



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ ΘΕΜΑ :

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΥΒΡΙΔΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ
ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Δ. ΚΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗΣ

επιβλέπων :

καθηγητής **Γ. ΤΖΑΜΠΙΡΑΣ**

ΑΘΗΝΑ 2009

1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΕΡΙΛΗΨΗΣ	Σελ. 2
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ Δ.Ε.	Σελ. 3
3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	Σελ. 4
3.1 ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	Σελ. 4
3.2 ΚΩΔΙΚΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	Σελ. 5
3.3 ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	Σελ. 10
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	Σελ. 12
4.1 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ	Σελ. 12
4.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	Σελ. 14
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	Σελ. 17
5.1 ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ (TEST CASES)	Σελ. 17
5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ WAVECUTS	Σελ. 24
5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ – ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	Σελ. 34
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	Σελ. 39
7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι : ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ Δ.Ε.	Σελ. 41
8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	Σελ. 42

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΣΚΟΠΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Απώτερος σκοπός της παρούσης εργασίας ήταν η παραγωγή ενός εξελιγμένου εργαλείου που θα μπορούσε να χρησιμοποιείται ως οδηγός για την υδροδυναμική σχεδίαση και βελτιστοποίηση των πλοίων. Για μια τέτοια χρήση όμως, απαιτούνται ικανοποιητικές λύσεις σε μικρό χρονικό διάστημα. Για αυτό τον λόγο στραφήκαμε προς μια υβριδική μεθοδολογία, η οποία συνδυάζει την ταχύτητα ενός κώδικα δυναμικής ροής, με την ακρίβεια των προγραμμάτων συνεκτικής - πραγματικής ροής. Η βασική ιδέα είναι η χρήση της γρήγορα παραγόμενης και σχετικά ορθής ελεύθερης επιφάνειας που υπολογίζεται με την θεώρηση της δυναμικής ροής, ως στερεό σύνορο για τον κώδικα πραγματικής ροής. Η επίλυση δε των εξισώσεων RANS με δεδομένη την ελεύθερη επιφάνεια, γίνεται επίσης πολύ γρήγορα, αφού πέραν της πιθανής πύκνωσης του πλέγματος, δεν απαιτείται άλλη ανανέωσή του. Τόσο ο κώδικας δυναμικής ροής όσο και της πραγματικής έχουν αναπτυχθεί στο ΕΜΠ από τον καθηγητή Γ.Τζαμπίρα, και μπορούν να αντιμετωπίσουν οποιαδήποτε γεωμετρία πλοίου.

Με τον όρο «δυναμική» εννοείται η ροή ιδανικού ασυμπίεστου ρευστού που δεν περιλαμβάνει φαινόμενα συνεκτικότητας. Τα φαινόμενα αυτά δεν επηρεάζουν πρακτικά τον σχηματισμό του κύματος στην πλώρη, ενώ αντίθετα στην πρύμνη και στον ομόρου αλληλεπιδρούν ισχυρά με την ελεύθερη επιφάνεια. Η μέθοδος επιλύει το πλήρες μη γραμμικό πρόβλημα, δηλαδή ικανοποιεί την κινηματική και την δυναμική συνθήκη πάνω στην πραγματική ελεύθερη επιφάνεια. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση τετράπλευρων επιφανειακών στοιχείων (panels), τα οποία κατασκευάζονται με χρήση του σύμμορφου μετασχηματισμού.

Ο κώδικας πραγματικής ροής χωρίζει το πρόβλημα σε τρεις περιοχές (3-blocks) ώστε τα πλέγματα που θα χρησιμοποιηθούν να λαμβάνουν υπόψη τους τις ιδιαιτερότητες τις κάθε περιοχής. Για την περιοχή του πλοίου χρησιμοποιούνται καμπυλόγραμμες συντεταγμένες που παράγονται και εδώ μέσω του σύμμορφου μετασχηματισμού. Ο κώδικας έχει την δυνατότητα να πυκνώνει αυτόματα τα πλέγματα, ώστε να επιτυγχάνονται λύσεις ανεξάρτητες από αυτό, ενώ επίσης μπορεί να πραγματοποιήσει αριθμητικά πειράματα αυτοπρόωσης και να υπολογίσει τις αλληλεπιδράσεις έλικας –πλοίου, μέσω της θεώρησης του δίσκου ορμής.

Για τον έλεγχο και την επιβεβαίωση της μεθόδου, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων ρυμούλκησης προτύπων πλοίων σε ήρεμο νερό. Τα πειράματα έγιναν στην πειραματική δεξαμενή του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του Ε.Μ.Π. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται σε δύο στάδια. Αρχικά η υπολογισμένη ελεύθερη επιφάνεια από το κώδικα δυναμικής ροής συγκρίνεται με κυματομορφές (wavecuts) μετρημένες στην δεξαμενή, ενώ στην συνέχεια τα αποτελέσματα των υπολογισμών του κώδικα συνεκτικής ροής συγκρίνονται με τις μετρήσεις αντίστασης. Επιπλέον γίνονται υπολογισμοί και για την πλήρη κλίμακα (πλοίο) έτσι ώστε να ελεγχθούν οι βασικές αρχές των εμπειρικών μεθόδων προεκβολής που χρησιμοποιούν οι δεξαμενές.

Τέλος παρατίθενται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και κάποιες σημαντικές παρατηρήσεις, ενώ δίδονται και τα μέχρι στιγμής συμπεράσματα για τις δυνατότητες της μεθόδου και τα όρια εφαρμογής της.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

3.1 ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

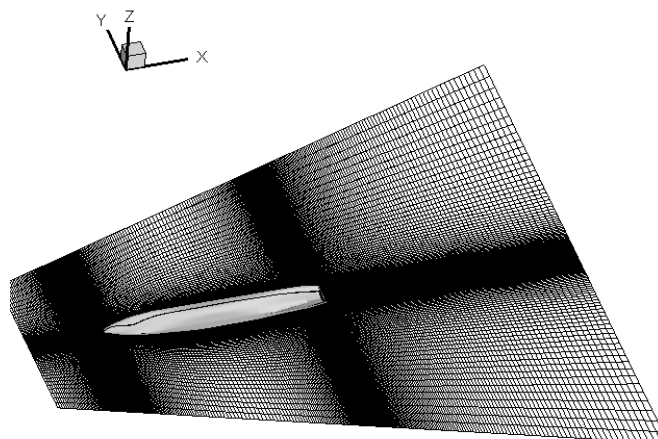
Μία αποτελεσματική προσέγγιση που έχει αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της ολικής αντίστασης των πλοίων βασίζεται στην αποσύζευξη του προβλήματος. Η ελεύθερη επιφάνεια υπολογίζεται από έναν κώδικα δυναμικής ροής, και στη συνέχεια οι εξισώσεις του συνεκτικού ρευστού επιλύονται κάτω απ' αυτήν. Αυτή η υβριδική διαδικασία είναι σημαντικά ταχύτερη από την επίλυση του πλήρους προβλήματος με τις έως τώρα γνωστές μεθόδους (surface tracking & surface capturing). Επιπλέον επιτρέπει την εφαρμογή πολύ πυκνότερων πλεγμάτων τα οποία είναι απαραίτητα για την επίτευξη αποτελεσμάτων ανεξάρτητων του πλέγματος. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που υιοθετούν αυτήν τη λογική [1,2] οι οποίες διαφέρουν στον τρόπο επίλυσης τόσο του δυναμικού όσο και του συνεκτικού προβλήματος. Σε κάθε περίπτωση η ελεύθερη επιφάνεια που προκύπτει από τη δυναμική λύση αγνοεί τις επιδράσεις της συνεκτικότητας στις περιοχές της πρύμνης και του ομόρου. Εξάλλου είναι αδύνατο, μέχρι σήμερα, να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της θραύσης των κυματισμών που εμφανίζεται γύρω από την πλώρη σε υψηλούς αριθμούς Froude. Συνεπώς η εφαρμοσιμότητα της μεθόδου εξαρτάται άμεσα από αυτές τις επιδράσεις.

Ο σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να δοκιμάσει την αποτελεσματικότητα μιας υβριδικής μεθόδου όπως η παραπάνω, με σκοπό να υπολογίσει τους συντελεστές αντίστασης και αυτοπρόωσης διαφόρων μορφών πλοίων. Τα πλοία αυτά συχνά δοκιμάζονται στην δεξαμενή του ΕΜΠ και η συνήθης απαίτηση είναι η βελτίωση των γραμμών στην πλώρη ή την πρύμνη, έτσι ώστε να επιτύχουν υψηλότερη ταχύτητα. Έχουν συνήθως μικρό συντελεστή γάστρας το οποίο ισοδυναμεί με ομαλές γραμμές στην περιοχή της πρύμνης το οποίο με την σειρά του επιτρέπει την εφαρμογή του κλασικού μοντέλου τύρβης με αξιοπιστία. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος επαληθεύεται με την διεξαγωγή πειραμάτων αντίστασης για τρία διαφορετικά μοντέλα στην πειραματική δεξαμενή. Στην συνέχεια υπολογισμοί αυτοπρόωσης πραγματοποιήθηκαν σε κλίμακα μοντέλου και πλοίου, ώστε να διερευνηθούν οι επιδράσεις κλίμακας στους συντελεστές αυτοπρόωσης, αλλά και να αξιολογηθούν οι εμπειρικοί τρόποι προεκβολής των μετρήσεων που χρησιμοποιούν οι δεξαμενές.

3.2 ΚΩΔΙΚΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

3.2.1 Γενικά

Η μέθοδος επίλυσης του ιδεατού (ατριβούς) μόνιμου πεδίου ροής γύρω από πλοίο βασίστηκε στην αναπαράσταση του μέσω επιφανειακών πηγών που καλύπτουν την επιφάνεια της γάστρας και την ελεύθερη επιφάνεια των κυματισμών. Η αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος ακολουθεί την κλασσική προσέγγιση των Hess&Smith [3] σύμφωνα με την οποία οι δύο επιφάνειες (γάστρας και κυματισμών) καλύπτονται από επίπεδα τετράπλευρα στοιχεία με σταθερή κατανομή πηγών. Οι εντάσεις των πηγών υπολογίζονται από την κινηματική συνθήκη μη εισχώρησης, δηλαδή η κάθετη ταχύτητα σε συγκεκριμένο σημείο («null point») κάθε στοιχείου να είναι ίση με το μηδέν. Η αναπαράσταση αυτή του πεδίου αντιστοιχεί στην λύση της εξίσωσης Laplace και ικανοποιεί την εξίσωση της συνέχειας σε κάθε σημείο του. Επιπλέον η ταχύτητα σε κάθε σημείο υπολογίζεται άμεσα ως το άθροισμα των επαγόμενων συνεισφορών όλων των στοιχείων. Θεωρητικά, όλη η ελεύθερη επιφάνεια πρέπει να καλύπτεται από στοιχεία ώστε η λύση να είναι ακριβής αλλά αυτό προφανώς είναι ανέφικτο. Ως εκ τούτου, το υπολογιστικό πεδίο εκτείνεται σε ένα περιορισμένο χώρο γύρω από το πλοίο, σχήμα 1, που επιλέγεται έτσι ώστε ο υπολογισμός της γεωμετρίας του κύματος κοντά στο πλοίο να μην επηρεάζεται πρακτικά από τη θέση των εξωτερικών συνόρων



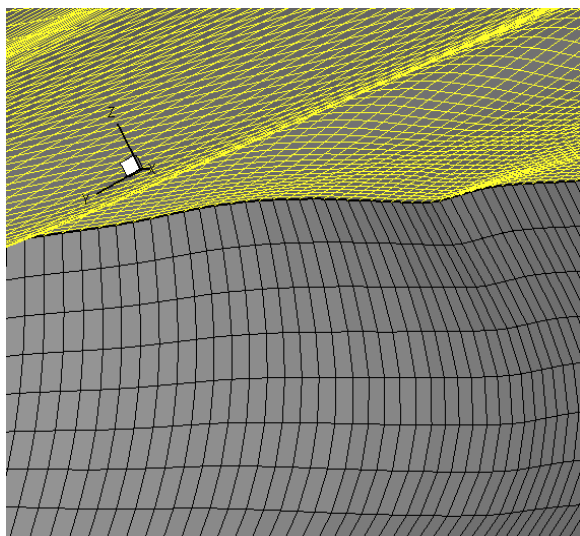
Σχήμα 1 : Επιφανειακά στοιχεία

3.2.2 Η κατασκευή των panels

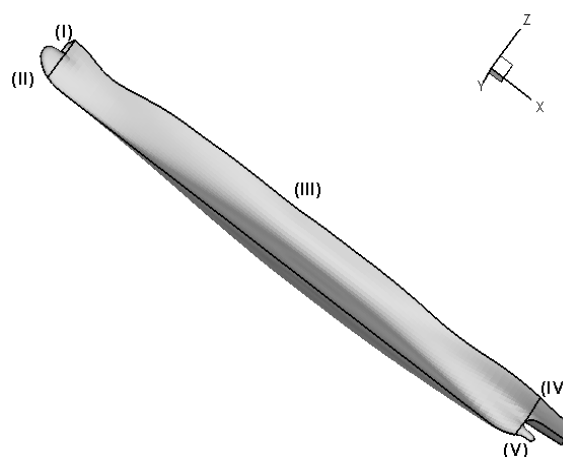
Η γεωμετρική κατασκευή των επιφανειακών στοιχείων (panels) αποτελεί ένα βασικό υπολογιστικό βήμα στην όλη διαδικασία, γιατί η επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος απαιτεί συνεχή ανανέωση της ελεύθερης επιφάνειας και ως εκ τούτου ένα γρήγορο και ακριβή τρόπο επαναπροσδιορισμού τους. Στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται ακολουθείται η αναπαράσταση των εγκάρσιων τομών του πλοίου με την μέθοδο του σύμμορφου μετασχηματισμού. Η εξωτερική επιφάνεια του πλοίου, συμπεριλαμβανομένου και του βολβού, περιγράφεται από τις συντεταγμένες σημείων σε συγκεκριμένες εγκάρσιες τομές. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο σύμμορφος μετασχηματισμός κάθε τομής στο μοναδιαίο κύκλο, σύμφωνα με τη συνάρτηση :

$$z = c_0 + c_1\zeta + \sum_{n=1}^N c_n\zeta^{-n} \quad (1)$$

όπου ζ είναι το μιγαδικό επίπεδο του μοναδιαίου κύκλου, z το επίπεδο της εγκάρσιας τομής και a_n οι συντελεστές του σύμμορφου μετασχηματισμού που υπολογίζονται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας [4]. Κάνοντας χρήση κυβικής παρεμβολής μεταξύ των συντελεστών των αρχικών δεδομένων, προκύπτουν άμεσα οι συντελεστές που παράγουν ενδιάμεσες εγκάρσιες τομές, ώστε τελικά να επιτευχθεί η πυκνή διαμήκης διακριτοποίηση που απαιτείται για την ακριβή αναπαράσταση των κυματισμών. Παράλληλα, η αναλυτική αναπαράσταση (1) προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για τον γεωμετρικό προσδιορισμό της τομής του κύματος με την επιφάνεια της γάστρας, σχήμα 2, καθώς και τον τρόπο διαμέρισης των σημείων πάνω σε κάθε εγκάρσια τομή.

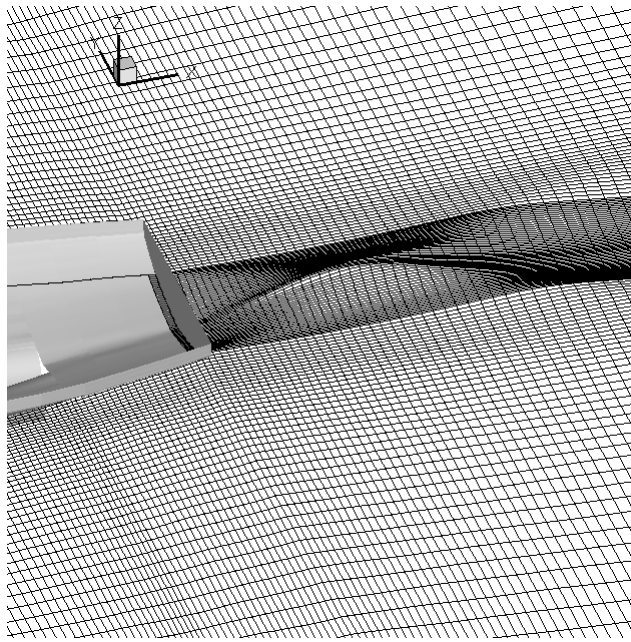


Σχήμα 2



Σχήμα 3

Στη γενικότερη περίπτωση η γάστρα του πλοίου χωρίζεται σε πέντε επιμέρους περιοχές, όπως φαίνεται στο σχήμα 3: στη πλώρη (I), τον βολβό (II), την περιοχή που καθορίζεται μεταξύ της βάσης του βολβού και τον νομέα ασυνέχειας (III), την πρύμνη (IV) και την πλήμνη της έλικας (V). Σε κάθε περιοχή χρησιμοποιείται διαφορετικός αριθμός σημείων N_I κατά το εγκάρσιο και αν υποθέσουμε ότι η διαμέριση κατά μήκος περιλαμβάνει N_K σημεία, τότε ο αριθμός των στοιχείων μίας συγκεκριμένης περιοχής είναι προφανώς $(N_I-1)*(N_K-1)$. Στην παρούσα μελέτη η επιλογή της εγκάρσιας διαμέρισης είναι τέτοια ώστε να αντιστοιχεί σε ίσα επικαμπύλια μήκη μεταξύ σημείων. Σε μια εγκάρσια τομή της ελεύθερης επιφάνειας επιλέγεται ενιαία διαμέριση N_I με δεδομένη την απόσταση μεταξύ του πρώτου σημείου πάνω στη γάστρα και του επόμενου. Βρίσκεται τότε ο λόγος που αντιστοιχεί σε γεωμετρική πρόοδο της διαμέρισης, και επομένως η εγκάρσια διάσταση των στοιχείων μεταβάλλεται εκθετικά. Στην ειδική περίπτωση που το πλοίο έχει πρύμνη «καθρέφτη» που δεν βυθίζεται στο νερό, η ελεύθερη επιφάνεια μετά τη γάστρα περιλαμβάνει και αριθμό σημείων ίσο με αυτό της πρύμνης, σχήμα 4.



Σχήμα 4.

3.2.3 Ο αλγόριθμος επίλυσης

Για την επίλυση του προβλήματος γίνεται χρήση δύο συστημάτων συντεταγμένων (x, y, z): πρώτον ενός σωματόδετου το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή των στοιχείων (panels), και κατά δεύτερον ενός απόλυτου συστήματος συντεταγμένων, με $z=0$ στην αδιατάρακτη ελεύθερη επιφάνεια, στο οποίο διατυπώνονται όλες οι εξισώσεις του ρευστού. Οι συντεταγμένες μπορούν να μετασχηματίζονται μεταξύ των συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη πιθανή παράλληλη βύθιση (sinkage) και διορθώσεις διαγωγής (trim). Τόσο η κινηματική όσο και η δυναμική συνοριακή συνθήκη ικανοποιούνται στην ελεύθερη επιφάνεια στο τέλος μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Τα κύρια βήματα του αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα :

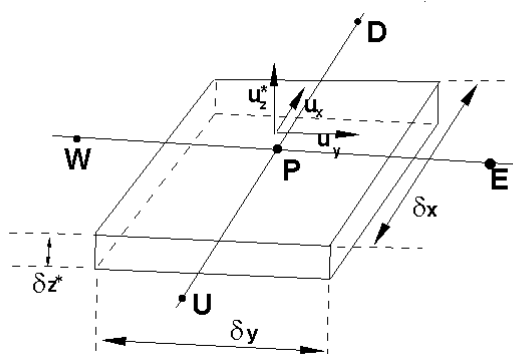
1. Για γνωστή γεωμετρία της ελεύθερης επιφάνειας, λύνεται η εξίσωση Laplace η οποία ικανοποιεί την κινηματική συνοριακή συνθήκη στην γάστρα του πλοίου και στην επιφάνεια του ρευστού (συνθήκη με εισχώρησης), όπως περιγράφεται και στην παράγραφο 2.1.
2. Λύνεται η κατακόρυφη εξίσωση της ορμής, εισάγοντας το διάνυσμα της μεταβολής της πίεσης (pressure gradient) στην ελεύθερη επιφάνεια που υπολογίζεται από το Βήμα 1 χρησιμοποιώντας την εξίσωση Bernoulli. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζονται οι αντίστοιχες συνιστώσες της ταχύτητας.
3. Επαναπροσδιορίζεται η ελεύθερη επιφάνεια μέσω μιας Lagrangian - Eulerian διαδικασίας σε δύο στάδια, η οποία χρησιμοποιεί τις συνιστώσες της ταχύτητας που υπολογίσθηκαν στο Βήμα 2.
4. Τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση, που συμβαίνει όταν η δυναμική συνοριακή συνθήκη ικανοποιεί ένα προκαθορισμένο κριτήριο.

Αναλυτικότερα, μετά τον υπολογισμό των πηγών κατά Hess & Smith [3] (Βήμα 1), οι συνιστώσες της ταχύτητας (u_x, u_y, u_z) υπολογίζονται στο σημείο ελέγχου κάθε επιφανειακού στοιχείου, και η ολική πίεση εξάγεται από την εξίσωση Bernoulli. Η ολική πίεση είναι το άθροισμα της στατικής πίεσης p_s και του υδροστατικού όρου ρgh . Προφανώς, για μια αυθαίρετη επιφάνεια η p_s είναι διάφορη της περιβάλλουσας ατμοσφαιρικής πίεσης (η οποία θεωρείται ίση με μηδέν). Αυτή η διαφορά χρησιμοποιείται σαν όρος πηγής για τον υπολογισμό της κατακόρυφης ταχύτητας u_z^* στην ελεύθερη επιφάνεια, μέσω της επίλυσης της εξίσωσης ορμής μη συνεκτικού ρευστού :

$$\rho \left[\frac{\partial u_x u_z^*}{\partial x} + \frac{\partial u_y u_z^*}{\partial y} + \frac{\partial u_z u_z^*}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p^*}{\partial z} \quad (2)$$

Η εξίσωση (2) επιλύεται αριθμητικά μετά από ολοκλήρωση στους επιφανειακούς όγκους ελέγχου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Το αποτέλεσμα αυτής της ολοκλήρωσης είναι ένα σύνολο από μη-γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις που αναφέρονται στα επιφανειακά στοιχεία και έχουν την παρακάτω μορφή :

$$A_P u_{zP}^* = A_E u_{zE}^* + A_W u_{zW}^* + A_U u_{zU}^* + A_D u_z^* + (\delta x \delta y) (p_P^* - \rho g z_P) \quad (3)$$

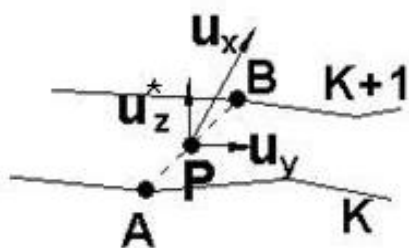


Σχήμα 5 : Επιφανειακός όγκος ελέγχου

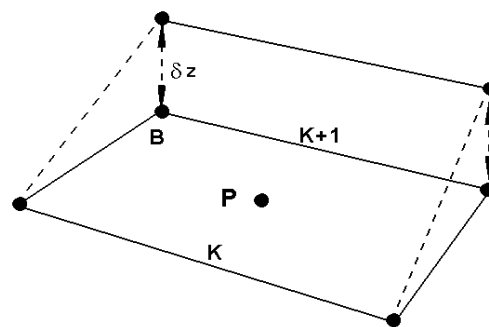
Η κατακόρυφη πλευρά δz^* του όγκου ελέγχου στο σχήμα 5 είναι μια αυθαίρετη παράμετρος που ελέγχει την σύγκλιση της μεθόδου. Εμφανίζεται στους όρους διάχυσης A_i της εξίσωσης (3), αλλά ουσιαστικά καθορίζει την επίδραση του όρου μεταβολής της πίεσης. Μετά από αρκετές αριθμητικές δοκιμές σε διάφορα πλοία και αριθμούς Froude, βρέθηκε πως το δz^* πρέπει να παίρνει τιμές ίδιας τάξης με το $(\delta x \delta y)$. Οι συντελεστές διάχυσης μπορούν να προσεγγιστούν από οποιοδήποτε άναντες σχήμα διαφορών ανώτερης τάξης. Παρόλα αυτά, κατά την διεύθυνση της ροής (διεύθυνση UD) χρησιμοποιήθηκε το μηδενικής τάξης άναντες σχήμα για να αποφευχθούν κατά το δυνατό κατάντη ανακλάσεις. Αυτό συνεπάγεται πως αρκεί μόνο μία σάρωση του χώρου υπολογισμού για να βρεθεί η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας, αλλά απαιτείται μεγάλη διακριτοποίηση στην διαμήκη διεύθυνση, ώστε να περιγράφεται ικανοποιητικά η γεωμετρία της ελεύθερης επιφάνειας.

Μετά τον υπολογισμό της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας, η καινούρια ελεύθερη επιφάνεια υπολογίζεται με την βοήθεια δύο διορθωτικών βημάτων [5]. Πρώτον, ακολουθώντας τις τοπικές ροϊκές γραμμές, τα σημεία μιας εγκάρσιας τομής της ελεύθερης επιφάνειας, μεταφέρονται στην επόμενη, κατά το διάνυσμα της ταχύτητας. Έτσι δημιουργείται μια νέα τομή, σχήμα 6.

Στη συνέχεια η τομή αυτή διορθώνεται ώστε η συνολική παροχή διά του επιφανειακού στοιχείου να είναι ίση με το μηδέν (κινηματική συνθήκη), σχήμα 7.



Σχήμα 6



Σχήμα 7

Επειδή η ακρίβεια των υπολογισμών εξαρτάται σημαντικά από τον αριθμό των panels, για να μειώσουμε την υπολογιστική προσπάθεια μπορεί η επίλυση να ξεκινήσει με ένα αραιό πλέγμα, το οποίο όμως με σταδιακή πύκνωση θα φτάνει στον μέγιστο αριθμό panels που έχει καθοριστεί στα δεδομένα. Εκτός των γεωμετρικών παρεμβολών δεν υπάρχει δυσκολία στο να περάσεις από το ένα πλέγμα στο αμέσως πυκνότερο, λόγω της ανάλυσης η οποία χρησιμοποιείται.

3.2.4 Υπολογισμός sinkage & trim

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παράλληλης βύθισης και της δυναμικής διαγωγής, όποτε αυτά ζητούνται (runs with free trim & sinkage), βασίζεται σε μια επαναληπτική διαδικασία εξισορρόπησης του βάρους του πλοίου, από τις ασκούμενες δυνάμεις και ροπές στην γάστρα. Οι κατακόρυφες δυνάμεις και ροπές πάνω στην γάστρα, υπολογίζονται όπως και η αντίσταση κυματισμού, δηλαδή με ολοκλήρωση της στατικής πίεσης στα panels της γάστρας.

Η διαδικασία ξεκινά μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων όπου αυτά κρατούνται σταθερά ώστε να διαμορφωθεί μια πρώτη ελεύθερη επιφάνεια. Για να εξασφαλιστεί η σύγκλιση γίνεται χρήση συντελεστών υποχαλάρωσης στον υπολογισμό των απαραίτητων μεταβολών, ενώ η διόρθωση του βυθίσματος και της διαγωγής γίνεται κάθε 25 βήματα διόρθωσης της ελεύθερης επιφάνειας, έτσι ώστε η τελευταία να προλαβαίνει να συγκλίνει.

Η εξισορρόπηση επιτυγχάνεται διορθώνοντας τις τιμές του βυθίσματος και της διαγωγής από τους υδροστατικούς τύπους (4) & (5) :

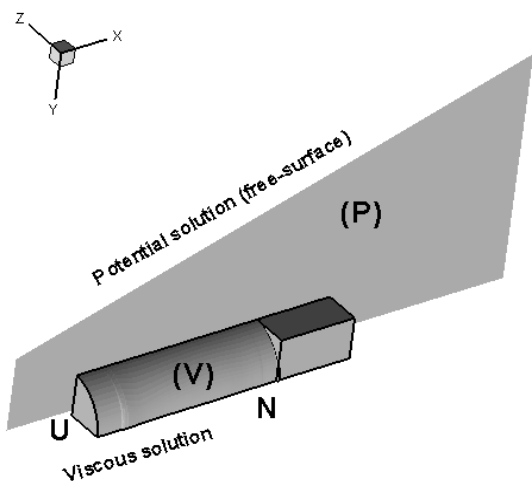
$$\delta h = r_h \frac{W - D}{\gamma A_w} \quad (4)$$

$$\tan(\theta) = r_\theta \frac{D(x_w - x_B)}{\gamma I_{yy}} \quad (5)$$

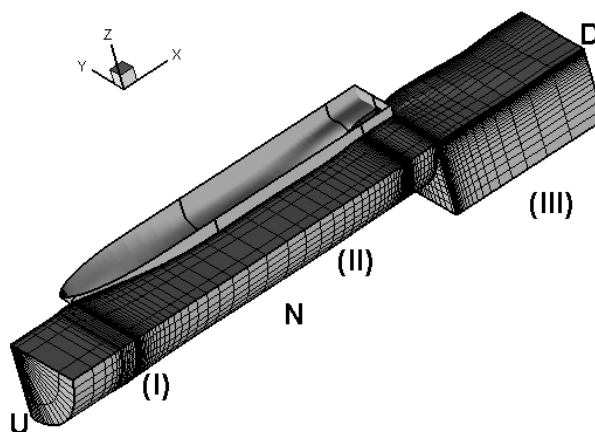
Όπου : W το εκτόπισμα του πλοίου υπολογίζεται στην πρώτη επανάληψη (ήρεμο νερό), D : η άντωση υπολογίζεται με ολοκλήρωση της στατικής πίεσης στα panels της γάστρας, γ : το ειδικό βάρος του ρευστού, A_w το εμβαδό της ισάλου επιφάνειας, I_{yy} η δεύτερη ροπή της ισάλου επιφάνειας ως προς τον εγκάρσιο κύριο άξονα, x_w η διαμήκης θέση του κέντρου βάρους του πλοίου, πρέπει να δίδεται, x_B η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης, υπολογίζεται από θεώρημα ροπών στα ύφαλα, r_h , r_θ συντελεστές υποχαλάρωσης.

3.3 ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Η λύση του προβλήματος δυναμικής ροής χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της ελεύθερης επιφάνειας (P) γύρω από την γάστρα (σχήμα 8), όπου στην συνέχεια επιλύονται οι εξισώσεις συνεκτικής ροής σε περιορισμένο χωρίο (V). Δυο συστήματα συντεταγμένων χρησιμοποιούνται, τα οποία είναι το απόλυτο για την δυναμική ροή, και ένα σωματόδετο για τους υπολογισμούς του αληθινού ρευστού. Για να επιτύχουμε όσο το δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα τα εξωτερικά σύνορα (U & N) του χωρίου επίλυσης, τοποθετούνται κοντά στην επιφάνεια της γάστρας.



Σχήμα 8



Σχήμα 9

Ο κώδικας επίλυσης της συνεκτικής ροής περιγράφεται [5] και εφαρμόζεται για την επίλυση των RANS εξισώσεων κάτω από τη ελεύθερη επιφάνεια. Στην γενική περίπτωση η μέθοδος χρησιμοποιεί τρία πεδία (σχήμα 9), τα οποία είναι το πρώτο (I) γύρω από την πλώρη και το μεσαίο τμήμα της γάστρας, το δεύτερο (II) γύρω από την πρύμνη και το τρίτο (III) γύρω από το καθρέφτη και την περιοχή του ομόρου. Στις περιοχές ένα και δύο ένα πλέγμα τύπου H-O κατασκευάζεται μέσω του σύμμορφου μετασχηματισμού [5]. Ενώ στην τρίτη περιοχή καλύπτεται από ένα καρτεσιανό πλέγμα.

Οι εξισώσεις RANS επιλύονται σε μη ορθογώνιο πλέγμα εφαρμόζοντας ορθογώνιες καμπυλόγραμμες συντεταγμένες. Η στροβιλότητα λαμβάνεται υπόψη εφαρμόζοντας το βασικό μοντέλο τύρβης k-ε κάνοντας χρήση wall functions [6]. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή η επιλογή του εν λόγω μοντέλου αιτιολογείται από τον χαμηλό συντελεστή γάστρας των υπό μελέτη πλοίων, ο οποίος περιορίζει την μη ισοτροπική στροβιλότητα στην περιοχή της πρύμνης. Οι συναρτήσεις ορμής ολοκληρώνονται σε μετατοπισμένους (staggered) όγκους ελέγχου. Στις προκύπτουσες μη γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις οι όροι μεταφοράς υπολογίζονται εφαρμόζοντας το δευτεροτάξιο σχήμα διαφορών. Οι όροι μετάδοσης (convection terms) στις δύο κάθετες διευθύνσεις προσεγγίζονται από το δευτεροτάξιο σχήμα MUSCL, κάνοντας χρήση του limiter MINMOD [7], ενώ στην διαμήκη κύρια διεύθυνση εφαρμόζεται το πρωτοτάξιο άναπτες σχήμα διαφορών. Για τον υπολογισμό του πεδίου των πιέσεων χρησιμοποιείται μια διόρθωση με βάση τον αλγόριθμο SIMPLE [8]. Οι συνοριακές συνθήκες για τις ταχύτητες και τις πιέσεις στα χωρία U και N υπολογίζονται από την λύση της

δυναμικής ροής (θέτοντας $k=\varepsilon=0$). Στην ελεύθερη επιφάνεια οι όροι μετάδοσης τίθενται ίσοι με το μηδέν, ενώ η συνθήκη Neuman εφαρμόζεται για την πίεση. Στο πίσω άκρο (σύνορο εξόδου) εφαρμόζονται συνθήκες ανοιχτού συνόρου [5].

Οι εξισώσεις RANS επιλύονται πρώτα στο χωρίο I και στην συνέχεια στα II και III. Αυτή η διάζευξη βοηθάει στην επίτευξη πυκνών πλεγμάτων και στα δύο χωρία. Τα χωρία αλληλεπικαλύπτονται και οι αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή. Ένας επαναληπτικός αλγόριθμος εφαρμόζεται για την επίλυση των εξισώσεων ορμής και $k-\varepsilon$, ενώ μια ελλειπτική επίλυση εφαρμόζεται για να ανανεώσει το πεδίο πιέσεων σε όλο το χωρίο μετά την ολοκλήρωση μιας πλήρους επανάληψης. Σύγκλιση επιτυγχάνεται όταν η αδιάστατη ορμή και τα υπόλοιπα μάζας ικανοποιούν ένα προκαθορισμένο κριτήριο, το οποίο εξασφαλίζει ότι τουλάχιστον τα ολοκληρώματα των δυνάμεων έχουν συγκλίνει. Μια διαδικασία σταδιακής πύκνωσης του πλέγματος μπορεί να εφαρμοστεί ώστε να μελετηθούν οι επιδράσεις της πυκνότητας του πλέγματος στα υπολογισθέντα αποτελέσματα [8].

Για να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά αυτοπρόωσης υιοθετείται η προσέγγιση του δίσκου ορμής σε συνδυασμό με ένα μοντέλο ανωστικής γραμμής [9]. Σύμφωνα με αυτήν την μέθοδο η επίδραση της προπέλας λαμβάνεται υπόψη μέσω των όρων f_1 (αξονική συνιστώσα) f_2 και f_3 (εγκάρσιες συνιστώσες) στους όρους πηγής των εξισώσεων ορμής, υποθέτοντας πως ο προωστήρας έχει άπειρο αριθμό πτερυγίων (ορισμός του δίσκου ορμής). Το ολοκληρωμένο αποτέλεσμα των $f_{1,2,3}$ εμφανίζεται σαν μια εξωτερική δύναμη η οποία συμπεριλαμβάνεται στον όρο πηγής της εξίσωσης. Οι επακόλουθες δυνάμεις $F_{1,2,3}$ μπορούν να εκφραστούν ως [10] :

$$F_1 = C_1 E \Gamma(r) \quad (6)$$

$$F_{2,3} = C_{2,3} E \frac{\Gamma(r)}{r} \quad (7)$$

Όπου E = το εμβαδό της τομής του δίσκου της έλικας με τους αντίστοιχους όγκους ελέγχου; $\Gamma(r)$ = η κατανομή της στροβιλότητας κατά μήκος του πτερυγίου σύμφωνα με την θεωρία ανωστικής γραμμής (lifting line); C_1 = συνάρτηση εξαρτώμενη από την ολική δύναμη ώσης και την διαμήκη κατανομή της δύναμης και $C_{2,3}$ = συνάρτηση εξαρτώμενη από την ροπή της προπέλας και την διαμήκη κατανομή της δύναμης [5].

Οι δυνάμεις του σώματος στην αξονική και στην περιφερική διεύθυνση εμπεριέχονται στην εξίσωση ορμής, και για αυτό η λύση στην περιοχή της πρύμνης αλλάζει κυρίως λόγω της επίδρασης στο πεδίο των πιέσεων. Μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων όπου η ώση τίθεται επανειλημμένα ίση με την τιμή της αντίστασης, επιτυγχάνεται αυτοπρόωση όταν πια η ώση της προπέλας γίνει σταθερά ίση με την αντίσταση τις γάστρας. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται μόνο στα χωρία II και III. Όταν το πρόβλημα συγκλίνει το μοντέλο ανωστικής γραμμής εφαρμόζεται για να υπολογιστεί ο βέλτιστος λόγος βήματος, οι στροφές της προπέλας, καθώς και η απαιτούμενη ισχύς (DHP). Ο πραγματικός ομόρους στο μοντέλο ανωστικής γραμμής υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική ροή μέσω του δίσκου ορμής. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την κατάργηση του βαθμού απόδοσης σχετικής περιστροφής.

Table 1 : Boundary conditions on blocks

	Block (I)	Block (II)	Block (III)
U	Dirichlet: all variables	Dirichlet: all variables interpolation from (I)	Dirichlet: all variables Interpolation from (II)
D	Dirichlet: pressure, Neumann: all other	Dirichlet:all variables interpolation from (III)	Neumann: all variables
N	Dirichlet: all variables	Dirichlet: all variables	Dirichlet: all variables
S	Dirichlet: $u_2=0$ Neumann: all other or wall functions	Dirichlet: $u_2=0$ Neumann: all other or wall functions	Dirichlet: $u_2=0$ Neumann: all other
E	Dirichlet: $u_3=0$ Neumann: all other	Dirichlet: $u_3=0$ Neumann: all other	Dirichlet:all variables
W	Kinematic or dynamic	Kinematic or dynamic	Kinematic or dynamic

Table 8 Location of inlet U, exit D and external N boundaries

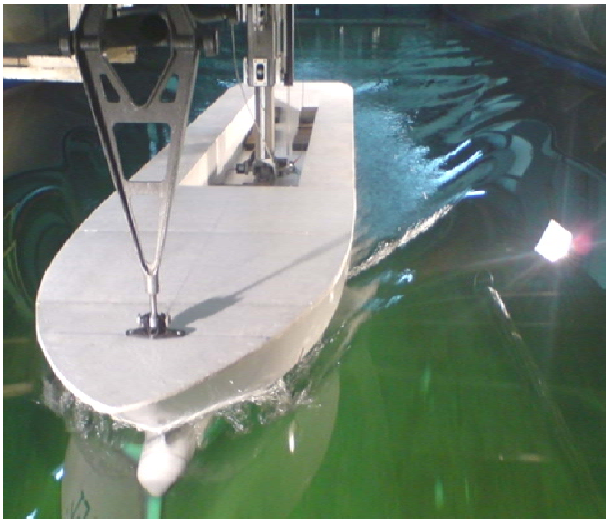
Boundary	Block (I)		Block (II)		Block (III)	
	U	D	U	D	U	D
X/L	- 0.2	0.55	0.45	1.	0.98	1.5
Dex/L	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

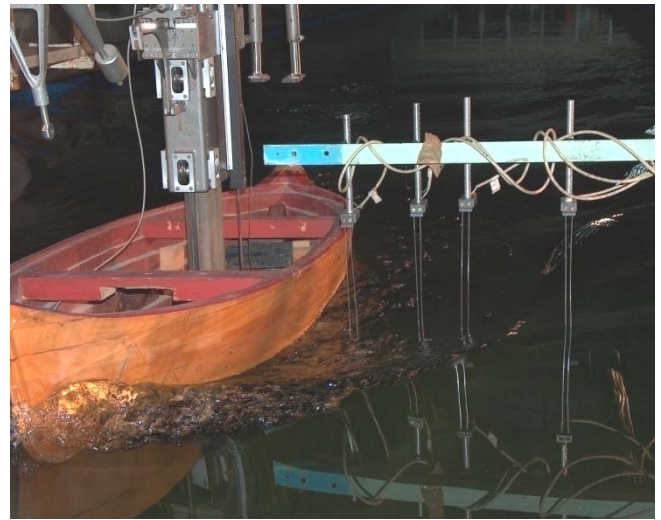
4.1 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ

Ο καλύτερος τρόπος να επαληθευθούν τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος, είναι η διεξαγωγή πειραμάτων υπό κλίμακα. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (σχήμα 10). Τα πειράματα έγιναν σε μοντέλα μήκους 1.9-5.1m (κλίμακας 1/7.85-1/40) και για ένα εύρος ταχυτήτων.

Για την επιλογή την εκλογή της καλύτερης μεταξύ ενός αριθμού εναλλακτικών σχεδιάσεων, αρκεί η μέτρηση τη ολικής αντίστασης και η αναγωγή της σε κλίμακα πλοίου (μέθοδος Froude). Όμως η χρήση δυναμικών υπολογιστικών μεθόδων δεν δίνει πάντοτε αξιόπιστα αποτελέσματα για την ολική αντίσταση, για αυτό τα πειράματα προσανατολίστηκαν στη σύγκριση των ελεύθερων επιφανειών με τα αντίστοιχα υπολογιστικά αποτελέσματα. Ο πιο εύκολος και αξιόπιστος τρόπος να γίνει αυτό, είναι να συγκριθούν διαμήκεις τομές της επιφάνειας που παράγει ο κώδικας (wavencuts) με αντίστοιχες τομές του συστήματος κυματισμών που παράγει το μοντέλο στη δεξαμενή. Λόγω της μονιμότητας του φαινομένου της αντίστασης, η διαμήκης τομή της ελεύθερης επιφάνειας σε δεδομένη απόσταση από το μοντέλο, ισοδυναμεί με την μέτρηση σε σταθερή θέση, της χρονικής ιστορίας του κυματισμού που παράγει το κινούμενο μοντέλο (σχήμα 11). Μετρήσεις έγιναν για πέντε διαφορετικές αποστάσεις από τον διαμήκη άξονα του μοντέλου.



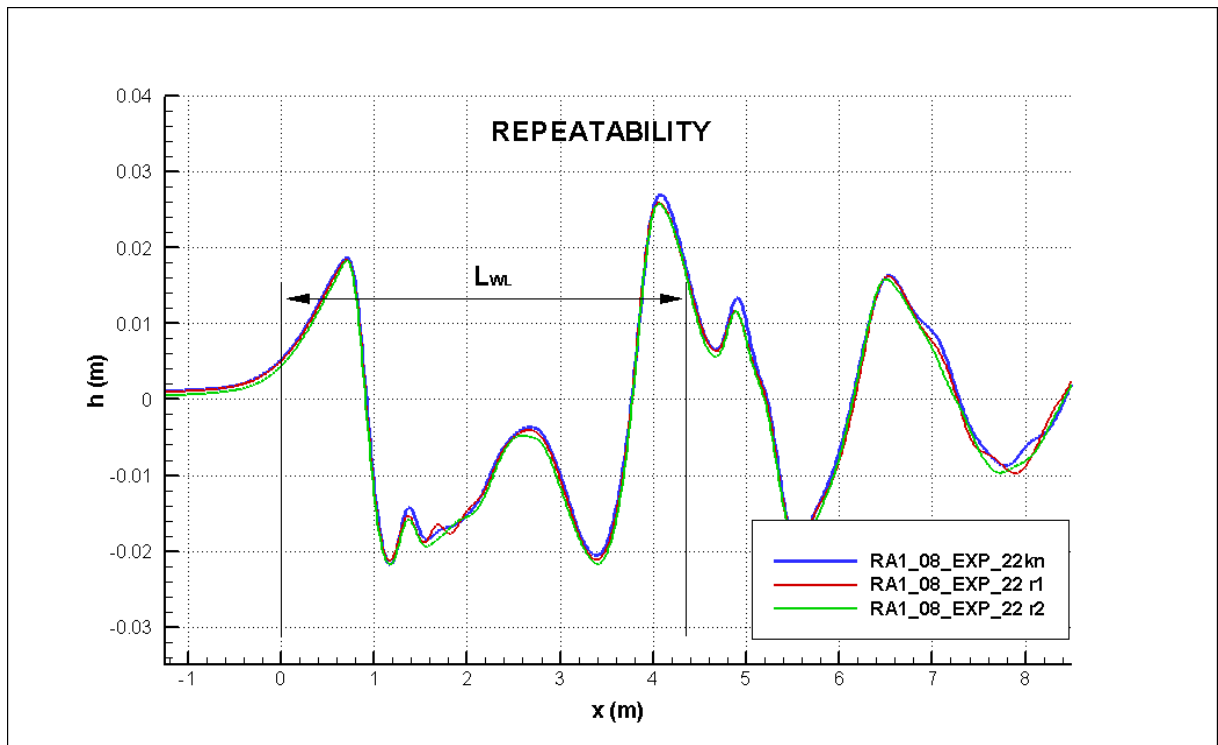
Σχήμα 10



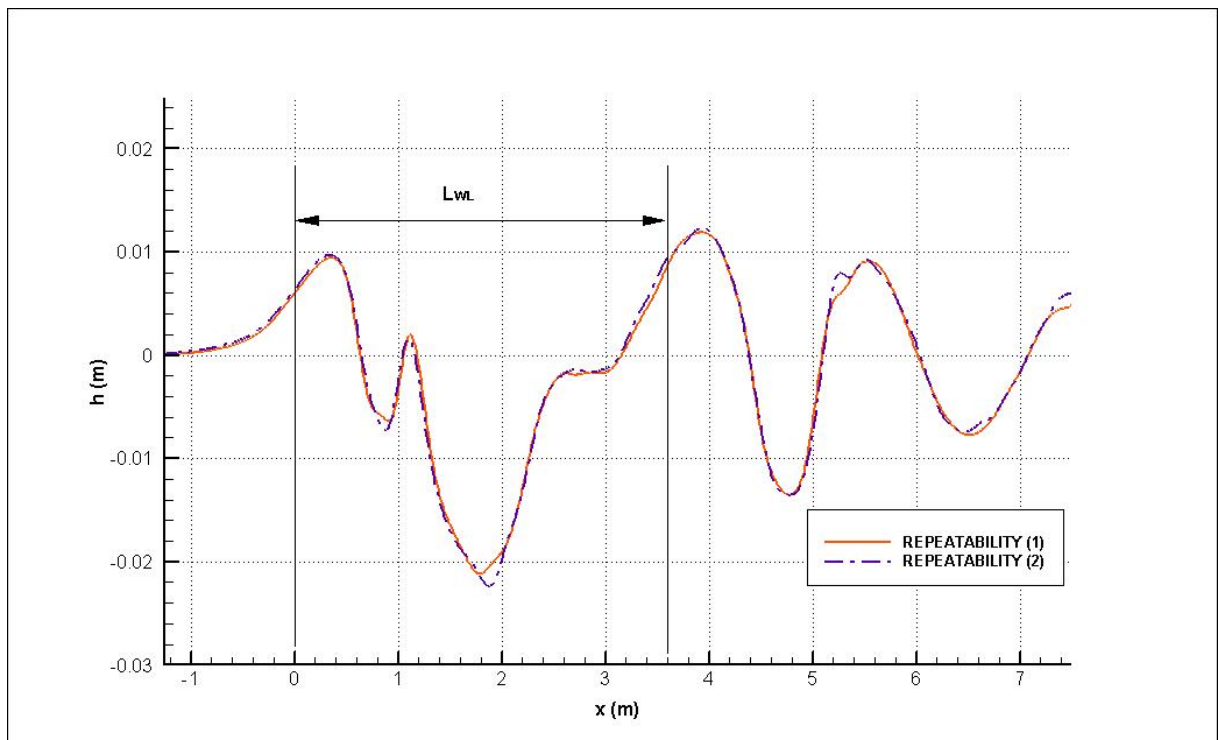
Σχήμα 11

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων το μοντέλο στερεώνεται στο δυναμόμετρο του φορείου της δεξαμενής, ελεύθερο να πάρει κατακόρυφες μετατοπίσεις (heave) και διαμήκεις κλίσεις (pitch), σχήμα 10. Μετά την αρχική επιτάχυνση του μοντέλου και αναλόγως της ταχύτητας, μετράται μία μόνιμη παράλληλη βύθιση (sinkage) και δυναμική διαγωγή (dynamic trim). Οι μετρούμενες πειραματικά τιμές τους, μπορούν να εισαχθούν σαν δεδομένα στον κώδικα που αναπτύχθηκε.

Για λόγους ελέγχου της επαναληψιμότητας των πειραματικών αποτελεσμάτων, και ειδικά σε ταχύτητες όπου το κύμα της πλήρους έσπαγε, κάποιες από τις μετρήσεις επαναλήφθηκαν για περισσότερες της μίας φορές. Από τους ελέγχους αυτούς, πλην ελαχίστων μικρό-ασταθειών στα ακρότατα, φαίνεται η εξαιρετική επαναληψιμότητα των μετρήσεων, σχήμα 12,13.



Σχήμα 12



Σχήμα 13

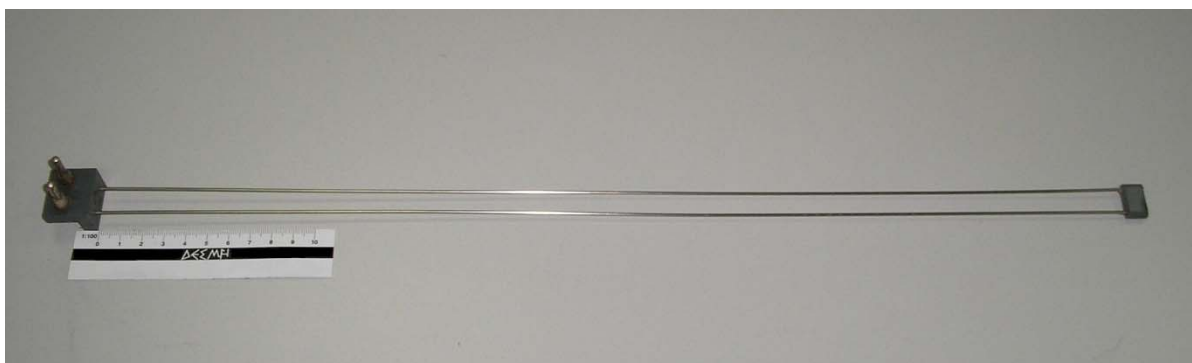
4.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ

Για την μέτρηση των τομών της ελεύθερης επιφάνειας (wavecuts) χρησιμοποιήθηκε ένας σταθερός οριζόντιος πρόβολος, κάθετος στην πλευρά της δεξαμενής, άρα και στην διεύθυνση κίνησης του μοντέλου. Ο πρόβολος (σχήμα 14) στερεώθηκε στην εσωτερική πλευρά της δεξαμενής με τρόπο που εξασφάλιζε την σταθερότητα του και ταυτόχρονα δεν εμπόδιζε την διέλευση του φορείου. Στο πάνω μέρος του προβόλου ήταν τοποθετημένα ένας αριθμημένος κανόνας και η ράβδος στερέωσης των μετρητικών ύψους κύματος τύπου αντίστασης (resistant wave probes).

Το καθένα από τα wave probe (σχήμα 15) αποτελείται από δύο παράλληλα τοποθετημένα λεπτά σύρματα. Το μήκος τους είναι 40cm και η μεταξύ τους απόσταση 6mm. Τα σύρματα ενώνονται στο κάτω άκρο τους ώστε να δημιουργούν ένα κλειστό κύκλωμα. Το πάνω μέρος τους τοποθετείται σε ειδική βάση που είναι αναρτημένη στο πρόβολο, έτσι ώστε το probe να είναι μισοβυθισμένο και κάθετο στην ελεύθερη επιφάνεια. Για τις μετρήσεις τοποθετήθηκαν πέντε waverobes σε αποστάσεις 10, 20, 30, 50 και 100cm μετρούμενες από το μέγιστο πλάτος του μοντέλου, σχήμα 17.



Σχήμα 14



Σχήμα 15

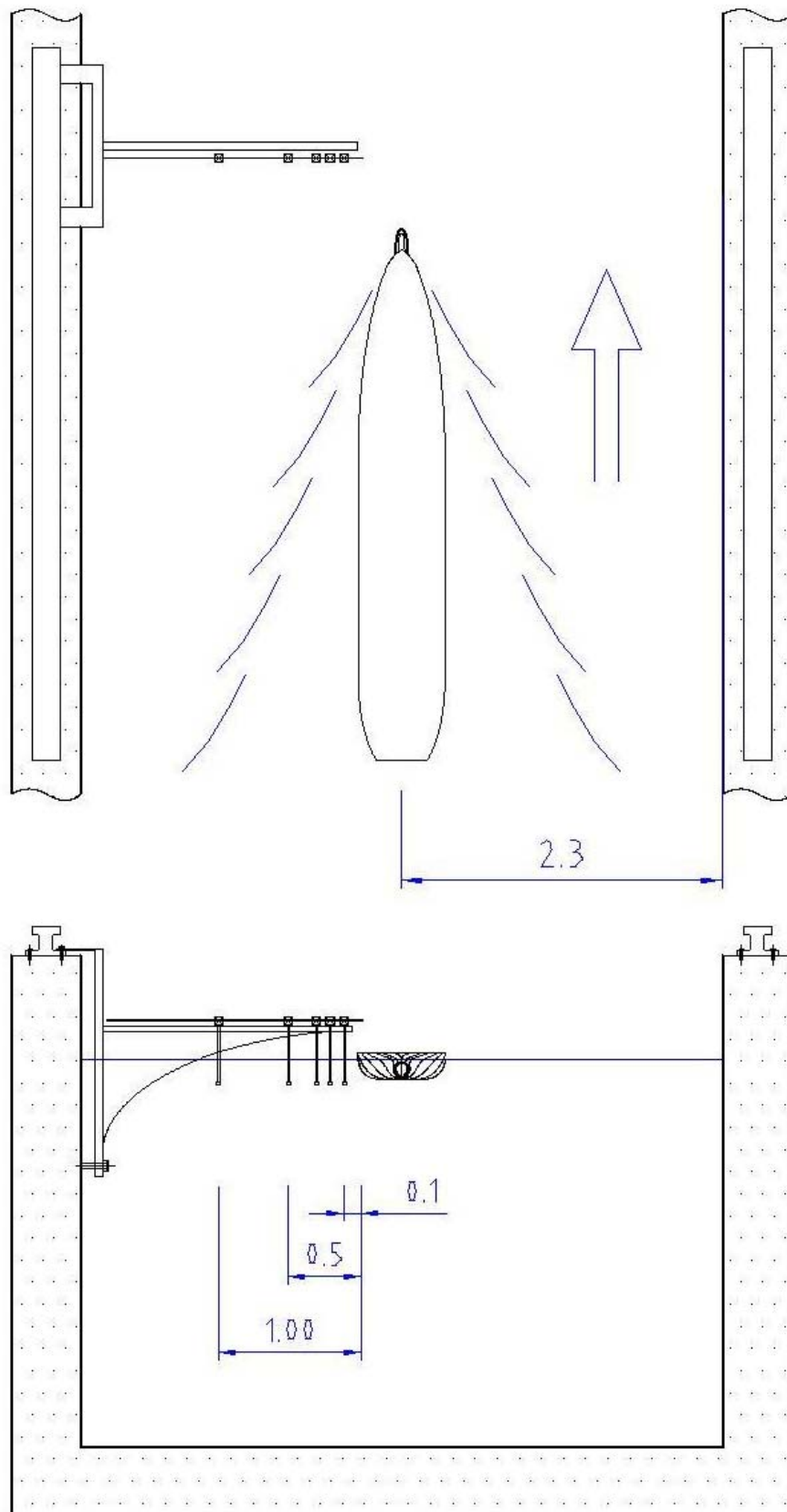
Η λειτουργία του οργάνου βασίζεται στη διαφορά αντίστασης ενός γυμνού σύρματος όταν αυτό βρίσκεται στον αέρα και όταν είναι βυθισμένο στο νερό. Έτσι καθώς διέρχεται ένα κύμα από το waverprobe, μεταβάλλεται η αναλογία του ελεύθερου προς το βυθισμένο μήκος του. Η αναλογία αυτή, λόγω της σταθερής τάσης, οδηγεί σε αλλαγή της έντασης του ρεύματος, η οποία μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης μεταφράζεται σε ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.

Πολύ σημαντική για την ακρίβεια των μετρήσεων ήταν η βαθμονόμηση, η οποία λόγω της μεγάλης ευαισθησίας του οργάνου στις περιβαλλοντολογικές αλλαγές, έπρεπε μερικές φορές να γίνεται ακόμα και δύο φορές την ίδια μέρα. Για τους ίδιους λόγους πριν από κάθε μέτρηση λαμβανόταν μία μηδενική μέτρηση (μέτρηση θορύβου), ο μέσος όρος της οποίας αφαιρούνταν από την κανονική μέτρηση που ακολουθούσε. Επίσης, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε και στις ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των probes, για να μην επάγει το μαγνητικό πεδίο του ενός, ρεύμα στο άλλο.

Το σήμα και από τα πέντε waverprobes μεταφέρονταν μέσω καλωδίων στη βάση μέτρησης (σχήμα 16) που βρισκόταν παραπλεύρως της δεξαμενής σε σταθερό σημείο. Εκεί ενισχυόταν, φιλτράρονταν για υψίσυχο θόρυβο, ψηφιοποιούνταν και τελικά κατέληγε σε ένα φορητό υπολογιστή όπου καταγράφονταν. Για την ψηφιοποίηση χρησιμοποιήθηκε σταθερή συχνότητα δειγματοληψίας 200Hz όπου αντιστοιχεί, για τον μεγαλύτερο αριθμό Froude που μετρήθηκε ($F_n=0.45$), σε διαμήκη απόσταση μικρότερη των 15mm σε κλίμακα μοντέλου, ή 0.5m σε κλίμακα πλοίου.



Σχήμα 16



Σχήμα 17

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΝΟΛΟ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Για να ελεγχθεί η ακρίβεια της μεθόδου κρίθηκε απαραίτητη, όπως ήδη αναφέρθηκε, η σύγκριση με πειραματικά δεδομένα. Για να διερευνηθούν οι δυνατότητες της μεθόδου, έπρεπε να δοκιμαστεί σε έναν αριθμό μοντέλων-προτύπων, με κατά το δυνατόν διαφορετικά χαρακτηριστικά, και για ένα εύρος αριθμών Froude που να καλύπτουν τις δυνατότητες εφαρμογής της.

Με γνώμονα τα παραπάνω, επιλέχθηκαν πέντε (ως ο ελάχιστος αριθμός) διαφορετικά μοντέλα-πλοίων από τα υπάρχοντα στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του ΕΜΠ, τέτοια ώστε να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών ($C_B=0.40-0.80$, $L/B=2.97-7.58$, $B/T=2.33-4.59$). Για τα μοντέλα αυτά πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε αριθμούς Froude από 0.140 έως 0.794. Στην συνέχεια περιγράφονται οι 5 γάστρες και δίδονται οι λόγοι που εκλέχθηκαν, ενώ στον παρακάτω πίνακα δίδονται συγκεντρωτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των 5 γαστρών σε πλήρη κλίμακα, και κάποιιοι από τους αδιάστατους συντελεστές.

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των πέντε γαστρών

	Hull_1	Hull_2	Hull_3	Hull_4	Hull_5
L_{BP} (m)	140.00	140.00	179.60	25.00	19.30
B (m)	25.00	22.60	23.70	6.80	6.50
T (m)	5.45	5.50/6.00	10.15/7.25	1.98	2.20
C_B	0.53	0.55	0.80	0.40	0.45
V_S (kn)	18 - 24	19 - 37	11 - 16	16 - 25	6 - 11
scale	1/40	1/35	1/35	1/8.75	1/10
Fn	0.244 - 0.325	0.256 - 0.497	0.140 - 0.190	0.506 - 0.792	0.230 - 0.378
L/B	5.60	6.19	7.58	3.68	2.97
B/T	4.59	4.11/3.77	2.33/3.27	3.43	2.95


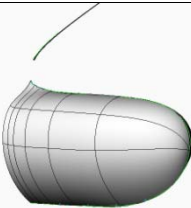
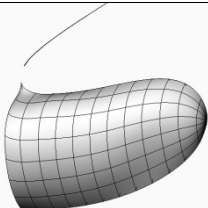
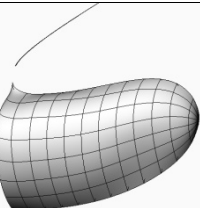
5.1.1 Hull_1, Ropax

Η πρώτη γάστρα που εξετάζεται είναι ένα τυπικό λεπτόγραμμο ΕΓ/ΟΓ πλοίου με συντελεστή γάστρας $C_B=0.53$, κοινή πρύμνη καθρέφτη, και ποδόστημα. Στην γάστρα προσαρμόστηκαν τρεις διαφορετικοί βολβοί, ένας κοντός και λεπτός βολβός, ένας βέλτιστος κατά Kracht (Kracht 1979), και ένα σύγχρονος σηκωμένος βολβός. Στις παραπάνω περιπτώσεις προστέθηκε και μία τέταρτη με έντονα μεγαλύτερο αρχικό trim. Όλες οι περιπτώσεις εξετάστηκαν για τρεις αριθμούς Froude, 0.244, 0.284 και 0.325, που αντιστοιχούν σε ταχύτητες 18kn 21kn και 24kn στο πραγματικό πλοίο.

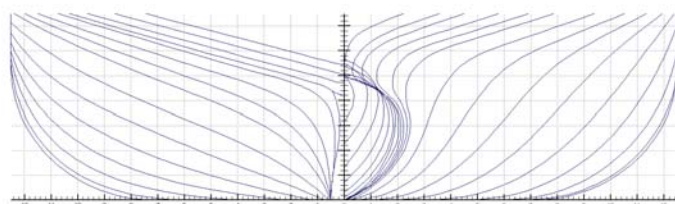
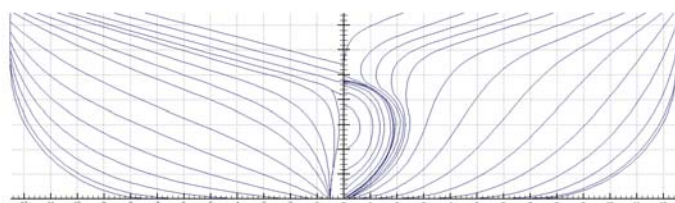
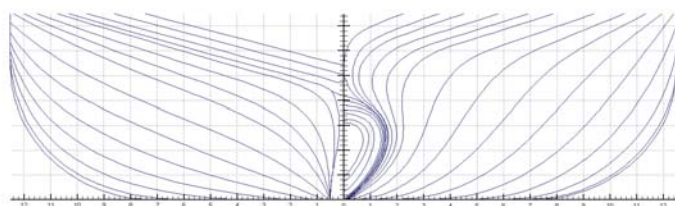
Η γραμμές του πλοίου με τους διάφορους βολβούς δίδονται παρακάτω (σχήμα 18) μαζί με τα βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου σε πλήρη κλίμακα. Οι γάστρες ήταν πανομοιότυπες, με διαφορές μόνο στην περιοχή της πλώρης (10% του μήκους μεταξύ καθέτων) και του σχήματος του βολβού. Όλα τα μοντέλα ήταν υπό κλίμακα 1/40 και είχαν μήκος μεταξύ καθέτων 3.6m.

Η περίπτωση αυτή επιλέχθηκε προκειμένου να διερευνηθεί η ακρίβεια της υπολογιστικής μεθόδου σε μικρές διαφορές της αντίστασης, καθώς και για να ελεγχθεί η δυνατότητα της να αναγνωρίζει τον βέλτιστο μεταξύ ενός αριθμού βολβών.

Τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων περιπτώσεων δίδονται στο πίνακα 2. Αυτά είναι το μήκος του βολβού (L_{BULB}) μετρημένο από την πρωραία κάθετο, το μέγιστο πλάτος του βολβού (B_{BULB}), το ύψος του ακραίου σημείου του (Z_{BULB}) μετρημένο από την τρόπιδα και το εμβαδό της εγκάρσιας τομής του βολβού στην πρωραία κάθετο (A_{BULB}). Επιπλέον για την κάθε περίπτωση δίδονται το εκτόπισμά του πλοίου (Δ_{SHIP}), το βύθισμα (T_{SHIP}) και η διαγωγή (Trim). Ο τελικός αριθμός των επιφανειακών στοιχείων της υπολογιστικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη των αντίστοιχων περιπτώσεων δίνεται στην τελευταία σειρά του πίνακα. Τόσο τα πειράματα όσο και οι υπολογισμοί έγιναν για σταθερό βύθισμα, το οποίο αντιστοιχούσε σε διαφορετικό εκτόπισμα αναλόγως του βολβού.

Πίνακας 2				
	B0	B1	B2	B2t
				

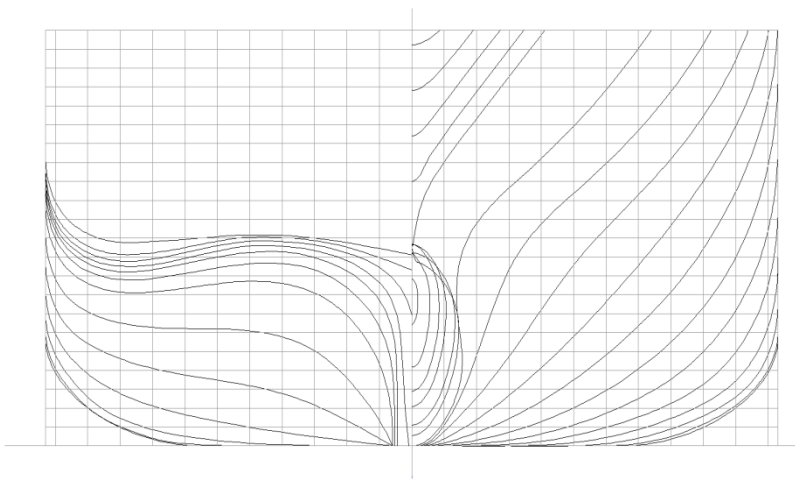
L_{BULB} (m)	2.800	7.888	7.893	7.893
B_{BULB} (m)	1.569	1.940	1.912	1.912
Z_{BULB} (m)	2.150	3.037	4.350	4.350
A_{BULB} (m²)	9.600	13.456	13.539	13.539
Δ_{SHIP} (t)	10 347	10 472	10 483	10 483
T_{SHIP} (m)	5.450	5.450	5.450	5.450
Trim (m)	0.500	0.500	0.500	1.222
Αρ.Στοιχείων	34 053	34 326	34 268	34 268



	1^Η ΓΑΣΤΡΑ
L_{BP} (m)	140.00
B (m)	25.00
T (m)	5.45
C_B	0.53
scale	1/40
F_n	0.244 – 0.325

5.1.2 Hull_2, Ropax

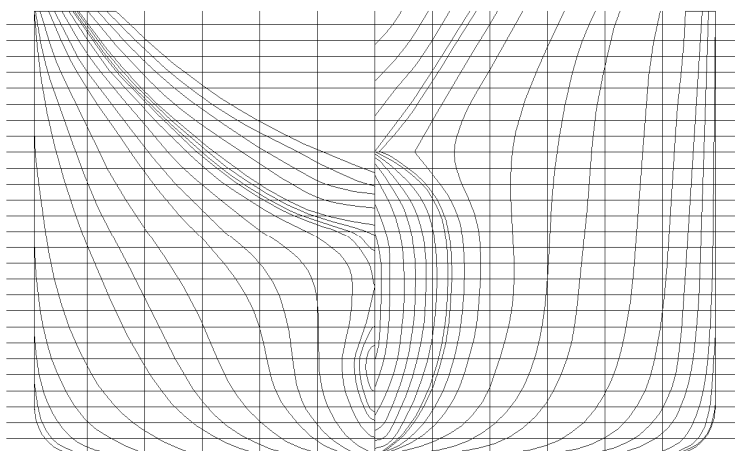
Η δεύτερη γάστρα ανήκε επίσης σε ταχύπλοο ΕΓ/ΟΓ πλοίο το οποίο είχε μια ιδιαίτερη πρύμνη που κατέληγε επίσης σε καθρέφτη. Το μήκος του μοντέλου αυτού ήταν 4.0m και η κλίμακα 1/35, και δοκιμάστηκε σε δύο διαφορετικά βυθίσματα και σε τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του βαθμού βύθισης του καθρέφτη στην σύγκλιση της μεθόδου. Το σχέδιο νομέων και τα βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.



	2 ^H ΓΑΣΤΡΑ
L_{BP} (m)	140.00
B (m)	22.60
T (m)	5.50 / 6.00
C_B	0.55
scale	1/35
Fn	0.256 – 0.497

5.1.3 Hull_3, Bulk Carrier

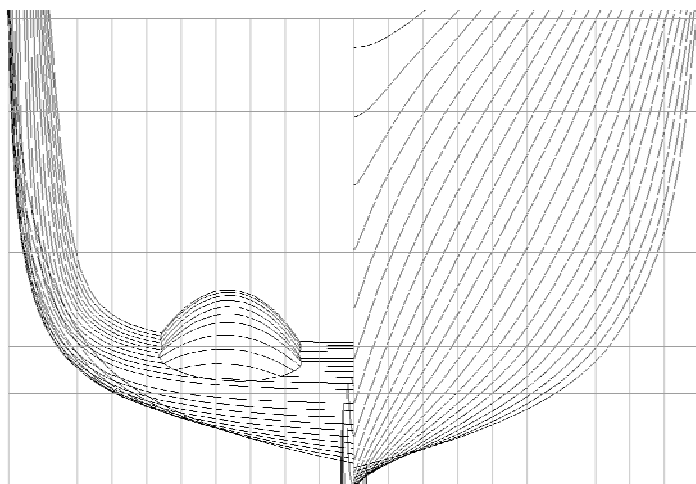
Η τρίτη γάστρα ήταν ένα Bulk Carrier με συντελεστή γάστρας C_B=0.80. Το μήκος μοντέλου ήταν 5.13m και η κλίμακα 1/35, δοκιμάστηκε σε δύο διαφορετικά βυθίσματα που αντιστοιχούν στις καταστάσεις φόρτωσης full load & heavy ballast, και σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες ώστε να διερευνηθούν τα όρια της μεθόδου σε ογκώδη πλοία και χαμηλούς αριθμούς Fn. Το σχέδιο νομέων και τα βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.



	3 ^H ΓΑΣΤΡΑ
L_{BP} (m)	179.60
B (m)	23.70
T (m)	10.15 / 7.25
C_B	0.80
scale	1/35
Fn	0.140 – 0.190

5.1.4 Hull_4, Round Bilge High Speed Craft

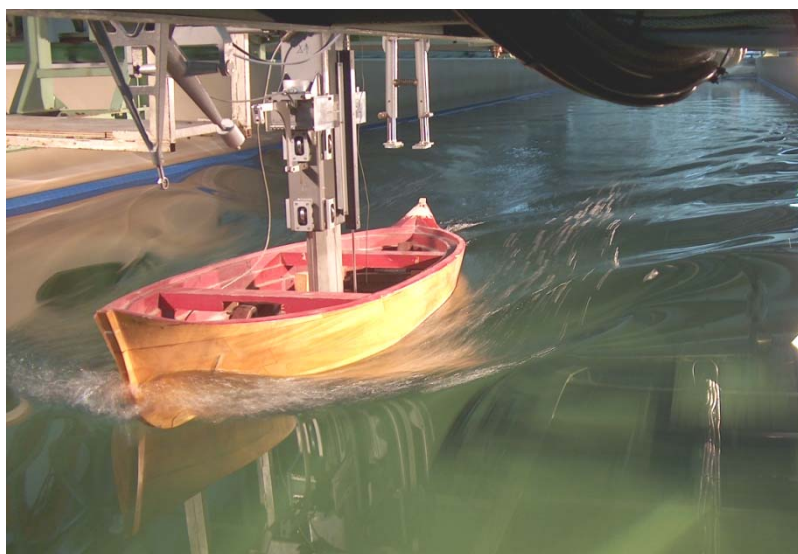
Η τέταρτη γάστρα ανήκε σε ταχύπλοο σκάφος με στρογγυλό πυθμένα. Το μήκος μοντέλου ήταν 2.85m και η κλίμακα 1/8.75, δοκιμάστηκε σε μία κατάσταση και σε τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες στην περιοχή των σκαφών ημικτοπίσματος, με σκοπό να διερευνηθούν οι δυνατότητες και οι περιορισμοί της μεθόδου στους υψηλούς αριθμούς F_n . Το σχέδιο νομέων και τα βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.



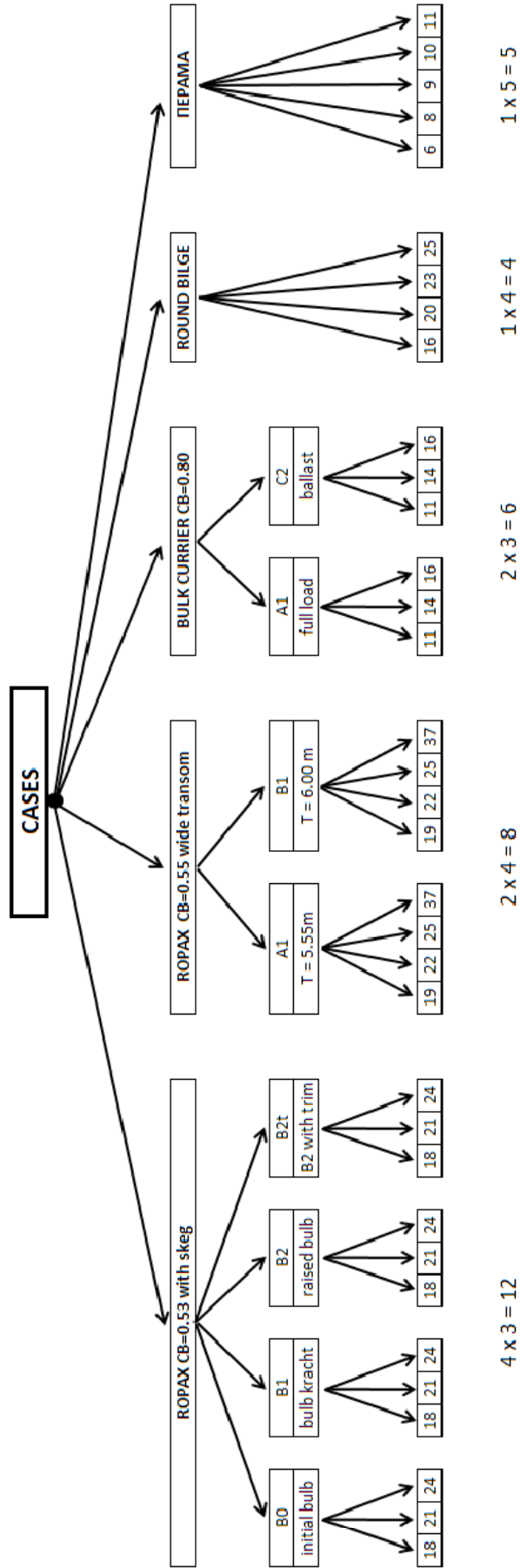
	4 ^Η ΓΑΣΤΡΑ
L_{BP} (m)	25.00
B (m)	6.80
T (m)	1.98
C_B	0.40
scale	1/8.75
F_n	0.506 – 0.792

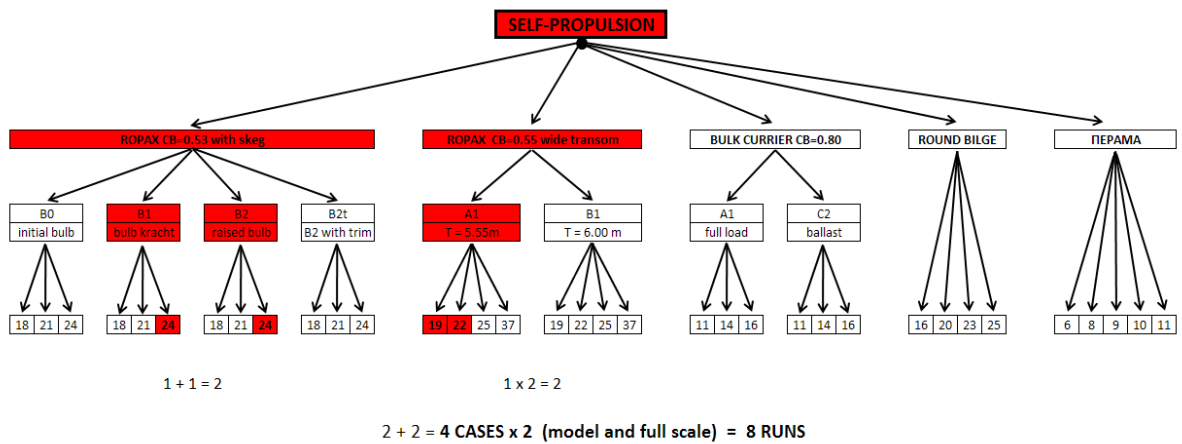
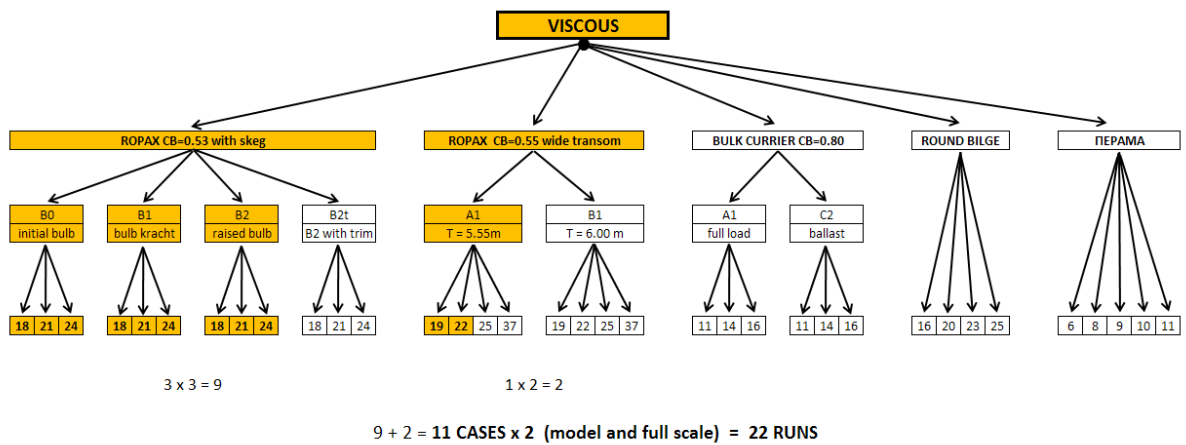
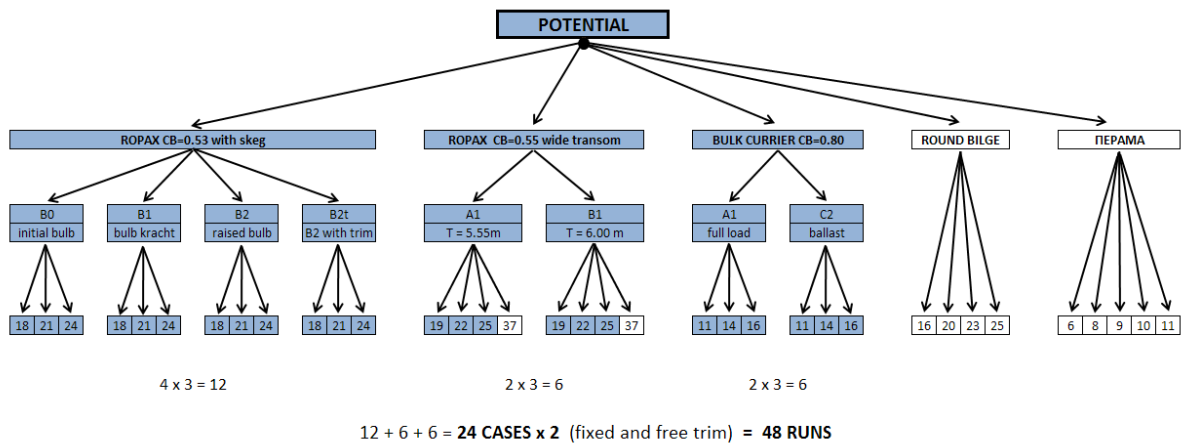
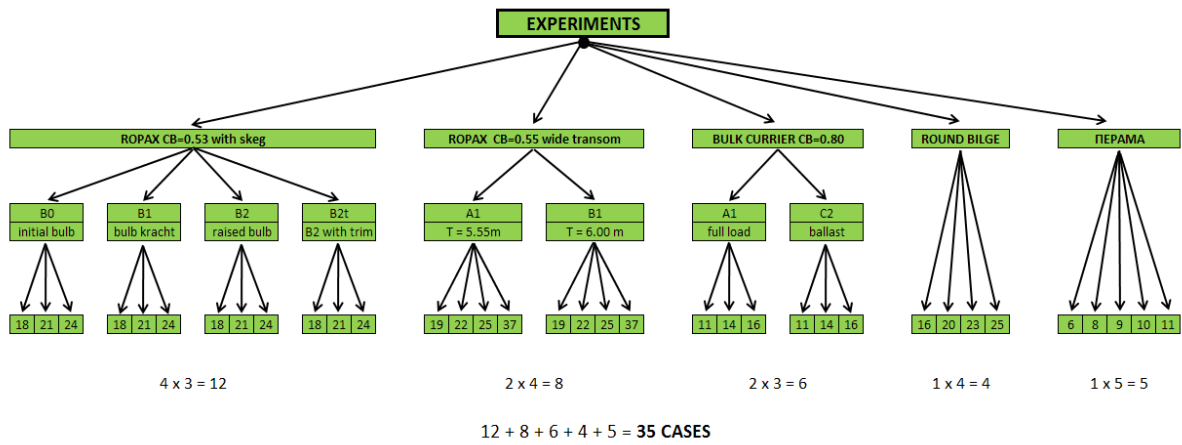
5.1.5 Hull_5, Παραδοσιακό σκάφος τύπου ΠΕΡΑΜΑ

Η πέμπτη και τελευταία γάστρα ανήκε σε ένα παραδοσιακό σκάφος τύπου Περάματος. Το μήκος του μοντέλου ήταν 2.0m και η κλίμακα 1/10. Δοκιμάστηκε σε μία κατάσταση και σε πέντε διαφορετικές ταχύτητες ώστε να ελεγχθεί αν η μέθοδος μπορεί να προβλέψει τα κύματα αλλά και την μεγάλη έμπρυμνη δυναμική διαγωγή που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος τύπων σκαφών. Το σχέδιο νομέων και τα βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.



	5 ^Η ΓΑΣΤΡΑ
L_{BP} (m)	19.30
B (m)	6.50
T (m)	2.20
C_B	0.45
scale	1/10
F_n	0.230 – 0.378





5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ WAVECUTS

Οι υπολογισμοί δυναμικής ροής έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής για τις γάστρες 1, 2 και 3 τόσο για τις μετρημένες σταθερές τιμές του sinkage και trim καθώς και υπό ελεύθερες συνθήκες. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν περίπου 35,000 στοιχεία (panels) εκ των οποίων τα 30,000 απ αυτά κάλυπταν την ελεύθερη επιφάνεια. Στις εικόνες που ακολουθούν δίδεται η σύγκριση των αριθμητικά υπολογισμένων κυματομορφών σε αποστάσεις 8-20cm από την πλευρά του μοντέλου, με τις αντίστοιχες πειραματικά μετρημένες (εδώ για σταθερό sinkage και trim).

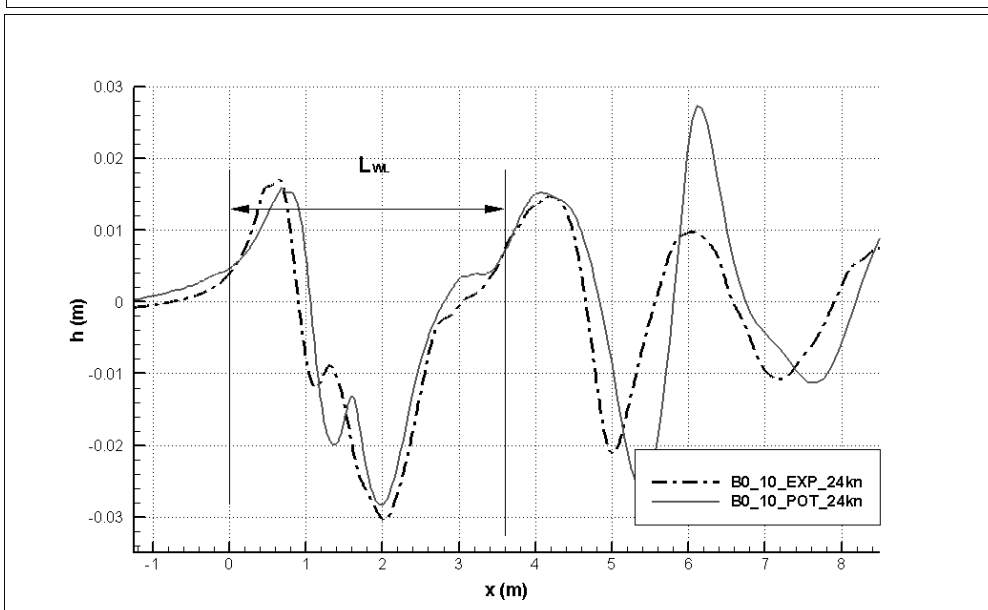
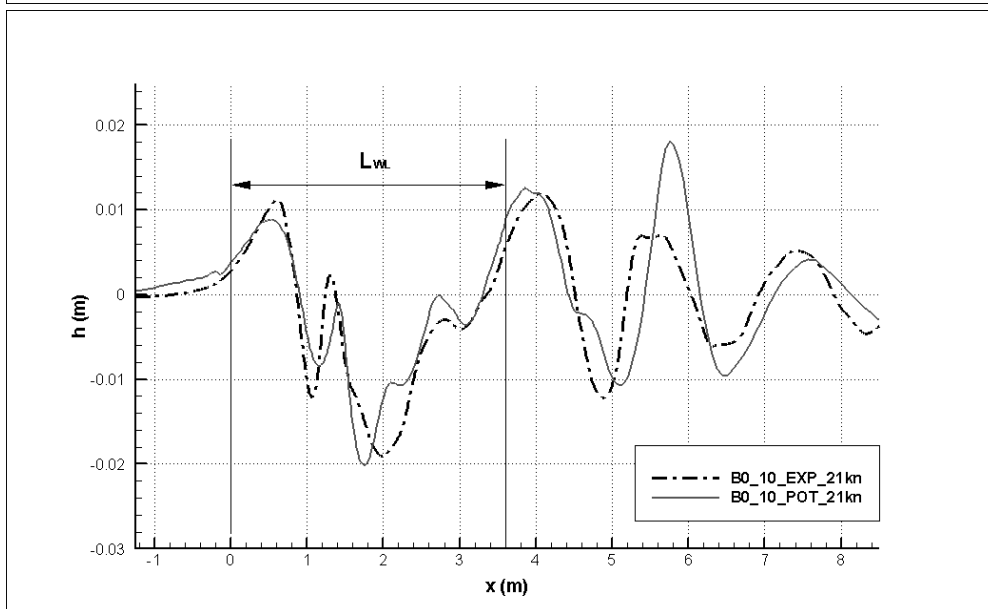
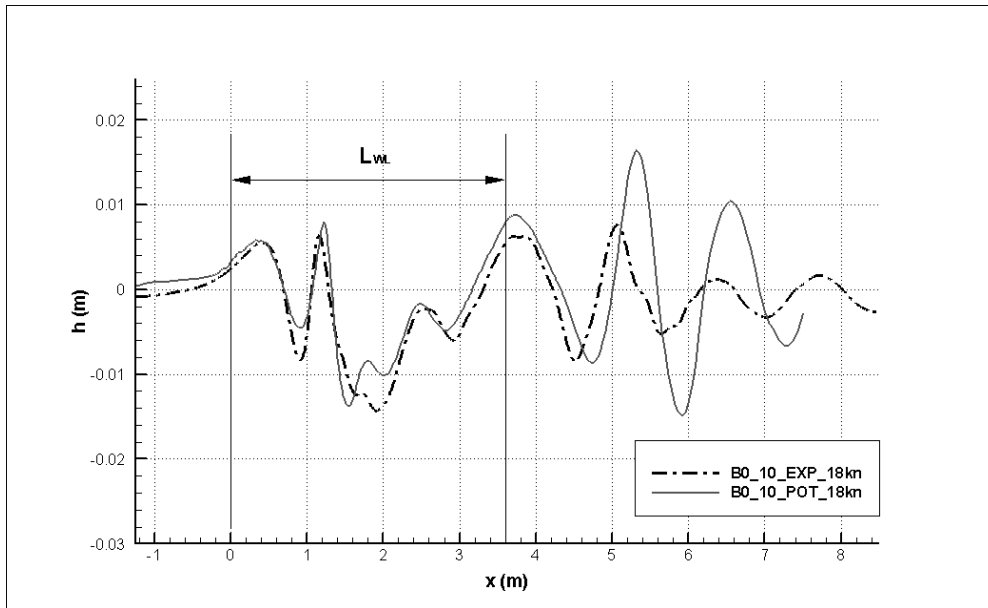
Όπως παρατηρεί κάποιος, τα υπολογιστικά με τα πειραματικά βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία κατά μήκος τους πλοίου. Μετά την πρύμνη ο κώδικας δυναμικής ροή υπερεκτιμά τα ύψη των κυμάτων για τις γάστρες 1 και 2 το οποίο οφείλεται στα φαινόμενα συνεκτικότητας που έχουν αγνοηθεί. Στην γάστρα 2 και για τον μικρότερο αριθμό F_n παρατηρείται μία διαφορά φάσης στην περιοχή του ομόρου, η οποία αποδίδεται στην μερική βύθιση του καθρέφτη που παρατηρήθηκε στα πειράματα. Αυτό το φαινόμενο είναι λιγότερο έντονο καθώς πάμε σε μεγαλύτερους αριθμούς F_n . Επιπλέον στην γάστρα 2, για το δεύτερο και μεγαλύτερο βύθισμα και τον υψηλό αριθμό F_n παρατηρείται μια ασυμφωνία στο ύψος του πρώτου κύματος, η οποία οφείλεται στο σπάσιμο του πραγματικού κύματος και στην αδυναμία του κώδικα να το προβλέψει.

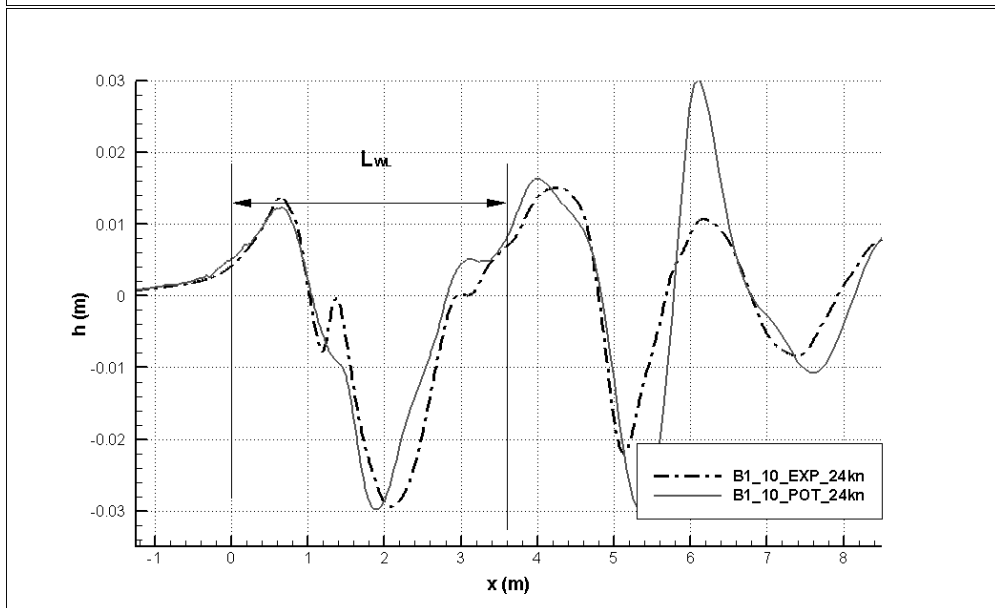
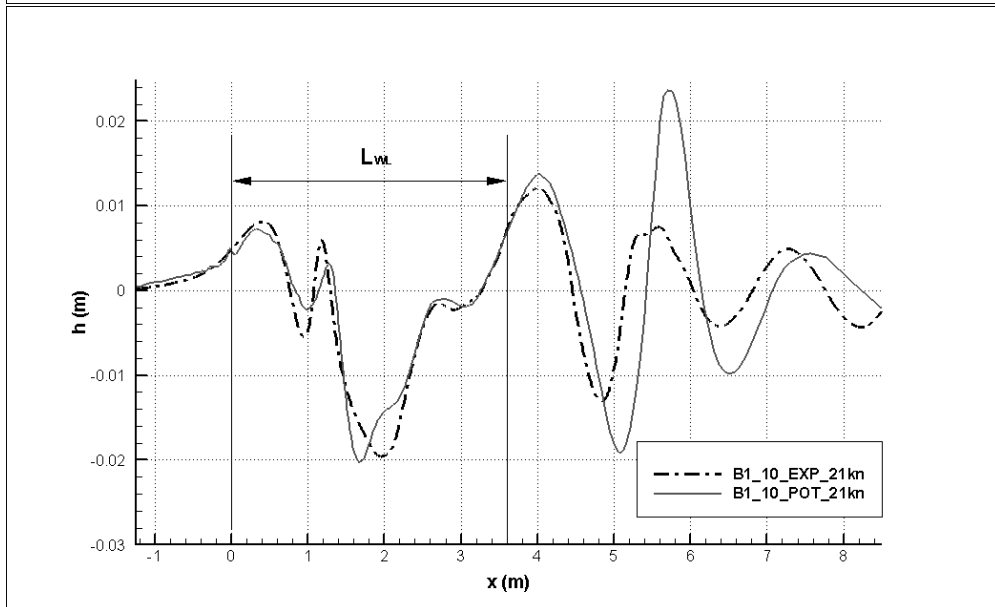
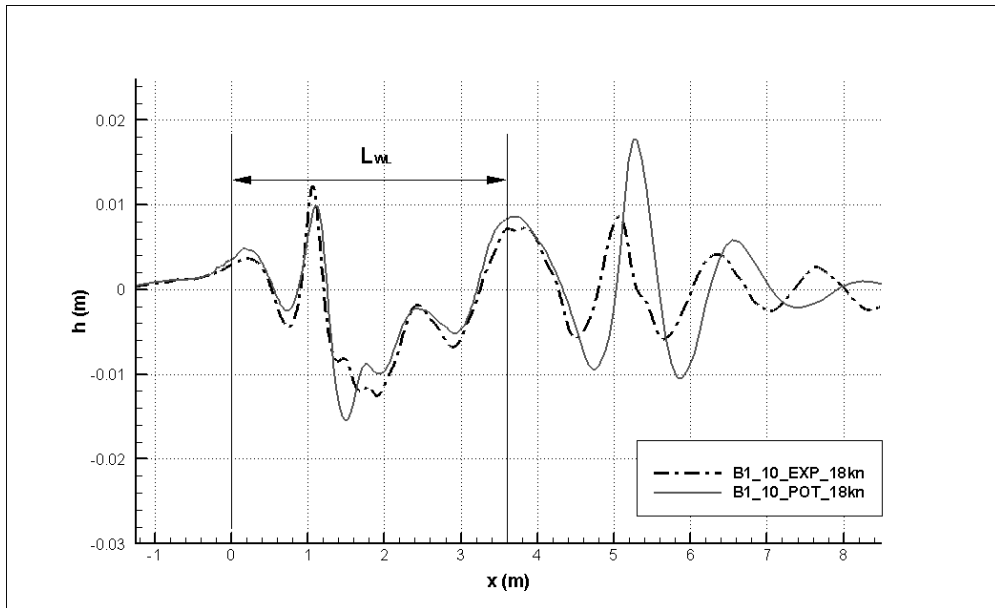
Επίσης πρέπει να αναφερθεί εδώ πως οι διαφορές στα υπολογισθέντα προφίλ του κύματος με σταθερά ή ελεύθερα sinkage και trim, για όλες τις γάστρες, είναι αμελητέες. Στον πίνακα 3 οι υπολογισθείσες τιμές για το sinkage και την γωνία διαγωγής με ελεύθερες συνθήκες (γάστρες 1 και 2) συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πειραματικές, και παρουσιάζουν ικανοποιητική ταύτιση.

Τέλος στα σχήματα 18 και 19 παρουσιάζεται η ιστορία σύγκλισης μέσω τις σταθεροποίησης του συντελεστή παραγόμενων κυματισμών. Στις περιπτώσεις του σταθερού sinkage και trim επιτυγχάνεται σύγκλιση μετά από 500 επαναλήψεις. Στις ίδιες εφαρμογές όταν το μοντέλο είναι ελεύθερο να βυθιστεί και να πάρει διαγωγή, η μέθοδος πρακτικά συγκλίνει μετά από 700 επαναλήψεις, καθώς οι τιμές του βυθίσματος και της διαγωγής ανανεώνονται.

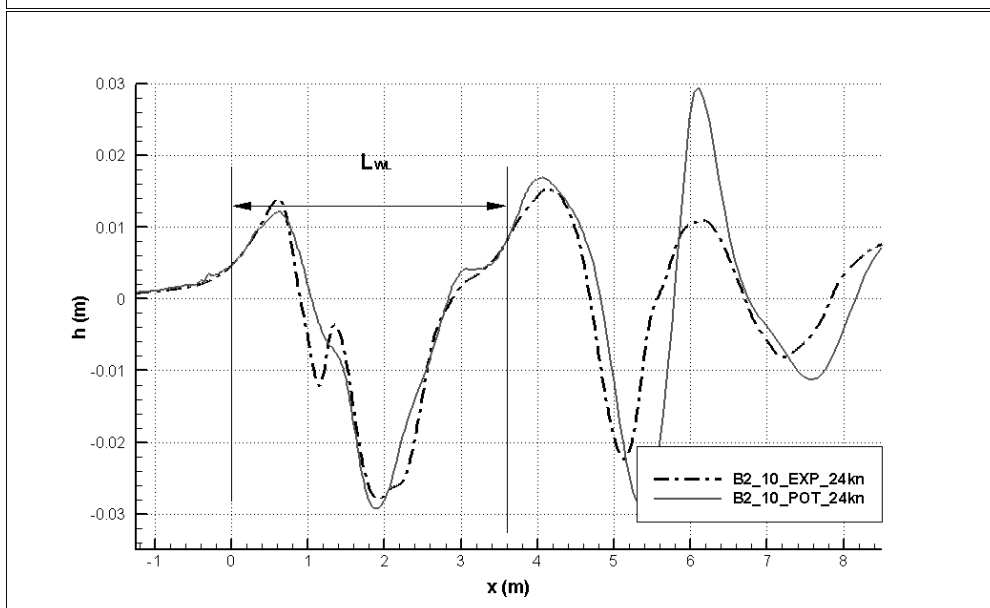
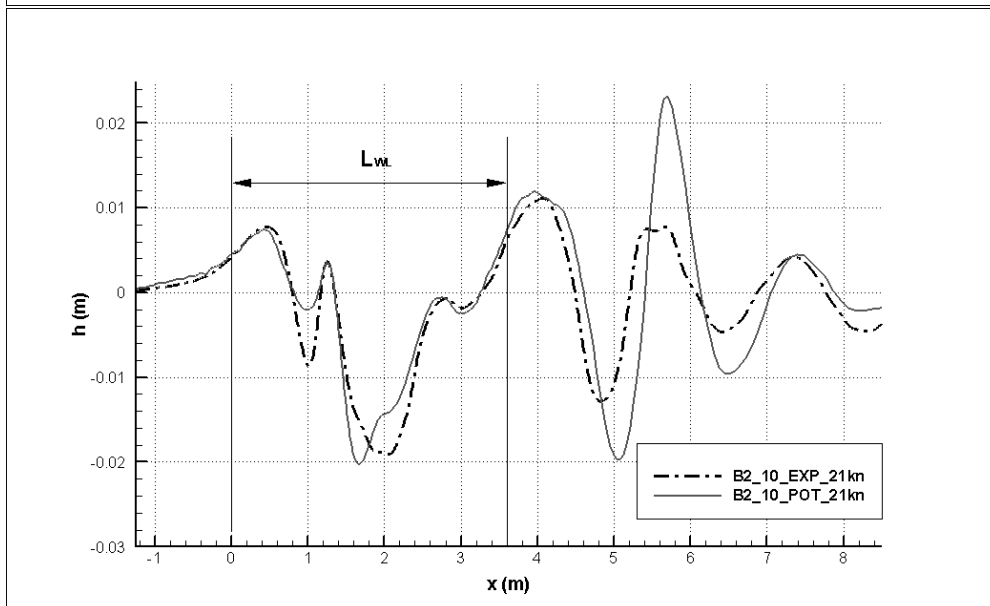
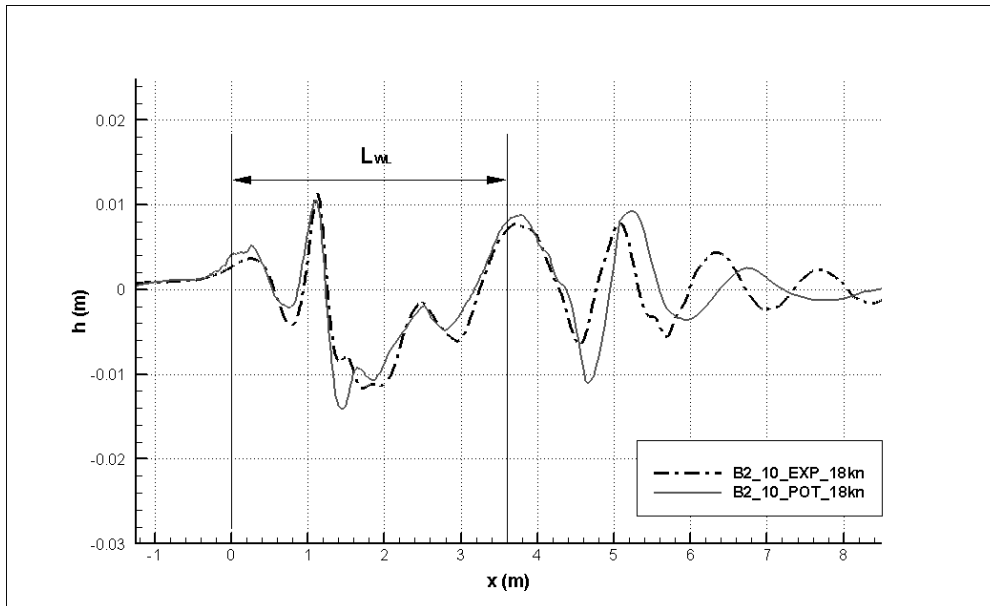
Πίνακας 3. Αποτελέσματα για την Παράλληλη βύθιση και τη δυναμική Διαγωγή

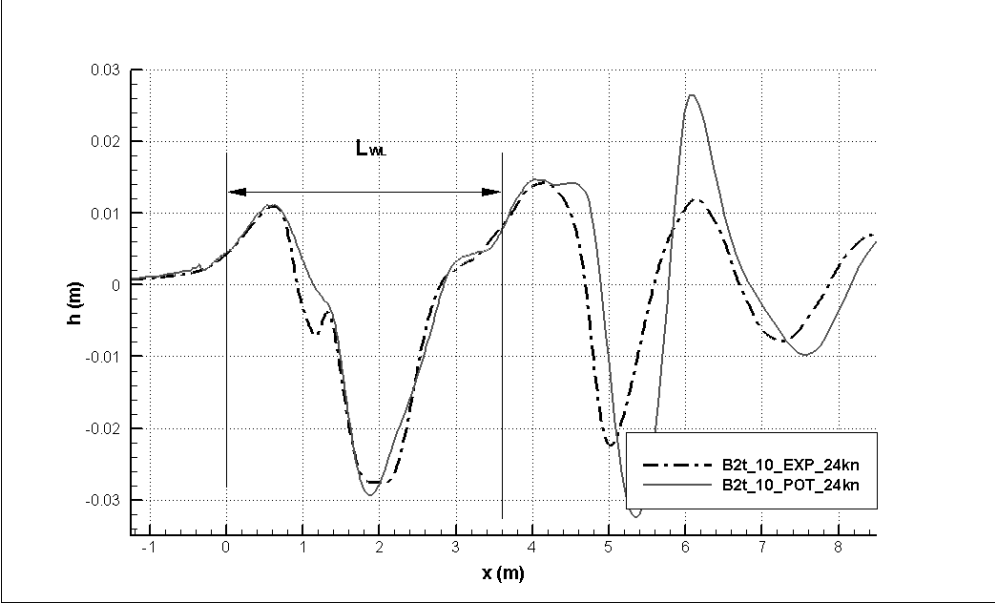
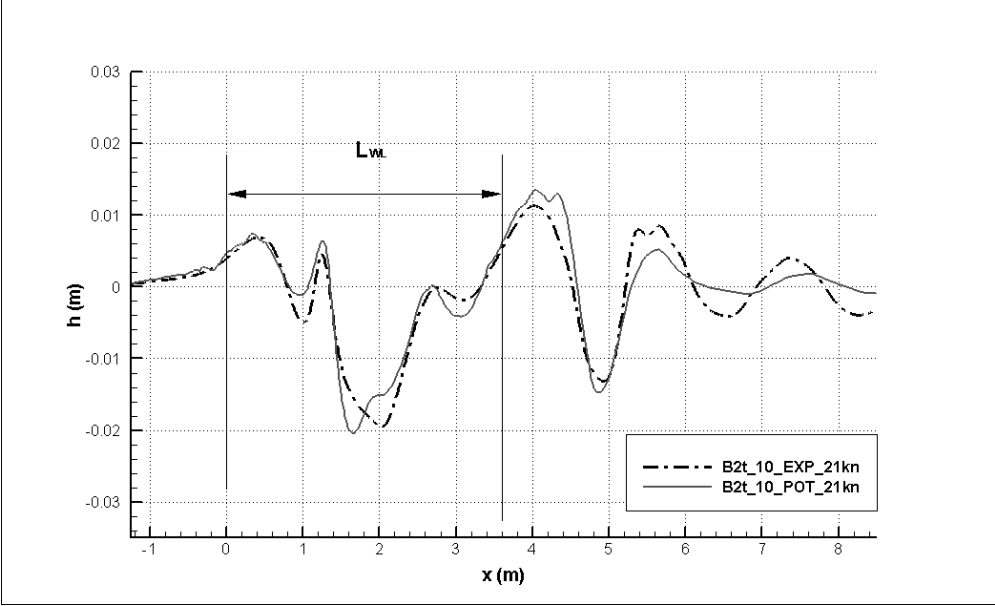
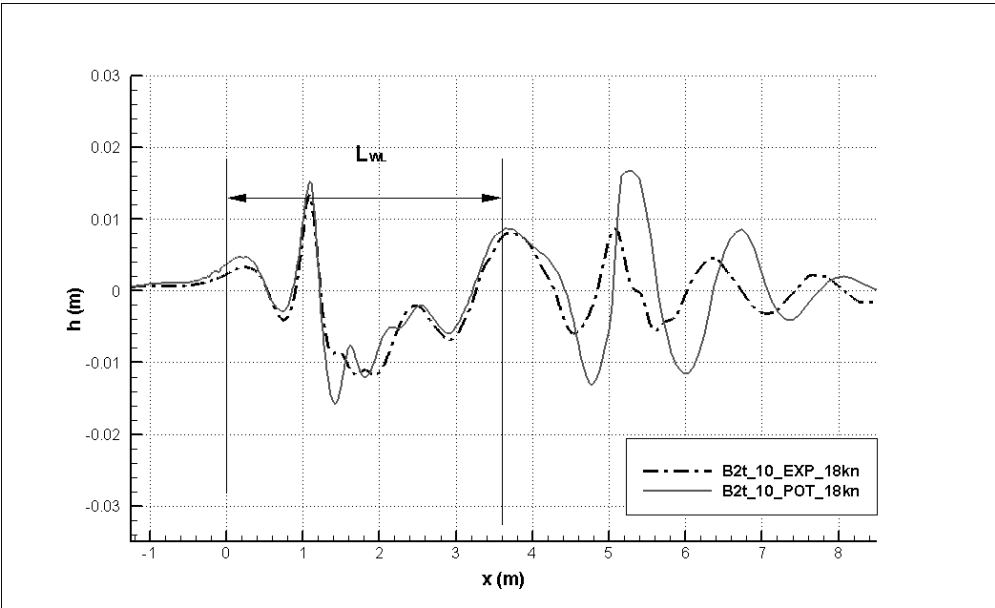
A/A	CASES	Measured Data		Calculated from Potential code		Errors	
		sinkage (m)	trim (deg)	sinkage (m)	trim (deg)	sinkage (%)	trim (%)
1	B0 21kn	0.008	0.160	0.009	0.168	16%	5%
2	B1 21kn	0.008	0.136	0.009	0.166	11%	23%
3	B2 21kn	0.008	0.154	0.009	0.170	9%	10%
4	B2t 21kn	0.008	0.469			-100%	-100%
5	B0 24kn	0.011	0.207	0.009	0.235	-15%	13%
6	B1 24kn	0.011	0.156	0.011	0.192	-2%	23%
7	B2 24kn	0.010	0.184	0.011	0.196	3%	7%
8	B2t 24kn	0.011	0.485	0.010	0.530	-9%	9%
9	A1 19kn	0.008	-0.157	0.003	0.036	-62%	-123%
10	A1 22kn	0.009	-0.173	0.006	0.005	-33%	-103%
11	A1 25kn	0.013	-0.203	0.008	-0.027	-40%	-87%
12	Hull_2 A1 37kn	0.025	1.409			-100%	-100%
13	B1 19kn	0.007	-0.154	0.001	0.088	-82%	-157%
14	B1 22kn	0.010	-0.150	0.004	0.075	-58%	-150%
15	B1 25kn	0.013	-0.154	0.006	0.058	-52%	-138%
16	A1 11kn	0.004	-0.039	0.007	-0.080	79%	103%
17	A1 14kn	0.007	-0.092	0.012	-0.129	76%	40%
18	A1 16kn	0.009	-0.122	0.014	-0.149	54%	22%
19	Hull_3 C2 11kn	0.003	0.640	0.004	0.614	27%	-4%
20	C2 14kn	0.005	0.601	0.007	0.592	27%	-2%
21	C2 16kn	0.007	0.581	0.008	0.577	26%	-1%

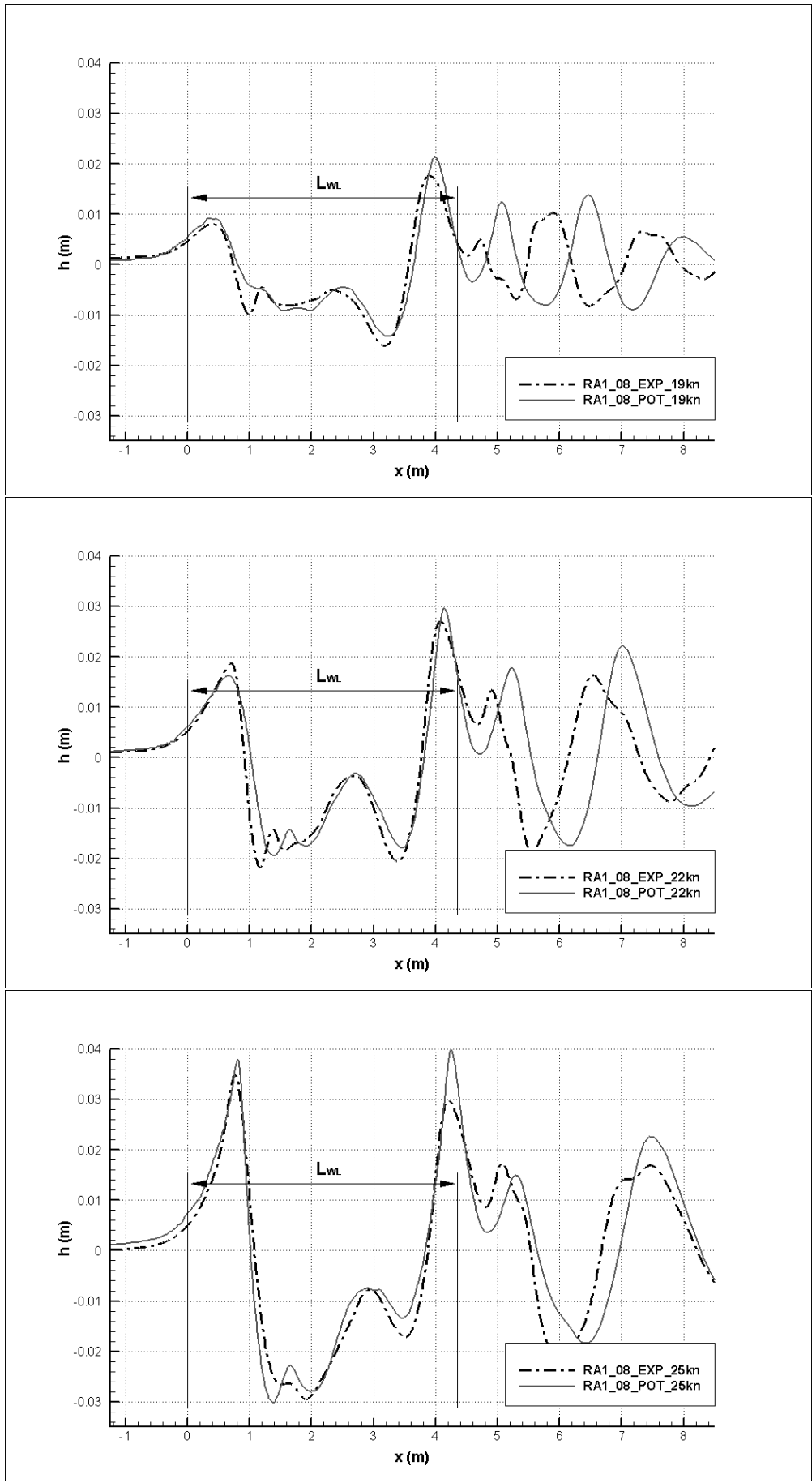


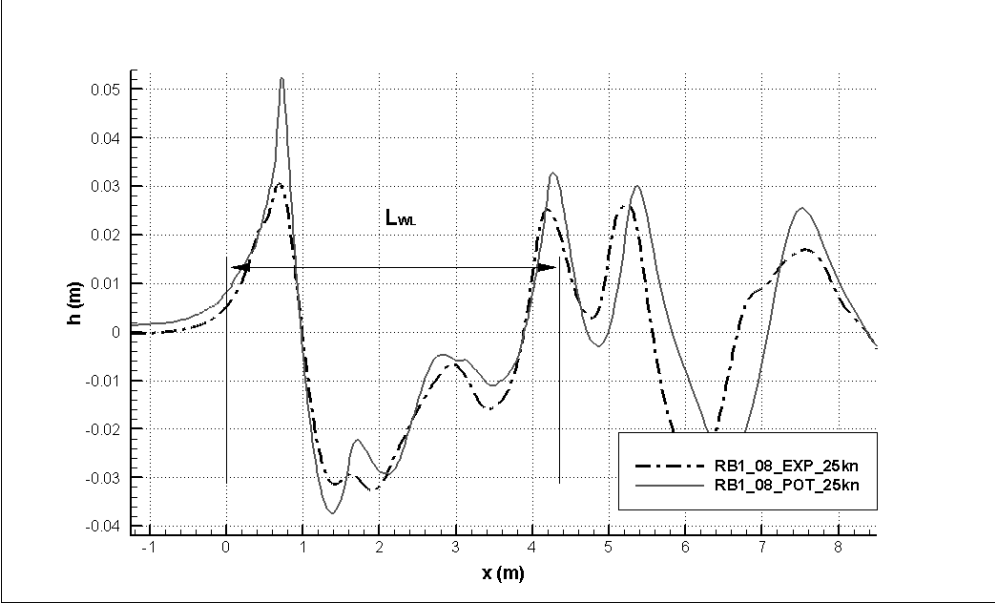
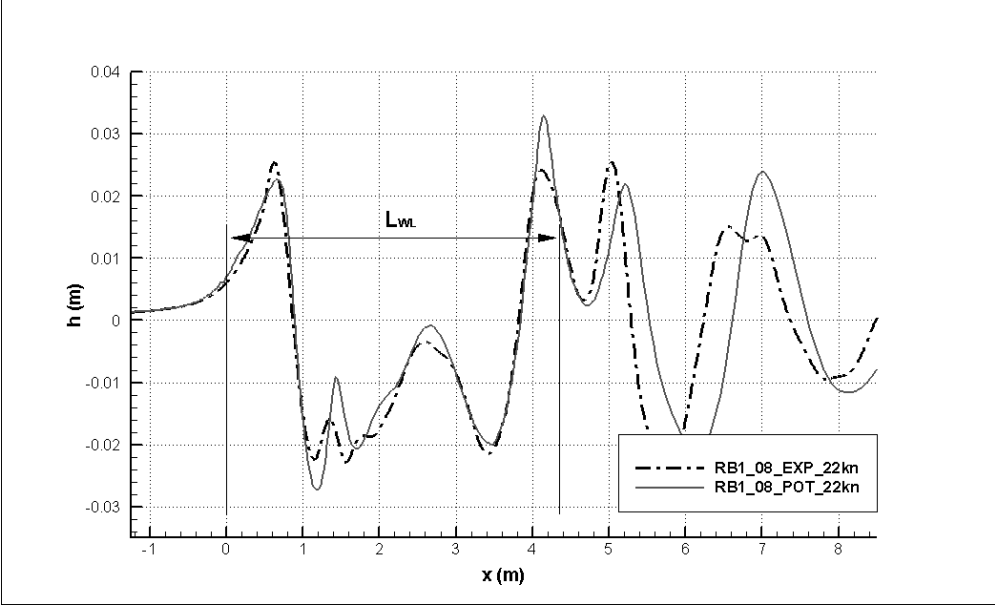
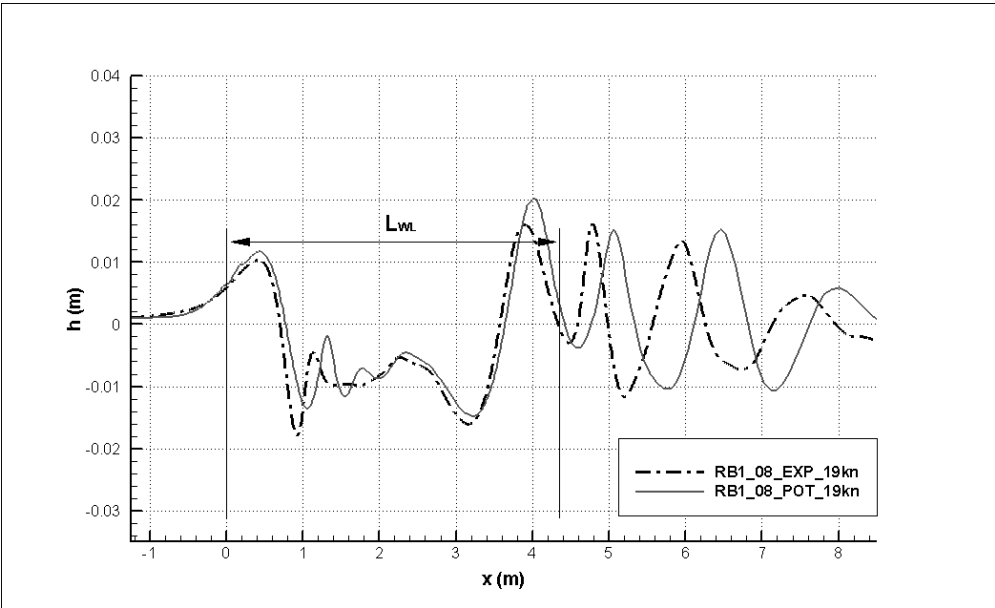


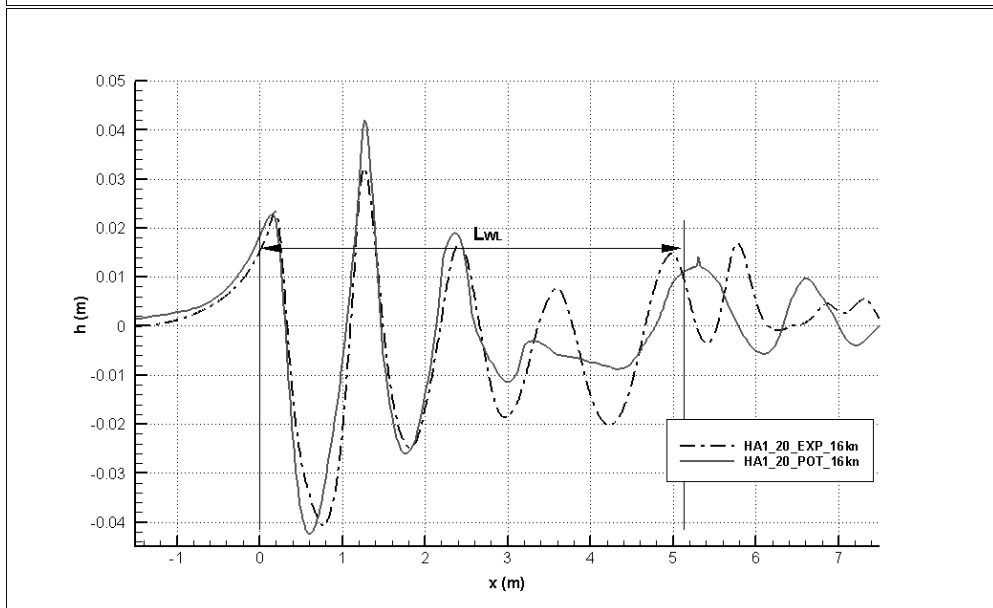
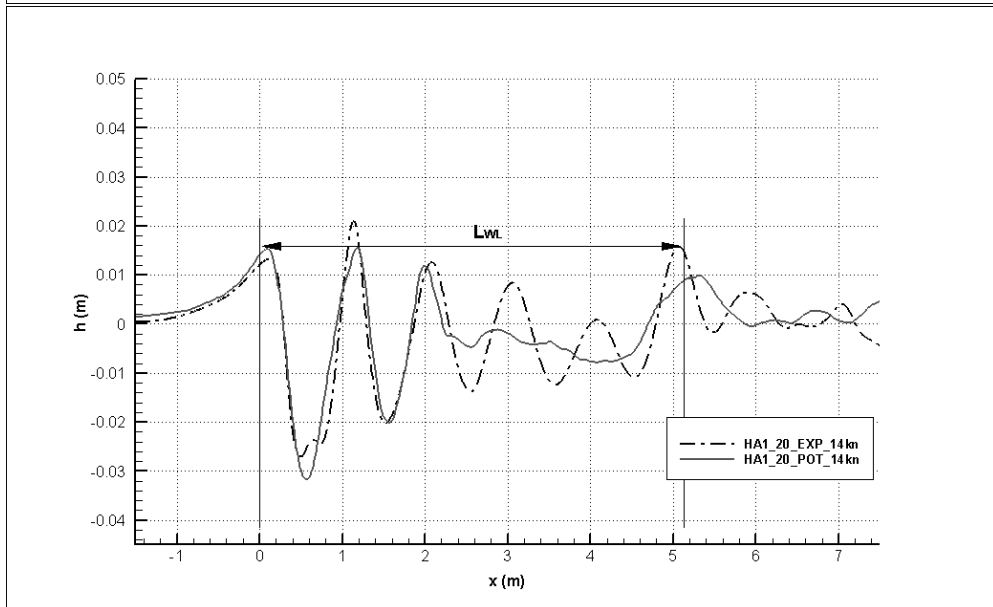
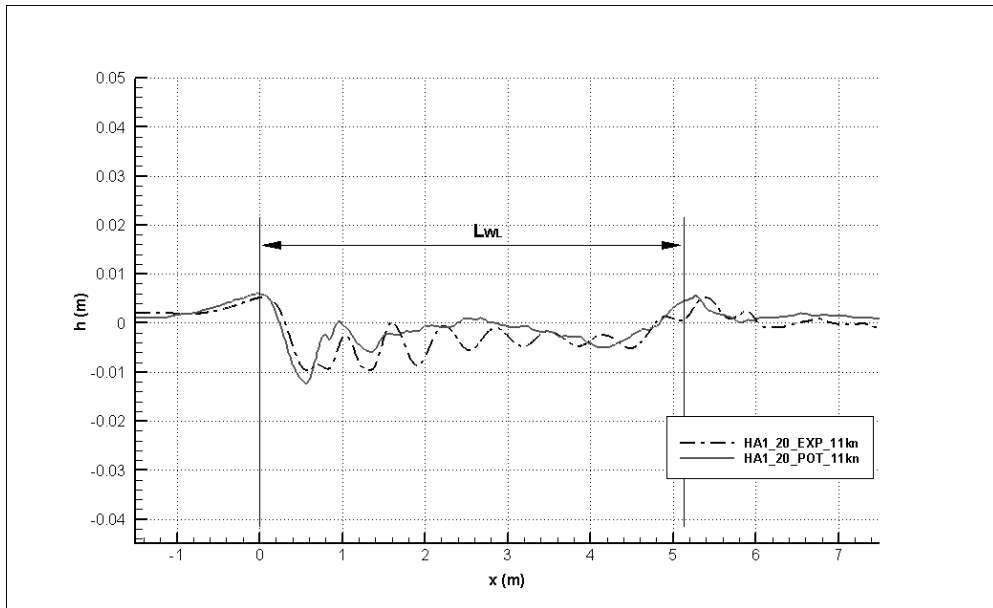
Hull_1 : Ropax $C_B=0.53$ Bulb_2 , 10cm from B_{max} , V_S : 18/21/24, Fn : 0.244/0.284/0.325

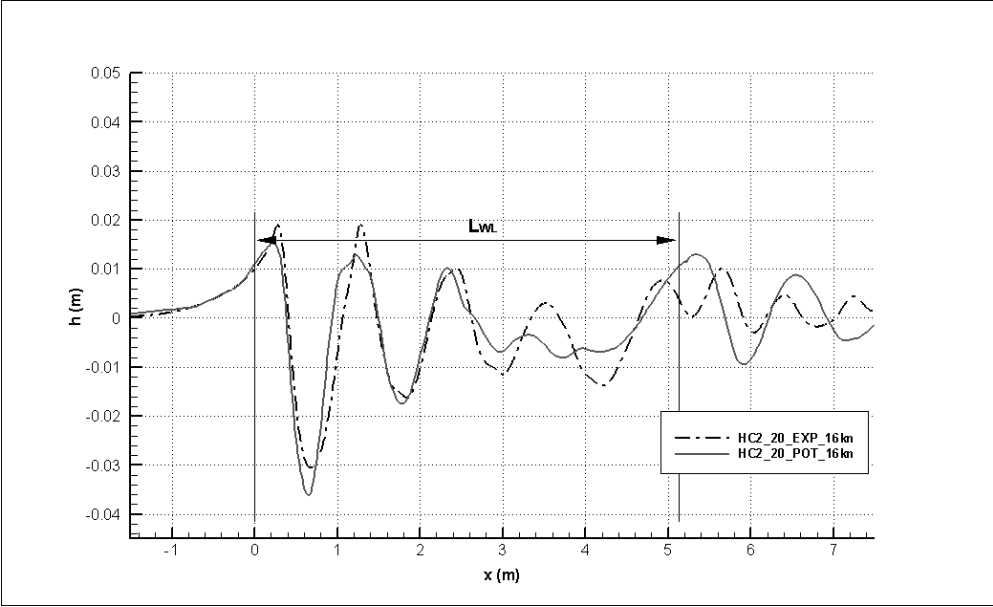
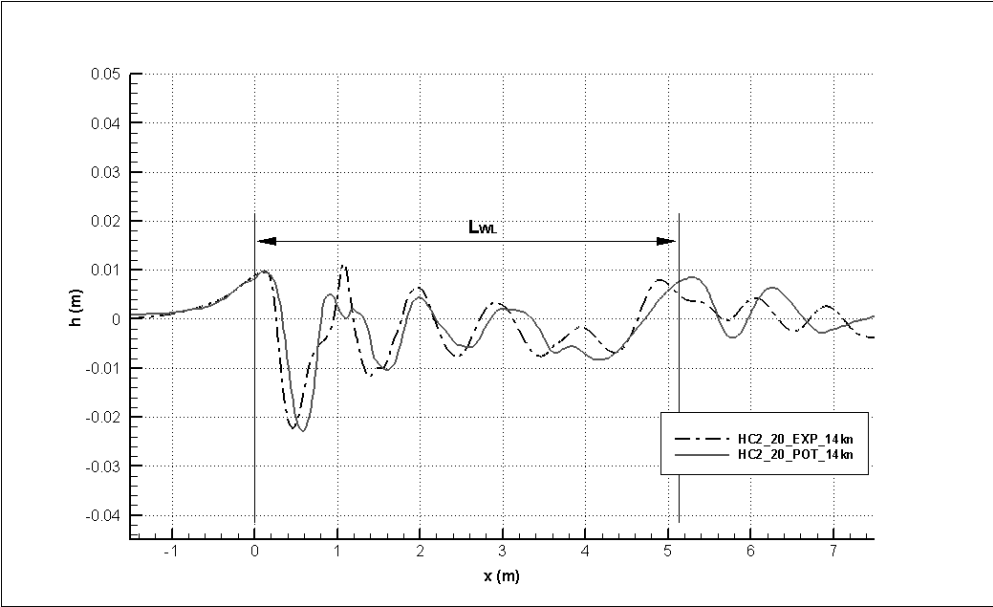
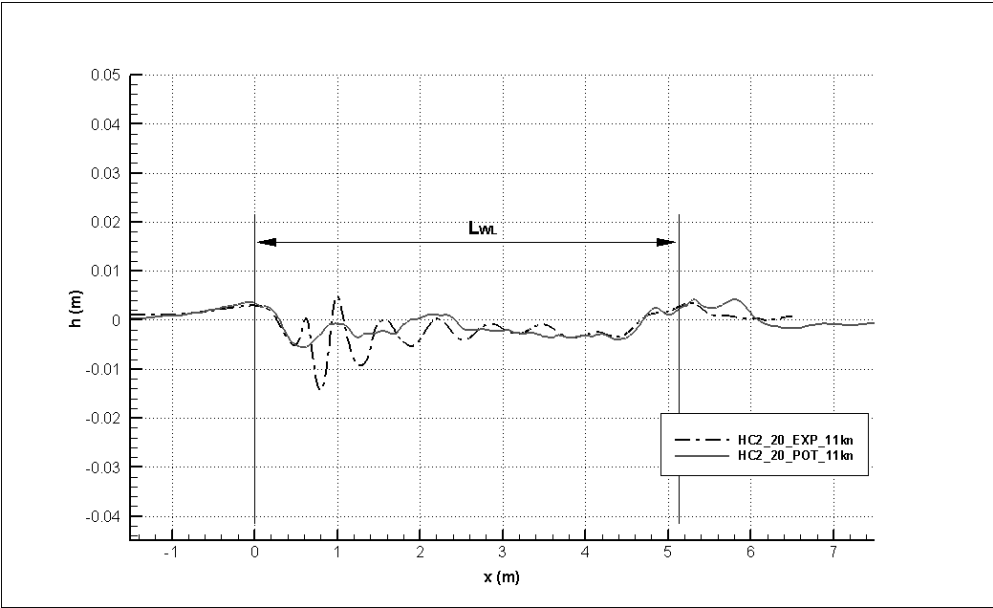












5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ – ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Οι υπολογισμοί της συνεκτικής ροής πραγματοποιήθηκαν για όλες τις εφαρμογές, τόσο για κλίμακα μοντέλου όσο και για πλήρη κλίμακα, κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια που υπολογίστηκε από την δυναμική ροή. Για να ελεγχθεί η ευαισθησία των υπολογισθέντων τιμών ολικής αντίστασης ως προς την πυκνότητα του πλέγματος, εφαρμόστηκε η διαδικασία σταδιακής πύκνωσης των πλεγμάτων [8]. Ένα τυπικό παράδειγμα παρουσιάζεται στους πίνακες 4 - 7, όπου δίδονται οι υπολογισμοί για κλίμακα μοντέλου και πλοίου αντίστοιχα για τις γάστρες 1,2. Οι διαστάσεις του πλέγματος δηλώνονται από τους αριθμούς N1N2N3 όπου N1 είναι ο αριθμός των κόμβων στην διαμήκη διεύθυνση, N2 στην ακτινική διεύθυνση και N3 στην περιμετρική. Η τάση σύγκλιση του συντελεστή ολικής αντίστασης παρουσιάζεται χωριστά για το πρωαίο και το πρυμναίο τμήμα και δείχνει πως οι διαφορές μεταξύ των δύο πυκνότερων πλεγμάτων είναι μικρότερες του 1% σε όλες τις περιπτώσεις.

Πίνακας 4 : Αποτελέσματα της σταδιακής πύκνωσης για την Hull_1 B1 21kn model scale

Block (I)			Block (I)+(II)		
Grid (N1·N2·N3)	Iterations	$C_{TB} \times 10^3$	Grid (N1·N2·N3)	Iterations	$C_T \times 10^3$
116x31x21	1220	38.32	102x31x21+36x30x25	1240	4.521
231x62x42	393	38.05	204x62x44+69x61x50	512	4.364
331x91x61	459	38.00	301x91x61+91x91x70	655	4.308

Πίνακας 5 : Αποτελέσματα της σταδιακής πύκνωσης για την Hull_1 B1 21kn full scale

Block (I)			Block (I)+(II)		
Grid (N1·N2·N3)	Iterations	$C_{TB} \times 10^3$	Grid (N1·N2·N3)	Iterations	$C_T \times 10^3$
116x41x21	929	36.13	131x41x21+36x30x25	2003	2.856
231x82x42	560	36.12	261x82x42+70x61x50	451	2.652
331x120x61	479	36.04	391x120x61+92x91x70	590	2.589

Πίνακας 6 : Αποτελέσματα της σταδιακής πύκνωσης για την Hull_2 A1 19kn model scale

Block (I)			Block (I)+(II)		
Grid (N1·N2·N3)	Iterations	$C_{TB} \times 10^3$	Grid (N1·N2·N3)	Iterations	$C_T \times 10^3$
116x31x21	703	34.17	121x31x21+36x30x25	1050	4.209
231x62x42	382	34.04	241x62x44+69x61x50	428	4.037
331x91x61	437	34.07	341x91x61+91x91x70	410	4.057

Πίνακας 7 : Αποτελέσματα της σταδιακής πύκνωσης για την Hull_2 A1 19kn full scale

Block (I)			Block (I)+(II)		
Grid (N1·N2·N3)	Iterations	$C_{TB} \times 10^3$	Grid (N1·N2·N3)	Iterations	$C_T \times 10^3$
116x41x21	1037	32.08	121x41x21+36x30x25	1216	2.455
231x82x42	528	32.01	241x82x44+69x61x50	506	2.346
331x120x61	576	32.05	361x120x61+91x91x70	477	2.367

Στους πίνακες 8 και 9 γίνεται σύγκριση της υπολογισθείσας ολικής αντίστασης για σταθερό sinkage και trim με την πειραματικά μετρημένη σε κλίμακα μοντέλου. Παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία με το απόλυτο λάθος να είναι κάτω του 2.5% σε κάθε περίπτωση. Επιπλέον, τα υπολογιστικά αποτελέσματα δείχνουν όμοιες τάσεις ως προς τα μετρηθέντα για τις γάστρες 1 και 2. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα αποτελέσματα σημειώνουν επιπλέον βελτίωση υπό ελεύθερες συνθήκες (πίνακας 10).

Πίνακας 8: Σύγκριση μεταξύ πειραματικά μετρημένων αντιστάσεων και αρ. υπολογισμένων

R_T (Nt)	Hull_1 B1 Fn=0.325	Hull_1 B2 Fn=0.325
experimental	19.397	19.613
calculated	18.979	19.176
“error”	- 2.20 %	- 2.22 %

Πίνακας 9: Σύγκριση μεταξύ πειραματικά μετρημένων αντιστάσεων και αρ. υπολογισμένων

R_T (Nt)	Hull_2 Fn=0.256	Hull_2 Fn=0.297
experimental	16.083	23.899
calculated	16.213	23.441
“error”	0.81 %	- 1.92 %

Πίνακας 10: Σύγκριση μεταξύ πειραματικά μετρημένων αντιστάσεων και υπολογισμένων μέσω διαδικασίας εύρεσης της παράλληλης βύθισης και διαγωγής

R_T (Nt)	Hull_1 B1 Fn=0.325	Hull_1 B2 Fn=0.325
Experimental	19.397	19.613
Calculated	19.149	19.326
error	- 1.28 %	- 1.46 %

Πίνακας 11 : Σύγκριση των μετρημένων C_R με τα υπολογισμένα από το potential C_W για τους τρεις βολβούς της Hull_1 και για δύο ταχύτητες

	Fn=0.244			Fn=0.284		
	B0	B1	B2	B0	B1	B2
Exp. $C_R \times 10^3$	1.128	1.104	1.075	1.472	1.281	1.433
Calc. $C_W \times 10^3$	0.540	0.538	0.527	0.756	0.657	0.658

Table 12: Reynolds numbers at model and full scale for the tested speeds Hull_1

	Fn=0.244			Fn=0.284		
	B0	B1	B2	B0	B1	B2
Model scale R_n	5.517×10^6	5.639×10^6	5.742×10^6	6.479×10^6	6.849×10^6	6.576×10^6
Full scale R_n	1.151×10^9	1.191×10^9	1.191×10^9	1.342×10^9	1.389×10^9	1.388×10^9

Table 13: Comparison between the calculated and the measured total resistance Hull_1

R_T (Nt)	Fn=0.244			Fn=0.284		
	B0	B1	B2	B0	B1	B2
experimental	9.829	10.027	9.879	14.136	13.890	14.283
calculated	10.138	10.239	10.161	14.073	14.056	14.231
“error” %	+3.1	+2.1	+2.8	-0.4	+1.2	-0.4

Table 14: Calculated resistance coefficients at model scale Hull_1

	Fn=0.244			Fn=0.284		
	B0	B1	B2	B0	B1	B2
$C_T \times 10^3$	4.346	4.319	4.300	4.348	4.308	4.361
$C_F \times 10^3$	3.329	3.263	3.262	3.244	3.162	3.256
$C_P \times 10^3$	1.017	1.057	1.037	1.105	1.146	1.105
$C_F \times 10^3$ ATTC	3.235	3.205	3.217	3.152	3.125	3.123
$C_F \times 10^3$ ITTC	3.332	3.298	3.311	3.240	3.207	3.207

Table 15: Calculated resistance coefficients and total resistance at full scale Hull_1

	Fn=0.244			Fn=0.284		
	B0	B1	B2	B0	B1	B2
$C_T \times 10^3$	2.493	2.476	2.481	2.602	2.589	2.619
$C_F \times 10^3$	1.576	1.571	1.590	1.546	1.545	1.574
$C_P \times 10^3$	0.918	0.943	0.890	1.056	1.044	1.045
$C_F \times 10^3$ ATTC-ITTC	1.504	1.498	1.498	1.476	1.470	1.470
R_T (Nt)	3.823×10^5	3.858×10^5	3.853×10^5	5.535×10^5	5.552×10^6	5.618×10^5

Table 16: Calculated form factors κ according to skin friction options

C_F	Fn=0.244			Fn=0.284		
	B0	B1	B2	B0	B1	B2
computed	0.057	0.089	0.088	0.028	0.063	0.036
ITTC	0.069	0.064	0.045	0.012	0.041	0.060
ATTC	0.128	0.122	0.102	0.120	0.093	0.114

Table 17: Predicted total resistance $R_T(Nt)$ at full scale from experiments

	Fn=0.244			Fn=0.284		
	B0	B1	B2	B0	B1	B2
ITTC - Ss	3.803×10^5	3.891×10^5	3.824×10^5	5.804×10^5	5.588×10^5	5.885×10^5
$\delta R_T\%$	-0.05	+0.08	-0.08	+4.8	+0.06	+4.7
ITTC - Sw	3.659×10^5	3.785×10^5	3.714×10^5	5.540×10^5	5.403×10^5	5.685×10^5
$\delta R_T\%$	-4.30	-1.90	-3.6	+0.01	-2.7	+1.20
Sw/Ss	1.054	1.040	1.041	1.075	1.052	1.057

Table 18: Comparison between computational EHP and calculated with the standard Froude extrapolation method.

Full Scale EHP (kW)	Hull_1 B1 Fn=0.325	Hull_1 B2 Fn=0.325	Hull_2 A1 Fn=0.256	Hull_2 A1 Fn=0.297
CFD	9685	9579	3799	6835
Froude	10222	10460	3905	7385
error	5.25 %	8.43 %	2.73 %	7.44 %

Table 19: Calculated resistance coefficients for Hull_1 B1 & B2

	MODEL SCALE		FULL SCALE	
	Hull_1 B1	Hull_1 B2	Hull_1 B1	Hull_1 B2
Re no	7.82×10^6	7.82×10^6	1.58×10^9	1.58×10^9
$C_F \times 10^3$	3.112	3.177	1.506	1.533
$C_P \times 10^3$	1.278	1.270	1.232	1.186
$C_T \times 10^3$	4.391	4.447	2.738	2.720
$1-w_n$	0.906	0.905	0.926	0.927
EHP(KW)	0.037	0.037	9685	9579

Table 9: Calculated resistance coefficients for Hull_2 A1

	MODEL SCALE		FULL SCALE	
	Fr=0.256	Fr=0.297	Fr=0.256	Fr=0.297
Re no	6.10×10^6	7.07×10^6	1.28×10^9	1.49×10^9
$C_F \times 10^3$	3.271	3.207	1.580	1.558
$C_P \times 10^3$	0.524	0.850	0.482	0.809
$C_T \times 10^3$	3.794	4.056	2.063	2.367
$1-w_n$	0.876	0.891	0.913	0.920
EHP(KW)	0.027	0.045	3799	6835

Table 11: Calculated self-propulsion coefficients for Hull_1 B1 & B2

	MODEL SCALE		FULL SCALE	
	B1	B2	B1	B2
$C_F \times 10^3$	3.124	3.178	1.507	1.537
$C_P \times 10^3$	1.627	1.573	1.424	1.367
$C_T \times 10^3$	4.751	4.751	2.931	2.904
1-t	0.924	0.922	0.935	0.936
1- w_e	0.894	0.891	0.917	0.917
P/D	1.185	1.14	1.24	1.25
RPM	1529	1567	205	204
DHP(KW)	0.056	0.056	13378	13178
K_T	0.243	0.231	0.208	0.208
10 K_Q	0.462	0.426	0.428	0.429

Table 12: Calculated self-propulsion coefficients for Hull_2 A1

	MODEL SCALE		FULL SCALE	
	Fr=0.256	Fr=0.297	Fr=0.256	Fr=0.297
$C_F \times 10^3$	3.289	3.223	1.587	1.563
$C_P \times 10^3$	0.747	1.092	0.605	0.909
$C_T \times 10^3$	4.035	4.315	2.192	2.472
1-t	0.94	0.94	0.941	0.956
1- w_e	0.890	0.906	0.913	0.924
P/D	1.10	1.06	1.24	1.25
RPM	1421	1742	187	230
DHP(KW)	0.042	0.0706	5200	9472
K_T	0.235	0.225	0.210	0.210
10 K_Q	0.415	0.039	0.429	0.417

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Στις εφαρμογές που έχουν γίνει μέχρι στιγμής, γενικά η αναπτυχθείσα υβριδική μέθοδος, επιτυγχάνει τον σκοπό της να επιταχύνει την διαδικασία υπολογισμών, ενώ μπορεί να προβλέψει με πολύ καλή ακρίβεια την ολική αντίσταση για πλοία με χαμηλό συντελεστή γάστρας, όπως ΕΓ/ΟΓ, RoRo, ContainerShips
- Γενικά η μέθοδος, μπορεί να εντοπίσει την καλύτερη μεταξύ ενός αριθμού περιπτώσεων, και σαν αποτέλεσμα αυτού, στο μέλλον θα μπορούσε να εισαχθεί σε μία διαδικασία βελτιστοποίησης και να χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία σχεδίασης παρόμοιων μορφών πλοίων
- Η μέθοδος έχει μειωμένη ακρίβεια σε πολύ μεγάλους αριθμούς Froude όπου τα πραγματικά κύματα σπάνε, μιας και αδυνατεί να προβλέψει τέτοιου είδους φαινόμενα.
- Επίσης σε ογκώδη πλοία και σε πολύ χαμηλούς αριθμούς Froude, αφενός ο κώδικας δυναμικής απαιτεί πολύ μεγάλο πλήθος panels και άρα και υπολογιστικό χρόνο, αφετέρου στον κώδικα πραγματικής ροής τα μοντέλα τύρβης αδυνατούν να περιγράψουν τα φαινόμενα αποκόλλησης που συμβαίνουν
- Οι πρόσθετοι βολβοί (additive bulbs), φαίνεται αρχικά πως έχουν την ίδια επίδραση με τους εξομαλυμένους (implicit bulbs). Απαιτούνται περαιτέρω πειράματα για επιβεβαίωση.
- Οι υπολογισμοί σε κλίμακα πλοίου, έδειξαν πως οι υπολογιστικές μεθοδολογίες θα μπορούσαν να προσφέρουν σημαντική βοήθεια στον μέχρι σήμερα εμπειρικό τρόπο προεκβολής των μετρήσεων που χρησιμοποιούν οι πειραματικές δεξαμενές, και κυρίως όσον αφορά την βρεχόμενη επιφάνεια η οποία χρησιμοποιείται.
- Οι υπολογισμοί αυτοπρόωσης επιβεβαιώνουν την πρακτική των πειραματικών δεξαμενών να υποθέτουν σταθερό συντελεστή ώσης k_T μεταξύ μοντέλου και πλοίου.
- Οι υπολογισθέντες τιμές για το ονομαστικό ποσοστό ομόρου (nominal wake) είναι πολύ κοντά σε αυτές του πραγματικού ποσοστού ομόρου (effective wake), δείχνοντας πως η μέτρηση των ταχυτήτων του ρευστού σε πειράματα ρυμούλκησης, έχει νόημα.

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι : ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ Δ.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	Σελ. 3
1. ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	Σελ. 5
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ Δ.Ε.	Σελ. 7
3. ΜΕΡΟΣ 1⁰ – ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	Σελ. 9
3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΙΔΕΑ : ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	Σελ. 11
3.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΓΑΣΤΡΑΣ	Σελ. 12
3.2.1 ΓΕΝΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΤΟΜΗΣ	Σελ. 13
3.2.2 ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΝΟΜΕΩΝ	Σελ. 14
3.2.3 ΔΥΣΚΟΛΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	Σελ. 15
3.3 ΚΩΔΙΚΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	Σελ. 16
3.3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ PANELS	Σελ. 17
3.3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	Σελ. 18
3.3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ SINKAGE & TRIM	Σελ. 19
3.4 ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	Σελ. 20
3.4.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	Σελ. 21
3.4.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	Σελ. 22
3.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	Σελ. 28
3.5.1 ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΑ ΜΕΓΕΘΗ	Σελ. 28
3.5.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	Σελ. 35
4. ΜΕΡΟΣ 2⁰ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	Σελ. 39
4.1 ΣΥΝΟΛΟ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ - ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	Σελ. 40
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΡΟΗΣ - ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ	Σελ. 52
4.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	Σελ. 28
4.4 ΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	Σελ. 54
4.4.1 ΒΡΕΧΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ & ΠΡΟΕΚΒΟΛΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	Σελ. 54
4.4.2 ΠΡΟΣΘΕΤΟΙ ΚΑΙ ΕΞΟΜΑΛΥΜΕΝΟΙ ΒΟΛΒΟΙ	Σελ. 57
4.4.3 ΠΟΔΟΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΛΥΣΕΙΣ	Σελ. 60
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	Σελ. 61
6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	Σελ. 61
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	Σελ. 61

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ : ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [xx] Tzabiras GD, Loukakis TA, Garofallidis D. On the numerical solution of the total ship resistance problem under a predetermined free surface. 18th Symposium on Naval Hydrodynamics, ONR, Ann-Arbor, Michigan 1990.
- [xx] Garofallidis D. Experimental and numerical investigation of the flow around a ship model at various Froude numbers. PHD Thesis, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, NTUA, Athens 1996
- [xx] Tzabiras G, Garofallidis D. Computation of the resistance of s Series 60, $C_B=0.6$ model under a measured free-surface. 12th IMAM Int. Conference, Lisboa 2005.
- [xx] Janson C E. Potential Flow Panel Methods for the Calculation of Free-surface Flows with Lift. PHD Thesis, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Division of Hydromechanics, Chalmers University, Goteborg 1997.
- [1] Raven HC, Starke B. Efficient Methods to Compute Steady Ship Viscous Flow with Free Surface. 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan 2002.
- [2] Huan, JC, Huang, TT. Surface ship total resistance prediction based on a nonlinear free surface potential flow solver and a Reynolds-averaged Navier-Stokes viscous correction, J of Ship Research, March 2007; 47-64
- [xx] Kerczek von C, Tuck EO. The Representation of Ship Hulls by Conformal Mapping Functions. J of Ship Research, September 1969;234-293.
- [xx] Reed AM, Nowacki H. Interactive Creation of Fair Ship Lines. J of Ship Research, June 1974;18:96-112.
- [8] Tzabiras GD, Prifti AC, Numerical simulation of the separated, turbulent flow past the stern of traditional fishing vessels. In: Tzabiras GD, editor. Calculation of Complex Turbulent Flows, Advances in Fluid Mech. series, CMEM pub., 2001;131-166.
- [xx] Tzabiras GD, Dimas A, Loukakis TA. A numerical method for the calculation of incompressible, steady, separated flows around aerofoils. Int. J for Numerical Methods in Fluids 1986;6:789-809.
- [xx] Tzabiras GD, Prifti AC, Grigoropoulos G.J, Loukakis T.A. An advanced CFD method for predicting the propulsive performance of traditional fishing vessels. CADAP-95 RINA Conference, Southampton 1995; p.17.1-17.16.
- [xx] Tzabiras GD. Numerical study of the viscous flow past a ship's model with asymmetric

stern. MARIND-96 Conf., Varna 1996; p.III.41-III.57.

- [xx] Kerczek von C, Stern F. The Representation of Ship Hulls by Conformal Mapping Functions: Fractional Maps. *J of Ship Research* 1983;27:158-159.
- [xx] Tzabiras GD. Numerical evaluation of Reynolds scale effects on the resistance and propulsion characteristics of ships. In: Schmitt H, editor. *Flows at Large Reynolds Numbers, Advances in Fluid Mech. series, CMEM pub.*, 1997; p.251-290.
- [xx] Tzabiras GD. A method for predicting the influence of an additive bulb on ship resistance. 8th International Conference on Hydrodynamics, Nantes 2008; p.53-60.
- [3] Hess, J.L. and Smith A.M.O 1968. Calculations of potential flow about arbitrary bodies, *Prog. Aeraunaut. Sci.*, vol 8, 1-136
- [5] Tzabiras, G.D. 2004. Resistance and self-propulsion calculations for a Series-60, C_B -0.6 hull at model and full scale. *Ship Technology Research*, vol. 51(1), 21-34
- [xx] Tzabiras GD. Numerical calculation of 2D free surface flows. *Proc. Computational Methods and Experimental Measurements VIII (CMEM-97)*, Rhodes, Greece 1997; p.361-370.
- [4] Launder BE, Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows, *Computation Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3, p.269-289, 1974
- [xx] Tzabiras GD. On the calculation of the viscous flow around bulbous or U-shaped bows at zero Froude number. *Ship Technology Research*, February 1995;42:31-44.
- [xx] Tzabiras GD. A numerical study of the turbulent flow around the stern of ship models. *Int. J for Numerical Methods in Fluids*, November 1991;9:1179-1204.
- [xx] Tzabiras GD. A numerical investigation of the Reynolds scale effect on the resistance of bodies of revolution. *Ship Technology Research*, February 1992;39:28-44.
- [xx] Tzabiras GD. Resistance and self-propulsion numerical experiments on two tankers at model and full scale. *Ship Technology Research*, February 1993;40:20-38.
- [xx] Eca L, Hoekstra M. On the influence of grid topology on the accuracy of ship viscous flow calculations. 5th Osaka colloquium on advanced CFD applications to ship flow and hull form design, Osaka, Japan 2005.
- [xx] Kracht AM. Design of bulbous bows. *SNAME Transactions*, 1978

- [xx] Σπύρου, Κ. 1984 Σχεδίαση της βολβοειδούς πλώρης, Διπλωματική εργασία, τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- [6] Tzabiras, G.D. 1997. A numerical study of additive bulb effects on the resistance and self-propulsion characteristics of a full ship form. Ship Technology Research, vol. 44(1), 98-108
- [7] Toro Riemann, EF. 1999. Solvers and numerical methods for fluid dynamics : a practical introduction. 2nd edition. Berlin : Springer Verlag.
- [9] Tzabiras, G. Politis, G. and Loukakis T. 1995. Calculations of propulsion characteristics of a tanker using different propeller models. First International Conference on Marine Technology ODRA-95, Szczecin, Poland.
- [10] Tzabiras, GD. 1996. A numerical study of actuator disk parameters affecting the self-propulsion of a tanker. International Shipbuilding Progress. Vol. 43. 433 : 5-47.
- [xx] Τζαμπίρας, Γ.Δ. Κοντογιάννης, Κ.Δ. 2008 Ανάπτυξη Μεθόδου Υπολογισμού τις Υδροδυναμικής Συμπεριφοράς των Βολβών. ετήσιο συνέδριο ΕΛ.Ι.Ν.Τ., Πειραιάς, Ελλάδα
- [xx] Tzabiras, GD. Kontogiannis, KD. Papakonstantinou, VK. 2009. Numerical Prediction of the Resistance and Self-Propulsion characteristics of Passenger-Ferry Ships. 13th Congress of Intl. Maritime Assoc. of Mediterranean IMAM 2009, Istanbul, Turkey
- [xx] Tzabiras, GD. Kontogiannis, KD. 2009. An Integrated Method for Predicting the Hydrodynamic Resistance of low- C_B Ships. Journal Computer Aided Design, Elsevier ed. Article in Press. doi:10.1016 / j.cad.2009.08.001