



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

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΕΛΙΚΑΣ - ΠΗΔΑΛΙΟΥ ΣΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΑΥΤΟΠΡΟΩΣΗΣ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

Σαρδέλης Κωνσταντίνος,
Προπτυχιακός Φοιτητής Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επιβλέπων: Τζαμπίρας Γεώργιος
Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής(Ε.Ν.Θ.Υ) κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2017-2018, στο πλαίσιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον επιβλέποντα και διευθυντή του Ε.Ν.Θ.Υ κ. Γεώργιο Τζαμπίρα, Καθηγητή, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντας μου την εν λόγω διπλωματική εργασία καθώς και για τη μεγάλη του διάθεση να με καθοδηγήσει και να με συνδράμει σε όποιες δυσκολίες συνάντησα κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Λιαροκάπη Δημήτριο (ΕΤΕΠ) για την καθοδήγηση που μου προσέφερε, με περισσή όρεξη και ενδιαφέρον, κατά την εκτέλεση και επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων καθώς και κατά την συγγραφή του παρόντος.

Θα ήθελα ακόμη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον κ. Ι. Τραχανά (ΕΤΕΠ) για την ταχεία εκτέλεση και προετοιμασία της συνολικής πειραματικής διαδικασίας καθώς και για τη διάθεσή του να μου επιλύσει όποιες απορίες προέκυψαν στην διάρκεια αυτής.

Κρίσιμη στην εκτέλεση και εξέλιξη της εν λόγω εργασίας ήταν και η συμβολή του κ. Γ. Μυλωνά (Προτυποποιού, ΕΤΕΠ), τόσο για την επιδιόρθωση του πρότυπου μοντέλου αλλά και για όλες τις τεχνικές λύσεις που προσέφερε κάθε φορά που ήταν αυτό αναγκαίο.

Καθοριστική ήταν και η βοήθεια των κυρίων Φ. Κασάπη (ΕΕΔΙΠ), κατά στην διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων και Δ. Τριπερίνα (ΕΤΕΠ) κατά τον υπολογισμό των απαραίτητων υδροστατικών μεγεθών και της γεωμετρίας της γάστρας του μοντέλου.

Κλείνοντας θα ήθελα να αναφέρω πως συνολικά όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής από το ξεκίνημα της διπλωματικής μου εργασίας με έκανε να αισθανθώ πολύ οικεία με την εξαιρετική τους συμπεριφοράς προς το πρόσωπό μου, με αποτέλεσμα η διαδικασία αυτή για όσο καιρό διήρκεσε να είναι ιδιαίτερος ευχάριστη και να τη θυμάμαι πάντα στο μέλλον με αγάπη.

Κων/νος Σαρδέλης,

30/6/2018

Στοιχεία Επικοινωνίας

Τηλ: +306934494240

Email: sardelis93@gmail.com

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗΣ

ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ.....	5
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΡΙΒΗΣ.....	5
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΛΟΓΩ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	7
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ.....	8
ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	
ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ.....	11
ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΡΟΗ.....	13
ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΥΤΟΠΡΟΩΣΗΣ.....	14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟΥ & ΜΟΝΤΕΛΟΥ

2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	19
2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΚΑΙ	
ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	23
3.4 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΥΤΟΠΡΟΩΣΗΣ.....	26
3.4.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΛΙΚΑΣ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΗΔΑΛΙΟ.....	26
3.4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΞΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	27
3.4.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ DRY RUN.....	29
3.5 ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΡΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	32
3.6 ΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΘΕΛΚΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ.....	34
4.2 ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ.....	35
4.2.1 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ RESISTANCE,	
HEAVE, RITCH.....	35
4.2.2 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΩΣΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ.....	36
4.2.3 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ.....	37
4.2.4 ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ.....	37
4.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ΟΡΓΑΝΩΝ.....	38
4.3.1 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	38
4.3.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	
ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΚΕΝΤΡΟΥ ΜΑΖΑΣ.....	39
4.3.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	
ΠΡΟΝΕΥΤΑΣΜΟΥ.....	41
4.3.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ	
ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ.....	42
4.3.5 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΩΣΗΣ.....	44
4.3.6 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΡΟΠΗΣ.....	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΡΟΗ

5.1 ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΩΝ.....	48
5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	52
6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΩΡΙΣ ΠΗΔΑΛΙΟ.....	53
6.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΠΗΔΑΛΙΟ.....	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΥΤΟΠΡΟΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

7.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	66
7.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΩΡΙΣ ΠΗΔΑΛΙΟ.....	68
7.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΠΗΔΑΛΙΟ.....	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ.....	91
8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΠΡΟΩΣΗΣ.....	92
8.3 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

9.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ – ΑΦΟΡΜΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	97
9.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΡΟΩΝ.....	97
9.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ.....	99
9.4 ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	104
9.4.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ.....	105
9.4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΡΟΥΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ.....	108
9.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	113

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης του πηδαλίου στους συντελεστές πρόωσης και λειτουργίας της έλικας αυτοπροωθούμενου πλοίου.

Η εξέταση των συντελεστών αυτών πραγματοποιείται στα πλαίσια πειράματος αυτοπρόωσης προτύπου εξοπλισμένου με έλικα και πηδάλιο, κατασκευασμένου σε κλίμακα 1:45 σε σχέση με πραγματικό πλοίο μεταφοράς υγρού φορτίου. Τα πειράματα, έλαβαν χώρα στην πειραματική δεξαμενή του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να γίνει σύγκριση των μετρήσεων για μοντέλο εξοπλισμένο με και χωρίς πηδάλιο αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα η μελέτη ξεκίνησε με την προετοιμασία, την επισκευή και τον ερματισμό του μοντέλου. Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης και εγκαταστάθηκαν το σύστημα πρόωσης αποτελούμενο από κινητήρα, αξονικό σύστημα και έλικα καθώς και το δυναμόμετρο ώσης και ροπής. Στην συνέχεια ακολούθησαν τα πειράματα.

Όσον αφορά την διεξαγωγή των πειραμάτων, αρχικά εκτελέστηκε πείραμα ελεύθερης ροής της έλικας προκειμένου να ληφθεί το αντίστοιχο διάγραμμα. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μια σειρά πειραμάτων υπολογισμού αντίστασης ρυμούλκησης του μοντέλου εξοπλισμένου με και χωρίς πηδάλιο σε ήρεμο νερό σε ταχύτητες πλοίου 9-15.5 kn με βάση την εξίσωση των αριθμών Froude. Ακολούθως επιλέχθηκαν τέσσερις ταχύτητες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν πειράματα αυτοπρόωσης του μοντέλου με και χωρίς πηδάλιο, αντίστοιχα.

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν από τα παραπάνω αναλύθηκαν προκειμένου να εξαχθούν οι απαραίτητοι συντελεστές, όπως το ποσοστό μείωσης ώσης και ο συντελεστής ομόρρου, αλλά και τα μεγέθη όπως η ταχύτητα προχώρησης, η ώση της έλικας και η μεταφερόμενη ισχύς. Τα μεγέθη που εξήχθησαν τελικώς για μοντέλο εξοπλισμένο με και χωρίς πηδάλιο συγκρίθηκαν μεταξύ τους και παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές οι οποίες και σημειώθηκαν.

Τέλος επιλέχθηκε σε συνεργασία με τον επιβλέποντα να πραγματοποιηθούν και αριθμητικοί υπολογισμοί στην κλίμακα του μοντέλου για μία μόνο ταχύτητα. Μέσω επίλυσης προβλημάτων υπολογιστικής υδροδυναμικής επιβεβαιώθηκαν τα αντίστοιχα μεγέθη που μετρήθηκαν σε αρκετά μεγάλο βαθμό ενώ αποκτήθηκε και μια πληρέστερη εικόνα γύρω από το φαινόμενο που συνολικά μελετάται.

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗΣ [1]

1.1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ

Από τις αρχές του 19ου αιώνα, με τη χρήση των πρώτων μηχανοκίνητων προωστήριων μέσω για την κίνηση των πλοίων, εκλήθησαν οι ναυπηγοί της εποχής να υπολογίσουν την απαιτούμενη υποδύναμη πρόωσης, η οποία είναι στενά συνυφασμένη με την αντίσταση ρυμούλκησης του πλοίου. Ο υπολογισμός της αντίστασης ήταν όχι μόνο σύνθετος να πραγματοποιηθεί αλλά ταυτόχρονα όφειλε να είναι εξαιρετικά ακριβής καθώς υποεκτίμηση της αντίστασης θα οδηγούσε σε μειωμένη από την επιθυμητή επιτεύξιμη ταχύτητα ενώ υπερεκτίμηση της αντίστασης θα οδηγούσε σε αύξηση του κόστους της μηχανολογικής εγκατάστασης και μείωση της μεταφορικής ικανότητας λόγω αύξησης του βάρους της μηχανολογικής εγκατάστασης και της έκτασης του μηχανοστασίου. Όπως γίνεται συνεπώς αντιληπτό, η ανάγκη για τον ακριβή υπολογισμό της αντίστασης του πλοίου είναι μεγάλη και μέσα από συστηματικές έρευνες και μελέτες οι σύγχρονες αντιλήψεις για την αντίσταση παραθέτονται ακολούθως.

Η αντίσταση του πλοίου για μια δεδομένη ταχύτητα είναι ουσιαστικά η απαιτούμενη δύναμη που χρειάζεται για να ρυμουλκηθεί το πλοίο στην ταχύτητα αυτή σε ήρεμο νερό και οφείλεται σε απώλειες ενέργειας λόγω της επαφής της επιφάνειας της γάστρας του με το περιβάλλον ρευστό. Στη περίπτωση που η γάστρα δεν φέρει παρελκόμενα, τότε η αντίστασή της ονομάζεται αντίσταση γυμνής γάστρας (bare hull) ή ρυμούλκησης (towing) και είναι λίγο μειωμένη σε σχέση με την αντίσταση πρόωσης καθώς στην τελευταία παρουσιάζονται και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ έλικας και γάστρας.

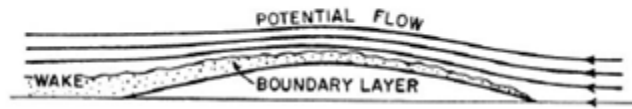
Κατά την κίνηση της γάστρας στο περιβάλλον ρευστό, σε κάθε σημείο της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας ασκείται μια στοιχειώδης δύναμη, η οποία μπορεί να αναλυθεί σε μια κάθετη συνιστώσα που οφείλεται στην πίεση και σε μια εφαπτόμενη στην επιφάνεια συνιστώσα που οφείλεται στη συνεκτικότητα(ιξώδες).

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο πως η συνεκτικότητα είναι χαρακτηριστική φυσική ιδιότητα των ρευστών και είναι το αίτιο εμφάνισης της διατμητικής εντατικής κατάστασης στη μάζα τους. Πρόκειται ουσιαστικά για την ιδιότητα των ρευστών να ανθίστανται στη διάτμησή τους, δηλαδή στη κίνηση ενός στοιχείου ως προς το διπλανό του. Από φαινομενολογικής σκοπιάς η συνεκτικότητα μοιάζει με την τριβή δύο στερεών σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή και κινούνται σχετικά. Για αυτό το λόγο ονομάζεται και εσωτερική τριβή. Ωστόσο η φύση των δύο δυνάμεων είναι εντελώς διαφορετική.

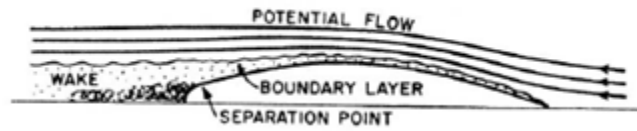
Συνεπώς, συνοψίζοντας τα παραπάνω η αντίσταση του πλοίου είναι η προβολή κατά τη διεύθυνση του άξονα της κίνησης του ολοκληρώματος των στοιχειωδών αυτών δυνάμεων (κάθετων και εφαπτομενικών) στη συνολική βρεχόμενη επιφάνεια. Προκύπτουν κατά αυτόν τον τρόπο οι 2 βασικές συνιστώσες της αντίστασης του πλοίου, η αντίσταση πίεσης και η αντίσταση τριβής, όπου θα αναλυθούν στην συνέχεια.

1.1.1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΤΡΙΒΗΣ

Η αντίσταση τριβής είναι η συνιστώσα της αντίστασης που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των εφαπτομενικών τάσεων (τάσεων συνεκτικότητας) και προβολή κατά τη διεύθυνση της ροής. Είναι αποτέλεσμα της κίνησης ενός σώματος σε ένα συνεκτικό ρευστό, καθώς σε ένα μη συνεκτικό ρευστό η αντίσταση τριβής είναι μηδενική. Κατά τη κίνηση αυτή, τα σημεία του ρευστού που βρίσκονται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια της γάστρας έχουν την ίδια ταχύτητα με αυτή και λόγω συνεκτικότητας θέτουν και τα γειτονικά υλικά σημεία σε κίνηση ίδιας κατεύθυνσης με το σώμα με συνέπεια τη δημιουργία οριακού στρώματος, το οποίο γίνεται παχύτερο από την πλώρη στην πρύμνη και διαφοροποιεί το γεωμετρικό σχήμα της γάστρας (Σχ. 1.1). Επίσης, σε περίπτωση που η γάστρα είναι παχύγραμμη, στη περιοχή της πρύμνης η ροή δύναται να αποκολληθεί σε ένα σημείο που λέγεται σημείο αποκόλλησης με αρνητικά αποτελέσματα, όπως είναι η δημιουργία ανάστροφης ροής και δρόμου δινών και ως εκ τούτου αύξηση των πιέσεων στην περιοχή (Σχ. 1.2, Σχ. 1.3).



Σχήμα 1.1 : Διαφοροποίηση της γεωμετρίας λόγω δημιουργίας οριακού στρώματος [1]



Σχήμα 1.2 : Εμφάνιση σημείου αποκόλλησης στην περιοχή της πρύμνης [1]

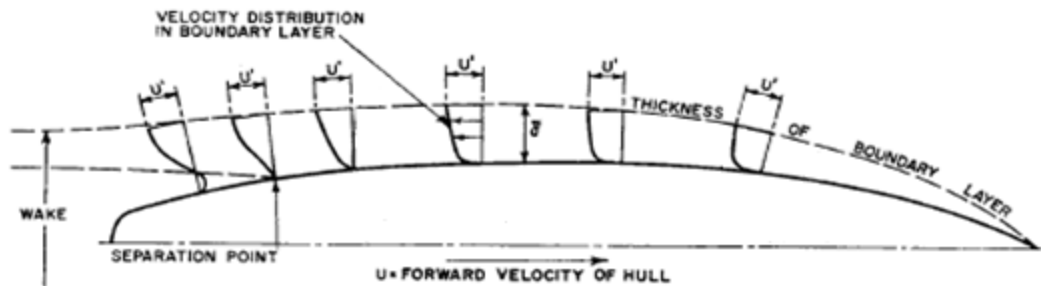


Fig. 26 Schematic diagram of boundary-layer flow

U' = Velocity at any point on hull in potential flow without viscosity
The velocity in boundary layer approaches U' asymptotically, and the thickness of layer, δ , is usually measured to the point where the velocity is $0.99 U'$

Σχήμα 1.3 : Εμφάνιση οριακού στρώματος και δημιουργία ανάστροφης ροής [1]

Η αντίσταση τριβής μπορεί να διασπαστεί σε δύο επιμέρους συνιστώσες, την αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας και την αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας που αποτελεί μέρος της υπόλοιπης αντίστασης. Πιο αναλυτικά, η διαδρομή κατά μήκος μιας γραμμής ροής από την πλώρη στην πρύμνη είναι μεγαλύτερη σε ένα σχηματισμένο σώμα από ότι σε μια επίπεδη πλάκα και έτσι η μέση ταχύτητα είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα η πραγματική τριβή να είναι μεγαλύτερη σε ένα πλοίο από ότι στην επίπεδη πλάκα. Συνεπώς, όσο πιο καμπυλόγραμμο είναι ένα σώμα τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της αντίστασης τριβής λόγω καμπυλότητας. Σημειώνεται πως η αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας αποκτά νόημα μόνο υπό το οπτικό πρίσμα της σύγκρισης με το πρόβλημα αντίστασης επίπεδης πλάκας και σε περίπτωση που δημιουργηθεί σημείο αποκόλλησης ο συντελεστής αντίστασης καμπυλότητας μειώνεται σημαντικά.

Η αντίσταση τριβής χαρακτηρίζεται κατά κύριο λόγο από τον αριθμό Reynolds (Re). Ο αριθμός Re αποτελεί το λόγο των δυνάμεων αδρανείας προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας, σχετίζεται από φυσικής άποψης με τις επιδράσεις του κινηματικού ιξώδους και δίνεται από τη σχέση:

$$Re = V \cdot L / \nu$$

Όπου:

V : η ταχύτητα του σώματος,

L : το μήκος του σώματος,

ν : η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Άμεσος είναι ο και συσχετισμός μεταξύ του αριθμού Re και του οριακού στρώματος καθώς το αδιάστατο πάχος του οριακού στρώματος για τον ίδιο τύπο ροής, είτε στρωτή είτε τυρβώδης, μειώνεται αυξάνοντας τον αριθμό Re με αποτέλεσμα το πλοίο να έχει πιο λεπτό αδιάστατο οριακό στρώμα από ότι το μοντέλο αφού λειτουργεί σε μεγαλύτερο αριθμό Re .

Επίσης, σημειώνεται πως για τον ίδιο αριθμό Reynolds το πάχος του οριακού στρώματος της στρωτής ροής είναι μικρότερο από το αντίστοιχο της τυρβώδους.

Η μετάβαση από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή συμβαίνει για αριθμούς Re από 10^5 έως 10^6 καθώς για χαμηλούς αριθμούς Re η ροή είναι στρωτή ενώ για μεγάλους αριθμούς Re η ροή γίνεται τυρβώδης αυξάνοντας την αντίσταση τριβής.

Ο τύπος υπολογισμού του συντελεστή αντίστασης τριβής, C_F , εισήχθη από την International Towing Tank Conference (ITTC) το έτος 1957 με σκοπό να συσχετίσει με σχετική ακρίβεια την αντίσταση τριβής πλοίου – μοντέλου. Ο τύπος είναι γνωστός υπό την ονομασία καμπύλη της ITTC' 57 και δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2}$$

Από τον παραπάνω συντελεστή υπολογίζεται η αντίσταση τριβής από την εξής σχέση:

$$R_F = 1/2 \cdot C_F \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S$$

όπου

C_F : ο συντελεστής αντίστασης τριβής

ρ : η πυκνότητα του νερού [$\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$]

S : η βρεχόμενη επιφάνεια [m^2]

V : η ταχύτητα [m/s]

Τέλος, σημειώνεται ότι η αντίσταση τριβής είναι κυρίαρχη σε χαμηλές ταχύτητες και, όπως φαίνεται παραπάνω, είναι συνάρτηση της βρεχόμενης επιφάνειας, της ταχύτητας, της τραχύτητας και της γεωμετρίας του σώματος. Αποτελεί ως ποσοστό της ολικής αντίστασης περίπου το 50% για πλοία υδροδυναμικής σχεδίασης υψηλών ταχυτήτων και περίπου το 85% για πλοία χαμηλής ταχύτητας.

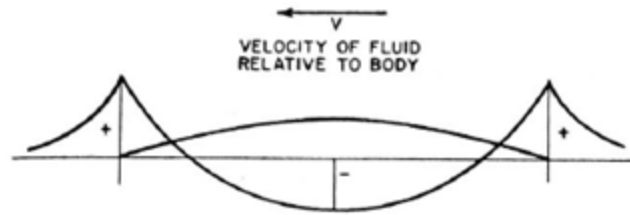
1.1.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΛΟΓΩ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας είναι η συνιστώσα της αντίστασης που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των κάθετων τάσεων (δυνάμεις πίεσης) και προβολή κατά τη διεύθυνση της ροής και οφείλεται στη συνεκτικότητα του ρευστού και στη συνεπαγόμενη δημιουργία οριακού στρώματος. Πιο αναλυτικά, εάν ένα σώμα είναι βαθιά βυθισμένο σε ένα ιδανικό μη συνεκτικό ρευστό και κινείται οριζοντίως με σταθερή ταχύτητα τότε λόγω απουσίας συνεκτικότητας, όπως σημειώθηκε προηγουμένως, η αντίσταση τριβής είναι μηδενική ενώ επειδή το σώμα είναι πλήρως βυθισμένο και δεν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια και η αντίσταση κυματισμού είναι μηδενική. (Σχ. 1.4)



Σχήμα 1.4: Πλήρως βυθισμένο σώμα σε μη συνεκτικό ρευστό [1]

Για το παραπάνω βυθισμένο σώμα η ταχύτητα της ροής στην πλώρη και στην πρύμνη του σώματος είναι μηδενική (σημεία ανακοπής), ενώ πλησιάζοντας το παράλληλο τμήμα του σώματος η ταχύτητα της ροής αυξάνεται επιτυγχάνοντας τη μέγιστη τιμή της. Από την εξίσωση Bernoulli, όπου ταχύτητα και πίεση είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη, προκύπτει ότι η πίεση θα είναι μέγιστη στην πλώρη και την πρύμνη, ενώ θα ελαττώνεται πλησιάζοντας προς το μέσο τμήμα. Για το λόγο αυτό και εξαιτίας της συμμετρικότητας του σώματος η κατανομή της πίεσης παρουσιάζεται ακολούθως (Σχ. 1.5).



Σχήμα 1.5 : Κατανομή πίεσης για το πλήρως βυθισμένο σώμα [1]

Οι ασκούμενες δυνάμεις θα οφείλονται αποκλειστικά στις πιέσεις, καθώς η αντίσταση τριβής και κυματισμού θα είναι μηδενικές, και επειδή κατά μήκος του σώματος θα είναι κάθετες στο σώμα μπορεί να αποδειχθεί πως θα αλληλοεξουδετερώνονται με αποτέλεσμα το σώμα να έχει μηδενική αντίσταση πίεσης και άρα μηδενική συνολική αντίσταση.

Αντιθέτως, εάν το παραπάνω σώμα είναι πλήρως βυθισμένο σε ένα πραγματικό συνεκτικό ρευστό, τότε, όπως εξηγήθηκε και στην αντίσταση τριβής, θα δημιουργηθεί ένα οριακό στρώμα που θα διαφοροποιεί το γεωμετρικό σχήμα του σώματος με συνέπεια αυτό το οριακό στρώμα να μεταβάλλει την κατανομή πίεσης σε σχέση με την προηγούμενη κατανομή σε μη συνεκτικό ρευστό, μειώνοντας τις πιέσεις στην πρύμνη. Έτσι, η ύπαρξη του οριακού στρώματος οδηγεί σε μείωση της οριζόντιας συνιστώσας της πίεσης αυξάνοντας κατά αυτό τον τρόπο την αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας.

Η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας είναι συνάρτηση της βρεχόμενης επιφάνειας, της ταχύτητας και της γεωμετρίας του σώματος. Αποτελεί μέρος της υπόλοιπης αντίστασης ενώ σημειώνεται πως μαζί με την αντίσταση τριβής ονομάζονται αντίσταση συνεκτικότητας του σώματος.

1.1.3 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ

Η αντίσταση κυματισμού προκαλείται από τα κύματα που δημιουργεί ένα σώμα κατά την κίνησή του με σταθερή ταχύτητα σε ήρεμο νερό και σχετίζεται με την συνισταμένη δύναμη που είναι κατά κύριο λόγο αποτέλεσμα των κάθετων πιέσεων που ασκούνται στο σώμα. Το σώμα κινούμενο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού προκαλεί κύματα που απλώνονται μακριά από το σώμα μεταφέροντας ορισμένο ποσό ενέργειας που διασκορπίζεται στη θάλασσα.

Η αντίσταση κυματισμού χαρακτηρίζεται κατά κύριο λόγο από τον αριθμό Froude (F_n). Ο αριθμός F_n αποτελεί το λόγο των δυνάμεων αδρανείας προς τις δυνάμεις βαρύτητας, σχετίζεται από φυσικής άποψης με την δημιουργία κυματισμών και δίνεται από τη σχέση:

$$F_n = \frac{V}{(g \cdot L)^{1/2}}$$

Όπου:

V: η ταχύτητα [m/s]

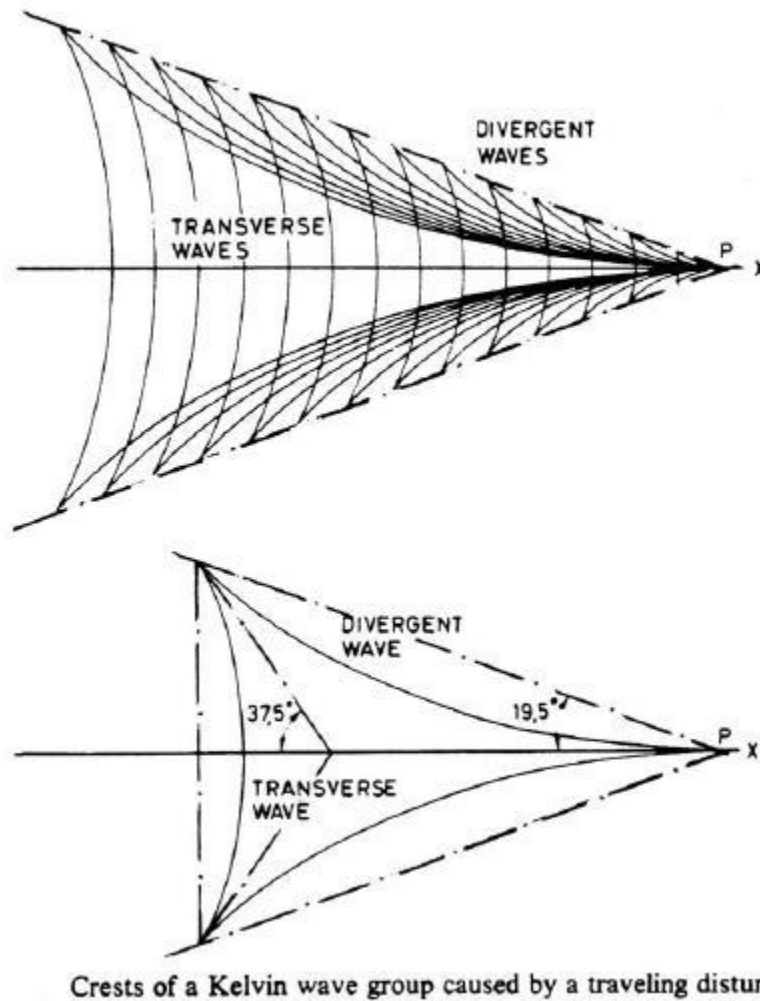
v: η κινηματική συνεκτικότητα [m^2/s]

L: το βρεχόμενο μήκος της ισάλου [m]

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s^2]

Η πρώτη θεωρητική προσπάθεια για τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού πραγματοποιήθηκε από τον Kelvin τον 19^ο αιώνα, σύμφωνα με την οποία ένα μοναδικό σημείο πίεσης που κινείται με ταχύτητα ίδια με αυτή του πλοίου σε ευθεία γραμμή πάνω στην επιφάνεια του νερού δημιουργεί ένα σύστημα εγκάρσιων κυματισμών (transverse waves) μαζί με μια σειρά αποκλινόντων κυματισμών (divergent wave) που απλώνονται πίσω από το σημείο πίεσης. Ο συνολικός σχηματισμός κυμάτων βρίσκεται μέσα σε δύο γραμμές που ξεκινούν από το σημείο πίεσης και σχηματίζουν γωνίες περίπου 19.5^ο ως προς τη διεύθυνση της κίνησης.

Το σύστημα αυτό των κυματισμών παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.6 : Σύστημα εγκάρσιων και αποκλινόντων κυματισμών [1]

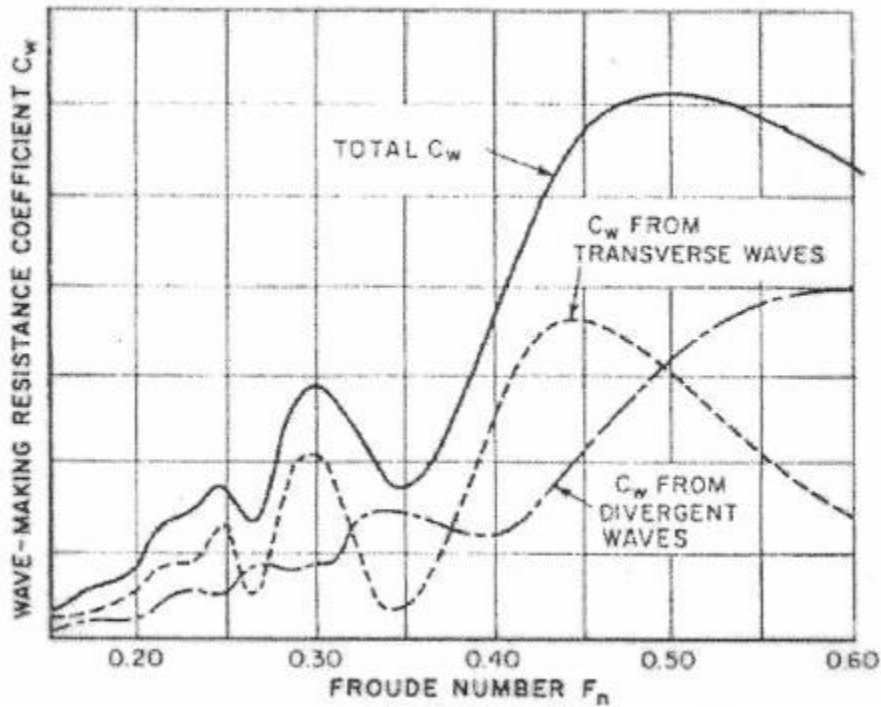
Η ανάπτυξη της θεωρίας αντίστασης κυματισμών αρχικά στηρίχθηκε στην υπέρθεση των κυματισμών που δημιουργεί μία γάστρα με αποτέλεσμα το συνολικό πλάτος κυματισμού να προκύπτει από το άθροισμα των πλατών της κάθε γάστρας. Στην πραγματικότητα όμως, το συνολικό σύστημα κυματισμών επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση των διαθλώμενων κυμάτων που περιλαμβάνουν αντανακλώμενα και μεταδιδόμενα κύματα.

Οι πιο πρόσφατες μελέτες για τον αριθμητικό υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού πραγματοποιούνται μέσω των μεθόδων συνοριακών στοιχείων. Σε αυτές τις μεθόδους η επιφάνεια της γάστρας προσεγγίζεται με μια σειρά στοιχείων από κατανεμημένες πηγές και καταβόθρες, οι οποίες βρίσκονται πάνω στην πραγματική επιφάνεια της γάστρας αντί στο κεντρικό επίπεδο, όπως γίνεται στη μέθοδο προσέγγισης λεπτόγραμμου πλοίου, με συνέπεια την καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής γεωμετρίας της γάστρας.

Γενικότερα, η αντίσταση κυματισμού εξαρτάται από τη βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος, από τη γεωμετρία της γάστρας καθώς και από την ταχύτητα με την οποία κινείται το πλοίο ενώ σημειώνεται πως είναι κυρίαρχη κυρίως σε μεγάλες ταχύτητες, δηλαδή σε μεγάλους αριθμούς Froude. Η αντίσταση κυματισμού σε αντίθεση με την αντίσταση τριβής και την αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας δεν είναι μηδενική για ιδανικό μη συνεκτικό ρευστό και αποτελεί μέρος της της υπόλοιπης αντίστασης. Μπορεί επίσης να διαχωριστεί σε αντίσταση σχηματισμού κυματισμών (wave pattern resistance) και σε αντίσταση θραύσεως κυματισμών (wave breaking resistance).

Για την μείωση της αντίστασης κυματισμού κρίνεται σκόπιμη η σχεδίαση λεπτόγραμμων γαστρών, η επιλογή της κατάλληλης απόστασης μεταξύ των ημιγαστρών εφόσον πρόκειται για δίγαστρο πλοίο, καθώς και στη σχεδίαση βολβού στο προωαίο τμήμα, η οποία μέσω πειραμάτων έχει δείξει πως μπορεί να επιφέρει σημαντική μείωση στην ολική αντίσταση του πλοίου εάν σχεδιαστεί σωστά.

Τέλος, παρουσιάζεται τυπικό διάγραμμα του συντελεστή αντίστασης κυματισμού συναρτήσει του αριθμού Froude, το οποίο διαχωρίζεται στον συντελεστή αντίστασης που οφείλεται στους εγκάρσιους κυματισμούς και στον συντελεστή αντίστασης που οφείλεται στους αποκλίνοντες κυματισμούς (Σχ. 1.7).



Σχήμα 1.7 : Διάγραμμα συντελεστή αντίστασης κυματισμού [1]

1.2 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ

Για τον υπολογισμό της αντίστασης ενός πλοίου δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι προκειμένου να μπορεί να μετρηθεί απευθείας και με εγγύηση ποιότητας και ακρίβειας, χωρίς πειραματικές μετρήσεις. Το βασικό πρόβλημα των πειραματικών μεθόδων έγκειται στην παρεμβολή των πειραματικών μετρήσεων στην φυσική κλίμακα.

Για να έχουν δύο γεωμετρικά όμοιες γάστρες τον ίδιο συντελεστή ολικής αντίστασης πρέπει να ικανοποιούν ταυτόχρονα ισότητα αριθμών Reynolds και Froude, κάτι το οποίο δεν είναι εφικτό. Αυτό συμβαίνει διότι μέσω της ισότητας των αριθμών Reynolds για το πλοίο και για το γεωμετρικά όμοιο μοντέλο προκύπτει το εξής:

$$Re_s = Re_m \rightarrow V_m / V_s = \lambda$$

Όπου, λ είναι η κλίμακα του μοντέλου. Η ισότητα λοιπόν αυτή είναι μη πρακτική καθώς οδηγεί σε πολύ υψηλές ταχύτητες ή γεννάται η ανάγκη κάποιου μη πραγματικού ρευστού. Από την ισότητα των αριθμών Froude προκύπτει το εξής:

$$Fn_s = Fn_m \rightarrow V_m / V_s = 1/\lambda^{1/2}$$

Συνεπώς εξυπηρετεί η εξίσωση των αριθμών Froude από την οποία προκύπτει η παραπάνω σχέση για τις ταχύτητες πλοίου και μοντέλου. Η μετρούμενη αντίσταση του μοντέλου R_{Tm} στο πείραμα αντίστασης εκφράζεται από τον αδιάστατο συντελεστή ολικής αντίστασης C_{Tm} μέσω της σχέσης:

$$C_{Tm} = \frac{R_{Tm}}{(1/2 \cdot \rho_m \cdot S_m \cdot V_m^2)}$$

Όπου,

R_{Tm} : η μετρούμενη αντίσταση του μοντέλου[kp]

ρ_m : η πυκνότητα του γλυκού νερού[kp·s²/m⁴]

S_m : η βρεχόμενη επιφάνεια του μοντέλου[m²]

V_m : η ταχύτητα του μοντέλου[m/s]

Η βρεχόμενη επιφάνεια του μοντέλου που χρησιμοποιείται στην παραπάνω σχέση (S_m) υπολογίζεται για πλευρή του μοντέλου σε ήρεμο νερό. Η επιφάνεια του καθρέφτη στην πρύμνη δεν προσμετράται στον υπολογισμό αυτό. Επίσης η επιφάνεια των παρελκομένων υπολογίζεται ξεχωριστά και προστίθεται στην ολική βρεχόμενη επιφάνεια του μοντέλου.

Η ισχύς ρυμούλκησης η οποία αφορά την γυμνή γάστρα του μοντέλου(Effective Horse Power) [W]:

$$P_{Em} = R_{Tm} \cdot V_m$$

Όπου:

V_m : η ταχύτητα του μοντέλου [m/s]

R_{Tm} : η συνολική μετρούμενη αντίσταση [N]

Όσον αφορά τον υπολογισμό των μεγεθών στην κλίμακα του πραγματικού πλοίου, έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι η διαφορά του συντελεστή αντίστασης τριβής επίπεδης πλάκας από τον συντελεστή ολικής αντίστασης είναι περίπου σταθερή, δηλαδή είναι ανεξάρτητη του αριθμού Reynolds όταν πλοίο και μοντέλο βρίσκονται στον ίδιο αριθμό Froude. Η διαφορά αυτή συνιστά τον συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R ο οποίος συμβολίζει την υπόλοιπη αντίσταση του πλοίου. Η τιμή αυτή της αντίστασης μεταφέρεται αμετάβλητη από το πλοίο στο μοντέλο ($C_{Rs} = C_{Rm}$).

Σύμφωνα με την ITTC για τον υπολογισμό του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης ισχύει η παρακάτω σχέση. Ο παράγοντας k που υπεισέρχεται είναι ανεξάρτητος από την κλίμακα και την ταχύτητα, δηλαδή είναι ανεξάρτητος από τον αριθμό Reynolds και ίδιος για όμοια μοντέλα και πλοία.

$$C_R = C_{Tm} - C_{Fm} \cdot (1+k)$$

Όπου,

k : παράγοντας ανεξάρτητος από την κλίμακα και την ταχύτητα, δηλαδή ανεξάρτητος από τον αριθμό Reynolds και ίδιος για όμοια μοντέλα και πλοία

C_{Fm} : ο συντελεστής αντίστασης τριβής του μοντέλου

Η προτεινόμενη μέθοδος από την ITTC για τον πειραματικό προσδιορισμό του παράγοντα k είναι η μέθοδος *Prohaska* [9]. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή η ολική αντίσταση μπορεί αρχικά να προσδιοριστεί ως εξής:

$$C_{Tm} = C_{Fm} \cdot (1+k) + C_W$$

Όπου,

C_W : ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού

Η σχέση αυτή βασίζεται στην θεώρηση του *Hughes*[1] ότι ο συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης μπορεί να διασπαστεί ως εξής:

$$C_R = C_W + C_{FORM}$$

Όπου,

C_{FORM} : ο συντελεστής αντίστασης μορφής όπου θεωρείται ίσος με $C_{FORM} = k \cdot C_F$

Ως εκ τούτου από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$C_R = C_W + k \cdot C_F$$

Άρα εφόσον ο συντελεστής ολικής αντίστασης ισούται με το άθροισμα του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης και του συντελεστή τριβής τελικώς:

$$C_T = C_R + C_F \rightarrow C_T = C_F \cdot (1+k) + C_W$$

Στο σημείο αυτό και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας βάσει της μεθόδου *Prohaska*, αν ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού C_W στην περιοχή μικρών ταχυτήτων ($0.1 < Fn < 0.2$) θεωρηθεί συνάρτηση του Fn^6 τότε η γραφική παράσταση του C_{Tm}/C_{Fm} (άξονας y) και Fn^6/C_{Fm} (άξονας x) θα τέμνει τον άξονα y ($Fn=0$) στο σημείο $(1+k)$. Αφού υπολογιστεί ο παράγοντας k μέσω της παραπάνω μεθόδου, ο συντελεστής αντίστασης τριβής του μοντέλου και ο συντελεστής ολικής αντίστασης του μοντέλου από τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζεται ο συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης C_R .

Ο συντελεστής αυτός μεταφέρεται αμετάβλητος από το μοντέλο στο πλοίο, δηλαδή $C_{Rs} = C_{Rm}$. Έτσι υπολογίζοντας και το συντελεστή αντίστασης τριβής του πλοίου μέσω της σχέσης ITTC και διατηρώντας τον παράγοντα k σταθερό υπολογίζεται μέσω της αντίστροφης διαδικασίας ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου και τελικά η ολική του αντίσταση.

1.3 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΡΟΗ_[1]

Προκειμένου να γίνει η μελέτη της πρόωσης απαιτούνται στοιχεία που αφορούν την έλικα και την λειτουργία της σε διάφορες ταχύτητες και στροφές αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας. Για την κατασκευή αυτού πραγματοποιείται το αντίστοιχο πείραμα της έλικας σε ελεύθερη ροή.

Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει το μοντέλο μπροστά από την έλικα και έτσι η ροή προς αυτή είναι ίση και αντίθετη με την ταχύτητα με την οποία κινείται, παράλληλα με τον άξονα της. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται *ταχύτητα προχώρησης*. Για την ταχύτητα αυτή περιστρέφεται ο άξονας της έλικας με στροφές n ασκώντας ροπή Q με αποτέλεσμα η έλικα να αναπτύσσει ώση T . Για ένα εύρος τέτοιων ταχυτήτων και στροφών στην συνέχεια μέσω δυναμόμετρου μετρούνται η ροπή και η ώση που αναπτύσσονται.

Τελικώς κατασκευάζεται το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα αυτοπρώωσης, το οποίο δίνει πληροφορίες για τους συντελεστές ώσης και ροπής k_T και k_Q αντίστοιχα και τον βαθμό απόδοσης η_0 για συντελεστές προχώρησης J ανάλογα με την ταχύτητα. Συγκεκριμένα οι παράμετροι που αφορούν την ελεύθερη ροή ορίζονται όπως παρακάτω:

Για τον *συντελεστή προχώρησης* της έλικας ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$J = \frac{V}{n \cdot D}$$

Όπου:

V : η ταχύτητα προχώρησης [m/s]

n : οι στροφές που αναπτύσσει η έλικα [RPS]

D : η διάμετρος της έλικας [m]

Για τους συντελεστές k_T και k_Q ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$k_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad k_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$$

Όπου:

T : η αναπτυσσόμενη ώση [kp]

Q : η ροπή στον άξονα [kp·m]

ρ : η πυκνότητα του γλυκού νερού [kps²/m⁴]

n : οι στροφές που αναπτύσσει η έλικα [RPS]

D : η διάμετρος της έλικας [m]

Ο βαθμός απόδοσης σε ελεύθερη ροή ορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση και εκφράζει τον λόγο της ωφέλιμης ισχύος της ώσης που αναπτύσσει η έλικα προς την ισχύ που δαπανάται για την περιστροφή της.

$$\eta_0 = \frac{J \cdot k_T}{2\pi \cdot k_Q}$$

Όπου:

J : ο συντελεστής προχώρησης της έλικας

k_T : ο συντελεστής ώσης της έλικας

k_Q : ο συντελεστής ροπής της έλικας

Τελικώς για μια έλικα σταθερού βήματος και διαμέτρου κατασκευάζονται τρεις καμπύλες όπου εξαρτώνται και οι τρεις μεταξύ τους αλλά και από τον αντίστοιχο συντελεστή προχώρησης.

1.2 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΥΤΟΠΡΟΩΣΗΣ

Το αυτοπροωθούμενο μοντέλο διαφοροποιείται από το ρυμουλκούμενο μοντέλο στο γεγονός ότι το πρώτο κινείται στο νερό με την βοήθεια έλικας. Ο κινητήρας του πλοίου ασκεί στην έλικα ροπή Q για να περιστραφεί με στροφές n με αποτέλεσμα η έλικα να αναπτύσσει ώση T με την οποία θα υπερνικήσει την αντίσταση R έτσι ώστε τελικά να κινηθεί με ταχύτητα V .

Ως εκ τούτου για την αυτοπρόωση του μοντέλου θα πρέπει να ισχύει $T=R$. Βέβαια η αντίσταση αυτή, η οποία πρέπει να υπερνικηθεί από την ώση που αναπτύσσεται για να κινηθεί το πλοίο, διαφέρει από την αντίσταση R_0 του ρυμουλκούμενου μοντέλου που εξετάστηκε πρωτίστως.

Η αντίσταση αυτή είναι διαφορετική για ένα πλήρες εξοπλισμένο πλοίο πλην της έλικας και ένα πλοίο που φέρει έλικα. Αυτό συμβαίνει διότι η λειτουργία της έλικας ρίχνει τις πιέσεις στην περιοχή της πρύμνης, δηλαδή μεταβάλλει τις κάθετες τάσεις και τροποποιεί τις εφαπτομενικές τάσεις λόγω της διαφοροποίησης του οριακού στρώματος. Συνεπώς η λειτουργία της έλικας δημιουργεί μια επιπλέον αντίσταση στη γάστρα η οποία σε σχέση με την συνολικά απαιτούμενη ώση T ονομάζεται «ποσοστό μείωσης ώσης». Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η δύναμη της ώσης T πρέπει να υπερνικήσει την αντίσταση του πλοίου χωρίς την παρουσία της έλικας R_0 και την «απώλεια ώσης» που επιβάλλει ο τρόπος αυτός πρόωσης. Ο συντελεστής μείωσης ώσης χρησιμοποιείται προκειμένου να εκφραστεί αδιάστατα αυτό το ποσοστό μείωσης ώσης και ορίζεται ως εξής:

$$t = \frac{T - R_0}{T} = 1 - \frac{R_0}{T}$$

Επιπλέον στην περίπτωση του αυτοπροωθούμενου πλοίου η ροή τροποποιείται στην πρύμνη λόγω της γεωμετρίας και του οριακού στρώματος που αναπτύσσει το πλοίο. Σε αντίθεση με την έλικα σε ελεύθερη ροή πλέον η έλικα δεν λειτουργεί σε παράλληλη ροή ταχύτητας V αλλά στα απόνερα ή ομόρρου του πλοίου. Συνεπώς η έλικα λειτουργεί σε ανομοιόμορφο πεδίο ροής το οποίο δεν είναι μόνιμο φαινόμενο αλλά περιοδικό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η έλικα να βλέπει μια μέση αξονική ταχύτητα V_0 , μικρότερη από την ταχύτητα του πλοίου V . Η πραγματική αυτή ταχύτητα του ομόρρου εκφράζεται μέσω του «ποσοστού ομόρρου» για τον οποίο ισχύει:

$$w = \frac{V - V_0}{V} = 1 - \frac{V_0}{V}$$

Η τιμή του ποσοστού ομόρρου εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα της γάστρας. Έτσι πλοία με υψηλό συντελεστή γάστρας έχουν αυξημένο ποσοστό, με την κατανομή την κατανομή της ταχύτητας γύρω από την έλικα είναι να ανομοιογενής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η μελέτη του αυτοπροωθούμενου μοντέλου αποτελεί μια σύζευξη της μελέτης της έλικας σε ελεύθερη ροή και της αντίστασης γυμνής γάστρας (αντίσταση ρυμούλκησης). Όπως είναι φυσικό, στην πειραματική μελέτη της αυτοπρόωσης υπεισέρχονται νέοι παράγοντες ανάλυσης. Το μοντέλο, εφοδιασμένο πλέον με την έλικα, προσδένεται στο δυναμόμετρο με τον ίδιο ακριβώς τρόπο όπως και στο πείραμα αντίστασης. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι εκτός από την αντίσταση R του μοντέλου υπάρχει ακόμα μια δύναμη κατά τον διαμήκη άξονα, η ώση T που αναπτύσσεται από την έλικα. Συνεπώς το δυναμόμετρο θα δέχεται και θα μετρά μια δύναμη F η οποία ισούται με την διαφορά της ώσης από την αντίσταση του μοντέλου που εμφανίζεται ως προς την κίνησή του. Η δύναμη αυτή μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική, ανάλογα με το αν η αντίσταση υπερνικά την ώση ή όχι. Όταν η δύναμη αυτή είναι μηδέν σημαίνει ότι η ώση που αναπτύσσει το μοντέλο είναι ίση με την αντίσταση που προκαλείται από την κίνηση του στο νερό. Στις στροφές που αυτό επιτυγχάνεται βρισκόμαστε στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου για την ταχύτητα που έχει ορίσει.

Η τιμή της δύναμης, η οποία αντιστοιχεί στην αυτοπρόωση του πλοίου για την εκάστοτε ταχύτητα, δίνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_m \cdot V_m^2 \cdot S_m \cdot (C_{Tm} - C_{Ts})$$

Όπου:

ρ_m : η πυκνότητα του γλυκού νερού [kps²/m⁴]

V_m : η ταχύτητα του μοντέλου [m/s]

S_m : η βρεχόμενη επιφάνεια του μοντέλου [m²]

C_{Tm} : ο συντελεστής ολικής αντίστασης του μοντέλου, όπως αυτός υπολογίστηκε στο πείραμα αντίστασης

C_{Ts} : ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου

Ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου C_{Ts} υπολογίζεται με βάση της παρακάτω σχέσης:

$$C_{Ts} = (1 + k) \cdot C_{Fs} + \Delta C_F + C_A + C_R + C_{AAS}$$

Όπου :

C_{Fs} : ο συντελεστής αντίστασης τριβής του πλοίου, με βάση τον αριθμό Reynolds του πλοίου, όπως προκύπτει από την εξίσωση ITTC '57

ΔC_F : ο συντελεστής τραχύτητας ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\Delta C_F = 0.044 \cdot \left[\left(\frac{k_s}{L_{wl}} \right)^{\frac{1}{3}} - 10 \cdot Re^{-\frac{1}{3}} \right] + 0.000125$$

Όπου:

k_s : συντελεστής ο οποίος αντιπροσωπεύει την τραχύτητα της επιφάνειας της γάστρας και λαμβάνεται ίσος με 150×10^{-6}

L_{wl} : το μήκος της ισάλου του πλοίου [m]

Re : ο αριθμός Reynolds του πλοίου

C_{AAS} : ο συντελεστής αντίστασης αέρα, ο οποίος αμελείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας

C_R : ο συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης

C_A : ο συντελεστής συσχέτισης ο οποίος λαμβάνεται με βάση την τιμή που προκύπτει από την παρακάτω σχέση

$$C_A = (5.68 - 0.6 \cdot \log Re) \cdot 10^{-3}$$

Όπου :

Re : ο αριθμός Reynolds του πλοίου

Για μια ομάδα μετρήσεων ίδιας ταχύτητας και διαφορετικών στροφών, έχοντας υπολογίσει την δύναμη F_d που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου, καταγράφονται οι τιμές της δύναμης που ασκείται στο δυναμόμετρο για ένα εύρος στροφών γύρω από το σημείο αυτό και χαράσσεται η καμπύλη F-n. Από την καμπύλη αυτή, είτε γραφικά είτε μέσω του πολυωνύμου που προσεγγίζει καλύτερα το διάγραμμα, βρίσκονται οι στροφές που αντιστοιχούν στην δύναμη αυτοπρόωσης του πλοίου. Οι στροφές αυτές αντιπροσωπεύουν το σημείο λειτουργίας της έλικας του μοντέλου που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου. Με δεδομένη την καμπύλη F-n υπολογίζονται αντίστοιχα και οι στροφές αυτοπρόωσης του μοντέλου στο σημείο τομής με τον άξονα xx'.

Με αυτές τις τιμές των στροφών και μέσω των διαγραμμάτων Q-n και T-n, που παράγονται από τις μετρήσεις της ροπής και της ώσης αντίστοιχα και προσεγγίζονται από ένα πολυώνυμο, υπολογίζονται η ροπή και η ώση στο σημείο αυτό.

Έχοντας την τιμή των στροφών, την ώση και την ροπή του μοντέλου που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης υπολογίζεται ο συντελεστής προχώρησης J_m καθώς και οι συντελεστές ώσης και ροπής, kT_m και kQ_m αντίστοιχα, σύμφωνα με τις σχέσεις που ακολουθούν.

Για τον συντελεστή προχώρησης J_m της έλικας ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$J_m = \frac{V_m}{n_m \cdot D_m}$$

Όπου:

V_m : η ταχύτητα προχώρησης [m/s]

n_m : οι στροφές που αναπτύσσει η έλικα [RPS]

D_m : η διάμετρος της έλικας [m]

Για τους συντελεστές kT_m και kQ_m ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$kT_m = \frac{T}{\rho_m \cdot n_m^2 \cdot D_m^4}$$

$$kQ = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$$

Όπου:

T : η αναπτυσσόμενη ώση [kp]

Q : η ροπή στον άξονα [kp·m]

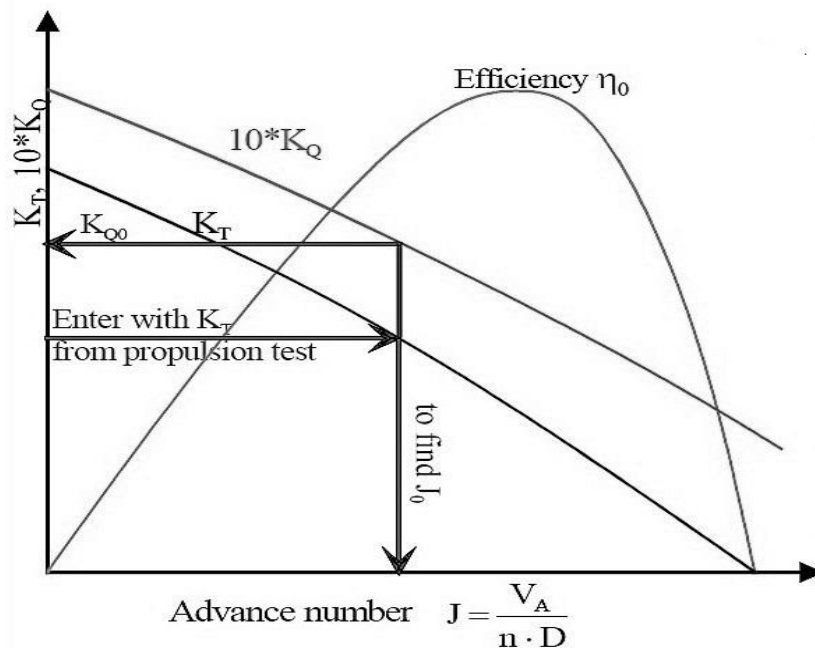
ρ_m : η πυκνότητα του γλυκού νερού [kps²/m⁴]

n_m : οι στροφές που αναπτύσσει η έλικα του μοντέλου [RPS]

D_m : η διάμετρος της έλικας του μοντέλου [m]

Σύμφωνα με την μέθοδο εξίσωσης ώσης διατηρείται σταθερός ο συντελεστής ώσης k_T και με χρήση του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας βρίσκεται ο συντελεστής προχώρησης J_0 από την αντίστοιχη καμπύλη του k_T . Για τον συντελεστή προχώρησης που προέκυψε από το ίδιο διάγραμμα υπολογίζεται ο συντελεστής ροπής kQ_0 και ο βαθμός απόδοσης η_0 για την κλίμακα του μοντέλου.

Η διαδικασία υπολογισμού με την χρήση του διαγράμματος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.8 : Διαδικασία υπολογισμών με χρήση της μεθόδου εξίσωσης ώσης

Από τον συντελεστή προχώρησης J_0 του διαγράμματος ελεύθερης ροής υπολογίζεται η ταχύτητα προχώρησης V_A , που αντιστοιχεί στην ταχύτητα που θα έβλεπε η έλικα κινούμενη παράλληλα με τον άξονα της στην ταχύτητα του μοντέλου V_m αλλά χωρίς την παρουσία γάστρας. Έχοντας την ταχύτητα αυτή υπολογίζεται και ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου του μοντέλου w_m , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$W_m = \frac{V_m - V_a}{V_m}$$

Ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής του μοντέλου η_R υπολογίζεται με βάση την σχέση που ακολουθεί:

$$\eta_R = \frac{kQ_0}{kQ}$$

Όπου:

kQ_0 : ο συντελεστής ροπής που διαβάζεται από το διάγραμμα ελεύθερης ροής

kQ : ο συντελεστής ροπής που υπολογίζεται από την μετρούμενη ροπή

Για τον συντελεστή μείωσης ώσης t χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$t = \frac{T_m - R_C}{T_m}$$

Όπου:

T_m : η ώση που υπολογίστηκε ότι αντιστοιχεί στις στροφές αυτοπρόωσης του πλοίου [kr]

R_C : η αντίσταση διορθωμένη λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας του νερού μεταξύ των πειραμάτων αντίστασης και αυτοπρόωσης [kr].

Η τιμή της αντίστασης αυτής προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_C = \frac{(1+k) \cdot C_{FMC} + C_R}{(1+k) \cdot C_{FM} + C_R} \cdot R_{Tm}$$

Όπου:

$(1+k)$: η τιμή του συντελεστή μορφής όπως αυτή υπολογίστηκε στα πειράματα αντίστασης

C_{FMC} : ο συντελεστής αντίστασης τριβής του μοντέλου υπολογιζόμενος στην θερμοκρασία νερού των πειραμάτων αυτοπρόωσης

C_{FM} : ο συντελεστής αντίστασης τριβής του μοντέλου υπολογιζόμενος στην θερμοκρασία νερού των πειραμάτων αντίστασης

C_R : ο συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης όπως αυτός υπολογίστηκε στο πείραμα αντίστασης

R_{Tm} : η μετρούμενη αντίσταση του μοντέλου όπως αυτή προέκυψε για την ταχύτητα αυτή από το πείραμα αντίστασης [kr]

Ο βαθμός απόδοσης της γάστρας η_H για το μοντέλο ή το πλοίο υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$$

Όπου:

t : ο συντελεστής μείωσης ώσης

w : ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου πλοίου ή του μοντέλου

Ο βαθμός απόδοσης της έλικας η_B για το μοντέλο ή το πλοίο υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\eta_B = \eta_0 \cdot \eta_R$$

Όπου:

η_0 : ο βαθμός απόδοσης έλικας σε ελεύθερη ροή

η_R : ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής

Όπου αφορά τον πραγματικό βαθμό απόδοσης με την παρουσία της γάστρας

Τέλος η ισχύς στην έλικα (Delivered Horse Power) μετρούμενη σε W, που αφορά τον πλέον βασικό παράγοντα στην μελέτη και επιλογή προωστήτριας εγκατάστασης, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$DHP = 2\pi \cdot n \cdot Q$$

Όπου:

Q: η ροπή στον άξονα [N·m]

n : οι στροφές που αναπτύσσει η έλικα [RPS]

Τα παραπάνω μεγέθη είναι αντιπροσωπευτικά κάθε ταχύτητας του μοντέλου και υπολογίζονται προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά της γάστρας με και χωρίς παρελκόμενα

2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟΥ

2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Το υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο “M/T SCORPIO” είναι αυτό που φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί και οι κύριες διαστάσεις του παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Επιπλέον παρακάτω επισυνάπτεται ένα σχέδιο γενικής διάταξης με το προφίλ και την κάτοψη του καταστρώματος του πλοίου.



ΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ L_{OA}	243,800m
ΜΗΚΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΘΕΤΩΝ L_{BP}	233,000m
ΠΛΑΤΟΣ B	42,000m
ΚΟΙΛΟ D	21,400m
ΒΥΘΙΣΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ T_{des}	13,500m
ΒΥΘΙΣΜΑ ΑΝΤΟΧΗΣ $T_{SCANTLING}$	15,100m
ΣΙΜΟΤΗΤΑ SHEER	ΛΟΓΩ ΚΥΡΤΟΤΗΤΑΣ
ΚΥΡΤΟΤΗΤΑ CAMBER	0,900m
RADIUS OF BILGE CIRCLE R	2,000m

Πίνακας 2.1 Κύριες διαστάσεις MT “SCORPIO”

2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΑ

Στα πλαίσια της παρούσας πειραματικής μελέτης επιλέχθηκε η κατάσταση φόρτωσης και ως εκ τούτου το αντίστοιχο βύθισμα με γνώμονα την μέγιστη αντοχή του δυναμόμετρου ώσης και ροπής. Ως εκ τούτου λήφθηκε το ελάχιστο εκτόπισμα ώστε η έλικα να είναι πλήρως βυθισμένη, ώστε να αποφευχθεί και κάθε αλληλεπίδραση της με την ελεύθερη επιφάνεια, ενώ επιλέχθηκε ο καθρέπτης της πρύμνης του πλοίου να είναι εντελώς εκτός του νερού.

Προκειμένου να υπολογιστούν τα υδροστατικά μεγέθη που αφορούν την παρούσα κατάσταση φόρτωσης και απαιτήθηκαν τόσο για τους πειραματικούς όσο και για τους αριθμητικούς υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα HYDRO που έχει αναπτυχθεί από το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Το πρόγραμμα αυτό δέχεται σαν αρχείο εισόδου συντεταγμένες y-z για ένα εύρος νομέων, σημεία x-z που περιγράφουν το προφίλ του πλοίου, τις κύριες διαστάσεις του πλοίου καθώς και άλλα στοιχεία που αφορούν την ευστάθεια και τα κατακλύσιμα μήκη. Το σύστημα συντεταγμένων τοποθετεί τον άξονα x κατά το διάμηκες του πλοίου, τον άξονα y κατά το εγκάρσιο και τον άξονα z κατά το κοίλο. Οι συντεταγμένες των ζητούμενων σημείων μπορούν εύκολα να μετρηθούν από το σχέδιο γραμμών του πλοίου(Lines Plan) και να καταγραφούν σε κατάλληλη μορφή για το αρχείο εισόδου του προγράμματος.

Τα πειράματα που θα ακολουθήσουν αφορούν το εκτόπισμα που περιεγράφηκε παραπάνω σε ισοβύθιστη κατάσταση πλεύσης με βύθισμα $T_s=9,860$ m.

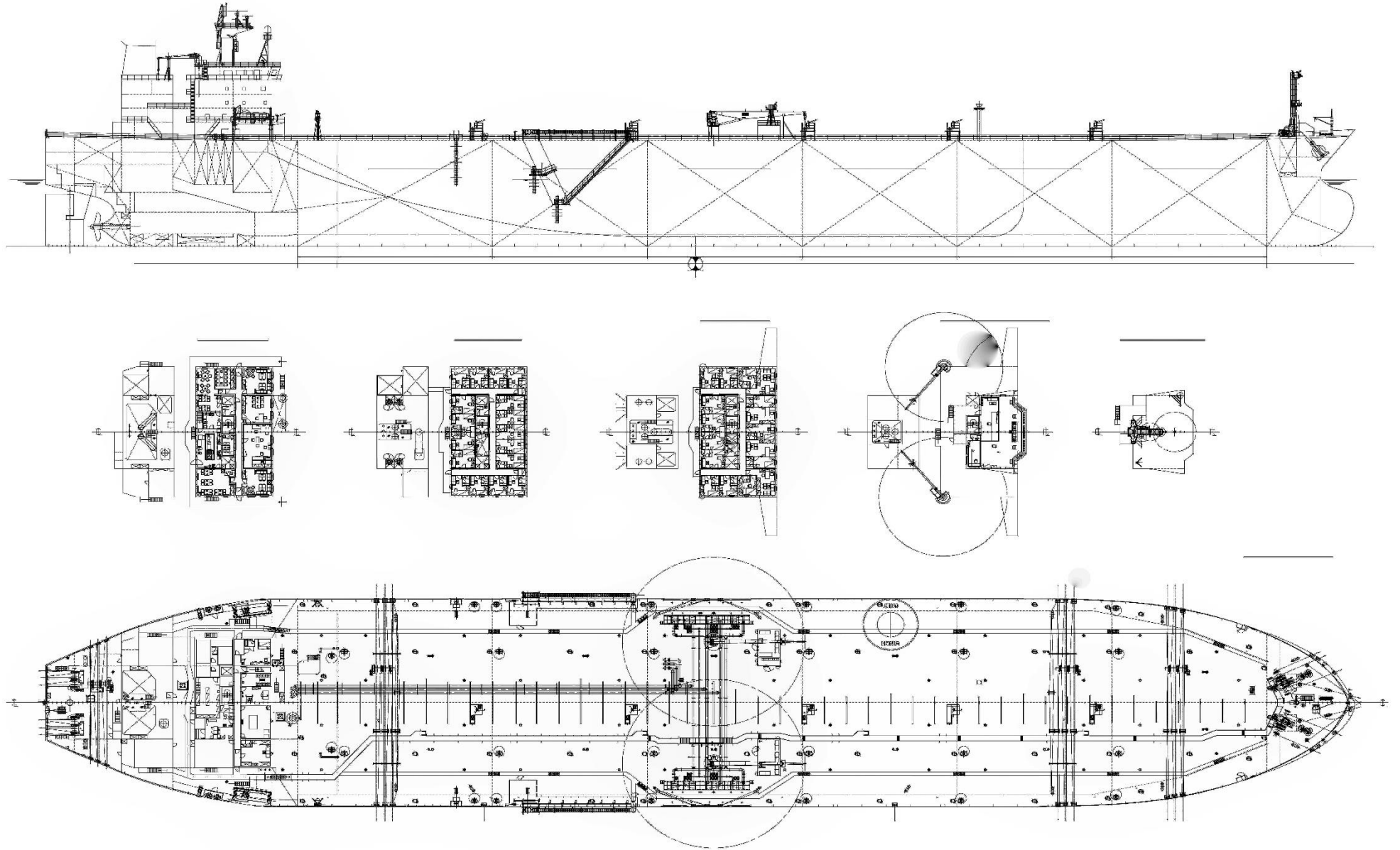
Συνεπώς τα υδροστατικά αποτελέσματα που θα εξάγονται αναφέρονται αποκλειστικά σε αυτή την κατάσταση πλεύσης.

Αφού εισάγουμε στο πρόγραμμα τα απαραίτητα δεδομένα που περιγράφουν την γεωμετρία της γάστρας και τρέξουμε το πρόγραμμα τότε μέσω του αρχείου εξόδου(αρχείο .RES) μπορούμε να συλλέξουμε τα παρακάτω στοιχεία για τα υδροστατικά μεγέθη που αφορούν την ισοβύθιστη κατάσταση πλεύσης.

HYDROSTATICS

T(m)	A(m ²)	LCF	V(m ³)	Δ	I TRANS.	I LON	LCB	BM	KB	W.S.	BML	TP1	MCT1	C _B	C _{WP}	C _M	C _P
9.800	8423.2	6.235	75474.060	77542.590	1094842.0	29742120	11.083	14.506	5.091	11816.5	394.1	86.338	1307.877	0.78442	0.85838	0.99502	0.78835
9.810	8424.6	6.217	75558.300	77629.020	1095069.0	29755830	11.078	14.493	5.096	11822.0	393.8	86.352	1308.425	0.78446	0.85849	0.99503	0.78838
9.820	8426.0	6.200	75642.560	77715.470	1095295.0	29769490	11.072	14.480	5.102	11827.5	393.6	86.366	1308.972	0.78449	0.85859	0.99503	0.78841
9.830	8427.3	6.183	75726.820	77801.920	1095522.0	29783140	11.067	14.467	5.107	11832.9	393.3	86.380	1309.518	0.78453	0.85870	0.99504	0.78844
9.840	8428.7	6.166	75811.110	77888.400	1095750.0	29796830	11.062	14.454	5.112	11838.4	393.0	86.394	1310.066	0.78457	0.85881	0.99504	0.78848
9.850	8430.1	6.148	75895.410	77974.890	1095977.0	29810470	11.056	14.441	5.117	11843.9	392.8	86.409	1310.612	0.78460	0.85891	0.99505	0.78851
9.860	8431.5	6.131	75979.700	78061.380	1096205.0	29824110	11.051	14.428	5.123	11849.3	392.5	86.423	1311.157	0.78464	0.85902	0.99505	0.78854
9.870	8432.9	6.114	76064.040	78147.910	1096434.0	29837740	11.045	14.415	5.128	11854.8	392.3	86.437	1311.703	0.78467	0.85913	0.99506	0.78857
9.880	8434.2	6.097	76148.380	78234.440	1096663.0	29851390	11.040	14.402	5.133	11860.3	392.0	86.451	1312.249	0.78471	0.85923	0.99506	0.78860
9.890	8435.6	6.080	76232.720	78320.970	1096892.0	29864980	11.034	14.389	5.138	11865.7	391.8	86.465	1312.792	0.78474	0.85934	0.99507	0.78864
9.900	8437.0	6.063	76317.080	78407.520	1097121.0	29878600	11.029	14.376	5.144	11871.2	391.5	86.479	1313.336	0.78478	0.85945	0.99507	0.78867

Πίνακας 4.2 Υδροστατικά μεγέθη του υπό μελέτη πλοίου SCORPIO



Σχέδιο Γενικής Διάταξης του Tanker "SCORPIO"

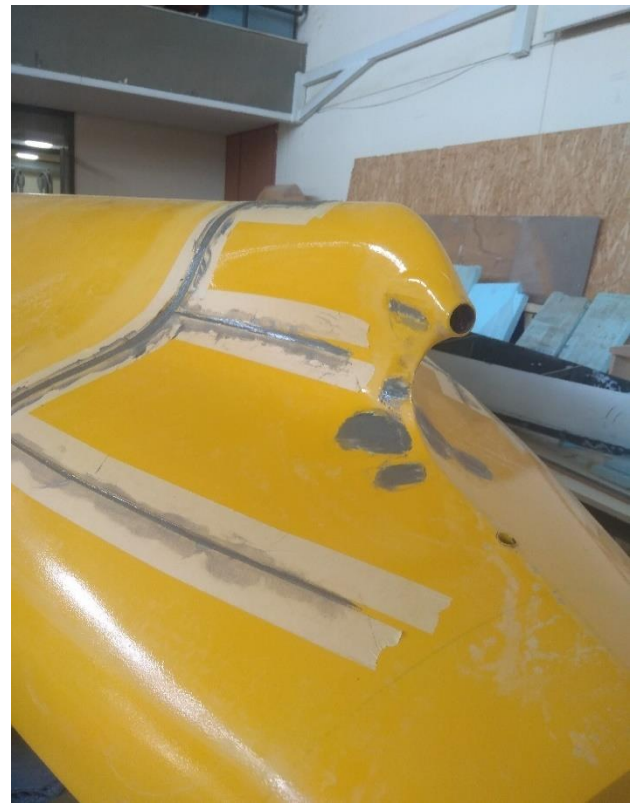
3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ & ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ

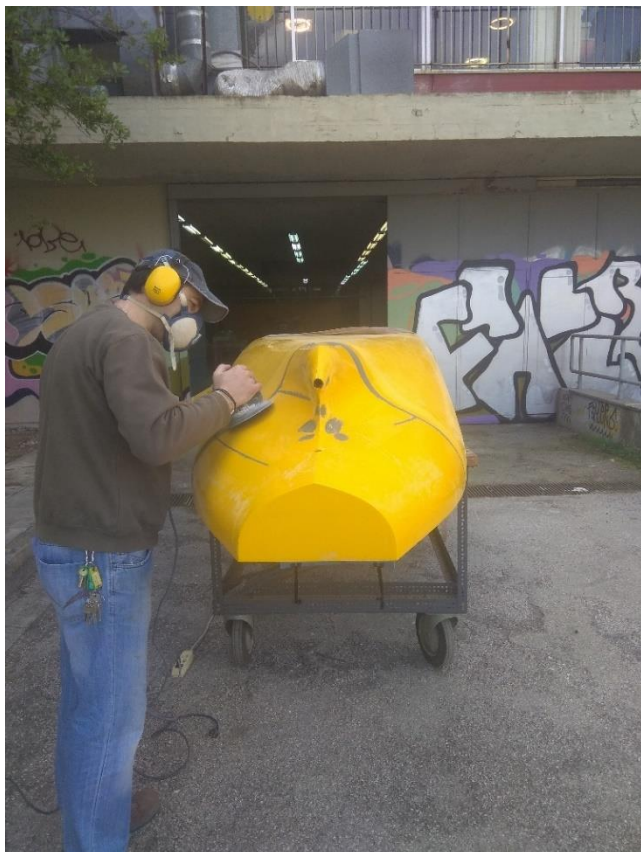
Με βάση τα χαρακτηριστικά του πραγματικού πλοίου έχει κατασκευαστεί στο προτυποποιείο του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών μοντέλο του υπό μελέτη πλοίου υπό κλίμακα 1:45.

Το εν λόγω μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί και στο παρελθόν σε μελέτες του εργαστηρίου και είχε παραμείνει αποθηκευμένο με αποτέλεσμα να αναπτύξει κάποιες ατέλειες στην επιφάνεια του, όπως φούσκωμα της μπογιάς, σπασίματα και αιχμές.

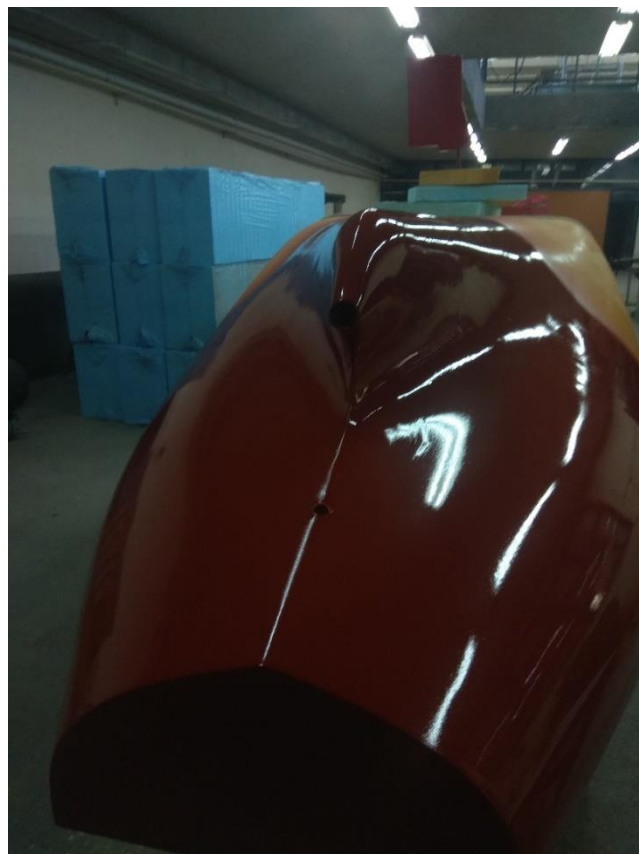
Η σημασία όμως μιας λείας ομοιόμορφης επιφάνειας που θα εξασφαλίζει όσο το δυνατόν μικρότερες τριβές και ως εκ τούτου πιο ομαλή ροή είναι μεγάλη. Για αυτό το λόγο προτού ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία έγιναν επιδιορθώσεις τοπικά σε κάθε σημείο που κρίθηκε προβληματικό και εν συνεχεία η επιφάνεια λειάνθηκε και βάρφτηκε με σπρέι μπογιάς με υδατοπροστασία. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται κάποια από τα παραπάνω βήματα αλλά και η τελική μορφή της επιφάνειας που προέκυψε. (Εικόνες 3.1-3.5)



Εικόνα 3.1 Διαδικασία Επιδιορθώσεων



Εικόνα 3.2 Λείανση και Βαφή



Εικόνα 3.3 Τελική Μορφή Πρύμνης

Η κατάσταση φόρτωσης που έχει επιλεγεί για το υπό μελέτη πλοίο ανάγεται στο μοντέλο μέσω της κλίμακας. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην διάσταση του εκτόπισματος μιας και τα αποτελέσματα του υδροστατικού αφορούν αλμυρό νερό. Το νερό όμως της πειραματικής δεξαμενής είναι γλυκό και ως εκ τούτου ως έχει πυκνότητα ίση με την μονάδα. Για αυτό το λόγο ως εκτόπισμα επιλέγεται ο βυθισμένος όγκος του πλοίου και αντίστοιχα του μοντέλου. Συγκεκριμένα για τον παραπάνω λόγω αναλογίας $\lambda = 45$ λαμβάνονται οι διαστάσεις:

Διάσταση	ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟ	ΜΟΝΤΕΛΟ
Μήκος Μεταξύ Καθέτων - $L_{BP}(m)$	233,0	5,178
Ολικό Μήκος - $L_{OA}(m)$	243,8	5,418
Μήκος Ισάλου - $L_{WL}(m)$	233,8	5,196
Μήκος Πηδαλίου - $L_{Rudder}(m)$	8,220	0,183
Πλάτος - $B(m)$	42,00	0,933
Κοίλο - $D(m)$	21,40	0,450
Βύθισμα - $T(m)$	9,860	0,219
Εκτόπισμα - $\Delta(kg)$	75979,7	833,8
Θέση Διαμήκους Κέντρου Άντωσης (Από Μέσο Νομέα) - $LCB(m)$	11,051	0,246
Βρεχόμενη Επιφάνεια Γάστρας $W.S.A(m^2)$	11849,3	5,852
Βρεχόμενη Επιφάνεια Πηδαλίου $W.S.A_{Rudder}(m^2)$	61,9	0,031
Συντελεστής Γάστρας - C_B	0,785	0,785

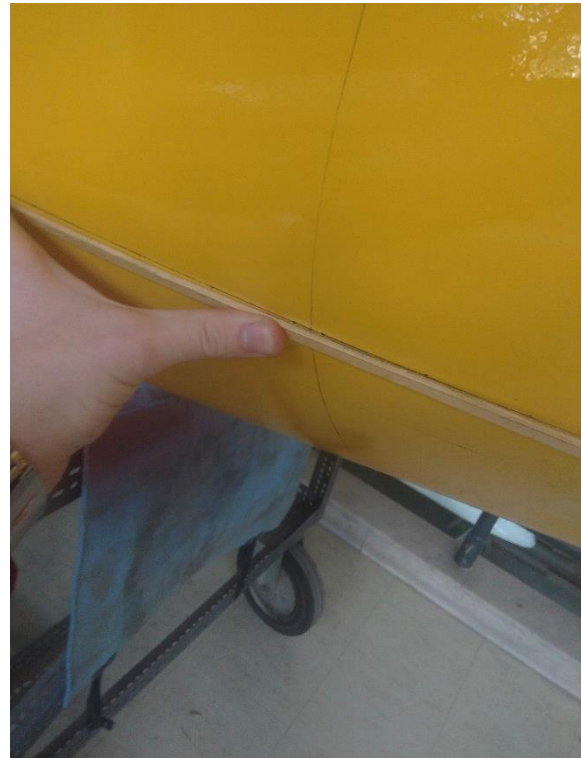
Πίνακας 3.1 Διαστάσεις μοντέλου και υπό μελέτη πλοίου SCORPIO

Τα υδροστατικά στοιχεία του μοντέλου υπολογίστηκαν και αυτά βάσει της κλίμακας με χρήση των στοιχείων του υπό μελέτη πλοίου που προέκυψαν από το πρόγραμμα HYDRO.

Το επόμενο βήμα είναι η χάραξη ισάλου του μοντέλου στο κατάλληλο βύθισμα για την κατάσταση φόρτωσης που έχει επιλεγεί. Για την χάραξη της ισάλου έγινε αρχικά μέτρηση και σημειώθηκαν τα στοιχεία της επιθυμητής θέσης και εν συνεχεία με χρήση λέιζερ, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ισοβύθιστη κατάσταση, σημειώθηκαν πλώρα και πρίμα τα ίχνη της ισάλου. Η διαδικασία φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 3.4 Μέτρηση και επιλογή Βυθίσματος



Εικόνα 3.5 Χρήση Λέιζερ - Χάραξη της ισάλου

3.4 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΥΤΟΠΡΩΣΗΣ

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν τα πειράματα αυτοπρόωσης απαιτείται η εγκατάσταση στο μοντέλου του απαραίτητου εξοπλισμού πρόωσης (έλικα, αξονικό σύστημα, κινητήρας) αλλά και του δυναμόμετρου μέτρησης ώσης και ροπής. Τα στοιχεία αυτά εγκαταστάθηκαν και παρουσιάζονται παρακάτω.

3.4.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΛΙΚΑΣ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΗΔΑΛΙΟΥ

Η έλικα επιλέχθηκε βάσει κλίμακας με χρήση του λόγου $\lambda = 45$ αντίστοιχη με αυτή του πατρικού πλοίου. Ανήκει στην οικογένεια ελίκων *Wagenigen-B Series* και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Διάσταση	ΕΛΙΚΑ ΠΛΟΙΟΥ	ΕΛΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
Διάμετρος - D[m]	7,2	0,16
Λόγος Βήματος - P/D		0,75
Λόγος Εκτεταμένης Επιφάνειας - A_E/A_0		0,70
Αριθμός Πτερυγίων - z		4
Μήκος Χορδής στο 75% R - $c_{0,75R}$ [m]	2,5918	0,05759
Μέγιστο Πάχος Πτερυγίου στο 75% R [m]	0,0972	0,00216
Φορά Περιστροφής	ΑΡΙΣΤΕΡΟΣΤΡΟΦΗ	

Πίνακας 3.2 Στοιχεία Έλικας μοντέλου και υπό μελέτη πλοίου SCORPIO

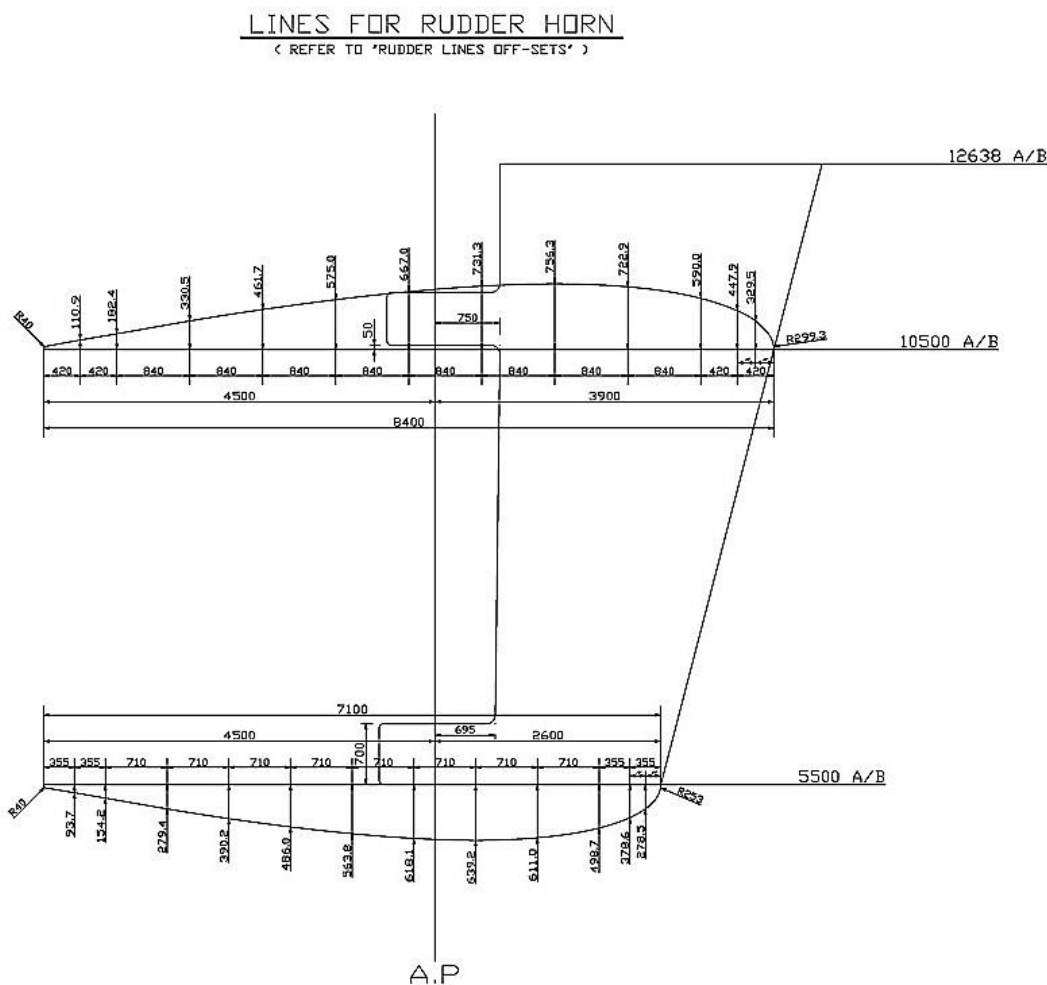
Η σύνδεσή της γίνεται στο αξονικό σύστημα με χρήση σφήνας ενώ συνοδεύεται και από πλήμνη με καμπύλο άκρο. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα αντίστοιχα κομμάτια



Εικόνα 3.6 Έλικα με Αντίστοιχη Πλήμνη

Αντίστοιχα το πηδάλιο κατασκευάστηκε στο προτυποποιείο της σχολής με βάσει τα σχέδια του πατρικού πλοίου υπό την παραπάνω κλίμακα.

Το σχέδιο της υδροτομής φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 3.7 Σχέδιο Πηδαλίου του Υπό Μελέτη Πλοίου

Με την χρήση του παραπάνω σχεδίου εκτελείται και υπολογισμός του εμβαδού βρεχόμενης επιφάνειας του πηδαλίου καθώς και το μήκος του στο ανάλογο βύθισμα και με χρήση του λόγου μοντέλου πλοίου συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς.

3.4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΞΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Για την εξασφάλιση της ισχύος πρόωσης επιλέγεται ηλεκτροκινητήρας που το τοποθετείται στο μοντέλο και συνδέεται μέσω αξονικού με το δυναμόμετρο ώσης και ροπής. Από το δυναμόμετρο εξέρχεται σύνδεσμος που συνδέεται με τον άξονα χοάνης στον οποίο στην συνέχεια τοποθετείται η έλικα και η πλήμνη. Όλες οι συνδέσεις γίνονται με σφήνες ενώ στα σημεία σύνδεσης με τους άξονες τοποθετούνται σύνδεσμοι(σταυροί) προκειμένου να παραλάβουν τις αλλαγές στις γωνίες.

Πριν την εγκατάσταση οι άξονες έχουν ελεγχθεί για την ευθυγράμμιση τους και με χρήση τόννου έχουν τροχιστεί με γυαλόχαρτο στα σημεία που παρουσίαζαν ατέλειες, επίσης ελέγχονται οι επαρκείς συναρμογές των σφηνών και η κατάσταση των εδράνων και των συνδέσμων.

Το σύστημα εγκαθίσταται στο μοντέλο όπου αρχικά περνιέται ο άξονας χοάνης μέσα από το αντίστοιχο έδρανο και στερεώνεται στα δυο άκρα σε υδρολίπαντα έδρανα ολίσθησης. Στην συνέχεια τοποθετείται το δυναμόμετρο ώσης και ροπής(για το οποίο στοιχεία δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο) με την βοήθεια δύο βιδωτών βάσεων στο μοντέλο και συνδέεται μέσω σύνδεσμου στον άξονα. Μετά ο ενδιάμεσος άξονας συνδέεται με τον κινητήρα που εδράζεται πάνω σε ειδική αντικραδασμική βάση υπό γωνία.

Τέλος τοποθετείται η έλικα με την πλήμνη της ενώ γίνεται και χρήση ενός δακτυλίου(αποστάτης) λόγω της απόστασης του πίσω μέρους της έλικας με την γάστρα.

Ακολουθούν εικόνες που αφορούν τα παραπάνω



Εικόνα 3.8 Τοποθέτηση Κινητήρα και Δυναμόμετρου Ωσης και Ροπής



Εικόνα 3.9 Σύνδεση Αξονικού με Χρήση Σταυρών

3.4.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ DRY RUN

Στο σημείο αυτό γίνεται σύνδεση των καλωδιώσεων τροφοδοσίας και μετρήσεων με το σύστημα του υπολογιστή του φορείου της δεξαμενής προκειμένου να γίνει ένας πρώτος έλεγχος του συστήματος χωρίς φορτίο. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται είναι ώσης και ροπής για τις εκάστοτε στροφές ρύθμισης, συγκεκριμένα λαμβάνονται μετρήσεις για 100 ,200 ,300 ,400 ,500 ,600 ,700 ,800 RPM. Το αποτέλεσμα όμως της απεικόνισης της χρονικής ιστορίας για μετρήσεις διάρκειας 5s είναι ταλαντώσεις και μόνιμο offset όπως φαίνεται ενδεικτικά από τα παρακάτω γραφήματα:



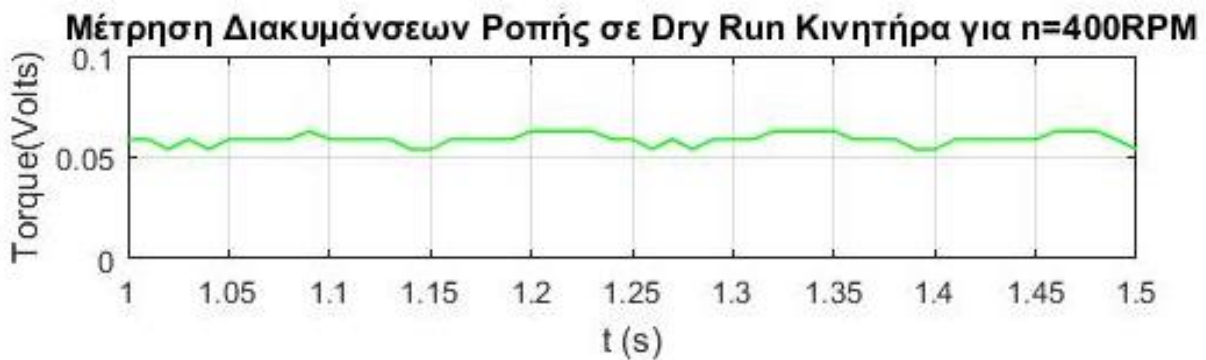
Γράφημα 3.1



Γράφημα 3.2



Γράφημα 3.3



Γράφημα 3.4

Μια παρατήρηση που αξίζει να σημειωθεί είναι πως πέραν της ταλαντωτικής συμπεριφοράς, σε κάθε ταχύτητα υπάρχει και διαφορετική μέση τιμή, δηλαδή η καμπύλη δημιουργούσε ένα μόνιμο offset σε σχέση με την αύξηση των στροφών, κάτι που φαίνεται και από τις παραπάνω χρονικές ιστορίες.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα έγινε απομόνωση του συστήματος, ευθυγράμμιση με λέιζερ, αλλαγή των συνδέσμων και μετακίνηση της βάσης του δυναμόμετρου. Επιπλέον έγιναν δοκιμές χωρίς φορτίο με μέτρηση για το κάθε τμήμα της διάταξης ξεχωριστά. Τελικώς διαπιστώθηκε ότι αίτιο της ταλαντωτικής αυτής συμπεριφοράς ήταν η γωνία του συνδέσμου μεταξύ κινητήρα και ενδιάμεσου άξονα. Η λύση που προτάθηκε σε συνεργασία με τον κ. Τζαμπίρα και το προσωπικό του εργαστηρίου ήταν η αλλαγή κινητήρα προκειμένου να μειωθεί η γωνία αυτή και η επανατοποθέτηση του συστήματος για δοκιμή. Με τον νέο κινητήρα δεν υπήρχαν παρά ελάχιστες τιμές ταλαντώσεων και ως εκ τούτου το σύστημα διατηρήθηκε. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η δοκιμή και ο τελικός κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε:



Εικόνα 3.10 Απομόνωση του συστήματος – Ευθυγράμμιση με λέιζερ - Μετρήσεις γωνίας και ταλαντώσεων



Εικόνα 3.11 Τελικός Κινητήρας με μικρή γωνία ενδιάμεσου άξονα

3.5 ΔΙΑΤΑΞΗ ΦΡΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η διάταξη του φρένου του μοντέλου που χρησιμοποιείται κατά τις δοκιμές προκειμένου να μην αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις στο δυναμόμετρο Resistance / Heave / Pitch κατά την επιτάχυνση και επιβράδυνση του μοντέλου. Η διάταξη φαίνεται παρακάτω και αποτελείται από μια ξύλινη δοκό βιδωμένη επί του μοντέλου η οποία περνάται ανάμεσα σε δυο σιαγόνες. Οι σιαγόνες αυτές είναι στερεωμένες επί σιδηρών μοχλών βιδωμένων σε μια βάση επάνω στο φορείο των πειραμάτων όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες με ένα υπομόγλιο γίνεται η πρόσδεση και η απελευθέρωση του μοντέλου στις απαραίτητες στιγμές κατά την διάρκεια του πειράματος. Ως εκ τούτου κατά την προετοιμασία του μοντέλου τοποθετείται και αυτό το σύστημα



Εικόνα 3.12 Διάταξη φρένου και σιαγόνες

3.6 ΕΡΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΘΕΛΚΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στην συνέχεια το πλήρως εξοπλισμένο μοντέλο τοποθετήθηκε στον αναλογικό ζυγό του εργαστηρίου και ερματίστηκε με βάρη κατά το μήκος του όσο το δυνατόν πιο συμμετρικά προκειμένου να ληφθεί το τελικό επιθυμητό εκτόπισμα μιας ισοβύθιστης ισάλου ενώ επιβάλλεται σε κάθε νοητό διαμέρισμα η δύναμη της άντωσης να ισούται με τον εκτοπιζόμενο όγκο. Αν κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, θα υπάρξει κίνδυνος αστοχίας του μοντέλου, κυρίως στις περιοχές σύνδεσης της πλώρης και της πρύμνης, λόγω των δυνάμεων που θα δέχεται. Οι δυνάμεις αυτές θα είναι είτε προς τα επάνω, αν στο σημείο αυτό η άντωση είναι μεγαλύτερη από τον εκτοπιζόμενο όγκο(ίδιος με το εκτόπισμα στην περίπτωση του μοντέλου που πλέει σε γλυκό νερό), είτε προς τα κάτω αν το εκτόπισμα υπερτερεί της άντωσης.

Μετά τη επίτευξη του επιθυμητού βάρους τοποθετείται η πλάκα πρόσδεσης στο υπολογισμένο LCB όπου σε ισοβύθιστη κατάσταση θα ταυτίζεται με το LCG, ώστε να λαμβάνονται όσο το δυνατόν οι κινήσεις του κέντρου βάρους. Τέλος το μοντέλο αναρτάται με χρήση μιάτων στον γερανό της δεξαμενής και καθελκείται.

Κάποια βήματα της διαδικασίας φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 3.13 Τελική Ζύγιση και Ανάρτηση του Μοντέλου



Εικόνα 3.14 Έναρξη Διαδικασίας Καθέλκυσης Πλήρους Εξοπλισμένου Μοντέλου

Μετά την καθέλκυση ακολουθεί η πρόσδεση με το δυναμόμετρο Resistance / Heave / Pitch προκειμένου να φτάσει το μοντέλο μαζί με κάθε είδους παρελκόμενα το τελικό του βάρος. Η απαίτηση για ισοβύθιστη κατάσταση (μηδενική διαγωγή) ελέγχεται οπτικά στο μέσον, στην πλώρη και στην πρύμνη στις ισάλους που έχουν χαραχτεί και μετακινώντας κάποια από τα βάρη μπορούμε να φέρουμε το μοντέλο στην ίσαλο που αντιστοιχεί στην κατάσταση που εξετάζεται. Τέλος συνδέεται και ο οδηγός στο μπροστινό μέρος του μοντέλου και ξεκινούν οι δοκιμές.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ

Τα πειράματα διεξήχθησαν στην δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η δεξαμενή αυτή έχει μήκος 91m, πλάτος 4.56m και μέγιστο βάθος 3m. Διαθέτει στα δύο τοιχώματά της μεταλλικές ράγες πάνω στις οποίες υπάρχει δυνατότητα κύλισης φορείου βάρους 5.5 tn με μέγιστη ταχύτητα 5.2 m/s. Η ταχύτητα του φορείου μετριέται με ειδικό τροχό που διαθέτει φωτοηλεκτρικό σύστημα και η παρεχόμενη από το σύστημα ακρίβεια είναι 1mm/s. Το φορείο δοκιμών οδηγείται από ειδικό χειριστήριο και εκτός από γέφυρα προσδέσεως των προτύπων διαθέτει στο εμπρόσθιο μέρος του γέφυρα παρακολουθήσεως, έτσι ώστε να μπορεί να υπάρχει οπτική επαφή με τα πρότυπα μοντέλα κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Επίσης, στο πρυμναίο μέρος του το φορείο διαθέτει κεκλιμένη προς την επιφάνεια του νερού επιμήκη μεταλλική επιφάνεια με δυνατότητα κίνησης προς τα πάνω και προς τα κάτω με σκοπό την άμεση απόσβεση των κυματισμών που τα πρότυπα μοντέλα προκαλούν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Η απόσβεση επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση της μεταλλικής επιφάνειας (σιδερώστρας) στο ύψος της επιφάνειας του νερού κατά την επιστροφή του φορείου μετά το τέλος του πειράματος στην αρχική θέση εκκίνησης. Επάνω στο φορείο βρίσκεται εγκατεστημένος όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός για την καταγραφή και επεξεργασία των πειραμάτων. Τα μετρητικά συστήματα είναι πλήρως αυτοματοποιημένα και η ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων γίνεται με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και λογισμικού Windows 98, λόγω της αξιοπιστίας που αυτό παρέχει.

Σημειώνεται ακόμη πως στην μία άκρη της δεξαμενής υπάρχει σύστημα παραγωγής κυματισμών. Αποτελείται από πτερύγιο ανοξείδωτου χάλυβα πλάτους 4.56 m και ύψους 2 m, εδρασμένο σε χάλυβα ύψους 1.30 m από τον πυθμένα της δεξαμενής. Το πτερύγιο κινείται μέσω υδραυλικού συστήματος ισχύος 15 kW ενώ το νερό αντλείται από την πίσω πλευρά του πτερυγίου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Ο κυματιστήρας, ωστόσο, δεν χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων καθώς αυτά πραγματοποιήθηκαν σε ήρεμο νερό. Στο άλλο άκρο της δεξαμενής είναι κατασκευασμένη ειδική ημιπερατή κεκλιμένη ακτή, μήκους 11.1 m για την απορρόφηση και απόσβεση των ανακλώμενων κυματισμών, με μέσο συντελεστή απόσβεσης 95%. Στην πλευρά αυτή της δεξαμενής υπάρχει ειδικό θερμόμετρο για την μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής καθώς και αντλία που καθαρίζει τα επιφανειακά στρώματα νερού της δεξαμενής από τη δημιουργούμενη άλγη.

Η άποψη της δεξαμενής από το φορείο φαίνεται στην Εικόνα 4.1 που ακολουθεί.



Εικόνα 4.1 Πειραματική δεξαμενή ΕΝΘΥ

Τέλος στον χώρο της δεξαμενής βρίσκονται εγκατεστημένοι 2 γερανοί ανυψωτικής ικανότητας ενός και δύο τόνων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την είσοδο και έξοδο των μοντέλων από την δεξαμενή

4.2 ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

4.2.1 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ RESISTANCE, HEAVE, PITCH

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ήταν το όργανο R47 που περιέχει τον αισθητήρα μέτρησης της αντίστασης του μοντέλου (resistance), τον αισθητήρα που μετράει τον προνευτασμό του μοντέλου (pitch) και τον αισθητήρα που μετράει την ανύψωση του κέντρου μάζας (heave). Είναι πακτωμένο πάνω στο φορείο και έχει δυνατότητα κίνησης κατά το διάμηκες επίπεδο της δεξαμενής εφόσον πρώτα λυθούν οι τέσσερις κοχλίες που το συγκρατούν καθώς αποτελείται από τρία μέρη, ένα μόνιμα σταθερό, ένα εν δυνάμει σταθερό που κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παραμένει σταθερό και ένα κινούμενο μέρος. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το συνολικό σύστημα αναρτημένο προκειμένου να τοποθετηθεί στην σωστή θέση για το μοντέλο και για να βαθμονομηθεί:



Εικόνα 4.2 Δυναμόμετρο R-47

Η μέτρηση της αντίστασης πραγματοποιείται μέσω μιας γέφυρας Wheatstone, η οποία αποτελείται από τέσσερα strain gages που συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν κύκλωμα. Το σταθερό κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μέρος του δυναμόμετρου μπορεί να εκτελεί απειροστά μικρές κινήσεις ως προς το μόνιμα σταθερό μέρος του δυναμόμετρου κατά τη διαμήκη άξονα της δεξαμενής που οφείλονται στην αντίσταση που συναντά το μοντέλο κατά τη κίνηση του στο νερό. Οι μικρές αυτές κινήσεις εντοπίζονται από τον αισθητήρα και με αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η μέτρηση της αντίστασης.

Η ανύψωση του κέντρου μάζας πραγματοποιείται με τη χρήση ενός αισθητήρα γραμμικού ποτενσιόμετρου, το οποίο είναι ένα αναλογικό ηλεκτρονικό εξάρτημα που χρησιμεύει στα κυκλώματα ως μεταβλητή αντίσταση. Συγκεκριμένα, το ποτενσιόμετρο λαμβάνοντας την σχετική κατακόρυφη κίνηση μεταξύ του κινούμενου μέρους του δυναμόμετρου και του σταθερού στα πειράματα μέρους του δυναμόμετρου μεταβάλλει την αντίσταση του με αποτέλεσμα και τη μεταβολή του διαρρέομενου σε αυτό ρεύματος. Η μεταβολή του ρεύματος στη συνέχεια

μεταφράζεται σε μεταβολή τάσης και είναι αυτή που μετρά ο ενισχυτής. Σημειώνεται επίσης πως το εύρος της μετρούμενης τάσης κυμαίνεται από 0 έως 10 V.

Η μέτρηση του προνευτασμού γίνεται και αυτή μέσω ενός ειδικού ποτενσιόμετρου ικανού να λαμβάνει τις κινήσεις πρόσδεσης του μοντέλου με το δυναμόμετρο ανάλογα με τον προνευτασμό του μοντέλου. Ο τρόπος λήψης της μέτρησης είναι ανάλογος με αυτόν της ανύψωσης του κέντρου μάζας, δηλαδή με μεταβολή της αντίστασης του ποτενσιόμετρου. Το εύρος της μετρούμενης τάσης κυμαίνεται σε αυτή την περίπτωση από -15 V έως +15 V.

4.2.2 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΩΣΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ

Για την μέτρηση της ώσης και της ροπής στο πείραμα αυτοπρόωσης, που αποτελούν τα πιο βασικά μεγέθη της μελέτης και απαιτούνταν η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια έγινε χρήση του δυναμόμετρου R31.

Το εν λόγω δυναμόμετρο αποτελείται από έναν σύνθετο άξονα. Στην μία άκρη υπάρχει ένα μεταλλικό ακροφύσιο το οποίο συνδέεται με τον ελικοφόρο άξονα και μεταφέρει την ώση και την ροπή, στην συνέχεια υπάρχει μια ορειχάλκινη βάση στην οποία προσφείεται ένα λεπτό ωστήριο. Μέσω του ωστηρίου αυτού μεταβιβάζεται η δύναμη της ώσης σε μία βάση σχήματος Γ με δυνατότητα ελαφριάς κάμψης που φέρει 4 επιμηκυνσιόμετρα που συγκροτούν μια αντίστοιχη γέφυρα Wheatstone όπου μεταβάλλει ανάλογα με την παραμόρφωση την τάση στην έξοδο. Αντίστοιχα για την ροπή μετά την ορειχάλκινη βάση ακολουθεί ένας συμπλέκτης και μια βάση με 4 λεπτά άκρα(στήλες) που φέρουν το κάθε ένα από 2 επιμηκυνσιόμετρα(συνολικά 8), συνδεδεμένα και αυτά σε γέφυρα. Η όποια μεταβολή στην θέση των άκρων λόγω στρέψης προκαλεί μεταβολή της του μήκους, επομένως και της τάσης και ως εκ τούτου λαμβάνεται μέτρηση. Στο άλλο άκρο υπάρχει εξίσου ένα μεταλλικό ακροφύσιο που πρέπει να συνδεθεί με τον ενδιάμεσο άξονα του συστήματος μέσω σφήνας.

Το εύρος που δύναται να μετρήσει δίχως αστοχία το εν λόγω δυναμόμετρο είναι 10kg ώση και 40kgxcm ροπή, με ένα μικρό περιθώριο υπερφόρτισης 15%. Ως εκ τούτου έγινε αρχικά ένας εμπειρικός υπολογισμός των δυνάμενων που θα αντιμετωπίσει σε σύγκριση με παλιές μελέτες του εργαστηρίου προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακρίβεια των μετρήσεων και η ασφάλεια του εξοπλισμού. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το εσωτερικό του δυναμόμετρου και ο μηχανισμός όπως εγκαταστάθηκε στο μοντέλο.



Εικόνα 4.3 Δυναμόμετρο R-31

4.2.3 ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ

Το μετρικό σύστημα του δυναμόμετρου για την μέτρηση ώσης και ροπής σε ελεύθερη ροή είναι τύπου Full Bridge Strain Gauge. Συγκεκριμένα αποτελείται στην εσωτερική κεφαλή του από ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα (Strain Gauges) σε κατάλληλες θέσεις, τα οποία αντιλαμβάνονται την οποιαδήποτε δύναμη ή ροπή μέσω των παραμορφώσεων στα εσωτερικά ελάσματα του δυναμόμετρου όπου είναι προσαρτημένα. Οι παραμορφώσεις αυτές προκαλούν μεταβολή της αντίστασης των ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων, η οποία συνεπάγεται μια μεταβολή στο ρεύμα που τα διαρρέει και μια διαφορά τάσης

4.2.4 ΜΕΤΡΗΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ

Για την μέτρηση των στροφών χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικός μετρητής στροφών τύπου OMEGA HHT13. Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από ένα εκπομπό δέσμης λέιζερ που συνδέεται με την οθόνη που καταγράφονται οι μετρήσεις και από έναν ανακλαστήρα που τοποθετείται στον άξονα που περιστρέφεται. Η ακτίνα ευθυγραμμίζεται με τον ανακλαστήρα και ξεκινά η περιστροφή, όπου για κάθε ανάκλαση λαμβάνεται μέτρηση. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή το εν λόγω σύστημα έχει ακρίβεια 0,01RPM ενώ είχε βαθμονομηθεί πρόσφατα. Στερεώθηκε επί του μοντέλου μέσω μιας ξύλινης βάσης που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο. Παρακάτω ακολουθεί μια εικόνα του συστήματος μαζί με την έξοδο στην οθόνη.



Εικόνα 4.4 Σύστημα Μέτρηση Στροφών

4.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ ΟΡΓΑΝΩΝ

Για τη σωστή λήψη των πειραματικών μετρήσεων ήταν απαραίτητη η βαθμονόμηση και των τριών αισθητήρων πριν την εκτέλεση των πειραμάτων, η οποία παρουσιάζεται για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά στη συνέχεια.

Σε γενικές γραμμές, οι φυσικές μεταβολές κάθε μετρούμενου μεγέθους που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων καθώς και διαταραχές που επηρεάζουν το σύστημα μέτρησης - όπως η συχνότητα και η τάση του δικτύου τροφοδοσίας ρεύματος, η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας των οργάνων κλπ. γίνονται αντιληπτές από το αντίστοιχο όργανο ως μεταβολές τάσης και μετριοούνται σε Volt. Οι μετρούμενες αυτές τάσεις σε Volt για να βρουν αντιστοιχία στις πραγματικές μονάδες στο σύστημα S.I που εκφράζουν χρειάζονται μια συνάρτηση μεταφοράς, δηλαδή μια συνάρτηση όπου εισάγοντας ως ανεξάρτητη μεταβλητή τα Volt που λαμβάνονται από τον αισθητήρα του εκάστοτε οργάνου θα προκύπτει ως εξαρτημένη μεταβλητή το μετρούμενο μέγεθος σε πραγματικές φυσικές μονάδες στο σύστημα S.I.

Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι γραμμικές συναρτήσεις της μορφής $y = ax + b$ και προκύπτουν από τις βαθμονομήσεις των αισθητήρων, όπου αυτοί μετρώντας πρότυπα φυσικά μεγέθη δίνουν αποτελέσματα σε Volt και μέσω αυτών των ζευγών τιμών προκύπτουν οι αντίστοιχες συναρτήσεις.

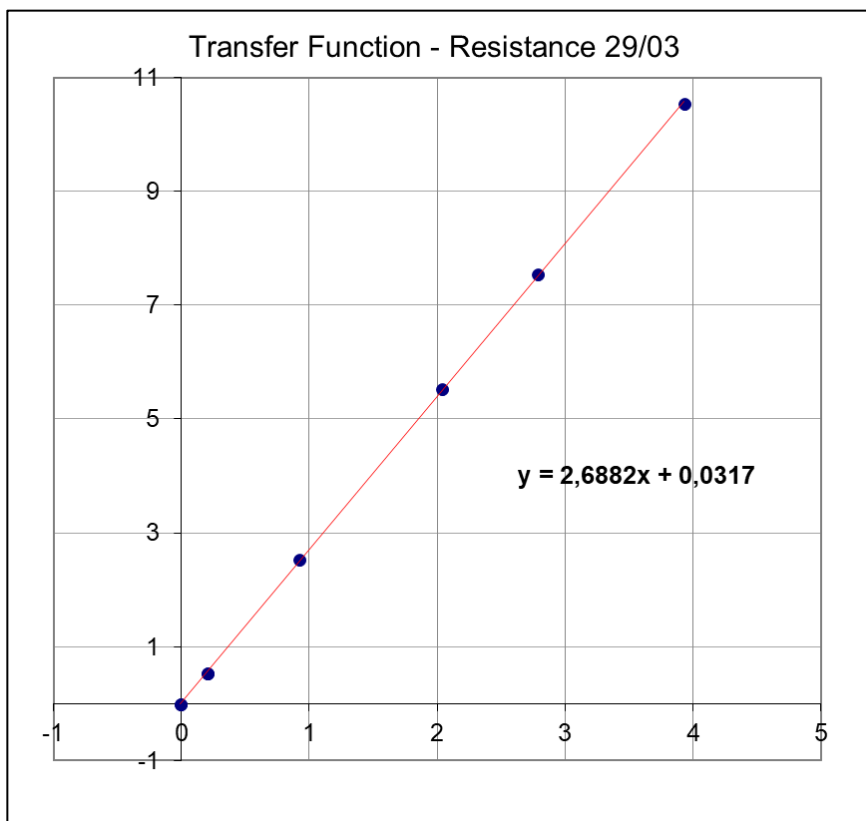
Μετά τον προσδιορισμό των εξισώσεων μεταφοράς, πριν την πραγματοποίηση του κάθε τρεξίματος του μοντέλου στην δεξαμενή λαμβανόταν μια μηδενική μέτρηση σε πλήρη κατάσταση ηρεμίας, ώστε να ληφθούν οι αποκρίσεις των αισθητήρων των οργάνων στην κατάσταση αυτή και στη συνέχεια εισάγονταν οι τιμές των Volt που λαμβανόταν από τους αισθητήρες στις κατάλληλες εξισώσεις μεταφοράς ώστε να καταγραφούν οι μηδενικές φυσικές τιμές των μετρούμενων μεγεθών. Κατόπιν, ακολουθούσε το τρέξιμο του μοντέλου στη δεξαμενή, όπου οι αισθητήρες λάμβαναν εκ νέου μετρήσεις που ακολούθως εισάγονταν με τη σειρά τους στις εξισώσεις μεταφοράς προκειμένου να προκύψουν πάλι τα μετρούμενα μεγέθη σε φυσικές μονάδες του συστήματος S.I. Όπως γίνεται αντιληπτό, οι πραγματικές τιμές των μετρούμενων μεγεθών πρόκυπταν από την αφαίρεση των μηδενικών φυσικών τιμών στο σύστημα S.I από τις φυσικές μετρούμενες τιμές κατά τη διεξαγωγή των τρεξιμάτων του μοντέλου στη δεξαμενή. Δηλαδή κατά το τρέξιμο μετράται τιμή x_i , οπότε το ζητούμενο φυσικό μέγεθος (y) προκύπτει από:

$$y = y_i - y_o = [a \cdot x_i + b] - [a \cdot x_o + b] = a(x_i - x_o)$$

4.3.1 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα Resistance πραγματοποιούταν σε καθημερινή βάση προκειμένου να ληφθούν υπόψη διαταραχές που επηρεάζουν το σύστημα μέτρησης, όπως η συχνότητα και η τάση του δικτύου τροφοδοσίας ρεύματος, η διαφοροποίηση της θερμοκρασίας των οργάνων κλπ., τόσο στα πειράματα υπολογισμού της αντίστασης ρυμούλκησης όσο και σε αυτά της αυτοπρώσης. Συγκεκριμένα η βαθμονόμηση περιελάμβανε τοποθέτηση πρότυπων βαρών στον πρόβολο του δυναμόμετρου. Αρχικά λαμβανόταν μηδενική μέτρηση χωρίς κανένα βάρος και στη συνέχεια τοποθετείτο στον πρόβολο ζυγαριά βάρους 0.54 kg όπου με τη σειρά προστίθενται τα βάρη 2kg, 5 kg και 7 kg, ενώ τελικώς λαμβανόταν μία ακόμη μέτρηση μόνο με τη ζυγαριά και μία χωρίς κανένα βάρος. Στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζεται μια τυπική βαθμονόμηση του αισθητήρα αντίστασης, όπως αυτή πραγματοποιήθηκε στις 29-03-2018. Ακολούθως παρουσιάζεται και εικόνα που δείχνει το δυναμόμετρο μαζί με τον πρόβολο, όπου τοποθετούνταν διαδοχικά τα βάρη.

Volts	Μέγεθος
-0,013	0
0,199	0,54
0,919	2,54
2,032	5,54
2,785	7,54
3,926	10,54
0,199	0,54
-0,008	0



Εικόνα 4.5 Βαθμονόμηση Αισθητήρα Αντίστασης

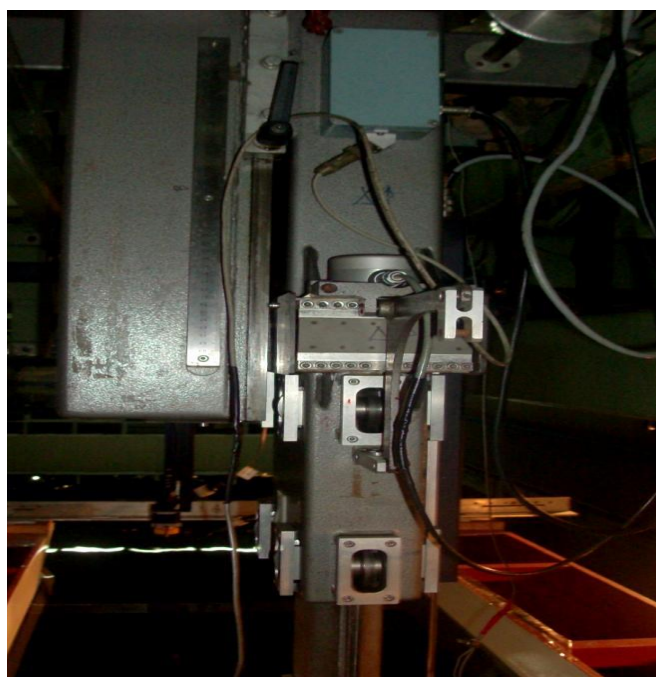
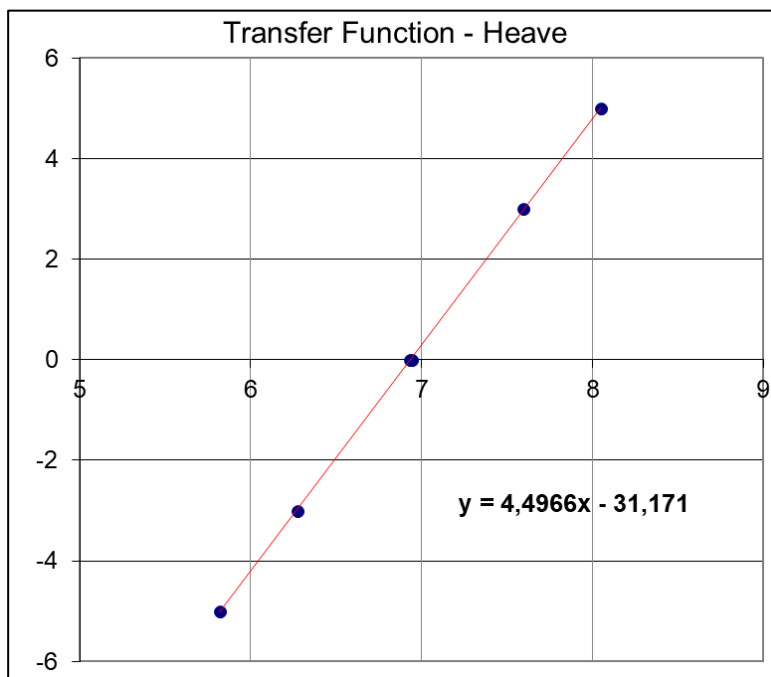
4.3.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΚΕΝΤΡΟΥ ΜΑΖΑΣ

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα Heave πραγματοποιήθηκε μια φορά κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων πριν ξεκινήσουν τα πειράματα της αντίστασης χωρίς πηδάλιο. Η βαθμονόμηση του αισθητήρα Heave βασίζεται στην ορισμένη κίνηση του ελεύθερου μέρους του οργάνου R47. Κατά αυτόν τον τρόπο μεταβάλλεται η αντίσταση του αισθητήρα heave με συνέπεια και τη μεταβολή της μετρούμενης τάσης. Για να επιτευχθεί αυτό, είτε θα έπρεπε να αυξομειώνεται η στάθμη του νερού της δεξαμενής είτε θα έπρεπε να ανυψωνόταν και να βυθιζόταν το μοντέλο μέσα στο νερό.

Επειδή καμιά από τις δύο μεθόδους δεν είναι εφικτή να πραγματοποιηθεί, για τη βαθμονόμηση του heave το εν δυνάμει σταθερό μέρος του δυναμόμετρου μετατοπιζόταν κατά τον κατακόρυφο άξονα προκαλώντας διαφορετικές σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ αυτού και του κινητού μέρους του δυναμόμετρου.

Η κατακόρυφη κίνηση του εν δυνάμει σταθερού μέρους του δυναμόμετρου πραγματοποιούνταν μέσω ενός κοχλίου ευρισκόμενου στο πάνω μέρος, ενώ η ακριβής κατακόρυφη μετατόπισή του ήταν δυνατό να προσδιοριστεί μέσω ενός μεταλλικού χάρακα που ήταν πακτωμένος κατακόρυφα σε κατάλληλο σημείο στο σταθερό μέρος του δυναμόμετρου όπου ως σημείο μηδέν για την μέτρηση των μετατοπίσεων ελήφθησαν τα 30cm. Στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζεται η βαθμονόμηση του αισθητήρα, όπως αυτή πραγματοποιήθηκε στις 29-03-2018.

Volts	Μέγεθος
8,045	5
7,595	3
6,939	0
6,271	-3
5,815	-5
6,928	0

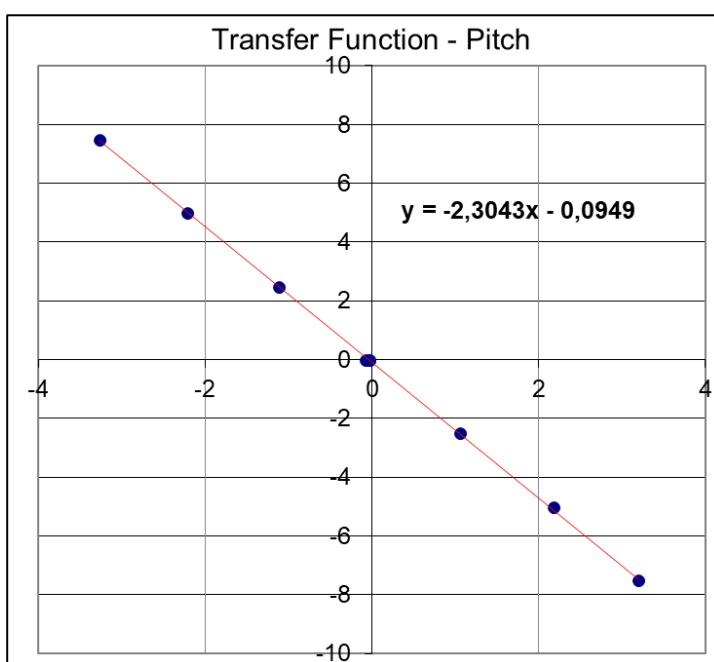


Εικόνα 4.6 Βαθμονόμηση Αισθητήρα Ανύψωσης Κέντρου Μάζας

4.3.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΡΟΝΕΥΤΑΣΜΟΥ

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα Pitch πραγματοποιήθηκε μια φορά κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων πριν ξεκινήσουν τα πειράματα της αντίστασης χωρίς πηδάλιο. Αυτό συνέβη καθώς για τη μέτρηση του pitch στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας που βρίσκεται μόνιμα εγκατεστημένος στο πόδι του δυναμόμετρου. Η βαθμονόμηση του αισθητήρα pitch του δυναμόμετρου πραγματοποιήθηκε με την εξής διαδικασία. Αρχικά τοποθετήθηκε στο πέλμα του δυναμόμετρου μια ειδική μεταλλική κατασκευή που το συγκρατούσε παράλληλο ως προς το οριζόντιο επίπεδο και αντιστοιχούσε στη μηδενική γωνία διαγωγής. Κατόπιν τοποθετήθηκαν στην παραπάνω μεταλλική κατασκευή ειδικές πρότυπες σφήνες που αντιστοιχούσαν στις γωνίες 2.5°, 5° και 7°, οι οποίες στη συνέχεια τοποθετήθηκαν με αντίθετο τρόπο ώστε να αντιστοιχούν στις αρνητικές γωνίες -2.5°, -5° και -7°, ενώ για κάθε γωνία λαμβανόταν από τον αισθητήρα η αντίστοιχη μέτρηση. Στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα παρουσιάζεται η βαθμονόμηση του αισθητήρα pitch του δυναμόμετρου, όπως αυτή πραγματοποιήθηκε στις 29-03-2018.

Volts	Μέγεθος
-0,039	0
-1,127	2,5
1,045	-2,5
-0,039	0
-2,217	5
2,176	-5
-0,045	0
-3,277	7,5
3,195	-7,5
-0,084	0



Εικόνα 4.7 Βαθμονόμηση Αισθητήρα Προνευτασμού

4.3.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ

Για την έναρξη της διαδικασίας των πειραμάτων της έλικας σε ελεύθερη ροή είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του δυναμόμετρου που θα χρησιμοποιηθεί. Η διαδικασία είχε ως εξής. Στην θέση της έλικας τοποθετείται ένα ειδικό εξάρτημα κυλινδρικού σχήματος και μήκους 50cm το οποίο συνδέεται με τον εσωτερικό άξονα, που οδηγεί στην κεφαλή του δυναμόμετρου, και παρέχει την δυνατότητα ανάρτησης βαρών στην άκρη του δυναμόμετρου, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Συνεπώς το βάρος που αναρτάται κάθε φορά μεταφέρεται στην κεφαλή του δυναμόμετρου και μέσω των παραμορφώσεων που παραλαμβάνουν τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα εξάγονται αποτελέσματα από τον υπολογιστή σε Volt. Αναρτώντας γνωστά βάρη μέσω ειδικών δίσκων, είτε στο κέντρο όταν πρόκειται για μέτρηση δύναμης είτε σε κάποιο άκρο για μέτρηση ροπής, και καταγράφοντας κάθε φορά το αποτέλεσμα του υπολογιστή παράγεται η αντίστοιχη συνάρτηση μεταφοράς. Προκειμένου να μετρηθεί και η αριστερόστροφη ροπή αναρτώνται τα βάρη δεξιά ενώ σε κάθε περίπτωση πρέπει να μπλοκαριστεί το άλλο άκρο του δυναμόμετρου για να μην υπάρχει περιστροφή. Το αναρτώμενο βάρος, η μεριά τοποθέτησης του βάρους για την παραγωγή ροπής καθώς και οι συναρτήσεις μεταφοράς που προέκυψαν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

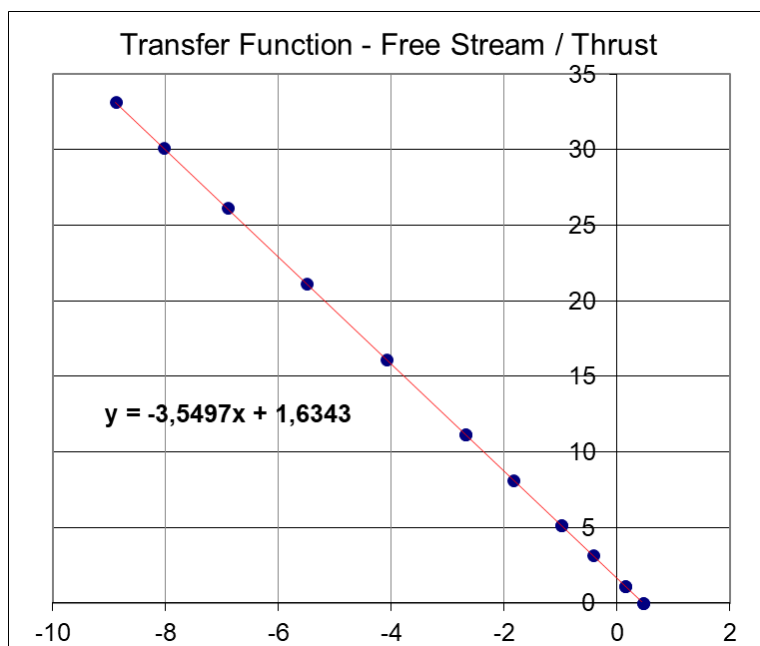


Εικόνα 4.8 Βαθμονόμηση Δυναμόμετρου πειράματος Ελεύθερης Ροής

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΩΣΗΣ

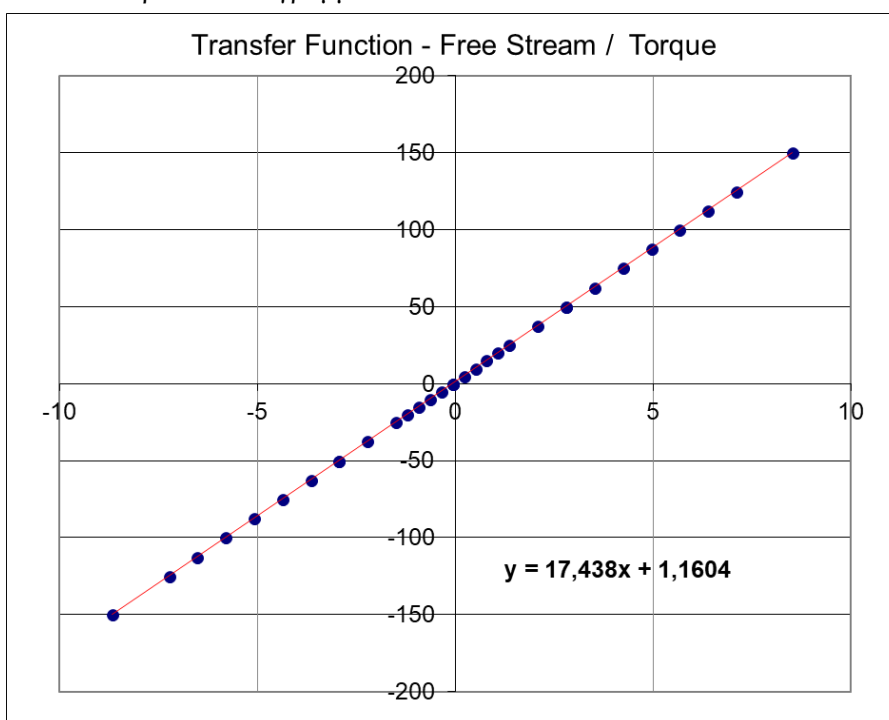
Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι μετρήσεις που έγιναν για την βαθμονόμηση του αισθητήρα μέτρησης ώσης. Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς.

Volts	Μέγεθος
0,457	0,025
0,132	1,175
-0,431	3,175
-0,995	5,175
-1,842	8,175
-2,688	11,175
-4,099	16,175
-5,507	21,175
-6,914	26,175
-8,039	30,175
-8,881	33,175
-2,697	11,175
-0,999	5,175
0,128	1,175
0,453	0,025



ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μετρήσεις που έγιναν για την βαθμονόμηση του αισθητήρα για την μέτρηση της ροπής. Στην δεύτερη στήλη παρατίθενται τα αναρτώμενα βάρη σε kg και στην τρίτη στήλη τα βάρη πολλαπλασιάζονται με τον μοχλοβραχίονα ο οποίος είναι 25cm. Στην τελευταία στήλη του πίνακα αναφέρεται η πλευρά ανάρτησης του εκάστοτε βάρους. Υπενθυμίζεται εδώ πως για την μέτρηση αριστερόστροφης ροπής το βάρος τοποθετείται δεξιά ενώ το αντίθετο συμβαίνει για την μέτρηση δεξιόστροφης ροπής. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων ο άξονας έχει μπλοκαριστεί με ειδικό εργαλείο προκειμένου να αποτραπεί η περιστροφή του. Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει και η συνάρτηση μεταφοράς για την ροπή, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

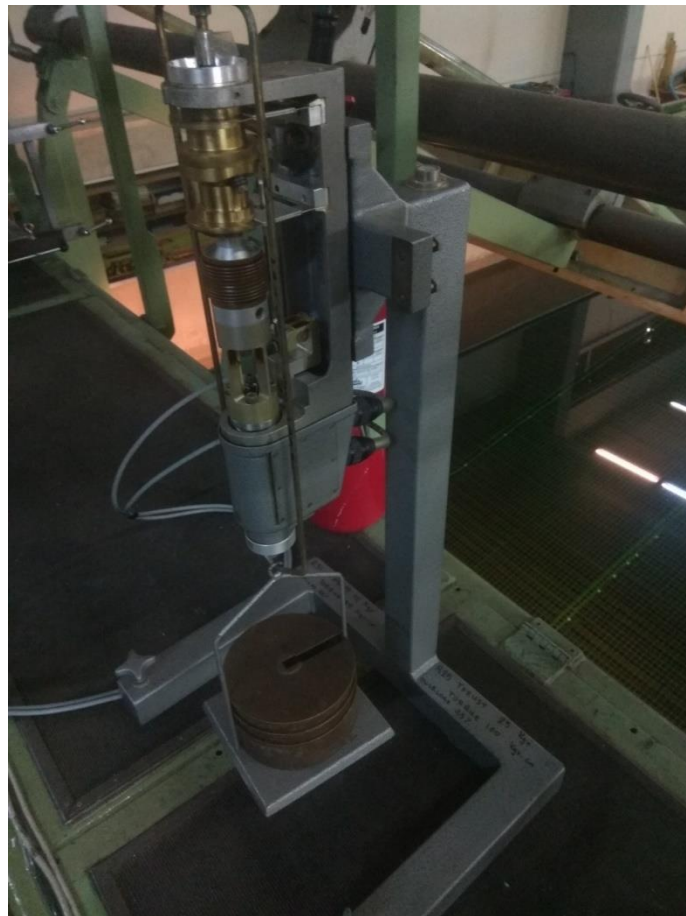
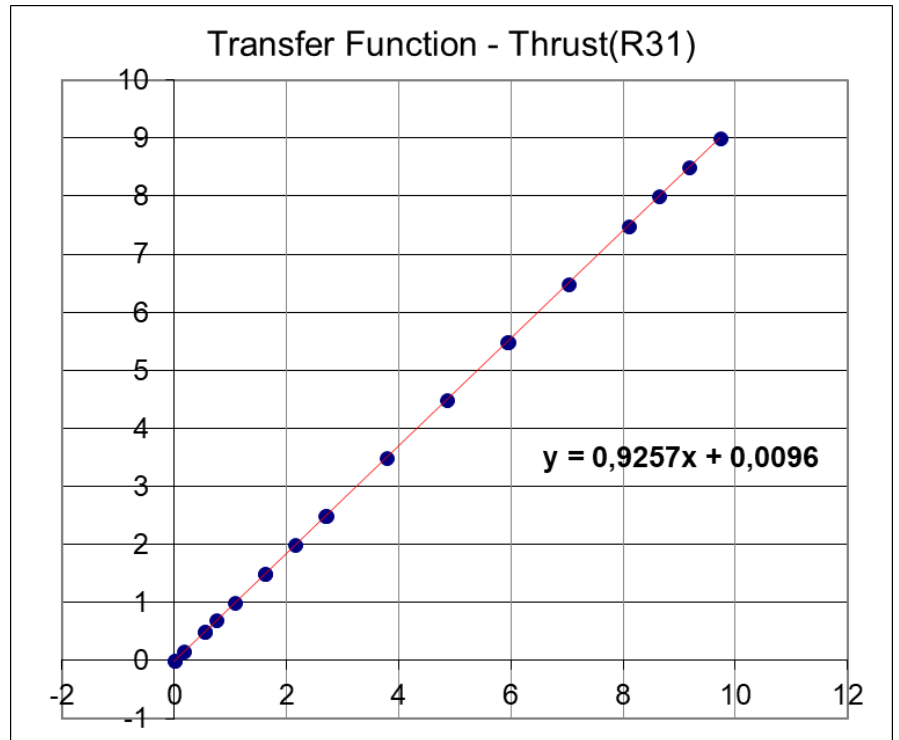


Volts	Μέγεθος(kg)	Μέγεθος(kg x cm)
-0,067	0	0
0,22	0,2	5
0,505	0,4	10
0,791	0,6	15
1,079	0,8	20
1,368	1	25
2,086	1,5	37,5
2,803	2	50
3,521	2,5	62,5
4,237	3	75
4,954	3,5	87,5
5,67	4	100
6,387	4,5	112,5
7,102	5	125
8,53	6	150
2,803	2	50
-0,067	0	0
-0,354	-0,2	-5
-0,64	-0,4	-10
-0,925	-0,6	-15
-1,213	-0,8	-20
-1,503	-1	-25
-2,22	-1,5	-37,5
-2,935	-2	-50
-3,652	-2,5	-62,5
-4,369	-3	-75
-5,084	-3,5	-87,5
-5,801	-4	-100
-6,518	-4,5	-112,5
-7,233	-5	-125
-8,662	-6	-150
-2,937	-2	-50
-0,072	0	0

4.3.5 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΩΣΗΣ

Για την βαθμονόμηση του αισθητήρα μέτρησης ώσης του δυναμόμετρου αναρτώνται στο άκρο του δυναμόμετρου τυποποιημένα βάρη μέσω ειδικής ζυγαριάς, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Για την βαθμονόμηση σημειώνονται τα ζεύγη βαρών και Volt που εξάγει ο υπολογιστής και παράγεται η συνάρτηση μεταφοράς όπως φαίνεται παρακάτω.

Volts	Μέγεθος
-0,01	0
0,171	0,17
0,529	0,5
0,747	0,7
1,069	1
1,61	1,5
1,61	1,5
2,149	2
2,69	2,5
3,77	3,5
4,849	4,5
5,931	5,5
7,011	6,5
8,091	7,5
9,171	8,5
8,633	8
9,712	9
5,936	5,5
2,693	2,5
0,532	0,5
-0,011	0

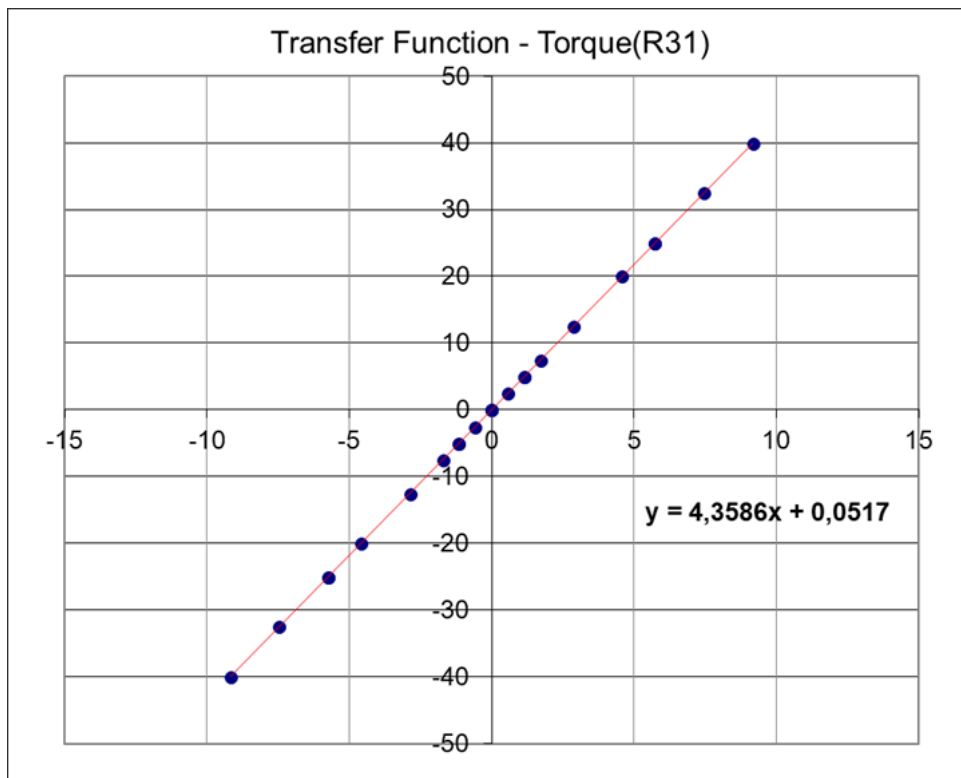


Εικόνα 7.1 Βαθμονόμηση αισθητήρα μέτρησης ώσης

4.3.6 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΡΟΠΗΣ

Με τον ίδιο τρόπο γίνεται και η βαθμονόμηση του αισθητήρα για την μέτρηση της ροπής. Σε αυτή την περίπτωση όμως τα βάρη αναρτώνται δεξιά και αριστερά από τον κατακόρυφο άξονα του δυναμόμετρου μέσω ζυγαριών, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Η απόσταση τοποθέτησης της κάθε ζυγαριάς είναι 25cm από τον κατακόρυφο άξονα. Τοποθετώντας βάρη στις ζυγαριές δημιουργείται είτε αριστερόστροφη είτε δεξιόστροφη ροπή ανάλογα με την πλευρά του βάρους. Τα θετικά Volt αντιστοιχούν σε δεξιόστροφη ροπή κοιτώντας προς την πλώρη ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τις αρνητικές τιμές Volt. Με τα ζεύγη των τιμών που καταγράφονται προκύπτει και η συνάρτηση μεταφοράς όπως φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.

Volts	Μέγεθος(kg x cm)	Μέγεθος(kg)
-0,01	0	0
-0,584	-2,5	0,1
-1,157	-5	0,2
-1,729	-7,5	0,3
-2,879	-12,5	0,5
-4,6	-20	0,8
-5,749	-25	1
-7,468	-32,5	1,3
-9,188	-40	1,6
-5,757	-25	1
-1,162	-5	0,2
-0,013	0	0
0,56	2,5	0,1
1,133	5	0,2
1,706	7,5	0,3
2,855	12,5	0,5
4,577	20	0,8
5,724	25	1
7,442	32,5	1,3
9,16	40	1,6
5,731	25	1
1,14	5	0,2
-0,005	0	0



Εικόνα 7.2 Βαθμονόμηση αισθητήρα μέτρησης ροπής

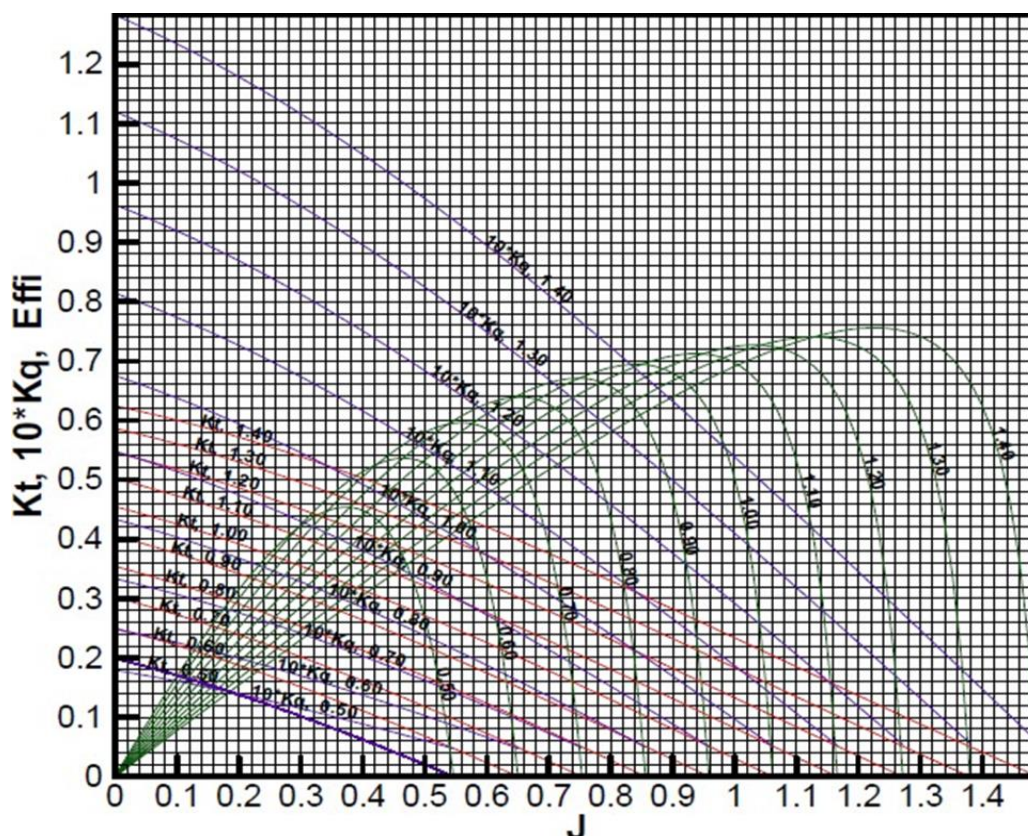
5. ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΡΟΗ

5.1 ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ ΜΕΓΕΘΩΝ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΩΝ

Προτού πραγματοποιηθεί το πείραμα της έλικας σε ελεύθερη ροή επιβάλλεται να γίνει μια προεκτίμηση της ροπής και της ώσης που πρόκειται να μετρηθούν για συγκεκριμένες ταχύτητες, προκειμένου να είναι γνωστή η τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων που αναμένονται από το πείραμα. Κάτι τέτοιο είναι απαραίτητο για την αποφυγή υπερφορτίσεων κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων καθώς το δυναμόμετρο μπορεί να υποστηρίξει μια μέγιστη ροπή $\pm 150 \text{ kr}\cdot\text{cm}$ και μια μέγιστη ώση $\pm 40 \text{ kr}$ για στροφές μέχρι 3000RPM.

Η προεκτίμηση αυτή γίνεται μέσω αριθμητικών υπολογισμών με την αντίστροφη από την παραπάνω διαδικασία για μια έλικα σειράς Wageningen B4-70 με διάμετρο $D=0,16\text{m}$ και βήμα $P/D=0,75$, ίδια με αυτά της έλικας του πειράματος.

Για την έλικα αυτή είναι γνωστό το διάγραμμα ελεύθερης ροής^[1] (Διάγραμμα 3.1), το οποίο φαίνεται παρακάτω, και μας δίνει πληροφορίες για τα k_T , k_Q και η , ανάλογα με το συντελεστή προχώρησης J και το βήμα P/D .



Διάγραμμα 5.1 Έλικα WAGENIGEN B4-70 σε ελεύθερη ροή [1]

Για ένα εύρος συντελεστών προχώρησης από 0,1 έως 0,8 προσδιορίζονται η ταχύτητα και οι στροφές της έλικας, μέσω της σχέσης του συντελεστή προχώρησης. Για κάθε J καταγράφονται οι συντελεστές ώσης και ροπής k_T και k_Q αντίστοιχα και ο βαθμός απόδοσης η_0 από το διάγραμμα ελεύθερης ροής. Έχοντας τους συντελεστές αυτούς, μέσω των αντίστοιχων σχέσεων, υπολογίζονται η ροπή και την ώση για την εκάστοτε κατάσταση.

Εδώ σημειώνεται ότι για την επιλογή των ταχυτήτων για το συγκεκριμένο εύρος συντελεστών προχώρησης της μελέτης θα πρέπει σύμφωνα με την ITTC ο αριθμός Reynolds στο 0,75R να είναι μεγαλύτερος από $2 \cdot 10^5$.

Ο αριθμός αυτός δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Re_{0,75c} = \frac{c_{0,75R} \cdot \sqrt{V^2 + (\pi \cdot n \cdot 0,75 \cdot D)^2}}{\nu}$$

Όπου:

V: η ταχύτητα της έλικας [m/s]

$C_{0,75R}$: το μήκος χορδής σχέσης

ν : η κινηματική συνεκτικότητα του γλυκού νερού [m²/s]

n : οι στροφές που αναπτύσσει η έλικα[RPS]

D : η διάμετρος της έλικας [m]

Η προεκτίμηση των μεγεθών αυτών είναι αυτή που φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:

J	V[m/s]	n[RPM]	T[kp]	Q[kp·m]	kT	10kQ	η_0	$Re_{0,75c}$
0,1	0,5	1875	19,24	0,37	0,295	0,355	0,135	595954
0,2	0,75	1406	9,73	0,19	0,265	0,320	0,260	448171
0,25	1,4	2100	20,30	0,40	0,248	0,305	0,325	670615
0,3	1,4	1750	13,07	0,26	0,230	0,285	0,380	560214
0,4	1,4	1312	6,07	0,12	0,190	0,240	0,490	422762
0,5	1,4	1050	2,93	0,07	0,143	0,200	0,570	340866
0,55	1,4	954	2,03	0,05	0,120	0,175	0,600	311279
0,6	1,4	875	1,38	0,04	0,097	0,155	0,610	286738
0,65	1,4	807	0,91	0,03	0,075	0,130	0,590	266078
0,7	1,4	750	0,55	0,02	0,053	0,107	0,505	248466
0,75	1,4	700	0,23	0,01	0,025	0,080	0,305	233290
0,8	1,4	656	0,00	0,01	0,000	0,055	0,050	220092

Πίνακας 5.1 Προεκτίμηση Ωσης και Ροπής για Έλικα WAGENIGEN B4-70

5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Μετρώντας την παραγόμενη ώση και ροπή για ένα εύρος συντελεστών προχώρησης μπορούμε μέσω των σχέσεων που προαναφέρθηκαν να υπολογίσουμε τους συντελεστές αυτούς.

Μετά το πέρας της βαθμονόμησης του δυναμόμετρου και αφού έχουμε τις συναρτήσεις μεταφοράς για την ώση και ροπή τοποθετείται στο δυναμόμετρο η έλικα και εισέρχεται στην δεξαμενή.



Εικόνα 5.1 Έλικα σε Ελεύθερη Ροή

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις ταχύτητες και στις αντίστοιχες στροφές οι οποίες έχουν προεκτιμηθεί παραπάνω.

Αρχικά, κατά την πρώτη σειρά πειραμάτων, εκτός από τις στροφές υπήρχε και μεταβολή της ταχύτητας του φορείου για κάθε συντελεστή προχώρησης J . Όμως λόγω μικρών αποκλίσεων των αποτελεσμάτων κατά τις επαναληπτικές μετρήσεις επιλέχθηκε η ταχύτητα να παραμένει σταθερή και η μόνη παράμετρος που θα μεταβάλλεται να είναι οι στροφές. Έτσι επιλέχθηκε τιμή για την ταχύτητα $V=1,4\text{m/s}$ και μεταβάλλοντας τις στροφές ήταν εφικτό να επιτευχθούν οι επιθυμητοί συντελεστές προχώρησης J .

Στο δυναμόμετρο δεν ορίζονται απευθείας στροφές σε RPM. Εσωτερικά του δυναμόμετρου υπάρχει ένας παλμοδότης (encoder wheel) ο οποίος παράγει 100 παλμούς ανά περιστροφή του άξονα. Ως εκ τούτου έχοντας τις επιθυμητές στροφές σε RPM διαιρώντας με 60, για να υπολογιστούν οι στροφές ανά δευτερόλεπτο (RPS), και πολλαπλασιάζοντας με 100 να υπολογιστούν οι παλμοί που πρέπει να παραχθούν ανά δευτερόλεπτο για να επιτευχθούν οι επιθυμητές στροφές στον άξονα.

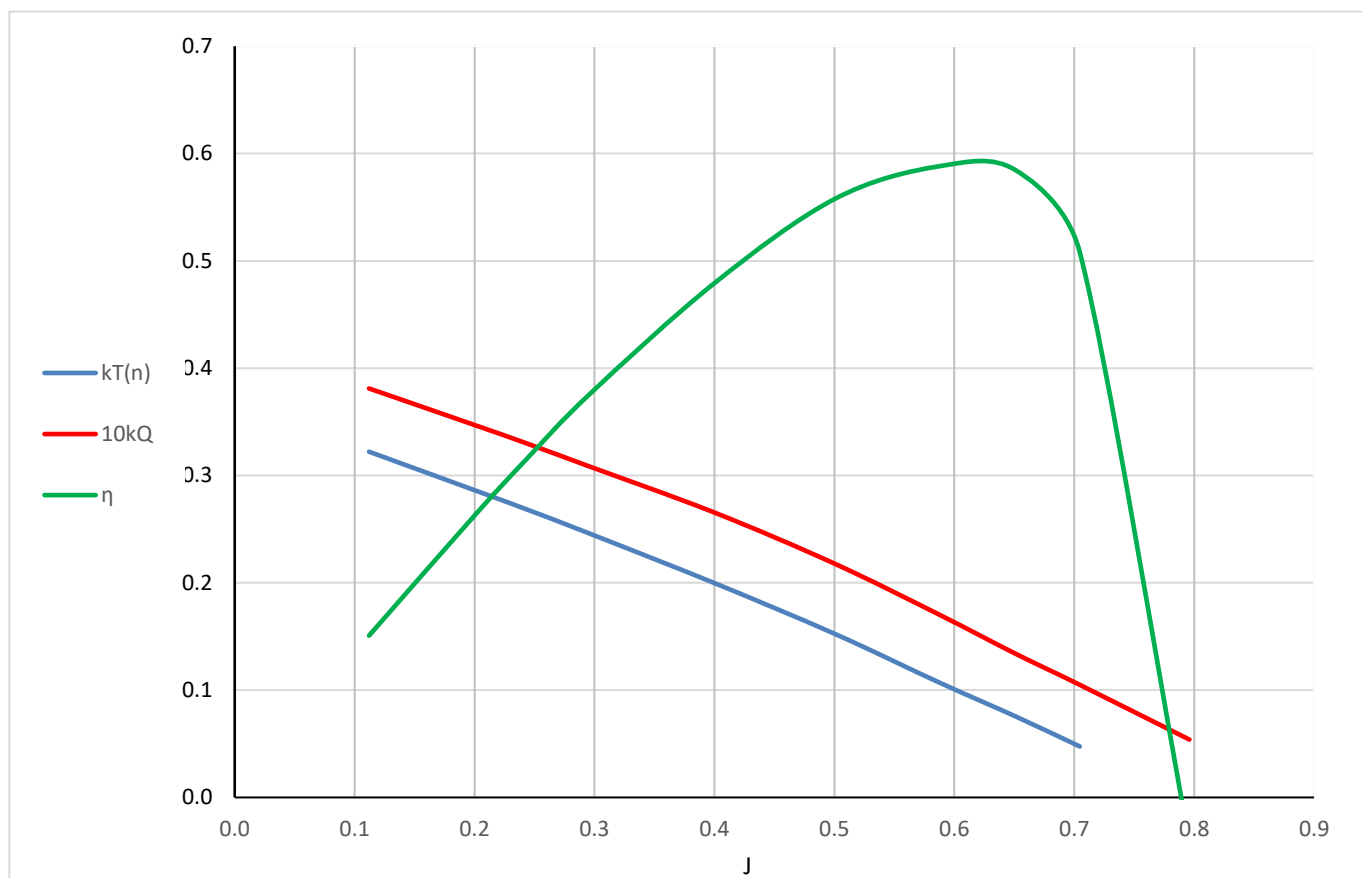
Για την διεξαγωγή του πειράματος και την καταγραφή αποτελεσμάτων για την παραγόμενη ώση και ροπή αρκεί να τρέξει το φορείο στην κατάλληλη ταχύτητα και να οριστούν οι παλμοί που υπολογίστηκαν. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες αντιστοιχούν στον επιθυμητό αριθμό συντελεστών προχώρησης. Μεταξύ των μετρήσεων πρέπει να μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα περίπου 10 λεπτών προκειμένου να ηρεμεί το νερό από κυματισμούς προκειμένου οι μετρήσεις να μην επηρεάζονται από την διατάραξη της ελεύθερης επιφάνειας. Πριν από την κάθε μέτρηση καταγράφεται η τιμή για την ώση και τη ροπή που δίνει ο υπολογιστής για μηδενική ταχύτητα και στροφές. Στη συνέχεια ορίζονται οι παλμοί και η ταχύτητα του φορείου και μετά το τρέξιμο καταγράφονται οι τιμές της ώσης και της ροπής για τις εκάστοτε συνθήκες σε Volt.

Μέσω όμως των συναρτήσεων μεταφοράς, όπως αυτές καταγράφηκαν παραπάνω, τα Volt μετατρέπονται σε kp για την ώση και σε $kp\cdot cm$ για την ροπή. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής προχώρησης J και οι συντελεστές k_T , k_Q και μέσω των παραπάνω σχέσεων και το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και το διάγραμμα ελεύθερης ροής που προέκυψε ακολουθούν παρακάτω (Πίνακας 3.5 και Διάγραμμα 3.4).

V[m/s]	PULSES	n[RPM]	T[kp]	Q[kp·cm]	J	kT	10kQ	η_0
0,562	3135	1881	21,15	-40,04	0,11	0,322	0,381	0,151
0,755	2352	1411	10,57	-20,51	0,20	0,286	0,346	0,263
1,412	3620	2172	23,48	-46,19	0,24	0,268	0,330	0,316
1,41	2980	1788	14,59	-29,28	0,30	0,246	0,308	0,376
1,405	2195	1317	6,43	-13,67	0,40	0,200	0,265	0,479
1,404	1753	1051	3,13	-7,15	0,50	0,152	0,218	0,558
1,400	1490	894	1,59	-4,05	0,59	0,107	0,170	0,588
1,403	1347	808	0,92	-2,60	0,65	0,075	0,134	0,585
1,406	1247	748	0,49	-1,74	0,70	0,047	0,105	0,508

Πίνακας 3.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ



Διάγραμμα 3.4 Διάγραμμα Έλικας σε Ελεύθερη Ροή

6. ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

6.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στην διάρκεια των πειραμάτων καθελκύεται το μοντέλο στην πειραματική δεξαμενή αρχικά δίχως έλικα και πηδάλιο, ενώ σε δεύτερο στάδιο τοποθετείται και βιδώνεται το πηδάλιο, προσδένεται στο δυναμόμετρο και ελέγχεται η οπτικά η ίσαλος. Μετά το πέρας του ελέγχου αυτού βαθμονομείται ο αισθητήρας αντίστασης και λαμβάνεται μια μηδενική μέτρηση για την σε κατάσταση ηρεμίας. Στην συνέχεια προσδένεται το φρένο και ξεκινάει η επιτάχυνση του φορείου. Σε πολύ μικρό χρόνο το μοντέλο επιτυγχάνει την ζητούμενη ταχύτητα, λύνεται το φρένο και ξεκινάει η λήψη των μετρήσεων για χρόνο 25s.

Με το πέρας του χρόνου καταγραφής δένεται το φρένο και σταματάει το μοντέλο το οποίο επιστρέφει στην αρχική του θέση. Μεταξύ των μετρήσεων μεσολαβεί χρόνος 15 λεπτών προκειμένου η επιφάνεια του νερού να ηρεμίσει και να αποσβεστούν όσο το δυνατόν οι κυματισμοί που παρήχθησαν.

Τα πειράματα της αντίστασης πραγματοποιήθηκαν για ταχύτητες πλοίου από 9kn μέχρι 15,5kn ανά μισό κόμβο. Οι ταχύτητες που αντιστοιχούν στο μοντέλο σε m/s με βάση την εξίσωση των αριθμών Froude φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

V_s (kn)	V_m (m/s)
9,000	0,690
9,500	0,729
10,000	0,767
10,500	0,805
11,000	0,844
11,500	0,882
12,000	0,920
12,500	0,959
13,000	0,997
13,500	1,035
14,000	1,074
14,500	1,112
15,000	1,150
15,500	1,189

Πίνακας 6.1 Ταχύτητες πλοίου και μοντέλου στο πείραμα αντίστασης

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού σε κάθε ημέρα πειραμάτων γίνεται με την βοήθεια υδραργυρικού θερμομέτρου που τοποθετείται στη δεξαμενή.

6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΩΡΙΣ ΠΗΔΑΛΙΟ

Τα στοιχεία που αφορούν τις συνθήκες του νερού κατά την διάρκεια των πειραμάτων που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς στα πειράματα αντίστασης, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα μαζί με την ημερομηνία διεξαγωγής των πειραμάτων και τις συναρτήσεις μεταφορά που χρησιμοποιήθηκαν.

Ημ/νια : 29-Μαρ-18		Συναρτήσεις Μεταφοράς	
$T_{\text{tank}}(^{\circ}\text{C})$	14,55	Resistance	$2,6882 x + 0,0317$
$v_{\text{tank}}(\text{m}^2/\text{s})$	1,15219E-06	Heave	$4,4966 x - 31,171$
$\rho_{\text{tank}}(\text{kps}^2/\text{m}^4)$	101,887	Pitch	$-2,3043 x - 0,0949$

Πίνακας 6.2 Συνθήκες διεξαγωγής πειράματος και συναρτήσεις μεταφοράς

Η ταχύτητα του μοντέλου[m/s] που επιτεύχθηκε σε κάθε τρέξιμο για την επιθυμητή ταχύτητα πλοίου[kn], οι μετρούμενες τιμές της αντίστασης[kp] στην κατάσταση ηρεμίας αλλά και κατά την διάρκεια του τρεξίματος παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

V_s (kn)	V_m (m/s)	V_{m_real} (m/s)	R_{Tm} (Volt)
9,000	0,690	0,000	-0,0080
		0,680	0,2350
9,500	0,729	0,000	-0,0030
		0,718	0,2580
10,000	0,767	0,000	-0,0030
		0,760	0,2900
10,500	0,805	0,000	-0,0040
		0,797	0,3200
11,000	0,844	0,000	-0,0060
		0,838	0,3510
11,500	0,882	0,000	-0,0020
		0,874	0,3730
12,000	0,920	0,000	-0,0030
		0,908	0,4060
12,500	0,959	0,000	-0,0040
		0,948	0,4410
13,000	0,997	0,000	-0,0040
		0,989	0,4760
13,500	1,035	0,000	-0,0040
		1,025	0,5120
14,000	1,074	0,000	-0,0060
		1,065	0,5530
14,500	1,112	0,000	-0,0030
		1,107	0,6040
15,000	1,150	0,000	-0,0040
		1,146	0,6460
15,500	1,189	0,000	-0,0030
		1,185	0,6950

Πίνακας 6.3 Μετρούμενες τιμές αντίστασης

Συνεπώς προκύπτει ο παρακάτω πίνακας για την τιμή της αντίστασης του μοντέλου που αντιστοιχεί σε κάθε ταχύτητα.

$V_s(\text{kn})$	$V_m(\text{m/s})$	$V_{m, \text{real}}(\text{m/s})$	$R_{Tm}(\text{kp})$
9,000	0,690	0,680	0,653
9,500	0,729	0,718	0,702
10,000	0,767	0,760	0,788
10,500	0,805	0,797	0,871
11,000	0,844	0,838	0,960
11,500	0,882	0,874	1,008
12,000	0,920	0,908	1,099
12,500	0,959	0,948	1,196
13,000	0,997	0,989	1,290
13,500	1,035	1,025	1,387
14,000	1,074	1,065	1,503
14,500	1,112	1,107	1,632
15,000	1,150	1,146	1,747
15,500	1,189	1,185	1,876

Πίνακας 6.4 Τελικές τιμές αντίστασης μοντέλου

Στο διάγραμμα που προκύπτει από τις παραπάνω τιμές της αντίστασης παρεμβάλλεται μια πολυωνμική καμπύλη τρίτου βαθμού. Στην συνέχεια από την συνάρτηση της καμπύλης αυτής προκύπτουν οι ομαλοποιημένες τιμές της αντίστασης οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω ανάλυση. Η καμπύλη και η συνάρτηση αυτή φαίνονται στο Διάγραμμα 6.1 που ακολουθεί.



Διάγραμμα 6.1 Συνάρτηση που προκύπτει από την καμπύλη της αντίστασης του μοντέλου

Οι νέες ομαλοποιημένες τιμές της αντίστασης του μοντέλου που προκύπτουν από την παραπάνω συνάρτηση είναι αυτές που φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί σε k_r και N αντίστοιχα. Το αντίστοιχο γινόμενο ταχύτητας με δύναμη είναι ίσο με την ισχύ ρυμούλκησης.

$V_m(m/s)$	$R_{Tm}(kp)$	$R_{Tm}(N)$	EHP(W)
0,680	0,665	6,517	4,498
0,718	0,733	7,187	5,236
0,760	0,804	7,886	6,048
0,797	0,879	8,619	6,941
0,838	0,957	9,389	7,920
0,874	1,040	10,198	8,994
0,908	1,127	11,052	10,171
0,948	1,219	11,952	11,458
0,989	1,316	12,903	12,864
1,025	1,418	13,908	14,399
1,065	1,527	14,971	16,074
1,107	1,641	16,095	17,898
1,146	1,762	17,284	19,882
1,185	1,891	18,540	22,038

Πίνακας 6.5 Ομαλοποιημένες τιμές αντίστασης και ισχύος ρυμούλκησης

Σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο θεωρητικό μέρος υπάρχουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία προκειμένου να υπολογιστούν οι αριθμοί Froude (Fn_m) και Reynolds του μοντέλου (Re_m), ο συντελεστής αντίστασης τριβής του μοντέλου (C_{Fm}) και ο συντελεστή ολικής αντίστασης του μοντέλου (C_{Tm}).

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών στην κλίμακα του μοντέλου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

$V_m(m/s)$	Re_m	C_{Fm}	C_{Tm}
0,680	3,112E+06	0,00178	0,00468
0,718	3,285E+06	0,00177	0,00463
0,760	3,457E+06	0,00175	0,00459
0,797	3,630E+06	0,00174	0,00455
0,838	3,803E+06	0,00173	0,00451
0,874	3,976E+06	0,00172	0,00449
0,908	4,149E+06	0,00171	0,00446
0,948	4,322E+06	0,00170	0,00445
0,989	4,495E+06	0,00169	0,00444
1,025	4,668E+06	0,00169	0,00444
1,065	4,840E+06	0,00168	0,00444
1,107	5,013E+06	0,00167	0,00445
1,146	5,186E+06	0,00166	0,00447
1,185	5,359E+06	0,00166	0,00449

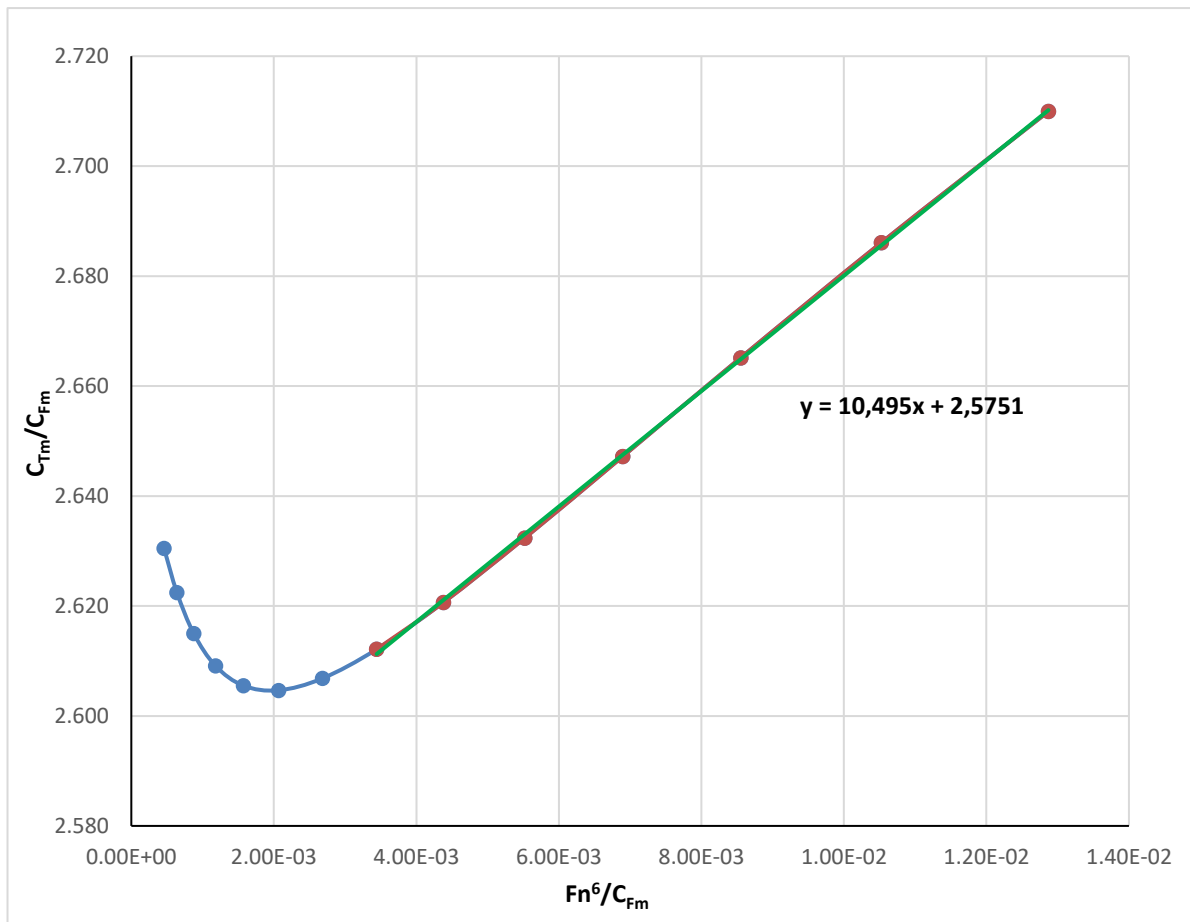
Πίνακας 6.6 Συντελεστές αντίστασης του μοντέλου

Σύμφωνα με την ITTC, για τον υπολογισμό του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R , ο οποίος είναι ίδιος για το μοντέλο και το πλοίο, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί ο παράγοντας k . Με βάση την μέθοδο Prohaska, όπως αυτή έχει περιγραφεί στο θεωρητικό μέρος, υπολογίζεται ο παράγοντας k με βάση το διάγραμμα $Fn^6/C_{Fm} - C_{Tm}/C_{Fm}$. Οι τιμές που λαμβάνονται αφορούν αριθμούς Froude μεγαλύτερους από 0,13

Οι λόγοι αυτοί και τελικά το διάγραμμα προκύπτουν όπως φαίνεται στην συνέχεια(Πίνακας 6.7 και Διάγραμμα 6.2).

$V_m(m/s)$	C_{Tm}/C_{Fm}	Fn^6/C_{Fm}
0,690	2,630	4,59E-04
0,729	2,622	6,40E-04
0,767	2,615	8,76E-04
0,805	2,609	1,18E-03
0,844	2,606	1,57E-03
0,882	2,605	2,06E-03
0,920	2,607	2,68E-03
0,959	2,612	3,44E-03
0,997	2,621	4,38E-03
1,035	2,632	5,52E-03
1,074	2,647	6,90E-03
1,112	2,665	8,55E-03
1,150	2,686	1,05E-02
1,189	2,710	1,29E-02

Πίνακας 6.7 Λόγοι υπολογισμού του παράγοντα k



Διάγραμμα 6.2 Υπολογισμός παράγοντα k

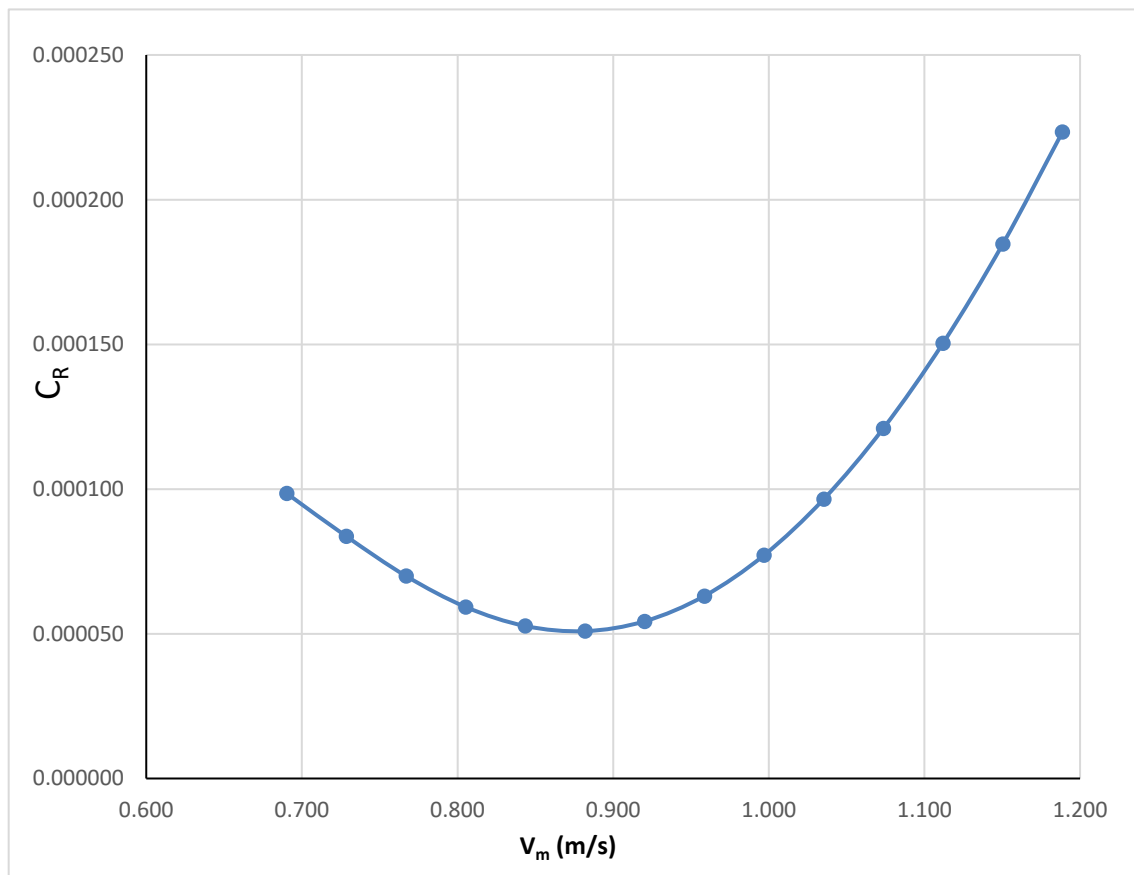
Παρεμβάλλοντας μια γραμμική συνάρτηση μεταξύ των σημείων του διαγράμματος είναι η καμπύλη θα τέμνει τον άξονα y στο σημείο $y=2,5751$. Επομένως ο παράγοντας $1+k$ είναι ίσος με:

$$1+k = 2,575$$

Έχοντας την τιμή για το $1+k$ υπολογίζεται ο συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R , ο οποίος προκύπτει όπως φαίνεται στον πίνακα και διάγραμμα που ακολουθεί.

$V_m(\text{m/s})$	C_R
0,690	0,000099
0,729	0,000084
0,767	0,000070
0,805	0,000059
0,844	0,000053
0,882	0,000051
0,920	0,000054
0,959	0,000063
0,997	0,000077
1,035	0,000097
1,074	0,000121
1,112	0,000150
1,150	0,000185
1,189	0,000223

Πίνακας 6.9 Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης



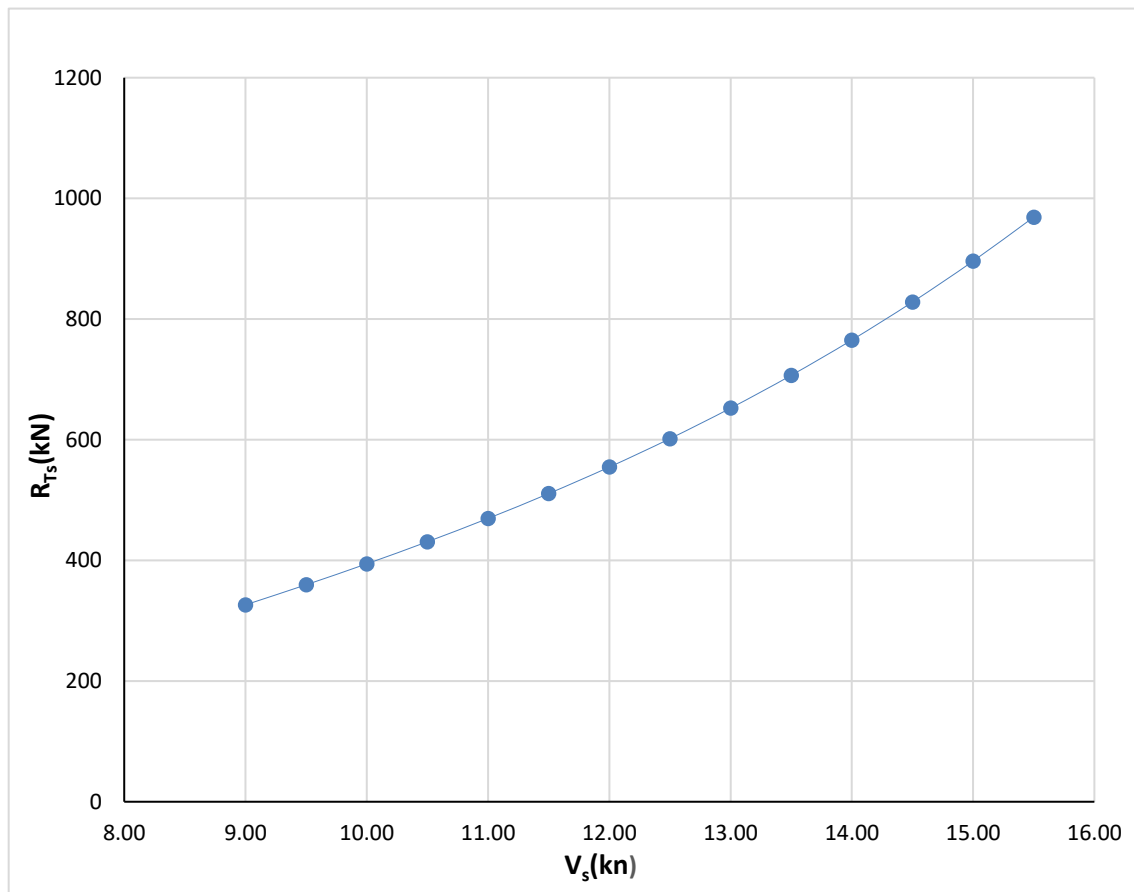
Διάγραμμα 6.3 Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης ως προς την ταχύτητα του μοντέλου

Διατηρώντας τον συντελεστή αυτό αναλλοίωτο στην κλίμακα του πλοίου και έχοντας υπολογίσει τον αριθμό Reynolds του πλοίου (Re_s) για την εκάστοτε ταχύτητα, μέσω της αντίστροφης διαδικασίας υπολογίζονται ο συντελεστής αντίστασης τριβής του πλοίου (C_{Fs}), ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου (C_{Ts}) και τελικά η ολική αντίσταση του πλοίου (R_{Ts}).

Τα συνολικά αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών για το πραγματικό πλοίο παρατίθενται στον πίνακα και διάγραμμα που ακολουθεί.

V_s (kn)	V_s (m/s)	Re_s	C_{Fs}	C_{Ts}	$R_{Ts}(kp)$	$R_{Ts}(kN)$
9,000	4,630	9,11E+08	0,000934	0,00250	3,33E+04	326,32
9,500	4,887	9,62E+08	0,000929	0,00248	3,67E+04	359,60
10,000	5,144	1,01E+09	0,000925	0,00245	4,02E+04	394,34
10,500	5,402	1,06E+09	0,000921	0,00243	4,39E+04	430,88
11,000	5,659	1,11E+09	0,000916	0,00241	4,79E+04	469,56
11,500	5,916	1,16E+09	0,000912	0,00240	5,21E+04	510,70
12,000	6,173	1,21E+09	0,000909	0,00239	5,66E+04	554,66
12,500	6,431	1,27E+09	0,000905	0,00239	6,14E+04	601,75
13,000	6,688	1,32E+09	0,000902	0,00240	6,65E+04	652,32
13,500	6,945	1,37E+09	0,000899	0,00241	7,21E+04	706,69
14,000	7,202	1,42E+09	0,000896	0,00243	7,80E+04	765,22
14,500	7,459	1,47E+09	0,000893	0,00245	8,45E+04	828,22
15,000	7,717	1,52E+09	0,000890	0,00248	9,14E+04	896,03
15,500	7,974	1,57E+09	0,000887	0,00251	9,88E+04	968,98

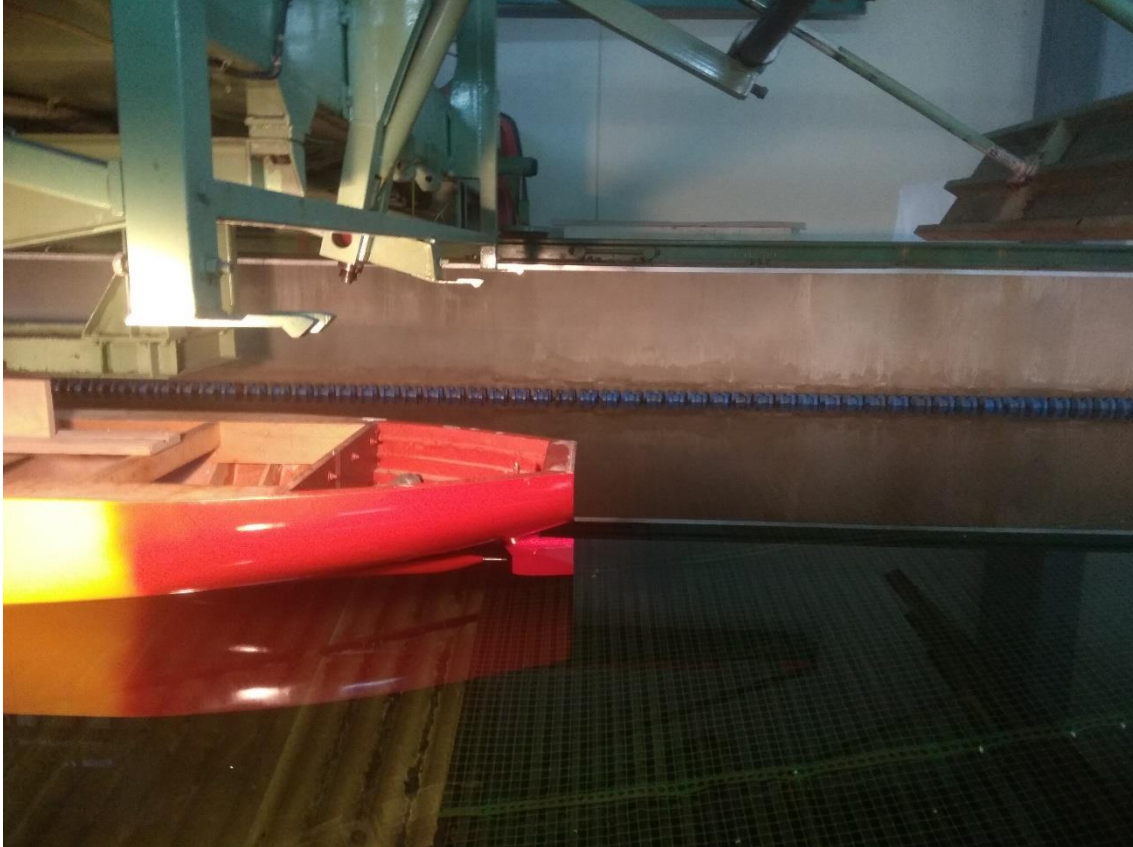
Πίνακας 6.10 Υπολογισμός μεγεθών που αφορούν στην κλίμακα του πλοίου



Διάγραμμα 6.4 Ολική αντίσταση του πλοίου ως προς την ταχύτητα

6.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΠΗΔΑΛΙΟ

Στο στάδιο αυτό πριν την έναρξη των πειραμάτων προσδένεται το πηδάλιο πίσω από την γάστρα στην θέση που είναι και στο πραγματικό πλοίο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μοντέλο στο βύθισμα μελέτης με το πηδάλιο στην θέση του δίχως έλικα, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων αντίστασης.



Εικόνα 6.1 Μοντέλο με πηδάλιο κατά την διάρκεια των πειραμάτων

Τα στοιχεία που αφορούν τις συνθήκες του νερού κατά την διάρκεια των πειραμάτων που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς στα πειράματα αντίστασης, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα μαζί με την ημερομηνία διεξαγωγής των πειραμάτων και τις συναρτήσεις μεταφορά που χρησιμοποιήθηκαν.

Ημ/νια : 30-Μαρ-18		Συναρτήσεις Μεταφοράς	
$T_{\text{tank}}(^{\circ}\text{C})$	14,70	Resistance	$2,7079 \times - 0,038$
$v_{\text{tank}}(\text{m}^2/\text{s})$	1,14762E-06	Heave	$4,4966 \times - 31,171$
$\rho_{\text{tank}}(\text{kps}^2/\text{m}^4)$	101,884	Pitch	$-2,3043 \times - 0,0949$

Πίνακας 6.10 Συνθήκες διεξαγωγής πειράματος και συναρτήσεις μεταφοράς

Η ταχύτητα του μοντέλου[m/s] που επιτεύχθηκε σε κάθε τρέξιμο για την επιθυμητή ταχύτητα πλοίου[kn], οι μετρούμενες τιμές της αντίστασης[kr] και οι μηδενικές μετρήσεις παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

V_s (kn)	V_m(m/s)	V_{m, real}(m/s)	R_{Tm}(Volt)
9,000	0,690	0,000	-0,0080
		0,680	0,2380
9,500	0,729	0,000	-0,0040
		0,718	0,2620
10,000	0,767	0,000	-0,0050
		0,759	0,2920
10,500	0,805	0,000	-0,0030
		0,798	0,3190
11,000	0,844	0,000	-0,0040
		0,838	0,3540
11,500	0,882	0,000	-0,0020
		0,874	0,3770
12,000	0,920	0,000	-0,0020
		0,908	0,4090
12,500	0,959	0,000	-0,0020
		0,952	0,4460
13,000	0,997	0,000	-0,0030
		0,985	0,4790
13,500	1,035	0,000	-0,0020
		1,028	0,5150
14,000	1,074	0,000	-0,0020
		1,063	0,5610
14,500	1,112	0,000	-0,0030
		1,107	0,6060
15,000	1,150	0,000	-0,0010
		1,144	0,6480
15,500	1,189	0,000	0,0000
		1,186	0,7050

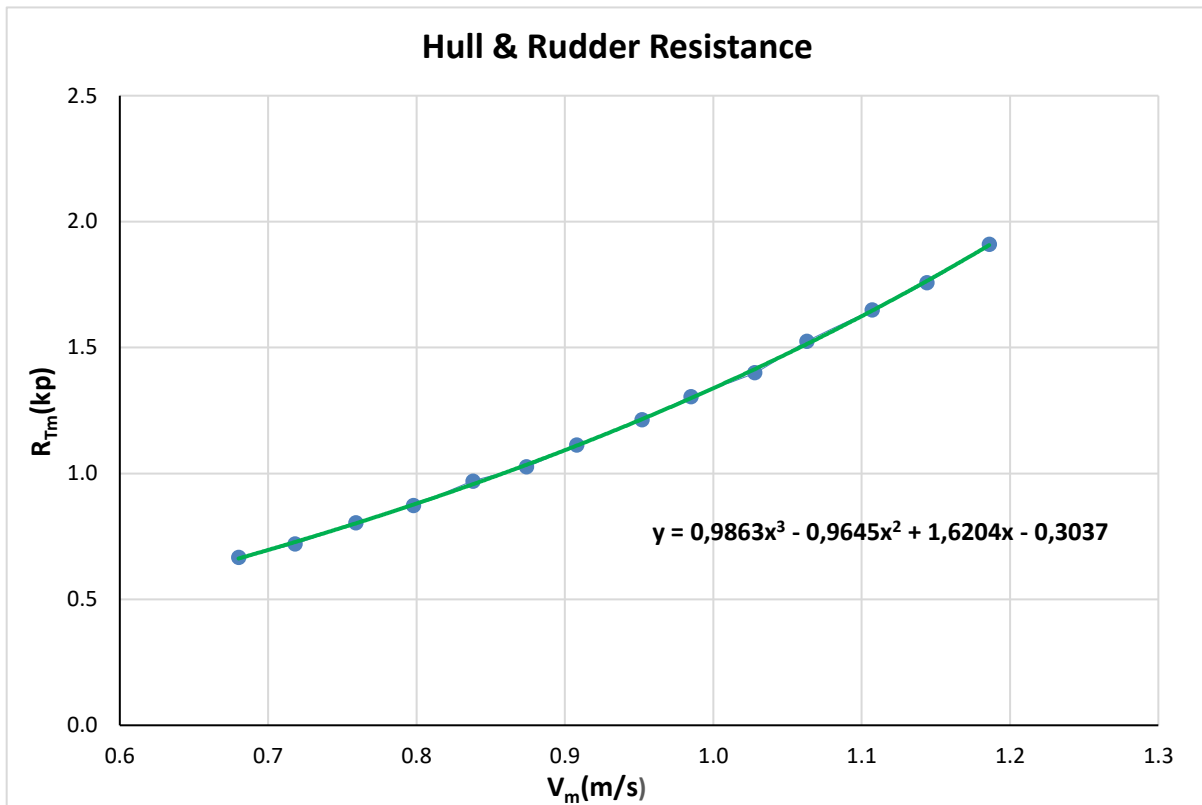
Πίνακας 6.11 Μετρούμενες τιμές αντίστασης

Συνεπώς προκύπτει ο παρακάτω πίνακας για την τιμή της αντίστασης του μοντέλου που αντιστοιχεί σε κάθε ταχύτητα.

V_s(kn)	V_m(m/s)	V_{m, real}(m/s)	R_{Tm}(kp)
9,000	0,690	0,680	0,666
9,500	0,729	0,718	0,720
10,000	0,767	0,759	0,804
10,500	0,805	0,798	0,872
11,000	0,844	0,838	0,969
11,500	0,882	0,874	1,026
12,000	0,920	0,908	1,113
12,500	0,959	0,952	1,213
13,000	0,997	0,985	1,305
13,500	1,035	1,028	1,400
14,000	1,074	1,063	1,525
14,500	1,112	1,107	1,649
15,000	1,150	1,144	1,757
15,500	1,189	1,186	1,909

Πίνακας 6.12 Τελικές τιμές αντίστασης μοντέλου

Στο διάγραμμα που προκύπτει από τις παραπάνω τιμές της αντίστασης μπορούμε να παρεμβάλλεται αντίστοιχα μια πολυωνμική καμπύλη τρίτου βαθμού. Από την συνάρτηση της καμπύλης αυτής θα προκύψουν οι ομαλοποιημένες τιμές της αντίστασης οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω ανάλυση. Η καμπύλη και η συνάρτησή αυτή φαίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 6.5 Συνάρτηση που προκύπτει από την καμπύλη της αντίστασης του μοντέλου

Οι νέες ομαλοποιημένες τιμές της αντίστασης που προκύπτουν από την παραπάνω συνάρτηση είναι αυτές που φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί σε kp και N αντίστοιχα. Το αντίστοιχο γινόμενο ταχύτητας με δύναμη είναι ίσο με την ισχύ ρυμούλκησης.

V_m (m/s)	R_{Tm} (kp)	R_{Tm} (N)	EHP(W)
0,680	0,680	6,664	4,599
0,718	0,746	7,319	5,332
0,759	0,817	8,008	6,141
0,798	0,891	8,735	7,033
0,838	0,969	9,502	8,016
0,874	1,052	10,314	9,096
0,908	1,139	11,173	10,282
0,952	1,232	12,083	11,583
0,985	1,330	13,047	13,008
1,028	1,435	14,068	14,565
1,063	1,545	15,150	16,266
1,107	1,662	16,296	18,121
1,144	1,785	17,508	20,140
1,186	1,916	18,791	22,337

Πίνακας 6.13 Ομαλοποιημένες τιμές αντίστασης και ισχύος ρυμούλκησης

Υπάρχουν πλέον όλα τα απαραίτητα στοιχεία προκειμένου να υπολογιστούν οι αριθμοί Froude (F_{n_m}) και Reynolds του μοντέλου (Re_m), ο συντελεστής αντίστασης τριβής του μοντέλου (C_{Fm}) και ο συντελεστή ολικής αντίστασης του μοντέλου (C_{Tm}) όπως παρουσιάστηκαν στο θεωρητικό μέρος.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

V_m (m/s)	Re_m	C_{Fm}	C_{Tm}
0,680	3,552E+06	0,00175	0,00476
0,718	3,750E+06	0,00174	0,00469
0,759	3,947E+06	0,00172	0,00463
0,798	4,144E+06	0,00171	0,00458
0,838	4,342E+06	0,00170	0,00454
0,874	4,539E+06	0,00169	0,00451
0,908	4,736E+06	0,00168	0,00449
0,952	4,934E+06	0,00167	0,00447
0,985	5,131E+06	0,00167	0,00447
1,028	5,328E+06	0,00166	0,00447
1,063	5,526E+06	0,00165	0,00447
1,107	5,723E+06	0,00164	0,00448
1,144	5,920E+06	0,00164	0,00450
1,186	6,118E+06	0,00163	0,00453

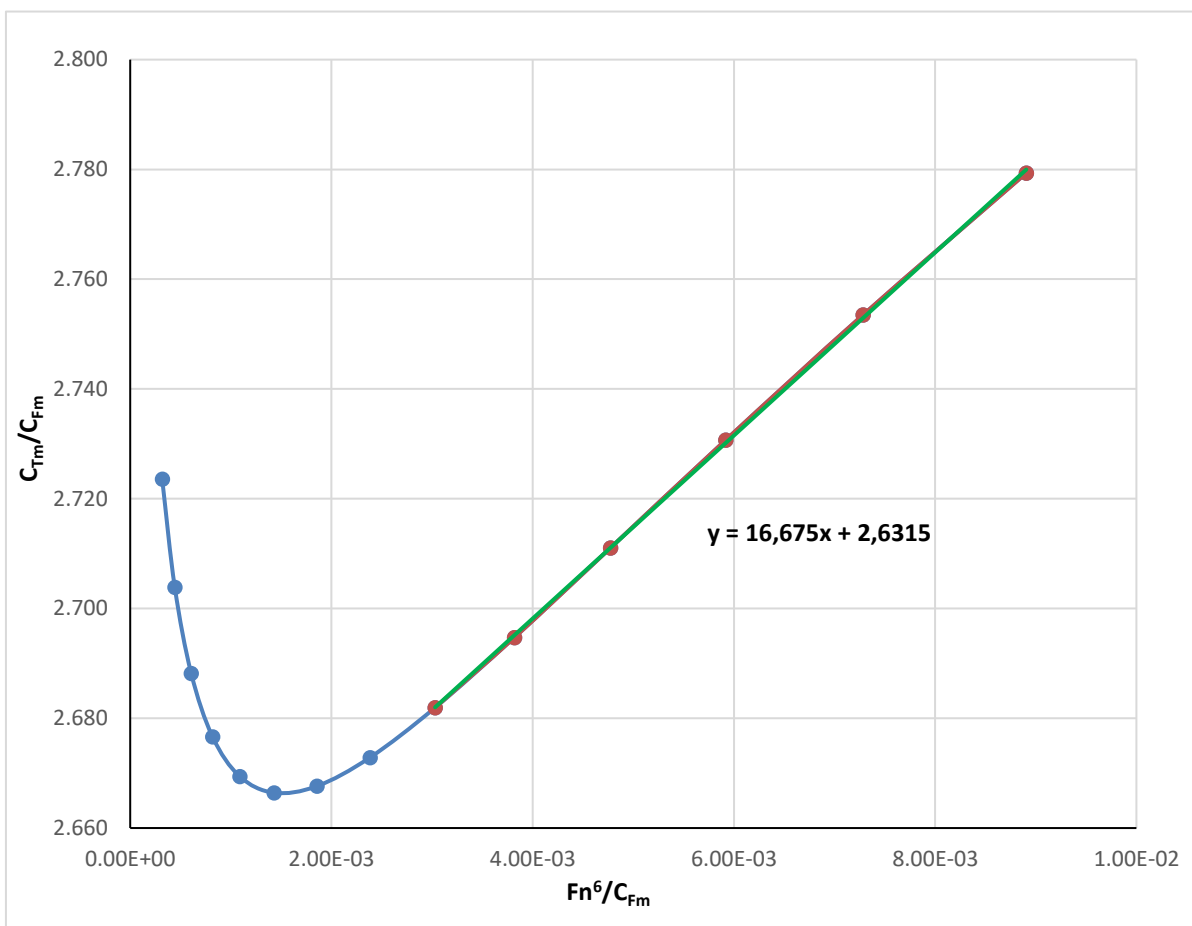
Πίνακας 6.14 Συντελεστές αντίστασης του μοντέλου

Σύμφωνα με την ITTC, για τον υπολογισμό του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R , ο οποίος είναι ίδιος για το μοντέλο και το πλοίο, πρέπει πρώτα να υπολογιστεί ο παράγοντας k . Με βάση την μέθοδο Prohaska, όπως αυτή έχει περιγραφεί στο θεωρητικό μέρος, υπολογίζεται ο παράγοντας k με βάση το διάγραμμα $F_n^6/C_{Fm}-C_{Tm}/C_{Fm}$. Οι τιμές που λαμβάνονται αφορούν αριθμούς Froude μεγαλύτερους από 0,13

Οι λόγοι αυτοί και τελικά το διάγραμμα προκύπτουν όπως φαίνεται στην συνέχεια:

V_m (m/s)	C_{Tm}/C_{Fm}	F_n^6/C_{Fm}
0,690	2,724	3,18E-04
0,729	2,704	4,43E-04
0,767	2,688	6,07E-04
0,805	2,677	8,18E-04
0,844	2,669	1,09E-03
0,882	2,666	1,43E-03
0,920	2,668	1,86E-03
0,959	2,673	2,38E-03
0,997	2,682	3,03E-03
1,035	2,695	3,82E-03
1,074	2,711	4,77E-03
1,112	2,731	5,92E-03
1,150	2,754	7,28E-03
1,189	2,779	8,91E-03

Πίνακας 6.15 Λόγοι υπολογισμού του παράγοντα k



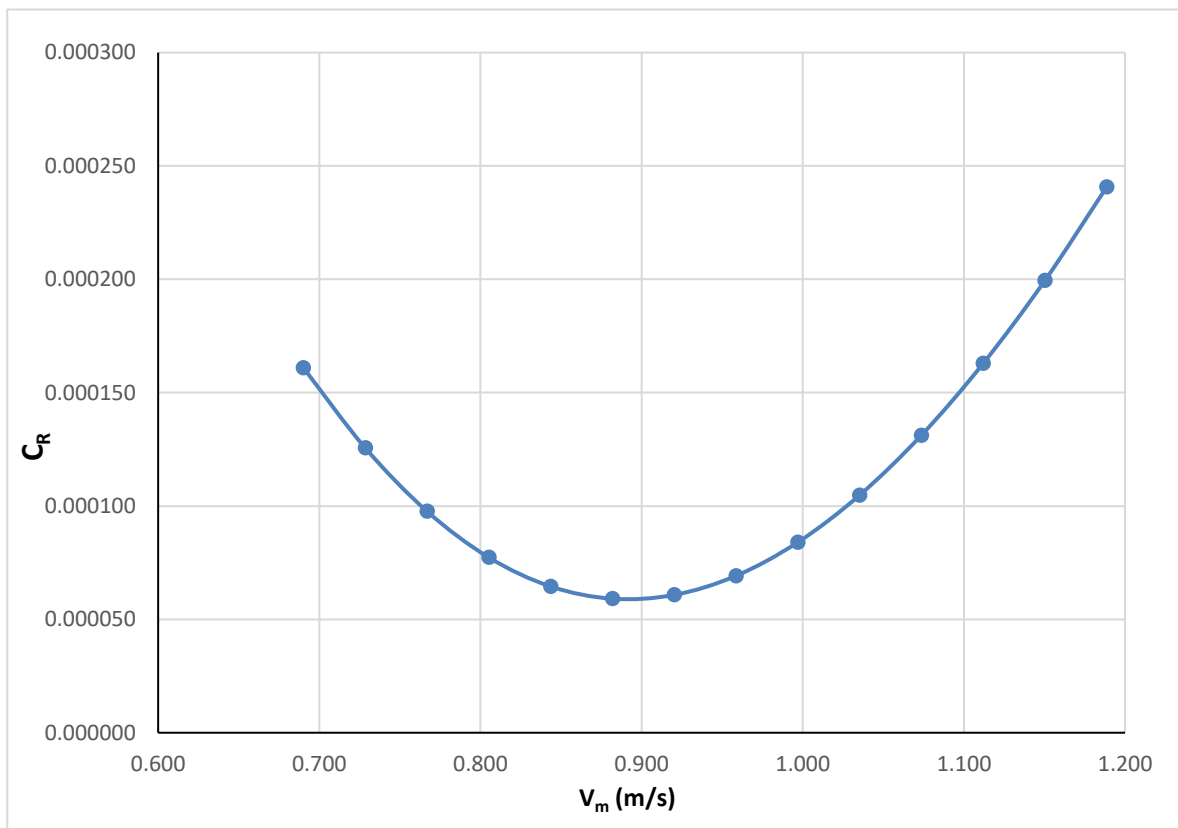
Διάγραμμα 6.6 Υπολογισμός παράγοντα k

Παρεμβάλλοντας μια γραμμική συνάρτηση μεταξύ των σημείων του διαγράμματος είναι η καμπύλη θα τέμνει τον άξονα y στο σημείο $y=2,632$. Επομένως ο παράγοντας $1+k$ είναι ίσος με:
 $1+k = 2,632$

Έχοντας την τιμή για το $1+k$ υπολογίζεται ο συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R , ο οποίος προκύπτει όπως φαίνεται στον πίνακα και διάγραμμα που ακολουθεί.

$V_m(m/s)$	C_R
0,690	0,000161
0,729	0,000126
0,767	0,000098
0,805	0,000077
0,844	0,000065
0,882	0,000059
0,920	0,000061
0,959	0,000069
0,997	0,000084
1,035	0,000105
1,074	0,000131
1,112	0,000163
1,150	0,000200
1,189	0,000241

Πίνακας 6.16 Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης



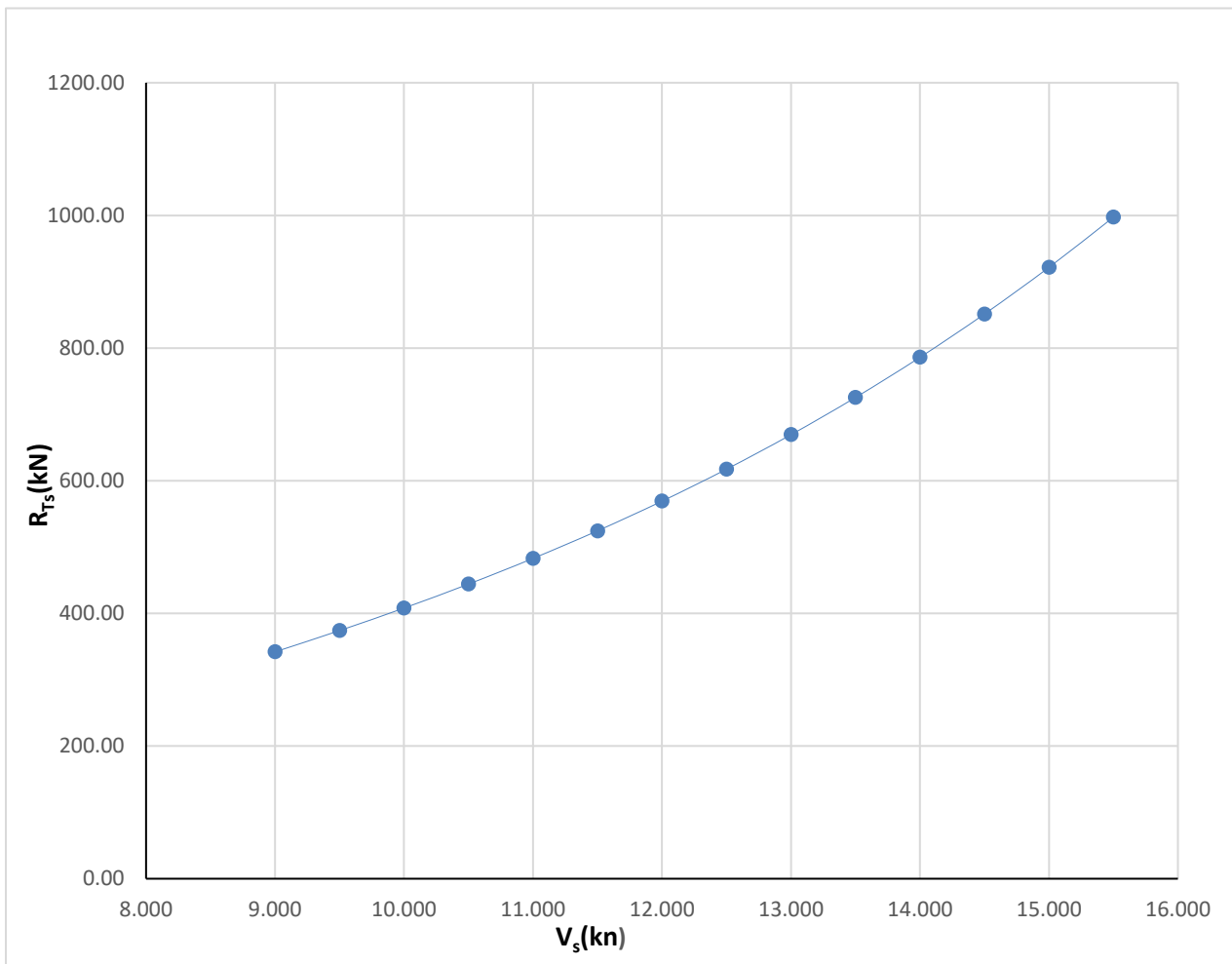
Διάγραμμα 6.7 Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης ως προς την ταχύτητα του μοντέλου

Διατηρώντας τον συντελεστή αυτό αναλλοίωτο στην κλίμακα του πλοίου και έχοντας υπολογίσει τον αριθμό Reynolds του πλοίου (Re_s) για την εκάστοτε ταχύτητα, μέσω της αντίστροφης διαδικασίας υπολογίζονται ο συντελεστής αντίστασης τριβής του πλοίου (C_{Fs}), ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου (C_{Ts}) και τελικά η ολική αντίσταση του πλοίου (R_{Ts}).

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών παρατίθενται στον πίνακα και διάγραμμα που ακολουθεί.

V_s (kn)	V_s (m/s)	Re_s	C_{Fs}	C_{Ts}	R_{Ts} (kp)	R_{Ts} (kN)
9,000	4,630	9,43E+08	0,000931	0,00261	3,49E+04	342,01
9,500	4,887	9,95E+08	0,000926	0,00256	3,81E+04	374,06
10,000	5,144	1,05E+09	0,000922	0,00252	4,16E+04	408,00
10,500	5,402	1,10E+09	0,000917	0,00249	4,53E+04	444,17
11,000	5,659	1,15E+09	0,000913	0,00247	4,92E+04	482,88
11,500	5,916	1,21E+09	0,000909	0,00245	5,35E+04	524,44
12,000	6,173	1,26E+09	0,000906	0,00244	5,80E+04	569,16
12,500	6,431	1,31E+09	0,000902	0,00244	6,30E+04	617,37
13,000	6,688	1,36E+09	0,000899	0,00245	6,83E+04	669,37
13,500	6,945	1,41E+09	0,000896	0,00246	7,40E+04	725,48
14,000	7,202	1,47E+09	0,000893	0,00248	8,02E+04	786,01
14,500	7,459	1,52E+09	0,000890	0,00250	8,68E+04	851,28
15,000	7,717	1,57E+09	0,000887	0,00253	9,40E+04	921,60
15,500	7,974	1,62E+09	0,000884	0,00257	1,02E+05	997,27

Πίνακας 6.17 Υπολογισμός μεγεθών που αφορούν στην κλίμακα του πλοίου



Διάγραμμα 6.8 Ολική αντίσταση του πλοίου ως προς την ταχύτητα

7. ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΥΤΟΠΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

7.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Πριν την έναρξη των πειραμάτων αυτοπρόωσης τοποθετείται η έλικα στο μοντέλο, αρχικά δίχως το πηδάλιο. Αφού τοποθετηθεί η έλικα στο μοντέλο, αυτό εισέρχεται στην δεξαμενή και προσδένεται στο πόδι του δυναμόμετρου μέτρησης της αντίστασης. Στην συνέχεια συνδέονται τα συστήματα τροφοδοσίας του κινητήρα καθώς και το δυναμόμετρο ώσης και ροπής με τον Η/Υ. Μετά βαθμονομείται ο αισθητήρας αντίστασης και λαμβάνεται μια μηδενική μέτρηση για την σε κατάσταση ηρεμίας για την δύναμη που είναι ίση με την διαφορά της ώσης και της δύναμης του δυναμόμετρου (δύναμη ΔF), την ώση και την ροπή. Η τελική τιμή της δύναμης προκύπτει αφαιρώντας την μηδενική τιμή στην κατάσταση ηρεμίας από την τιμή κατά το τρέξιμο του φορείου ενώ για την τελική τιμή της ώσης και ροπής εισάγεται η διαφορά αυτή για το εκάστοτε μέγεθος στην συνάρτηση μεταφοράς που έχει προκύψει από την βαθμονόμηση του δυναμόμετρου.

Στην συνέχεια προσδένεται το φρένο και ξεκινάει η επιτάχυνση του φορείου. Σε πολύ μικρό χρόνο το μοντέλο επιτυγχάνει την ζητούμενη ταχύτητα ενώ ελέγχεται χειροκίνητα ο αριθμός των στροφών ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στον απαιτούμενο. Στο σημείο που υπάρχει μικρή ή καθόλου απόκλιση στο στροφόμετρο λύνεται το φρένο και ξεκινάει η λήψη των μετρήσεων για χρόνο 30s. Με το πέρας του χρόνου καταγραφής δένεται το φρένο και σταματάει το μοντέλο το οποίο επιστρέφει στην αρχική του θέση. Μεταξύ των μετρήσεων μεσολαβεί χρόνος 15 λεπτών προκειμένου η επιφάνεια του νερού να ηρεμίσει και να αποσβεστούν όσο το δυνατόν οι κυματισμοί που παρήχθησαν.



Εικόνα 7.1 Τοποθέτηση έλικας στο μοντέλο

Τα πειράματα αυτοπρόωσης πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις ομάδες, για ταχύτητες πλοίου 10, 12, 13 και 14kn.

Η τιμή της δύναμης F που ασκείται στο μοντέλο και αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου (F_d) υπολογίζεται πριν την έναρξη των πειραμάτων διότι πρέπει τα πειράματα να πραγματοποιηθούν σε ένα εύρος στροφών γύρω από την τιμή αυτή. Για τον υπολογισμό της, σύμφωνα με την θεωρία, χρειάζεται ο συντελεστής ολικής αντίστασης του μοντέλου C_{Tm} καθώς και ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου C_{Ts} . Ο συντελεστής ολικής αντίστασης του μοντέλου C_{Tm} είναι γνωστός από τα πειράματα της αντίστασης ενώ ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου C_{Ts} υπολογίζεται σύμφωνα με την ITTC αφού πρώτα έχουν υπολογιστεί ο συντελεστής τραχύτητας, ο συντελεστής συσχέτισης C_A και είναι γνωστοί ο συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης C_R και ο παράγοντας $(1+k)$. Η διαδικασία υπολογισμού και οι τελικές τιμές παρουσιάζονται παρακάτω για πλοίο με και χωρίς πηδάλιο αντιστοίχως.

Σημείο Αυτοπρόωσης Πλοίου Χωρίς Πηδάλιο

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών όπως αυτοί παρουσιάζονται στο θεωρητικό μέρος καθώς και η τιμή της δύναμης F_d φαίνονται στον παρακάτω πίνακα για τις ταχύτητες μελέτης που εξετάζονται.

V_S (kn)	V_m (m/s)	C_{Fs}	C_{Tm}	C_A	C_R	ΔC_F	C_{Ts}	F_d (kp)
10	0,767	0,000925	0,00459	0,000277	0,000070	0,0000663	0,00279	0,314
12	0,920	0,000909	0,00446	0,000229	0,000054	0,0000921	0,00272	0,441
13	0,997	0,000902	0,00444	0,000208	0,000077	0,0001030	0,00271	0,513
14	1,074	0,000896	0,00444	0,000189	0,000121	0,0001128	0,00273	0,589

Πίνακας 7.1 Υπολογισμός δύναμης F_d για πλοίο χωρίς πηδάλιο

Σημείο Αυτοπρόωσης Πλοίου Με Πηδάλιο

Αντίστοιχος πίνακας προκύπτει για το πλοίο με πηδάλιο

V_S (kn)	V_m (m/s)	C_{Fs}	C_{Tm}	C_A	C_R	ΔC_F	C_{Ts}	F_d (kp)
10	0,767	0,000922	0,00463	0,000268	0,000041	0,0000713	0,00281	0,320
12	0,920	0,000906	0,00449	0,000220	0,000006	0,0000969	0,00271	0,450
13	0,997	0,000899	0,00447	0,000199	0,000030	0,0001076	0,00270	0,523
14	1,074	0,000893	0,00447	0,000180	0,000078	0,0001173	0,00272	0,601

Πίνακας 7.2 Υπολογισμός δύναμης F_d για πλοίο με πηδάλιο

7.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΩΡΙΣ ΠΗΔΑΛΙΟ

Τα στοιχεία που αφορούν τις συνθήκες του νερού κατά την διάρκεια των πειραμάτων που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς στα πειράματα αυτοπρόωσης, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα μαζί με την ημερομηνία διεξαγωγής των πειραμάτων και τις συναρτήσεις μεταφορά που χρησιμοποιήθηκαν. Η διάρκεια των πειραμάτων για την κάθε κατάσταση ήταν 2 ημέρες και ως εκ τούτου η βαθμονόμηση του δυναμόμετρου της αντίστασης καθώς και οι μετρήσεις θερμοκρασίας έγιναν δύο φορές. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

Ημ/νια : 2-Απρ-18		Συναρτήσεις Μεταφοράς	
$T_{\text{tank}}(^{\circ}\text{C})$	15,4	Resistance (Δύναμη ΔF)	$2,7402 x + 0,0554$
$v_{\text{tank}}(\text{m}^2/\text{s})$	1,127E-06	Heave	$4,4966 x - 31,171$
$\rho_{\text{tank}}(\text{kps}^2/\text{m}^4)$	101,874	Pitch	$-2,3043 x - 0,0949$
		Thrust	$0,9257 x + 0,0096$
		Torque	$4,3586 x + 0,0517$

Ημ/νια : 3-Απρ-18		Συναρτήσεις Μεταφοράς	
$T_{\text{tank}}(^{\circ}\text{C})$	15,4	Resistance (Δύναμη ΔF)	$2,7071 x + 0,0286$
$v_{\text{tank}}(\text{m}^2/\text{s})$	1,127E-06	Heave	$4,4966 x - 31,171$
$\rho_{\text{tank}}(\text{kps}^2/\text{m}^4)$	101,874	Pitch	$-2,3043 x - 0,0949$
		Thrust	$0,9257 x + 0,0096$
		Torque	$4,3586 x + 0,0517$

Πίνακας 7.3 Συνθήκες διεξαγωγής πειράματος και συναρτήσεις μεταφοράς

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι μετρήσεις στην κατάσταση ηρεμίας καθώς και κατά το τρέξιμο του φορείου για την κάθε ταχύτητα.

1η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=10kn$

$n_{\text{Required}}(\text{RPM})$	$n_{\text{Achieved}}(\text{RPM})$	$V_m(\text{m/sec})$	$\Delta F(\text{Volts})$	Thrust (Volts)	Torque (Volts)
-	35,3	0,000	0,009	-0,7180	0,026
300	300,4	0,767	0,216	-0,4210	0,185
-	35,3	0,000	0,010	-0,7190	0,025
350	351,9	0,761	0,166	-0,2620	0,260
-	35,3	0,000	0,009	-0,7210	0,027
450	450,1	0,766	0,052	0,1180	0,411
-	35,3	0,000	0,006	-0,7170	0,024
485	485,0	0,768	0,006	0,2930	0,477
-	35,3	0,000	0,005	-0,7240	0,027
500	499,4	0,767	-0,022	0,3600	0,513
-	35,3	0,000	0,009	-0,7140	0,025
550	550,9	0,767	-0,104	0,6660	0,631

Πίνακας 7.2 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=10kn$

2η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=12kn$

$n_{Required}(RPM)$	$n_{Achieved}(RPM)$	$V_m(m/sec)$	$\Delta F(Volts)$	Thrust (Volts)	Torque (Volts)
-	35,4	0,000	0,009	-0,7300	0,027
400	397,4	0,917	0,216	-0,1790	0,316
-	35,3	0,000	0,010	-0,7260	0,026
450	449,1	0,920	0,166	0,0340	0,378
-	35,3	0,000	0,009	-0,7280	0,028
550	554,9	0,917	0,052	0,5570	0,595
-	35,3	0,000	0,006	-0,7320	0,025
600	588,9	0,919	0,006	0,7550	0,687
-	39,0	0,000	0,005	-0,7280	0,027
650	650,2	0,917	-0,022	1,1640	0,845
-	35,4	0,000	0,009	-0,7300	0,027
700	697,5	0,918	-0,104	1,5110	0,991

Πίνακας 7.3 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=12kn$

3η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=13kn$

$n_{Required}(RPM)$	$n_{Achieved}(RPM)$	$V_m(m/sec)$	$\Delta F(Volts)$	Thrust (Volts)	Torque (Volts)
-	35,1	0	-0,011	-0,7260	0,030
450	452,7	0,997	0,276	0,0060	0,382
-	35,8	0	-0,013	-0,7080	0,038
500	500,8	0,998	0,220	0,2410	0,508
-	35,5	0	-0,004	-0,7080	0,032
600	602,6	0,997	0,046	0,8140	0,696
-	35,3	0	-0,018	-0,7260	0,031
630	627,7	0,997	-0,015	0,9510	0,763
-	35,5	0	-0,003	-0,7140	0,028
700	704,1	0,998	-0,177	1,5150	0,984
-	34,4	0	-0,013	-0,7210	0,028
800	802,8	0,995	-0,443	2,3160	1,317

Πίνακας 7.4 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=13kn$

4η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=14kn$

$n_{Required}(RPM)$	$n_{Achieved}(RPM)$	$V_m(m/sec)$	$\Delta F(Volts)$	Thrust (Volts)	Torque (Volts)
-	35,4	0	-0,010	-0,7270	0,029
600	601,9	1,076	0,135	0,7310	0,680
-	35,4	0	-0,004	-0,7320	0,031
650	654,8	1,075	0,031	1,0690	0,842
-	35,8	0	-0,013	-0,7320	0,030
670	669,1	1,075	-0,007	1,1650	0,858
-	35,4	0	0,002	-0,7290	0,028
700	703,7	1,077	-0,076	1,4180	0,959
-	35,4	0	-0,006	-0,7310	0,026
750	750,9	1,076	-0,194	1,7800	1,112
-	35,3	0	-0,011	-0,7270	0,027
800	796,5	1,078	-0,305	2,1700	1,269

Πίνακας 7.5 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=14kn$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις μηδενικές τιμές των μετρήσεων και τις συναρτήσεις μεταφοράς για την ώση και την ροπή προκύπτει τελικά ο Πίνακας 7.6. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται οι τιμές της δύναμης ΔF , της ώσης T και της ροπής Q για έναν αριθμό στροφών γύρω από το σημείο λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης σε ταχύτητα πλοίου ίση με 10kn.

1η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=10kn$

$n_{\text{Achieved}}(\text{RPM})$	$\Delta F_m(\text{kp})$	Thrust (kp)	Torque (kp x cm)
300,4	0,560	0,275	0,693
351,9	0,422	0,423	1,024
450,1	0,116	0,777	1,674
485,0	0,000	0,935	1,974
499,4	-0,073	1,003	2,118
550,9	-0,306	1,277	2,641

Πίνακας 7.6 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=0,767\text{m/s}$

Ομοίως οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται στην συνέχεια για τις ταχύτητες των 12, 13 και 14 kn αντίστοιχα

2η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=12kn$

$n_{\text{Achieved}}(\text{RPM})$	$\Delta F_m(\text{kp})$	Thrust (kp)	Torque (kp x cm)
397,4	0,733	0,510	1,260
449,1	0,549	0,704	1,534
554,9	0,087	1,190	2,471
588,9	-0,027	1,377	2,885
650,2	-0,408	1,751	3,565
697,5	-0,746	2,074	4,202

Πίνακας 7.7 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=0,92\text{m/s}$

3η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=13kn$

$n_{\text{Achieved}}(\text{RPM})$	$\Delta F_m(\text{kp})$	Thrust (kp)	Torque (kp x cm)
452,7	0,777	0,678	1,534
500,8	0,631	0,878	2,049
602,6	0,135	1,409	2,894
627,7	0,008	1,552	3,190
704,1	-0,471	2,063	4,167
802,8	-1,164	2,811	5,618

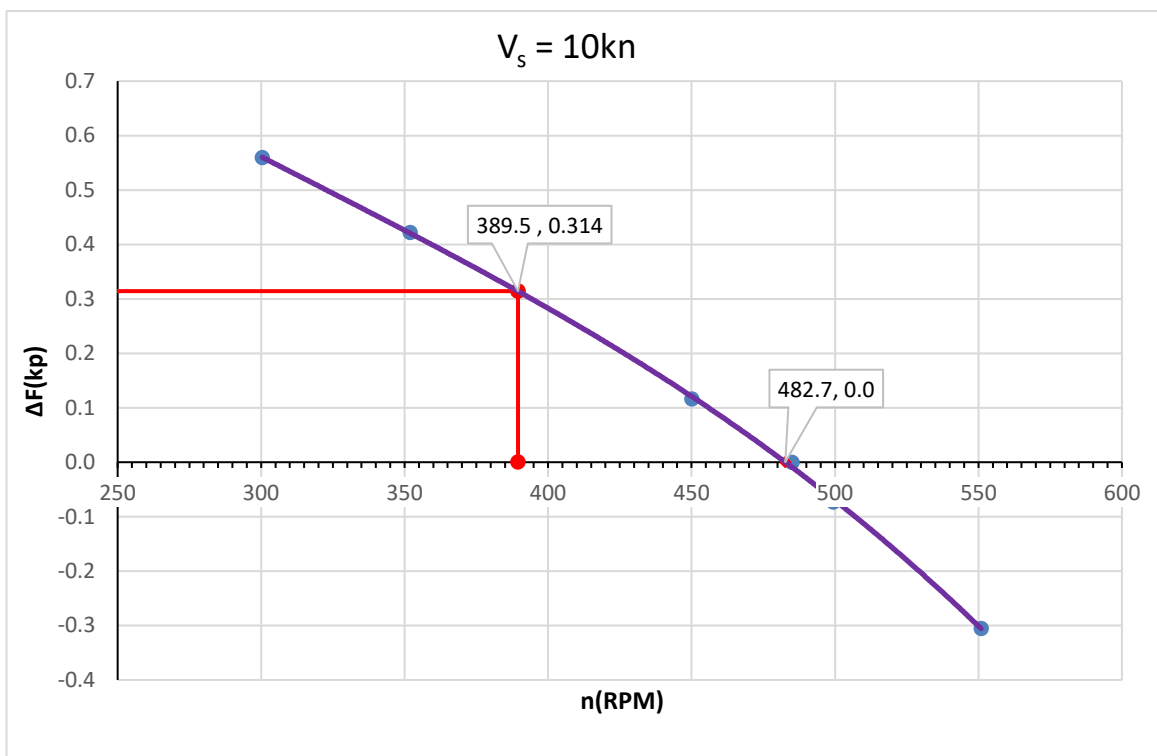
Πίνακας 7.8 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=0,997\text{m/s}$

4η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=14kn$

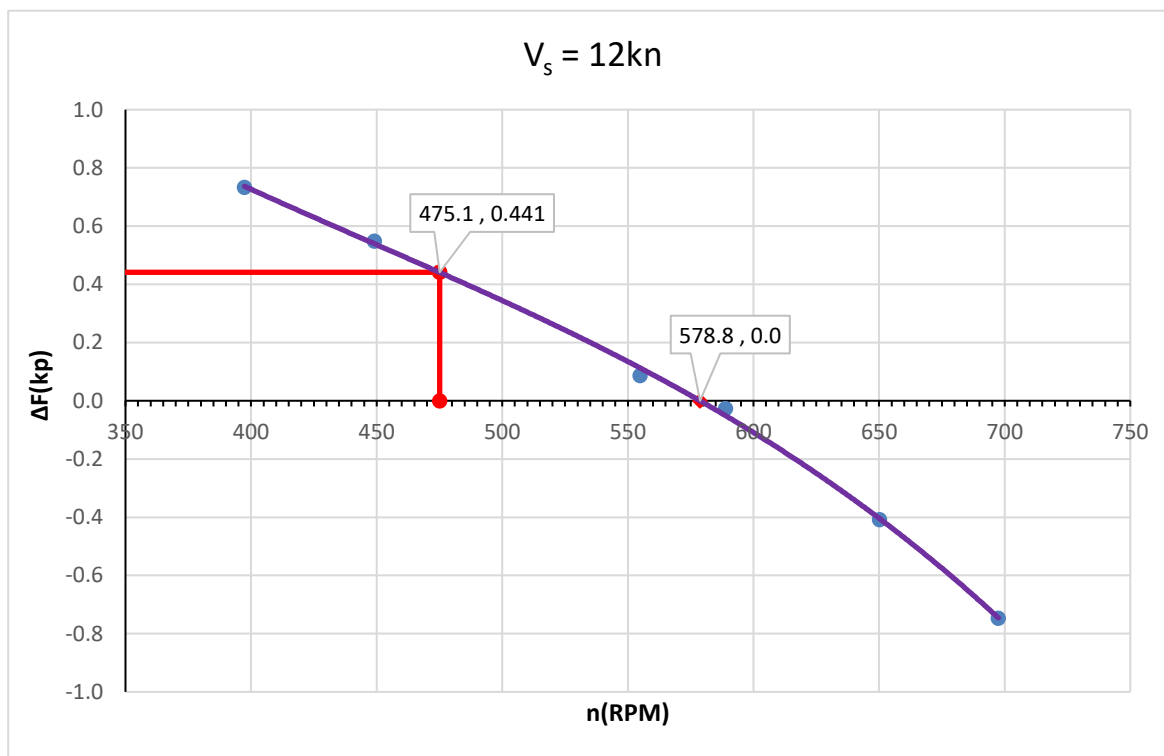
$n_{\text{Achieved}}(\text{RPM})$	$\Delta F_m(\text{kp})$	Thrust (kp)	Torque (kp x cm)
601,9	0,393	1,350	2,837
654,8	0,095	1,667	3,535
669,1	0,016	1,756	3,609
703,7	-0,211	1,987	4,058
750,9	-0,509	2,324	4,733
796,5	-0,796	2,682	5,413

Πίνακας 7.9 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=1,074\text{m/s}$

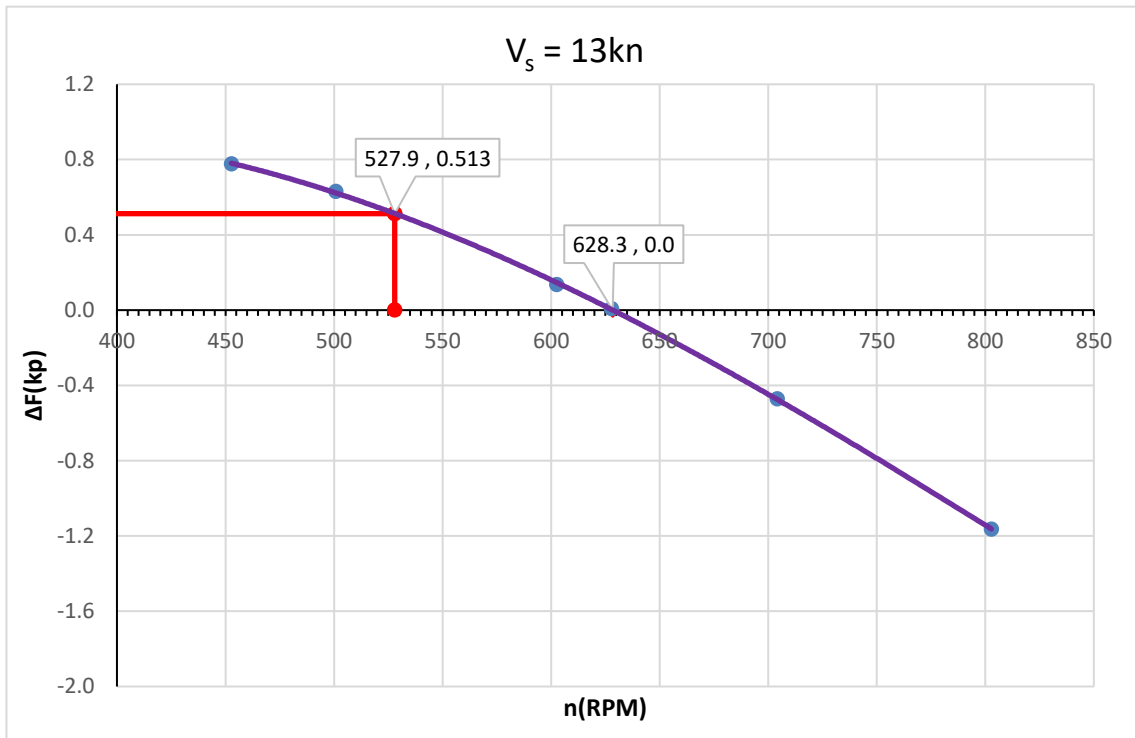
Προκειμένου να βρεθούν με ακρίβεια οι στροφές λειτουργίας της έλικας του μοντέλου, που αντιστοιχούν στην τιμή της δύναμης που υπολογίστηκε παραπάνω αλλά και στο σημείο που η δύναμη μηδενίζεται (αυτοπρόωση μοντέλου) χαράσσεται η καμπύλη $n-\Delta F$. Στην συνέχεια η καμπύλη προσεγγίζεται από μια 3^{ου} βαθμού πολυωνυμική και με χρήση του μη γραμμικού solver βρίσκονται οι τιμές των στροφών αυτοπρόωσης πλοίου και μοντέλου. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται και γραφικά στα διαγράμματα που ακολουθούν. Οι τελικές τιμές των στροφών αυτοπρόωσης πλοίου και μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.10.



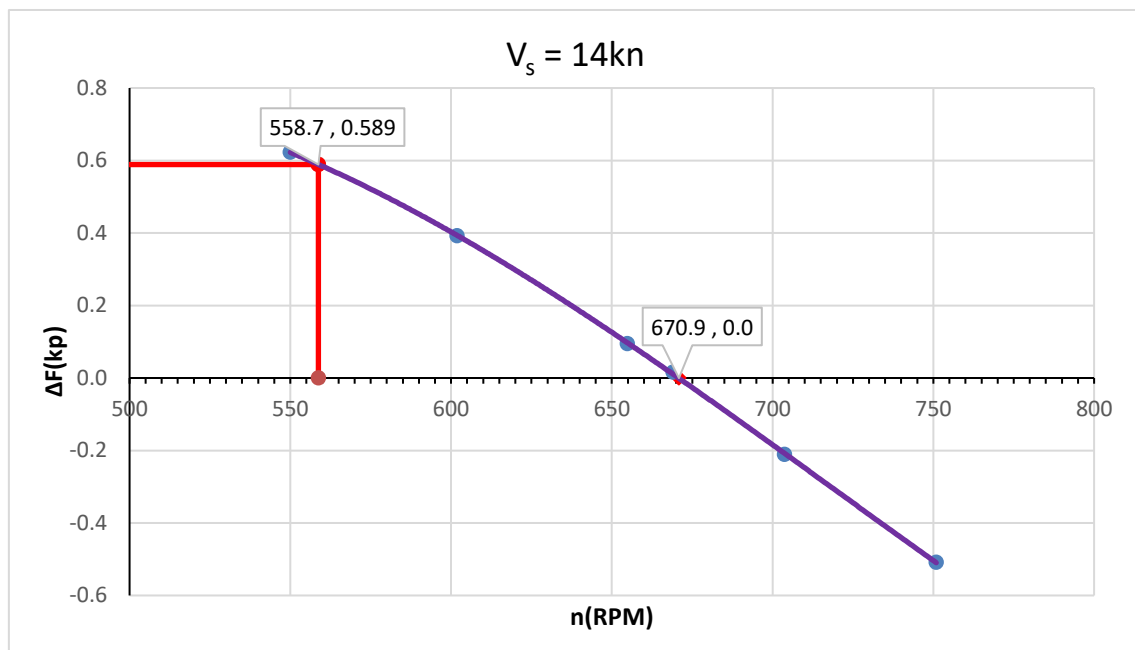
Διάγραμμα 7.1 Διάγραμμα $n-\Delta F$ για $V_m=0,767\text{m/s}$



Διάγραμμα 7.2 Διάγραμμα $n-\Delta F$ για $V_m=0,92\text{m/s}$



Διάγραμμα 7.3 Διάγραμμα n- ΔF για $V_m=0,997\text{m/s}$

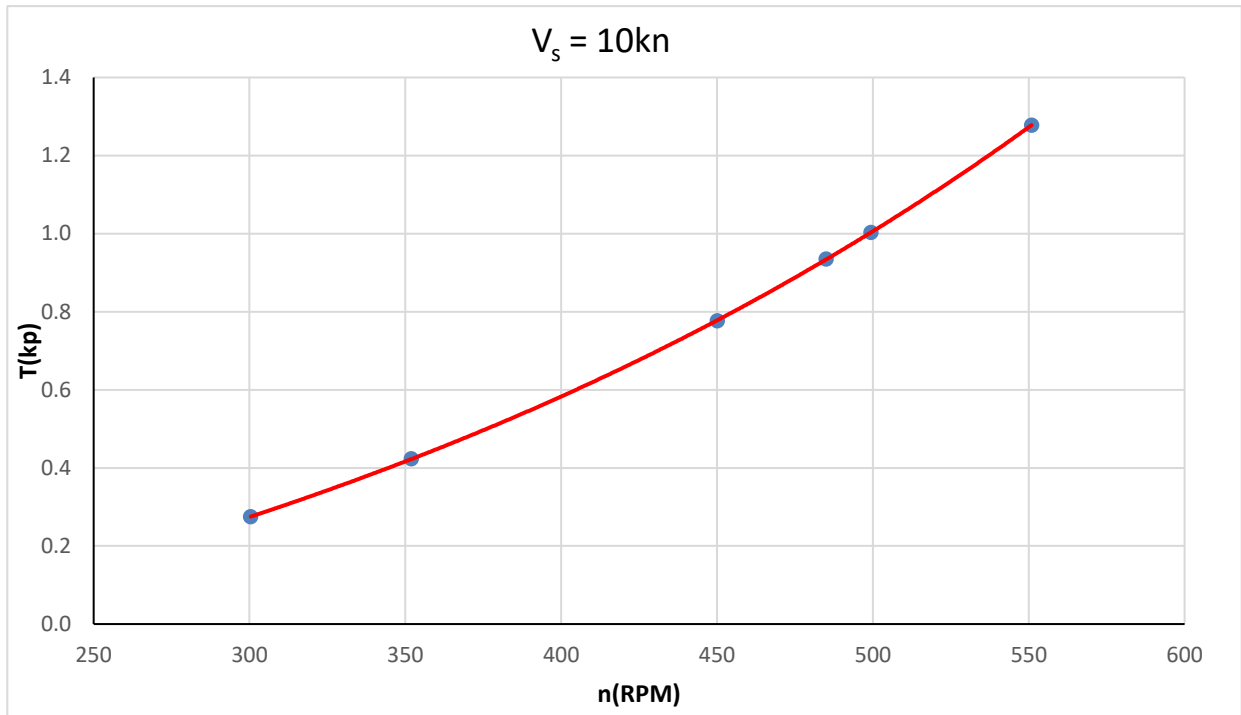


Διάγραμμα 7.4 Διάγραμμα n- ΔF για $V_m=1,074\text{m/s}$

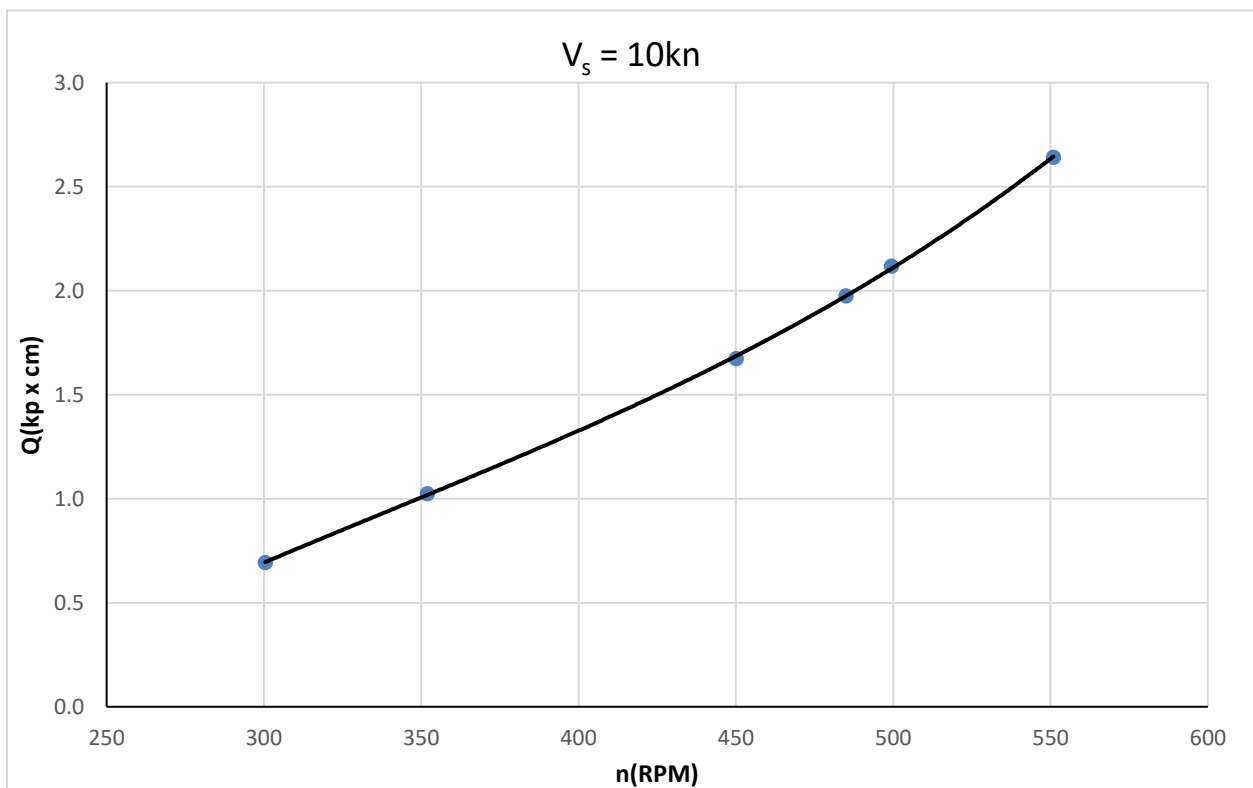
V_s (kn)	V_m (m/s)	Σημείο Αυτοπρόωσης Μοντέλου(RPM)	Σημείο Αυτοπρόωσης Πλοίου(RPM)
10	0,767	482,7	389,5
12	0,920	578,8	475,1
13	0,997	628,3	527,9
14	1,074	670,9	558,7

Πίνακας 7.10 Σημείο λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης καθώς και στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου για $V_s=10, 12, 13$ και 14kn

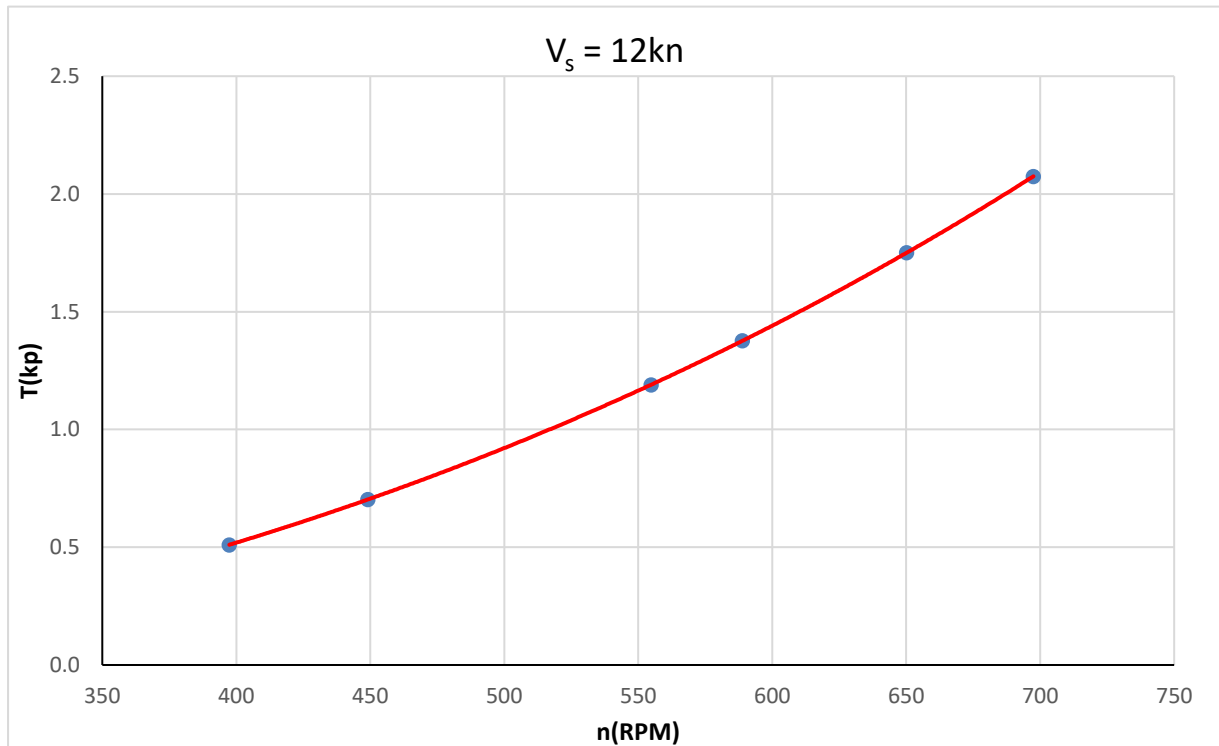
Αντίστοιχα χαράσσονται τα διαγράμματα n-T και n-Q για την ώση και την ροπή όπου φαίνονται παρακάτω:



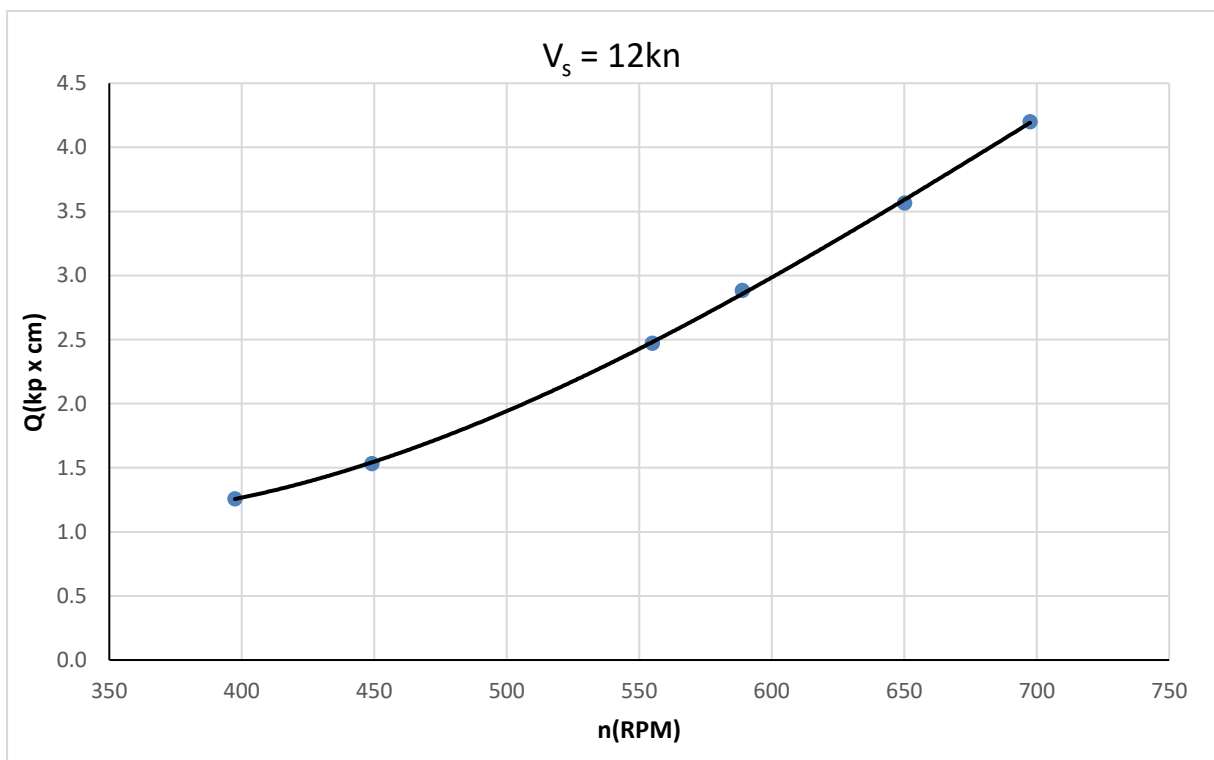
Διάγραμμα 7.5 Συνάρτηση ώσης για $V_m=0,767m/s$



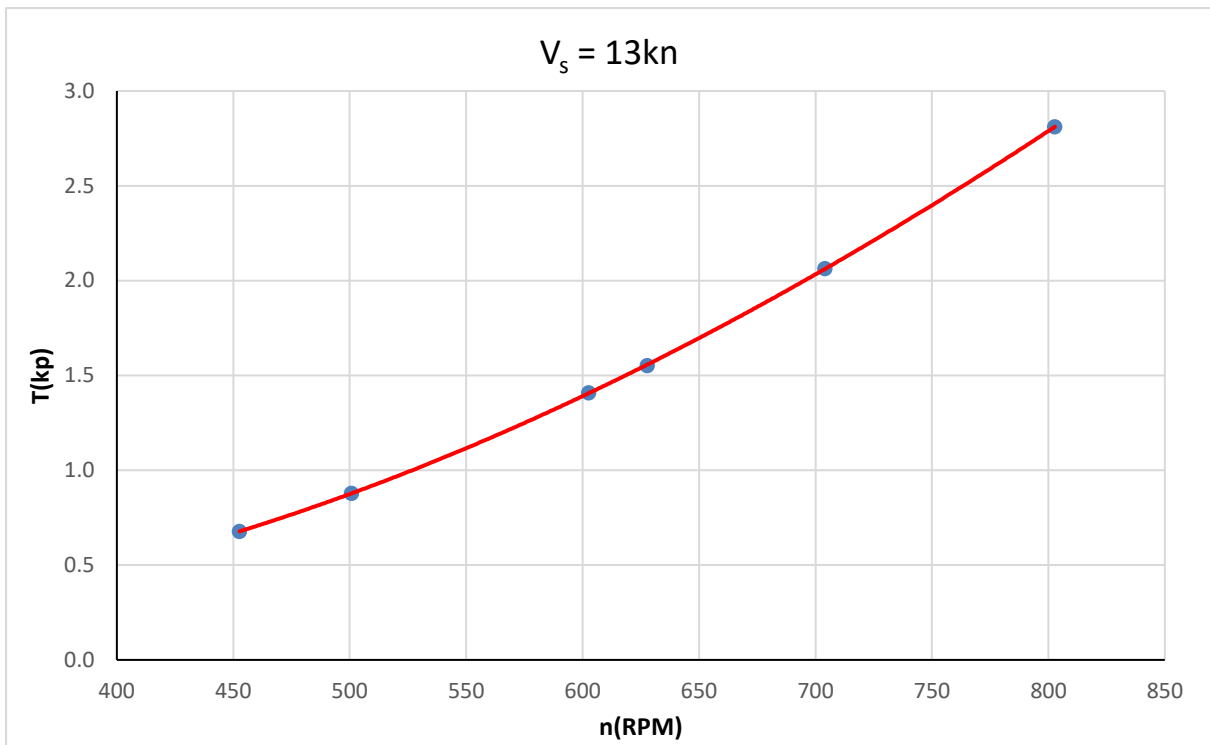
Διάγραμμα 7.6 Συνάρτηση ροπής για $V_m=0,767m/s$



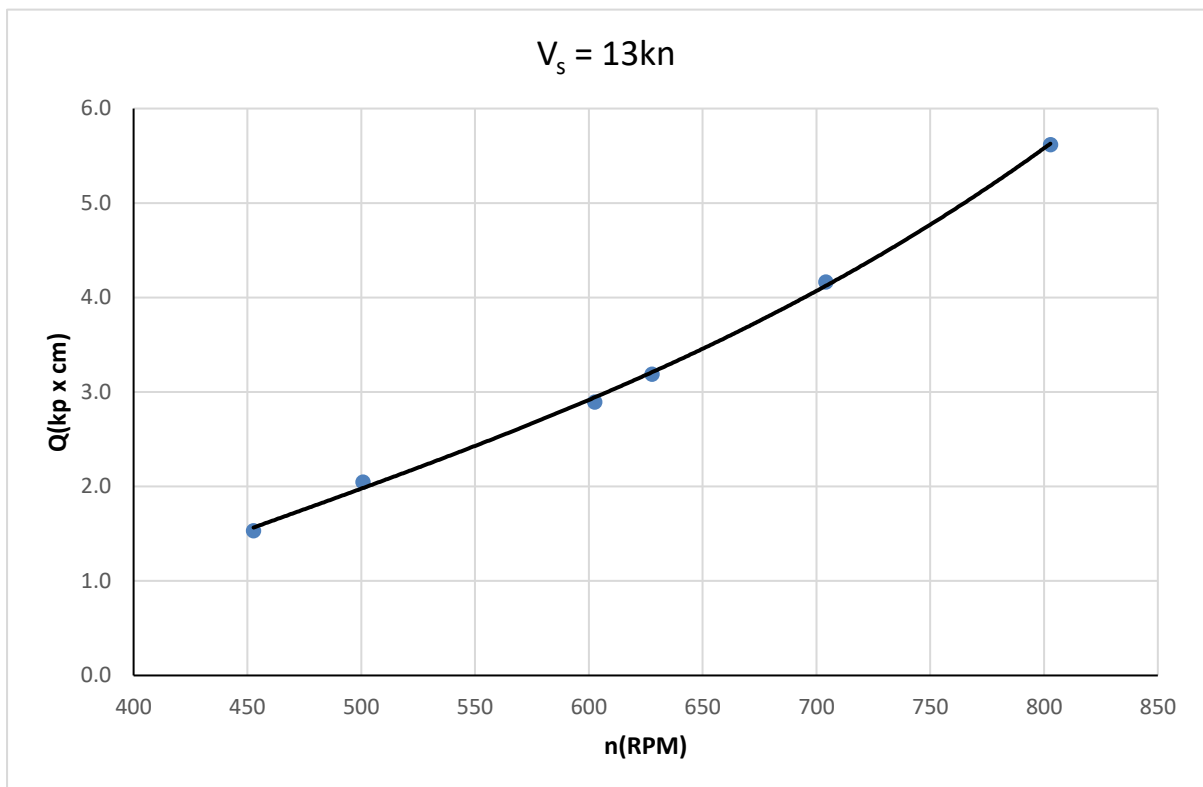
Διάγραμμα 7.7 Συνάρτηση ώσης για $V_m=0,92\text{m/s}$



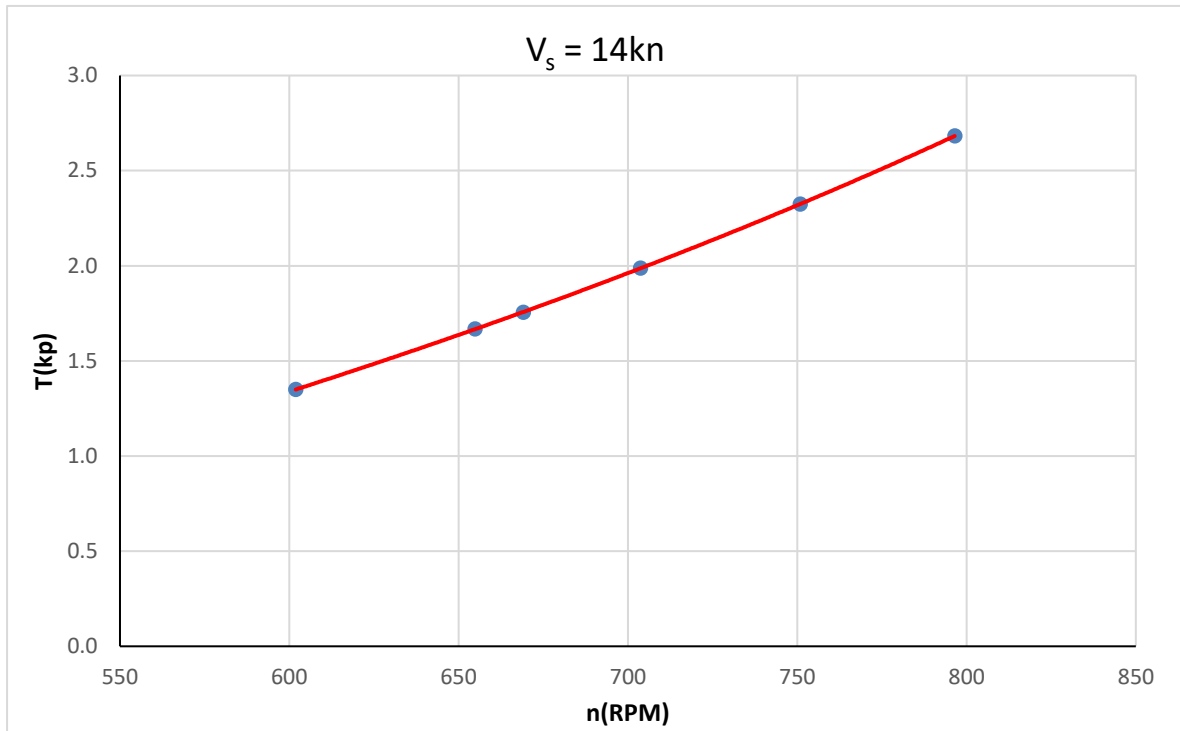
Διάγραμμα 7.8 Συνάρτηση ροπής για $V_m=0,92\text{m/s}$



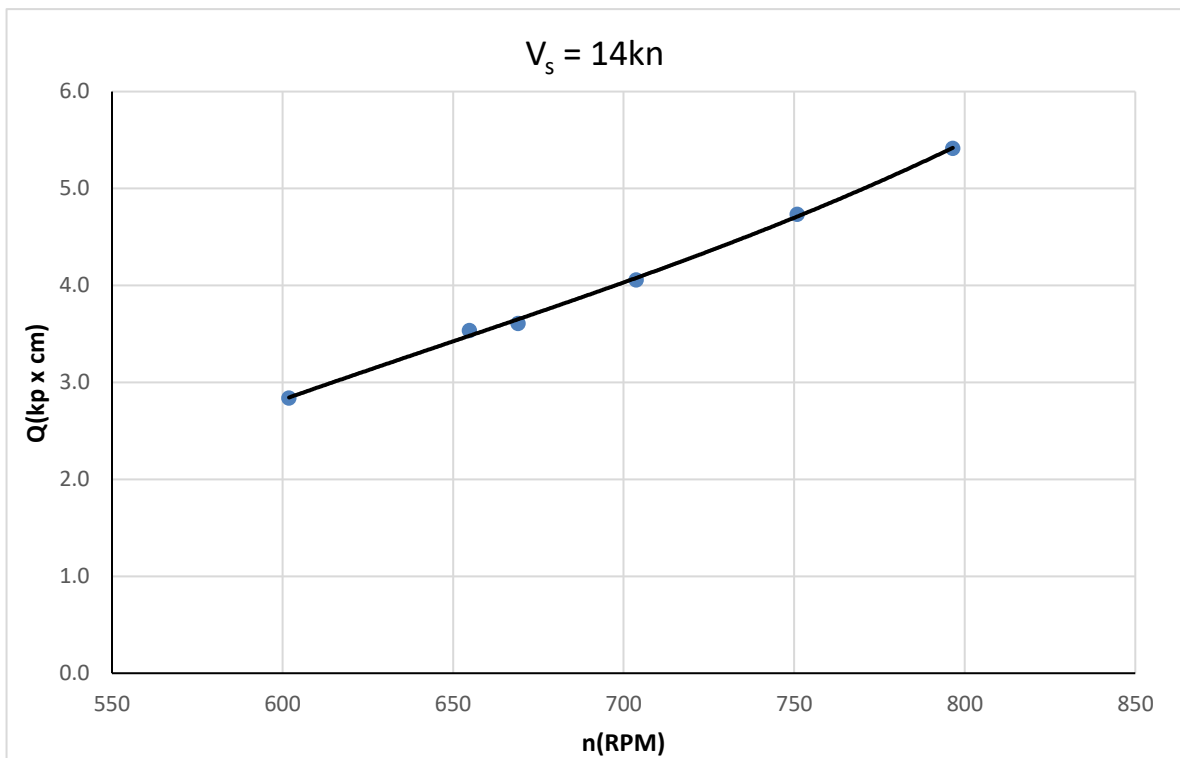
Διάγραμμα 7.9 Συνάρτηση ώσης για $V_m=0,997\text{m/s}$



Διάγραμμα 7.10 Συνάρτηση ροπής για $V_m=0,997\text{m/s}$



Διάγραμμα 7.11 Συνάρτηση ώσης για $V_m=1,074m/s$



Διάγραμμα 7.12 Συνάρτηση ροπής για $V_m=1,074m/s$

Από τις τιμές για την ώση και την ροπή που προέκυψαν μέσω των διαγραμμάτων στο σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στην αυτοπρώωση του μοντέλου μπορούν στην συνέχεια να υπολογιστούν οι συντελεστές ώσης και ροπής, kT_m και kQ_m αντίστοιχα. Οι τιμές των μεγεθών αυτών παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

V_s (kn)	V_m (m/s)	T_m (kp)	Q_m (kp x cm)	J_m	kT_m	kQ_m
10	0,767	0,923	1,9542	0,596	0,214	2,827
12	0,920	1,319	2,7406	0,596	0,212	2,757
13	0,997	1,561	3,2151	0,595	0,213	2,744
14	1,074	1,769	3,6758	0,600	0,212	2,752

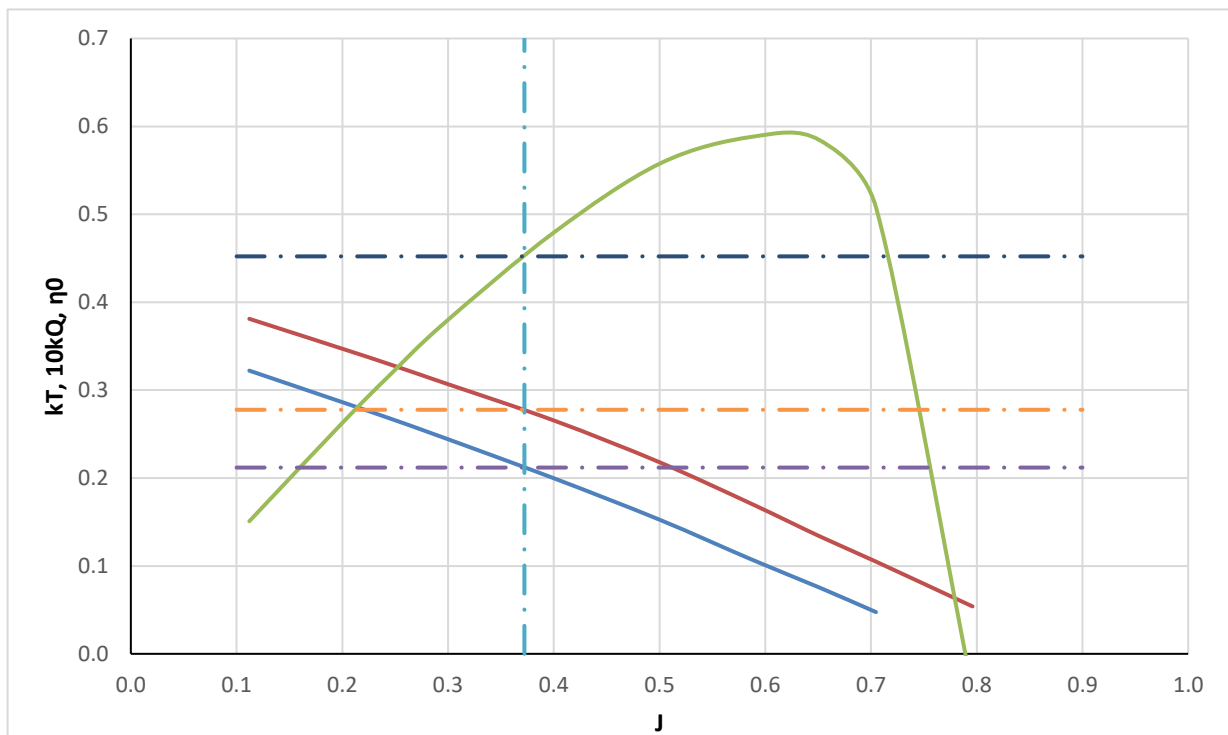
Πίνακας 7.11 Τιμές συντελεστών στο σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στην αυτοπρόωση του μοντέλου

Σύμφωνα με την μέθοδο εξίσωσης ώσης, διατηρώντας σταθερό τον συντελεστή ώσης kT , για την κάθε ταχύτητα στο σημείο αυτοπρόωσης, κάνοντας χρήση του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας του μοντέλου που έχει κατασκευαστεί παραπάνω υπολογίζονται ο συντελεστή προχώρησης J_0 , ο συντελεστής ροπής kQ_0 και ο βαθμό απόδοσης η_0 για την κάθε ταχύτητα. Τα αποτελέσματα για τις τιμές αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

V_s (kn)	V_m (m/s)	J_0	kT_0	kQ_0	η_0
10	0,767	0,368	0,214	0,0280	0,447
12	0,920	0,372	0,212	0,0278	0,453
13	0,997	0,370	0,213	0,0279	0,451
14	1,074	0,372	0,212	0,0278	0,452

Πίνακας 7.12 Τιμές μεγεθών που αφορούν την ελεύθερη ροή στις στροφές αυτοπρόωσης του μοντέλου

Το διάγραμμα ελεύθερης ροής χρησιμοποιήθηκε γραφικά με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Ένα παράδειγμα για την ταχύτητα των 14kn (σε κλίμακα μοντέλου 1,074 m/s) φαίνεται παρακάτω:



Διάγραμμα 7.13 Μέθοδος της εξίσωσης της ώσης σε διάγραμμα ελεύθερης ροής έλικας για $V_m=1,074m/s$

Μετά τους παραπάνω υπολογισμούς διατίθενται πλέον όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό των επιθυμητών υδροδυναμικών συντελεστών και μεγεθών που αφορούν την κλίμακα του μοντέλου και την αλληλεπίδραση έλικας - γάστρας.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε αντιστοιχία με το θεωρητικό μέρος. Τα μεγέθη αυτά φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

$V_m(\text{m/s})$	$n_m(\text{RPM})$	$V_A(\text{m/s})$	$R_c(\text{kp})$	$DHP(\text{W})$
0,767	482,7	0,473	0,801	9,682
0,920	578,8	0,574	1,122	16,281
0,997	628,3	0,620	1,310	20,735
1,074	670,9	0,666	1,520	25,312

Πίνακας 7.14 Υπολογιζόμενα μεγέθη που αφορούν την κλίμακα του μοντέλου

$V_m(\text{m/s})$	w	t	η_0	η_R	η_H	η_B
0,767	0,383	0,132	0,447	0,989	1,406	0,442
0,920	0,376	0,149	0,453	1,007	1,363	0,456
0,997	0,378	0,160	0,451	1,015	1,350	0,457
1,074	0,380	0,140	0,452	1,009	1,386	0,456

Πίνακας 7.15 Υπολογιζόμενα μεγέθη που αφορούν την αλληλεπίδραση έλικας γάστρας

1.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΠΗΔΑΛΙΟ

Στο στάδιο αυτό της πειραματικής διαδικασίας το μοντέλο εξοπλίζεται ξανά με την έλικα και το πηδάλιο και ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω εκτελούνται τα πειράματα της αυτοπρόωσης για τις ίδιες ομάδες ταχυτήτων. Η μοναδική διαφοροποίηση των νέων πειραμάτων αυτοπρόωσης έγκειται στην παρουσία του πηδαλίου στην πρύμνη του μοντέλου.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται πως προ της εκτέλεσης των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην περιοχή του βολβού της πρύμνης του σκάφους προκειμένου να προσδιοριστούν με ακρίβεια η απόσταση πλήμνης της έλικας από πηδάλιο καθώς και η απόσταση της ρίζας της έλικας από το χείλος πρόσπτωσης της υδροτομής του πηδαλίου. Τα μεγέθη αυτά επιλέχθηκαν διότι θεωρήθηκε ότι διαδραματίζουν σημαίνοντα ρόλο στο φαινόμενο που μελετά η παρούσα διπλωματική εργασία. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το σύστημα πηδάλιο, έλικα πλήμνη όπου έγιναν οι μετρήσεις. Για λόγους ακρίβειας χρησιμοποιήθηκε μικρόμετρο και fillers.



Εικόνα 7.1 Μέτρηση αποστάσεων έλικα πηδαλίου

Σκοπός της ανάλυσης στο στάδιο αυτό είναι να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν την θετική ή αρνητική επίδραση που μπορεί να έχει η παρουσία του πηδαλίου πίσω από την έλικα στην απόδοση και τελικά στην κατανάλωση καυσίμου του πλοίου για την εκάστοτε υπό μελέτη ταχύτητα. Τα συμπεράσματα αυτά μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με την ταχύτητα. Για τον λόγο αυτό αρχικά θα παρουσιαστούν ομαδοποιημένα τα αποτελέσματα για αυτή την σειρά πειραμάτων αλλά θα γίνει ξεχωριστή ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων στην συνέχεια.

Τα στοιχεία που αφορούν τις συνθήκες του νερού κατά την διάρκεια των πειραμάτων που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς στα πειράματα αυτοπρώωσης, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα μαζί με την ημερομηνία διεξαγωγής των πειραμάτων και τις συναρτήσεις μεταφορά που χρησιμοποιήθηκαν. Η διάρκεια των πειραμάτων για την κάθε κατάσταση ήταν 2 ημέρες και ως εκ τούτου η βαθμονόμηση του δυναμόμετρου της αντίστασης καθώς και οι μετρήσεις θερμοκρασίας έγιναν δύο φορές. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

Ημ/νια : 12-Απρ-18		Συναρτήσεις Μεταφοράς	
$T_{\text{tank}}(^{\circ}\text{C})$	15,9	Resistance (Δύναμη ΔF)	$2,7020 x + 0,0071$
$v_{\text{tank}}(\text{m}^2/\text{s})$	1,11212E-06	Heave	$4,4966 x - 31,171$
$\rho_{\text{tank}}(\text{kps}^2/\text{m}^4)$	101,866	Pitch	$-2,3043 x - 0,0949$
		Thrust	$0,9257 x + 0,0096$
		Torque	$4,3586 x + 0,0517$

Ημ/νια : 13-Απρ-18		Συναρτήσεις Μεταφοράς	
$T_{\text{tank}}(^{\circ}\text{C})$	16,1	Resistance (Δύναμη ΔF)	$2,7002 x + 0,0061$
$v_{\text{tank}}(\text{m}^2/\text{s})$	1,10637E-06	Heave	$4,4966 x - 31,171$
$\rho_{\text{tank}}(\text{kps}^2/\text{m}^4)$	101,863	Pitch	$-2,3043 x - 0,0949$
		Thrust	$0,9257 x + 0,0096$
		Torque	$4,3586 x + 0,0517$

Πίνακας 7.16 Συνθήκες διεξαγωγής πειράματος και συναρτήσεις μεταφοράς

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι μετρήσεις στην κατάσταση ηρεμίας καθώς και κατά το τρέξιμο του φορείου για την κάθε ταχύτητα.

1η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=10kn$

$n_{\text{Required}}(\text{RPM})$	$n_{\text{Achieved}}(\text{RPM})$	$V_m(\text{m/sec})$	$\Delta F(\text{Volts})$	Thrust (Volts)	Torque (Volts)
-	35,3	0,000	0,014	-0,709	0,033
300	300,2	0,766	0,221	-0,366	0,262
-	35,4	0,000	0,022	-0,709	0,033
350	350,7	0,766	0,175	-0,203	0,321
-	34,9	0,000	0,020	-0,703	0,025
450	450,9	0,768	0,066	0,224	0,440
-	34,8	0,000	0,021	-0,711	0,024
475	474,6	0,769	0,021	0,341	0,473
-	35,7	0,000	0,023	-0,709	0,028
500	500,1	0,766	-0,019	0,472	0,581
-	34,8	0,000	0,019	-0,715	0,024
550	552,7	0,763	-0,121	0,797	0,622

Πίνακας 7.17 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=10kn$

2η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=12kn$

Σημειώνεται ότι σε αυτή την σειρά μετρήσεων υπήρξαν τιμές που εξαιρέθηκαν λόγω ταλαντώσεων που παρουσιάστηκαν κατά την μέτρηση.

$n_{Required}(RPM)$	$n_{Achieved}(RPM)$	$V_m(m/sec)$	$\Delta F(Volts)$	Thrust (Volts)	Torque (Volts)
-	34,7	0,000	0,022	-0,724	0,024
400	398,4	0,917	0,270	-0,092	0,322
-	34,8	0,000	0,010	-0,720	0,025
450	450,7	0,918	0,201	0,135	0,401
-	34,7	0,000	0,014	-0,723	0,024
550	548,5	0,917	0,045	0,657	0,618
-	35,1	0,000	0,018	-0,730	0,025
600	601,6	0,921	-0,053	0,993	0,759
-	34,7	0,000	0,018	-0,728	0,023
650	649,7	0,917	-0,163	1,355	0,905

Πίνακας 7.18 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=12kn$ 3η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=13kn$

$n_{Required}(RPM)$	$n_{Achieved}(RPM)$	$V_m(m/sec)$	$\Delta F(Volts)$	Thrust (Volts)	Torque (Volts)
-	35,0	0,000	0,013	-0,722	0,027
450	452,8	0,993	0,270	0,111	0,399
-	35,3	0,000	0,028	-0,715	0,033
500	503,0	1,000	0,205	0,372	0,556
-	35,0	0,000	0,020	-0,714	0,028
600	600,9	0,996	0,031	0,962	0,759
-	35,1	0,000	0,013	-0,718	0,027
620	618,7	0,998	-0,013	1,071	0,786
-	35,0	0,000	0,018	-0,714	0,028
700	702,5	0,993	-0,204	1,716	1,041
-	35,1	0,000	0,016	-0,724	0,026
750	750,5	0,998	-0,319	2,105	1,200

Πίνακας 7.19 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=13kn$ 4η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=14kn$

$n_{Required}(RPM)$	$n_{Achieved}(RPM)$	$V_m(m/sec)$	$\Delta F(Volts)$	Thrust (Volts)	Torque (Volts)
-	35,1	0	0,013	-0,733	0,026
550	550,1	1,076	0,238	0,557	0,605
-	34,6	0	0,012	-0,730	0,027
600	601,4	1,076	0,131	0,878	0,731
-	35,1	0	0,016	-0,731	0,027
660	664,3	1,077	0,003	1,325	0,912
-	35,1	0	0,022	-0,730	0,027
700	698,0	1,077	-0,075	1,554	0,986
-	35,1	0	0,019	-0,731	0,027
750	750,5	1,077	-0,193	2,023	1,192
-	35,1	0	0,019	-0,731	0,027
800	802,1	1,076	-0,336	2,486	1,374

Πίνακας 7.20 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=14kn$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις μηδενικές τιμές των μετρήσεων και τις συναρτήσεις μεταφοράς για την ώση και την ροπή προκύπτει τελικά ο Πίνακας 7.21. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται οι τιμές της δύναμης ΔF , της ώσης T και της ροπής Q για έναν αριθμό στροφών γύρω από το σημείο λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης σε ταχύτητα πλοίου ίση με 10kn.

1η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=10kn$

$n_{Achieved}(RPM)$	$\Delta F_m(kp)$	Thrust (kp)	Torque (kp x cm)
300,2	0,559	0,318	0,998
350,7	0,413	0,468	1,255
450,9	0,124	0,858	1,809
474,6	0,000	0,974	1,957
500,1	-0,113	1,093	2,410
552,7	-0,378	1,400	2,606

Πίνακας 7.21 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=0,767m/s$

Ομοίως οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται στην συνέχεια για τις ταχύτητες των 12, 13 και 14 kn αντίστοιχα

2η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=12kn$

$n_{Achieved}(RPM)$	$\Delta F_m(kp)$	Thrust (kp)	Torque (kp x cm)
398,4	0,670	0,585	1,299
450,7	0,516	0,791	1,639
548,5	0,084	1,277	2,589
601,6	-0,192	1,595	3,199
649,7	-0,489	1,928	3,844

Πίνακας 7.22 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=0,92m/s$

3η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=13kn$

$n_{Achieved}(RPM)$	$\Delta F_m(kp)$	Thrust (kp)	Torque (kp x cm)
452,8	0,694	0,771	1,621
503	0,478	1,006	2,280
600,9	0,030	1,551	3,186
618,7	-0,070	1,656	3,308
702,5	-0,599	2,249	4,415
750,5	-0,905	2,619	5,117

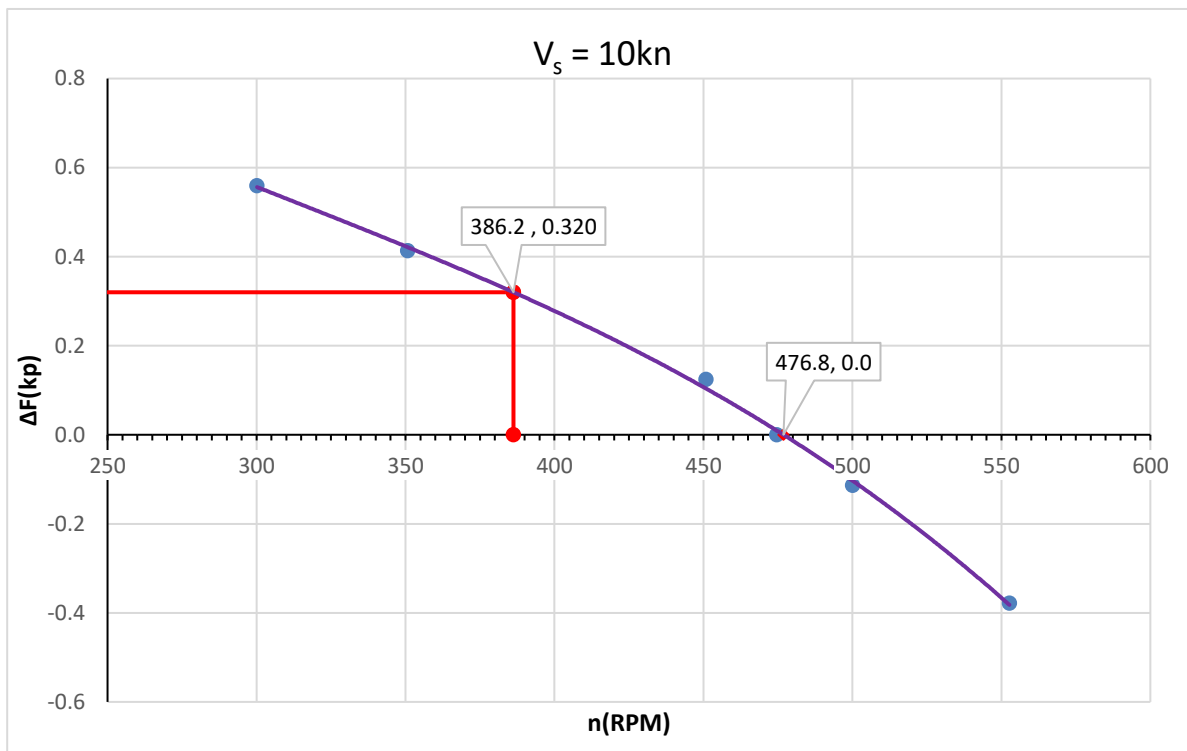
Πίνακας 7.23 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=0,997m/s$

4η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=14kn$

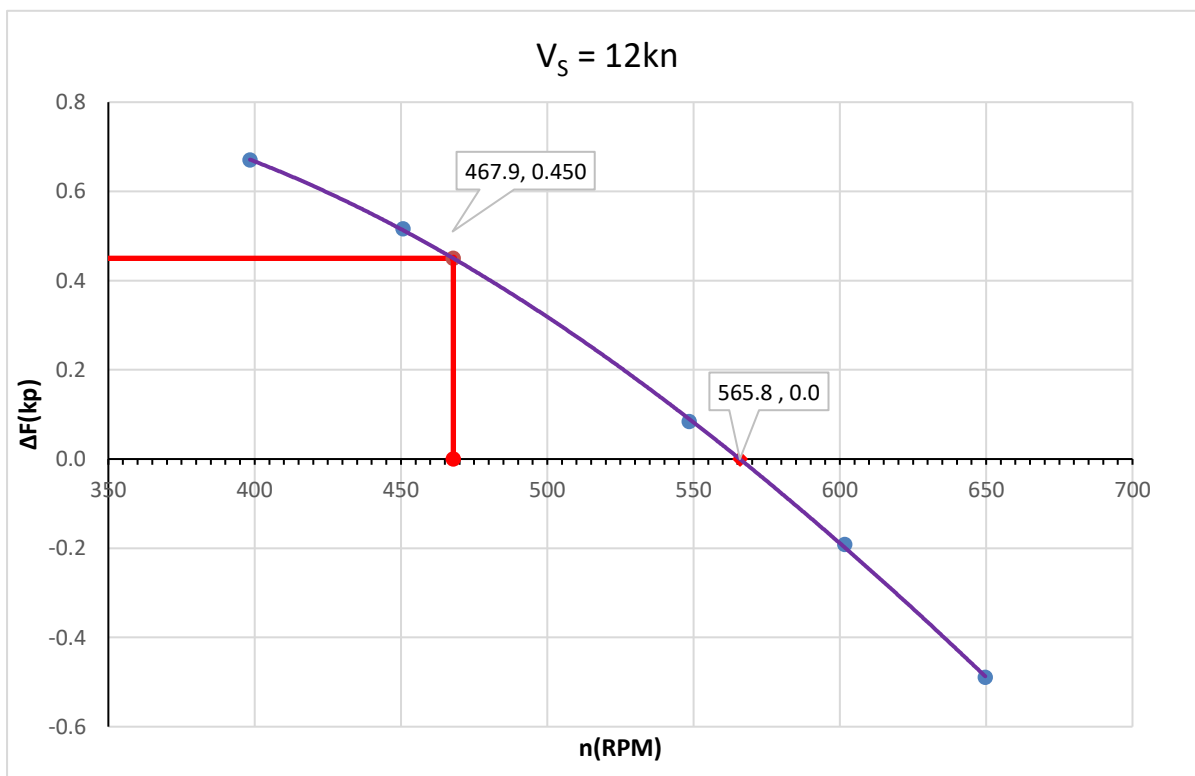
$n_{Achieved}(RPM)$	$\Delta F_m(kp)$	Thrust (kp)	Torque (kp x cm)
550,1	0,608	1,194	2,524
601,4	0,321	1,489	3,068
664,3	-0,035	1,903	3,857
698,0	-0,262	2,114	4,180
750,5	-0,572	2,549	5,078
802,1	-0,959	2,978	5,871

Πίνακας 7.24 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=1,074m/s$

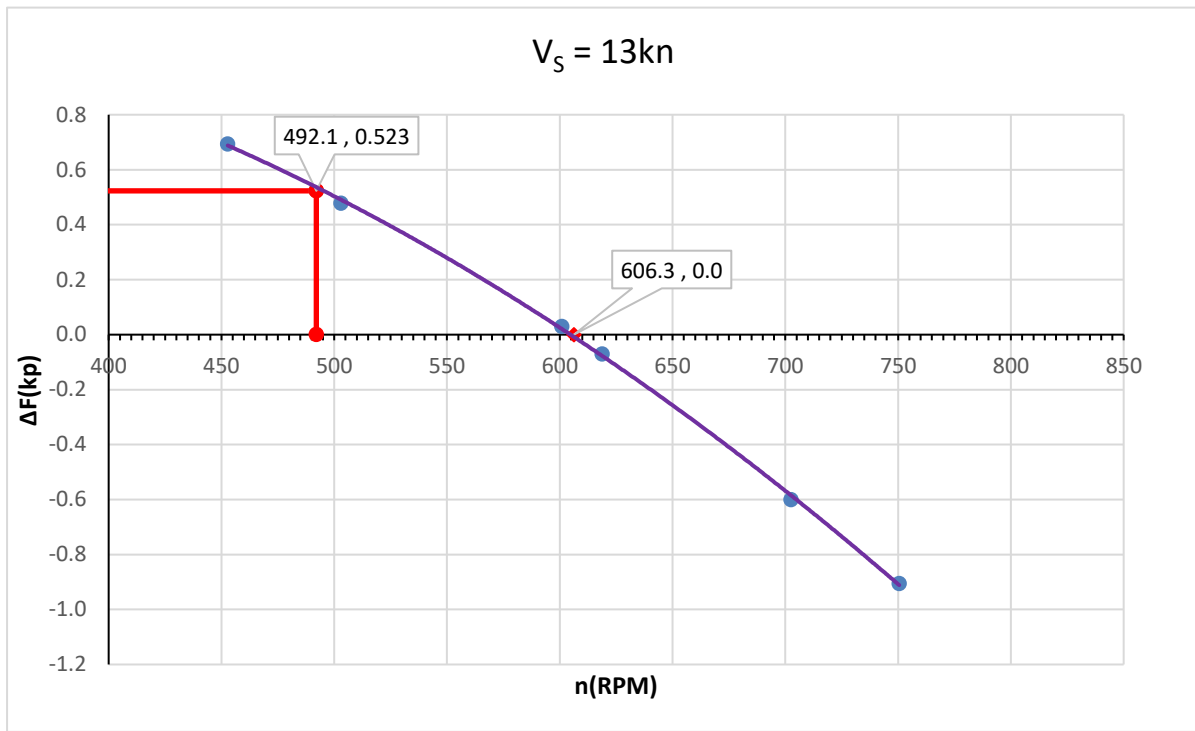
Προκειμένου να βρεθούν με ακρίβεια οι στροφές λειτουργίας της έλικας του μοντέλου, που αντιστοιχούν στην τιμή της δύναμης που υπολογίστηκε παραπάνω αλλά και στο σημείο που η δύναμη μηδενίζεται (αυτοπρόωση μοντέλου) χαράσσεται η καμπύλη $n-\Delta F$. Στην συνέχεια η καμπύλη προσεγγίζεται από μια 3^{ου} βαθμού πολυωνυμική και με χρήση του μη γραμμικού solver βρίσκονται οι τιμές των στροφών αυτοπρόωσης πλοίου και μοντέλου. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται και γραφικά στα διαγράμματα που ακολουθούν. Οι τελικές τιμές των στροφών αυτοπρόωσης πλοίου και μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.25.



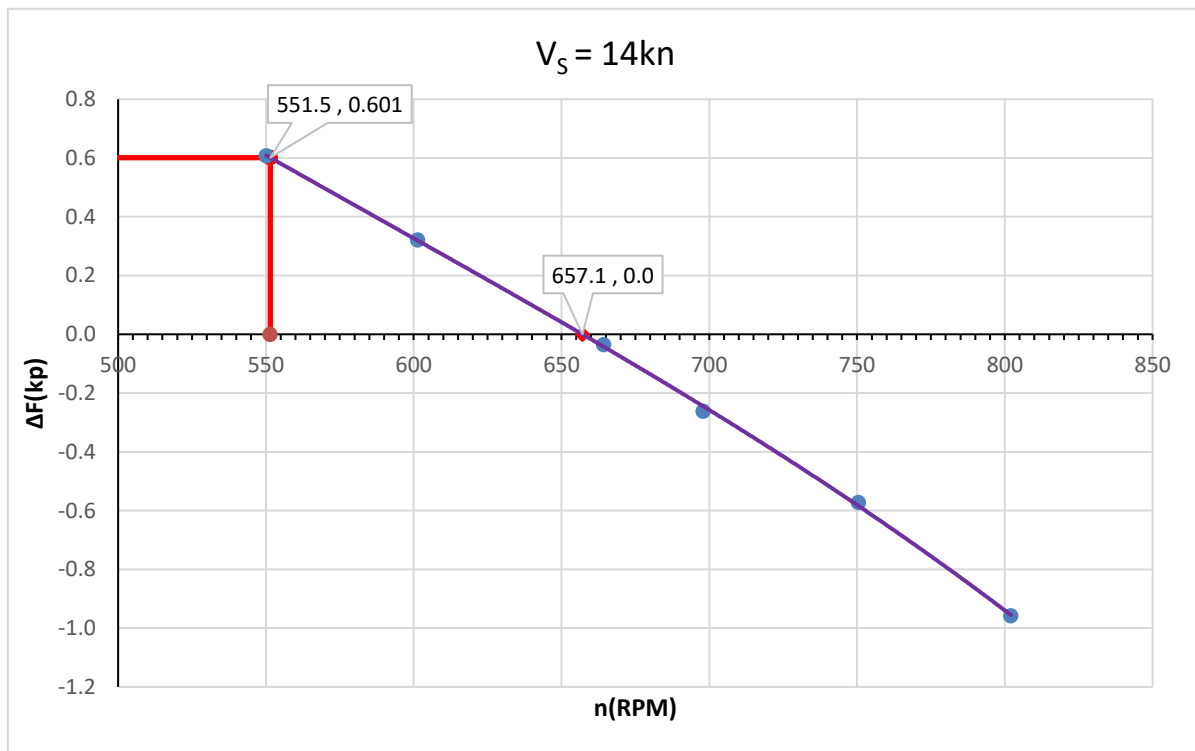
Διάγραμμα 7.14 Διάγραμμα $n-\Delta F$ για $V_m=0,767\text{m/s}$



Διάγραμμα 7.15 Διάγραμμα $n-\Delta F$ για $V_m=0,92\text{m/s}$



Διάγραμμα 7.16 Διάγραμμα n-ΔF για $V_m=0,997\text{m/s}$

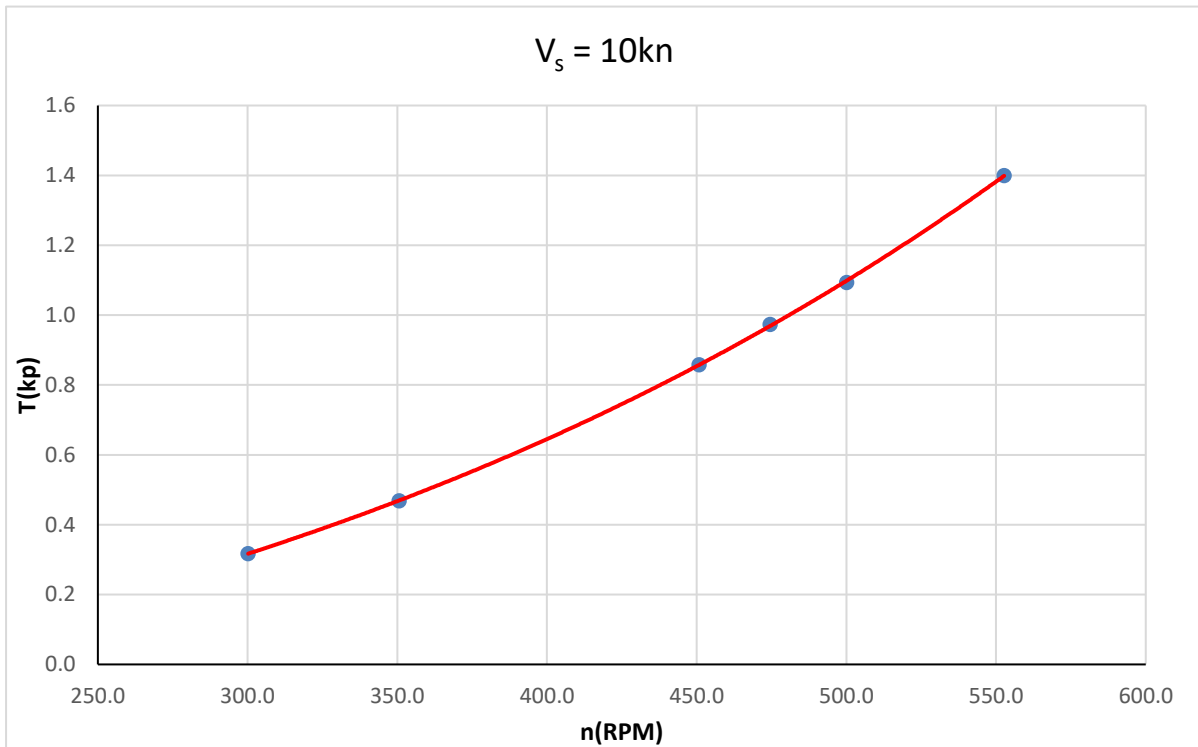


Διάγραμμα 7.17 Διάγραμμα n-ΔF για $V_m=1,074\text{m/s}$

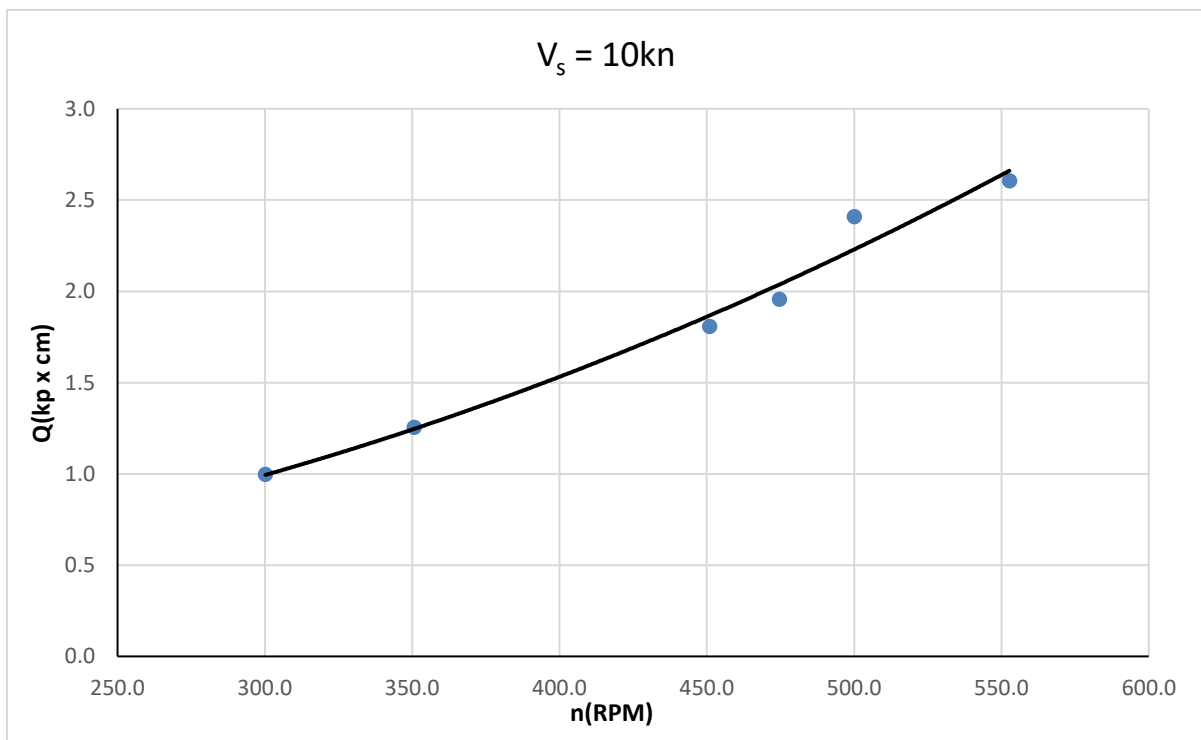
V_s (kn)	V_m (m/s)	Σημείο Αυτοπρόωσης Μοντέλου(RPM)	Σημείο Αυτοπρόωσης Πλοίου(RPM)
10	0,767	476,8	386,2
12	0,920	565,8	467,9
13	0,997	606,3	492,1
14	1,074	657,1	551,5

Πίνακας 7.25 Σημείο λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης καθώς και στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου για $V_s=10, 12, 13$ και 14kn

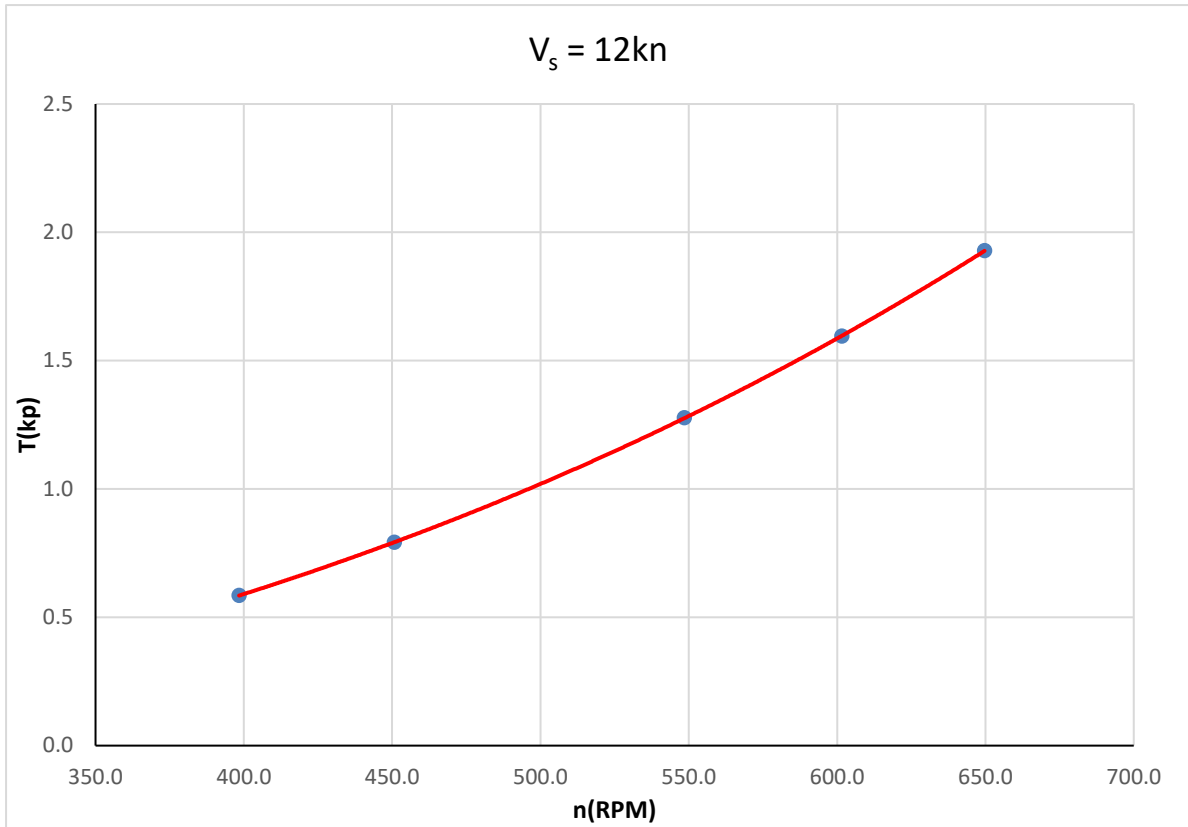
Αντίστοιχα χαράσσονται τα διαγράμματα $n-T$ και $n-Q$ για την ώση και την ροπή όπου φαίνονται παρακάτω:



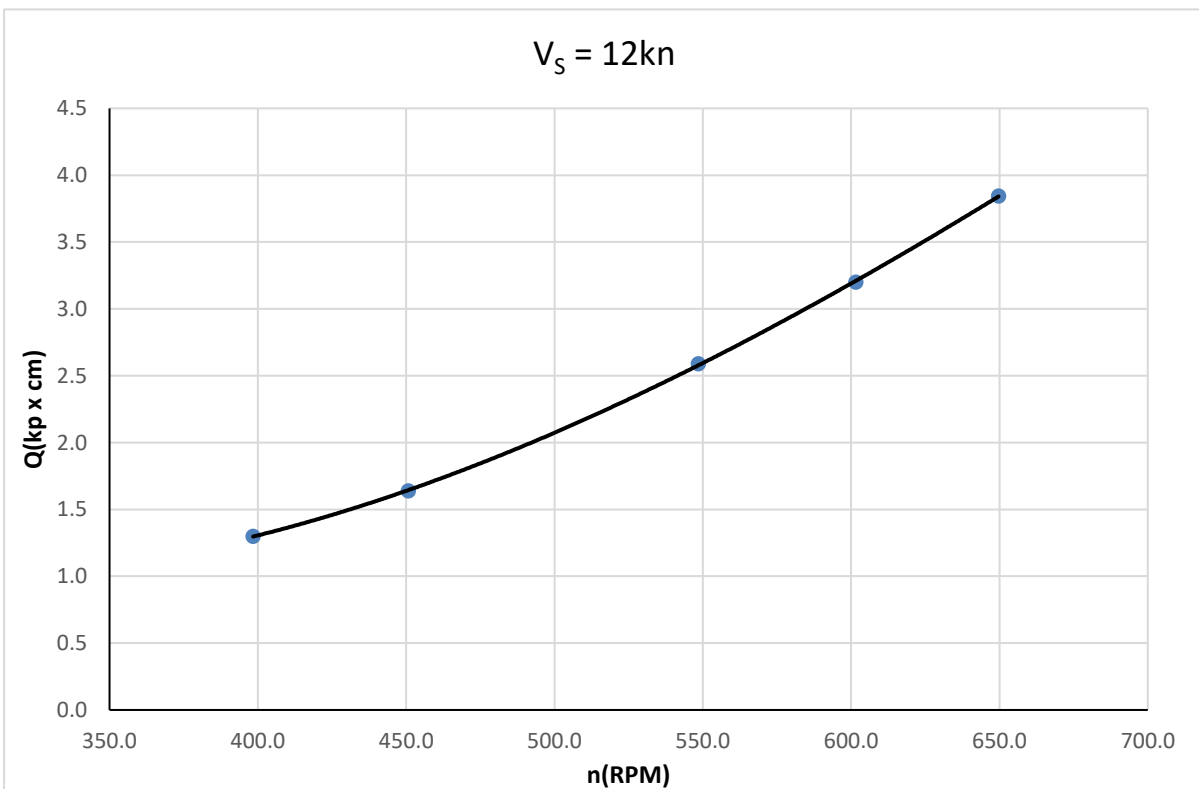
Διάγραμμα 7.18 Συνάρτηση ώσης για $V_m=0,767m/s$



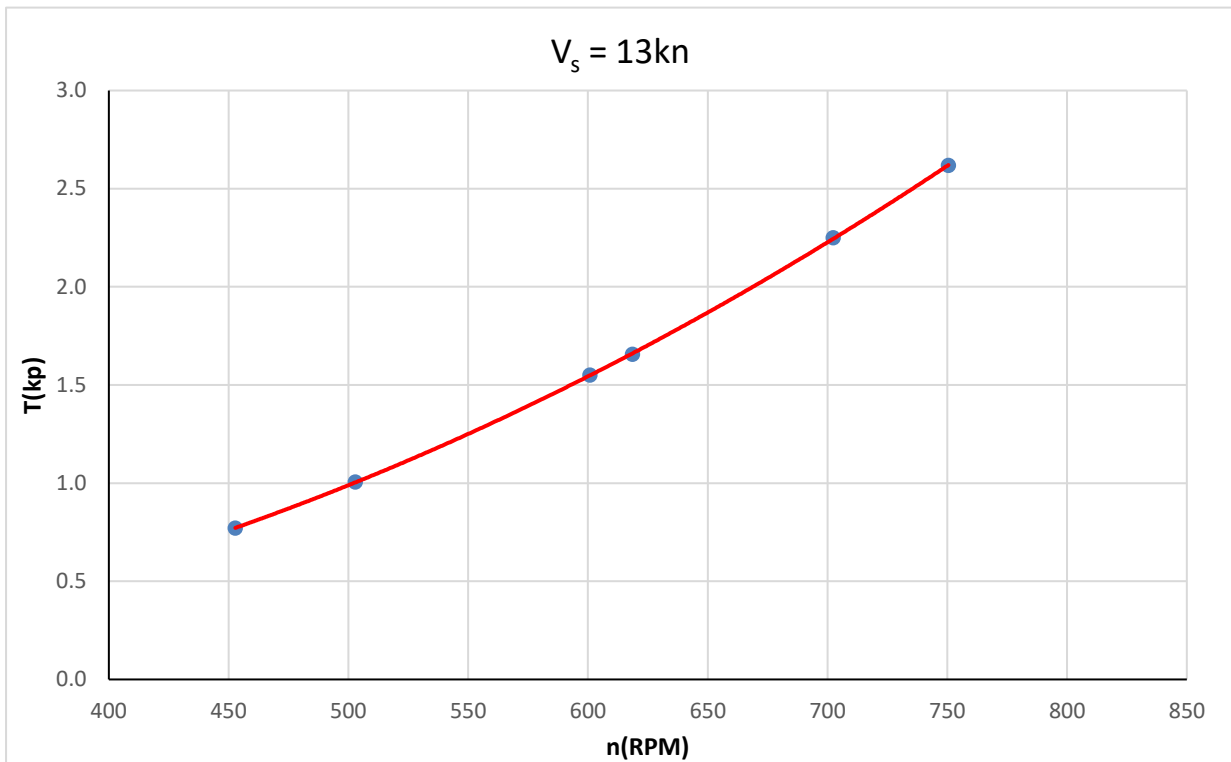
Διάγραμμα 7.19 Συνάρτηση ροπής για $V_m=0,767m/s$



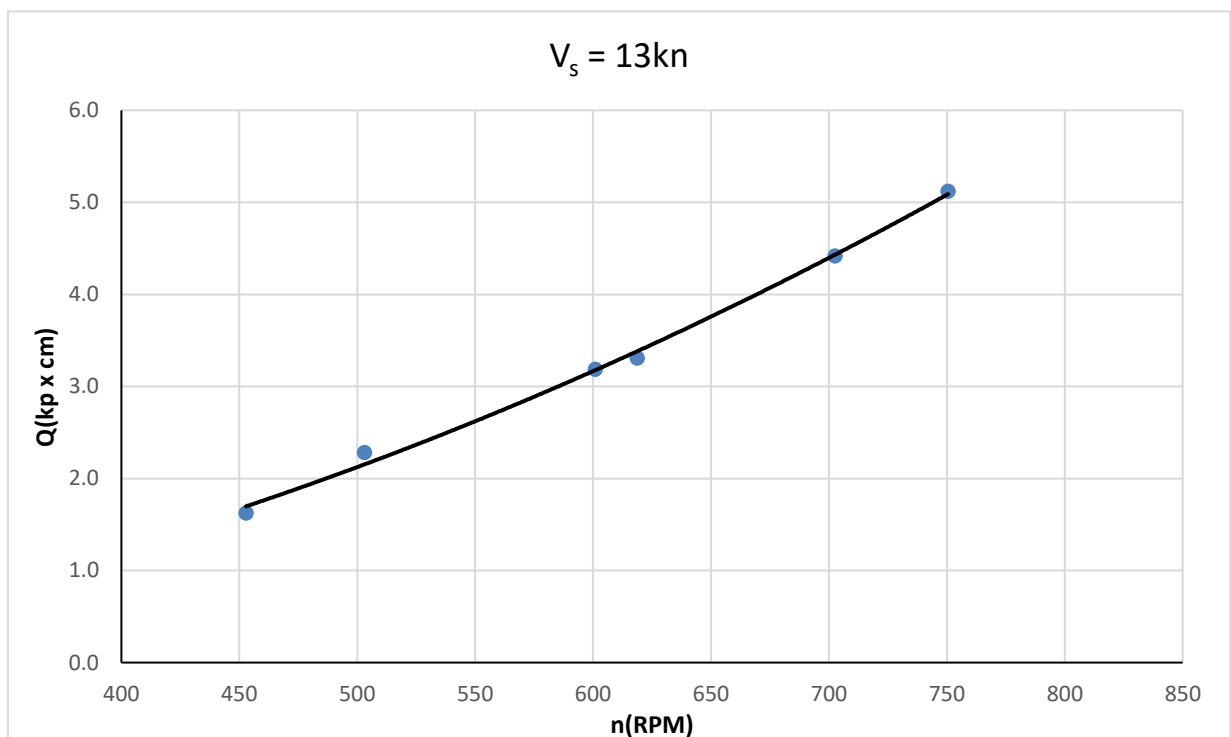
Διάγραμμα 7.20 Συνάρτηση ώσης για $V_m=0,92\text{m/s}$



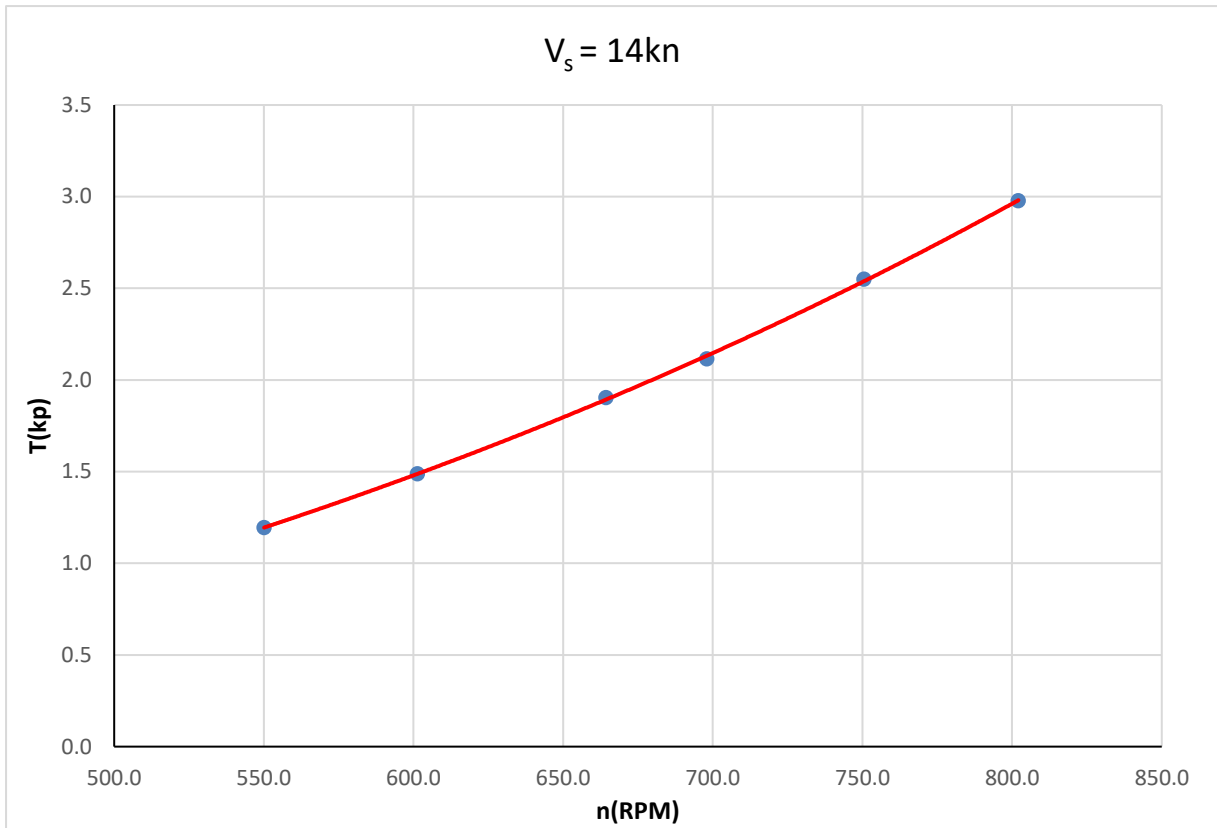
Διάγραμμα 7.21 Συνάρτηση ροπής για $V_m=0,92\text{m/s}$



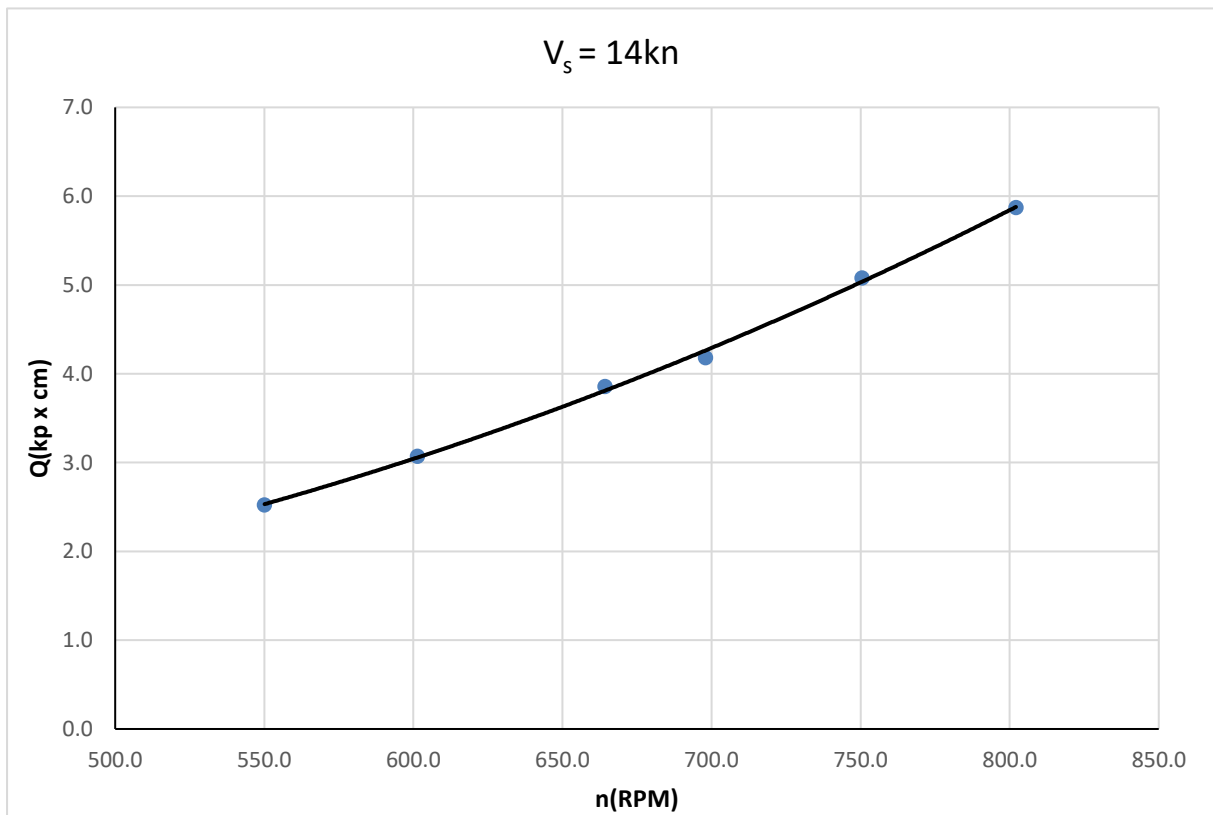
Διάγραμμα 7.22 Συνάρτηση ώσης για $V_m=0,997m/s$



Διάγραμμα 7.23 Συνάρτηση ροπής για $V_m=0,997m/s$



Διάγραμμα 7.24 Συνάρτηση ώσης για $V_m=1,074m/s$



Διάγραμμα 7.25 Συνάρτηση ροπής για $V_m=1,074m/s$

Από τις τιμές για την ώση και την ροπή που προέκυψαν μέσω των διαγραμμάτων στο σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στην αυτοπρόωση του μοντέλου μπορούν στην συνέχεια να υπολογιστούν οι συντελεστές ώσης και ροπής, kT_m και kQ_m αντίστοιχα. Οι τιμές των μεγεθών αυτών παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

V_s (kn)	V_m (m/s)	T_m (kp)	Q_m (kp x cm)	J_m	kT_m	kQ_m
10	0,767	0,980	2,0537	0,603	0,232	0,0304
12	0,920	1,376	2,7761	0,610	0,232	0,0292
13	0,997	1,583	3,2381	0,617	0,232	0,0297
14	1,074	1,844	3,7181	0,613	0,230	0,0290

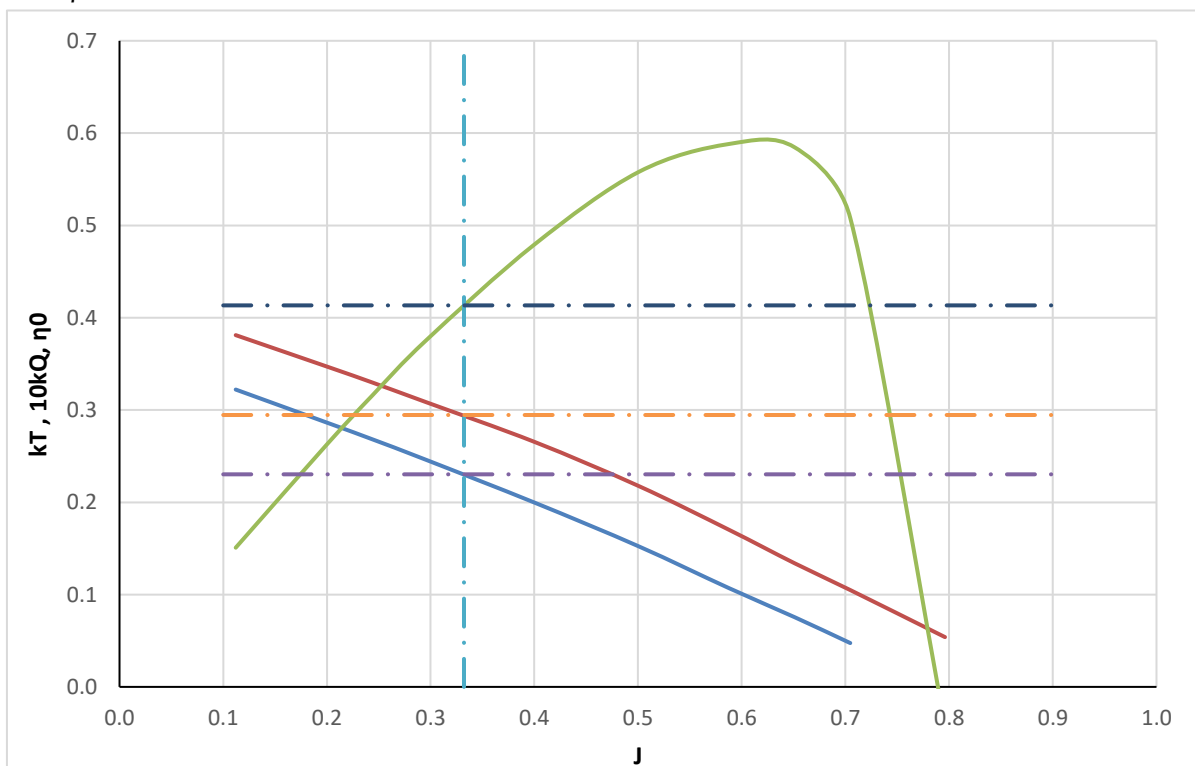
Πίνακας 7.26 Τιμές συντελεστών στο σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στην αυτοπρόωση του μοντέλου

Σύμφωνα με την μέθοδο εξίσωσης ώσης, διατηρώντας σταθερό τον συντελεστή ώσης kT , για την κάθε ταχύτητα στο σημείο αυτοπρόωσης, κάνοντας χρήση του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας του μοντέλου που έχει κατασκευαστεί παραπάνω υπολογίζονται ο συντελεστή προχώρησης J_0 , ο συντελεστής ροπής kQ_0 και ο βαθμό απόδοσης η_0 για την κάθε ταχύτητα. Τα αποτελέσματα για τις τιμές αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

V_s (kn)	V_m (m/s)	J_0	kT_0	kQ_0	η_0
10	0,767	0,328	0,232	0,0296	0,409
12	0,920	0,328	0,232	0,0296	0,408
13	0,997	0,328	0,232	0,0296	0,409
14	1,074	0,332	0,230	0,0295	0,413

Πίνακας 7.27 Τιμές μεγεθών που αφορούν την ελεύθερη ροή στις στροφές αυτοπρόωσης του μοντέλου

Το διάγραμμα ελεύθερης ροής χρησιμοποιήθηκε γραφικά με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Ένα παράδειγμα για την ταχύτητα των 14kn (σε κλίμακα μοντέλου 1,074 m/s) φαίνεται παρακάτω:



Διάγραμμα 7.13 Μέθοδος της εξίσωσης της ώσης σε διάγραμμα ελεύθερης ροής έλικας για $V_m=1,074m$

Μετά τους παραπάνω υπολογισμούς διατίθενται πλέον όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό των επιθυμητών υδροδυναμικών συντελεστών και μεγεθών που αφορούν την κλίμακα του μοντέλου και την αλληλεπίδραση έλικας - γάστρας.

Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε αντιστοιχία με το θεωρητικό μέρος. Τα μεγέθη αυτά φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

$V_m(\text{m/s})$	$n_m(\text{RPM})$	$V_A(\text{m/s})$	$R_c(\text{kp})$	$DHP(W)$
0,767	476,8	0,417	0,812	9,682
0,920	565,8	0,494	1,133	16,281
0,997	606,3	0,530	1,321	20,735
1,074	657,1	0,582	1,535	25,312

Πίνακας 7.28 Υπολογιζόμενα μεγέθη που αφορούν την κλίμακα του μοντέλου

$V_m(\text{m/s})$	w	t	η_o	η_R	η_H	η_B
0,767	0,457	0,172	0,409	0,974	1,524	0,398
0,920	0,463	0,177	0,408	1,014	1,532	0,414
0,997	0,469	0,165	0,409	0,998	1,571	0,408
1,074	0,458	0,168	0,413	1,015	1,535	0,420

Πίνακας 7.29 Υπολογιζόμενα μεγέθη που αφορούν την αλληλεπίδραση έλικας γάστρας

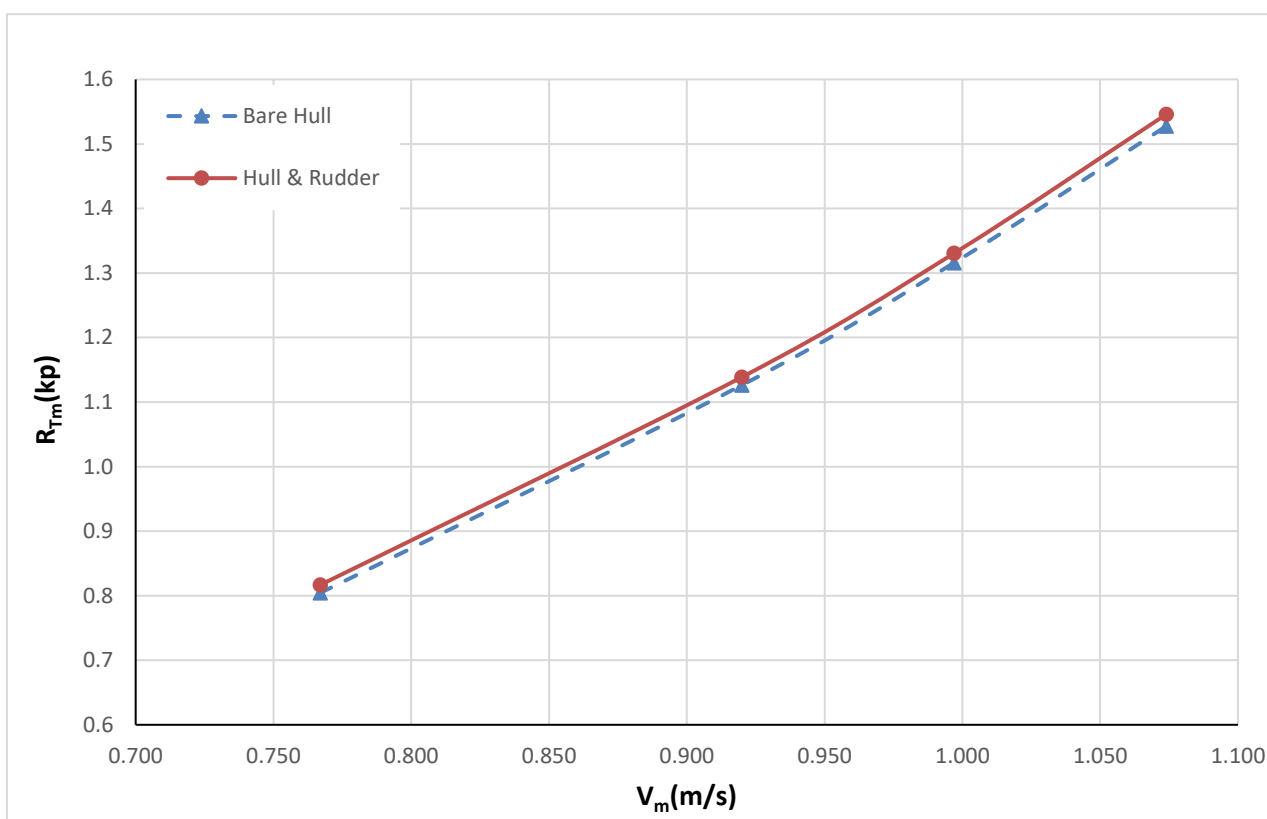
8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΡΥΜΟΥΛΚΗΣΗΣ

Στον Πίνακα 8.1 και στο αντίστοιχο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η διαφορά της αντίστασης του μοντέλου πριν και μετά την τοποθέτηση του πηδαλίου. Οι ταχύτητες είναι αυτές για τις οποίες μελετήθηκε και η αυτοπρόωση.

V_m (m/s)	R_{Tm} (kp) – Bare Hull	R_{Tm} (kp) – Hull & Rudder	δR_{Tm} %
0,767	0,788	0,804	2%
0,92	1,099	1,113	1%
0,997	1,290	1,305	1%
1,074	1,503	1,525	2%

Πίνακας 8.1 Διαφορά πειραματικών μετρήσεων για την αντίσταση του μοντέλου με και χωρίς πηδάλιο



Διάγραμμα 8.1 Μεταβολή Αντίστασης Ρυμούλκησης Μοντέλου

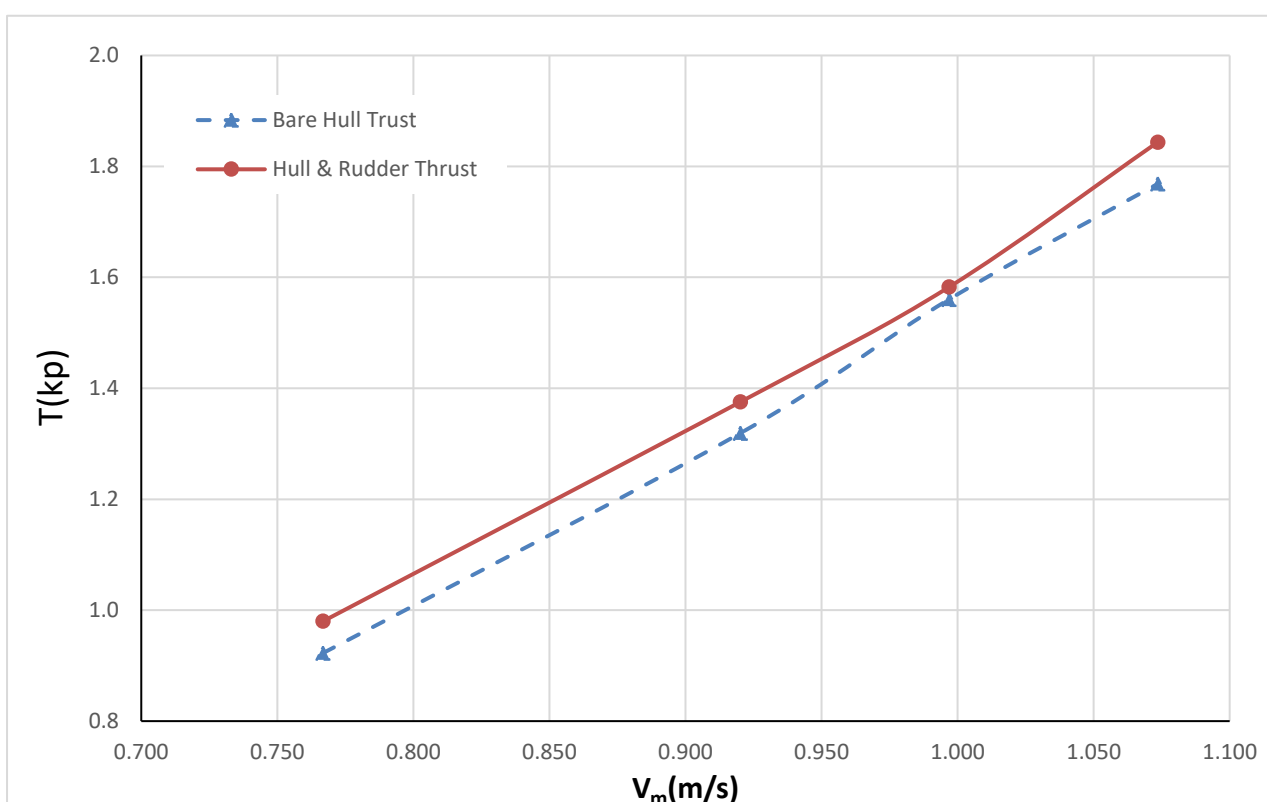
Από τον παραπάνω πίνακα και διάγραμμα φαίνεται πως, παρόλο που οι τιμές της αντίστασης μεταξύ των δυο καταστάσεων δεν διαφέρουν σημαντικά, παρουσιάζεται μια σταθερή αύξηση της αντίστασης 1-2% μετά την τοποθέτηση του πηδαλίου. Το αποτέλεσμα φαντάζει λογικό μιας και επιβάλλεται ουσιαστικά μια ακόμη μεταβολή στην ελεύθερη επιφάνεια λόγω της παρουσίας της υδροτομής του πηδαλίου στον ομόρρου του πλοίου, με το μήκος της ισάλου του μοντέλου να αυξάνει κατά το μήκος του πηδαλίου. Σε αυτή βέβαια την περίπτωση δεν είναι ασφαλές να ληφθεί ο συνολικός αριθμός Re για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής καθώς η ροή και το οριακό στρώμα διακόπτονται στον ομόρρου του πλοίου.

8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΠΡΟΩΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των μετρήσεων στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου πριν και μετά την τοποθέτηση του πηδαλίου για την κάθε ταχύτητα. Στους πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν το σημείο αυτό καθώς και οι συντελεστές αλληλεπίδραση μοντέλου – έλικας, όπως υπολογίστηκαν στο αντίστοιχο τμήμα της μελέτης. Οι διαφορές εκφράζονται στους παρακάτω πίνακες ως ποσοστά και παρουσιάζονται και διαγραμματικά.

V_m (m/s)	Bare Hull	Hull & Rudder	δT %
0,767	0,923	0,980	6%
0,920	1,319	1,376	4%
0,997	1,561	1,583	1%
1,074	1,769	1,844	4%

Πίνακας 8.2 Μεταβολή Ωσης



Διάγραμμα 8.2 Μεταβολή Ωσης Μοντέλου

Παρατηρείται αύξηση της ώσης που αναπτύσσει το μοντέλο στο σημείο αυτοπρόωσης της εκάστοτε ταχύτητας. Γεγονός αναμενόμενο δεδομένου ότι υπάρχει αύξηση στην αντίσταση ρυμούγκησης.

Η σημαντική παρατήρηση στο σημείο αυτό είναι ότι το ποσοστό μεταβολής είναι το διπλάσιο. Δηλαδή της τάξης του 4%. Μια ακόμη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι το ποσοστό αυτό παραμένει σταθερό ανεξαρτήτως ταχύτητας. Το γεγονός αυτό ισχυροποιεί την σκέψη ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ έλικας και πηδαλίου και μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής:

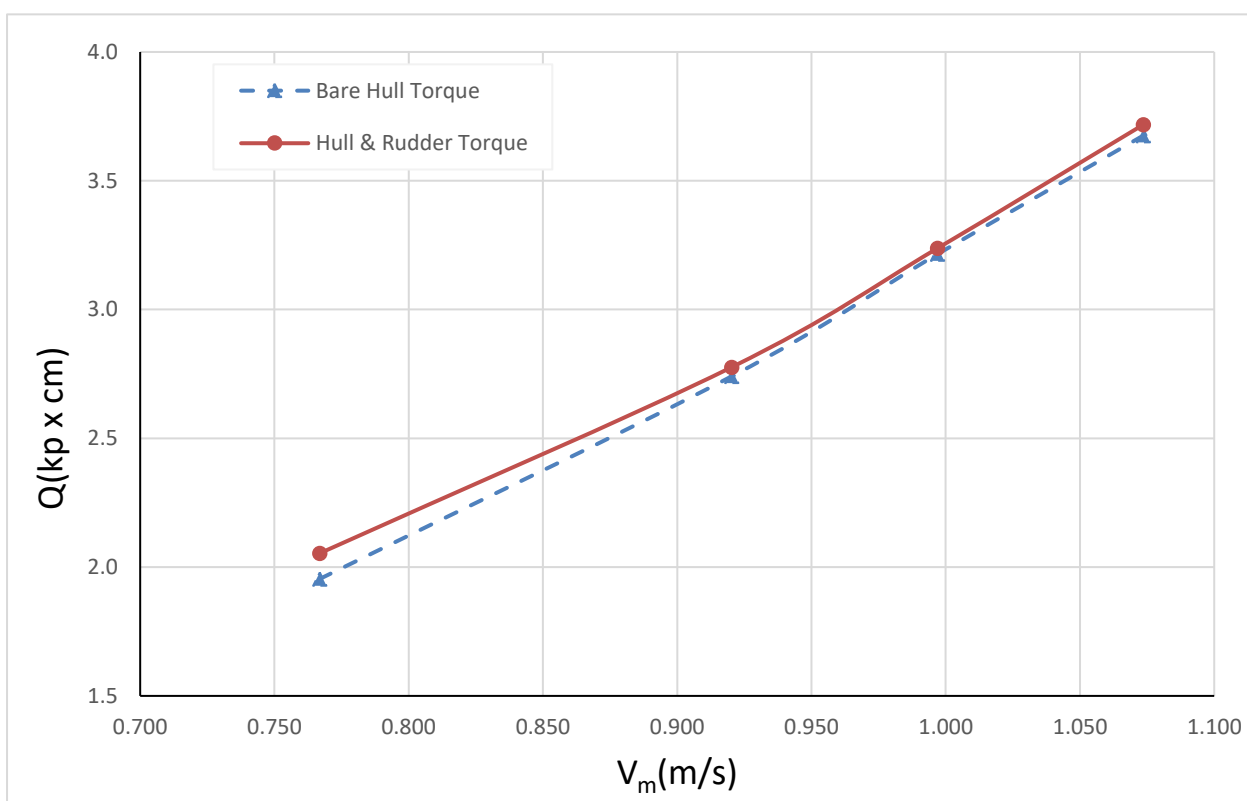
Δίχως την παρουσία του πηδαλίου η ροή μετά την έλικα περιστρέφεται και ωθεί το πλοίο προς τα εμπρός. Με την παρουσία του πηδαλίου η περιστρεφόμενη ροή μετά την έλικα συναντά την υδροτομή του πηδαλίου με αποτέλεσμα να διακόπτεται μερικώς η περιστροφή λόγω της γεωμετρίας του πηδαλίου που επιβάλλει στην ροή να την ακολουθήσει και ως εκ τούτου η ροή εξομαλύνεται. Για αυτό το λόγω η ώση που αναπτύσσεται στο σημείο αυτοπρόωσης είναι αυξημένη.

Η ταχύτητα των 0,997 m/s φαίνεται να παρουσιάζει μια διαφορά συγκριτικά με τις άλλες, γεγονός που οφείλεται σε πιθανές αστοχίες των μετρήσεων. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από την μεγάλη διασπορά που φαίνεται στο αντίστοιχο γράφημα ροπής της αυτοπρόωσης με πηδάλιο(δες διάγραμμα 7.23).

Η αύξηση της ώσης συνεπάγεται επίσης αύξηση των συντελεστών ώσης και ροπής η οποία οδηγεί σε μείωση του συντελεστή προχώρησης και του βαθμού απόδοσης της έλικας του μοντέλου σε ελεύθερη ροή κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και παρακάτω.

$V_m(m/s)$	Bare Hull	Hull & Rudder	δQ %
0,767	1,954	2,054	5%
0,920	2,741	2,776	1%
0,997	3,215	3,238	1%
1,074	3,676	3,718	1%

Πίνακας 8.3 Μεταβολή Ροπής



Διάγραμμα 8.3 Μεταβολή ροπής στην έλικα του μοντέλου

Όπως φαίνεται και διαγραμματικά υπάρχει αύξηση και της ροπής προκειμένου να ανταποκριθεί η προωστήρια εγκατάσταση στις απαιτήσεις της αύξησης της αντίστασης, όπου εδώ αποτυπώνεται πλήρως και με όμοια αναλογία. Η αύξηση αυτή είναι της τάξης του 1% με μεγαλύτερη απαίτηση στην χαμηλότερη ταχύτητα.

Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνεται η μεταβολή των στροφών στο σημείο αυτοπρόωσης

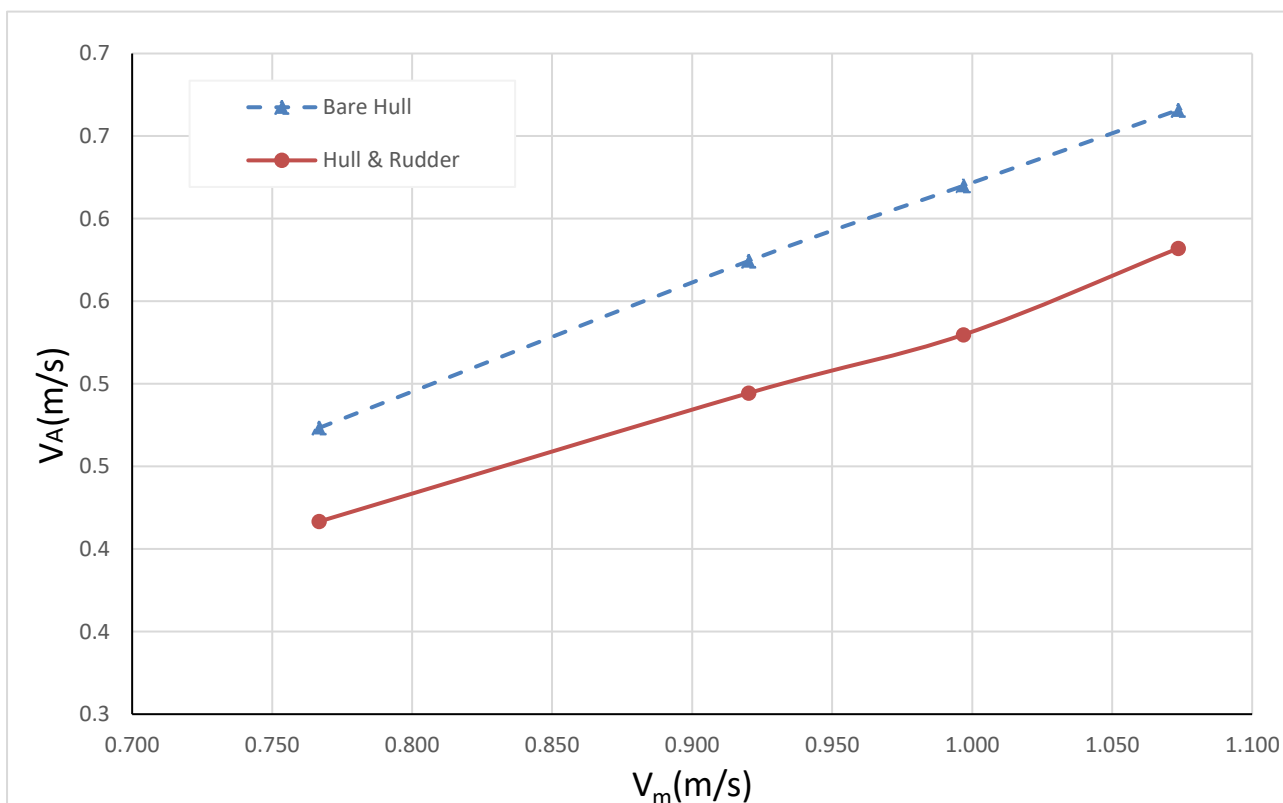
$V_m(m/s)$	Bare Hull	Hull & Rudder	δn %
0,767	482,7	476,8	-1,2%
0,920	578,8	565,8	-2,2%
0,997	628,3	606,3	-3,5%
1,074	670,9	657,1	-2,1%

Πίνακας 8.4 Μεταβολή στροφών σημείου αυτοπρόωσης

Εδώ φαίνεται πως μετά την τοποθέτηση του πηδαλίου μειώθηκαν οι στροφές λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης κατά 1% με 2%, το γεγονός αυτό είναι εξίσου αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της έλικας με το πηδάλιο διότι η ώση που παράγεται στο σημείο αυτοπρόωσης απαιτεί λιγότερες στροφές.

$V_m(m/s)$	Bare Hull	Hull & Rudder	$\delta V_A\%$
0,767	0,473	0,417	-12%
0,920	0,574	0,494	-14%
0,997	0,620	0,530	-14%
1,074	0,666	0,582	-13%

Πίνακας 8.5 Μεταβολή ταχύτητας προχώρησης σημείου αυτοπρόωσης



Διάγραμμα 8.4 Μεταβολή ταχύτητας προχώρησης μοντέλου

Η αύξηση της ώσης που παράγει η έλικα οδηγεί σε μείωση του συντελεστή προχώρησης και ως εκ τούτου σε μείωση της ταχύτητας προχώρησης σε ποσοστό της τάξης του 12% με 14%. Η παρατήρηση αυτή είναι πολύ σημαντική διότι οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η παρουσία του πηδαλίου μετά την έλικα μεταβάλλει το πεδίο πίεσης και ταχύτητας στον ομόρρο του γάστρας και ως εκ τούτου επηρεάζει την συμπεριφορά της έλικας ενώ αλλάζει τις απαιτήσεις πρόωσης. Ουσιαστικά τελικώς απαιτούνται λιγότερες στροφές στο σημείο αυτοπρόωσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί και παραπάνω καθώς και μικρότερη ταχύτητα του ρευστού κατά την είσοδό του στον δίσκο της έλικας.

Η μείωση αυτή της ταχύτητας προχώρησης φανερώνεται και στην αύξηση του συντελεστή ποσοστού ομόρρου και του ποσοστού μείωσης ώσης, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

$V_m(m/s)$	$\delta w\%$	$\delta t\%$
0,767	19%	30%
0,920	23%	18%
1,074	21%	20%

Πίνακας 8.6 Μεταβολή συντελεστών πρόωσης

Εδώ αναφέρεται ότι η τιμή των συντελεστών της ταχύτητας 0,997 m/s δεν παρουσιάζεται εδώ λόγω του προβλήματος μέτρησης και της διασποράς των σημείων.

Για τους βαθμούς απόδοσης του συστήματος όπως αυτοί έχουν οριστεί στο θεωρητικό μέρος προκύπτουν αντίστοιχα οι μεταβολές:

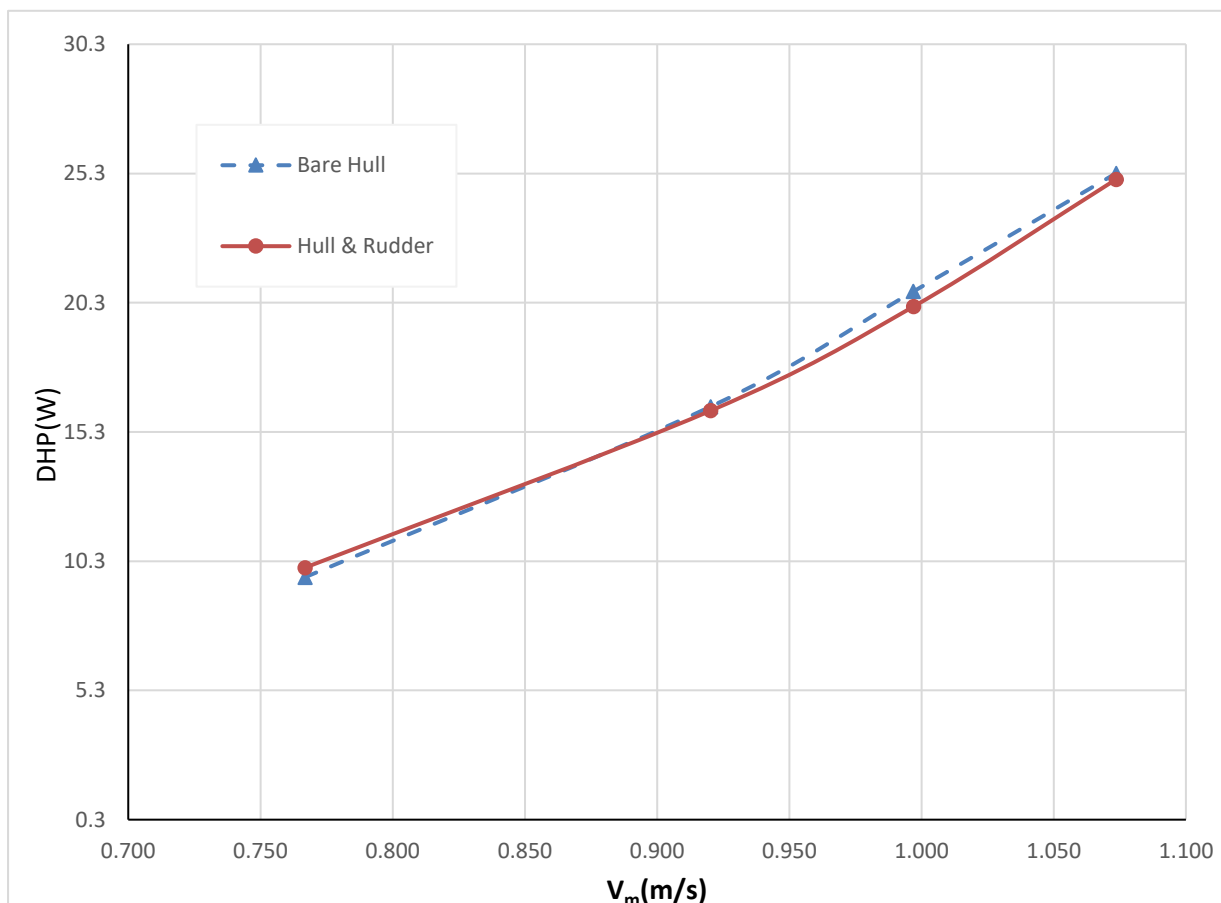
$V_m(m/s)$	$\delta\eta_0\%$	$\delta\eta_R\%$	$\delta\eta_H\%$	$\delta\eta_B\%$
0,767	-8,6%	-1,5%	8%	10%
0,920	-10,1%	0,8%	12%	-9%
0,997	-9,3%	-1,6%	16%	-11%
1,074	-8,6%	0,6%	11%	-8%

Πίνακας 8.7 Μεταβολή βαθμών απόδοσης

Τέλος παρουσιάζεται η μεταβολή στην μεταφερόμενη ισχύ (DHP), δηλαδή την ισχύ που απορροφά η έλικα στις δύο περιπτώσεις. Η ισχύς φαίνεται να είναι στην μικρότερη ταχύτητα αυξημένη, ακολουθώντας την συμπεριφορά της ροπής, όμως στις μεγαλύτερες ταχύτητες είναι μικρότερη καθώς οι στροφές που απαιτούνται στο σημείο αυτοπρόωσης μοντέλου μειώνονται.

$V_m(m/s)$	Bare Hull	Hull & Rudder	$\delta DHP\%$
0,767	9,682	10,052	4%
0,920	16,281	16,123	-1%
0,997	20,735	20,151	-3%
1,074	25,312	25,077	-1%

Πίνακας 8.8 Μεταβολή ισχύος έλικας



Διάγραμμα 8.5 Μεταβολή ισχύος απορροφούμενης από την έλικα του μοντέλου

8.3 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Από τα παραπάνω δύναται να εξαχθούν αρκετά συμπεράσματα σχετικά με την αλληλεπίδραση του πηδαλίου στην λειτουργία της έλικας του μοντέλου στο σημείο αυτοπρώωσης.

Το σημαντικότερο όμως συμπέρασμα από τις πειραματικές μετρήσεις είναι πως η παρουσία του πηδαλίου πρυμναία της έλικας επιδρά στην ροή και στο πεδίο πιέσεων που αναπτύσσεται στον ομόρρου του πλοίου και ως εκ τούτου μεταβάλλει ελαφρώς την λειτουργία του συστήματος πρόωσης. Με την συμβολή του να είναι θετική δεδομένου ότι αυξάνει την παραγόμενη ώση στο σημείο αυτοπρώωσης του μοντέλου και μειώνει τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα.

Οφείλεται όμως να τονισθεί πως τα αποτελέσματα αυτά αφορούν μια συγκεκριμένη θέση του πηδαλίου ως προς την έλικα, την συγκεκριμένη υδροτομή καθώς και την γεωμετρία της πλήμνης της έλικας. Νέες πειραματικές μετρήσεις με μεταβολή των παραγόντων αυτών μπορεί να δώσουν εξίσου ενδιαφέροντα αποτελέσματα και σε κάποιο άλλο εύρος ταχυτήτων. Αυτή η παρατήρηση αποτελεί και την βασική πρόταση του γράφοντος για μελλοντική έρευνα. Επίσης ενδιαφέρουσα θα ήταν και η σχεδίαση πηδαλίων προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ως προς αυτή την αλληλεπίδραση η λειτουργία της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου. Τέλος ως πρόταση προς εξέλιξη της παρούσας μελέτης θα ήταν η μελέτη του φαινομένου της σπηλαιώσης λόγω της παρουσίας του πηδαλίου μετά την έλικα και η σχεδίαση της πλήμνης για την αποτροπή του φαινομένου αυτού.

9. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

9.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ – ΑΦΟΡΜΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθούν και αριθμητικοί υπολογισμοί προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι μετρήσεις που ελήφθησαν από το πείραμα της αντίστασης και αυτοπρόωσης αντίστοιχα αλλά και για να γίνει μια αξιολόγηση της αξιοπιστίας των μεθόδων αυτών σε σχέση με τις πειραματικές που απαιτούν πέραν του εξοπλισμού ειδικές συνθήκες για να πραγματοποιηθούν.

Η μελέτη που ακολουθεί αφορά μία εκ των παραπάνω ταχυτήτων του πειράματος αυτοπρόωσης. Συγκεκριμένα την ταχύτητα μοντέλου ίση με 1,074 m/s.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι διαφορές των αριθμητικών μεθόδων, μεταβάλλοντας κάποιες παραμέτρους, με τις πειραματικές σε αντίστοιχους πίνακες. Σημειώνεται επιπλέον ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα αφορούν αποκλειστικά το μοντέλο χωρίς πηδάλιο.

Για την εκπόνηση της εργασίας τα βασικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τρία. Το πρόγραμμα *Condor.f*, το οποίο χρησιμοποιείται για την γεωμετρική αναπαράσταση της γάστρας του μοντέλου, το πρόγραμμα *Panelw.f*, το οποίο δημιουργεί την ελεύθερη επιφάνεια του νερού γύρω από το μοντέλο και τέλος το πρόγραμμα *Santor.f*, το οποίο εκτελεί τους υπολογισμούς για την αντίσταση και την αυτοπρόωση του μοντέλου. Τα συγκεκριμένα προγράμματα έχουν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ναυτικής & Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.) από τον Καθηγητή Γεώργιο Τζαμπίρα.

Αναφέρεται επίσης ότι όλοι οι υπολογισμοί που θα πραγματοποιηθούν αφορούν την κατάσταση φόρτωσης του μοντέλου όπως περιγράφεται στο πειραματικό μέρος.

9.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΡΟΩΝ [2],[3]

Το αίτιο ανάπτυξης αριθμητικών μεθόδων για την επίλυση προβλημάτων ναυτικής υδροδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) είναι το γεγονός ότι τα προβλήματα αυτά χαρακτηρίζονται από αδιάστατους αριθμούς Reynolds και Froude οι οποίοι δεν μπορούν να προσομοιωθούν συγχρόνως για πλοίο και μοντέλο σε πειραματικές δεξαμενές. Απαιτείται η τροποποίηση των συντελεστών που μετρούνται πειραματικά με αποτέλεσμα αυτή η επίδραση της κλίμακας να εισάγει τελικά μια αβεβαιότητα στα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων αφού οι μετατροπές βασίζονται σε εμπειρικές υποθέσεις. Δημιουργείται ως εκ τούτου η ανάγκη ανάπτυξης αριθμητικών μεθόδων επίλυσης τέτοιων προβλημάτων που οδηγούν σε αξιόπιστα αποτελέσματα ενώ αίρεται και η απαίτηση χρήσης ειδικού εξοπλισμού και μοντέλων. Η επίλυση των προβλημάτων αυτών βασίζεται στην παρακάτω μεθοδολογία.

Το πεδίο ροής γύρω από ένα πλοίο χαρακτηρίζεται από τις εξισώσεις Navier - Stokes (N-S) και την εξίσωση συνέχειας.

Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho u_2) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\rho u_3) = 0$$

όπου για πεδίο σταθερής πυκνότητας ισχύει:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

Εξίσωση ορμής (Navier-Stokes)

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho X_i + \frac{\partial \sigma_{i1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{i2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{i3}}{\partial x_3}$$

Όπου, X_i : εξωτερική δύναμη.

Η παραπάνω σχέση για ασυμπίεστο ρευστό σταθερής πυκνότητας (ουσιαστικά σε σταθερό εύρος θερμοκρασιών) γράφεται στην παρακάτω μορφή για κάθε συντεταγμένη i :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_1 u_i)}{\partial x_1} + \frac{\partial(u_2 u_i)}{\partial x_2} + \frac{\partial(u_3 u_i)}{\partial x_3} = X_i - \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{i1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{i2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{i3}}{\partial x_3} \right]$$

Συνεπώς προκύπτει ένα σύστημα τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους (u_1, u_2, u_3, p) με δυσκολίες στην αριθμητική επίλυση λόγω της τυρβώδους ροής γύρω από το μοντέλο η οποία συνεπάγεται υψηλούς αριθμούς Reynolds, της μη μόνιμης δράσης της έλικας και της ύπαρξης ελεύθερης επιφάνειας.

Η τύρβη συνιστά την υπέρθεση ενός ακανόνιστου και ταλαντευόμενου πεδίου ταχυτήτων πάνω σε μια ροή, όπου για υψηλούς αριθμούς Reynolds είναι έντονη με αντίστοιχο ανομοιόμορφο προφίλ της ταχύτητας. Ως εκ τούτου για την επίλυση των εξισώσεων απαιτούνται τεράστιες δυνατότητες διακριτοποίησης προκειμένου να προσεγγιστούν ικανοποιητικά όλες οι κλίμακες του μη μόνιμου φαινομένου της τύρβης. Για τον λόγο αυτό μέσω της ανάπτυξης μοντέλων τύρβης και απλοποιητικών παραδοχών προσεγγίζονται κατά το δυνατόν, με ικανοποιητική ακρίβεια, οι παράμετροι της ροής δίχως να λυθεί το πλήρες υδροδυναμικό πρόβλημα.

Αρχικά υποτίθεται πως ένα βαθμωτό μέγεθος Φ αναλύεται ως εξής:

$$\Phi(t) = \bar{\Phi} + \Phi'$$

Όπου:

$\bar{\Phi}$: η εναλλασσόμενη συνιστώσα και η μέση τιμή η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \Phi(t) dt$$

Όπου:

$\delta t = t_2 - t_1$ ο χρόνος ολοκλήρωσης, ο οποίος θεωρείται αρκετά μεγαλύτερος από την κλίμακα χρόνου της τυρβώδους κίνησης.

Με αντικατάσταση στα παραπάνω προκύπτουν οι σχέσεις:

Εξίσωση συνέχειας για ασυμπίεστο ρευστό

$$\frac{\partial(\bar{u}_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\bar{u}_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\bar{u}_3)}{\partial x_3} = 0$$

Εξίσωση ορμής

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}_1 \bar{u}_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\bar{u}_2 \bar{u}_1)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\bar{u}_3 \bar{u}_1)}{\partial x_3} = \\ & = X_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\nu \left(\frac{\partial(\bar{u}_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\bar{u}_2)}{\partial x_1} \right) - \overline{u_1' u_1'} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\nu \left(\frac{\partial(\bar{u}_1)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\bar{u}_2)}{\partial x_1} \right) - \overline{u_1' u_2'} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\nu \left(\frac{\partial(\bar{u}_1)}{\partial x_3} + \frac{\partial(\bar{u}_3)}{\partial x_1} \right) - \overline{u_1' u_3'} \right] \end{aligned}$$

Οι διπλές συσχετίσεις των εναλλασσόμενων τιμών της ταχύτητας $-\overline{u_1' u_j'}$ που εμφανίζονται ονομάζονται τάσεις Reynolds και σύμφωνα με τον Bousinesq μοντελοποιούνται ως εξής:

$$-\overline{u_1' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial(\bar{u}_1)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\bar{u}_j)}{\partial x_1} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

Όπου:

ν_t : η τυρβώδης συνεκτικότητα και ο υπολογισμός αυτής χαρακτηρίζει το εκάστοτε μοντέλο τύρβης

k : η κινητική ενέργεια της τύρβης

Ο παράγοντας k ορίζεται ως εξής :

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2})$$

Το δημοφιλέστερο μοντέλο τύρβης που οδηγεί σε κλειστό σύστημα εξισώσεων και μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά είναι το k - ε , όπου ε ο ρυθμός καταστροφής της κινητικής ενέργειας ο οποίος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon = \nu \left[\frac{\partial(u_i')}{\partial x_j} \left(\frac{\partial(u_i')}{\partial x_j} + \frac{\partial(u_j')}{\partial x_i} \right) \right]$$

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η τυρβώδης συνεκτικότητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\nu_t = f_\mu C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Όπου:

$C_\mu=0,09$

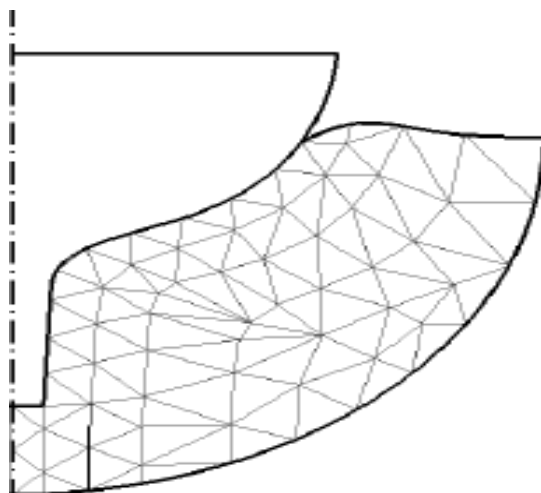
f_μ : Συνάρτηση ανάλογα με την παραλλαγή του μοντέλου.

9.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ [2]

Προκειμένου να προκύψουν αποτελέσματα από την υδροδυναμική μελέτη πρέπει οι παραπάνω εξισώσεις να επιλυθούν στις τρεις διαστάσεις. Για τον λόγο αυτό οι εξισώσεις *Navier - Stokes* καθώς και η *εξίσωση συνέχειας* ολοκληρώνονται σε κατάλληλους όγκους.

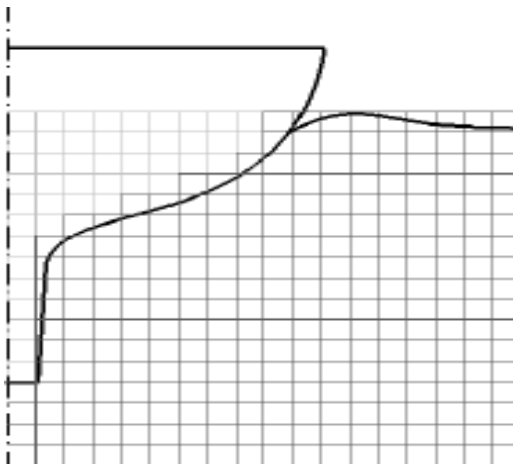
Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής απαιτείται η κατασκευή κατάλληλου αριθμητικού πλέγματος γύρω από το μοντέλο. Δηλαδή γεννάται η ανάγκη, η περιοχή του ρευστού γύρω από το μοντέλο να χωριστεί σε όγκους των οποίων οι έδρες εφάπτονται μεταξύ τους. Στην περίπτωση του σχήματος του πλοίου, το οποίο συνιστά περίπλοκη γεωμετρία, η κατασκευή τέτοιων πλεγμάτων είναι μια περίπλοκη διαδικασία.

Τα αριθμητικά πλέγματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα *Δομημένα* και τα *Μη Δομημένα*. Η βασική τους διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι τα δομημένα πλέγματα συνίστανται από τετράπλευρα τα οποία ορίζονται μονοσήμαντα από δύο ακέραιους δείκτες i, j (στην περίπτωση τρισδιάστατων πλεγμάτων από τρεις δείκτες i, j, k) ενώ τα μη δομημένα πλέγματα μπορεί να αποτελούνται από διαφορετικά σχήματα (τρίγωνα, τετράπλευρα, εξαέδρα κλπ.) με αποτέλεσμα να μπορούν να περιγράψουν οποιαδήποτε γεωμετρία. Παρ' όλα αυτά οι πίνακες που προκύπτουν από τη χρήση των μη δομημένων πλεγμάτων δεν έχουν εξαρχής γνωστή δομή εφόσον δεν μπορούν οι κόμβοι να αναπαρασταθούν από δείκτες, όπως συμβαίνει στα δομημένα πλέγματα. Για τον λόγο αυτό όταν απαιτείται ακρίβεια στους υπολογισμούς προτιμώνται τα δομημένα πλέγματα παρά την δυσκολία τους να περιγράψουν περίπλοκες γεωμετρίες



Εικόνα 9.3 Μη δομημένο πλέγμα γύρω από νομέα

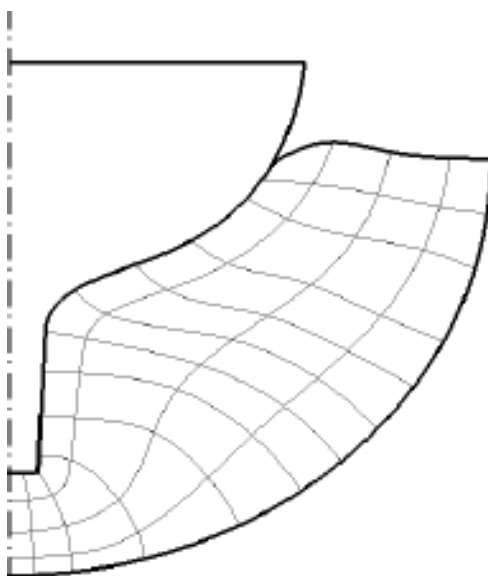
Μια κατηγορία δομημένων πλεγμάτων είναι τα καρτεσιανά ορθογώνια πλέγματα τα οποία αποτελούνται από ορθογώνια παραλληλόγραμμα σε δύο ή ορθογώνια παραλληλεπίπεδα σε τρεις διαστάσεις και όσο εύκολο είναι να κατασκευαστούν τόσο δύσκολο είναι να περιγράψουν οποιαδήποτε γεωμετρία.



Εικόνα 9.4 Καρτεσιανό ορθογώνιο πλέγμα γύρω από νομέα

Τα καρτεσιανά μη ορθογώνια πλέγματα αποτελούνται από τετράπλευρα σε δύο ή εξάεδρα σε τρεις διαστάσεις. Η κατασκευή τους για σύνθετες γεωμετρίες είναι εύκολη αλλά έχουν μειωμένη ακρίβεια λόγω της μη ορθογωνιότητας.

Μια ακόμη κατηγορία δομημένων πλεγμάτων είναι τα καμπυλόγραμμα πλέγματα. Τα πλέγματα αυτά μπορούν να είναι και ορθογώνια, δηλαδή οι πλεγματικές γραμμές τους να τέμνονται κάθετα. Με ορθογώνια καμπυλόγραμμα πλέγματα επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια αλλά η περιγραφή περίπλοκης γεωμετρίας (γάστρα πλοίου με παρελκόμενα) με ένα μόνο πλέγμα παραμένει ένα άλυτο πρόβλημα.



Εικόνα 9.5 Καμπυλόγραμμα πλέγμα γύρω από νομέα

Το τελικό αριθμητικό πλέγμα που παράγεται γύρω από την γάστρα του πλοίου στα πλαίσια της μελέτης αποτελείται από δισδιάστατα ορθογώνια καμπυλόγραμμα πλέγματα, κάθε ένα από τα οποία δημιουργείται μέσω της σύμμορφης απεικόνισης της αντίστοιχης τομής σε κύκλο, προκειμένου να λυθούν οι μέσες χρονικά εξισώσεις Navier-Stokes. Το πρόγραμμα **Condor.f**, αποτελεί το βασικό μέσο που χρησιμοποιήθηκε για την αναπαράσταση της γεωμετρίας της γάστρας σε μία μορφή που να είναι συμβατή για τα μοντέλα επίλυσης.

Συγκεκριμένα η λειτουργία του **Condor.f**, αφορά κυρίως στον μετασχηματισμό των εγκάρσιων νομέων του πλοίου σε μοναδιαίο κύκλο. Η γενική μορφή του σύμμορφου μετασχηματισμού για ένα νομέα πλοίου γράφεται ως εξής:

$$z = c_0 + c_{-1}\zeta + \sum_{n=1}^N c_n \zeta^{-n}$$

Όπου:

ζ : το μιγαδικό επίπεδο του μοναδιαίου κύκλου

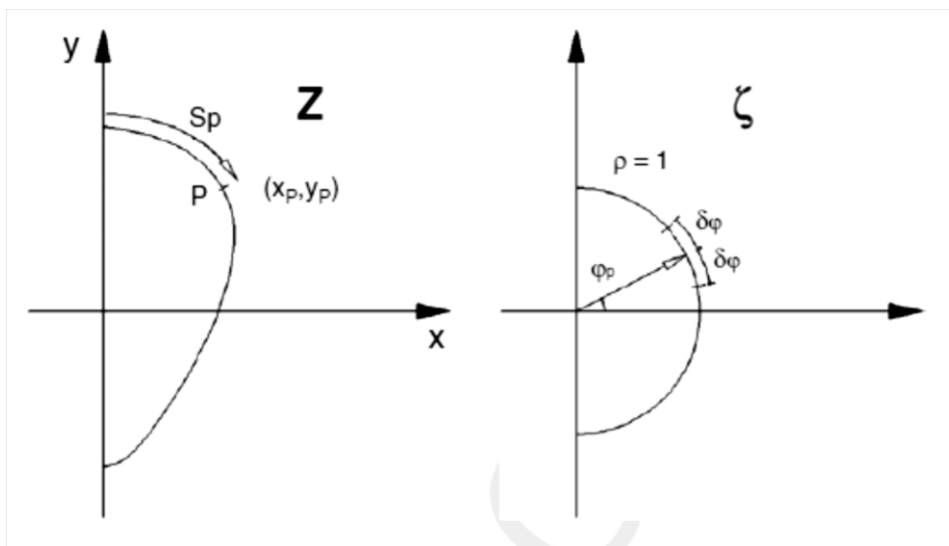
z : το μιγαδικό επίπεδο του νομέα.

Όταν η καμπύλη είναι συμμετρική στον άξονα y (νομέας πλοίου) τότε οι συντελεστές C_n απλοποιούνται στους πραγματικούς a_n και το πραγματικό και φανταστικό μέρος του z γίνεται:

$$x = a_{-1} \cos \varphi + \sum_{n=1}^N a_n \cos(-n \varphi) \quad \text{και} \quad y = a_0 + a_{-1} \sin \varphi + \sum_{n=1}^N a_n \sin(-n \varphi)$$

Το περίγραμμα της εκάστοτε τομής ορίζεται από έναν αριθμό σημείων (x,y) που αντιστοιχούν σε γωνίες φ πάνω στο μοναδιαίο κύκλο.

Στις παραπάνω εξισώσεις η γωνία φ αντιπροσωπεύει το σημείο (x,y) στο επίπεδο του μοναδιαίου κύκλου ενώ οι συντελεστές a_n μπορούν να υπολογιστούν όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 9.6 Ο σύμμορφος μετασχηματισμός νομέα πλοίου στο μοναδιαίο κύκλο

$$a_0^{(1)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x(\varphi) d\varphi$$

$$a_{-1}^{(1)} + a_1^{(1)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} x(\varphi) \cos \varphi d\varphi$$

$$a_n^{(1)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} x(\varphi) \cos(n\varphi) d\varphi, n > 2$$

ή

$$a_0^{(2)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} y(\varphi) d\varphi$$

$$a_{-1}^{(2)} + a_1^{(2)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(\varphi) \sin \varphi d\varphi$$

$$a_n^{(2)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(\varphi) \sin(n\varphi) d\varphi, n > 2$$

Μέσω των παραπάνω εξισώσεων οι συντελεστές a_n μπορούν να υπολογιστούν με δύο τρόπους οι οποίοι οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα. Ωστόσο επειδή σε πραγματικές εφαρμογές υπάρχει πεπερασμένος αριθμός σημείων N οι παραπάνω σχέσεις οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη απεικόνιση ενός δισδιάστατου πλέγματος χρησιμοποιείται η παρακάτω γραμμική σχέση παρεμβάλλοντας τις παραπάνω εξισώσεις:

$$a_n = r a_n^{(1)} + (1 - r) a_n^{(2)}, n=1, \dots, N$$

Όπου ο συντελεστής βάρους r ορίζεται ελαχιστοποιώντας το συνολικό σφάλμα:

$$E_t = \sum_P [(x_P - x_{aP})^2 + (y_P - y_{aP})^2]$$

Όπου P είναι ο αριθμός των σημείων (x_P, y_P) που περιγράφουν το περίγραμμα του νομέα και (x_{aP}, y_{aP}) οι αντίστοιχες αναλυτικές εκφράσεις.

Εισάγοντας τον συντελεστή βάρους r στις εξισώσεις προκύπτουν οι σχέσεις :

$$x_{aP} = [r a_{-1}^{(1)} + (1 - r) a_{-1}^{(2)}] \cos \varphi_P + \sum_{n=1}^N [r a_n^{(1)} + (1 - r) a_n^{(2)}] \cos(-n \varphi_P)$$

$$y_{aP} = [r a_0^{(1)} + (1 - r) a_0^{(2)}] + [r a_{-1}^{(1)} + (1 - r) a_{-1}^{(2)}] \sin \varphi_P + \sum_{n=1}^N [r a_n^{(1)} + (1 - r) a_n^{(2)}] \sin(-n \varphi_P)$$

Ο συντελεστής βάρους r προκύπτει επιλύοντας την γραμμική εξίσωση:

$$\frac{\partial E_t}{\partial r} = 0$$

Ο υπολογισμός των παραπάνω εξισώσεων προϋποθέτει τον υπολογισμό της γωνίας φ_P , της γωνίας δηλαδή που αντιπροσωπεύει τα σημεία P στο επίπεδο του κύκλου. Η γωνία αυτή προσδιορίζεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η απόσταση μεταξύ ενός σημείου και της αναλυτικής απεικόνισής του, αυξάνοντας την γωνία φ μονοτονικά. Η διαδικασία είναι η παρακάτω.

Αρχικά υποτίθεται ότι η γωνία είναι μια συνάρτηση του S_P , όπου S είναι το περίγραμμα του νομέα υπολογιζόμενο ως εξής:

$$S_P = S_{P-1} + \sqrt{(x_P - x_{P-1})^2 + (y_P - y_{P-1})^2}$$

Στη συνέχεια, εισάγοντας μια σειρά γνωστών γωνιών φ_i , οι τιμές S_i υπολογίζονται αναλυτικά μέσω του σύμμορφου μετασχηματισμού. Έπειτα, οι γωνίες φ_P καθορίζονται μέσω γραμμικής παρεμβολής ή παρεμβολής μέσω κυβικών splines. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται στα ενδιάμεσα στάδια της επαναληπτικής διαδικασίας καθώς η προσέγγιση του S_P εφαρμόζεται μεταξύ σημείων. Στην τελευταία επανάληψη της διαδικασίας, στην περίπτωση που δεν έχει περατωθεί νωρίτερα από το όριο που έχει οριστεί για το σφάλμα και έχει ληφθεί η μέγιστη τιμή του αριθμού των συντελεστών που έχουν επιλεγεί, εφαρμόζεται μία ακόμα διαδικασία που υπολογίζει την τιμή της φ_P με βάση την ελάχιστη απόσταση του σημείου P από την αναλυτική αναπαράσταση του νομέα από τον σύμμορφο μετασχηματισμό στο εύρος $[\varphi_P - \delta\varphi, \varphi_P + \delta\varphi]$, όπου $\delta\varphi \approx 0,1\pi$.

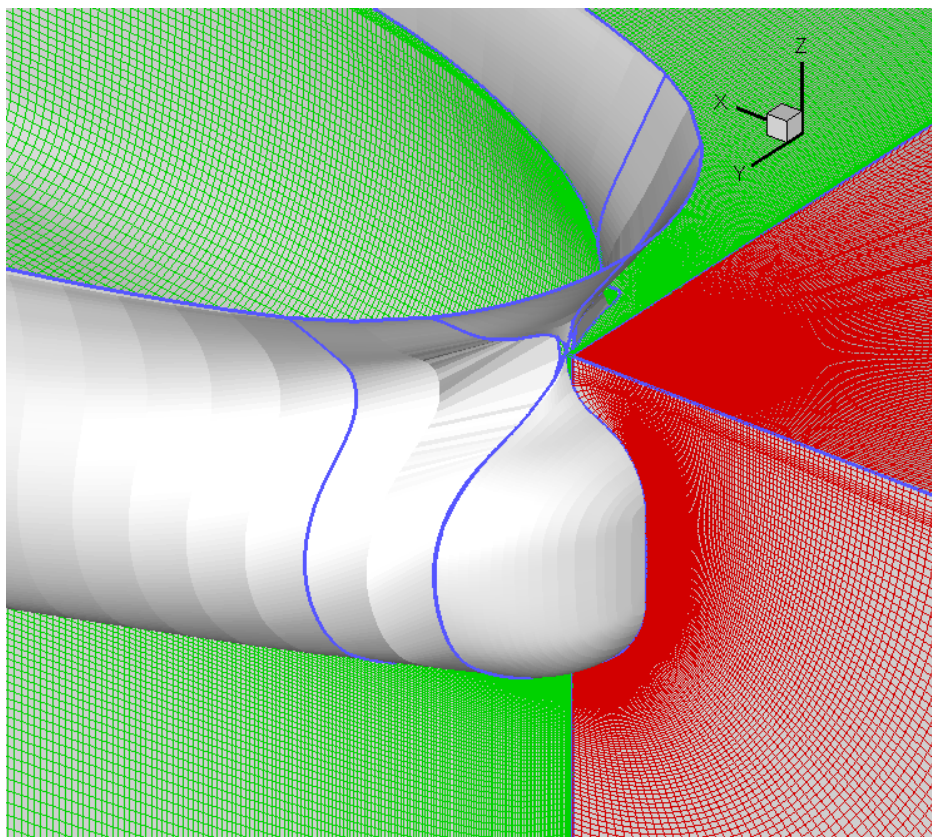
Για μια τυπική μορφή πλοίου, η οποία είναι επίσης συμμετρική και κατά τον άξονα xz' η γενική σχέση του σύμμορφου μετασχηματισμού απλοποιείται στην παρακάτω:

$$z = \sum_{n=1}^N a_n \zeta^{3-2n}$$

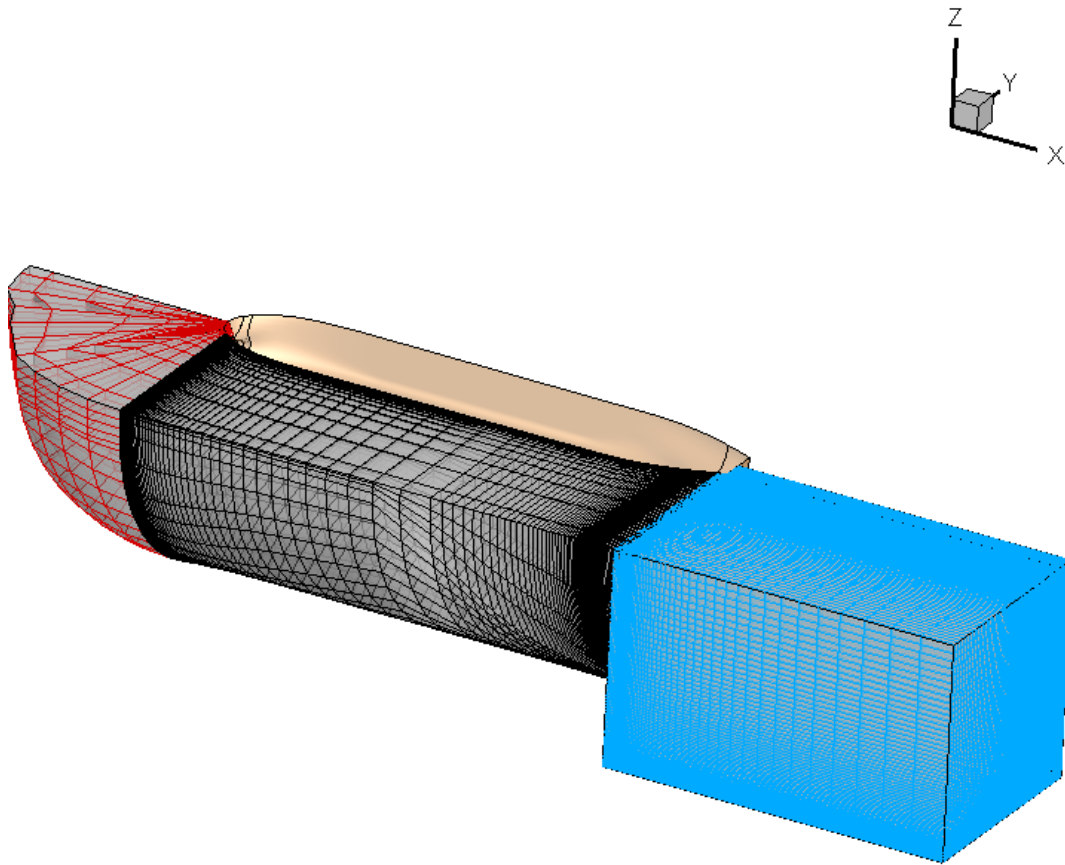
Αφού η διαδικασία ολοκληρωθεί μπορεί να δημιουργηθεί ένα δισδιάστατο ορθογώνιο καμπυλόγραμμο πλέγμα στο επίπεδο του κύκλου που αντιπροσωπεύει το αντίστοιχο επίπεδο για τον κάθε νομέα.

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός, δηλαδή η μεταφορά από το επίπεδο του κύκλου στο επίπεδο του νομέα είναι επίσης σύμμορφος με αποτέλεσμα το ορθογώνιο καμπυλόγραμμο πλέγμα που έχει σχηματιστεί γύρω από το επίπεδο του κύκλου να μπορεί τελικά να μεταφερθεί μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού στο επίπεδο του νομέα και να παραμένει ορθογώνιο καμπυλόγραμμο. Το τρισδιάστατο πλέγμα που αφορά την γάστρα του πλοίου θα προκύψει ενώνοντας τους σχετικούς κόμβους των πλεγμάτων των νομέων. Το πλέγμα που θα προκύψει στην πραγματικότητα δεν θα είναι ορθογώνιο καμπυλόγραμμο αλλά λόγω της μορφής της γάστρας μπορεί να θεωρηθεί πως η μορφή του πλεγματος προσεγγίζεται ικανοποιητικά από ένα ορθογώνιο καμπυλόγραμμο πλέγμα.

Στις επόμενες δυο εικόνες φαίνονται το τρισδιάστατο πλέγμα που έχει παραχθεί στην πλήρη και πίσω από αυτήν. Το πλέγμα αυτό είναι εν μέρει ορθογώνιο καμπυλόγραμμο στο κατώτερο μέρος του ενώ είναι μη ορθογώνιο στο ανώτερο προκειμένου να προσαρμοστεί με την ελεύθερη επιφάνεια.



Εικόνα 9.7



Εικόνα 9.8

9.4 ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ [10]

Για το σύνθετο πρόβλημα, όπως περιεγράφηκε παραπάνω γίνονται κάποιες απλουστευτικές παραδοχές προκειμένου να είναι δυνατή η επίλυση. Το πεδίο ροής, όπως αναφέρθηκε, περιγράφεται από τις μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις *Navier-Stokes* και την *εξίσωση συνέχειας*. Μία αποτελεσματική προσέγγιση που έχει αναπτυχθεί για τον υπολογισμό του συνολικού προβλήματος βασίζεται στην αποσύζευξη του. 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 ενώ επιπλέον επιτρέπει την εφαρμογή πολύ πυκνότερων πλεγμάτων τα οποία είναι απαραίτητα για την επίτευξη αντικειμενικών αποτελεσμάτων.

Η ελεύθερη επιφάνεια που προκύπτει από τη δυναμική λύση αγνοεί τις επιδράσεις της συνεκτικότητας στις περιοχές της πρύμνης και του ομόρρου γεγονός που διαφοροποιεί λίγο το πρόβλημα από το πλήρες (*viscus flow*), όμως δεν μεταβάλλει σοβαρά τα αποτελέσματα της μελέτης.

9.4.1 ΑΡΘΙΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ [2], [3], [14]

Ως εκ τούτου στα πλαίσια δυναμικής ροής θεωρώντας το ρευστό ασυμπίεστο και ατριβές οι εξισώσεις απλοποιούνται σε εξισώσεις *Euler*. Εάν επίσης θεωρηθεί αστρόβιλο τότε περιγράφονται από μια εξίσωση *Laplace*. Ο τελικός υπολογισμός της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας στο χρόνο, όπως αναφέρεται και παρακάτω, θα γίνει μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας.

Η τελική μορφή των εξισώσεων (*Εξισώσεις Euler*), βάσει αυτών είναι η παρακάτω:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_x}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot u_x \cdot U) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \cdot \text{grad} u_x) + S_{Mx} & \frac{\partial u_x}{\partial t} + \text{div}(u_x U) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial \rho u_y}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot u_y \cdot U) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \cdot \text{grad} u_y) + S_{My} & \frac{\partial u_y}{\partial t} + \text{div}(u_y U) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial \rho u_z}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot u_z \cdot U) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \cdot \text{grad} u_z) + S_{Mz} & \frac{\partial u_z}{\partial t} + \text{div}(u_z U) &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned}$$

Η εξίσωση συνέχειας απλοποιείται στην παρακάτω μορφή:

$$\text{div}(U) = 0$$

Για την επίλυση των εξισώσεων απαιτούνται οι οριακές συνθήκες σε όλο το σύνορο S του πεδίου:

$$U \cdot n|_S = F$$

Όπου:

n : Το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα σε κάποιο σημείο του S

$F=F(x,t)$: Μια γνωστή συνάρτηση της θέσης πάνω στο S και του χρόνου.

Στο πρόβλημα όμως τα σύνορα θεωρούνται ακίνητα, συνεπώς:

$$U \cdot n|_S = 0$$

Επιπλέον χρειάζεται και κατάλληλη συνθήκη στο άπειρο.

Οι παραπάνω εξισώσεις ορίζουν ένα ασυμπίεστο και ατριβές πεδίο. Ως εκ τούτου, το άνωσμα της ταχύτητας ισούται με την αρνητική κλίση μιας βαθμωτής συνάρτησης δυναμικού Φ .

$$U = -\nabla \Phi$$

Η στροβιλότητα ενός δυναμικού πεδίου ισούται με μηδέν:

$$\nabla \times U = 0$$

Συνεπώς ένα πεδίο δυναμικού είναι ένα αστρόβιλο πεδίο.

Σύμφωνα με τη θεωρία των *Hess & Smith* (*Hess & J.L.Smith, 1966*) το άνωσμα της ταχύτητας U εκφράζεται ως το άθροισμα της ταχύτητας του πεδίου στο άπειρο και της διαταραχής λόγω παρουσίας του συνόρου:

$$U = U_\infty + u$$

Θεωρούμε ότι η διαταραχή της ταχύτητας είναι δυναμικό πεδίο:

$$u = -\text{grad}(\varphi)$$

Συνεπώς η u ικανοποιεί την απλουστευμένη εξίσωση συνέχειας:

$$\text{div}(u) = 0$$

Το δυναμικό Φ της διαταραχής ικανοποιεί την εξίσωση Laplace με τις αντίστοιχες οριακές συνθήκες:

$$\nabla^2 \phi = 0 \qquad \text{grad} \phi \cdot \mathbf{n}|_S = \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}}|_S = U_\infty \cdot \mathbf{n}|_S$$

$$|\text{grad} \phi| \rightarrow 0$$

Για τον υπολογισμό της πίεσης χρησιμοποιείται η εξίσωση Bernoulli:

$$p - p_\infty = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (|U_\infty|^2 - |U|^2)$$

Όπου:

p_∞ η πίεση στο άπειρο.

Θεωρείται ότι το σύνορο S του πεδίου, το οποίο αποτελείται από τη βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου και την ελεύθερη επιφάνεια, χαρακτηρίζεται από μία κατανομή της έντασης του δυναμικού $\sigma(q)$, όπου το q είναι κάποιο σημείο του S .

Για να ικανοποιηθούν οι οριακές συνθήκες της εξίσωσης Laplace πρέπει να ικανοποιείται η εξίσωση:

$$2\pi \cdot \sigma(q) - \iint \frac{\partial}{\partial n} \cdot \frac{\sigma(q)}{r(p,q)} dS = n(p) \cdot U_\infty$$

Όπου η ποσότητα $r(p,q)$ είναι η απόσταση δύο σημείων p και q , για ένα οποιοδήποτε σημείο p με συντεταγμένες x, y, z και αντίστοιχα σημείου q με συντεταγμένες x_q, y_q, z_q . Δηλαδή:

$$r(p,q) = \sqrt{(x - x_q)^2 + (y - y_q)^2 + (z - z_q)^2}$$

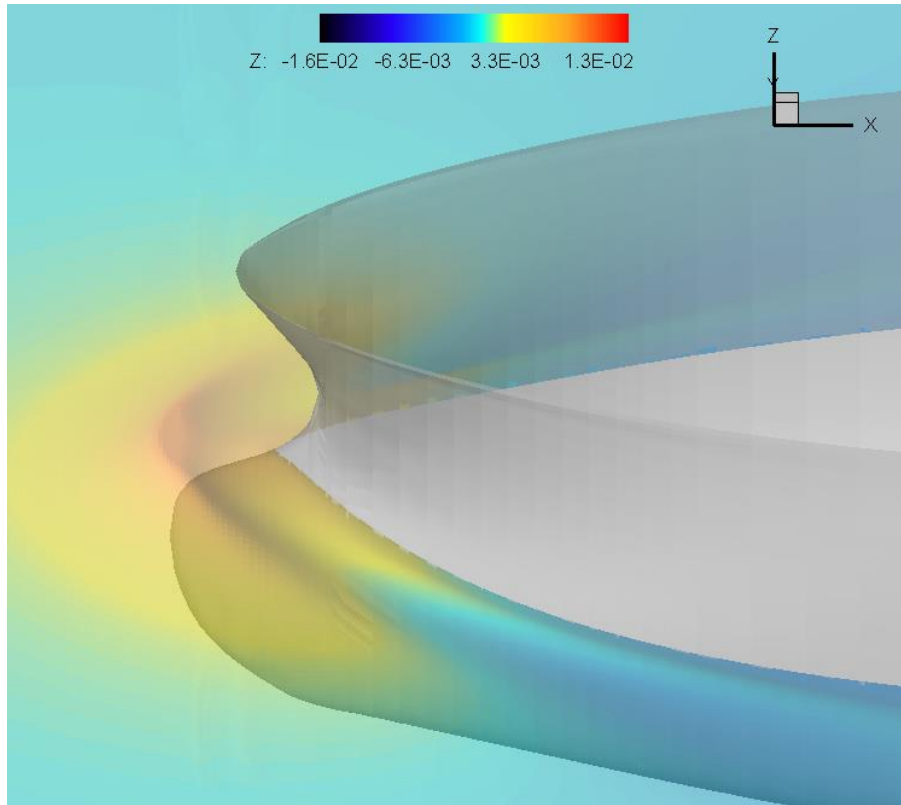
Όπου λόγω της θεώρησης συνεχούς πηγής κατανομής το δυναμικό είναι ίσο με:

$$\phi = \iint \frac{\sigma(q)}{r(p,q)} dS$$

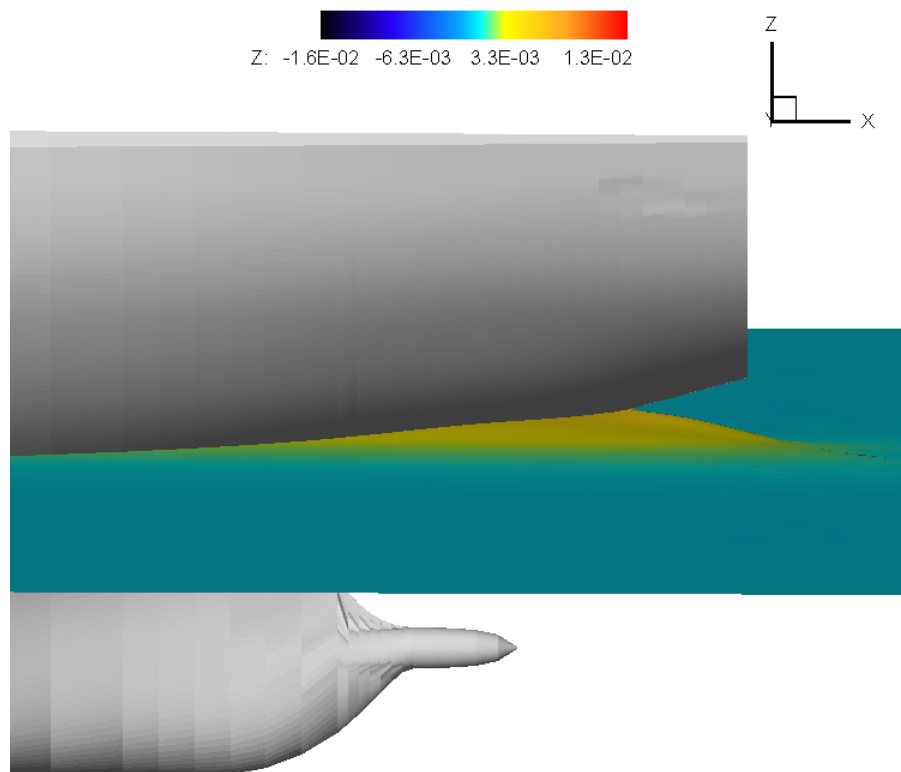
Για την επίλυση του παραπάνω η εξίσωση πρέπει να διακριτοποιηθεί προκειμένου να προκύψει ένα σύστημα γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Το σύνορο S θεωρείται ότι αποτελείται από N , μικρά σε μέγεθος, επίπεδα στοιχεία. Κάθε στοιχείο αντιπροσωπεύεται από ένα σημείο ελέγχου και το δυναμικό έχει σταθερή ένταση σε όλη την επιφάνεια του στοιχείου. Στην συνέχεια η εξίσωση ολοκληρώνεται αναλυτικά σε κάθε επιμέρους στοιχείο και με αυτό τον τρόπο προκύπτει ένα σύστημα $N \times N$ εξισώσεων για την ένταση του δυναμικού σε κάθε στοιχείο. Από την επίλυση του συστήματος υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας σε κάθε στοιχείο και σύμφωνα με την *εξίσωση Bernoulli* υπολογίζεται και η πίεση.

Η παραπάνω μέθοδος έχει ως βασική προϋπόθεση ότι το σύνορο S είναι γνωστό. Αυτό όμως δεν είναι δυνατό σε προβλήματα ροής στην ελεύθερη επιφάνεια και για το λόγο αυτό απαιτείται να εφαρμοστεί μία επαναληπτική διαδικασία για τον προσδιορισμό της ελεύθερης επιφάνειας.

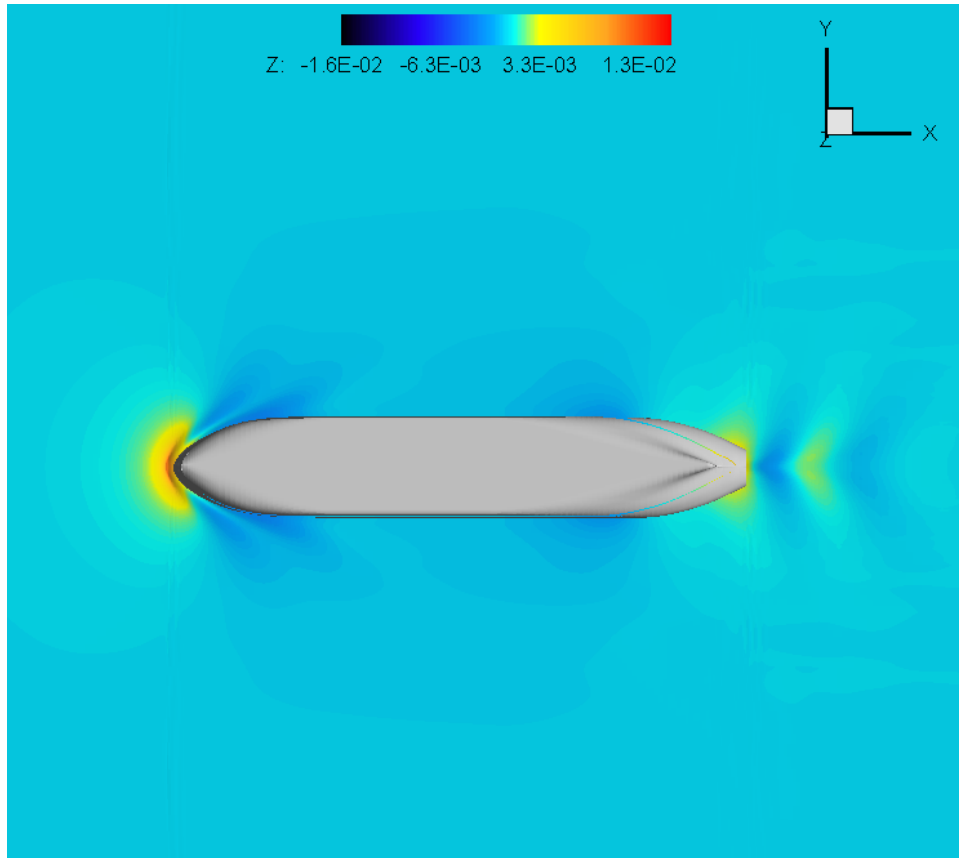
Το πρόβλημα τελικώς επιλύεται με βάση μία επαναληπτική διαδικασία για τον υπολογισμό της. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία πραγματοποιείται μέσω του προγράμματος **Panelw.f**. Μετά την χρήση του προγράμματος υπολογισμού της ελεύθερης επιφάνειας με βάση την θεωρία δυναμικού (*potential flow*) προέκυψαν τα ακόλουθα σχήματα:



Εικόνα 9.7 – Κύμα στην πλώρη με χρήση potential flow



Εικόνα 9.8 – Κύμα στην πρόμνη με χρήση potential flow



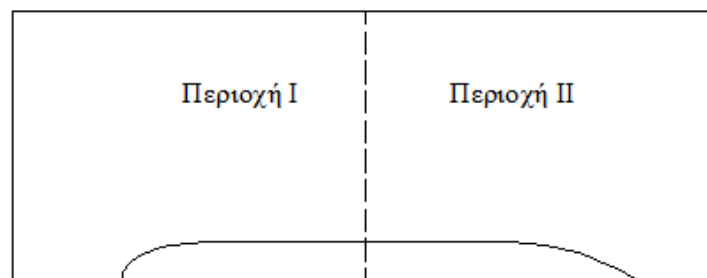
Εικόνα 9.9 – Ελεύθερη επιφάνεια γύρω από το μοντέλο με χρήση potential flow

Στην Εικόνα 9.7 φαίνεται το κύμα της πλήρης που δημιουργείται λόγω της κίνησης του μοντέλου στο νερό και επάγει την αντίσταση κυματισμού, στην Εικόνα 9.8 το κύμα που δημιουργείται στην πρύμνη ενώ στην Εικόνα 9.9 φαίνεται συνολικά η κάτοψη της ελεύθερης επιφάνειας στο πεδίο γύρω από την γάστρα.

9.4.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΡΟΥΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ [2], [3]

Αφού έχει δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο πλέγμα γύρω από την γάστρα του πλοίου και έχει ορισθεί πλήρως η ελεύθερη επιφάνεια, υπάρχουν επαρκή δεδομένα για την επίλυση των εξισώσεων που τέθηκαν στο θεωρητικό μέρος, όπου στην συνέχεια θα καλούνται ως RANS (*Reynolds average Navier-Stokes*). Το πρόγραμμα που θα χρησιμοποιηθεί για τους αριθμητικούς υπολογισμούς καλείται *Santor.f*, ενώ σημειώνεται ότι η έλικα του πλοίου προσομοιώνεται στο στάδιο αυτό από έναν δίσκο ορμής.

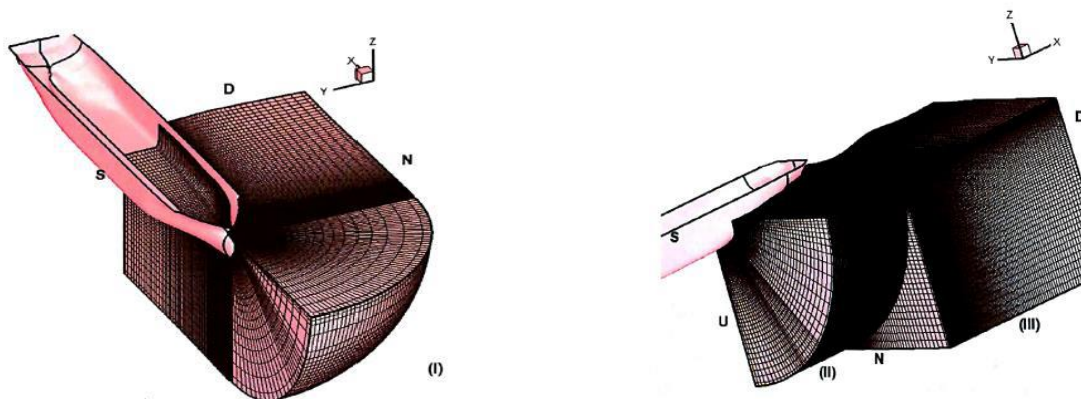
Αρχικά, γίνεται ο διαχωρισμός του μοντέλου σε δύο περιοχές, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 9.10 - Διαχωρισμός του πλοίου σε δύο περιοχές

Για την περιοχή I το χρησιμοποιούμενο πλέγμα είναι τύπου C, ενώ για την περιοχή II χρησιμοποιούνται δύο πλέγματα τύπου H-O που αποτελείται από μια σειρά εγκάρσιων νομέων. Η ειδικότερη διάσπαση του κάθε τμήματος λαμβάνει υπόψιν την παραβολική φύση της ροής γύρω από το μεγαλύτερο κομμάτι της γάστρας και επιδεικνύει έτσι τα οφέλη επιβολής πλεγμάτων υψηλής διακριτοποίησης προκειμένου να επιτευχθούν όσο το δυνατόν ακριβέστερα αποτελέσματα. Το πρώτο πλέγμα της περιοχής II καλύπτει από το μέσο μέχρι το τέλος του πλοίου και το δεύτερο πλέγμα καλύπτει τον καθρέφτη της πρύμνης και την περιοχή του ομόρρου.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα πλέγματα γύρω από το πλοίο καθώς και ο διαχωρισμός τους:



Εικόνα 9.11 - Χρησιμοποιούμενα πλέγματα γύρω από το πλοίο

Σε κάθε περιοχή οι RANS εξισώσεις επιλύονται αριθμητικά μέσω των εξισώσεων ορμής:

$$\frac{\rho}{h_i h_j h_l} \left[\frac{\theta(h_j h_l u_i u_i)}{\theta x_i} + \frac{\theta(h_i h_l u_j u_i)}{\theta x_j} + \frac{\theta(h_i h_j u_l u_i)}{\theta x_l} \right] = -\frac{1}{h_i} \frac{\theta p^*}{\theta x_i} + \rho u_j^2 K_{ji} + \rho u_l^2 K_{li} - \rho u_i u_j K_{ij} - \rho u_i u_l K_{il} + (\sigma_{ii} - \sigma_{jj}) K_{ji} + (\sigma_{ii} - \sigma_{ll}) K_{li} + \sigma_{ij} (2K_{ij} + K_{lj}) + \sigma_{il} (2K_{il} + K_{jl}) + \frac{1}{h_i} \frac{\theta \sigma_{il}}{\theta x_i} + \frac{1}{h_j} \frac{\theta \sigma_{ij}}{\theta x_j} + \frac{1}{h_l} \frac{\theta \sigma_{il}}{\theta x_l}$$

Όπου:

u_i, u_j, u_l : ποσότητες που αντιπροσωπεύουν τις μέσες τιμές των ταχυτήτων u_1, u_2, u_3 σύμφωνα με σύστημα συντεταγμένων όπου ο άξονας 1 είναι παράλληλος με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας του πλοίου

K_{ij} : τανυστής καμπυλότητας

h_i, h_j, h_l : οι αντίστοιχες μετρήσεις

p^* : πίεση η οποία περιλαμβάνει την στατική και την υδροστατική

Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συνιστωσών του τανυστή τάσεων σ_{ij} είναι το μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων k-ε, το οποίο αναλύθηκε παραπάνω.

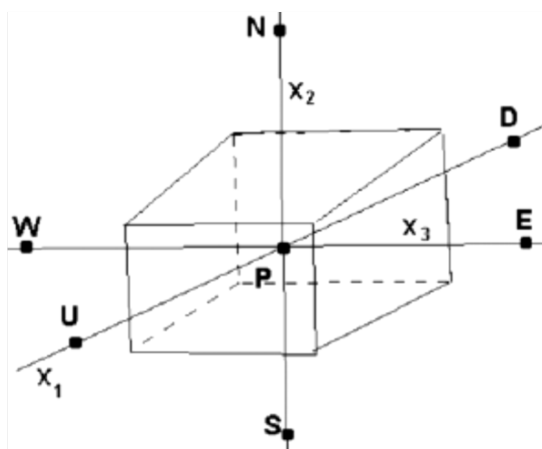
Εφόσον ο άξονας x_1 συμπίπτει με τον διαμήκη άξονα του πλοίου οι καμπυλότητες εξαφανίζονται από τις εξισώσεις μεταφοράς, δηλαδή $K_{13} = K_{23} = K_{31} = K_{32} = 0$.

Επιπλέον επειδή οι γραμμές στον άξονα x_3 είναι κάθετες στο βασικό επίπεδο αναφοράς του πλοίου γίνεται ακόμα μια απλοποίηση των εξισώσεων με $K_{12} = K_{21} = 0$.

Οι εξισώσεις ορμής και οι εξισώσεις του μοντέλου τύρβης επιλύονται αριθμητικά μέσω της προσέγγισης των όγκων ελέγχου. Η ολοκλήρωση οποιασδήποτε εξίσωσης μεταφοράς οδηγεί στην παρακάτω γενική μορφή:

$$A_P \Phi_P = A_N \Phi_N + A_S \Phi_S + A_E \Phi_E + A_W \Phi_W + [A_D \Phi_D + A_U \Phi_U] + S_\Phi$$

Στην παραπάνω εξίσωση το Φ αντιπροσωπεύει τα $u_1, u_2, u_3, k, \varepsilon$ και το $\Phi_{N,W,E,S,D,U}$ αντιστοιχεί στις έξι γειτονικές τιμές του κεντρικού κόμβου P, όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί. Οι συντελεστές A_i με $i=N, W, E, D, S, U$, αποτελούν το άθροισμα των όρων διάχυσης και μεταφοράς.



Εικόνα 9.12 - Ο όγκος ελέγχου

Το σύστημα των εξισώσεων με την εναλλαγή των δεικτών, αποτελεί ένα σύστημα 6 εξισώσεων που όταν συγκλίνουν δίνουν το πεδίο ροής. Η λύση του συστήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση μίας επαναληπτικής διαδικασίας που υιοθετεί την μεθοδολογία του αλγορίθμου SIMPLE. Η διαδικασία αυτή προκειμένου να εξελιχθεί στον χρόνο είναι επαναληπτική.

Η επαναληπτική διαδικασία που χρησιμοποιείται επιλύει σε δισδιάστατα πλέγματα σε κάθε κόμβο την εξίσωση μεταφοράς. Κάθε βήμα της επαναληπτικής ολοκληρώνεται όταν όλες οι εξισώσεις μεταφοράς έχουν επιλυθεί. Η μέθοδος ολοκληρώνεται όταν όλες οι εξισώσεις μεταφοράς συγκλίνουν. Το κριτήριο σύγκλισης της μεθόδου είναι:

$$\sum_N \left| A_P \cdot \Phi_P - \sum_1^6 A_i \cdot \Phi_i - S_\Phi \right| \leq c \cdot E_{in} \cdot U_\infty^2$$

Όπου:

Το αριστερό μέρος της παραπάνω εξίσωσης είναι το άθροισμα της απόλυτης διαφοράς της εξίσωσης μεταφοράς.

Ο συντελεστής c είναι μία ειδική σταθερά που ελέγχει τη σύγκλιση της μεθόδου.

Ο όρος E_{in} , είναι το εμβαδόν του πλέγματος στο οποίο εισέρχεται το ρευστό

Ο όρος U_∞^2 , είναι η ταχύτητα του ρευστού στο άπειρο

Όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί που πραγματοποιούνται στα πλέγματα απαιτούν ορισμένες οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες θεωρούνται για 4 σύνορα. Το σύνορο εισόδου του ρευστού, το εξωτερικό σύνορο του πεδίου, το σύνορο εξόδου του ρευστού καθώς και το στερεό σύνορο δηλαδή την επιφάνεια του πλοίου.

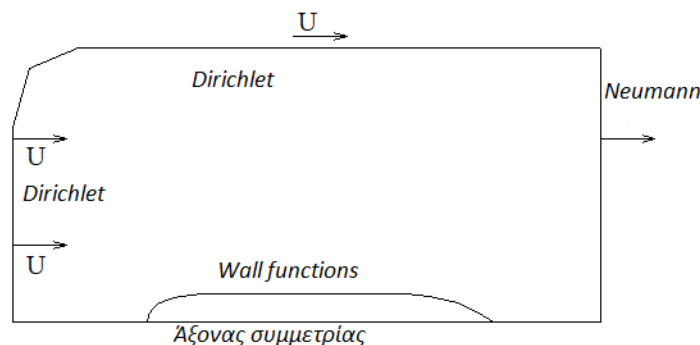
Για το σύνορο εισόδου του ρευστού και το εξωτερικό σύνορο εφαρμόζονται *συνθήκες Dirichlet*. Οι συνιστώσες της ταχύτητας υπολογίζονται από τη λύση της δυναμικής ροής γύρω από το πλοίο. Με αυτόν τον τρόπο τα σύνορα μεταφέρονται πιο κοντά στο πλοίο και ως αποτέλεσμα χρησιμοποιούνται λιγότεροι υπολογιστικοί κόμβοι.

Για το σύνορο εξόδου του ρευστού εφαρμόζονται *συνθήκες Neumann*. Δηλαδή, υποτίθεται ότι η πρώτη παράγωγος οποιασδήποτε μεταβλητής στη διεύθυνση της ροής (κάθετα στο σύνορο αυτό) είναι μηδενική.

Για το στερεό σύνορο εφαρμόζονται οι *συναρτήσεις τοίχου* (wall functions) λόγω των υψηλών αριθμών Reynolds ενώ σημειώνεται ότι κοντά στην επιφάνεια του πλοίου το πεδίο χωρίζεται στην περιοχή του στρωτού οριακού υποστρώματος, του ενδιάμεσου στρώματος όπου οι τάσεις της στρωτής ροής και οι τάσεις Reynolds είναι της ίδιας τάξεως και στην περιοχή ισχύος του

λογαριθμικού νόμου όπου οι τάσεις Reynolds είναι πολύ μεγαλύτερες από τις τάσεις στρωτής ροής. Η μέθοδος των συναρτήσεων τοίχου που χρησιμοποιείται θεωρεί ότι ο πρώτος κόμβος που υπολογίζεται βρίσκεται πάντα στην τρίτη περιοχή. Συνολικά οι εξισώσεις που ορίζουν τις οριακές συνθήκες των μεταβλητών στο στερεό σύνορο είναι:

$$\frac{\tau_W}{\rho} = \nu_t \cdot \frac{\partial u}{\partial y_R} \quad , \quad \frac{\partial u}{\partial y_R} = \frac{\left(\frac{\tau_W}{\rho}\right)^{1/2}}{0.42 \cdot y_R}$$



Εικόνα 9.13 - Συνοριακές συνθήκες

Όσον αφορά το μοντέλο προσομοίωσης της έλικας που χρησιμοποιείται βασίζεται στη θεώρηση των πεδιακών δυνάμεων. Η επίδραση της έλικας συμπεριλαμβάνεται στις εξισώσεις μεταφοράς για τον όγκο ελέγχου στον όρο S_ϕ . Υποτίθεται ότι η προσομοίωση της προπέλας γίνεται από έναν δίσκο ο οποίος έχει άπειρο αριθμό πτερυγίων. Οι ολοκληρωμένες πεδιακές δυνάμεις ορίζονται ως εξής:

$$F_1 = C_1 \cdot E \cdot \Gamma(r)$$

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

Στις παραπάνω εξισώσεις ο όρος E αποτελεί την επιφάνεια της τομής του δίσκου της έλικας με τον αντίστοιχο όγκο ελέγχου και ο όρος $\Gamma(r)$ αποτελεί την τοπική διανομή της κυκλοφορίας που επάγει στοιχειώδη ώση. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι η κυκλοφορία αυτή είναι δυνατόν να ρυθμίζεται από τον χρήστη ή να προκύπτει βάσει της θεωρίας φέρουσας γραμμής.

Η σταθερά C_1 σχετίζεται με την αξονική συνιστώσα της ταχύτητας και υπολογίζεται ως εξής:

$$T = C_1 \cdot \int_{r_t}^{r_h} \Gamma(r) \cdot r dr$$

Στην παραπάνω εξίσωση T είναι η ώση της έλικας, r_h είναι η ακτίνα της πλήμνης και r_t είναι η εξωτερική ακτίνα της έλικας.

Οι σταθερές C_2, C_3 είναι ανάλογες με την ροπή της προπέλας η οποία προσεγγίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q = C_{2,3} \cdot \int_{r_t}^{r_h} \Gamma(r) \cdot r dr$$

Το πρόβλημα της αυτοπρόωσης επιλύεται με την εφαρμογή επαναληπτικής διαδικασίας. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας αυτής.

Αρχικά το πρόβλημα λύνεται θεωρώντας μία γνωστή κατανομή $\Gamma(r)$ και υπολογίζεται η συνολική αντίσταση. Έπειτα, θεωρείται όση ίση με την αντίσταση που υπολογίστηκε. Από την αντίστοιχη εξίσωση υπολογίζεται η σταθερά C_1 και κατόπιν η πεδιακή δύναμη F_1 . Με γνωστή διάμετρο, όση και κατανομή κυκλοφορίας προσδιορίζεται η προπέλα αρκεί να βρεθεί η ταχύτητα προχώρησης u_A της έλικας στο άπειρο. Θεωρείται η ταχύτητα u_p , η μέση αξονική ταχύτητα στο δίσκο της προπέλας και τότε η ταχύτητα προχώρησης εξαρτάται από τα παρακάτω μεγέθη:

$$u_A = f(u_p, D, \Gamma(r), T, l, V, \rho)$$

Στην παραπάνω εξίσωση l είναι το μήκος του δίσκου ορμής. Ο υπολογισμός της μέσης αξονικής ταχύτητας προκύπτει από την ροή στο πρυμναίο τμήμα του σώματος. Για τον λόγο αυτό, δημιουργείται ένα πλέγμα στον άξονα της προπέλας και εφαρμόζεται επαναληπτική διαδικασία για τον υπολογισμό της ταχύτητας της προπέλας και της ταχύτητας προχώρησης, με κατάλληλες οριακές συνθήκες στα σύνορα εισόδου και εξόδου της ροής. Αν υποθέσουμε ότι σε κάποιο βήμα N της επαναληπτικής διαδικασίας έχει επέλθει σύγκλιση και η ταχύτητα προχώρησης είναι u_A , τότε η επόμενη προσέγγιση $(N+1)$ στηρίζεται στη μέθοδο *Newton - Raphson*:

$$u_A^{N+1} = \frac{u_p - u_p^N}{\left(\frac{\partial u_p}{\partial u_A}\right)_N} + u_A^N$$

$$\left(\frac{\partial u_p}{\partial u_A}\right)_N = \frac{u_p^N - u_p^{N-1}}{u_A^N - u_A^{N-1}}$$

Αφού έχει ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία και έχει υπολογιστεί η ταχύτητα προχώρησης u_A υπολογίζεται η βέλτιστη έλικα με βάση τα πολυώνυμα βελτιστοποίησης έλικας:

$$k_T/J^2 = T / \rho \cdot u_A^2 \cdot D^2$$

Δηλαδή σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση υπολογίζονται οι βέλτιστες στροφές RPM, ο βαθμός απόδοσης καθώς και την ροπή Q της προπέλας. Οπότε, με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται και οι περιφερειακές πεδιακές δυνάμεις από τις παραπάνω εξισώσεις.

Έχοντας τις τιμές όλων των πεδιακών δυνάμεων ανανεώνεται το πλέγμα πυκνώνοντάς το στον άξονα της προπέλας και υπολογίζεται εκ νέου η καινούρια αντίσταση R_T . Συνεχίζοντας τίθεται η όση T ίση με την καινούρια αντίσταση και επαναλαμβάνεται η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Το κριτήριο σύγκλισης της μεθόδου ορίζεται ως εξής:

$$|R_T^N - R_T^{N-1}| \leq 0,001 \cdot |R_T^{N-1}|$$

Θεωρία Φέρουσας Γραμμής

Στο σημείο αυτό, δεδομένου ότι αναφέρθηκε παραπάνω και χρησιμοποιήθηκε και στα πλαίσια της μελέτης, κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί σε αδρές γραμμές η θεωρία φέρουσας γραμμής.

Η θεωρία φέρουσας γραμμής προσομοιάζει τη ροή γύρω από μία έλικα χωρίς περιορισμούς σχετικά με τις συνθήκες της εισερχόμενης ροής και την επιλογή των παραμέτρων μορφής της. Ως αποτέλεσμα ο σχεδιαστής μπορεί να υπολογίσει την ακτινική κατανομή του βήματος και την ακτινική και χορδική κατανομή κυρτότητας που ελαχιστοποιούν την ισχύ που απορροφά η έλικα σε ένα ακτινικά μεταβαλλόμενο πεδίο πραγματικού όμορου (*wake adopted propeller*). Η μη γραμμική αυτή εκδοχή της θεωρίας φέρουσας γραμμής συνήθως δίνει καλές προβλέψεις για την υδροδυναμική συμπεριφορά της έλικας. Στα πλαίσια της μελέτης χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση της κυκλοφορίας και ως εκ τούτου για την κατανομή της όσης στην έλικα. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιώντας την θεωρία φέρουσας γραμμής η θεώρηση της ταχύτητας u_p γίνεται στο πάντα στο μέσο του δίσκου της έλικας.

9.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο τμήμα αυτό της μελέτης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντίστασης ρυμούλκησης και της αυτοπρόωσης, όπως προέκυψαν από διάφορες προσπάθειες (RUNS) που έγιναν προκειμένου να υπάρξει η μικρότερη δυνατή απόκλιση από τα πειραματικά μετρούμενα μεγέθη.

Όλες οι προσπάθειες πραγματοποιήθηκαν με χρήση των προαναφερθέντων προγραμμάτων από τον καθηγητή κ. Γ. Τζαμπίρα για την ταχύτητα πλοίου $V_s=14\text{kn}$, η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα μοντέλου $V_m=1,074\text{m/s}$, χωρίς την παρουσία του πηδαλίου, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Οι συνθήκες θερμοκρασίας και περιβάλλοντος που χρησιμοποιήθηκαν είναι ίδιες με αυτές στις οποίες εκτελέστηκαν και τα αντίστοιχα πειράματα.

Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της μελέτης περιλαμβάνονται σε αρχεία που παράγονται από το πρόγραμμα. Τα δύο αυτά αρχεία ονομάζονται “*ostern*” και “*oship*”. Στο αρχείο “*ostern*” περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα για την αντίσταση ρυμούλκησης και στα αρχεία “*oship*” περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα για την αυτοπρόωση.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα επικρατέστερα σενάρια που μελετήθηκαν. Σε κάθε περίπτωση έγιναν κάποιες τροποποιήσεις στο σύστημα έλικα / μοντέλο όπου και σημειώνονται. Προκειμένου να ελεγχθεί αν η θέση της έλικας(σε σχέση με τον καθρέφτη) ήταν σωστή εξετάστηκε και μετακινήθηκε κατά μια μικρή απόσταση. Σε αυτή την κατάσταση πραγματοποιήθηκαν εξίσου μερικά RUNS

Ακολουθούν οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν:

oship1.1: Η έλικα(δίσκος ορμής) τοποθετήθηκε στην θέση της, όπως μετρήθηκε στο μοντέλο, όμως η ταχύτητα u_p λήφθηκε στην είσοδο της έλικας και όχι στο μέσο του δίσκου γεγονός που τροποποίησε την κατανομή τόσο των πιέσεων όσο και των ταχυτήτων. Επιπλέον η κυκλοφορία σε αυτό το RUN θεωρήθηκε ημιτονική, ενώ η ώση λήφθηκε βάσει των αποτελεσμάτων χωρίς να διορθωθεί.

oship1.2: Η έλικα(δίσκος ορμής) τοποθετήθηκε στην θέση της, όμοια με παραπάνω, όμως η ταχύτητα u_p λήφθηκε στο μέσον του δίσκου της έλικας διαφοροποιώντας την κατανομή πιέσεων και την τελική ώση. Η κυκλοφορία θεωρήθηκε και σε αυτό το RUN ημιτονική

oship2.1: Η έλικα(δίσκος ορμής) τοποθετήθηκε στην θέση της, όμοια με παραπάνω, η ταχύτητα u_p λαμβάνεται μπροστά από τον δίσκο και η κυκλοφορία θεωρείται ημιτονική. Στην περίπτωση αυτή όμως μέσω των δυνατοτήτων που δίνει το σύστημα τίθεται εξ αρχής η ώση ίση με την μετρηθείσα. Κάνοντας αυτή την διόρθωση της ώσης τελικώς λαμβάνεται ροπή πολύ παραπλήσια με αυτή που μετρήθηκε στο πείραμα αυτοπρόωσης.

oship2.2: Η έλικα(δίσκος ορμής) τοποθετήθηκε στην θέση της, και όλα τα στοιχεία είναι ίδια με την περίπτωση *oship2.1*, με την διαφορά ότι η ταχύτητα u_p λήφθηκε στο μέσον του δίσκου της έλικας. Η διόρθωση της ώσης σε συνδυασμό με αυτόν τον υπολογισμό δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα και την μικρότερη δυνατή απόκλιση στην τελική ροπή σε σύγκριση με την πειραματική διαδικασία. Η κυκλοφορία θεωρήθηκε και σε αυτό το RUN ημιτονική

oship3.1: Η έλικα(δίσκος ορμής) τοποθετήθηκε στην θέση της, όμως στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται η κυκλοφορία βάσει της θεωρίας φέρουσας γραμμής. Ως εκ τούτου η ταχύτητα u_p λαμβάνεται στο μέσον του δίσκου της έλικας.

oship3.2: Η έλικα(δίσκος ορμής) τοποθετήθηκε στην θέση της, η κυκλοφορία προκύπτει με βάση την θεωρία φέρουσας γραμμής, η ταχύτητα u_p λαμβάνεται στο μέσον του δίσκου της έλικας, ενώ γίνεται και διόρθωση της ώσης, εισάγοντας εξ αρχής την τιμή της στον κώδικα.

oship4.1: Η έλικα(δίσκος ορμής) τοποθετήθηκε πιο κοντά στην γάστρα σε διαφορετική από την αρχική θέση της στην οποία ελήφθησαν οι πειραματικές μετρήσεις. Η ταχύτητα υπολογισμού u_p λήφθηκε στην είσοδο του δίσκου της έλικας ενώ η κυκλοφορία θεωρήθηκε ημιτονική.

oship4.2: Η έλικα(δίσκος ορμής) τοποθετήθηκε αντίστοιχα με το RUN *oship4.1* ενώ όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του υπολογισμού ήταν ίδια με την διαφορά ότι έγινε τελικώς διόρθωση της ώσης(με την τιμή που μετρήθηκε στο πείραμα).

oship5: Το τελικό RUN που παρουσιάζεται εδώ αφορά την έλικα στην θέση πλησίον της γάστρας του πλοίου με την κυκλοφορία να προκύπτει με βάση την θεωρία φέρουσας γραμμής. Ως εκ τούτου η ταχύτητα u_p λαμβάνεται στο μέσον του δίσκου της έλικας(*lifting line*). Σημειώνεται ότι και αυτή η περίπτωση είχε πολύ καλά αποτελέσματα για την τιμή της ώσης, όμως παρουσίασε μεγάλες διαφορές σε στροφές και ροπή γεγονός που οδηγεί στην επιλογή της *oship2.2* ως επικρατέστερη περίπτωση.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών καθώς και του υπολογισμού της αντίστασης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Αντίστοιχα ακολουθεί ο πίνακας με τα ποσοστά διαφοράς των τιμών, ανά Run σε σύγκριση με τα πειραματικά μετρημένα μεγέθη.

ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

	C_T	$R_T(N)$	EHP(kW)
ostern1	0,0043713	14,736	0,015954

Πίνακας 9.1 – Αποτελέσματα CFD

	$\delta C_T \%$	$\delta R_T \%$	$\delta EHP \%$
ostern1	-2%	-2%	-1%

Πίνακας 9.2 – Διαφορές με μετρήσιμα μεγέθη

ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΥΤΟΠΡΟΩΣΗΣ

	n(RPM)	T(N)	Q(Nm)	DHP(kW)	t	w
oship1.1	638,0	16,676	0,342	0,0229	0,110	0,580
oship1.2	647,0	16,676	0,345	0,0234	0,110	0,429
oship2.1	648,2	17,336	0,355	0,0241	0,144	0,456
oship2.2	657,3	17,336	0,358	0,0246	0,144	0,426
oship3.1	618,1	16,748	0,342	0,0244	0,114	0,428
oship3.2	690,3	17,296	0,352	0,0255	0,142	0,426
oship4.1	608,0	17,146	0,341	0,0217	0,134	0,588
oship4.2	641,7	17,146	0,350	0,0236	0,134	0,470
oship5	687,7	17,234	0,351	0,0252	0,138	0,438

Πίνακας 9.3 – Αποτελέσματα CFD για διάφορα RUNS

	δn %	δT %	δQ %	δDHP %	δt %	δw %	δn % x δQ %
oship1.1	-5%	-4%	-5%	-10%	-22%	53%	0,25%
oship1.2	-4%	-4%	-4%	-8%	-22%	13%	0,15%
oship2.1	-3%	0%	-1%	-5%	2%	20%	0,05%
oship2.2	-2%	0%	-1%	-3%	2%	12%	0,01%
oship3.1	-8%	-3%	-5%	-4%	-19%	13%	0,41%
oship3.2	3%	0%	-2%	1%	1%	12%	-0,07%
oship4.1	-9%	-1%	-5%	-14%	-5%	55%	0,51%
oship4.2	-4%	-1%	-3%	-7%	-5%	24%	0,12%
oship5	3%	-1%	-3%	0%	-2%	15%	-0,07%

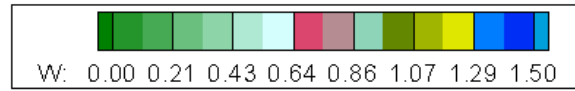
Πίνακας 9.4 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των παραπάνω αποτελεσμάτων είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Συγκεκριμένα φαίνεται πως σε όλες τις περιπτώσεις η ροπή και η ώση διαφέρουν σε ποσοστό λιγότερο από 10%, όπως αντίστοιχα και η ισχύ, με εξαίρεση την περίπτωση 4.1 και 4.2 όπου όμως έχει αλλάξει η θέση της έλικας. Συγκεκριμένα στα RUNS όπου έγινε διόρθωση της ώσης λαμβάνεται διαφορά της ροπής ίση με -1% που αγγίζει το όριο της ακρίβειας των μετρητικών συσκευών. Επίσης ένα άλλο στατιστικό μέγεθος που μπορεί να δώσει αποτελέσματα είναι το γινόμενο δn % x δQ %, που στην περίπτωση του RUN 2.2 είναι σχεδόν μηδέν. Το αποτέλεσμα αυτό αποδεικνύει πως η συγκεκριμένη μέθοδος αριθμητικής επίλυσης είναι η βέλτιστη. Τέλος επιβεβαιώνεται και η ποιότητα των μετρήσεων, τουλάχιστον σε αυτή την ταχύτητα.

Στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται οι ισοϋψείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας στην περιοχή της έλικας στο αντίστοιχο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου. Το πλοίο είναι πλήρως συμμετρικό, ως εκ τούτου στο αριστερό τμήμα φαίνεται η ταχύτητα με έλικα σε λειτουργία και το άλλο τμήμα φαίνεται η ταχύτητα της ροής στην περιοχή της έλικας δίχως την παρουσία αυτής.

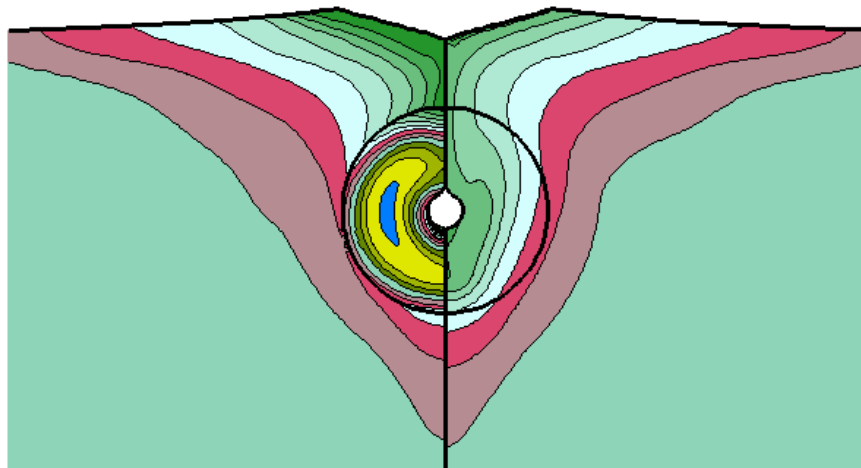
Τα διαγράμματα ουσιαστικά παρουσιάζουν τα RUNS *oship1.2* και *oship2.2*. Δηλαδή απεικονίζουν την έλικα στην κανονική μετρηθήσα θέση της, με την ταχύτητα u_p να υπολογίζεται στο μέσον του δίσκου της έλικας και την κυκλοφορία να είναι εξ αρχής ημιτονική. Η διαφορά των δύο έγκειται στο ότι στην περίπτωση 2.2 γίνεται διόρθωση της ώσης, με βάση την μετρηθήσα στα πειράματα ώση.

Η κλίμακα με τα χρώματα που υπάρχει αντιπροσωπεύει τον λόγο της ταχύτητας του ρευστού προς την ταχύτητα του μοντέλου. Παρατηρείται ότι οι περιοχές με πράσινο χρώμα παρουσιάζουν μικρότερες ταχύτητες. Γενικά, όσο πλησιάζουμε στην πλήμνη της έλικας οι τιμές της ταχύτητας του ρευστού είναι χαμηλότερες. Οι μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας του ρευστού εμφανίζονται με ελαφρώς ροζ χρώμα σε ποσοστό 86% της ταχύτητας του μοντέλου. Συγκριτικά με την αντίστοιχη εικόνα χωρίς την λειτουργία της έλικας, στο αριστερό τμήμα που η έλικα επενεργεί οι ταχύτητες του ρευστού είναι αρκετά μεγαλύτερες με τις τιμές αυτές πλησιάζουν σε ποσοστό 150% της ταχύτητας του πλοίου. Εμφανής είναι ακόμη η διαφορά της μίας περίπτωσης με την άλλη δεδομένου ότι η περιοχή μεγάλων ταχυτήτων και ως εκ τούτου υποπίεσης στην έλικα (μπλε περιοχή) είναι μεγαλύτερη. Συμπέρασμα λογικό καθώς και η ώση θα είναι μεγαλύτερη.

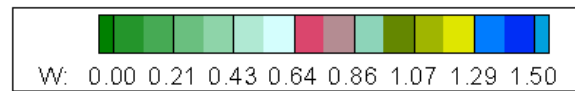


PROPELLER

NO PROPELLER

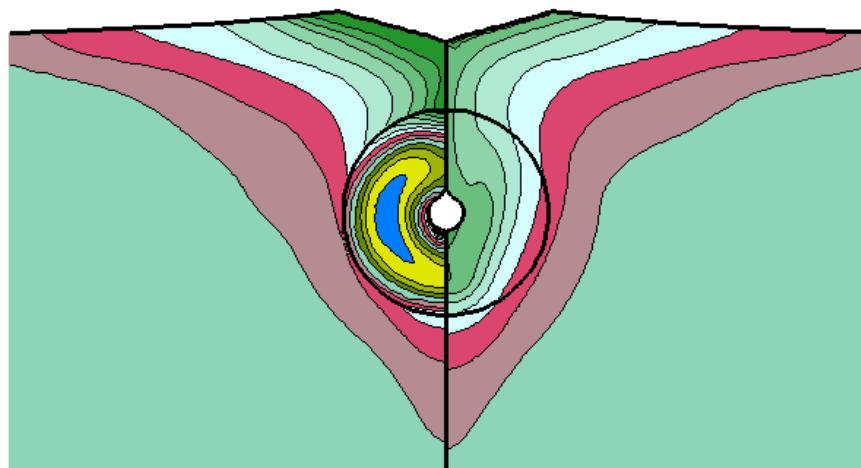


Εικόνα 9.14 - Προφίλ ταχύτητας του ρευστού στο RUN oship1.2



PROPELLER

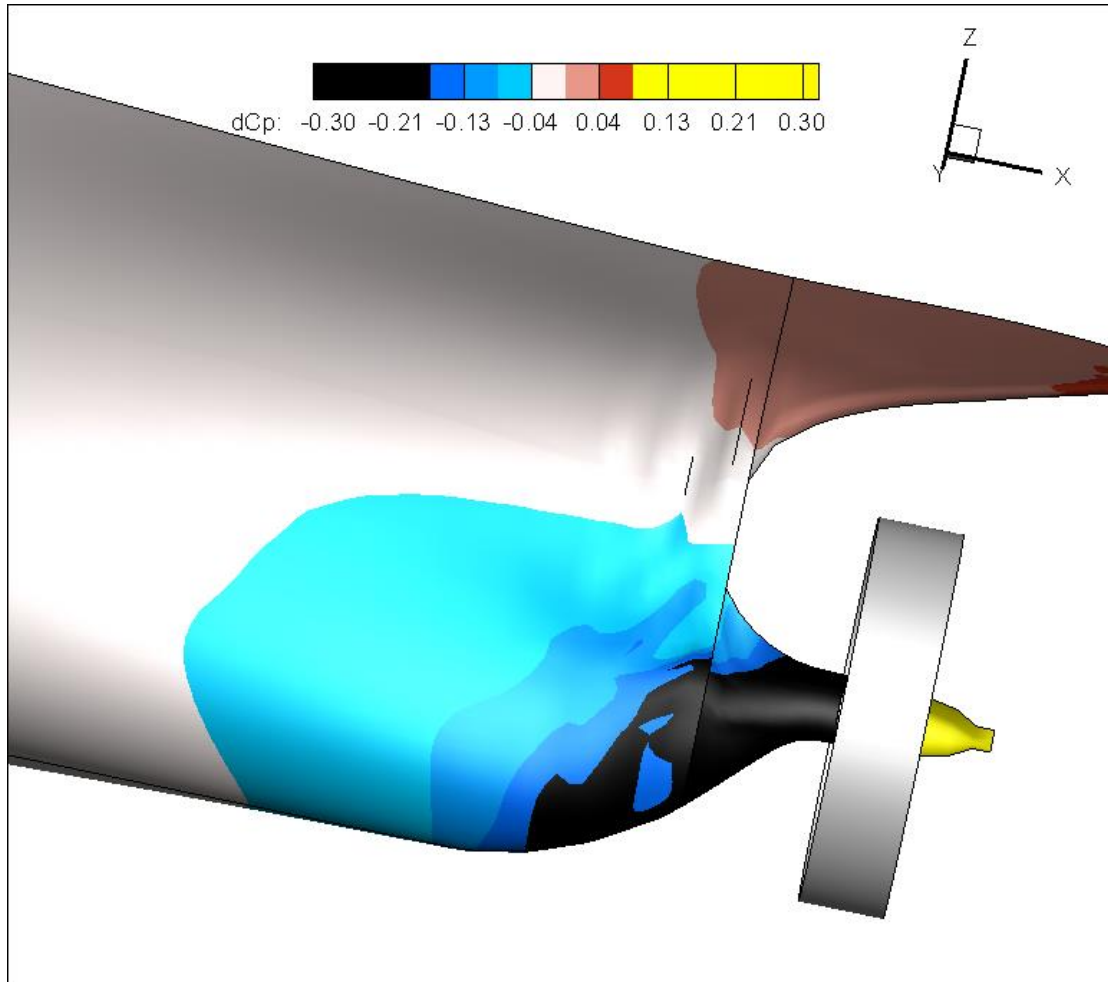
NO PROPELLER



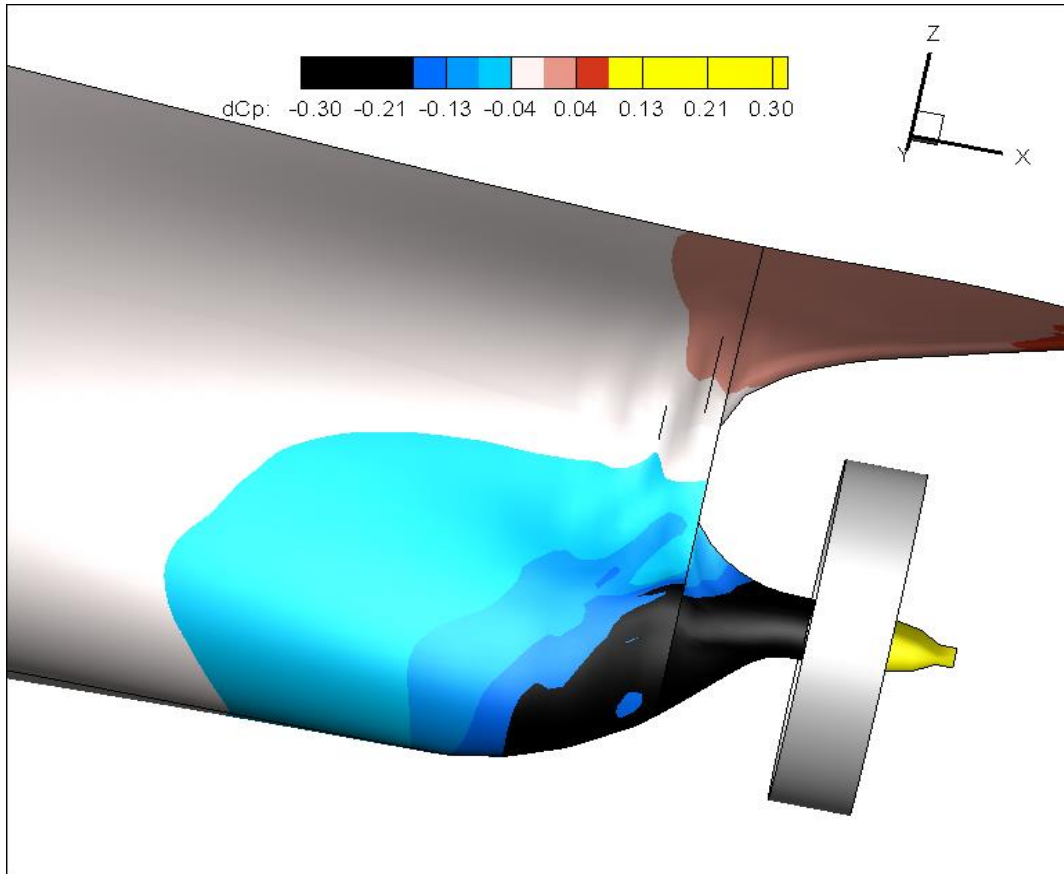
Εικόνα 9.15 - Προφίλ ταχύτητας του ρευστού στο RUN oship2.2

Αντίστοιχα παρουσιάζονται παρακάτω εικόνες της κατανομής των πιέσεων λόγω της λειτουργίας της έλικας πίσω από την γάστρα για τα RUNS *oship1.2* και *oship2.2*. Ενώ τέλος παρουσιάζεται και η κατανομή για την έλικα σε διαφορετική θέση(πλησίον της γάστρας), χωρίς διόρθωση της ώσης που αφορά τα RUNS *oship4*

Η κλίμακα με τα χρώματα αξιολογεί την διαφορά πιέσεων. Παρατηρείται ότι στο κομμάτι μπροστά από την έλικα η διαφορά πιέσεων είναι αρνητική, ενώ στο κομμάτι πάνω από την έλικα η διαφορά πιέσεων είναι θετική. Όσο περισσότερο απομακρυνόμαστε από την έλικα η διαφορά πιέσεων μηδενίζεται.

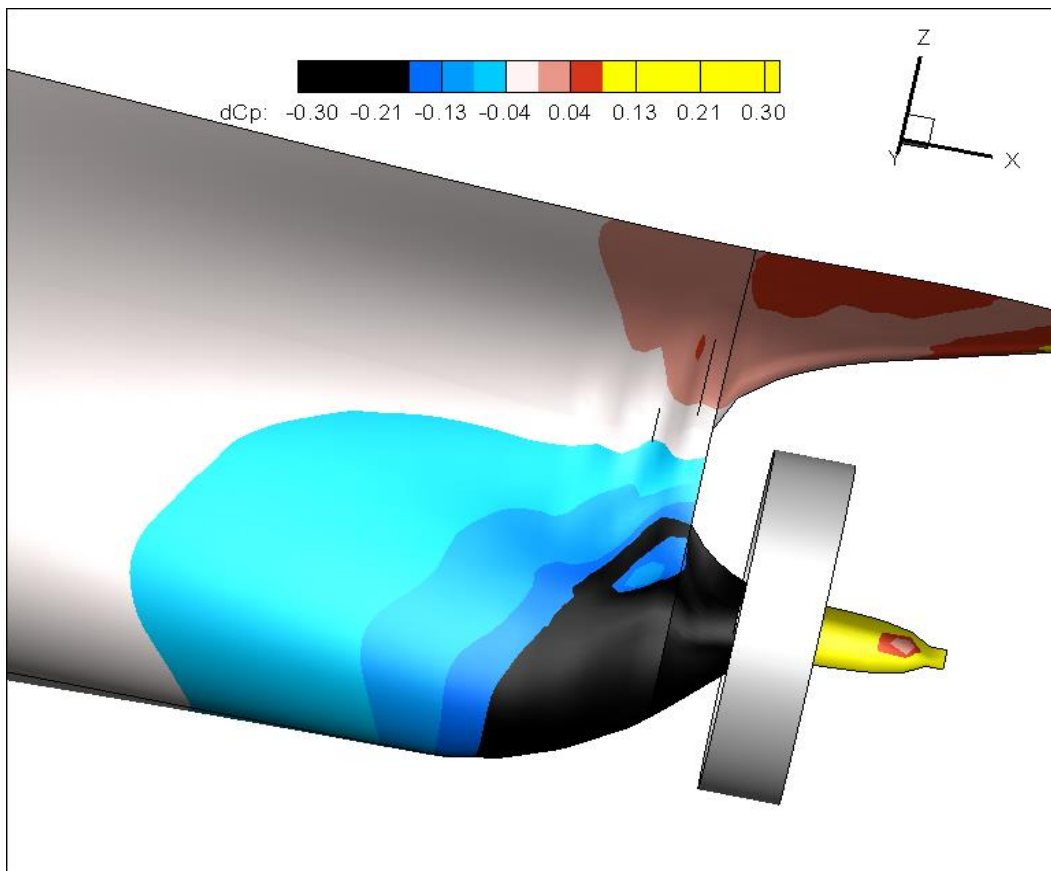


Εικόνα 9.16 - Προφίλ ταχύτητας του ρευστού στο RUN *oship1.2*



Εικόνα 9.17 - Προφίλ ταχύτητας του ρευστού στο RUN oship2.2

Αντίστοιχα για την έλικα σε θέση πλησίον της γάστρας λαμβάνεται η κατανομή:



Εικόνα 9.18 - Προφίλ ταχύτητας του ρευστού στο RUN oship4,1

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Πολίτης Γ. , «*Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου*», Σημειώσεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011
2. Τζαμπίρας Γ. , «*Αριθμητικές Προσομοιώσεις Υδροδυναμικών Ροών*», Σημειώσεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1998
3. Μπεργελές Γ. , «*Υπολογιστική Ρευστομηχανική*», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2012
4. Γ. Τριανταφύλλου, «*Βασικές Αρχές Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής*», Σημειώσεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2010
5. Σιμόπουλος Σ.Ε. , «*Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών*», Σημειώσεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1989
6. Γρηγορόπουλος Γ.Ι. , «*Μετρήσεις Φυσικών Μεγεθών με Έμφαση στο Θαλάσσιο Περιβάλλον*», Σημειώσεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2013
7. Καυκά Ι. , «*Μελέτη Υδροδυναμικής Συμπεριφοράς Δακτυλίων Schneekluth σε Πρότυπο Πλοίου*», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2013
8. Πάσσας Γ., «*Πειραματική Διερεύνηση της Τραχύτητας στην Αντίσταση και Αυτοπρόωση Πλοίου*», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2014
9. Αγαθάγγελος Δ. , «*Αριθμητική Μελέτη της Αυτοπρόωσης ενός Tanker σε Διάφορες Καταστάσεις Φόρτωσης*», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχ/γων Μηχανικών, Ε.Μ.Π 2018
10. *ITTC-Recommended Procedures and Guidelines*, Quality Systems Group of the 28th ITTC, 2017
11. Tzabiras G. , Kontogiannis K. , «*An Integrated Method for Predicting the Hydrodynamic Resistance of low- C_B Ships*», Computer Aided Design, 2009
12. Tzabiras G. D. . «*Resistance and Self-propulsion Simulations for a Series-60, $C_B = 0.6$ Hull at Model and Full Scale*», Ship Technology Research, 21–34
13. Kristensen H.O. , Lützen M. , «*Prediction of Resistance and Propulsion Power of Ships*», Project no. 2010-56, Emissionsbeslutningsstøttesystem, Technical University of Denmark, May 2013
14. Ueno M., Tsukada Y., «*Estimation of full-scale Propeller Torque and Thrust using Free-Running Model Ship in Waves*», Ocean Engineering 120(2016), 30–39
15. Hess A.M.O, Smith J.L., «*Calculations of Potential Flow about Arbitrary Bodies*», Progress in Aerospace Sciences, Volume 8, 1967, Pages 1-138
16. Simonsen C.D., «*Rudder, Propeller and Hull Interaction by RANS*», PhD Thesis, Technical University of Denmark, May 2000
17. Szantyr J.A. , «*Mutual Hydrodynamic Interaction between the Operation Propeller and the Rudder*», Gdansk University of Technology, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. VII 2007, No. 3