερευνήθηκε η τρέχουσα αγορά ταχυπλόων σκαφών αντιστοίχων διαστάσεων με το υπό μελέτη μοντέλο ώστε να εκτιμηθεί μια ρεαλιστική κλίμακα σχεδίασης. Στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. πραγματοποιήθηκε πείραμα αντίστασης του μοντέλου, τα αποτελέσματα του οποίου συγκρίθηκαν αφενός με τους υπολογισμούς του κώδικα SWAN2 για πλεύση του σκάφους σε ήρεμο νερό και αφετέρου με τις εκτιμήσεις της ημι-εμπειρικής μεθόδου του Savitsky. Βάσει της εκτίμησης της αντίστασης επιλέχθηκε στη συνέχεια έλικα για το υπό σχεδίαση σκάφος και εκτιμήθηκε η ισχύς της προωστήριας εγκατάστασης. Στα πλαίσια μελέτης της δυναμικής συμπεριφοράς του σκάφους, παρήχθησαν και αναλύθηκαν τυχαίοι κυματισμοί στην πειραματική δεξαμενή, τα αποτελέσματα των οποίων αποτέλεσαν έπειτα δεδομένα εισόδου για υπολογισμό των τιμών απόκρισης του σκάφους από τον κώδικα SWAN2. Τελικώς, εκτιμήθηκε η ρίζα της μέσης τετραγωνικής τιμής επιταχύνσεων και συγκρίθηκε με κριτήρια.

[ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ]

ABSTRACT

This diploma thesis studies the behavior of a planning hull of the NTUA series with $L/B = 2.50$ in calm water and in waves. Initially, a market research for crafts with similar dimensions helps in estimating a realistic scaling factor for the examined model. An experiment of resistance was conducted at the towing tank of the Laboratory of Ship and Marine Hydrodynamics of the School of Naval Architecture and Marine Engineering of NTUA, whose results are compared with the calculations of the SWAN2 code for calm water as well as with the estimations of the semi-empirical Savitsky method. According to the estimated resistance, a propeller is chosen for the examined model and its propulsion installation's power is assessed. The study of the dynamic behavior of the vessel included the production and analysis of random waves at the towing tank, the results of which are used as inputs for the SWAN2 code that calculated the response values of the ship. Finally, the root mean square value of acceleration is estimated and compared with certain criteria.

[ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ]

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γρηγόριο Γρηγορόπουλο για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με τον πειραματικό τομέα του αντικειμένου των σπουδών μου ως Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός, την καθοδήγησή του, την υπομονή και την επιμονή του σε όλα τα στάδια της διπλωματικής μου εργασίας και ιδίως στα απροσδόκητα προβλήματα που παρουσιάστηκαν.

Ειδικές ευχαριστίες οφείλω στο προσωπικό της δεξαμενής του εργαστηρίου, τον κ. Ιωάννη Τραχανά, ΕΤΕΠ, τον κ. Δημήτριο Λιαροκάπη, Υ.Δ. και τον κ. Γεώργιο Μυλωνά, για την πολύπλευρη βοήθειά τους, τις επεξηγήσεις και τη βοήθειά τους σε καίρια σημεία της εργασίας αυτής.

Πάνω από όλους και όλα, ωστόσο, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους που υπήρξαν μόνιμοι συνοδοιπόροι σε όλο το ταξίδι των σπουδών μου. Είμαι ευγνώμων στη μητέρα μου για τον αγώνα της να σπουδάσω και την πίστη της σε εμένα και στο συμφοιτητή, συνεργάτη, φίλο και σχέση μου, Τάσο, για την αμέριστη στήριξή του, στα εύκολα και στα δύσκολα, στα μικρά και στα μεγάλα.

[ΚΕΝΗ ΣΕΛΙΔΑ]

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	1
1.1	Συμπεριφορά σε ήρεμο νερό	1
1.1.1	Σκάφη ημι-εκτοπίσματος	1
1.1.2	Ολισθάκατοι	3
1.2	Συμπεριφορά σε κυματισμούς	6
1.2.1	Οι κινήσεις του πλοίου	6
1.2.2	Είδη κυματισμών	7
1.2.3	Αποκρίσεις σκάφους – RAOs	14
1.3	Παράμετροι σχεδίασης ταχυπλόου σκάφους με $L/B=2.50$	15
1.4	Το υπολογιστικό πρόγραμμα SWAN2	17
1.4.1	Θεωρητικό υπόβαθρο	17
1.4.2	Τρόπος χρήσης	21
2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ Ε.Μ.Π.	23
2.1	Γενική παρουσίαση	23
2.2	Το πρότυπο με $L/B=2.50$	26
3	ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ	29
3.1	Εισαγωγή	29
3.2	Μέθοδος Froude	30
3.3	Πείραμα αντίστασης	32
3.3.1	Πειραματική εγκατάσταση	32
3.3.2	Προετοιμασία προτύπου	33
3.3.3	Βαθμονόμηση μετρητικών διατάξεων	37
3.3.4	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	39

3.4	SWAN2 σε ήρεμο νερό και αποτελέσματα.....	45
3.5	Μέθοδος Savitsky	50
3.6	Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων με κώδικα SWAN2 και μέθοδο Savitsky	53
3.7	Υπολογισμός εγκατεστημένης ισχύος και εκλογή έλικας σκάφους σε φυσική κλίμακα.....	55
4	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ.....	61
4.1	Εισαγωγή.....	61
4.2	Κριτήρια άνετης και ασφαλούς πλεύσης ταχυπλόων σκαφών σε κυματισμούς.....	62
4.3	Καταστάσεις θάλασσας.....	63
4.3.1	Βαθμονόμηση αισθητήρα	64
4.3.2	Παραγωγή και μέτρηση τυχαίων κυματισμών.....	64
4.3.3	Επεξεργασία μετρήσεων και χάραξη φασμάτων	65
4.4	Ταχύπλοο σε κυματισμούς στο SWAN2	71
4.4.1	Δημιουργία κυματισμών προς εκτέλεση κώδικα και χάραξη φασμάτων	71
4.4.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων με κριτήρια.....	75
	Βιβλιογραφία	77
	Παράρτημα I : Αναλογίες πειραματικής – φυσικής κλίμακας με γεωμετρική ομοιότητα	79
	Παράρτημα II : Πρότυπο αρχείου εισόδου κώδικα HYDRO.....	80
	Παράρτημα III : Πρότυπο αρχείο εισόδου “.pln” κώδικα SWAN2	82
	Παράρτημα IV : Πρότυπο αρχείο εισόδου “.inp” κώδικα SWAN2 για υπολογισμούς σε ήρεμο νερό.....	85
	Παράρτημα V : Πρότυπο αρχείο εξόδου “.out” κώδικα SWAN2 για υπολογισμούς σε ήρεμο νερό	86
	Παράρτημα VI : Πρότυπο αρχείο εισόδου “.inp” κώδικα SWAN2 για υπολογισμούς σε κυματισμούς.....	88

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Οι έξι κινήσεις του πλοίου	6
Πίνακας 2: Κύρια χαρακτηριστικά προτύπου $L/B = 2.50$	25
Πίνακας 3: Όμοια ταχύπλοα αγοράς.....	27
Πίνακας 4: Επιλεχθείσες τιμές καταστάσεων φόρτωσης για το ταχύπλοο με $L/B = 2.50$	28
Πίνακας 5: Αποτελέσματα σύγκλισης HYDRO σε κλίμακα μοντέλου ($\lambda = 1$) για 3 καταστάσεις φόρτωσης	34
Πίνακας 6: Μάζες μοντέλου, φορτίου και λοιπών εξαρτημάτων	35
Πίνακας 7: Θεωρητική και πειραματική περίοδος ιδιοταλάντωσης και απόκλιση %	37
Πίνακας 8: Συναρτήσεις μεταφοράς μεγεθών	38
Πίνακας 9: Ταχύτητες πειράματος αντίστασης	39
Πίνακας 10: Τελικές τιμές μετρήσεων πειράματος αντίστασης	40
Πίνακας 11: Ταχύτητες εκτέλεσης υπολογισμών στον κώδικα SWAN2	46
Πίνακας 12: Αποτελέσματα εκτέλεσης κώδικα SWAN2	46
Πίνακας 13: Τιμές ολική αντίστασης μοντέλου (RT, m) βάσει SWAN2.....	47
Πίνακας 14: Ταχύτητες υπολογισμού με τη μέθοδο Savitsky και προκύπτουσες ολικές αντιστάσεις πλοίου.....	52
Πίνακας 15: Ταχύτητα και ολική αντίσταση υπολογισμών.....	55
Πίνακας 16: Επιλογές αρχικών μεγεθών	56
Πίνακας 17: Έλεγχος κριτηρίων επιλεχθείσας έλικας.....	59
Πίνακας 18: Κριτήρια λειτουργικότητας άνετης και ασφαλούς πλεύσης για διάφορα πλοία.....	62
Πίνακας 19: Καταστάσεις θάλασσας δοκιμών ταχυπλόου $L/B = 2.50$	63
Πίνακας 20: Φάσματα στα οποία επιλέχθηκε Scaling Factor.....	67
Πίνακας 21: Συνδυασμός ταχυτήτων και κυματισμών που μελετήθηκαν στο SWAN2	71
Πίνακας 22: Αποτελέσματα $RMSacc$ στην πλήρη του σκάφους.....	76

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Ολική αντίσταση μοντέλου (RT, m) συναρτήσει ταχύτητας (Vm) βάσει πειραματικών μετρήσεων	41
Διάγραμμα 2: Δυναμική διαγωγή μοντέλου (Pitch) συναρτήσει της ταχύτητας (Vm)	41
Διάγραμμα 3: Δυναμική ανύψωση του κέντρου βάρους του μοντέλου (Heave) συναρτήσει της ταχύτητας (Vm)	42
Διάγραμμα 4: Ολική αντίσταση πλοίου (RT, S) συναρτήσει της ταχύτητας (Vs) βάσει πειράματος μέσω Froude.....	43
Διάγραμμα 5: Συντελεστής ολικής αντίστασης πλοίου (CT, S) συναρτήσει ταχύτητας (Vs) βάσει πειράματος μέσω Froude	43
Διάγραμμα 6: Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης πλοίου (CT, S) συναρτήσει ταχύτητας (Vs) βάσει πειράματος μέσω Froude	44
Διάγραμμα 7: Ολική αντίσταση μοντέλου (RT, m) συναρτήσει ταχύτητας (Vm) βάσει SWAN2	47
Διάγραμμα 8: Ολική αντίσταση πλοίου (RT, S) συναρτήσει ταχύτητας (Vs) βάσει SWAN2 μέσω Froude	48
Διάγραμμα 9: Συντελεστής ολικής αντίστασης πλοίου (CT, S) συναρτήσει ταχύτητας (Vs) βάσει SWAN2 μέσω Froude.....	49
Διάγραμμα 10: Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης πλοίου (CR, S) συναρτήσει ταχύτητας (Vs) βάσει SWAN2 μέσω Froude.....	49
Διάγραμμα 11: Ολική αντίσταση πλοίου (RT, s) συναρτήσει ταχύτητας (Vs) βάσει Savitsky... ..	52
Διάγραμμα 12: Συγκριτική παρουσίαση ολικής αντίστασης πλοίου (RT, S) συναρτήσει ταχύτητας(Vs) βάσει και των τριών μεθόδων.....	53
Διάγραμμα 13: Σύγκριση αποτελεσμάτων Fourier ανάλυσης για διαφορετικούς αριθμούς σημείων για το κύμα h10t1274.....	66
Διάγραμμα 14: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος h09t1062	68
Διάγραμμα 15: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος h10t1274	68

Διάγραμμα 16: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος h11t1486	69
Διάγραμμα 17: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος h12t1669	69
Διάγραμμα 18: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος h14t1911	70
Διάγραμμα 19: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος h16t2123	70
Διάγραμμα 20: Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης για h09t1062 με SF και για F _n =0.68	73
Διάγραμμα 21: Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης για h09t1062 με SF και για F _n =1.032	74
Διάγραμμα 22: Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης για h11t1486 και για F _n =0.68	74
Διάγραμμα 23: Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης για h14t1911 και για F _n =0.68	75

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Τυπικό σχέδιο γραμμών γάστρας ημι – εκτοπίσματος.....	2
Εικόνα 2: Τυπικό σχέδιο γραμμών γάστρας ολισθακάτου	3
Εικόνα 3: «Δίπλωμα» του V (V wrap)	4
Εικόνα 4: Διαμόρφωση πλώρας προς απορρόφηση κραδασμών κατά τη σφυρόκρουση	5
Εικόνα 5: Οι κινήσεις του πλοίου στο σύστημα συντεταγμένων	6
Εικόνα 6: Μοντέλο «Longuet – Higgins». Υπέρθυση άπειρων ημιτονικών κυμάτων.	9
Εικόνα 7: Μορφή διαγράμματος φάσματος κυματικής ενέργειας.....	11
Εικόνα 8: Σύστημα συντεταγμένων κίνησης πλοίου σε περιβάλλοντες κυματισμούς.....	18
Εικόνα 9: Σύστημα συντεταγμένων αναφοράς SWAN2	21
Εικόνα 10: Σχέδιο γραμμών του πατρικού προτύπου με $L/B = 2.50$ της συστηματικής σειράς του Ε.Μ.Π.....	24
Εικόνα 11: : Σχεδιάγραμμα διαστάσεων δεξαμενής δοκιμών προτύπων του Εργαστήριου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π. από τα στοιχεία της Ι.Τ.Τ.Σ.	32

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΩΝ

Φ	:	δυναμικό της ταχύτητας
ζ	:	ανύψωση του κύματος
U	:	ταχύτητα κίνησης πλοίου
ω	:	γωνιακή συχνότητα [rad/s]
k	:	κυματικός αριθμός, $k = \frac{2\cdot\pi}{\lambda}$
g	:	επιτάχυνση της βαρύτητας, $g = 9.80665 m/s^2$
λ	:	μήκος κύματος [m]
f	:	συχνότητα κύματος [Hz]
A	:	πλάτος κύματος [m]
φ	:	γωνία φάσης κύματος [rad]
$S(\omega)$ ή $S(f)$:	συνάρτηση πυκνότητας φάσματος ή φάσμα ισχύος [$m^2/s^4/Hz$] ή [g^2/Hz]
\bar{E}	:	μέση ενέργεια κυματισμού
ω_p	:	κυκλική συχνότητα κορυφής ενός φάσματος
$H^{1/3}$ ή H_S	:	σημαντικό ύψος κύματος
m_n	:	n-οστή φασματική ροπή
σ	:	τυπική απόκλιση
T_p	:	περίοδος κορυφής ενός φάσματος
L_{OA}	:	ολικό μήκος [m]
L_{WL}	:	μήκος ισάλου [m]
B	:	μέσο πλάτος στην άνω ακμή [m]
T	:	βύθισμα [m]

Δ	:	εκτόπισμα [kg]
∇	:	όγκος εκτοπίσματος [m^3]
LCG	:	διαμήκης θέση κέντρου βάρους από πρυμναίο άκρο, θετική πρόραθεν [m]
L/B	:	λόγος ολικού μήκους προς μέγιστο πλάτος
C_{DI}	:	συντελεστής εκτοπίσματος, $C_{DI} = \frac{\nabla}{(0.1 \cdot L_{WL})^3}$
λ	:	κλίμακα γεωμετρικής ομοιότητας
V	:	ταχύτητα [m/s] ή [knots]
Fn	:	αριθμός Froude, $Fn = \frac{V}{g \cdot L_{WL}}$
ν	:	κινηματικό ιξώδες νερού [m^2/s]
Re	:	αριθμός Reynolds, $Re = \frac{V \cdot L_{WL}}{\nu}$
C_T	:	συντελεστής ολικής αντίστασης
C_R	:	συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης
C_F	:	συντελεστής αντίστασης τριβής
C_W	:	συντελεστής αντίστασης κυματισμών
R_W	:	αντίσταση κυματισμών [kp]
ρ	:	πυκνότητα νερού [$kp \cdot \frac{s^2}{m^4}$] ή [kg/m^3]
WS	:	βρεχόμενη επιφάνεια [m^2]
R_T	:	ολική αντίσταση [kp]
β	:	γωνία ανύψωσης πυθμένα [deg]
w	:	ποσοστό ομόρρου
t	:	ποσοστό μείωσης ώσης

D	:	διάμετρος της έλικας [m]
K_T	:	αδιάστατος συντελεστής ώσης της έλικας
J	:	συντελεστής προχώρησης της έλικας
N_{pr}	:	αριθμός ελίκων
σ	:	αριθμός σπηλαίωσης
h	:	βύθιση του άξονα της έλικας [m]
T_m	:	μέσο βύθισμα σκάφους [m]
EAR	:	λόγος εκτεταμένης επιφάνειας έλικας
P/D	:	λόγος βήματος έλικας
η_o	:	βαθμός απόδοσης έλικας
K_Q	:	αδιάστατος συντελεστής ροπής της έλικας
n	:	αριθμός στροφών έλικας [RPM] ή [RPS]
T	:	ώση στον άξονα της έλικας [kp]
Q	:	ροπή στον άξονα της έλικας [$kp \cdot m$]
$V_{0.7R}$:	συνισταμένη ταχύτητα ροής στα 0.7 της ακτίνας της έλικας [m/s]
A_P	:	προβεβλημένη επιφάνεια της έλικας [m^2]
$\sigma_{0.7R}$:	αριθμός σπηλαίωσης στα 0.7 της ακτίνας της έλικας
τ_C	:	συντελεστής φόρτισης της ώσης στα 0.7 της ακτίνας της έλικας
Q_C	:	συντελεστής φόρτισης της ροπής στα 0.7 της ακτίνας της έλικας
EHP	:	ισχύς ρυμουλκήσεως [PS]
η_H	:	βαθμός απόδοσης γάστρας, $\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$
η_R	:	βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής

- η_s : βαθμός απόδοσης αξονικού συστήματος
- SHP : ισχύς κύριας μηχανής στον άξονά της [PS]

1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.1 Συμπεριφορά σε ήρεμο νερό

1.1.1 Σκάφη ημι-εκτοπίσματος

Κύριο χαρακτηριστικό των γαστρών της κατηγορίας αυτής είναι ότι κατά την πλεύση αντιμετωπίζουν σημαντική δυναμική άνωση αν και δεν ολισθαίνουν (Λουκάκης & Γρηγορόπουλος, 1996, σσ. 6-8). Πρόκειται για σκάφη με στρογγυλό πυθμένα (round bottom). Τα σκάφη αυτά λειτουργούν σε περιοχές ταχυτήτων που αντιστοιχούν σε αριθμό Froude $0.5 \leq Fn \leq 1.3$. Οι γάστρες τους χαρακτηρίζονται από:

- κυρτή μορφή προωραίων 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 τρόπιδα(skeg) στο πρυμναίο μέρος
- πρύμνη καθρέφτη

Για $Fn < 0.8$ συνηθίζονται στρογγυλεμένοι νομείς και κυρτές διαμήκεις τομές ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες προτιμώνται ευθείες διαμήκεις τομές και σχεδόν ευθείς νομείς. Για να μειωθεί η δυναμική διαγωγή, οι γάστρες αυτές εξοπλίζονται με πρυμναία σφήνα.

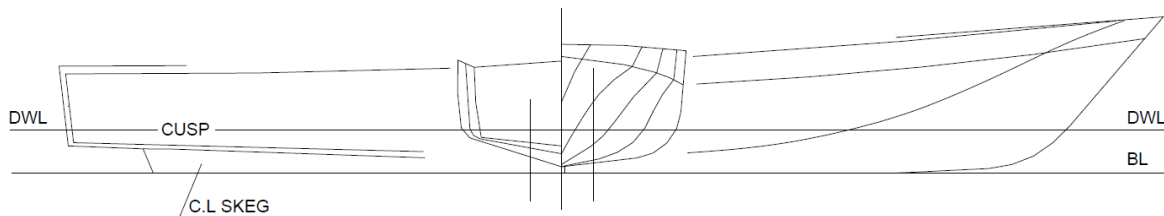
Το βάρος του σκάφους εξισορροπείται κυρίως από υδροστατικές δυνάμεις. Για $Fn > 0.7$ εμφανίζεται δυναμική άνωση που αυξάνεται με την ταχύτητα κατά τον ίδιο τρόπο που μειώνεται η υδροστατική άνωση. Η δυναμική ανύψωση του κέντρου βάρους υποδηλώνει την έναρξη της θετικής συνεισφοράς της υδροδυναμικής άνωσης. Οι γάστρες στρογγυλού πυθμένα χαρακτηρίζονται εν πλω από την δημιουργία του λεγόμενου πλευρικού αφρού (whisker spray) που αυξάνεται με την ταχύτητα, ιδιαίτερα πάνω από $Fn = 0.7$. Η ανάπτυξη και η έκταση του

πλευρικού αφρού ευνοείται από την κυρτότητα των προωραίων νομέων και την καμπυλότητα των διαμήκων τομών στην πλώρα.

Η βρεχόμενη επιφάνεια μεταβάλλεται με την ταχύτητα και την δυναμική διαγωγή. Μπορεί δε να μειωθεί με την χρήση αντιδιαβροχικών λωρίδων (spray rails) ή σε μικρή απόσταση, από την μετακίνηση του κέντρου βάρους πρύμνηθεν.

Ο τύπος αυτός των γαστρών χρησιμοποιείται για όλους τους τύπους σκαφών αναψυχής, επαγγελματικών σκαφών, περιπολικών και μικρών πολεμικών σκαφών. Συνεπώς οι κύριες διαστάσεις, οι παράμετροι μορφής και οι ταχύτητες λειτουργίας καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα:

- Μήκους μεταξύ καθέτων: 6 έως 100m
- Λόγο μήκους προς πλάτος: 3.2 έως 7.5
- Εκτόπισμα: 5 έως 2000mt
- Λόγος μήκους –εκτοπίσματος $L/\nabla^{1/3}$: 4.4 έως 8.3
- Ταχύτητα: 15 έως 50kn

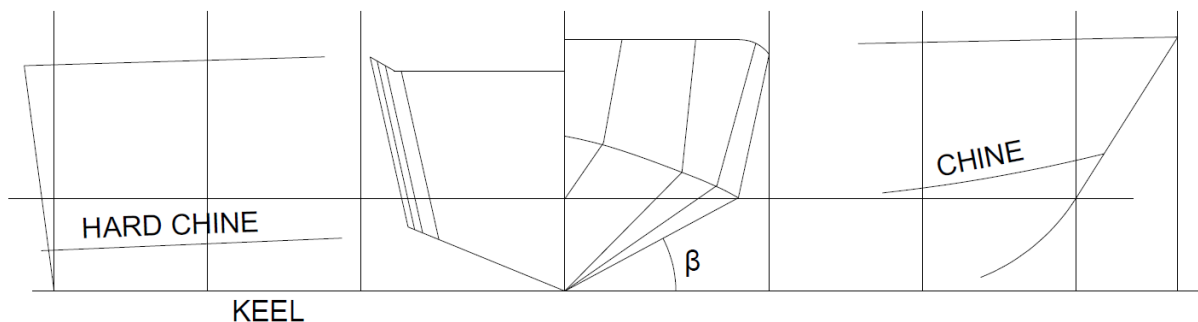


Εικόνα 1: Τυπικό σχέδιο γραμμών γάστρας ημι – εκτοπίσματος

1.1.2 Ολισθάκατοι

Οι ολισθάκατοι (planning hulls) είναι σκάφη που λειτουργούν σε ταχύτητες μεγαλύτερες από $F_n = 1.0$. Οι γάστρες αυτές χαρακτηρίζονται από :

- Οξείες ακμές και πρύμνη καθρέφτη για να προκληθεί αποκόλληση της ροής στην πρύμνη και κατά μήκος των πλευρών.
- Ευθείες διαμήκεις τομές και αποφυγή κυρτών νομέων ιδιαίτερα πρύμνηθεν της περιοχής της πλώρας για να εμποδιστεί η ανάπτυξη αρνητικών δυναμικών πιέσεων στον πυθμένα.
- Ανύψωση πυθμένα που αυξάνεται γρήγορα στην περιοχή της πλώρας, για να μειωθούν τα κρουστικά φορτία σε κυματισμούς και να προσδώσουν επαρκή εγκάρσια επιφάνεια για τους ελιγμούς.
- Λεπτές γραμμές στην είσοδο για τη μείωση της αντίστασης στις μικρές ταχύτητες.



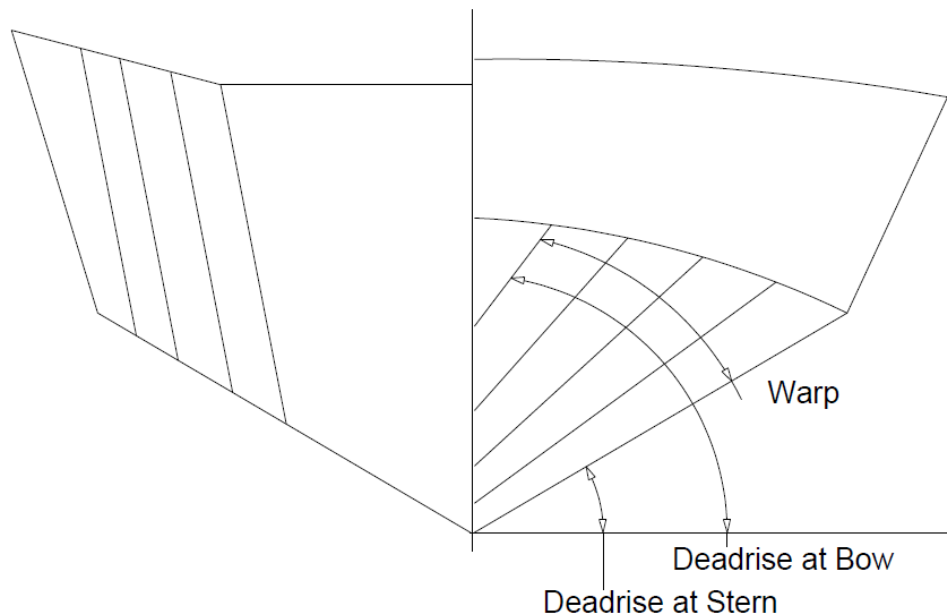
Εικόνα 2: Τυπικό σχέδιο γραμμών γάστρας ολισθακάτου

Όταν η γωνία ανύψωσης του πυθμένα στο πρυμναίο τμήμα της γάστρας υπερβαίνει τις 20° αναφερόμαστε σε γάστρες με βαθύ V. Στην κατηγορία των ολισθακάτων υπάγονται και μορφές γάστρας με στρογγυλό πυθμένα. Και οι γάστρες αυτές χαρακτηρίζονται από ουσιαστικά κάθετη και επίπεδη πρύμνη καθρέφτη και από, προσεγγιστικά, επίπεδο και οριζόντιο πυθμένα. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά, κυρίως προάγουν τη συμπεριφορά ολίσθησης. Γενικά, πάντως η ανωστική δύναμη σε κατάσταση ολίσθησης είναι μικρότερη στις γάστρες με στρογγυλό πυθμένα όπως προκύπτει από την εξίσωση Bernoulli. Επομένως, οι μορφές με ακμή προτιμώνται στις πολύ

υψηλές ταχύτητες. Ένα επί πλέον πλεονέκτημα των γαστρών με ακμή είναι ο σαφής προσδιορισμός της βρεχόμενης επιφάνειας. Αντίθετα, μειονέκτημά τους αποτελεί η σφυρόκρουση της πλώρας και γενικά οι δυσμενέστερες κινήσεις τους σε κυματισμούς.

Όταν η ολισθάκατος οδηγηθεί σε ταχύτητες πέραν εκείνων όπου συμπεριφέρεται σαν γάστρα εκτοπίσματος, αναπτύσσονται θετικές υδροδυναμικές πιέσεις στον πυθμένα. Καθώς, με την αύξηση της ταχύτητας, αυξάνει η υδροδυναμική άνωση, μειώνεται αντίστοιχα η υδροστατική άνωση.

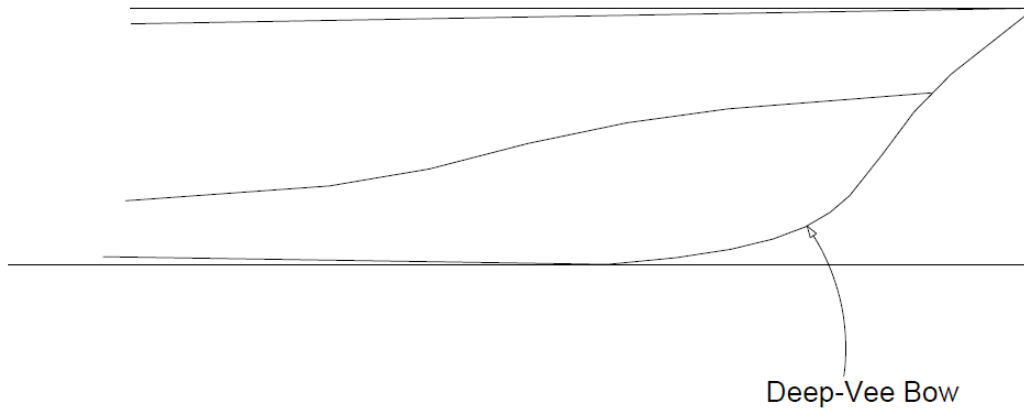
Στα σκάφη που κατασκευάζονται σήμερα, συναντώνται, πέραν των βασικών χαρακτηριστικών των πρισματικών μορφών που περιεγράφηκαν ήδη, και μερικά άλλα γεωμετρικά στοιχεία που βελτιώνουν γενικά την υδροδυναμική συμπεριφορά τους. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι το "δίπλωμα" του V (warp ή twist) που αντιστοιχεί στην αύξηση της γωνίας ανύψωσης του πυθμένα προς την πλώρα του σκάφους, η οποία και φαίνεται στην Εικόνα 3. Το κύριο πλεονέκτημα του "διπλώματος" του V είναι η μείωση των κινήσεων του σκάφους σε κυματισμούς.



Εικόνα 3: «Δίπλωμα» του V (V wrap)

Συνηθίζεται ακόμη η διαμόρφωση πλώρας προς απορρόφηση των σφυροκρούσεων όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.

Μια τέτοια πλώρα έχει, συνήθως, μεταβλητή γωνία ανύψωσης του πυθμένα (σχήμα 3.6.α) και είναι κυρτή κοντά στην τρόπιδα και κοίλη κοντά στην ακμή.



Εικόνα 4: Διαμόρφωση πλώρας προς απορρόφηση κραδασμών κατά τη σφυρόκρουση

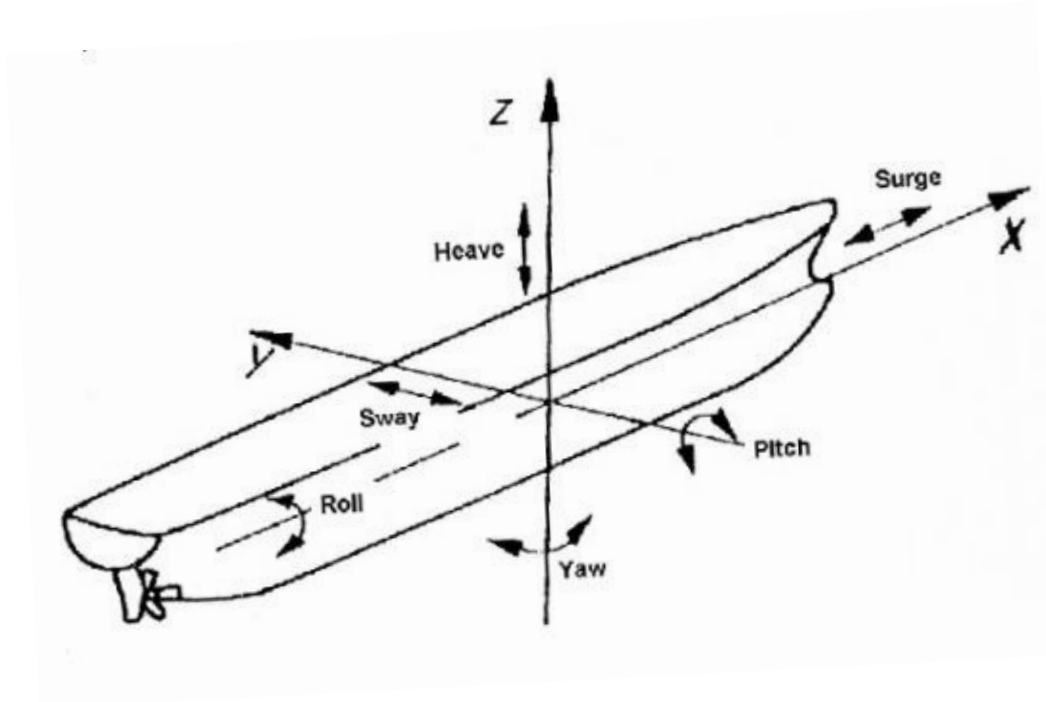
Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τυπικών γαστρών είναι οι σειρές από διαμήκεις αντιδιαβροχικές λωρίδες (spray rails ή spray strips). Οι λωρίδες αυτές συμπεριφέρονται σαν μικροσκοπικές ακμές, και, εκτός από τη μείωση του αφρού, βοηθούν στον προσδιορισμό της πραγματικής βρεχόμενης επιφάνειας εν πλω. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του σκάφους, ενεργοποιούνται διαδοχικές λωρίδες. Η ροή του νερού επηρεάζεται ουσιαστικά μόνον από τις τελευταίες λωρίδες από κάθε πλευρά, που είναι βυθισμένες. Τέτοιες λωρίδες τοποθετούνται επίσης στην ακμή για να αυξήσουν την αποτελεσματικότητά της. Οι λωρίδες που βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια του νερού δεν επηρεάζουν τη ροή αλλά απλά κρατούν στεγνό το κατάστρωμα.

Οι ολισθάκατοι χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σαν πολεμικά περιπολικά, σκάφη αναψυχής, ταχύπλοα μεταφοράς επιβατών και αγωνιστικά. Οι κύριες γεωμετρικές και λειτουργικές παράμετροι των σκαφών αυτών κυμαίνονται ως εξής:

- Ολικό μήκος : 4 έως 60 m
- Λόγος L/B : 3 έως 7
- Εκτόπισμα : 5 έως 600 mt
- Ταχύτητα : 20 έως 60 kn

1.2 Συμπεριφορά σε κυματισμούς

1.2.1 Οι κινήσεις του πλοίου



Εικόνα 5: Οι κινήσεις του πλοίου στο σύστημα συντεταγμένων

Είναι γεγονός πως η δυναμική συμπεριφορά των ταχύπλοων σκαφών σε κυματισμούς αποτελεί ένα πολύ σύνθετο και πολύπλοκο φαινόμενο. Η κίνηση κάθε πλέοντος σκάφους χαρακτηρίζεται από συνολικά έξι βαθμούς ελευθερίας κινήσεων, τρεις μεταφορικές κατά μήκος των αξόνων $x'x$, $y'y$ και $z'z$ και τρεις περιστροφικές περί αυτών.

Πίνακας 1: Οι έξι κινήσεις του πλοίου

Είδος	Συμβολισμός	Ελληνική ονομασία	Αγγλική ονομασία
Μεταφορικές	ξ_1	Διαμήκης οριζόντια ταλάντωση – Παρέαση	Surge
	ξ_2	Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση – Έκπτωση	Sway
	ξ_3	Κατακόρυφη ταλάντωση – Ανάπαυση	Heave
Περιστροφικές	ξ_4	Ταλάντωση περί το διαμήκη ($x'x$) άξονα – Διατοιχισμός	Roll
	ξ_5	Ταλάντωση περί τον εγκάρσιο ($y'y$) άξονα – Προνευτασμός	Pitch
	ξ_6	Ταλάντωση περί τον κατακόρυφο ($z'z$) άξονα – Παροιάκισμα	Yaw

Οι έξι κινήσεις του πλοίου είναι ομαδοποιημένες ανά τρεις. Οι κινήσεις *heave*, *pitch* και *surge*, οι οποίες ονομάζονται και «συμμετρικές κινήσεις», αποτελούν την πρώτη ομάδα συζευγμένων κινήσεων, ενώ οι κινήσεις *yaw*, *sway* και *roll* αποτελούν τη δεύτερη. Η έννοια της σύζευξης πρακτικά υποδηλώνει μια αλληλεπίδραση μεταξύ των κινήσεων, η οποία ωστόσο δεν επεκτείνεται μεταξύ των δύο ομάδων (Αθανασούλης & Μπελιμπασάκης, 2012).

Οι διεγείρουσες δυνάμεις που ασκούνται στο πλοίο λόγω των κυματισμών το εξαναγκάζουν σε πολλά είδη κινήσεων ταυτοχρόνως. Για την αξιολόγηση, όμως, της δυναμικής συμπεριφοράς ενός σκάφους κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς, οι κινήσεις που εξετάζονται κατά κύριο λόγο είναι το *heave* και το *pitch*, διότι οι υψηλές τιμές αυτών των κινήσεων αφενός επιδρούν σημαντικά στις κατακόρυφες επιταχύνσεις κατά μήκος του πλοίου και αφετέρου προξενούν προβλήματα όπως μετακινήσεις φορτίου, ανάδυση έλικας, κακή πηδαλιουχία, έλλειψη ευστάθειας, διαβροχή καταστρώματος κ.ά., επηρεάζοντας έτσι και την άνεση του πληρώματος και των επιβατών.

1.2.2 Είδη κυματισμών

1.2.2.1 Γενικά

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

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

Η εκτέλεση ενός πειράματος πολλές φορές που οδηγεί σε αποτελέσματα με επαναληψιμότητα ακριβείας συνιστά μια «προσδιοριστική διαδικασία». Στην περίπτωση, όμως, των θαλάσσιων κυματισμών κάτι τέτοιο δεν ισχύει μια και η μορφή των κυμάτων δεν παρουσιάζει κανονικότητα, μεταβάλλεται συνεχώς τοπικά και χρονικά, καθιστώντας αδύνατη την προσπάθεια περιγραφής τους με τη συνηθισμένη προσδιοριστική διαδικασία.

Στην περίπτωση αυτή, είναι χρήσιμη μια στατιστική περιγραφή των αποτελεσμάτων όλων των πειραμάτων με το μόνο γνωστό τρόπο πλήρους στατιστικής περιγραφής αυτών των τυχαίων διεγέρσεων, εφόσον μία ντετερμινιστική διαδικασία αποκλείεται, να είναι η θεωρία στοχαστικών διαδικασιών. Προέκυψε ως επέκταση της θεωρίας των πιθανοτήτων και επί της ουσίας αφορά περιπτώσεις όπου ενώ οι συνθήκες του πειράματος παραμένουν σταθερές, τα αποτελέσματα είναι ανόμοια και διαφορετικής μορφής. Σε αυτό το κλίμα, επομένως, διατυπώθηκαν και αναλύθηκαν διάφορα μοντέλα μελέτης αυτών των τυχαίων κυματισμών τα οποία βασίζονται στους αρμονικούς κυματισμούς, τα βασικά χαρακτηριστικά των οποίων αναλύονται παρακάτω.

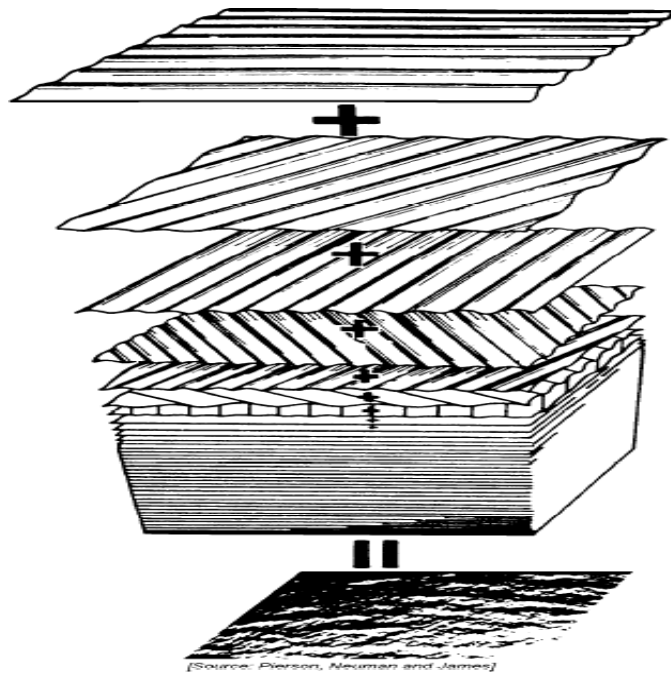
1.2.2.2 *Αρμονικοί Κυματισμοί*

Η μορφή ενός αρμονικού κυματισμού είναι απλή ημιτονοειδής ή συνημιτονοειδής και περιγράφεται πλήρως από την περίοδο (T), την συχνότητα (f), το μήκος κύματος (λ) και το ύψος κύματος (H). Στην περίπτωση του βαθέως νερού, από την εξίσωση της διασποράς προκύπτει:

$$\omega^2 = k \cdot g \xrightarrow[\omega=2\cdot\pi\cdot f]{k=\frac{2\cdot\pi}{\lambda}} f = \sqrt{\frac{g}{2\cdot\pi\cdot\lambda}}$$

1.2.2.3 Τυχαίοι Κυματισμοί

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την μελέτη ενός τυχαίου κυματισμού, είναι το μοντέλο «Longuet – Higgins», κεντρική ιδέα του οποίου είναι ότι το κυματικό προφίλ ενός τυχαίου κυματισμού μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση άπειρων απλών ημιτονικών κυμάτων πλήθους i , σταθερών παραμέτρων (συχνότητα, κυματικός αριθμός, πλάτος ταλάντωσης A) αλλά με διαφορετικές γωνίες φάσης.



Εικόνα 6: Μοντέλο «Longuet – Higgins». Υπέρθθεση άπειρων ημιτονικών κυμάτων.

Η τυχαία κυματομορφή αναλύεται κατ' αυτόν τον τρόπο σε ένα άπειρο (πεπερασμένο στην πράξη) άθροισμα αρμονικών κυματισμών με πλάτος A_i και διαφορά φάσης φ_i , ανάλυση η οποία περιγράφεται από τη μαθηματική σχέση:

$$A(t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \cdot \cos(\omega_i \cdot t + \varphi_i)$$

Στην πράξη, όταν ζητείται η περιγραφή μιας κατάστασης θάλασσας και η μελέτη των αποκρίσεων ενός σκάφους σε αυτή, η ακριβής καταγραφή μια μεμονωμένης κυματομορφής δεν αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος. Αντ' αυτού επιδιώκεται η εύρεση χαρακτηριστικών στατιστικών μεγεθών που επιτρέπουν την ικανοποιητική περιγραφή της επικρατούσας κατάστασης θάλασσας και την μελέτη των αντίστοιχων στατιστικών στοιχείων που χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά του πλοίου.

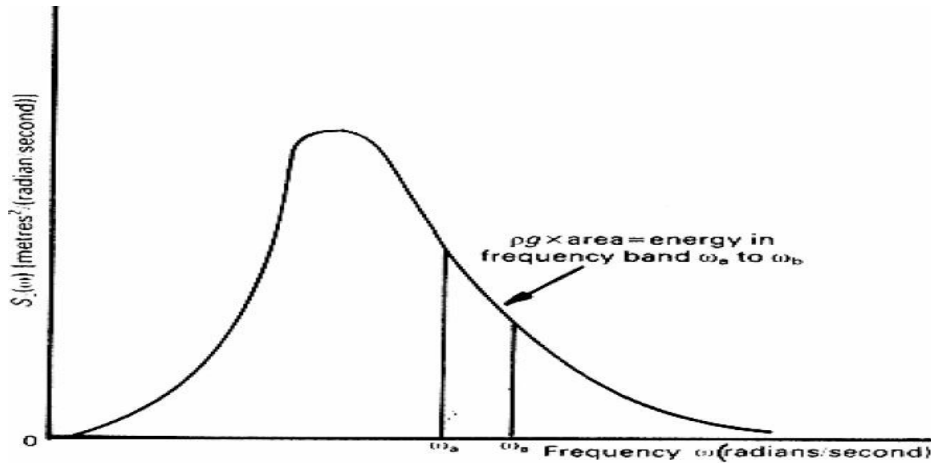
Φάσμα κυματικής ενέργειας

Μια δεδομένη κατάσταση θάλασσας περιγράφεται με την βοήθεια του φάσματος κυματικής ενέργειας (wave energy spectrum) $S(\omega)$, το οποίο περιγράφει την κατανομή της κυματικής ενέργειας μέσα σε ένα φάσμα συχνοτήτων και επομένως αρμονικών κυματισμών.

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

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

Ως είθισται, στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τυχαίοι κυματισμοί σε πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες, οπότε και θεωρείται πως η συνολική ενέργεια που μπορούσε να μεταφερθεί από τον άνεμο στη θάλασσα έχει μεταφερθεί και επομένως αφενός σε δεδομένο χρονικό διάστημα η ενέργεια του κυματισμού παραμένει σταθερή και αφετέρου έχει νόημα η σχεδίαση του διαγράμματος $S(\omega) - \omega$.



Εικόνα 7: Μορφή διαγράμματος φάσματος κυματικής ενέργειας

Οι τιμές της φασματικής πυκνότητας $S(\omega)$ επιλέγονται έτσι ώστε η κυματική ενέργεια της συγκεκριμένης κατάστασης θάλασσας στην τυχαία λωρίδα συχνοτήτων $\omega_a \leq \omega \leq \omega_b$ να δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{E} = S(\bar{\omega}) \cdot d\omega \cdot \rho \cdot g$$

όπου

- $\bar{\omega} = \frac{\omega_a + \omega_b}{2}$
- $d\omega = \omega_b - \omega_a$
- $S(\bar{\omega}) \cdot d\omega$: το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του φάσματος στη λωρίδα συχνοτήτων $\omega_a \leq \omega \leq \omega_b$

Η μέση ενέργεια κυματισμών πλάτους A δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot A^2$$

επομένως για το φάσμα προκύπτει:

$$S(\omega) = \frac{1}{2} \cdot A^2 \cdot \frac{1}{d\omega}$$

Μοντέλα κυματικών φασμάτων

Για την κατάσταση τέτοιων θαλάσσιων κυματισμών πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα, τα πιο γνωστά από τα οποία αυτό των *Pierson – Moskowitz* και αυτό του *Bretschneider*. Το φάσμα των *Pierson – Moskowitz* χρησιμοποιεί την ταχύτητα του ανέμου ως μοναδική παράμετρο, είναι δηλαδή μονοπαραμετρικό και δίνεται από τη σχέση:

$$S(\omega) = \frac{0.0081 \cdot g^2}{\omega^5} \cdot \exp\left(-0.74 \cdot \left(\frac{g}{V_w \cdot \omega}\right)^4\right)$$

όπου V_w : η ταχύτητα του ανέμου

Ωστόσο, η πραγματικότητα είναι πιο περίπλοκη και το μονοπαραμετρικό φάσμα *Pierson – Moskowitz* δίνει μικρότερη τιμή για τη συχνότητα κορυφής από την πραγματική. Η δυσκολία αυτή μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση διπαραμετρικών φασμάτων της ίδιας αναλυτικής μορφής, που μπορούν να περιγράψουν θάλασσες σε όλες τις φάσεις εξέλιξής τους, όπως αυτό που προτάθηκε από τον International Towing Tank Conference (ITTC), το λεγόμενο φάσμα του *Bretschneider*:

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

Το φάσμα του *Bretschneider* ως διπαραμετρικό ορίζεται από δύο κύριες παραμέτρους, τη συχνότητα κορυφής (ω_p) και το σημαντικό ύψος κύματος ($H^{1/3}$).

Χαρακτηριστικά μεγέθη φάσματος

Η ν-οστή φασματική ροπή δίνεται από τη σχέση:

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

όπου κάθε μία έχει τη δική της φυσική σημασία. Ενδεικτικά:

- $m_0 = \int S(\omega) d\omega$: το εμβαδόν κάτω από τη γραφική παράσταση του φάσματος που ισούται αφενός με $\frac{E}{\rho \cdot g}$ και αφετέρου με το μέσο τετράγωνο της ανύψωσης της επιφάνειας, σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν προηγουμένως.

- m_1 : το κεντροειδές της γραφικής παράστασης
- m_2 : η δεύτερη ροπή αδράνειας

Ορίζεται η τυπική απόκλιση ή ρίζα της μέσης τετραγωνικής τιμής του φάσματος (root mean square – RMS) ως:

$$\sigma = RMS = \sqrt{m_0}$$

Παρόλο που η κατανομή του ύψους δεν ακολουθεί πάντα γνωστή κατανομή, από παρατηρήσεις στην θάλασσα έχειδειχθεί ότι πολλές από τις στατιστικές ιδιότητες της επιφάνειας του κύματος προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την κατανομή *Rayleigh*. Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά μερικά στατιστικά μεγέθη:

- Πλάτος κύματος (root mean square amplitude) = 1.00σ
- Μέση τιμή του πλάτους κύματος (average amplitude) = 1.25σ
- Μέσο πλάτος του 1/3 των υψηλότερων κυμάτων (average of highest 1/3 amplitude) = $A^{1/3} = 2.00\sigma$
- Μέσο πλάτος του 1/10 των υψηλότερων κυμάτων (average of highest 1/10 amplitude) = $A^{1/10} = 2.55\sigma$
- Μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης (average zero up-crossings) = $T_0 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{m_2}}$
- Μέση περίοδος διαδοχικών κορυφών (average peak-to-peak) = $T_0 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$
- Σημαντικό ύψος κύματος = $H^{1/3} = 4\sqrt{m_0} = 4.00\sigma$

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

1.2.3 Αποκρίσεις σκάφους – RAOs

Η εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός πλοίου σε κυματισμούς γίνεται με τη χρήση των αδιάστατων συντελεστών απόκρισης (Response Amplitude Operator – RAO). Αν οριστεί το φάσμα απόκρισης ως $S_{\xi_i}(\omega)$ και το φάσμα διέγερσης του πλοίου ως $S_z(\omega)$, τότε η γραμμικότητα απόκρισης - διέγερσης περιγράφεται μέσω της γενικής σχέσης:

$$S_{\xi_i}(\omega) = RAO^2 \cdot S_z(\omega)$$

Σύμφωνα με την ITTC, τα RAO των αποκρίσεων ορίζονται επομένως για τις περιπτώσεις ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης, ήτοι της κατακόρυφης κίνησης, της περιστροφής περί τον εγκάρσιο άξονα και των επιταχύνσεων, ως:

- $RAO_{Heave} = \frac{\xi_3}{A}$
- $RAO_{Pitch} = \frac{\xi_5 \cdot \lambda}{360 \cdot A}$
- $RAO_{Acc} = \frac{a \cdot L_{wl}}{A}$

1.3 Παράμετροι σχεδίασης ταχυπλόου σκάφους με $L/B=2.50$

Η μελέτη και σχεδίαση ενός ταχύπλοου σκάφους έτσι ώστε να έχει καλή δυναμική συμπεριφορά είναι μία διαδικασία δύσκολη και σχετικά επίπονη, καθώς υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν οι οποίοι μάλιστα αλληλοσυγκρούονται. Ένας μελετητής ναυπηγός, λοιπόν, θα πρέπει να συνδυάσει τις παραμέτρους σχεδίασης που ακολουθούν (Γερογιαννάκη, 2009, σ. 63; Λουκάκης & Γρηγορόπουλος, 1996):

- Λόγος μήκους/πλάτους (L/B): Πειραματικές και αναλυτικές διαδικασίες έχουν δείξει ότι αύξηση του λόγου L/B έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των επιταχύνσεων σε όλα τα επίπεδα και για όλες τις περιοχές ταχυτήτων.
- Γωνία ανύψωσης του πυθμένα (β): Η αύξηση της γωνίας ανύψωσης του πυθμένα επιδρά θετικά στον περιορισμό των κινήσεων του σκάφους καθώς και στη μείωση της πρόσθετης αντίστασης. Μεγάλες γωνίες ανύψωσης πυθμένα βελτιώνουν την ευστάθεια πορείας ενός πλοίου υποδεικνύοντας μια ευνοϊκή επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά του σκάφους, επιδρά όμως αρνητικά στις κρουστικές επιταχύνσεις. Απαιτείται, επομένως, προσεκτική τελική επιλογή της γωνίας.
- Γωνία Διαγωγής (*trim*): Είναι γνωστό ότι μείωση της γωνίας διαγωγής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατακόρυφης κίνησης, του προνευτασμού, της πρόσθετης αντίστασης και των κρουστικών επιταχύνσεων. Η μείωση όμως έχει και το μειονέκτημα της αύξησης της πρόσθετης αντίστασης στις ταχύτητες που αντιστοιχούν στην περιοχή μετά το τοπικό μέγιστο της καμπύλης αντίστασης.
- Μορφή νομέων: Είναι γνωστό ότι η μορφή των νομέων σχήματος V συμβάλλει στην βελτίωση της πηδαλιουχίας (manoeuvring) του σκάφους σε κυματισμούς καθώς και στον περιορισμό της δημιουργίας αφρού. Όμως, η μορφή αυτή έχει το ελάττωμα ότι οδηγεί σε μεγάλα κρουστικά φορτία και σε έντονη σφυρόκρουση στην περιοχή της πλώρης. Σε ορισμένες περιπτώσεις λοιπόν μια καλή επιλογή θα μπορούσε να είναι η μορφή νομέων

σε σχήμα ανεστραμμένου κουδουνιού που δεν αυξάνει πολύ την πρόσθετη αντίσταση και συγχρόνως έχει λιγότερο έντονες κρουστικές φορτίσεις.

- Συντελεστής φόρτισης (C_{dl}): Έχει αποδειχθεί ότι οι επιταχύνσεις μειώνονται γραμμικά με την αύξηση του συντελεστή φόρτισης. Ακόμη, είναι γνωστό ότι για ταχύτητες με αριθμό Froude πάνω από 0.6 αύξηση του συντελεστή φόρτισης οδηγεί σε ελαφριά μείωση των κινήσεων του πλοίου καθώς και της πρόσθετης αντίστασης.

1.4 Το υπολογιστικό πρόγραμμα SWAN2

1.4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

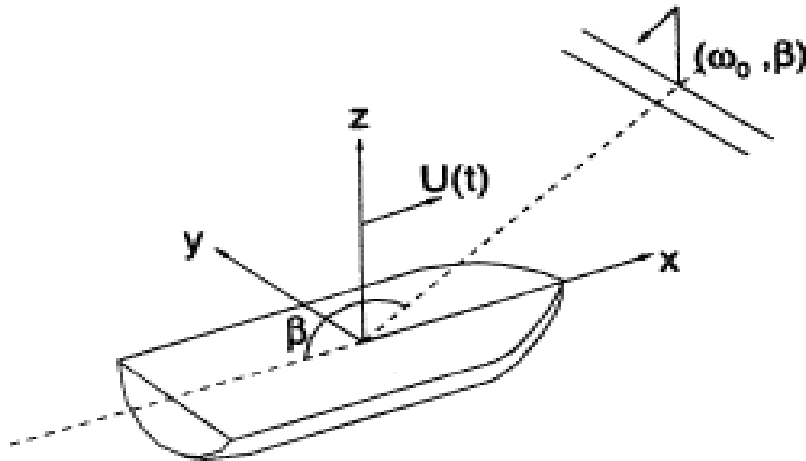
Η αναλυτική μελέτη των αποκρίσεων ενός σκάφους σε θαλάσσιους κυματισμούς, αποτελεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Το σύνολο των κινήσεων του σκάφους είναι μη γραμμικό πρόβλημα και περιλαμβάνει πολλές μη γραμμικότητες, σχετιζόμενες με την ελεύθερη επιφάνεια και με την βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος όπως:

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

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

Το SWAN2 (Ship Wave Analysis 2) είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα για την ανάλυση της κίνησης πλοίου κινούμενου ή ακίνητου σε νερό απείρου ή πεπερασμένου βάθους. Επιλύει το μόνιμο και μη μόνιμο πρόβλημα ροής ελεύθερης επιφάνειας γύρω από πλοίο χρησιμοποιώντας τη τρισδιάστατη μέθοδο *Rankine Panel* στο πεδίο του χρόνου, κατανέμοντας τετράπλευρα πλαίσια πάνω στη γάστρα του πλοίου και την ελεύθερη επιφάνεια (Sclavounos, 1995).

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



Εικόνα 8: Σύστημα συντεταγμένων κίνησης πλοίου σε περιβάλλοντες κυματισμούς

Οι εξισώσεις κίνησης του ρευστού δηλώνονται σύμφωνα με το καρτεσιανό σύστημα που φαίνεται στην Εικόνα 8. Για λόγους συνέχειας, το δυναμικό της ταχύτητας $\Phi(x,t)$ υπακούει στην εξίσωση Laplace στο πεδίο ροής:

$$\nabla^2 \Phi = 0$$

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

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

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

όπου $z = \zeta(x, y, t)$

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

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

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

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \vec{U} \cdot \vec{n} + \vec{v} \cdot \vec{n}$$

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

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

Η πρώτη γραμμικοποίηση αφορά τις συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας και κρίνεται ικανοποιητική υπό την προϋπόθεση ότι η κλίση του κύματος είναι μικρή και η γάστρα λεπτόγραμμη. Σε αυτό το σημείο, είναι δυνατός ο διαχωρισμός του δυναμικού Φ σε δύο μέρη:

$$\Phi = \varphi_0 + \varphi_1$$

$$|\nabla \varphi_1| \ll |\nabla \varphi_0|$$

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

Για την ανύψωση του κύματος ζ , ισχύει:

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_1$$

$$\zeta_1 \ll \zeta_0$$

Κάνοντας χρήση της Double-body linearization, προκύπτει:

$$\zeta_0 = \frac{U}{g} \cdot \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} - \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \nabla \varphi_0 \cdot \nabla \varphi_0, \quad z = 0$$

Και τελικώς:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \right] \cdot \zeta_1 = \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial z^2} \cdot \zeta_1 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}, \quad z = 0$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \right] \cdot \varphi_1 = -g \cdot \zeta_1 + \left[\vec{U} \cdot \nabla \varphi_0 - \frac{1}{2} \cdot \nabla \varphi_0 \cdot \nabla \varphi_0 \right], \quad z = 0$$

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

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial n} = \vec{U} \cdot \vec{n} = U \cdot n_1$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_1}{\partial n}$$

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \sum_{j=1}^6 \frac{\partial \xi_j}{\partial t} \cdot n_j + \xi_j \cdot m_j$$

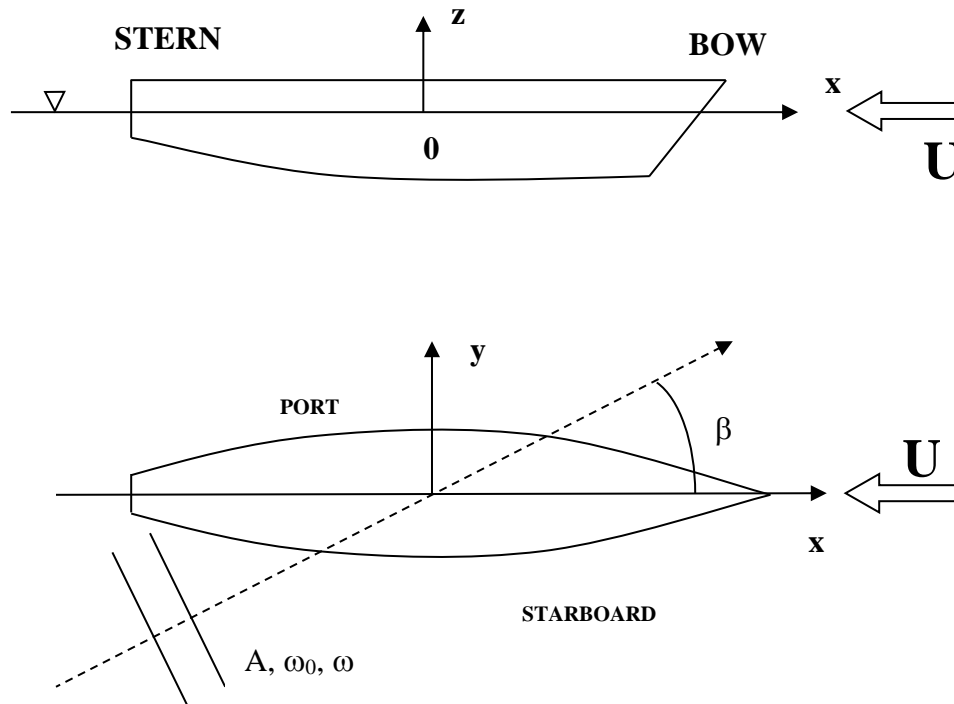
όπου:

- $(n_4, n_5, n_6) = \vec{x} \times \vec{n}$
- $(m_1, m_2, m_3) = (\vec{n} \cdot \nabla) \cdot (\vec{U} - \nabla \varphi_0)$
- $(m_4, m_5, m_6) = (\vec{n} \cdot \nabla) \cdot [\vec{x} \times (\vec{U} - \nabla \varphi_0)]$
- Οι m όροι στις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της σταθερής δυναμικής ροής και της ασταθούς ροής που αποτελεί παράγωγο της ακτινοβολίας.

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

1.4.2 Τρόπος χρήσης

Το σύστημα συντεταγμένων αναφοράς που χρησιμοποιεί ο κώδικας SWAN2 λαμβάνει ως αρχή σημείο στο μέσον του σκάφους, κατά το διάμηκες και κατά το εγκάρσιο, στο ύψος του βυθίσματος του πλοίου σε ήρεμο νερό, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες (Boston Marine Consulting Inc., 2002, σσ. 14-16).



Εικόνα 9: Σύστημα συντεταγμένων αναφοράς SWAN2

Επιπλέον, ο κώδικας SWAN2 διαχωρίζει και αναγνωρίζει τα είδη των γραμμών σε δύο κατηγορίες:

- Τύπου A: το προφίλ της πλώρης και το προφίλ της πρύμνης
- Τύπου B: οι νομείς του σκάφους μεταξύ πλώρης και πρύμνης

Ο κώδικας απαιτεί δύο βασικά αρχεία κειμένου ως αρχεία εισόδου:

- Το αρχείο “.pln” στο οποίο περιγράφεται η γεωμετρία της γάστρας του σκάφους
- Το αρχείο “.inp” στο οποίο περιέχονται ένα πλήθος δεδομένων σχετικά με το σκάφος, την κατάσταση της θάλασσας και τα χαρακτηριστικά του πειράματος

Τα αρχεία αυτά αξιοποιούνται από τρεις διαφορετικές υπορουτίνες που εμπεριέχονται στο υπολογιστικό πακέτο του SWAN2:

- Την υπορουτίνα MAKESSG η οποία με αρχεία εισόδου τα “.inp” και “.pln” μοντελοποιεί τη γεωμετρία και κατασκευάζει το πλέγμα των τετράπλευρων που τοποθετείται στη γάστρα και στην ελεύθερη επιφάνεια και που καθορίζει τόσο το αριθμητικό αποτέλεσμα όσο και τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στα αρχεία “.geo” και “.ssg” αντίστοιχα.
- Την υπορουτίνα SETUP η οποία με αρχεία εισόδου τα “.inp”, “.pln” και “.ssg” εφαρμόζει την οριακή συνθήκη του σώματος και υπολογίζει τη βασική ροή. Τα αποτελέσματα καταγράφονται στο αρχείο “.jou”.
- Την υπορουτίνα SOLVE η οποία αποτελεί το κεντρικό υπολογιστικό τμήμα του κώδικα SWAN2 και η οποία με αρχεία εισόδου τα “.inp”, “.pln”, “.ssg” και “.jou” επιλύει το υδροδυναμικό πρόβλημα και εξάγει τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα. Κατά τη μελέτη της κίνησης του σκάφους σε ήρεμο νερό υπολογίζονται μεταξύ άλλων οι συντελεστές αντίστασης, το βύθισμα και η διαγωγή τα οποία παρουσιάζονται στο παραγόμενο αρχείο εξόδου .out, ενώ κατά τη μελέτη της κίνησης του σκάφους σε κυματισμό υπολογίζονται μεταξύ άλλων η χρονική ιστορία των κινήσεών του, οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις και ροπές και οι αδιάστατοι συντελεστές απόκρισης (RAOs) των κινήσεων και των επιταχύνσεων στα επιθυμητά σημεία, αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στα παραγόμενα αρχεία “.mot”, “.frc”, “.rao” και “.fort.40” αντίστοιχα.

2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ ΤΑΧΥΠΛΟΩΝ Ε.Μ.Π.

2.1 Γενική παρουσίαση

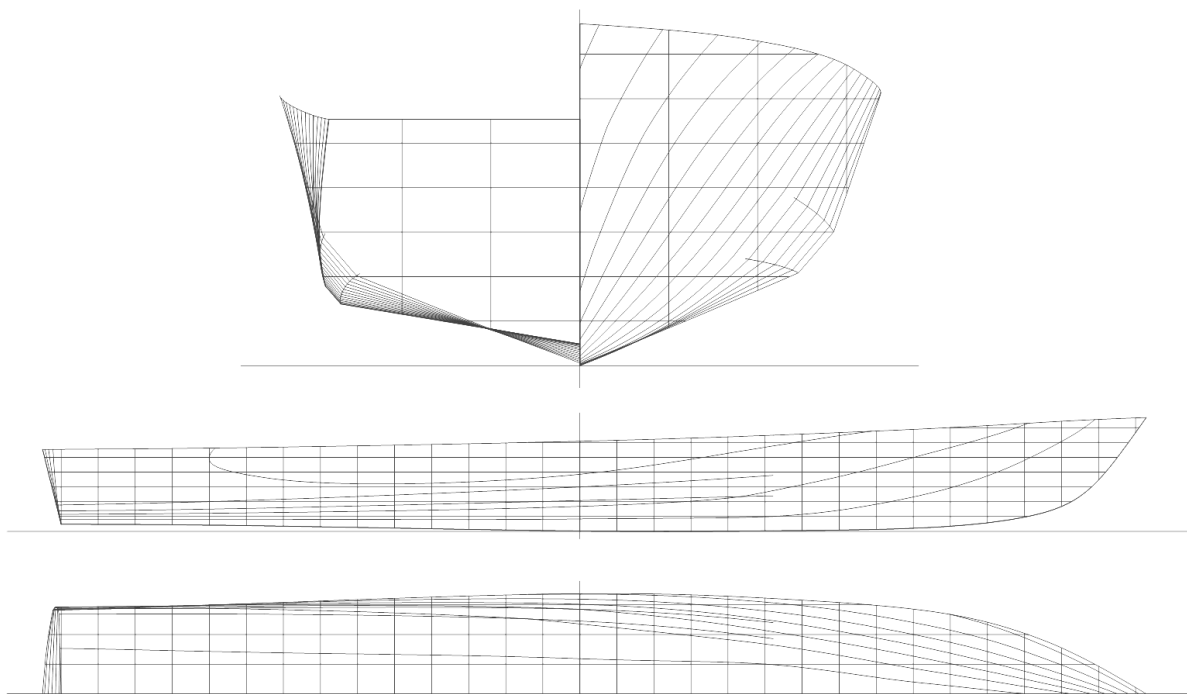
Μια συστηματική σειρά σκαφών συνιστά μια «οικογένεια» γαστρών με ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά στις οποίες έχουν γίνει τα απαραίτητα πειράματα αντίστασης και δυναμικής συμπεριφοράς για διάφορες ταχύτητες και σε διάφορες καταστάσεις θάλασσας, ώστε να είναι δυνατή η πρόβλεψη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς όμοιων ή παρομοίων γαστρών χωρίς την ανάγκη διεξαγωγής πειραμάτων. Συστηματικές σειρές αναπτύσσονται από ερευνητικά κέντρα ανά τον κόσμο εδώ και δεκαετίες με ποικιλία ως προς τη γεωμετρία και τις παραμέτρους σχεδίασης των σκαφών.

Η συστηματική σειρά του Ε.Μ.Π. αποτελεί μια προσπάθεια των καθηγητών του Ε.Μ.Π. Θεοδώρου Λουκάκη και Γρηγορίου Γρηγορόπουλου η οποία ξεκίνησε το 1994. Βασισμένοι σε μια πρόταση των Savitsky, Roper και Benen (1972) για ολισθάκατο με διπλή ακμή, πεπλατυσμένο καθρέπτη στην πρύμνη, στρεβλή επιφάνεια ολίσθησης (warped) και πολύ λεπτόγραμμη πλώρη, η οποία παρουσίαζε πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά σε κυματισμούς στις υψηλές ταχύτητες που λειτουργούσε, οι καθηγητές συνδύασαν χαρακτηριστικά της γάστρας της συστηματικής σειράς 62 και κατασκεύασαν το πατρικό σκάφος της σειράς του Ε.Μ.Π. «NTUA/097-94».

Στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. πραγματοποιήθηκαν πειράματα αντίστασης τόσο του πατρικού σκάφους όσο και τεσσάρων προτύπων άλλων γνωστών σειρών με αντίστοιχα χαρακτηριστικά, τα αποτελέσματα των οποίων κατέδειξαν την υπεροχή του προτύπου στον τομέα της αντίστασης. Το «NTUA/097-94» παρουσίαζε μειωμένη αντίσταση σε σχέση με τα άλλα σκάφη στην προ-ολίσθησης περιοχή, ενώ οι αντιδιαβροχικές λωρίδες αντί να βελτιώνουν τη συμπεριφορά του μειώνοντας τη δεχόμενη αντίσταση, τη δυσχέραιναν (Μάζης, 2013, σ. 39).

Τα πολύ θετικά αποτελέσματα των πειραμάτων, αλλά και η θέληση να αυξηθεί η χρησιμότητα του έργου, οδήγησαν τους καθηγητές κ.κ. Λουκάκη και Γρηγορόπουλο στην απόφαση να αναπτυχθεί η συστηματική σειρά του Ε.Μ.Π. με πατρικό το σκάφος «NTUA/097-94». Το πατρικό είχε λόγο μηκών $L/B = 5.50$, χαρακτηριστικό το οποίο αποτέλεσε τη βασική παράμετρο για τη σχεδίαση

και κατασκευή των υπολοίπων σκαφών της σειράς. Η δεύτερη κύρια παράμετρος της σειράς ήταν ο συντελεστής εκτοπίσματος (C_{dl}), μια παραλλαγή εν πολλοίς του συντελεστή $L/\nabla^{1/3}$ που χρησιμοποιείται έντονα από άλλες συστηματικές σειρές (Γερογιαννάκη, 2009, σ. 71).



Εικόνα 10: Σχέδιο γραμμών του πατρικού προτύπου με $L/B=2.50$ της συστηματικής σειράς του Ε.Μ.Π.

Σπουδαία ιδιαιτερότητα της σειράς αποτελούσε η μνεία για συστηματικές δοκιμές σε κυματισμούς, μελέτη που δεν περιλάμβανε καμία άλλη πειραματική σειρά για αντίσταση έως τότε. Ωστόσο, ο περιορισμός που επιβαλλόταν από τις δυνατότητες της δεξαμενής του Ε.Μ.Π. για ταχύτητες πειραμάτων μικρότερες των 5 m/s , ήτοι αριθμό Froude μικρότερο από 1, συνδυασμένος με τη γνώση για την κατασκευή στην Ευρώπη μεγάλων ταχέων επιβατηγών πλοίων, «έσπρωξε» τους σχεδιαστές στην κατεύθυνση των πλοίων με ταχύτητα στην περιοχή Froude από 0.55 έως 0.85 – 0.90, όρια που αντιστοιχούν είτε σε 40 m επιβατηγό ταχύτητας 33 knots ή σε 140 m επιβατηγό-οχηματαγωγό ταχύτητας 40 knots ή σε ιδιωτικό yacht με $L_{wl} = 20 \text{ m}$ με 25 knots (Λουκάκης & Γρηγορόπουλος, 2013, σ. 6).

Τα πρώτα μοντέλα που κατασκευάστηκαν, και αποτέλεσαν το κορμό της συστηματικής σειράς, είχαν λόγους $L/B = 4.00, 4.75, 5.50, 6.25$ και 7.00 προέκυψαν διατηρώντας σταθερή τη μέση τομή του πατρικού σκάφους με $L/B = 5.50$ και τροποποιώντας καταλλήλως τα υπόλοιπα γεωμετρικά μεγέθη. Ήταν κατάλληλα για προκαταρκτική σχεδίαση μονόγαστρων σκαφών με λειτουργία είτε ως εμπορικά (επιβατηγά, ΕΓ/ΟΓ, κρουαζιερόπλοια και πλοία αναψυχής) είτε ως πολεμικά σε μεγάλες ταχύτητες σχεδίασης (ταχύτητες μάχης για τα πολεμικά), όχι όμως σε ταχύτητες ολίσθησης. Αποσκοπούσαν εν ολίγοις σε ελαφριές γάστρες (lightships) με εύρος λειτουργίας σε μεγάλες ταχύτητες και μικρό φορτίο.

Παρά την αρχική επιτυχία της σειράς λόγω ζήτησης από την αγορά για ταχύτερα σκάφη και κάλυψη μεγάλων αποστάσεων σε μικρό χρόνο, η άνοδος της τιμής του καυσίμου λειτούργησε ως τροχοπέδη μια και τα κατέστησε υπερβολικά κοστοβόρα. Παράλληλα αναπτύχθηκαν γάστρες που στην κατηγορία των επιβατηγών προσέφεραν συγκριτικά πολύ μεγαλύτερη μεταφορική ικανότητα για την ίδια απαίτηση ισχύος με αποτέλεσμα τη σταδιακή εγκατάλειψη των σκαφών της σειράς.

Με αφορμή αυτή την εξέλιξη των γεγονότων, αλλά και προκειμένου να καλυφθούν σκάφη μικρότερου ολικού μήκους και εκτοπίσματος, αποφασίστηκε η επέκταση της αρχικής συστηματικής σειράς. Σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δύο επιπλέον μοντέλα, πρώτα αυτό με $L/B = 3.25$ και ύστερα αυτό με $L/B = 2.50$. Το δεύτερο αποτελεί και το αντικείμενο εργασίας της παρούσας μελέτης, τα κύρια χαρακτηριστικά του οποίου παρατίθενται παρακάτω:

Πίνακας 2: Κύρια χαρακτηριστικά προτύπου $L/B=2.50$

L_{OA} [m]	1.769
B_{max} [m]	0.705
D [m]	0.400

2.2 Το πρότυπο με $L/B=2.50$

Σε μια προσπάθεια η επακόλουθη μελέτη του ταχυπλόου της σειράς του Ε.Μ.Π. με $L/B = 2.50$ να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα και στις ανάγκες και απαιτήσεις της αγοράς έγινε μια εκτενής έρευνα των τάσεων που επικρατούσαν και των σκαφών που υπήρχαν στην αντίστοιχη κατηγορία. Η έρευνα εκτελέστηκε με αρχικό και κύριο γνώμονα σύγκρισης το λόγο μηκών L/B των σκαφών και με βασικό σκοπό την εκτίμηση τόσο της κλίμακας γεωμετρικής ομοιότητας λ μεταξύ του μοντέλου και του πλοίου φυσικού μεγέθους όσο και των καταστάσεων φόρτωσης που χρήζουν μελέτης, μέσω του συντελεστή εκτοπίσματος C_{dl} . Πραγματοποιήθηκε έρευνα στις ιστοσελίδες των διαφόρων κατασκευαστών για την εύρεση των κατάλληλων μοντέλων σκαφών και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3: Όμοια ταχύπλοα αγοράς

Όμιλος εταιριών		FERETTI GROUP	Mochi Craft	ITAMA	APREAMARE	RIZZARDI	BERTRAM
Εμπορικό όνομα σκάφους		Ferreti Yachts 450	Dolphin 44	Itama 45S	Apreamare 44	Rizzardi 43TL	Bertram 35
Μήκος στην ίσαλο	L_{wl} [m]	11.39	12.20	10.84	11.02	10.96	9.60
Μήκος μεταξύ καθέτων	L_{BP} [m]	14.20	13.65	13.82	13.50	14.79	9.90
Μέγιστο πλάτος	B [m]	4.30	4.52	3.95	4.53	4.37	3.78
Βύθισμα	T [m]	1.25	1.42	1.33	1.27	-	0.80
Χωρητικότητα δεξαμενής καυσίμων	[Litres]	1400	2550	1130	1650	1600	1173
Εκτόπισμα άφορτου σκάφους	$\Delta_{unladen}$ [tonnes]	17000	21500	12070	16000	14500	7000
Εκτόπισμα έμφορτου σκάφους	Δ_{laden} [tonnes]	20300	26900	15080	19500	18000	9430
Χωρητικότητα δεξαμενής νερού	[Litres]	600	710	330	416	400	189
Κύρια μηχανή		Cummins qsb 6.7	MAN R6-800 CR	Cummins qsb 6.7	VOLVO PENTA D6	Cummins qsb 6.7	Caterpillar C7.1
Ιπποδύναμη	[HP]	550	800	550	435	550	507
Ταχύτητα οπηρεσίας	[knots]	27	28	30	24	30	25
Μέγιστη ταχύτητα	[knots]	31	32	35	28	34	30

Υπολογίστηκαν στη συνέχεια για κάθε σκάφος της λίστας ο συντελεστής εκτοπίσματος (C_{dl}) και ο λόγος μηκών (L/B), καθώς και οι μέσοι όροι των διαστάσεων μήκους (L), πλάτους (B) και των εκτοπισμάτων σε έμφορτη κατάσταση (Δ_{laden}). Από τους υπολογισμούς αυτούς αφενός επιβεβαιώθηκαν οι εκτιμήσεις περί καταλληλότητας του μοντέλου για κατασκευή ταχυπλόων σκαφών μήκους έως 15 μέτρων και αφετέρου επιλέχθηκαν οι καταστάσεις φόρτωσης του μοντέλου προς μελέτη. Σύμφωνα με τις τιμές του συντελεστή εκτοπίσματος που αποφασίστηκαν, υπολογίστηκαν πρώτα οι τιμές του εκτοπίσματος στην κλίμακα του μοντέλου σύμφωνα με τη σχέση:

$$C_{dl} = \frac{\nabla}{(0.1 \cdot L_{wl})^3} \xrightarrow{\nabla = \frac{\Delta}{\rho}}$$

$$\Delta = C_{dl} \cdot (0.1 \cdot L_{wl})^3 \cdot \rho$$

και μετατράπηκαν στη συνέχεια σε τιμές για το πλοίο σε πραγματική κλίμακα σύμφωνα με τις αναλογίες γεωμετρική ομοιότητας που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ι. Συγκεντρωτικά οι επιλεγέντες τιμές :

Πίνακας 4: Επιλεγθείσες τιμές καταστάσεων φόρτωσης για το ταχύπλοο με L/B=2.50

C_{Dl}	Δ_{laden_model} [kg]	λ	Δ_{laden_ship} [kg]
7.00	39.72	7	13964.6
9.00	51.07		17954.9
11.00	62.42		21945.3

3 ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ

3.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να επιτευχθεί μια συνολική και ακριβής μελέτη και αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ταχυπλόου σε ήρεμο νερό ακολουθήθηκε η οδός της εφαρμογής και σύγκρισης τριών διαφορετικών μεθόδων μέτρησης της αντίστασης και συναφών μεγεθών και συγκεκριμένα:

- το πείραμα αντίστασης
- ο κώδικας SWAN2
- η μέθοδος Savitsky

Τόσο οι πειραματικές μετρήσεις όσο και οι υπολογισμοί με χρήση του κώδικα SWAN2 πραγματοποιήθηκαν σε κλίμακα μοντέλου και τα αποτελέσματα αποδόθηκαν ύστερα σε πραγματική κλίμακα πλοίου, ενώ η μέθοδος Savitsky εφαρμόστηκε απευθείας σε πραγματική κλίμακα πλοίου.

Ως γνωστόν, εκτέλεση πειραμάτων αντίστασης υπό κλίμακα και υπό συνθήκες πλήρους ομοιότητας, δηλαδή με ταυτόχρονη ικανοποίηση της ισότητας των αριθμών Reynolds και Froude στις δύο κλίμακες, δεν καθίσταται δυνατή (Πολίτης, 2016, σ. 31). Επιλέχθηκε, επομένως, η χρήση της μεθόδου Froude για την απόδοση των μεγεθών της αντίστασης του ταχυπλόου σε φυσική κλίμακα.

3.2 Μέθοδος Froude

Βασική υπόθεση της μεθόδου Froude αποτελεί η εξάρτηση του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης κυρίως από τον αριθμό Froude και δευτερευόντως από τον αριθμό Reynolds για γεωμετρικά όμοια πρότυπα πλοίων, δηλαδή: $C_R(Re, Fr) = C_R(Fr)$. Θεωρώντας, έτσι, ίδια τιμή του αριθμού Froude μεταξύ μοντέλου (m) και πλοίου (S) προκύπτει: $C_{R,m}(Fr) = C_{R,S}(Fr)$.

Δεδομένων όλων των παραπάνω και γνωρίζοντας την ολική ασκούμενη δύναμη αντίστασης στην κλίμακα του μοντέλου ($R_{T,m}$), η αναγωγή σε φυσική κλίμακα ταχυπλόου εναπόκειται σε μια τυποποιημένη διαδικασία υπολογισμών, τα βήματα της οποίας είναι:

1. Υπολογισμός συντελεστή τριβής μοντέλου¹:

$$C_{F,m} = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re_m - 2))^2}$$

$$\text{όπου } Re_m = \frac{V_m \cdot L_{wl,m}}{\nu_{fw}}$$

2. Υπολογισμός συντελεστή ολικής αντίστασης μοντέλου:

$$C_{t,m} = \frac{R_{T,m}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{fw} \cdot V_m^2 \cdot WS_m}$$

3. Υπολογισμός συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης μοντέλου:

$$C_{R,m} = C_{t,m} - C_{F,m}$$

4. Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης πλοίου:

$$C_{R,S} = C_{R,m}$$

¹ fw : fresh water, γλυκό νερό δεξαμενής

5. Υπολογισμός συντελεστή τριβής πλοίου²:

$$C_{F,m} = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re_S - 2))^2}$$

$$\text{όπου } Re_S = \frac{V_S \cdot L_{wl,S}}{\nu_{sw}}$$

6. Υπολογισμός συντελεστή ολικής αντίστασης πλοίου:

$$C_{T,S} = C_{R,S} + C_{F,S} + C_A$$

όπου $C_A = 0.0004$: συντελεστής συσχέτισεως μοντέλου και πλοίου

7. Υπολογισμός ολικής αντίστασης πλοίου:

$$R_{T,S} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot V_S^2 \cdot WS_S \cdot C_{T,S}$$

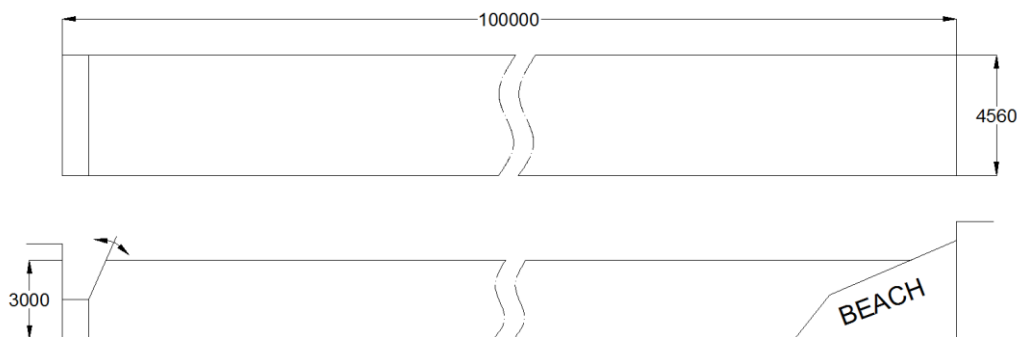
² sw : salt water, αλμυρό νερό θάλασσας

3.3 Πείραμα αντίστασης

Η μελέτη της συμπεριφοράς του ταχυπλόου σε ήρεμο νερό αποτέλεσε το αντικείμενο της πειραματικής διαδικασίας. Για το μοντέλο της σειράς ταχυπλόων του Ε.Μ.Π. με $L/B = 2.50$ εκτελέστηκε πείραμα αντίστασης ρυμούλκησης στην πειραματική δεξαμενή δοκιμών προτύπων του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

3.3.1 Πειραματική εγκατάσταση

Η πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π. έχει μήκος 100 m , πλάτος 4.56 m και μέγιστο βάθος 3.0 m (International Towing Tank Conference, 2016).



Εικόνα 11: : Σχεδιάγραμμα διαστάσεων δεξαμενής δοκιμών προτύπων του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π. από τα στοιχεία της Ι.Τ.Τ.Σ.

Διαθέτει σύστημα παραγωγής κυμάτων (κυματιστήρας) με δυνατότητα παραγωγής ημιτονικών κυματισμών καθώς και τυχαίων θαλάσσιων κυματισμών με συγκεκριμένη φασματική κατανομή, διαδικασία που θα περιγραφεί αναλυτικότερα στη μελέτη του ταχυπλόου σε κυματισμούς. Το σύστημα απόσβεσης των κυματισμών περιλαμβάνει το μηχανισμό του αποσβεστήρα (ή σιδερώστρα), την ακτή (beach) που έχει τη δυνατότητα απόσβεσης έως και 95% της ενέργειας των κυματισμών και τους φελλούς οι οποίοι τοποθετούνται στα πλαϊνά μέρη της δεξαμενής.

Η δεξαμενή είναι ακόμη εξοπλισμένη με φορείο δοκιμών, η κίνηση του οποίου πραγματοποιείται πάνω σε ράγες και στο οποίο προσδένεται κατάλληλα το εκάστοτε μοντέλο. Ο εγκατεστημένος στο φορείο Η/Υ, εξοπλισμένος με αρμόδια προγράμματα, ρυθμίζει τόσο τις κινήσεις του κυματιστήρα, όσο και του φορείου, η μέγιστη ταχύτητα του οποίου ορίζεται 5.2 m/s και ελέγχεται και χάρη στο φρένο του φορείου.

3.3.2 Προετοιμασία προτύπου

Προτού το πρότυπο μοντέλο προσδεθεί στο φορείο της δεξαμενής για την πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών απαιτείται πρώτα η προετοιμασία του. Σε αυτή περιλαμβάνεται αρχικά ο καθαρισμός του και ο προσεκτικός έλεγχός του για τυχόν ρωγμές ή χτυπήματα που χρήζουν επιδιόρθωσης. Έπειτα, υπολογίζεται και επιτυγχάνεται το επιθυμητό βύθισμα του μοντέλου, ενώ εκτιμάται, τέλος, η ακτίνα αδράνειας και υπολογίζεται η περίοδος ιδιοταλάντωσής του. Το μοντέλο προετοιμάστηκε πλήρως για τρεις διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης, διαδικασία η οποία πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα στάδια.

3.3.2.1 Κώδικας HYDRO

Η επιλογή των καταστάσεων φόρτωσης αναλύθηκε προηγουμένως βάσει των όμοιων ταχυπλόων που υπήρχαν στην αγορά, και οδήγησε στις τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή $C_{d1} = 7.00, 9.00$ και 11.00 . Υπολογίστηκαν, επομένως τα αντίστοιχα εκτοπίσματα, οι θέσεις κέντρου βάρους (LCG) και τα βυθίσματα του μοντέλου. Για το σκοπό αυτό αξιοποιήθηκε ο διαθέσιμος από τη σχολή κώδικας HYDRO.

Ο κώδικας HYDRO είναι γραμμένος σε γλώσσα “Modern Fortran” και υπολογίζει τα υδροστατικά μεγέθη σκάφους με δεδομένα τα κύρια χαρακτηριστικά του και τα κατασκευαστικά του στοιχεία. Λόγω της ιδιαιτερότητας του κώδικα να πραγματοποιεί τους υπολογισμούς για κλίμακα πλοίου $\lambda = 10$, τα μεν κύρια χαρακτηριστικά του ταχυπλόου, όπως ολικό μήκος, πλάτος και κοίλο μετατράπηκαν αξιοποιώντας τις αναλογίες πειραματικής και φυσικής κλίμακας, όπως αυτές προκύπτουν από τη γεωμετρική ομοιότητα και παρουσιάζονται στο Παράρτημα I, τα δε σημεία

των νομέων και των προφίλ πλώρης και πρύμνης μετρήθηκαν από το αντίστοιχο σχέδιο γραμμών για δεκαπλάσια κλίμακα. Τα δεδομένα εισήχθησαν με την απαιτούμενη από τον κώδικα μορφοποίηση, πρότυπο αρχείο εισόδου του οποίου παρουσιάζεται στο Παράρτημα ΙΙ.

Εκτελώντας τον κώδικα HYDRO για τρία βυθίσματα, επιλογής μας κάθε φορά, λαμβάνονταν ως αποτέλεσμα το υπολογιζόμενο εκτόπισμα. Με επαναληπτική διαδικασία επιδιώχτηκε η σύγκλιση των εκτοπισμάτων στις υπολογισμένες βάσει του συντελεστή C_{dl} , τα αποτελέσματα της οποίας παρατίθενται στην κλίμακα του μοντέλου στον κάτωθι πίνακα:

Πίνακας 5: Αποτελέσματα σύγκλισης HYDRO σε κλίμακα μοντέλου ($\lambda = 1$) για 3 καταστάσεις φόρτωσης

C_{dl}	Δ [kg]	T [m]	LCG [m]
7	39.54	0.108	0.6019
9	50.90	0.125	0.6048
11	62.23	0.138	0.6085

3.3.2.2 Χάραξη βυθισμάτων

Χάρη στα αποτελέσματα του κώδικα HYDRO κατέστη δυνατή έπειτα η χάραξη των βυθισμάτων στο μοντέλο. Αρχικά, εξασφαλίστηκε πως το επίπεδο ήταν λείο και χωρίς κλίση με τη χρήση επίπεδων πλακών – λαμαρινών και αλφαδιού. Το μοντέλο τοποθετήθηκε ανάποδα ώστε να επιβεβαιωθεί η ευθυγράμμισή του με το επίπεδο και χρησιμοποιώντας τον ηλεκτρονικό ισοϋψή χάρακα χαράχτηκαν επί του μοντέλου τα τρία βυθίσματα με τρεις διαφορετικούς συμβολισμούς προς ευκρίνεια και σε τρία διαφορετικά σημεία, την πρύμνη, το δεξί και το αριστερό μέρος της πλώρης, προς πολλαπλή επιβεβαίωση.

3.3.2.3 Γωνίες διαγωγής και εγκάρσιας κλίσης και έλεγχος βυθίσματος

Το επόμενο στάδιο της προετοιμασίας του μοντέλου περιλάμβανε την τοποθέτηση των βαρών στο σκάφος ώστε αφενός να επιτυγχάνεται η υπολογισμένη τιμή του βυθίσματος και αφετέρου να εξασφαλίζεται τόσο η μηδενική διαγωγή (trim) του όσο και η μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης του.

Πρώτα πρώτα μετρήθηκε η μάζα του κενού σκάφους στη ζυγαριά ακριβείας που διαθέτει η δεξαμενή. Αφού συνυπολογίστηκαν τα απαραίτητα για τη διεξαγωγή των πειραμάτων βάρη, όπως του δυναμόμετρου και της πλάκας πρόσδεσης, βρέθηκε το αναγκαίο ποσό μάζα που έπρεπε να προστεθεί στο σκάφος ως φορτίο για να επιτευχθεί το επιθυμητό εκτόπισμα. Δεδομένου ότι τα πειράματα θα πραγματοποιούνταν μονάχα για την κατάσταση φόρτωσης $C_{dl} = 7.00$, η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε μία φορά με τις εξής μετρήσεις:

Πίνακας 6: Μάζες μοντέλου, φορτίου και λοιπών εξαρτημάτων

Εκτόπισμα (Δ)	Μοντέλο	Πλάκα πρόσδεσης	Δυναμόμετρο	Λοιπό φορτίο
39.54 kg	19.76 kg	0.58 kg	7.36 kg	11.84 kg

Το απαιτούμενο φορτίο συμπληρώθηκε με την τοποθέτηση μαζών («πάπιες»), η ακριβής θέση των οποίων οριοθετήθηκε ύστερα από δοκιμές με το μοντέλο τοποθετημένο μέσα στη δεξαμενή, εξασφαλίζοντας τις μηδενικές γωνίες διαγωγής και εγκάρσιας κλίσης με οπτικό έλεγχο και την απαίτηση η στάθμη του νερού να μην υπερκαλύπτει πουθενά τις χαραγμένες σε τρία σημεία στο σκάφος γραμμές βυθίσματος.

Σημειώνεται πως η πλάκα πρόσδεσης του δυναμόμετρου και το ίδιο το δυναμόμετρο τοποθετούνται στη θέση του κέντρου βάρους, με την ιδιαιτερότητα πως κατά τις δοκιμές στη θέση του δυναμόμετρου τοποθετήθηκε μάζα ίση με τη μάζα του.

3.3.2.4 Ακτίνα αδράνειας και περίοδος ιδιοταλάντωσης

Τέλος, υπολογίστηκε η περίοδος ιδιοταλάντωσης του μοντέλου, συμπεριλαμβανομένων όλων των βαρών, ώστε να ελεγχθεί αν η ακτίνα αδράνειας γύρω από τον κατακόρυφο άξονα είναι αντίστοιχη του πλοίου, γεγονός το οποίο αποτελεί ένδειξη σωστής κατανομής των βαρών.

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

$$T_{\theta} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{I_{zz} \cdot l}{\Delta \cdot a^2 \cdot g}}$$

όπου

- I_{zz} : η ροπή αδράνειας γύρω από τον άξονα $z'z$
- l : το μήκος ανακρέμασης από την κατακόρυφη θέση το κέντρου βάρους
- a : η ημιαπόσταση μεταξύ των στελεχών ανακρέμασης

Γνωρίζοντας ακόμη πως η ροπή αδράνειας δίνεται από τη σχέση:

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

όπου r_{zz} η ακτίνα αδράνειας η οποία έχει υπολογισθεί μέσω όμοιων πλοίων και λαμβάνεται εμπειρικά περίπου ίση με $0.25 \cdot L_{BP}$, η περίοδος ιδιοταλάντωσης υπολογίζεται πλέον από τη σχέση:

$$T_{\theta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{zz}}{a} \cdot \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Το μοντέλο κρεμάστηκε από δύο γάντζους, πακτωμένους σε ειδικό χώρο στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, με απόσταση μεταξύ τους ίση με $2 \cdot a = 56.5 \text{ cm}$ και χρησιμοποιώντας συρματόσχοινο, ώστε το βάρος του να μπορεί να αμεληθεί, οδηγώντας σε μήκος $l = 2.33 \text{ m}$. Συνεπώς υπολογίστηκε:

$$T_{\theta} = 4.867 \text{ s}$$

Ο πειραματικός υπολογισμός της ιδιοπεριόδου πραγματοποιούταν εκτρέποντας το μοντέλο από τη θέση ισορροπίας του κατά μια μικρή γωνία ως προς τον x'x άξονα και αφήνοντάς το να εκτελεί ελεύθερες ταλαντώσεις περί τον κατακόρυφο άξονα του z'z. Χρονομετρούνταν συνολικά 10 πλήρεις ταλαντώσεις και άρα η ιδιοπερίοδος προέκυπτε με διαίρεση:

$$T_{\pi} = \frac{\Delta t}{N} = \frac{\Delta t}{10}$$

Η θεωρητική και η πειραματικά υπολογιζόμενη περίοδος ιδιοταλάντωσης του σκάφους έπρεπε να έχουν παραπλήσιες τιμές. Σε περίπτωση που αυτό δε συνέβαινε, πραγματοποιούταν μετακίνηση των βαρών φορτίου του μοντέλου περί του κέντρου του, με τρόπο τέτοιο ώστε το αλγεβρικό άθροισμα των ροπών να παραμένει σταθερό. Μετά από κάθε τέτοιου είδους μετακίνηση, ελεγχόταν η ισοβύθιστη κατάσταση της ισάλου πλευσης. τοποθετώντας το μοντέλο μέσα στη δεξαμενή με τη βοήθεια γερανού και ιμάντων.

Τελικώς υπολογίστηκε η απόκλιση τοις εκατό μεταξύ πειραματικής και θεωρητικής τιμής σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Απόκλιση \%} = \left| \frac{T_{\pi} - T_{\theta}}{T_{\pi}} \right\% \left| \right.$$

Πίνακας 7: Θεωρητική και πειραματική περίοδος ιδιοταλάντωσης και απόκλιση %

T_{θ}	T_{π}	Απόκλιση %
4.867 s	4.859 s	0.16%

3.3.3 Βαθμονόμηση μετρητικών διατάξεων

Κατά τη διεξαγωγή του πειράματος αντίστασης λαμβάνονται τριών ειδών μετρήσεις της ασκούμενης δύναμης αντίστασης, της κατακόρυφης κίνησης του μοντέλου (heave) και του προνευτασμού (pitch). Οι αισθητήρες, με τη βοήθεια των οποίων αποκτώνται οι τιμές των μεγεθών αυτών, ανήκουν στο δυναμόμετρο R-47 της πειραματικής διάταξης, το οποίο προσδένεται όπως αναφέρθηκε σε ειδική πλάκα στη θέση του κέντρου βάρους του μοντέλου.

Η καταγραφή μετρήσεων είναι ανάλογη της συχνότητας δειγματοληψίας που ορίζεται, με τους αισθητήρες να δίνουν στην έξοδό τους ηλεκτρικό σήμα σε *Volts* το οποίο εν συνεχεία ενισχύεται και καταγράφεται στον Η/Υ του φορείου. Τα ηλεκτρικά σήματα μετατρέπονται από *Volts* σε τιμές φυσικών μεγεθών χάρη στις συναρτήσεις μεταφοράς που καταστρώνονται κατά τη βαθμονόμηση των αισθητήρων.

Δεδομένης της λειτουργίας που επιτελούν κατά την πειραματική διαδικασία, η βαθμονόμηση των μετρητικών διατάξεων αποτελεί θεμελιώδες και αναπόσπαστο κομμάτι της. Κρίνεται άκρως απαραίτητη η άσογη και σωστή λειτουργία τους, ώστε να εξασφαλίζεται η εγκυρότητα και η ακρίβεια των μετρήσεων. Για το λόγο αυτό, η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα και με απόλυτη προσοχή.

Στην παρούσα περίπτωση του πειράματος αντίστασης, ακριβώς πριν την έναρξη της εκτέλεσης του πειράματος βαθμονομήθηκαν και οι τρεις μετρητικές διατάξεις. Για τη βαθμονόμηση της αντίστασης λαμβάνονταν τιμές σε ακινησία του φορείου με προσδεδεμένο το μοντέλο στο δυναμόμετρο όντας πλήρως φορτωμένο με τα βάρη του. Η βαθμονόμηση της κατακόρυφης κίνησης (*heave*) περιλάμβανε την κατακόρυφη μετακίνηση ενός στελέχους του δυναμόμετρου και τη λήψη μέτρησης ανά θέση. Η πλέον απαιτητική βαθμονόμηση ήταν του αισθητήρα που κατέγραφε την κίνηση του προνευτασμού, καθώς απαιτούσε την αποσυναρμολόγηση του δυναμόμετρου από τη σταθερή θέση του για τη λήψη μέτρησης. Από τις βαθμονομήσεις αυτές προέκυψαν οι παρακάτω συναρτήσεις μεταφοράς οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη μετατροπή των μετρήσεων από τις τιμές σε *Volts* στις τιμές σε *kp, cm* και *deg* για την αντίσταση, την κατακόρυφη κίνηση και τον προνευτασμό αντίστοιχα.

Πίνακας 8: Συναρτήσεις μεταφοράς μεγεθών

Αντίσταση (Resistance)	Κατακόρυφη κίνηση (Heave)	Προνευτασμός (Pitch) ³
$y = 2.7364 \cdot x - 0.421$	$y = -4.5761 \cdot x + 25.901$	$y = -2.2775 \cdot x + 0.228$

Σημειώνεται πως λήφθηκε ακόμη μέτρηση για την τιμή της θερμοκρασίας του νερού με τη ρίψη ενός θερμομέτρου εντός τη δεξαμενής και την αναμονή επαρκούς χρόνου.

³ Θεωρήθηκε θετική η έμπρομη διαγωγή και αρνητική η έμπρομη διαγωγή

3.3.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Το πείραμα αντίστασης για το ταχύπλοο με $L/B = 2.50$ πραγματοποιήθηκε για 11 συνολικά ταχύτητες. Θεωρήθηκε ένα εύρος ταχυτήτων λειτουργίας για το υπό μελέτη πλοίο σε ναυτικούς κόμβους (*knots*), με βήμα 2 *knots*, συμπεριλαμβανομένης επίσης και της ταχύτητας διεξαγωγής των δυναμικών πειραμάτων ($F_n = 0.68$). Έπειτα από τις κατάλληλες μετατροπές μονάδων και κλίμακας υπολογίστηκαν οι ταχύτητες διεξαγωγής του πειράματος του μοντέλου στη δεξαμενή.

Πίνακας 9: Ταχύτητες πειράματος αντίστασης

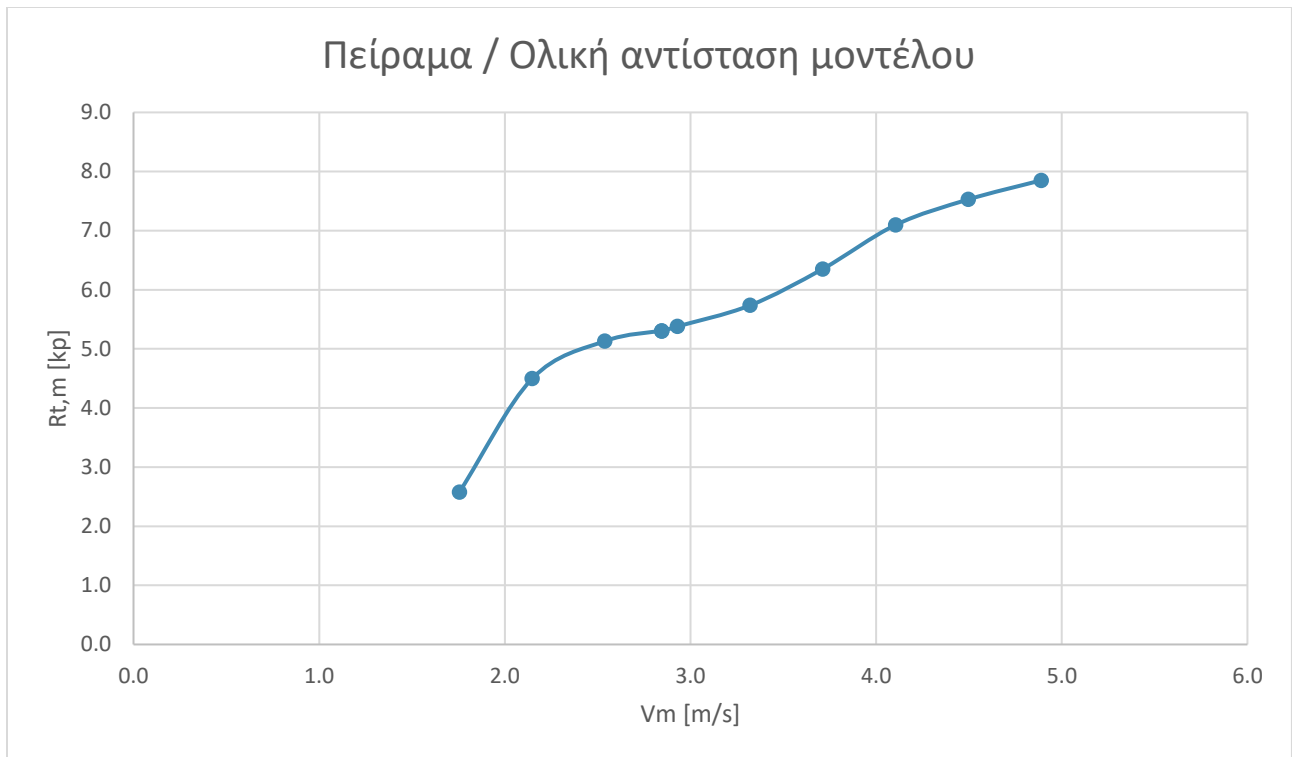
<i>Ship</i>		<i>Model</i>
<i>knots</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>
9	4.630	1.750
11	5.658	2.139
13	6.687	2.528
14.6	7.494	2.832
15	7.716	2.916
17	8.745	3.305
19	9.774	3.694
21	10.802	4.083
23	11.831	4.472
25	12.860	4.861
27	13.889	5.249

Πριν από το «τρέξιμο» κάθε ταχύτητας λαμβανόταν μια μηδενική μέτρηση όλων των τιμών σε ακινησία του φορείου. Στη συνέχεια, η εκάστοτε ταχύτητα εισαγόταν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του φορείου της δεξαμενής και το «τρέξιμο» του φορείου εκκινούσε. Με το που η αναμενόμενη ταχύτητα επιτυγχανόταν, ενεργοποιούνταν οι μετρήσεις σε *Volts*. Οι τελικές μετρήσεις προέκυπταν με αφαίρεση μεταξύ των δύο μετρήσεων.

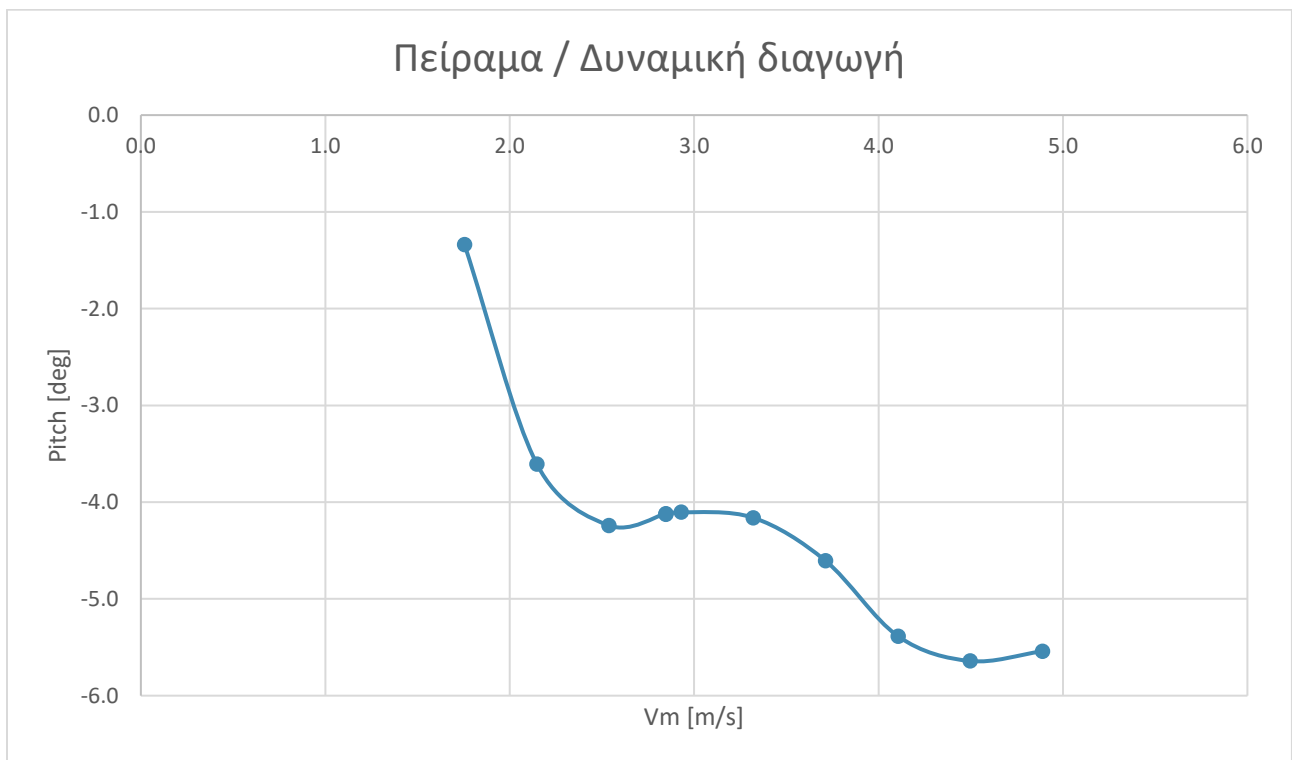
Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε και για τις 11 ταχύτητες με αναμονή περίπου 25 λεπτών μεταξύ των εκτελέσεων ώστε να ηρεμεί το νερό και να αποφεύγονται οι παραμένοντες κυματισμοί από προηγούμενο «τρέξιμο». Τελικώς, αξιοποιώντας τις συναρτήσεις μεταφοράς που υπολογίστηκαν κατά τη βαθμονόμηση των μετρητικών διατάξεων, προέκυψαν οι τελικές τιμές των μεγεθών που παρουσιάζονται τόσο στον παρακάτω πίνακα όσο και στα επακόλουθα διαγράμματα:

Πίνακας 10: Τελικές τιμές μετρήσεων πειράματος αντίστασης

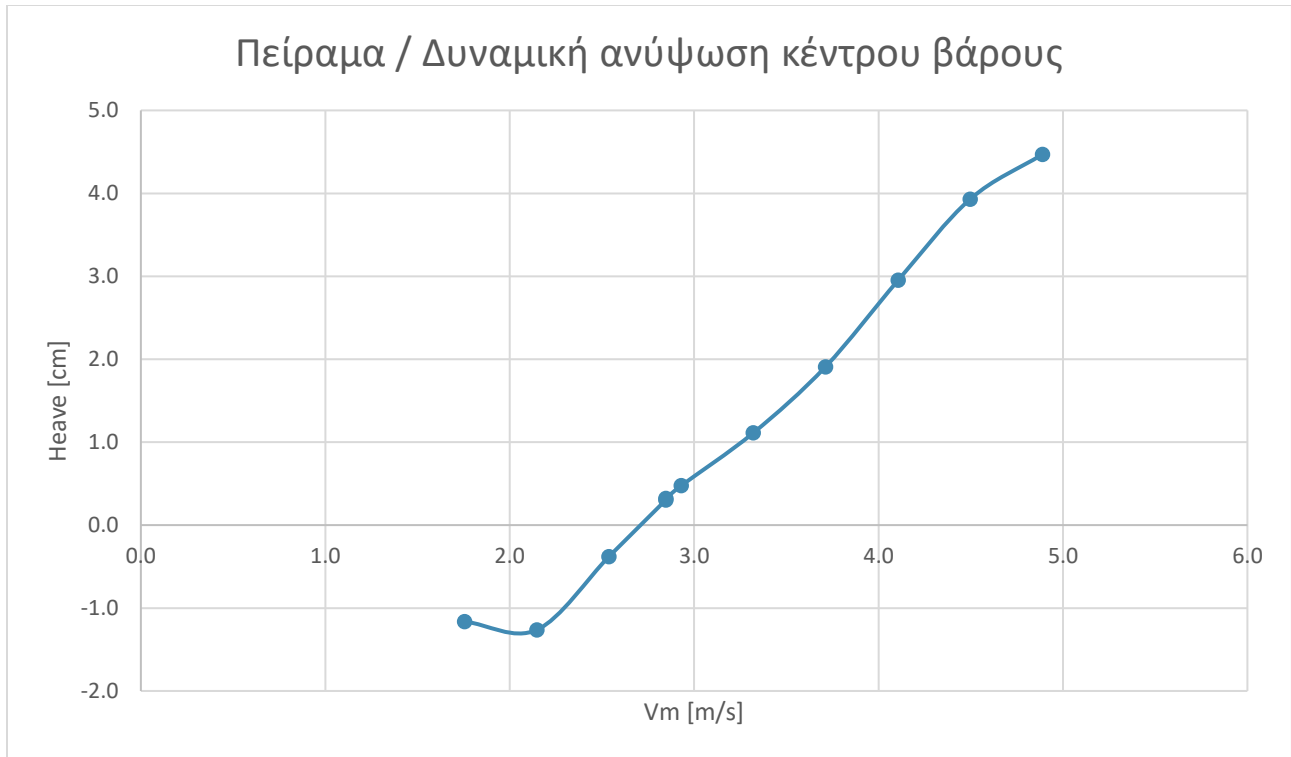
V_m [m/s]	$R_{T,m}$ [kp]	$Pitch$ [deg]	$Heave$ [cm]
1.755	2.575	-1.339	-1.162
2.147	4.496	-3.605	-1.263
2.538	5.131	-4.241	-0.380
2.846	5.306	-4.118	0.302
2.846	5.298	-4.127	0.320
2.930	5.380	-4.104	0.476
3.321	5.735	-4.161	1.112
3.712	6.351	-4.605	1.908
4.106	7.098	-5.386	2.952
4.497	7.528	-5.641	3.931
4.889	7.851	-5.541	4.471



Διάγραμμα 1: Ολική αντίσταση μοντέλου ($R_{T,m}$) συναρτήσει ταχύτητας (V_m) βάσει πειραματικών μετρήσεων

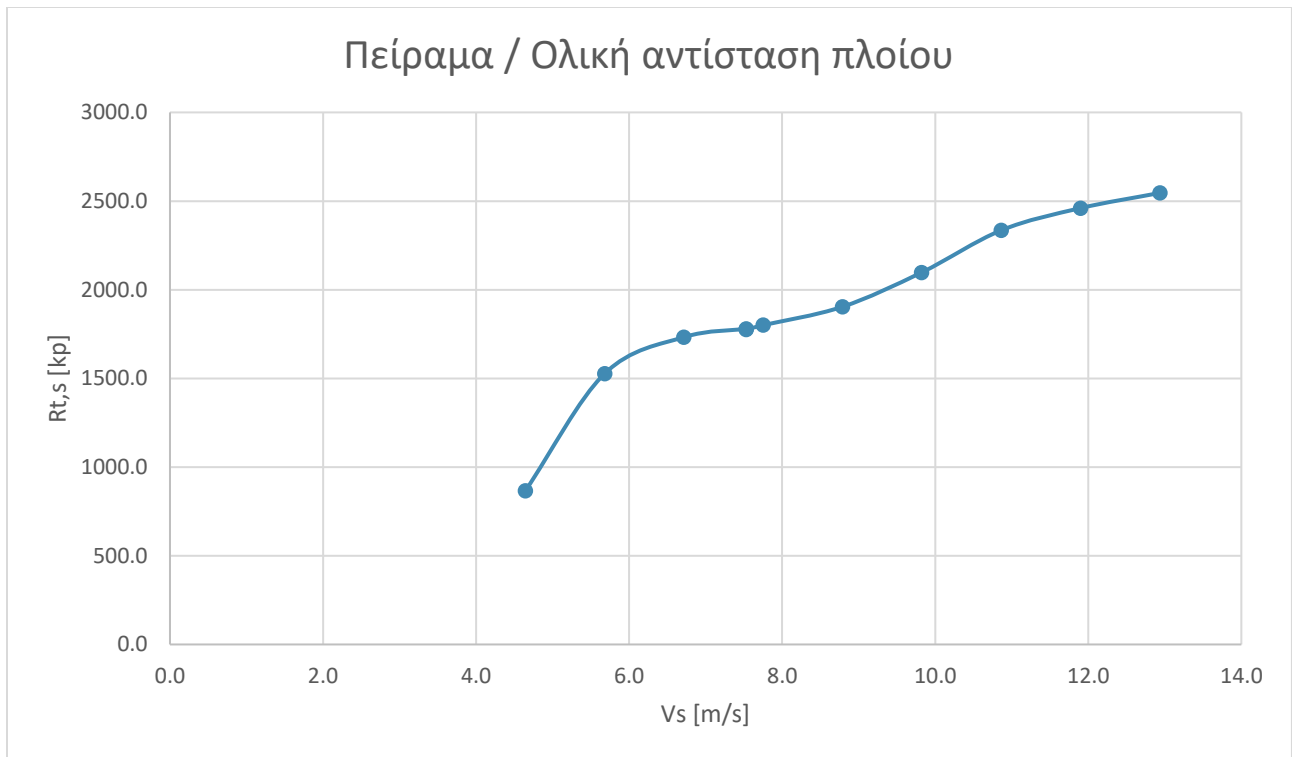


Διάγραμμα 2: Δυναμική διαγωγή μοντέλου (Pitch) συναρτήσει της ταχύτητας (V_m)

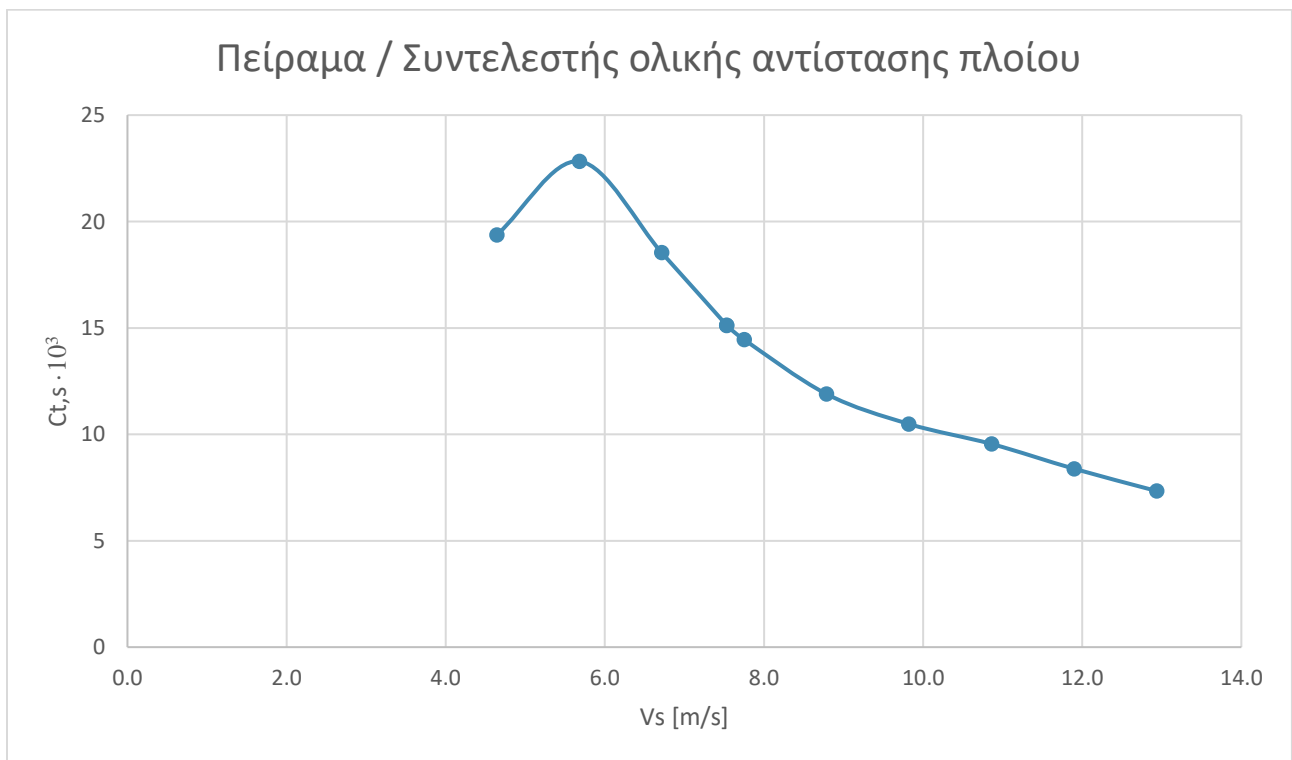


Διάγραμμα 3: Δυναμική ανύψωση του κέντρου βάρους του μοντέλου (*Heave*) συναρτήσει της ταχύτητας (*V_m*)

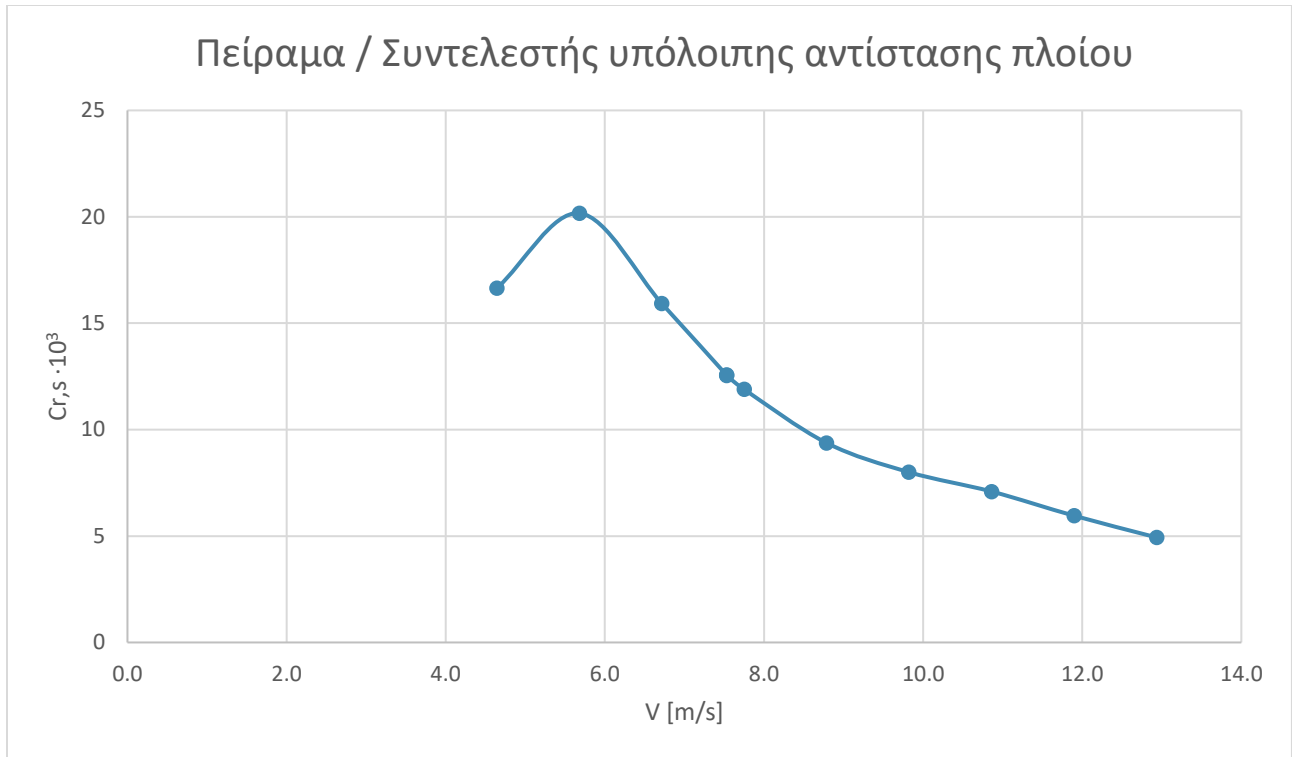
Στη συνέχεια, ακολουθήθηκαν τα βήματα της μεθόδου Froude, όπως αυτά περιεγράφηκαν παραπάνω. Όπου χρειάστηκαν μεγέθη του πλοίου (*S*) αυτά υπολογίστηκαν βάσει των μεγεθών του μοντέλου (*m*) αξιοποιώντας τις αναλογίες πειραματικής και φυσικής κλίμακας, όπως αυτές προκύπτουν από τη γεωμετρική ομοιότητα και παρουσιάζονται στο Παράρτημα I. Αξίζει να σημειωθεί πως οι τιμές της βρεχόμενης επιφάνειας του μοντέλου (WS_m) λήφθηκαν από τον κώδικα υπολογισμού υδροδυναμικής Hydro. Υπολογίστηκαν, έτσι, οι τιμές της ολικής αντίστασης σε φυσική κλίμακα σκάφους, καθώς και οι συντελεστές ολικής και υπόλοιπης αντίστασης, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω συναρτήσει της ταχύτητας.



Διάγραμμα 4: Ολική αντίσταση πλοίου ($R_{T,S}$) συναρτήσει της ταχύτητας (V_S) βάσει πειράματος μέσω Froude



Διάγραμμα 5: Συντελεστής ολικής αντίστασης πλοίου ($C_{T,S}$) συναρτήσει ταχύτητας (V_S) βάσει πειράματος μέσω Froude



Διάγραμμα 6: Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης πλοίου ($C_{T,S}$) συναρτήσει ταχύτητας (V) βάσει πειράματος μέσω Froude

3.4 SWAN2 σε ήρεμο νερό και αποτελέσματα

Στα πλαίσια των μετρήσεων αντίστασης του σκάφους πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί αντίστασης σε κλίμακα μοντέλου χρησιμοποιώντας τον κώδικα SWAN2.

Αρχικά, προκειμένου να οριστεί σαφώς η γεωμετρία του σκάφους, μετρήθηκαν σημεία, τόσο των νομέων όσο και των προφίλ της πλώρης και της πρύμνης, επί του σχεδίου γραμμών. Μετά από τις κατάλληλες μετατροπές των συντεταγμένων τους ως προς το παραπάνω σύστημα συντεταγμένων εισήχθησαν στο αρχείο “.pln” κατά σειρά οι πληροφορίες της πλώρης, των νομέων (συμπεριλαμβανομένης της πρύμνης – καθρέπτη (transom)) και της πρύμνης. Όπου κρίθηκε αναγκαίο, κυρίως σε περιπτώσεις μεγάλων ταχυτήτων λόγω αύξησης της διαγωγής του σκάφους (planning), αποκόπηκε από το αρχείο ο πιο πρωραίος νομέας και προστέθηκε ένα σημείο πιο πρύμα στο προφίλ της πλώρης. Πρότυπο δείγμα αρχείου “.pln” παρατίθεται στο Παράρτημα III.

Ακολούθησε ο καθορισμός των παραμέτρων του πειράματος και η δημιουργία του αρχείου “.inp”. Μεταξύ των δεδομένων που εισήχθησαν περιλαμβάνονταν το αρχικό βύθισμα και η αρχική διαγωγή του σκάφους, η ταχύτητα διεξαγωγής των υπολογισμών, η μάζα εκτοπίσματος, οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους, οι ακτίνες περιστροφής της γάστρας περί των αξόνων, η χρονική διάρκεια και το βήμα της εκάστοτε προσομοίωσης. Πρότυπο δείγμα αρχείου “.inp” παρατίθεται στο Παράρτημα IV.

Αξίζει να σημειωθούν πως οι υπολογισμοί αντίστασης σε ήρεμο νερό εκτελέστηκαν για την επιλεχθείσα κατάσταση φόρτωσης ($CdI=7.00$) και με πλήρη ελευθερία κινήσεων της γάστρας. Η ακτίνα περιστροφής περί των άξονα $x'x$ πάρθηκε ίση με $35\% \cdot B$, ενώ οι ακτίνες περιστροφής περί των αξόνων $y'y$ και $z'z$ θεωρήθηκαν περίπου ίσες με $25\% \cdot L$.

Συνολικά πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για 7 διαφορετικές τιμές Froude και επομένως ταχύτητες. Συγκεκριμένα:

Πίνακας 11: Ταχύτητες εκτέλεσης υπολογισμών στον κώδικα SWAN2

F_n	V [m/s]
0.34	1.416
0.45	1.874
0.55	2.291
0.68	2.832
0.8	3.332
0.9	3.749
1.02	4.249

Για κάθε τιμή ταχύτητας, επαναληπτικές εκτελέσεις του κώδικα οδήγησαν σε σύγκλιση τις τιμές του βυθίσματος και της διαγωγής έως ότου ελαχιστοποιήθηκε το ποσοστό διαφοράς των τιμών τους μεταξύ δύο εκτελέσεων. Από το αρχείο εξόδου “.out” του SWAN2, πρότυπο του οποίου παρατίθεται στο Παράρτημα V, πάρθηκαν οι τιμές της αντίστασης κυματισμών ($R_{W,m}$), του συντελεστή αντίστασης κυματισμών ($C_{W,m}$) και της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας (WS_m):

Πίνακας 12: Αποτελέσματα εκτέλεσης κώδικα SWAN2

F_n	V_m [m/s]	$R_{W,m}$ [kN]	$C_{W,m}$	WS_m [m²]
0.34	1.416	0.017	0.022	0.800
0.45	1.874	0.023	0.017	0.793
0.55	2.291	0.026	0.013	0.780
0.68	2.832	0.028	0.009	0.766
0.8	3.332	0.030	0.007	0.745
0.9	3.749	0.029	0.006	0.720
1.02	4.249	0.029	0.005	0.681

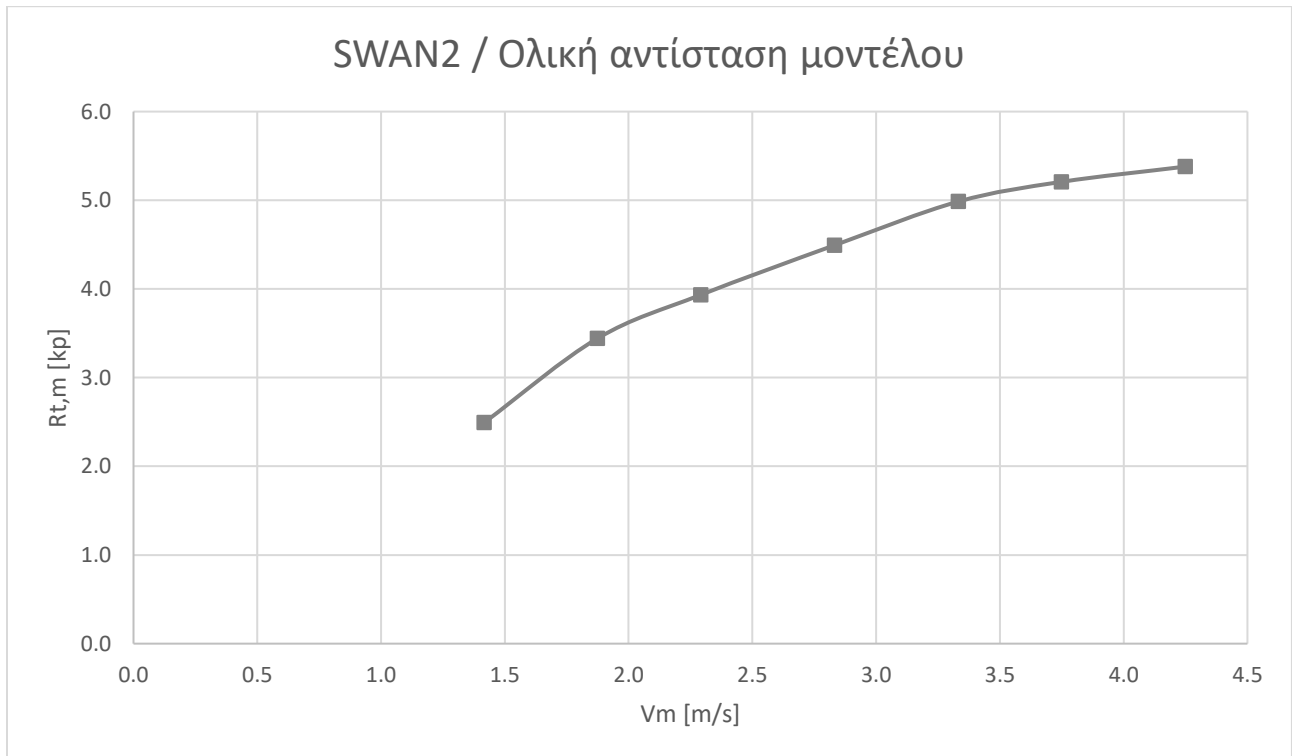
Σύμφωνα με τις μαθηματικές σχέσεις:

- $C_T = C_R + C_F$
- $C_R = k \cdot C_F + C_W$, όπου k : συντελεστής μορφής
- $C_F = \frac{0.066}{(\log_{10} Re - 2.03)^2}$

και με τη θεώρηση ότι το C_W ισοδυναμεί με το 75% του C_R , πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες μετατροπές μονάδων και οι υπολογισμοί ώστε να προκύψει η ολική αντίσταση του μοντέλου συναρτήσει της ταχύτητας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω τόσο σε πίνακα όσο και σε μορφή διαγράμματος.

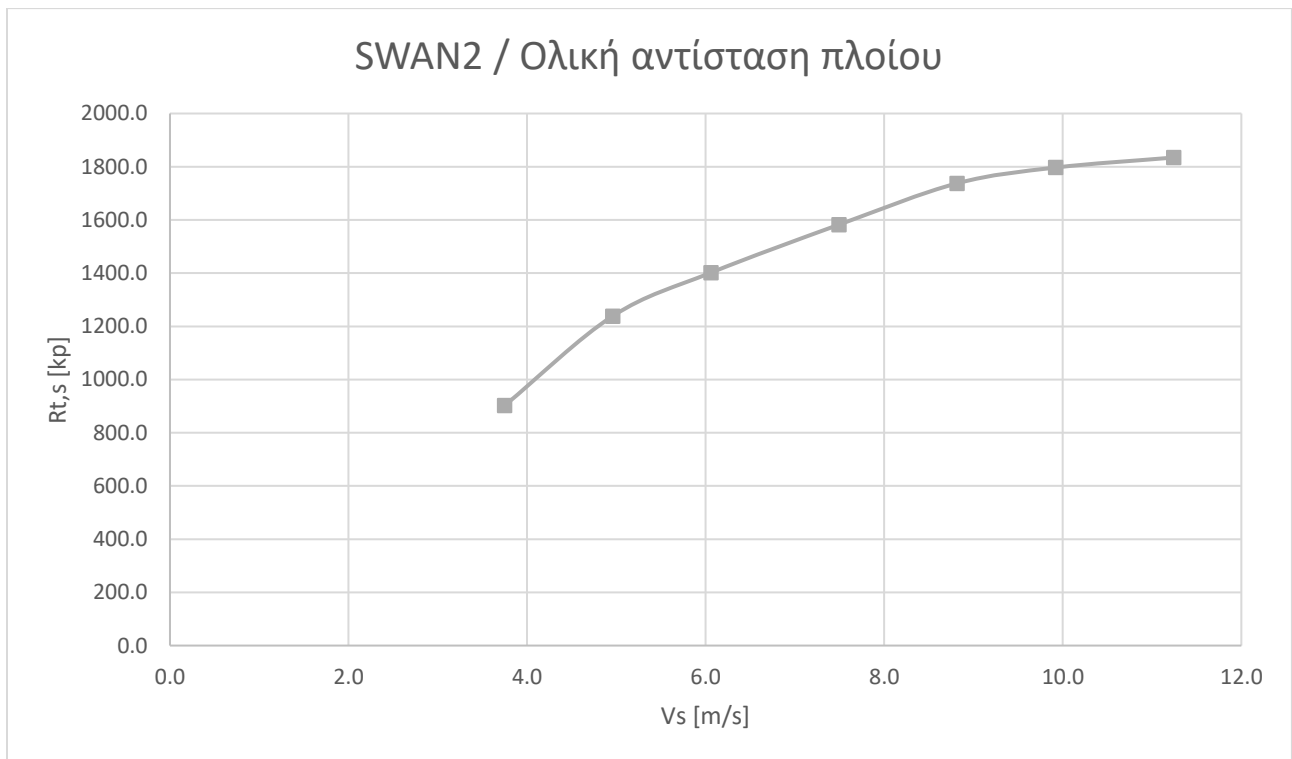
Πίνακας 13: Τιμές ολική αντίστασης μοντέλου ($R_{T,m}$) βάσει SWAN2

V_m [m/s]	$R_{T,m}$ [kp]
1.416	2.492
1.874	3.442
2.291	3.933
2.832	4.493
3.332	4.985
3.749	5.208
4.249	5.379

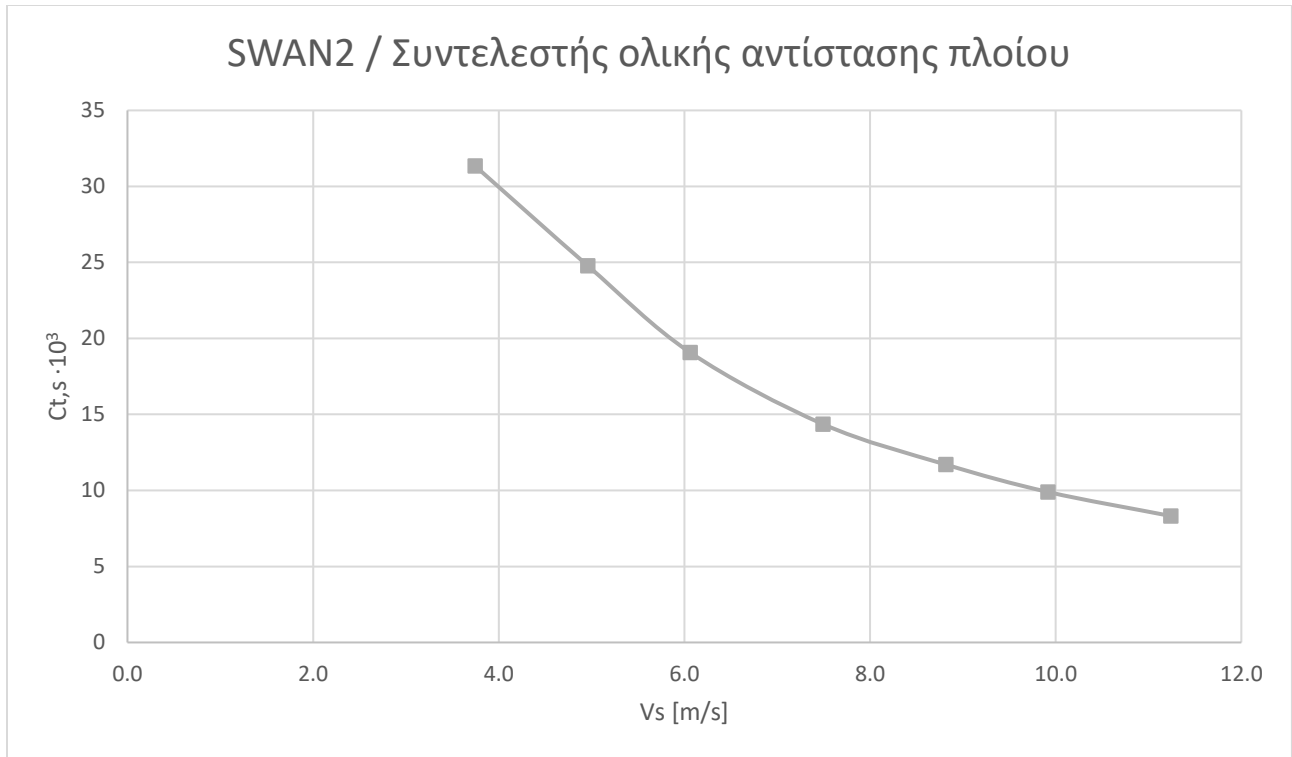


Διάγραμμα 7: Ολική αντίσταση μοντέλου ($R_{T,m}$) συναρτήσει ταχύτητας (V_m) βάσει SWAN2

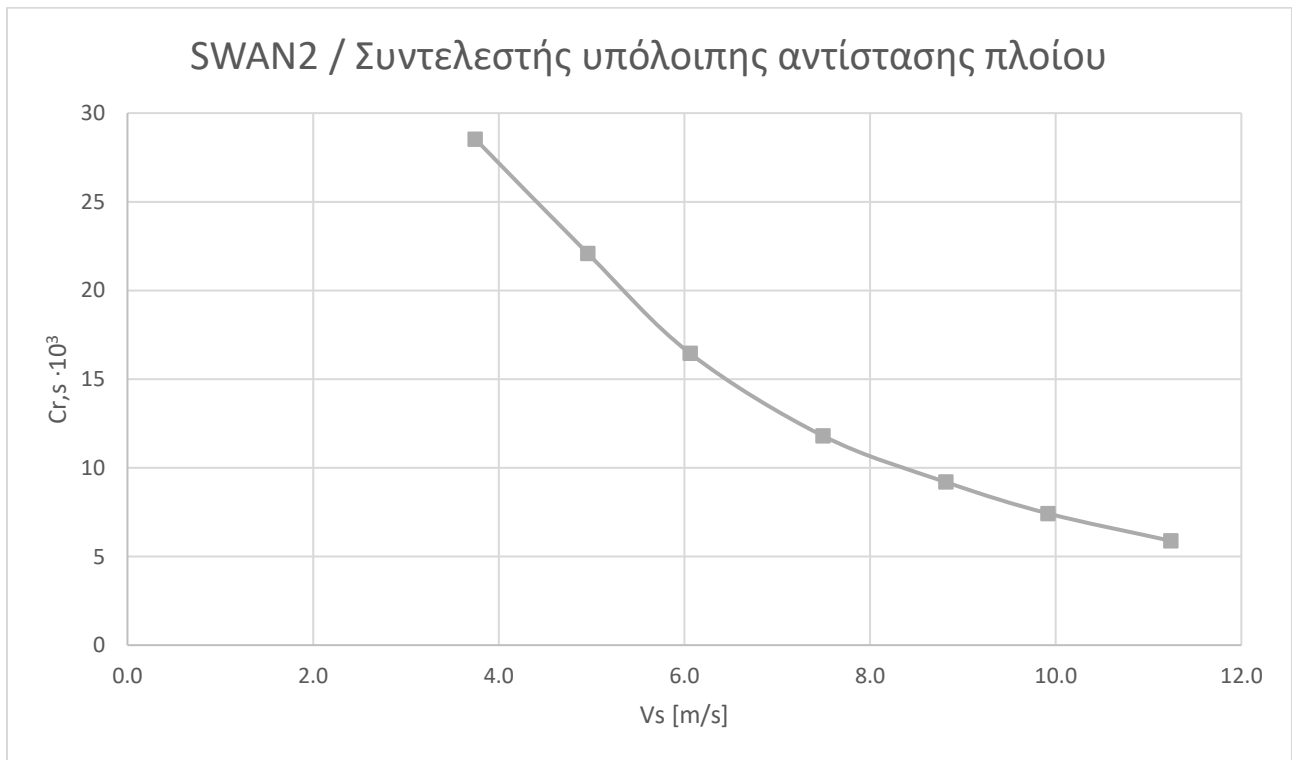
Τέλος, ακολουθήθηκαν εκ νέου τα βήματα της μεθόδου Froude, όμοια με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και με τη διαφορά ότι οι τιμές της βρεχόμενης επιφάνειας του μοντέλου (WS_m) λήφθηκαν από το output αρχείο υπολογισμού της εκάστοτε ταχύτητας. Υπολογίστηκαν, έτσι, οι τιμές της ολικής αντίστασης σε φυσική κλίμακα σκάφους, καθώς και οι συντελεστές ολικής και υπόλοιπης αντίστασης, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω συναρτήσει της ταχύτητας.



Διάγραμμα 8: Ολική αντίσταση πλοίου ($R_{T,s}$) συναρτήσει ταχύτητας (V_s) βάσει SWAN2 μέσω Froude



Διάγραμμα 9: Συντελεστής ολικής αντίστασης πλοίου ($C_{T,S}$) συναρτήσεως ταχύτητας (V_s) βάσει SWAN2 μέσω Froude



Διάγραμμα 10: Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης πλοίου ($C_{R,S}$) συναρτήσεως ταχύτητας (V_s) βάσει SWAN2 μέσω Froude

3.5 Μέθοδος Savitsky

Στοχεύοντας σε περαιτέρω σύγκριση, επιλέχθηκε η χρήση μιας ημι-εμπειρικής μεθόδου υπολογισμού αντίστασης ταχυπλόου σκάφους και συγκεκριμένα η μέθοδος Savitsky. Για τον υπολογισμό της ολικής αντίστασης του σκάφους ακολουθήθηκαν τα βήματα υπολογισμού και εύρεσης μεγεθών της σύντομης μεθόδου Savitsky (Λουκάκης & Γρηγορόπουλος, 1996, σσ. 74-87), όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Αριθμός Froude με βάση το πλάτος:

$$F_B = \frac{V}{\sqrt{g \cdot B}}$$

2. Συντελεστής άνωσης πρισματικού σκάφους:

$$C_{L,\beta} = \frac{W}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot B^2}$$

όπου $W = \Delta [kp]$

3. Συντελεστής άνωσης επίπεδης πλάκας ($C_{L,o}$), μέσω του διαγράμματος 5.13, βάσει των $C_{L,\beta}$ και β

4. Κέντρο πιέσεων: $\frac{Lp}{B}$

5. Λόγος μέσου βρεχόμενου μήκους (λ) και μειωμένος συντελεστής επίπεδης πλάκας $\left(\frac{C_{L,o}}{\tau^{1.1}}\right)$,

μέσω του διαγράμματος 5.20, βάσει των $\frac{Lp}{B}$ και F_B

6. Δυναμική διαγωγή:

$$\tau = \left(\frac{C_{L,o}}{\left(\frac{C_{L,o}}{\tau^{1.1}}\right)} \right)^{\frac{1}{1.1}}$$

7. Συντελεστής δυναμικής άνωσης:

$$C_{L,d} = 0.012 \cdot \lambda^{\frac{1}{2}} \cdot \tau^{1.1} - 0.0065 \cdot \beta \cdot \left(0.012 \cdot \lambda^{\frac{1}{2}} \cdot \tau^{1.1}\right)^{0.6}$$

8. Μέση ταχύτητα πυθμένα:

$$V_M = V \cdot \sqrt{1 - \frac{C_{L,d}}{\lambda \cdot \cos\tau}}$$

9. Διόρθωση βρεχόμενου μήκους λόγω αφρού ($\Delta\lambda$) σύμφωνα με το διάγραμμα 5.18 και τη σχέση:

$$\lambda_F = \lambda + \Delta\lambda$$

10. Αριθμός Reynolds:

$$Re = \frac{V_M \cdot B \cdot \lambda_F}{\nu}$$

11. Συντελεστής τριβής:

$$C_F = \frac{0.455}{(\log_{10} Re)^{2.58}}, \quad 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$$

12. Συντελεστής συσχέτισεως ATTC: $\Delta C_F = 0.004$

13. Βρεχόμενη επιφάνεια τριβής:

$$S_F = \frac{\lambda_F \cdot B^2}{\cos\beta}$$

14. Αντίσταση τριβής:

$$D_F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_M^2 \cdot S_F \cdot (C_F + \Delta C_F)$$

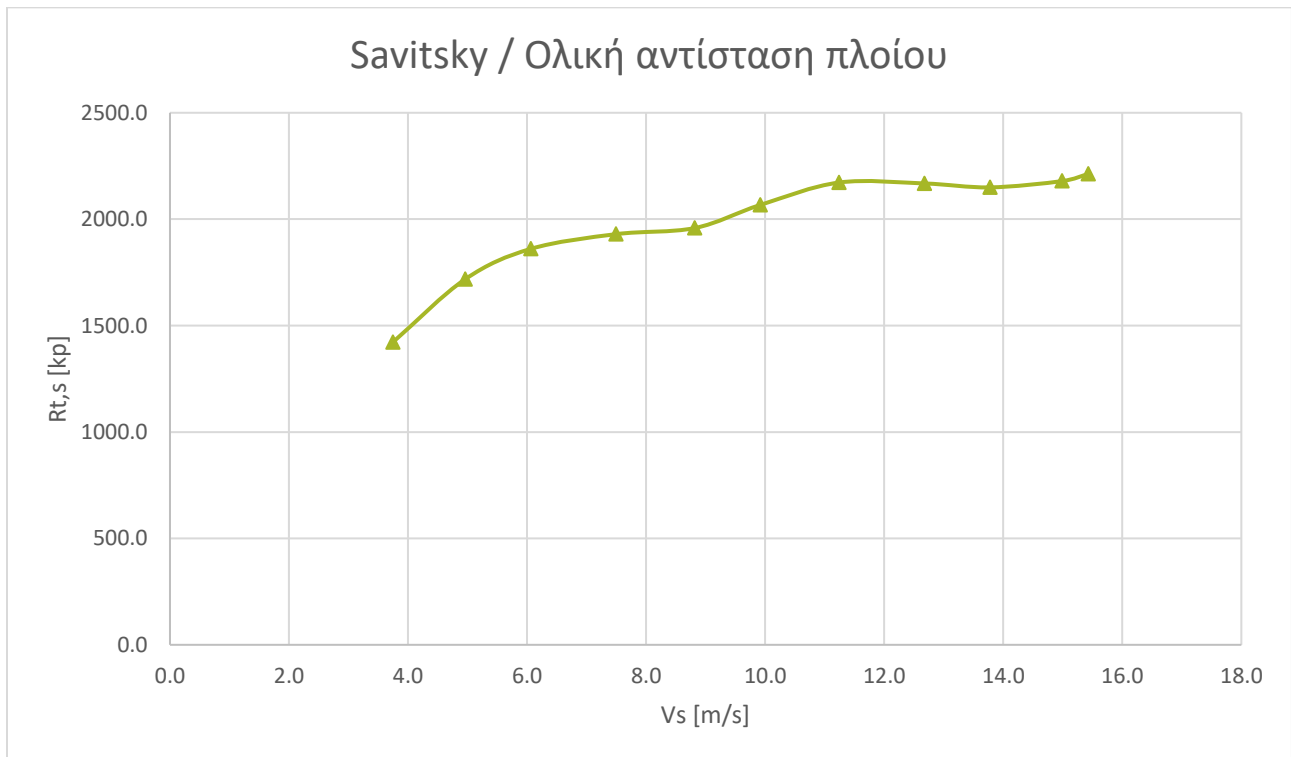
15. Αντίσταση:

$$R_T = W \cdot \tan\tau + \frac{D_F}{\cos\tau}$$

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για 11 τιμές Froude και επομένως τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται παρακάτω τόσο σε πίνακα όσο και σε μορφή διαγράμματος:

Πίνακας 14: Ταχύτητες υπολογισμού με τη μέθοδο Savitsky και προκύπτουσες ολικές αντιστάσεις πλοίου

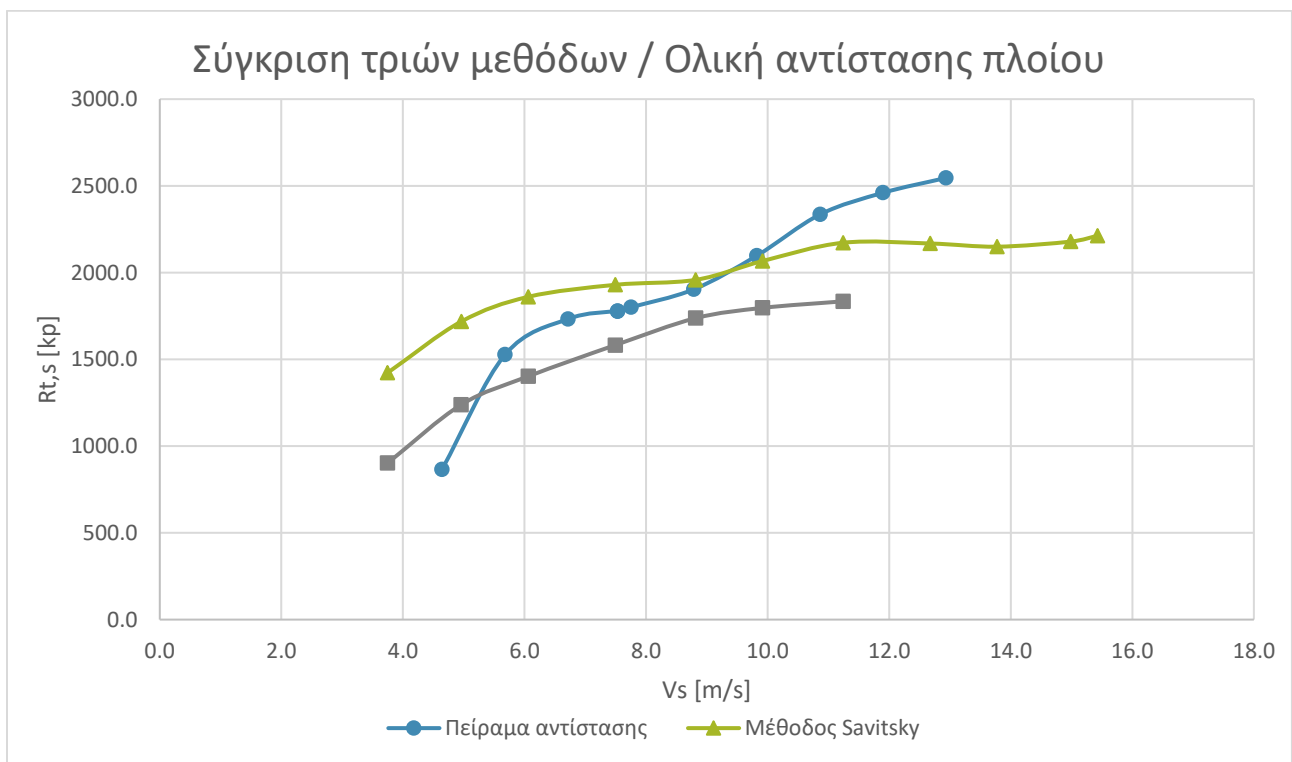
F_n	V_s [m/s]	$R_{T,s}$ [kp]
0.34	3.747	1422.378
0.45	4.959	1717.810
0.55	6.061	1860.536
0.68	7.494	1929.688
0.8	8.816	1958.403
0.9	9.918	2066.905
1.02	11.241	2172.285
1.15	12.674	2167.838
1.25	13.776	2149.455
1.36	14.988	2179.061
1.4	15.429	2212.600



Διάγραμμα 11: Ολική αντίσταση πλοίου ($R_{T,s}$) συναρτήσει ταχύτητας (V_s) βάσει Savitsky

3.6 Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων με κώδικα SWAN2 και μέθοδο Savitsky

Στοχεύοντας στην αξιολόγηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων παρατίθεται παρακάτω συγκριτική παρουσίαση των τιμών της ολικής αντίστασης σε ήρεμο νερό του σκάφους σε πραγματική κλίμακα συναρτήσει της ταχύτητας, όπως αυτές υπολογίστηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας στη δεξαμενή της σχολής, μέσω του κώδικα SWAN2 και κατά την εφαρμογή της ημι-εμπειρικής μεθόδου Savitsky.



Διάγραμμα 12: Συγκριτική παρουσίαση ολικής αντίστασης πλοίου ($R_{T,S}$) συναρτήσει ταχύτητας (V_S) βάσει και των τριών μεθόδων

Παρατηρήθηκε πως οι προκύπτουσες τιμές ολικής αντίστασης της μεθόδου Savitsky και του κώδικα SWAN2 απέκλιναν σημαντικά μεταξύ τους, ενώ οι πειραματικές μετρήσεις βρίσκονταν σε ενδιάμεσα επίπεδα.

Από τη μια μεριά, τα αποτελέσματα του κώδικα SWAN2 υποεκτίμησαν τη δύναμη της ολικής αντίστασης που ασκείται στη γάστρα κατά την κίνησή της σε ήρεμο νερό, γεγονός το οποίο δεν προκαλεί ιδιαίτερη εντύπωση, δεδομένου ότι το υπολογιστικό αυτό πακέτο έχει σχεδιαστεί με σκοπό την παραγωγή αποτελεσμάτων για σκάφη φυσικής κλίμακας, ενώ στην παρούσα μελέτη εκτελέστηκε στην κλίμακα του μοντέλου.

Από την άλλη, τα αποτελέσματα της μεθόδου Savitsky παρουσιάζουν μια υπερεκτίμηση της αντίστασης σε ταχύτητες χαμηλότερες των 3.5 m/s , ενώ σε υψηλότερες ταχύτητες παρατηρείται μια τάση σύγκλισης των τιμών αντίστασης από τη μέθοδο Savitsky με αυτές των πειραματικών.

3.7 Υπολογισμός εγκατεστημένης ισχύος και εκλογή έλικας σκάφους σε φυσική κλίμακα

Όλη η μελέτη η οποία προηγήθηκε και αφορούσε τον υπολογισμό της δύναμης ολικής αντίστασης με τη χρήση τριών διαφορετικών μεθόδων και σύγκριση αυτών μεταξύ τους συμπληρώνεται και ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό της αναγκαίας εγκατεστημένης ισχύος και την εκλογή έλικας προς πρόωση του ταχυπλόου σε κλίμακα πλοίου.

Η έρευνα και εκλογή της έλικας πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να ικανοποιούνται δύο βασικοί περιορισμοί: α) σπηλαίωσης και β) γεωμετρίας. Για το σκοπό αυτό, αναζητήθηκε αρχικά έλικα που να πληροί τα κριτήρια σπηλαίωσης και ύστερα ελέγχθηκαν για την έλικα αυτή οι γεωμετρικοί περιορισμοί.

Με επιλεγείσα ταχύτητα υπηρεσίας $V = 25 \text{ knots}$, βάσει των όμοιων πλοίων της κατηγορίας του στην αγορά, υπολογίστηκε η προκύπτουσα ολική αντίσταση αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, μια και θεωρήθηκαν τα πλέον αξιόπιστα και ρεαλιστικά από τη σύγκριση που προηγήθηκε. Η αντίσταση αυτή προσαυξήθηκε κατά 8%, ώστε να συνυπολογιστεί η αντίσταση του ταχυπλόου λόγω παρελκομένων (σύστημα προωστήριας εγκατάστασης, πηδάλιο, τρόπιδα και παρατροπίδια, αντιδιαβροχικές λωρίδες κ.ά.).

Πίνακας 15: Ταχύτητα και ολική αντίσταση υπολογισμών

V [knots]	V [m/s]	$R_{T \text{ calculated}}$ [kp]	R_T [kp]
25	12.86	2578.07	2784.31

Αξιοποιώντας διαγράμματα από πειράματα αυτοπρώωσης (Λουκάκης & Γρηγορόπουλος, 1996, σ. 120) και σύμφωνα με τον ογκομετρικό αριθμό Froude εκλέχθηκαν οι συντελεστές πρόωσης w και t . Επιλέχθηκε ακόμη η διάμετρος της έλικας ίσης με $D = 0.8 \text{ m}$.

Πίνακας 16: Επιλογές αρχικών μεγεθών

$1 - w$	$1 - t$	$D [m]$
1.00	0.97	0.8

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν ο συντελεστής φόρτισης της έλικας ($\frac{K_T}{J^2}$) και ο αριθμός σπηλαίωσης σ σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{R_T}{\rho \cdot D^2 \cdot V^2 \cdot (1 - w)^2 \cdot (1 - t) \cdot N_{pr}}$$

$$\sigma = \frac{p_A + p_H - p_V}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (V \cdot (1 - w))^2}$$

όπου

- $p_A = 10336 \frac{kp}{m^2}$
- $p_V = 175.7 \frac{kp}{m^2}$
- $p_H = \rho \cdot g \cdot h$
 - $h = T_m + \frac{D}{2} + 0.15 \cdot D$

και δεδομένου ότι μελετήθηκε η εγκατάσταση μίας έλικας ($N_{pr} = 1$) προέκυψαν:

$$\frac{K_T}{J^2} = 0.2592$$

$$\sigma = 1.29$$

Βάσει των υπολογισθέντων αυτών τιμών, πραγματοποιήθηκε έρευνα συμβατότητας έλικας στα διαθέσιμα διαγράμματα ελίκων Wageningen B-Series, Newton-Rader και Gawn-Burill, με διάφορους λόγους εκτεταμένης επιφάνειας EAR (Λουκάκης & Γρηγορόπουλος, 1996, σσ. Γ3-Γ34). Για κάθε μία έλικα και για την τιμή $\frac{K_T}{J^2}$ επιλεγόταν ο λόγος βήματος P/D εκείνος που προσέφερε τη μέγιστη δυνατή απόδοση (η_o) και λαμβανόταν η τιμή του συντελεστή προχωρήσεως (J).

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για δύο διαγράμματα με αριθμούς σπηλαιώσης που εμπεριείχαν την τιμή $\sigma = 1.29$, υπολογίζοντας τις τελικές τιμές με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δύο, και για συνολικά 12 περιπτώσεις ελίκων. Έπειτα, υπολογίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη σύμφωνα με τις σχέσεις που τα συνοδεύουν:

- $K_T = \frac{K_T}{J^2} \cdot J^2$
- $K_Q = \frac{K_T \cdot J}{2 \cdot \pi \cdot \eta_o}$
- $n = \frac{V \cdot (1-w)}{J \cdot D} [RPS]$
- $T = K_T \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4$
- $Q = K_Q \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5$
- $V_{0.7R} = \sqrt{(V \cdot (1-w))^2 + (0.7 \cdot \pi \cdot n \cdot D)^2}$
- $A_P = EAR \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right) \cdot \left(1.067 - 0.229 \cdot \frac{P}{D}\right)$
- $\sigma_{0.7R} = \frac{p_A + p_H - p_V}{\frac{1}{2} \rho \cdot (V_{0.7R})^2}$
- $\tau_C = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho \cdot A_P \cdot (V_{0.7R})^2}$
- $Q_C = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho \cdot D \cdot A_P \cdot (V_{0.7R})^2}$

Οι εξεταζόμενες έλικες ελέγχθηκαν για την καταλληλότητά τους βάσει τριών κριτηρίων (Λουκάκης & Γρηγορόπουλος, 1996, σσ. 130-132):

Το 1^ο κριτήριο εξετάζει εάν η σπηλαιώση καλύπτει το 10% της πίσω όψης το πτερυγίου και ισχύει:

$$\tau_{C_{10\%BackCavitation}} = 0.494 \cdot (\sigma_{0.7R})^{0.88}$$

Το 2^ο κριτήριο εξετάζει τη στιγμή όπου η σπηλαιώση αρχίζει να επιδρά πτωτικά στην αποδιδόμενη ώση της έλικας και ισχύει:

$$\tau_{C_{K_T Breakdown}} = 0.7 \cdot (\sigma_{0.7R})$$

Το 3^ο κριτήριο εκφράζει το έσχατο όριο της φόρτισης και διαφοροποιείται για κάθε είδος έλικας.

- Για Wageningen B-Series:
 - $\tau_{C\ limit} = 1.27 \cdot (\sigma_{0.7R})$
 - $Q_{C\ limit} = \left(-0.0167 + 0.247 \cdot \left(\frac{P}{D}\right)\right) \cdot (\sigma_{0.7R})^{1.04}$
- Για Gawn-Burill:
 - $\tau_{C\ limit} = \max \left[(1.2 \cdot \sigma_{0.7R}), \left(0.0725 \cdot \left(\frac{P}{D}\right) - 0.034 \cdot EAR \right) \right]$
 - $Q_{C\ limit} = \max \left[\left(0.2 \cdot \left(\frac{P}{D}\right) \cdot (\sigma_{0.7R}^{0.7+0.31 \cdot EAR}) \right), \frac{1}{EAR^{\frac{1}{3}}} \cdot \left(0.0185 \cdot \left(\frac{P}{D}\right)^2 - 0.0166 \cdot \left(\frac{P}{D}\right) + 0.00594 \right) \right]$
- Για Newton-Rader:
 - $\tau_{C\ limit} = \max \left[\left(\left(0.703 + 0.25 \cdot \left(\frac{P}{D}\right) \right) \cdot \left(\sigma_{0.7R}^{0.65+0.10 \cdot \left(\frac{P}{D}\right)} \right) \right), \left(-0.0142 \cdot EAR + 0.0833 \cdot \left(\frac{P}{D}\right) \right) \right]$
 - $Q_{C\ limit} = \max \left[\left(\left(-0.012 + 0.24 \cdot \left(\frac{P}{D}\right) \right) \cdot \left(\sigma_{0.7R}^{0.5+0.165 \cdot \left(\frac{P}{D}\right)} \right) \right), \left(-0.024 \cdot (EAR)^{\frac{1}{2}} + 0.0335 \cdot \left(\frac{P}{D}\right) \right) \right]$

Για κάθε μία εξεταζόμενη έλικα έπρεπε οι τιμές τ_C και Q_C να είναι μικρότερες των αντίστοιχων τιμών και των τριών κριτηρίων ώστε να κρίνεται κατάλληλη. Μόνο μία από τις εξεταζόμενες έλικες κρίθηκε κατάλληλη, με χαρακτηριστικά:

- Τύπος: Gawn – Burill 3-πτερη
- $EAR = 1.18$
- $\eta_o = 0.681$
- $P/D = 1.4$
- $n = 1000\ RPM$

για την οποία προέκυψε:

Πίνακας 17: Έλεγχος κριτηρίων επιλεχθείσας έλικας

Έλικα		1 ^ο κριτήριο	2 ^ο κριτήριο	3 ^ο κριτήριο	
τ_c	Q_c	$\tau_{C_{10\%BackCavitation}}$	$\tau_{C_{KTBreakdown}}$	$\tau_{C_{limit}}$	$Q_{C_{limit}}$
0.1209	0.0272	0.1238	0.1452	0.3039	0.0684

Βάσει της επιλεχθείσας πλέον έλικας, υπολογίστηκε η αναγκαία και απαραίτητη ισχύς της μηχανής, ισχύς η οποία πρέπει να αποδίδεται προκειμένου να υπερνικηθεί η δύναμη της αντίστασης και το πλοίο να προωθηθεί. Η ισχύς αυτή υπολογίστηκε αρχικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$SHP = \frac{EHP}{\eta_o \cdot \eta_H \cdot \eta_R \cdot \eta_S} \Rightarrow$$

$$SHP = 729.8 PS$$

όπου η ισχύς ρυμουλκήσεως υπολογίστηκε βάσει της προσαυξημένης λόγω παρελκομένων ολικής αντίστασης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$EHP = \frac{R_T \cdot V}{75}$$

και οι συντελεστές πάρθηκαν ως εξής:

$$\eta_H = 0.97$$

$$\eta_R = 1.00$$

$$\eta_S = 0.99$$

Ως είθισται στα ταχύπλοα, η έλικα και κατ' επέκταση όλο το προωστήριο σύστημα βρίσκονται σε κλίση, η οποία ωστόσο δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 12° ώστε να εξασφαλίζεται η λίπανση και η καλή λειτουργία της μηχανής. Δεδομένης της διαμέτρου της έλικας $D = 0.8 m$, εκτιμώντας ένα περιθώριο ανοχής μεταξύ έλικας και γάστρας $d = 0.15 m$, της τάξης δηλαδή του 15% – 20% (Λουκάκης & Γρηγορόπουλος, 1996, σ. 127) και επιλέγοντας μήκος ελικοφόρου άξονα ίσο με $l_{\acute{\alpha}\xi\omicron\nu\alpha} = 3.0 m$, υπολογίστηκε η σχηματιζόμενη γωνία κλίσης $\omega \cong 10.4^\circ$. Η γωνία αυτή βρισκόταν εντός του επιτρεπόμενου ορίου και επομένως ήταν αποδεκτή.

Εξ αιτίας της κλίσης ω που περιεγράφηκε, ένα μέρος της αποδιδόμενης από τη μηχανή στην έλικα ισχύ αναλίσκεται σε μια κατακόρυφη συνιστώσα δύναμης η οποία δε συνεισφέρει στην πρόωση του σκάφους. Για την υπολογισθείσα γωνία ω , η προς πρόωση εκμεταλλευόμενη ισχύς βρέθηκε περίπου ίση με το 98.4% της παραγόμενης SHP . Λήφθηκε, επομένως, μια προσαύξηση της ισχύος της μηχανής ώστε να αναπληρωθεί το «χαμένο κομμάτι» ισχύος και προέκυψε:

$$SHP' = 1.016 \cdot SHP = 730.3 PS$$

Τέλος, προκειμένου η μηχανή του ταχυπλόου να μη λειτουργεί συνεχώς στο σημείο λειτουργίας της μέγιστους συνεχούς ισχύος της, αλλά και για να συνυπολογιστούν παράγοντες όπως η ρύπανση της γάστρας, οι κακές καιρικές συνθήκες και η ενδεχόμενη παλαιότητα με το πέρασ κάποιου χρονικού διαστήματος, επιλέχθηκε η προσαύξηση της ισχύος κατά 15% και προέκυψε:

$$SHP_{final} = 1.15 \cdot SHP' = 839.8 PS \Rightarrow$$

$$SHP_{final} \cong 840 PS$$

4 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

4.1 Εισαγωγή

Για τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς ενός σκάφους στην πειραματική δεξαμενή απαιτείται η εκλογή της εξεταζόμενης κατάστασης φόρτωσης (C_{dl}), της ταχύτητας εκτέλεσης των πειραμάτων (μέσω του αριθμού Froude) και του είδους των παραγόμενων κυματισμών. Για το ταχύπλοο της σειράς του Ε.Μ.Π. με $L/B = 2.50$ και στα πλαίσια της παρούσας μελέτης αποφασίστηκαν:

- $C_{dl} = 7.00$
- $Fn = 0.68 \Rightarrow V = 2.832 \text{ m/s}$
- Τυχαίοι κυματισμοί όπως αυτοί προκύπτουν για $T_p' = 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5$, και 5.0

Προτού ξεκινήσουν τα πειράματα στη δεξαμενή με το ταχύπλοο προσδεδεμένο στο φορείο, όποτε και λαμβάνονται οι επιθυμητές μετρήσεις, απαιτείται η παραγωγή, η μέτρηση και ο έλεγχος των καταστάσεων θάλασσας που θα χρησιμοποιηθούν.

Δυστυχώς, λόγω τεχνικής βλάβης που παρουσιάστηκε στο φορείο της πειραματικής δεξαμενής του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Ε.Μ.Π. δεν κατέστη δυνατή η επιτυχής ολοκλήρωση των πειραματικών δοκιμών που είχαν προγραμματιστεί. Συγκεκριμένα, δεν πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα μελέτης δυναμικής συμπεριφοράς του ταχυπλόου σε τυχαίους κυματισμούς. Αντ' αυτών αποφασίστηκε η εκτέλεση υπολογισμών μέσω του προγραμματιστικού κώδικα SWAN2, όπως παρουσιάζεται και στη συνέχεια.

4.2 Κριτήρια άνετης και ασφαλούς πλεύσης ταχυπλόων σκαφών σε κυματισμούς

Καθ' όλη τη διάρκεια πλεύσης ενός σκάφους στη θάλασσα διαθέτει, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έξι βαθμούς ελευθερίας κινήσεων. Οι κινήσεις αυτές αναλόγως τη σχεδίαση του ίδιου του σκάφους και τη δυσμέμεια των επικρατουσών καιρικών συνθηκών μπορούν να εξελιχθούν σε πολύ έντονες, ιδίως στην περίπτωση των ταχυπλόων σκαφών που πλέουν σε μεγάλες ταχύτητες. Λόγω αυτού θεσπίστηκαν κατά το πέρας των δεκαετιών ορισμένοι κανόνες λειτουργικότητας ώστε οι απότομες κινήσεις του σκάφους να μη ξεφεύγουν από τα πλαίσια ανοχή των επιβαινόντων.

Από τις πρώτες και πληρέστερες μελέτες επί του θέματος πραγματοποιήθηκε από τον οργανισμό NORDIC⁴ το 1987. Βασισμένα τόσο σε πειραματικές μετρήσεις όσο και σε παρατηρήσεις επί πραγματικής κλίμακας και κανονικές συνθήκες λειτουργίας, τα κριτήρια επιτρεπτών ορίων των κινήσεων του πλοίου προκύπτουν σύμφωνα με το ποσοστό του χρόνου ικανοποιητικής λειτουργίας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα όρια αυτά για τρεις μεγάλες κατηγορίες σκαφών και για έξι κύριες περιπτώσεις (Nordforsk, 1987; Γερογιαννάκη, 2009, σ. 64):

Πίνακας 18: Κριτήρια λειτουργικότητας άνετης και ασφαλούς πλεύσης για διάφορα πλοία

	Εμπορικά πλοία	Ναυτικά πλοία	Μικρά ταχύπλοα σκάφη
<i>RMS κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη</i>	0.05 · g (L > 300m) 0.16 · g (L > 200m) 0.3 · g (L > 100m)	0.275 · g	0.65 · g
<i>RMS κατακόρυφης επιτάχυνσης στη γέφυρα</i>	0.15 · g	0.2 · g	0.275 · g
<i>RMS εγκάρσιας επιτάχυνσης στη γέφυρα</i>	0.12 · g	0.1 · g	0.1 · g
<i>RMS διατοιχισμού</i>	6.0 deg	4.0 deg	4.0 deg
<i>Πιθανότητα σφυρόκρουσης</i>	0.01	0.03	0.03
<i>Πιθανότητα διαβροχής καταστρώματος</i>	0.05	0.05	0.05

⁴ Ο οργανισμός NORDIC λειτουργεί πλέον υπό τον ευρύτερο οργανισμό NORDFORSK

4.3 Καταστάσεις θάλασσας

Σχεδιάστηκε η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του ταχυπλόου σε συνολικά έξι καταστάσεις θάλασσας. Τα φάσματα των κυμάτων αυτών παράχθηκαν από τον κυματιστήρα της δεξαμενής και δημιουργήθηκαν με χρήση του διπαραμετρικού φάσματος του *Bretschneider* που ορίζεται με την βοήθεια δύο παραμέτρων, της συχνότητας κορυφής (ω_p) και του σημαντικού ύψους κύματος (H_s). Επιλέχθηκαν, επομένως, έξι φάσματα βάσει της αδιάστατης περιόδου κύματος (T_p') για τιμές από 2.5 έως και 5.0 με βήμα 0.5, καθώς και για επιλεγμένα σημαντικά ύψη κύματος H_s . Τα λοιπά χαρακτηριστικά μεγέθη των τυχαίων κυματισμών, όπως οι περίοδοι κορυφής και το μήκος κύματος υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά σε πίνακα.

$$T_p = T_p' \cdot \sqrt{\frac{L}{g}} \quad \omega_p = \frac{2 \cdot \pi}{T_p} \quad \lambda_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot g}{\omega_p^2} \quad f = \frac{1}{T_p}$$

Πίνακας 19: Καταστάσεις θάλασσας δοκιμών ταχυπλόου L/B=2.50

T_p'	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
$T_{p_{Ship}}$ [s]	2.809	3.371	3.933	4.494	5.056	5.618
$T_{p_{model}}$ [s]	1.062	1.274	1.486	1.699	1.911	2.123
$\omega_{p_{model}}$ [rad/s]	5.918	4.932	4.227	3.699	3.288	2.959
λ_p [m]	1.759	2.533	3.448	4.504	5.700	7.037
f_{model} [Hz]	0.942	0.785	0.673	0.589	0.523	0.471
$H_{s_{model}}$ [m]	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16
Συντομογραφία	h09t1062	h10t1274	h11t1486	h12t1699	h14t1911	h16t2123

Προτού το μοντέλο εισαχθεί στη δεξαμενή για την εκτέλεση των δυναμικών πειραμάτων ήταν απαραίτητη η παραγωγή και ο έλεγχος των τυχαίων κυματισμών στους οποίους θα μελετιόταν η συμπεριφορά του ταχυπλόου.

4.3.1 Βαθμονόμηση αισθητήρα

Υποχρεωτική και καίριας σημασίας για την αξιοπιστία και την ακρίβεια των δεδομένων που λαμβάνονταν αποτελούσε, όμοια με το πείραμα της αντίστασης, η εργασία βαθμονόμησης του οργάνου μέτρησης. Η μέτρηση της ανύψωσης του κύματος πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ακίνητου αισθητήρα (Wave Tank Probe), προσδεδεμένου σε σταθερό σημείο στη δεξαμενή, σχετικά κοντά στον κυματιστήρα.

Το Wave tank Probe λαμβάνει μετρήσεις μέσω διπλού μεταλλικού στελέχους βυθισμένου στο νερό. Τα δύο μεταλλικά στοιχεία μπορούν να θεωρηθούν σαν οπλισμοί ενός πυκνωτή και το νερό σαν διηλεκτρικό μέσο. Οι μετρήσεις δίνουν ένα μέτρο του μεγέθους της βύθισης και καταγράφονται ως τάσεις μέσω ειδικού προγράμματος στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του φορείου. Έτσι, για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός τους ώστε να δοθούν τα αποτελέσματα από μονάδες μέτρησης *Volts* στις επιθυμητές μονάδες, μετασχηματισμός για τον οποίο πρέπει να καταστρωθεί η αντίστοιχη συνάρτηση μεταφοράς. Λόγω την ευαισθησίας του οργάνου, η διαδικασία της βαθμονόμησής του πραγματοποιούταν κάθε μέρα πριν από την εκκίνηση των μετρήσεων.

4.3.2 Παραγωγή και μέτρηση τυχαίων κυματισμών

Η παραγωγή των επιθυμητών κυματισμών στη δεξαμενή του Εργαστηρίου πραγματοποιούταν με τη χρήση του συστήματος του κυματιστήρα μέσω του προγράμματος H/Y WGEN.

Στην πειραματική δεξαμενή του Ε.Μ.Π. εφαρμόζεται μια τεχνική παραγωγής ψευδο-τυχαίου κυματισμού με δεδομένη ενεργειακή κατανομή (φάσμα). Το σχετικό πρόγραμμα WGEN, που αναπτύχθηκε από τον καθηγητή Γ. Γρηγορόπουλο (1981), είναι ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Basic 7.0, το οποίο μπορεί να παράγει τρία είδη κυμάτων: ημιτονικούς, τυχαίους κυματισμούς με δεδομένο φάσμα και παροδικά κύματα. Στο πρόγραμμα δίνονται ως δεδομένα εισόδου μεταξύ άλλων το είδος του κυματισμού, το όνομα του αρχείου αποθήκευσης των αποτελεσμάτων, ο τύπος του φάσματος προς χρήση, το σημαντικό ύψος κύματος, η περίοδος κορυφής του κύματος, η κλίμακα (scaling factor), όπου απαιτείται και η χρονική διάρκεια της κυματομορφής.

Βάσει των στοιχείων του φάσματος που δίνονται, το πρόγραμμα υπολογίζει την αντίστοιχη παλμική συνάρτηση απόκρισης και εφ' όσον επιβεβαιωθεί η ετοιμότητα του κυματιστήρα ξεκινά η παραγωγή των κυματισμών.

Το βασικό εξάρτημα του συστήματος του κυματιστήρα που διαθέτει το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής είναι το «πέδιλο» χάρη στην κίνηση του οποίου δημιουργούνται τα κύματα. Ένας σερβο-κινητήρας λαμβάνει ηλεκτρικό σήμα από τον Η/Υ και κινεί ένα υδραυλικό έμβολο, το οποίο με τη σειρά του μεταδίδει την κίνηση στο «πέδιλο». Το έμβολο αυτό βρίσκεται περί το μέσον του κυματιστήρα, ενώ δύο άλλα έμβολα εκατέρωθεν αυτού εξασφαλίζουν την ομαλή επαναφορά του.

Βασική προϋπόθεση για την ασφαλή λειτουργία του κυματιστήρα είναι η στάθμη του νερού στο πίσω μέρος αυτού να μην υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο ύψος. Η ανάγκη αυτή καλύπτεται από δύο αντλίες οι οποίες αντλούν νερό από την περιοχή πίσω από το «πέδιλο» και το μεταφέρουν μπροστά από αυτό, ενώ ταυτόχρονα δύο φλοτέρ ελέγχουν τη στάθμη του νερού εμποδίζοντας τη λειτουργία του κυματιστήρα όταν αυτή βρίσκεται σε μη επιτρεπτά επίπεδα. Για το σκοπό αυτό, η άντληση του νερού ξεκινά προγενέστερα της λειτουργίας του κυματιστήρα.

4.3.3 Επεξεργασία μετρήσεων και χάραξη φασμάτων

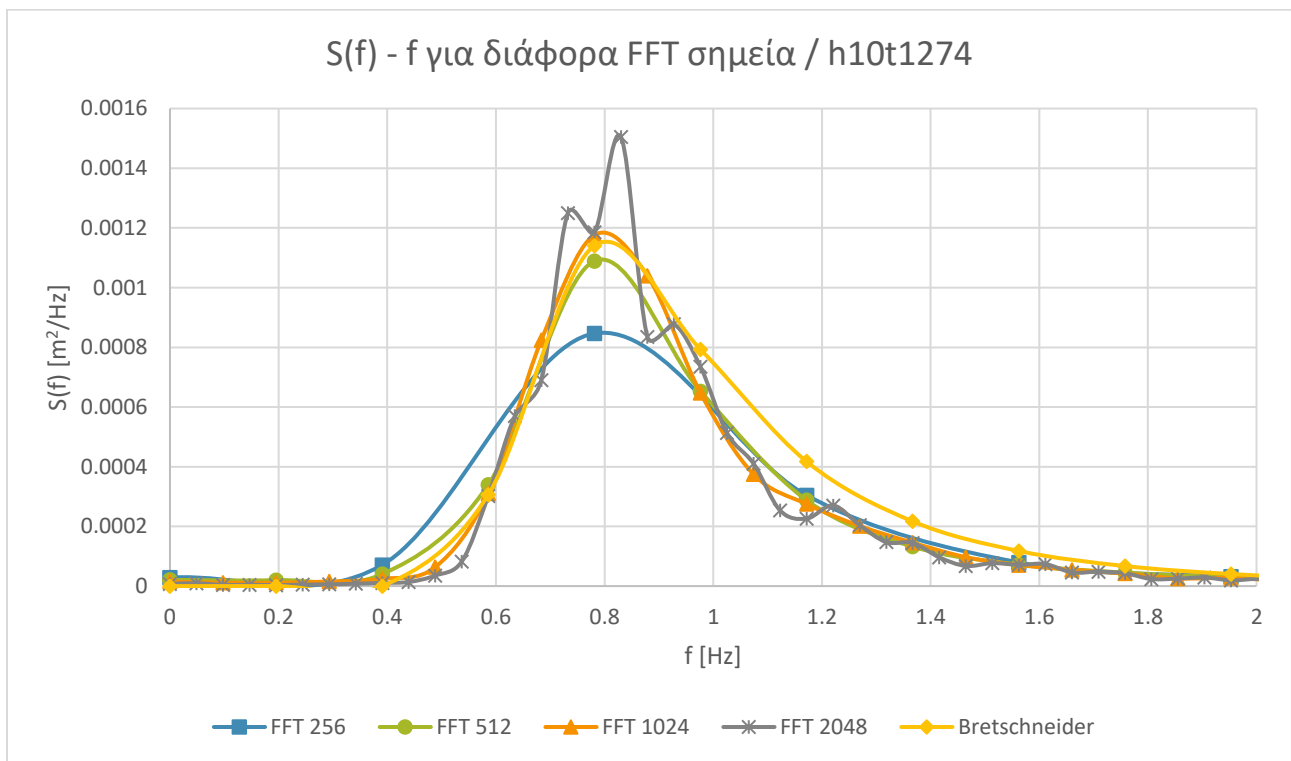
Στην παρούσα μελέτη παράχθηκαν τυχαίοι κυματισμοί χρησιμοποιώντας φάσμα τύπου *Bretschneider* για τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 19. Κάθε φάσμα «έτρεξε» σε δύο τμήματα διάρκειας 300 s έκαστο με σκοπό τη μείωση του σφάλματος μέτρησης λόγω ανάκλασης μέρος του κυματισμού, μη απόσβεσης δηλαδή μέρους της ενέργειας. Ανάμεσα σε όλα τα «τρεξίματα» υπήρχε αναμονή των 25 λεπτών ώστε να ηρεμεί το νερό της δεξαμενής και να αποφεύγονται λάθη λόγω παραμενόντων κυματισμών.

Τα δύο τμήματα μέτρησης της χρονικής ιστορίας κάθε φάσματος καταγράφονταν σε αρχεία τύπου “.dat”. Κάθε αρχείο από αυτά, συνολικά έξι, σε συνδυασμό με τη συνάρτηση μεταφοράς που είχε καταστρωθεί την αντίστοιχη ημέρα αποτελούσαν τα δεδομένα εισόδου κώδικα της σχολής για την ανάλυση των φασμάτων. Ο εν λόγω κώδικας, γραμμένος σε γλώσσα Modern Fortran, πραγματοποιούσε μετασχηματισμό Fourier από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων,

για αριθμό σημείων οριζόμενο από το χρήστη και υπολόγιζε σε αρχείο εξόδου τύπου “.out” τις τιμές του φάσματος συναρτήσεως της συχνότητας (ζεύγη $S(f) - f$) και τη μέση τετραγωνική τιμή της απόκρισης (root mean square, rms value).

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για 126, 512, 1024 και 2048 σημεία μετασχηματισμού Fourier. Στο παρακάτω διάγραμμα – παράδειγμα, διαφαίνονται τα αποτελέσματα αυτών σε συνδυασμό με το θεωρητικό φάσμα του *Bretschneider*, όπως αυτό υπολογίζεται συναρτήσεως της συχνότητας από τη σχέση:

$$S(f) = \frac{5}{16} \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-5} \cdot \frac{H_s^2}{f_p} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4} \cdot \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right)$$



Διάγραμμα 13: Σύγκριση αποτελεσμάτων Fourier ανάλυσης για διαφορετικούς αριθμούς σημείων για το κύμα h10t1274

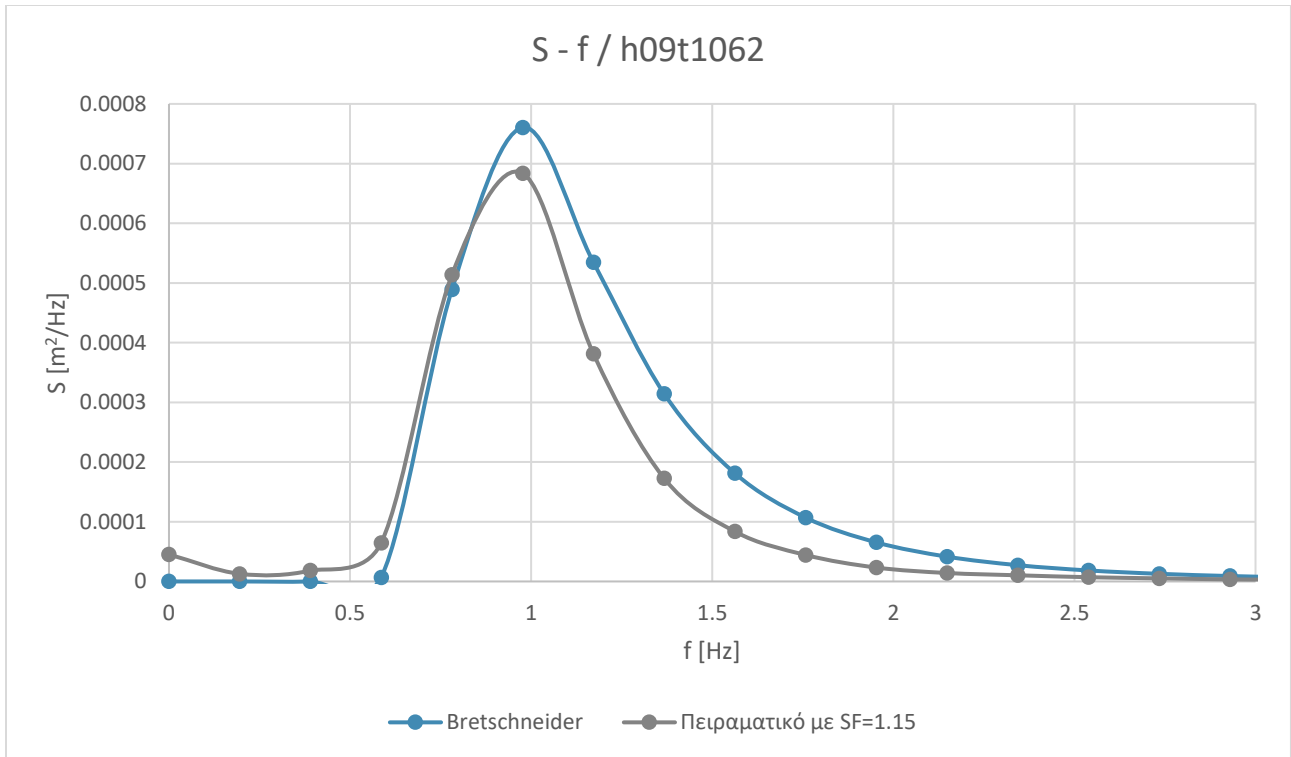
Συγκρίνοντας τις προκύπτουσες κατανομές φασμάτων με τη θεωρητική του *Bretschneider* κρίθηκε πως ο μετασχηματισμός Fourier με 512 σημεία ως ο πλέον κατάλληλος για την επεξεργασία του συνόλου των κυματομορφών.

Υπολογίζοντας ακόμη την απόκλιση μεταξύ της θεωρητικής τιμής και της πειραματικά μετρούμενης και αποδιδόμενης μετά το μετασχηματισμό Fourier rms τιμής του κάθε φάσματος αποφασίστηκε η χρήση κλίμακας (Scaling Factor) κατά την παραγωγή του κυματισμού στη δεξαμενή σε τρεις εκ των έξι περιπτώσεων, όπως παρουσιάζονται και στον κάτωθι πίνακα. Για τις περιπτώσεις αυτές πραγματοποιήθηκε εκ νέου μέτρηση των τυχαίων κυματισμών στη δεξαμενή του Εργαστηρίου και ανάλυση μετά με μετασχηματισμό Fourier.

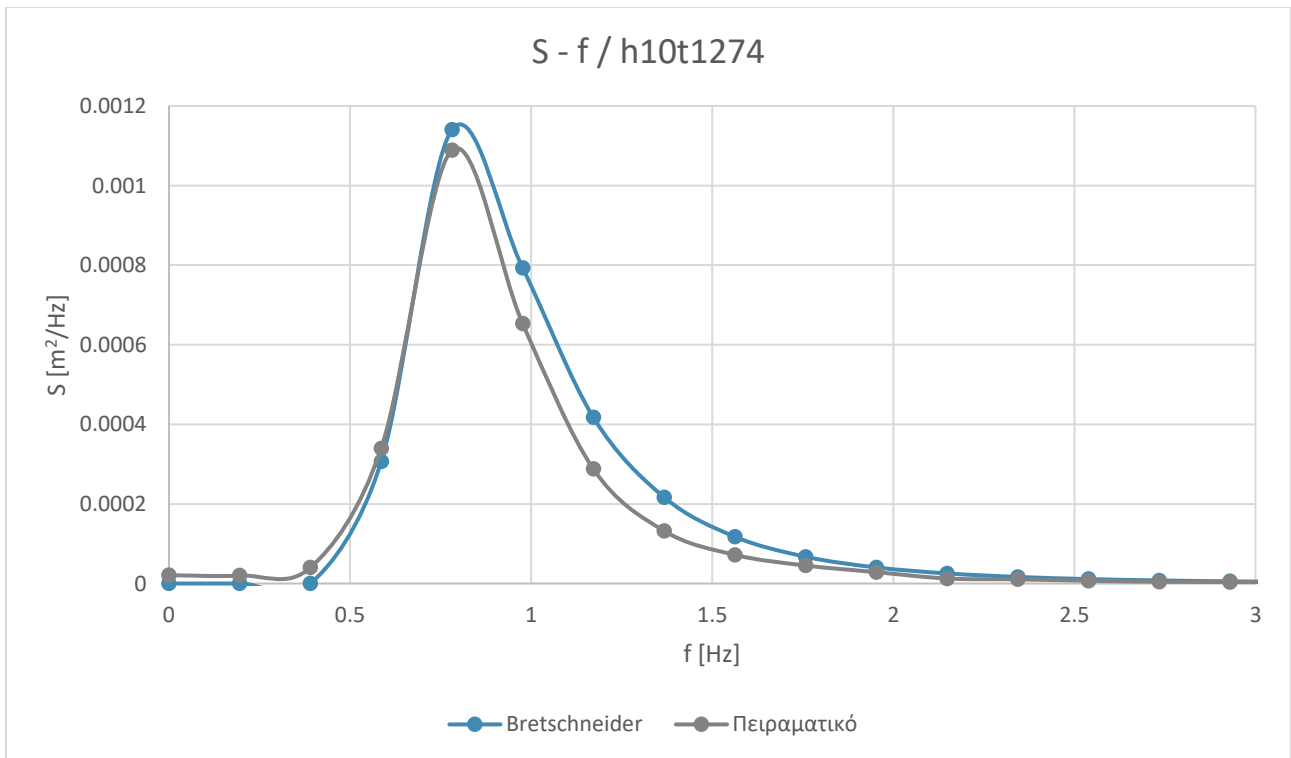
Πίνακας 20: Φάσματα στα οποία επιλέχθηκε Scaling Factor

Φάσμα	Θεωρητική RMS τιμή	Πειραματική RMS τιμή	Απόκλιση %	Scaling Factor
h09t1062	0.0225	0.0199	11.55%	1.15
h14t1911	0.0350	0.0315	10%	1.11
h16t2123	0.0400	0.0360	10%	1.11

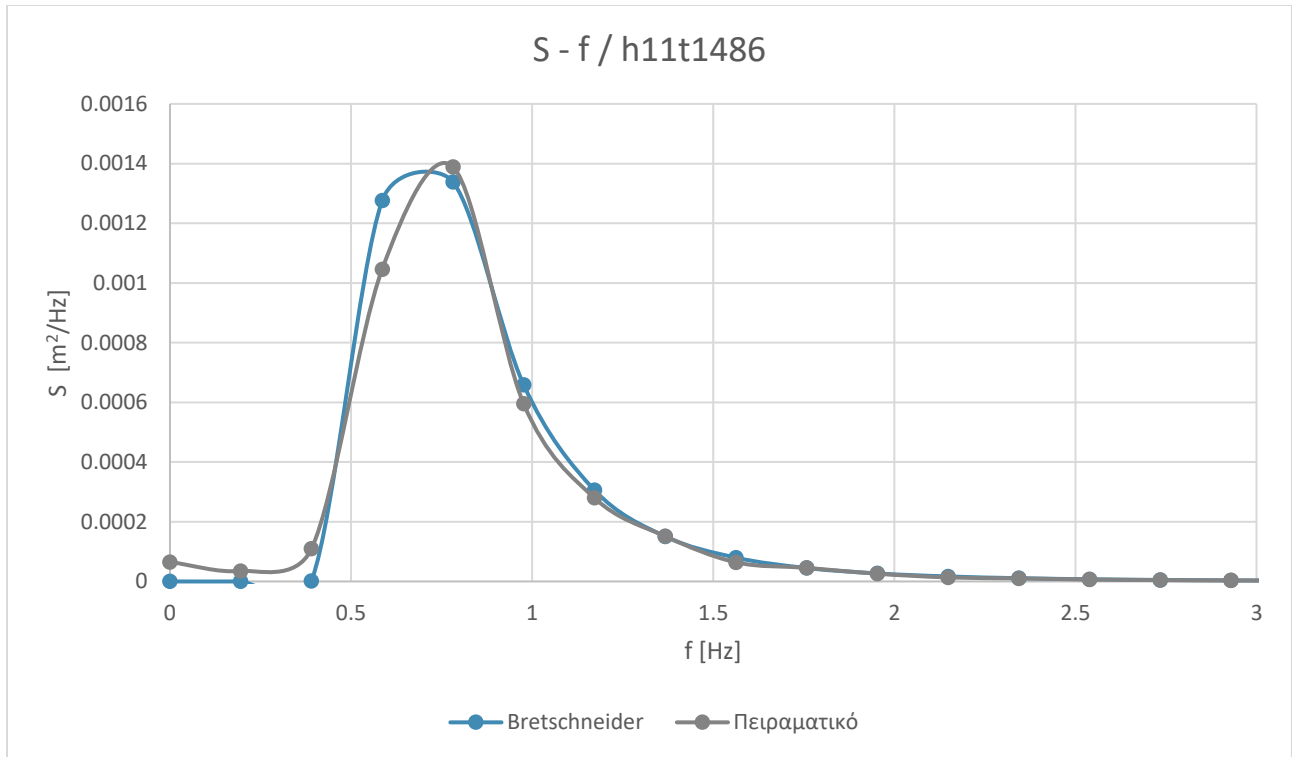
Το σύνολο των έξι καταστάσεων θάλασσας παρουσιάζονται στη συνέχεια σε διαγράμματα κατανομής φάσματος, πάντα συγκριτικά με το θεωρητικό φάσμα *Bretschneider*, με τα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή του scaling factor για τις περιπτώσεις που αυτό χρειάστηκε.



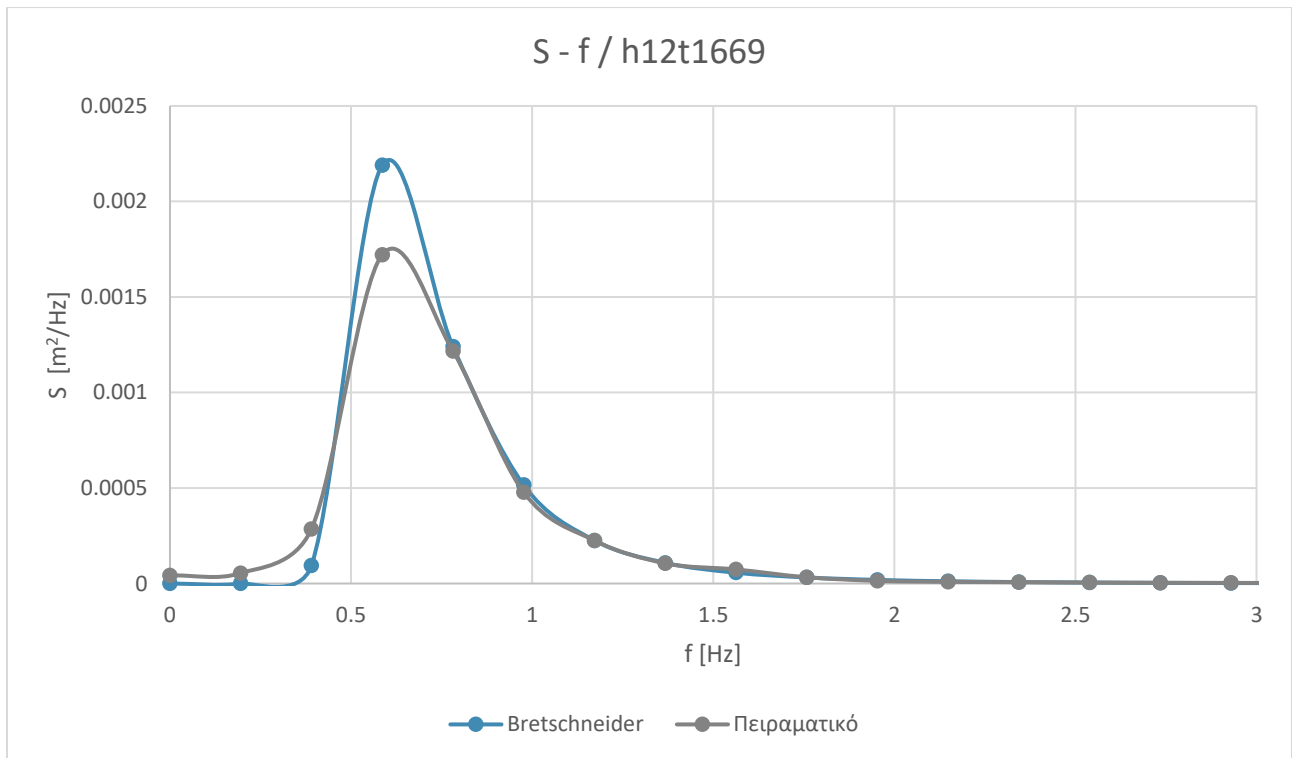
Διάγραμμα 14: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος h09t1062



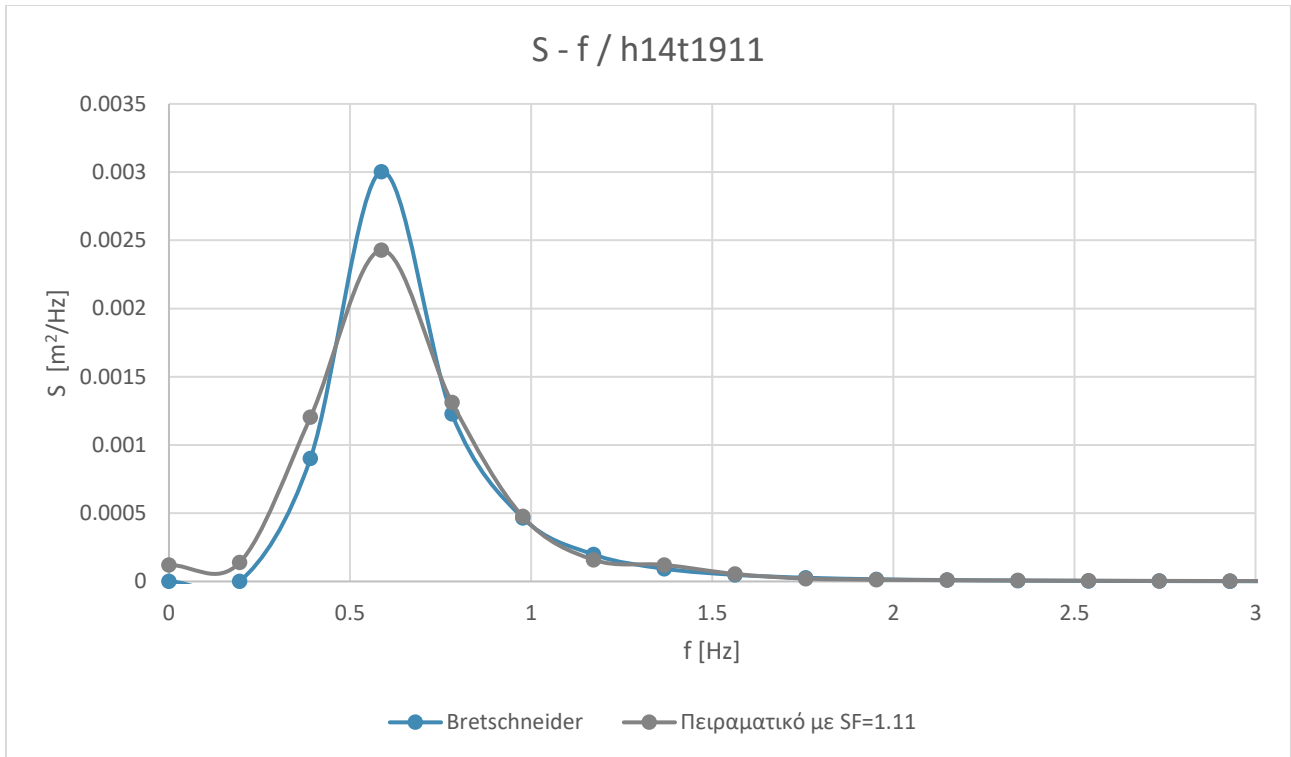
Διάγραμμα 15: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος h10t1274



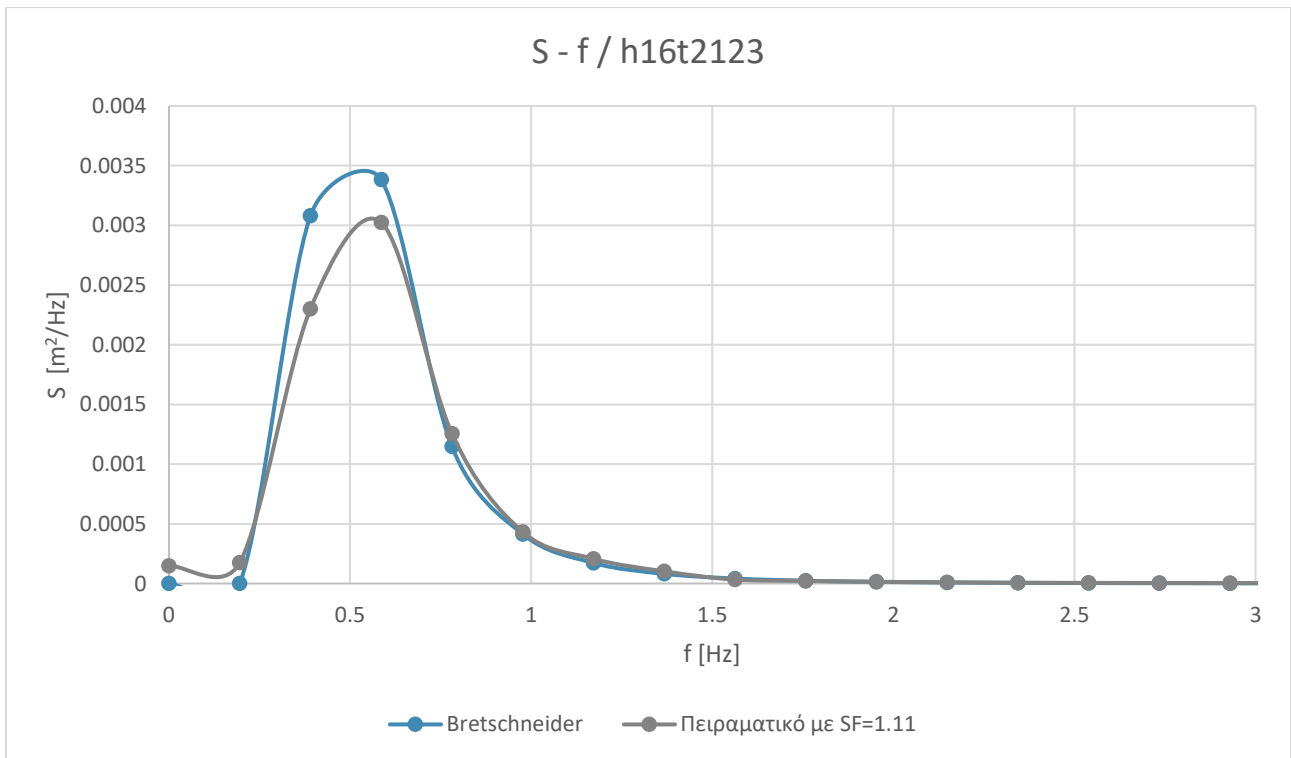
Διάγραμμα 16: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος h11t1486



Διάγραμμα 17: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος h12t1669



Διάγραμμα 18: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος $h14t1911$



Διάγραμμα 19: Θεωρητική και Πειραματική συνάρτηση πυκνότητας φάσματος κύματος $h16t2123$

4.4 Ταχύπλοο σε κυματισμούς στο SWAN2

4.4.1 Δημιουργία κυματισμών προς εκτέλεση κώδικα και χάραξη φασμάτων

Οι υπολογισμοί στον κώδικα SWAN2 πραγματοποιήθηκαν σε κλίμακα μοντέλου για την εκτέλεση των οποίων απαιτούνταν, όμοια με τους υπολογισμούς αντίστασης, τα αρχεία εισόδου “.pln” και “.inp”. Το αρχείο τύπου “.pln” πάρθηκε ακριβώς ίδιο όπως χρησιμοποιήθηκε και στους υπολογισμούς της αντίστασης στις αντίστοιχες ταχύτητες. Στο αρχείο τύπου “.inp” τα περισσότερα δεδομένα παρέμειναν ίδια με κυριότερη διαφορά την προσθήκη της περιγραφής του επιθυμητού κυματισμού για τον εκάστοτε υπολογισμό. Πρότυπο του αρχείου “.inp” για τη δυναμική μελέτη παρατίθεται στο Παράρτημα VI. Συνολικά μελετήθηκε η συμπεριφορά του ταχύπλου σε τρεις τυχαίους κυματισμούς και σε δύο διαφορετικές ταχύτητες με το συνδυασμό που παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα. Σημειώνεται πως σε όποιον κυματισμό απαιτήθηκε κλίμακα (Scaling Factor) αξιοποιήθηκαν τα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή της.

Πίνακας 21: Συνδυασμός ταχυτήτων και κυματισμών που μελετήθηκαν στο SWAN2

F_n	Κυματισμός	h09t1062 (με SF)	h11t1486	h14t1911 (με SF)
0.68		✓	✓	✓
1.032		✓	-	-

Οι κυματισμοί “h09t1062”, “h11t1486” και “h14t1911” είναι όμοιοι με τους κυματισμούς που παρήχθησαν και αναλύθηκαν στην πειραματική δεξαμενή, τα κύρια χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 19.

Προκειμένου ο κώδικας SWAN2 να υπολογίσει τη συμπεριφορά του ταχυπλόου σε τυχαίους κυματισμούς απαιτεί την περιγραφή αυτών μέσω τριών βασικών μεγεθών:

- την περίοδο T
- τη γωνία πρόσπτωσης β
- το πλάτος A

με τον περιορισμό ο αριθμός των κυμάτων που εισάγονται να μην υπερβαίνει τους είκοσι (20) (Boston Marine Consulting Inc., 2002, σ. 46). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των μεγεθών αυτών είναι η ακόλουθη:

1. Επιλογή τιμών συχνοτήτων (f) στην περιοχή ενδιαφέροντος του φάσματος με σταθερή ισαπόσταση μεταξύ τους (δf)
2. Υπολογισμός της τιμής της πυκνότητας του φάσματος ($S(f)$). Στις επιλεγμένες τιμές της συχνότητας πραγματοποιήθηκε μέσω κώδικα MATLAB παρεμβολή (interpolation) στα ζεύγη τιμών πυκνότητας φάσματος – συχνότητας ($S(f) - f$) όπως αυτά προέκυψαν μετά το μετασχηματισμό Fourier.
3. Υπολογισμός πλάτους (A) κυματισμού σύμφωνα με τη σχέση:

$$A = \sqrt{2 \cdot S(f) \cdot \delta f}$$

4. Υπολογισμός περιόδου κυματισμού σύμφωνα με τη σχέση:

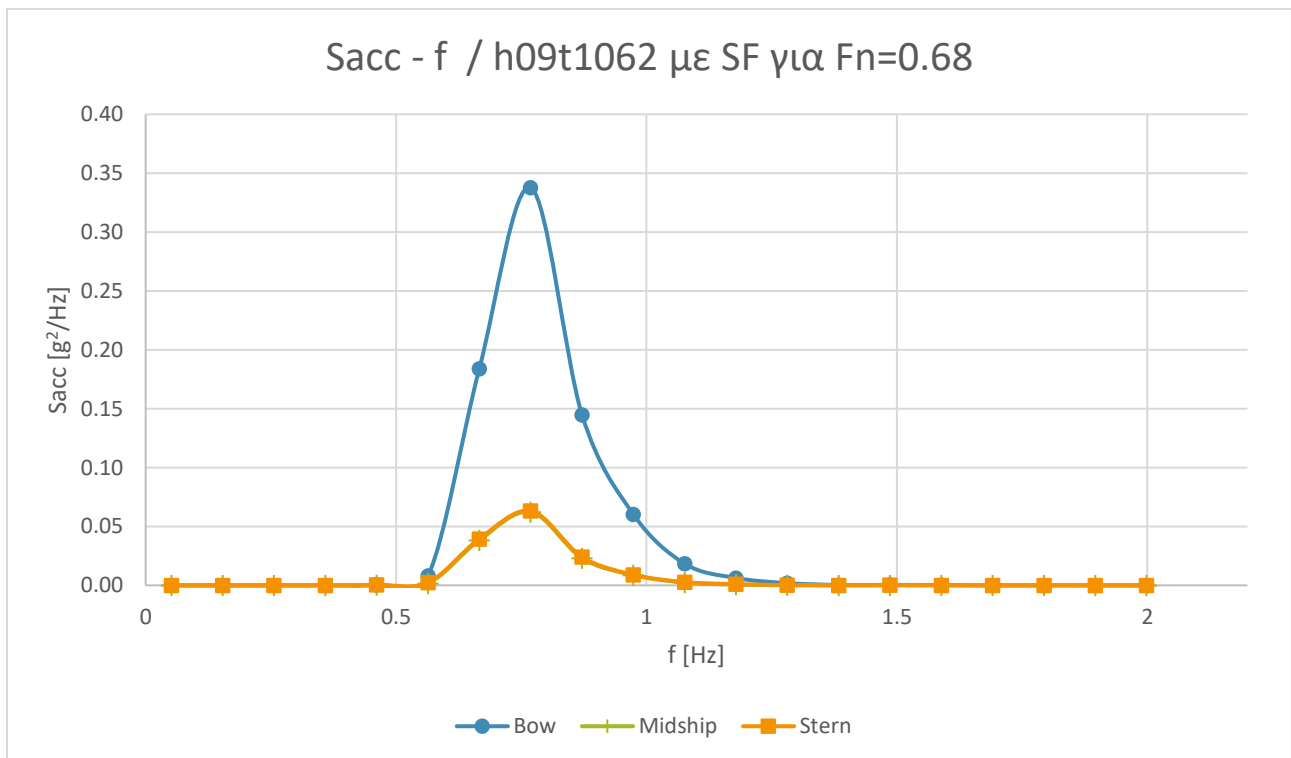
$$T = \frac{1}{f}$$

Στη συνέχεια, εκτελούνταν ο κώδικας SWAN2 για 20 κύματα με δεδομένη περίοδο, πλάτος και γωνία πρόσπτωσης κυματισμού. Σε όλες τις περιπτώσεις μελετήθηκαν μετωπικοί κυματισμοί και επομένως γωνία ίση με $\beta = 180^\circ$. Από τον κώδικα ζητήθηκαν μεταξύ άλλων οι συντελεστές απόκρισης επιταχύνσεων (Response Amplitude Operator, RAO_{acc}) σε τρία σημεία του σκάφους:

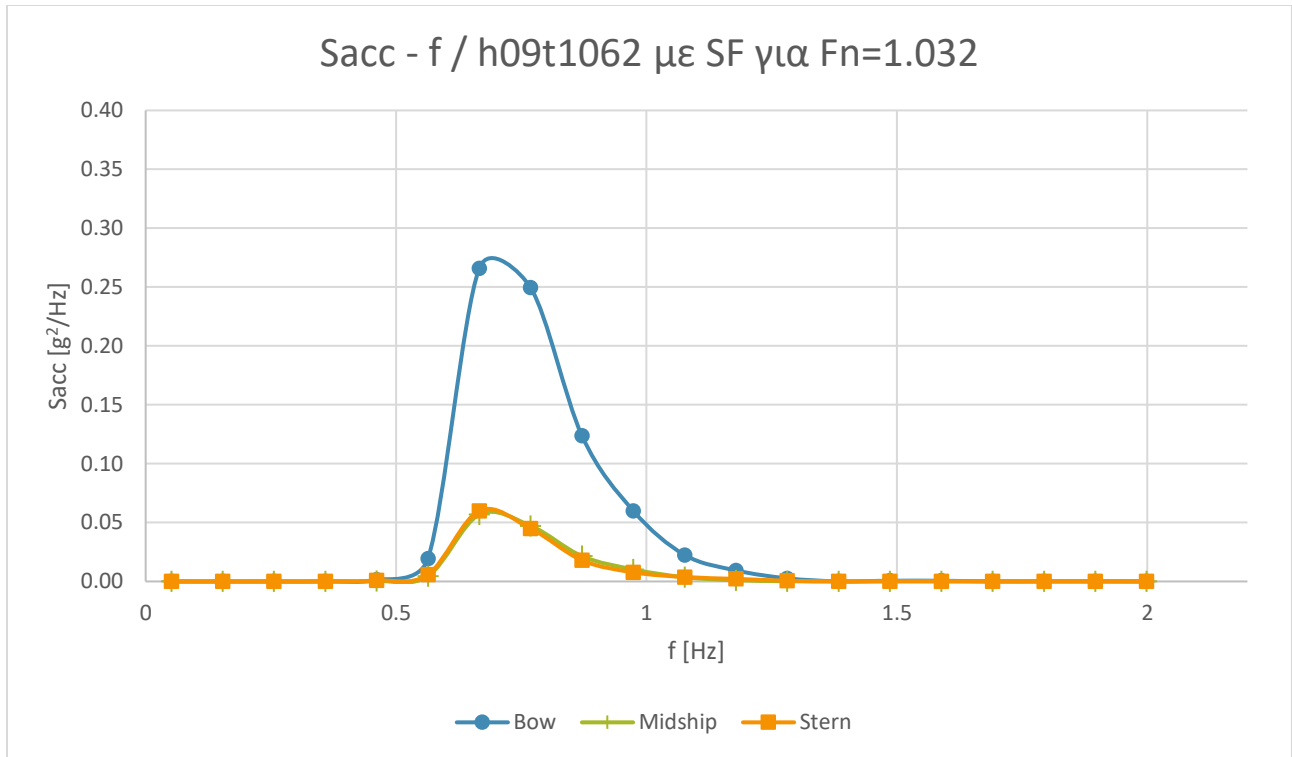
την πλώρη, το μέσον και την πρύμνη. Οι τιμές αυτών για κάθε συχνότητα των εισαχθέντων κυμάτων καταγράφονταν στο αρχείο εξόδου “fort.40”. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των κατακόρυφων επιταχύνσεων υπολογίστηκε η πυκνότητα φάσματος κατακόρυφων επιταχύνσεων σύμφωνα με τη σχέση:

$$S_{acc}(f) = RAO_{acc}^2 \cdot S(f)$$

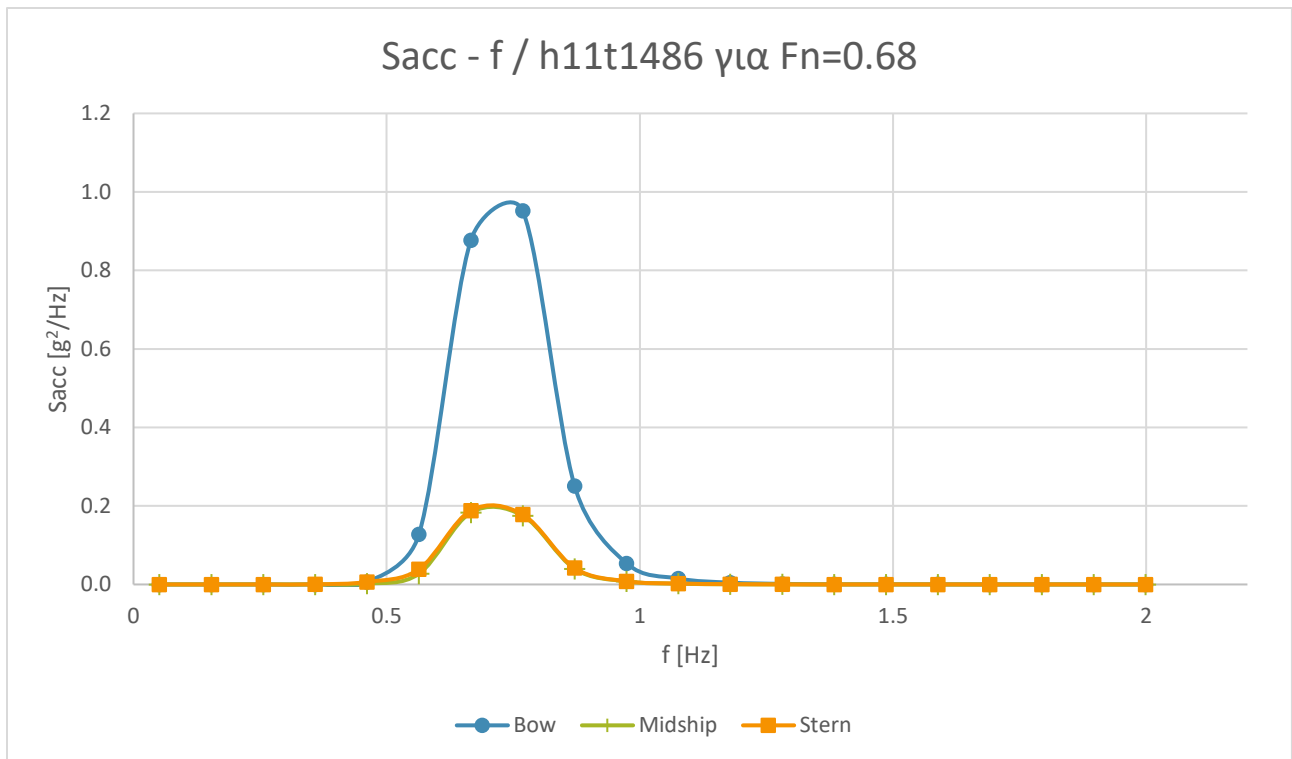
Παρακάτω παρουσιάζονται σε μορφή διαγράμματος οι τελικές τιμές των φασμάτων κατακόρυφων επιταχύνσεων στην πλώρη του σκάφους για κάθε έναν από τους συνδυασμούς που περιεγράφηκαν στον Πίνακα 21.



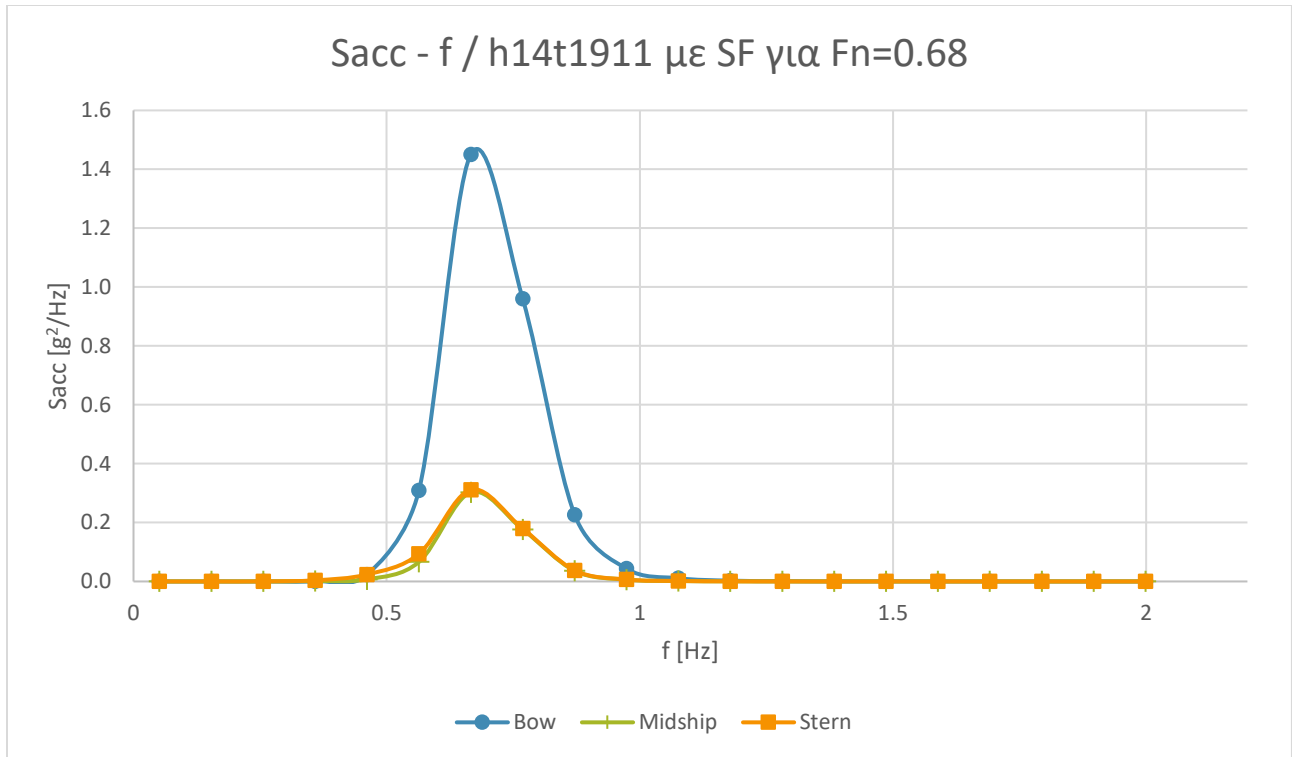
Διάγραμμα 20: Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης για h09t1062 με SF και για Fn=0.68



Διάγραμμα 21: Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης για h09t1062 με SF και για Fn=1.032



Διάγραμμα 22: Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης για h11t1486 και για Fn=0.68



Διάγραμμα 23: Πυκνότητα φάσματος κατακόρυφης επιτάχυνσης για h14t1911 και για Fn=0.68

4.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων με κριτήρια

Αποφασίστηκε η μελέτη συμμόρφωσης του ταχύπλοου σύμφωνα με τη κριτήρια άνετης και ασφαλούς πλεύσης του οργανισμού NORDIC που περιεγράφηκαν προηγουμένως. Για το σκοπό αυτό και βάσει των σχεδιασμένων φασμάτων απόκρισης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη, υπολογίστηκαν οι τιμές της μέσης τετραγωνικής τιμής της απόκρισης της επιτάχυνσης (RMS_{acc}) προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας αφενός τον κανόνα του Simpson και αφετέρου τη μαθηματική σχέση:

$$RMS_{acc} = \sqrt{\int S_{acc}(f) \cdot df}$$

Τα αποτελέσματα για κάθε συνδυασμό κυματισμού και ταχύτητας που εξετάστηκε ελέγχθηκαν με το αντίστοιχο όριο του Πίνακα 18, ήτοι $0.65 \cdot g$. Διαπιστώθηκε πως σε όλες τις περιπτώσεις το ταχύπλοο πληροί το κριτήριο άνετης και ασφαλούς πλεύσης για κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη.

Πίνακας 22: Αποτελέσματα RMS_{acc} στην πλώρη του σκάφους

Κυματισμός	F_n	RMS_{acc} κυματισμού	RMS_{acc} κριτηρίου
h09t1062 με SF	0.68	2.7802	6.3743
h09t1062 με SF	1.032	2.6832	
h11t1486	0.68	4.7455	
h14t1911	0.68	5.3443	

Βιβλιογραφία

- Apreamare Yachts. (χ.χ.). *Apreamare 44'*. Ανάκτηση από Apreamare: <https://apreamare.it/apreamare/index.php/portfolios/apreamare-44/>
- Bertram Yachts. (χ.χ.). *the35*. Ανάκτηση από Bertram: <https://www.bertram.com/the35.cfm>
- Boston Marine Consulting Inc. (2002). *Ship flow simulation in calm water and in waves - User manual*. Boston, MA, USA.
- Ferreti Yachts. (χ.χ.). *Ferretti yachts 450*. Ανάκτηση από <https://www.ferretti-yachts.com/en-us/model/p/1-147-244-PUB/n/Ferretti-Yachts-450#500Project>
- International Towing Tank Conference. (2016). *Members: National Technical University of Athens*. Ανάκτηση July 2020, από ITTC: <https://itc.info/media/5694/towing-tank.pdf>
- Mochi Craft. (χ.χ.). *The fleet*. Ανάκτηση από Mochi Craft: <https://www.mochicraft-yacht.com/en-us/Gamma/Technical-Specification/5-99-146-PUB/Mochi-Dolphin-44%e2%80%99->
- Nordforsk. (1987). *Assessment of Ship Performance in a Seaway: The Nordic Co-operative Project: "Seakeeping Performance of Ships"*. Nordforsk.
- Sclavounos, P. D. (1995). Computation of Wave Ship Interactions. *Computational Mechanics Publications*.
- Αθανασούλης, Γ. Α., & Μπελιμπασάκης, Κ. Α. (2012). *Δυναμική πλοίου*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Γερογιαννάκη, Α. Α. (2009). *Πειραματική διερεύνηση τη συμπεριφοράς ταχυπλόου σκάφους σε ήρεμο νερό και σε κυματισμούς*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Λουκάκης, Θ. Α., & Γρηγορόπουλος, Γ. Ι. (1996). *Υδροδυναμική σχεδίαση μικρών σκαφών*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Λουκάκης, Θ., & Γρηγορόπουλος, Γ. (2013). *Συστηματική σειρά ΕΜΠ : Περιγραφή και αποτελέσματα*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μάζης, Δ. (2013). *Πειραματική και αναλυτική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχυπολόων σκαφών σε τυχαίους κυματισμούς*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Πολίτης, Γ. Κ. (2016). *Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τσιορτός, Κ. (2017). *Πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχυπλόων σκαφών με διπλή ακμή σε τυχαίους κυματισμούς*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Παράρτημα Ι : Αναλογίες πειραματικής – φυσικής κλίμακας με γεωμετρική ομοιότητα

Παρουσιάζονται οι αναλογίες των φυσικών μεγεθών μεταξύ της πειραματικής και της φυσικής κλίμακας σκάφους, όπως αυτές προκύπτουν με χρήση της γεωμετρικής ομοιότητας. Ο δείκτης (m) αναφέρεται στην κλίμακα μοντέλου και ο δείκτης (S) αναφέρεται στην κλίμακα πλοίου (Πολίτης, 2016, σ. 190; Γερογιαννάκη, 2009, σ. 79)

Κλίμακα $\lambda = \frac{L_S}{L_m} \Rightarrow L_S = \lambda \cdot L_m$

Αριθμός Froude $Fn_m = \frac{V_m}{\sqrt{g \cdot L_m}} = \frac{V_S}{\sqrt{g \cdot L_S}} = Fn_S$

Ταχύτητα $V_S = \sqrt{\lambda} \cdot V_m$

Βρεχόμενη επιφάνεια $WS_S = \lambda^2 \cdot WS_m$

Εκτόπισμα $\Delta_S = \lambda^3 \cdot 1.025 \cdot \Delta_m$

Παράρτημα II : Πρότυπο αρχείου εισόδου κώδικα HYDRO

```
0 SAVITSKY L/B=7.0 Scale 1:10 - 1995 - final hydrostatics
0 0
0 16.618 6.774 1.500 2.750 0.500
0 21 0 3 12 23
0 0 0.000 0.000 9.230 0.000 0.000 1.025
0 1 1 0 -0.281 0.000 2.750
0 1 0
0 2 17 0 0.000 0.000 0.254 0.700 0.370 1.399 0.487 2.099 0.604
0 2 2.799 0.721 2.980 0.930 3.010 1.070 3.023 1.141 3.039 1.269
0 2 3.055 1.500 3.053 1.750 3.040 2.000 3.019 2.250 2.985 2.567
0 2 2.962 2.750 1.500 2.750 0.000 2.750
0 2 2 1 0 17
0 3 16 0 0.923 0.000 0.248 0.702 0.363 1.402 0.492 2.453 0.682
0 3 2.804 0.738 2.990 0.964 3.020 1.100 3.038 1.231 3.059 1.433
0 3 3.064 1.500 3.073 1.750 3.070 2.010 3.040 2.500 3.016 2.750
0 3 1.500 2.750 0.000 2.750
0 3 2 1 0 16
0 4 16 0 1.846 0.000 0.235 0.355 0.299 1.418 0.500 2.114 0.628
0 4 2.807 0.767 3.005 1.017 3.026 1.137 3.060 1.379 3.073 1.500
0 4 3.084 1.625 3.092 1.750 3.100 2.000 3.094 2.500 3.084 2.750
0 4 1.500 2.750 0.000 2.750
0 4 2 1 0 16
0 5 15 0 2.769 0.000 0.213 0.500 0.315 1.500 0.523 2.000 0.629
0 5 2.803 0.800 3.018 1.073 3.052 1.286 3.081 1.500 3.108 1.750
0 5 3.129 2.000 3.143 2.250 3.150 2.500 3.151 2.750 1.500 2.750
0 5 0.000 2.750
0 5 2 1 0 15
0 6 14 0 3.692 0.000 0.181 1.000 0.415 1.500 0.532 2.000 0.652
0 6 2.792 0.840 3.031 1.142 3.087 1.500 3.125 1.750 3.156 2.000
0 6 3.184 2.250 3.205 2.500 3.218 2.750 1.500 2.750 0.000 2.750
0 6 2 1 0 14
0 7 15 0 4.615 0.000 0.146 1.000 0.410 1.500 0.543 2.000 0.678
0 7 2.771 0.887 2.909 1.049 3.040 1.217 3.094 1.500 3.139 1.750
0 7 3.180 2.000 3.218 2.250 3.252 2.500 3.280 2.750 1.500 2.750
0 7 0.000 2.750
0 7 2 1 0 15
0 8 14 0 5.538 0.000 0.109 1.312 0.500 2.190 0.770 2.741 0.935
0 8 2.893 1.114 3.044 1.295 3.095 1.522 3.144 1.750 3.196 2.000
0 8 3.244 2.250 3.289 2.500 3.330 2.750 1.500 2.750 0.000 2.750
0 8 2 1 0 14
0 9 12 0 6.461 0.000 0.074 0.643 0.284 1.284 0.500 2.700 0.984
0 9 3.038 1.379 3.134 1.750 3.196 2.000 3.256 2.250 3.313 2.500
0 9 3.367 2.750 1.500 2.750 0.000 2.750
0 9 2 1 0 12
0 10 13 0 7.384 0.000 0.042 0.628 0.266 1.251 0.500 1.904 0.750
0 10 2.642 1.035 3.017 1.469 3.101 1.750 3.174 2.000 3.246 2.250
0 10 3.317 2.500 3.387 2.750 1.500 2.750 0.000 2.750
0 10 2 1 0 13
0 11 12 0 8.307 0.000 0.015 0.610 0.249 1.212 0.500 1.789 0.750
0 11 2.561 1.086 2.974 1.565 3.121 2.000 3.207 2.250 3.293 2.500
0 11 3.379 2.750 1.500 2.750 0.000 2.750
0 11 2 1 0 12
0 12 13 0 9.230 0.000 0.001 0.296 0.114 0.588 0.236 1.165 0.500
0 12 1.672 0.750 2.442 1.136 2.894 1.669 3.024 2.000 3.124 2.250
```

```

0 12 3.225 2.500 3.327 2.750 1.500 2.750 0.000 2.750
0 12 2 1 0 13
0 13 14 0 10.153 0.000 0.000 0.284 0.111 0.563 0.231 0.837 0.361
0 13 1.107 0.500 1.554 0.750 1.914 0.965 2.270 1.185 2.764 1.787
0 13 2.979 2.250 3.100 2.500 3.221 2.750 1.500 2.750 0.000 2.750
0 13 2 1 0 14
0 14 15 0 11.076 0.000 0.014 0.262 0.117 0.518 0.233 0.769 0.361
0 14 1.013 0.500 1.407 0.750 1.730 0.983 2.039 1.234 2.253 1.500
0 14 2.585 1.919 2.760 2.240 2.909 2.500 3.054 2.750 1.500 2.750
0 14 0.000 2.750
0 14 2 1 0 15
0 15 16 0 11.999 0.000 0.033 0.222 0.134 0.439 0.245 0.600 0.340
0 15 0.854 0.500 1.025 0.622 1.336 0.872 1.476 1.000 1.602 1.123
0 15 1.832 1.373 2.036 1.624 2.228 1.874 2.654 2.500 2.819 2.750
0 15 1.500 2.750 0.000 2.750
0 15 2 1 0 16
0 16 15 0 12.922 0.000 0.064 0.242 0.214 0.472 0.381 0.761 0.623
0 16 1.026 0.873 1.263 1.124 1.481 1.374 1.584 1.500 1.778 1.750
0 16 1.965 2.000 2.148 2.250 2.329 2.500 2.511 2.750 1.500 2.750
0 16 0.000 2.750
0 16 2 1 0 15
0 17 14 0 13.845 0.000 0.130 0.189 0.311 0.370 0.500 0.595 0.750
0 17 0.806 0.999 1.008 1.250 1.201 1.500 1.386 1.750 1.566 2.000
0 17 1.746 2.250 1.928 2.500 2.120 2.750 1.000 2.750 0.000 2.750
0 17 2 1 0 14
0 18 11 0 14.768 0.000 0.286 0.308 0.750 0.471 1.000 0.634 1.250
0 18 0.794 1.500 1.114 2.002 1.448 2.500 1.539 2.626 1.633 2.750
0 18 1.000 2.750 0.000 2.750
0 18 2 1 0 11
0 19 12 0 15.691 0.000 0.627 0.151 1.001 0.257 1.250 0.369 1.500
0 19 0.487 1.751 0.610 2.000 0.742 2.250 0.883 2.500 0.958 2.626
0 19 1.036 2.750 1.000 2.750 0.000 2.750
0 19 2 1 0 12
0 20 8 0 16.614 0.000 1.783 0.064 2.019 0.134 2.252 0.220 2.503
0 20 0.267 2.626 0.317 2.750 0.150 2.750 0.000 2.750
0 20 2 1 0 8
0 21 1 0 16.981 0.000 2.750
0 21 0
0 1.076 1.077 1.08
1 0.000 0.254 0.923 0.248 1.846 0.235 2.769 0.219 3.692 0.181
2 4.615 0.146 5.538 0.109 6.461 0.074 7.384 0.074 8.307 0.015
3 9.230 0.001 10.153 0.002 11.076 0.014 11.999 0.033 12.922 0.064
4 13.845 0.130 14.768 0.286 15.691 0.627 16.614 1.783 16.981 2.750
5 8.000 2.750 -0.281 2.750 0.000 0.254

```

1111

Παράρτημα III : Πρότυπο αρχείο εισόδου “.pln” κώδικα SWAN2

1

```
taxyploo
1
19
11 0.00000 0.00000
0.69000 0.00000 -0.04000
0.77697 0.00000 0.07030
0.79739 0.00000 0.05140
0.80429 0.00000 0.06570
0.81009 0.00000 0.07880
0.81499 0.00000 0.09040
0.81969 0.00000 0.10230
0.82419 0.00000 0.11440
0.83099 0.00000 0.13300
0.83999 0.00000 0.15830
0.84299 0.00000 0.16700
10 0.00000 0.00000
0.68466 0.00000 -0.04530
0.68466 0.01510 -0.00790
0.68466 0.02570 0.01700
0.68466 0.03690 0.04200
0.68466 0.04870 0.06710
0.68466 0.06100 0.09200
0.68466 0.07420 0.11700
0.68466 0.08830 0.14200
0.68466 0.09580 0.15460
0.68466 0.10360 0.16700
9 0.00000 0.00000
0.59235 0.00000 -0.07940
0.59235 0.03080 -0.03300
0.59235 0.04710 -0.00800
0.59235 0.06340 0.01700
0.59235 0.07940 0.04200
0.59235 0.11140 0.09220
0.59235 0.14480 0.14200
0.59235 0.15390 0.15460
0.59235 0.16330 0.16700
12 0.00000 0.00000
0.50004 0.00000 -0.09500
0.50004 0.01890 -0.07690
0.50004 0.03700 -0.05800
0.50004 0.05950 -0.03300
0.50004 0.08060 -0.00810
0.50004 0.10080 0.01700
0.50004 0.12010 0.04200
0.50004 0.13860 0.06700
0.50004 0.15660 0.09200
0.50004 0.17460 0.11700
0.50004 0.19280 0.14200
0.50004 0.21200 0.16700
13 0.00000 0.00000
0.40773 0.00000 -0.10160
0.40773 0.02420 -0.08660
0.40773 0.04720 -0.06990
0.40773 0.07610 -0.04570
```

2

```
0.40773 0.10260 -0.02070
0.40773 0.12630 0.00440
0.40773 0.14810 0.02940
0.40773 0.15840 0.04200
0.40773 0.17780 0.06700
0.40773 0.19650 0.09200
0.40773 0.21480 0.11700
0.40773 0.23290 0.14200
0.40773 0.25110 0.16700
14 0.00000 0.00000
0.31542 0.00000 -0.10470
0.31542 0.02220 -0.09460
0.31542 0.04390 -0.08350
0.31542 0.06500 -0.08120
0.31542 0.08540 -0.05800
0.31542 0.10250 -0.04580
0.31542 0.13360 -0.02080
0.31542 0.14760 -0.00800
0.31542 0.16020 0.00430
0.31542 0.18320 0.02930
0.31542 0.20360 0.05440
0.31542 0.22280 0.07940
0.31542 0.26540 0.14200
0.31542 0.28190 0.16700
13 0.00000 0.00000
0.22311 0.00000 -0.10660
0.22311 0.02620 -0.09630
0.22311 0.05180 -0.08470
0.22311 0.07690 -0.07190
0.22311 0.10130 -0.05800
0.22311 0.14070 -0.03300
0.22311 0.17300 -0.00970
0.22311 0.20390 0.01540
0.22311 0.22530 0.04200
0.22311 0.25850 0.08390
0.22311 0.27600 0.11600
0.22311 0.29090 0.14200
0.22311 0.30540 0.16700
12 0.00000 0.00000
0.13080 0.00000 -0.10510
0.13080 0.02840 -0.09690
0.13080 0.05630 -0.08490
0.13080 0.08370 -0.07190
0.13080 0.11070 -0.05800
0.13080 0.15540 -0.03300
0.13080 0.19140 -0.01150
0.13080 0.22700 0.01050
0.13080 0.27640 0.07070
0.13080 0.29790 0.11700
0.13080 0.31000 0.14200
0.13080 0.32210 0.16700
11 0.00000 0.00000
0.03849 0.00000 -0.10790
0.03849 0.02960 -0.09660
```

```

0.03849 0.05880 -0.08440
0.03849 0.11650 -0.05800
0.03849 0.16720 -0.03300
0.03849 0.24420 0.00560
0.03849 0.28940 0.05890
0.03849 0.30240 0.09200
0.03849 0.31240 0.11700
0.03849 0.32250 0.14200
0.03849 0.33270 0.16700
10 0.00000 0.00000
-0.05383 0.00000 -0.10650
-0.05383 0.06100 -0.08310
-0.05383 0.12120 -0.05800
-0.05383 0.17890 -0.03300
-0.05383 0.25610 0.00060
-0.05383 0.29740 0.04850
-0.05383 0.31210 0.09200
-0.05383 0.32070 0.11700
-0.05383 0.32930 0.14200
-0.05383 0.33790 0.16700
11 0.00000 0.00000
-0.14614 0.00000 -0.10380
-0.14614 0.06280 -0.08140
-0.14614 0.12510 -0.05800
-0.14614 0.19040 -0.03300
-0.14614 0.26420 -0.00450
-0.14614 0.30170 0.03890
-0.14614 0.31010 0.06700
-0.14614 0.31740 0.09200
-0.14614 0.32460 0.11700
-0.14614 0.33170 0.14200
-0.14614 0.33870 0.16700
10 0.00000 0.00000
-0.23845 0.00000 -0.10060
-0.23845 0.06430 -0.07960
-0.23845 0.12840 -0.05800
-0.23845 0.27000 -0.00960
-0.23845 0.30380 0.02990
-0.23845 0.31340 0.06700
-0.23845 0.31960 0.09200
-0.23845 0.32560 0.11700
-0.23845 0.33130 0.14200
-0.23845 0.33670 0.16700
12 0.00000 0.00000
-0.33076 0.00000 -0.09710
-0.33076 0.13120 -0.05800
-0.33076 0.22070 -0.03640
-0.33076 0.27410 -0.01450
-0.33076 0.28930 0.00340
-0.33076 0.30440 0.02150
-0.33076 0.30950 0.04420
-0.33076 0.31440 0.06700
-0.33076 0.31960 0.09200
-0.33076 0.32440 0.11700

```

```

-0.33076 0.32890 0.14200
-0.33076 0.33300 0.16700
13 0.00000 0.00000
-0.42307 0.00000 -0.09340
-0.42307 0.10000 -0.06700
-0.42307 0.15000 -0.05370
-0.42307 0.20000 -0.04020
-0.42307 0.27710 -0.01930
-0.42307 0.29090 -0.00310
-0.42307 0.30400 0.01370
-0.42307 0.30940 0.04200
-0.42307 0.31390 0.06700
-0.42307 0.31800 0.09200
-0.42307 0.32180 0.11700
-0.42307 0.32520 0.14200
-0.42307 0.32800 0.16700
12 0.00000 0.00000
-0.51538 0.00000 -0.08990
-0.51538 0.10000 -0.06650
-0.51538 0.15000 -0.05480
-0.51538 0.20000 -0.04280
-0.51538 0.27920 -0.02400
-0.51538 0.30310 0.00620
-0.51538 0.30870 0.04200
-0.51538 0.31250 0.06700
-0.51538 0.31560 0.09200
-0.51538 0.31840 0.11700
-0.51538 0.32050 0.14200
-0.51538 0.32180 0.16700
13 0.00000 0.00000
-0.60769 0.00000 -0.08670
-0.60769 0.05000 -0.07650
-0.60769 0.15000 -0.05570
-0.60769 0.20000 -0.04510
-0.60769 0.28030 -0.02800
-0.60769 0.30180 -0.00070
-0.60769 0.30520 0.02060
-0.60769 0.30810 0.04200
-0.60769 0.31080 0.06700
-0.60769 0.31290 0.09200
-0.60769 0.31430 0.11700
-0.60769 0.31500 0.14200
-0.60769 0.31510 0.16700
14 0.00000 0.00000
-0.70000 0.00000 -0.08450
-0.70000 0.03550 -0.07810
-0.70000 0.14180 -0.05800
-0.70000 0.21140 -0.04520
-0.70000 0.28070 -0.03130
-0.70000 0.30050 -0.00630
-0.70000 0.30260 0.00570
-0.70000 0.30600 0.02990
-0.70000 0.30730 0.04200
-0.70000 0.30840 0.05450

```

```
-0.70000 0.30920 0.06700
-0.70000 0.31000 0.09200
-0.70000 0.30940 0.14200
-0.70000 0.30840 0.16700
14 0.00000 0.00000
-0.79231 0.00000 -0.08320
-0.79231 0.07020 -0.07170
-0.79231 0.14020 -0.05880
-0.79231 0.24530 -0.03980
-0.79231 0.28040 -0.03420
-0.79231 0.29900 -0.01160
-0.79231 0.31070 0.00170
-0.79231 0.30380 0.01510
-0.79231 0.30590 0.03530
-0.79231 0.30640 0.04200
-0.79231 0.30730 0.06700
-0.79231 0.30700 0.09300
-0.79231 0.30400 0.14200
-0.79231 0.30160 0.16700
15 0.00000 0.00000
-0.88462 0.00000 -0.08260
-0.88462 0.07000 -0.07100
-0.88462 0.13990 -0.05930
-0.88462 0.20990 -0.04760
-0.88462 0.27990 -0.03590
-0.88462 0.29910 -0.00980
-0.88462 0.30100 -0.00100
-0.88462 0.30230 0.00610
-0.88462 0.30390 0.01890
-0.88462 0.30550 0.04200
-0.88462 0.30530 0.06700
-0.88462 0.30400 0.09200
-0.88462 0.30190 0.11700
-0.88462 0.29850 0.14870
-0.88462 0.29620 0.16700
```

Παράρτημα IV : Πρότυπο αρχείο εισόδου “.inp” κώδικα SWAN2 για υπολογισμούς σε ήρεμο νερό

```
1
"LB25_new.pln"
0,0
35,11
0
.5,1.5,1
"LB25_034.ssg"
"LB25_034 SSG file"
"LB25_034"
1.7262,1000
0,7
1.416
0,0,0,0,0,0
0,0,0,0,0,0
0,0,0,0,0,0
0
0
0

39.54,-.28272,0,-.108
.246673,.4423075,.4423075,0
0,0,0
"LB25_034.out"
"0",0
"0","0","0"
2.358252E-03,8.393875
0
0
0
0
0
0
```


Παράρτημα V : Πρότυπο αρχείο εξόδου “.out” κώδικα SWAN2 για υπολογισμούς σε ήρεμο νερό

```

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

```

```

-----
Name      :  LB25_034 SSG file
-----

```

Sheet#	NP1	NP2	NP	KP	MP
1	22	104	2288	3	0
2	9	53	477	3	0
3	36	12	432	2	1
4	12	12	144	1	0

```

-----

```

```

-----
PRINCIPAL HYDROSTATIC PARTICULARS
density (kg/m^3)= 1000.000  gravity (m/s^2)= 9.800
-----

```

Waterline Length	(m)	:	1.606E+0
Waterline Beam	(m)	:	6.176E-1
Maximum Draft	(m)	:	1.076E-1
Displacement	(m^3)	:	3.851E-2
Wetted Surface Area	(m^2)	:	7.850E-1
LCB (from origin)	(m)	:	-2.642E-1
TCB (from origin)	(m)	:	0.000E+0
VCB (from origin)	(m)	:	-3.348E-2

```

-----

```

Waterplane Area	(m^2)	:	7.015E-1
LCF (from origin)	(m)	:	-2.630E-1
Metacentric height	(m)	:	4.860E-1

```

-----

```

Mass	(kg)	:	3.954E+1
Mass/density	(m^3)	:	3.954E-2
LCG (from origin)	(m)	:	-2.827E-1

```

-----

```

TCG (from origin)	(m)	:	0.000E+0
VCG (from origin)	(m)	:	-1.080E-1
Radii of Gyration	(m)	:	2.467E-1 (roll)
(about CG)	(m)	:	4.423E-1 (pitch)
	(m)	:	4.423E-1 (yaw)

STEADY FORCE AND RESPONSE

Ship Speed	(m/s)	:	1.416E+0
Ship Speed	(knots)	:	2.750E+0
Wetted Surface Area	(m ²)	:	7.850E-1
Rw	(kN)	:	1.188E-2
Cw		:	1.510E-2
Sinkage	(m)	:	-3.893E-3
Trim at CG	(deg)	:	-5.740E-1

Παράρτημα VI : Πρότυπο αρχείο εισόδου “.inp” κώδικα SWAN2 για υπολογισμούς σε κυματισμούς

```
1
"LB25_new.pln"
.00542,-1.96
35,11
0
.5,1.5,1
"LB25_068_wave.ssg"
"LB25_068 wave SSG file"
"LB25_068_wave"
1.7262,1000
0,0
2.832
1,1,1,1,1,1
0,0,0,0,0,0
0,0,0,0,0,0
20
19.512
6.504
3.902
2.787
2.168
1.774
1.501
1.301
1.148
1.027
0.929
0.848
0.780
0.723
0.673
0.629
0.591
0.557
0.527
0.500
180
180
180
180
180
180
180
180
180
180
180
180
180
180
180
180
```

```
180
180
180
180
180
180
180
180
180
0.0027
0.0020
0.0017
0.0019
0.0027
0.0035
0.0072
0.0100
0.0110
0.0118
0.0104
0.0087
0.0074
0.0058
0.0049
0.0040
0.0034
0.0029
0.0024
0.0021
39.54,-.28272,0,-.108
.246673,.4423075,.4423075,0
0,0,0
"LB25_068_wave.out"
"LB25_068_wave.wp",20
"LB25_068_wave.frc","LB25_068_wave.mot","LB25_068_wave.rao"
2.358252E-03,156.096
0
0
0
0
3
0.8846 0 0.292
0.0000 0 0.212
-0.8846 0 0.182
0
```