



**ΕΞΕΤΑΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ  
ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΠΑΚΟΓΙΑΝΝΗ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΘΗΣΕΑ.

ΙΔΡΥΜΑ: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ: ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ : ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο των σπουδών μου στο τμήμα των Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου τον κ.Νικόλαο Θεμελή για την στήριξη, την υπομονή και την κατανόηση που μου έδειξε στην προσπάθεια μου να διεκπεραιώσω την διπλωματική μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Δημήτρη Μουρκογιάννη και τον κ.Γεώργιο Παπατζανάκη για την βοήθεια που μου προσέφεραν όσον αφορά την εκμάθηση του προγράμματος Shipflow. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Sukuī Liu για τη παροχή δεδομένων που αφορούν την κατανόηση και τη χρήση των ημιεμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη στήριξη που μου προσέφερε αυτά τα 7 χρόνια ώστε να μπορέσω να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

## ΣΥΝΟΨΗ.

Η καθιέρωση του δείκτη ενεργειακής σχεδίασης EEDI από τον IMO έχει εισάγει νέα δεδομένα όσον αφορά την σχεδίαση των εμπορικών πλοίων ώστε να μειωθούν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου από την λειτουργία των πλοίων. Ένα από τα μέτρα επίτευξης λιγότερων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι η μείωση της εγκατεστημένης ισχύος των εμπορικών πλοίων. Οι απαιτήσεις για μείωση της εγκατεστημένης ισχύος έρχονται σε αντίθεση με τα κριτήρια που θέτει ο IMO για την ελάχιστη απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς που πρέπει να έχει ένα πλοίο ώστε να διατηρεί τις δυνατότητες πραγματοποίησης ελιγμών σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Μια σημαντική συνιστώσα της αντίστασης που δέχεται το πλοίο σε αντίξοες καιρικές συνθήκες είναι η αντίσταση εξαιτίας των θαλάσσιων κυματισμών.

Για την μελέτη της πρόσθετης αντίστασης εξαιτίας των κυματισμών έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι όπως αναλυτικές και εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις, μέθοδοι υπολογιστικής ρευστομηχανικής (CFD) και πειράματα σε δεξαμενές. Σε αυτήν την εργασία θα γίνει χρήση των 2 πρώτων μεθόδων δηλαδή χρήση ημιεμπειρικών μαθηματικών εξισώσεων και χρήση του προγράμματος CFD Shipflow. Η έμφαση στις ημιεμπειρικές εξισώσεις δίνεται διότι επιτρέπουν στον μελετητή να υπολογίσει την πρόσθετη αντίσταση με λίγα μέσα και σε μικρό χρονικό διάστημα και με τη γνώση βασικών γεωμετρικών και υδροστατικών μεγεθών ενός πλοίου. Επίσης θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των ημιεμπειρικών με αυτών του προγράμματος Shipflow. Για της μελέτη της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα πλοίο το οποίο δεν είναι ένα υπαρκτό πλοίο αλλά ένα πρότυπο μοντέλο το containership KCS. Στο κεφάλαιο 4 θα γίνει εκτίμηση εάν το πλοίο μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του IMO που ορίζουν την Έλάχιστη Απαιτούμενη Ισχύς Πρόωσης ( Minimum Propulsion Power) που πρέπει να έχει το πλοίο ώστε να μπορεί να πλέει και να εκτελεί ελιγμούς με ασφάλεια σε κακές καιρικές συνθήκες. Το αντικείμενο της εργασίας αυτής αποτελεί αποκλειστικά η μελέτη της πρόσθετης αντίστασης εξαιτίας των κυματισμών και του πόσο αυτή περιορίζει την δυνατότητα της μηχανολογικής ισχύς του πλοίου να καλύψει τις ανάγκες για απαραίτητη ισχύς πρόωσης με βάση τους κανονισμούς του IMO.

Μέσα από την διεξαγωγή των υπολογισμών της εργασίας προέκυψαν πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα που σχετίζονται με την συνεισφορά της πρόσθετης αντίστασης στην συνολική αντίσταση του πλοίου τόσο για κανονικούς κυματισμούς ( regular waves) όσο και τυχαίους κυματισμούς (irregular waves). Επίσης μελετήθηκε η πρόσθετη αντίσταση για κυματισμούς μεγάλου και μικρού μήκους κύματος. Εξετάστηκε η επίδραση παραμέτρων όπως η ταχύτητα και η διαγωγή του πλοίου, το ύψος και η διεύθυνση των κυματισμών στην πρόσθετη αντίσταση. Τέλος μελετήθηκε η επίδραση της πρόσθετης αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς για διαφορετικές τιμές ταχύτητας πλοίου και ύψους καρμούματος στην ζήτηση ισχύος από τον κινητήρα του υπό μελέτη πλοίου

## **ABSTRACT.**

The introduction of Energy Efficient Design Index by IMO has imposed new standards regarding ship design in order to reduce the greenhouse gas emissions by shipping activities. Power limitation is one of the design options that can result to lower emissions. The demand for lower power comes in contradiction with the implementation of the criteria set by IMO regarding the Minimum Propulsion Power(MPP) that indicate the minimum propulsion power a ship must have in order to maintain maneuverability in adverse conditions. A serious component of ships resistance in adverse weather conditions is the Added wave Resistance due to sea waves.

This thesis investigates the phenomenon of the added wave resistance due to the sea waves. Many methods have been developed for the study and prediction of the wave added resistance like semiempirical formulas, CFD methods and tank experiments. In this thesis we considered the use of semiempirical formulas and CFD methods for the prediction of added wave resistance. Regarding the semiempirical formulas a special focus was given to the Liu&Papanikolaou formulas. Semiempirical formulas have the advantage that can predict the added wave resistance in short time with the knowledge of very basic and few Ship particulars. When it comes to the CFD program we chose Shipflow which is a program designed for maritime studies. The results of both methods will be compared. For the purposes of the study only one subject ship was chosen. The ship is not a real ship but the benchmark model containership KCS. In Section 4 the ship's installed propulsion power will be tested if it can fulfill the criteria of IMO regarding the Minimum Propulsion Power and the power demand due to high added wave resistance for various ship speeds.

Examining the results of the calculations of this thesis interesting conclusions were made regarding the contribution of the added resistance to the total ship resistance both for regular and irregular waves. The added resistance was studied for both short and long wave lengths. Also the influence of other parameters like the ship's speed and trim, the height and the direction of the waves on the added wave resistance, was studied. In the end we examine the power demand for the ships engine due to the added resistance in irregular waves for different values of ship speed and wave height.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΣΥΝΟΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	4
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	8
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ**.....13

1.1 Ενεργειακή αποδοτικότητα.....	13
1.2 Έλεγχος Ελάχιστης Εγκατεστημένη Ισχύος.....	14
1.3 Η φύση της πρόσθετης αντίστασης πλοίου.....	14
1.4 Μέθοδοι υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης.....	15
1.5 Στόχος της διπλωματικής εργασίας.....	15
1.6 Αναλυτικές μαθηματικές μέθοδοι.....	16
1.6.1 Gerritsma&Beukelman.....	16
1.6.2 Salvesen.....	17
1.6.3 Faltisen.....	17
1.7 Το υπο μελέτη πλοίο KCS.....	20

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**.....21

2.1 Εισαγωγή στις ημιεμπειρικές μεθόδους.....	21
2.2 Stawave-1.....	22
2.3 Stawave-2.....	23
2.4 Liu&Papanikolaou.....	26
2.5 Liu Papanikolaou(2020) Εισαγωγή παραμέτρου Διαγωγής( ΔΤ).....	35
2.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων Liu&Papanikolaou και Stawave-2.....	40
2.7 Επίδραση της ταχύτητας στην πρόσθετη αντίσταση κυματισμού.....	42
2.8 Επίδραση γωνίας πρόσπτωσης κυματισμού.....	43
2.8.1 Αντίσταση λόγω διάθλασης.....	44

2.8.2 Αντίσταση λόγω ακτινοβολίας.....	45
<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SHIPFLOW</u></b> .....	49
3.1 Εισαγωγή στο πρόγραμμα Shipflow.....	49
3.2 Κώδικες του Shipflow.....	49
3.2.1 XBOUND.....	49
3.2.2 XPAN.....	50
3.2.3 XMESH.....	50
3.2.4 XCHAP.....	50
3.2.5 XPTD.....	51
3.2.6 XMTD.....	51
3.2.7 MOTIONS7.....	51
3.3 Θεωρία δυναμικής ροής(Potential Flow Theory).....	52
3.4 Οριακές συνθήκες.....	53
3.4.1 Κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας.....	53
3.4.2 Δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας.....	53
3.4.3 Συνθήκη μη εισχώρησης στην επιφάνεια του σώματος.....	53
3.4.4 Η επ' άπειρον συνθήκη η συνθήκη ακτινοβολίας.....	54
3.5 Υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού στο Shipflow .....	54
3.5.1 Αντίσταση σε ήρεμο νερό.....	54
3.5.2 Αντίσταση σε κατάσταση κυματισμών.....	56
3.5.3 Αποτελέσματα Shipflow.....	57
3.5.3.1 Γωνία 180 μοιρών.....	58
3.5.3.2 Γωνία 150 μοιρών.....	59
3.5.3.3 Γωνία 120 μοιρών.....	60
3.5.3.4 Γωνία 90 μοιρών.....	61
3.5.3.5 Γωνία 60 μοιρών.....	62
3.5.3.6 Γωνία 30 μοιρών.....	63
3.5.3.7 Γωνία 0 μοιρών.....	64
3.5.3.8 Γωνία 180 μοιρών $T_m=9.2$ και $\Delta T=0.5$ .....	65

3.6 Αποτελέσματα Shipflow για τις ταχύτητες πλοίου και ύψη κύματος του Κεφαλαίου 4.....	65
3.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων Shipflow.....	75

<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (M.P.P). ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΡΟΦΩΝ</u></b> .....	77
4.1 Επιλογή κινητήρα για το KCS.....	77
4.1.1 Υπολογισμός αντίστασης πλοίου.....	77
4.1.1.1 Αντίσταση σε ήρεμο νερό.....	77
4.1.1.2 Αεροδυναμική αντίσταση.....	78
4.1.2 Συντελεστές $t_{nR}$ , $w$ .....	79
4.1.2.1 Συντελεστής ποσοστού ομόρου $w$ .....	79
4.1.2.2 Συντελεστής μείωσης ώσης $t$ .....	79
4.1.2.2 Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής $n_R$ .....	80
4.1.3 Βαθμός απόδοσης αξονικού συστήματος $n_s$ .....	80
4.1.4 Επιλογή Έλικας.....	80
4.1.5 MAN_ 6G-90ME-C10.5.....	82
4.2 Εφαρμογή κριτηρίων ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος M.P.P.....	85
4.2.1 Εισαγωγή στην M.P.P. ....	85
4.2.2 Επίπεδο Ελέγχου 1.....	85
4.2.3 Επίπεδο Ελέγχου 2.....	86
4.2.3.1 Επιλογή πρόσω ταχύτητας $V_{min}$ .....	86
4.2.3.2 Αντίσταση σε ήρεμο νερό για την $V_{min}$ .....	87
4.2.3.3 Αεροδυναμική αντίσταση για την $V_{min}$ .....	88
4.2.3.4 Πρόσθετη αντίσταση Κυματισμού για την $V_{min}$ και για $H_s=5m$ .....	89
4.3 Ζήτηση ισχύος-στροφών εξαιτίας της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού.....	100
4.3.1 Ζήτηση ισχύος στροφών για $H_s=5m$ για $V_s=8,12,16 kn$ .....	100
4.3.2 Ζήτηση ισχύος στροφών για $H_s=3.5m$ για $V_s=8,12,16 kn$ .....	103
4.3.3 Ζήτηση ισχύος στροφών για $H_s=2m$ για $V_s=8,12,16 kn$ .....	106

<b><u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u></b> .....	109
<b><u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u></b> .....	111
<b><u>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ</u></b> .....	113
Παράρτημα Α : Ονοματολογία.....	112
Παράρτημα Β : Shipflow.....	114
Παράρτημα Γ : Λογισμικό Propulsion.....	120
Παράρτημα Δ : Paraview.....	126
Παράρτημα Ε : Γραφήματα πρόσθετης αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς.....	128
<b><u>ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</u></b> .....	
Σχήμα 1: Το KCS στο περιβάλλον του προγράμματος Shipflow .....	20
Σχήμα 2: Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς ( συνάρτησης μεταφοράς) $R_{wave}$ και οι 2 συνιστώσες $R_{AWML}$ και $R_{AWRL}$ σύμφωνα με την σχέση STAWAVE-2.....	25
Σχήμα 3: Η μέση πρόσθετη αντίσταση $R_{AWL}$ για τυχαίους κυματισμούς σύμφωνα με την σχέση STAWAVE-2.....	26
Σχήμα 4: Added Resistance due to diffraction effect of DTC containership in head waves by various methods, $F_n=0.139$ . (Liu,Papanikolaou, Bolbot 2016).....	29
Σχήμα 5: Το μήκος και η γωνία εισόδου ισάλου $L_E$ και $E$ αντίστοιχα.....	30
Σχήμα 6: Behaviour of speed factor( Improved formula for Estimating Added wave Resistance of ships in Engineering applications , Liu, Papanikolaou,Bolbot,Shang 2016).....	31
Σχήμα 7: Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς( συνάρτηση μεταφοράς) $R_{AW}$ και οι 2 συνιστώσες της $R_{AWML}$ και $R_{AWRL}$ σύμφωνα με την σχέση Liu&Papanikolaou.....	33
Σχήμα 8: Η μέση πρόσθετη αντίσταση $R_{AWL}$ για τυχαίους κυματισμούς σύμφωνα με την μέθοδο Liu&Papanikolaou.....	34
Σχήμα 9: Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς( συνάρτηση μεταφοράς) $R_{AW}$ σύμφωνα με τη φόρμουλα Liu&Papanikolaou(2020) για βύθισμα $T_m=9.2$ και έμπρυμνη διαγωγή $\Delta T=0.5$ .....	37
Σχήμα 10: Σύγκριση αποτελεσμάτων των LiuPapanikolaou(2016) και LiuPapanikolaou(2020) για βύθισμα μέσο νομέα $T_m=9.2m$ και έμπρυμνη διαγωγή $\Delta T=0.5 m$ .....	38
Σχήμα 11: Η πρόσθετη αντίσταση (συνάρτηση μεταφοράς) $R_{AW}$ για κανονικούς κυματισμούς συναρτήσεως της διαγωγής $\Delta T$ σύμφωνα με την φόρμουλα Liu&Papanikolaou(2020) .....	39
Σχήμα 12: Σύγκριση των συναρτήσεων μεταφοράς $R_{AW}$ των μεθόδων Liu&Papanikolaou και STAWAVE-2.....	40



Σχήμα 13: Η μέση πρόσθετη αντίσταση $R_{AWL}$ για τυχαίους κυματισμούς σύμφωνα με τις STAWAVE-1, STAWAVE-2, Li&Papanikolaou. ....	41
Σχήμα 14: Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς (συνάρτηση μεταφοράς) $R_{AW}$ για διαφορετικές τιμές ταχύτητας πλοίου $V_s$ σύμφωνα με την φόρμουλα Liu&Papanikolaou. ....	42
Σχήμα 15: Τα μήκη και οι γωνίες εισόδου και εξόδου ισάλου $L_{E1}$ , $L_{E2}$ και $E1$ , $E2$ αντίστοιχα. ....	44
Σχήμα 16: Η πρόσθετη αντίσταση (συνάρτηση μεταφοράς) $R_{aw}$ σε κανονικούς κυματισμούς για διαφορετικές τιμές της γωνίας πρόσπτωσης κυματισμού. ....	47
Σχήμα 17: 3-D γράφημα της πρόσθετης αντίστασης $RAW$ για κανονικούς κυματισμούς για διαφορετικές τιμές γωνίας πρόσπτωσης. ....	48
Σχήμα 18: Γραφική απεικόνιση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας από το πρόγραμμα Shipflow κατά τον υπολογισμό της αντίστασης πλοίου σε ήρεμο νερό για την ταχύτητα $V_s=23,26\text{kn}$ . ....	56
Σχήμα 19: Αποτελέσματα του Shipflow για προωραίους κυματισμούς ( $180^\circ$ ). ....	58
Σχήμα 20: Γραφική απεικόνιση των υπολογισμών για προωραίους κυματισμούς και αδιάστατο μήκος κύματος 0.15. ....	58
Σχήμα 21: Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών $150^\circ$ . ....	59
Σχήμα 22: Γραφική αναπαράσταση της προσομείωσης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $150^\circ$ . ....	59
Σχήμα 23: Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών $120^\circ$ . ....	60
Σχήμα 24: Γραφική αναπαράσταση της προσομείωσης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $120^\circ$ . ....	60
Σχήμα 25: Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών $90^\circ$ . ....	61
Σχήμα 26: Γραφική αναπαράσταση της προσομείωσης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $90^\circ$ και αδιάστατο μήκος κύματος 1.5. ....	61
Σχήμα 27: Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών $60^\circ$ . ....	62
Σχήμα 28: Γραφική αναπαράσταση της προσομείωσης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $60^\circ$ και αδιάστατο μήκος κύματος 0.5. ....	62
Σχήμα 29: Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών $30^\circ$ . ....	63
Σχήμα 30: Γραφική αναπαράσταση της προσομείωσης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού $30^\circ$ και αδιάστατο μήκος κύματος 0.75. ....	63
Σχήμα 31: Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών $0^\circ$ . ....	64
Σχήμα 32: Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς ( $180^\circ$ ) για βύθισμα $T_M=9.2$ και $\Delta T=0.5$ . ....	65
Σχήμα 33: Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς ( $180^\circ$ ). $V_s=8\text{kn}$ , $H_s=2\text{m}$ . ....	66
Σχήμα 34: Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς ( $180^\circ$ ). $V_s=8\text{kn}$ , $H_s=3.5\text{m}$ . ....	67

Σχήμα 35: Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς( $180^\circ$ ) . $V_s=8kn$ , $H_s=5m$ .....	68
Σχήμα 36: Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς( $180^\circ$ ) . $V_s=12kn$ , $H_s=2m$ .....	69
Σχήμα 37: Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς( $180^\circ$ ) . $V_s=12kn$ , $H_s=3.5 m$ .....	70
Σχήμα 38: Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς( $180^\circ$ ) . $V_s=12kn$ , $H_s=5 m$ .....	71
Σχήμα 39: Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς( $180^\circ$ ) . $V_s=16kn$ , $H_s=2m$ .....	72
Σχήμα 40: Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς( $180^\circ$ ) . $V_s=16kn$ , $H_s=3.5m$ .....	73
Σχήμα 41: Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς( $180^\circ$ ) . $V_s=16kn$ , $H_s=5m$ .....	74
Σχήμα 42: Διάγραμμα Ελεύθερης ροής έλικας KP505.....	81
Σχήμα 43:Πεδίο λειτουργίας μηχανής και σημεία επιλογής πρόωσης .....	83
Σχήμα 44: Διάγραμμα Φόρτισης Κινητήρα .....	84
Σχήμα 45: Κατανομή των $R_{AW}, R_{AA}, R_{CW}$ σύμφωνα με την STAWAVE-1 για $H_s=5m$ και $V_s=4kn$ .....	89
Σχήμα 46: Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς $R_{AW}$ για ταχύτητα πλοίου $V_s=4kn$ σύμφωνα με την φόρμουλα STAWAVE-2.....	90
Σχήμα 47: Η μέση πρόσθετη αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς $R_{AWL}$ σύμφωνα με την σχέση STAWAVE-2. ....	91
Σχήμα 48: Κατανομή $R_{AW}, R_{CW}, R_{AA}$ σύμφωνα με την STAWAVE-2 για $H_s=5m$ και $V_s=4kn$ . ....	92
Σχήμα 49: Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς $R_{AW}$ για ταχύτητα πλοίου $V_s=4kn$ σύμφωνα με την φόρμουλα Liu&Papanikolaou.....	93
Σχήμα 50: Η μέση πρόσθετη αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς $R_{AWL}$ σύμφωνα με την σχέση Liu&Papanikolaou για $V_s=4kn$ και $H_s=5m$ .....	94
Σχήμα 51: Κατανομή $R_{AW}, R_{CW}, R_{AA}$ σύμφωνα με την Liu&Papanikolaou για $H_s=5m$ και $V_s=4kn$ . ...	95
Σχήμα 52: Η μέση πρόσθετη αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς για $V_s=4kn$ και $H_s=5m$ σύμφωνα με τις STAWAVE-1, STAWAVE-2 , Liu&Papanikolaou .....	96
Σχήμα 53: Διάγραμμα φόρτισης Κινητήρα και τα ζεύγη ισχύος στροφών για την ταχύτητα πλοίου $V_s=4kn$ και για σημαντικό ύψος κύματος $H_s=5m$ σύμφωνα με τις ημιεμπειρικές σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2 ,Liu&Papanikolaou.....	98
Σχήμα 54: Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα και η ζήτηση ισχύος στροφών για τις ταχύτητες $V_s=16,12,8 kn$ για σημαντικό ύψος κύματος $H_s=5 m$ σύμφωνα με τις ημιεμπειρικές σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2, Liu&Papanikoalou.....	101
Σχήμα 55: Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα και η ζήτηση ισχύος στροφών για τις ταχύτητες $V_s=16,12,8 kn$ για σημαντικό ύψος κύματος $H_s=3.5 m$ σύμφωνα με τις ημιεμπειρικές σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2, Liu&Papanikoalou.....	104

Σχήμα 56: Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα και η ζήτηση ισχύος στροφών για τις ταχύτητες $V_s=16,12,8$ kn για σημαντικό ύψος κύματος $H_s=2$ m σύμφωνα με τις ημιεμπειρικές σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2, Liu&Papanikolaou.....	107
Σχήμα 57:Το γραφικό περιβάλλον του Shipflow.....	158
Σχήμα 58:Καρτέλα εντολών Shipflow.....	159
Σχήμα 59:Στιγμιότυπο εισαγωγής δεδομένων στην κατάσταση ρυπασμένης γάστρας.....	165
Σχήμα 60:Εισαγωγή στοιχείων στο πρόγραμμα Propref για τον υπολογισμό του σημείου σχεδίασεως της έλικας PD για την έλικα KP505.....	166
Σχήμα 61:Αποτελέσματα προγράμματος Propref.....	167
Σχήμα 62:Εισαγωγή τιμών στο πρόγραμμα Propdes.....	168
Σχήμα 63: Αποτελέσματα προγράμματος Propdes.....	168
Σχήμα 64: Η καρτέλα εντολών του προγράμματος Paraview.....	169
Σχήμα 65: Αποτελέσματα προγράμματος Propdes.....	170
Σχήμα 66 Η μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού σύμφωνα με τις σχέσεις STAWAVE-1,STAWAVE-2 και Liu&Papanikolaou για $V_s=8$ kn.....	172
Σχήμα 67 Η μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού σύμφωνα με τις σχέσεις STAWAVE-1,STAWAVE-2 και Liu&Papanikolaou για $V_s=12$ kn.....	173
Σχήμα 68Η μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού σύμφωνα με τις σχέσεις STAWAVE-1,STAWAVE-2 και Liu&Papanikolaou για $V_s=16$ kn.....	174

## **ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 1: Οι γεωμετρικές διαστάσεις και τα υδροστατικά μεγέθη του KCS.....	21
Πίνακας 2: Η αντίσταση σε ήρεμο νερό $R_0$ ,Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{wave}$ , και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης $\Delta R$ για $V_s=8$ kn, $H_s=2$ m.....	67
Πίνακας 3: Η αντίσταση σε ήρεμο νερό $R_0$ ,Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{wave}$ , και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης $\Delta R$ για $V_s=8$ kn, $H_s=3.5$ m.....	68
Πίνακας 4: Η αντίσταση σε ήρεμο νερό $R_0$ ,Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{wave}$ , και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης $\Delta R$ για $V_s=8$ kn, $H_s=5$ m.....	69
Πίνακας 5: Η αντίσταση σε ήρεμο νερό $R_0$ ,Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{wave}$ , και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης $\Delta R$ για $V_s=12$ kn, $H_s=2$ m.....	70
Πίνακας 6: Η αντίσταση σε ήρεμο νερό $R_0$ ,Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{wave}$ , και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης $\Delta R$ για $V_s=12$ kn, $H_s=3.5$ m.....	71
Πίνακας 7: Η αντίσταση σε ήρεμο νερό $R_0$ ,Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{wave}$ , και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης $\Delta R$ για $V_s=12$ kn, $H_s=5$ m.....	72

Πίνακας 8: Η αντίσταση σε ήρεμο νερό $R_0$ , Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{wave}$ , και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης $\Delta R$ για $V_s=16kn$ , $H_s=2m$ .....	73
Πίνακας 9: Η αντίσταση σε ήρεμο νερό $R_0$ , Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{wave}$ , και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης $\Delta R$ για $V_s=16kn$ , $H_s=3.5m$ . ....	74
Πίνακας 10: Η αντίσταση σε ήρεμο νερό $R_0$ , Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{wave}$ , και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης $\Delta R$ για $V_s=16kn$ , $H_s=5m$ .....	75
Πίνακας 11: Αντίσταση σε ήρεμο νερό για καθαρή γάστρα $R_{cw\_clean}$ , $V_s$ ,.....	78
Πίνακας 12: Αντίσταση σε ήρεμο νερό για μολυσμένη γάστρα $R_{cw\_fouled}$ , $V_s$ .....	79
Πίνακας 13: Αεροδυναμική αντίσταση πλοίου .....	79
Πίνακας 14: Συνολική Αντίσταση ρυμούλκησης για καθαρή και μολυσμένη γάστρα.....	80
Πίνακας 15: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά KP505 .....	81
Πίνακας 16: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Wageningen(P/D=1.4) .....	83
Πίνακας 17: Power Speed, Clean and Fouled hull .....	83
Πίνακας 18: Τιμές $H_s$ , $V_w$ , $T_p$ για δυσμενείς καιρικές συνθήκες σύμφωνα με την οδηγία IMO,2013 .....	86
Πίνακας 19: Συντελεστές $a, b$ υπολογισμού ελάχιστου απαιτούμενου MCR σύμφωνα με το Επίπεδο Ελέγχου 1 και την οδηγία (IMO,2013) .....	87
Πίνακας 20: Ελάχιστη ταχύτητα πλοίου $V_s$ , πυκνότητα αέρα $\rho_a$ , ταχύτητα ανέμου $V_w$ , σχετική ταχύτητα πλοίου και αέρα $V_{wrel}$ , μετωπική επιφάνεια $A_{FW}$ πλοίου.....	89
Πίνακας 21: Αντίσταση ρυμούλκησης $R_T$ , ώση έλικας $T$ , η ισχύς SHP και οι στροφές $N$ στον άξονα της μηχανής για την ελάχιστη ταχύτητα πλεύσης $V_s=4kn$ για το επίπεδο ελέγχου 2 .....	98
Πίνακας 22: Αντίσταση σε ήρεμο και καθαρή γάστρα $R_{cw}$ , Αντίσταση σε ήρεμο και μολυσμένη γάστρα $R_{cw\_fouled}$ , Αεροδυναμική αντίσταση $R_{AA}$ , Μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{AWL}$ σύμφωνα με τις σχέσεις $stawave-1$ , $stawave-2$ , Liu&Papanikolaou για τις ταχύτητες $V_s=8,12,16kn$ και σημαντικό ύψος κύματος $H_s=5m$ . ....	100
Πίνακας 23: Συνολική αντίσταση $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές $N$ στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-1, για $V_s=8,12,16kn$ $H_s=5m$ .....	101
Πίνακας 24: Συνολική αντίσταση $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές $N$ στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-2, για $V_s=8,12,16kn$ $H_s=5m$ .....	101
Πίνακας 25: Συνολική αντίσταση $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές $N$ στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την Liu&Papanikolaou , για $V_s=8,12,16kn$ $H_s=5m$ .....	101
Πίνακας 26: Αντίσταση σε ήρεμο και καθαρή γάστρα $R_{cw}$ , Αντίσταση σε ήρεμο και μολυσμένη γάστρα $R_{cw\_fouled}$ , Αεροδυναμική αντίσταση $R_{AA}$ , Μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{AWL}$ σύμφωνα με τις σχέσεις $stawave-1$ , $stawave-2$ , Liu&Papanikolaou για τις ταχύτητες $V_s=8,12,16kn$ και σημαντικό ύψος κύματος $H_s=3.5m$ . ....	103

Πίνακας 27: Συνολική αντίσταση $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές $N$ στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-1, για $V_s=8,12,16\text{kn}$ $H_s=3.5\text{m}$ .	103
Πίνακας 28: Συνολική αντίσταση $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές $N$ στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-2, για $V_s=8,12,16\text{kn}$ $H_s=3.5\text{m}$ .	104
Πίνακας 29: Συνολική αντίσταση $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές $N$ στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την Liu&Papanikolaou , για $V_s=8,12,16\text{kn}$ $H_s=3.5\text{m}$ .	104
Πίνακας 30: Αντίσταση σε ήρεμο και καθαρή γάστρα $R_{cw}$ , Αντίσταση σε ήρεμο και μολυσμένη γάστρα $R_{cw\_fouled}$ , Αεροδυναμική αντίσταση $R_{AA}$ , Μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού $R_{AWL}$ σύμφωνα με τις σχέσεις stawave-1, stawave-2, Liu&Papanikolaou για τις ταχύτητες $V_s=8,12,16\text{kn}$ και σημαντικό ύψος κύματος $H_s=2\text{m}$ .	106
Πίνακας 32: Συνολική αντίσταση $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές $N$ στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-1, για $V_s=8,12,16\text{kn}$ $H_s=2\text{ m}$	106
Πίνακας 32: Συνολική αντίσταση $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές $N$ στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-2, για $V_s=8,12,16\text{kn}$ $H_s=2\text{ m}$	106
Πίνακας 33: Συνολική αντίσταση $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές $N$ στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την Liu&Papanikolaou , για $V_s=8,12,16\text{kn}$ $H_s=2\text{m}$	107

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:ΕΙΣΑΓΩΓΗ.**

### **1.1 .ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ.**

Τις τελευταίες δεκαετίες το φαινόμενο του θερμοκηπίου αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα ζητήματα που αφορά την ανθρωπότητα. Είναι ένα αμιγώς ανθρωπογενές πρόβλημα το οποίο οφείλεται στις εκπομπές ρίπων όλων των σύγχρονων βιομηχανικών δραστηριοτήτων. Η παγκόσμια ναυτιλία αποτελεί βασικό πυλώνα της παγκόσμιας βιομηχανίας. Η συμβολή της παγκόσμιας εμπορικής ναυτιλίας στις εκπομπές ρίπων αποτελεί την τρίτη στη κατάταξη στον τομέα των μεταφορών παρότι το ποσοστό της είναι σχετικά μικρό , 11% των εκπομπών CO<sub>2</sub> (IEA, Statista 2022). Κατέστη λοιπόν αναγκαία η θεσμοθέτηση ενός πλαισίου κανόνων που θα αφορούσε τον σχεδιασμό των πλοίων, ώστε να περιοριστούν σταδιακά οι εκπομπές ρίπων από τη λειτουργία τους. Το 2011 ο IMO καθιέρωσε τον Σχεδιαστικό Δείκτη Ενεργειακής Απόδοσης κατα τη σχεδίαση του πλοίου ( Energy Efficiency Design Index- EEDI) και τον δείκτη ενεργειακής απόδοσης υφισταμένου εν λειτουργία πλοίου (Energy Efficiency Existing Index-EEXI) συνεδρίαση του IMO MEPC.203(62)(IMO 2011).

Οι EEDI και EEXI έχουν ως μονάδα τα γραμμάρια του εκπέμποντος CO<sub>2</sub> ανά τόνομίλι.(g/t\*nm). Ξεκινώντας από την 1 Ιανουαρίου του 2013 ο IMO όρισε τις Φάσεις μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> με πρώτη τη Φάση 0 η οποία είχε διάρκεια 2 χρόνων, με απώτερο στόχο όλα τα πλοία που ναυπηγήθηκαν από το 2013 και μετά να μπορούν μεταξύ του 2025 και 2030 να εκπέμπουν 30% λιγότερες ποσότητες CO<sub>2</sub> κατά την επιτέλεση των δραστηριοτήτων τους. Μάλιστα ο στόχος του IMO είναι η επίτευξη μείωσης κατά 70% των εκπομπών CO<sub>2</sub> μέχρι το 2050.

Η επίτευξη χαμηλότερων τιμών EEDI και EEXI μπορεί να γίνει με συγκεκριμένες σχεδιαστικές επιλογές όπως η μείωση της ειδικής κατανάλωσης του κινητήρα SFOC (g/kWh), με την χρήση αέριων καυσίμων όπως LNG και LPG, με την χρήση αξονικών γεννητριών (shaft generators) και με την μείωση της εγκατεστημένης ισχύος του κινητήρα (power limitation). Ωστόσο η μείωση της εγκατεστημένης ισχύος περιορίζεται από τους κανονισμούς του IMO MEPC.232(65) οι οποίοι ορίζουν την Ελάχιστη Απαιτούμενη Ισχύς Πρόωσης (MPP) που χρειάζεται ένα πλοίο ώστε να μπορεί να εκτελεί ελιγμούς σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Δηλαδή τα κριτήρια της ενεργειακής αποδοτικότητας έχουν ανταγωνιστική σχέση με αυτά της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος πρόωσης.

### **1.2.ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΗ ΙΣΧΥΣ ΠΡΟΩΣΗΣ –MINIMUM PROPULSION POWER( MPP).**

Σύμφωνα με τον Κανονισμό 21.5 Κεφάλαιο 4. Παράρτημα 6 της MARPOL για κάθε πλοίο απαιτείται ο εγκατεστημένος Μηχανολογικός εξοπλισμός να παρέχει επαρκή ισχύς προώσεως ώστε το πλοίο να μπορεί να εκτελέσει ασφαλή πλεύση και ελιγμούς

ακόμα και στις χειρότερες καιρικές συνθήκες όπως αυτές ορίζονται από τους κανονισμούς. Οι κανονισμοί του IMO για την MPP δημοσιεύθηκαν πρώτη φορά το 2013( IMO 2013,MEPC.232(65)) και εφαρμόζονται μέχρι σήμερα. Ο έλεγχος για την επάρκεια της εγκατεστημένης ισχύος του πλοίου γίνεται σε 2 επίπεδα σύμφωνα με ( IMO 2013,MEPC.232(65)). Το πρώτο επίπεδο αφορά τον υπολογισμό της MPP συναρτήση του DWT του πλοίου. Το δεύτερο επίπεδο αφορά τον προσδιορισμό της ελάχιστης ταχύτητας για την οποία μπορεί το πλοίο να πραγματοποιήσει ελιγμούς σε αντίξοες καιρικές συνθήκες και αν η εγκατεστημένη ισχύ μπορεί να καλύψει την ζήτηση ισχύος στροφών για την συγκεκριμένη ταχύτητα. Τα 2 επίπεδα ελέγχου περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Για την εφαρμογή του 2ου επιπέδου είναι απαραίτητη η γνώση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού η οποία αποτελεί βασικό κομμάτι της συνολικής αντίστασης. Για παράδειγμα όπως θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 4 η μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού μπορεί να είναι έως 3 και 4 φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση σε ήρεμο νερό για την ταχύτητα και το ύψος κύματος που ορίζει το 2 επίπεδο ελέγχου.

### **1.3.Η ΦΥΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.**

Όταν ένα πλοίο πραγματοποιεί ταλαντωτικές κινήσεις εξαιτίας της επίδρασης κυματισμών ακτινοβολεί ενέργεια στο περιβάλλον ρευστό. Η ενέργεια μεταφέρεται στον περιβάλλον ρευστό με την μορφή κυματισμών. Οι υδροδυναμικές κινήσεις και συνεπώς οι υδροδυναμικές δυνάμεις που αναπτύσσονται είναι κυρίαρχες για τις περιπτώσεις του προνευτασμού (pitch) και της κατακόρυφης ταλάντωσης (Heave). Έτσι είναι κατανοητό πως η πρόσθετη αντίσταση αποτελεί ένα μη συνεκτικό φαινόμενο δηλαδή δεν οφείλεται στα φαινόμενα τριβής και στροβιλισμού του ρευστού κοντά στην επιφάνεια της γάστρας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς για την μελέτη της πρόσθετης αντίστασης μπορεί να εφαρμοστεί η θεωρία δυναμικής ροής(potential flow theory) η οποία θεωρεί το ρευστό το οποίο περιρρέει ένα σώμα ασυμπίεστο,ατριβές και αστρόβιλο και έτσι διευκολύνεται η απλοποίηση της μαθηματικής ανάλυσης εφόσον δεν λαμβάνονται υπόψιν τα εν λόγω φαινόμενα τριβής και στροβιλισμού. Εκτός από την ακτινοβολία κυματισμών εξαιτίας των κινήσεων του πλοίου η πρόσθετη αντίσταση οφείλεται και στην ανάκλαση διάθλαση των προσπιπτόντων κυματισμών. Αυτές οι 2 συνιστώσες αποτελούν κυρίως την πρόσθετη αντίσταση και όπως θα διαπιστωθεί στη συνέχεια μέσα από τους υπολογισμούς η αντίσταση εξαιτίας της διάθλασης των κυματισμών κυριαρχεί για κυματισμούς υψηλής συχνότητας και μικρού μήκους ενώ η αντίσταση για εξαιτίας της ακτινοβολίας των κυματισμών αποτελεί την κύρια συνιστώσα για κυματισμούς μεγάλου μήκους και μικρότερης συχνότητας.

### **1.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.**

Για τον υπολογισμό της Πρόσθετης Αντίστασης λόγω κυματισμού έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι όπως προγράμματα CFD, κώδικες RANS, κώδικες επίλυσης εξίσωσης δυναμικής ροής(potential flow solvers), αναλυτικές και ημιεμπειρικές μέθοδοι και

εκτέλεση πειραμάτων μοντέλων σε δεξαμενές. Στην εργασία αυτή θα γίνει μελέτη με την χρήση των ημιεμπειρικών μεθόδων και με την χρήση του προγράμματος CFD Shipflow version 7. Η χρήση των ημιεμπειρικών στην συγκεκριμένη διπλωματική έγινε διότι η ανάπτυξη ημιεμπειρικών μαθηματικών σχέσεων παρουσιάζει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς μπορούν να αποδίδουν με ακρίβεια την πρόσθετη αντίσταση κυματισμού με λίγα μέσα και με την χρήση βασικών παραμέτρων. Για παράδειγμα ο Αμερικανικός Νηογνώμονας ABS έχει αναπτύξει ένα πρόγραμμα υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης, το ABS RAW το οποίο βασίζεται στην ημιεμπειρική μέθοδο D.3(ISO 15016).

### **1.5 Ο ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.**

Ο στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της πρόσθετης αντίστασης για ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με την χρήση ημιεμπειρικών μεθόδων και με την χρήση προγράμματος CFD. Θα γίνει χρήση των ημιεμπειρικών σχέσεων STAWAVE-1&2 και της σχέσης Liu&Papanikolaou ενώ το πρόγραμμα CFD που θα χρησιμοποιηθεί είναι το πρόγραμμα Shipflow της εταιρείας Flowtech. Θα μελετηθεί η πρόσθετη αντίσταση για διαφορετικές τιμές βυθίσματος, διαγωγής και ταχύτητας πλοίου όπως και για διαφορετικές τιμές μήκους και ύψους κύματος. Θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των ημιεμπειρικών και του Shipflow απο κοινού και θα εξαχθούν τα ανάλογα συμπεράσματα. Τέλος θα μελετηθεί η επίδραση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού στην ζήτηση ισχύος και στροφών από τον ναυτικό κινητήρα του υπο μελέτη πλοίου αλλά και η δυνατότητα του κινητήρα του πλοίου να ικανοποιήσει τα κριτήρια της ελάχιστης απαιτούμενης ισχύος πρόωσης(M.P.P) του IMO.

### **1.6 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ**

Για την μελέτη της πρόσθετης αντίστασης αναπτύχθηκαν αρκετές μαθηματικές μέθοδοι όπως των Gerritsma&Beukman (1972),Faltsisen(1980),Boese (1970) Fuji Takashi(1975). Απο αυτές θα παρατεθούν στην εργασία μας αυτές των Gerritsma&Beukelman (1972),Faltsisen(1980),Salvesen χωρίς όμως να γίνει χρήση τους για τους υπολογισμούς απλά για να τονιστεί η ανάγκη της αναπτύξεως των ημι-εμπειρικών μεθόδων.

#### **1.6.1 Gerritsma&Beukelman (1972).**

Για την περιγραφή της πρόσθετης αντίστασης θα χρησιμοποιήσουμε την ενεργειακή μέθοδο που προτάθηκε από τους Gerritsma&Beukman (1972) η οποία πέραν της απλότητας της παρέχει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Η συγκεκριμένη θεώρηση βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας δηλαδή για παράδειγμα στην απλούστερη περίπτωση των μετωπικών απλών αρμονικών κυματισμών( $\beta=180^0$ ) η ενέργεια  $E_{AW} = R_{AW}(U+c)T = R_{AW}\lambda$  που συνδέεται με την εμφάνιση της πρόσθετης αντίστασης  $R_{AW}$  στη διάρκεια μιας περιόδου  $T$  η οποία σχετίζεται με την κυματική ενέργεια που ακτινοβολείται μακριά από το πλοίο λόγω της κατακόρυφης ταλάντωσης του εξαιτίας του προσπίπτοντος κυματισμού. Με την έννοια



αυτή η σχετική κατακόρυφη ταχύτητα σε κάθε εγκάρσια τομή κατά μήκος του πλοίου δίνεται από τη σχέση.

$$VR(x1, t) = \frac{d\xi R(x1, t)}{dt} = \frac{\partial \xi R(x1, t)}{\partial t} - U \frac{\partial \xi R(x1, t)}{\partial x1} \quad (1.1)$$

Όπου  $\xi R(x1, t) = (\xi 3 - \chi \xi 5 - \eta(x1, t)) \exp(j\omega t)$ . (1.2)

Όπου  $\xi 3, \xi 5$  τα μιγαδικά πλάτη της κατακόρυφης ταλάντωσης (heave) και του προνευτασμού (pitch) και  $\eta(x1, t) = A \exp(j(kox1 + \omega t)) \exp(-jkoUt)$  η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας λόγω του προσπίπτοντος κυματισμού στο πλοίο. Στην περίπτωση των μετωπικών κυματισμών  $\omega = \omega_0 + koU$  όπου  $\omega$  η συχνότητα συνάντησης και  $ko = \omega^2/g$  ο κυματαριθμός.

Η ενέργεια που ακτινοβολείται κατά την διάρκεια μιας περιόδου  $T$  λόγω των κατακόρυφων ταλαντώσεων των εγκάρσιων τομών του πλοίου δίνονται από την σχέση.

$$E = \frac{\pi}{\lambda \omega} \int_L \beta_{33}(\chi 1) * \overline{V_R^2} dx1 \quad (1.3)$$

Όπου  $\beta_{33}(\chi 1)$  είναι ο συντελεστής απόσβεσης της κάθε εγκάρσιας μέσης τομής και  $\overline{V_R^2}$  η μέση τετραγωνική τιμή της σχετικής κατακόρυφης ταχύτητας. Έτσι προκύπτει η εξίσωση της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού

$$R_{AW} = \frac{\pi}{\omega} \int_L \beta_{33}(\chi 1) * \overline{V_R^2} dx1 \quad (1.4)$$

### **1.6.2 Salvesen(1974).**

Η μέθοδος Salvesen(1974) εφαρμόζεται για λεπτόγραμμα πλοία με διαμήκη συμμετρία.

$$\Sigma_{\kappa=3,5} - \omega^2 (M_{jk} + A_{jk}) + i\omega B_{jk} + C_{jk} n_k = F_j \text{ for } j = 3 \text{ and } 5$$

Όπου  $M_{jk}, A_{jk}, B_{jk}, C_{jk}$  τα μητρώα των συντελεστών των μαζών, πρόσθετων μαζών, των δυνάμεων απόσβεσης και επαναφοράς αντίστοιχα.

Η εξωτερική δύναμη δίνεται από τον τύπο

$$F_j = F_j^I + F_j^D \quad (1.5)$$

Όπου  $F_j^I$  οι δυνάμεις και ροπές Froude-Kryllon και  $F_j^D$  οι δυνάμεις και ροπές εξαιτίας της διάθλασης των προσπίπτοντων κυματισμών. Το πεδίο για τον υπολογισμό των δυνάμεων Froude-Kryllon δίνεται από την σχέση.  $\Phi_0 = \frac{i\rho \zeta \alpha}{\omega} e^{(ik(xc \cos b + y \sin b) + kz)}$

$$R_{AW} = \frac{-i * k * \cos \beta}{2} * \Sigma_{j=3,5} \zeta_j \{ (\widehat{F_j^I} + \widehat{F_j^D}) \} + R7 \quad (1.6)$$

$$F_3^I = i * \rho * \omega * \iiint_S N_3 * \Phi_0 * ds \quad (1.7)$$

$$F_5^I = i * \rho * \omega * \iiint_S x N_3 * \Phi_0 * ds \quad (1.8)$$

$$\widehat{F}_j^D = \iiint_L \widehat{h}_3(x) ds \quad (1.9)$$

$$\widehat{F}_j^D = - \iiint_L (x + \frac{iU}{\omega e}) \widehat{h}_3(x) ds \quad (1.10)$$

$$\widehat{h}_3(x) = -\rho * \kappa * \int_C \Psi_3 [N_3 + i * N_3 * \sin\beta] * \Phi_0 * dl \quad (1.11)$$

$$R_7 = -\frac{1}{2} * \rho * \zeta \alpha^2 \frac{\omega^2}{\omega e} * k * \cos\beta * \int_L e^{-2kds} (b_{33} + b_{22} * \sin^2 \beta) dx \quad (1.12)$$

Το γράμμα  $C$  συμβολίζει την καμπύλη της ισάλου.  $N_3$  το κάθετο διάνυσμα της καμπύλης της βρεχόμενης περιοχής της διδιάστατης μέσης τομής. Με  $b_{33}$  και  $b_{22}$  οι συντελεστές απόσβεσης των κινήσεων στον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα αντίστοιχα. Με  $\beta$  συμβολίζεται η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, με  $U$  η ταχύτητα του πλοίου και με  $\Psi_3$  το δυναμικό της ταχύτητας στον κατακόρυφο άξονα.

### **1.6.3 Faltinsen(1980).**

Η βασική ιδέα της μεθόδου βασίζεται στον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμού μέσω της ολοκλήρωσης των πιέσεων πάνω στην βρεχόμενη επιφάνεια μέσω των εξισώσεων ισορροπίας δυνάμεων και ροπών αλλά και ενεργειακής ισορροπίας.

$$P = -\rho * g * z - \rho * \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{\rho}{2} * V^2 + p_0 + \frac{\rho}{2} * U^2 \quad (1.13)$$

Η μέθοδος Faltisen δίνει καλά αποτελέσματα για μικρές ταχύτητες πλοίου και μεγάλα μήκη κύματος.

$$P = -\rho * g * z - \rho * \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \rho * U * \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{\rho}{2} \left\{ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right\} + P_0 \quad (1.14)$$

$$\Phi \sim \Phi^{(1)} + \Phi^{(2)} + \dots \quad (1.15)$$

$\Phi^{(1)}$  : Είναι το γραμμικό δυναμικό πρώτου βαθμού.

$\Phi^{(2)}$  : Είναι το μη γραμμικό δυναμικό δεύτερου βαθμού.

$$\begin{aligned}
ps = & -\rho * g * z - \rho * \left( \frac{\partial \Phi^1}{\partial t} + U * \frac{\partial \Phi^1}{\partial x} \right)_m - \rho * \left( \frac{\partial \Phi^2}{\partial t} + U * \frac{\partial \Phi^2}{\partial x} \right)_m - \rho(n2 + xn6 - \\
& zn6) * \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \Phi^1}{\partial t} + U * \frac{\partial \Phi^1}{\partial x} \right)_m - \rho(n3 + xn5 - yn4) * \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \Phi^1}{\partial t} + U * \frac{\partial \Phi^1}{\partial x} \right)_m - \\
& \frac{\rho}{2} \left\{ \left( \frac{\partial \Phi^1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi^1}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi^1}{\partial z} \right)_m^2 \right\} + \rho o \quad (1.16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F1 = & \int_C \left\{ -\frac{\rho * g}{2} * \bar{\zeta}_r \right\} n1 ds - \omega_e^2 M \overline{n3n5} + \omega_e^2 M \overline{(n2 - ZG * ns)n6} \\
& + \rho \int_{SB} \{ (n2 + xn6 - zn4) \} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \right)_m \\
& + \left( \{ (n2 + xn6 - zn4) \} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial x} \right)_m + \left\{ \left( \frac{\partial \Phi^1}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi^1}{\partial y} \right)^2 \right. \right. \\
& \left. \left. + \left( \frac{\partial \Phi^1}{\partial z} \right)^2 \right\} n1 ds. \quad (1.17)
\end{aligned}$$

Το γράμμα C χρησιμοποιείται για να συμβολιστεί η ισάλος γραμμή,  $\zeta_r = \zeta - (\eta_3 - \chi_5 - yn_4)$  η σχετική μετατόπιση κατά μήκος του πλοίου με  $\zeta$  την ανύψωση της ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Με SB συμβολίζεται η βρεχόμενη επιφάνεια της θάλασσας. Η μπάρα πάνω από ορισμένους συντελεστές συμβολίζει τη μέση τιμή.

#### Faltisen Asymptotic Formula

$$\overline{Fn} = \frac{1}{2} \rho * g * \zeta \alpha^2 \left\{ \left( \frac{k_1}{2\kappa} - \frac{1}{2} (\cos\theta)^2 \right) + \frac{k_2}{2\kappa} \sin\theta \right\} \quad (1.18)$$

$$k_1 = (\omega e - V k \cos\theta)^2 / g \quad (1.19)$$

$$k_2 = \sqrt{(k_1^2 - k^2 * (\cos\theta)^2)} \quad (1.20)$$

$\zeta$ : Το πλάτος του κύματος

$\kappa$ : Ο κυματαριθμός.

$\theta$ : Η γωνία μεταξύ της εφαπτομένης της ισάλου και του διαμήκη άξονα  $\chi$ .

$$Raw = \int_{c_l} \rho * g * \zeta \alpha^2 \{ (\sin\theta)^2 + 2 * \frac{\omega o U}{g} (1 - (\cos\theta)^2) \} \sin\theta \quad (1.21)$$

Η αναφορά στην ασυμπτωτική μέθοδο Faltsien γίνεται και για έναν εξίσου σημαντικό λόγο και αυτός είναι ότι η μέθοδος Liu-Papanikolaou η οποία θα αναλυθεί στην εργασία αυτή έχει βασιστεί και αναπτυχθεί πάνω στην ασυμπτωτική φόρμουλα Faltsinsen για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης κυματισμών μικρού μήκους.

Η πρόσθετη αντίσταση αναφέρεται συνήθως στην αδιάστατη μορφή της.

$$R_{AW} \text{ η } CAW = \frac{R_{AW}}{\zeta \alpha^2 * \rho * g * \frac{B}{Lwl}^2} \quad (1.22)$$

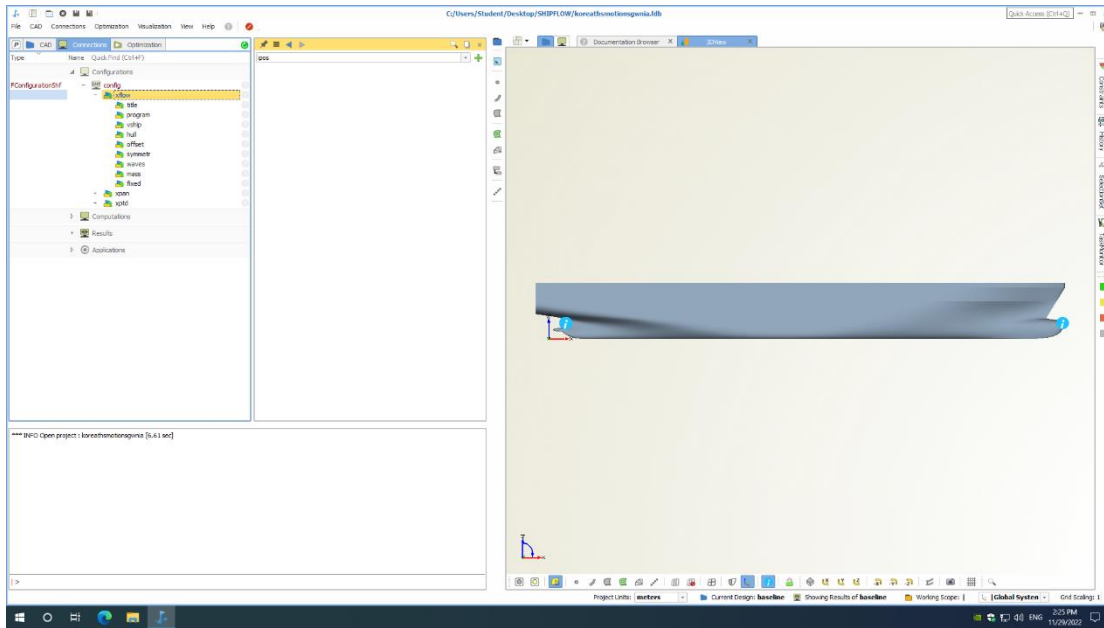
### Η Αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς.

Ένα πλοίο κατά την διάρκεια πλεύσης του δέχεται την επίδραση τυχαίων κυματισμών irregular waves. Έτσι είναι απαραίτητο να μπορεί να υπολογιστεί η Μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού για τυχαίους κυματισμούς. Εφόσον η μελέτη αφορά τους τυχαίους κυματισμούς είναι απαραίτητη η εισαγωγή του ενεργειακού φάσματος θαλάσσης. Η πρόσθετη αντίσταση για τυχαίους κυματισμούς δίνεται από την παρακάτω σχέση. Η Rwave είναι η συνάρτηση μεταφοράς της πρόσθετης αντίστασης για regular waves, ζα είναι το πλάτος του κυματισμού, Sη(ω) είναι το ενεργειακό φάσμα. Στην δική μας εργασία επιλέξαμε το φάσμα Johnswarp το οποίο είναι διπαραμετρικό με παραμέτρους Hs, Tr.

$$R_{AWL} = 2 * \int_0^{\infty} \frac{R_{wave}(\omega, Vs)}{\zeta \alpha^2} * S_{\eta}(\omega) * d\omega \quad (1.23)$$

### **1.7 .ΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟ**

Το πλοίο το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις μελέτες της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι το πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων KCS. Το KCS δεν είναι ένα υπαρκτό πλοίο αλλά ένα πρότυπο μοντέλο το οποίο έχει κατασκευάσει και βελτιστοποιήσει το Κορεατικό ινστιτούτο Ναυτιλίας και Θαλάσσιας Τεχνολογίας. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα ευρευνητικών εργασιών. Παρακάτω παρουσιάζεται το KCS στο 3Dview γραφικό περιβάλλον του προγράμματος Shipflow. Επειδή το πλοίο δεν είναι ένα υπαρκτό πλοίο αλλά ένα πλοίο μοντέλο έτσι δεν υπάρχει εγχειρίδιο διαγωγής και ευστάθειας. Ωστόσο με το υποπρόγραμμα Hydrostatics του Shipflow μπορούμε εξάγουμε τα υδροστατικά δεδομένα του πλοίου για το εκάστοτε βύθισμα. Για γεωμετρικά μεγέθη όπως το μήκος εισόδου ισάλου LE το οποίο χρησιμοποιείται από τις μεθόδους STAWAVE2 και Liu-Papanikolaou τα οποία δεν μπορούν να εξαχθούν από το Hydrostatics του Shipflow, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Rhinoceros.



Σχήμα 1 Το πλοίο KCS στο περιβάλλον του προγράμματος Shipflow.

Στον πίνακα παρουσιάζονται όλα τα γεωμετρικά και υδροστατικά μεγέθη τα οποία χρειάζονται για τους υπολογισμούς της εργασίας. Τα στοιχεία ελήφθησαν από την ιστοσελίδα. [http://www.simman2008.dk/KCS/kcs\\_geometry.htm](http://www.simman2008.dk/KCS/kcs_geometry.htm).

LBP	230m
B	32,2 m
Tsc	10.8 m
D	19 m
C <sub>bTdes</sub>	0,6505
S	9424 m <sup>2</sup>
V	52030 m <sup>3</sup>
K <sub>yy</sub>	0.25
C <sub>p</sub>	0.661
C <sub>w</sub>	0.83
A <sub>wl</sub>	6144.8 m <sup>2</sup>

Πίνακας 1 Γεωμετρικές διαστάσεις και υδροστατικά μεγέθη του KCS.

Στην εργασία μας η μελέτη της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού για το πλοίο KCS έγινε για ταχύτητα  $V=23.26$  kn ,  $Fr=0.252$ . και  $H=5$ m.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΗΜΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ.**

Παρατηρώντας την ανάλυση των Gerritsma&Beukman (1972) και Faltisen(1980) καταλαβαίνει κάποιος πώς ο υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης εξαιτίας των κυματισμών ενός πλοίου βάση των παραπάνω μεθόδων αποτελεί ένα δύσκολο αντικείμενο τόσο από άποψη πολυπλοκότητας αλλά και των υπολογισμών που απαιτούνται. Αυτό δεν εξυπηρετεί τις άμεσες ανάγκες του σύγχρονου σχεδιαστή να μπορεί να προβλέψει την πρόσθετη αντίσταση κυματισμού σε σύντομο χρονικό διάστημα και με την γνώση βασικών γεωμετρικών και υδροστατικών παραμέτρων και με την χρήση ενός απλοϊκού υπολογιστικού προγράμματος όπως το Microsoft Excel. Αποτέλεσμα ήταν να αναπτυχθούν μια σειρά από ημιεμπειρικές μαθηματικές φόρμουλες οι οποίες έχουν υιοθετηθεί και από την ITTC(2021)( Preparation, Conduct and Analysis of Speed/ Power Trials (Appendix G)) και που μπορούν να αποδώσουν την πρόσθετη αντίσταση κυματισμού για συγκεκριμένες καταστάσεις φόρτωσης και θαλάσσης με αρκετά ικανοποιητική ακρίβεια. Οι πιο γνωστές απ'όλες αυτές είναι οι STAWAVE1,STAWAVE-2,STAWAVE-3 και οι φόρμουλες Liu-Papanikolaou.Στην παρούσα εργασία θα γίνει μελέτη των STAWAVE-1,STAWAVE-2 και των Liu-Papanikolaou,(ITTC(2022)).

Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει η ανάπτυξη μιας καθολικής ημιεμπειρικής φόρμουλας για όλους τους τύπους πλοίων και όλες τις καταστάσεις φόρτωσης και κυματισμού είναι πολλές και σχετίζονται με τις διαφορές ως προς την μορφή της γάστρας των διάφορων τύπων πλοίων, το μήκος κύματος, την επίδραση παραγόντων όπως το βύθισμα και η ταχύτητα πλοίου, η κατεύθυνση του κυματισμού. Για παράδειγμα τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και τα κρουαζιερόπλοία έχουν πιο λεπτόγραμμες μορφές γάστρας σε αντίθεση με τα bulk carrier και τα tanker. Στην περίπτωση των μικρού μήκους κυματισμών όπου τα συνεκτικά φαινόμενα και η αντίσταση διάθλασης κυριαρχούν και η ένταση τους ποικίλει ανάλογα την ταχύτητα και τον τύπο του πλοίου, η πρόβλεψη της πρόσθετης αντίστασης είναι πολύ πιο δύσκολη απ'ότι στους κυματισμούς μεγάλου μήκους.

### **2.2 STAWAVE-1( ITTC-2021).**

Η μαθηματική σχέση STAWAVE-1 αναπτύχθηκε από την STA-JIP(Boom,2013) για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμού. Είναι μια φόρμουλα η οποία απαιτεί περιορισμένο αριθμό εισαγόμενων παραμέτρων και είναι ιδανική για τον υπολογισμό αντίστασης κυματισμού σε κατάσταση δοκιμών θαλάσσης. Οι δοκιμές θαλάσσης διεξάγονται σε ήπιας έντασης κατάσταση θάλασσας. Σε κυματισμούς μικρού μήκους και συνεπώς μεγάλης συχνότητας συνάντησης οι κινήσεις του πλοίου κυρίως heave και pitch είναι αμελητέες έτσι η αντίσταση κυματισμού οφείλεται κυρίως στην ανάκλαση των κυμάτων στην ίσαλο γραμμή. Η φόρμουλα είναι εφαρμόσιμη για εύρος γωνίας πρόσπτωσης κυματισμού  $\pm 45^\circ$ .

Η STAWAVE-1 δίνει έγκυρα αποτελέσματα κυρίως για τις περιπτώσεις όπου:

1. Μικρές επιταχύνσεις για τις κινήσεις pitch και heave.(Κατακόρυφη επιτάχυνση <0.005g).
2. Σημαντικό ύψος κύματος  $H \leq 2.25 * \sqrt{\frac{Lpp}{100}}$
3. Μετωπικούς κυματισμούς.

$$R_{AWL} = \frac{1}{16} \rho_s g H_{w1/3}^2 B \sqrt{\frac{B}{L_{BWL}}} \quad (2.1)$$

B: Το πλάτος του πλοίου [m].

$H_{w1/3}$ : Σημαντικό ύψος κύματος ανεμογεννών κυματισμών. [m]

$L_{BWL}$ : Το μήκος από το μπροστινό άκρο της ισάλου επιφανείας μέχρι το διάμηκες σημείο στο οποίο το πλάτος είναι  $B(x)=95\%B$ . [m]

$\rho_s$ : πυκνότητα του νερού [ $kg/m^3$ ]

g: Επιτάχυνση της βαρύτητας [ $m/s^2$ ].

Για ύψος κύματος  $H=5m$ .

RAWL=318.55 KN.

### **2.3.STAWAVE-2 (ITTC-2021).**

Η συγκεκριμένη φόρμουλα αναπτύχθηκε επίσης από την STA-JIP(Boom,2013) για τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς της μέσης αύξησης της αντίστασης σε κανονικούς κυματισμούς χρησιμοποιώντας βασικές παραμέτρους όπως οι διαστάσεις και η ταχύτητα του πλοίου. Γι' αυτό το λόγο έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για μια μεγάλη γκάμα εμπορικών πλοίων διαφόρων τύπων και διαστάσεων ώστε να παραχθούν οι κατάλληλες παραμετρικές συναρτήσεις.

Η συνάρτηση μεταφοράς  $R_{wave}$  είναι αποτέλεσμα του αρθροίσματος της μέσης αντίστασης εξαιτίας της ανάκλασης των κυματισμών από τη γάστρα του πλοίου RAWRL και της αντίστασης εξαιτίας των κινήσεων του πλοίου που οφείλονται στους κυματισμούς  $R_{AWML}$ .

$$\triangleright R_{WAVE} = R_{AWML} + R_{AWRL} \quad (2.2)$$

$$\triangleright R_{AWML} = 4 * \rho * g * \zeta \alpha^2 * \frac{B^2}{Lpp} * raw(\omega) \quad (2.3)$$

$$\triangleright raw(\omega) = \bar{\omega}^{b1} * \exp\left(\frac{b1}{d1} * (1 - \bar{\omega}^{b1})\right) * a1 * Fr^{1.5} * \exp(-3.5 * Fr). \quad (2.4)$$

$$\bar{\omega} = \frac{\sqrt{\frac{L_{PP}}{g}} * \sqrt[3]{Ky\gamma}}{1.17 * Fr^{-0.143}} \quad (2.5)$$

$$\alpha 1 = 60.3 * C_B^{1.34} \quad (2.6)$$

$$b 1 = \begin{cases} 11 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -8.5 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$d 1 = \begin{cases} 14 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -566 * \left(\frac{L_{PP}}{B}\right)^{-2.66} & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.8)$$

$$R_{AWRL} = \frac{1}{2} * \rho s * g * \zeta \alpha^2 * B^2 * \alpha 1(\omega) \quad (2.9)$$

$$\alpha 1(\omega) = \frac{\pi^2 * I 1^2 (1.5 * \kappa * T_M)}{p^2 * I 1^2 (1.5 * \kappa * T_M) + K 1^2 (1.5 * \kappa * T_M)} * f 1 \quad (2.10)$$

$$f 1 = 0.692 * \left(\frac{V_s}{\sqrt{T_M * g}}\right)^{0.769} + 1.81 * C_B \quad (2.11)$$

Η σχέση STAWAVE-2 εφαρμόζεται υπό προϋποθέσεις.

1.  $50m < L_{pp} < 400m$
2.  $4 < \frac{L_{pp}}{B} < 9$
3.  $4 < \frac{B}{T_m} < 9$
4.  $0.1 < Fr < 0.3$
5.  $0.39 < C_b < 0.9$
6. Διεύθυνση κυματισμού από 0 έως  $\pm 45$  μοίρες.

Η συνάρτηση μεταφοράς της πρόσθετης αντίστασης STAWAVE-2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς  $R_{AWL}$  σύμφωνα με τον τύπο:

$$R_{AWL} = 2 * \int_0^\infty \frac{R_{wave}(\omega, V_s)}{\zeta_A^2} * S_\eta(\omega) * d\omega \quad (2.12)$$

$\zeta_A$ : Είναι το πλάτος του κύματος σε m.

$\omega$ : Κυκλική συχνότητα κυματισμών σε rad/sec.

$S_\eta(\omega)$ : είναι το κυματικό φάσμα Jonswap σε  $m^2/s$ .

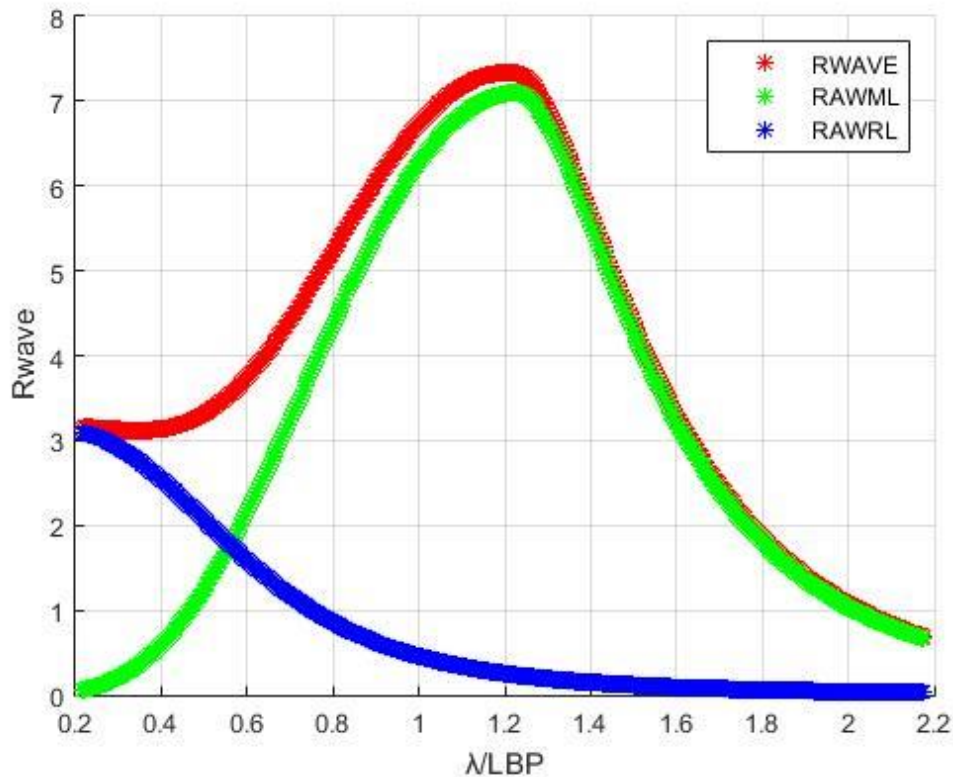
$$S_\eta(\omega, H_s, \gamma) = \frac{a * H_s^2 * \omega^{-5}}{\omega p^{-4}} * \exp\left(-\frac{5}{4} * \left(\frac{\omega}{\omega p}\right)^{-4}\right) \gamma \exp\left(\frac{-(\omega - \omega p)^2}{2\sigma^2 * \omega p^2}\right) \quad (2.13)$$



$$a^* = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336 \cdot \gamma - \frac{0.185}{1 + \gamma}} \quad (2.14)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{for } \omega \leq \omega_p \\ 0.09 & \text{for } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\gamma = 3.3$$

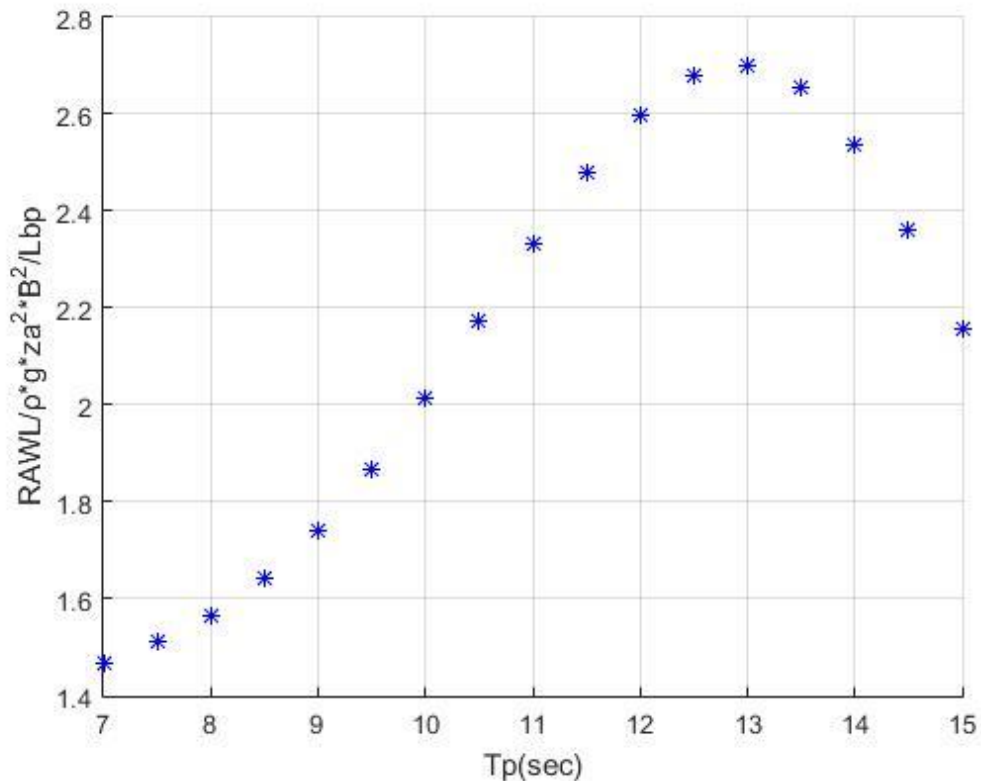


Σχήμα 2: Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς (συναρτησης μεταφοράς)  $R_{wave}$  και οι 2 συνιστώσες  $R_{awml}$  και  $R_{awrl}$  σύμφωνα με την σχέση STAWAVE-2.

Στο Σχήμα 5 με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η πρόσθετη αντίσταση  $R_{aw}$ , με πράσινο η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού εξαιτίας της ακτινοβολίας κυματισμών από τις κινήσεις του πλοίου  $R_{awml}$  και με μπλέ η αντίσταση κυματισμού εξαιτίας της ανάκλασης διάθλασης των κυματισμών  $R_{awrl}$ . Σύμφωνα με το γράφημα η κύρια συνιστώσα της συνολικής αντίστασης κυματισμού είναι η αντίσταση εξαιτίας των κυματισμών που ακτινοβολεί το πλοίο εξαιτίας των κινήσεων που πραγματοποιεί λόγω των προσπίπτοντων κυματισμών. Η αντίσταση εξαιτίας της διάθλασης των κυματισμών παρουσιάζει πτωτική πορεία καθώς το μήκος του κύματος αυξάνεται το οποίο είναι

λογικό καθώς όσο μεγαλώνει το μήκος κύματος τόσο περισσότερο το πλοίο ακολουθεί τις κινήσεις της ελεύθερης επιφάνειας με αποτέλεσμα τα φαινόμενα διάθλασης και ανάκλασης κυματισμών να εκλείπουν. Αντιθέτως η αντίσταση λόγω ακτινοβολίας RAWML αυξάνεται όσο μεγαλώνει το μήκος κύματος μέχρι την τιμή 1.2 διότι αύξηση του μήκους συνεπάγεται αύξηση των ταλαντωτικών κινήσεων του πλοίου. Μετά και αυτή με την σειρά της μειώνεται καθώς για πολύ μεγάλα μήκη κύματος το πλοίο ακολουθεί την κίνηση της ελεύθερης επιφάνειας χωρίς να εκτελεί έντονες ταλαντωτικές κινήσεις.

Ο υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς υπολογίστηκε για περιόδους κορυφής  $T_p$  για εύρος τιμών από 7 έως 15 sec στο Σχήμα 3. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της πρόσθετης αντίστασης για το υπο μελέτη πλοίο προκύπτει για περίοδο κορυφής ίση με 13 sec.



Σχήμα 3 Η μέση πρόσθετη αντίσταση για τυχαίους κυματισμούς σύμφωνα με την φόρμουλα STAWAVE-2.

#### **2.4.Liu-Papanikolaou(2016).**

Η σχέση Liu-Papanikolaou όπως και οι σχέσεις STAWAVE 1,2 δημιουργήθηκε εξαιτίας της ανάγκης υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού με την γνώση

βασικών παραμέτρων όπως γεωμετρικές διαστάσεις, υψος κύματος, ταχύτητα πλοίου. Η αύξηση του μεγέθους των πλοίων και συνεπώς και του μήκους τους  $L_{BP}$  καθιστά όλο και πιο απαραίτητη την γνώση της αντίστασης λόγω κυματισμού σε μικρού μήκους κύματα γιατί αύξηση του  $L_{BP}$  συνεπάγεται μείωση του λόγου  $\lambda/L$ . Έτσι η δυνατότητα υπολογισμού της αντίστασης κυματισμού σε μικρού μήκους κύματα καθίσταται όλο και πιο αναγκαία. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός αυτός είναι αρκετά δύσκολος διότι η συμπεριφορά των κυμάτων μικρού μήκους αλλά και η συμπεριφορά των πλοίων σε αυτά αποτελεί ένα πολύπλοκο φυσικό φαινόμενο. Αυτό συμβαίνει διότι στα κύματα μικρού μήκους παρουσιάζονται φαινόμενα όπως σπάσιμο της κορυφής κτλπ. Είναι απαραίτητο λοιπόν στις μαθηματικές εξισώσεις να γίνεται χρήση διορθωτικών συντελεστών, οι οποίοι εξάγονται από πειράματα σε δεξαμενές. Επίσης τα προγράμματα CFD αδυνατούν πολλές φορές να δώσουν ρεαλιστικές τιμές στα μικρού μήκους κύματα καθώς τα πλέγματα επιφανείας γίνονται υπερβολικά πυκνά με αποτέλεσμα να μην μπορούν να ανταπεξέλθουν όσον αφορά την υπολογιστική ισχύς. Επίσης επιλυτές προβλημάτων δυναμικής ροής δεν μπορούν να αποδώσουν ρεαλιστικές τιμές στους κυματισμούς μικρού μήκους καθώς στους κυματισμούς μικρού μήκους κυριαρχούν τα μη συνεκτικά φαινόμενα τα οποία η μαθηματική θεωρία της δυναμικής ροής τα αγνοεί. Έτσι η ανάπτυξη ημιεμπειρικών μεθόδων για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμούς μικρού μήκους είναι αναγκαία.

Για την ανάπτυξη απλοποιημένων πρακτικών μαθηματικών εξισώσεων για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης σε μικρού μήκους κύματα είναι απαραίτητη η χρήση μαθηματικών συντελεστών οι οποίοι εξάγονται μέσα από έναν μεγάλο αριθμό πειραματικών δεδομένων.

Οι Liu και Parpanikolaou πρότειναν μια μαθηματική σχέση για τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού η οποία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τα σύγχρονα εμπορικά πλοία τόσο σε μικρού όσο και μεγάλου μήκους κύματα σε μικρές και μεγάλες ταχύτητες. Η μέθοδος έχει υιοθετηθεί και από την ITTC (2021).

Η ανάπτυξη της μεθόδου βασίστηκε πάνω στην ασυμπτωτική μέθοδο του Faltinsen για τον υπολογισμό της αντίστασης για κυματισμούς μικρού μήκους και δίνεται από την σχέση (2.16).

$$F1 = \int_C \overline{F_n} \sin\theta dl \quad (2.16)$$

Με  $\overline{F_n}$  συμβολίζεται η πρόσθετη αντίσταση ανα μονάδα μήκους. Η εξίσωση της  $\overline{F_n}$  σύμφωνα με την εργασία (S.Liu, et al 2015) δίνεται για μετωπικούς κυματισμούς από την σχέση (2.17).

$$\overline{F_n} \approx \frac{1}{2} \rho g \zeta a^2 a_T \sin^2 E \left(1 + 5 \sqrt{\frac{L}{\lambda}} Fr\right) \left(\frac{0.87}{CB}\right)^{(1+4\sqrt{Fr})} \quad (2.17)$$

Με την χρήση αποτελεσμάτων από πειράματα σε μοντέλα πλοίων προκύπτει η απλοποιημένη τελική εξίσωση της πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμούς μικρού μήκους ορίζεται και ως αντίσταση διάθλασης κυματισμών  $R_{AWR}$ .

$$R_{AWR} = \frac{2.25}{2} * \rho * g * B * \zeta \alpha^2 * \alpha_T * \sin^2 E * \left( 1 + 5 * \sqrt{\frac{LPP}{\lambda}} Fn \right) * \left( \frac{0.87}{Cb} \right)^{(1 + 4\sqrt{Fn})} \quad (2.18)$$

Για κύματα μεγάλου μήκους η πρόσθετη αντίσταση υπολογίζεται απο την βελτιωμένη και τροποποιημένη φόρμουλα των *Jinkie Ferdinande(1974)* με την βελτιστοποίηση των συντελεστών  $a_1$  και  $a_2$ .

$$R_{AWM} = 4 * \rho * g * B * \zeta \alpha^2 * \frac{B^2}{LPP} * \bar{\omega}^{b_1} * \exp \left[ \frac{b_1}{d_1} * (1 - \bar{\omega}^{d_1}) \right] a_1 * a_2. \quad (2.19)$$

Η  $R_{AWM}$  ορίζεται ως η αντίσταση κυματισμού εξαιτίας της ακτινοβολίας των κυματισμών.

Έτσι η συνάρτηση μεταφοράς της πρόσθετης αντίστασης για κανονικούς κυματισμούς δίνεται από τον τύπο.

$$R_{AW} = R_{AWR} + R_{AWM} \quad (2.20)$$

#### Συντελεστής βυθίσματος $\alpha_T$

Στους κυματισμούς μικρού μήκους ο *F.Ursell(1947)* έθεσε μια θεωρητική λύση για την πρόσθετη αντίσταση εξαιτίας κυμάτων τα οποία ανακλώνται από έναν κάθετο τοίχο με βύθισμα  $T$  στην προσπάθεια να εξεταστεί η επίδραση του πεπερασμένου βυθίσματος πλεούμενου σώματος στην πρόσθετη αντίσταση. Οι *Fujii ,Takashi(1975)* και *Kuroda(2008)* υιοθέτησαν αυτή την μέθοδο για την μαθηματική μοντελοποίηση της πρόσθετης αντίστασης για μικρού μήκους κυματισμούς στην προσπάθεια να αντιμετωπίσουν την επίδραση του πεπερασμένου βυθίσματος πρότειναν έναν συντελεστή βυθίσματος  $\alpha_T$ .

$$\alpha_T = \frac{\pi^2 * I_1^2(Ke * T)}{\pi^2 * I_1^2(Ke * T) + K_1^2(Ke * T)} \quad (2.21)$$

$T$  είναι το βύθισμα του πλοίου,  $Ke = \frac{\omega_e^2}{g}$  είναι ο κυματαριθμός συνάντησης και  $I_1, K_1$  είναι οι συναρτήσεις Bessel πρώτου βαθμού πρώτου και δεύτερου είδους αντίστοιχα. Οι *Valanto και Hong(2015)* παρατήρησαν ότι η μέθοδος δεν έδινε ικανοποιητικές τιμές για την αντίσταση σε κυματισμούς ενός κρουαζιερόπλοιου το οποίο μελετούσαν. Υποστήριξαν ότι η φθίνουσα εκθετική συνάρτηση  $e^{-kT}$  δίνει καλύτερες τιμές για τον συντελεστή βυθίσματος από αυτήν εκδοχή των *Fujii ,Takashi και Kuoda*.

Επίσης ο *Kwon(1981)* είχε καταλήξει σε μια παρόμοια σχέση για τον συντελεστή βυθίσματος θεωρώντας ότι η φθίνουσα συνάρτηση του πλάτους κυματισμού μικρού

μήκους είναι εκθετικής μορφής τότε και η φθίνουσα συνάρτηση της ενέργειας κυματισμού η οποία εξαρτάται από το τετράγωνο του πλάτους του κύματος, είναι τετραγωνικής εκθετικής μορφής.

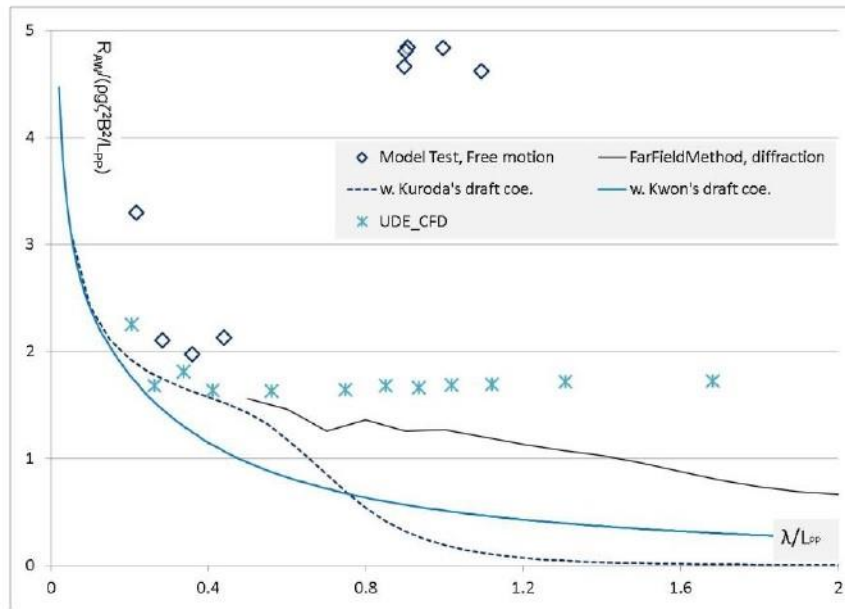
Έτσι καθορίστηκε η ακόλουθη σχέση για τον συντελεστή βυθίσματος

$$a_T = 1 - e^{-2KT} \quad (2.22)$$

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η προσέγγιση της πρόσθετης αντίστασης για το containership DTC και για τις 2 εκδοχές του συντελεστή βυθίσματος. Για κύματα μικρού και πολύ μικρού μήκους οι δύο εκδοχές δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Για κύματα ενδιάμεσου μήκους οι 2 σχέσεις δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Σε κύματα μεγάλου μήκους η εκδοχή Kuroda δίνει μηδενικές τιμές για την πρόσθετη αντίσταση ενώ η σχέση του Kwon δίνει μικρές αλλά όχι μηδενικές τιμές.

Με βάση μελέτες οι οποίες έγιναν με βάση της θεωρίας δυναμικής ροής από τον Liu(2011) και από προσομοιώσεις CFD από τον Sigmund(2015) φαίνεται ότι η χρήση του συντελεστή Kwon δίνει πιο ρεαλιστικές τιμές για την πρόσθετη αντίσταση. Αυτό αποτελεί σημαντικό γεγονός καθώς η εκδοχή του Kwon(1981) δεν περιέχει την χρήση των εξισώσεων Bessel με αποτέλεσμα να είναι πολύ ευκολότερη η χρήση του απο τον μελετητή.

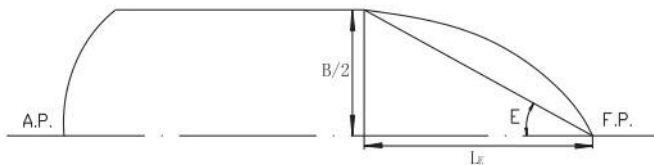
Για την συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του Kwon για τον υπολογισμό του συντελεστή βυθίσματος με βάση την σχέση Liu&Papanikolaou(2016). Η σχέση Fujii και Takashi χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς σύμφωνα με την σχέση STAWAVE-2.



Σχήμα 4 Added Resistance due to diffraction effect of DTC containership in head waves by various methods,  $Fn=0.139$ . (Liu, Papanikolaou, Bolbot 2016).

Το μήκος  $L_E$  και η γωνία  $E$  εισόδου ισάλου.

Το μήκος εισόδου ισάλου ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ της προωρίας κάθετου F.P και του πρώτου σημείου της ισάλου το οποίο έχει τετμημένη  $y=B/2$ .



Σχήμα 5 Το μήκος και η γωνία εισόδου ισάλου  $L_E$  και  $E$  αντίστοιχα

Η γωνία εισόδου ισάλου ορίζεται από την σχέση

$$E = \arctan(B / (2L_E)). \quad (2.4.8)$$

Συντελεστής διόρθωσης κορυφής της πρόσθετης αντίστασης  $\alpha_1$ .

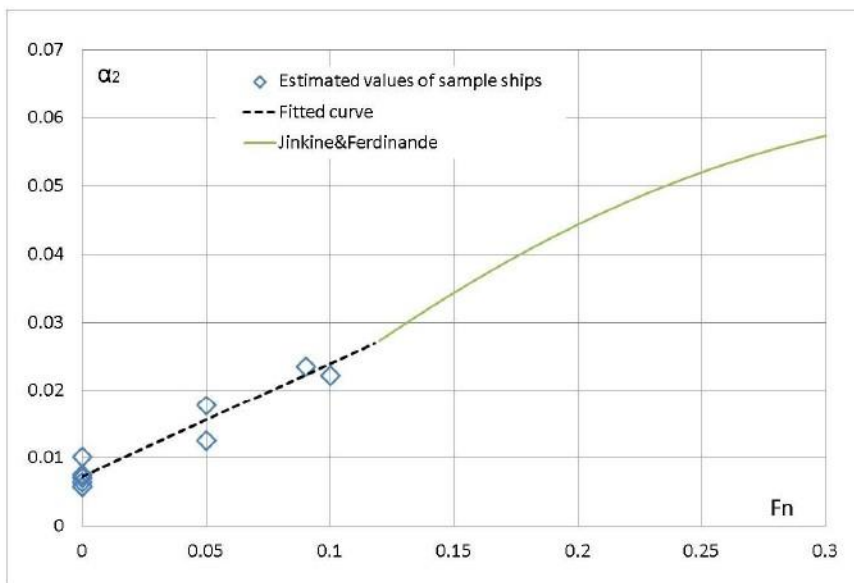
$$a1 = 60.3 * C_B^{1.34} * \left(\frac{0.87}{CB}\right)^{1+Fn} \quad (2.23)$$

### Συντελεστής ταχύτητας α2.

Ο συντελεστής ταχύτητας α2 ορίζεται από τη σχέση

$$a2 = \begin{cases} 0.0072 + 0.1676Fn & Fn < 0.12 \\ Fn^{1.5} \exp(-3.5 * Fn) & Fn \geq 0.12 \end{cases} \quad (2.24)$$

Στη Σχήμα 6. φαίνεται πώς η εξίσωση του συντελεστή α2 δίνει ορθά αποτελέσματα για αριθμούς Froude μεταξύ 0 και 0.3.



Σχήμα 6 Behaviour of speed factor (Liu, Papanikolaou, Bolbot, Shang (2016)).

Ο αριθμός Froude του πλοίου για την ταχύτητα Vs δίνεται από τον τύπο:

$$Fr = \frac{Vs}{\sqrt{Lwl * g}} \quad (2.25)$$

Συγκεντρωτικά :

$$\triangleright R_{WAVE} = R_{AWR} + R_{AWL}$$

$$\triangleright R_{AWR} = \frac{2.25}{2} * \rho * g * B * \zeta \alpha^2 * \alpha_T * \sin^2 E * \left(1 + 5 * \sqrt{\frac{LPP}{\lambda}} Fn\right) * \left(\frac{0.87}{cb}\right)^{(1 + 4\sqrt{Fn})} \quad (2.26)$$

$$\text{➤ } R_{AWM} = 4 * \rho * g * B * \zeta \alpha^2 * \frac{B^2}{LPP} * \bar{\omega}^{b1} * \exp \left[ \frac{b1}{d1} * (1 - \bar{\omega}^{d1}) \right] a1 * a2. \quad (2.27)$$

$$\text{➤ } E = \text{atan} \left( \frac{B}{2LE} \right) \quad (2.28)$$

$$\text{➤ } at = 1 - e^{-2KT} \quad (2.30)$$

$$\text{➤ } a1 = 60.3 * CB^{1.34} * \left( \frac{0.87}{CB} \right)^{1+Fn} \quad (2.31)$$

$$\text{➤ } a2 = \begin{cases} 0.0072 + 0.1676Fn & Fn < 0.12 \\ Fn^{1.5} \exp(-3.5 * Fn) & Fn \geq 0.12 \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\text{➤ } \bar{\omega} = \begin{cases} \frac{\sqrt{\frac{Lpp}{g}}^3 \sqrt{\frac{Kyy}{Lpp}} * 0.05^{0.143}}{1.17} \omega & Fn < 0.05 \\ \frac{\sqrt{\frac{Lpp}{g}}^3 \sqrt{\frac{Kyy}{Lpp}} * Fn^{0.143}}{1.17} \omega & Fn \geq 0.05 \end{cases} \quad (2.33)$$

Οι συντελεστές b1 και d1 για  $Cb \leq 0.75$

$$\text{➤ } b1 = \begin{cases} 11 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -8.5 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.34)$$

$$\text{➤ } d1 = \begin{cases} 14 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -566 * \left( \frac{LPP}{B} \right)^{-2.66} * 6 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.35)$$

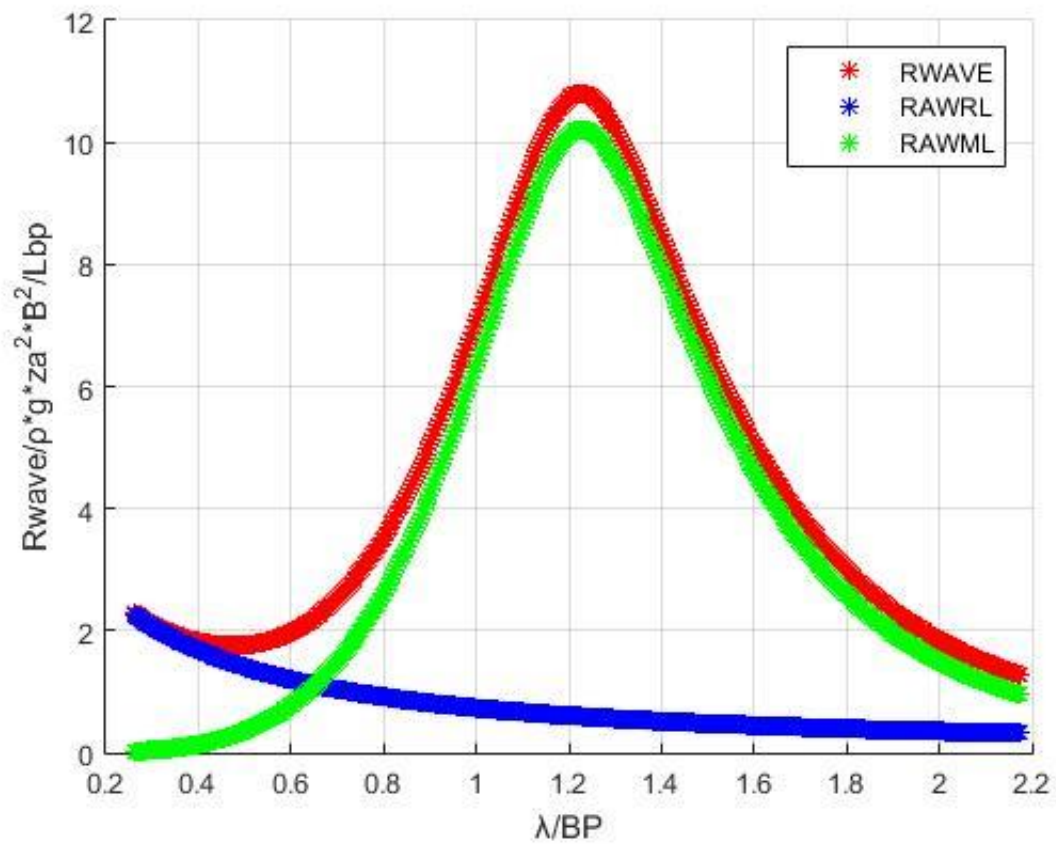
Οι συντελεστές b1 και d1 για  $Cb > 0.75$

$$\text{➤ } b1 = \begin{cases} 11 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -8.5 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.36)$$

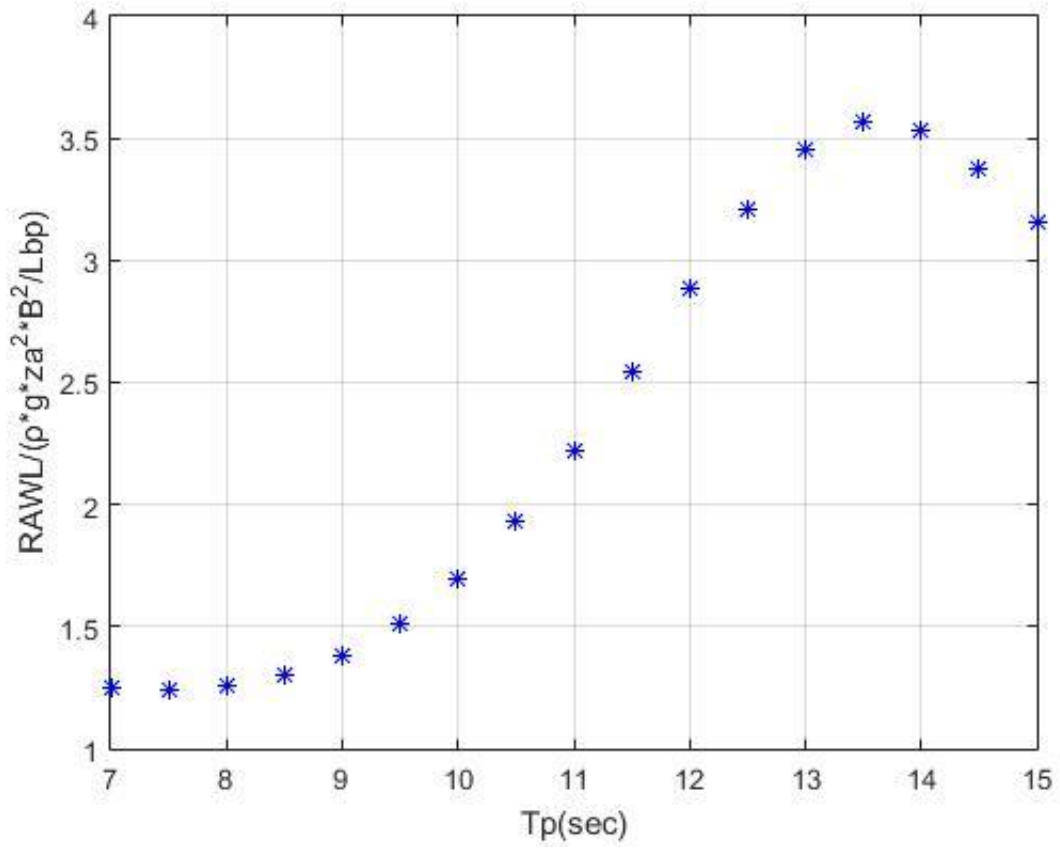
$$\text{➤ } d1 = \begin{cases} 566 * \left( \frac{LPP}{B} \right)^{-2.66} & 14 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -566 * \left( \frac{LPP}{B} \right)^{-2.66} * 6 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.37)$$

Εφαρμόζοντας την μέθοδο Liu&Paranikoalou για ταχύτητα πλοίου  $Vs=23,26\text{kn}$  και  $H=5\text{m}$  παράγεται η καμπύλη της πρόσθετης αντίστασης  $R_{wave}$  για κανονικούς κυματισμούς στο Σχήμα 7. Για την ίδια ταχύτητα πλοίου και σημαντικού ύψους κύματος παράγεται η καμπύλη της μέσης πρόσθετης αντίστασης για τυχαίους κυματισμούς για εύρος τιμών περιόδου κορυφής  $Tp$  7 έως 15 sec.





Σχήμα 7 Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς( συνάρτηση μεταφοράς )Raw και οι 2 συνιστώσες της  $RA_{WML}$  και  $RA_{WRL}$  σύμφωνα με την σχέση Liu&Paranikolaou.



Σχήμα 8 Η μέση πρόσθετη αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς σύμφωνα με την ημιεμπρική μέθοδο Liu&Paranikolaou.

## **2.5.Liu-Papanikolaou (2020) Εισαγωγή παράμετρου Διαγωγής.**

Εάν παρατηρήσουμε την εξίσωση STAWAVE-2 θα διαπιστώσουμε πώς η σχέση εφαρμόζεται δεδομένου ότι το υπό μελέτη πλοίο πληρεί κάποιους περιορισμούς. Ένας από αυτούς είναι ότι ο λόγος B/T όπου πρέπει ( $2.2 < B/T < 5.5$ ). Για ορισμένα πλοία με υψηλούς λόγους B/T ακόμα και εντός των περιορισμών, η μαθηματική σχέση STAWAVE-2 δεν δίνει πολλές φορές αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης στις προηγούμενες σχέσεις δεν παρατηρείται πουθενά καμιά αναφορά στην διαγωγή trim. Είναι γνωστό ότι η διαγωγή έχει επίδραση στην αντίσταση σε ήρεμο νερό συνεπώς είναι απαραίτητη και η επιστημονική διερεύνηση της επίδρασης της στην αντίσταση λόγω κυματισμού. Έτσι αναπτύχθηκε μια ανανεωμένη εκδοχή της φόρμουλας Liu-Papanikolaou(2020) η οποία εμπεριέχει τις παραμέτρους  $\Delta T = \text{trim}$  και B/T. Η νέα αυτή μαθηματική σχέση για την ballast condition μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την Full Load Departure για όλους τους τύπους πλοίων ακόμα και για πλοία με λεπτόγραμμη μορφή γάστρας όπως κρουαζιερόπλοια. Ο αριθμός καταστάσεων φόρτωσης και συνεπώς βυθισμάτων και διαγωγής ενός containership είναι πολύ μεγάλος και αυτό οφείλεται στην ανομοιογένεια του φορτίου. Το KCS είναι ένα πρότυπο μοντέλο και όχι ένα πραγματικό πλοίο συνεπώς δεν έχει εγχειρίδιο διαγωγής και ευστάθειας. Επιλέχθηκε να γίνει σύγκριση των 2 μεθόδων Liu & Papanikolaou για βύθισμα  $T_m = 9.2$  (85%  $T_{des}$ ) και για έμπρυμνη διαγωγή  $\Delta T = 0.5m$ .

$$\text{➤ } R_{AW} = R_{AWR} + R_{AWL}$$

$$\text{➤ } R_{AWR} = \frac{2.25}{2} * \rho * g * B * \zeta \alpha^2 * \alpha_T * \sin^2 E * \left( 1 + 5 * \sqrt{\frac{LPP}{\lambda}} Fn \right) * \left( \frac{0.87}{cb} \right)^{(1 + 4\sqrt{Fn})}$$

$$\text{➤ } R_{AWM} = 4 * \rho * g * B * \zeta \alpha^2 * \frac{B^2}{LPP} * \bar{\omega}^{b1} * \exp \left[ \frac{b1}{d1} * (1 - \bar{\omega}^{d1}) \right] a1 * a2 * a3. (2.38)$$

$$\text{➤ } E = \text{atan} \left( \frac{B}{2LE} \right)$$

Ο συντελεστής βυθίσματος at

$$\text{➤ } at = \begin{cases} 1 - e^{-4\pi \left( \frac{T}{\lambda} - \frac{T}{2.5 Lpp} \right)} & (2.39) \\ 0 \end{cases}$$

$$\text{➤ } a1 = 60.3 * CB^{1.34} * (4 * k\gamma\gamma)^2 * \left( \frac{0.87}{CB} \right)^{1+Fn} \left( \ln \left( \frac{B}{T} \right) \right)^{-1} (2.40)$$

$$\text{➤ } a2 = \begin{cases} 0.0072 + 0.1676Fn & Fn < 0.12 \\ Fn^{1.5} \exp(-3.5 * Fn) & Fn \geq 0.12 \end{cases}$$

$$\text{➤ } a3 = 1 + 0.25 * \text{atan} \left( \frac{\delta T}{LPP} \right) (2.41)$$

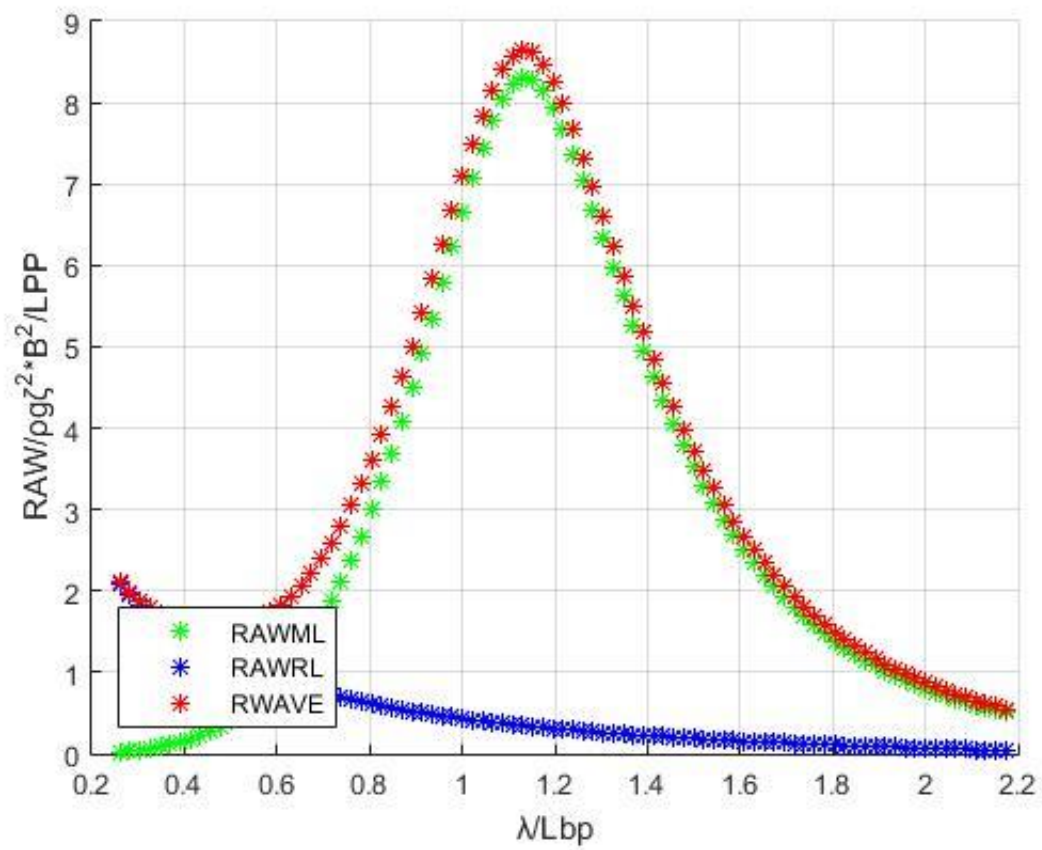
$$\begin{aligned} \text{➤ } \bar{\omega} = & \\ & \begin{cases} 2.142 * \sqrt[3]{K_{yy}} * \sqrt{\frac{L_{PP}}{\lambda}} \left[ 1 - 0.13 \frac{0.85}{c_b} \left( \ln \left( \frac{B}{T} \right) - \ln 2.75 \right) \right] (Fn + 0.62) & \text{for } Fn < 0.1 \\ 2.142 * \sqrt[3]{K_{yy}} * \sqrt{\frac{L_{PP}}{\lambda}} \left[ 1 - 0.13 \frac{0.85}{c_b} \left( \ln \left( \frac{B}{T} \right) - \ln 2.75 \right) \right] Fn^{0.143} & \text{for } Fn < 0.1 \end{cases} \end{aligned} \quad (2.41)$$

for  $C_b \leq 0.75$

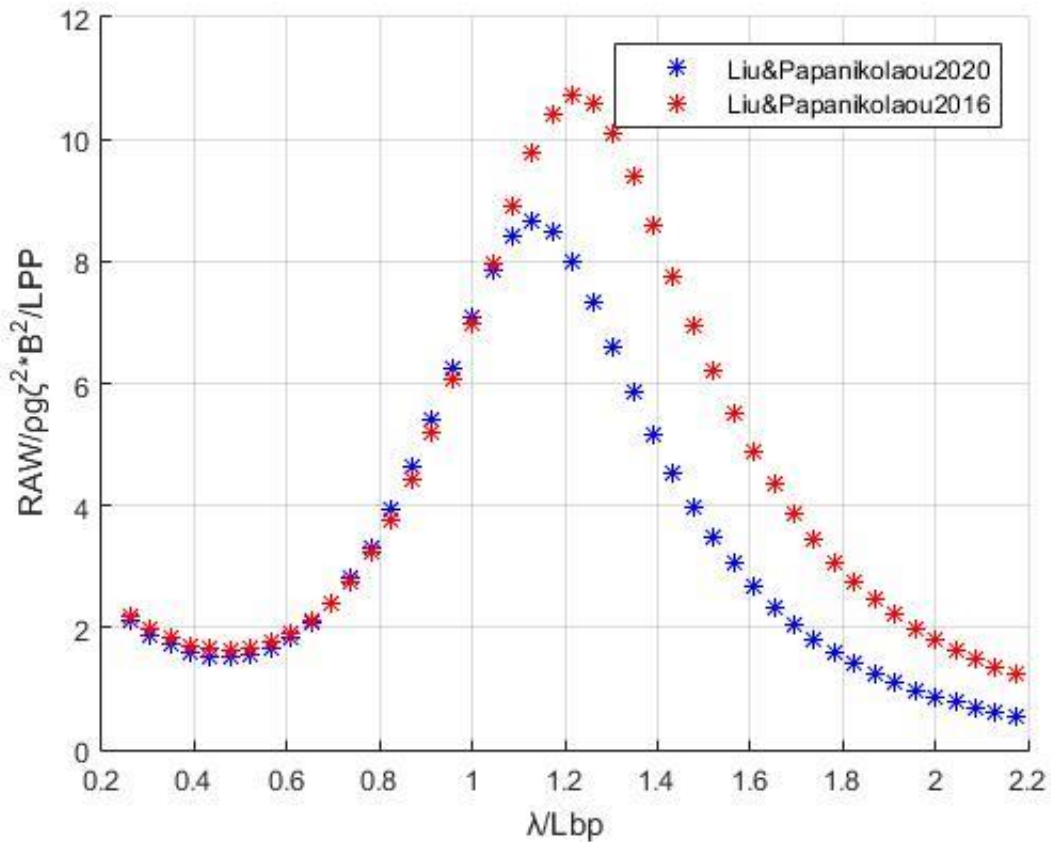
$$\begin{aligned} \text{➤ } b1 = & \begin{cases} 11 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -8.5 & \text{elsewhere} \end{cases} \\ \text{➤ } d1 = & \begin{cases} 14 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -566 * \left( \frac{L_{PP}}{B} \right)^{-2.66} * 6 & \text{elsewhere} \end{cases} \end{aligned}$$

for  $C_b > 0.75$

$$\begin{aligned} \text{➤ } b1 = & \begin{cases} 11 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -8.5 & \text{elsewhere} \end{cases} \\ \text{➤ } d1 = & \begin{cases} 566 * \left( \frac{L_{PP}}{B} \right)^{-2.66} * 14 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -566 * \left( \frac{L_{PP}}{B} \right)^{-2.66} * 6 & \text{elsewhere} \end{cases} \end{aligned}$$



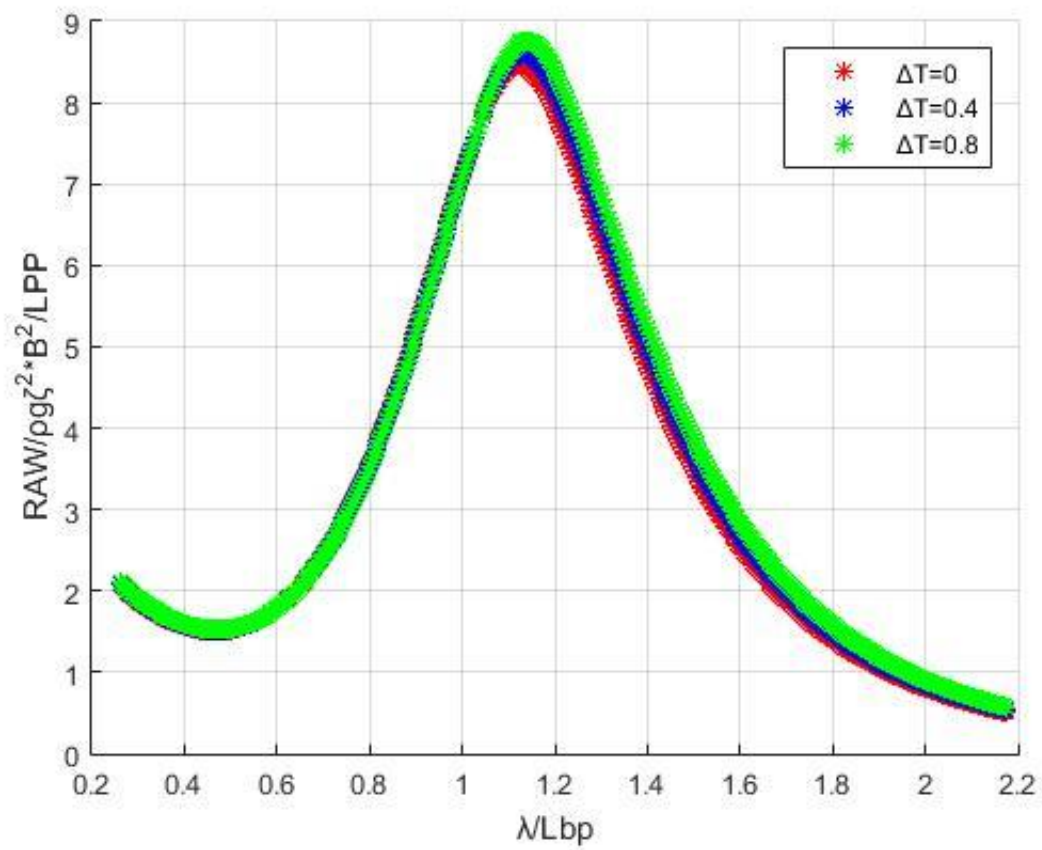
Σχήμα 9 : Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς (συναρτηση μεταφοράς)  $R_{AW}$  σύμφωνα με τη φόρμουλα Liu&Ραρανικολαου(2020) για θύθισμα  $Tm=9.2$  και έμπρυμνη διαγωγή  $\Delta T=0.5$



Σχήμα 10 Σύγκριση αποτελεσμάτων των LiuPapanikolaou(2016) και LiuPapanikolaou(2020) για βύθισμα μέσο νομέα  $T_m=9.2m$  και έμπρυμνη διαγωγή  $\Delta T=0.5 m$ .

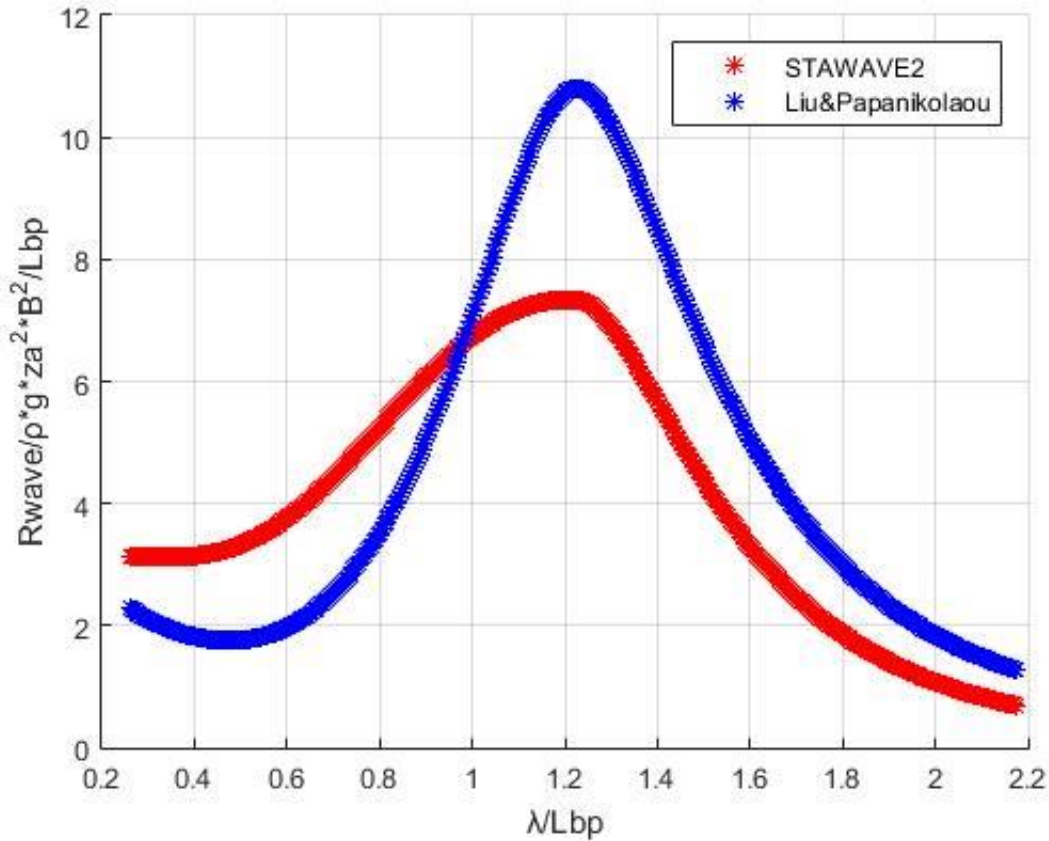
Στο Σχήμα 9 απεικονίζεται η συνάρτηση μεταφοράς της πρόσθετης αντίστασης για βύθισμα στο μέσο νομέα  $T_m=9.2 m$  και έμπρυμνη διαγωγή  $trim=0.5m$ . Στο Σχήμα 10 παρατηρείται ότι η LiuPapanikolaou(2020) δίνει μικρότερη μέγιστη τιμή για την συνάρτηση μεταφοράς της πρόσθετης αντίστασης από την σχέση LiuPapanikolaou(2016). Επίσης η θέση του μεγίστου για την ανανεωμένη σχέση εμφανίζεται σε χαμηλότερες τιμές μήκους κύματος. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η διαφορά των 2 μεθόδων παρατηρείται για τιμές αδιάστατου μήκους κύματος μεγαλύτερες από 1 όπου κυριαρχεί η αντίσταση εξαιτίας της ακτινοβολίας κυματισμών.  $R_{AWML}$ .

Εφαρμόζοντας την φόρμουλα Liu Papanikolaou (2020) για τιμές διαγωγής 0,0.4,0.8 παράχθηκε το γράφημα της πρόσθετης αντίστασης στο σχήμα 11. Παρατηρείται ότι η αύξηση της διαγωγής του πλοίου επιδρά θετικά στην αύξηση της πρόσθετης αντίστασης. Όσο αυξάνεται δηλαδή η τιμή της διαγωγής τόσο αυξάνεται και η πρόσθετη αντίσταση. Η διαφορά και πάλι παρατηρείται στα μεγάλα μήκη κύματος το οποίο είναι λογικό καθώς στα μεγάλα μήκη κύματος κυριαρχεί η αντίσταση εξαιτίας της ακτινοβολίας  $R_{AWM}$  των κυματισμών που παράγονται από τις κινήσεις του πλοίου.



Σχήμα 11 Η πρόσθετη αντίσταση (συνάρτηση μεταφοράς)  $R_{AW}$  για κανονικούς κυματισμούς συναρτήσει της διαγωγής  $\Delta T$  σύμφωνα με την φόρμουλα Liu&Paranikolaou(2020)

## 2.6.ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ STAWAVE1,2 ΚΑΙ LIU-PAPANIKOLAΟΥ.



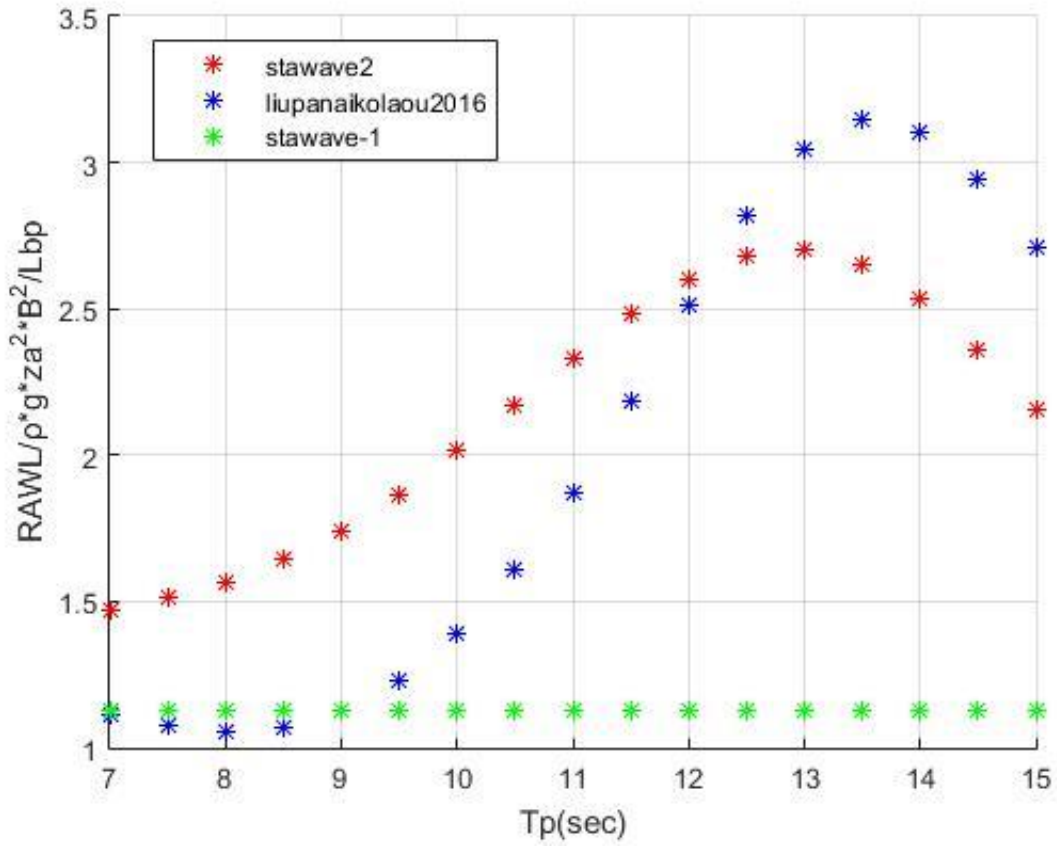
Σχήμα 12 Σύγκριση των συναρτήσεων μεταφοράς  $R_{AW}$  των μεθόδων Liu Papanikolaou και STAWAVE-2.

Στο σχήμα 12 απεικονίζεται η συνάρτηση μεταφοράς της πρόσθετης αντίστασης όπως αυτή υπολογίστηκε από τις 2 μεθόδους. Σύμφωνα με το γράφημα η Liu Papanikolaou υπολογίζει πολύ μεγαλύτερες τιμές για την πρόσθετη αντίσταση από την STAWAVE-2 για μήκος κύματος  $\lambda/L_{bp} > 1$ . Επίσης η Liu-Papanikolaou για μικρού μήκους κύματα δεν παρουσιάζει πτωτική πορεία αλλά αύξουσα φορά σε αντίθεση με την STAWAVE-2 η οποία είναι φθίνουσα για μείωση του λόγου  $\lambda/L_{pp}$  για τιμές μικρότερες από 0.5. Ωστόσο και οι 2 μέθοδοι παρουσιάζουν το μέγιστο τους για την ίδια τιμή  $\lambda/L_{pp}$ .

Στο Σχήμα 13 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι τιμές της Μέσης αντίστασης κυματισμού για τις μεθόδους Liu-Papanikolaou, Stawave 1 & 2. Παρατηρείται οι STAWAVE-2 και Liu&Papanikolaou συγκλίνουν για την τιμή περιόδου κορυφής  $T_p=12$  sec. Για τιμές περιόδου κορυφής μικρότερες από 12 sec η STAWAVE-2 δίνει μεγαλύτερες τιμές από την σχέση Liu&Papanikolaou ενώ η δεύτερη δίνει μεγαλύτερες τιμές από την πρώτη για τιμές περιόδου κορυφής μεγαλύτερες από 12 sec. Επίσης



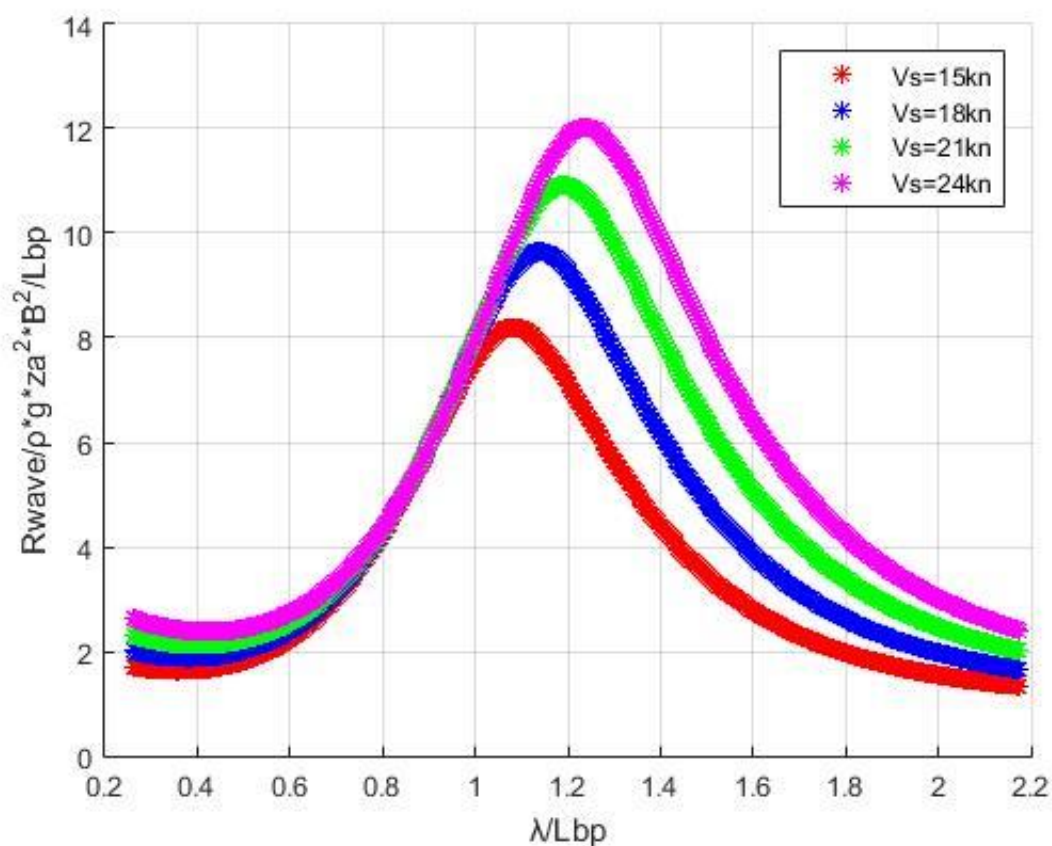
παρατηρείται ότι οι STAWAVE-1 και Liu&Paranikolaou συγκλίνουν για τιμές περιόδου κορυφής μεταξύ 9 και 7 sec. Η μαθηματική σχέση της STAWAVE-1 δεν εμπεριέχει την παράμετρο της ταχύτητας του πλοίου συνεπώς δίνει μια μόνο τιμή για κάθε τιμή σημαντικού ύψους κύματος  $H_s=5m$  για όλο το εύρος τιμών περιόδου κορυφής.



Σχήμα 13 Η μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμών σύμφωνα με τις μεθόδους STAWAVE-1, STAWAVE-2 και Liu&Paranikolaou για  $H_s=5m$  και  $V_s=23,26kn$ .

## 2.7 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.

Είναι απαραίτητο ο σχεδιαστής να γνωρίζει την ποιοτική συμπεριφορά της καμπύλης για τις βασικότερες μεταβλητές και παραμέτρους που καθορίζουν την αντίσταση κυματισμού. Μια βασική παράμετρος που καθορίζει την πρόσθετη αντίσταση είναι η ταχύτητα του πλοίου. Στο Σχήμα 14 μπορούμε να εξάγουμε πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα για το πώς η μεταβολή της  $V_s$  μεταβάλλει την καμπύλη της πρόσθετης αντίστασης. Παρατηρείται ότι μείωση της ταχύτητας του πλοίου συνεπάγεται μείωση της τιμής της πρόσθετης αντίστασης. Επίσης παρατηρείται ότι το μέγιστο της εκάστοτε καμπύλης παρουσιάζεται σε μικρότερα μήκη κύματος δηλαδή κινείται αριστερότερα στο γράφημα όσο μειώνεται η ταχύτητα του πλοίου. Επίσης παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες διαφορές παρουσιάζονται σε μεγάλα μήκη κύματος όπου κυριαρχεί η αντίσταση εξαιτίας της ακτινοβολίας κυματισμών  $R_{AWM}$ .



Σχήμα 14 Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς(συνάρτηση μεταφοράς)  $R_{AW}$  για διαφορετικές τιμές ταχύτητας πλοίου  $V_s$  σύμφωνα με την φόρμουλα Liu&Ραρανικόλαου

## **2.8 ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΙΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΣΥΦΜΩΝΑ. LIU&ΡΑΡΑΝΙΚΟΛΑΟΥ(2020).**

Ένα πλοίο κατά τη διάρκεια πλεύσης του στην ανοιχτή θάλασσα βρίσκεται συνεχώς υπό την επίδραση κυματισμών διαφορετικών κατευθύνσεων. Το φαινόμενο των κυματισμών υπό γωνία είναι πολύ πιο πολύπλοκο από την περίπτωση των μετωπικών κυματισμών καθώς η ροή παρουσιάζει έντονη ασυμμετρία γύρω από τη γάστρα.

Το φαινόμενο είναι τόσο πολύπλοκο που ακόμα και πολλές φορές έχει παρατηρηθεί τα καλύτερα προγράμματα CFD να μην αποδίδουν με ακρίβεια την πρόσθετη αντίσταση κυματισμού για την περίπτωση της γωνιακής πρόσπτωσης. Αυτό οφείλεται στον συνδυασμό μικρού μήκους κύματος και ασυμμετρίας της ροής του ρευστού γύρω από την επιφάνεια της γάστρας που εντείνουν την επίδραση των μη συνεκτικών φαινομένων με αποτέλεσμα το σφάλμα υπολογισμού ενός προγράμματος CFD να είναι αρκετά μεγάλο. Είναι λοιπόν απαραίτητη η ανάπτυξη μαθηματικών ημιεμπειρικών εξισώσεων βασισμένων σε πειραματικά δεδομένα όπως πειράματα μοντέλων σε δεξαμενες τα οποία να μπορούν να αποδίδουν με ακρίβεια την πρόσθετη αντίσταση για γωνιακούς κυματισμούς. Σύμφωνα με την εργασία (S.Liu,A.Papanikolaou et al (2020))για την ανάπτυξη της μαθηματικής φόρμουλας αυτού του κεφαλαίου χρησιμοποιήθηκαν πάνω από 3000 μετρήσεις που έγιναν για περίπου 130 πλοία. Απο αυτές οι μισές δηλαδή οι 1500 έγιναν για γωνιακούς κυματισμούς. Οι μαθηματικοί τύπου του κεφαλαίου όπως και των προηγούμενων κεφαλαίων αναφέρονται για μεγάλα εμπορικά πλοία εκτοπίσματος. Ο αριθμός των μετρήσεων κατανέμεται ανά τύπο πλοίου σε 17% για bulk carrier ,18% για tanker. Τα πλοία μεγάλων ταχυτήτων όπως containerships,LNG carrier και General Cargo ships αποτελούν το 22% ενώ επιβατηγά πλοία και πλοία διάφορων τύπων αποτελούν το 42%. Αυτός ο καταμερισμός αντιπροσωπεύει σε μεγάλο βαθμό τον καταμερισμό του παγκόσμιου στόλου.

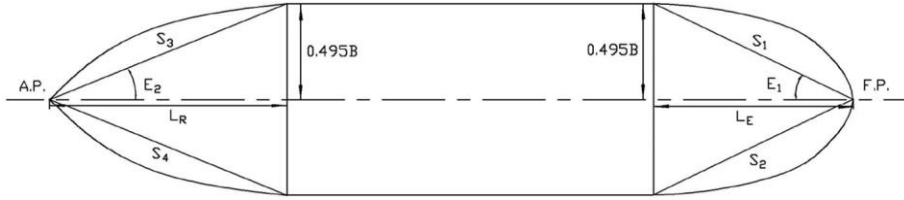
Το μήκος πλοίου για τα εξεταζόμενα μοντέλα κυμαίνονταν από 90m έως 383m. Ο συντελεστής  $C_B$  για πλοία container λαμβάνει τιμές από 0.55 εως 0.65 ενώ για tanker και bulk carrier μεταξύ 0.75 και 0.85.Ο Λόγος L/B κυμαίνεται μεταξύ 5.5 και λίγο πιο πάνω από 7.5. Ο λόγος B/T για την κατάσταση Full Load Departure κυμαίνεται μεταξύ 2.5 και 4.5 ενώ για την κατάσταση ballast είναι σε πολλές περιπτώσεις πάνω από το 4.5. Οι μετρήσεις έγιναν για εύρος τιμών για τον αριθμό Froude μεταξύ 0 και 0.3.

Για την ανάλυση της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης κυματισμού πρέπει να γίνει ανάλυση της επίδρασης της γωνίας πρόσπτωσης στις επιμέρους συνιστώσες της αντίστασης κυματισμού δηλαδή της αντίστασης εξαιτίας της ακτινοβολίας κυματισμών  $R_{AWM}$  αλλά και της αντίστασης διάθλασης-ανάκλασης  $R_{AWR}$ .

### **2.8.1 Αντίσταση Λόγω Διάθλασης.**

Μέχρι στιγμής λαμβανόταν υπόψιν μόνο το μήκος εισόδου LE και η γωνία εισόδου E1 του προωραίου τμήματος της ισάλου καθώς η μελέτη αφορούσε τους προωραίους

κυματισμούς. Στην περίπτωση των πρυμναίων κυματισμών είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρυμναίου τμήματος της ισάλου του πλοίου.



Σχήμα 15 Τα μήκη και οι γωνίες εισόδου και εξόδου ισάλου LE1, LE2 και E1, E2 αντίστοιχα.

Έτσι η αντίσταση εξαιτίας ακτινοβολίας δίνεται υπό την μορφή αρθροίσματος.

- $RAWR = \sum_i^4 RAWR_i$  (2.42)
- $RAWR1 = \frac{2.25}{4} \rho g B \zeta \alpha^2 \alpha_T \left\{ \sin^2(E1 - a) + \frac{2\omega_0 U}{g} [\cos E1 \cos(E1 - a) - \cos a] \right\} \left( \frac{0.87}{C_B} \right)^{1+4\sqrt{Fr}}$  (2.43)
- $RAWR2 = \frac{2.25}{4} \rho g B \zeta \alpha^2 \alpha_T \left\{ \sin^2(E1 + a) + \frac{2\omega_0 U}{g} [\cos E1 \cos(E1 + a) - \cos a] \right\} \left( \frac{0.87}{C_B} \right)^{1+4\sqrt{Fr}}$  (2.44)
- $RAWR3 = -\frac{2.25}{4} \rho g B \zeta \alpha^2 \alpha_T \left\{ \sin^2(E2 + a) + \frac{2\omega_0 U}{g} [\cos E2 \cos(E2 + a) - \cos a] \right\} \left( \frac{0.87}{C_B} \right)^{1+4\sqrt{Fr}}$  (2.45)
- $RAWR4 = -\frac{2.25}{4} \rho g B \zeta \alpha^2 \alpha_T \left\{ \sin^2(E2 - a) + \frac{2\omega_0 U}{g} [\cos E2 \cos(E2 - a) - \cos a] \right\} \left( \frac{0.87}{C_B} \right)^{1+4\sqrt{Fr}}$  (2.46)

$$a_T = \begin{cases} 1 - e^{-4\pi \left( \frac{T^*}{\lambda} - \frac{T^*}{2.5 \cdot L_{pp}} \right)} & \frac{\lambda}{L_{pp}} \leq 2.5 \\ 0 & \frac{\lambda}{L_{pp}} > 2.5 \end{cases} \quad (2.47)$$

Για τις περιπτώσεις 1 και 2

$T^* = T_{max}$ .

Για τις περιπτώσεις 3 και 4

$$T^* = \begin{cases} \frac{T_{\max}(4+\sqrt{|cosa|})}{5} & \text{for } Cb \leq 0.75 \\ \frac{T_{\max}(2+\sqrt{|cosa|})}{5} & \text{for } Cb > 0.75 \end{cases} \quad (2.48)$$

Παρατηρείται ότι οι συνιστώσες  $R_{AWR3}$  και  $R_{AWR4}$  έχουν αρνητικό πρόσημο. Αυτό συμβαίνει διότι η δύναμεις που ασκούνται απο τον κυματισμό ώθούν το πλοίο και δεν αντιτίθεται στην κίνηση του.

### **2.8.2 Πρόσθετη Αντίσταση Λόγω Ακτινοβολίας $R_{AWM}$ σε Following Waves(Ακόλουθους κυματισμούς).**

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση των Following waves. Εκ πρώτης όψεως δίνεται η αίσθηση ότι οι ακόλουθοντες κυματισμοί έχουν ως αποτέλεσμα αρνητική πρόσθετη αντίσταση δηλαδή ο κυματισμός σπρώχνει το πλοίο ωστόσο αυτό δεν συμβαίνει πάντα. Το πρόσημο της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού συσχετίζεται άμεσα με την διαφορά των ταχυτήτων  $V_s$  του πλοίου και των κυματισμών  $V_c$ .

Διαισθητικά μπορούμε να καταλάβουμε πώς αν η ταχύτητα πλοίου είναι μικρότερη από αυτήν του κυματισμού(η της ομάδας κυματισμού) τότε η αντίσταση πλοίου είναι αρνητική ενώ όταν είναι αρκετά μεγαλύτερη από του προπωρευόμενου κυματισμού τότε η αντίσταση κυματισμού είναι θετική. Έτσι στους ακόλουθους κυματισμούς εισέρχεται μια παράμετρος αυτή είναι η ταχύτητα φάσης του κυματισμού (phase velocity)  $V_c =$

$\sqrt{\frac{g*\lambda}{2*\pi}}$  αλλά και η ταχύτητα ομάδας κυματισμών (group velocity)  $V_g=V_c/2$ . Η ενέργεια του κυματισμού διαδίδεται με ταχύτητα ίση με την ομαδική ταχύτητα  $V_g$ . Σύμφωνα με πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν σε μοντέλα παρατηρήθηκαν εξήχθησαν ορισμένα συμπεράσματα.

- 1) Όταν η ταχύτητα του πλοίου είναι μηδέν  $Fr=0$  τότε η αντίσταση υπολογίζεται από τον τύπο (2.49) για  $Fr=0$ .
- 2) Όταν η ταχύτητα του πλοίου είναι ίση με  $V_c/4$  τότε η αντίσταση ακτινοβολίας  $R_{AWM}$  ισούται με μηδέν
- 3) Όταν η ταχύτητα πλοίου είναι ίση από  $V_c/2$  τότε η αντίσταση ακτινοβολίας πλοίου υπολογίζεται πάλι με βάση την εξίσωση (2.49)για head seas για μηδενική ταχύτητα.
- 4) Για ταχύτητα πλοίου  $V_s > V_c/2$  τότε η αντίσταση ακτινοβολίας υπολογίζεται για από την εξίσωση (2.49) για head seas αλλά για πρόσω ταχύτητα  $V_s - V_c/2$  δηλαδή για τον σχετικό αριθμό  $Fr_{rel} = (V_s - V_c/2)/(g*L)$ .
- 5) Για τις ενδιάμεσες περιπτώσεις η τιμή της  $R_{AWM}$  υπολογίζεται μέσω γραμμικής παρεμβολής.

Προσοχή οι σχέσεις αφορούν κυματισμούς σε βαθύ νερό.

$$\bullet \quad RAWM = 4 * \rho * g * \zeta \alpha^2 * \frac{B^2}{Lpp} a1 * a2 * a3 * \bar{\omega}^{b1} * e^{\frac{b1(1-\bar{\omega}^{b1})}{d1}} \quad (2.49)$$

$$a1 = \begin{cases} 60.3C_B^{1.34} (4kyy)^2 \left(\frac{0.87}{Cb}\right)^{-(1+Fr)\cos\alpha} \left(\ln \frac{B}{T_{max}}\right)^{-1} \frac{(1-2\cos\alpha)}{3} & \text{for } \frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi \\ \text{Γραμμική παρεμβολή μεταξύ beam seas και following seas} & \text{για } 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\ f(U, Vg) & \text{for } a = 0 \end{cases} \quad (2.50)$$

$$a2 = \begin{cases} 0.0072 + 0.1676Fr & \text{for } Fr < 0.12 \\ Fr^{1.5} \exp(-3.5Fr) & \text{for } Fr \geq 0.12 \end{cases}$$

$$a3 = 1 + 28.7 * \operatorname{atan} \frac{|Ta-Tf|}{Lpp} \quad (2.51)$$

$$\bar{\omega} = 2.142^3 \sqrt{kyy} \sqrt{\frac{Lpp}{\lambda}} \left[1 - \frac{0.111}{Cb} \left(\ln \frac{B}{T_{max}} - \ln 2.75\right)\right] \left(\frac{Cb}{0.65}\right)^{0.17} \left[(-1.377Fr^2 + 1.157Fr)|\cos\alpha| + \frac{0.618(13+\cos 2\alpha)}{14}\right] \quad (2.52)$$

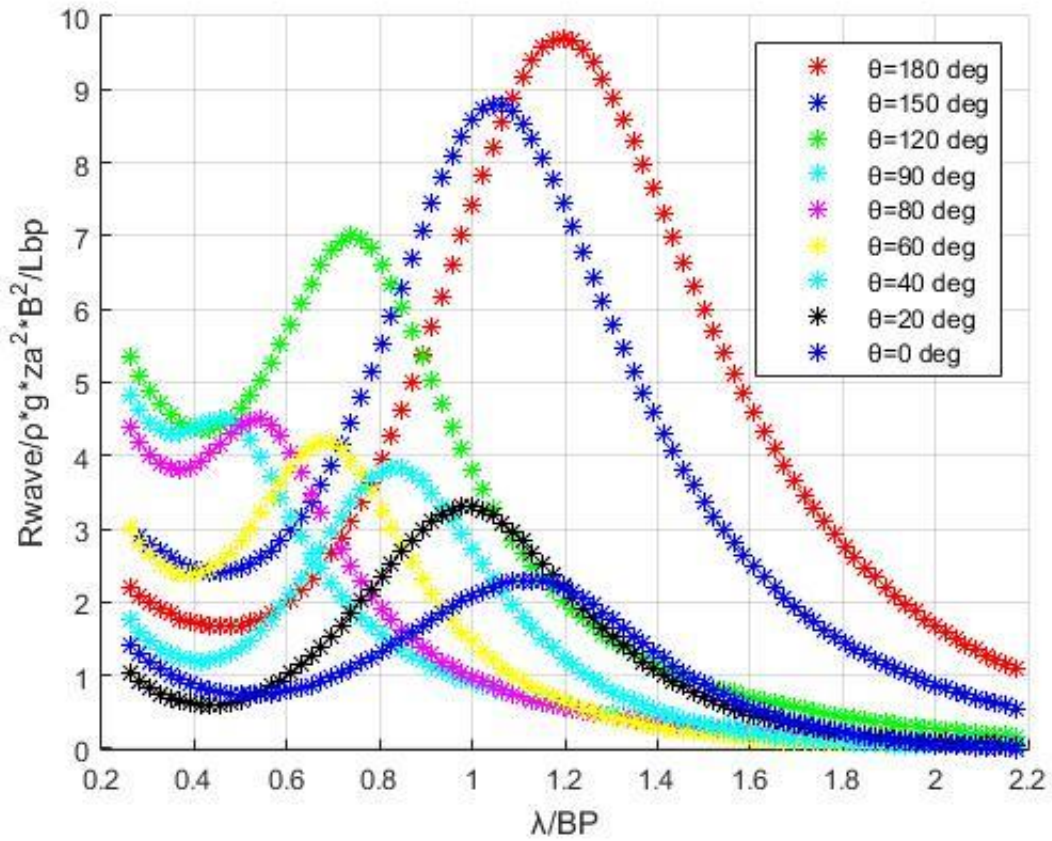
$$b1 = \begin{cases} 11 & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -8.5 & \text{elsewhere} \end{cases}$$

$$d1 = \begin{cases} 566 \left(\frac{LppCb}{B}\right)^{-2.66} & \text{for } \bar{\omega} < 1 \\ -566 \left(\frac{Lpp}{B}\right)^{-2.66} * \left(4 - \frac{125 \operatorname{atan}|Ta-Tf|}{Lpp}\right) & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.53)$$

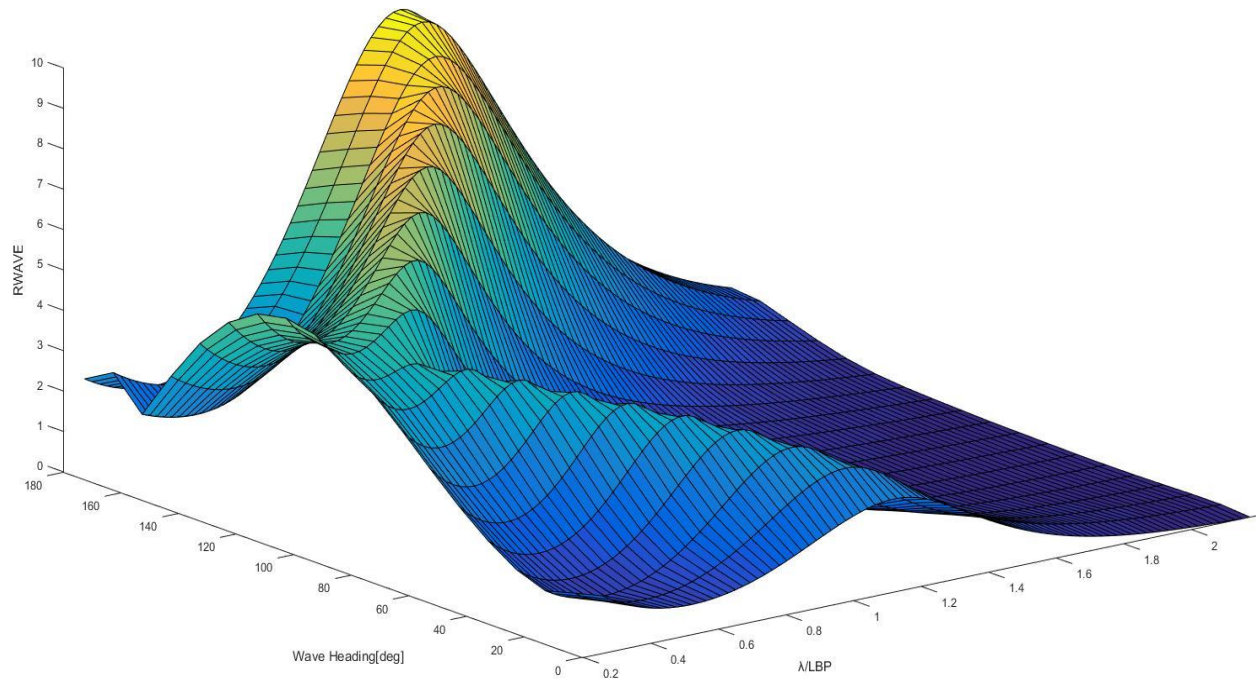
Στα σχήματα 16 και 17 βλέπουμε την πρόσθετη αντίσταση πλοίου για διαφορετικές γωνίες κυματισμού. Παρατηρείται η μείωση της πρόσθετης αντίστασης για μείωση της γωνίας πρόσπτωσης. Επίσης παρατηρείται μετατόπιση του μέγιστου της εκάστοτε καμπύλης προς τα αριστερά του γραφήματος δηλαδή για μικρότερες τιμές  $\lambda/Lpp$ . Αντιστρόφως για γωνίες μεταξύ 0 και 90 μοίρες παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της πρόσθετης αντίστασης εμφανίζεται για μεγαλύτερα μήκη κύματος καθώς η γωνία κυματισμού μετατοπίζεται από 90 μοίρες προς τις 0 μοίρες. Ωστόσο η τιμή της πρόσθετης αντίστασης συνεχίζει να βαίνει μειούμενη καθώς η γωνία κυματισμού μετακινείται από τις 180 μοίρες προς τις 0 μοίρες.

Για την περίπτωση των containerships όπως το KCS όπου έχουμε transom sterns περαιτέρω έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη ώστε να είναι δυνατή η σωστή μαθηματική

μοντελοποίηση καθώς η γωνία E2 απειρίζεται. Ωστόσο προς το παρόν ενδείκνυται η τιμή  $\pi/2$  για την γωνία E2.



Σχήμα 16 Η πρόσθετη αντίσταση (συνάρτηση μεταφοράς)  $R_{wave}$  σε κανονικούς αρμ. κυματισμούς για διαφορετικές τιμές της γωνίας πρόσπτωσης κυματισμού.



Σχήμα 17. 3-D γράφημα της πρόσθετης αντίστασης  $R_{AW}$  για κανονικούς κυματισμούς για διαφορετικές τιμές γωνίας πρόσπτωσης.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SHIPFLOW.**

### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ CFD ΚΑΙ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SHIPFLOW.**

Το λογισμικό Shipflow της εταιρείας Flowtech, (Shipflow, User's Manual, Gothenburg Sweden) είναι ένα πρόγραμμα CFD (Computational Fluid Dynamics) το οποίο περιέχει κώδικες RANS αλλά και κώδικες για την επίλυση προβλημάτων δυναμικής ροής. Τα προγράμματα CFD χρησιμοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες για να επιλύσουν δύσκολα προβλήματα της ρευστομηχανικής που αφορούν την κίνηση κινητών μέσων από τα πιο απλά από τυπικά αυτοκίνητα μέχρι αεροπλάνα και διαστημόπλοια. Οι μέθοδοι CFD δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα ωστόσο απαιτούν πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Η βάση των μεθόδων CFD είναι η επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes. Το Shipflow είναι ένα πρόγραμμα σχεδιασμένο εξ'ολοκλήρου για ναυτικές εφαρμογές. Έχει την δυνατότητα να εξάγει υπολογισμούς και αποτελέσματα για διάφορων τύπων γάστρες από εμπορικά πλοία ( κοντέινερ, τανκερ ) μέχρι πιο εξειδικευμένες γάστρες όπως καταμαράν και τριμαράν. Επίσης δίνει στο χρήστη δυνατότητες βελτιστοποίησης της γεωμετρίας των πλοίων ενώ οι τελευταίες εκδόσεις περιέχουν και την δυνατότητα μελέτης όχι μόνο πλοίων αλλά και πλατφορμών εξόρυξεως, αγκυρώσεις πλωτές ανεμογεννήτριες κτλπ.

Με το πρόγραμμα Shipflow και συγκεκριμένα με την χρήση του επιλυτή εξίσωσης δυναμικής ροής motions7 υπολογίσαμε την πρόσθετη αντίσταση σε μετωπικούς, γωνιακούς και πλάγιους κυματισμούς καθώς και την πρόσθετη αντίσταση σε μετωπικούς κυματισμούς για πλευση με διαγωγή. Τα αποτελέσματα του προγράμματος παρατέθηκαν μαζί με τα αποτελέσματα των ημιεμπειρικών μεθόδων κυρίως της Liu&Papanikolaou αλλά και της STAWAVE-2 για μετωπικούς κυματισμούς και για κυματισμούς υπο γωνία 150°.

Για να μπορεί να επιτελεί τις λειτουργίες του το Shipflow χρησιμοποιεί ορισμένους κώδικες- υποπρογράμματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

### **3.2 ΟΙ ΚΩΔΙΚΕΣ ΤΟΥ SHIPFLOW.**

Το πρόγραμμα Shipflow χρησιμοποιεί διάφορους κώδικες για τον υπολογισμό των εκάστοτε ζητούμενων φυσικών μεγεθών. Οι εντολές οι οποίες χρησιμοποιούνται ώστε να χρησιμοποιηθεί ο εκάστοτε κώδικας φέρουν το όνομα του κώδικα.

#### **3.2.1 XBOUND:**

Ο συγκεκριμένος κώδικας ασχολείται με το λεπτό στροβιλώδες οριακό σώμα που περιβάλλει τη γάστρα. Χρησιμοποιείται δηλαδή για τον υπολογισμό της αντίστασης τριβής του πλοίου. Το xbound μας δίνει τον συντελεστή τριβής CF μετά από κάθε δοκιμή. Το xbound δημιουργεί ένα αρχείο βάσης που χρησιμοποιείται από το XCHAR.

### **3.2.2 XPAN:**

Το XPAN είναι ένα πρόγραμμα το οποίο υπολογίζει την αντίσταση κυματισμού που δημιουργεί το πλοίο, χωρίζοντας την ελεύθερη επιφάνεια σε ένα πλέγμα από τετραγωνικά επίπεδα. Είναι σύμφωνα με την shipflow ένα πολυ αποτελεσματικό πρόγραμμα, επίλυσης προβλημάτων που αφορούν ελεύθερη επιφάνεια ρευστού χωρίς όμως να λαμβάνεται η συνεκτικότητα του ρευστού δηλαδή η ροή είναι αστρόβιλη και ασυμπιεστή χρησιμοποιώντας δηλαδή την γνωστή θεωρία δυναμικής ροής (potential flow). Συγκεντρωτικά το XPAN μπορεί να δώσει τα παρακάτω αποτελέσματα.

- Γραμμικές και μη γραμμικές συνοριακές συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας.
- Αντίσταση κυματισμού του πλοίου από την ολοκλήρωση των πιέσεων γύρω από την βρεχόμενη επιφάνεια
- Γραμμική και μη γραμμική κυματομορφή.
- Διαμήκη και εγκάρσια προφίλ κυματισμών
- Γραμμές ροής γύρω από τη γάστρα.
- Κατανομή πιέσεων πάνω στη γάστρα.
- Υπολογίζει την διαγωγή και την δυναμική διαγωγή του πλοίου.
- Μπορεί να δεσμεύει όλους του πυρήνες σε έναν πολυπύρηνο υπολογιστή ώστε να βελτιστοποιεί τον χρόνο υπολογισμού.

Το αποτέλεσμα δίνει το συντελεστή CW μετά από κάθε δοκιμή.

### **3.2.3 XMESH:**

Ο κώδικας XMESH δημιουργεί το πλέγμα της ελεύθερης επιφανείας και της επιφάνειας της γάστρας. το οποίο χρησιμοποιείται από το κώδικα XPAN. Ο κώδικας XMESH επίσης καλείται σε περιπτώσεις όπου εκτελούνται μη γραμμικές μέθοδοι ,υπολογισμοί διαγωγής και βύθισης της γάστρας λόγω των κινήσεων της στο νερό. Αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος συνεπάγεται αύξηση της ακρίβειας των παραγόμενων αποτελεσμάτων ωστόσο φέρνει να αύξηση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύς και άρα για δεδομένη υπολογιστική ισχύ συνεπάγεται αύξηση του απαιτούμενου χρόνου για την εξαγωγή των ζητούμενων αποτελεσμάτων. Για την επιλογή πυκνότητας του πλέγματος ο χρήστης έχει τρεις επιλογές μόνο. 1 αραιό (coarse), 2 μεσαίο (medium), 3 πυκνό (fine).

### **3.2.4 XCHAP:**

Ο κώδικας XCHAP χρησιμοποιεί το μοντέλο στροβιλισμού k- $\omega$ SST. Το XCHAP χρησιμοποιεί το πλέγμα που παράγεται από το XGRID. Με την χρήση αυτής της εντολής είναι δυνατός ο υπολογισμός της μέσης πίεσης, ταχύτητας και των υπόλοιπων

μεγεθών που σχετίζονται με την τυρβώδη ροή. Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται κυρίως όταν θέλουμε στους υπολογισμούς μας να εισάγουμε τα παρελκόμενα και την επίδραση τους στον υπολογισμό των διάφορων μεγεθών για παράδειγμα η επίδραση του ωμόρου και της λειτουργίας της προπέλας στην αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό. Στην δική μας εργασία δεν έγινε χρήση αυτής της εντολής καθώς δεν περιλαμβάνονται τα παρελκόμενα , πηδάλιο και προπέλα στην αναλύσή μας.

### **3.2.5 XPTD:**

Ο XPTD είναι ένας κώδικας επίλυσης προβλημάτων δυναμικής ροής ο οποίος χρησιμοποιείται για τις περιπτώσεις μελέτης της συμπεριφοράς του πλοίου σε κατάσταση κυματισμών. Χρονικά ακριβής επιλυτής για προβλήματα ελεύθερης επιφανείας. Μπορεί να κάνει υπολογισμούς για ήρεμο νερό, για κυματισμούς και για δυναμική βύθιση και διαγωγής λόγω κινήσεων του πλοίου στην ελεύθερη πειφάνεια της θάλασσας. Μπορεί να κάνει υπολογισμούς τόσο για γραμμικούς όσο και τυχαίους κυματισμούς και να υπολογίζει την πρόσθετη αντίσταση εξαιτίας των κυματισμών.

### **3.2.6XMTD:**

Η εντολή XMTD δημιουργεί το πλέγμα επιφανείας και γάστρας που θα χρησιμοποιηθεί από το motions7 η το xprtd.

### **3.2.7 MOTIONS7:**

Πρόκειται για μια μετεξέλιξη του XPTD η οποία προστέθηκε στην έκδοση 7 που είναι και η νεότερη έκδοση του προγράμματος Shipflow. Καλύτερη ακρίβεια από παραδοσιακές μεθόδους, κώδικες και επιλυτές θεωρίας δυναμικής ροής (potential flow theory). Χρησιμοποιείται τόσο για κανονικούς όσο για τυχαίους κυματισμούς. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης εξαιτίας των κυματισμών και των 6 συντελεστών RAO του πλοίου. Έχει τη δυνατότητα να κάνει υπολογισμούς για ήρεμο νερό όπως την παραγόμενη μορφή των κυματισμών που δημιουργεί το πλοίο, αντίσταση σε ήρεμο νερό και δυναμική διαγωγή. Είναι ο κύριος κώδικας που θα χρησιμοποιήσουμε για τους υπολογισμούς της πρόσθετης αντίστασης.

Έχει εξαιρετική δυνατότητα υπολογισμού ικανοποιητικών αποτελεσμάτων σε μικρό χρονικό διάστημα σε σχέση με κώδικες RANS. Για παράδειγμα σε έναν υπολογιστή με 16 πυρήνες ο motions7 μπορεί να πραγματοποιήσει μια τύπικη προσομείωση σε 2 με 4 ώρες, ενώ προγράμματα CFD που χρησιμοποιούν κώδικες RANS( STAR-CCM, Fine/Marine, OpenFoam) χρειάζονται περίπου 200 με 250 h για ίδιο αριθμό πυρήνων.

### **3.3 Θεωρία δυναμικής ροής(Σ.Τσαγγάρης(2016) )**

Σύμφωνα με την θεωρία της δυναμικής ροής το ρευστο θεωρείται συνεχές και ασυμπιεστο, ατριβές και αστρόβιλο. Με  $\Phi$  συμβολίζεται το δυναμικό της ροής.

$$\nabla\Phi = \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}, \frac{\partial\Phi}{\partial y}, \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) = (u, v, w) = \vec{u} \quad (3.1)$$

Με  $\vec{u}$  συμβολίζεται το διάνυσμα της ταχύτητας της ροής.

#### Εξίσωση Συνέχειας.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση στην εξίσωση της συνέχειας έχουμε.

$$\nabla * \vec{u} = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla * \nabla\Phi = 0$$

$$\nabla^2\varphi = \left(\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2}\right)=0 \quad (3.3)$$

Έτσι η εξίσωση της συνέχειας μετασχηματίζεται στην εξίσωση Laplace για το δυναμικό της ροής.

#### Εξισώσεις Navier-Stokes

Οι εξισώσεις Navier –Stokes για συνεχές, ασυμπιεστο νευτωνικό ρευστό ορίζονται ως.

$$\frac{\partial\vec{u}}{\partial t} = \vec{u} \times \vec{\omega} - \nabla \left(\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}|\vec{u}|^2 + gz\right) + \nu * \nabla^2\vec{u} \quad (3.4)$$

Σύμφωνα με την θεωρία της δυναμικής ροής το ρευστό θεωρείται αστρόβιλο συνεπώς  $\vec{\omega} = 0$  και  $\nabla^2\vec{u} = \nabla^2(\nabla\varphi) = \nabla(\nabla^2\varphi) = 0$ .

Επιπλέον:

$$\frac{\partial\vec{u}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\nabla\varphi) = \nabla \frac{\partial\Phi}{\partial t} \quad (3.5)$$

Άρα:

$$\nabla \left(\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}|\vec{u}|^2 + gz\right) = 0. \quad (3.6)$$

Έτσι οι εξισώσεις Navier –Stokes μετασχηματίζονται στη εξίσωση Bernoulli.

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}|\nabla\varphi|^2 + gz = \text{const} \quad (3.7)$$

### **3.4 Οριακές συνθήκες**

Οι οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στην επιφάνεια της γάστρας και στην ελεύθερη επιφάνεια είναι οι εξής.

#### **3.4.1 Κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας.**

Η κινηματική συνθήκη ορίζει την ελεύθερη επιφάνεια ως το ανώτερο όριο του δυναμικού της ροής.

Η κινηματική συνθήκη δίνεται από την σχέση.

$$\frac{D(\eta(x,y,t)-z)}{Dt} = 0 \quad (3.8)$$

Όπου  $\eta$  είναι η συνάρτηση μετατόπισης της ελεύθερης επιφάνειας από την θέση ισορροπίας της. Για  $z=\eta$ :

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (3.9)$$

#### **3.4.2 Δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας.**

Σύμφωνα με την συνθήκη αυτή πρέπει να υπάρχει ισορροπία υδροστατικών και υδροδυναμικών δυνάμεων στην ελεύθερη επιφάνεια του πλοίου. Η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση

$$\frac{D\Phi}{Dt} = -g * z + \frac{1}{2} \nabla \Phi * \nabla \Phi - \frac{p_a}{\rho} \quad (3.10)$$

Όπου  $p_a$  η ατμοσφαιρική πίεση και  $D/Dt$  η ουσιώδης η υλική παράγωγος που εκφράζει τον απόλυτο χρονικό ρυθμό μεταβολής ενός μεγέθους αναφερόμενο σε συγκεκριμένο υλικό στοιχείο. Ένας παρατηρητής κινούμενος μαζί με το σωματίδιο διαπιστώνει τη μεταβολή της υλικής παραγωγού.

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \nabla \Phi * \nabla \quad (3.11)$$

#### **3.4.3 Συνθήκη μη εισχώρησης στην επιφάνεια του σώματος.**

Σύμφωνα με την συνθήκη αυτή η ροή του ρευστού στην επιφάνεια του σώματος είναι εφαπτομενική και η ταχύτητα της ροής στην διεύθυνση του κάθετου μοναδιαίου διανύσματος της επιφάνειας της γάστρας  $\vec{n}$  είναι μηδενική.

$$\nabla\varphi * \vec{n} \equiv \frac{\partial\varphi}{\partial n} = \vec{n} * (\vec{V} + \vec{\omega} \times \vec{r}). \quad (3.12)$$

Όπου  $\vec{n}$  το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα της επιφανείας του πλοίου,  $\vec{V}$  και  $\vec{\omega}$  οι ταχύτητες μεταφοράς και περιστροφής του σώματος αντίστοιχα. Με  $\vec{r}$  είναι το διάνυσμα θέσης του σημείου στην επιφάνεια της γάστρας.

#### **3.4.4 Η επ'άπειρον συνθήκη η συνθήκη ακτινοβολίας.**

Για την επίλυση των προβλήματος προσδιορισμού της πρόσθετης αντίστασης απαιτείται και μια επ'άπειρον συνθήκη η οποία περιγράφει την μορφή του δυναμικού της ροής σε μεγάλες αποστάσεις από το πλοίο. Σε αυτήν την συνθήκη εμπεριέχεται και η συνθήκη μη εισχώρησης στον πυθμένα καθώς η επίλυση των προβλημάτων γίνεται για βαθύ νερό άπειρου βάθους.

#### **3.5.Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης κυματισμού στο πρόγραμμα Shipflow:**

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού πρέπει να υπολογιστεί η διαφορά μεταξύ αντίστασης σε ήρεμο νερό και της αντίστασης σε κυματισμό. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο motions7. Το πρόγραμμα Shipflow χρησιμοποιήθηκε ευρέως για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας

Οι υπολογισμοί στο πρόγραμμα Shipflow έγιναν για τις ίδιες τιμές ταχύτητας πλοίου και σημαντικού ύψους κύματος.  $V_s=23.26$  kn,  $H_s=5$ m. Οι κυματισμοί για τους οποίους γίνονται οι υπολογισμοί είναι κυματισμοί Stokes 5ης τάξης μη γραμμικότητας. Επιλέχθηκαν οι κυματισμοί Stokes 5<sup>ης</sup> τάξης αντί των κυματισμών Airy διότι σύμφωνα με την μαθηματική θεωρία κυματισμών του Stokes για μεγάλους κυματισμούς έχουμε φαινόμενα μεταφοράς μάζας και συνεπώς λαμβάνεται υπόψιν η μη γραμμικότητα του φαινομένου. Αντίθετα σύμφωνα με την θεωρία του Airy οι κυματισμοί είναι ένα πλήρως γραμμικό φαινόμενο χωρίς την παρουσία φαινομένων μεταφοράς μάζας.

##### **3.5.1.Αντίσταση σε ήρεμο νερό:**

Για τον υπολογισμό της αντίστασης σε ήρεμο νερό είναι απαραίτητο να γίνει χρήση αποκλειστικά του motions7. Η συνολική αντίσταση σε ήρεμο νερό αλλά σε κυματισμούς δίνεται από τον τύπο:

$$RT = RF + RW \quad (3.13)$$

Η αντίσταση τριβής δίνεται από τον τύπο:

$$RF = (1 + \kappa) * RFo \quad (3.14)$$

Με RFo συμβολίζεται η αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας με επιφάνεια ίση με τη γάστρα του πλοίου και υπολογίζεται από την σχέση

$$RFo = \frac{1}{2} * \rho * V_s^2 * Swett * CF \quad (3.15)$$

Με  $\rho$  συμβολίζεται η πυκνότητα του θαλασσινού νερού, με  $V_s$  η ταχύτητα του πλοίου με Swett η βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου και  $CF = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re)-2)^2}$  ο συντελεστής τριβής επίπεδης πλάκας σύμφωνα με την ITTC. Με  $\kappa$  συμβολίζεται ο συντελεστής μορφής και δίνεται μετά την εκτέλεση μιας δοκιμής. Τέλος με  $RW$  συμβολίζεται η αντίσταση του κυματισμού και υπολογίζεται από την ολοκλήρωση των πιέσεων του ρευστού πάνω στην επιφάνεια της γάστρας. Στην περίπτωση της της αντίστασης σε ήρεμο νερό η  $RW$  είναι η αντίσταση εξαιτίας των κυματισμών των οποίων παράγει το ίδιο το πλοίο.

Για ταχύτητα  $V_s=23.26\text{kn}$  ελήφθησαν οι εξής τιμές.

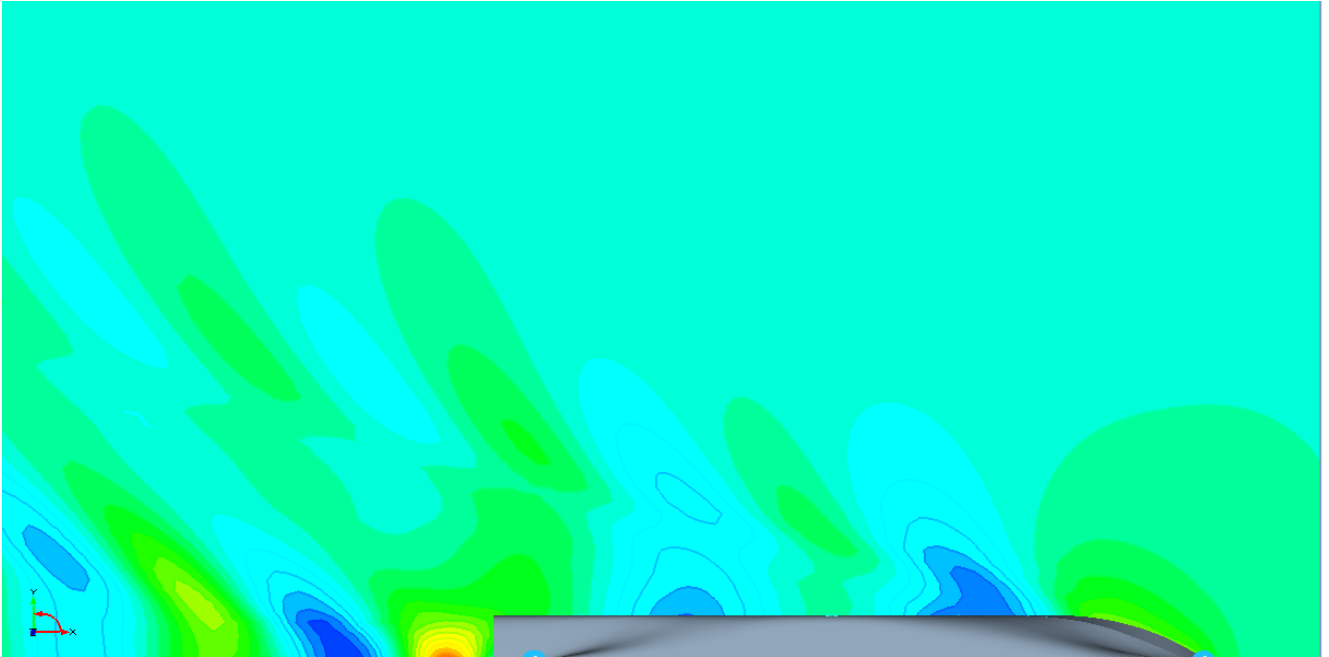
**$RW= 285294,98\text{N}$ .**

**$\kappa=0.25$**

**$RF= 1210212.09\text{ N}$ .**

**$RT= 1495507\text{ N}$ .**

Παρατηρείται ότι η αντίσταση τριβής είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση κυματισμού το οποίο είναι χαρακτηριστικό των πλοίων εκτοπίσματος. Για την κατάσταση σε ήρεμο νερό το πρόγραμμα Shipflow εμφανίζει αναφορές αποτελεσμάτων με γραφικές απεικονίσεις για την κατανομή της πίεσης αλλά και την μορφή των κυματισμών που δημιουργεί το πλοίο. Στην Σχήμα 18 φαίνονται οι κυματομορφές που δημιουργούνται από την κίνηση του πλοίου σε ήρεμο νερό. Με κόκκινο φαίνονται οι κορυφές των κυματισμών ενώ με μπλέ οι κοιλάδες.



Σχήμα 18 Γραφική απεικόνιση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας απο το πρόγραμμα Shipflow κατα τον υπολογισμό της αντίστασης πλοίου σε ήρεμο νερό για την ταχύτητα  $V_s=23,26kn$ .

### **3.5.2.Υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης σε κατάσταση κυματισμού.**

Παρακάτω υπολογίστηκαν οι τιμές της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού για 5 διαφορετικές τιμές μήκους κύματος. Οι τιμές αδιάστατου μήκους κύματος που επιλέχθηκαν είναι 0.15, 0.5 , 1 , 1.5, 2. Για ορισμένες περιπτώσεις ελήφθησαν και μετρήσεις για ενδιάμεσες τιμές 0.75 και 1.25. Κάθε δοκιμή διήρκησε περίπου 12 ώρες για το πυκνότερο πλέγμα (fine) σε head seas. Για τις περιπτώσεις γωνιακής πρόσπτωσης κυματισμού ο χρόνος ήταν παρόμοιος αλλά οι εκτελέσεις έγιναν για το αραιότερο πλέγμα (coarse) καθώς ο υπολογιστικός χρόνος ήταν απαγορευτικός για τις περιπτώσεις medium και fine. Στην περίπτωση του medium ο χρόνος σε ορισμένες περιπτώσεις για μια δοκιμή σε γωνιακούς κυματισμούς ξεπερνούσε τις 4 ημέρες και για το fine τις 9. Έτσι επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε το αραιότερο πλέγμα(coarse) για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης για τις περιπτώσεις γωνιακής πρόσπτωσης κυματισμού. Ένας παράγοντας ο οποίος επίσης οδηγεί σε αύξηση του χρόνου μιας μέτρησης για σταθερή πυκνότητα πλέγματος είναι το μήκος κύματος. Παρατηρήθηκε στην περίπτωση των μετωπικών κυματισμών ότι ο χρόνος για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης για μήκος κύματος 0.15 ήταν κατά 8 ώρες μεγαλύτερος (+67%) από τις υπόλοιπες μετρήσεις για την ίδια περίπτωση κυματισμού και για το πυκνότερο πλέγμα fine.

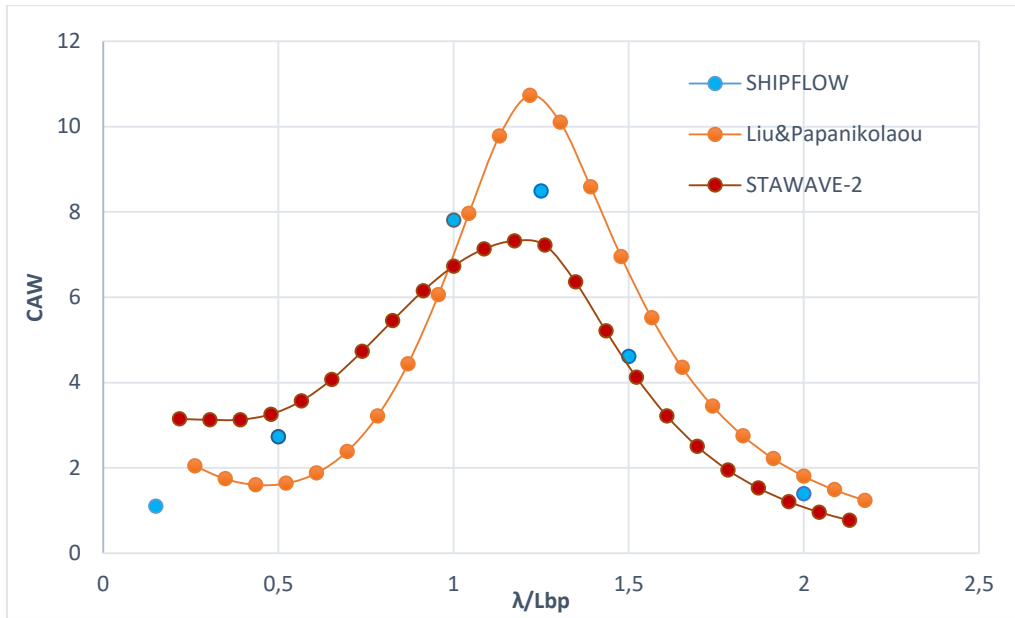


### **3.5.3 Αποτελέσματα Shipflow.**

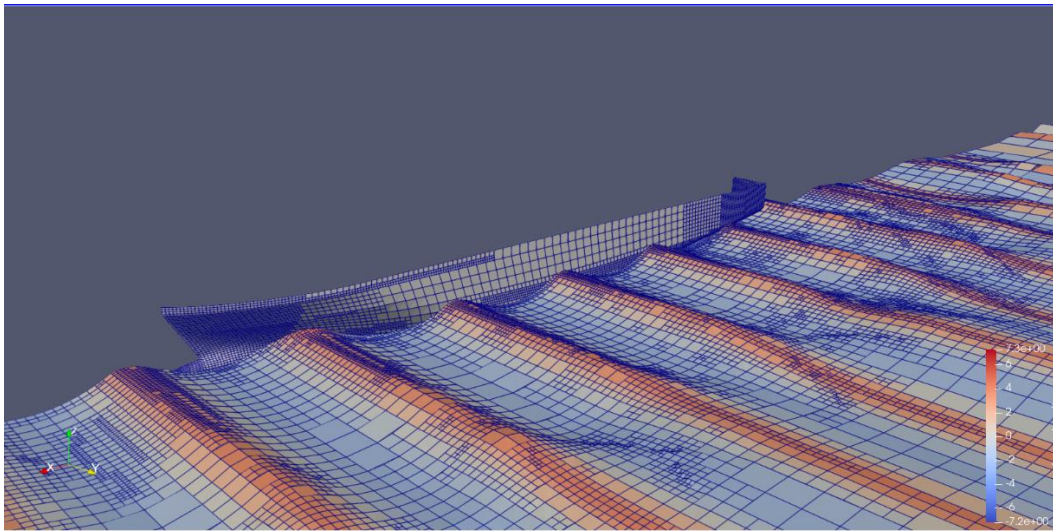
Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τους υπολογισμούς του προγράμματος Shipflow παρουσιάζονται στα παρακάτω γραφήματα. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται απο κοινού με τα αποτελέσματα των ημι εμπειρικών μεθόδων. Επίσης παρουσιάζονται στιγμιότυπα απο τους υπολογισμούς του Shipflow. Η γραφική απεικόνιση των υπολογισμών έγινε από το πρόγραμμα Paraview.

Για τις μετρήσεις σε 180 και 150 μοίρες παρουσιάζονται στο γράφημα εκτός από τη μέθοδο Liu&Paranikolaou(2016) και των εκδοχή της για τις περιπτώσεις γωνιακών κυματισμών και η μέθοδος STAWAVE-2 καθώς η δεύτερη χρησιμοποιείται για γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού με εύρος ( $\pm 45^\circ$ ).

### 3.5.3.1 ΓΩΝΙΑ 180 ΜΟΙΡΩΝ (HEAD SEAS).

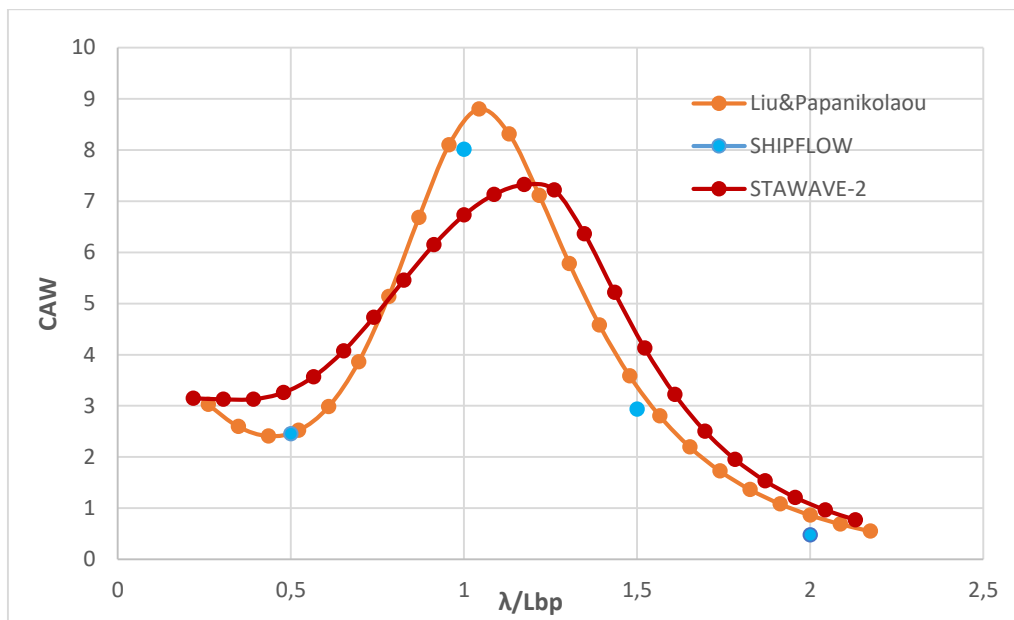


Σχήμα 19 Αποτελέσματα του Shipflow για πρωραίους κυματισμούς(180°).

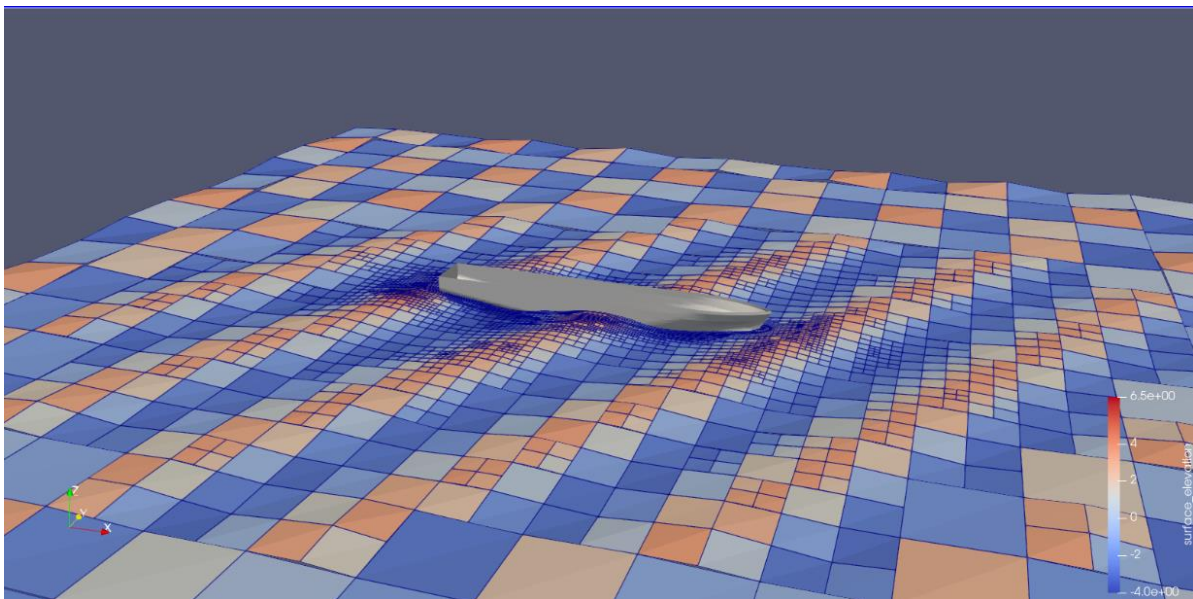


Σχήμα 20 Γραφική απεικόνιση της προσομείωσης για πρωραίους κυματισμούς και αδιάστατο μήκος κύματος 0.15

### 3.5.3.2 ΓΩΝΙΑ 150 ΜΟΙΡΩΝ.

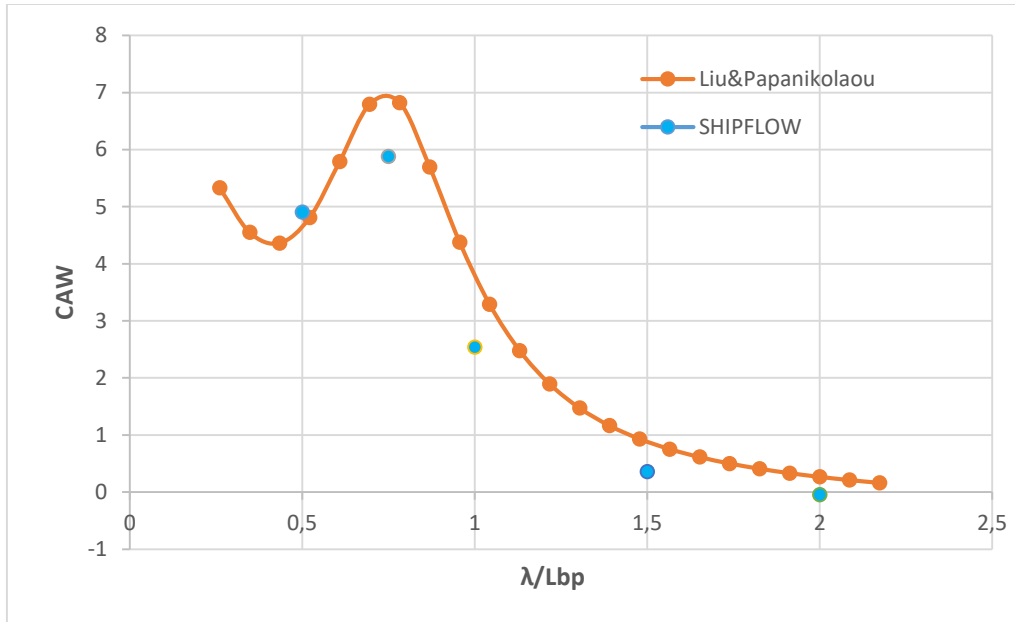


Σχήμα 21 Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών 150°.

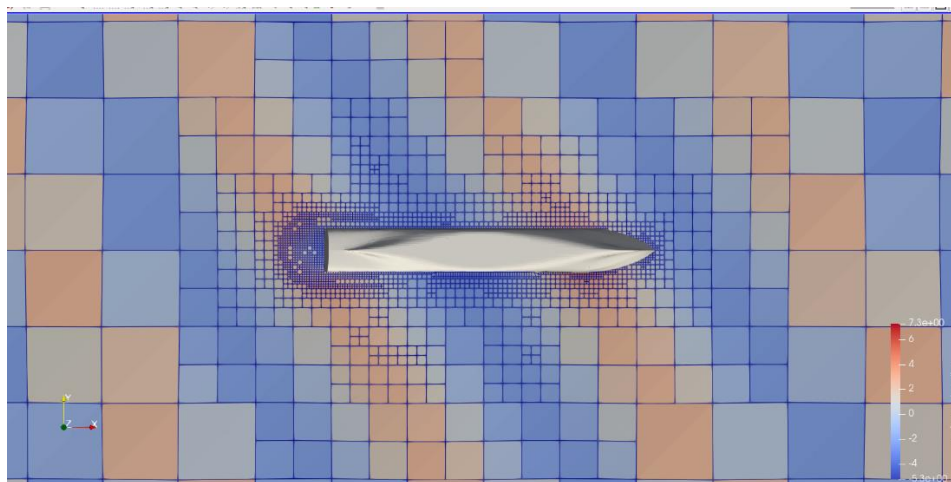


Σχήμα 22 Γραφική αναπαράσταση της προσομείωσης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού 150°

### 3.5.3.3 ΓΩΝΙΑ 120 ΜΟΙΡΩΝ.

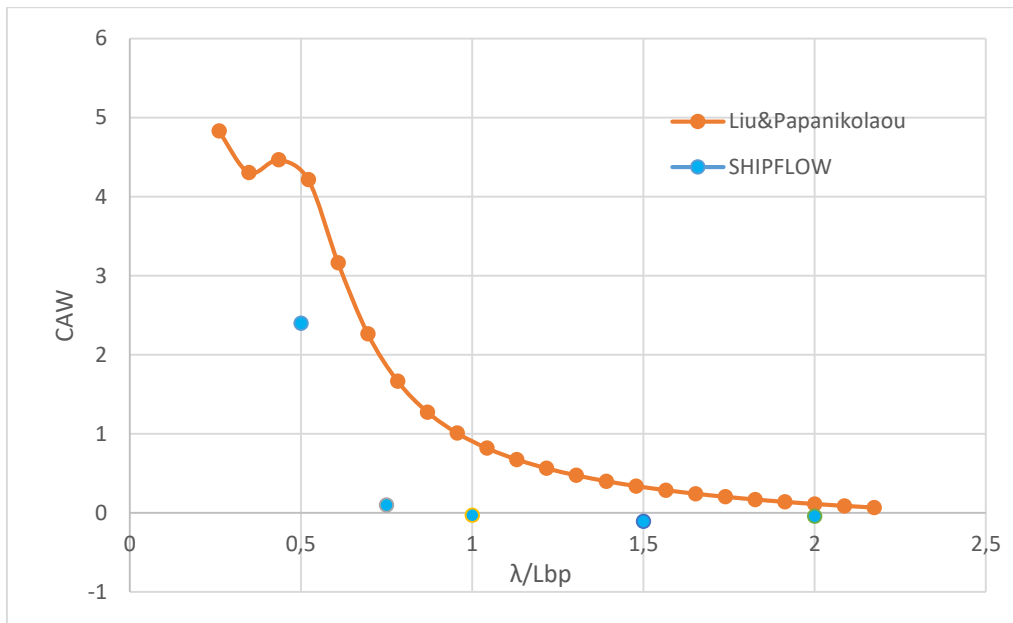


Σχήμα 23 Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών 120°

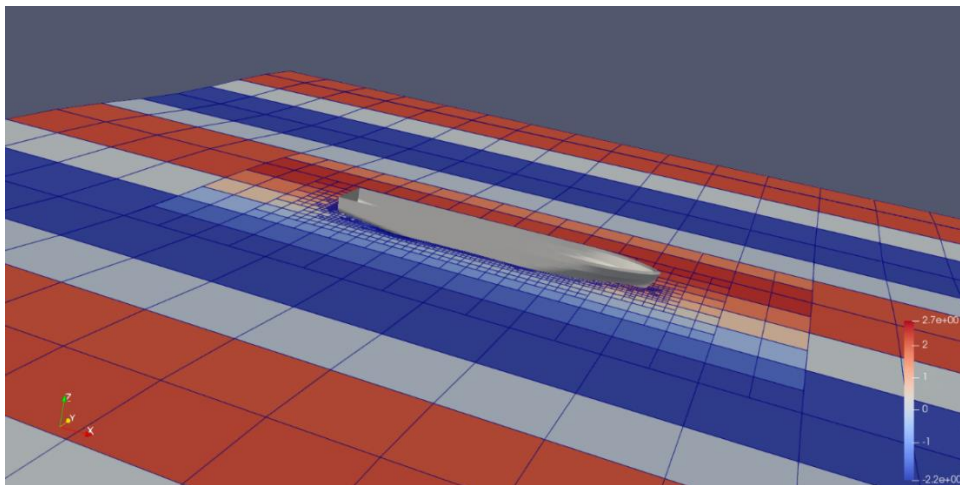


Σχήμα 24 Γραφική αναπαράσταση της προσομείωσης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού 120°

### 3.5.3.4 ΓΩΝΙΑ 90 ΜΟΙΡΩΝ.

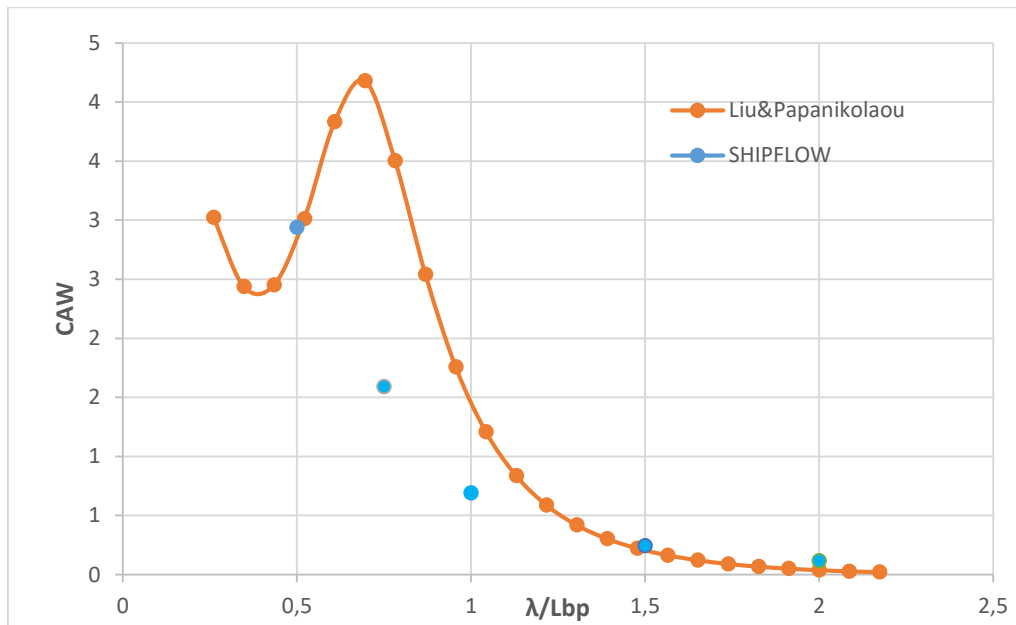


Σχήμα 25 Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών 90°

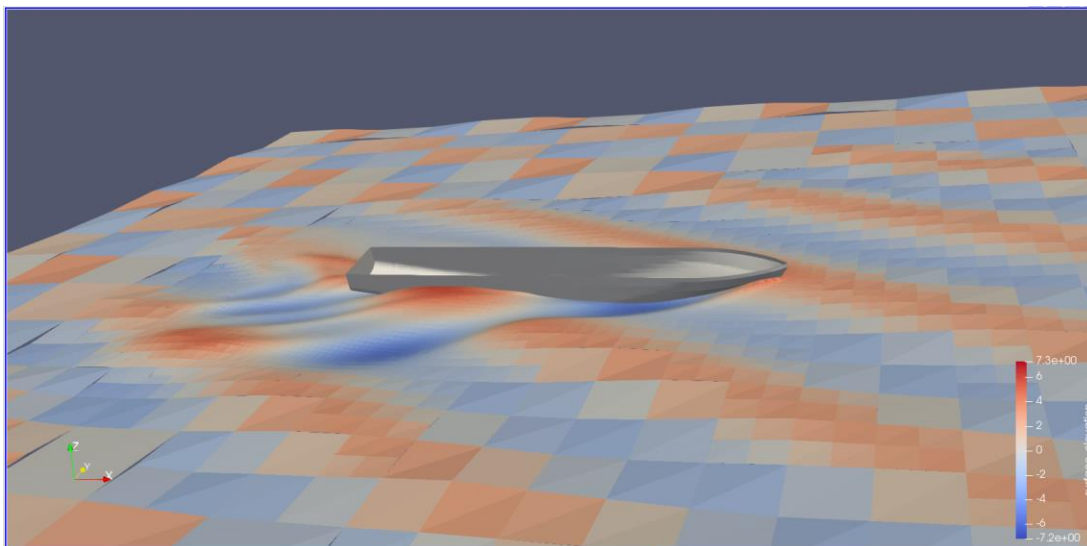


Σχήμα 26 Γραφική αναπαράσταση της προσομείωσης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού 90° και αδιάστατο μήκος κύματος 1.5.

### 3.5.3.5 ΓΩΝΙΑ 60 ΜΟΙΡΩΝ.

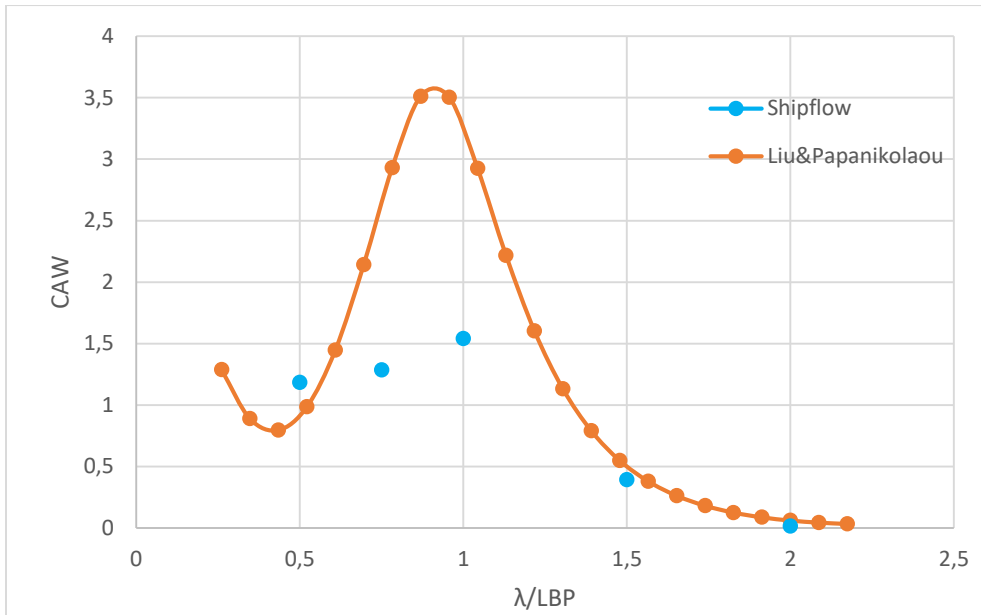


Σχήμα 27 Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών 60°

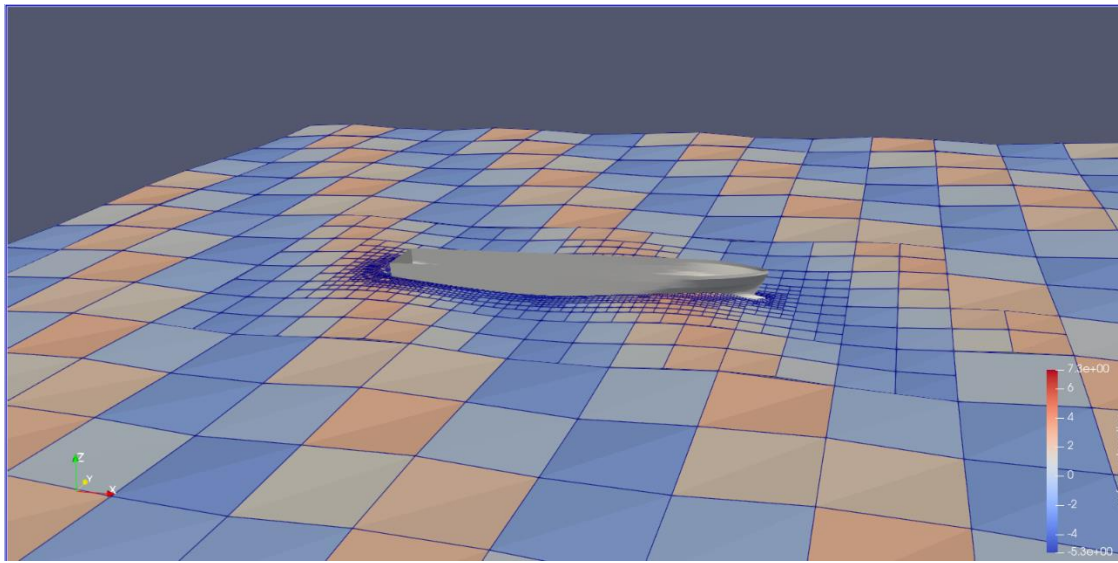


Σχήμα 28 Γραφική αναπαράσταση της προσομείωσης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού 60° και αδιάστατο μήκος κύματος 0.5

### 3.5.3.6 ΓΩΝΙΑ 30 ΜΟΙΡΩΝ.

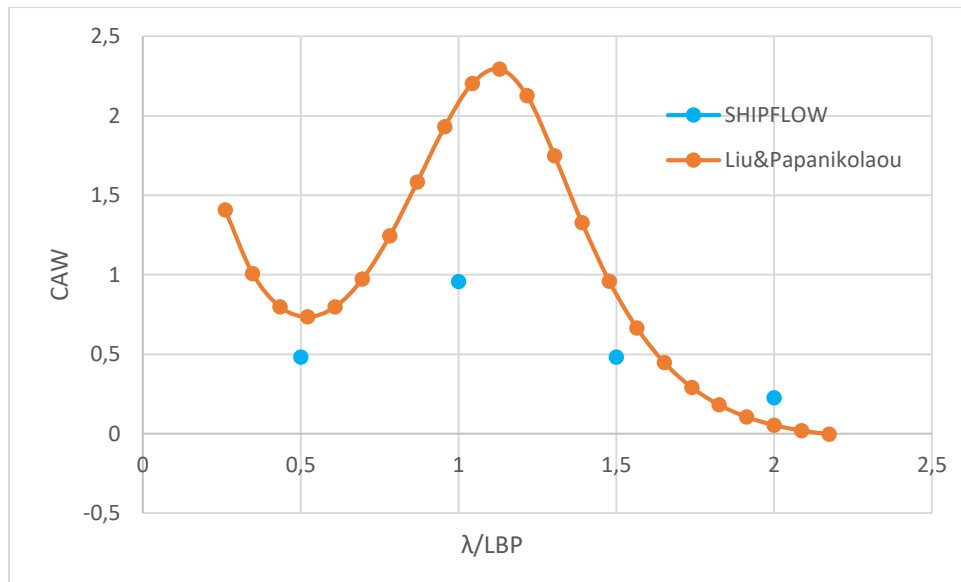


Σχήμα 29 Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών 30°



Σχήμα 30 Γραφική αναπαράσταση της προσομείωσης για γωνία πρόσπτωσης κυματισμού 30° και αδιάστατο μήκος κύματος 0.75.

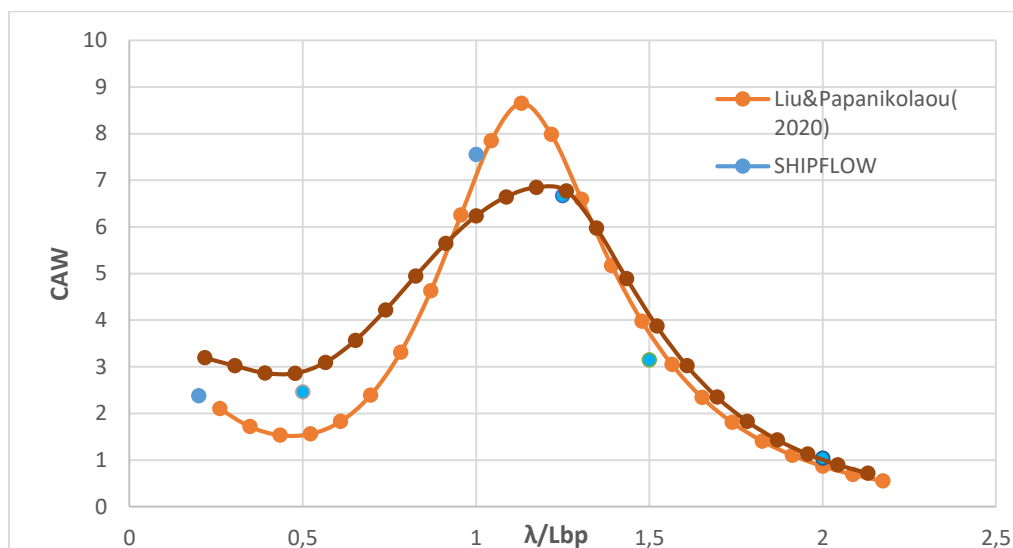
### 3.5.3.7 ΓΩΝΙΑ 0 ΜΟΙΡΩΝ (FOLLOWING WAVES).



Σχήμα 31 Αποτελέσματα του Shipflow για γωνία κυματισμών 0°



### 3.5.3.8 ΓΩΝΙΑ 180 Βύθισμα $T_M=9.2$ και έμπροσθη διαγωγή trim=0.5

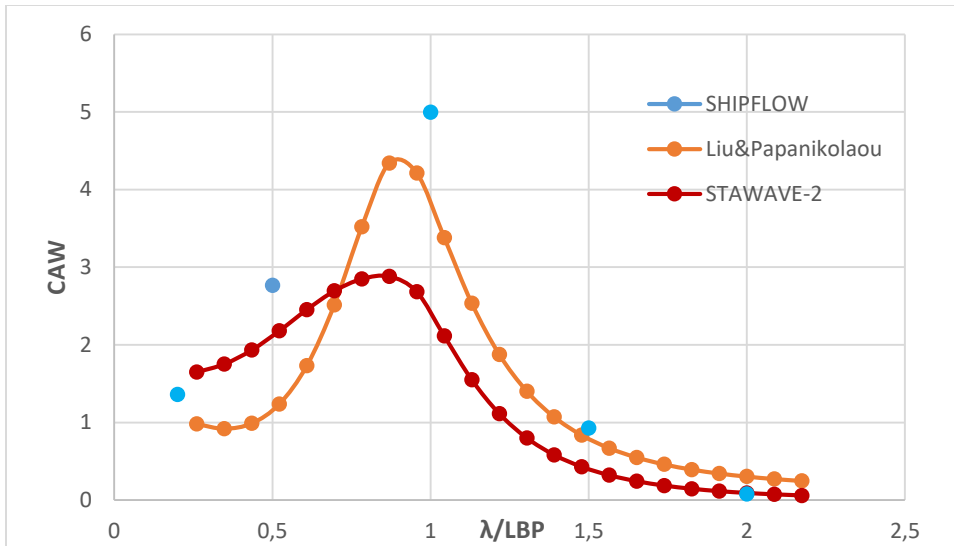


Σχήμα 32 Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς(180°) για βύθισμα  $T_M=9.2$  και trim=0.5.

### 3.6 Αποτελέσματα Shipflow για τις ταχύτητες και ύψη κύματος του Κεφάλαιο 4.

Στο Κεφάλαιο 4 μελετάται η ζήτηση ισχύος που απαιτείται από τον κινητήρα του πλοίου για ορισμένες καταστάσεις ταχύτητας πλοίου και ύψους κύματος. Η μελέτη έγινε για ταχύτητες πλοίου 8,12,16 kn και η για ύψος κύματος  $H_s=2,3.5$  και 5 m για κάθε ταχύτητα πλοίου. Τα μήκη κύματος που επιλέχθηκαν για την εξαγωγή τιμών είναι 0.2,0.5,1,1.5 και 2. Συνολικά ο αριθμός των υπολογισμών στο πρόγραμμα Shipflow ήταν 44. Εξαιτίας του πολύ μεγάλου αριθμού μετρήσεων δεν υπήρχε η δυνατότητα εκτέλεσης υπολογισμών για το πυκνότερο πλέγμα fine οπότε οι υπολογισμοί έγιναν για το αραιότερο πλέγμα (coarse). Αυτό δεν επηρεάζει την ανάλυση μας καθώς για τον υπολογισμό της μέσης πρόσθετης αντίστασης σε τυχαίους κυματισμούς  $R_{AWL}$  μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε εάν οι ημιεμπειρικές μέθοδοι Liu&Papanikolaou, STAWAVE-2 αποδίδουν σωστά την συνάρτηση μεταφοράς  $R_{wave}$  για την περίπτωση των αρμονικών κυματισμών.

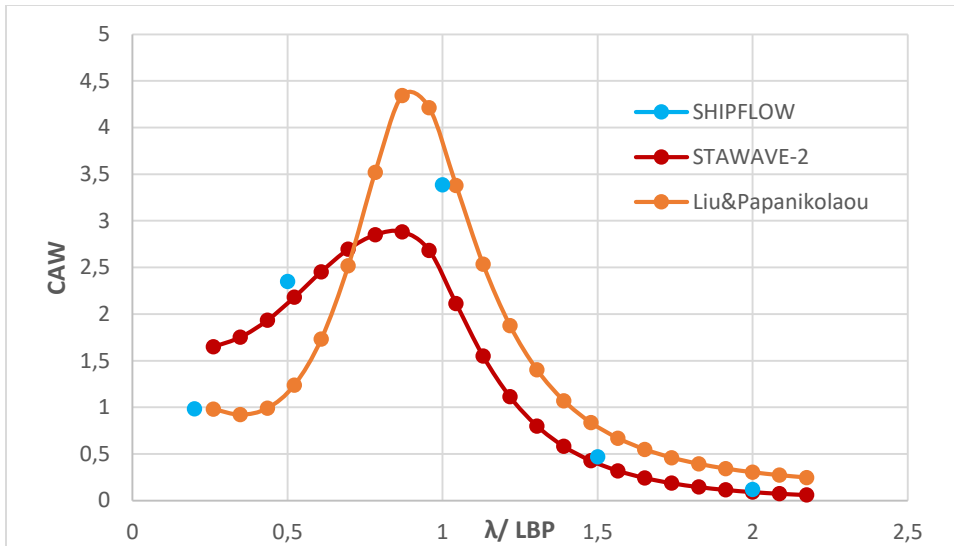
Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι τιμές



Σχήμα 33 Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς(180°) .Vs=8kn , Hs=2m

Vs=8 kn							
Hs=2 m							
		Liu_Pap		STAWAVE-2		SHIPFLOW	
λ/Lbp	Ro[KN]	RWAVE[KN]	ΔR%	RWAVE[KN]	ΔR%	RWAVE[KN]	ΔR%
0.2	184.802	48.87	26.45	72.46	39.21	61.6	33.33
0.5	184.802	52.4	28.36	95.87	51.88	125.48	67.9
1	184.802	173.47	93.87	109.49	59.25	226.58	122.6
1.5	184.802	35.79	19.37	18.02	9.75	42.15	22.81
2	184.802	13.77	7.45	4.13	2.24	3.557822	1.93

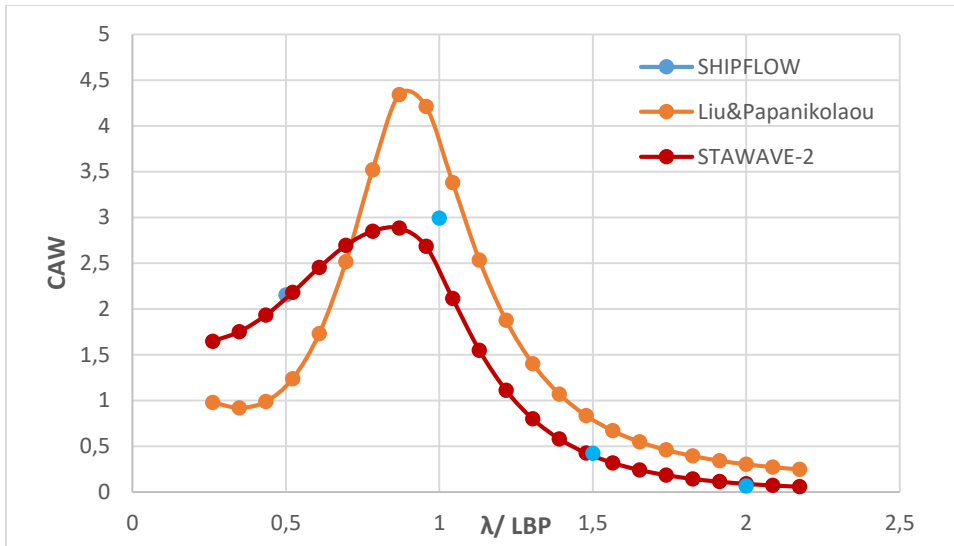
Πίνακας 2 Η αντίσταση σε ήρεμο νερό Ro, Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού Rwave, και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης ΔR για Vs=8kn, Hs=2m.



Σχήμα 34 Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς(180°) .Vs=8kn , Hs=3.5m

Vs=8 kn							
Hs=3.5m							
		Liu_Pap		STAWAVE-2		SHIPFLOW	
$\lambda/Lbp$	Ro[KN]	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$
<b>0.2</b>	184.802	149.67	80.99	221.91	120.01	136.66	73.95
<b>0.5</b>	184.802	160.49	86.84	293.6	158.87	326.2	176.51
<b>1</b>	184.802	531.25	287.47	335.32	181.45	470.14	254.40
<b>1.5</b>	184.802	109.59	59.3	55.18	29.86	65.29	35.33
<b>2</b>	184.802	42.16	22.81	12.65	6.85	16.71	9.045

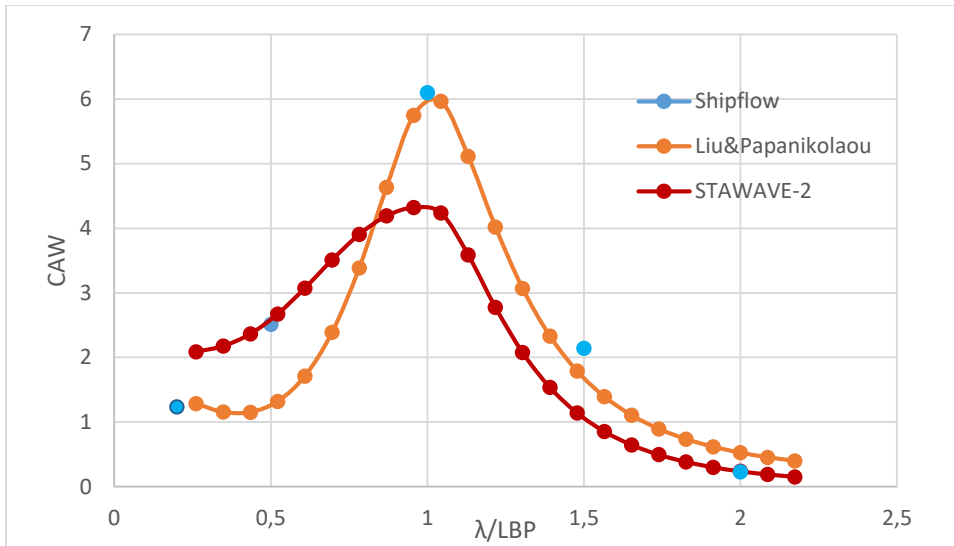
Πίνακας 3 Η αντίσταση σε ήρεμο νερό Ro, Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού Rwave, και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης  $\Delta R$  για Vs=8kn, Hs=3.5m.



Σχήμα 35 Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς(180°) .Vs=8kn , Hs=5m

Vs=8 kn							
Hs=5m							
		Liu_Pap		STAWAVE-2		SHIPFLOW	
$\lambda/Lbp$	Ro[KN]	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$
0.2	184.802	305.44	165.28	452.88	245.06	-	-
0.5	184.802	327.52	177.23	599.19	324.23	587.68	318
1	184.802	108.42	58.67	684.33	370.3	782.33	423.33
1.5	184.802	223.66	121.03	112.62	60.941	119.96	64.91
2	184.802	86.03	46.55	25.817	13.97	18.63	10.08

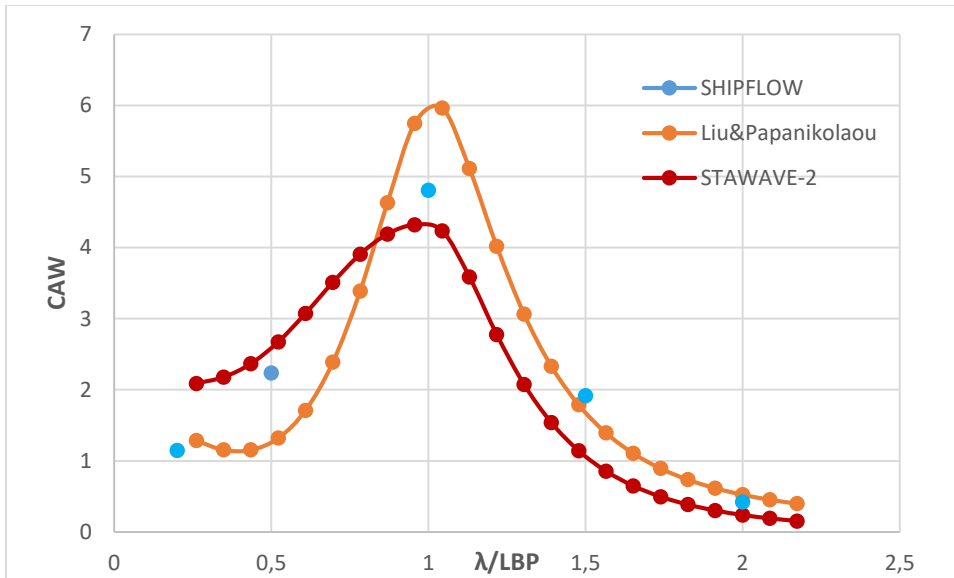
Πίνακας 4 Η αντίσταση σε ήρεμο νερό Ro, Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού Rwave, και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης  $\Delta R$  για Vs=8kn, Hs=5m.



Σχήμα 36 Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς(180°) .Vs=12kn , Hs=2m

Vs=12 kn							
Hs=2 m							
		Liu_Pap		STAWAVE-2		SHIPFLOW	
$\lambda/Lbp$	Ro[KN]	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$
0.2	409.514	65.52	16	92.77	22.65	56.03	13.68
0.5	409.514	57.1	13.94	117.2	28.62	113.95	27.83
1	409.514	271.1	66.2	195.81	47.82	276.33	67.49
1.5	409.514	76.04	18.57	48.08	11.74	96.98	23.68
2	409.514	23.79	5.81	10.77	2.63	10.4	2.54

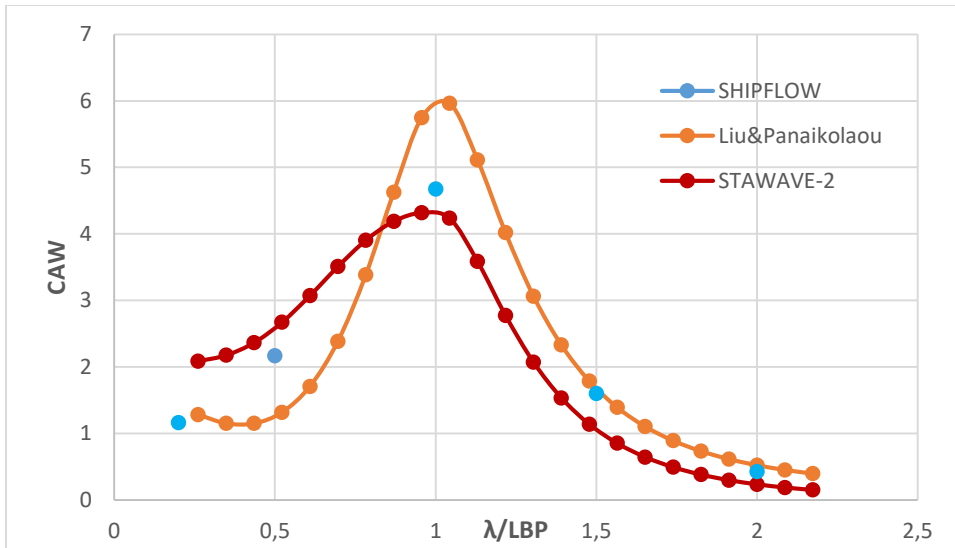
Πίνακας 5 Η αντίσταση σε ήρεμο νερό Ro, Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού Rwave, και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης  $\Delta R$  για Vs=12kn, Hs=2m.



Σχήμα 37 Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς(180°) .Vs=12 kn , Hs=3.5m

Vs=12 kn							
Hs=3.5m							
		Liu_Pap		STAWAVE-2		SHIPFLOW	
$\lambda/Lbp$	Ro[KN]	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$
0.2	409.514	200.67	49.	284	69.35	158.93	38.81
0.5	409.514	174.87	42.7	358.9	87.64	310.14	75.734
1	409.514	836.38	204.24	599.68	146.44	666.9	162.85
1.5	409.514	232.88	56.87	147.26	35.96	265.96	64.95
2	409.514	72.86	17.79	32.98	8.05	58.67	14.33

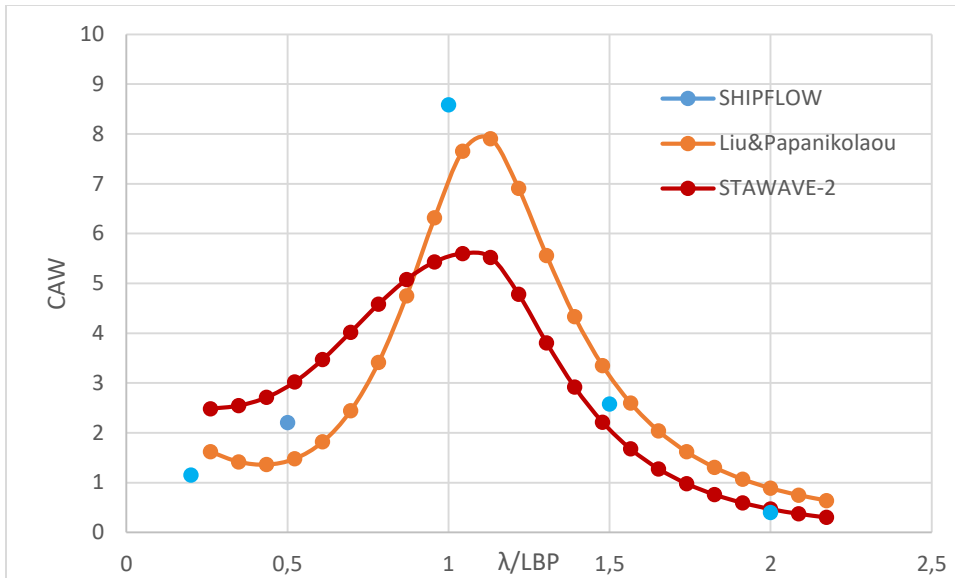
Πίνακας 6 Η αντίσταση σε ήρεμο νερό Ro, Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού Rwave, και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης  $\Delta R$  για Vs=12kn, Hs=3.5m..



Σχήμα 38 Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς(180°) .Vs=12 kn , Hs=5m

Vs=12 kn							
Hs=5m							
		Liu_Pap		STAWAVE-2		SHIPFLOW	
$\lambda/Lbp$	Ro[KN]	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE%	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$
0.2	409.514	409.53	100	579.6	141.53	330.31	67.11
0.5	409.514	356.88	87.15	732.51	178.87	581.72	142.05
1	409.514	1706.9	416.81	1223.6	298.79	1204.97	294.25
1.5	409.514	475.27	116.06	300.53	73.39	453.68	110.78
2	409.514	148.69	36.31	67.32	16.44	121.47	29.66

Πίνακας 7 Η αντίσταση σε ήρεμο νερό Ro, Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού Rwave, και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης  $\Delta R$  για Vs=12kn, Hs=5m.

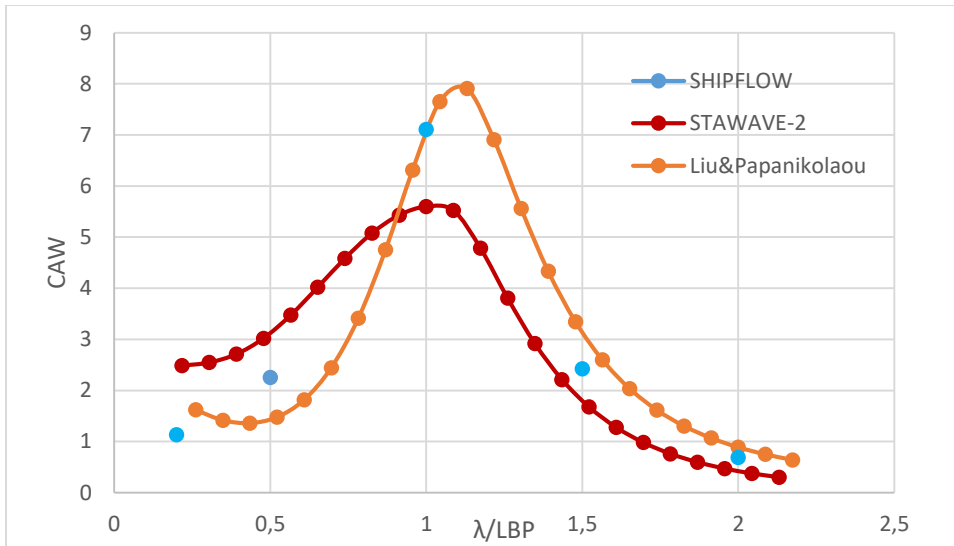


Σχήμα 39 Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς(180°) .Vs=16kn , Hs=2m

Vs=16 kn							
Hs=2 m							
		Liu_Pap		STAWAVE-2		SHIPFLOW	
$\lambda/Lbp$	Ro[KN]	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$
0.2	704.164	83.584	11.87	113.36	16.1	52.27	7.42
0.5	704.164	64.842	9.21	132.17	18.77	100.1	14.21
1	704.164	319.88	45.43	250.66	35.6	389.06	55.25
1.5	704.164	142.27	20.2	93.42	13.27	116.87	16.6
2	704.164	40.275	5.72	21.28	3	18.17	2.58

Πίνακας 8 Η αντίσταση σε ήρεμο νερό Ro, Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού Rwave, και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης  $\Delta R$  για Vs=16kn, Hs=2m.

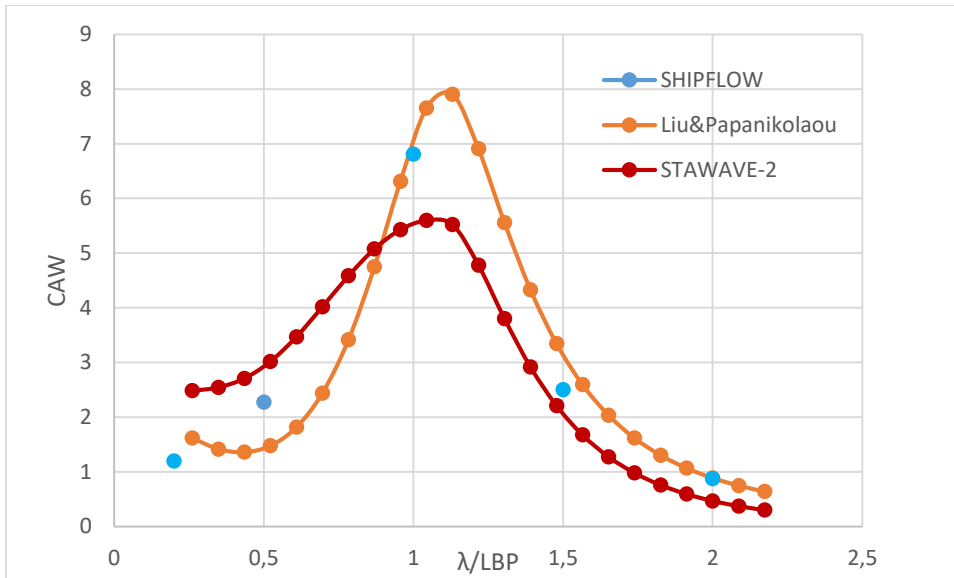




Σχήμα 40 Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς(180°) .Vs=16kn , Hs=3.5m

Vs=16 kn							
Hs=3.5m							
		Liu_Pap		STAWAVE-2		SHIPFLOW	
$\lambda/Lbp$	Ro[KN]	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$
<b>0.2</b>	704.164	255.98	36.35	341.04	48.43	157.3	22.34
<b>0.5</b>	704.164	198.58	28.2	404.77	57.48	313.23	44.48
<b>1</b>	704.164	979.62	139.12	767.65	109.02	986.55	140.10
<b>1.5</b>	704.164	435.71	61.88	286.11	40.63	336.07	47.72
<b>2</b>	704.164	123.34	17.52	65.176	9.26	95.81	13.61

Πίνακας 9 Η αντίσταση σε ήρεμο νερό Ro,H πρόσετη αντίσταση κυματισμού Rwave, και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης  $\Delta R$  για Vs=16 kn, Hs=3.5m.



Σχήμα 41 Αποτελέσματα του Shipflow για μετωπικούς κυματισμούς(180°) .Vs=16kn , Hs=5m.

Vs=16 kn							
Hs=5m							
		Liu_Pap		STAWAVE-2		SHIPFLOW	
$\lambda/Lbp$	Ro[KN]	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$	RWAVE[KN]	$\Delta R\%$
0.2	704.164	522.4	74.19	695.19	98.73	295.93	48.25
0.5	704.164	405.27	57.55	826.06	117.31	644.26	91.49
1	704.164	1999.2	283.91	1566.6	222.48	1929.23	273.97
1.5	704.164	889.2	126.28	583.89	82.92	710.16	100.85
2	704.164	251.72	35.75	133.01	18.89	249.11	35.38

Πίνακας 10 Η αντίσταση σε ήρεμο νερό Ro, Η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού Rwave, και η προσαύξηση της συνολικής αντίστασης  $\Delta R$  για Vs=8kn, Hs=5m.

### **3.7 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.**

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του προγράμματος Shipflow με αυτά των ημιεμπειρικών μεθόδων εξάγονται ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Στην περίπτωση των μετωπικών κυματισμών παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του προγράμματος συγκλίνουν με αυτά των ημιεμπειρικών μεθόδων. Για την περίπτωση των κυματισμών μικρού μήκους  $\lambda/L_{BP}$  παρατηρείται ότι το πρόγραμμα συνεχίζει να δίνει μικρότερες τιμές για την πρόσθετη αντίσταση σε αντίθεση με την σχέση Liu&Paranikolaou η οποία δίνει όλο και μεγαλύτερες τιμές για  $\lambda/L_{BP} < 0.5$  ενώ η STAWAVE-2 για πολύ μικρά μήκη κύματος τείνει σε μια σταθερή τιμή η οποία όμως είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις τιμές του Shipflow. Ωστόσο για την ακριβή τιμή θα πρέπει να γίνει επαλήθευση των αποτελεσμάτων με την διεξαγωγή πειραμάτων σε δεξαμενές δεδομένου ότι το Shipflow δεν αποδίδει μαθηματικά το φαινόμενο σπασίματος της κορυφής του κύματος το οποίο λαμβάνει χώρα σε κυματισμούς μικρού μήκους. Για  $\lambda/L_{BP} = 0.5$  η STAWAVE-2 αποδίδει πιο αξιόπιστες τιμές από την Liu&Paranikolaou. Για κυματισμούς ίσου μήκους με το μήκος του πλοίου τα αποτελέσματα του Shipflow δίνουν τιμή πρόσθετης αντίστασης μεγαλύτερη από αυτές των 2 ημιεμπειρικών μεθόδων. Για κυματισμούς με  $(1 < \lambda/L_{BP} < 1.25)$  οι τιμές του προγράμματος είναι μεγαλύτερες από αυτές της STAWAVE-2 και μικρότερες από αυτές της Liu&Paranikolaou. Όπως θα διαπιστωθεί παρακάτω και από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του Shipflow για τους μετωπικούς κυματισμούς του Κεφαλαίου 4, για το συγκεκριμένο εύρος μήκους κύματος η Liu&Paranikolaou δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα από την STAWAVE-2. Επίσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προγράμματος και οι δύο μέθοδοι προσδιορίζουν σωστά την θέση του μεγίστου της συνάρτησης μεταφοράς της πρόσθετης αντίστασης. Για μεγάλα μήκη κύματος  $\lambda/L_{BP} > 1.5$  τα αποτελέσματα του Shipflow συγκλίνουν απόλυτα με αυτά των ημιεμπειρικών. Καταλήγουμε έτσι στο συμπέρασμα πώς για τον προσδιορισμό της πρόσθετης αντίστασης για κυματισμούς μικρού και μεσαίου μήκους κύματος απαιτείται η χρήση παραπάνω από μίας ημιεμπειρικής μεθόδου.

Για τους κυματισμούς υπό γωνία 150 και 120 μοιρών παρατηρείται επίσης σύγκλιση αποτελεσμάτων. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται για πλάγιους κυματισμούς ( $\theta = 90^\circ, 60^\circ, 30^\circ$ ) αλλά και για την περίπτωση των Following waves οι τιμές που αποδίδονται από το πρόγραμμα δεν συγκλίνουν ούτε όσον αφορά την τιμή της πρόσθετης αντίστασης αλλά και όσον αφορά τον προσδιορισμό της θέσης του μέγιστης τιμής της πρόσθετης αντίστασης. Ωστόσο και σε αυτές τις περιπτώσεις οι αποκλίσεις παρατηρούνται για κυματισμούς μικρούς μήκους και όχι για τους κυματισμούς μεγάλου μήκους όπου τα αποτελέσματα συγκλίνουν. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι για τις περιπτώσεις των κυματισμών (150,120,90,60,30) μοιρών έγινε χρήση του πλέγματος με την αραιότερη πυκνότητα coarse γεγονός το οποίο επιδρά αρνητικά στην ακρίβεια των υπολογισμών. Επίσης η ασυμμετρία της ροής του ρευστού γύρω από την γάστρα για αυτές τις γωνίες ευνοεί την ύπαρξη των μη συνεκτικών φαινομένων τα οποία

με βάση την μαθηματική θεωρία της δυναμικής ροής δεν λαμβάνονται υπόψη και συνεπώς ο motions<sup>7</sup> ως επιλυτής προβλημάτων δυναμικής ροής είναι δυνατόν να μην μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις μεγάλης ασυμμετρίας της ροής και για πολύ μικρά μήκη κύματος να αποδώσει με ακρίβεια την φύση του φαινομένου. Επίσης το γεγονός ότι τα αποτελέσματα για τις γωνίες 30,60 παρουσιάζουν αποκλίσεις σε σχέση με την σχέση Liu & Papanikolaou και όχι αυτά των 150 και 120 μοιρών οφείλεται στο γεγονός ότι για αυτές τις γωνίες οι συντελεστές  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  λαμβάνονται μέσω παρεμβολής μεταξύ των αντίστοιχων για τις περιπτώσεις beam (90°) following seas (0°) και όχι μέσω ακριβούς μαθηματικής σχέσης γεγονός το οποίο επιδρά αρνητικά στην ακρίβεια της μαθηματικής σχέσης. Επιπλέον για την περίπτωση των 0,30 και 60 μοιρών σημαντικός παράγοντας αποτελεί και η σχέση μεταξύ ταχύτητας πλοίου και κυματισμού  $V_{rel} = V_s - V_{wave}$ , όπως και η ιδιαίτερη γεωμετρία του πρυμναίου τμήματος (transom stern) το οποίο αυξάνει την επίδραση των μη συνεκτικών φαινομένων.

Όσον αφορά τις καταστάσεις του Κεφαλαίου 4 παρατηρείται ότι Liu Papanikolaou αποδίδει πιο σωστά την πρόσθετη αντίσταση σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Shipflow από την STAWAVE-2 για μήκος κύματος ίσο με 0.2. Για  $\lambda/L_{BP} = 0.5$  η STAWAVE-2 πάλι υπολογίζει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Για μήκος κύματος ίσο με το μήκος του πλοίου η Liu Papanikolaou υπολογίζει καλύτερα την πρόσθετη αντίσταση σε σχέση με την STAWAVE-2. Για μεγάλα μήκη κύματος οι ημιεμπειρικές συγκλίνουν πλήρως με τα αποτελέσματα του Shipflow. Συμπεραίνουμε ότι η χρήση των ημιεμπειρικών μεθόδων για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης αποτελεί μια ασφαλής επιλογή καθώς αποδίδουν με ακρίβεια την πρόσθετη αντίσταση και μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις υπερεκτιμούν την πρόσθετη αντίσταση. Αυτό σημαίνει ότι για την μελέτη της επίδρασης της πρόσθετης αντίστασης στην ζήτηση ισχύος στροφών μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ημιεμπειρικές μέθοδοι.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους πίνακες προκύπτει η σημασία της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού. Για σημαντικό ύψος κύματος 5 m παρατηρείται αύξηση της συνολικής αντίστασης μέχρι 3 έως 4 φορές.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΤΗΝ ΖΗΤΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ.**

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύθηκε το φαινόμενο της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού μέσα από την χρήση των ημιεμπειρικών σχέσεων και με την χρήση του Shipflow. Ο κύριος λόγος για τον οποίο μελετάται η αντίσταση εξαιτίας του κυματισμού είναι η επίδραση της στην ζήτηση ισχύος από την μηχανή του πλοίου. Η απαίτηση για μείωση της ισχύος των ναυτικών μηχανών για την επίτευξη αποδεκτών τιμών για τον δείκτη EEDI εγείρει ανησυχίες για την ικανοποίηση των κριτηρίων του IMO που αφορούν την Ελάχιστη Ισχύς Πρόωσης. (Minimum Propulsion Power ). Στο κεφάλαιο 4 θα αναλυθεί η επίδραση της ζήτησης ισχύος εξαιτίας της αντίστασης κυματισμών και της δυνατότητας του κινητήρα να παρέχει την απαιτούμενη ισχύ τόσο για την ταχύτητα για την οποία ορίζουν τα κριτήρια του IMO για την MPP όσο και για υψηλότερες ταχύτητες.

### **4.1 Επιλογή Κύριας Μηχανής Πλοίου.**

Το KCS δεν είναι ένα υπαρκτό πλοίο και δεν έχει οριστεί κάποιος συγκεκριμένο ναυτικό κινητήρα από το Κορεατικό Ινστιτούτο Θαλάσσιας και Ναυτικής Τεχνολογίας. Έτσι καλούμαστε να επιλέξουμε ναυτικό κινητήρα για το KCS. Για την επιλογή του κινητήρα πρέπει να προηγηθεί ο υπολογισμός της αντίστασης ρυμουλκήσεως του πλοίου σε ήρεμο νερό. Οι κύριες συνιστώσες της αντίστασης του πλοίου είναι οι αντίσταση σε ήρεμο νερό και η αεροδυναμική αντίσταση. Για την επιλογή του MCR του κινητήρα έγινε με βάση την κατάσταση ρυπασμένης γάστρας εξαιτίας θαλάσσιων μικροοργανισμών όπου οδηγούν σε προσαύξηση της αντίστασης σε ήρεμο νερό κατά 20%

#### **4.1.1Υπολογισμός Αντίστασης Πλοίου.**

##### **4.1.1.1 Αντίσταση σε ήρεμο νερό**

Για τον υπολογισμό της αντίστασης του πλοίου σε ήρεμο νερό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Shipflow.

<b>Rcalm water-CLEAN HULL</b>	
<b>Vs(Kn)</b>	<b>Rt(KN)</b>
<b>19.26</b>	<b>1001.99</b>
<b>20.26</b>	<b>1119.44</b>
<b>21.26</b>	<b>1266.86</b>
<b>22.26</b>	<b>1396.55</b>
<b>23.26</b>	<b>1495.51</b>
<b>24.26</b>	<b>1756.92</b>

*Πίνακας 11 Η Αντίσταση πλοίου σε ήρεμο νερό για καθαρή γάστρα.*

Για κατάσταση ρυπασμένης γάστρας υποθέτουμε προσαύξηση κατά 20% στην αντίσταση για ήρεμο νερό.

<b>Rcalm Water -FOULED HULL</b>	
<b>Vs(Kn)</b>	<b>Rt(KN)</b>
<b>19.26</b>	<b>1202.39</b>
<b>20.26</b>	<b>1343.33</b>
<b>21.26</b>	<b>1520.23</b>
<b>22.26</b>	<b>1675.87</b>
<b>23.26</b>	<b>1794.61</b>
<b>24.26</b>	<b>2108.3</b>

Πίνακας 12 Αντίσταση πλοίου σε ήρεμο νερό για ρυπασμένη γάστρα.

#### **4.1.1.2 Υπολογισμός αντίστασης εξαιτίας ατμοσφαιρικού αέρα.**

Επιπλέον για την περίπτωση των containerships λόγω της μεγάλης επιφάνειας εξάλων θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η αντίσταση εξαιτίας της αντίστασης του ατμοσφαιρικού αέρα. Η αεροδυναμική αντίσταση δίνεται από τον τύπο όπου ο αδιάστατος συντελεστής  $C_{air}$  μπορεί να εξαχθεί από πειράματα, εάν δεν υπάρχουν δεδομένα από πειράματα ο συντελεστής μπορεί να τεθεί  $C_{air}=1$ . Η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα δίνεται ίση με  $\rho_{air}=1.293 \text{ kg/m}^3$ . Ο όρος  $A_{FW}$  εκφράζει την μετωπική επιφάνεια του πλοίου η οποία είναι ίση με  $A_{FW} = 900 \text{ m}^2$ .

$$R_{AA} = \frac{1}{2} * \rho_{air} * C_{air} * A_{FW} * Vs^2 \quad (4.1)$$

<b>AERODYNAMIC RESISTANCE</b>	
<b>Vs(Kn)</b>	<b>R<sub>AA</sub>(KN)</b>
<b>19.26</b>	<b>53</b>
<b>20.26</b>	<b>58.66</b>
<b>21.26</b>	<b>64.59</b>
<b>22.26</b>	<b>70.81</b>
<b>23.26</b>	<b>77.32</b>
<b>24.26</b>	<b>84.11</b>

Πίνακας 13 Αεροδυναμική Αντίσταση πλοίου.

Συνολικά

Vs(kn)	R <sub>CW-clean hull</sub> ( KN)	R <sub>aerodynamic</sub> (KN)	R <sub>total</sub> (KN)
19.26	1001.99	53	1055.01
20.26	1119.44	58.66	1178.1
21.26	1266.86	64.59	1331.46
22.26	1396.55	70.81	1467.37
23.26	1495.51	77.32	1572.83
24.26	1756.92	84.11	1841.03
Vs(kn)	R <sub>CW-fouled hull</sub> ( KN)	R <sub>aerodynamic</sub> (KN)	R <sub>total</sub> (KN)
19.26	1202.39	53	1255.4
20.26	1343.33	58.66	1401.99
21.26	1520.23	64.59	1584.83
22.26	1675.87	70.81	1746.68
23.26	1794.61	77.32	1871.93
24.26	2108.3	84.11	2192.41

Πίνακας 14 Συνολική αντίσταση πλοίου σε ήρεμο νερό για μολυσμένη και καθαρή γάστρα.

#### 4.1.2 Συντελεστές w,t,n<sub>R</sub>.

Οι συντελεστές w,t,n<sub>R</sub> εφόσον δεν τους έχουμε αναλυτικά στην διάθεση μας απο πειράματα σε μοντέλο θα τους υπολογίσουμε με την χρήση εμπειρικών σχέσεων της σχετικής βιβλιογραφίας(Πολίτης 2018).

##### 4.1.2.1 Συντελεστής ποσοστού ομόρου w. (Πολίτης,2018).

Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση Kruger.

$$W=0.75 \cdot C_b - 0.24 = 0.24788 \quad (4.2)$$

Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση Hecksher

$$W=0.7 \cdot C_p - 0.18 = 0.2827 \quad (4.3)$$

Σύμφωνα με τη σχέση Troost.

$$W=0.25 + 2.5 \cdot (C_b - 0.6)^2 = 0.256375625 \quad (4.4)$$

Η τελική τιμή προκύπτει από τον μέσο όρο των παραπάνω μεθόδων.

$$W=0.26232$$

##### 4.1.2.2 Συντελεστής μείωσης ώσης t. (Πολίτης,2018).

$$S.S.P.A: \quad t = w * \left( 1.57 - C_b * \frac{2.3 - 1.5 \cdot C_{wl}}{C_{wl}} \right) = 0.1948 \quad (4.5)$$

$$Hecksher: \quad t = 0.25 \cdot C_p - 0.18 = 0.1505 \quad (4.6)$$

$$Dackward: \quad t = 0.15 \cdot C_b - 0.18 = 0.1753 \quad (4.7)$$

Η τελική τιμή προκύπτει απο τον μέσο όρο των παραπάνω τιμών  $t=0.1735$

#### **4.1.2.3 Βαθμός σχετικής περιστροφής $n_R$ (Πολίτης,2018).**

Holtrop-Mennen :

$$n_R = 0.9922 - 0.0598 * \frac{AE}{Ao} + 0.07424 * \left[ C_p - 0.0225 * \left( LCB - \frac{L}{2} \right) \right] = 1.0423 \quad (4.8)$$

#### **4.1.3 Ο βαθμός απόδοσης του αξονικού συστήματος $n_s$ (Πολίτης,2018).**

Ο βαθμός απόδοσης του αξονικού συστήματος είναι ίσος με  $n_s=0.98$ .

#### **4.1.4 Επιλογή Έλικας**

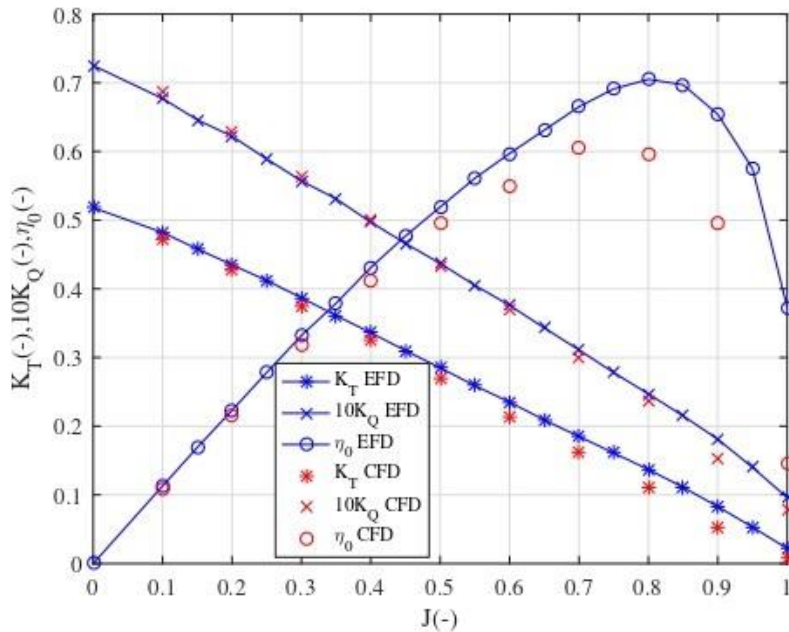
Τα στοιχεία της έλικας του πλοίου ελήφθησαν από το site [http://www.simman2008.dk/KCS/kcs\\_geometry.htm](http://www.simman2008.dk/KCS/kcs_geometry.htm). Η έλικα του πλοίου έχει την ονομασία KP505. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της έλικας παρατείνονται στον παρακάτω πίνακα.

Z	5
D	7.9
Ae/Ao	0.8
P/D(0.7R)	0.95

Πίνακας 15 Γεωμετρικά στοιχεία έλικας KP505.

Οι συντελεστές ώσης  $K_t$ ,ροπής 10Kq και απόδοσης  $\eta_o$  για την KP505 για ελεύθερη ροή έχουν υπολογιστεί με μεθόδους CFD και EFD την εργασία (S.Lu, L.Liu(2020)).





Σχήμα 42 Διάγραμμα Ελεύθερης ροής έλικας KP505. (S.Lu, L.Liu(2020) ).

Με την βοήθεια του προγράμματος **Propulsion** (Λουκάκης, Μαλιάτσος 2016) και συγκεκριμένα με την χρήση του υποπρογράμματος **Propref** (Παράρτημα Δ,σελ 169) με το οποίο μπορεί ο χρήστης να επιλύει προβλήματα πρόωσης για έλικα δεδομένης διαμέτρου  $D$  και βήματος  $P/D$  και γνωρίζοντας τις τιμές των συντελεστών  $\eta$ ,  $K_t$ ,  $10K_q$  και της αντίστασης ρυμούλκησης  $R$ , υπολογίσαμε τις στροφές  $N$ [RPM] και την αποδιδόμενη ισχύ στον άξονα της μηχανής  $SHP$ [KW] για την ταχύτητα 23,26 kn, για την κατάσταση μολυσμένης γάστρας.

$N=101.19$  RPM.

$SHP=29299.77$  KW.

Το εν λόγω ζεύγος  $P_{mec}, \eta$  δεν μπορούσε να καλυφθεί από κάποιον σύγχρονο κινητήρα. Συνεπώς λήφθηκε η απόφαση να γίνει μελέτη επιλογής κινητήρα αλλά για μια έλικα της σειράς Wageningen ομοίων διαστάσεων με την KP505 αλλά μεγαλύτερου βήματος, για την οποία θα οι στροφές της μηχανής θα είναι μικρότερες.

Η έλικα Wageningen έχει διαστάσεις

Z	5
D	7.9
Ae/Ao	0.8
P/D(0.7R)	1.4

Πίνακας 16 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά έλικας Wageningen.

Εδώ να σημειωθεί ότι σκοπός της εργασίας μας δεν είναι η βέλτιστη επιλογή έλικας αλλά ο έλεγχος το αν η εγκατεστημένη ισχύς του πλοίου είναι ικανή να καλύψει της αναγκες του πλοίου σε αντίξοες καιρικές συνθήκες για δεδομένη σχεδίαση.

#### **4.1.5 MAN- Κινητήρας 6 G-90ME-C10.5**

Με τη χρήση του προγράμματος **Propulsion** και συγκεκριμένα του υποπρογράμματος **Propdes** το οποίο χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την επίλυση προβλημάτων πρόωσης που αφορούν τις έλικες της σειράς Wageningen υπολογίστηκαν οι τιμές των στροφών και της ισχύος της κύριας μύχανης στον άξονα για την κατάσταση ρυπασμένης γάστρας(+20%).

P/D=1.4					
CLEAN HULL			FOULED HULL(+20%)		
Vs(Kn)	N(RPM)	SHP(KW)	Vs(Kn)	N(RPM)	SHP(KW)
19.26	62.185	14988.8	19.26	65.409	18568.8
20.26	65.21	17509.8	20.26	68.034	21718
21.26	68.94	20890	21.26	72.593	25925.1
22.26	72.29	24136.2	22.26	76.132	29997.4
23.26	75.14	26914.3	23.26	79.1	33394.5
24.26	80.052	333425	24.26	84.396	41565.7

Πίνακας 17 Power speed cleand and fouled hull.

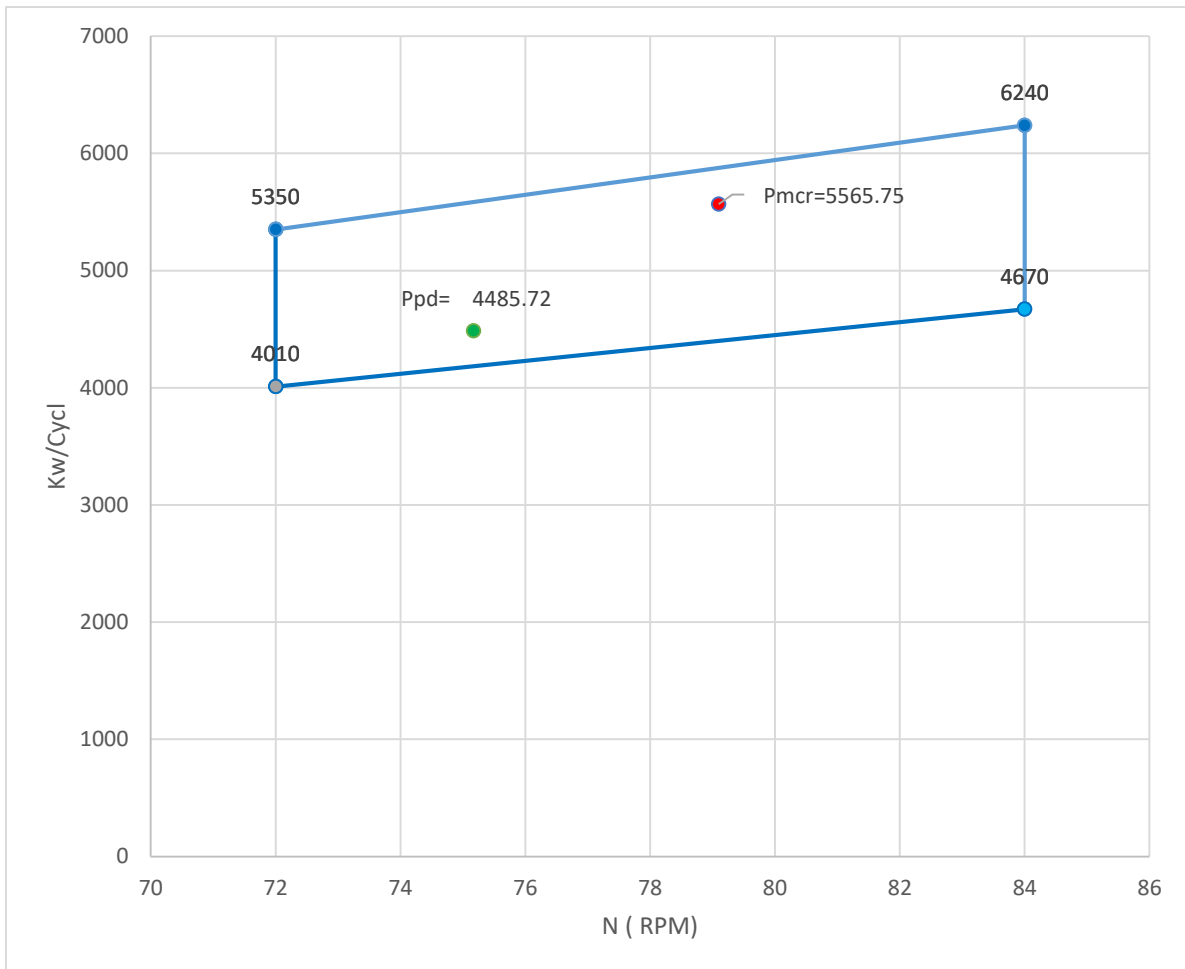
Η επιλογή κινητήρα θα γίνει με βάση την απαιτούμενη ισχύ για την κατάσταση ρυπασμένης γάστρας και προσαύξηση αντίστασης κατά 20% για την ταχύτητα των 23.26kn. Το σημείο σχεδίασης της έλικας Propeller Design point υπολογίζεται για την κατάσταση καθαρής γάστρας για την ταχύτητα 23.26 kn.

$P_{MCR}=33394.5 \text{ KW}$ ,  $N_{MCR}=79.1 \text{ RPM}$ .

$P_{PD}=26914.3 \text{ KW}$ ,  $N_{PD}=75.14 \text{ RPM}$ .

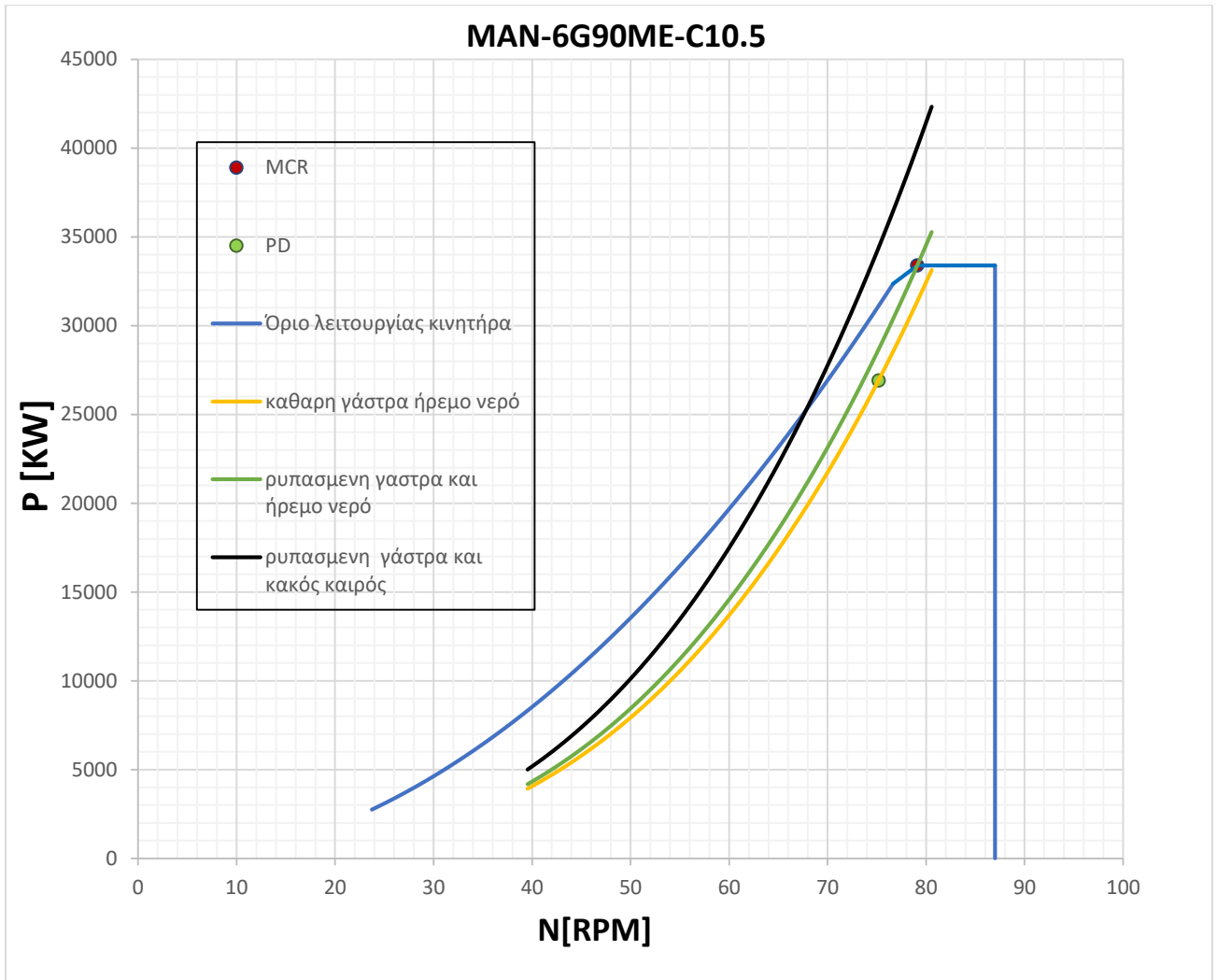
Έτσι έγινε η επιλογή του 6 κύλινδρου κινητήρα της κατασκευάστριας εταιρείας MAN ,6G-90ME-C10.5. Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα του πεδίου λειτουργίας του κινητήρα και τα σημεία MCR και PD μέσα σε αυτό. Παρατηρείται ότι η σχεδίαση είναι καλή καθώς το σημείο MCR βρίσκεται στο δεξιό μέρος του διαγράμματος καθώς

αποτελεί βασική αρχή μιας καλής σχεδίασης η τοποθέτηση του σημείου MCR στο δεξιό και πάνω τμήμα του διαγράμματος του πεδίου λειτουργίας.



Σχήμα 43 Πεδίο λειτουργίας μηχανής και σημεία επιλογής πρόωσης.

Χρησιμοποιώντας το project guide του κινητήρα κατασκευάσαμε το διάγραμμα φόρτισης του κινητήρα το οποίο δίνεται από το site της MAN και από το πρόγραμμα CEAS. <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations>



Σχήμα 44. Διάγραμμα Φόρτισης Κινητήρα

Μαζί με το διάγραμμα φόρτισης κινητήρα παρουσιάζονται και οι καμπύλες ζήτησης ισχύος για καθαρή γάστρα και ήρεμο νερό, ρυπασμένη γάστρα και ήρεμο νερό και η καμπύλη ρυπασμένης γάστρας και κακών καιρικών συνθηκών η οποία σχεδιάζεται για ποσοστό προσαύξησης ισχύος 20%. Οι καμπύλες ζήτησης ισχύος χάραχθηκαν σύμφωνα με τον Νόμο της έλικας  $P=C \cdot N^3$  αλλά και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το πρόγραμμα Propdes και παρουσιάζονται στον Πίνακα 17.

- Καμπύλη καθαρής γάστρας και ήρεμου νερού:  $c_1 = \frac{P_{PD}}{N_{PD}^3}$
- Καμπύλη ρυπασμένης γάστρας και ήρεμου νερού:  $c_2 = \frac{P_{MCR}}{N_{MCR}^3}$
- Καμπύλη ρυπασμένης γάστρας και κακές καιρικές συνθήκες:  $c_3 = \frac{1.2 \cdot P_{MCR}}{N_{MCR}^3}$

## **4.2 Έλεγχος Ελάχιστης Εγκατεστημένης Ισχύος M.P.P.**

### **4.2.1 Εισαγωγή στην M.P.P.**

Η εισαγωγή του δείκτη EEDI στον σχεδιασμό των πλοίων κατέστησε απαραίτητη την θεσμοθέτηση κανονισμών και οδηγιών που να καθορίζουν την ελάχιστη τιμή ισχύος πρόωσης που πρέπει να αποδίδει ο κινητήρας ώστε να μπορεί το πλοίο να διατηρεί την δυνατότητα πραγματοποίησης ελιγμών σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Οι οδηγίες του IMO MEPC 232(65), για τον έλεγχο της ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος πρόωσης (M.P.P) θεσπίστηκαν το 2013 και εφαρμόζονται μέχρι σήμερα. Ο έλεγχος της ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος πρόωσης εφαρμόζεται σε 2 επίπεδα.

1.Επίπεδο ελέγχου 1: Χρήση ελάχιστων τιμών ισχύος ( Minimum Power Lines Assesment).

2.Επίπεδο ελέγχου 2: Απλοποιημένη υπολογιστική διαδικασία(Simplified Assesment).

Για να θεωρηθεί ένα πλοίο ότι διαθέτει επαρκή ισχύς πρόωσης αρκεί να ικανοποιεί ένα από τα 2 επίπεδα ελέγχου.

Οι αντίξοες καιρικές συνθήκες για τις οποίες πρέπει να γίνει η ανάλυση ορίζονται σύμφωνα με τους κανονισμούς στον πίνακα 18. Οι αντίξοες καιρικές συνθήκες αφορούν το επίπεδο ελέγχου 2.

Ship Length (m)	Significant wave height $h_s$ (m)	Peak wave Period $T_p$ (s)	Mean wind speed $V_w$ (m/s)
Less than 200	4.0	7.0 to 15.0	15.7
200 < $L_{pp}$ < 250	Parameters linearly interpolated depending on ships length		
More than $L_{pp}$ =250	5.5	7.0 to 15.0	19.0

Πίνακας 18 Τιμές  $H_s, V_w, T_p$  για δυσμενείς καιρικές συνθήκες σύμφωνα με την οδηγία IMO ,MEPC232(65).

### **4.2.2Επίπεδο Ελεγχου 1( Minimum Power lines Assesment)**

Ο έλεγχος αυτός αφορά την ελάχιστη απαιτούμενη Μέγιστη συνεχόμενη ισχύ MCR που μπορεί να δώσει η μηχανή του πλοίου και η οποία εξαρτάται από το DWT του πλοίου.

$$MCR_{min} = a * DWT + b \quad (4.9)$$

DWT: Ωφέλιμο βάρος του πλοίου σε μετρικούς τόνους.

a,b:Συντελεστές οι οποίο καθορίζονται με βάση τον τύπο του πλοίου από τον πίνακα18.

SHIP TYPE	a	b
Bulk Carriers	0.0687	2924.4
Tankers	0.0689	3253.0
Combination carriers	See tankers above	

Πίνακας 19 Συντελεστές a,b για τον προσδιορισμό του ελάχιστου απαιτούμενου MCR σύμφωνα με το Επίπεδο ελέγχου 1 και την οδηγία (IMO.2013) .

Το πλοίο KCS είναι πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και έτσι δεν θα εφαρμοστεί το επίπεδο ελέγχου 1.

#### **4.2.3 Επίπεδο Ελέγχου 2 (Simplified Assesment):**

Με βάση το επίπεδο ελέγχου 2 η αλλιώς τη διαδικασία απλοποιημένης μεθόδου απαιτείται να υπολογιστεί αν η μηχανολογική εγκατάσταση του πλοίου δύναται να αποδώσει την απαιτούμενη ισχύ στον άξονα της έλικας για συγκεκριμένη πρόσω ταχύτητα σε αντίξοες καιρικές συνθήκες και συνθήκες ρύπανσης γάστρας. Επίσης ένας παράγοντας που επηρεάζει τον καθορισμό της ελάχιστης τιμής της ταχύτητας πλεύσης είναι η επιφάνεια του πηδαλίου και η πρόραθεν και πλευρική επιφάνεια του πλοίου. Το 2 επίπεδο ελέγχου δηλαδή χωρίζεται σε 2 σκέλη.

1. Προσδιορισμός της ελάχιστης απαιτούμενης ταχύτητας πλεύσης για την οποία το πλοίο διατηρεί την δυνατότητα να πραγματοποιεί ελιγμούς σε μετωπικούς κυματισμούς για ταχύτητα ανέμου και σημαντικό ύψος κύματος όπως αυτά ορίζονται από τον πίνακα 17.
2. Έλεγχος εάν ο εγκατεστημένος κινητήρας του πλοίου μπορεί να παρέχει την ισχύ που απαιτείται ώστε να πλεύσει το πλοίο στην συγκεκριμένη ταχύτητα .

##### **4.2.3.1 Προσδιορισμός απαιτούμενης πρόσω ταχύτητας.**

Σύμφωνα με τις οδηγίες του IMO 232(65), η απαιτούμενη πρόσω ταχύτητα υπό την επίδραση πρωραίων κυματισμών και ανέμου ορίζεται ως η μέγιστη μεταξύ των:

- 1.Ελάχιστη τιμή της ταχύτητας πλεύσης (Navigational speed),  $V_{nav}$ .
- 2.Ελάχιστη τιμή ταχύτητας για την διατήρηση πορείας,  $V_{ck}$ .

Η ελάχιστη ταχύτητα πλεύσης ορίζεται στους 4 κόμβους  $V_{nav}=4$  knots. Είναι η ταχύτητα για την οποία διασφαλίζεται η ασφαλής έξοδο απο την παράκτια ζώνη για την αποφυγή συνάντησης κακών καιρικών συνθηκών.

Η ελάχιστη τιμή για την διατήρηση πορείας  $V_{ck}$  ,επιλέγεται ώστε να διασφαλίζεται η διατήρηση πορείας υπό την επίδραση κυματισμών και ανέμου από οποιαδήποτε κατεύθυνση. Συνεπώς κατά για τον υπολογισμό της ταχύτητας λαμβάνονται υπόψιν

παράγοντες όπως η πλευρική επιφάνεια εξάλων  $A_{LW}$ , η μετωπική επιφάνεια εξάλων  $A_{FW}$  και η επιφάνεια του πηδαλίου  $A_R$ .

$$A_{FW} = 900 \text{ m}^2$$

$$A_{LW} = 4200 \text{ m}^2$$

$$A_R = 54.45 \text{ m}^2$$

Για τον υπολογισμό της λαμβάνονται υπόψιν οι επιπλέον διορθώσεις πλοίου για τους λόγους  $A_R / A_{LS,COR}$  και  $A_{FW} / A_{LW}$ .

$$A_{R\%} = \frac{A_R}{A_{LS,COR}} * 100\% \quad (4.10)$$

Η διόρθωση για το πλάτος του πλοίου:

$$A_{LS,cor} = Lpp * T_M * [1 + 25 * \left(\frac{B_{WL}}{L_{PP}}\right)^2] \quad (4.11)$$

Η διόρθωση για το λόγο  $A_{FW} / A_{LW}$ :

$$V_{ck,ref} = \begin{cases} 4.0 \text{ για } \frac{A_{FW}}{A_{LW}} \geq 0.4 \\ \text{Γραμμική παρεμβολή για } 0.1 \leq \frac{A_{FW}}{A_{LW}} \leq 0.4 \\ 9.0 \text{ για } \frac{A_{FW}}{A_{LW}} \leq 0.1 \end{cases} \quad (4.12)$$

$$V_{Ck} = V_{ck,ref} - 10.0 * (A_{R\%} - 0.9\%) \quad (4.13)$$

Έτσι προκύπτει:

$$V_{Ck} = 1.935 \text{ m/s}^2$$

$$V_s = \max(V_{nav}, V_{ck}) = 4 \text{ kn.}$$

#### **4.2.3.2 Προσδιορισμός Αντίστασης σε ήρεμο νερό $R_{cw}$ .**

Για πλοία μεγάλου  $C_b$  κυρίως tanker, bulk carrier, και combination carriers για πολύ χαμηλές ταχύτητες μπορεί να παραληφθεί η αντίσταση εξαιτίας των κυματισμών που παράγει το ίδιο το πλοίο (wave-making resistance). Έτσι η αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό για την ταχύτητα που ορίζουν οι κανονισμοί υπολογίζεται από τον τύπο της αντίστασης τριβής.

$$R_{cw} = \frac{1}{2} * (1 + k) * C_F * \rho * S * V_s^2 \quad (4.15)$$

Ο συντελεστής  $k$ , υπολογίζεται από model tests, είτε μέσω της εμπειρικής σχέσης

$$\kappa = -0.095 + 25.6 * \frac{C_B}{\left(\frac{Lpp}{BWL}\right)^2 * \sqrt{\frac{BWL}{T_M}}} \quad (4.16)$$

Ο συντελεστής αντίστασης τριβής  $C_F$

$$C_F = \frac{0.075}{\left(\frac{Re}{10} - 2\right)^2} \quad (4.17)$$

$\rho$ : Η πυκνότητα του νερού σε  $\text{kg/m}^3$ .

S: Η βρεχόμενη επιφάνεια της γυμνής γάστρας σε  $\text{m}^2$ .

$V_s$ : Η ταχύτητα προχώρησης σε  $\text{m/s}$ .

$\nu$ : Το κινηματικό ιξώδες του νερού σε  $\text{m}^2/\text{s}$ .

$Re = (V_s * L_{bp}) / \nu$ : Ο αριθμός Reynolds.

Στην περίπτωση της εργασία μας υπολογίστηκε η αντίσταση σε ήρεμο νερό και με την βοήθεια του προγράμματος Shipflow. Η αντίσταση για ήρεμο νερό σύμφωνα με τη σχέση (4.15) είναι  $R_{cw} = 38.804 \text{ KN}$  ενώ με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος Shipflow είναι  $R_{CW\_SHIPFLOW} = 48.975 \text{ KN}$ . Έτσι για τιμή της αντίστασης σε ήρεμο νερό θα χρησιμοποιηθεί αυτή που προκύπτει από το πρόγραμμα Shipflow. Για ρυπασμένη γάστρα υποθέτουμε προσαύξηση της αντίστασης σε ήρεμο νερό κατά 20%.  $R_{c\_fouled} = 1.2 * R_{cw\_shipflow} = 58.77 \text{ KN}$ .

#### **4.2.3.3 Ποσοδιορισμός της αντίστασης Ανέμου.**

$$R_{air} = \frac{1}{2} * C_{air} * \rho_a * A_{FW} * V_{w,rel}^2 \quad (4.18)$$

Ο αεροδυναμικός συντελεστής  $C_{air}$  λαμβάνεται ίσως με 1

Η σχετική ταχύτητα του ανέμου  $V_{w,rel}$  υπολογίζεται ως

$$V_{w,rel} = V_s + V_w \quad (4.19)$$

Όπου

$V_s$ : Η ταχύτητα του πλοίου

$V_w$ : Η ταχύτητα του ανέμου όπως αυτή ορίζεται από τον πίνακα.

$A_{FW}$ : Η μετωπική επιφάνεια εξάλων του πλοίου.

$\rho_a$ : η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα ίση με  $1.293 \text{ kg/m}^3$

$V_s$ [kn]	4
$\rho_a$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	1.293
$V_w$ [m/s]	17.68
$V_{w,rel}$ [m/s]	19.7376
$A_{FW}$ [ $\text{m}^2$ ]	900



$R_{air} = 226.67 \text{ KW}$ .

#### 4.2.3.4 Πρόσθετη αντίσταση εξαιτίας του κυματισμού.

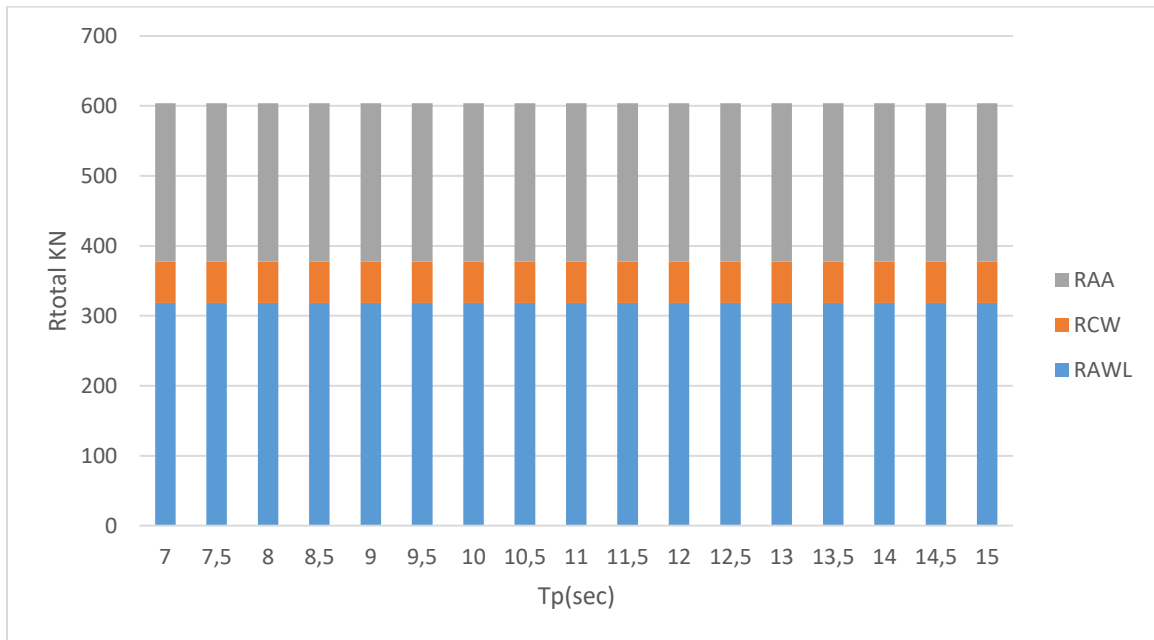
Η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμού θα υπολογιστεί με βάση τις μεθόδους STAWAVE 1&2 και την σχέση Liu&Paranikolaou με τις οποίες αναλύσαμε στο Κεφάλαιο 1. Και όπως επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα του προγράμματος Shipflow στο Κεφάλαιο 2 η χρήση των εμπειρικών μεθόδων για μετωπικούς κυματισμούς ιδιαίτερα Liu&Paranikolaou είναι αξιόπιστη και δίνει ακριβή αποτελέσματα. Οι υπολογισμοί αυτήν τη φορά θα γίνουν με βάση και πάλι το σημαντικό ύψος κύματος  $H_s=5\text{m}$  και για εύρος τιμών περιόδου κορυφής  $T_p$  ,9 έως 15 sec σύμφωνα με τον πίνακα 9 με βάση το μήκος του πλοίου για την ελάχιστη απαιτούμενη ταχύτητα  $V_s=4\text{kn}$ .

#### STAWAVE-1

$$R_{AWL} = \frac{1}{16} * \rho_s * g * H_s^2 * B * \sqrt{\frac{B}{L_E}} \quad (4.20)$$

$H_s$  είναι το σημαντικό ύψος κύματος και είναι ίσο με 5m σύμφωνα με τον πίνακα 17.

$R_{AWL}=318.55\text{KN}$ .

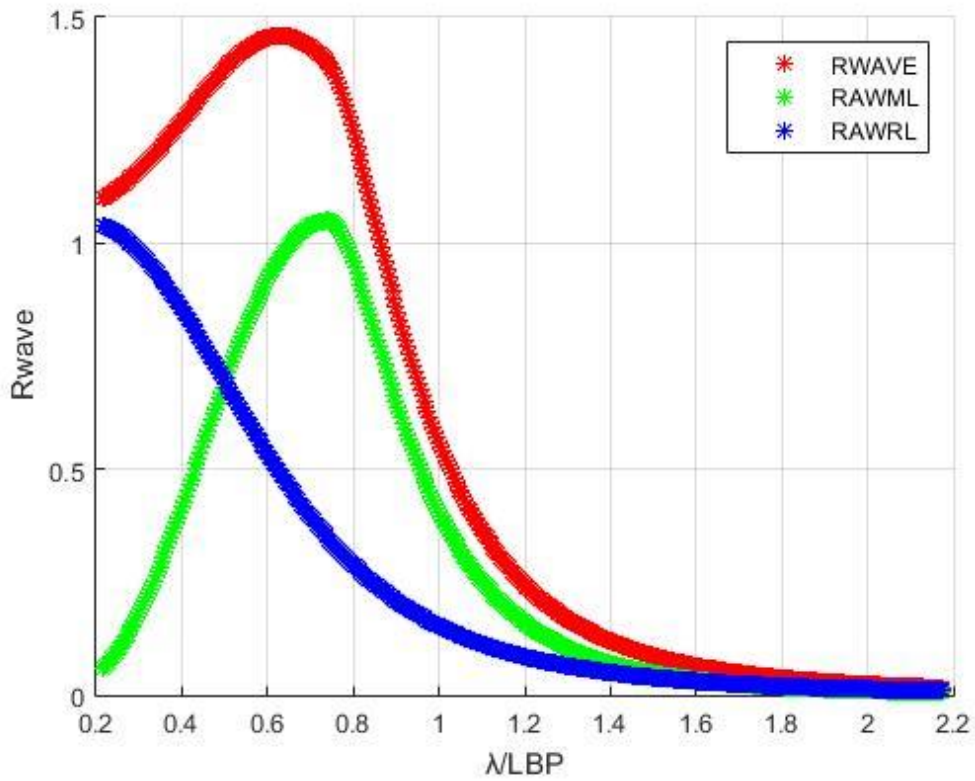


Σχήμα 45 Κατανομή των RAWL, RAA, RCW σύμφωνα με την STAWAVE-1 για  $H_s=5\text{m}$  και  $V_s=4\text{kn}$ .

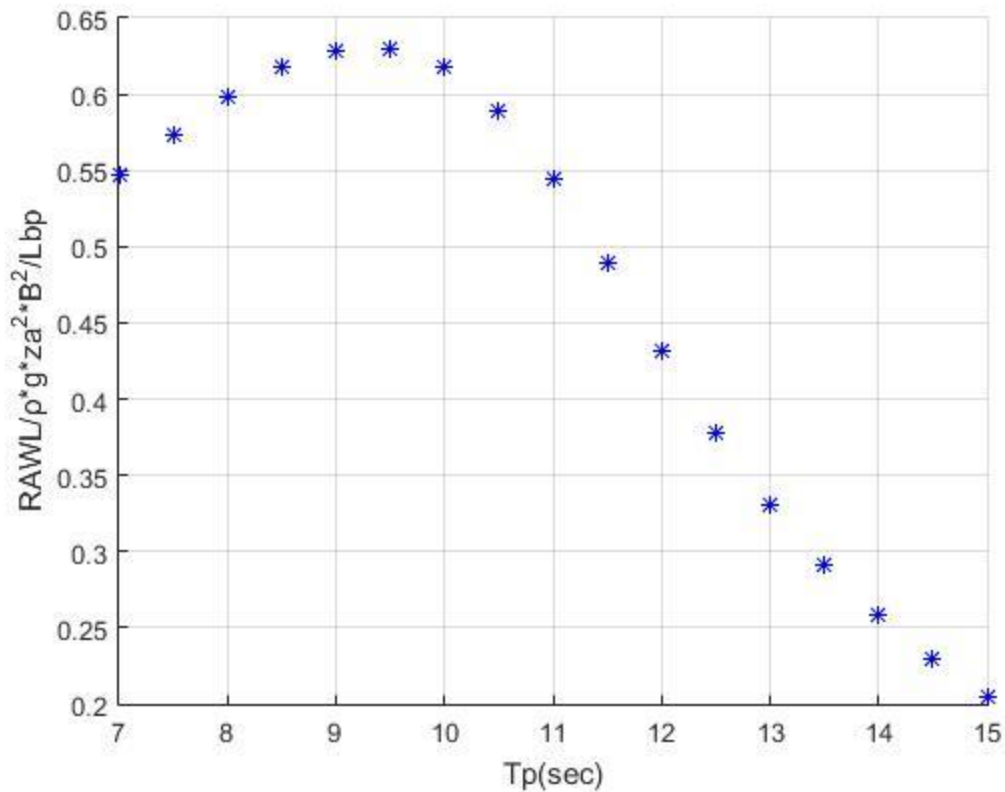
#### STAWAVE-2

$R_{WAVE} = R_{AWRL} + R_{AWML}$ .

Η συνάρτηση μεταφοράς  $R_{WAVE}$  και η συνάρτηση της μέσης πρόσθετης Αντίστασης  $R_{AWL}$  φαίνεται στα σχήματα 46 και 47 αντίστοιχα.

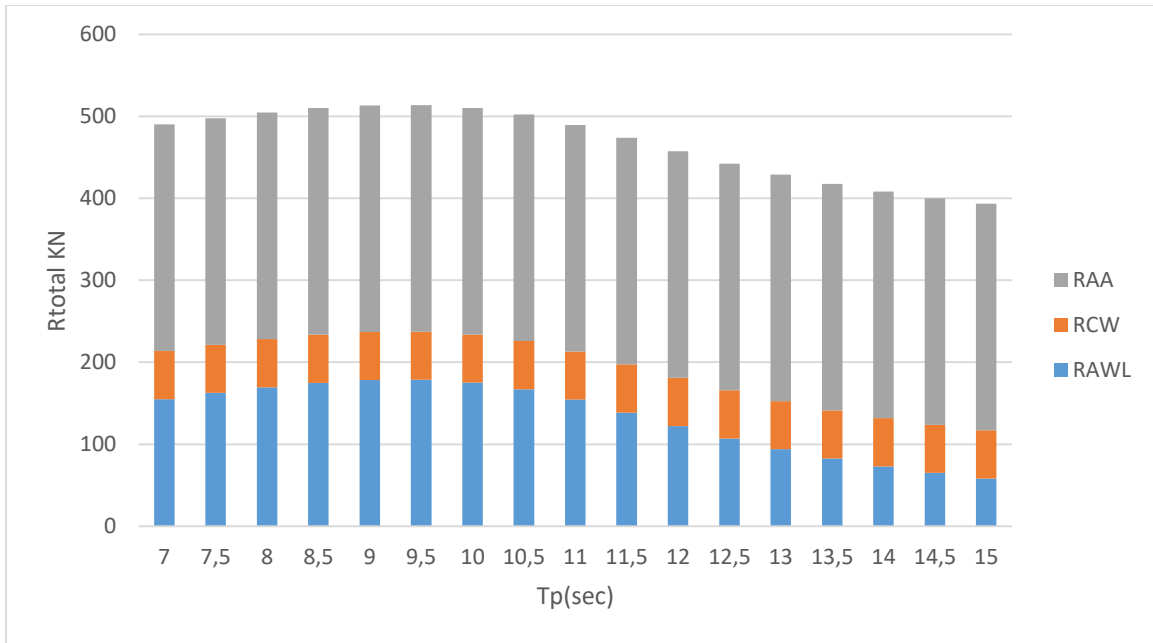


Σχήμα 46 Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς  $R_{AW}$  για ταχύτητα πλοίου  $V_s=4kn$  σύμφωνα με την φόρμουλα STAWAVE-2.



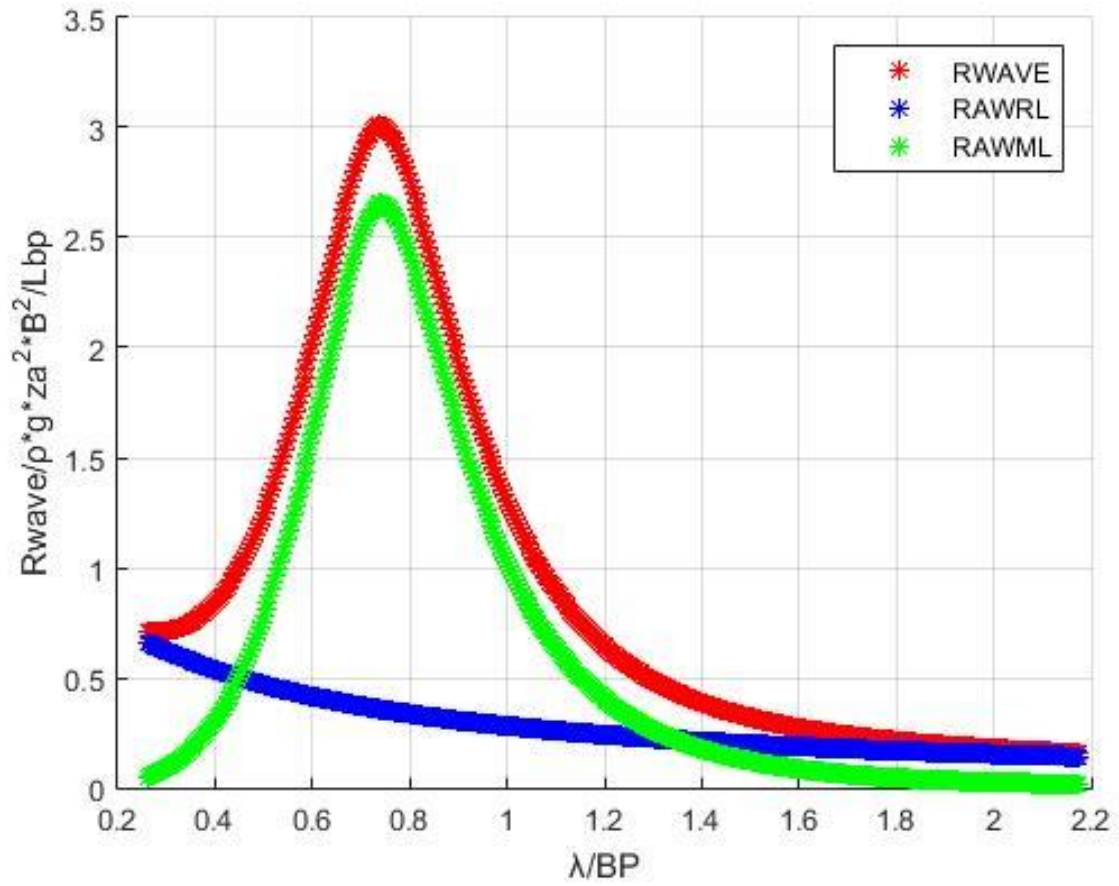
Σχήμα 47 Η μέση πρόσθετη αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς RAWL σύμφωνα με την μέθοδο STAWAVE-2.

Οι τιμές της μέσης πρόσθετης αντίστασης υπολογίστηκαν για το εύρος περιόδου κορυφής που ορίζουν οι κανονισμοί δηλαδή για  $T_p$  από 7 έως 15 sec. Η μέγιστη τιμή της μέσης πρόσθετης αντίστασης κυματισμού εξαιτίας εμφανίζεται για τιμή περιόδου κορυφής  $T_p=9.5$  sec και είναι ίση με  $R_{AWL} = 178.493$  KN. Στο σχήμα 48 φαίνεται η κατανομή και των 3 συνιστωσών της συνολικής αντίστασης για το εύρος τιμών περιόδου κορυφής που ορίζουν οι κανονισμοί.

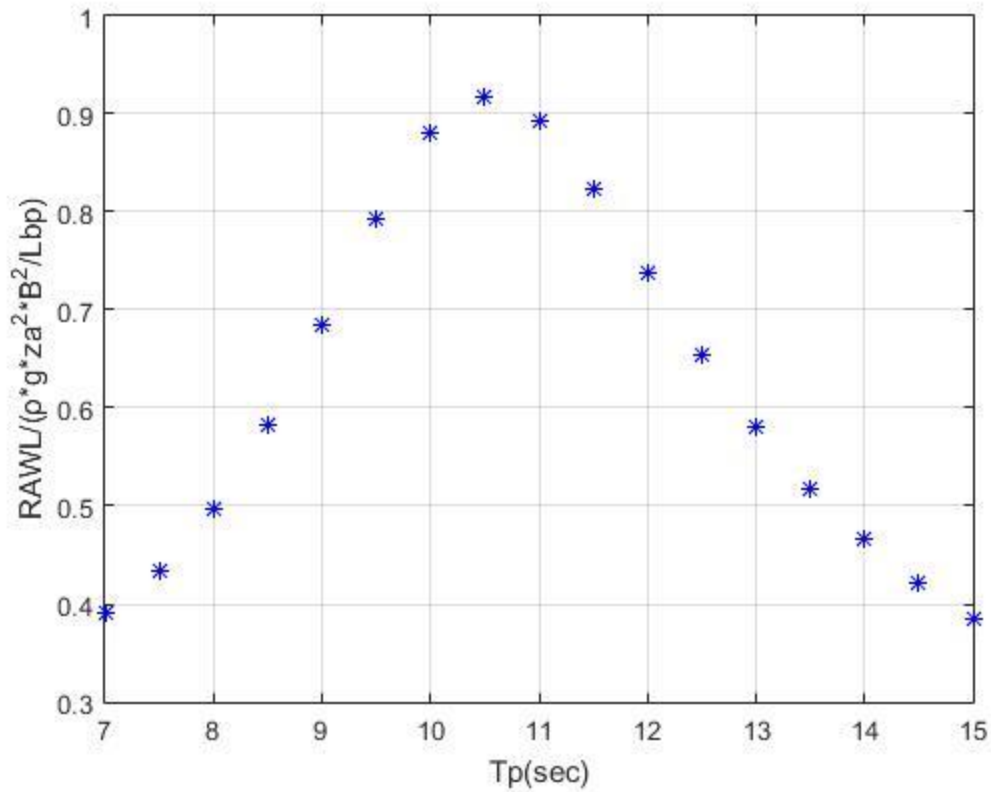


Σχήμα 48 Κατανομή RAWL, RCW, RAA σύμφωνα με την STAWAVE-2 για  $H_s=5m$  και  $V_s=4kn$ .

Liu-Papanikolaou(2016).

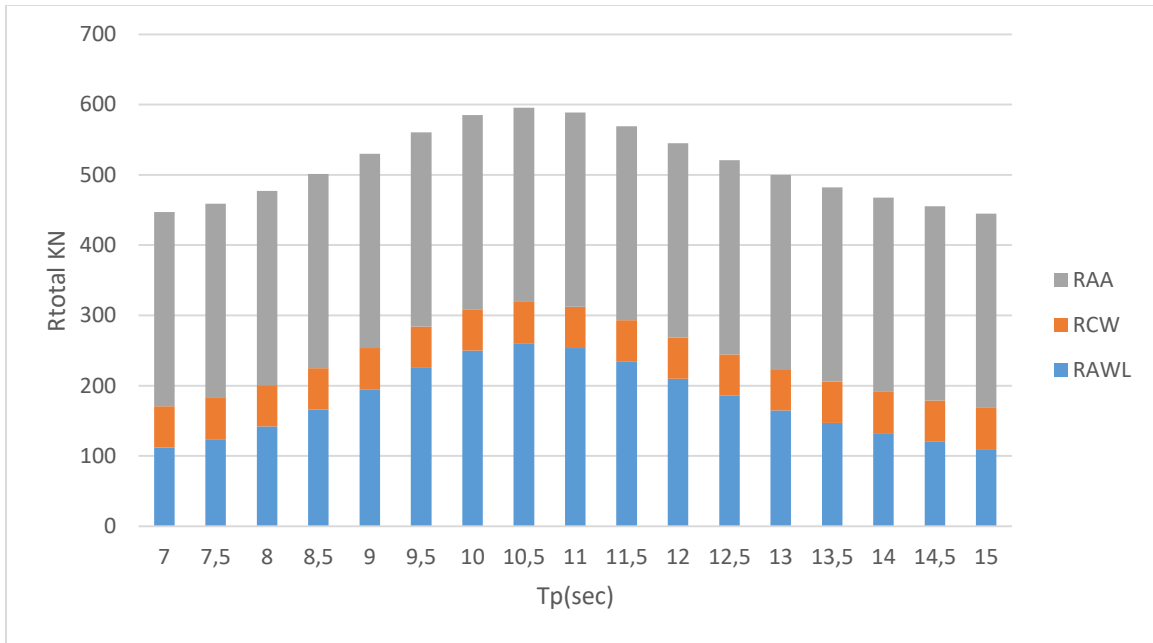


Σχήμα 49 Η πρόσθετη αντίσταση σε κανονικούς κυματισμούς RAW για ταχύτητα πλοίου  $V_s=4kn$  σύμφωνα με την μέθοδο Liu&Papanikolaou.



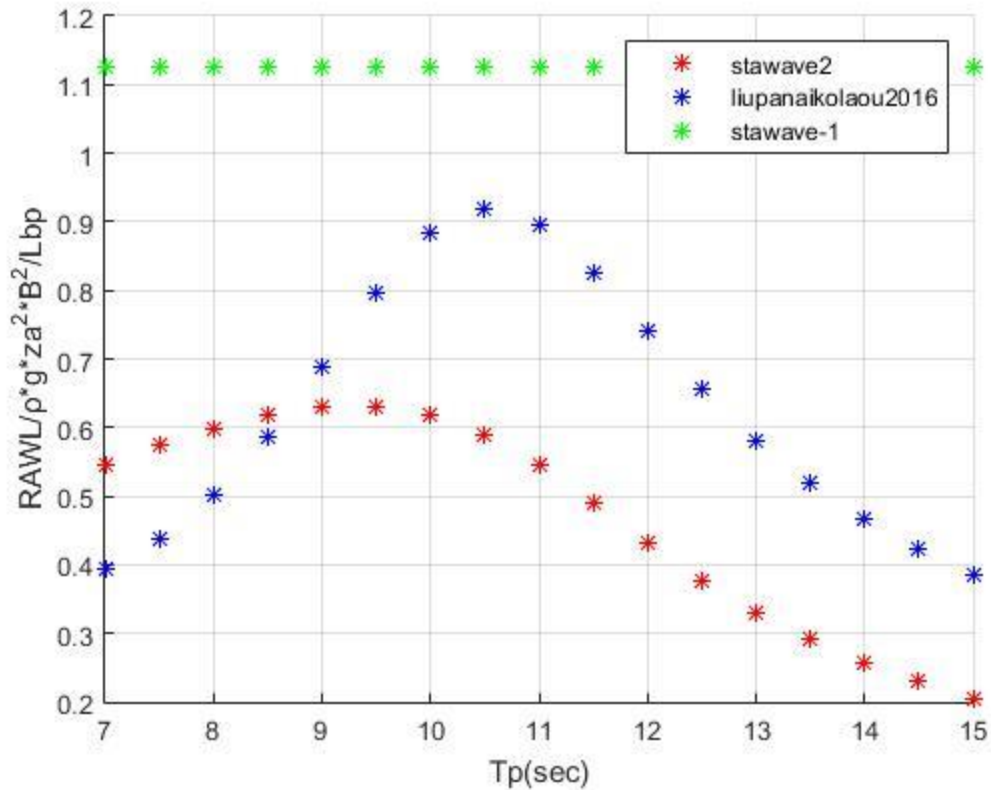
Σχήμα 50 Η μέση πρόσθετη αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς RAWL σύμφωνα με την σχέση Liu&Papanikolaou για  $V_s=4kn$  και  $H_s=5m$ .

Στο σχήμα 50 φαίνεται η καμπύλη της μέσης πρόσθετης αντίστασης για τυχαίους κυματισμούς για σημαντικό ύψος κύματος  $H_s=5m$  και εύρος τιμών περιόδου κορυφής  $T_p$  7 έως 15 sec. Για τους υπολογισμούς θα χρησιμοποιηθεί η μέγιστη τιμή η οποία σημειώνεται για περίοδο κορυφής  $T_p=10.5$  sec. και είναι ίση με  $R_{AWL} = 259.8$  KN.



Σχήμα 51 Γράφημα Κατανομής των RAWL, RCW, RAA σύμφωνα με την Liu&Papanikolaou για  $H_s=5m$  και  $V_s=4kn..$

Στο σχήμα 52 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά και οι τιμές της πρόσθετης αντίστασης για όλο το εύρος περιόδου κορυφής και για τις 3 μεθόδους STAWAVE-1&2 και Liu&Papanikolaou.



Σχήμα 52 Η μέση πρόσθετη αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς για  $V_s=4kn$  και  $H_s=5m$  σύμφωνα με τις STAWAVE-1, STAWAVE-2, Liu&Papanikolaou.

Συγκεντρωτικά έχουμε τις μέγιστες τιμές που προέκυψαν από την εφαρμογή και των 3 μεθόδων.

STAWAVE-1:  $R_{AWL}=318.55$  KN.

STAWAVE-2:  $R_{AWL}=178.493$  KN.

Liu&Papanikolaou:  $R_{AWL}=259.8$  KN.

Η εφαρμογή του ελέγχου θα γίνει και για τις 3 μεθόδους

Έτσι η συνολική αντίσταση για την κατάσταση που ορίζουν οι κανονισμοί (IMO 2013,MEPC 232(65)).

$$R=R_{CW}+R_{AIR}+R_{AW} \quad (4.22)$$

STAWAVE-1:  $R=604$  KN.

STAWAVE-2:  $R=463.94$  KN.

Liu&Papanikolaou:  $R=545.24$  KN.

Η απαιτούμενη ώση που πρέπει να αποδίδει η έλικα υπολογίζεται από την σχέση (4.23):



$$T = \frac{(R_{CW} + R_{AIR} + R_{AW})}{1-t} \quad (4.23)$$

Η ταχύτητα προχώρησης υπολογίζεται ως

$$ua = Vs * (1 - w) \quad (4.24)$$

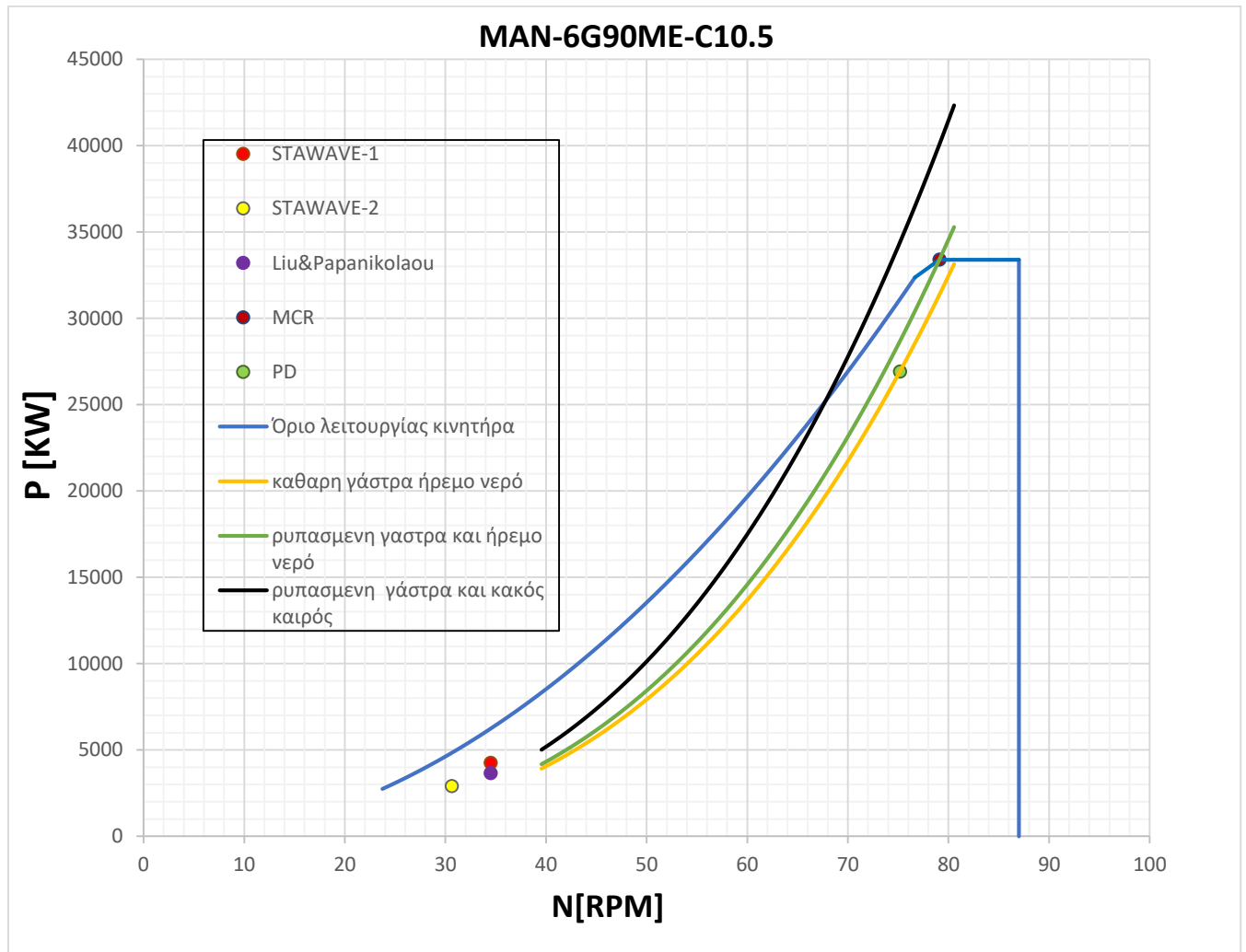
Ύστερα πρέπει να γίνει χάραξη της καμπύλης  $\frac{K_T}{J^2} = \frac{T}{\rho * ua^2 * D_p^2}$  και εύρεση του σημείου τομής με την καμπύλη του συντελεστή ώσης  $K_t$  στο διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας .

Το πρόγραμμα Propdes επιτελεί αυτήν ακριβώς την διαδικασία σε μικρό χρονικό διάστημα χωρίς ο χρήστης να χρειαστεί να χαράξει την καμπύλη  $\frac{K_T}{J^2}$  . Τα αποτελέσματα του προγράμματος Propdes φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	$R_T$ [KN]	$T$ [KN]	SHP [KN]	N [RPM]
STAWAVE_1	604	730.8	4245.46	34.5
STAWAVE_2	463.94	561.34	2907	30.67
Liu Papanikolaou	545.24	751.13	3364.23	32.95

Πίνακας 21 Αντίσταση ρυμούλκησης  $R_T$ , η ώση της προπέλας  $T$ , η αποδιδόμενη ισχύς στον άξονα SHP και οι στροφές του άξονα για  $V_s=4$  Kn για τις 3 ημιεμπειρικές μεθόδους STAWAVE-1, STAWAVE-2 και Liu&Papanikolaou.

Στο σχήμα 53 απεικονίζονται τα σημεία που αντιστοιχούν στις τιμές ζήτησης ισχύος στροφών όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα Propdes για κάθε ημιεμπειρική μέθοδο.



Σχήμα 53 Διάγραμμα φόρτισης Κινητήρα και τα ζεύγη ισχύος στροφών για την ταχύτητα πλοίου  $V_s=4kn$  για σημαντικό ύψος κύματος  $H_s=5m$  σύμφωνα με τις ημιεμπειρικές σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2, Liu&Papanikolaou.

Παρατηρούμε ότι τα ζεύγη ισχύος στροφών (P,n) που προέκυψαν με βάση τις οδηγίες των κανονισμών είναι εντός του διαγράμματος του κινητήρα. Παρατηρούμε ότι οι στρόφες είναι πολύ χαμηλές. Αυτό συμβαίνει διότι τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων δεν αντιμετωπίζουν ιδιαίτερα προβλήματα όσον αφορά την Ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς πρόωσης διότι οι ναυτικοί κινητήρες τους χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές ισχύος ώστε να μπορούν να πλέουν σε υψηλές ταχύτητες. Η ικανοποίηση των κριτηρίων για την MPP αποτελεί πρόβλημα κυρίως των tankers και των bulk carriers. Αυτό συμβαίνει διότι τα πλοία αυτών των τύπων χαρακτηρίζονται από υψηλούς συντελεστές γάστρας  $C_b$  αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη βρεχόμενη επιφάνεια η

οποία αυξάνει την αντίσταση τριβής. Επιπλέον συνεπάγεται αύξηση της αντίστασης εξαιτίας της ολοκλήρωσης των πιέσεων επάνω στην επιφάνεια της γάστρας λόγω των κινήσεων του πλοίου. Δηλαδή η πρόσθετη αντίσταση εξαιτίας των κυματισμών είναι πολύ μεγαλύτερη για tankers και bulk carriers από τα containerships.

### **4.3 Γενική μελέτη Ζήτηση ισχύος στροφών εξαιτίας της πρόσθετης αντίστασης.**

Η αγορά Liner επιβάλλει στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων να πλέουν σε υψηλές ταχύτητες. Τα αυστηρά χρονοδιαγράμματα δεν επιτρέπουν μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις όσον αφορά την άφιξη των εμπορευμάτων στο λιμάνι και όταν αυτές συμβαίνουν οι οικονομικές ζημιές μπορεί να είναι τεράστιες. Έτσι τα containerships καλούνται να κινούνται και σε μεγάλες ταχύτητες ακόμα και αν οι καιρικές συνθήκες είναι αντίξοες. Συνεπώς θα πρέπει να ελεγχθεί η δυνατότητα του κινητήρα να καλύψει τις απαιτήσεις ισχύος και για υψηλότερες ταχύτητες. Οι ταχύτητες πλοίου για τις οποίες θα γίνει ανάλυση είναι  $V_s=8, 12, 16$  kn, για σημαντικά ύψη κύματος  $H_s=2, 3.5$  και  $5$  m. Τα σχήματα στα οποία παρουσιάζεται η μέση πρόσθετη αντίσταση σε τυχαίους κυματισμούς και για τις 3 μεθόδους για τις τιμές σημαντικού ύψους που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται στο Παράρτημα ΣΤ(σελ.188).

#### **4.3.1 Ζήτηση ισχύος στροφών για $H_s=5$ m για $V_s=8, 12, 16$ kn**

Στον πίνακα 22 παρατίθενται, η αντίσταση σε ήρεμο νερό για καθαρή και ρυπασμένη γάστρα όπως αυτή υπολογίστηκε από το πρόγραμμα Shipflow, η αεροδυναμική αντίσταση και η μέγιστη τιμή της μέσης πρόσθετης αντίστασης σύμφωνα με την κάθε ημιεμπειρική μέθοδο. Παρατηρείται ότι η STAWAVE-1 αποδίδει μικρότερες τιμές για την Μέση πρόσθετη αντίσταση και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στον μαθηματικό τύπο της STAWAVE-1 δεν συμπεριλαμβάνεται η ταχύτητα του πλοίου σε αντίθεση με τις STAWAVE-2 και την Liu&Papanikolaou. Επίσης παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη τιμή πρόσθετης αντίστασης κυματισμού είναι αυτή που προκύπτει από την μέθοδο Liu&Papanikolaou. Αυτό συμβαίνει και για  $H_s=2$  και  $3.5$  m όπως θα δούμε στην συνέχεια.

$V_s$ (kn)	Rcw_Shipflow (KN)	Rcw_+20% fouled (KN)	RAWL_STAWAVE_1 (KN)	RAWL_STAWAVE_2 (KN)	RAWL_Liu_Papanikolaou (KN)	$R_{AA}$ (KN)
8	184.802	221.76	318.55	325.11	357.68	276.4
12	409.514	491.42	318.55	468.11	481.16	331.05
16	704.164	845	318.55	592.88	631.71	390.62

Πίνακας 22 Αντίσταση σε ήρεμο και καθαρή γάστρα  $R_{cw\_Shipflow}$ , Αντίσταση σε ήρεμο και μολυσμένη γάστρα  $R_{cw\_fouled}$ , Αεροδυναμική αντίσταση  $R_{AA}$ , Μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού RAWL σύμφωνα με τις σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2, Liu&Papanikolaou για τις ταχύτητες  $V_s=8, 12, 16$  kn και σημαντικό ύψος κύματος  $H_s=5$  m.

Έτσι προκύπτει και με την χρήση του προγράμματος Propdes .

#### STAWAVE-1.

Vs (kn)	RTOTAL (KN)	N(rpm)	SHP (KW)
8	816,35	43.32	7335.9
12	1141.02	54.5	12967.68
16	1554.17	64.46	21610.52

Πίνακας 23 Συνολική αντίσταση Rt, ισχύς SHP και στροφές N στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-1, για Vs=8,12,16kn Hs=5m

#### STAWAVE-2

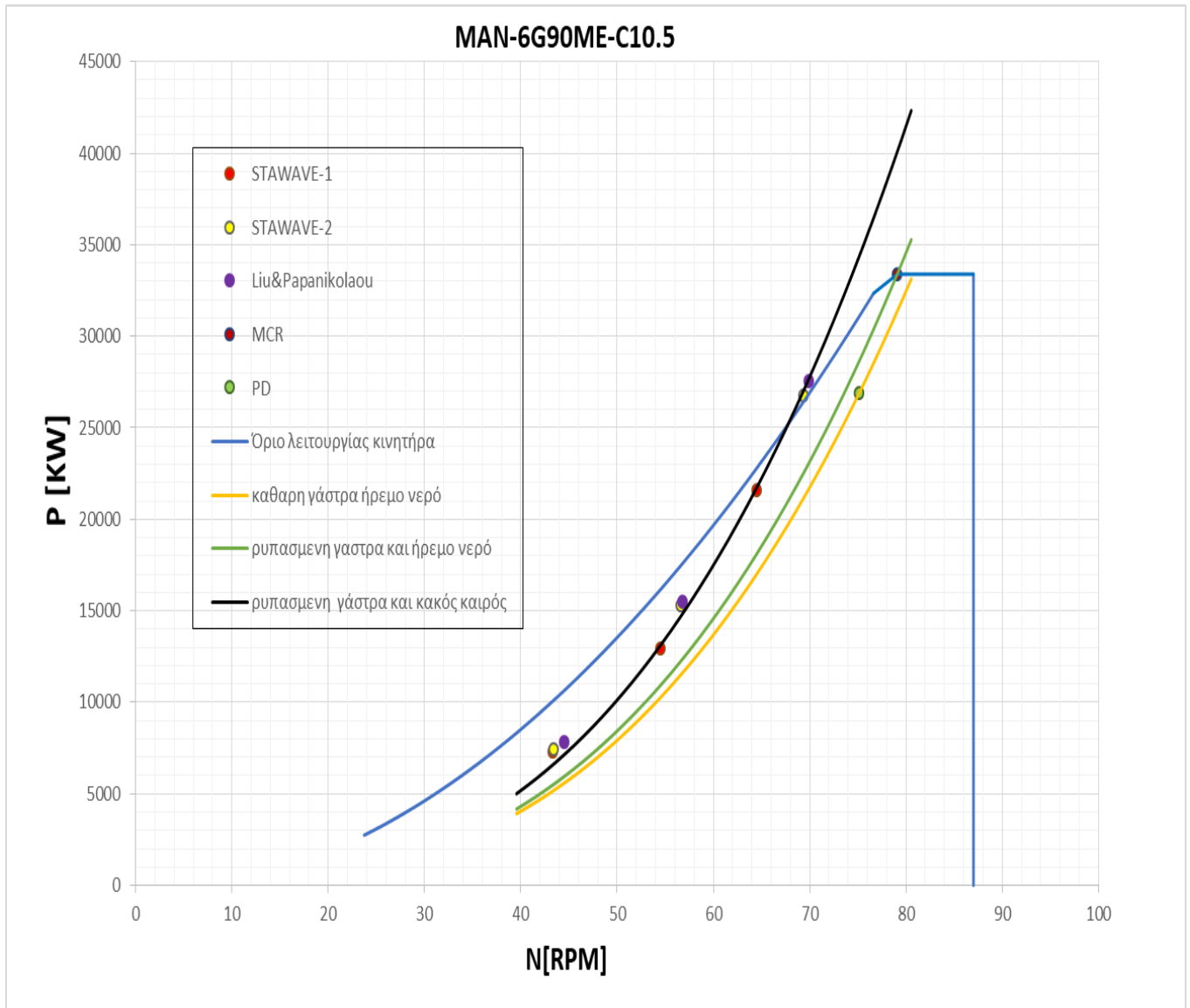
Vs (kn)	RTOTAL (KN)	N(rpm)	SHP (KW)
8	822.91	43.36	7415.97
12	1290.58	56.61	15300
16	1828.5	69.34	26774.87

Πίνακας 24 Συνολική αντίσταση Rt, ισχύς SHP και στροφές N στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-2, για Vs=8,12,16kn Hs=5m

#### Liu Papanikolaou.

Vs (kn)	RTOTAL (KN)	N(rpm)	SHP (KW)
8	855.48	44.51	7824.19
12	1303.63	56.81	15501
16	1867.3	69.9	27531.79

Πίνακας 25 Συνολική αντίσταση Rt, ισχύς SHP και στροφές N στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την Liu&Papanikolaou , για Vs=8,12,16kn Hs=5m



Σχήμα 54 Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα και η ζήτηση ισχύος στροφών για τις ταχύτητες  $V_s=16,12,8$  kn για ύψος κύματος  $H_s=5$  m σύμφωνα με τις ημιεμπειρικές σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2, Liu&Papanikolaou.

Εξετάζοντας το σχήμα 54 προκύπτουν ορισμένα ενδιαφέροντα στοιχεία. Παρατηρείται ότι για την ταχύτητα των  $V_s=8\text{kn}$  και οι 3 μέθοδοι δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα και η ζήτηση ισχύος στροφών είναι εντός του διαγράμματος του κινητήρα αλλά οι τιμές ισχύος στροφών είναι μεγαλύτερες από αυτές της καμπύλης για ρυπασμένης γάστρας και κακού καιρού. Για την ταχύτητα  $V_s=12\text{kn}$  παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ της STAWAVE-1 και των άλλων 2 μεθόδων επιπλέον η καμπύλη ισχύος για ρυπασμένη γάστρα και κακό καιρό δίνει χαμηλότερες τιμές από τις STAWAVE-2 και Liu&Papanikolaou ωστόσο και σε αυτήν την περίπτωση ο κινητήρας μπορεί να καλύψει την ζήτηση σε ισχύ. Για την περίπτωση των  $16\text{kn}$  πάλι οι STAWAVE\_2 και η Liu Papanikolaou συγκλίνουν ενώ η απόκλιση της STAWAVE-1 από τις άλλες 2 μεθόδους είναι ακόμα μεγαλύτερη σε σχέση με τις περιπτώσεις των  $8$  και  $12\text{kn}$ . Σύμφωνα με την STAWAVE-1 ο κινητήρας καλύπτει την απαίτηση σε ισχύ ενώ σύμφωνα με τις STAWAVE-2 και Liu&Papanikolaou ο κινητήρας δεν μπορεί να καλύψει την απαίτηση σε ισχύ.

#### **4.3.2 Ζήτηση ισχύος στροφών για $H_s=3.5\text{m}$ για $V_s=8,12,16\text{k}$**

$V_s$ (kn)	Rcw_shipflow (KN)	Rcw_+20% fouled (KN)	RAWL_STAWAVE_1 (KN)	RAWL_STAWAVE_2 (KN)	RAWL_Liu_Papanikolaou (KN)	$R_{AA}$ (KN)
8	184.802	221.76	156.09	159.31	175.26	276.04
12	409.514	491.42	156.09	229.37	235.77	331.05
16	704.164	845	156.09	290.51	309.54	390.62

Πίνακας 26 Αντίσταση σε ήρεμο και καθαρή γάστρα  $R_{cw\_Shipflow}$ , Αντίσταση σε ήρεμο και μολυσμένη γάστρα  $R_{cw\_fouled}$ , Αεροδυναμική αντίσταση  $R_{AA}$ , Μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού RAWL σύμφωνα με τις σχέσεις  $stawave-1$ ,  $stawave-2$ , Liu&Papanikolaou για τις ταχύτητες  $V_s=8,12,16\text{kn}$  και σημαντικό ύψος κύματος  $H_s=3.5\text{m}$ .

#### **STAWAVE-1.**

$V_s$ (kn)	RTOTAL (KN)	N(rpm)	SHP (KW)
8	653.89	39.68	5412.3
12	978.56	51.1	10572.52
16	1391.71	63	18713.56

Πίνακας 27 Συνολική αντίσταση  $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές  $N$  στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-1, για  $V_s=8,12,16\text{kn}$   $H_s=3.5\text{m}$

## STAWAVE-2

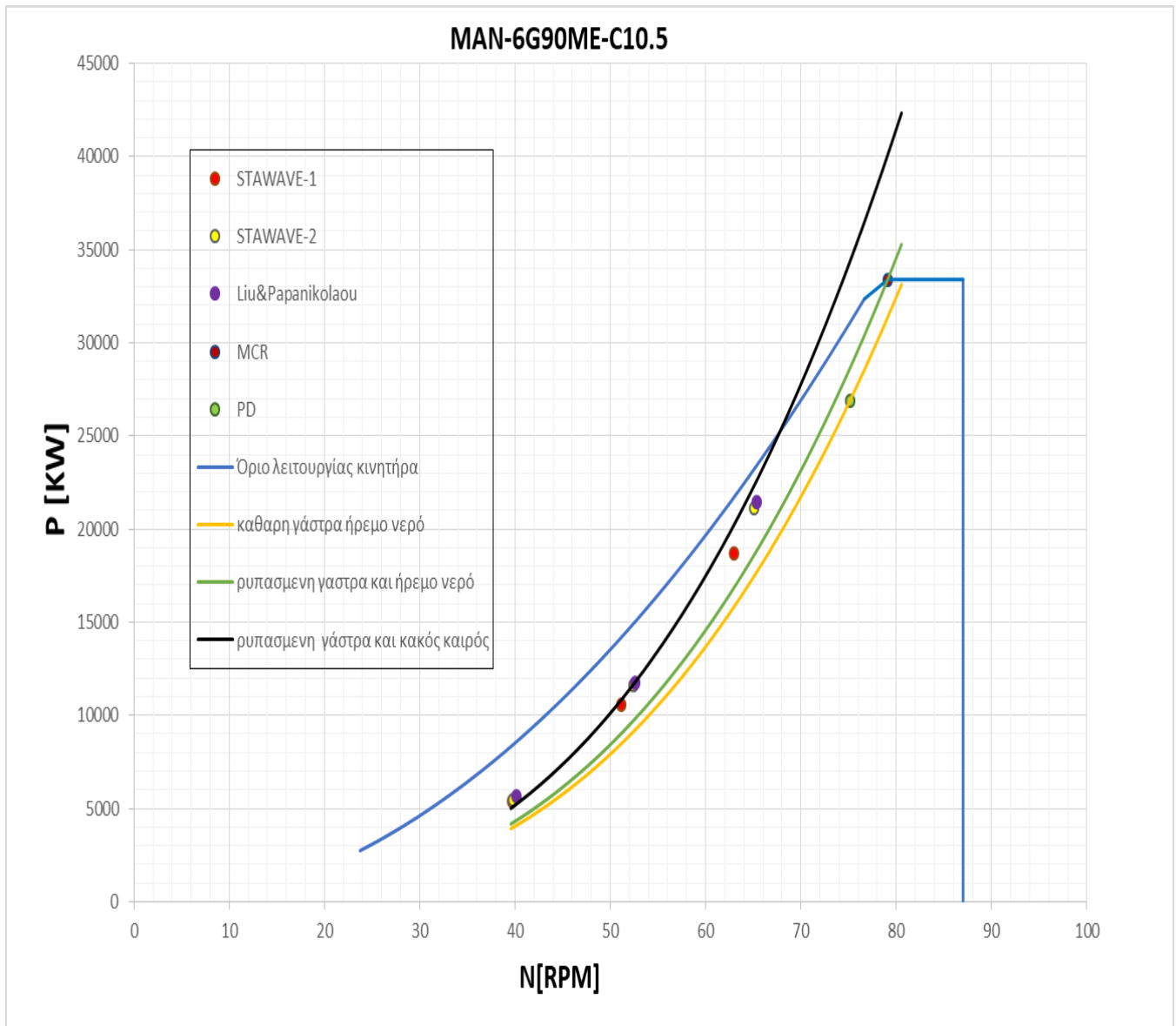
Vs (kn)	RTOTAL (KN)	N(rpm)	SHP (KW)
8	657.11	39.76	5448.67
12	1051.84	52.45	11634.47
16	1545.16	65.04	21101.7

Πίνακας 28 Συνολική αντίσταση Rt, ισχύς SHP και στροφές N στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-2, για Vs=8,12,16kn Hs=3.5m

## Liu Papanikolaou.

Vs (kn)	RTOTAL (KN)	N(rpm)	SHP (KW)
8	673.66	40.15	5636.41
12	1058.24	52.57	11728.67
16	1545.16	62.32	21446.62

Πίνακας 29 Συνολική αντίσταση Rt, ισχύς SHP και στροφές N στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την Liu&Papanikolaou , για Vs=8,12,16kn Hs=3.5m .



Σχήμα 55. Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα και η ζήτηση ισχύος στροφών για τις ταχύτητες  $V_s=16,12,8$  kn για ύψος κύματος  $H_s=3.5m$  σύμφωνα με τις ημιεμπειρικές σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2, Liu&Papanikolaou.



### 4.3.3 Ζήτηση ισχύος στροφών για $H_s=2m$ για $V_s=8,12,16 kn$

$V_s$ (kn)	Rcw_shipflow (KN)	Rcw_+20% fouled (KN)	RAWL_STAWAVE_1 (KN)	RAWL_STAWAVE_2 (KN)	RAWL_Liu_Papanikolaou (KN)	$R_{AA}$ (KN)
8	184.802	221.76	50.967	52.012	57.229	276.04
12	409.514	491.42	50.967	74.898	76.986	331.05
16	704.164	845	50.967	94.86	101.07	390.62

Πίνακας 30 Αντίσταση σε ήρεμο και καθαρή γάστρα  $R_{cw\_Shipflow}$ , Αντίσταση σε ήρεμο και μολυσμένη γάστρα  $R_{cw\_fouled}$ , Αεροδυναμική αντίσταση  $R_{AA}$ , Μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού RAWL σύμφωνα με τις σχέσεις  $stawave-1$ ,  $stawave-2$ , Liu&Papanikolaou για τις ταχύτητες  $V_s=8,12,16kn$  και σημαντικό ύψος κύματος  $H_s=5m$ .

Έτσι προκύπτει και με την χρήση του προγράμματος Propdes .

#### STAWAVE-1.

$V_s$ (kn)	RTOTAL (KN)	N(rpm)	SHP (KW)
8	548.77	37.11	4270
12	873.74	49.1	9104.11
16	1286.59	61.35	16906.43

Πίνακας 31 Συνολική αντίσταση  $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές  $N$  στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-1, για  $V_s=8,12,16kn$   $H_s=2m$

#### STAWAVE-2

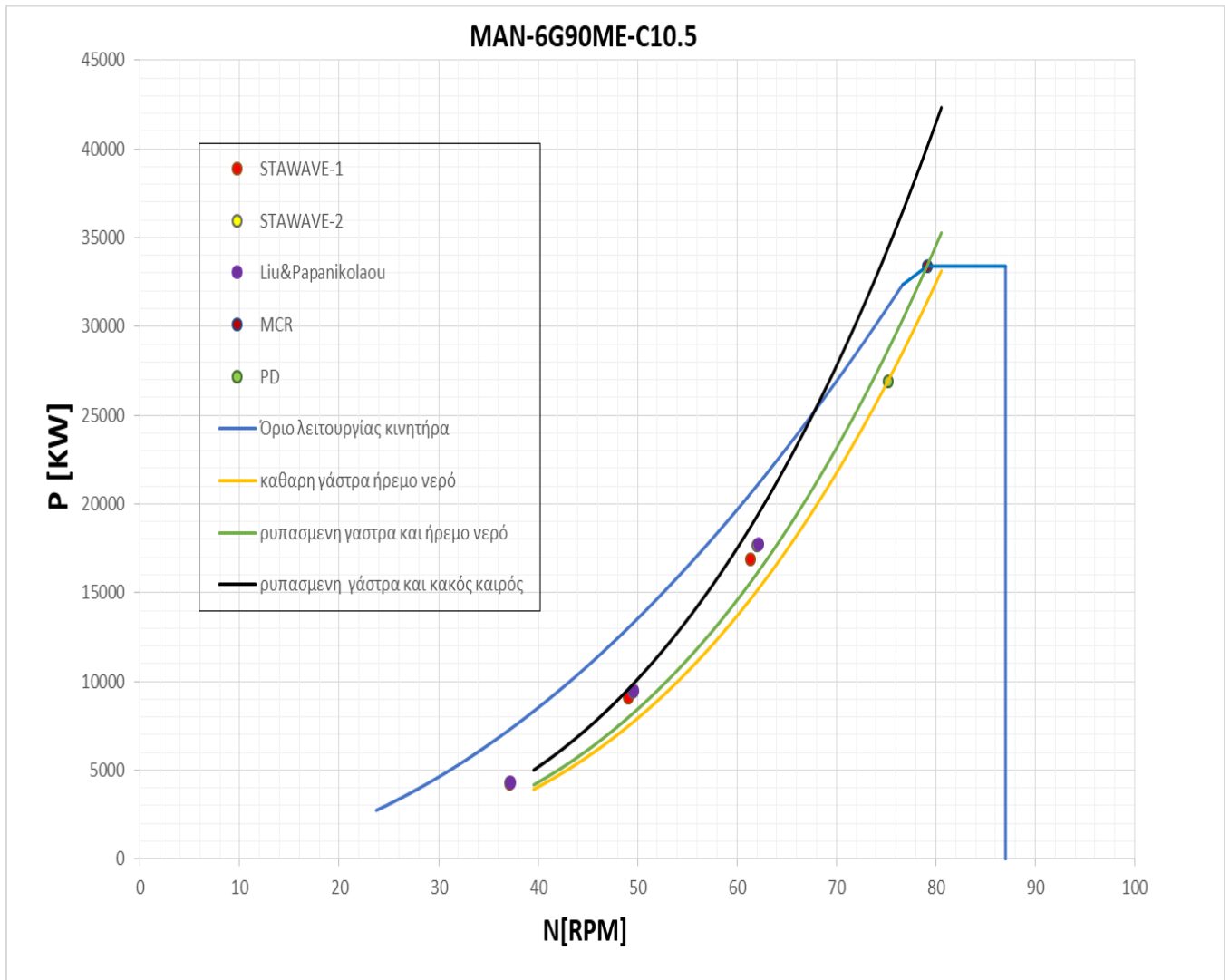
$V_s$ (kn)	RTOTAL (KN)	N(rpm)	SHP (KW)
8	549.82	37.13	4281
12	897.37	49.54	9432.55
16	1330.48	62.04	17654.36

Πίνακας 32 Συνολική αντίσταση  $R_t$ , ισχύς SHP και στροφές  $N$  στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την STAWAVE-2, για  $V_s=8,12,16kn$   $H_s=2m$

Liu Papanikolaou.

Vs (kn)	RTOTAL (KN)	N(rpm)	SHP (KW)
8	555.029	37.27	4335.66
12	899.456	49.58	9461.41
16	1336.69	62.14	17760.96

Πίνακας 33 Συνολική αντίσταση Rt, ισχύς SHP και στροφές N στον άξονα της μηχανής σύμφωνα με την Liu & Papanikolaou, για Vs=8,12,16kn Hs=5m



Σχήμα 56. Διάγραμμα φόρτισης κινητήρα και η ζήτηση ισχύος στροφών για τις ταχύτητες  $V_s=16, 12, 8$  kn για ύψος κύματος  $H_s=2$  m σύμφωνα με τις ημιεμπρικές σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2, Liu&Papanikolaou.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα για μικρότερα ύψη κύματος  $H_s=2$  και  $H_s=3.5$  φαίνεται πώς οι 3 μέθοδοι συγκλίνουν και για τις 3 ταχύτητες. Αυτό συμβαίνει διότι φόρμουλα STAWAVE-1 παρουσιάζει έγκυρα αποτελέσματα σύμφωνα με την ITTC(2022) για ύψος κύματος  $H_s \leq 2.25 * \sqrt{Lbp/100}=3.41$  m. Επίσης παρατηρείται ότι οι τιμές ζήτησης ισχύος στροφών που προκύπτουν είναι μικρότερες από αυτές που προκύπτουν με βάση την καμπύλη ρυπασμένης γάστρας και κακού καιρού για περιθώριο θαλάσσης 20% ιδιαίτερα για τις ταχύτητες 12 και 16 kn. Άρα η καμπύλη ρυπασμένης γάστρας και κακού καιρού αποτελεί μια συντηρητική και ασφαλής εκτίμηση για την ζήτηση ισχύος σε καταστάσεις θαλάσσης για σημαντικό ύψος κύματος  $H_s=2, 3.5$  m.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΠΕΔΙΟ ΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑ**

Ο στόχος αυτής της διπλωματικής ήταν η μελέτη της πρόσθετης αντίστασης με την χρήση των ημιεμπειρικών εξισώσεων και με το πρόγραμμα Shipflow καθώς και η επίδραση της στην ζήτηση ισχύος. Η ακριβής πρόβλεψη της πρόσθετης αντίστασης είναι ύψιστης σημασίας καθώς όπως απεδείχθει στο Κεφάλαιο 4 κατά την εκτέλεση του επιπέδου ελέγχου 2 των κριτηρίων του IMO για την M.P.P, η πρόσθετη αντίσταση αποτελεί την κυρίαρχη συνιστώσα της ολικής αντίστασης πλοίου. Η χρήση των ημιεμπειρικών εξισώσεων είναι απαραίτητη καθώς αποδίδουν με ακρίβεια την πρόσθετη αντίσταση κυματισμού. Αυτό τους προσδίδει το πλεονέκτημα σε σχέση με τα πειράματα σε δεξαμενές και τις προσομοιώσεις σε προγράμματα CFD εξαιτίας του μικρού όγκου εκτέλεσης υπολογισμών, σε μικρό χρονικό διάστημα και με τη γνώση βασικών παραμέτρων. Επίσης ένα άλλο πλεονεκτημα που έχουν σε σχέση με τα προγράμματα CFD είναι η δυνατότητα υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης για κυματισμούς μικρού μήκους όπου τα συνεκτικά φαινόμενα κυριαρχούν και τα προγράμματα CFD φτάνουν στα όρια των υπολογιστικών τους δυνατοτήτων. Ωστόσο όπως διαπιστώθηκε για τον ακριβή προσδιορισμό της πρόσθετης αντίστασης για όλο το εύρος μήκους και ύψους κύματος, ταχύτητας και βυθίσματος πλοίου είναι απαραίτητος ο συνδιασμός όλων των ημιεμπειρικών αλλά και των υπόλοιπων μεθόδων. Η αύξηση του μεγέθους των πλοίων καθιστά όλο και πιο αναγκαία την δυνατότητα υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης για κύματα μεσαίου και μικρού μήκους. Έτσι υπάρχει μεγάλο πεδίο για περεταίρω έρευνα για ανάπτυξη και βελτίωση των ημιεμπειρικών μεθόδων ώστε να καλύπτουν όλο το εύρος των τύπων εμπορικών πλοίων για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης, ταχύτητας κτλπ. για κυματισμούς μικρού μήκους κύματος. Επίσης απαραίτητη είναι και η περεταίρω τεχνολογική ανάπτυξη των προγραμμάτων CFD ώστε να μπορεί ο μελετητής να υπολογίζει την πρόσθετη αντίσταση με μεγαλύτερη ακρίβεια και σε μικρότερο χρονικό διάστημα .

### Παραδοχές και περιορισμοί.

1.Στους υπολογισμούς που έγιναν με το πρόγραμμα Shipflow δεν συμπεριλήφθηκε η επίδραση των παρελκομένων. Η χρήση των παρελκομένων(πηδάλιο, προπέλα) στην ανάλυση θα απαιτούσε την εισαγωγή του κώδικα XCHAP. Η χρήση και του κώδικα XCHAP θα αύξανε καταλυτικά το χρόνο υπολογισμού των αποτελεσμάτων. Επειδή η επίδραση των παρελκομένων στην πρόσθετη αντίσταση κυματισμού είναι πολύ μικρή σε σχέση με αυτήν της γάστρας μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα αποτελέσματα μας είναι ορθά.

2.Για τους γωνιακούς κυματισμούς πραγματοποιήσαμε μετρήσεις σε αραιό πλέγμα(coarse) και για αδιάστατα μήκη κύματος μεγαλύτερα από 0.5. Το γεγονός αυτό

περιορίζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και δεν επέτρεψε την εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων για τιμές αδιάστατου μήκους κύματος 0.2.

3. Επίσης δεν μπορέσαμε να πραγματοποιήσουμε προσομοιώσεις για τυχαίους κυματισμούς καθώς το πρόγραμμα Shipflow δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα σε αυτόν τον τομέα. Το πρόγραμμα μπορεί να εκτελεί υπολογισμούς για το φάσμα Johnswar μόνο για συγκεκριμένα Sea state και δεν επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει τον συνδυασμό περιόδου κορυφής  $T_p$  και σημαντικού ύψους κύματος ξεχωριστά  $H_s$ .

4. Οι συντελεστές  $t, nr$ , επιλέχθηκαν με εμπειρικές σχέσεις και όχι από πειράματα. Το πρόγραμμα Shipflow επιτρέπει την εκτέλεση πειραμάτων αυτοπρόωσης μοντέλου αλλά και σε διαστάσεις πλοίου ωστόσο σύμφωνα με την εταιρεία Flowtech η μνήμη RAM του υπολογιστή θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 64 GB. Ο υπολογιστής που χρησιμοποιήθηκε δεν είχε τόσο ισχυρή μνήμη RAM.

5. Επίσης κατά την εκτέλεση της ανάλυσης ελέγχου για την MPP δεν συμπεριλήφθηκε η επίδραση της τραχύτητας της προπέλας.

6. Κατά την εκτέλεση της ανάλυσης ελέγχου για την MPP ο motions7 δεν απέδωσε την αντίσταση κυματισμού για  $V_s=4\text{kn}$  διότι το πρόγραμμα δεν μπόρεσε να επιλύσει την εξίσωση Laplace για την συγκεκριμένη ταχύτητα.

7. Η χρήση του νόμου της έλικας για τον υπολογισμό της καμπύλης ζήτησης ισχύος αποτελεί αξιόπιστο εργαλείο δεδομένου ότι για την χάραξη της καμπύλης χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα Propdes.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Alexandersson, M. (2009), "A Study of Methods to predict added resistance in waves". Master thesis, KTH Center of Naval Architecture. Stockholm.
- Faltinsen, O. M., Minsaas, K. J. (1980). N. Liapis and S. Skjørdal, "Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway," in Proceedings of the 13th ONR Symposium.
- Flowtech International AB. SHIPFLOW 7. User's manual. Gothenburg, Sweden
- Gerritsma, J. and Beukelman, W. (1972), "Analysis of resistance increase in waves of a fast cargo ship," International Ship Building Progress 18 (217),
- IMO MEPC.232(65), 2013. "Interim Guidelines for Determining Minimum Propulsion Power to Maintain the Manoeuvrability in Adverse Conditions". Retrieved from <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC.1-CIRC.850-REV2.pdf>
- ITTC. 2022. Procedures and guidelines: Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power trials, Appendix G "Correction methods for resistance increase due to waves". International Towing Tank Conference. Retrieved from <https://www.ittc.info/media/8103/75-02-07-022.pdf>
- Jinkine, V. and Ferdinande, V. (1974). "A method for predicting the added resistance of fast cargo ships in head waves," International Shipbuilding Progress.
- Liu, S., Papanikolaou, A. (2016) "Approximation of the added resistance of ships with small draft or in ballast condition by empirical formula". Published in Journal of Engineering for the Maritime Environment. Institution of mechanical engineers. DOI: 10.1177/1475090217710099
- Liu, S., Papanikolaou A., Bolbot V. (2016) "An Improved formula for Estimating the Added Resistance of Ships in Engineering Applications", Article in Journal of Marine Science and Application. DOI: 10.1007/s11804-016-1377-3.
- Liu, S., Papanikolaou, A. (2016). "Fast Approach to the estimation of the added resistance of ships in head waves", Ocean Engineering 112-211-225. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/journal/ocean-engineering>.
- Liu, S., Shang, B., Papanikolaou, A. (2016). et al. Improved formula for estimating added resistance of ships in engineering applications. J. Marine. Sci. Appl. 15, 442–451, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11804-016-1377-3>

Liu, S., Shang, B., Papanikolaou, A. (2020) “Regression analysis of experimental data for added resistance in waves of arbitrary heading and development of a semi-empirical formula”. *Ocean Engineering* 206 107357. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/journal/ocean-engineering>.

Liu, S., Zaraphonitis, G., Papanikolaou, A. (2015), “ Practical approach to the added resistance of ships in short waves’”. *International Ocean and Polar Engineering Conference* Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21-26, 2015. ISBN 978-1-880653-89-0, ISSN 1098-618. Retrieved from: [https://www.researchgate.net/publication/273342290\\_Practical\\_approach\\_to\\_the\\_added\\_resistance\\_of\\_a\\_ship\\_in\\_short\\_waves](https://www.researchgate.net/publication/273342290_Practical_approach_to_the_added_resistance_of_a_ship_in_short_waves)

MAN Marine engine program(2022). Retrieved from: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/marine-engine-programme>

Salvesen, N. (1972). “Added resistance of ships in waves,” *Journal of Hydronautics*.

Πολίτης, Γ. (2018). “Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου (5η έκδοση)”. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα.

Τσαγγάρης, Σ. (2016) “ Μηχανική των Ρευστών, 2η έκδοση ’’. Εκδόσεις Τσότρας.

Λουκάκης, Θ., & Μαλιάτσος, Κ. (2016). Πρόωση Πλοίου. Προγράμματα Η/Υ και οι εφαρμογές τους (Τόμος Γ.). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Retrieved from <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/462>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

Παρακάτω φαίνονται όλα τα μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούνται στην εργασία.

LBP Μήκος μεταξύ καθέτων.

B Πλάτος Πλοίου

T Βύθισμα Πλοίου

Cb Συντελεστής γάστρας.

Fr Συντελεστής Froude.

E1 Γωνία εισόδου ισάλου

E2 Γωνία εξόδου ισάλου

L<sub>E</sub> Μήκος εισόδου ισάλου

α<sub>t</sub> Συντελεστής Βυθίσματος.

α<sub>1</sub> Συντελεστής μορφής.

α<sub>2</sub> Συντελεστής ταχύτητας.

α<sub>3</sub> Συντελεστής Βυθίσματος.

λ Μήκος Κύματος.

ω Γωνιακή συχνότητα κυματισμού.

ω<sub>e</sub> Γωνιακή συχνότητα συνάντησης.

J<sub>1</sub> Συνάρτηση Bessel πρώτου είδους πρώτου βαθμού.

K<sub>1</sub> Συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους και πρώτου βαθμού.

K Κύματαριθμός.

K<sub>e</sub> Κύματαριθμός συνάντησης.

K<sub>yy</sub> Αδιάστατη διαμήκης μαζική ακτίνα.

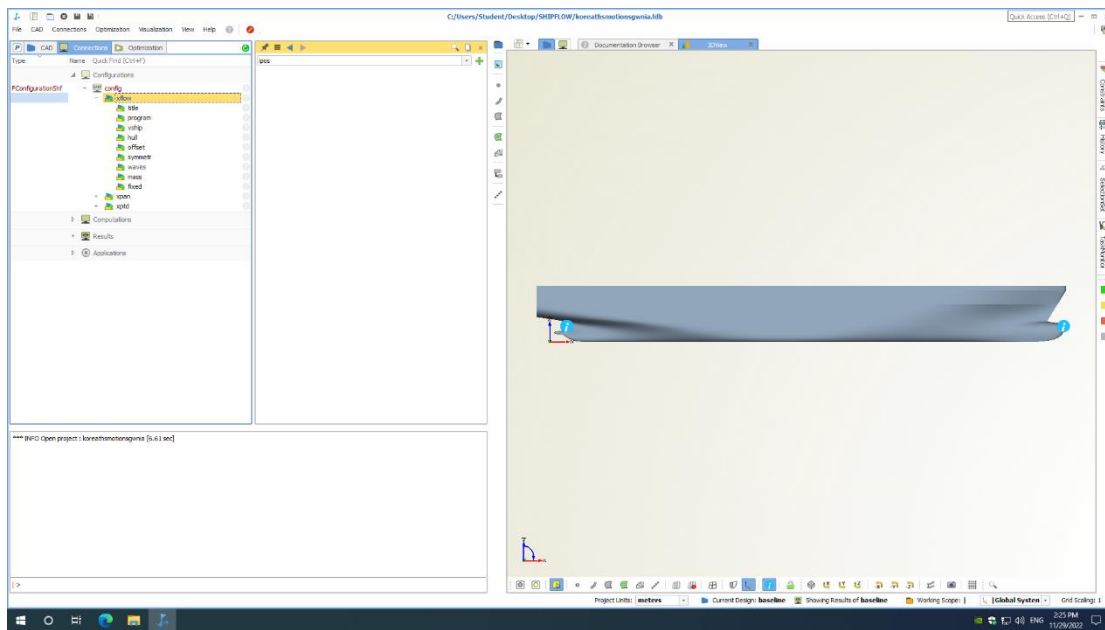


- $T_p$  Περίοδος Κορυφής(η zero crossing tsekare to)
- $H_s$  Σημαντικό ύψος κύματος.
- $R_{AW}$  Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού σε γραμμικούς κυματισμούς.
- $R_{AWM}$  Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού εξαιτίας των κυματισμών ακτινοβολίας που προκύπτουν από τις κινήσεις του πλοίου.
- $R_{AWR}$  Πρόσθετη αντίσταση κυματισμού εξαιτίας της διάθλασης των προσπίπτοντων κυματισμών.
- $r_{AW}$  Συντελεστής πρόσθετης αντίστασης.
- $\rho$  Πυκνότητα Θαλασσινού νερού.
- $g$  Επιτάχυνση της βαρύτητας.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SHIPFLOW.

### ΤΟ ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ SHIPFLOW

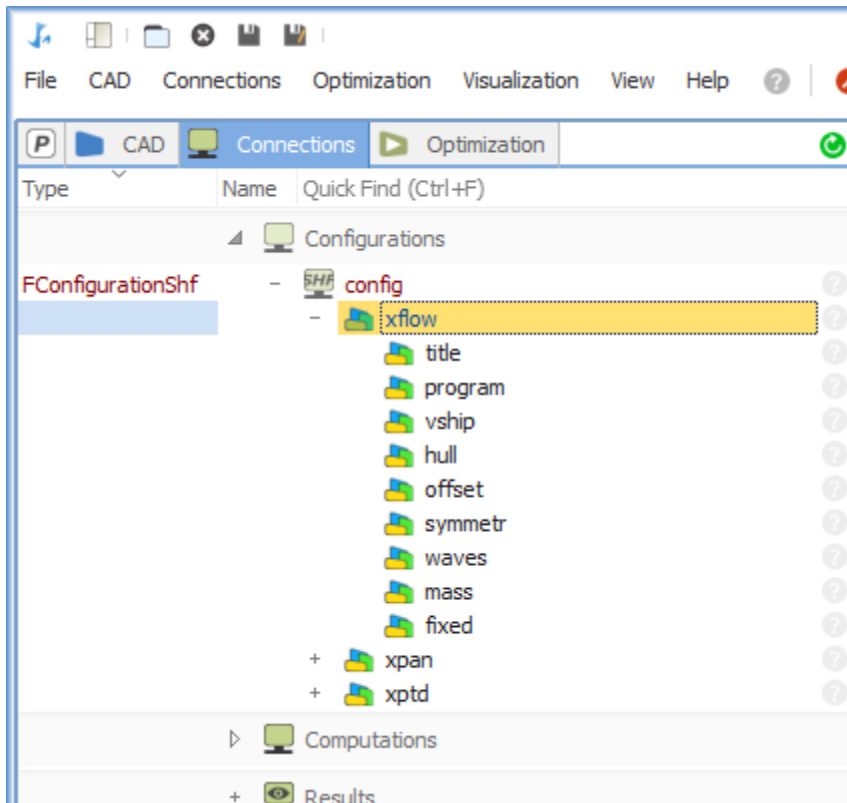
Παρακάτω παρατίθεται μια φωτογραφία απο το γραφικό περιβάλλον τους προγράμματος shipflow. Το πρόγραμμα Shipflow δίνει τις δυνατότητες στον χρήστη να έχει εικόνα του αρχείου iges που έχει εισάγει ώστε να μπορέσει να εντοπίσει τυχόν γεωμετρικές ανωμαλίες η κακοτεχνίες. Πρώτα εισάγουμε το αρχείο iges του KCS στο πρόγραμμα μέσω της εντολής Import μετά επιλέγουμε την εντολή IGES\_deprecated.ΠΡΟΣΟΧΗ όχι IGES. Και ύστερα επιλέγουμε το αρχείο kes2010.iges. Στην καρτέλα CAD καταγράφονται όλα τα γεωμετρικά στοιχεία που φέρει το εισαγόμενο αρχείο iges όπως surfaces,curves και points. Δίνεται στον χρήστη η δυνατότητα εάν επιθυμεί όταν εισάγει ένα αρχείο να μην εισάγει κάποια απο τις παραπάνω κατηγορίες γεωμετρικών στοιχείων.



Σχήμα 57 Το γραφικό περιβάλλον του Shipflow.

Στην καρτέλα Connections, στην υπο καρτέλα Configurations ο χρήστης καθορίζει τις επιλογές για την κατάσταση την οποία θέλει να μελετήσει. Στην φωτογραφία φαίνονται όλες οι εντολές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή των αρχείων shipflow. Στην καρτέλα <<title>> ο χρήστης επιλέγει το όνομα του αρχείου που θα περιλαμβάνει την δοκιμή. Στην καρτέλα program ο χρήστης επιλέγει ποιά απο τα υποπρογράμματα που αναφέρθηκαν προτέρω επιθυμεί να χρησιμοποιήσει. Στην καρτέλα vship καθορίζεται η ταχύτητα του πλοίου. Η ταχύτητα του πλοίου μπορεί να εισαχθεί είτε μετρούμενη σε m/s

είτε σε κόμβους Kn είτε ακόμα μπορεί να εισαχθεί ο αριθμός Froude της επιθυμητής κατάστασης πλεύσης. Στην καρτέλα hull ο χρήστης δίνει στο πρόγραμμα τον τύπο του πλοίου όσον αφορά τον αριθμό των γαστρών εάν δηλαδή το πλοίο είναι μονόγαστρο η δίγαστρο, ορίζει επίσης το είδος της επιφάνειας της θάλασσας όσον αφορά αν είναι ελεύθερη επιφάνεια η όχι καθώς και την ύπαρξη transom και την πυκνότητα του πλέγματος της γάστρας και της επιφανείας της θάλασσας. Προφανώς η επιλογή είναι αυτή της ελεύθερης επιφανείας. Στην καρτέλα offset ο χρήστης εισάγει στο πρόγραμμα τις 2 απαιτούμενες βασικές γεωμετρικές και υδροστατικές παραμέτρους που χρειάζεται το πρόγραμμα για να τρέξει μια δοκιμή και αυτές είναι το μήκος μεταξύ των καθέτων  $L_{bp}=230m$  και το βύθισμα στο οποίο θέλουμε να πραγματοποιήσουμε τη μελέτη μας Στην δική μας περίπτωση  $T=10.8 m$ . Δεν είναι απαραίτητη η εισαγωγή του πλάτους B. Στην καρτέλα symmetry ο χρήστης μπορεί να ορίσει το είδος της ροής γύρω από τη γάστρα. Χρησιμοποιείται για τις περιπτώσεις όπου μελετάται μη συμμετρική ροή γύρω από το πλοίο και αυτο συμβαίνει στις περιπτώσεις γωνιακής πρόσπτωσης κυματισμού. Όταν δεν χρησιμοποιείται αυτή η εντολή τότε το πρόγραμμα θεωρεί αυτόματα τη ροή συμμετρική. Η εντολή waves εισάγεται όταν γίνεται μελέτη περίπτωσης κυματισμών. Τα κύρια στοιχεία εισαγωγής είναι το είδος του κυματισμού π.χ regular η irregular , το μήκος κύματος length και την κατεύθυνση η γωνία του κυματισμού direction. Το ύψος κύματος δίνεται σε αδιάστατη μορφή διαιρεμένο με το μήκος του πλοίου  $H/L_{bp}=0.02174$ .



Σχήμα 58 Καρτέλα εντολών Shipflow.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του προγράμματος Shipflow είναι ότι λαμβάνει ορισμένα μεγέθη άλλοτε σε διαστατή μορφή άλλοτε διαιρεμένα με το  $L_{bp}$ ,  $L_{bp}^2$ ,  $L_{bp}^3$  ανάλογα τις μονάδες του μεγέθους δηλαδή μεγέθη όπως το μήκος κύματος  $\lambda$  (wavelength) και το ύψος κύματος (waveheight) και το πλάτος του πλοίου  $B$ , που έχουν μονάδες  $m$  διαιρούνται με το μήκος του πλοίου  $L_{bp}$ . Μεγέθη όπως η βρεχόμενη επιφάνεια  $Swett$  ( $m^2$ ) διαιρούνται με το  $L_{bp}^2$  ενώ ο όγκος υφάλων  $V$  διαιρείται με το  $L_{bp}^3$ . Η καινούρια έκδοση του προγράμματος Shipflow σε αντίθεση με τις προηγούμενες εκδόσεις απαιτεί από τον χρήστη να εισάγει πολυ μικρότερο αριθμό αδιάστατων παραμέτρων με αποτέλεσμα να καθίσταται πολύ πιο εύκολη η χρήση του σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις.

Παρακάτω παρατίθενται ορισμένα configurations για Clam water, για head waves, για γωνία κυματισμού  $150^\circ$  και για την περίπτωση της διαγωγής

#### Configuration για Calm Water.

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης εξαιτίας του κυματισμού είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της αντίστασης πλοίου σε ήρεμο νερό με την χρήση πάλι μόνο του προγράμματος motions7 και όχι κάποιου άλλου επιλυτή όπως xpan, xbound. Το configuration για τον υπολογισμό της αντίστασης σε ήρεμο νερό πρέπει να είναι όπως παραδίδεται από κάτω.

```

xflow
title( title = "CASE1" )
program( motions7 )
vship( vknot = 23.26, reflen = 230 )
hull( mono, fsflow, fine)
offset( iges = "kcs_iges.igs", lpp = 230, zori = 10.8 )
mass( zcg = 14.3, kyy = 57.87 )
fixed( surge )
end

```

```

xpan
iterati( maxit = 12 )
end

```

```

xptd
parall( nthread = 6 )
end

```

Configuration για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού για την περίπτωση των head seas ( $\theta=180^0$ ).

Για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίσει αυτόματα την τιμή με την χρήση της εντολής post και την εισαγωγή της καρτέλας ro στην οποία ο χρήστης μπορεί να εισάγει την τιμή της πρόσθετης αντίστασης η οποία υπολογίστηκε προηγουμένως με την χρήση του παραπάνω config.

```

xflow
title( title = "CASE1" )
program( motions7 )
vship( vknot = 23.26, reflen = 230 )
hull( mono, fsflow, fine )
offset( iges = "kcs_iges.igs", lpp = 230, zori = 10.8 )
waves( regular, leng = [1.5], heig = [0.02174], dire = [180] )
mass( zcg = 14.3, kyy = 57.87 )
fixed( surge )
end

```

```

xpan
iterati( maxit = 12 )
end

```

```

xptd
parall( nthread = 6 )
post(ro=1495507)

```

end

Configuration για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού για την περίπτωση των γωνιακών κυματισμών ( $\theta=150^0$ ) .

Για την περίπτωση των γωνιακών κυματισμών πρέπει να γίνεται χρήση της εντολής symmetry και να εισάγεται η εντολή nonsym που ορίζει στο πρόγραμμα την μορφή της ροής γύρω από την γάστρα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για την περίπτωση των γωνιακών κυματισμών καθώς η ροή του ρευστού γύρω από την γάστρα είναι μη συμμετρική. Όταν η εντολή δεν χρησιμοποιείται το πρόγραμμα θεωρεί αυτόματα συμμετρική ροή γι' αυτό στην περίπτωση των head και following seas δεν γίνεται χρήση της συγκεκριμένης εντολής επειδή η ροή είναι συμμετρική.

```
xflow
title( title = "CASE1" )
program( motions7 )
vship( vknot = 23.26, reflen = 230 )
hull( mono, fsflow, coarse )
offset( iges = "kcs_iges.iges", lpp = 230, zori = 10.8 )
symmetr( nosym )
waves( regular, leng = [1.5], heig = [0.02174], dire = [150] )
mass( zcg = 14.3, kyy = 57.87 )
fixed( surge )
end
```

```
xpan
iterati( maxit = 12 )
end
```

```
xptd
parall( nthread = 6 )
post(ro=1495507)
end
```

Configuration για τον υπολογισμό της πρόσθετης αντίστασης κυματισμού για την περίπτωση των head seas για βύθισμα  $T_m=9.2$  και έμπρυμνη διαγωγή  $\Delta T=0.5$  m.

Για την εκτέλεση υπολογισμών για την περίπτωση που το πλοίο έχει αρχική διαγωγή πρέπει όπως και στην περίπτωση του ισοβύθιστου πλοίου να προηγηθεί ο υπολογισμός της αντίστασης σε ήρεμο νερό και μετά να γίνει ο υπολογισμός της αντίστασης για κατάσταση κυματισμών.

Ήρεμο νερό

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται όταν γίνεται υπολογισμός για καταστάσεις όπου υπάρχει αρχική μόνιμη διαγωγή να μην γίνεται χρήση της επιλογής `zori` στην καρτέλα `offset` καθώς αυτή η εντολή χρησιμοποιείται μόνο για περιπτώσεις ισοβύθιστης κατάστασης πλευσης. Η είσοδος των στοιχείων που αφορούν την διαγωγή του πλοίου γίνεται μέσω της καρτέλας `ipos` και με την εισαγωγή των τιμών `ta` και `tf` όπου αυτές αναπαριστούν το πρυμναίο και το πωραίο βύθισμα αντίστοιχα.

#### Κατάσταση ήρεμου νερού.

```
xflow
title( title = "CASE1" )
program( motions7 )
vship( vknot = 23.26, reflen = 230 )
hull( mono, fsflow, fine)
offset( iges = "kcs_iges.igs", lpp = 230)
ipos(tf=8.95,ta=9.45)
mass( zcg = 14.3, kyy = 57.87 )
fixed( surge )
end
```

```
xpan
iterati( maxit = 12 )
end
```

```
xptd
parall( nthread = 6 )
end
```

#### Κατάσταση κυματισμών.

```
xflow
title( title = "CASE1" )
program( motions7 )
vship( vknot = 23.26, reflen = 230 )
hull( mono, fsflow, fine)
offset( iges = "kcs_iges.igs", lpp = 230)
ipos(tf=8.95,ta=9.45)
waves( regular, leng = [1.5], heig = [0.02174], dire = [180] )
mass( zcg = 14.3, kyy = 57.87 )
fixed( surge )
end
```

```
xpan
iterati( maxit = 12 )
end
```

```
xptd
```

```
parall( nthread = 6 )  
post(ro=1403517)  
end
```



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PROPULSION

### Λογισμικό Propulsion

Το λογισμικό Propulsion, που αναλύεται στο Τόμο Γ του βιβλίου «Πρόωση Πλοίου» (Λουκάκης & Μαλιάτσος, 2016), το οποίο αναπτύχθηκε από μελέτες του Θ. Λουκάκη και προγραμματίστηκε από τον Κ. Μαλιάτσο σε περιβάλλον MATLAB χρησιμοποιείται για προβλήματα πρόωσης και αποτελείται από τέσσερα προγράμματα. Στα πλαίσια της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν τα εξής τρία:

#### - Πρόγραμμα ShipRES

Στο πρόγραμμα αυτό παρατίθενται και χρησιμοποιούνται τα δεδομένα αντίστασης του υπό εξέταση πλοίου, τα οποία αποτελούν απαραίτητα στοιχεία εισόδου και για τα τρία επόμενα προγράμματα του λογισμικού. Στις εισόδους που περιέχονται στο πρόγραμμα περιλαμβάνονται τα απαραίτητα μεγέθη, που παρέχονται από δοκιμές επί προτύπου ή εναλλακτικά από μεθόδους υπολογιστικής ή εμπειρικής πρόβλεψης της αντίστασης.

Τα διανύσματα που παρέχονται ως είσοδοι είναι τα εξής:

Διάνυσμα **Ταχύτητας** που εκφράζει το μέγεθος VS μετρούμενο σε κόμβους.

Διάνυσμα **δύναμης ρυμούγκησης FS** για τις αντίστοιχες ταχύτητες του πρώτου πεδίου μετρούμενο σε kN.

**Διάνυσμα του μεγέθους nR** για τις αντίστοιχες ταχύτητες του πρώτου πεδίου.

**Διάνυσμα του μεγέθους t** για τις αντίστοιχες ταχύτητες του πρώτου πεδίου.

**Διάνυσμα του μεγέθους ποσοστού ομόρου w** για τις αντίστοιχες ταχύτητες του πρώτου πεδίου.

Σκοπός της εφαρμογής είναι να συγκεντρώσει τις μετρήσεις των προαναφερόμενων μεγεθών και να υπολογίζει τις αντίστοιχες συναρτήσεις  $y = f(Vs)$ ,  $y = Fs$ ,  $w$ ,  $t$ ,  $nR$ .

Ακολουθεί ενδεικτικό στιγμιότυπο από τη χρήση του προγράμματος Shipres. Τα δεδομένα εισαγωγής αφορούν την κατάσταση καθαρής γάστρας.

Measurement-based input:

Velocities (in knots):	[24.26,23.26,22.26,21.26,20.26,19.26]
$n_B$ :	[1.04229,1.04229,1.04229,1.04229,1.04229,1.04229]
$t$ :	[0.17351,0.17351,0.17351,0.17351,0.17351,0.17351]
$w$ :	[0.26232,0.26232,0.26232,0.26232,0.26232,0.26232]
$F_s$ :	[2192.41,1871.93,1746.68,1584.83,1401.99,1255.4]

OK Back Cancel

Σχήμα 59 Στιγμιότυπο εισαγωγής δεδομένων για την κατάσταση ρυπασμένης γάστρας

### Πρόγραμμα PropPERF

Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για την επίλυση των προβλημάτων πρόωσης πλοίου για δεδομένη διάμετρο και βήμα έλικας. Χωρίζεται σε δύο βασικές υποεφαρμογές, από τις οποίες χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη (**Calculate Individual Values**) για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής. Σημειώνεται πως για την εκτέλεση των υπό-εφαρμογών του προγράμματος PropPERF πρέπει πρώτα να έχουν συμπληρωθεί οι είσοδοι της ShipRES. Για τη λειτουργία του PropPERF χρησιμοποιούνται τρία πάνελ εισόδου.

Στο πρώτο πάνελ εισάγονται τα εξής διανύσματα:  
**Διάνυσμα συντελεστή προχώρησης  $J$**  της έλικας.

**Διάνυσμα  $K_T$**  της έλικας.

**Διάνυσμα  $10K_Q$**  της έλικας.

Στο δεύτερο πάνελ εισάγονται τα εξής διανύσματα:

**Διάνυσμα διαμέτρου  $D$**  της έλικας σε m.

**Διάνυσμα λόγου βήματος  $P/D$**  της έλικας.

**Διάνυσμα συντελεστή απόδοσης άξονα  $\eta_s$ .**

Στο τρίτο πάνελ επιλέγεται η εισαγωγή 2 εκ των 6 εξής διαθέσιμων μεταβλητών:  
**Μεταβλητή ταχύτητας  $V_S$  πλοίου** μετρούμενη σε κόμβους.

**Μεταβλητή στροφών  $n$**   
**κινητήρα** μετρούμενη σε rpm.

**Μεταβλητή ιπποδύναμης**

άξονα SHP μετρούμενη σε kW.

**Μεταβλητή απαιτούμενης ώσης T μετρούμενη σε kN.  
Μεταβλητή αδιάστατου μεγέθους J.**

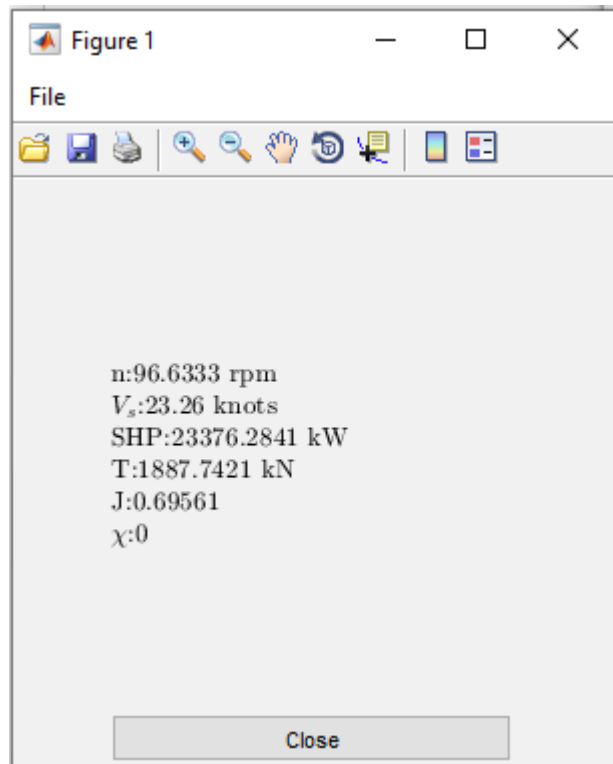
**Μεταβλητή αδιάστατου μεγέθους  $\chi$**  προσαύξησης αντίστασης λόγω συνθηκών πλοίου.

Παρακάτω φαίνονται 2 στιγμιότυπα, το πρώτο αφορά την εισαγωγή των απαραίτητων μεταβλητών στο πρόγραμμα Propref και το δεύτερο αφορά την εμφάνιση αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα.

The screenshot shows the 'prog\_properf2' software interface. It contains several input sections:

- Kt, Kq fits:** A section with a warning: "(You must provide at least 7 values) Kt and 10Kq must correspond to J values". It has three input fields:
  - J: [0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8]
  - Fit for  $K_t$ : [0.48,0.43,0.4,0.33,0.28,0.23,0.18,0.12]
  - Fit for  $10K_q$ : [0.67,0.62,0.55,0.49,0.42,0.36,0.28,0.22]
- Mandatory input for a given propeller:** Includes D (in m): 7.9, a radio button for "Use Reynolds", P/D: 0.95, and  $\eta_s$ : 0.98.
- User selected input (provide values for 2 out of 6 variables):** Includes  $V_s$ : 23.26, SHP (in kW): [empty], n (in RPM): [empty], T (in kN): [empty], J: [empty], and  $\chi$ : 0.
- Results:** A text box stating "The results are saved in the folder 'Results' in file: propperf\_result.txt".
- Buttons:** OK, Back, and Cancel.

Σχήμα 60 Εισαγωγή στοιχείων στο πρόγραμμα Propref για τον υπολογισμό του σημείου σχεδίασης της έλικας PD για την έλικα KP505



Σχήμα 61 Αποτελέσματα προγράμματος Propref.

### Πρόγραμμα PropDes

Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων πρόωσης που αφορούν αποκλειστικά και μόνο τις έλικες Wageningen σε αντίθεση με το πρόγραμμα το PropPerf το οποίο αφορά επίλυση προβλημάτων πρόωσης για κάθε είδους έλικας. Για να μπορέσει να εκτελέσει υπολογισμούς το πρόγραμμα PropDes απαιτείται και πάλι να έχει προηγηθεί η εισαγωγή των στοιχείων της εφαρμογής Shipres. Το πρόγραμμα Propdes έχει 2 υποεφαρμογές την εφαρμογή **Create Figures** και την εφαρμογή **Calculate Individual Values**. Η πρώτη εφαρμογή χρησιμοποιείται όταν ο χρήστης επιθυμεί να κάνει υπολογισμούς για ένα εύρος βημάτων P/D, διαμέτρων D, και στροφών nrpm. Η δεύτερη εφαρμογή είναι αυτή που χρησιμοποιήσαμε καθώς εμείς πραγματοποιήσαμε μελέτη για συγκεκριμένη έλικα Wageningen ( $Z=5, P/D=1.4, A_e/A_o=0.8, D=7.9m$ ). Στο Σχήμα 62 φαίνονται 2 πάνελ. Στο πρώτο πάνελ ο χρήστης πρέπει να εισάγει υποχρεωτικά τον αριθμό πτερυγίων Z, τον συντελεστή εκτεταμένης επιφανείας  $a_E$  και τον βαθμό απόδοσης του αξονικού συστήματος  $\eta_s$ . Στην καρτέλα **User Selected input** ο χρήστης πρέπει να εισάγει τουλάχιστον 4 μεταβλητές από αυτές που παρατίθενται στην καρτέλα. Μετά την εκτέλεση των υπολογισμών το πρόγραμμα θα εξάγει τις τιμές για τις υπόλοιπες 4 μεταβλητές Σχήμα63

prog\_propdes\_2

Mandatory input for a given propeller

Include Reynolds      z:        $a_e$  :        $\eta_S$  :

User selected input (provide values for 4 out of 8 variables):

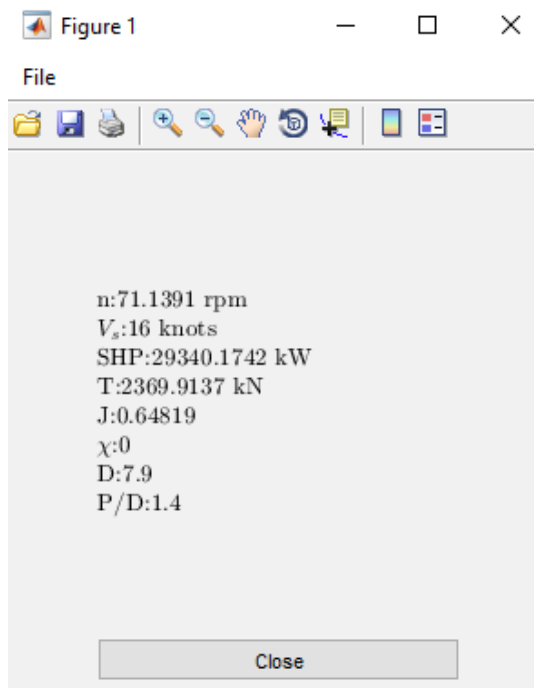
$V_s$  (in knots):       SHP (in kW):       n (in RPM):       T (in kN):

D (in m):       J:        $\chi$  :       PoD:

The results are saved in the folder "Results" at file:

OK      Back      Cancel

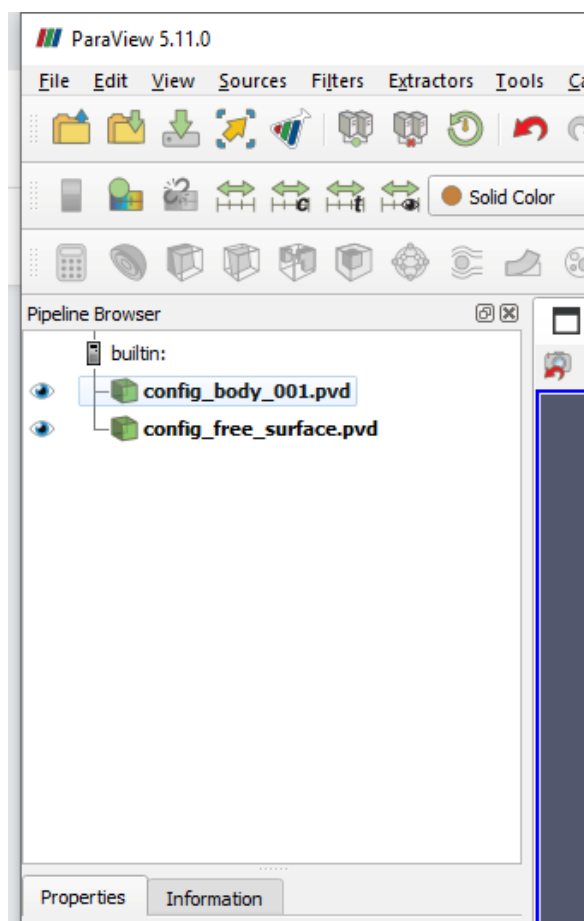
Σχήμα 62 Εισαγωγή τιμών στο πρόγραμμα Propdes.



Σχήμα 63 Αποτελέσματα προγράμματος PropDes για την ταχύτητα  $V_s=16kn$

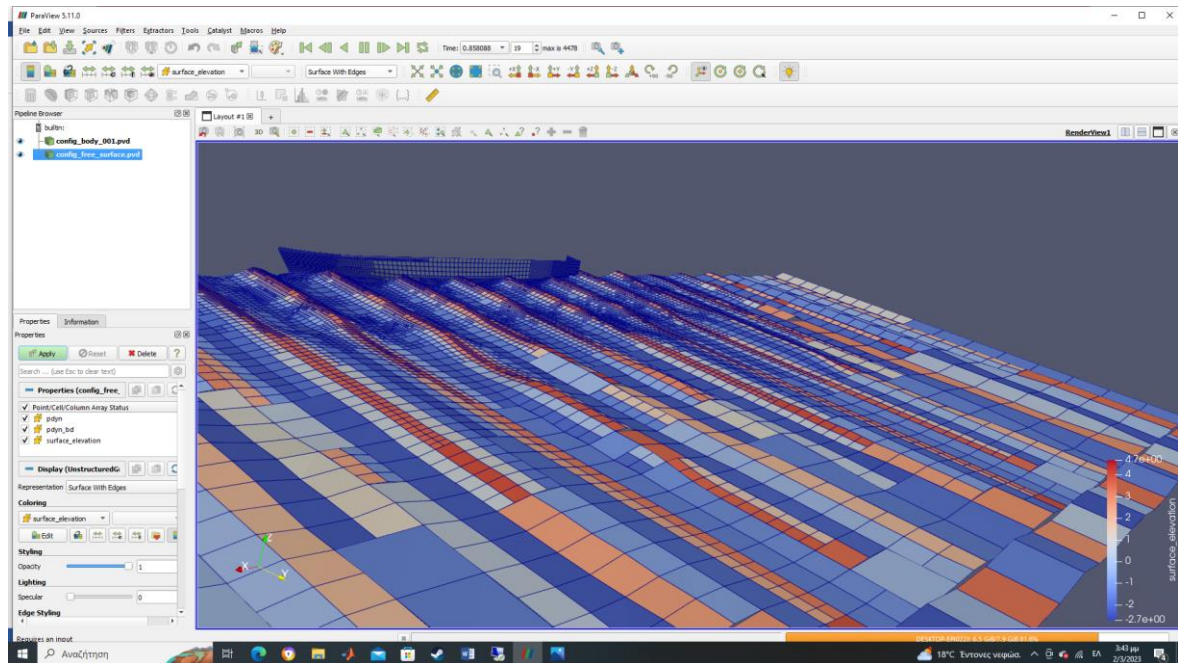
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PARAVIEW

Το πρόγραμμα Paraview είναι ένα πρόγραμμα γραφικών απεικονίσεων αποτελεσμάτων υπολογιστικών προγραμμάτων. Καλύπτει μια ευρεία γκάμα προγραμμάτων από προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων μέχρι προγράμματα CFD. Το πρόγραμμα προσφέρει στον χρήστη την δυνατότητα να έχει εικόνα όχι μόνο στιγμιότυπων αλλά και να παρακολουθήσει ολόκληρη την ροή της προσωμοίωσης. Για την περίπτωση του προγράμματος Shipflow το πρόγραμμα Paraview εισάγει αρχεία με την ονομασία `config_body_001.pvd` και `config_free_surface.pvd`. Ωστόσο το πρόγραμμα απαιτεί να έχει πρόσβαση στους φακέλους με ονομασία `body_001` και `free_surface`.



Σχήμα64 Η καρτέλα εντολών του προγράμματος Paraview.

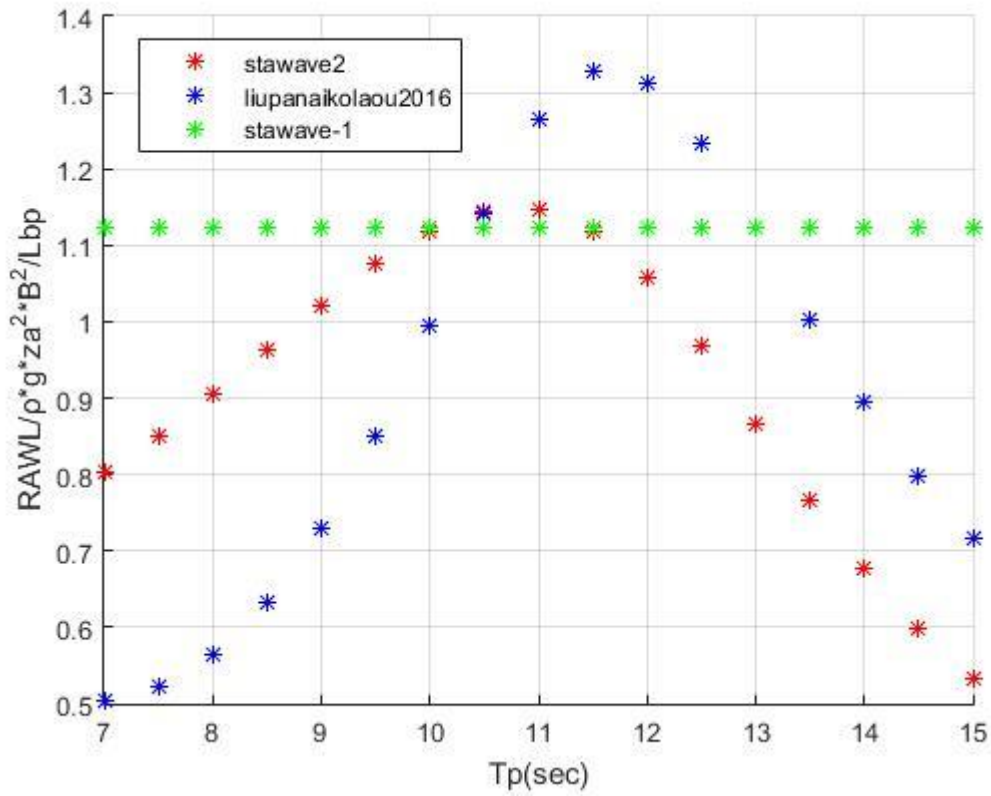
Το πρόγραμμα παρουσιάζει όλο το χρονικό της προσομοίωσης απο την αρχή μέχρι την τελευταία επανάληψη.



Σχήμα 65 Γραφική προσομοίωση των υπολογισμών στο Shipflow για head seas.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ ΠΡΟΣΘΕΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΣΕ ΤΥΧΑΙΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ.**

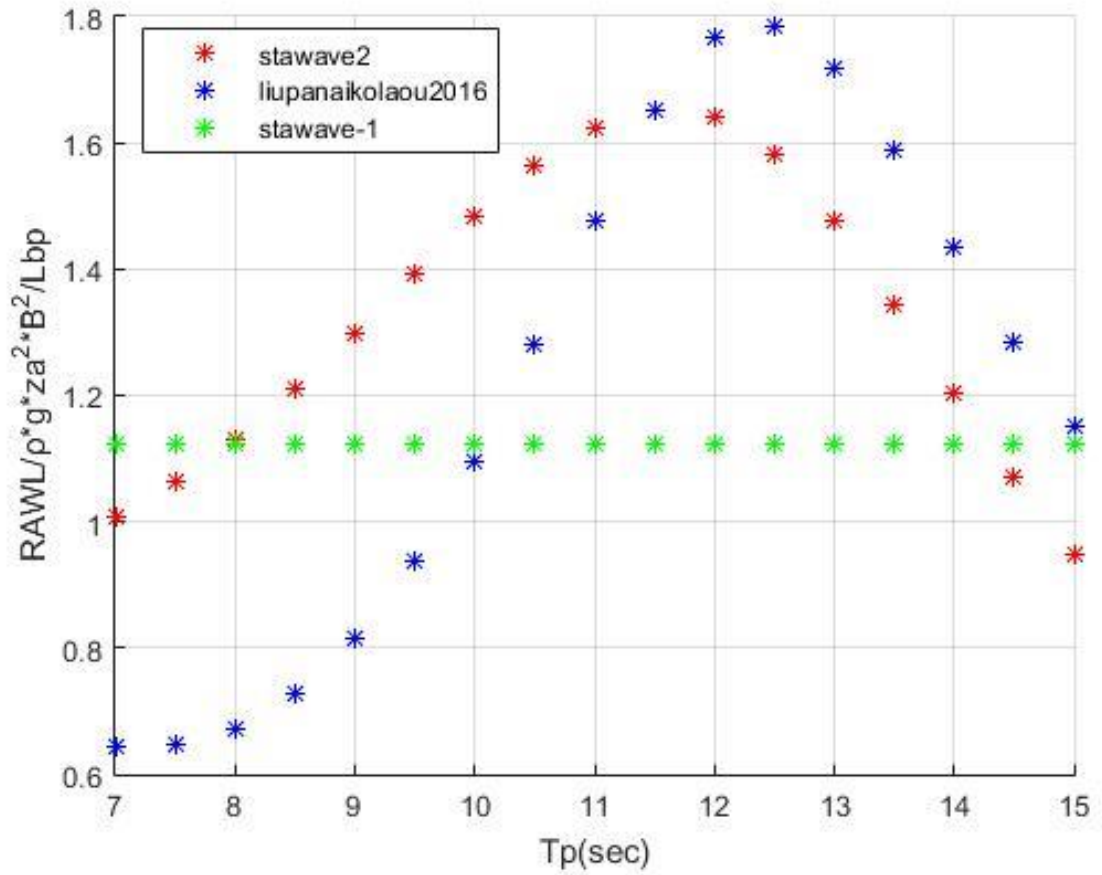
**Ταχύτητα  $V_s=8 \text{ kn}$**



Σχήμα 66 Η μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού σύμφωνα με τις σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2 και Liu&Paranikolaou για  $V_s=8 \text{ kn}$ .

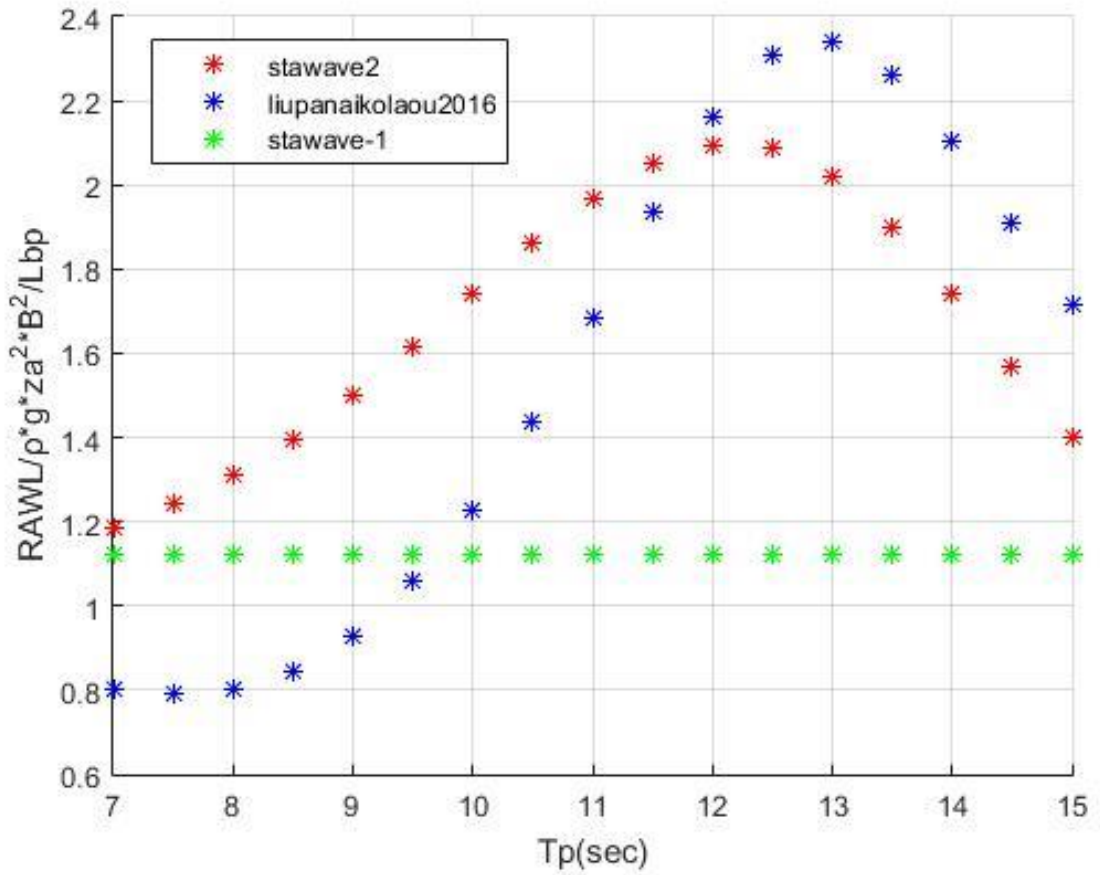


**Ταχύτητα Vs=12kn.**



Σχήμα 67Η μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού σύμφωνα με τις σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2 και Liu&Paranikolaou για Vs=12kn

**Ταχύτητα Vs=16 kn.**



Σχήμα 68 Η μέση πρόσθετη αντίσταση κυματισμού σύμφωνα με τις σχέσεις STAWAVE-1, STAWAVE-2 και Liu&Paranikolaou για Vs=16kn