

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΑΘΗΝΑ 2013



ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

ΚΑΥΚΑ Ν. ΙΩΑΝΝΑ



ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Γ. ΤΖΑΜΠΙΡΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

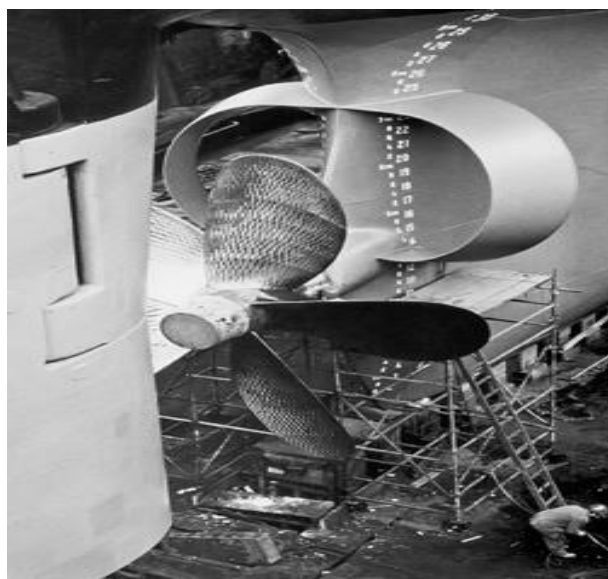
ΜΕΛΗ: Γ. ΠΟΛΙΤΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Κ. ΜΠΕΛΙΜΠΑΣΑΚΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ



ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ
ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ
ΠΛΟΙΟΥ

ΚΑΥΚΑ Ν. ΙΩΑΝΝΑ



ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Γ. ΤΖΑΜΠΙΡΑΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΕΛΗ: Γ. ΠΟΛΙΤΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Κ. ΜΠΕΛΙΜΠΑΣΑΚΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (Ε.Ν.Θ.Υ) της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια του προγράμματος σπουδών για την απόκτηση του τίτλου Ναυπηγού Μηχανολόγου Μηχανικού.

Θα ήθελα να εκφράσω ολόψυχα τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή και διευθυντή του Ε.Ν.Θ.Υ κ. Γεώργιο Τζαμπίρα για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου αναθέτοντας την παρούσα διπλωματική εργασία αλλά και για το ενδιαφέρον, την επίβλεψη και την υποστήριξη του καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Παπακωνσταντίνου για την καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά την εκτέλεση και επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων καθώς η βοήθειά του ήταν καθοριστική για την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το προσωπικό της πειραματικής δεξαμενής και ιδιαίτερα τον κ. Γεώργιο Μυλωνά για την κατασκευή του μοντέλου και την άμεση επέμβασή του σε τυχόν επισκευές που χρειάστηκαν, τον κ. Ιωάννη Τραχανά χωρίς την βοήθεια του οποίου δεν θα ήταν δυνατή η εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων καθώς και τον κ. Δημήτριο Λιαροκάπη για την πολύτιμη συμβολή του στην διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων και τον κ. Φώτη Κασάπη για την βοήθεια που προσέφε κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Θα ήθελα να τονίσω πως συνολικά το προσωπικό του εργαστηρίου έδειξε αμέριστη συμπαράσταση από την έναρξη της διπλωματικής μου εργασίας και για τον λόγο αυτό τους ευχαριστώ όλους από καρδιάς .

Στο σημείο αυτό δεν θα ήθελα να παραλείψω να αναφέρω την χορηγία που προσφέρθηκε στο εργαστήριο για την κατασκευή του μοντέλου και την συνολική διεξαγωγή των πειραμάτων από την εταιρία TECHNAVA. Εγώ προσωπικά και το εργαστήριο ευχαριστούμε θερμά την εταιρία αυτή για την συμβολή της στην διεξαγωγή ερευνητικών προγραμμάτων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου οι οποίοι δεν έπαψαν να με στηρίζουν όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΤΥΠΟΥ WED	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Η ΕΛΙΚΑ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΡΟΗ	
3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	27
3.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ	33
3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ LAP-KELLER	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΑ	
6.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	63
6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ FULL LOAD CONDITION	71
6.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	71
6.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	77
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΥΤΟΠΡΩΣΗΣ	
7.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	89
7.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΩΣΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ	103
7.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΓΡΑΜΜΕΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΓΑΣΤΡΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	129
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΤΥΠΟΥ WED	133
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΩΝ	
10.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	139
10.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΩΝ	148

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΥΤΟΠΡΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΩΝ	151
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	171
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13 ΓΡΑΜΜΕΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΓΑΣΤΡΑ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΟΥΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	189
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ	
14.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	193
14.2 POTENTIAL FLOW	205
14.3 ΕΠΙΛΥΣΗ RANS ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ	209
14.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	213
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	232

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ανάλυση, μέσω πειραματικών μετρήσεων, της υδροδυναμικής συμπεριφοράς δακτυλίων Schneekluth (WED, Wake Equalizing Ducts), προσαρμοσμένων σε πρότυπο δεξαμενόπλοιο. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στην πειραματική δεξαμενή του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για την διεξαγωγή συμπερασμάτων γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν την ισχύ και τον βαθμό απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου, πριν και μετά την εγκατάσταση των ημιδακτυλίων στο μοντέλο, μέσω πειραμάτων αντίστασης και αυτοπρώωσης. Η εργασία διαρθρώνεται ως ακολούθως.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των βασικών αρχών που διέπουν την λειτουργία ημιδακτυλίων τέτοιου τύπου. Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται η διάταξη και ο εξοπλισμός της πειραματικής δεξαμενής όπου έλαβαν χώρα οι πειραματικές μετρήσεις. Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται οι μετρήσεις που αφορούν την έλικα του μοντέλου σε ελεύθερη ροή καθώς και το διάγραμμα ελεύθερης ροής που προκύπτει. Στο επόμενο κεφάλαιο αναφέρονται τα υδροστατικά χαρακτηριστικά του υπο μελέτη πλοίου και μοντέλου ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια θεωρητική προεκτίμηση της αντίστασης του μοντέλου μέσω της μεθόδου Lap- Keller. Στα επόμενα δύο κεφάλαια ακολουθούν το πείραμα αντίστασης και το πείραμα αυτοπρώωσης του μοντέλου. Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται στιγμιότυπα από το πείραμα βιντεοσκόπησης νημάτων τα οποία ακολουθούν της γραμμής ροής γύρω από την γάστρα του μοντέλου. Στην συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία τοποθέτησης των ημιδακτυλίων και επαναλαμβάνονται τα πειράματα αντίστασης, αυτοπρώωσης καθώς και το πείραμα του ογδού κεφαλαίου. Ακολουθεί το δωδέκατο κεφάλαιο όπου γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο καταστάσεων, πριν και μετά την εγκατάσταση των ημιδακτυλίων, για την διεξαγωγή συμπερασμάτων και τέλος γίνεται μια περιγραφή των αριθμητικών μεθόδων επίλυσης υδροδυναμικών προβλημάτων (CFD Methods).

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΤΥΠΟΥ WED

Τον Μάρτιο του 1984 εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε μεγάλο πλοίο ένας δακτύλιος τύπου WED. Σκοπός ήταν να αναβαθμιστούν τα χαρακτηριστικά πρόωσης μέσω της βελτίωσης της ροής προς την έλικα του πλοίου. Το W.E.D συνίσταται από δύο κεντροσυμμετρικούς ημιδακτυλίους καθένας από τους οποίους αποτελεί ένα πτερύγιο ρύθμισης της ροής, σχήματος δακτυλίου με διατομή λεπτού φύλλου που προσαρμόζεται στην γάστρα του πλοίου μπροστά από την άνω περιοχή της έλικας, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα(Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1 THE WAKE EQUALIZING DUCT

Η βασική αρχή που διέπει την εφαρμογή αυτή είναι το γεγονός ότι δημιουργείται μια επιτάχυνση της ροής εσωτερικά των δακτυλίων και μια επιβράδυνση στο εξωτερικό τους περιβάλλον. Συνεπώς, λόγω της θέσης των ημιδακτυλίων, η ροή προς την έλικα είναι επιταχυμένη στην άνω περιοχή της, όπου πριν ήταν επιβραδυμένη, εφόσον αντιστοιχεί σε πιο πλήρη μορφή γάστρας. Αντιθέτως στην χαμηλότερη περιοχή, όπου συνήθως η ροή προς την έλικα έχει μεγαλύτερη ταχύτητα, τώρα καθυστερείται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μέσω των ημιδακτυλίων το πεδίο ομόρρου γύρω από την έλικα γίνεται πιο ομοιογενές ενώ η μέση ταχύτητα του ομόρρου πρακτικά να μην μεταβάλλεται σχεδόν καθόλου.

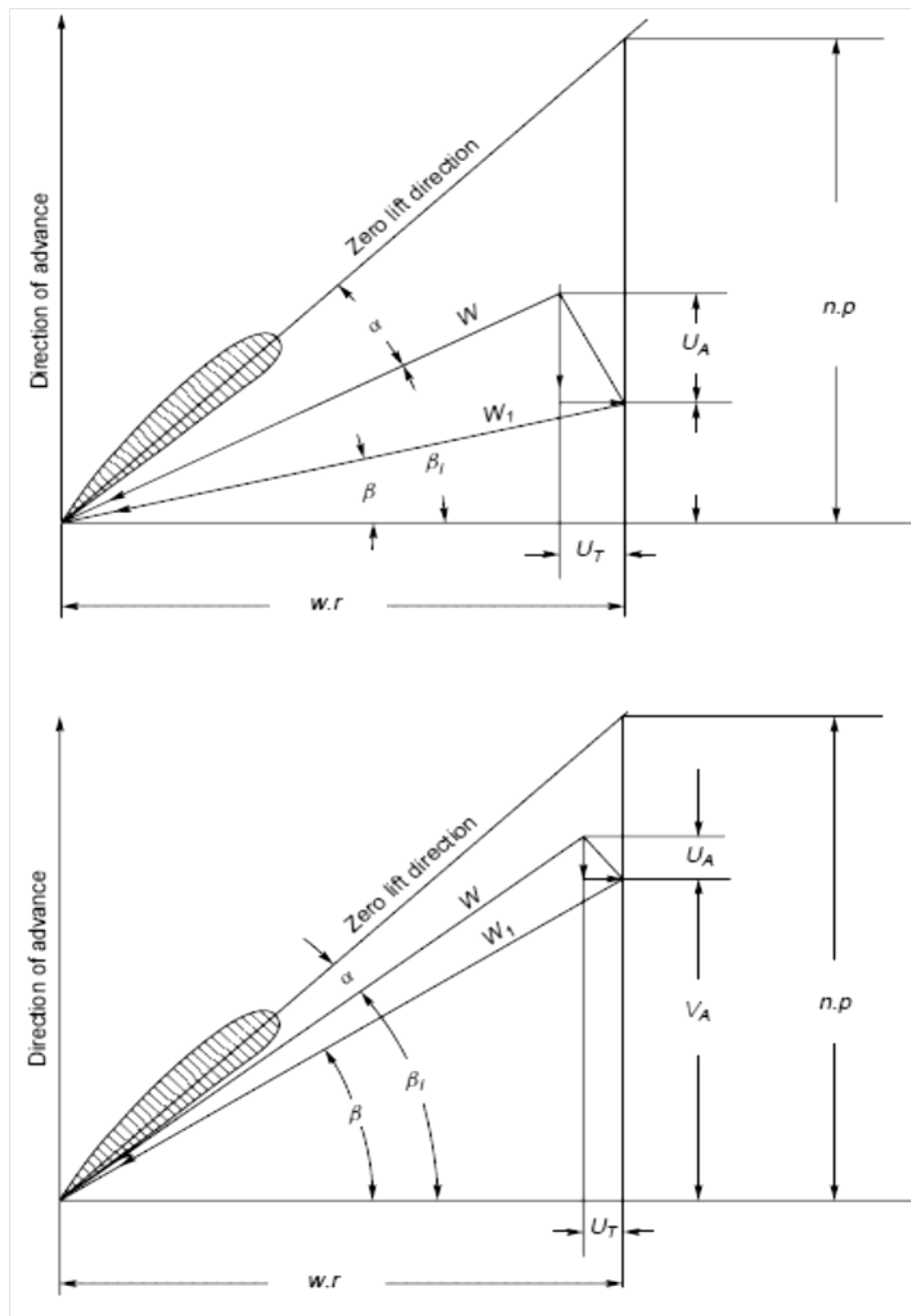
Όταν το πλοίο κινείται στο νερό, λόγω της τριβής της γάστρας, δημιουργείται οριακό στρώμα γύρω από τη γάστρα. Στη ζώνη του οριακού στρώματος η ταχύτητα κοντά στην επιφάνεια της γάστρας είναι ίδια με την ταχύτητα του πλοίου αλλά μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από την επιφάνεια της γάστρας. Σε κάποια απόσταση από την επιφάνεια της γάστρας η ταχύτητα του νερού είναι ίδια με την ταχύτητα της περιβάλλουσας υδάτινης μάζας. Η απόσταση αυτή ονομάζεται πάχος του οριακού στρώματος και αυξάνεται καθώς απομακρυνόμαστε από το πρωραίο τμήμα της γάστρας. Δηλαδή το πάχος του οριακού στρώματος θα είναι μεγαλύτερο στην πρύμνη του πλοίου. Συνεπώς η έλικα θα λειτουργεί σε ένα πεδίο ομόρρου, δηλαδή σε ένα ανομοιομορφο πεδίο ταχύτητας ρευστού, και το νερό στην έλικα θα έχει μια πραγματική ταχύτητα ομόρρου V_w . Άρα η μέση ταχύτητα της ροής που βλέπει η έλικα V_a είναι χαμηλότερη από την ταχύτητα του πλοίου V κατά την πραγματική ταχύτητα ομόρρου του ρευστού στην περιοχή της έλικας V_w . Η πραγματική αυτή ταχύτητα του ομόρρου εκφράζεται μέσω του συντελεστή ποσοστού ομόρρου w για τον οποίο ισχύει:

$$w = \frac{V_w}{V} = \frac{V - V_a}{V} \rightarrow 1 - w = \frac{V_a}{V}$$

Η τιμή του συντελεστή ομόρρου εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα της γάστρας. Έτσι πλοία με υψηλό συντελεστή γάστρας έχουν αυξημένο συντελεστή ομόρρου. Κάτω όμως από αυτές τις συνθήκες η κατανομή της ταχύτητας γύρω από την έλικα είναι ανομοιογενής. Συνεπώς δημιουργείται η ανάγκη για περισσότερο ομοιογενές πεδίο ομόρρου καθώς επίσης και για μεγαλύτερη ταχύτητα προχώρησης, δηλαδή χαμηλότερη ταχύτητα ομόρρου. Ένας δακτύλιος τύπου WED, προκαλεί αύξηση της αξονικής ταχύτητας του ρευστού και ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας στον δίσκο της έλικας. Με την αύξηση της ταχύτητας της ροής προς την έλικα (ταχύτητα προχώρησης), για σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω αυτής, επιτυγχάνεται αύξηση του βαθμού απόδοσης της έλικας η_B μέσω μείωσης της γωνίας πρόσπτωσης α της ροής στο πτερύγιο της έλικας, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί (Εικόνα 1.2). Η αύξηση του βαθμού απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή η_0 με την αύξηση της ταχύτητας προχώρησης V_A γίνεται εύκολα αντιληπτή και από το διάγραμμα ελεύθερης ροής μιας έλικας, όπου η ταχύτητα εκφράζεται αδιάστατα από τον συντελεστή προχώρησης J . Όμως ο βαθμός απόδοσης αυτός αφορά την έλικα χωρίς την παρουσία γάστρας. Ο παραγματικός βαθμός απόδοσης της έλικας με την παρουσία γάστρας είναι το γινόμενο του βαθμού απόδοσης έλικας σε ελεύθερη ροή η_0 και του βαθμού απόδοσης σχετικής περιστροφής η_R .

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

Ο βαθμός απόδοσης η_R σε πλοία με μία έλικα παίρνει συνήθως τιμές από 1 έως 1,07, δηλαδή έχει ευεργετικό αποτέλεσμα στον τελικό βαθμό απόδοσης τη έλικας.



Εικόνα 1.2 ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ ΣΤΟ ΠΤΕΡΥΓΙΟ ΓΙΑ ΜΙΚΡΗ(ΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΓΙΑ ΜΕΓΑΛΗ(ΚΑΤΩ) ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΡΟΧΩΡΗΣΗΣ V_A

V_A αξονική ταχύτητα εισερχόμενης ροής (ταχύτητα προχώρησης)

$w.r$ ακτινική ταχύτητα

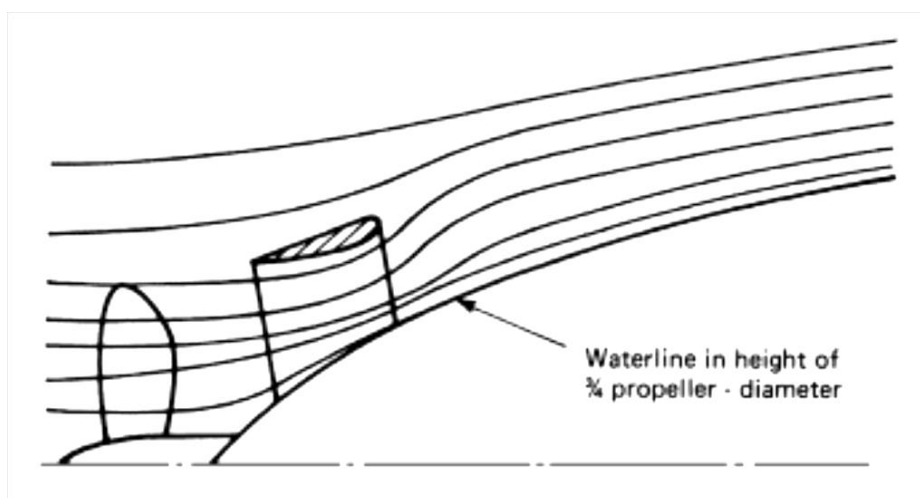
U_A πρόσθετη ταχύτητα στην αξονική διεύθυνση

U_T πρόσθετη ταχύτητα στην ακτινική διεύθυνση

W συνισταμένη ταχύτητα εισερχόμενης ροής

α γωνία πρόσπτωσης της ροής

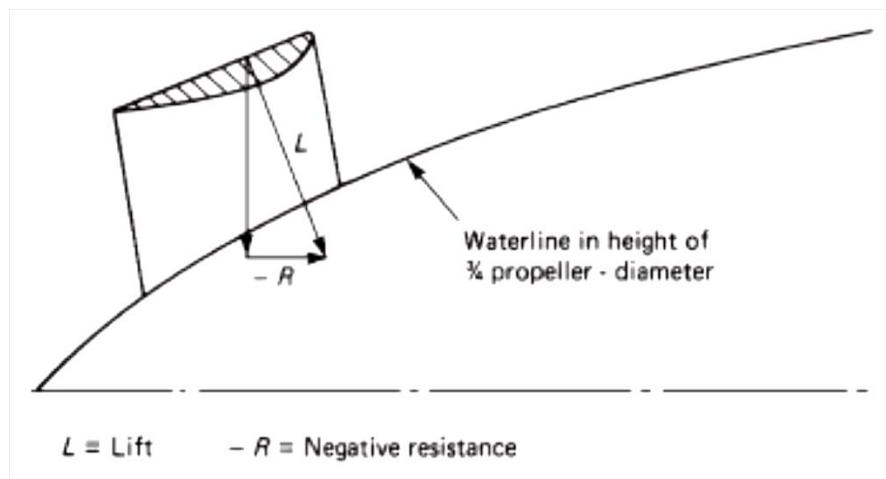
Μια ακόμη βασική αρχή της εφαρμογής των δακτυλίων αυτών είναι η μείωση της απόκλισης που παρουσιάζουν οι γραμμές ροής του ρευστού στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου. Στην περιοχή αυτή οι γραμμές ροής δεν είναι ομαλές, λόγω μείωσης της ταχύτητας. Στην θέση που βρίσκονται οι δακτύλιοι έχουν την δυνατότητα να προλάβουν σημαντικό μέρος της απόκλισης εγκλωβίζοντας τις γραμμές ροής, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα(Εικόνα 1.3). Το γεγονός αυτό συντελεί έναν ακόμα λόγο για την δημιουργία ομοιόμορφης ροής προς την έλικα.



Εικόνα 1.3 ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΡΟΗΣ

Η πρόσπτωση της ροής στον δακτύλιο πριν φτάσει στην έλικα έχει ακόμα μια ευεργετική επίδραση στην ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου καθώς έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μιας ανωστικής δύναμης(LIFT), με διάνυσμα κάθετο στο διάνυσμα της ροής, και μιας επιπλέον αντίστασης(DRAG), λόγω του σχήματος αεροτομής που έχει η διατομή του δακτυλίου, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί(Εικόνα 1.4). Αναλύοντας το διάνυσμα του LIFT είναι φανερό ότι η συνιστώσα του κατά τον διαμήκη άξονα που διατρέχει το πλοίο δημιουργεί μια αρνητική αντίσταση (-R) η οποία συνεισφέρει θετικά στην δύναμη της ώσης μειώνοντας την αντίσταση. Όμως λόγω του DRAG έχει δημιουργηθεί μια ακόμα συνιστώσα αντίστασης. Συνεπώς παίζει πολύ σημαντικό ρόλο η τοποθέτηση των δακτυλίων στην βέλτιστη θέση ώστε τελικά να επιτυγχάνεται μείωση της

αντίστασης του αυτοπροωθούμενου πλοίου και μείωση του συντελεστή μείωσης ώσης t .



Εικόνα 1.4 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΩΣΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΣΤΟΝ ΔΑΚΤΥΛΙΟ ΠΟΥ ΟΔΗΓΕΙ ΣΕ ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΩΣΗ

Η αντίσταση του πλοίου είναι το ολοκλήρωμα των κάθετων και των εφαπτομενικών δυνάμεων που ασκεί το ρευστό στη γάστρα. Η αντίσταση αυτή είναι διαφορετική για ένα πλήρες εξοπλισμένο πλοίο πλήν της έλικας και ένα πλοίο που φέρει έλικα. Αυτό συμβαίνει διότι η λειτουργία της έλικας ρίχνει τις πιέσεις, 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” F . 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” F . Ο συντελεστής μείωσης ώσης χρησιμοποιείται προκειμένου να εκφραστεί αδιάστατα αυτό το ποσοστό μείωσης ώσης F . Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως εξής:

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

Ο συντελεστής μείωσης ώσης αυξάνεται όσο αυξάνεται και ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου w , π.χ για πλοία με μεγάλο συντελεστή γάστρας. Όσο

μειώνεται ο συντελεστής αυτός μειώνεται και αυτή η επιπλέον αντίσταση που δημιουργεί η λειτουργία της έλικας και τελικά, όπως φαίνεται και μέσω της σχέσης, μειώνεται η συνολική αντίσταση του πλήρως εξοπλισμένου αυτοπροωθούμενου πλοίου αφού αυτή ισούται με την συνολική απαίτηση ώσης T .

Ο τελικός βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης εκφράζεται από τον συντελεστή πρόωσης $P.C$, ο οποίος είναι το γινόμενο του βαθμού απόδοσης της έλικας πίσω από το πλοίο η_B , του βαθμού απόδοσης άξονα η_S και του βαθμού απόδοσης γάστρας η_H , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

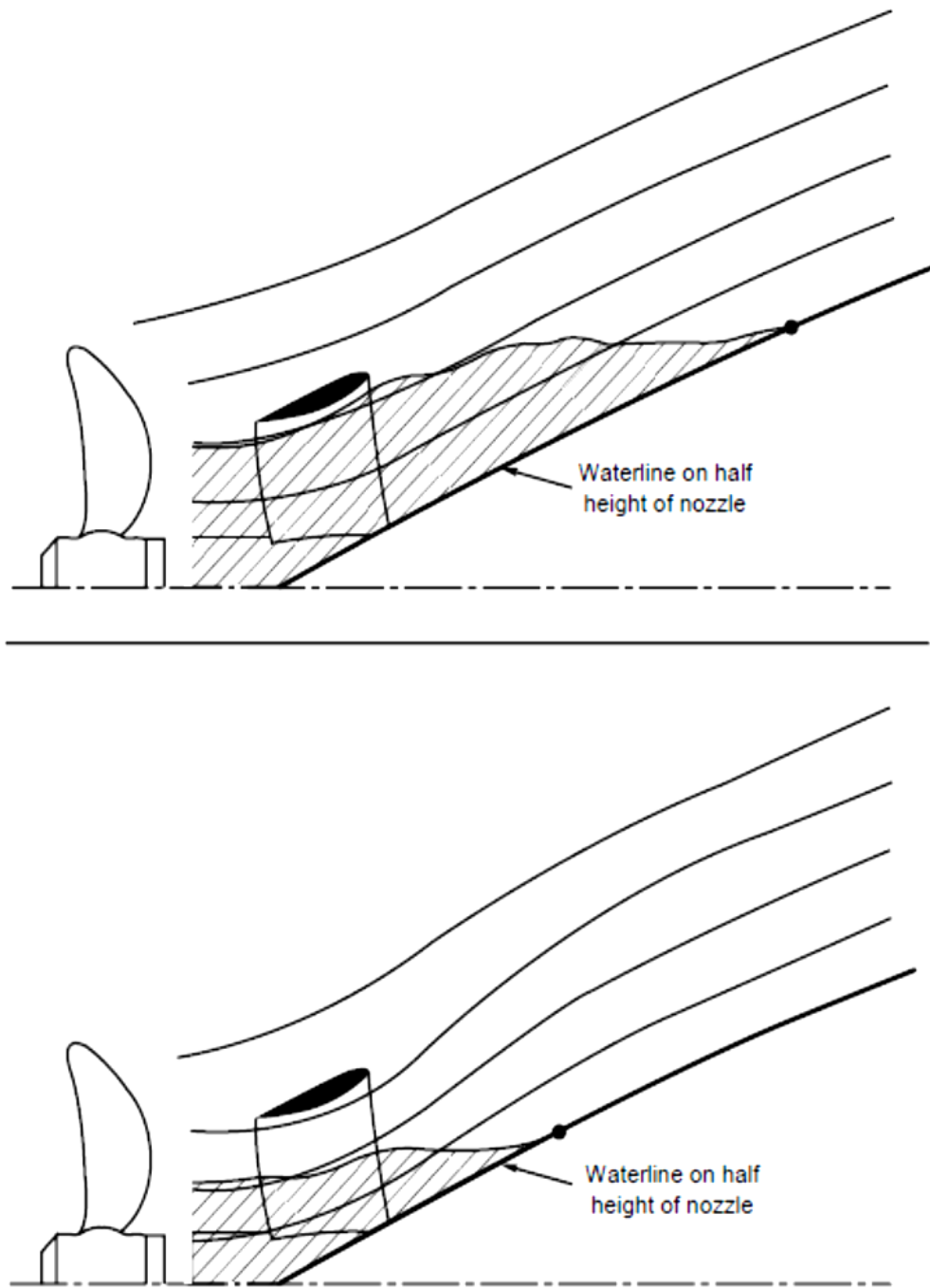
$$P.C = \eta_B \cdot \eta_S \cdot \eta_H$$

, όπου ο βαθμός απόδοσης γάστρας η_H εκφράζεται από την παρακάτω σχέση.

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

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση θα μπορούσε κάποιος να θεωρήσει πως μια μορφή γάστρας που οδηγεί σε υψηλό συντελεστή ομόρρου οδηγεί τελικά σε αύξηση του βαθμού απόδοσης γάστρας και έτσι σε αύξηση του συντελεστή πρόωσης. Όμως ο υψηλός συντελεστής ομόρρου σημαίνει χαμηλή ταχύτητα προχώρησης V_A , από την οποία έχει άμεση εξάρτηση ο βαθμός απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή η_0 . Αύξηση του βαθμού απόδοσης γάστρας μπορεί όμως να επιτευχθεί ακόμα και με υψηλό συντελεστή ομόρρου αλλά στην περίπτωση που θα υπάρχει μειωμένος συντελεστής μείωσης ώσης. Συνεπώς είναι φανερό πως δεν μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα μονοσήμαντα για τον συνολικό βαθμό απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης $P.C$ και η καλύτερη τιμή αυτού του βαθμού απόδοσης θα επιτυγχάνεται όταν η έλικα λειτουργεί σε ομοιογενές πεδίο ομόρρου.

Δυστυχώς, ακόμα και οι υπολογισμοί βασισμένοι στις εξισώσεις “Navier-Stokes” , δεν έχουν καταφέρει να προσδιορίσουν ακριβώς την εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί μέσω των WED. Ο ακριβής προσδιορισμός της απόκλισης των γραμμών ροής παραμένει ένα πρόβλημα. Γενικά είναι επίσης σχεδόν αδύνατο να εκτιμηθεί, χωρίς πειραματικές μετρήσεις σε μοντέλο, το ποσοστό στο οποίο θα μεταβληθεί αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας για μεταβολές της ταχύτητας, του βυθίσματος ή της διαγωγής. Παρόλαυτα υπάρχουν κάποιοι βασικοί λόγοι για τους οποίους η πραγματική εξοικονόμηση ενέργειας σε κλίμακα πλοίου μπορεί να είναι υψηλότερη από αυτή που αρχικά εκτιμάται από τα πειράματα σε κλίμακα μοντέλου. Αρχικά όπως είναι γνωστό το οριακό στρώμα γύρω από τη γάστρα του πλοίου είναι πιο λεπτό σχετικά με αυτό του μοντέλου. Συνεπώς ο όγκος νερού που περνά μέσα από τους δακτυλίους ενός πλοίου είναι μεγαλύτερος. Επιπλέον το μοντέλο έχει τον κίνδυνο να μην εγκλωβίσει πλήρως την απόκλιση των γραμμών ροής που προκαλείται, πράγμα που δεν μπορεί να συμβεί στο πλοίο αφού σε κλίμακα πλοίου η απόκλιση αυτή μεταφέρεται ακόμα πιο κοντά στην πρύμνη(βλ. Εικόνα 1.5) . Όμως η απόκλιση των γραμμών ροής είναι πιο έντονη στην κλίμακα μοντέλου, κάτι που στην περίπτωση αυτή θα λειτουργεί υπέρ του μοντέλου αφού η πιθανή μείωση της απόκλισης αυτής θα είναι μεγαλύτερη(βλ. Εικόνα 1.5). Τέλος μια πολύ μικρή επίδραση στα αποτελέσματα μπορεί να έχουν οι άξονες που τοποθετούνται στο μοντέλο κοντά στους δακτυλίους οι οποίοι σκοπό έχουν να μεταβάλουν τις γωνίες των δακτυλίων και μπορεί να επιφέρουν μια επιπλέον αντίσταση στο μοντέλο.



Εικόνα 1.5 Η ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΡΟΗΣ ΣΕ ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ(ΠΑΝΩ) ΚΑΙ ΣΕ ΚΛΙΜΑΚΑ ΠΛΟΙΟΥ(ΚΑΤΩ)

ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- I. Σε αντίθεση με τις έλικες που περιβάλλονται από δακτύλιο, όπως αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 1.6, οι οποίες λόγω προβλημάτων σπηλαιώσης σχεδόν ποτέ δεν χρησιμοποιούνται σε εμπορικά πλοία, οι έλικες που φέρουν μπροστά δακτύλιους τύπου WED δεν δημιουργούν τέτοια προβλήματα. Αυτό συμβαίνει διότι όσο πιο ομοιόμορφη είναι η ροή προς την έλικα τόσο μειώνεται η πιθανότητα εμφάνισης σπηλαιώσης στην έλικα. Οι ίδιοι οι δακτύλιοι είναι λιγότερο εκτεθειμένοι στον κίνδυνο σπηλαιώσης σχετικά με το πηδάλιο καθώς η ταχύτητα της ροής στο πεδίο ομμόρου λειτουργίας τους είναι μικρότερη σχετικά με αυτή του πηδαλίου και συχνά μπορεί να είναι και μικρότερη από την μισή ταχύτητα του πλοίου.



Εικόνα 1.6 DUCTED PROPELLER

- II. Οι δακτύλιοι τέτοιου τύπου μπορεί να οδηγήσουν και σε βελτίωση των χαρακτηριστικών πηδαλιουχίας καθώς η ροή ακόμα και μετά την έλικα κατευθύνεται ευθυγραμμισμένη προς το πηδάλιο.
- III. Για πλοία τύπου ICE CLASS οι δακτύλιοι ενδέχεται να προστατεύουν την έλικα από τον πάγο.
- IV. Η μείωση της γωνίας πρόσπτωσης της ροής στα πτερύγια της έλικας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, λειτουργεί επίσης ευεργετικά για την μείωση των κραδασμών καθώς μειώνεται η φόρτιση των άκρων των πτερυγίων.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

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 μεταλλικές ράγες πάνω στις οποίες κινείται το φορείο με μέγιστη ταχύτητα 5,2m/s. Επάνω στο φορείο βρίσκεται εγκατεστημένος όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός για την καταγραφή και επεξεργασία των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εμφανίζονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος επίσης βρίσκεται πάνω στο φορείο. Η δεξαμενή διαθέτει σύστημα παραγωγής και απόσβεσης κυματισμών για την διεξαγωγή σχετικών πειραμάτων. 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. Η άποψη της δεξαμενής από το φορείο φαίνεται στην Εικόνα 2.1 που ακολουθεί.



Εικόνα 2.1 Πειραματική δεξαμενή ΕΝΘΥ

Το βασικότερο μέρος του εξοπλισμού για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι το δυναμόμετρο πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένοι όλοι οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις. Το δυναμόμετρο είναι πακτωμένο πάνω στο φορείο και μπορεί να κινείται μαζί με αυτό. Μέσω των αισθητήρων που διαθέτει μπορεί να μετρά την αντίσταση, τον προνευτασμό(pitch) και την κατακόρυφη ταλάντωση του μοντέλου(heave).

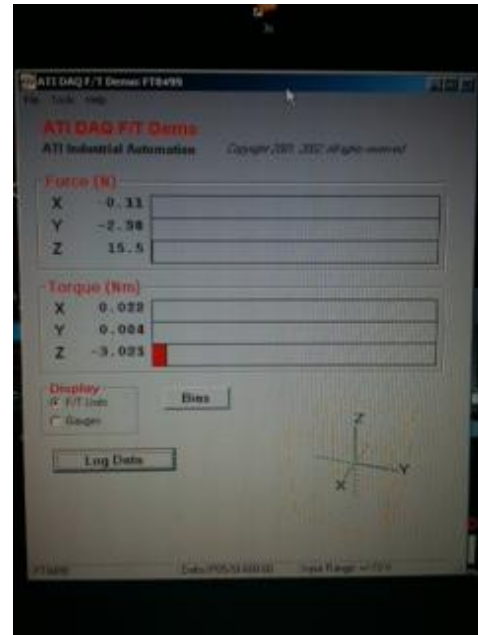
Η μέτρηση της αντίστασης με το δυναμόμετρο R47 αφορά πειράματα μικρών εκτοπισμάτων και πραγματοποιείται μέσω της γέφυρας Wheatstone που υπάρχει στο εσωτερικό του. Η γέφυρα αυτή αποτελείται από ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges) τα οποία είναι συνδεδεμένα σχηματίζοντας κύκλωμα. Το εν δυνάμει σταθερό τμήμα του δυναμομέτρου, το οποίο παραμένει σταθερό, εκτελεί μόνο απειροστά μικρές κινήσεις ως προς τον διαμήκη άξονα της δεξαμενής σχετικά με το σταθερό τμήμα του δυναμομέτρου. Αυτές οι μικρές κινήσεις οφείλονται στην αντίσταση που συναντά το μοντέλο για να κινηθεί στη δεξαμενή. Ο αισθητήρας αντίστασης παραλαμβάνει τις κινήσεις και λόγω της παραμόρφωσης που εντοπίζουν τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα εμφανίζεται μια μεταβολή του ρεύματος που τα διαρρέει και τελικά μια διαφορά τάσης. Έτσι τα αποτελέσματα που εμφανίζει ο υπολογιστής από την μέτρηση της αντίστασης είναι σε Volt. Συνεπώς χρειαζόμαστε μια συνάρτηση μεταφοράς η οποία θα μετατρέπει το αποτέλεσμα από Volt στις επιθυμητές μονάδες για το κάθε μετρούμενο μέγεθος. Οι συναρτήσεις μεταφοράς είναι γραμμικές συναρτήσεις της μορφής $y=a \cdot x+b$, όπου σαν x δέχονται τις τιμές σε Volt και δίνουν σαν αποτέλεσμα y τις επιθυμητές μονάδες για το κάθε μετρούμενο μέγεθος. Για να επιτευχθεί αυτό μετρώνται πρότυπα φυσικά μεγέθη και καταγράφονται οι τιμές σε Volt που εξάγει ο υπολογιστής. Έτσι μέσω αυτών των ζευγών τιμών προκύπτουν και οι αντίστοιχες συναρτήσεις. Αφού προσδιοριστεί η συνάρτηση μεταφοράς για την αντίσταση, τον προνευτασμό και την κατακόρυφη ταλάντωση και πριν από κάθε τρέξιμο του φορείου στην δεξαμενή λαμβάνεται μια μηδενική μέτρηση σε κατάσταση ηρεμίας και καταγράφονται οι τιμές σε Volt για τα τρία

μεγέθη που προαναφέρθηκαν. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στις μηδενικές τιμές των μετρούμενων μεγεθών. Στη συνέχεια πραγματοποιείται τρέξιμο του φορείου και καταγράφονται εκ νέου οι μετρήσεις σε Volt. Οι μετρήσεις αυτές εισάγονται στις συναρτήσεις μεταφοράς και έτσι τελικά απο την διαφορά της μετρούμενης απο την μηδενική τιμή προκύπτουν τα μεγέθη σε φυσικές μονάδες.

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, όπου μελετώνται μεγαλύτερα φορτία (Full Load Condition), δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο δυναμόμετρο (R47). Το δυναμόμετρο αυτό μπορεί να δεχθεί δυνάμεις μέχρι 40kr. Για τον λόγο αυτό σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένα μεγαλύτερο δυναμόμετρο το οποίο μετρά δυνάμεις και ροπές στους τρεις άξονες(x,y,z). Το δυναμόμετρο αυτό μπορεί να καταγράφει την αντίσταση, κατακόρυφες κινήσεις(heave) και ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα(pitch). Η βαθμονόμηση του αισθητήρα για την αντίσταση έχει γίνει απο τον κατασκευαστή και δεν χρειάζεται εκ νέου βαθμονόμηση. Μέσω μιας κάρτας η οποία συνδέεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και με την βοήθεια ενός προγράμματος γίνεται η πειραματική μέτρηση, ενώ τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή απευθείας σε N (για την αντίσταση) και όχι σε Volt. Η κάρτα,το πρόγραμμα του υπολογιστή για τις μετρήσεις καθώς και το δυναμόμετρο είναι αυτά που φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν(Εικόνα 2.2, 2.3 και 2.4).



Εικόνα 2.2 Κάρτα προγράμματος μέτρησης της αντίστασης



Εικόνα 2.3 Πρόγραμμα καταγραφής των μετρήσεων



Εικόνα 2.3 Δυναμόμετρο μέτρησης της αντίστασης

Το δυναμόμετρο αποτελείται απο ένα σταθερό και ένα κινητό μέρος. Το κινητό μέρος του δυναμομέτρου αποτελείται απο ένα βαγονέτο, το οποίο επιτρέπει τις κατακόρυφες κινήσεις, και απο το πόδι του δυναμομέτρου. Για τις ανάγκες των μετρήσεων έχει αφαιρεθεί απο το πόδι του δυναμομέτρου ο controller πάνω στον οποίο συνδέονται τα καλώδια του αισθητήρα για την μέτρηση του προνευτασμού(ritch). Στο πόδι υπάρχουν τέσσερις οπές οι οποίες μέσω κοχλιών βοηθούν στην σύνδεση του μοντέλου πάνω στο δυναμόμετρο. Το βαγονέτο λόγω του βάρους του δεν κινείται με απόλυτη ελευθερία κατα τον κατακόρυφο άξονα. Για τον λόγο αυτό τοποθετούνται βάρη που βοηθούν στην ανύψωση του βαγονέτου. Το συνολικό βάρος του κινητού μέρους του δυναμομέτρου, δηλαδή του βαγονέτου, του ποδιού και των κοχλιών στήριξης, παραλαμβάνεται εξ'ολοκλήρου απο το μοντέλο. Για τον λόγο αυτό ζυγίστηκε έτσι ώστε να αφαιρεθεί το αντίστοιχο βάρος απο το έρμα που θα τοποθετηθεί στο μοντέλο. Το βάρος αυτό υπολογίστηκε 29,560kg. Το πόδι του δυναμομέτρου προσδένεται στο μοντέλο στην θέση του διαμήκους κέντρου άντωσης (LCB).

3. Η ΕΛΙΚΑ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΡΟΗ

3.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το πρώτο φαινόμενο που εξετάστηκε στην δεξαμενή του εργαστηρίου είναι η έλικα 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 η έλικα, παράλληλα με τον άξονα της. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται ταχύτητα προχώρησης. Για την ταχύτητα αυτή περιστρέφουμε τον άξονα της έλικας με στροφές η ασκώντας ροπή Q με αποτέλεσμα η έλικα να αναπτύσσει ώση T . Για ένα εύρος τέτοιων ταχυτήτων και στροφών μπορούμε μέσω ειδικών οργάνων να μετρήσουμε την ροπή και την ώση που αναπτύσσονται. Ένα τέτοιο όργανο είναι το δυναμόμετρο ελεύθερης ροής που χρησιμοποιείται και στο εργαστήριο και είναι εδρασμένο στο φορείο της δεξαμενής.

Σκοπός μας είναι να κατασκευάσουμε το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα αυτοπρόωσης, το οποίο μας δίνει πληροφορίες για τους συντελεστές ώσης και ροπής k_T και k_Q αντίστοιχα και τον βαθμό απόδοσης η για συντελεστές προχώρησης J αναλόγα με την ταχύτητα. Μετρώντας μέσω του ειδικού δυναμομέτρου την ροπή και την ώση που αναπτύσσονται μπορούμε μέσω των σχέσεων που ακολουθούν να υπολογίσουμε τις απαραίτητες παραμέτρους για την κατασκευή του διαγράμματος ελεύθερης ροής. Η έλικα του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Πίνακας 3.1):

	ΕΛΙΚΑ ΠΛΟΙΟΥ	ΕΛΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ
ΚΛΙΜΑΚΑ	1	45
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ, D[m]	7,2	0,16
ΒΗΜΑ, P/D	0,75	
ΛΟΓΟΣ ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ, A_E/A₀	0,70	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ, z	4	
ΜΗΚΟΣ ΧΟΡΔΗΣ ΣΤΟ 0,75R, c[m]	2,5918	0,05759
ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ ΣΤΟ 0,75R, t[m]	0,0972	0,00216
ΦΟΡΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ	ΑΡΙΣΤΕΡΟΣΤΡΟΦΗ	

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά έλικας

Για τον συντελεστή προχώρησης της έλικας ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$J = \frac{V}{n \cdot D} \quad (3.1)$$

, 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:

$$kT = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad (3.2)$$

$$kQ = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad (3.3)$$

, όπου T: η αναπτυσσόμενη ώση [kr]

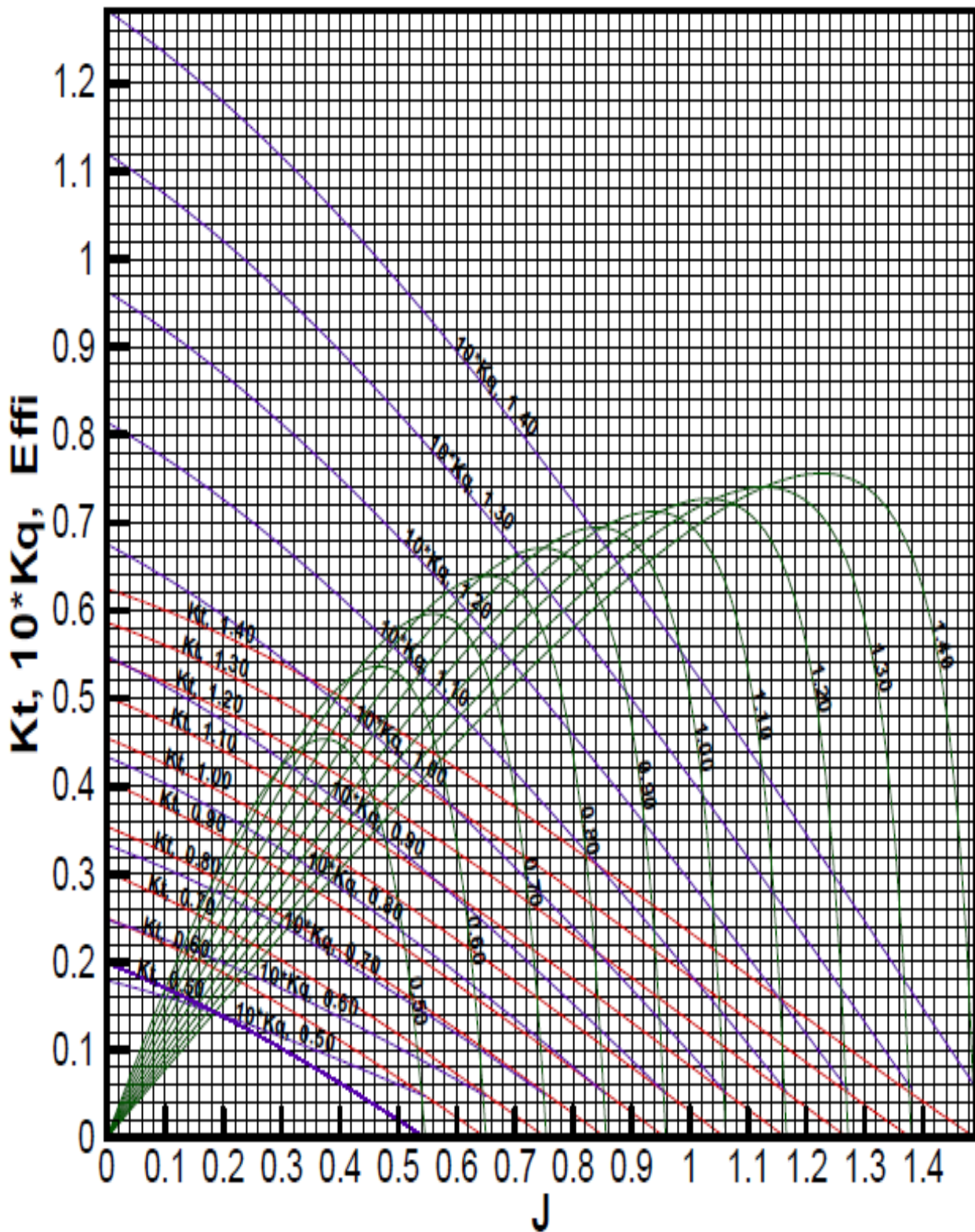
Q: η ροπή στον άξονα [kr·m]

ρ : η πυκνότητα του γλυκού νερού [$\frac{kp \cdot sec^2}{m^4}$]

n : οι στροφές που αναπτύσσει η έλικα[RPS]

D : η διάμετρος της έλικας [m]

Προτού πραγματοποιηθεί το πείραμα της έλικας σε ελεύθερη ροή μπορεί 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 περιμένουμε 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 ± 150 kr·cm και μια μέγιστη ώση ± 40 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 $D=0,16$ m και βήμα $P/D=0,75$, ίδια με αυτά της έλικας του πειράματος. Για την έλικα αυτή είναι γνωστό το διάγραμμα ελεύθερης ροής(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 3.1 Έλικα WAGENIGEN B4-70 σε ελεύθερη ροή

Για ένα εύρος συντελεστών προχώρησης από 0,1 έως 0,8 μπορούμε να προσδιορίσουμε την ταχύτητα και τις στροφές της έλικας, μέσω της σχέσης του συντελεστή προχώρησης που αναφέρθηκε παραπάνω. Για κάθε J μπορούμε επίσης να καταγράψουμε τους συντελεστές ώσης και ροπής k_T και k_Q αντίστοιχα και τον βαθμό απόδοσης η από το διάγραμμα ελεύθερης ροής. Έχοντας τους συντελεστές αυτούς, μέσω των αντίστοιχων σχέσεων, υπολογίζουμε την ροπή και την ώση για την εκάστοτε κατάσταση. Η ισχύς στην έλικα (Delivered Horse Power) υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$DHP = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot Q \quad (3.4)$$

,όπου Q: η ροπή στον άξονα [kr·m]

n : οι στροφές που αναπτύσσει η έλικα [RPS]

Όμως για την επιλογή των ταχυτήτων για το συγκεκριμένο εύρος συντελεστών προχώρησης 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:

$$Re_{0,75c} = \frac{\sqrt{V^2 + (\pi \cdot n \cdot D \cdot 0,75)^2} \cdot C_{0,75R}}{\nu} \quad (3.5)$$

,όπου V: η ταχύτητα της έλικας [m/s]

$C_{0,75R}$: το μήκος χορδής το οποίο μέσω της σχέσης $2,057 = \frac{C}{D} \cdot \frac{z}{Ae/Ao}$, για αριθμό πτερυγίων $z=4$, λόγο εκτεταμένης επιφάνειας $Ae/Ao=0,7$ και $r/R=0,75$, είναι ίσο με 0,05759

ν : η κινηματική συνεκτικότητα του γλυκού νερού [$\frac{m^2}{s}$]

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 3.2 που ακολουθεί:

J	J·D=V/n	V[m/s]	n[RPM]	T[kp]	Q[kp·m]	Kt	10Kq	η	Re_{0,75C}
0,1	0,016	0,5	1875	19,2463	0,37057	0,295	0,355	0,135	595954
0,2	0,032	0,75	1406,25	9,72508	0,1879	0,265	0,32	0,26	448171
0,25	0,04	1,4	2100	20,2961	0,39937	0,248	0,305	0,325	670615
0,3	0,048	1,4	1750	13,0715	0,25916	0,23	0,285	0,38	560214
0,4	0,064	1,4	1312,5	6,07399	0,12276	0,19	0,24	0,49	422762
0,5	0,08	1,4	1050	2,92575	0,06547	0,143	0,2	0,57	340866
0,55	0,088	1,4	954,545	2,02907	0,04734	0,12	0,175	0,6	311279
0,6	0,096	1,4	875	1,37819	0,03524	0,097	0,155	0,61	286738
0,65	0,104	1,4	807,692	0,90798	0,02518	0,075	0,13	0,59	266078
0,7	0,112	1,4	750	0,55325	0,01787	0,053	0,107	0,505	248466
0,75	0,12	1,4	700	0,22733	0,01164	0,025	0,08	0,305	233290
0,8	0,128	1,4	656,25	0	0,00703	0	0,055	0,05	220092

Πίνακας 3.2 ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ ΩΣΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ ΓΙΑ ΕΛΙΚΑ WAGENIGEN B4-70

3.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΟΥ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ

Για την έναρξη της διαδικασίας των πειραμάτων της έλικας σε ελεύθερη ροή είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του δυναμομέτρου που θα χρησιμοποιηθεί. Μέσω της βαθμονόμησης παράγεται μια συνάρτηση μεταφοράς για την μετρούμενη ώση και ροπή. Η συνάρτηση μεταφοράς σκοπό έχει να μετατρέψει τα αποτελέσματα που εξάγει ο υπολογιστής στις μονάδες που αντιστοιχούν στο εκάστοτε μετρούμενο μέγεθος.

Το μετρικό σύστημα του δυναμομέτρου για την μέτρηση ώσης και ροπής είναι τύπου Full Bridge Strain Gauge. Το δυναμόμετρο της ελεύθερης ροής 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 δυναμομέτρου όπου είναι προσαρτημένα. Οι παραμορφώσεις αυτές προκαλούν μεταβολή της αντίστασης των ηλεκτρικών επιμηκυνσιόμετρων, η οποία συνεπάγεται μια μεταβολή στο ρεύμα που τα διαρρέει και μια διαφορά τάσης. Είναι προφανές λοιπόν πως μέσω αυτής της μεθόδου τα αποτελέσματα θα μετρώνται σε μονάδες μέτρησης της τάσης [Volt] και μέσω της συνάρτησης μεταφοράς θα επιτυγχάνεται η μετατροπή των μετρούμενων Volt σε kr και σε $kr \cdot cm$ για την ώση και την ροπή αντίστοιχα. Προκειμένου να βρεθεί αυτή η συνάρτηση μεταφοράς για το κάθε μέγεθος έγιναν κάποιες μετρήσεις προτού προσαρτηθεί η έλικα στο δυναμόμετρο, εκτός της δεξαμενής. 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 δυναμομέτρου, και παρέχει την δυνατότητα ανάρτησης βαρών στην άκρη του δυναμομέτρου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1 παρακάτω. Συνεπώς το βάρος που αναρτάται κάθε φορά μεταφέρεται στην κεφαλή του δυναμομέτρου και μέσω των παραμορφώσεων που παραλαμβάνουν τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα εξάγονται αποτελέσματα από τον υπολογιστή σε Volt. Αναρτώντας λοιπόν 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 μπορούμε να παράξουμε μια συνάρτηση η οποία συνδέει το μετρούμενο μέγεθος με το αποτέλεσμα που δίνει ο υπολογιστής. Προσοχή χρειάζεται στην μέτρηση ροπής καθώς πρέπει να μπλοκαριστεί το άλλο άκρο του δυναμομέτρου για να μην υπάρχει περιστροφή. Επίσης προκειμένου να μετρήσουμε αριστερόστροφη ροπή αναρτούμε τα βάρη δεξιά. Το αναρτόμενο βάρος, η μεριά τοποθέτησης του βάρους για την παραγωγή ροπής καθώς και οι συναρτήσεις μεταφοράς που προέκυψαν φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.



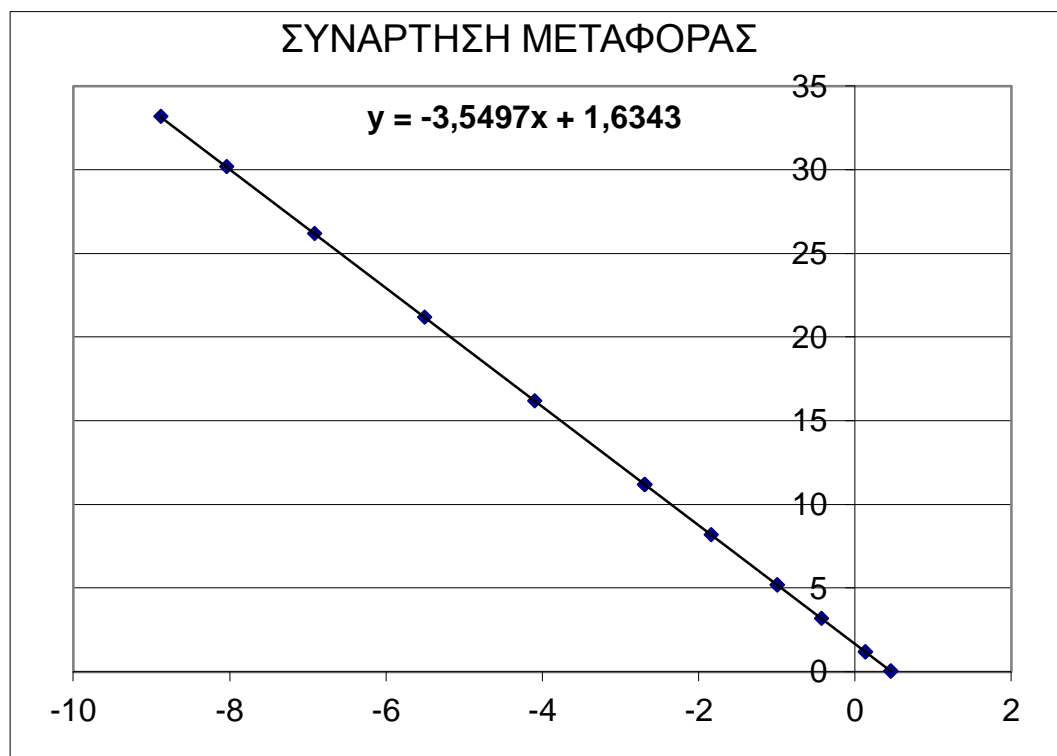
Εικόνα 3.1 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΩΣΗΣ

Στον Πίνακα 3.3 που ακολουθεί φαίνονται οι μετρήσεις που έγιναν για την βαθμονόμηση του αισθητήρα μέτρησης ώσης. Στην δεύτερη στήλη βλέπουμε τα αναρτώμενα βάρη σε kg ενώ στην πρώτη στήλη έχουμε τα αποτελέσματα που δίνει ο υπολογιστής σε Volt για το εκάστοτε βάρος. Απο 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

Πίνακας 3.3 Βαθμονόμηση αισθητήρα μέτρησης ώσης



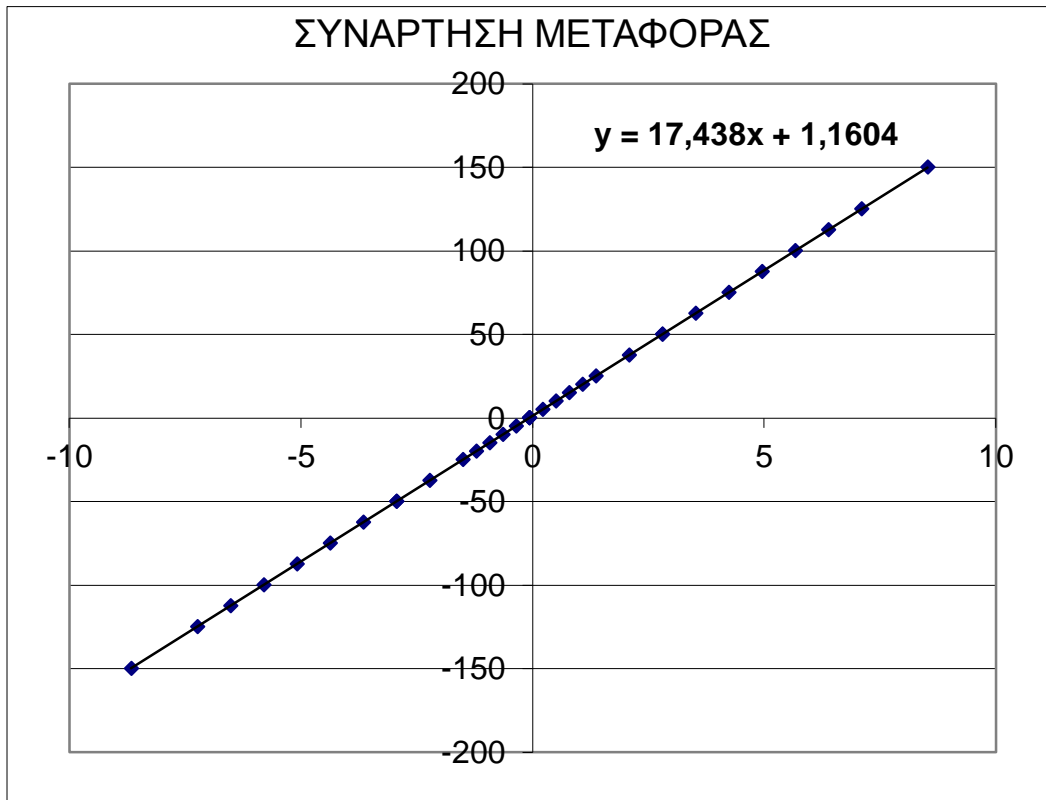
Διάγραμμα 3.2 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΩΣΗΣ

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ

Στον Πίνακα 3.4 παρακάτω 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. Τέλος στην πρώτη στήλη παρατίθενται τα αποτελέσματα που εξάγει ο υπολογιστής σε Volt. Από τις μετρήσεις αυτές προκύπτει και η συνάρτηση μεταφοράς για την ροπή.

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

Πίνακας 3.4 Βαθμονόμηση αισθητήρα μέτρησης ροπής



Διάγραμμα 3.3 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΡΟΠΗΣ

3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Όπως έχει προαναφερθεί, σκοπός του πειράματος αυτού είναι ο υπολογισμός των συντελεστών k_T , k_Q και η_0 για την κατασκευή του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα αυτοπρόωσης. 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 δυναμομέτρου και αφού έχουμε τις συναρτήσεις μεταφοράς για την ώση και ροπή τοποθετείται στο δυναμόμετρο η έλικα και εισέρχεται στην δεξαμενή.



Εικόνα 3.2 ΕΛΙΚΑ ΣΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΡΟΗ

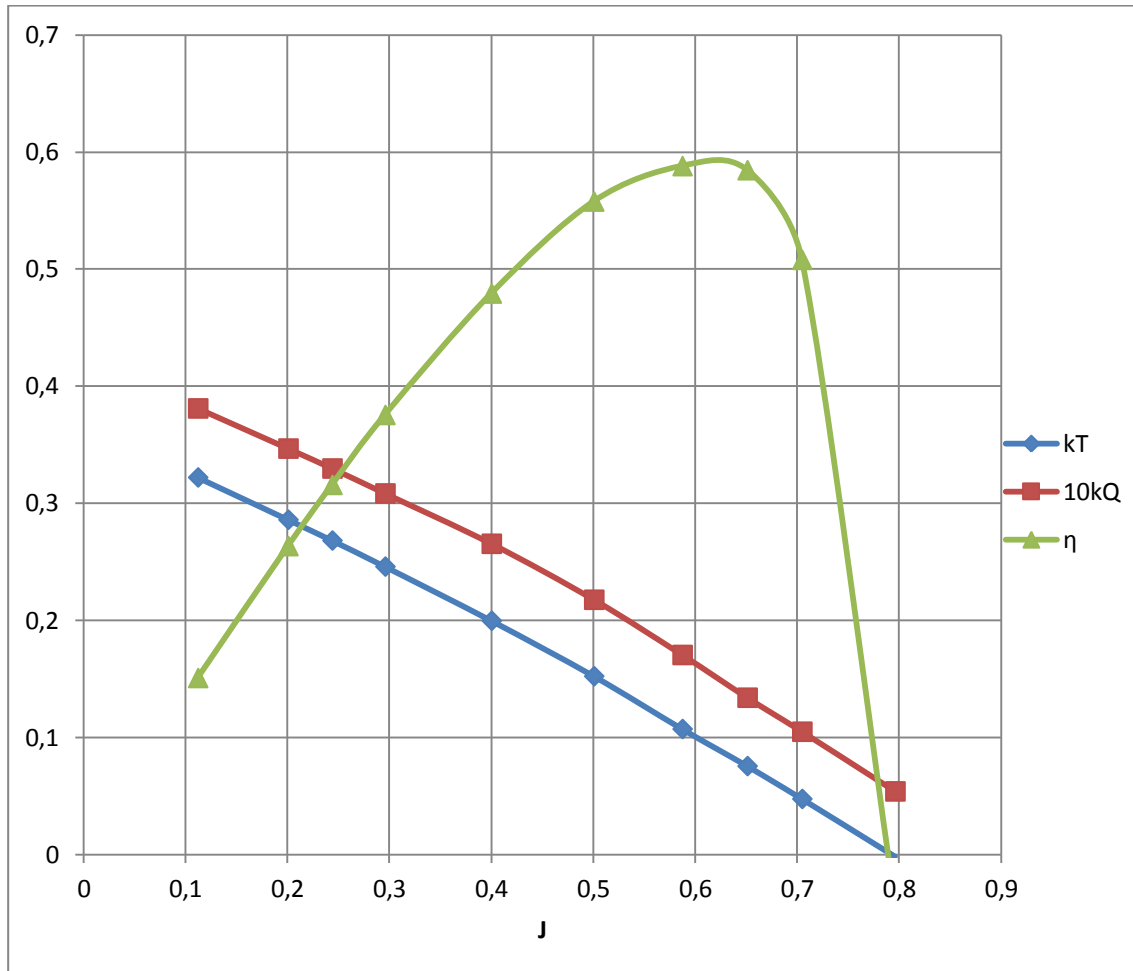
Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις ταχύτητες και στις αντίστοιχες στροφές για τις οποίες έχουμε προεκτιμήσει ώση και ροπή παραπάνω. Αρχικά, κατά την πρώτη σειρά πειραμάτων, εκτός από τις στροφές μεταβάλαμε και την ταχύτητα του φορείου για κάθε συντελεστή προχώρησης J . Όμως λόγω μικρών αποκλίσεων των 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 . Παρατηρούμε όμως ότι για μικρούς συντελεστές προχώρησης ($J=0,1$ και $J=0,2$) η ταχύτητα που επιλέχθηκε είναι μικρότερη από την ταχύτητα που πραγματοποιήθηκαν τα υπόλοιπα πειράματα για μεγαλύτερους συντελεστές. Αυτό

συνέβει διότι για να επιτύχουμε τόσο μικρούς συντελεστές για ταχύτητα 1,4m/s οι στροφές θα ξεπερνούσαν τις 3000RPM, πράγμα που θα οδηγούσε σε υπερφόρτιση του κινητήρα. Συνεπώς καταλήξαμε σε μικρότερες ταχύτητες μόνο για αυτούς τους δυο συντελεστές.

Στο δυναμόμετρο δεν μπορούμε απευθείας να ορίσουμε στροφές σε RPM. Εσωτερικά του δυναμομέτρου υπάρχει ένας παλμοδότης (encoder wheel) ο οποίος παράγει 100 παλμούς ανά περιστροφή του άξονα. Συνεπώς αυτό που αντιλαμβάνεται το δυναμόμετρο είναι οι παλμοί που εμείς θα του ορίσουμε. Έχοντας τις επιθυμητές στροφές σε RPM μπορούμε διαιρώντας με 60, για να υπολογίσουμε τις στροφές ανα δευτερόλεπτο(RPS), και πολλαπλασιάζοντας με 100 να υπολογίσουμε τους παλμούς που πρέπει να παραχθούν ανα δευτερόλεπτο για να επιτύχουμε τις επιθυμητές στροφές στον άξονα. Για την διεξαγωγή του πειράματος και την καταγραφή αποτελεσμάτων για την παραγόμενη ώση και ροπή αρκεί να τρέξουμε το φορείο στην κατάλληλη ταχύτητα και να ορίσουμε τους παλμούς που υπολογίσαμε. 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 μας 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 καταφράφηκαν παραπάνω, τα Volt μετατρέπονται σε kP για την ώση και σε kP·cm για την ροπή. Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον συντελεστή προχώρησης J και τους συντελεστές kT, kQ και η μέσω των παραπάνω σχέσεων και χαράσσεται έτσι 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).

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ			ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ		ΜΕΤΡΗΣΗ ΩΣΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ ΣΕ VOLT		ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΩΣΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ ΑΠΟ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ		ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ ΕΛΙΚΑΣ			
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ V[m/s]	PULSES ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΣΤΡΟΦΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ [RPM]	T[V]	Q[V]	T[V]	Q[V]	T[kp]	Q[kp·cm]	J	Kt	10Kq	η
0,562	3135	1881	0,477	0,047	-5,482	-2,249	21,15266	-40,0376	0,1120	0,322155	0,38111	0,150812
0,755	2352	1411,2	0,475	0,048	-2,503	-1,128	10,57101	-20,5071	0,2006	0,286034	0,3468	0,263489
1,412	3620	2172	0,475	0,045	-6,141	-2,604	23,48482	-46,1933	0,2437	0,268254	0,32977	0,315773
1,41	2980	1788	0,475	0,045	-3,636	-1,634	14,59282	-29,2784	0,2957	0,24597	0,30844	0,375522
1,405	2195	1317	0,477	0,046	-1,334	-0,738	6,428507	-13,6714	0,4000	0,199718	0,26546	0,479269
1,404	1753	1051,8	0,477	0,047	-0,404	-0,363	3,127286	-7,14958	0,500	0,152328	0,21766	0,557844
1,4	1490	894	0,477	0,048	0,029	-0,184	1,590266	-4,04562	0,5872	0,107219	0,17048	0,588122
1,403	1347	808,2	0,475	0,046	0,217	-0,103	0,915823	-2,59826	0,6509	0,075553	0,13397	0,5846
1,406	1247	748,2	0,476	0,046	0,337	-0,054	0,493408	-1,7438	0,7046	0,047495	0,10491	0,508006
1,401	1100	660	0,48	0,048	0,484	0,008	-0,014199	-0,69752	0,7960	-0,00176	0,05393	-0,04128

Πίνακας 3.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ



Διάγραμμα 3.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Το βάθος της έλικας για την διεξαγωγή του πειράματος ελεύθερης ροής ήταν 38cm από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Προκειμένου να εξεταστεί αν υπάρχει εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το βύθισμα της έλικας πραγματοποιήθηκαν τρεις μετρήσεις στις οποίες παρέμεναν σταθερές όλες οι παράμετροι όπως ο συντελεστής προχώρησης, η ταχύτητα και οι στροφές και το μόνο που μεταβάλαμε κάθε φορά ήταν η απόσταση της έλικας από την ελεύθερη επιφάνεια. Αρχικά η απόσταση μειώθηκε κατά 5cm, στην συνέχεια άλλα 5cm και στην τελευταία μέτρηση άλλα 5cm έτσι ώστε η τελική από την αρχική μέτρηση να έχει μια διαφορά βυθίσματος 15cm. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν για συντελεστή προχώρησης $J=0,5$, ταχύτητα φορείου $V=1,4m/s$ και στροφές $n=1050RPM$. Το συμπέρασμα ήταν πως για αυτή την ταχύτητα και τις στροφές δεν υπάρχει κάποια εξάρτηση των αποτελεσμάτων από το

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

βύθισμα της έλικας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 3.6 που ακολουθεί.

ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ				ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ							
J	V	ΜΕΙΩΣΗ ΒΑΘΟΥΣ	n[RPM]	T[V]	Q[V]	T[kp]	Q[kp·cm]	J	Kt	10Kq	η
0,5	1,4	5cm	1050,6	0,473	0,046	3,141	-7,0798	0,4997	0,1533	0,216	0,564
0,5	1,4	10cm	1051,2	0,473	0,05	3,141	-7,1670	0,4994	0,1531	0,218	0,557
0,5	1,4	15cm	1051,8	0,469	0,048	3,120	-7,1321	0,4991	0,1519	0,217	0,556

Πίνακας 3.6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΑΘΟΥΣ ΕΛΙΚΑΣ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ

4. ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το υπο μελέτη δεξαμενόπλοιο “SCORPIO” είναι αυτό που φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί και οι κύριες διαστάσεις του παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.



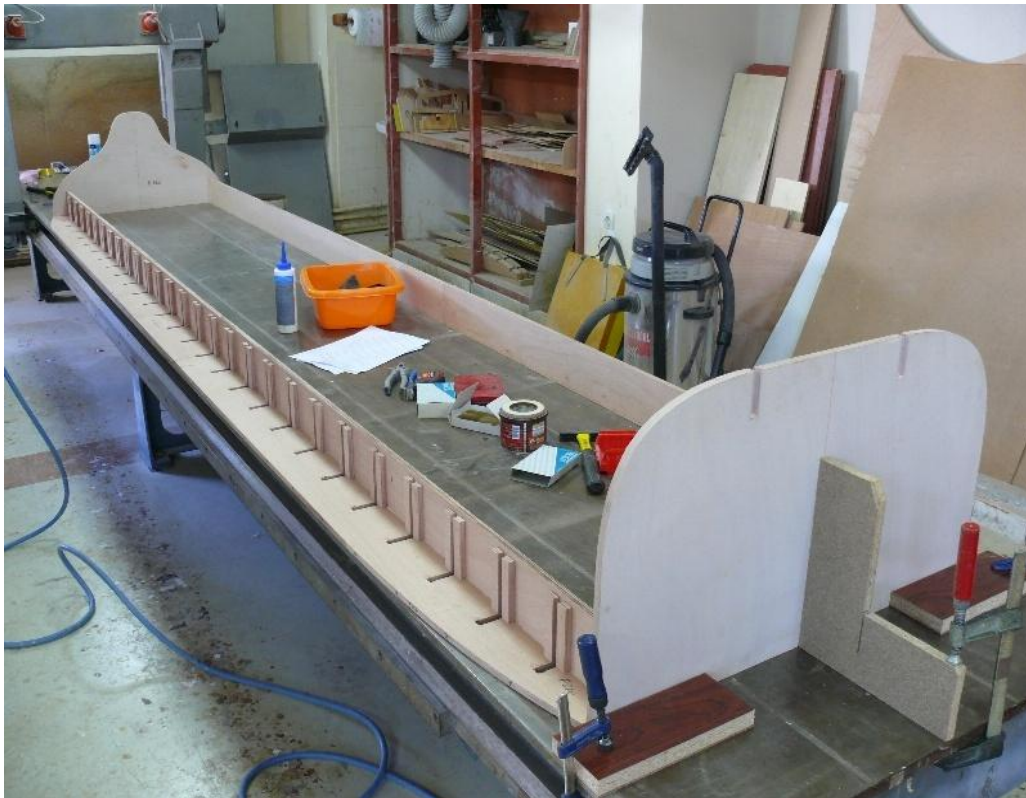
ΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ L_{OA}	243,800m
ΜΗΚΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΘΕΤΩΝ L_{BP}	233,000m
ΠΛΑΤΟΣ B	42,000m
ΚΟΙΛΟ D	21,400m
ΒΥΘΙΣΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ T_{des}	13,500m
ΒΥΘΙΣΜΑ ΑΝΤΟΧΗΣ $T_{SCANTLING}$	15,100m
ΣΙΜΟΤΗΤΑ SHEER	ΛΟΓΩ ΚΥΡΤΟΤΗΤΑΣ
ΚΥΡΤΟΤΗΤΑ CAMBER	0,900m
RADIUS OF BILGE CIRCLE R	2,000m

Πίνακας 4.1 Κύριες διαστάσεις SCORPIO

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά κατασκευάστηκε στο προτυποποιείο του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών μοντέλο του υπο μελέτη πλοίου υπο κλίμακα 1:45. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται τα στάδια κατασκευής του μοντέλου μέχρι την τελική μορφή του.



ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ SCHNEEKLUH ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ 2013





ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ SCHNEEKLUH ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ 2013





Προκειμένου να υπολογιστούν τα υδροστατικά μεγέθη που αφορούν την παρούσα διπλωματική εργασία και θα χρειαστούν τόσο για τους πειραματικούς όσο και για τους αριθμητικούς υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα HYDRO που αναπτύχθηκε 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 για το παρόν πρόγραμμα έχει 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

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ SCHNEEKLUH ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

την κατάσταση πλήρους φόρτωσης του πλοίου(Full Load Condition) η οποία συνιστά ισοβύθιστη κατάσταση πλεύσης σε βύθισμα $T_s=14,86m$. Συνεπώς τα υδροστατικά αποτελέσματα που θα εξάγουμε 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 μπορούμε να συλλέξουμε τα παρακάτω στοιχεία για τα υδροστατικά μεγέθη που αφορούν την ισοβύθιστη κατάσταση πλεύσης.

<i>T[m]</i>	<i>AREA[m2]</i>	<i>LCF[m]</i>	<i>V [m3]</i>	<i>DISP.[tn]</i>	<i>LCB[m]</i>	<i>BM[m]</i>	<i>KB[m]</i>	<i>W.S[m2]</i>	<i>BML[m]</i>
14,8	8976,7	-1,582	119171,3	122150,6	7,582	10,011	7,744	14523,3	297,2
14,9	8983,9	-1,649	120069,3	123071,0	7,513	9,949	7,797	14572,3	295,6

<i>T[m]</i>	<i>TPC[t/cm]</i>	<i>MCT[tm/cm]</i>	<i>CB</i>	<i>CW</i>	<i>CM</i>	<i>CP</i>
14,8	92,011	1526,786	0,82228	0,9173	0,9967	0,82554
14,9	92,085	1529,526	0,82346	0,918	0,9967	0,82616

Πίνακας 4.2 Υδροστατικά μεγέθη του υπο μελέτη πλοίου SCORPIO

Στο πρόγραμμα δεν μπορεί να εισαχθεί βύθισμα $T=14,86m$. Για τον λόγο αυτό μέσω του $TPC[t/cm]$, που εκφράζει την αλλαγή του εκτόπισματος ανά μονάδα μεταβολής του βυθίσματος, μπορούμε να υπολογίσουμε το εκτόπισμα του πλοίου που αντιστοιχεί σε βύθισμα 14,86m. Για αύξηση του βυθίσματος κατά 6cm απο τα 14,8m θα έχουμε μια μεταβολή στο εκτόπισμα κατά 552,066tn. Άρα το εκτόπισμα του πλοίου που αντιστοιχεί σε βύθισμα 14,86m είναι $\Delta=122702,6tn$, δηλαδή $V=119709,9m^3$. Επίσης για τον συντελεστή γάστρας C_B θα έχουμε:

$$C_B = \frac{V}{L \cdot B \cdot T} = 0,8232$$

Το κέντρο του συστήματος συντεταγμένων κατά τον άξονα x έχει οριστεί στο πρόγραμμα στα 116,5m. Συνεπώς όταν, μέσω γραμμικής παρεμβολής, έχουμε

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ SCHNEEKLUH ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

LCB=7,54m για T=14,86m σημαίνει ότι το LCB απέχει από την πρυμναία κάθετο 116,5+7,54=124,04m.

Για κλίμακα μοντέλου 1:45 προκύπτει ότι για βύθισμα μοντέλου $T_{MODEL}=330,2mm$ θα έχουμε $V_{MODEL}=1,313m^3$,δηλαδή $\Delta_{MODEL}=1,313tn$, και $LCB_{MODEL}=2,756m$ (από την πρυμναία κάθετο).

FULL LOAD CONDITION		
	ΠΛΟΙΟ	ΜΟΝΤΕΛΟ
ΜΗΚΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΘΕΤΩΝ, $L_{BP}[m]$	243,8	5,418
ΟΛΙΚΟ ΜΗΚΟΣ, $L_{OA}[m]$	233	5,178
ΠΛΑΤΟΣ, $B[m]$	42	0,933
ΒΥΘΙΣΜΑ, $T[m]$	14,86	0,330
ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ, $\Delta[tn]$	122702,6	1,313
ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΚΕΝΤΡΟΥ ΑΝΤΩΣΗΣ ΑΠΟ ΚΑΘΡΕΦΤΗ, $LCB[m]$	128,54	2,856
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΒΡΕΧΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕ ΠΗΔΑΛΙΟ, $S_{BH}[m^2]$	14693,4	7,256
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΒΡΕΧΟΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕ ΠΗΔΑΛΙΟ ΚΑΙ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥΣ, $S_{APP}[m^2]$	14711,6	7,265
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ, C_B	0,8232	0,8232

5. ΠΡΟΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ LAP- KELLER

Πρίν την έναρξη των πειραμάτων μέτρησης της αντίστασης γυμνής γάστρας του μοντέλου γίνεται μια προεκτίμηση της αντίστασης με βάση την μέθοδο LAP-KELLER. Οι ταχύτητες του πλοίου που μας ενδιαφέρουν είναι 10, 12, 13 και 14 kn. Συνεπώς οι αντίστοιχες ταχύτητες του μοντέλου στις οποίες θα γίνει προεκτίμηση της αντίστασης είναι 1,49, 1,79, 1,94 και 2,08 kn. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η συνολική αντίσταση του μοντέλου δίδεται από την εξής σχέση:

$$R_{T,m} = (R_{F,m} + R_R \cdot k_1) \cdot k_2 \quad (5.1)$$

, όπου: $R_{F,m} = (C_F + C_A) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot S$, η αντίσταση τριβής του μοντέλου

$R_{R,m} = \zeta_r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot A_M$, η υπόλοιπη αντίσταση

$\rho = 101,924 \text{ kp} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$ η πυκνότητα του γλυκού νερού

$A_M = 0,307 \text{ m}^2$ η επιφάνεια της μέσης τομής του μοντέλου

k_1, k_2 : συντελεστές διορθώσεως

Ο προσδιορισμός των συντελεστών αντίστασης C_F, C_A, ζ_r , των συντελεστών διορθώσεως k_1, k_2 και της βρεχόμενης επιφάνειας S γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω ανάλυση.

Συντελεστής Αντίστασης Τριβής C_F

Για το υπό μελέτη πλοίο, ισχύουν:

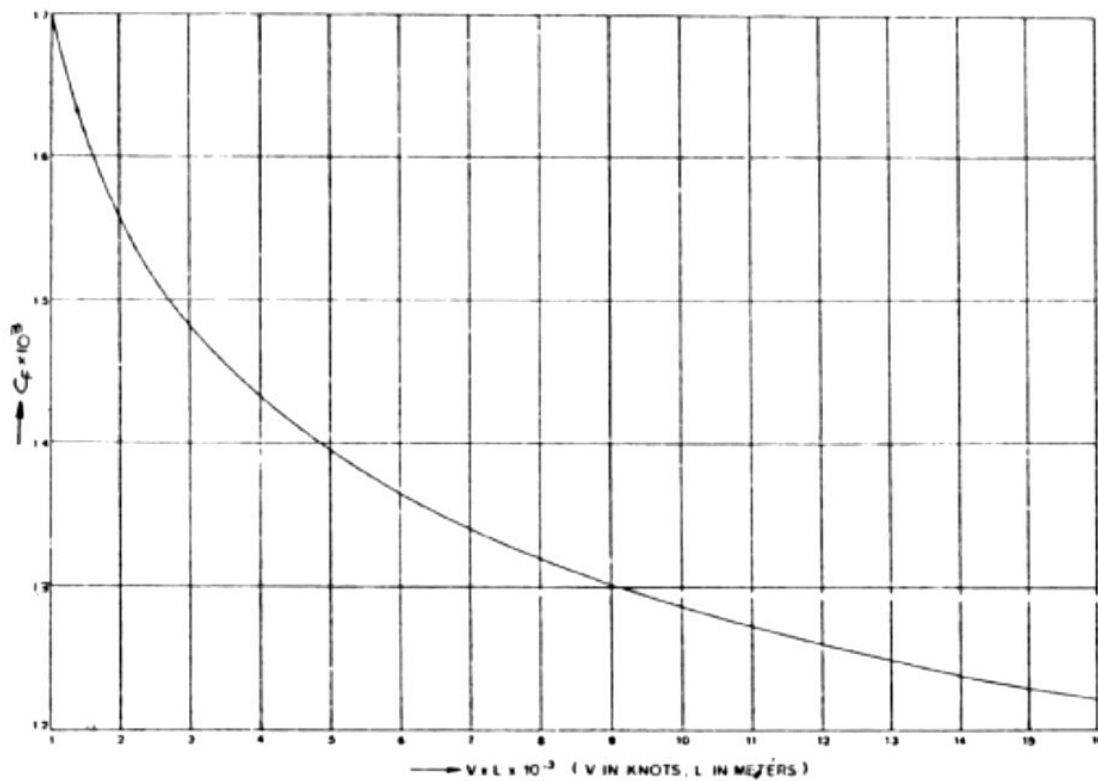
$$L_{WL} = 237,5 \text{ m}$$

$$\text{και } 1,01 L_{BP} = 235,33 \text{ m}$$

δηλαδή, $1,01 L_{BP} < L_{WL}$ οπότε λαμβάνεται: $L_d = 1,01 L_{BP} = 235,33 \text{ m}$

Ομοίως για το μοντέλο θα είναι $L_{d,m} = 235,33/45 = 5,230 \text{ m}$.

Ο υπολογισμός του C_F γίνεται με βάση το Διάγραμμα 5.1 σαν συνάρτηση του $V \cdot L_d$. Όμως εφόσον η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται για διαστάσεις μοντέλου είναι προφανές πως για τις ταχύτητες 1,49, 1,79, 1,94 και 2,08 kn καθώς επίσης και για $L_{d,m} = 5,230 \text{ m}$ θα έχουμε τιμές $V \cdot L_d$ εκτός του διαγράμματος.



Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα προσδιορισμού συντελεστή C_F

Για τον λόγο αυτό θα γίνει μια εκτίμηση του συντελεστή τριβής με την βοήθεια του τύπου της καμπύλης της ITTC ο οποίος είναι ο παρακάτω:

$$C_{F, ITTC} = 0.075 / (\log_{10} Re - 2)^2 \quad (5.2)$$

Αρχικά υπολογίζουμε τον συντελεστή C_F για το υπο μελέτη πλοίο από το παραπάνω διάγραμμα καθώς και από τον τύπο της καμπύλης της ITTC. Έτσι προκύπτει ένας λόγος διόρθωσης $C_F / C_{F, ITTC}$. Οι υπολογισμοί αυτοί για τις υπό εξέταση ταχύτητες φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

V_s [kn]	10	12	13	14
$L_{d,s}$	235,33	235,33	235,33	235,33
$V_s \cdot L_{d,s}$	2,3533	2,8240	3,0593	3,2946
$10^3 \cdot C_{Fs}$	1,5300	1,4800	1,4700	1,4600
Re_s	1,158E+09	1,389E+09	1,50E+09	1,62E+09
$C_{Fs,ITTC}$	0,0015	0,00147	0,001456	0,00144
$C_{Fs}/C_{Fs,ITTC}$	1,0178	1,0068	1,0097	1,0119

Πίνακας 5.1 Υπολογισμός διορθωτικού παράγοντα για τον συντελεστή αντίστασης τριβής του μοντέλου

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον συντελεστή C_F για το **μοντέλο** από τον τύπο της καμπύλης της ITTC και τον πολλαπλασιάζουμε με τον λόγο διόρθωσης $C_{Fs}/C_{Fs,ITTC}$ έτσι ώστε να προκύψει η τιμή του C_F που θα έδινε το διάγραμμα της μεθόδου LAP-KELLER.

Re_m	3,153E+06	3,784E+06	4,099E+06	4,41E+06
$C_{Fm,ITTC}$	0,00370573	0,003578649	0,003524914	0,003476
C_{Fm}	0,00377182	0,003602872	0,003559188	0,003517

Πίνακας 5.2 Συντελεστής αντίστασης τριβής μοντέλου

Συντελεστής Συσχετίσεως C_A

Για το υπό μελέτη πλοίο ισχύει $L_{BP} = 233$ m, οπότε από τον Πίνακα 5.3 προκύπτει:

$$C_A = 0,001$$

Μήκος πλοίου	Συντελεστής C_A
50-150m	+0.0004+0.00035
150-210m	+0.0002
210-260m	+0.0001
260-300m	0
300-350m	-0.0001
350-450m	-0.00025

Πίνακας 5.3 Συντελεστής C_A

Συντελεστής Υπολοίπων Αντιστάσεων ζ_r

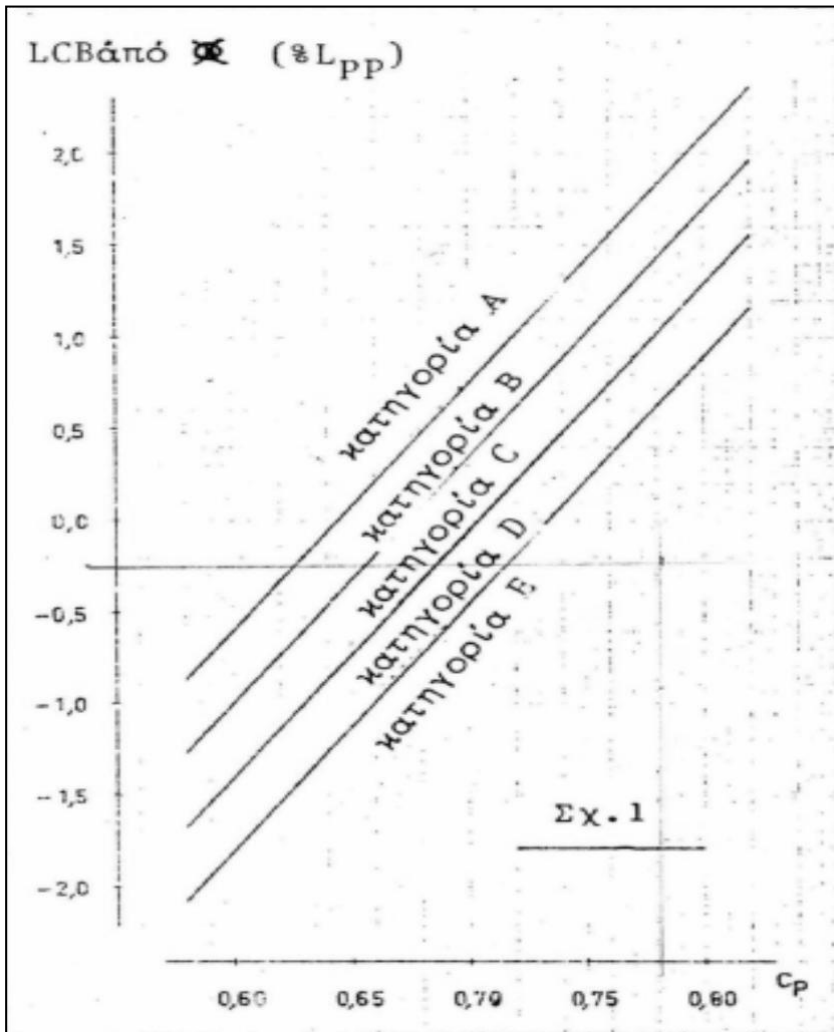
Ο συντελεστής υπολοίπων αντιστάσεων για την κάθε ταχύτητα, προκύπτει από το Διάγραμμα 5.3 που ακολουθεί, ως συνάρτηση του λόγου $V/(C_p L_d)^{1/2}$. Το σχήμα αυτό αντιστοιχεί στην κατηγορία πλοίων Α, η οποία ορίζεται με βάση το LCB σαν ποσοστό του μήκους, σύμφωνα με το Διάγραμμα 5.2.

Για το υπο μελέτη πλοίο και μοντέλο ισχύουν:

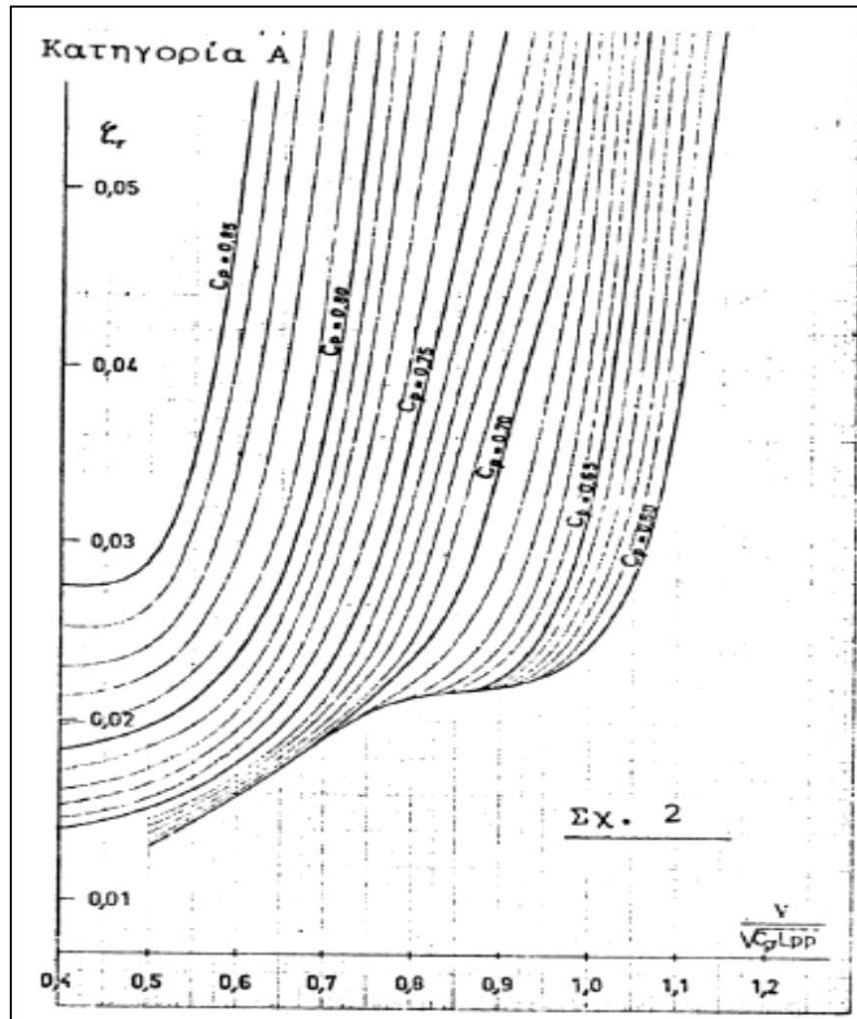
$$C_p = 0,8259$$

LCB = +3, 24% από το μέσο νομέα

, οπότε ανήκουν στην κατηγορία Α.



Διάγραμμα 5.2 Κατηγορία πλοίου



Διάγραμμα 5.3 Συντελεστής υπολοίπων αντιστάσεων

Οι λόγοι $V/(C_{p,d} L_d)^{1/2}$ καθώς και οι υπολογιζόμενοι συντελεστές υπολοίπων αντιστάσεων ζ_r για το μοντέλο φαίνονται στον Πίνακα 5.4 που ακολουθεί. Ο συντελεστής C_{pd} είναι ο πρισματικός συντελεστής που αντιστοιχεί στο μήκος L_d , όπως αυτό υπολογίστηκε παραπάνω.

$V_m[kn]$	1,49071198	1,788854382	1,93792558	2,086997
$V_m/(L_{d,m} \cdot C_{pd})^{1/2}$	0,3705	0,4446	0,4817	0,5187
ζ_r	0,0220	0,0230	0,0240	0,0250

Πίνακας 5.4 Συντελεστής υπολοίπων αντιστάσεων

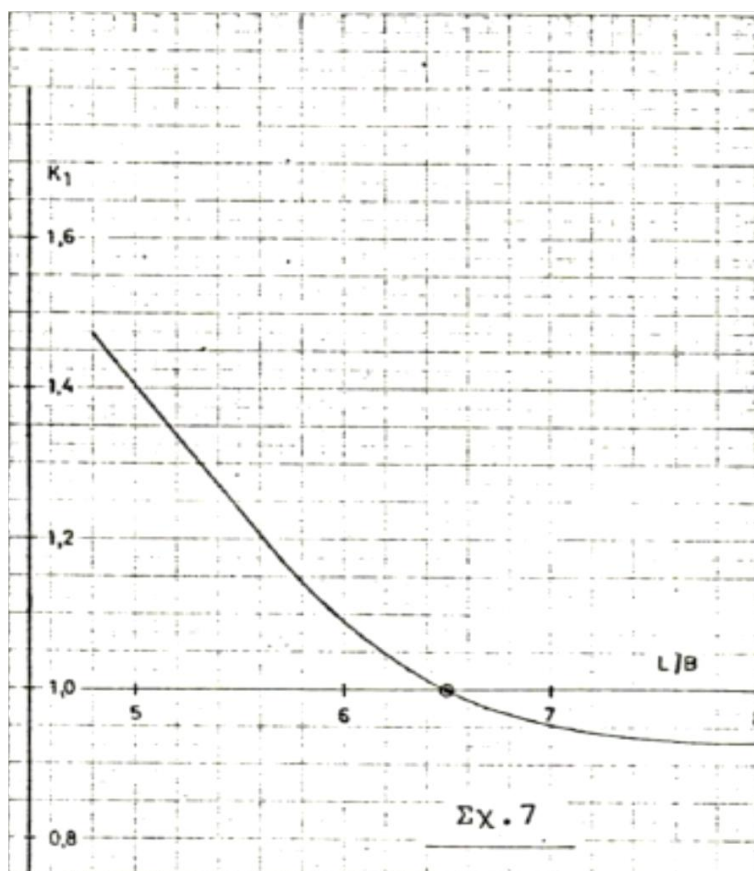
Συντελεστής Διορθώσεως k_1

Για το υπό μελέτη πλοίο και μοντέλο ισχύει:

$$L/B = 5,55 \neq 6,5$$

, οπότε από το Διάγραμμα 5.4 που ακολουθεί προκύπτει:

$$k_1 = 1,2$$



Διάγραμμα 5.4 Συντελεστής διορθώσεως k_1

Συντελεστής Διορθώσεως k_2

Για το υπό μελέτη πλοίο και μοντέλο είναι:

$$B/T = 2,82 > 2,4$$

, οπότε ο συντελεστής k_2 δίνεται από την σχέση:

$$k_2 = 1 + 0,05 \cdot \left(\frac{B}{T} - 2,4 \right) = 1,021 \quad (5.3)$$

Υπολογισμός βρεχόμενης επιφάνειας μοντέλου S

Ο υπολογισμός της βρεχόμενης επιφάνειας του μοντέλου σε m^2 γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$S = (3,4 \cdot V^{1/3} + 0,5 \cdot L_{d,m}) \cdot V^{1/3} \quad (5.4)$$

, όπου $V=1,314m^3$ ο όγκος που προκύπτει για εκτόπισμα μοντέλου $\Delta=1,313tn$.

Αντικαθιστώντας προκύπτει $S=6,942m^2$.

Γνωρίζοντας τις τιμές όλων των παραμέτρων μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση τριβής, την υπόλοιπη αντίσταση καθώς επίσης και την συνολική αντίσταση σύμφωνα με τις σχέσεις που αναφέρθηκαν αρχικά. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.5:

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

Vs[kn]	10	12	13	14
Vm[kn]	1,49071198	1,788854382	1,93792558	2,086997
R_{F, m}[kp]	0,80416123	1,107463398	1,284397675	1,472624
R_{R, m}[kp]	0,20218467	0,304379832	0,372755012	0,45032
R_{T, m}[kp]	1,06909917	1,504116063	1,76862184	2,055923

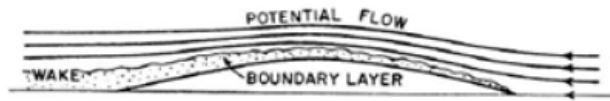
Πίνακας 5.5 Προεκτίμηση αντίστασης μοντέλου

6. ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΠΑΡΕΛΚΟΜΕΝΑ

6.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η αντίσταση του πλοίου οφείλεται σε απώλειες ενέργειας λόγω της επαφής του με το περιβάλλον ρευστό. Είναι η δύναμη που απαιτείται για να ρυμουλκηθεί το πλοίο σε μια δεδομένη ταχύτητα. Η αντίσταση γυμνής γάστρας ή αντίσταση ρυμούλκησης όπως ονομάζεται διαφέρει από την αντίσταση πρόωσης, η οποία αφορά το πλήρως εξοπλισμένο με έλικα πλοίο. Η αντίσταση του πλοίου συνίσταται από την αντίσταση συνεκτικότητας, η οποία οφείλεται στην δημιουργία του οριακού στρώματος γύρω από τη γάστρα, και από την αντίσταση κυματισμού. Η αντίσταση συνεκτικότητας αποτελείται από την αντίσταση τριβής και την αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας. Συνεπώς οι κύριες συνιστώσες της αντίστασης είναι η αντίσταση τριβής, η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας και η αντίσταση κυματισμού.

Η αντίσταση τριβής είναι η συνιστώσα της αντίστασης που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των εφαπτομενικών τάσεων (τάσεων συνεκτικότητας) και προβολή κατά την διεύθυνση της ροής. Κατά την κίνηση του σώματος σε συνεκτικό ρευστό τα σημεία του σώματος που βρίσκονται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια της γάστρας έχουν την ίδια ταχύτητα με αυτή. Όμως λόγω δράσης της συνεκτικότητας τα σημεία αυτά τείνουν να θέσουν και τα γειτονικά σημεία στην ίδια κίνηση με αποτέλεσμα την δημιουργία του οριακού στρώματος (boundary layer). Η ύπαρξη της συνεκτικότητας οδηγεί στην ανάπτυξη αντίστασης τριβής ενώ η δράση του οριακού στρώματος δημιουργεί μια εικονική διαφοροποίηση του σχήματος της γάστρας και έτσι μια διαφοροποίηση στην κατανομή της πίεσης που οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης πίεσης.



Εικόνα 6.1 Δημιουργία οριακού στρώματος γύρω από τη γάστρα ενός πλοίου

Η αντίσταση τριβής R_F χαρακτηρίζεται κυρίως από τον αριθμό Reynolds, ο οποίος αποτελεί τον λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας (βλ. Σχέση 6.2), και υπολογίζεται μέσω του συντελεστή αντίστασης τριβής C_F μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$R_F = 1/2 \cdot C_F \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \quad (6.1)$$

, 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]

Άμεση συσχέτιση με τον αριθμό Reynolds έχει και το οριακό στρώμα καθώς το πάχος του οριακού στρώματος, είτε η ροή είναι τυρβώδης είτε στρωτή, μειώνεται με την αύξηση του αριθμού Reynolds. Αυτό λοιπόν σημαίνει πως το πλοίο θα έχει λεπτότερο οριακό στρώμα σχετικά με το μοντέλο εφόσον λειτουργεί σε αριθμούς Reynolds της τάξης του 10^9 ενώ το μοντέλο σε αριθμούς Reynolds της τάξης του $10^6 - 10^7$. Για τον ίδιο αριθμό Reynolds το πάχος του οριακού στρώματος της στρωτής ροής είναι μικρότερο από το αντίστοιχο της τυρβώδους. Η μετάβαση από την στρωτή στην τυρβώδη ροή γίνεται σε αριθμούς Reynolds της τάξης του $10^5 - 10^6$ καθώς για χαμηλούς αριθμούς Reynolds η ροή είναι στρωτή ενώ για μεγαλύτερους είναι τυρβώδης, αυξάνοντας την αντίσταση τριβής.

Η αντίσταση τριβής μπορεί να διασπαστεί σε δυο επιμέρους συνιστώσες, την αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας και την αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας. Το μήκος μιας γραμμής ροής απο την πλώρη προς την πρύμνη είναι μεγαλύτερο για ένα σχηματισμένο καμπυλόγραμμο σώμα σχετικά με την επίπεδη πλάκα. Άρα η μέση ταχύτητα θα είναι μεγαλύτερη και έτσι και η τριβή στην περίπτωση αυτή θα είναι μεγαλύτερη. Η αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας ορίζεται εισάγοντας το εικονικό φαινόμενο παράλληλης συνεκτικής ροής σε άπειρο ρευστό γύρω απο επίπεδη πλάκα στον ίδιο αριθμό Reynolds με το πλοίο, όπου στην περίπτωση αυτή η αντίσταση πίεσης είναι μηδέν. Η διαφορά της αντίστασης τριβής επίπεδης πλάκας απο την ολική αντίσταση ονομάζεται υπόλοιπη αντίσταση. Η αντίσταση τριβής κυριαρχεί στις χαμηλές ταχύτητες και εξαρτάται απο την βρεχόμενη επιφάνεια, την τραχύτητα και την γεωμετρία της γάστρας.

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 την διεύθυνση της ροής και οφείλεται στην συνεκτικότητα του ρευστού και την δημιουργία του οριακού στρώματος. Αποτελεί μέρος της υπόλοιπης αντίστασης και εξαρτάται απο την βρεχόμενη επιφάνεια, την ταχύτητα και την γεωμετρία της γάστρας.

Η αντίσταση κυματισμού προκαλείται απο τα κύματα που δημιουργεί το σώμα κατα την κίνησή του με σταθερή ταχύτητα σε ήρεμο νερό. Όταν το σώμα κινείται κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού μέσω των 'κινούμενων σημείων πίεσης' δημιουργεί κύματα τα οποία μεταφέρουν ένα ποσό ενέργειας το οποίο διασκορπίζεται στη θάλασσα. Η συνιστώσα αυτή της αντίστασης κυριαρχεί στις υψηλότερες ταχύτητες και είναι μέρος της υπόλοιπης αντίστασης.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης ενός πλοίου δεν έχουν ακόμα αναπτυχθεί αριθμητικές μέθοδοι προκειμένου να μπορεί να μετρηθεί απευθείας, χωρίς πειραματικές μετρήσεις. Το βασικό πρόβλημα των πειραματικών μεθόδων έγκειται στην παρεκβολή 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 βέβαια δεν είναι εφικτό. Οι αριθμοί Reynolds και Froude δίνονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$Re = V \cdot L / \nu \quad (6.2)$$

$$Fn = V / (g \cdot L)^{1/2} \quad (6.3)$$

, όπου V: η ταχύτητα [m/s]

ν: η κινηματική συνεκτικότητα [m²/s]

L: το βρεχόμενο μήκος της ισάλου [m]

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s²]

Είναι φανερό πως μέσω της ισότητας των αριθμών Reynolds για το πλοίο και για το γεωμετρικά όμοιο μοντέλο καταλήγουμε στο 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. Απο την ισότητα των αριθμών Froude καταλήγουμε στο εξής:

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

Συνεπώς πρακτικά βολεύει η εξίσωση των αριθμών Froude απο 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:

$$C_{TM} = R_{TM} / (1/2 \cdot \rho_m \cdot S_m \cdot V_m^2) \quad (6.4)$$

, 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 πλεύση 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 βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας υπολογίζεται για το πλοίο απο τα υδροστατικά στοιχεία του προγράμματος HYDRO και γίνεται η παρεκβολή στο μοντέλο μέσω της κλίμακας.

Ο Froude είχε διαπιστώσει 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. Όμως η διαφορά αυτή συνιστά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τον συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R ο οποίος συμβολίζει την υπόλοιπη αντίσταση του πλοίου. Συνεπώς 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. Η υπόλοιπη αντίσταση λοιπόν προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_R = C_{Tm} - C_{Fm} \cdot (1+k) \quad (6.5)$$

, 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

Ο συντελεστής αντίστασης τριβής του μοντέλου (C_{Fm}) δίνεται από τον τύπο της καμπύλης της ITTC ο οποίος είναι ο παρακάτω:

$$C_{Fm} = 0.075 / (\log_{10} Re_m - 2)^2 \quad (6.6)$$

, όπου Re_m : ο αριθμός Reynolds του μοντέλου

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

$$C_{Tm} = C_{Fm} \cdot (1+k) + C_W \quad (6.7)$$

, όπου C_W ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού.

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

$$C_R = C_W + C_{FORM} \quad (6.8)$$

, όπου C_{FORM} ο συντελεστής αντίστασης μορφής.

Θεώρησε επίσης ότι για τον συντελεστή αντίστασης μορφής ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$C_{FORM} = k \cdot C_F \quad (6.9)$$

Από τις δύο λοιπόν παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$C_R = C_W + k \cdot C_F \quad (6.10)$$

Άρα λοιπόν εφόσον ο συντελεστής ολικής αντίστασης ισούται με το άθροισμα του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης και του συντελεστή τριβής τελικά καταλήγουμε ότι:

$$C_T = C_R + C_F \rightarrow C_T = C_F \cdot (1+k) + C_W \quad (6.11)$$

Σύμφωνα με την μέθοδο ITTC που βασίζεται στην μέθοδο **Prohaska**, αν ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού C_W στην περιοχή μικρών ταχυτήτων ($0.1 < Fn < 0.2$) θεωρηθεί συνάρτηση του Fn^4 τότε η γραφική παράσταση του C_{Tm}/C_{Fm} (άξονας y) και Fn^4/C_{Fm} (άξονας x) θα τέμνει τον άξονα y ($Fn=0$) στο σημείο $(1+k)$ καθιστώντας έτσι εύκολο τον προσδιορισμό του παράγοντα k . Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα χρησιμοποιηθεί ο λόγος Fn^6/C_{Fm} , διότι οδηγεί σε πιο εξομαλυμένη καμπύλη για τον προσδιορισμό του k .

Αφού υπολογιστεί ο παράγοντας k μέσω της παραπάνω μεθόδου, ο συντελεστής αντίστασης τριβής του μοντέλου μέσω της σχέσης (6.6) και ο συντελεστής ολικής αντίστασης του μοντέλου από την σχέση (6.4) μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R μέσω της σχέσης (6.5). 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 (6.6) και διατηρώντας τον παράγοντα k σταθερό μπορούμε μέσω της αντίστροφης διαδικασίας να υπολογίσουμε τον συντελεστή ολικής αντίστασης του πλοίου από την σχέση (6.5) και τελικά την ολική αντίσταση του πλοίου μέσω της σχέσης (6.4).

Η ισχύς ρυμούλκησης του μοντέλου $P_{E,m}[W]$, η οποία αφορά την γυμνή γάστρα του μοντέλου, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$P_{E,m} = R_{Tm} \cdot V_m \quad (6.12)$$

, όπου R_{Tm} : η μετρούμενη τιμή της αντίστασης γυμνής γάστρας του μοντέλου[N]

V_m : η ταχύτητα του μοντέλου[m/s]

6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ FULL LOAD CONDITION

Στην περίπτωση που μελετάται η κατάσταση πλήρους φόρτωσης (Full Load Condition), στην οποία το εκτόπισμα του μοντέλου είναι $\Delta=1,313\text{tn}$, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το δυναμόμετρο R47. Το δυναμόμετρο αυτό μπορεί να δεχθεί δυνάμεις μέχρι 40kρ. Κατά την επιτάχυνση και επιβράδυνση του φορείου, ακόμα και με κλειστό το φρένο το οποίο συγκρατεί το μοντέλο, η δύναμη που θα μεταφερόταν στο δυναμόμετρο R47 θα ξεπερνούσε τα όρια ανοχής του. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται το μεγαλύτερο δυναμόμετρο του εργαστηρίου. Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών μας ενδιαφέρει η δύναμη κατα τον άξονα x. Το δυναμόμετρο αυτό μπορεί να καταγράφει και κατακόρυφες κινήσεις (heave) και ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα (pitch) αλλά στην σειρά αυτή των πειραμάτων δεν θα μας απασχολήσουν οι μετρήσεις αυτές διότι λόγω του μεγέθους του μοντέλου είναι αμελητέες.

6.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του προγράμματος HYDRO για την κατάσταση πλήρους φόρτωσης (Full Load Condition) το επιθυμητό εκτόπισμα είναι $\Delta=1,313\text{tn}$. Συνεπώς προτού ξεκινήσουν οι πειραματικές μετρήσεις το μοντέλο πρέπει να φορτωθεί με κατάλληλα βάρη προκειμένου να επιτύχει το επιθυμητό εκτόπισμα. Τα βάρη όμως αυτά δεν μπορούν να τοποθετηθούν τυχαία. Στην Full Load Condition το πλοίο πλέει ισοβύθιστο στα 14,86m, που αντιστοιχεί για κλίμακα μοντέλου σε $T_m=0,330\text{m}$. Προκειμένου λοιπόν το μοντέλο να ικανοποιεί την απαίτηση αυτή είναι απαραίτητη η ζύγιση και η χάραξη ισάλων.

Αρχικά το μοντέλο ζυγίζεται χωρίς βάρη μέσω ειδικής ηλεκτρονικής ζυγαριάς που προσαρμόζεται στον γερανό ο οποίος σηκώνει το μοντέλο μέσω ημάντων. Το αποτέλεσμα της ζύγισης αυτής είναι $\Delta=176,1\text{kg}$. Με τον τρόπο αυτό είναι γνωστό πόσο βάρος υπολείπεται για να επιτύχει το μοντέλο κάθε φορά το επιθυμητό εκτόπισμα. Όμως όταν το μοντέλο εισέλθει στην δεξαμενή θα πρέπει να είναι εφικτός ο έλεγχος της ισάλου και της διαγωγής που έχει επιτύχει. Για τον λόγο αυτό χαράσσεται στο μοντέλο η πρωραία, η πρυμναία κάθετος και ο μέσος νομέας καθώς και το βύθισμα στις δύο αυτές καθέτους και στον μέσο νομέα. Έτσι όταν το μοντέλο έχει ήδη εισέλθει στην δεξαμενή μπορούμε μετακινώντας απλά τα βάρη να φέρουμε το μοντέλο στην ίσαλο που αντιστοιχεί στην κατάσταση που εξετάζεται. Η χάραξη του μοντέλου έγινε στο προτυποποιείο του εργαστηρίου και χρησιμοποιήθηκε ειδικό laser καθώς και μετρητικό όργανο το οποίο διαθέτει μόνιμα κατακόρυφο βραχίονα και μπορεί να ασφαρίζεται και να σταθεροποιείται σε κάθε επιθυμητή θέση(βλ. Εικόνα 6.1), τα οποία εξυπηρετούν στην ομαλή διεξαγωγή των μετρήσεων και της χάραξης.



Εικόνα 6.1 Ειδικό όργανο χάραξης ισάλων

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 6.2) φαίνεται η πρυμναία κάθετος του μοντέλου(A.P) και η ίσαλος στην κάθετο αυτή και στον καθρέφτη που αντιστοιχεί στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης(Full Load Condition). Παρατηρούμε ότι στην

θέση της έλικας έχει προσαρτηθεί ειδική τάπα προκειμένου να στεγανοποιείται το εσωτερικό της γάστρας αφού τα πειράματα αντίστασης πραγματοποιούνται χωρίς την παρουσία έλικας.



Εικόνα 6.2 Πρυμναία κάθετος και ίσαλος Full Load Condition μοντέλου

Πρέπει να σημειωθεί εδώ πως ακόμα και όταν γνωρίζουμε το βάρος που πρέπει να τοποθετηθεί στο μοντέλο δεν αρκεί να τοποθετηθούν τα βάρη με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να βρίσκεται το μοντέλο στην αντίστοιχη ίσαλο και να πλέει ισοβύθιστο. Πρέπει τα βάρη να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε σε κάθε νοητό διαμέρισμα η δύναμη της άντωσης να ισούται με τον εκτοπιζόμενο όγκο. Αν κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, στην περίπτωση όπου μελετάμε εκτόπισμα $\Delta=1,313\text{tn}$, θα υπάρξει κίνδυνος αστοχίας του μοντέλου, κυρίως στις περιοχές σύνδεσης της πλώρης και της πρύμνης με το μοντέλο, λόγω των δυνάμεων που θα δέχεται. Η δύναμεις αυτές θα είναι είτε προς τα επάνω, αν στο σημείο αυτό η άντωση είναι μεγαλύτερη απο 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. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων έγινε μια μελέτη της κατανομής βαρών του πλοίου στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης(Full Load Condition). Αρχικά χωρίζεται το πλοίο σε διαμερίσματα και υπολογίζεται ο όγκος του κάθε διαμερίσματος. Ο όγκος υπολογίζεται προσθέτοντας της εγκάρσιες

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ SCHNEEKLUHTH ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

επιφάνειες των δύο νομέων που ορίζουν ένα διαμέρισμα και πολλαπλασιάζοντας με την μεταξύ τους απόσταση. Έπειτα από τον όγκο αυτό μπορούμε μέσω της κλίμακας να μεταβούμε στον αντίστοιχο όγκο του διαμερίσματος για το μοντέλο. Η σύνδεση της πλώρης απέχει 0,48m από την πρωραία κάθετο(F.P) του μοντέλου. Η απόσταση αυτή αντιστοιχεί σε 21,95m από την πρωραία κάθετο(F.P) ή 211,05m από την πρυμναία κάθετο(A.P) του πλοίου. Ομοίως η σύνδεση της πρύμνης απέχει 0,5m από την πρυμναία κάθετο (A.P) του μοντέλου και 22,5m από την πρυμναία κάθετο(A.P) του πλοίου. Οι επιφάνειες των εγκάρσιων νομέων προκύπτουν από το πρόγραμμα HYDRO. Τα διαμερίσματα αυτά και οι όγκοι τους για το πλοίο και το μοντέλο φαίνονται στον Πίνακα 6.1 που ακολουθεί. Σημείο 0 θεωρείται η πρυμναία κάθετος(A.P). Είναι φανερό πως στο πρυμναίο κομμάτι του μοντέλου αντιστοιχεί εκτόπισμα 1,299 kg+3,421 kg+6,918 kg+25,03 kg=36,64 kg ενώ στο πρωραίο κομμάτι 47,968 kg +19,147 kg +10,71 kg +2,16 kg =79,98 kg. Είναι λοιπόν σημαντικό να τοποθετηθούν τα βάρη στο μοντέλο, για την κατάσταση πλήρους φόρτωσης(Full Load Condition), σύμφωνα με αυτούς τους υπολογισμούς.

ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΠΛΟΙΟΥ[m]	ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ[m]	ΟΓΚΟΣ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ[m ³]	ΟΓΚΟΣ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ[m ³]
-4.5-0	0.1-0	118.43	0.001299643
0-5.825	0-0.1294	311.805	0.003421728
5.825-11.65	0.1294-0.2588	630.465	0.006918683
11.65-22.5	0.2588-0.5	2281.6	0.025038134
22.5-34.95	0.5-0.776	4272.315	0.046884115
34.95-69.9	0.776-1.553	17658.99	0.193788642
69.9-104.85	1.553-2.33	21371.835	0.234533169
104.85-116.5	2.33-2.588	7266.685	0.079744143
116.5-163.1	2.588-3.624	29066.75	0.31897668
163.1-186.4	3.624-4.142	14450.61	0.158580082
186.4-203.875	4.142-4.53	10232.59	0.112291797
203.875-211.05	4.53-4.69	3755.315	0.04121059
211.05-221.35	4.69-4.918	4371.11	0.047968285
221.35-227.175	4.918-5.048	1744.855	0.019147929
227.175-233	5.048-5.177	975.98	0.010710343
233-235.99	5.177-5.244	197.025	0.00216214

Πίνακας 6.1 Κατανομή βάρους

Αφού λοιπόν το μοντέλο έχει χαραχθεί, έχει ζυγιστεί και είναι εξοπλισμένο με το πηδάλιο είναι έτοιμο να εισέλθει στην πειραματική δεξαμενή για την διεξαγωγή των πειραμάτων αντίστασης. Το μοντέλο σηκώνεται πάλι μέσω ενός γερανού με την βοήθεια ημάντων και μιας δοκού όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 6.3). Για την μελέτη της Ballast Condition τα βάρη τοποθετήθηκαν μέσα στο μοντέλο προτού αυτό εισέλθει στο νερό της δεξαμενής. Κάτι τέτοιο όμως δεν θα μπορούσε να συμβεί και για την φόρτωση της Full Load Condition καθώς το αυξημένο βάρος του μοντέλου ενδέχεται να οδηγήσει σε αστοχία όταν αυτό σηκώνεται απο τον γερανό. Για αυτό τον λόγο σε αυτή την κατάσταση φόρτωσης τα βάρη τοποθετήθηκαν αφού το μοντέλο είχε εισέλθει στη δεξαμενή και με βάση την προδιαγεγραμμένη κατανομή βάρους.



Εικόνα 6.3 Εισαγωγή μοντέλου στη δεξαμενή

Αφού το μοντέλο βρίσκεται πλέον στο νερό ακολουθεί η σύνδεση του στο δυναμόμετρο. Πριν από οποιοδήποτε τρέξιμο ελέγχεται η ισαλος να συμπίπτει με την ισαλο που έχει χαραχθεί. Ο έλεγχος της ισάλου γίνεται οπτικά ενώ κάποιες φορές μπορούμε να συμβουλευτούμε κάποιο αλφάδι. Μετά το πέρας του ελέγχου αυτού λαμβάνεται μια μηδενική μέτρηση για την αντίσταση σε κατάσταση ηρεμίας και ξεκινάει η επιτάχυνση του φορείου για την καταγραφή της αντίστασης. Ο χρόνος καταγραφής της αντίστασης στην κατάσταση ηρεμίας είναι

30 δευτερόλεπτα ενώ κατά την διάρκεια της κίνησης του φορείου ο χρόνος αυτός εξαρτάται από την ταχύτητα του φορείου.

Το πείραμα της αντίστασης πραγματοποιήθηκε για ταχύτητες πλοίου από 9kn μέχρι 15,5kn ανά μισό κόμβο. Οι ταχύτητες που αντιστοιχούν στο μοντέλο σε m/s φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Vs[kn]	Vm[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 6.2 Ταχύτητες πλοίου και μοντέλου στο πείραμα αντίστασης

6.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Τα στοιχεία που αφορούν τις συνθήκες του νερού κατα την διάρκεια των πειραμάτων καθώς και χαρακτηριστικά όπως η βρεχόμενη επιφάνεια και το μήκος της ισάλου, που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς στα πειράματα αντίστασης, φαίνονται στον Πίνακα 6.3 που ακολουθεί.

Θερμοκρασία νερού δεξαμενής	$T_{\gamma\lambda}$	21,8	°C
Θερμοκρασία θαλασσινού νερού	$T_{\theta\alpha\lambda}$	15	°C
Πυκνότητα γλυκού νερού δεξαμενής	$\rho_{\gamma\lambda}$	101,74	kps ² /m ⁴
Πυκνότητα θαλασσινού νερού	$\rho_{\theta\alpha\lambda}$	104,611	kps ² /m ⁴
Κινηματική συνεκτικότητα γλυκού νερού	$\nu_{\gamma\lambda}$	9,614E-07	m ² /s
Κινηματική συνεκτικότητα θαλασσινού νερού	$\nu_{\theta\alpha\lambda}$	1,188E-06	m ² /s
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9,810	m/s ²
Βρεχόμενη επιφάνεια πλοίου	$S_{BH,s}$	14692,70	m ²
Βρεχόμενη επιφάνεια μοντέλου	$S_{BH,m}$	7,256	m ²
Μήκος ισάλου πλοίου	$L_{wl,s}$	237,500	m
Μήκος ισάλου μοντέλου	$L_{wl,m}$	5,278	m
Ολικό μήκος υφάλων πλοίου	$L_{oa,sub,s}$	243,68	m
Ολικό μήκος υφάλων μοντέλου	$L_{oa,sub,m}$	5,415	m

Πίνακας 6.3 Συνθήκες διεξαγωγής πειράματος αντίστασης

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 Πίνακα 6.4.

Vs(kn)	Vm(m/sec)	Res (kp)
9	0,000	0,0150
	0,692	0,9320
9,5	0,000	0,0040
	0,729	1,0050
10,	0,000	-0,0021
	0,765	1,0920
10,5	0,000	0,0040
	0,804	1,1800
11	0,000	-0,0203
	0,845	1,2900
11,5	0,000	-0,0253
	0,881	1,3360
12	0,000	-0,0301
	0,922	1,4810
12,5	0,000	-0,0355
	0,960	1,5760
13	0,000	-0,0455
	0,996	1,6930
13,5	0,000	-0,0291
	1,036	1,7990
14	0,000	-0,0315
	1,076	1,9580
14,5	0,000	-0,0281
	1,115	2,1110
15	0,000	-0,0416
	1,152	2,2150
15,5	0,000	-0,036
	1,192	2,395

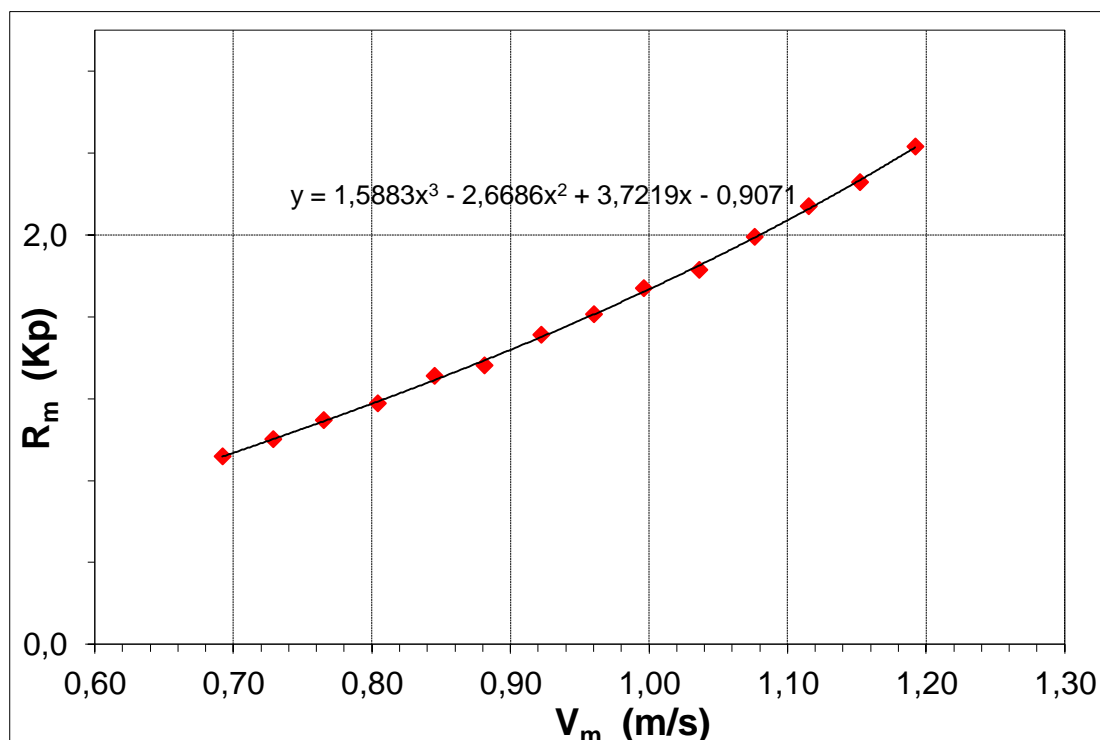
Πίνακας 6.4 Μετρούμενες τιμές αντίστασης

Συνεπώς προκύπτει ο Πίνακας 6.5 για την τιμή της αντίστασης του μοντέλου που αντιστοιχεί σε κάθε ταχύτητα.

Vs[kn]	Vm[m/s]	Rm[kp]
9	0,692	0,917
9,5	0,729	1,001
10	0,765	1,094
10,5	0,804	1,176
11	0,845	1,310
11,5	0,881	1,361
12	0,922	1,511
12,5	0,960	1,612
13	0,996	1,739
13,5	1,036	1,828
14	1,076	1,990
14,5	1,115	2,139
15	1,152	2,257
15,5	1,192	2,431

Πίνακας 6.5 Τελικές τιμές αντίστασης μοντέλου

Στο διάγραμμα που προκύπτει από τις παραπάνω τιμές της αντίστασης μπορούμε να παρεμβάλλουμε μια 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 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 που προκύπτουν από την παραπάνω συνάρτηση είναι αυτές που φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

V_m [m/s]	R_m [κρ]
0,692	0,917
0,729	1,002
0,765	1,089
0,804	1,186
0,845	1,291
0,881	1,387
0,922	1,501
0,960	1,612
0,996	1,722
1,036	1,851
1,076	1,987
1,115	2,127
1,152	2,267
1,192	2,428

Πίνακας 6.6 Ομαλοποιημένες τιμές αντίστασης

Σύμφωνα με τη θεωρία έχουμε πλέον όλα τα απαραίτητα στοιχεία για να υπολογίσουμε τον αριθμό Froude (F_{n_m}), τον αριθμό Reynolds του μοντέλου (Re_m), τον συντελεστή αντίστασης τριβής του μοντέλου (C_{f_m}) και τον συντελεστή ολικής αντίστασης του μοντέλου (C_{t_m}). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών φαίνονται στον Πίνακα 6.7.

V_m [m/s]	F_{n_m}	Re_m	C_{f_m}	C_{t_m}
0,692	0,096	3,898E+06	3,559E-03	5,188E-03
0,729	0,101	4,103E+06	3,524E-03	5,116E-03
0,765	0,106	4,309E+06	3,492E-03	5,044E-03
0,804	0,112	4,528E+06	3,460E-03	4,970E-03
0,845	0,117	4,759E+06	3,428E-03	4,898E-03
0,881	0,122	4,962E+06	3,401E-03	4,841E-03
0,922	0,128	5,193E+06	3,373E-03	4,783E-03
0,960	0,133	5,407E+06	3,348E-03	4,738E-03
0,996	0,138	5,610E+06	3,326E-03	4,703E-03
1,036	0,144	5,835E+06	3,302E-03	4,672E-03
1,076	0,150	6,060E+06	3,279E-03	4,649E-03
1,115	0,155	6,280E+06	3,258E-03	4,635E-03
1,152	0,160	6,489E+06	3,239E-03	4,629E-03
1,192	0,166	6,714E+06	3,219E-03	4,629E-03

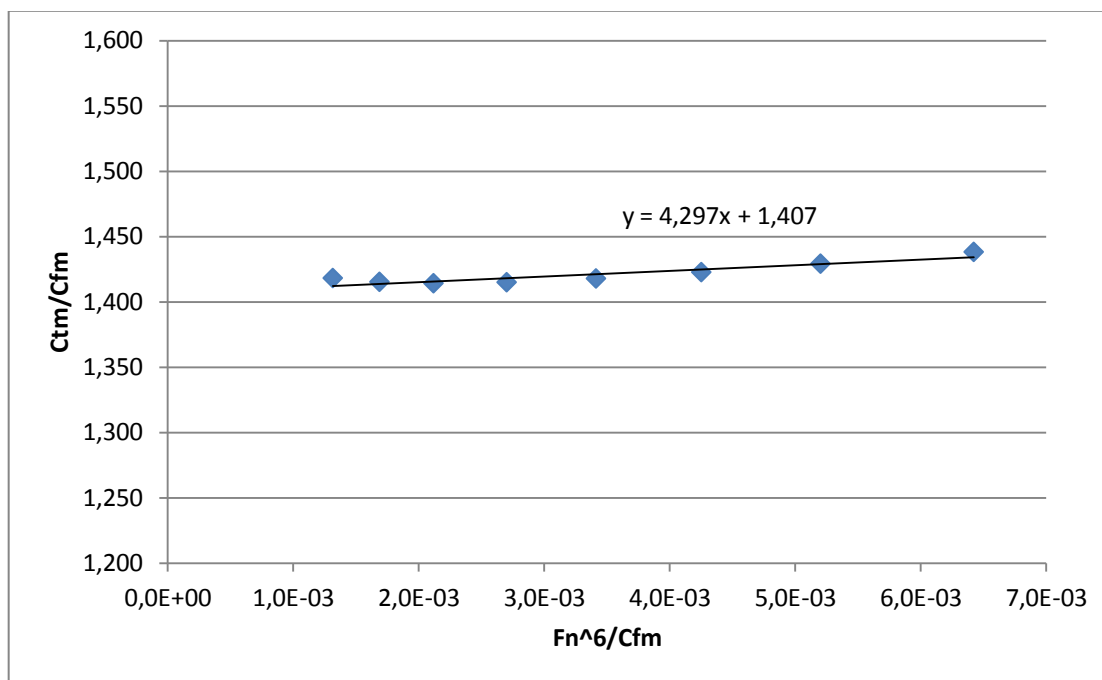
Πίνακας 6.7

Σύμφωνα με την ΙΤΤC , 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 λοιπόν την μέθοδο Prohaska, όπως αυτή έχει περιγραφεί στην θεωρία, θα υπολογίσουμε τον παράγοντα k με βάση το διάγραμμα $F_n^6/C_{f_m}-C_{t_m}/C_{f_m}$ (για αριθμούς Froude από 0,13 έως 0,17). Οι λόγοι αυτοί και τελικά το διάγραμμα προκύπτουν όπως φαίνεται στην συνέχεια(Πίνακας 6.8 και Διάγραμμα 6.2).

C_{t_m}/C_{f_m}	F_n^6/C_{f_m}
1,418	1,312E-03
1,415	1,685E-03
1,414	2,115E-03

1,415	2,698E-03
1,418	3,410E-03
1,423	4,250E-03
1,429	5,200E-03
1,438	6,421E-03

Πίνακας 6.8 Λόγοι υπολογισμού του παράγοντα k



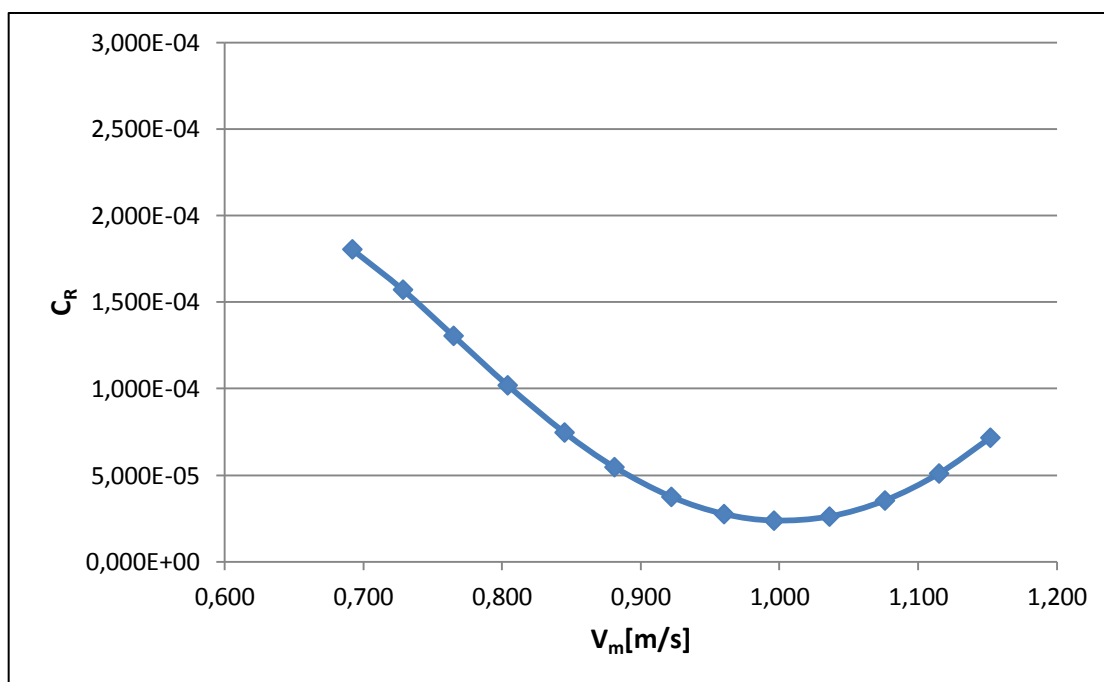
Διάγραμμα 6.2 Υπολογισμός παράγοντα k

Παρεμβάλλοντας μια γραμμική συνάρτηση μεταξύ των σημείων του διαγράμματος είναι φανερό ότι η καμπύλη θα τέμνει τον άξονα γ στο σημείο $\gamma=1,407$. Άρα σύμφωνα με την θεωρία έχουμε $1+k=1,407$.

Έχοντας την τιμή για το $1+k$ μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R , ο οποίος προκύπτει όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.9 που ακολουθεί.

V_m [m/s]	C_R
0,692	1,806E-04
0,729	1,572E-04
0,765	1,306E-04
0,804	1,020E-04
0,845	7,473E-05
0,881	5,470E-05
0,922	3,752E-05
0,960	2,757E-05
0,996	2,378E-05
1,036	2,614E-05
1,076	3,542E-05
1,115	5,104E-05
1,152	7,170E-05
1,192	1,002E-04

Πίνακας 6.9 Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης



Διάγραμμα 6.3 Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης ως προς την ταχύτητα του μοντέλου

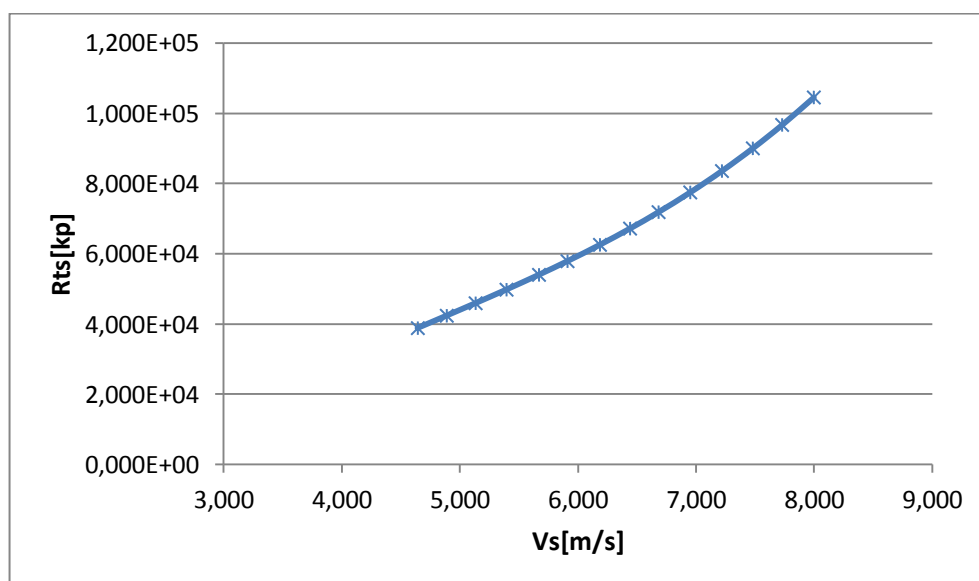
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

Διατηρώντας τον συντελεστή αυτό αναλόιωτο 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 (Cf_s), ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου(Ct_s) και τελικά η ολική αντίσταση του πλοίου(Rt_s). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 6.10 που ακολουθεί.

V_s [kn]	V_s [m/s]	Re_s	Cf_s	Ct_s	Rt_s [kp]	Rt_s [kN]
9,000	4,629	9,519E+08	1,540E-03	2,347E-03	3,887E+04	381,35
9,500	4,897	1,002E+09	1,530E-03	2,310E-03	4,241E+04	415,99
10,000	5,152	1,052E+09	1,521E-03	2,271E-03	4,595E+04	450,81
10,500	5,380	1,106E+09	1,512E-03	2,229E-03	4,983E+04	488,80
11,000	5,662	1,162E+09	1,502E-03	2,189E-03	5,404E+04	530,17
11,500	5,910	1,212E+09	1,495E-03	2,158E-03	5,792E+04	568,19
12,000	6,165	1,268E+09	1,486E-03	2,129E-03	6,259E+04	613,98
12,500	6,433	1,321E+09	1,479E-03	2,109E-03	6,721E+04	659,31
13,000	6,681	1,370E+09	1,473E-03	2,096E-03	7,189E+04	705,28
13,500	6,956	1,425E+09	1,465E-03	2,088E-03	7,750E+04	760,32
14,000	7,205	1,480E+09	1,459E-03	2,088E-03	8,360E+04	820,10
14,500	7,480	1,534E+09	1,452E-03	2,095E-03	9,006E+04	883,49
15,000	7,728	1,585E+09	1,447E-03	2,107E-03	9,672E+04	948,78
15,500	7,989	1,640E+09	1,441E-03	2,128E-03	1,045E+05	1025,54

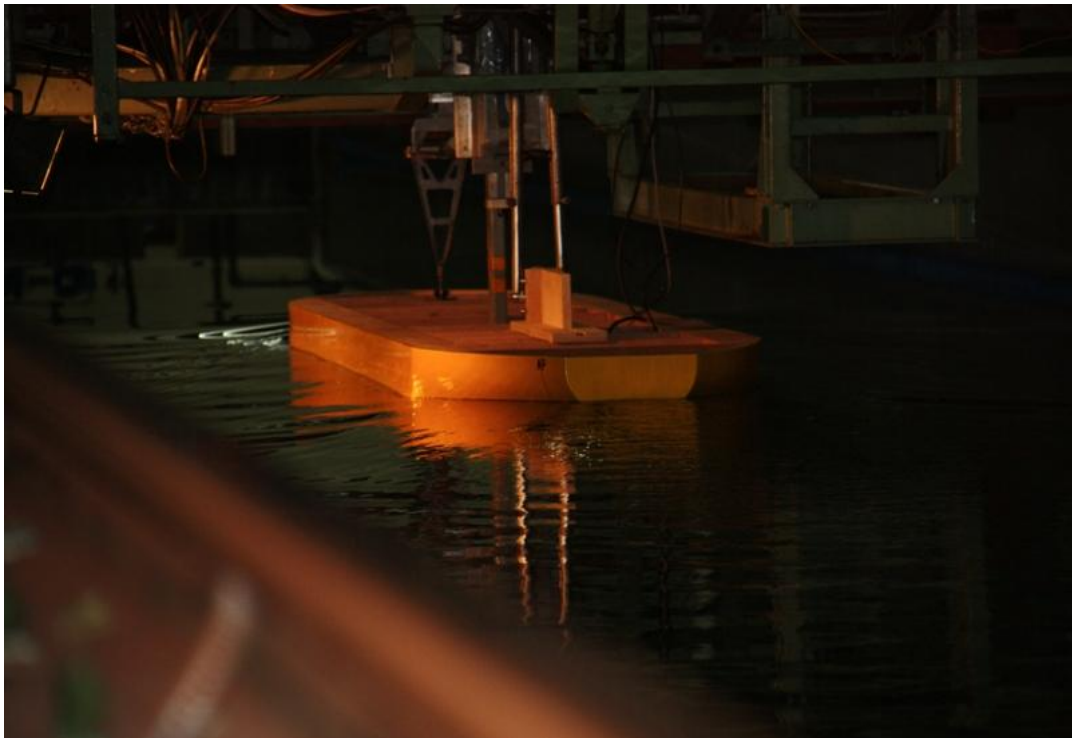
Πίνακας 6.10 Υπολογισμός μεγεθών που αφορούν στην κλίμακα του πλοίου

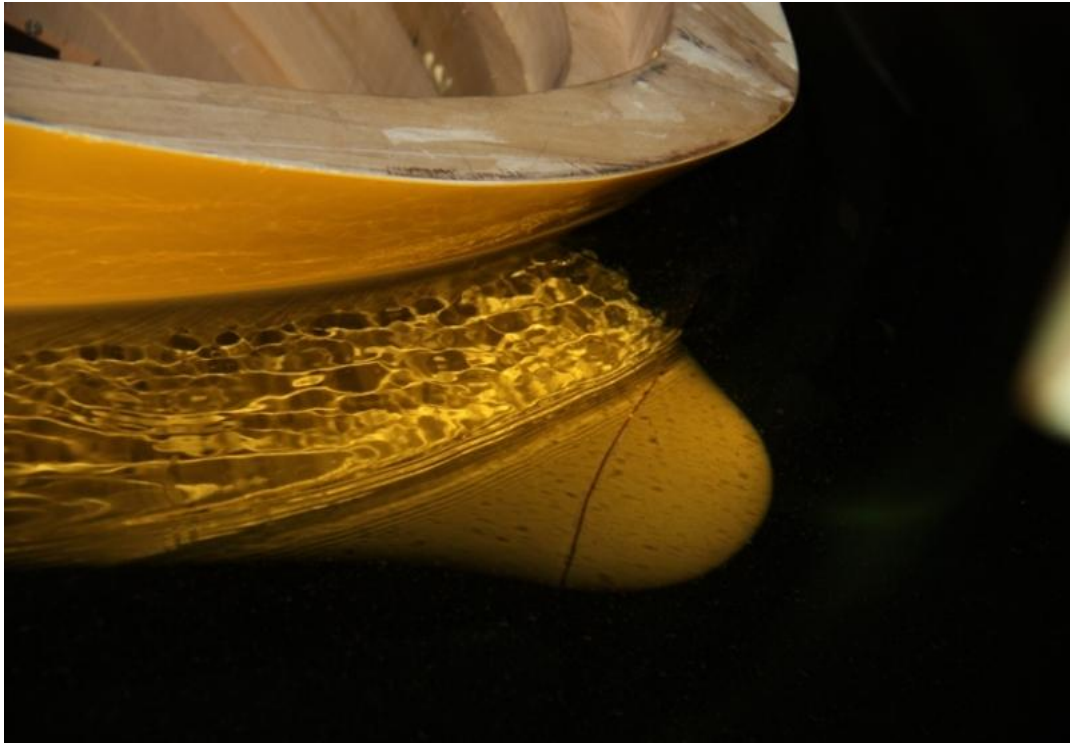


Διάγραμμα 6.4 Ολική αντίσταση του πλοίου ως προς την ταχύτητα

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η άποψη του μοντέλου, προσδεμένου στο φορείο, κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων αντίστασης στις διάφορες ταχύτητες.







7. ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΥΤΟΠΡΩΣΗΣ

7.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Το αυτοπρωθούμενο πλοίο διαφοροποιείται από το ρυμουλκούμενο πλοίο 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 του πλοίου έτσι ώστε τελικά να κινηθεί με ταχύτητα V . Για την αυτοπρόωση λοιπόν του πλοίου 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 πλοίου που εξετάστηκε πρωτίστως. Όπως έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, την διαφορά αυτή των αντιστάσεων αντιπροσωπεύει ο συντελεστή μείωσης ώσης t . Στην περίπτωση του αυτοπρωθούμενου πλοίου η ροή τροποποιείται στην πρύμνη λόγω της λειτουργίας της έλικας. 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 διαφορά αυτή των ταχυτήτων εκφράζεται από τον συντελεστή ποσοστού ομόρρου w , όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 1. Σύμφωνα με τα παραπάνω η μελέτη του αυτοπρωθούμενου πλοίου 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 του πλοίου 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 όμως έγκειται στο γεγονός ότι εκτός από την αντίσταση R του μοντέλου έχουμε ακόμα μια δύναμη κατά τον διαμήκη άξονα του μοντέλου, την 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. Η δύναμη αυτή μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική, ανάλογα με το αν η αντίσταση υπερνικά την ώση ή όχι, αντίστοιχα. 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 νερο, δηλαδή βρισκόμαστε στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου για την ταχύτητα που έχουμε ορίσει. Η τιμή της δύναμης, η οποία αντιστοιχεί στην αυτοπρόωση του πλοίου για την εκάστοτε ταχύτητα, δίνεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot V_M^2 \cdot S_M \cdot [C_{TM} - C_{TS}] \quad (7.1)$$

, όπου ρ_M : η πυκνότητα του γλυκού νερού $[\frac{kp \cdot sec^2}{m^4}]$

V_M : η ταχύτητα του μοντέλου $[\frac{m}{s}]$

S_M : η βρεχόμενη επιφάνεια του μοντέλου $[m^2]$

C_{TM} : ο συντελεστής ολικής αντίστασης του μοντέλου, όπως αυτός υπολογίστηκε στο πειραμα αντίστασης

C_{TS} : ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου

Ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου C_{TS} υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$C_{TS} = (1 + k) \cdot C_{FS} + \Delta C_F + C_A + C_R + C_{AAS} \quad (7.2)$$

, όπου C_{FS} : ο συντελεστής αντίστασης τριβής του πλοίου, με βάση τον αριθμό Reynolds του πλοίου

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 $150 \cdot 10^6$

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

Εκτός από το δυναμόμετρο που καταγράφει αυτή την δύναμη F τοποθετείται και ένα ακόμα δυναμόμετρο, εσωτερικά του μοντέλου, προκειμένου να καταγράφει την ροπή και την ώση που αναπτύσσει η έλικα. Το δυναμόμετρο αυτό είναι συνδεδεμένο με τον άξονα της έλικας και, ομοίως με το δυναμόμετρο R47, αποτελείται στο εσωτερικό του από ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα (strain gauges). Οι αισθητήρες παραλαμβάνουν τις δυνάμεις κατά τον άξονα x (ώση) και τις ροπές που μεταφέρονται από τον άξονα και λόγω της παραμόρφωσης που εντοπίζουν τα ηλεκτρικά επιμηκυνσιόμετρα εμφανίζεται μια μεταβολή στο ρεύμα που τα διαρρέει και τελικά μια διαφορά τάσης. Έτσι τα αποτελέσματα που εμφανίζει ο υπολογιστής από την μέτρηση των δυο αυτών μεγεθών είναι σε Volt. Για τον λόγο αυτό χρειάζεται προτού συνδεθεί το δυναμόμετρο με τον άξονα να βαθμονομηθούν οι αισθητήρες μέτρησης ώσης και ροπής που περιλαμβάνει.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων τοποθετείται επίσης εσωτερικά του μοντέλου ένας κινητήρας ο οποίος ενώνεται με το άκρο του άξονα της έλικας και συνδέεται μέσω καλωδίων με όργανο στο οποίο εμείς ορίζουμε παλμούς. Εσωτερικά του κινητήρα υπάρχει ένας παλμοδότης (encoder wheel) ο οποίος παράγει 100 παλμούς ανά περιστροφή του άξονα. Συνεπώς ξέροντας τις επιθυμητές στροφές σε RPM μπορούμε, διαιρώντας με 60 για να υπολογίσουμε τις στροφές ανά δευτερόλεπτο (RPS) και πολλαπλασιάζοντας με 100, να υπολογίσουμε τους παλμούς που πρέπει να ορισθούν στο όργανο για να επιτύχουμε τις επιθυμητές στροφές στον άξονα.

Για μια ομάδα μετρήσεων ίδιας ταχύτητας και διαφορετικών στροφών, έχοντας υπολογίσει την δύναμη F_d που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου, καταγράφουμε τις τιμές της δύναμης που ασκείται στο δυναμόμετρο για ένα εύρος στροφών γύρω από το σημείο αυτό και χαράσσουμε την καμπύλη $F-n$. Από την καμπύλη αυτή, είτε γραφικά είτε μέσω της συνάρτησης που προκύπτει από το διάγραμμα, μπορούμε να βρούμε τις στροφές που αντιστοιχούν στην δύναμη που έχουμε υπολογίσει. Οι στροφές αυτές αντιπροσωπεύουν το σημείο λειτουργίας της

έλικας του μοντέλου που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου. Με αυτή την τιμή των στροφών και μέσω των διαγραμμάτων Q-n και T-n, που παράγονται από τις μετρήσεις της ροπής και της ώσης αντίστοιχα, μπορούμε επίσης να υπολογίσουμε την ροπή και την ώση στο σημείο αυτό.

Έχοντας την τιμή των στροφών, την ώση και την ροπή του μοντέλου που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή προχώρησης J καθώς και τους συντελεστές ώσης και ροπής, k_{Tm} και k_{Qm} αντίστοιχα, σύμφωνα με τις σχέσεις που ακολουθούν.

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

$$J_m = \frac{V_m}{n_m \cdot D_m} \quad (7.3)$$

, όπου V_m : η ταχύτητα του μοντέλου[m/s]

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

D_m : η διάμετρος της έλικας του μοντέλου[m]

Για τους **συντελεστές ώσης και ροπής, k_{Tm} και k_{Qm}** αντίστοιχα, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$k_{Tm} = \frac{T}{\rho_m \cdot n_m^2 \cdot D_m^4} \quad (7.4)$$

$$k_{Qm} = \frac{Q}{\rho_m \cdot n_m^2 \cdot D_m^5} \quad (7.5)$$

, όπου T : η αναπτυσσόμενη ώση [kr]

Q : η ροπή στον άξονα [$kr \cdot m$]

ρ_m : η πυκνότητα του γλυκού νερού [$\frac{kp \cdot sec^2}{m^4}$]

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** διατηρούμε σταθερό τον συντελεστή ώσης kT_m και εισερχόμαστε στο διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας, όπως αυτό προέκυψε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Απο το διάγραμμα διαβάζουμε τον συντελεστή προχώρησης J_0 , εφόσον έχουμε την καμπύλη του kT για $P/D=0,75$. Για τον συντελεστή προχώρησης που προέκυψε μπορούμε από το ίδιο διάγραμμα να διαβάσουμε τον συντελεστή ροπής kQ_0 και τον βαθμό απόδοσης η_0 .

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** w_m , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$w_m = \frac{V_w}{V_m} = \frac{V_m - V_A}{V_m} \rightarrow 1 - w_m = \frac{V_A}{V_m} \quad (7.6)$$

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

$$\eta_R = \frac{kQ_0}{kQ} \quad (7.7)$$

, 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** σύμφωνα με την ITTC χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$t = \frac{T_M + F - R_C}{T_M} \quad (7.8)$$

, όπου T_M : η ώση που υπολογίστηκε ότι αντιστοιχεί στις στροφές αυτοπρόωσης του πλοίου [kr]

F: η τιμή της δύναμης που προέκυψε από την σχέση 7.1 [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:

$$R_C = \frac{(1+k) \cdot C_{FMC} + C_R}{(1+k) \cdot C_{FM} + C_R} \cdot R_{TM} \quad (7.9)$$

, 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 n_H για το μοντέλο ή το πλοίο υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$n_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (7.10)$$

, όπου t : ο συντελεστής μείωσης ώσης

w : ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου πλοίου ή του μοντέλου

Αφού υπολογισθούν όλα τα παραπάνω μεγέθη θα πρέπει να επιβληθούν οι διορθώσεις της κλίμακας για το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του πλοίου. Για τον υπολογισμό των συντελεστών kTs και kQs της έλικας του πλοίου διορθώνονται οι συντελεστές που έχουν υπολογιστεί για την έλικα του μοντέλου σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$kTs = kTm - \Delta kT \quad (7.11)$$

$$kQs = kQm - \Delta kQ \quad (7.12)$$

, όπου kTm : ο συντελεστής ώσης από το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του μοντέλου

kQm : ο συντελεστής ροπής από το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του μοντέλου

και

$$\Delta kT = -\Delta C_D \cdot 0,3 \cdot \frac{P}{D} \cdot \frac{c \cdot z}{D}$$

$$\Delta kQ = \Delta C_D \cdot 0,25 \cdot \frac{c \cdot z}{D}$$

, όπου $\frac{P}{D}$: ο λόγος βήματος της έλικας ίσος με 0,75

c : το μήκος χορδής της έλικας του μοντέλου για πτερυγοτομή $r/R=0,75$.

Το μήκος αυτό υπολογίστηκε 0,0576m με βάση την σχέση $2,057 = \frac{c}{D} \cdot \frac{z}{Ae/Ao}$ από

κατάλληλους πίνακες που αφορούν έλικες τύπου Wagenigen B[m]

z : ο αριθμός πτερυγίων της έλικας ίσος με 4

D : η διάμετρος της έλικας του μοντέλου[m]

και

$$\Delta C_D = C_{DM} - C_{DS}$$

, όπου

$$C_{DM} = 2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{t}{c}\right) \cdot \left[\frac{0,044}{(Re_{0,75c})^{1/6}} - \frac{5}{(Re_{0,75c})^{2/3}} \right]$$

$$C_{DS} = 2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{t}{c}\right) \cdot \left(1,89 + 1,62 \cdot \log \frac{c_s}{k_p}\right)^{-2,5}$$

, όπου t : το μέγιστο πάχος της έλικας του μοντέλου για πτερυγοτομή $r/R=0,75$. Το πάχος αυτό υπολογίστηκε $0,002\text{m}$ με βάση την σχέση $\frac{t}{D} = 0,0185 - 0,00125 \cdot z$, από κατάλληλους πίνακες που αφορούν έλικες τύπου Wagenigen B[m]

c : το μήκος χορδής της έλικας του μοντέλου για πτερυγοτομή $r/R=0,75$. Το μήκος αυτό υπολογίστηκε $0,0576\text{m}$ με βάση την σχέση $2,057 = \frac{c}{D} \cdot \frac{z}{Ae/Ao}$, από κατάλληλους πίνακες που αφορούν έλικες τύπου Wagenigen B[m]

c_s : το μήκος χορδής της έλικας του πλοίου για πτερυγοτομή $r/R=0,75$. Το μήκος αυτό υπολογίστηκε $2,592\text{m}$ με βάση την σχέση $2,057 = \frac{c}{D} \cdot \frac{z}{Ae/Ao}$, από κατάλληλους πίνακες που αφορούν έλικες τύπου Wagenigen B[m]

k_p : συντελεστής τραχύτητας του πτερυγίου της έλικας ίσος με $0,00003$

$Re_{0,75c}$: ο τοπικός αριθμός Reynolds, ο οποίος έχει ήδη υπολογιστεί για την κατασκευή του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας του μοντέλου.

Ο βαθμός απόδοσης η_s της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή, υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\eta_s = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{kT_s}{kQ_s} \quad (7.13)$$

Ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου w_{TS} υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον συντελεστή ποσοστού ομόρρου του μοντέλου w_M , που έχει ήδη υπολογισθεί, με βάση την παρακάτω σχέση:

$$w_{TS} = (t + w_R) + (w_M - t - w_R) \cdot \frac{(1+k) \cdot C_{FS} + \Delta C_F}{(1+k) \cdot C_{FM}} \quad (7.14)$$

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

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

C_{FS} : ο συντελεστής αντίστασης τριβής του πλοίου

w_R : συντελεστής που αντιπροσωπεύει την επίδραση του πηδαλιού στον ομόρρου του πλοίου. Η τιμή του συντελεστή αυτού λαμβάνεται ίση με 0,04

Η φόρτιση τη έλικας σε κλίμακα πλοίου λαμβάνεται από την σχέση:

$$\frac{kT}{J^2} = \frac{S_S}{2D_S^2} \cdot \frac{C_{TS}}{(1-t) \cdot (1-w_{TS})^2} \quad (7.15)$$

, όπου S_S : η συνολική βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου[m²]

D_S : η διάμετρος της έλικας του πλοίου[m]

C_{TS} : ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου

w_{TS} : ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου

t : ο συντελεστής μείωσης ώσης

Μπαίνοντας στο διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του πλοίου με την τιμή του $\frac{kT}{J^2}$ υπολογίζεται ο συντελεστής προχώρησης J_{TS} και ο συντελεστής ροπής kQ_{TS} για την έλικα του πλοίου και έτσι μπορούν να υπολογιστούν όλα τα παρακάτω μεγέθη που αφορούν την φυσική κλίμακα και την κατάσταση αυτοπρόωσης του πλοίου.

- ❖ Οι στροφές της έλικας(rate of revolutions) [RPS]:

$$n_s = \frac{(1 - w_{TS}) \cdot V_s}{J_{TS} \cdot D_s}$$

, όπου w_{TS} : ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου

V_s : η ταχύτητα του πλοίου[m/s]

J_{TS} : ο συντελεστής προχώρησης που αφορά την έλικα του πλοίου

D_s : η διάμετρος της έλικας του πλοίου[m]

- ❖ Η αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα (Delivered Horse Power) [kW]:

$$P_{DS} = 2 \cdot \pi \cdot \rho_s \cdot D_s^5 \cdot n_s^3 \cdot \frac{kQ_{TS}}{\eta_R} \cdot 10^{-3}$$

, όπου ρ_s : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού [$\frac{kg}{m^3}$]

D_s : η διάμετρος της έλικας του πλοίου[m]

n_s : οι στροφές της έλικας[RPS]

kQ_{TS} : ο συντελεστής ροπής της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή

η_R : ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής

- ❖ Η ώση που αναπτύσσει η έλικα(trust of propeller) [kp]:

$$T_s = \left(\frac{kT}{J^2}\right) \cdot J_{TS}^2 \cdot \rho_s \cdot D_s^4 \cdot n_s^2$$

, όπου J_{TS} : ο συντελεστής προχώρησης που αφορά την έλικα του πλοίου

ρ_s : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού [$\frac{kp \cdot sec^2}{m^4}$]

D_S : η διάμετρος της έλικας του πλοίου[m]

n_S : οι στροφές της έλικας[RPS]

❖ Η ροπή που ασκείται στον άξονα της έλικας(torque of propeller) [kp·m]:

$$Q_S = \frac{kQ_{TS}}{\eta_R} \cdot \rho_s \cdot D_S^5 \cdot n_S^2$$

, όπου kQ_{TS} : ο συντελεστής ροπής της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή

ρ_s : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού [$\frac{kp \cdot sec^2}{m^4}$]

D_S : η διάμετρος της έλικας του πλοίου[m]

n_S : οι στροφές της έλικας[RPS]

η_R : ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής

❖ Η ισχύς ρυμούλκησης η οποία αφορά την γυμνή γάστρα του πλοίου(Effective Horse Power) [kW]:

$$P_E = C_{TS} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_s \cdot V_S^3 \cdot S_S \cdot 10^{-3}$$

, όπου C_{TS} : ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου

ρ_s : η πυκνότητα του θαλασσινού νερού [$\frac{kg}{m^3}$]

V_s : η ταχύτητα του πλοίου[m/s]

S_s : η συνολική βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου[m²]

- ❖ Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης(total efficiency):

$$\eta_D = \frac{P_E}{P_{DS}}$$

Οι Froude και Taylor αναγνώριζαν ότι ο βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης δεν αντιπροσωπεύει την πραγματική απόδοση του πλοίου αφού στον αριθμητή εμφανίζεται μέγεθος που αφορά το ρυμουλκούμενο και όχι το αυτοπρωθούμενο πλοίο. Παρόλαυτα ο ορισμός αυτός έχει καθιερωθεί και η ισχύς στον αριθμητή εκφράζει ένα θεωρητικό ελάχιστο για το αυτοπρωθούμενο πλοίο.

7.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΔΥΝΑΜΟΜΕΤΡΟΥ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΩΣΗΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗΣ

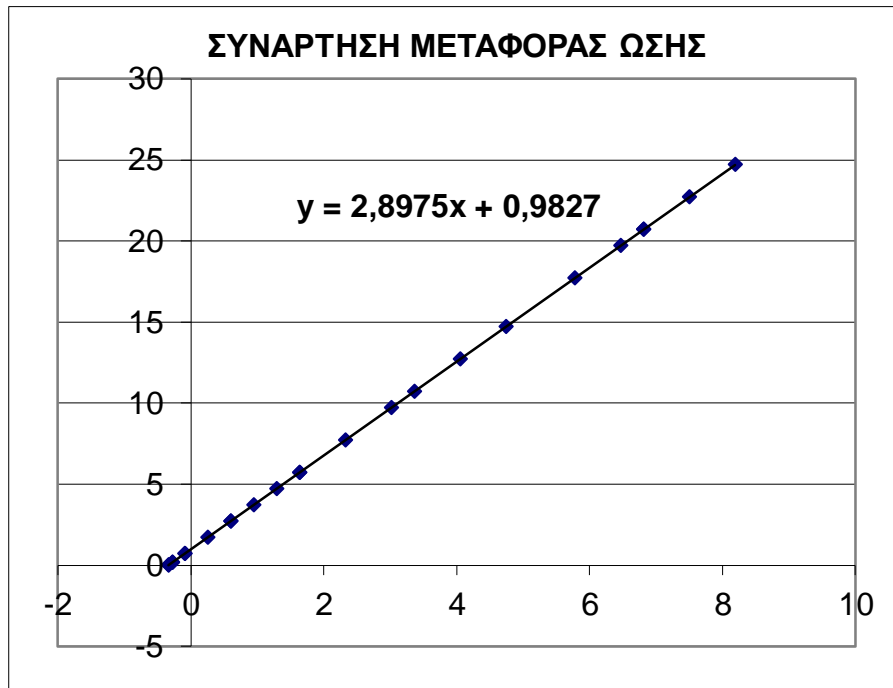
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΩΣΗΣ

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

Βαθμονόμηση αισθητήρα:	R25 Thrust
Ημερομηνία:	24/5/2013

Volts	Μέγεθος
-0,341	0
-0,282	0,17
-0,095	0,71
0,25	1,71
0,596	2,71
0,942	3,71
1,287	4,71
1,632	5,71
2,322	7,71
3,013	9,71
4,049	12,71
4,738	14,71
5,773	17,71
6,464	19,71
6,808	20,71
7,497	22,71
8,187	24,71
6,808	20,71
3,36	10,71
1,633	5,71
0,597	2,71
-0,094	0,71
-0,281	0,17
-0,34	0

Πίνακας 7.1 Βαθμονόμηση αισθητήρα μέτρησης ώσης



Διάγραμμα 7.1 Συνάρτηση μεταφοράς ώσης



Εικόνα 7.1 Βαθμονόμηση αισθητήρα μέτρησης ώσης

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ 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 δυναμομέτρου 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 πλήρη 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.

Βαθμονόμηση αισθητήρα:	R25 Torque
Ημερομηνία:	24/5/2013

Volts	Μέγεθος	
	Kg	Kg*cm
0	0	0
0,439	0,2	5
1,097	0,5	12,5
1,536	0,7	17,5
2,193	1	25
3,291	1,5	37,5
4,39	2	50
5,488	2,5	62,5
6,584	3	75
7,681	3,5	87,5
8,779	4	100
4,392	2	50
0,001	0	0
-0,438	-0,2	-5
-1,097	-0,5	-12,5
-1,537	-0,7	-17,5
-2,194	-1	-25
-3,292	-1,5	-37,5
-4,39	-2	-50
-5,487	-2,5	-62,5
-6,584	-3	-75
-7,68	-3,5	-87,5

-8,777	-4	-100
-4,392	-2	-50
0	0	0

Πίνακας 7.2 Βαθμονόμηση αισθητήρα μέτρησης ροπής



Διάγραμμα 7.2 Συνάρτηση μεταφοράς ροπής



Εικόνα 7.2 Βαθμονόμηση αισθητήρα μέτρησης ροπής

7.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Τα στοιχεία που αφορούν τις συνθήκες του νερού κατα την διάρκεια των πειραμάτων καθώς και χαρακτηριστικά όπως η βρεχόμενη επιφάνεια και το μήκος της ισάλου, που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς στα πειράματα αυτοπρώσης, φαίνονται στον Πίνακα 7.3 που ακολουθεί.

Θερμοκρασία νερού δεξαμενής	$T_{\gamma\lambda}$	21,5	°C
Θερμοκρασία θαλασσινού νερού	$T_{\theta\alpha\lambda}$	15	°C
Πυκνότητα γλυκού νερού δεξαμενής	$\rho_{\gamma\lambda}$	101,746	kps ² /m ⁴
Πυκνότητα θαλασσινού νερού	$\rho_{\theta\alpha\lambda}$	104,611	kps ² /m ⁴
Κινηματική συνεκτικότητα γλυκού νερού	$\nu_{\gamma\lambda}$	9,683E-07	m ² /s
Κινηματική συνεκτικότητα θαλασσινού νερού	$\nu_{\theta\alpha\lambda}$	1,188E-06	m ² /s
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9,810	m/s ²
Βρεχόμενη επιφάνεια πλοίου	$S_{BH,s}$	14692,70	m ²
Βρεχόμενη επιφάνεια μοντέλου	$S_{BH,m}$	7,256	m ²
Μήκος ισάλου πλοίου	$L_{wl,s}$	237,500	m
Μήκος ισάλου μοντέλου	$L_{wl,m}$	5,278	m
Ολικό μήκος υφάλων πλοίου	$L_{oa,sub,s}$	243,68	m
Ολικό μήκος υφάλων μοντέλου	$L_{oa,sub,m}$	5,415	m

Πίνακας 7.3 Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων αυτοπρώσης

Αφού τοποθετηθεί η έλικα στο μοντέλο(βλ. Εικόνα 7.3), αυτό εισέρχεται στην δεξαμενή και προσδένεται στο πόδι του δυναμομέτρου μέτρησης της αντίστασης. Το δυναμόμετρο αυτό, το δυναμόμετρο μέτρησης ώσης και ροπής καθώς και ο κινητήρας πρέπει να συνδεθούν με τα κατάλληλα υπολογιστικά όργανα του φορείου μέσω ειδικών καλωδίων. Πριν την έναρξη της διαδικασίας λαμβάνεται μια μηδενική μέτρηση 30 δευτερολέπτων σε κατάσταση ηρεμίας για την δύναμη F , 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 δυναμομέτρου.



Εικόνα 7.3 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 να γνωρίζουμε τον συντελεστή ολικής αντίστασης του

μοντέλου C_{t_m} καθώς και τον συντελεστή ολικής αντίστασης του πλοίου C_{t_s} . Ο συντελεστής ολικής αντίστασης του μοντέλου C_{t_m} είναι γνωστός από τα πειράματα της αντίστασης ενώ ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου C_{t_s} υπολογίζεται σύμφωνα με την ΙΤΤC αφού πρώτα έχουν υπολογιστεί ο συντελεστής αντίστασης τριβής του πλοίου C_{F_S} , ο συντελεστής τραχύτητας ΔC_F , ο συντελεστής συσχέτισης C_A και είναι γνωστοί ο συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης C_R και ο παράγοντας $(1+k)$. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και η τιμή της δύναμης F_d φαίνονται στον Πίνακα 7.4 .

V_s [kn]	10	12	13	14
V_m [m/s]	0,767	0,92	0,997	1,074
C_{t_m}	5,044E-03	4,783E-03	4,703E-03	4,649E-03
C_{f_s}	1,520E-03	1,487E-03	1,472E-03	1,459E-03
Re_s	1,055E+09	1,266E+09	1,371E+09	1,477E+09
C_{t_s}	2,606E-03	2,444E-03	2,400E-03	2,383E-03
ΔC_f	7,031E-05	9,573E-05	1,065E-04	1,162E-04
$(1+k)$	1,407	1,407	1,407	1,407
C_R	1,306E-04	3,752E-05	2,378E-05	3,542E-05
C_A	2,660E-04	2,186E-04	1,977E-04	1,783E-04
F_d [kp]	0,529	0,731	0,845	0,965

Πίνακας 7.4 Υπολογισμός δύναμης F_d

Στους Πίνακες 7.5, 7.6, 7.7 και 7.8 που ακολουθούν φαίνονται οι μετρήσεις στην κατάσταση ηρεμίας καθώς και κατά το τρέξιμο του φορείου για την κάθε ταχύτητα.

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

ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΝΤΕΣ ΠΑΛΜΟΙ	ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [m/s]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	THRUST [volts]	TORQUE [volts]
			0	0,145	-0,527	0,022
300	503	301,8	0,77	1,034	-0,443	0,078
			0	0,107	-0,524	0,026
400	665	399	0,767	0,79	-0,329	0,136
			0	0,103	-0,526	0,026
500	833	499,8	0,766	0,448	-0,171	0,216
			0	0,082	-0,527	0,028
600	997	598,2	0,769	-0,0091	0,032	0,316
			0	0,0896	-0,524	0,031
650	1087	652,2	0,766	-0,356	0,16	0,379

Πίνακας 7.5 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=10kn$

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

ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΝΤΕΣ ΠΑΛΜΟΙ	ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [m/s]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	THRUST [volts]	TORQUE [volts]
			0	-0,0961	-0,526	0,024
350	579	347,4	0,923	1,154	-0,418	0,093
			0	-0,08	-0,524	0,023
400	664	398,4	0,924	1,041	-0,362	0,121
			0	-0,09	-0,526	0,023
500	827	496,2	0,924	0,74	-0,222	0,193
			0	-0,0378	-0,523	0,022
600	1003	601,8	0,923	0,284	-0,02	0,291
			0	-0,1	-0,529	0,024
700	1155	693	0,924	-0,299	0,182	0,396

Πίνακας 7.6 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=12kn$

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

ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΝΤΕΣ ΠΑΛΜΟΙ	ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [m/s]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	THRUST [volts]	TORQUE [volts]
			0	-0,0569	-0,525	0,022
400	662	397,2	1,000	1,46	-0,376	0,114
			0	-0,02	-0,522	0,022
500	779	467,4	0,998	1,243	-0,284	0,159
			0	-0,0816	-0,522	0,024
600	987	592,2	1,003	0,69	-0,064	0,274
			0	-0,0791	-0,525	0,024
700	1163	697,8	0,994	0,0513	0,184	0,396
			0	-0,074	-0,527	0,028
750	1243	745,8	0,994	-0,279	0,304	0,454

Πίνακας 7.7 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=13kn$

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

ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΝΤΕΣ ΠΑΛΜΟΙ	ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [m/s]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	THRUST [volts]	TORQUE [volts]
			0	-0,112	-0,531	0,030
500	820	492	1,074	1,373	-0,269	0,173
			0	-0,0766	-0,532	0,031
600	990	594	1,074	0,918	-0,098	0,263
			0	-0,0416	-0,532	0,033
650	1085	651	1,073	0,607	0,035	0,331
			0	-0,093	-0,532	0,030
700	1179	707,4	1,075	0,254	0,163	0,391
			0	-0,0738	-0,531	0,030
800	1330	798	1,074	-0,376	0,422	0,519

Πίνακας 7.8 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=14kn$

Λαμβάνοντας υπόψη τις μηδενικές τιμές των μετρήσεων και τις συναρτήσεις μεταφοράς για την ώση και την ροπή προκύπτει τελικά ο Πίνακας 7.9. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται οι τιμές της δύναμης F , της ώσης T και της ροπής Q για έναν αριθμό στροφών γύρω από το σημείο λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχεί αυτοπρόωσης του πλοίου σε ταχύτητα 10kn. Ομοίως οι Πίνακες 7.10, 7.11 και 7.12 παρουσιάζονται στην συνέχεια για τις ταχύτητες των 12, 13 και 14 κόμβων αντίστοιχα.

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

ΣΤΡΟΦΕΣ [RPM]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	ΩΣΗ [kp]	ΡΟΠΗ [kp·cm]
301,8	0,889	0,243	0,638
399	0,683	0,565	1,253
499,8	0,345	1,029	2,164
598,2	-0,091	1,620	3,281
652,2	-0,446	1,982	3,964

Πίνακας 7.9 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=0,767m/s$

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

ΣΤΡΟΦΕΣ [RPM]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	ΩΣΗ [kp]	ΡΟΠΗ [kp·cm]
347,4	1,250	0,313	0,786
398,4	1,121	0,469	1,116
496,2	0,830	0,881	1,936
601,8	0,322	1,457	3,064
693	-0,199	2,060	4,237

Πίνακας 7.10 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=0,92m/s$

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

ΣΤΡΟΦΕΣ [RPM]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	ΩΣΗ[kp]	ΡΟΠΗ [kp·cm]
397,2	1,517	0,432	1,048
467,4	1,263	0,690	1,561
592,2	0,772	1,327	2,848
697,8	0,130	2,054	4,237
745,8	-0,205	2,408	4,853

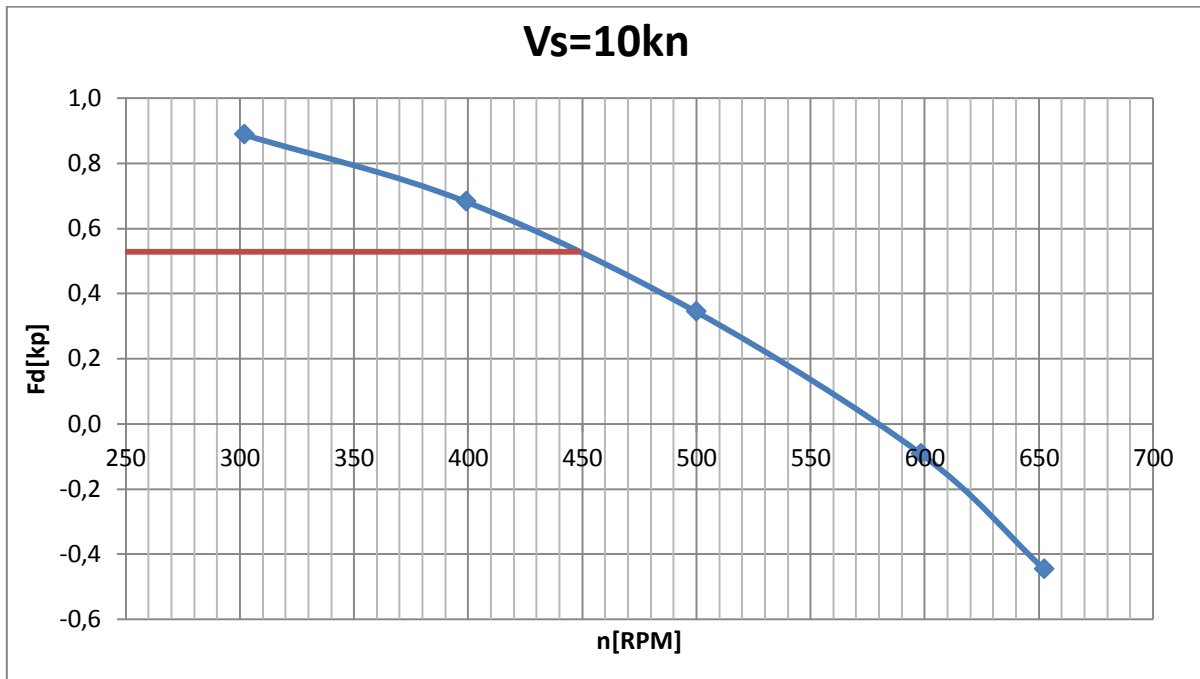
Πίνακας 7.11 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=0,997m/s$

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

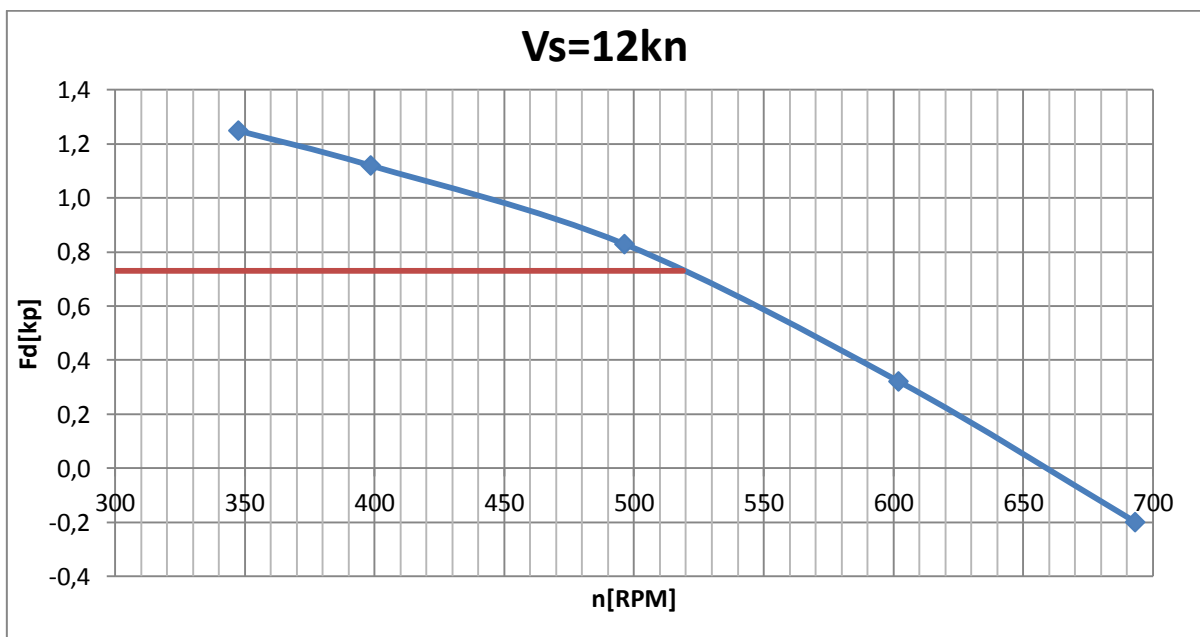
ΣΤΡΟΦΕΣ [RPM]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	ΩΣΗ [kp]	ΡΟΠΗ [kp·cm]
492	1,485	0,759	1,629
594	0,995	1,258	2,643
651	0,649	1,643	3,395
707,4	0,347	2,014	4,112
798	-0,302	2,761	5,570

Πίνακας 7.12 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης για $V_m=1,074m/s$

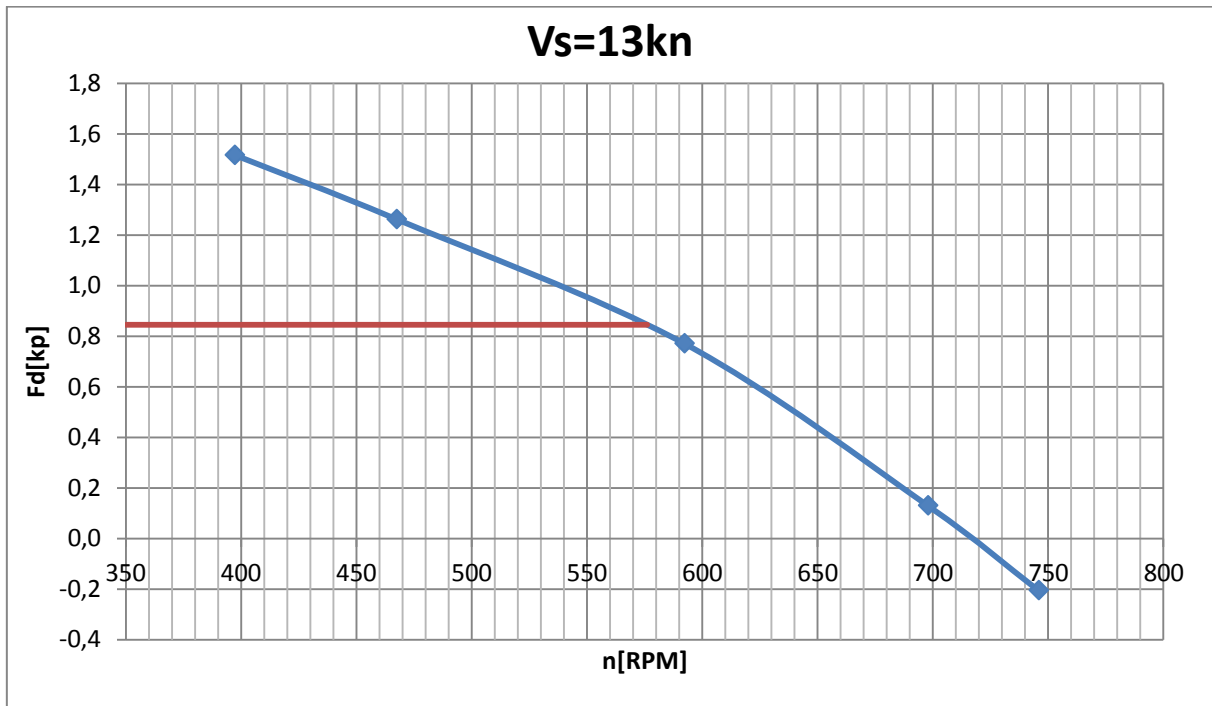
Προκειμένου να βρεθούν με ακρίβεια οι στροφές λειτουργίας της έλικας του μοντέλου, που αντιστοιχούν στην τιμή της δύναμης που υπολογίστηκε παραπάνω αλλά και στο σημείο που η δύναμη μηδενίζεται, χαράσσεται η καμπύλη n-F και γραφικά μπορούμε να εξαγάγουμε συμπέρασμα για την τιμή των στροφών. Τα διαγράμματα είναι αυτά που ακολουθούν και η τελική τιμή των στροφών που αντιστοιχεί στην εκάστοτε δύναμη φαίνεται στον Πίνακα 7.13.



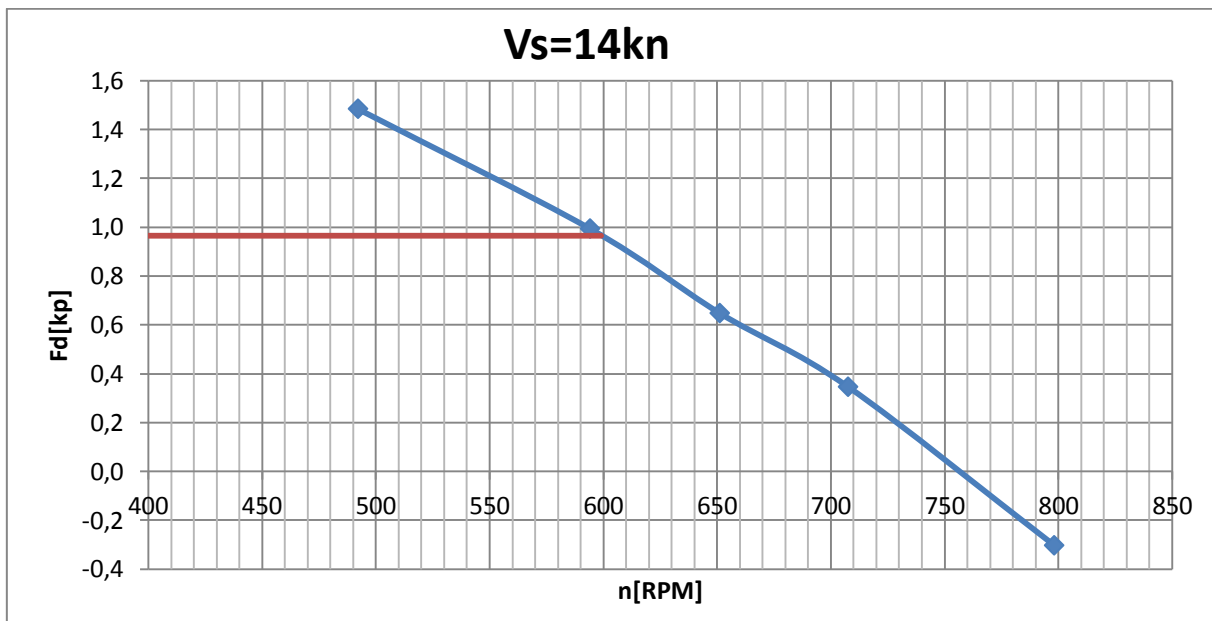
Διάγραμμα 7.3 Διάγραμμα n-Fd για $V_m=0,767\text{m/s}$



Διάγραμμα 7.4 Διάγραμμα n-Fd για $V_m=0,92\text{m/s}$



Διάγραμμα 7.5 Διάγραμμα n-Fd για $V_m=0,997\text{m/s}$



Διάγραμμα 7.6 Διάγραμμα n-Fd για $V_m=1,074\text{m/s}$

V_s[kn]	10	12	13	14
V_m[m/s]	0,767	0,92	0,997	1,074
F_d[kp]	0,529	0,731	0,845	0,965
n[RPM]	448	519	576	599
F=0				
n[RPM]	580	659	718	757

Πίνακας 7.13 Σημείο λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης του καθώς και στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου για V_s=10, 12, 13 και 14kn

Με τον ίδιο τρόπο χαράσσονται και τα διαγράμματα n-T και n-Q για την ώση και την ροπή αντίστοιχα. Παρεμβάλλοντας μεταξύ των σημείων του κάθε διαγράμματος καμπύλη δευτέρου βαθμού και μέσω της συνάρτησης που προκύπτει για την καμπύλη αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε την ακριβή τιμή της ώσης και της ροπής για τις στροφές που έχουν υπολογιστεί στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου και του πλοίου.

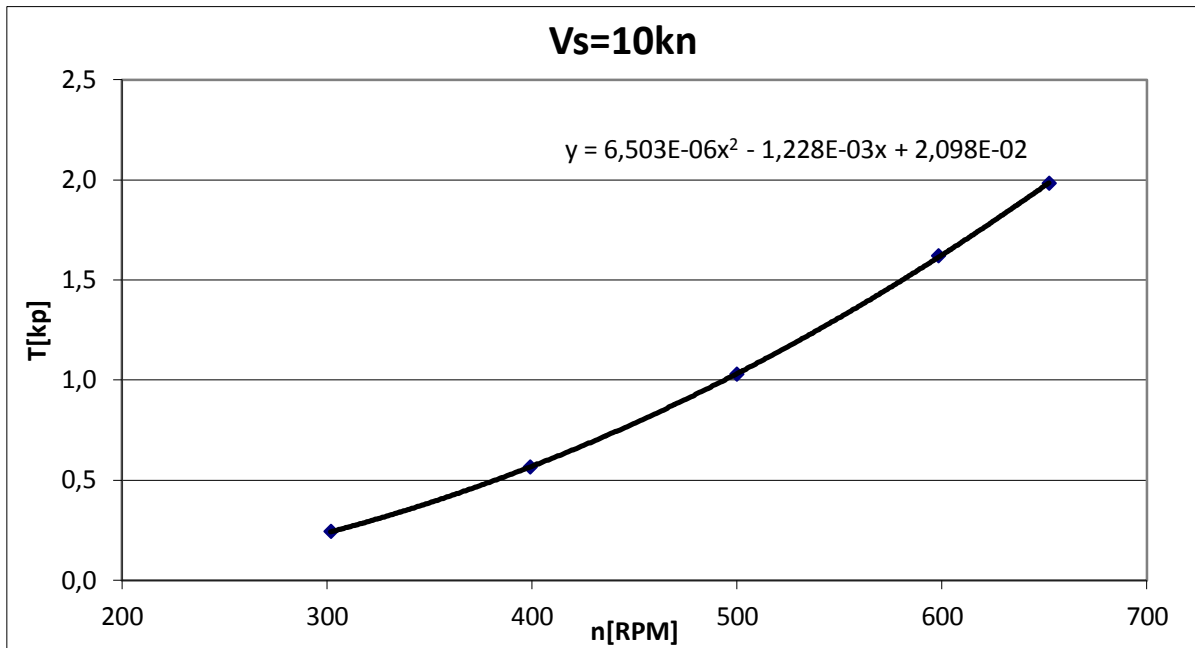
Από την τιμή της ροπής που προκύπτει για το σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου υπολογίζεται και η ισχύς P_{D,m} [W] που απορροφά η έλικα του μοντέλου στο σημείο αυτό μέσω της σχέσης:

$$P_{D,m}=2\cdot\pi\cdot n\cdot Q$$

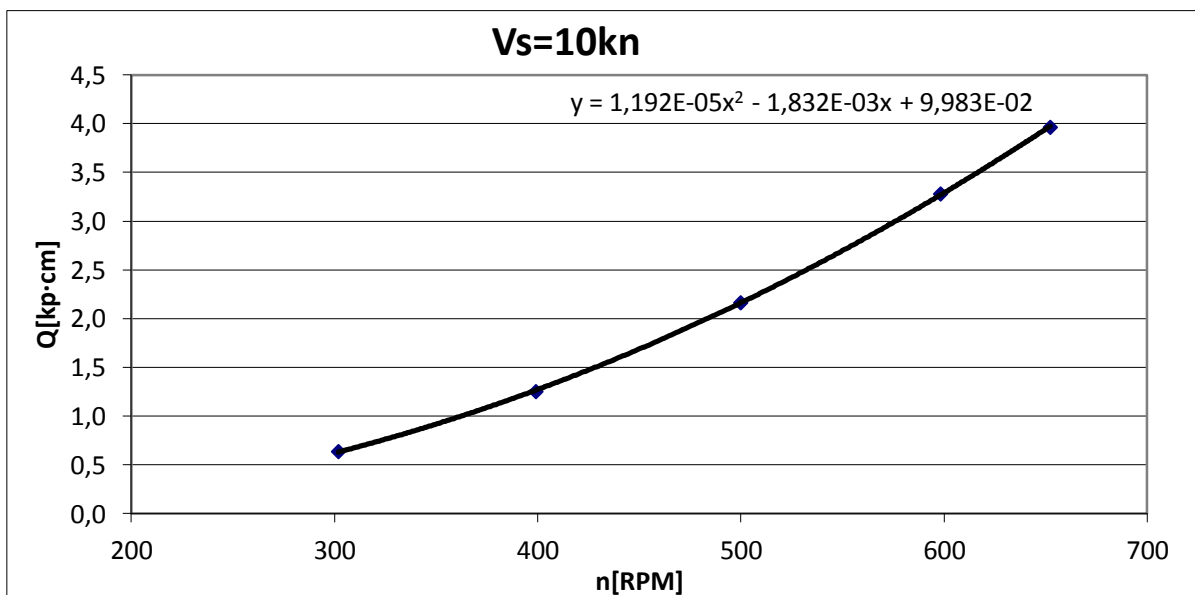
, όπου n: οι στροφές της έλικας στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου [RPS]

Q: η ροπή στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου [N]

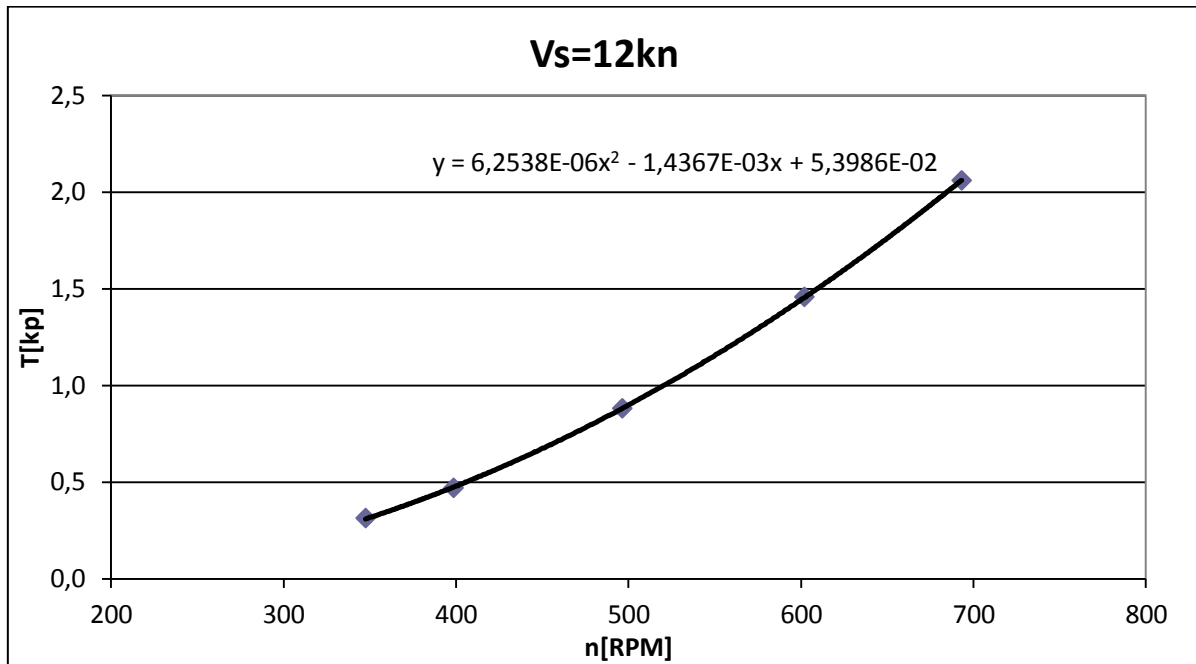
Τα διαγράμματα ώσης και ροπής είναι αυτά που φαίνονται παρακάτω.



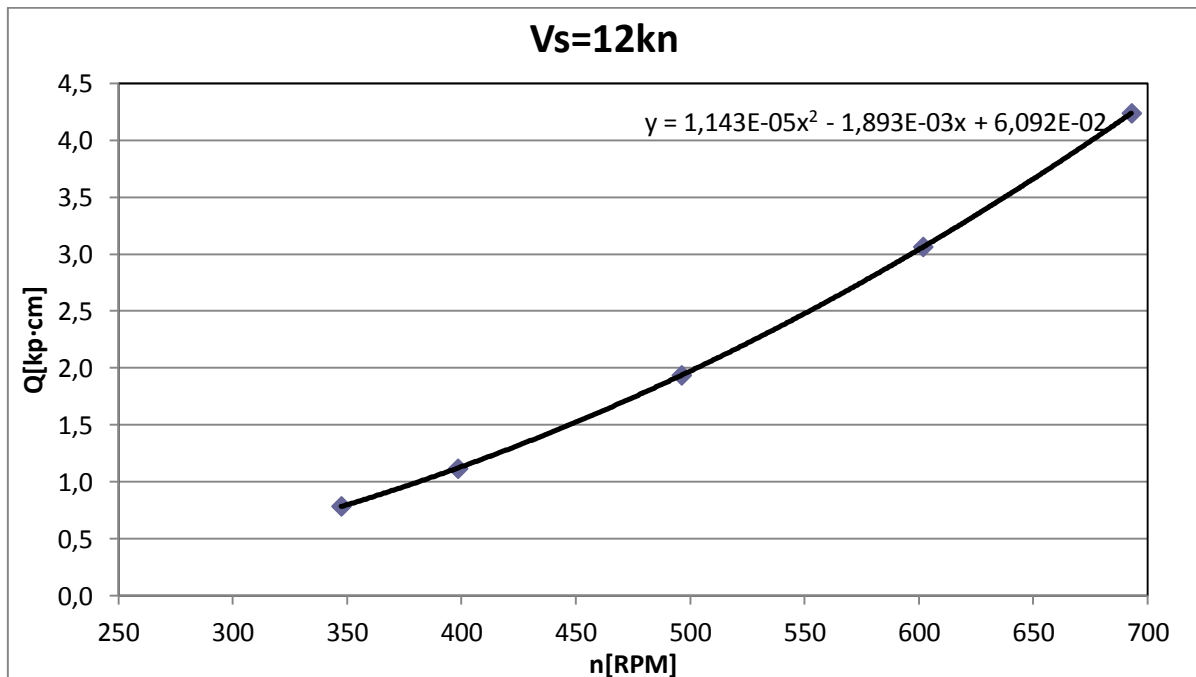
Διάγραμμα 7.7 Συνάρτηση ώσης για $V_m=0,767m/s$



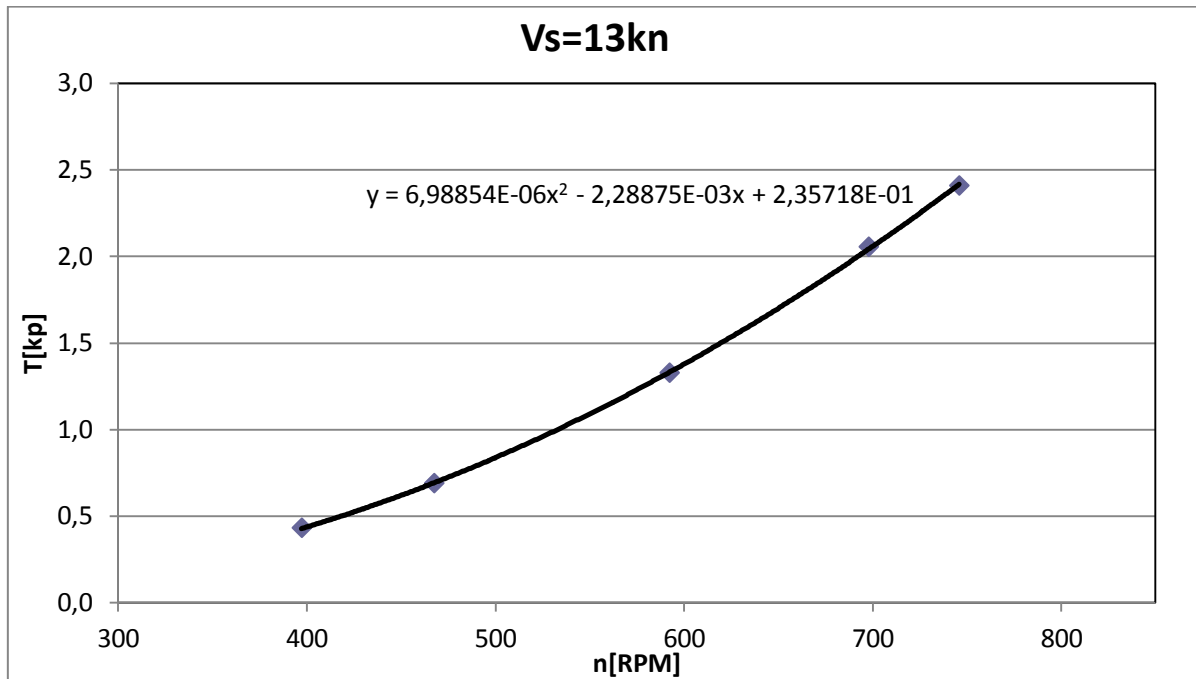
Διάγραμμα 7.8 Συνάρτηση ροπής για $V_m=0,767m/s$



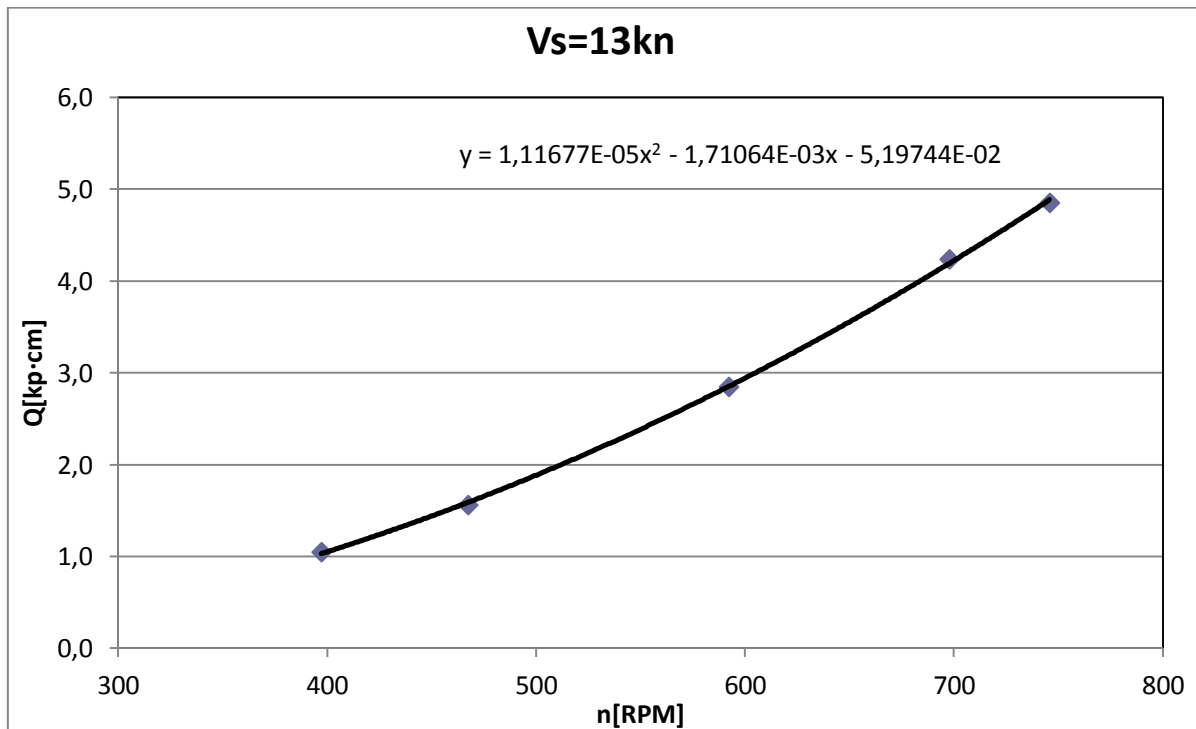
Διάγραμμα 7.9 Συνάρτηση ώσης για $V_m=0,92m/s$



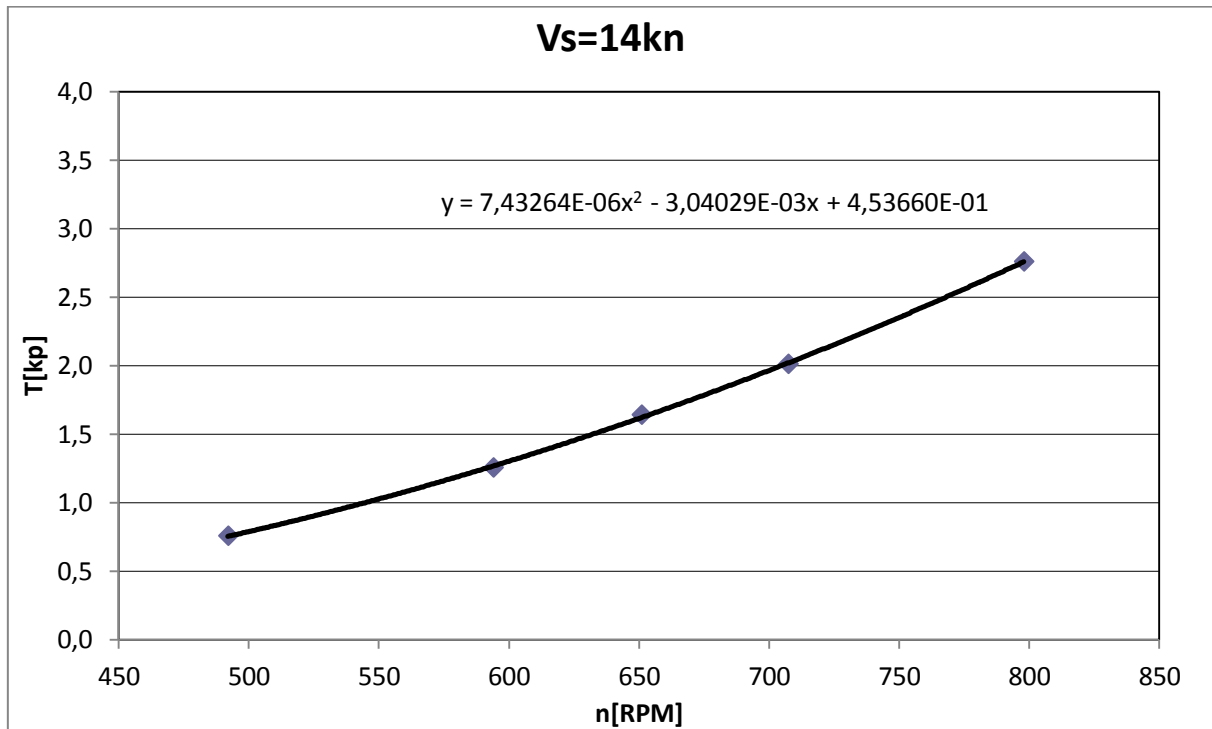
Διάγραμμα 7.10 Συνάρτηση ροπής για $V_m=0,92m/s$



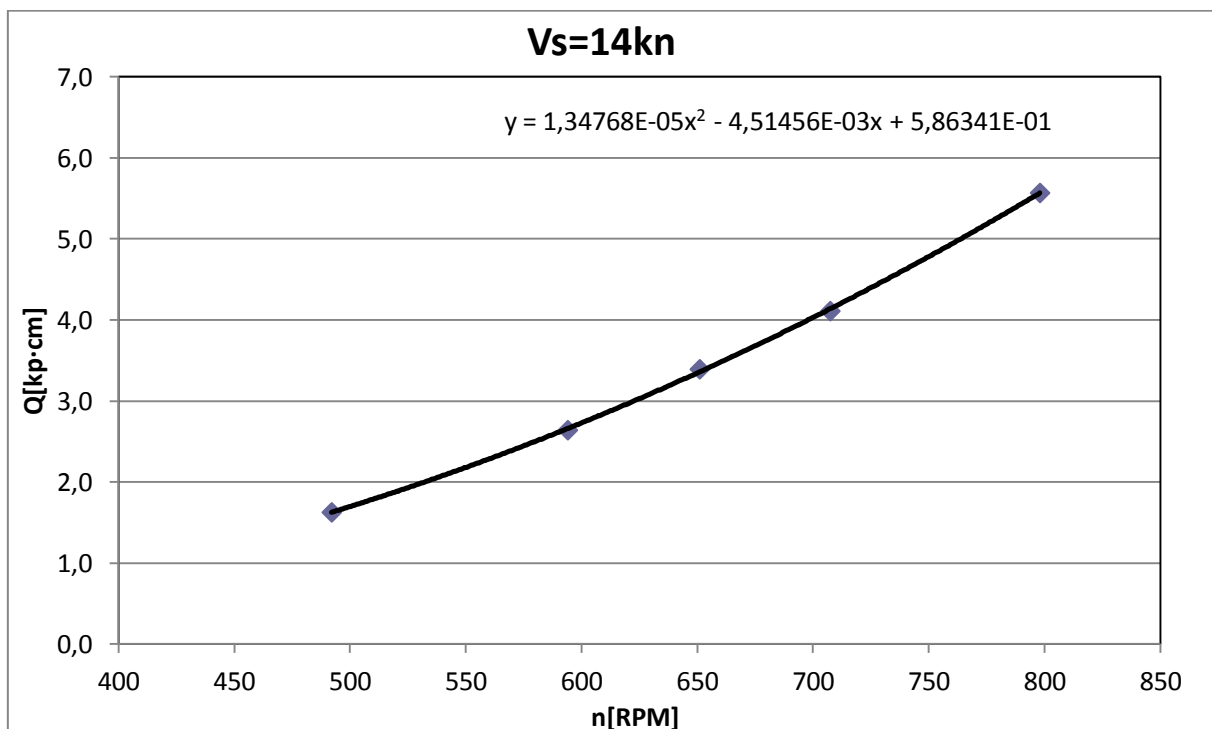
Διάγραμμα 7.11 Συνάρτηση ώσης για $V_m=0,997m/s$



Διάγραμμα 7.12 Συνάρτηση ροπής για $V_m=0,997m/s$



Διάγραμμα 7.1 Συνάρτηση ώσης για $V_m=1,074m/s$



Διάγραμμα 7.2 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 πλοίου μπορούν στην συνέχεια να βρεθούν οι συντελεστές ώσης και ροπής, kT_m και kQ_m αντίστοιχα. Επιπλέον, από την τιμή της ροπής για τον αριθμό στροφών όπου μηδενίζεται η δύναμη F , υπολογίζεται η ισχύς που απορροφά η έλικα του μοντέλου στο σημείο αυτοπρόωσης του. Οι τιμές των μεγεθών αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 7.14 που ακολουθεί.

V_s [kn]	10	12	13	14
V_m [m/s]	0,767	0,92	0,997	1,074
F_d [kp]	0,529	0,731	0,845	0,965
n [RPM]	448	519	576	599
T_m [kp]	0,774	0,992	1,237	1,300
Q_m [kp·cm]	1,671	2,157	2,668	2,718
J_m	0,642	0,665	0,649	0,672
kT_m	0,208	0,199	0,201	0,196
kQ_m	0,028	0,027	0,027	0,026
Σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου(F=0)				
T_m [kp]	1,494	1,825	2,196	2,412
Q_m [kp·cm]	3,047	3,780	4,478	4,893

Πίνακας 7.14 Τιμές συντελεστών ώσης και ροπής μοντέλου στο σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στην αυτοπρόωση του πλοίου

Σύμφωνα με την μέθοδο εξίσωσης ώσης, διατηρώντας σταθερό τον συντελεστή ώσης kT_m , μπορούμε να εισέλθουμε στο διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του μοντέλου και να υπολογίσουμε τον συντελεστή προχώρησης J_0 , τον συντελεστή ροπής kQ_0 και τον βαθμό απόδοσης η_0 . Τα αποτελέσματα για τις τιμές αυτές φαίνονται στον Πίνακα 7.15.

V_s [kn]	10	12	13	14
kT_m	0,208	0,199	0,201	0,196
ΑΠΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ				
J_0	0,38	0,4	0,397	0,408
$10kQ_0$	0,274	0,265	0,267	0,261
η_0	0,46	0,479	0,475	0,485

Πίνακας 7.15 Αποτελέσματα συντελεστών απο το διάγραμμα της έλικας σε ελεύθερη ροη του μοντέλου

Μετά τους υπολογισμούς αυτούς διαθέτουμε πλέον όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό όλων των επιθυμητών μεγεθών που αφορούν την κλίμακα του μοντέλου. Τα μεγέθη αυτά φαίνονται στον Πίνακα 7.16.

Ταχύτητα πλοίου	V_s [kn]	10	12	13	14
Ταχύτητα μοντέλου	V_m [m/s]	0,767	0,92	0,997	1,074
Ταχύτητα προχώρησης	V_A [m/s]	0,454	0,554	0,610	0,652
Συντελεστής ποσοστού ομόρρου μοντέλου	w_m	0,408	0,398	0,388	0,393
Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής	η_r	0,975	0,981	0,984	1,021
	(1+k)	1,407	1,407	1,407	1,407
Συντελεστής αντίστασης τριβής μοντέλου σε συνθήκες πειράματος αυτοπρώωσης	$C_{f_m, \text{αυτοπρώωσης}}$	3,495E-03	3,379E-03	3,329E-03	3,284E-03
Συντελεστής αντίστασης τριβής	$C_{f_m, \text{αντίστασης}}$	3,492E-03	3,373E-03	3,326E-03	3,279E-03

μοντέλου σε συνθήκες πειράματος αντίστασης					
Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης	C_R	1,306E-04	3,752E-05	2,378E-05	3,542E-05
Ολική αντίσταση μοντέλου	R_{t,m}[kp]	1,089	1,501	1,722	1,987
Διορθωμένη τιμή αντίστασης	R_c[kp]	1,090	1,504	1,720	1,990
Συντελεστής μείωσης ώσης	t	0,276	0,221	0,289	0,211
Βαθμός απόδοσης γάστρας μοντέλου	η_{H,m}	1,223	1,294	1,162	1,300
Ισχύς ρυμούλκησης του μοντέλου	P_{E,m}[W]	8,19	13,55	16,84	20,93
Ισχύς που απορροφά η έλικα στο σημείο αυτοπρώωσης του μοντέλου	P_{D,m}[W]	18,15	25,58	33,01	38,03
Βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης του μοντέλου	η_{D,m}	0,451	0,530	0,51	0,550

Πίνακας 7.16 Υπολογιζόμενα μεγέθη που αφορούν την κλίμακα του μοντέλου

Στη συνέχεια, προκειμένου να γίνουν οι υπολογισμοί που αφορούν την κλίμακα του πλοίου, θα πρέπει να παραχθεί το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του πλοίου. Για τον σκοπό αυτό γίνεται μια διόρθωση των συντελεστών που υπεισέρχονται στο διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του μοντέλου. Οι συντελεστές kT_m και kQ_m θα υποστούν μια διόρθωση κατά ΔkT και ΔkQ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

αντίστοιχα, σύμφωνα με την θεωρία, ενώ ο νέος βαθμός απόδοσης η_0 θα υπολογιστεί, με βάση τις νέες τιμές των k_T και k_Q που θα έχουν προκύψει για το πλοίο, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

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

Για τον προσδιορισμό των συντελεστών διόρθωσης Δk_T και Δk_Q πρέπει αρχικά να υπολογιστούν οι παράγοντες C_{d_m} και C_{d_s} . Από την διαφορά τους υπολογίζεται το ΔC_d που υπεισέρχεται στην σχέση προσδιορισμού των Δk_T και Δk_Q . Τα μεγέθη αυτά, τα οποία υπολογίστηκαν με βάση τον συντελεστή προχώρησης J , φαίνονται στον Πίνακα 7.17.

J	Re _{0,75C}	C _{d_m}	C _{d_s}	ΔC _d	Δk _Q	Δk _T
0,112041	595954,5	0,008794	0,006995	0,0018	0,000648	-0,00058
0,200627	448170,9	0,008978	0,006995	0,001984	0,000714	-0,00064
0,243785	670615,1	0,008708	0,006995	0,001714	0,000617	-0,00056
0,295721	560214,3	0,008837	0,006995	0,001843	0,000663	-0,0006
0,400057	422761,9	0,009011	0,006995	0,002017	0,000726	-0,00065
0,50057	340866,3	0,009116	0,006995	0,002121	0,000763	-0,00069
0,550801	311278,8	0,009151	0,006995	0,002156	0,000776	-0,0007
0,587248	286738,1	0,009177	0,006995	0,002183	0,000786	-0,00071
0,650984	266078,1	0,009197	0,006995	0,002202	0,000793	-0,00071
0,704691	248465,7	0,009211	0,006995	0,002216	0,000798	-0,00072
0,749572	233289,9	0,00922	0,006995	0,002226	0,000801	-0,00072
0,796023	220092,3	0,009226	0,006995	0,002231	0,000803	-0,00072

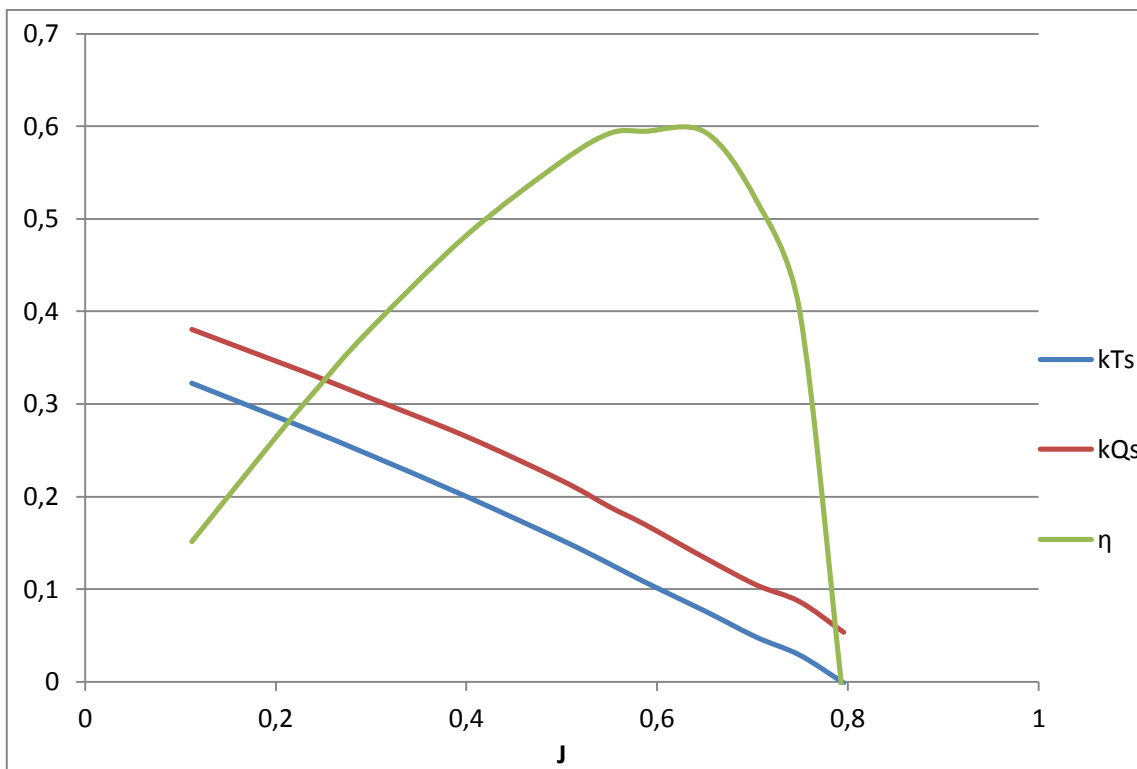
Πίνακας 7.17 Παράγοντες διόρθωσης των συντελεστών του διαγράμματος της έλικας σε ελεύθερη ροή του μοντέλου

Οι νέες τιμές των συντελεστών του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας του πλοίου καθώς και το διάγραμμα αυτό φαίνονται παρακάτω.

J _{0,s}	kT _{0,s}	10kQ _{0,s}	η _{0,s}
0,112041	0,322738	0,380461	0,151342
0,200627	0,286676	0,34609	0,264626
0,243785	0,268809	0,329158	0,31702
0,295721	0,246567	0,307776	0,377244
0,400057	0,200371	0,264734	0,482155

0,50057	0,153015	0,216893	0,562333
0,550801	0,127323	0,188464	0,592534
0,587248	0,107926	0,169692	0,594742
0,650984	0,076267	0,133176	0,593634
0,704691	0,048213	0,104113	0,519639
0,749572	0,029104	0,086344	0,402324
0,796023	-0,00103	0,053126	-0,02466

Πίνακας 7.18 Συντελεστές διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας του πλοίου



Διάγραμμα 7.3 Διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του πλοίου

Για τον προσδιορισμό της φόρτισης της έλικας του πλοίου $\frac{kT}{J^2}$ πρέπει πρωτίστως να είναι γνωστός ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου w_{TS} . Αφού υπολογιστεί ο παράγοντας $\frac{kT}{J^2}$ εισερχόμαστε στο διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του πλοίου με την καμπύλη $\frac{kT}{J^2} = C$, που έχει προκύψει για την κάθε ταχύτητα που εξετάζεται. Η καμπύλη αυτή θα τέμνει την καμπύλη $J-kT_{TS}$ του διαγράμματος ελεύθερης ροής της έλικας του πλοίου σε ένα σημείο. Για τον νέο συντελεστή προχώρησης J_{TS} , που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό, προσδιορίζονται επίσης ο συντελεστής kQ_{TS} και ο βαθμός απόδοσης η_{TS} . Οι υπολογισμοί αυτοί παρατίθενται στον Πίνακα 7.19 που ακολουθεί.

V_s[kn]	10	12	13	14
w_{ts}	0,357	0,324	0,357	0,318
kT/J²	1,236	0,974	1,157	0,920
ΑΠΌ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ				
J_{ts}	0,403	0,435	0,412	0,443
10kQ_s	0,263	0,249	0,259	0,245
η_s	0,484	0,511	0,493	0,518

Πίνακας 7.19 Συντελεστής προχώρησης, συντελεστής ροπής και βαθμός απόδοσης της έλικας του πλοίου

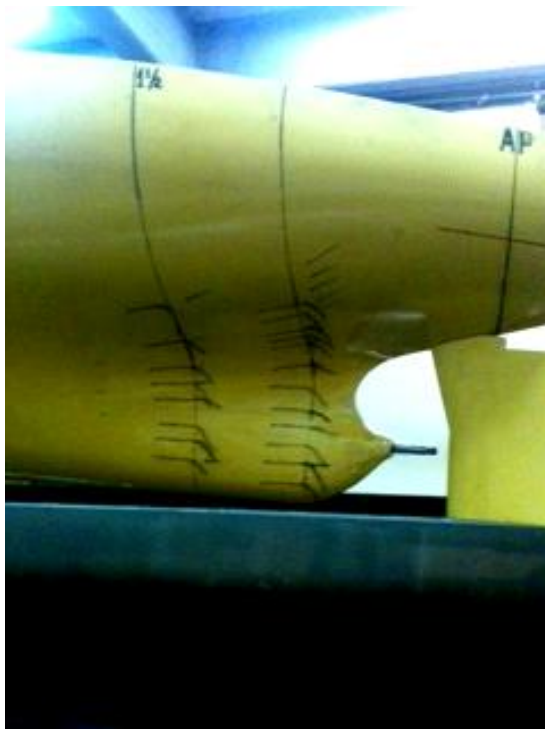
Με βάση τα παραπάνω μπορούν να υπολογιστούν όλα τα μεγέθη που αφορούν στην φυσική κλίμακα του πλοίου και χαρακτηρίζουν την αποδοτικότητα της προωστήριας εγκατάστασης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.20.

Ταχύτητα πλοίου	V_s [kn]	10	12	13	14
Ταχύτητα πλοίου υπολογισμών	V_s [m/s]	5,145	6,172	6,688	7,205
Στροφές άξονα το δευτερόλεπτο	n_s [RPS]	1,139	1,331	1,450	1,541
Στροφές άξονα το λεπτό	n_s [RPM]	68,358	79,879	87,012	92,442
Αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα	P_{Ds} [kW]	4972,5	7469,6	10009,1	10940,0
Ώση	T_s [kp]	73255,6	91873,8	116067,2	120519,7
Ροπή	Q_s [kp·m]	70867,4	91102,9	112067,7	115295,1
Ισχύς ρυμούλκησης	P_E [kW]	2675,4	4329,5	5410,1	6715,9
Συνολικός βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης	η_D	0,538	0,580	0,541	0,614

Πίνακας 7.20 Μεγέθη που αφορούν την απόδοση της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου

8. ΓΡΑΜΜΕΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΓΑΣΤΡΑ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

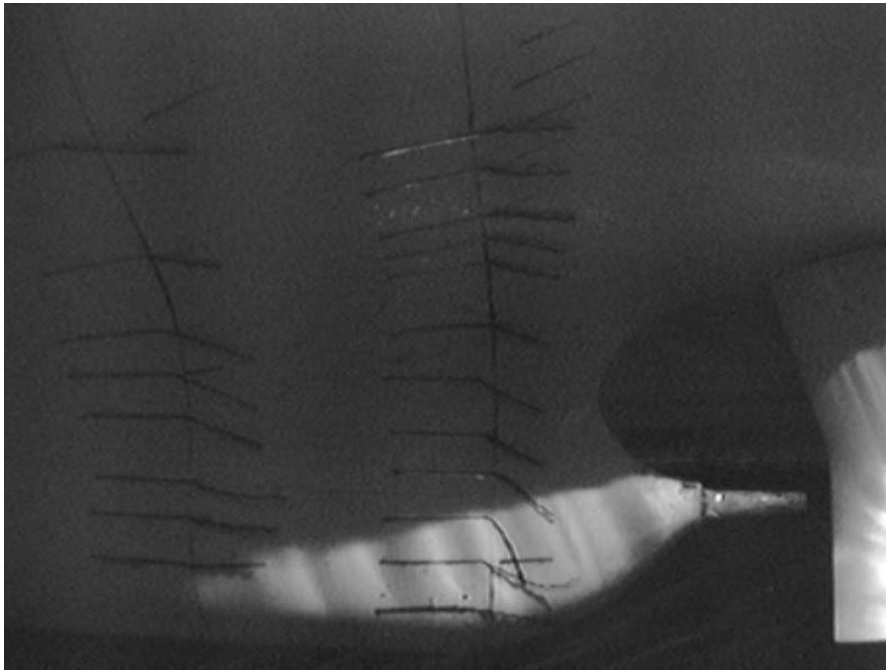
Μετά το πέρας των πειραμάτων αντίστασης και αυτοπρόωσης του μοντέλου χωρίς τους δακτυλίους ακολούθησε η παρατήρηση και μελέτη των γραμμών ροής στην πρύμνη του μοντέλου. Για τον σκοπό αυτό τοποθετήθηκαν ειδικά σκούρα νήματα στην περιοχή μπροστά από την έλικα και πίσω από τον 1,5 νομέα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1 παρακάτω .



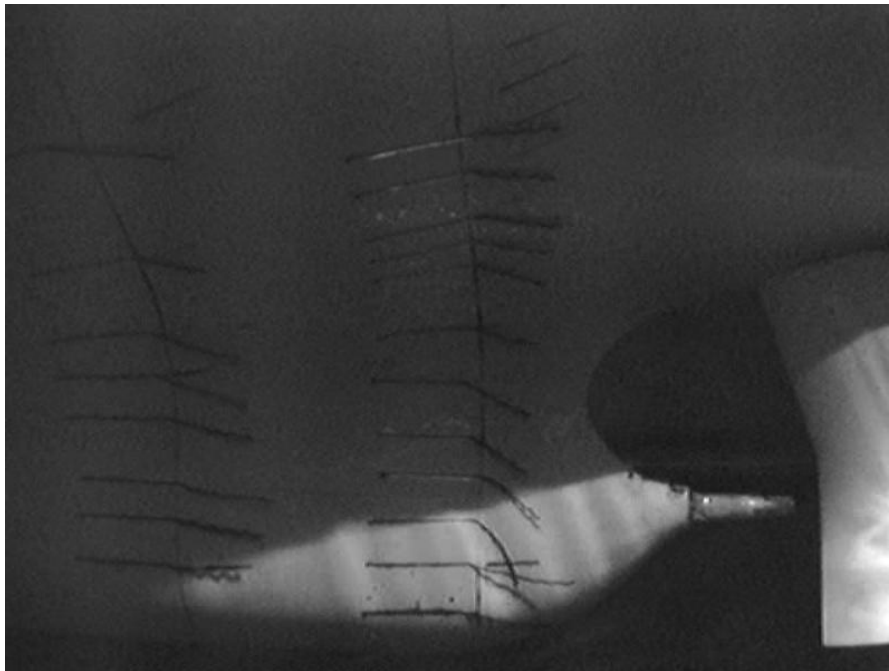
Εικόνα 8.1 Τοποθέτηση ειδικών νημάτων

Κατά το τρέξιμο του μοντέλου στην εκάστοτε ταχύτητα τα νήματα ακολουθούν την πορεία των γραμμών ροής. Βιντεοσκοπώντας την συμπεριφορά των νημάτων κατά την διάρκεια του τρεξίματος μπορεί να γίνει αντιληπτό σε ποιες περιοχές της πρύμνης η ροή είναι επιταχυμένη και σε ποιες αποκολλάται από την γάστρα αδυνατώντας να ακολουθήσει την γεωμετρία του μοντέλου. Στην δεύτερη περίπτωση το νήμα δεν θα μετακινείται σχεδόν καθόλου από την αρχική θέση του,

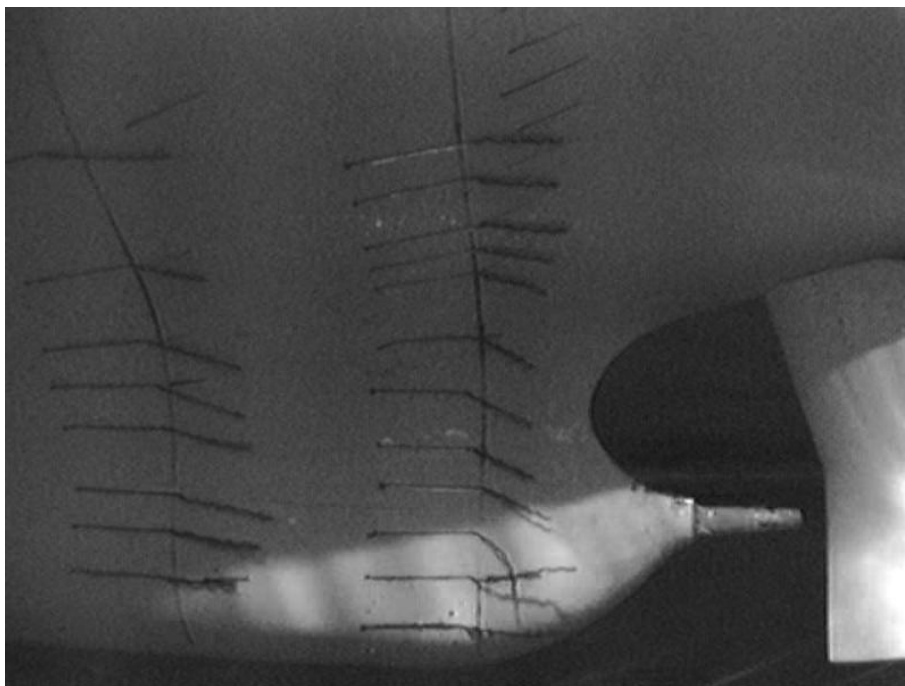
η οποία είναι αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 1 παραπάνω. Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε στις ταχύτητες που πραγματοποιήθηκε και το πείραμα της αυτοπρώωσης, δηλαδή για ταχύτητες πλοίου 10, 12, 13 και 14kn. Οι αντίστοιχες ταχύτητες του μοντέλου είναι 0,767, 0,92, 0,997 και 1,074m/s. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται στιγμιότυπα από το βιντεοσκοπημένο αρχείο για την κάθε ταχύτητα.



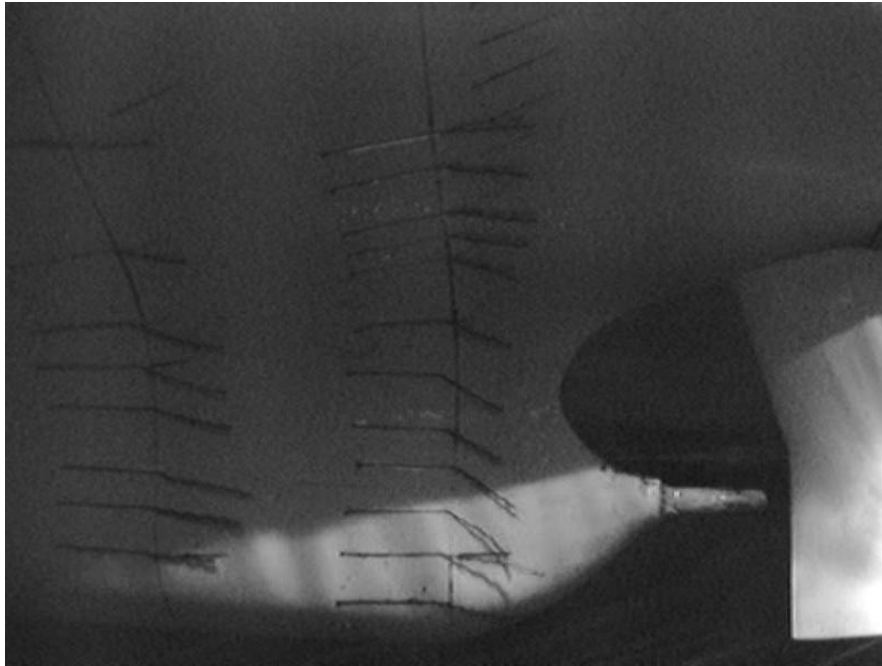
Εικόνα 8.2 Ταχύτητα μοντέλου $V_m=0,767\text{m/s}$



Εικόνα 8.3 Ταχύτητα μοντέλου $V_m=0,92\text{m/s}$



Εικόνα 8.4 Ταχύτητα μοντέλου $V_m=0,997\text{m/s}$



Εικόνα 8.5 Ταχύτητα μοντέλου $V_m=1,074\text{m/s}$

Από τις παραπάνω εικόνες γίνεται εύκολα αντιληπτό πως στην χαμηλότερη περιοχή της δεύτερης σειράς νημάτων η ταχύτητα του ρευστού είναι φανερά μειωμένη. Η πορεία του νήματος εκεί είναι διαφοροποιημένη σε σχέση με τα γειτονικά νήματα και δεν κατευθύνεται προς την θέση της έλικας. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως στο σημείο αυτό υπάρχει έντονη απόκλιση των γραμμών ροής.

9. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΤΥΠΟΥ WED

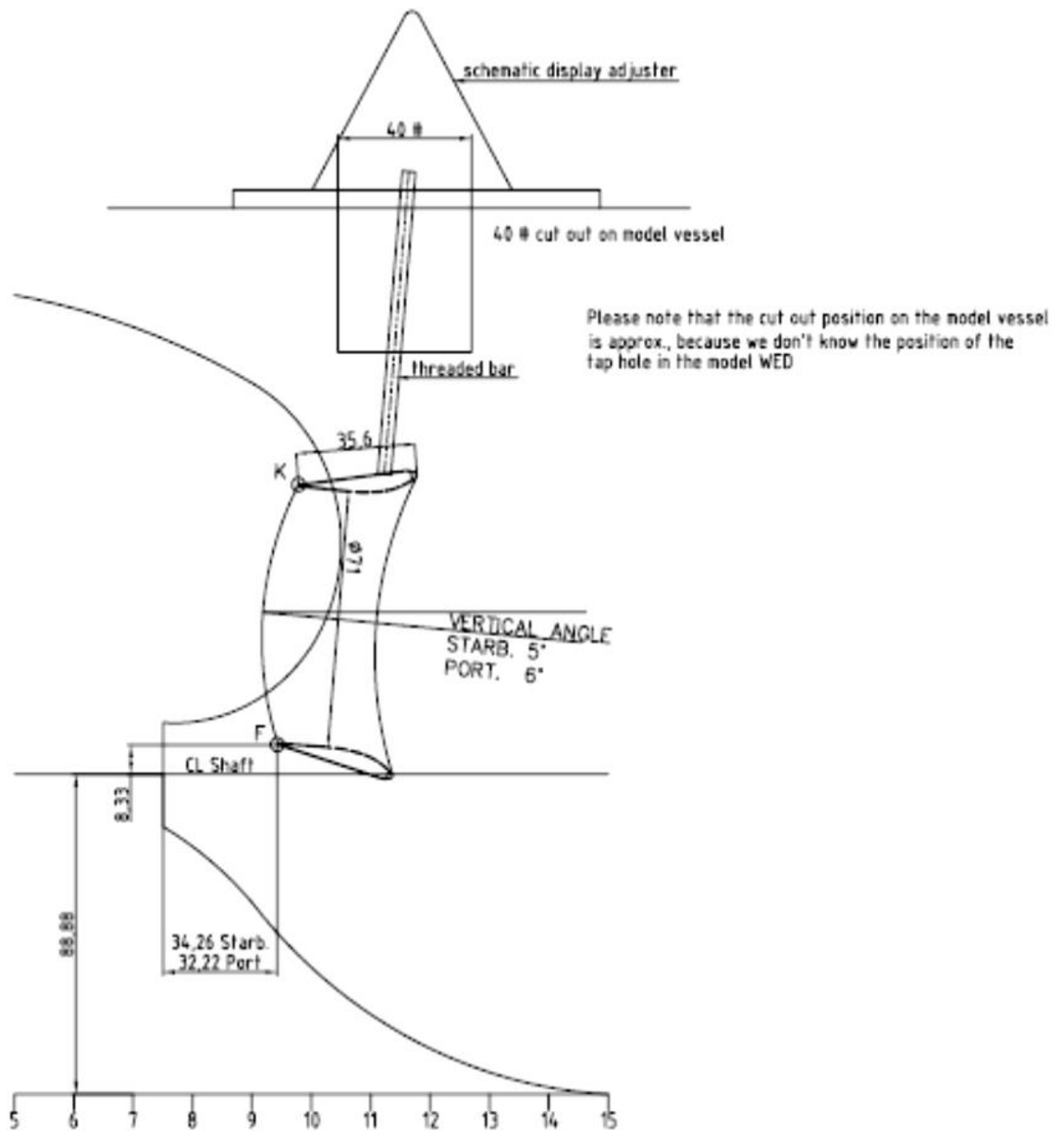
Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων που αφορούν την απόδοση του πλοίου θα πρέπει να επαναληφθούν τα ίδια πειράματα με μόνη διαφορά την παρουσία των ημιδακτυλίων. Συνεπώς το επόμενο βήμα της πειραματικής διαδικασίας συνιστά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων στην πρύμνη του μοντέλου. Για το σκοπό αυτό το μοντέλο εξέρχεται από την δεξαμενή και παραμένει στο προτυποποιείο. Στην Εικόνα 1 που ακολουθεί φαίνονται οι ημιδακτύλιοι που δόθηκαν από την κατασκευάστρια εταιρία και θα προσαρμοσθούν στο μοντέλο.



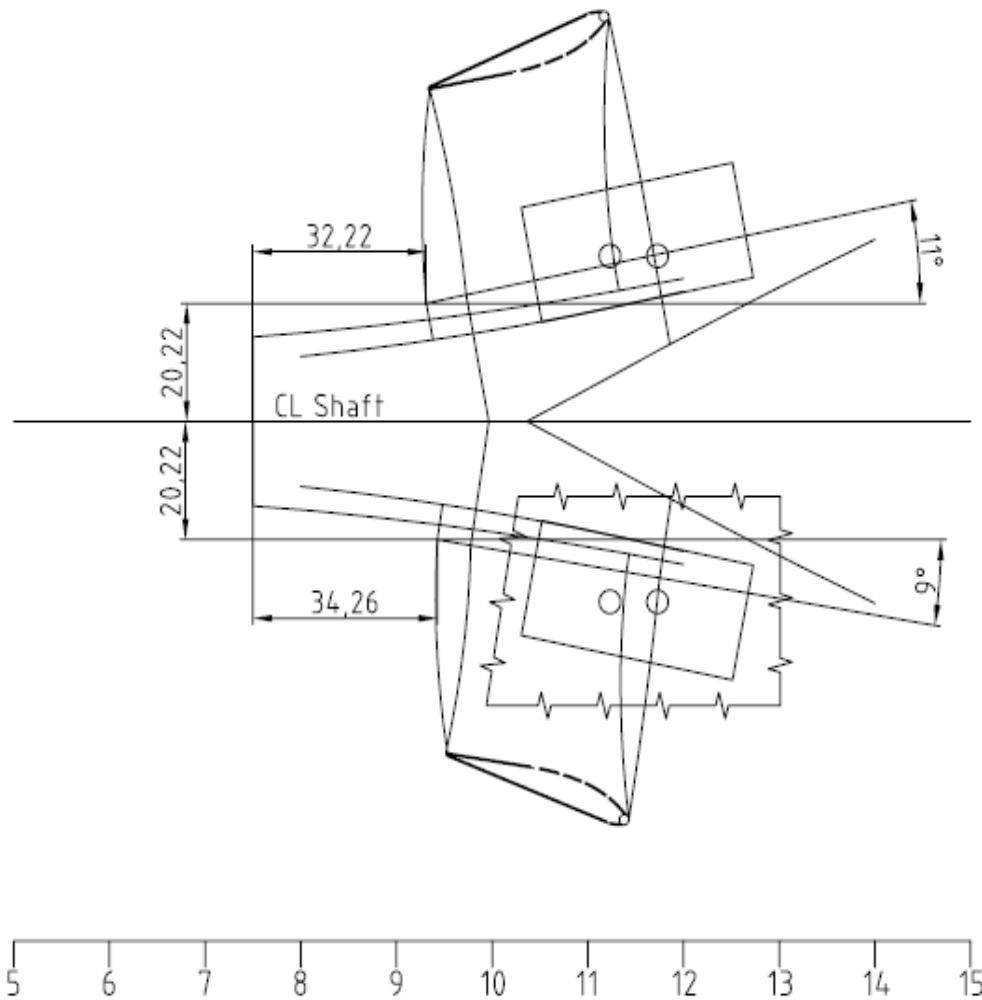
Εικόνα 9.1 Ημιδακτύλιοι τύπου WED του μοντέλου

Η θέση των δακτυλίων επι του μοντέλου δεν μπορεί να είναι τυχαία. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1 , η θέση των ημιδακτυλίων κατά το διάμηκες, η

εγκάρσια και διαμήκης κλίση τους παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική αποδοτικότητά τους. Για τον λόγο αυτό η τοποθέτηση τους γίνεται ακολουθώντας αυστηρά το σχέδιο που δόθηκε στο εργαστήριο. Το σχέδιο αυτό φαίνεται στις Εικόνες 9.2 και 9.3 που ακολουθούν.



Εικόνα 9.2 Προφίλ πρύμνης μοντέλου για την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων



Εικόνα 9.3 Κάτοψη πρύμνης μοντέλου για την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων

Σύμφωνα με το παραπάνω σχέδιο γίνεται η τοποθέτηση των δακτυλίων στο μοντέλο. Στην Εικόνα 9.4 που ακολουθεί φαίνεται η διαδικασία προσαρμογής των δακτυλίων και σταθεροποίησης αυτών στην κατάλληλη θέση.



Εικόνα 9.4 Τοποθέτηση των ημιδακτυλίων επι του μοντέλου

Αφού οριστικοποιηθεί η θέση των ημιδακτυλίων, αυτοί κολλούνται με ειδικό τρόπο ώστε να αποτραπεί οποιαδήποτε πιθανή μετακίνηση αυτών. Επιπλέον για την στεγανοποίηση του μοντέλου στοκάρονται οι οπές από τις οποίες περνούσαν οι άξονες του συστήματος ρύθμισης των γωνιών των δακτυλίων. Μετά το πέρας της διαδικασίας αυτής το μοντέλο έχει την τελική μορφή του και είναι έτοιμο να εισέλθει στην δεξαμενή για την διεξαγωγή των πειραμάτων, όπως φαίνεται στις Εικόνες 9.5 και 9.6 παρακάτω.



Εικόνα 9.5



Εικόνα 9.6

10. ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΩΝ

10.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Ομοίως με το πείραμα αντίστασης επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για τις ίδιες ταχύτητες του μοντέλου. Τα στοιχεία που αφορούν τις συνθήκες του νερού κατα την διάρκεια των νέων πειραμάτων αντίστασης καθώς και χαρακτηριστικά όπως η νέα βρεχόμενη επιφάνεια και το μήκος της ισάλου, που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς, φαίνονται στον Πίνακα 10.1 που ακολουθεί.

Θερμοκρασία νερού δεξαμενής	$T_{\gamma\lambda}$	23,2	°C
Θερμοκρασία θαλασσινού νερού	$T_{\theta\alpha\lambda}$	15	°C
Πυκνότητα γλυκού νερού δεξαμενής	$\rho_{\gamma\lambda}$	101,701	kps ² /m ⁴
Πυκνότητα θαλασσινού νερού	$\rho_{\theta\alpha\lambda}$	104,611	kps ² /m ⁴
Κινηματική συνεκτικότητα γλυκού νερού	$\nu_{\gamma\lambda}$	9,304E-07	m ² /s
Κινηματική συνεκτικότητα θαλασσινού νερού	$\nu_{\theta\alpha\lambda}$	1,188E-06	m ² /s
Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9,810	m/s ²
Βρεχόμενη επιφάνεια πλοίου+βρεχόμενη επιφάνεια δακτυλίων	$S_{APP,s}$	14711,53	m ²
Βρεχόμενη επιφάνεια μοντέλου+βρεχόμενη επιφάνεια δακτυλίων	$S_{APP,m}$	7,265	m ²

Μήκος ισάλου πλοίου	$L_{wl,s}$	237,500	m
Μήκος ισάλου μοντέλου	$L_{wl,m}$	5,278	m
Ολικό μήκος υφάλων πλοίου	$L_{oa,sub,s}$	243,68	m
Ολικό μήκος υφάλων μοντέλου	$L_{oa,sub,m}$	5,415	m

Πίνακας 10.1 Συνθήκες διεξαγωγής πειράματος αντίστασης μετα την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων

Η ταχύτητα του μοντέλου[m/s] που επιτεύχθηκε σε κάθε τρέξιμο για την επιθυμητή ταχύτητα πλοίου[kn], οι μετρούμενες τιμές της αντίστασης[kr] στην κατάσταση ηρεμίας αλλά και κατα την διάρκεια του τρεξίματος παρατίθενται στον Πίνακα 10.2.

Vs(kn)	Vm(m/sec)	Res (Volts)
0,000	0,000	-0,1049
9,000	0,690	0,8550
0,000	0,000	-0,0455
9,500	0,730	1,0060
0,000	0,000	-0,0468
10,000	0,768	1,0970
0,000	0,000	-0,1000
10,500	0,802	1,0870
0,000	0,000	-0,0840
11,000	0,844	1,2490
0,000	0,000	-0,0690
11,500	0,881	1,3560
0,000	0,000	-0,0790
12,000	0,919	1,4470
0,000	0,000	-0,0786
12,500	0,959	1,5250
0,000	0,000	-0,0844
13,000	0,996	1,6130
0,000	0,000	-0,0790
13,500	1,037	1,7410
0,000	0,000	-0,0970
14,000	1,074	1,8640
0,000	0,000	-0,0889
14,500	1,115	2,0100
0,000	0,000	-0,0964

15,000	1,152	2,1910
0,000	0,000	-0,086
15,500	1,191	2,341

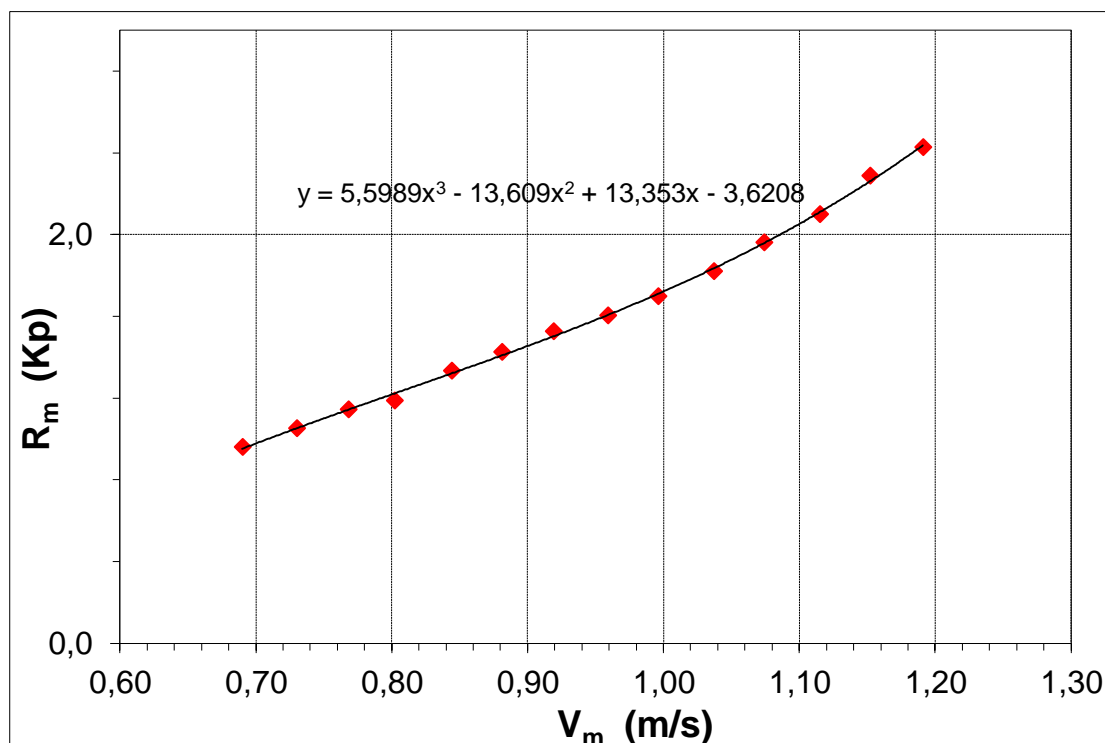
Πίνακας 10.2 Μετρούμενες τιμές αντίστασης

Συνεπώς προκύπτει ο Πίνακας 10.3 για την τιμή της αντίστασης του μοντέλου που αντιστοιχεί σε κάθε ταχύτητα.

Vs[kn]	Vm[m/s]	Rm[kp]
9	0,690	0,960
9,5	0,730	1,052
10	0,768	1,144
10,5	0,802	1,187
11	0,844	1,333
11,5	0,881	1,425
12	0,919	1,526
12,5	0,959	1,604
13	0,996	1,697
13,5	1,037	1,820
14	1,074	1,961
14,5	1,115	2,099
15	1,152	2,287
15,5	1,191	2,427

Πίνακας 10.3 Τελικές τιμές αντίστασης μοντέλου

Στο διάγραμμα που προκύπτει από τις παραπάνω τιμές της αντίστασης μπορούμε να παρεμβάλλουμε μια 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 συνάρτηση αυτή φαίνονται στο Διάγραμμα 10.1 που ακολουθεί.



Διάγραμμα 10.1 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.

V_m [m/s]	R_m [kp]
0,690	0,953
0,730	1,053
0,768	1,144
0,802	1,223
0,844	1,321
0,881	1,409
0,919	1,503
0,959	1,607
0,996	1,710
1,037	1,835
1,074	1,959
1,115	2,110
1,152	2,261
1,191	2,437

Πίνακας 10.4 Ομαλοποιημένες τιμές αντίστασης

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό Froude (F_{n_m}), τον αριθμό Reynolds του μοντέλου (Re_m), τον συντελεστή αντίστασης τριβής του μοντέλου (C_{f_m}) και τον συντελεστή ολικής αντίστασης του μοντέλου (C_{t_m}). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών φαίνονται στον Πίνακα 10.5.

V_m [m/s]	F_{n_m}	Re_m	C_{f_m}	C_{t_m}
0,690	0,096	4,016E+06	3,539E-03	5,417E-03
0,730	0,101	4,249E+06	3,501E-03	5,347E-03
0,768	0,107	4,470E+06	3,468E-03	5,248E-03
0,802	0,111	4,668E+06	3,440E-03	5,148E-03
0,844	0,117	4,912E+06	3,408E-03	5,020E-03
0,881	0,122	5,127E+06	3,381E-03	4,914E-03
0,919	0,128	5,348E+06	3,355E-03	4,816E-03
0,959	0,133	5,581E+06	3,329E-03	4,730E-03
0,996	0,138	5,797E+06	3,306E-03	4,667E-03
1,037	0,144	6,035E+06	3,282E-03	4,620E-03
1,074	0,149	6,251E+06	3,261E-03	4,597E-03
1,115	0,155	6,489E+06	3,239E-03	4,594E-03
1,152	0,160	6,705E+06	3,220E-03	4,612E-03
1,191	0,166	6,931E+06	3,201E-03	4,651E-03

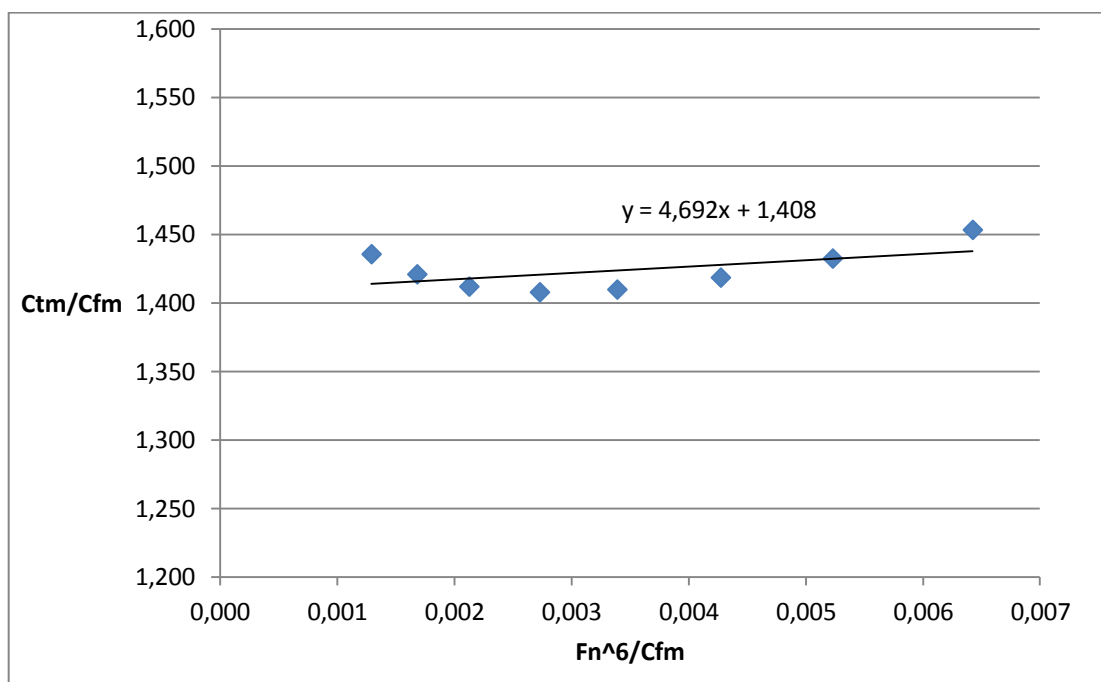
Πίνακας 10.5

Σύμφωνα με την ITTC , για τον υπολογισμό του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R , πρώτα θα υπολογιστεί ο παράγοντας k . Με βάση λοιπόν την μέθοδο Prohaska, όπως αυτή έχει περιγραφεί στην θεωρία, θα υπολογίσουμε τον παράγοντα k με βάση το διάγραμμα $F_n^6/C_{f_m}-C_{t_m}/C_{f_m}$. Οι λόγοι αυτοί και τελικά το διάγραμμα προκύπτουν όπως φαίνεται στην συνέχεια(Πίνακας 10.6 και Διάγραμμα 10.2).

C_{t_m}/C_{f_m}	F_n^6/C_{f_m}
1,436	1,2938E-03
1,421	1,6838E-03
1,412	2,1278E-03
1,408	2,7304E-03

1,410	3,3912E-03
1,418	4,2748E-03
1,432	5,2304E-03
1,453	6,4252E-03

Πίνακας 10.6 Λόγοι υπολογισμού του παράγοντα k



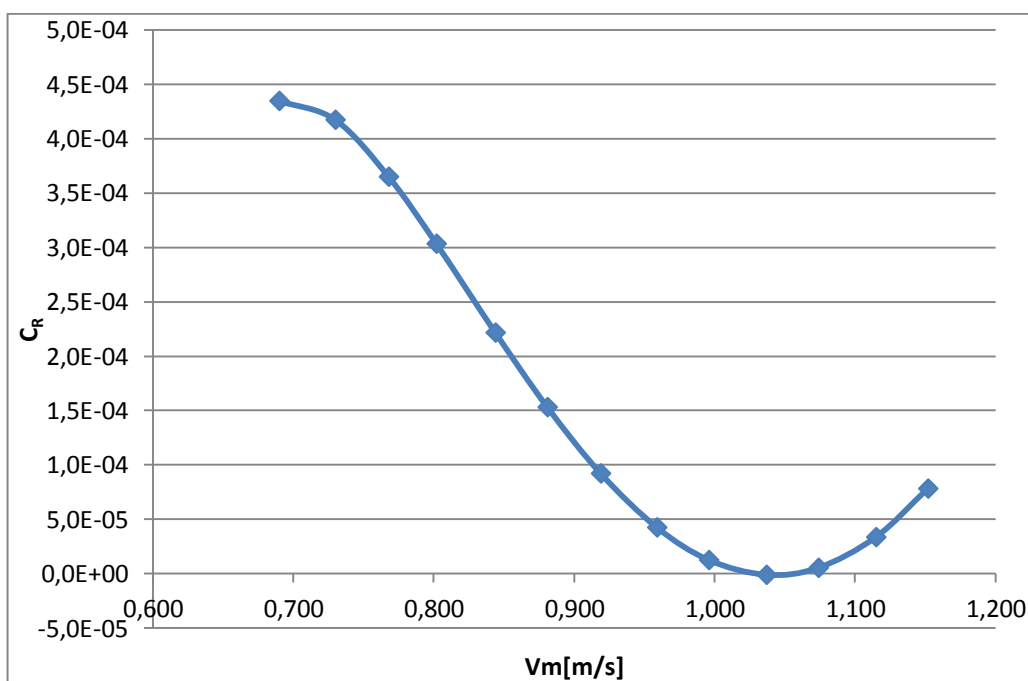
Διάγραμμα 10.2 Υπολογισμός παράγοντα k

Παρεμβάλλοντας μια γραμμική συνάρτηση μεταξύ των σημείων του διαγράμματος είναι φανερό ότι η καμπύλη θα τέμνει τον άξονα y στο σημείο $y=1,408$. Άρα σύμφωνα με την θεωρία έχουμε $1+k=1,408$.

Έχοντας την τιμή για το $1+k$ μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R , ο οποίος προκύπτει όπως φαίνεται στον Πίνακα 10.7 που ακολουθεί.

V_m [m/s]	C_R
0,690	4,349E-04
0,730	4,175E-04
0,768	3,652E-04
0,802	3,036E-04
0,844	2,219E-04
0,881	1,533E-04
0,919	9,237E-05
0,959	4,275E-05
0,996	1,274E-05
1,037	-8,341E-07
1,074	5,582E-06
1,115	3,383E-05
1,152	7,845E-05
1,191	1,449E-04

Πίνακας 10.7 Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης

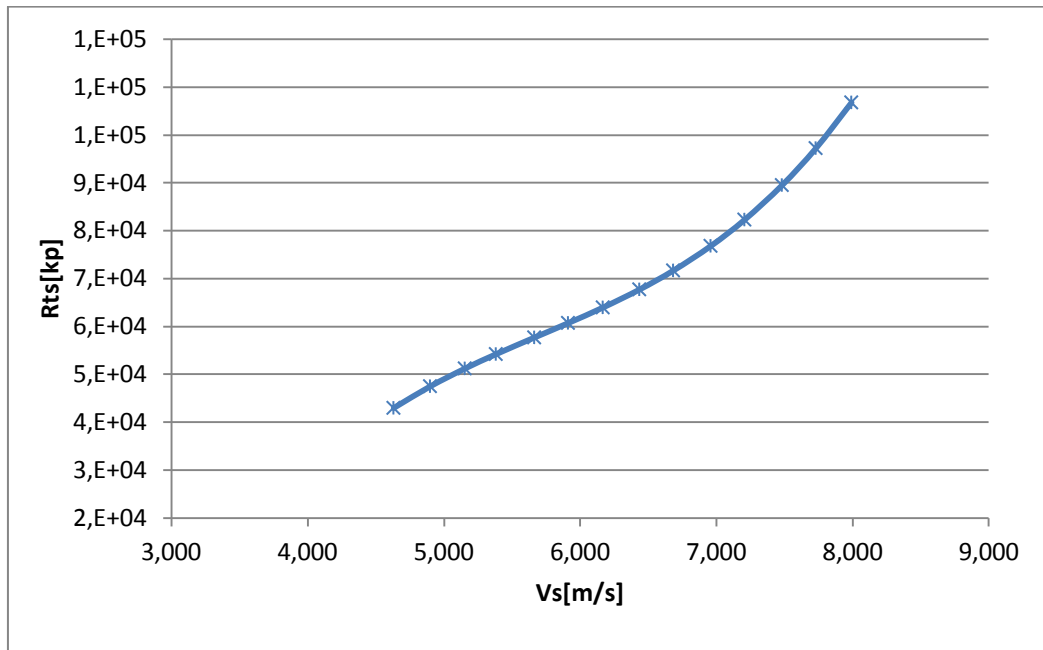


Διάγραμμα 10.3 Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης ως προς την ταχύτητα του μοντέλου

Διατηρώντας τον συντελεστή αυτό αναλόιωτο 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 (Cf_s), ο συντελεστής ολικής αντίστασης του πλοίου(Ct_s) και τελικά η ολική αντίσταση του πλοίου(Rt_s). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 10.8 που ακολουθεί.

V_s [kn]	V_s [m/s]	Re_s	Cf_s	Ct_s	Rt_s [kp]	Rt_s [kN]
9,000	4,629	9,492E+08	1,541E-03	2,604E-03	4,293E+04	421,14
9,500	4,897	1,004E+09	1,530E-03	2,572E-03	4,745E+04	465,50
10,000	5,152	1,056E+09	1,520E-03	2,506E-03	5,118E+04	502,03
10,500	5,380	1,103E+09	1,512E-03	2,433E-03	5,418E+04	531,51
11,000	5,662	1,161E+09	1,503E-03	2,338E-03	5,766E+04	565,64
11,500	5,910	1,212E+09	1,495E-03	2,258E-03	6,069E+04	595,32
12,000	6,165	1,264E+09	1,487E-03	2,186E-03	6,393E+04	627,18
12,500	6,433	1,319E+09	1,479E-03	2,126E-03	6,769E+04	664,07
13,000	6,681	1,370E+09	1,473E-03	2,086E-03	7,166E+04	702,96
13,500	6,956	1,427E+09	1,465E-03	2,062E-03	7,679E+04	753,36
14,000	7,205	1,477E+09	1,459E-03	2,060E-03	8,228E+04	807,16
14,500	7,480	1,534E+09	1,452E-03	2,079E-03	8,950E+04	877,97
15,000	7,728	1,585E+09	1,447E-03	2,116E-03	9,722E+04	953,69
15,500	7,989	1,638E+09	1,441E-03	2,174E-03	1,068E+05	1047,44

Πίνακας 10.8 Υπολογισμός μεγεθών που αφορούν στην κλίμακα του πλοίου



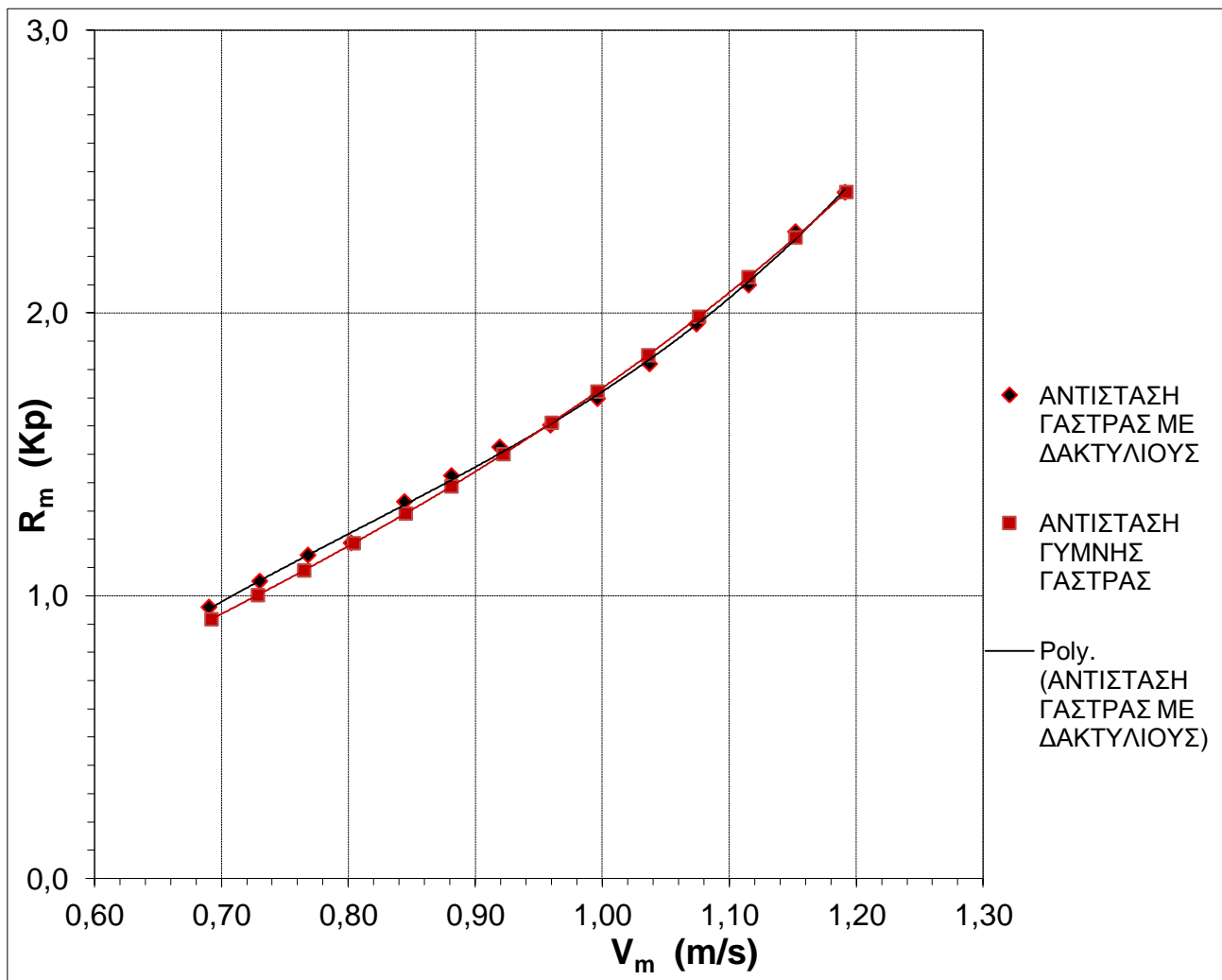
Διάγραμμα 10.4 Καμπύλη αντίστασης του πλοίου

**10.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ
ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΩΝ**

Στον Πίνακα 10.9 που ακολουθεί φαίνεται η διαφορά της αντίστασης του μοντέλου πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων. Η διαφορά αυτή, κυρίως στις μεγάλες ταχύτητες, είναι τόσο μικρή που μπορεί να θεωρηθεί ότι οφείλεται στο σφάλμα του οργάνου κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων.

ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΥΜΝΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ		ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΓΑΣΤΡΑΣ ΜΕ ΔΑΚΤΥΛΙΟΥΣ	
V_m[m/s]	R_m[kp]	V_m[m/s]	R_m[kp]
0,692	0,917	0,690	0,953
0,729	1,002	0,730	1,053
0,765	1,089	0,768	1,144
0,804	1,186	0,802	1,223
0,845	1,291	0,844	1,321
0,881	1,387	0,881	1,409
0,922	1,501	0,919	1,503
0,960	1,612	0,959	1,607
0,996	1,722	0,996	1,710
1,036	1,851	1,037	1,835
1,076	1,987	1,074	1,959
1,115	2,127	1,115	2,110
1,152	2,267	1,152	2,261
1,192	2,428	1,191	2,437

Πίνακας 10.9 Διαφορά πειραματικών μετρήσεων αντίστασης

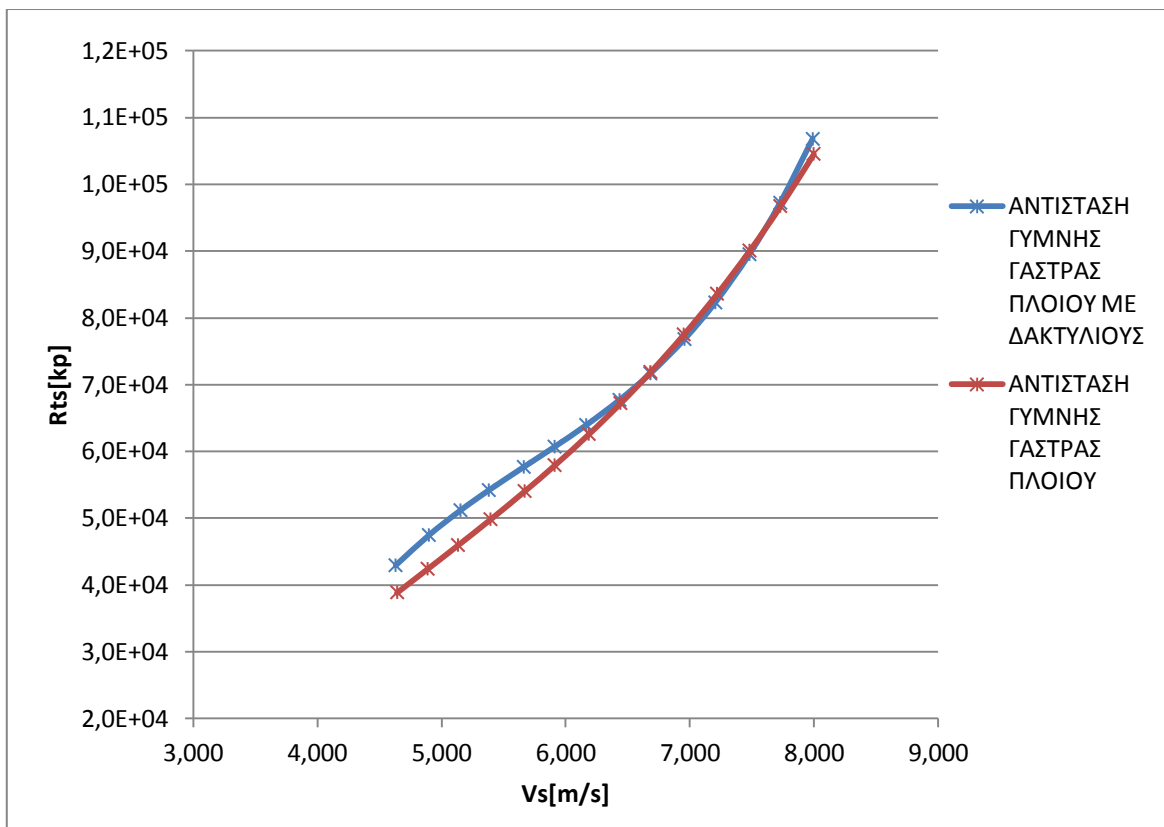


Διάγραμμα 10.5 Διαφορά πειραματικών μετρήσεων για την αντίσταση του μοντέλου πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων

Από τον παραπάνω πίνακα(Πίνακας 10.9) και διάγραμμα(Διάγραμμα 10.5) είναι φανερό πως, παρόλο που οι τιμές της αντίστασης μεταξύ των δυο καταστάσεων δεν διαφέρουν σημαντικά, παρουσιάζεται μια μεγαλύτερη διαφορά στην αντίσταση μεταξύ των δυο καμπυλών για τις μικρές ταχύτητες, όπου η αντίσταση με την παρουσία των δακτυλίων είναι μεγαλύτερη. Η διαφοροποίηση αυτή μεταξύ των ταχυτήτων οφείλεται στο γεγονός ότι στις μικρές ταχύτητες η γωνία πρόσπτωσης του ρευστού στον δακτύλιο είναι αυξημένη με αποτέλεσμα να αυξάνεται ελαφρώς η αντίσταση. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στις μεγαλύτερες

ταχύτητες καθώς αυτή η γωνία πρόσπτωσης μικραίνει λόγω αύξησης της ταχύτητας.

Το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται και στην κλίμακα του πλοίου, για την οποία τα διαγράμματα της αντίστασης πριν και μετά την τοποθέτηση των δακτυλίων είναι αυτά που φαίνονται στο Διάγραμμα 10.6 που ακολουθεί.



Διάγραμμα 10.6 Διαφορά αντίστασης του πλοίου πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων

11. ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΥΤΟΠΡΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΩΝ

Στο στάδιο αυτό της πειραματικής διαδικασίας το μοντέλο εξοπλίζεται ξανά με την έλικα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.1, και ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 7 εκτελούνται τα πειράματα της αυτοπρώσης για τις ίδιες ομάδες ταχυτήτων. Η μοναδική διαφοροποίηση των νέων πειραμάτων αυτοπρώσης έγκειται στην παρουσία των ημιδακτυλίων στην πρύμνη του μοντέλου. Σκοπός της ανάλυσης στο στάδιο αυτό είναι να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν την θετική ή αρνητική επίδραση που μπορεί να έχουν οι ημιδακτύλιοι στην απόδοση και τελικά στην κατανάλωση καυσίμου του πλοίου για την εκάστοτε υπο μελέτη ταχύτητα. Τα συμπεράσματα αυτά μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με την ταχύτητα καθώς οι ημιδακτύλιοι δε μπορεί να σχεδιαστούν και να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδίδουν εξίσου βέλτιστα σε κάθε 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 πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων για την κάθε ταχύτητα.



Εικόνα 11.1 Τοποθέτηση της έλικας στο μοντέλο για την διεξαγωγή των πειραμάτων αυτοπρόωσης

Τα στοιχεία που αφορούν τις συνθήκες του νερού κατά την διάρκεια των νέων πειραμάτων αυτοπρόωσης καθώς και χαρακτηριστικά όπως η νέα βρεχόμενη επιφάνεια και το μήκος της ισάλου, που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς, φαίνονται στον Πίνακα 11.1 που ακολουθεί.

Σειρά πειραμάτων		12 και 14kn	10 και 13kn	
Θερμοκρασία νερού δεξαμενής	$T_{\gamma\lambda}$	23,2	23,7	°C
Θερμοκρασία θαλασσινού νερού	$T_{\theta\alpha\lambda}$	15	15	°C
Πυκνότητα γλυκού νερού δεξαμενής	$\rho_{\gamma\lambda}$	101,701	101,691	kps^2/m^4
Πυκνότητα θαλασσινού νερού	$\rho_{\theta\alpha\lambda}$	104,611	104,611	kps^2/m^4
Κινηματική συνεκτικότητα γλυκού νερού	$\nu_{\gamma\lambda}$	9,304E-07	9,198E-07	m^2/s
Κινηματική συνεκτικότητα θαλασσινού νερού	$\nu_{\theta\alpha\lambda}$	1,188E-06	1,188E-06	m^2/s

Επιτάχυνση της βαρύτητας	g	9,810	9,810	m/s ²
Βρεχόμενη επιφάνεια πλοίου+βρεχόμενη επιφάνεια	S _{APP,s}	14711,53	14711,53	m ²
Βρεχόμενη επιφάνεια μοντέλου+βρεχόμενη επιφάνεια δακτυλίων	S _{APP,m}	7,265	7,265	m ²
Μήκος ισάλου πλοίου	L _{wl,s}	237,500	237,500	m
Μήκος ισάλου μοντέλου	L _{wl,m}	5,278	5,278	m
Ολικό μήκος υφάλων πλοίου	L _{oa,sub,s}	243,68	243,68	m
Ολικό μήκος υφάλων μοντέλου	L _{oa,sub,m}	5,415	5,415	m

Πίνακας 11.1 Συνθήκες διεξαγωγής πειραμάτων αυτοπρώσης μετα την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων

Με βάση το νέο πείραμα αντίστασης και την νέα βρεχόμενη επιφάνεια πρέπει να υπολογιστεί εκ νέου η τιμή της δύναμης F_d που όταν θα ασκείται στο μοντέλο τότε αυτό θα λειτουργεί σε σημείο που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρώσης του πλοίου. Τα μεγέθη που απαιτούνται για τον υπολογισμό της αλλά και η νέα τιμή της δύναμης αυτής φαίνονται στον Πίνακα 11.2.

V _s [kn]	10	12	13	14
V _m [m/s]	0,767	0,92	0,997	1,074
C _{t,m}	5,248E-03	4,816E-03	4,667E-03	4,597E-03
C _{f,s}	1,520E-03	1,487E-03	1,472E-03	1,459E-03
Re _s	1,055E+09	1,266E+09	1,371E+09	1,477E+09
C _{t,s}	2,842E-03	2,500E-03	2,390E-03	2,354E-03
ΔC _f	7,031E-05	9,573E-05	1,065E-04	1,162E-04
(1+k)	1,408	1,408	1,408	1,408
C _R	3,65E-04	9,24E-05	1,27E-05	5,58E-06
C _A	2,66E-04	2,19E-04	1,98E-04	1,78E-04
F _d [kp]	0,523	0,724	0,836	0,955

Πίνακας 11.2 Υπολογισμός δύναμης F_d

Με βάση αυτή την τιμή της δύναμης ξεκινά η πειραματική διαδικασία εκτελώντας μετρήσεις για αριθμό στροφών γύρω από το σημείο λειτουργίας που

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ

2013

αντιστοιχεί στην δύναμη αυτή. Στους Πίνακες 11.3, 11.4, 11.5 και 11.6 φαίνονται οι μετρήσεις σε κατάσταση ηρεμίας αλλά και κατά το τρέξιμο του φορείου σε κάθε ταχύτητα.

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

ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΝΤΕΣ ΠΑΛΜΟΙ	ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [m/s]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	THRUST [volts]	TORQUE [volts]
			0	0,077	-0,517	0,039
300	501	300,6	0,766	1,038	-0,423	0,087
			0	0,0444	-0,518	0,039
400	667	400,2	0,766	0,779	-0,303	0,148
			0	0,0536	-0,516	0,040
500	832	499,2	0,766	0,482	-0,142	0,229
			0	0,0195	-0,517	0,044
600	1000	600	0,767	-0,027	0,076	0,334
			0	0,0418	-0,518	0,043
650	1085	651	0,77	-0,356	0,193	0,388

Πίνακας 11.3 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=10kn$

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

ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΝΤΕΣ ΠΑΛΜΟΙ	ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [m/s]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	THRUST [volts]	TORQUE [volts]
			0	0,0081	-0,523	0,037
350	587	352,2	0,92	1,203	-0,403	0,101
			0	0,0169	-0,524	0,038
400	655	393	0,922	1,142	-0,358	0,125
			0	-0,024	-0,524	0,040
500	835	501	0,918	0,726	-0,198	0,205
			0	-0,0111	-0,524	0,043
600	985	591	0,917	0,297	-0,024	0,286
			0	-0,0382	-0,525	0,045
700	1175	705	0,92	-0,365	0,258	0,428

Πίνακας 11.4 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=12kn$

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

ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΝΤΕΣ ΠΑΛΜΟΙ	ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [m/s]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	THRUST [volts]	TORQUE [volts]
			0	0,0723	-0,522	0,039
400	665	399	0,998	1,574	-0,347	0,131
			0	0,0597	-0,523	0,040
500	834	500,4	0,996	1,108	-0,21	0,201
			0	0,076	-0,52	0,041
600	999	599,4	0,996	0,678	-0,025	0,293
			0	0,073	-0,526	0,041
700	1167	700,2	0,996	0,137	0,212	0,404
			0	0,0688	-0,526	0,043
750	1245	747	0,996	-0,212	0,336	0,466

Πίνακας 11.5 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=13kn$

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

ΕΠΙΘΥΜΗΤΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΝΤΕΣ ΠΑΛΜΟΙ	ΤΕΛΙΚΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ ΑΞΟΝΑ [RPM]	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ [m/s]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	THRUST [volts]	TORQUE [volts]
			0	0,0381	-0,515	0,035
500	829	497,4	1,074	1,494	-0,223	0,185
			0	0,119	-0,518	0,031
600	979	587,4	1,076	1,194	-0,061	0,261
			0	0,127	-0,52	0,035
650	1076	645,6	1,077	0,9	0,059	0,320
			0	0,0648	-0,521	0,035
700	1159	695,4	1,077	0,572	0,167	0,377
			0	0,053	-0,524	0,035
800	1334	800,4	0,924	-0,26	0,469	0,518

Πίνακας 11.6 Πειραματικές μετρήσεις για $V_s=14kn$

Λαμβάνοντας υπόψη τις μηδενικές τιμές των μετρήσεων και τις συναρτήσεις μεταφοράς για την ώση και την ροπή, προκύπτουν οι Πίνακες 11.7, 11.8, 11.9 και 11.10. Στους πίνακες αυτούς παρουσιάζονται οι τιμές της δύναμης F , της ώσης T και της ροπής Q για έναν αριθμό στροφών γύρω από το σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου σε ταχύτητες 10, 12, 13 και 14kn αντίστοιχα.

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

ΣΤΡΟΦΕΣ [RPM]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	ΩΣΗ [kp]	ΡΟΠΗ [kp·cm]
300,6	0,961	0,272	0,547
400,2	0,735	0,623	1,242
499,2	0,428	1,084	2,153
600	-0,047	1,718	3,303
651	-0,398	2,060	3,930

Πίνακας 11.7 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης μοντέλου για $V_m=0,767m/s$

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

ΣΤΡΟΦΕΣ [RPM]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	ΩΣΗ [kp]	ΡΟΠΗ [kp·cm]
352,2	1,195	0,348	0,729
393	1,125	0,481	0,991
501	0,750	0,945	1,880
591	0,308	1,449	2,768
705	-0,327	2,269	4,363

Πίνακας 11.8 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης μοντέλου για $V_m=0,92m/s$

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

ΣΤΡΟΦΕΣ [RPM]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	ΩΣΗ [kp]	ΡΟΠΗ [kp·cm]
399	1,502	0,507	1,048
500,4	1,048	0,907	1,834
599,4	0,602	1,434	2,871
700,2	0,064	2,138	4,135
747	-0,281	2,498	4,818

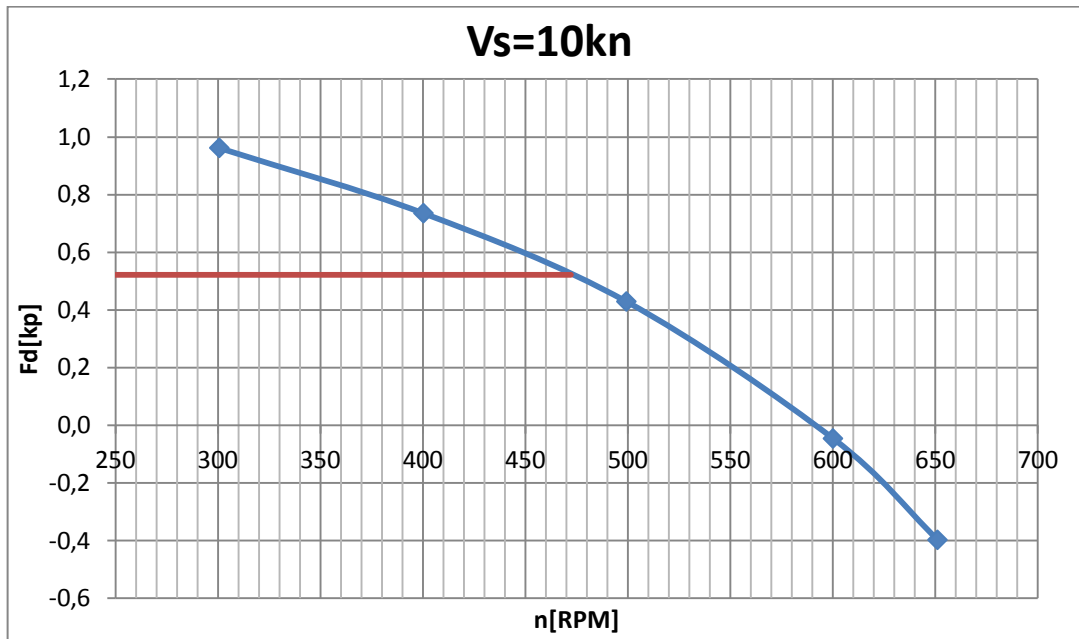
Πίνακας 11.9 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης μοντέλου για $V_m=0,997m/s$

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

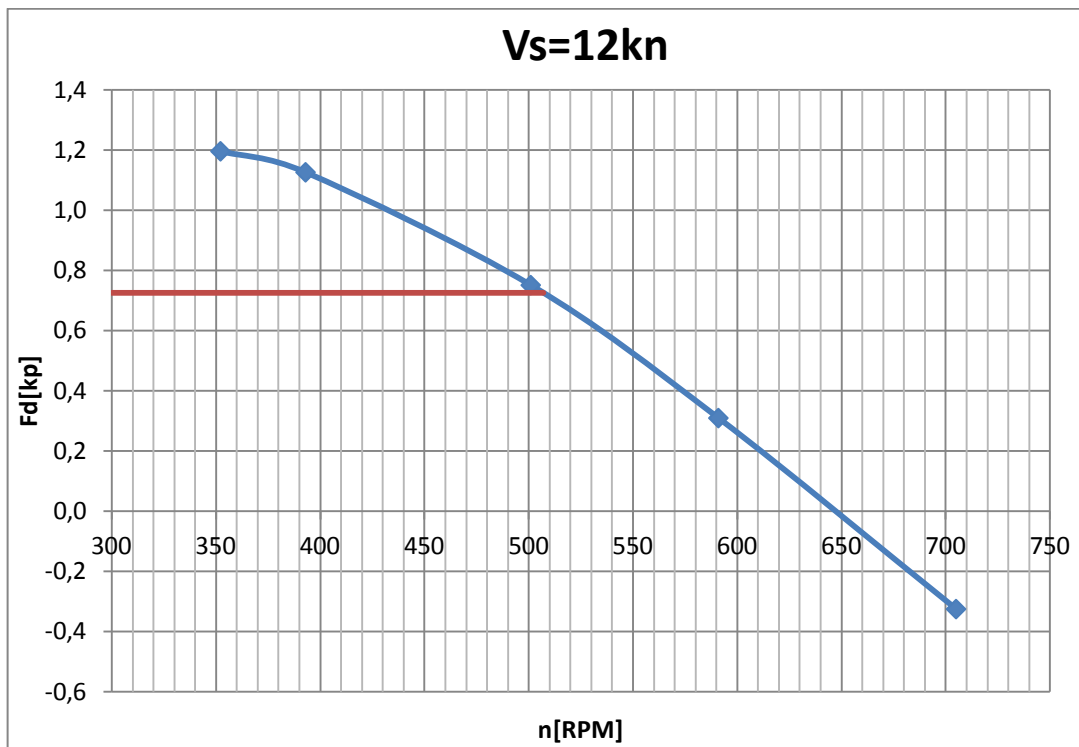
ΣΤΡΟΦΕΣ [RPM]	ΔΥΝΑΜΗ [kp]	ΩΣΗ [kp]	ΡΟΠΗ [kp·cm]
497,4	1,456	0,846	1,709
587,4	1,075	1,324	2,620
645,6	0,773	1,678	3,246
695,4	0,507	1,993	3,896
800,4	-0,313	2,877	5,502

Πίνακας 11.10 Μετρούμενες τιμές δύναμης, ροπής και ώσης μοντέλου για $V_m=1,074m/s$

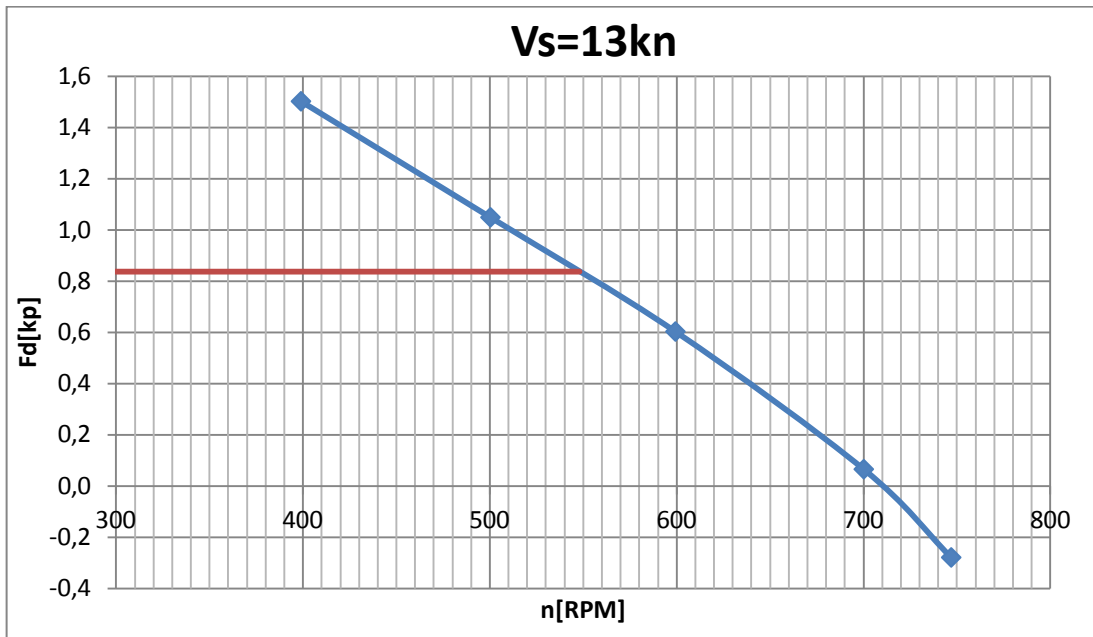
Προκειμένου να βρεθούν με ακρίβεια οι στροφές λειτουργίας της έλικας του μοντέλου που αντιστοιχούν στην τιμή της δύναμης που υπολογίστηκε παραπάνω αλλά και στο σημείο μηδενισμού της δύναμης, που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου, χαράσσεται η καμπύλη n-F και γραφικά μπορούμε να εξάγουμε συμπέρασμα για την τιμή των στροφών. Τα διαγράμματα είναι αυτά που ακολουθούν και η τελική τιμή των στροφών που αντιστοιχεί στην εκάστοτε δύναμη φαίνεται στον Πίνακα 11.11.



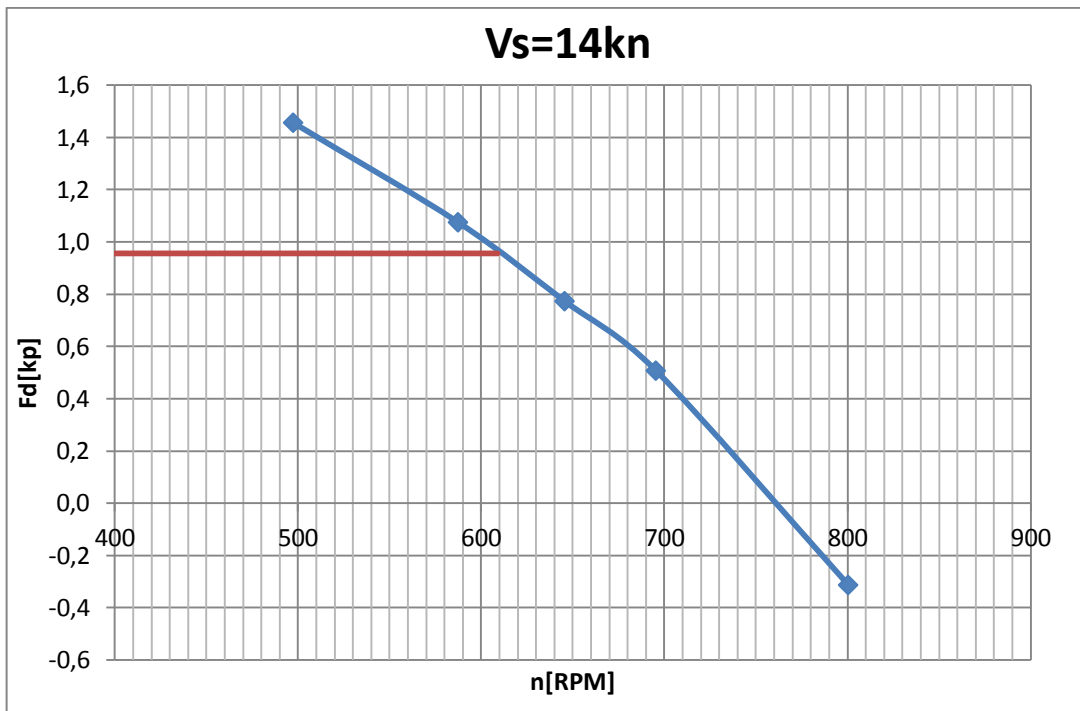
Διάγραμμα 11.1 Διάγραμμα n-Fd για $V_m=0,767\text{m/s}$



Διάγραμμα 11.2 Διάγραμμα n-Fd για $V_m=0,92\text{m/s}$



Διάγραμμα 11.3 Διάγραμμα n-Fd για $V_m=0,997\text{m/s}$

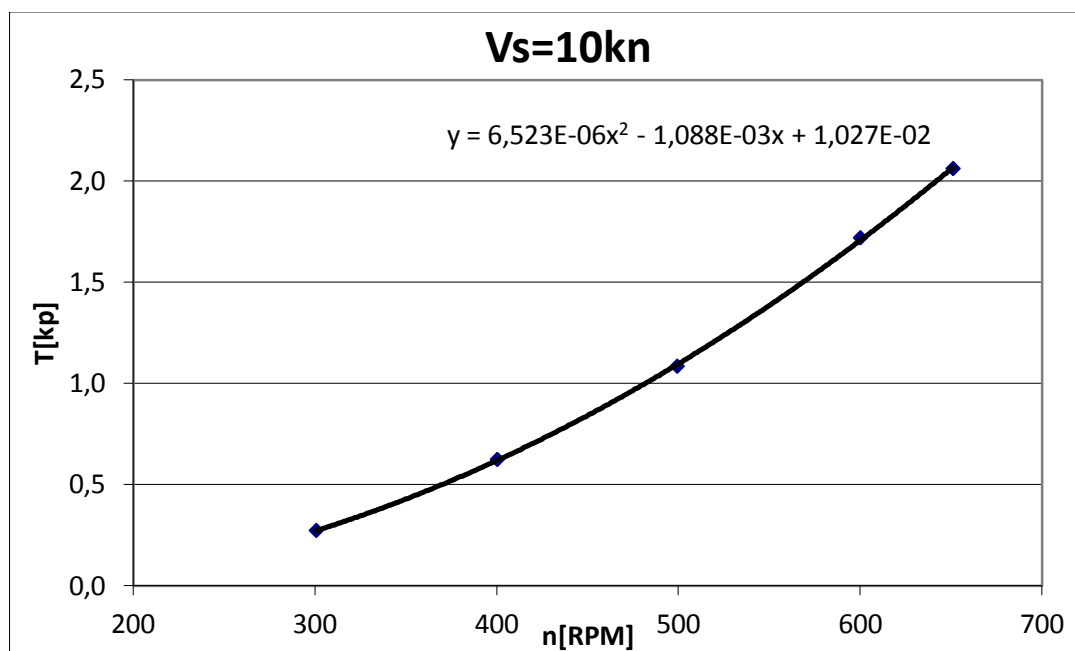


Διάγραμμα 11.4 Διάγραμμα n-Fd για $V_m=1,074\text{m/s}$

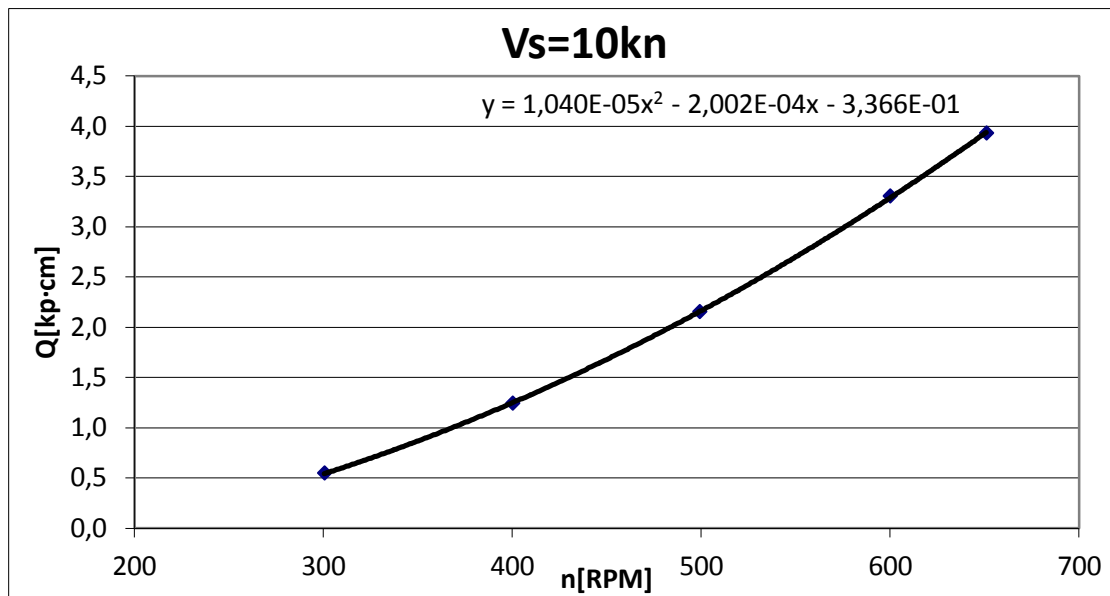
V_s [kn]	10	12	13	14
V_m [m/s]	0,767	0,92	0,997	1,074
F_d [kp]	0,523	0,724	0,836	0,955
n [RPM]	472	507	548	610
F=0				
n [RPM]	590	646	710	760

Πίνακας 11.11 Σημείο λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχεί στο σημείο αυτοπρόωσης του καθώς και στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου για $V_s=10, 12, 13$ και 14 kn

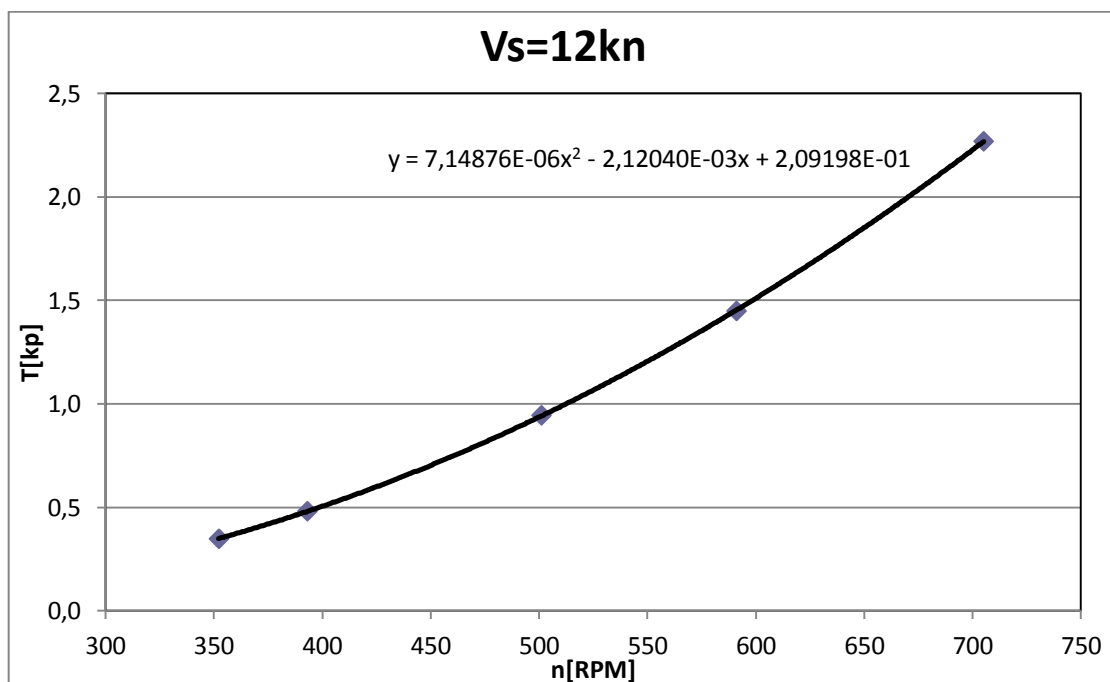
Στην συνέχεια κατασκευάζονται τα διαγράμματα $n-T$ και $n-Q$ για την ώση και την ροπή του μοντέλου αντίστοιχα. Παρεμβάλλοντας μεταξύ των σημείων του κάθε διαγράμματος καμπύλη δευτέρου βαθμού και μέσω της συνάρτησης που προκύπτει για την καμπύλη αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε την ακριβή τιμή της ώσης και της ροπής για τις στροφές υπολογίστηκαν παραπάνω. Τα διαγράμματα είναι αυτά που ακολουθούν.



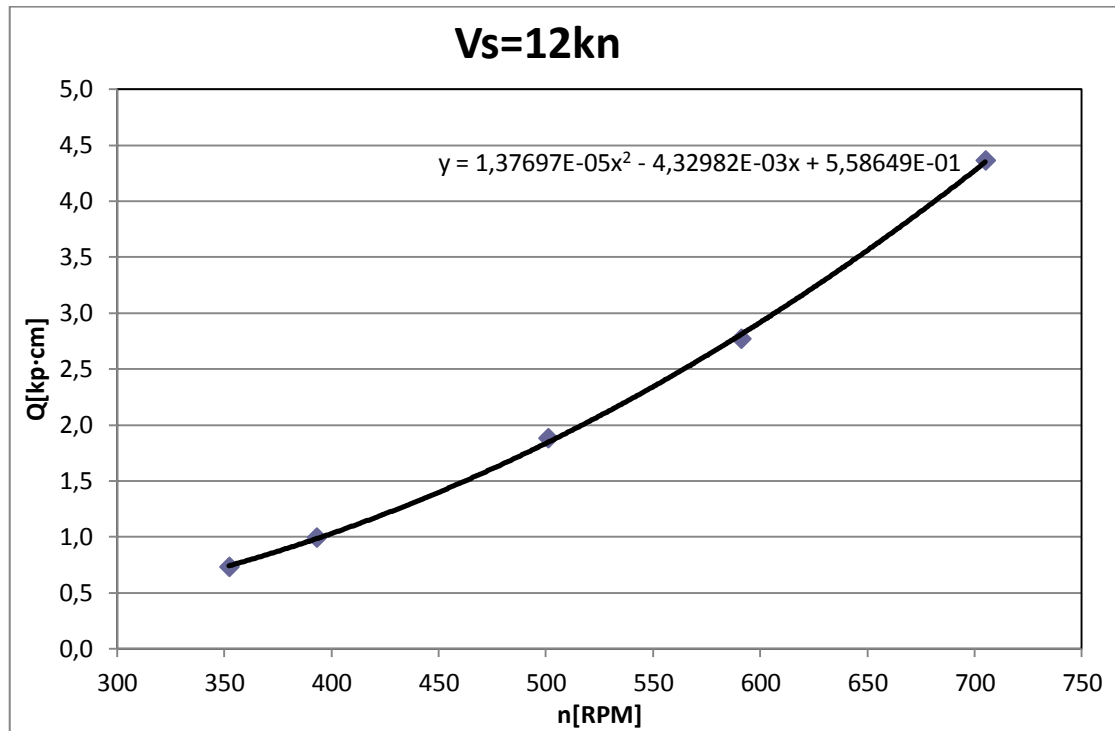
Διάγραμμα 11.5 Συνάρτηση ώσης μοντέλου για $V_m=0,767$ m/s



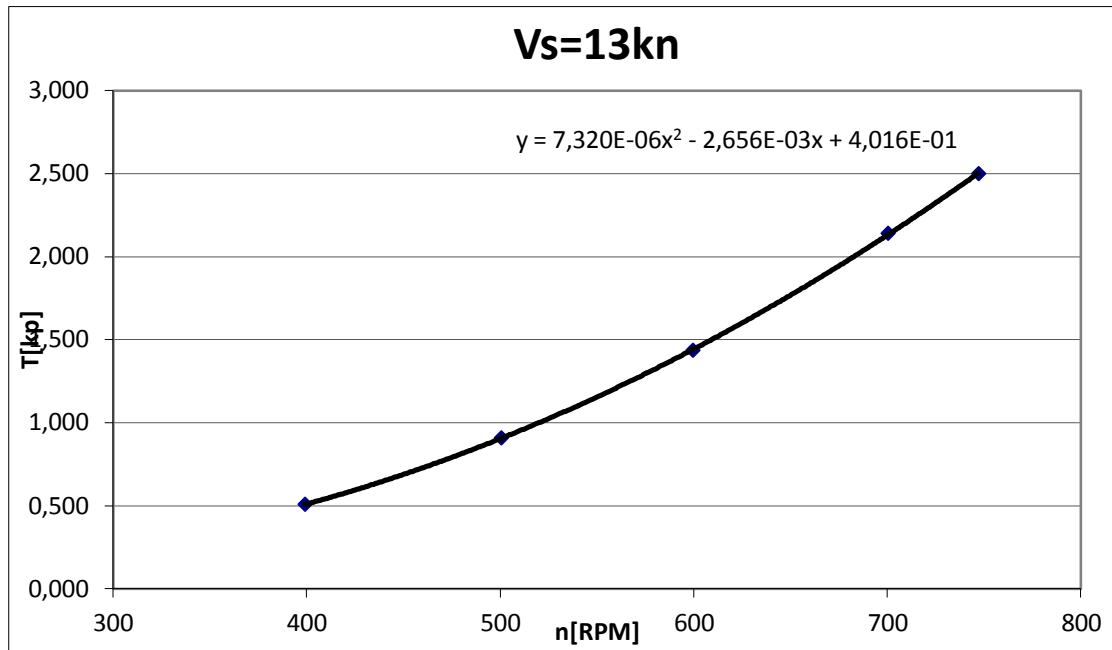
Διάγραμμα 11.6 Συνάρτηση ροπής μοντέλου για $V_m=0,767\text{m/s}$



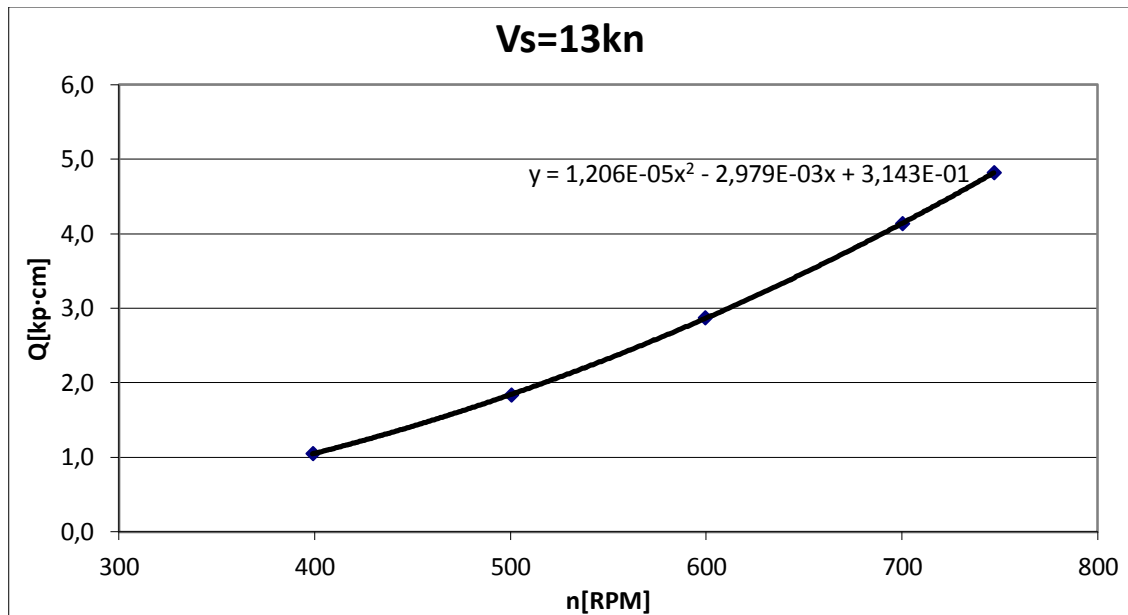
Διάγραμμα 11.7 Συνάρτηση ώσης μοντέλου για $V_m=0,92\text{m/s}$



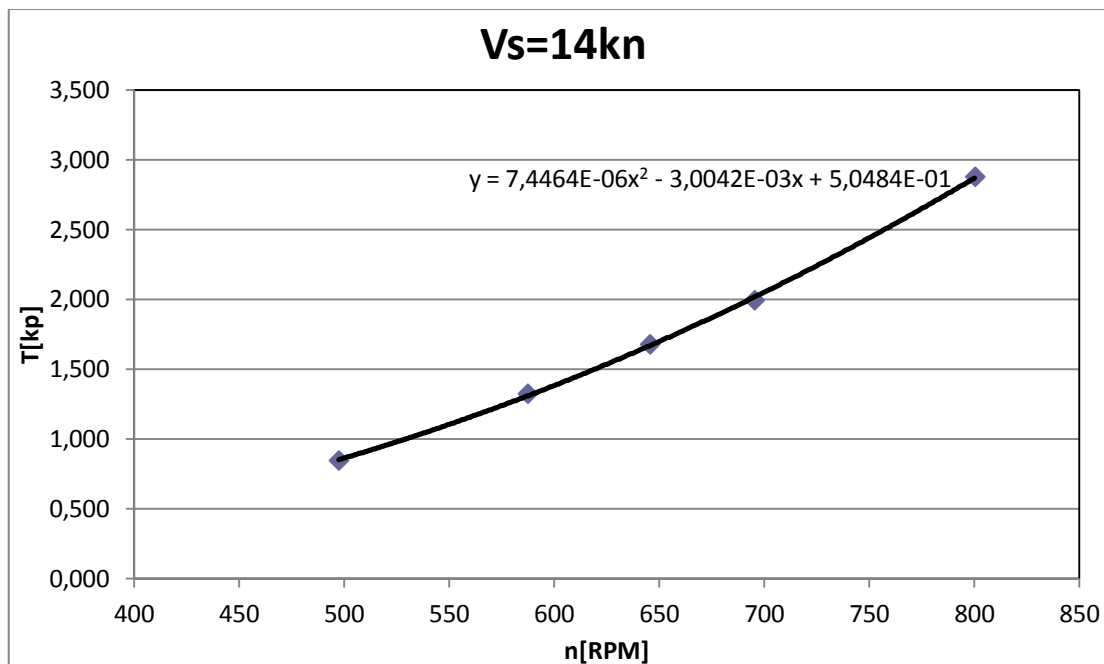
Διάγραμμα 11.8 Συνάρτηση ροπής μοντέλου για $V_m=0,92m/s$



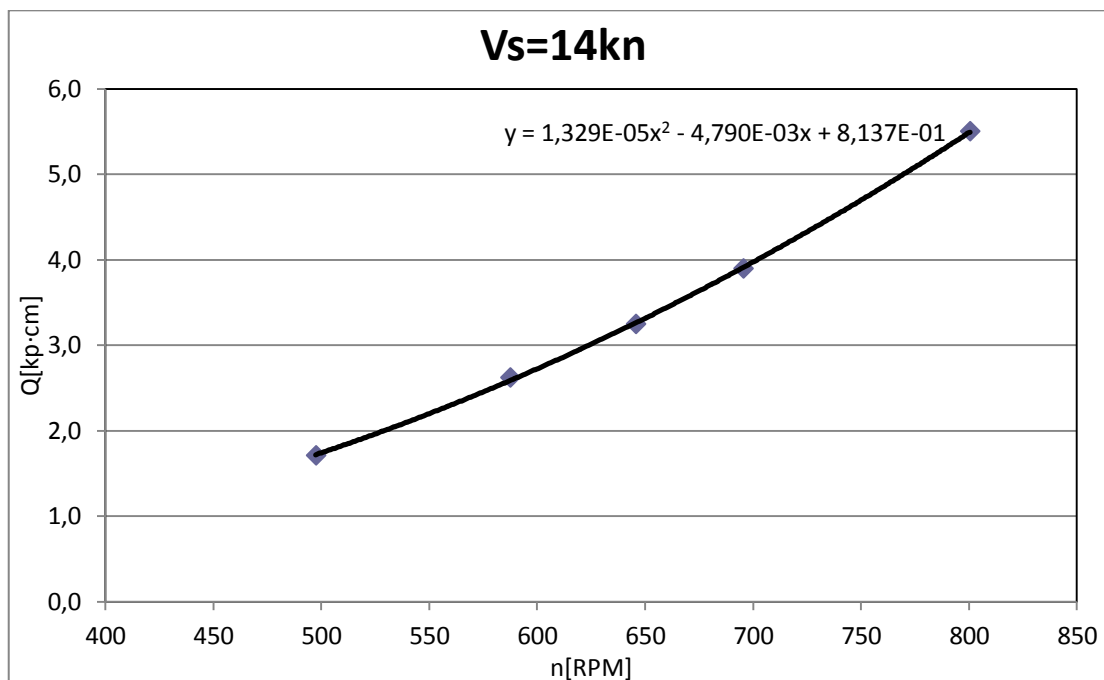
Διάγραμμα 11.9 Συνάρτηση ώσης μοντέλου για $V_m=0,997m/s$



Διάγραμμα 11.10 Συνάρτηση ροπής μοντέλου για $V_m=0,997m/s$



Διάγραμμα 11.11 Συνάρτηση ώσης μοντέλου για Vm=1,074m/s



Διάγραμμα 11.12 Συνάρτηση ροπής μοντέλου για Vm=1,074m/s

Από τις τιμές για την ώση και την ροπή, που προέκυψαν μέσω των διαγραμμάτων, μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές ώσης και ροπής του μοντέλου, kT_m και kQ_m αντίστοιχα. Υπολογίζεται ακόμα η τιμή της ώσης και της ροπής στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου. Οι τιμές των μεγεθών αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 11.12 που ακολουθεί.

V_s [kn]	10	12	13	14
V_m [m/s]	0,767	0,92	0,997	1,074
F_d [kp]	0,523	0,724	0,836	0,955
n [RPM]	472	507	548	610
T_m [kp]	0,950	0,972	1,144	1,443
Q_m [kp·cm]	1,886	1,903	2,303	2,837
J_m	0,609	0,680	0,682	0,660
kT_m	0,230	0,204	0,206	0,209
kQ_m	0,028	0,025	0,0259	0,026
Σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου(F=0)				
T_m [kp]	1,639	1,823	2,206	2,523
Q_m [kp·cm]	3,166	3,504	4,279	4,850

Πίνακας 11.12 Τιμές συντελεστών ώσης και ροπής του μοντέλου

Διατηρώντας σταθερό τον συντελεστή ώσης kT_m , εισερχόμαστε στο διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του μοντέλου και να υπολογίσουμε τον συντελεστή προχώρησης J_0 , τον συντελεστή ροπής kQ_0 και τον βαθμό απόδοσης η_0 . Τα αποτελέσματα για τις τιμές αυτές φαίνονται στον Πίνακα 11.13.

V_s [kn]	10	12	13	14
kT_m	0,230	0,204	0,206	0,209
ΑΠΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ				
J_0	0,331	0,390	0,385	0,378
$10kQ_0$	0,294	0,270	0,271	0,275
η_0	0,411	0,470	0,465	0,459

Πίνακας 11.13 Αποτελέσματα συντελεστών απο το διάγραμμα της έλικας σε ελεύθερη ροη του μοντέλου

Μετά τους υπολογισμούς αυτούς διαθέτουμε πλέον όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό όλων των επιθυμητών μεγεθών που αφορούν την κλίμακα του μοντέλου. Τα μεγέθη αυτά φαίνονται στον Πίνακα 11.14.

Ταχύτητα πλοίου	V_s[kn]	10	12	13	14
Ταχύτητα μοντέλου	V_m[m/s]	0,767	0,920	0,997	1,074
Ταχύτητα προχώρησης	V_A[m/s]	0,417	0,527	0,563	0,615
Συντελεστής ποσοστού ομόρρου μοντέλου	w_m	0,457	0,427	0,436	0,427
Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής	η_r	1,029	1,080	1,046	1,068
	(1+k)	1,408	1,408	1,408	1,408
Συντελεστής αντίστασης τριβής μοντέλου σε συνθήκες πειράματος αυτοπρόωσης	C_{f,m,αυτοπρόωσης}	3,462E-03	3,354E-03	3,298E-03	3,261E-03
Συντελεστής αντίστασης τριβής μοντέλου σε συνθήκες πειράματος αντίστασης	C_{f,m,αντίστασης}	3,468E-03	3,355E-03	3,306E-03	3,261E-03
Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης	C_R	3,652E-04	9,237E-05	1,274E-05	5,582E-06
Ολική αντίσταση μοντέλου	R_{t,m}[kp]	1,144	1,503	1,710	1,959
Διορθωμένη τιμή αντίστασης	R_c[kp]	1,142	1,503	1,707	1,959
Συντελεστής μείωσης ώσης	t	0,349	0,199	0,239	0,305
Βαθμός	η_{H,m}	1,199	1,398	1,348	1,215

απόδοσης γάστρας μοντέλου					
Ισχύς ρυμούλκησης του μοντέλου	$P_{E,m}[W]$	8,60	13,56	16,73	20,64
Ισχύς που απορροφά η έλικα στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου	$P_{D,m}[W]$	19,18	23,24	31,19	37,85
Βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης του μοντέλου	$\eta_{D,m}$	0,449	0,584	0,536	0,545

Πίνακας 11.14 Υπολογιζόμενα μεγέθη που αφορούν την κλίμακα του εξοπλισμένου με ημιδακτυλίου μοντέλου

Σειρά έχουν οι υπολογισμοί που αφορούν την κλίμακα του πλοίου. Έχοντας το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του πλοίου και αφού υπολογιστεί ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου w_{TS} , μπορεί να υπολογιστεί η φόρτιση της έλικας του πλοίου $\frac{kT}{J^2}$. Έχοντας την τιμή του $\frac{kT}{J^2}$ εισερχόμαστε στο διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας του πλοίου και προσδιορίζουμε το σημείο τομής της καμπύλης αυτής με την καμπύλη $J-kT_{TS}$ του διαγράμματος. Για τον νέο συντελεστή προώρησης J_{TS} , που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό, προσδιορίζονται επίσης ο συντελεστής kQ_{TS} και ο βαθμός απόδοσης η_{TS} . Οι υπολογισμοί αυτοί παρατίθενται στον Πίνακα 11.15 που ακολουθεί.

V_s [kn]	10	12	13	14
wts	0,420	0,326	0,353	0,384
kT/J^2	1,838	0,975	1,064	1,265
ΑΠΌ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΡΟΗΣ ΤΗΣ ΕΛΙΚΑΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ				
J_{ts}	0,349	0,435	0,423	0,400
$10kQ_s$	0,287	0,249	0,254	0,265
η_s	0,432	0,511	0,500	0,480

Πίνακας 11.15 Συντελεστής προχώρησης, συντελεστής ροπής και βαθμός απόδοσης της έλικας του πλοίου

Με βάση τα παραπάνω μπορούν να υπολογιστούν όλα τα μεγέθη που αφορούν στην φυσική κλίμακα του πλοίου και χαρακτηρίζουν την αποδοτικότητα της προωστήριας εγκατάστασης μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων, όπως φαίνεται στον τελικό Πίνακα 7.20.

Ταχύτητα πλοίου	$V_s[\text{kn}]$	10	12	13	14
Ταχύτητα πλοίου υπολογισμών	$V_s[\text{m/s}]$	5,145	6,172	6,688	7,205
Στροφές άξονα το δευτερόλεπτο	$n_s[\text{RPS}]$	1,188	1,328	1,421	1,541
Στροφές άξονα το λεπτό	$n_s[\text{RPM}]$	71,306	79,69	85,28	92,488
Αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα	$P_{Ds}[\text{kW}]$	5837,9	6731,1	8688,2	11325,9
Ώση	$T_s[\text{kp}]$	88897,5	91456,7	108154	135240,7
Ροπή	$Q_s[\text{kp}\cdot\text{m}]$	79762,1	82289,9	99252,9	119302,7
Ισχύς ρυμούλκησης	$P_E[\text{kW}]$	2921,5	4435	5395,4	6644,4
Συνολικός βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης	η_D	0,500	0,659	0,621	0,587

Πίνακας 11.16 Μεγέθη που αφορούν την απόδοση της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου

12. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική σύγκριση των αποτελεσμάτων πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων για την κάθε ταχύτητα ξεχωριστά. Στους πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν την αποδοτικότητα του πλοίου, όπως η ισχύς που αποδίδεται στην έλικα, οι στροφές λειτουργίας και ο βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης. Επίσης στο κεφάλαιο αυτό παράγονται διαγράμματα τα οποία μας διευκολύνουν στην σύγκριση των αποτελεσμάτων και στην διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα ή μη των ημιδακτυλίων.

1η ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ $V_s=10\text{kn}$

ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

		ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ WED	ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ WED
Αντίσταση γάστρας του μοντέλου	$R_t[\text{kp}]$	1,089	1,144
Στροφές λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$n[\text{RPM}]$	448	472
Ώση που αναπτύσσει το μοντέλο σε στροφές λειτουργίας που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$T_m[\text{kp}]$	0,774	0,950
Ροπή που αναπτύσσεται από τον άξονα του μοντέλου σε στροφές λειτουργίας που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$Q_m[\text{kp}\cdot\text{cm}]$	1,671	1,886

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΣΧΗΝΕΕΚΛΥΤΗ
ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ**

2013

Βαθμός απόδοσης της έλικας του μοντέλου σε ελεύθερη ροή	η_0	0,460	0,411
Συντελεστής ποσοστού ομόρρου του μοντέλου	w_m	0,408	0,457
Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής της έλικας	η_r	0,975	1,029
Συντελεστής μείωσης ώσης	t	0,276	0,349
Βαθμός απόδοσης γάστρας του μοντέλου	$\eta_{H,m}$	1,223	1,199
Ισχύς ρυμούλκησης του μοντέλου	$P_{E,m}[W]$	8,19	8,60
Ισχύς που απορροφά η έλικα στο σημείο αυτοπρώωσης του μοντέλου	$P_{D,m}[W]$	18,15	19,18
Βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης του μοντέλου	$\eta_{D,m}$	0,451	0,449

ΚΛΙΜΑΚΑ ΠΛΟΙΟΥ

Αντίσταση γάστρας του πλοίου	$Rt_s[kp]$	45953,7	51175,6
Συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου	w_{Ts}	0,357	0,420
Συντελεστής μείωσης ώσης	t	0,276	0,349
Βαθμός απόδοσης γάστρας του πλοίου	$\eta_{H,s}$	1,127	1,122
Βαθμός απόδοσης της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή	η_s	0,484	0,432
Στροφές λειτουργίας της έλικας του πλοίου για την επίτευξη ταχύτητας 10kn	$n_s[RPM]$	68,4	71,3
Ισχύς ρυμούλκησης για ταχύτητα 10kn(Effective Horse Power, EHP)	$P_E[kW]$	2675,4	2921,6
Αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα για την	$P_D[kW]$	4972,5	5837,9

επίτευξη ταχύτητας 10kn(Delivered Horse Power, DHP]			
Βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου	η_D	0,538	0,500

Η σειρά αυτή των πειραμάτων αφορά ταχύτητα μοντέλου $V_m=0,767\text{m/s}$ η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα πλοίου $V_s=10\text{kn}$. Αρχικά από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό πως μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων αυξήθηκαν οι στροφές λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου. Επίσης έχουμε και αύξηση της ώσης και της ροπής που αναπτύσσει το μοντέλο στο σημείο αυτό. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται και μικρή 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. Η μείωση της ταχύτητας προχώρησης οδηγεί επίσης στην αύξηση του συντελεστή ποσοστού ομόρρου. Για να επιτευχθεί αύξηση του βαθμού απόδοσης της γάστρας του μοντέλου θα έπρεπε να είχαμε και ταυτόχρονη μείωση του συντελεστή μείωσης ώσης κάτι το οποίο δεν συμβαίνει με αποτέλεσμα τελικά να έχουμε μείωση στον βαθμό απόδοσης γάστρας. Προυσιάζεται βέβαια μια μικρή αύξηση στο βαθμό απόδοσης σχετικής περιστροφής της έλικας. Τέλος, η ισχύς που απορροφά η έλικα του μοντέλου στο σημείο της αυτοπρόωσης του, δηλαδή στο σημείο όπου ισχύει $F=0$, έχει αυξηθεί περίπου $1W$ μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων με αποτέλεσμα την μείωση του βαθμού απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του μοντέλου.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα που αφορούν στην κλίμακα του πλοίου βλέπουμε πως και πάλι έχουμε αύξηση του συντελεστή ποσοστού ομόρρου του πλοίου και μείωση του βαθμού απόδοσης της γάστρας του πλοίου. Ο βαθμός απόδοσης της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή επίσης παρουσιάζει μια μείωση. Οι στροφές λειτουργίας της έλικας του πλοίου για την επίτευξη ταχύτητας 10kn αυξάνονται μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων. Επίσης η ισχύς ρυμούλκησης είναι αυξημένη καθώς η παρουσία των ημιδακτυλίων σε αυτή την ταχύτητα

επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση γυμνής γάστρας, όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος, η ισχύς που αποδίδεται στην έλικα του πλοίου έχει αυξηθεί με τελικό αποτέλεσμα την μείωση του συνολικού βαθμού απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως στην περίπτωση αυτή η τοποθέτηση των ημιδακτυλίων αυξάνει την αντίσταση γυμνής γάστρας, τόσο στην κλίμακα του μοντέλου όσο και του πλοίου, και οδηγεί σε αύξηση της ισχύος που απορροφά η έλικα του πλοίου. Το γεγονός αυτό θα έχει άμεσο αντίκτυπο στην απαίτηση ισχύος από την προωστήρια εγκατάσταση για την πλεύση σε ταχύτητα 10.

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

ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

		ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ WED	ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ WED
Αντίσταση γάστρας του μοντέλου	$R_{t_m}[kp]$	1,501	1,503
Στροφές λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$n[RPM]$	519	507
Ώση που αναπτύσσει το μοντέλο σε στροφές λειτουργίας που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$T_m[kp]$	0,992	0,972
Ροπή που αναπτύσσεται από τον άξονα του μοντέλου σε στροφές λειτουργίας που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$Q_m[kp \cdot cm]$	2,157	1,903
Βαθμός απόδοσης της έλικας του μοντέλου	η_0	0,479	0,470

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ SCHNEEKLUH
ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ**

2013

σε ελεύθερη ροή			
Συντελεστής ποσοστού ομόρρου του μοντέλου	w_m	0,398	0,427
Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής της έλικας του μοντέλου	η_r	0,98	1,080
Συντελεστής μείωσης ώσης	t	0,221	0,199
Βαθμός απόδοσης γάστρας του μοντέλου	$\eta_{H,m}$	1,294	1,398
Ισχύς ρυμούλκησης του μοντέλου	$P_{E,m}[W]$	13,55	13,56
Ισχύς που απορροφά η έλικα στο σημείο αυτοπρώωσης του μοντέλου	$P_{D,m}[W]$	25,58	23,24
Βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης του μοντέλου	$\eta_{D,m}$	0,530	0,584

ΚΛΙΜΑΚΑ ΠΛΟΙΟΥ

Αντίσταση γάστρας του πλοίου	$R_{ts}[kp]$	62587,7	63932,6
Συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου	w_{TS}	0,324	0,326
Συντελεστής μείωσης ώσης	t	0,221	0,199
Βαθμός απόδοσης γάστρας του πλοίου	$\eta_{H,s}$	1,152	1,189
Βαθμός απόδοσης της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή	η_s	0,511	0,511
Στροφές λειτουργίας της έλικας του πλοίου για την επίτευξη ταχύτητας 12kn	$n_s[RPM]$	79,88	79,69
Ισχύς ρυμούλκησης για την ταχύτητα των 12kn(Effective Horse Power, EHP)	$P_E[kW]$	4329,5	4435
Αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα για την επίτευξη ταχύτητας	$P_D[kW]$	7469,6	6731,1

12kn(Delivered Horse Power, DHP)			
Βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου	η_D	0,580	0,659

Τα πειράματα αυτά αφορούν ταχύτητα μοντέλου $V_m=0,92\text{m/s}$ η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα πλοίου $V_s=12\text{kn}$. Αρχικά από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η αντίσταση γάστρας του μοντέλου δεν έχει επηρεαστεί σχεδόν καθόλου από την παρουσία των ημιδακτυλίων. Υπάρχει μια μείωση των στροφών λειτουργίας του μοντέλου στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου και μια μείωση στην ώση και την ροπή που αναπτύσσει το μοντέλο στο σημείο αυτό. Ο συντελεστής ώσης του μοντέλου αυξάνεται ελαφρώς καθώς, παρά την μείωση της ώσης από την μια κατάσταση στην άλλη, υπάρχει και μείωση των στροφών, γεγονός που υπεισέρχεται στην σχέση υπολογισμού του συντελεστή αυτού. Για τον λόγο αυτό υπάρχει μια μικρή μείωση του συντελεστή προχώρησης και του βαθμού απόδοσης της έλικας του μοντέλου σε ελεύθερη ροή. Η μειωμένη ταχύτητα προχώρησης αυξάνει τον συντελεστή ποσοστού ομόρρου ενώ παρατηρούμε ότι παρουσιάζεται και μείωση στον συντελεστή μείωσης ώσης. Τα δύο παραπάνω φαινόμενα έχουν σαν συνέπεια την αύξηση του βαθμού απόδοσης της γάστρας του μοντέλου. Επίσης λόγω των ημιδακτυλίων έχουμε και αύξηση στο βαθμό απόδοσης σχετικής περιστροφής της έλικας. Τέλος η ισχύς που απορροφά η έλικα στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου έχει μειωθεί κατά περίπου 2,3W αυξάνοντας έτσι το βαθμό απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του μοντέλου. Το γεγονός αυτό είναι καθοριστικής σημασίας καθώς δεν μεταφέρει επιδράσεις κλίμακας αφού αφορά μόνο την απόδοση του μοντέλου.

Σε ότι αφορά την κλίμακα του πλοίου, ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου είναι σχεδόν αμετάβλητος και λόγω του συντελεστή μείωσης ώσης παρουσιάζεται μια αύξηση στο βαθμό απόδοσης της γάστρας του πλοίου. Ο βαθμός απόδοσης της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή δεν μεταβάλλεται. Οι στροφές λειτουργίας του

πλοίου για την επίτευξη ταχύτητας 12kn έχουν ελατωθεί όπως και η ισχύς που απορροφά η έλικα του πλοίου.

Τελικά είναι φανερό πως με την παρουσία των ημιδακτυλίων προκύπτει αύξηση της απόδοσης του μοντέλου κατά την αυτοπρόωση του καθώς επίσης και αύξηση του βαθμού απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου για την ταχύτητα των 12kn, με αποτέλεσμα η τοποθέτηση τους να οδηγεί σε εξοικονόμηση ισχύος.

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

ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

		ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ WED	ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ WED
Αντίσταση γάστρας του μοντέλου	$R_{t,m}[kp]$	1,722	1,710
Στροφές λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$n[RPM]$	576	548
Ώση που αναπτύσσει το μοντέλο σε στροφές λειτουργίας που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$T_m[kp]$	1,237	1,144
Ροπή που αναπτύσσεται από τον άξονα του μοντέλου σε στροφές λειτουργίας που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$Q_m[kp \cdot cm]$	2,668	2,303
Βαθμός απόδοσης της έλικας του μοντέλου σε ελεύθερη ροή	η_0	0,475	0,465
Συντελεστής ποσοστού ομόρρου του μοντέλου	w_m	0,388	0,436
Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής της έλικας του μοντέλου	η_r	0,984	1,046
Συντελεστής μείωσης ώσης	t	0,289	0,239
Βαθμός απόδοσης γάστρας του μοντέλου	$\eta_{H,m}$	1,162	1,348
Ισχύς ρυμούλκησης του μοντέλου	$P_{E,m}[W]$	16,84	16,73
Ισχύς που απορροφά η έλικα στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου	$P_{D,m}[W]$	33,01	31,19

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ SCHNEEKLUHTH
ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ**

2013

Βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης του μοντέλου	$\eta_{D,m}$	0,510	0,536
--	--------------	--------------	--------------

ΚΛΙΜΑΚΑ ΠΛΟΙΟΥ

Αντίσταση γάστρας του πλοίου	$Rt_s[kp]$	71893,7	71657,1
Συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου	w_{Ts}	0,357	0,353
Συντελεστής μείωσης ώσης	t	0,289	0,239
Βαθμός απόδοσης γάστρας του πλοίου	$\eta_{H,s}$	1,105	1,175
Βαθμός απόδοσης της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή	η_s	0,493	0,500
Στροφές λειτουργίας της έλικας του πλοίου για την επίτευξη ταχύτητας 13kn	$n_s[RPM]$	87	85,3
Ισχύς ρυμούλκησης για την ταχύτητα των 13kn(Effective Horse Power, EHP)	$P_E[kW]$	5410,1	5395,4
Αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα για την επίτευξη ταχύτητας 13kn(Delivered Horse Power, DHP)	$P_D[kW]$	10009,1	8688,2
Βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου	η_D	0,541	0,621

Η σειρά αυτή των πειραμάτων αφορά ταχύτητα μοντέλου $V_m=0,997m/s$ η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα πλοίου $V_s=13kn$. Αρχικά από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό πως η αντίσταση του μοντέλου πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων φαίνεται να είναι ελαφρώς βελτιωμένη στην δεύτερη περίπτωση. Οι στροφές λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου έχουν ελαττωθεί και υπάρχει μείωση στην ώση και την ροπή του μοντέλου στο σημείο αυτό. Όπως και στην περίπτωση των 12kn, ο συντελεστής ώσης στο

σημείο αυτό έχει αυξηθεί ελαφρώς με αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή προχώρησης και του βαθμού απόδοσης της έλικας του μοντέλου σε ελεύθερη ροή. Λόγω της μείωσης της ταχύτητας προχώρησης έχει αυξηθεί ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου ενώ είναι φανερό πως έχει μειωθεί ο συντελεστής μείωσης ώσης. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του βαθμού απόδοσης της γάστρας του μοντέλου ενώ επίσης παρατηρείται και αύξηση του βαθμού απόδοσης σχετικής περιστροφής της έλικας. Στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου η ισχύς που απορροφά η έλικα έχει μειωθεί κατά περίπου 2W μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων αυξάνοντας και πάλι τον βαθμό απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του μοντέλου.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα που αφορούν στην κλίμακα του πλοίου βλέπουμε πως η αντίσταση γυμνής γάστρας του πλοίου με τους δακτυλίους είναι ελαφρώς μικρότερη. Ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου σχεδόν δεν μεταβάλλεται και υπάρχει βελτίωση του βαθμού απόδοσης της γάστρας του πλοίου. Ο βαθμός απόδοσης της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή παρουσιάζει μια μικρή αύξηση ενώ οι στρόφες λειτουργίας του πλοίου στην ταχύτητα των 13kn είναι μειωμένες. Αυτό συνεπάγεται και μείωση της ισχύος που απορροφά η έλικα και τελικά βελτίωση στον βαθμό απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου για πλεύση στους 13kn.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως η τοποθέτηση των ημιδακτυλίων θα έχει ευεργετικό αποτέλεσμα τόσο στην απόδοση του αυτοπροωθούμενου μοντέλου όσο και του πλοίου στην ταχύτητα των 13kn.

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

ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

		ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ WED	ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ WED
Αντίσταση γάστρας του μοντέλου	$R_{t,m}[kp]$	1,987	1,959
Στροφές λειτουργίας του μοντέλου που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$n[RPM]$	599	610
Ώση που αναπτύσσει το μοντέλο σε στροφές λειτουργίας που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$T_m[kp]$	1,300	1,443
Ροπή που αναπτύσσεται από τον άξονα του μοντέλου σε στροφές λειτουργίας που αντιστοιχούν στο σημείο αυτοπρόωσης του πλοίου	$Q_m[kp \cdot cm]$	2,718	2,837
Βαθμός απόδοσης της έλικας του μοντέλου σε ελεύθερη ροή	η_0	0,485	0,459
Συντελεστής ποσοστού ομόρρου του μοντέλου	w_m	0,393	0,427
Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής της έλικας του μοντέλου	η_r	1,021	1,068
Συντελεστής μείωσης ώσης	t	0,211	0,305
Βαθμός απόδοσης γάστρας του μοντέλου	$\eta_{H,m}$	1,300	1,215
Ισχύς ρυμούλκησης του μοντέλου	$P_{E,m}[W]$	20,93	20,64
Ισχύς που απορροφά η έλικα στο σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου	$P_{D,m}[W]$	38,03	37,85

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ SCHNEEKLUH
ΣΕ ΠΡΟΤΥΠΟ ΠΛΟΙΟΥ**

2013

Βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του μοντέλου	$\eta_{D,m}$	0,550	0,545
--	--------------------------------	--------------	--------------

ΚΛΙΜΑΚΑ ΠΛΟΙΟΥ

Αντίσταση γάστρας του πλοίου	$Rt_s[kp]$	83598,1	82279,4
Συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου	w_{Ts}	0,318	0,384
Συντελεστής μείωσης ώσης	t	0,211	0,305
Βαθμός απόδοσης γάστρας του πλοίου	$\eta_{H,s}$	1,156	1,128
Βαθμός απόδοσης της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή	η_s	0,518	0,480
Στροφές λειτουργίας της έλικας του πλοίου για την επίτευξη ταχύτητας 14kn	$n_s[RPM]$	92,4	92,5
Ισχύς ρυμούλκησης για την ταχύτητα των 14kn(Effective Horse Power, EHP)	$P_E[kW]$	6715,9	6644,4
Αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα για την επίτευξη ταχύτητας 14kn(Delivered Horse Power, DHP)	$P_D[kW]$	10940	11325,9
Βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου	η_D	0,614	0,587

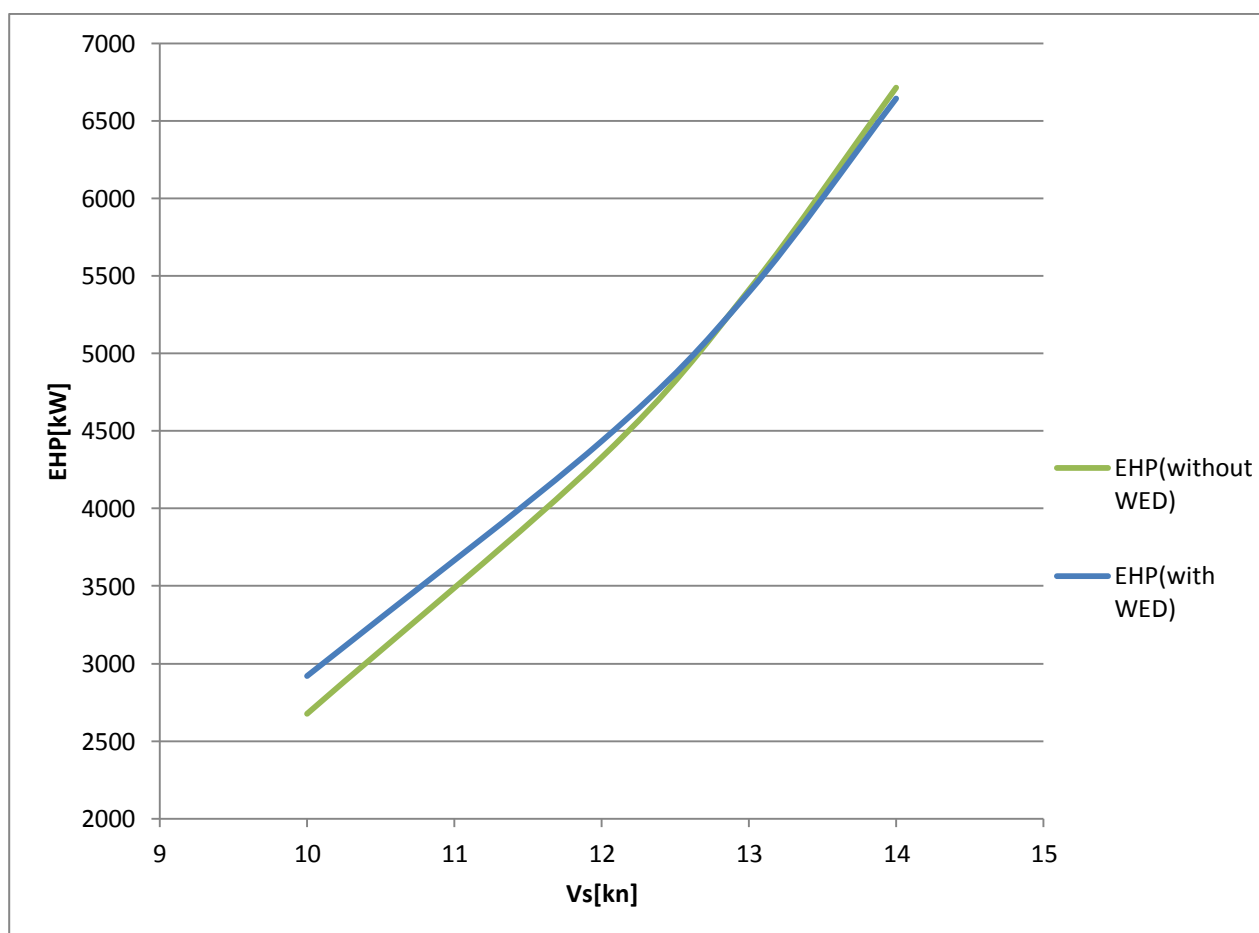
Η ταχύτητα του μοντέλου σε αυτή την σειρά πειραμάτων είναι $V_m=1,074m/s$ και αντιστοιχεί σε ταχύτητα πλοίου $V_s=14kn$. Αρχικά, από τον πίνακα που αναγράφει τα μεγέθη που αφορούν στην κλίμακα του μοντέλου, παρατηρούμε ότι η τοποθέτηση των ημιδακτυλίων έχει ευεργετική επίδραση στην αντίσταση της γάστρας του μοντέλου. Οι στροφές λειτουργίας της έλικας του μοντέλου στο σημείο αυτοπρώωσης του πλοίου έχουν αυξηθεί, όπως και η παραγόμενη ώση και ροπή στο σημείο αυτό. Η αύξηση και του συντελεστή ώσης του μοντέλου έχει οδηγήσει

στην μείωση του συντελεστή προχώρησης και του βαθμού απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή του μοντέλου. Ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου του μοντέλου έχει αυξηθεί αλλά ταυτόχρονα έχει αυξηθεί και ο συντελεστής μείωσης ώσης με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση του βαθμού απόδοσης της γάστρας του μοντέλου. Παρολαυτά ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής της έλικας του μοντέλου έχει αυξηθεί. Τέλος φαίνεται πως στο σημείο αυτοπρώωσης του μοντέλου η ισχύς που αποδίδεται στην έλικα έχει ελλατωθεί κατά 0,2W. Το μέγεθος αυτό είναι πολύ μικρό και λόγω της μείωσης της ισχύος ρυμούλκησης το τελικό αποτέλεσμα είναι μείωση στο βαθμό απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του μοντέλου.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα που αφορούν στην κλίμακα του πλοίου βλέπουμε ότι ο συντελεστής ποσοστού ομόρρου του πλοίου αυξάνεται καθώς και ο συντελεστής μείωσης ώσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του βαθμού απόδοσης της γάστρας του πλοίου. Επίσης έχουμε μείωση του βαθμού απόδοσης της έλικας του πλοίου σε ελεύθερη ροή και πολύ μικρή αύξηση των στροφών λειτουργίας του πλοίου για πλεύση σε ταχύτητα 14kn. Τελικά αυξάνεται η ισχύς που απορροφά η έλικα και έτσι μειώνεται ο συνολικός βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου.

Συμπερασματικά, στην ταχύτητα αυτή η τοποθέτηση των ημιδακτυλίων επιφέρει τελικά μια μικρή μείωση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης τόσο για την κλίμακα του μοντέλου όσο και του πλοίου.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί(Διάγραμμα 12.1) παρουσιάζεται η ισχύς ρυμούλκησης(Effective Horse Power) του πλοίου ανάλογα με την ταχύτητα(kn) πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων. Η ισχύς αυτή εξαρτάται αποκλειστικά από την αντίσταση της γάστρας με παρελκόμενα(μη εξοπλισμένης με έλικα) του πλοίου και την ταχύτητα πλεύσης.

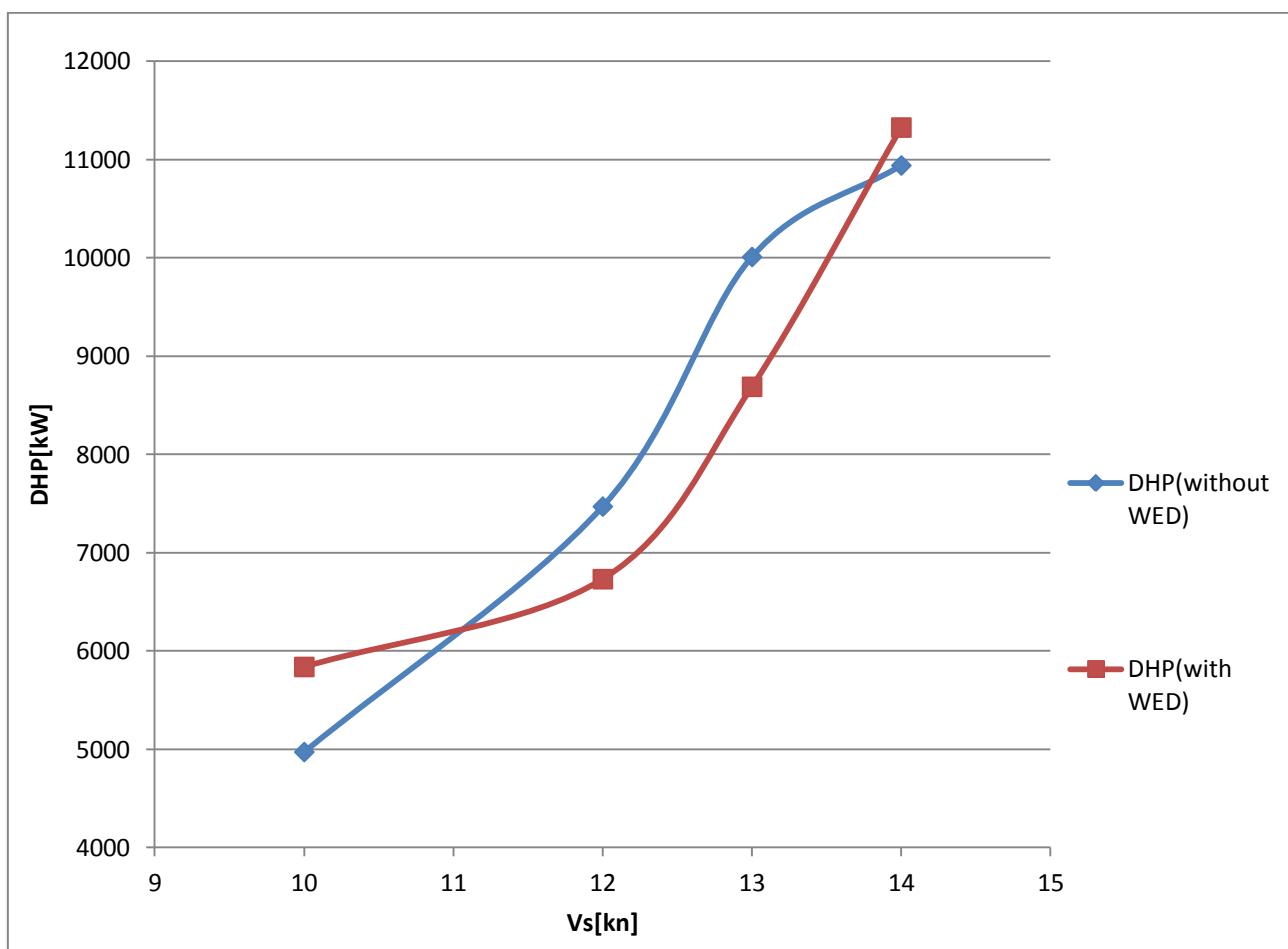


Διάγραμμα 12.1 Διάγραμμα Effective Horse Power του πλοίου ανάλογα με την ταχύτητα πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων

Από το διάγραμμα αυτό είναι φανερό πως στις χαμηλές ταχύτητες η ισχύς ρυμούλκησης αυξάνεται με την παρουσία των ημιδακτυλίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις μικρές ταχύτητες η γωνία πρόσπτωσης της ροής στον ημιδακτύλιο είναι μεγάλη με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια πρόσθετη αντίσταση. Καθώς η

ταχύτητα αυξάνεται η παρουσία των ημιδακτυλίων φαίνεται να μην επηρεάζει σχεδόν καθόλου την αντίσταση γυμνής γάστρας και την ισχύ ρυμούλκησης. Αντιθέτως στην ταχύτητα των 14kn υπάρχει μια μικρή μείωση της ισχύος ρυμούλκησης. Καθώς η ταχύτητα αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης της ροής στους ημιδακτυλίους μειώνεται με αποτέλεσμα την δημιουργία αρνητικής συνιστώσας της αντίστασης και έτσι μείωση της ισχύος ρυμούλκησης.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί(Διάγραμμα 12.2) φαίνεται η ισχύς που απορροφά ηέλικα του πλοίου DHP(kW) ανάλογα με την ταχύτητα(kn) πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων.

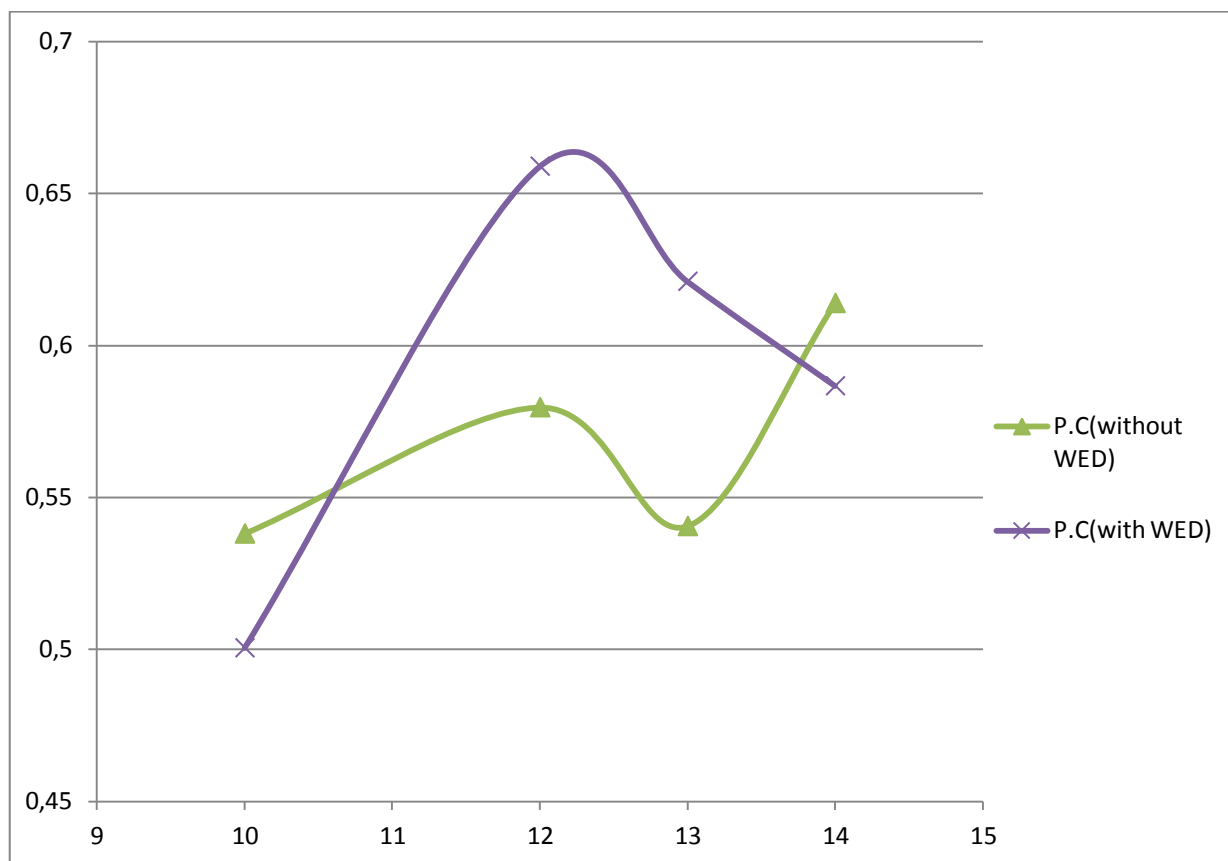


Διάγραμμα 12.2 Διάγραμμα Delivered Horse Power του πλοίου ανάλογα με την ταχύτητα πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων

Η μπλέ καμπύλη αναπαριστά την ισχύ που αποδίδεται στην έλικα ανάλογα με την ταχύτητα, χωρίς την παρουσία των ημιδακτυλίων ενώ η κόκκινη με την παρουσία ημιδακτυλίων. Από τις καμπύλες αυτές είναι εμφανές πως για ταχύτητες πλοίου από 11,5 μέχρι 13,5 κόμβους η τοποθέτηση των ημιδακτυλίων έχει ευεργετικό αποτέλεσμα στην ισχύ που απορροφά η έλικα. Όπως φάνηκε και από τους πίνακες παραπάνω, οι ημιδακτύλιοι δεν είναι αποτελεσματικοί για την μικρή ταχύτητα πλοίου των 10kn, καθώς αυξάνουν την τιμή της ισχύος που απορροφά η έλικα ενώ έχει αυξηθεί και η ισχύς ρυμούλκησης. Ομοίως μια μικρότερη αύξηση της ισχύος της έλικας παρουσιάζεται και για τους 14kn παρά την μείωση της ισχύος ρυμούλκησης στην ταχύτητα αυτή.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε μια υπερεκτίμηση της ισχύος στους 13kn πριν την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων(μπλέ καμπύλη). Στην πραγματικότητα η ισχύς που αποδίδεται στην έλικα σε αυτή την ταχύτητα είναι μικρότερη. Η απόκλιση αυτή οφείλεται σε κάποιο σφάλμα κατά την διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων. Όπως φαίνεται και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο συντελεστής μείωσης ώσης στην ταχύτητα αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερος σχετικά με τους αντίστοιχους συντελεστές των άλλων ταχυτήτων με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης γάστρας αλλά και ο βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης να είναι αρκετά μειωμένος. Παρόλαυτα ακόμα και για μικρότερη τιμή της ισχύος, η οποία θα οδηγούσε σε ένα ομαλοποιημένο διάγραμμα, είναι φανερό πως πάλι θα υπήρχε μείωση στην ισχύ για την ταχύτητα αυτή. Η μείωση θα ήταν σαφώς μικρότερη αλλά θα εξακολουθούσε η τοποθέτηση των ημιδακτυλίων να έχει ευεργετικά αποτελέσματα σε αυτό το εύρος ταχυτήτων.

Στο ακόλουθο διάγραμμα(Διάγραμμα 12.3) φαίνεται ο βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων ανάλογα με την ταχύτητα(kn). Ο βαθμός απόδοσης αυτός ισούται με τον λόγο της ισχύος ρυμούλκησης προς την ισχύ που απορροφά η έλικα.



Διάγραμμα 12.3 Διάγραμμα βαθμού απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου πριν και μετά την τοποθέτηση των ημιδακτυλίων

Μέσω αυτού του βαθμού απόδοσης αντικατοπτρίζεται η αποτελεσματικότητα των ημιδακτυλίων καθώς λαμβάνει υπόψην οποιαδήποτε μεταβολή στην αντίσταση γυμνής γάστρας και την ισχύ. Από το διάγραμμα αυτό φαίνεται μια βελτίωση στο βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης για ταχύτητες από 11 μέχρι 13,5 kn.

Σε ότι αφορά την ταχύτητα των 11 κόμβων βλέπουμε πως, ενώ η ισχύς που αποδίδεται στην έλικα στην ταχύτητα αυτή δεν έχει επηρεαστεί από την παρουσία των ημιδακτυλίων, ο βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης έχει αυξηθεί. Αυτό συμβαίνει διότι η ισχύς στην έλικα έχει παραμείνει ίδια ενώ η ισχύς ρυμούλκησης έχει αυξηθεί, αφού έχει αυξηθεί και η αντίσταση.

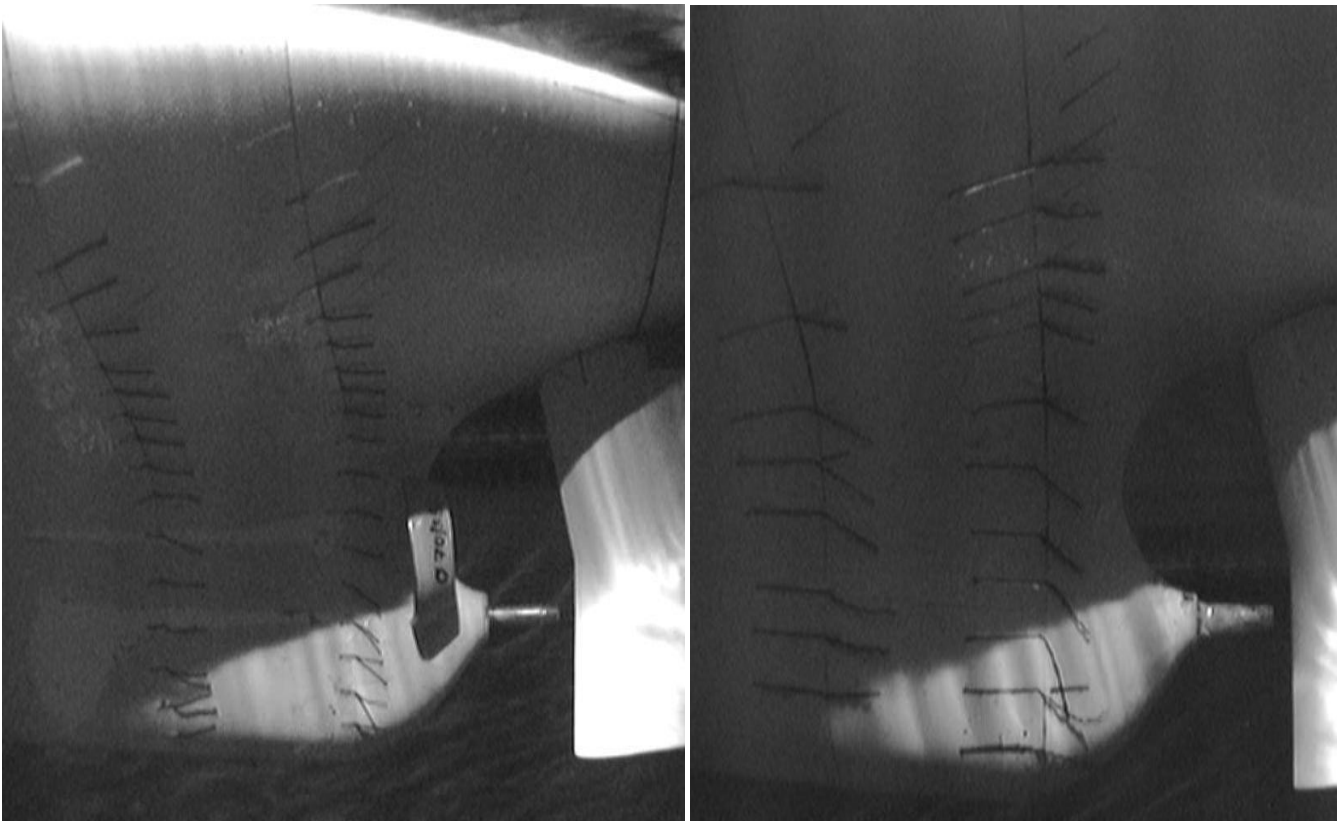
Τέλος, στην καμπύλη που αναπαριστά τον βαθμό απόδοσης πριν την εγκατάσταση των ημιδακτυλίων(πράσινη καμπύλη) φαίνεται το σφάλμα στις

μετρήσεις που αναφέρθηκε παραπάνω και αφορά την ταχύτητα των 13kn. Στην πραγματικότητα ο βαθμός απόδοσης στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτερος και οδηγεί σε μια ομαλή καμπύλη. Ακόμα όμως και σε αυτή την περίπτωση θα υπάρχει αύξηση(μικρότερη) του βαθμού απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης με την παρουσία των ημιδακτυλίων στη γάστρα του πλοίου.

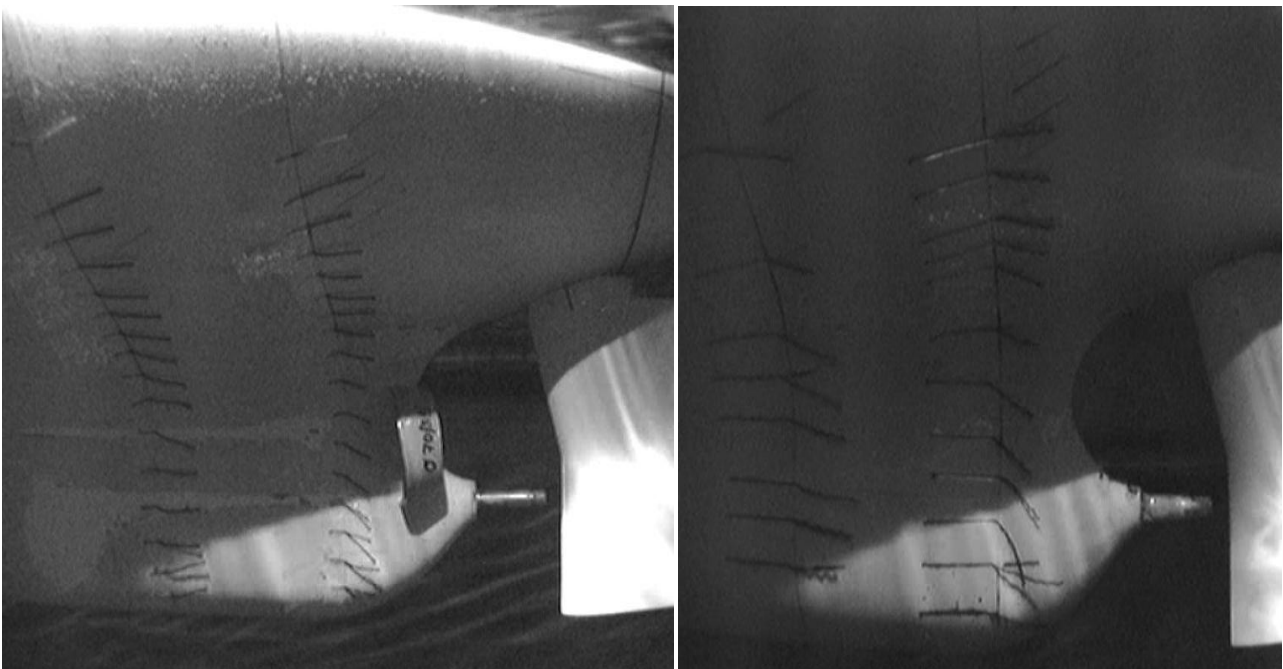
Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να εξαχθούν αρκετά συμπεράσματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα των ημιδακτυλίων τύπου WED. Αρχικά από τις πειραματικές μετρήσεις στην παρούσα εργασία φαίνεται πως οι ημιδακτύλιοι βελτιώνουν την απόδοση του πλοίου για ταχύτητες μεταξύ 11 και 13,5kn. Πρέπει όμως να τονισθεί πως τα αποτελέσματα αυτά αφορούν μια συγκεκριμένη θέση των ημιδακτυλίων ως προς το διάμηκες του πλοίου καθώς και μια συγκεκριμένη γωνία κλίσης. Νέες πειραματικές μετρήσεις μπορεί να δώσουν εξίσου θετικά αποτελέσματα και σε κάποιο άλλο εύρος ταχυτήτων εάν υπάρξει επανατοποθέτηση των ημιδακτυλίων. Συνεπώς εξίσου βασικό συμπέρασμα της εργασίας αυτής είναι πως η εγκατάσταση των ημιδακτυλίων σε μια προδιαγεγραμμένη θέση δεν μπορεί να λειτουργεί το ίδιο βέλτιστα σε όλες τις ταχύτητες πλεύσης του πλοίου.

13. ΓΡΑΜΜΕΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗ ΓΑΣΤΡΑ ΤΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΗΜΙΔΑΚΤΥΛΙΟΥΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

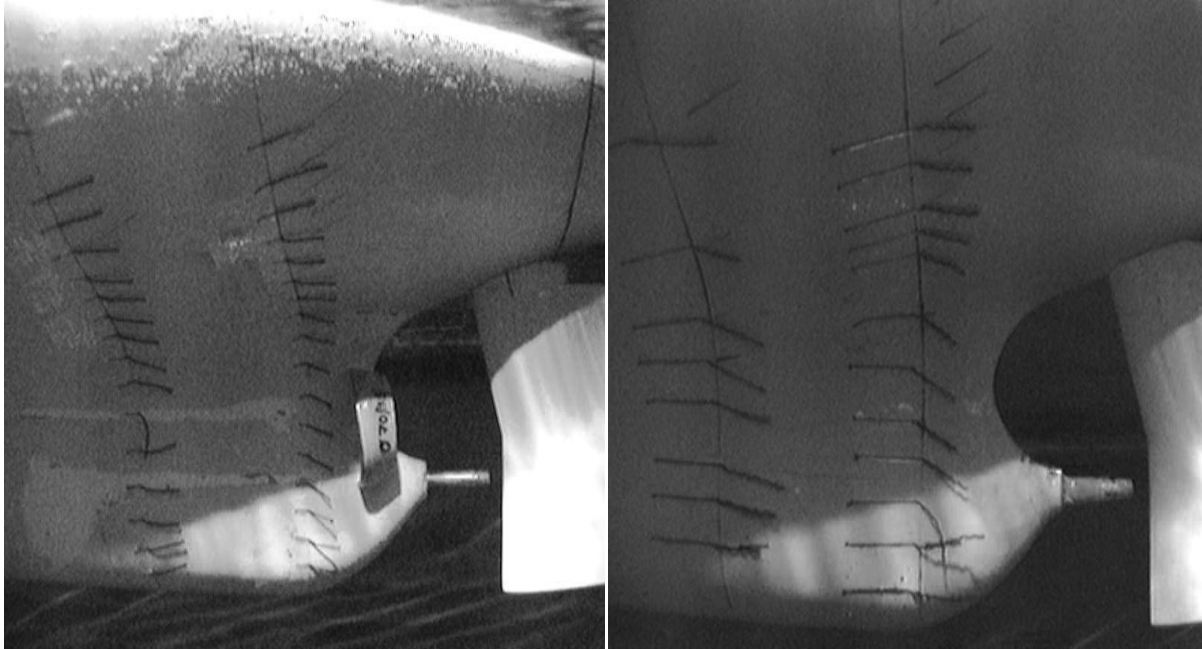
Ομοίως με την διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 8, τοποθετήθηκαν ξανά νήματα στην πρύμνη του μοντέλου στην ίδια θέση με το προηγούμενο πείραμα γραμμών ροής. Σκοπός της επανάληψης του πειράματος αυτού είναι η παρατήρηση των γραμμών ροής μετά την εγκατάσταση των ημιδακτυλίων επι του μοντέλου. Τα πειράματα αφορούν την γυμνή γάστρα του μοντέλου σε ταχύτητες 0,767, 0,92, 0,997 και 1,074m/s. Στις Εικόνες 13.1, 13.2, 13.3 και 13.4 φαίνονται στιγμιότυπα από το βιντεοσκοπημένο αρχείο για την εκάστοτε ταχύτητα πριν και μετά την τοποθέτηση των WED.



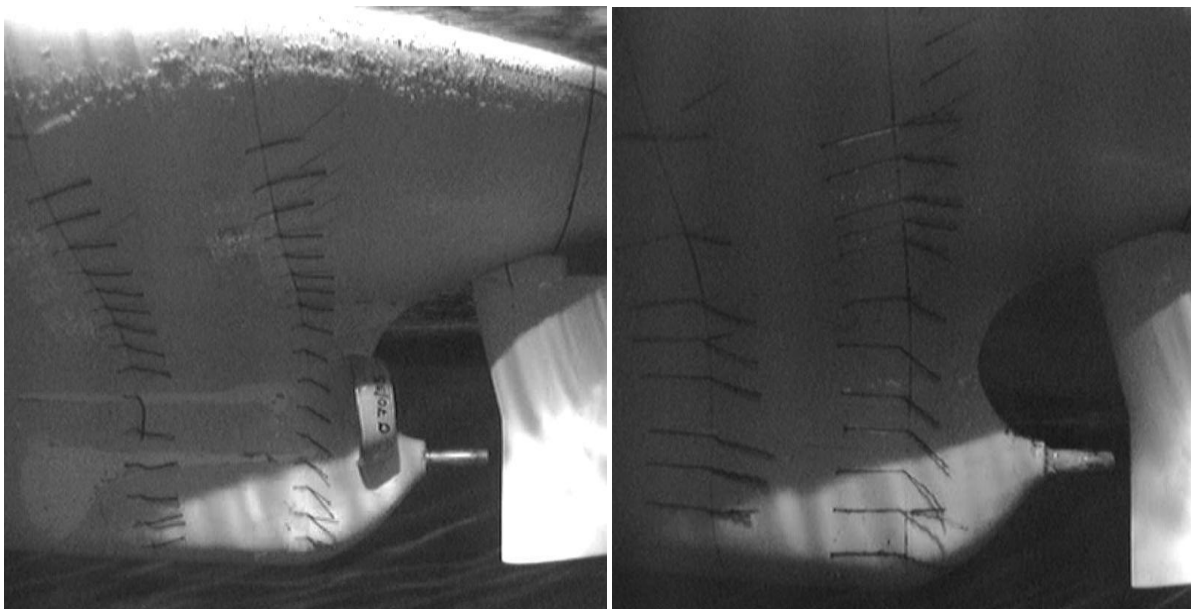
Εικόνα 13.1 Γραμμές ροής χωρίς WED(δεξιά) και με WED(αριστερά) για ταχύτητα μοντέλου 0,767m/s



Εικόνα 13.2 Γραμμές ροής χωρίς WED(δεξιά) και με WED(αριστερά) για ταχύτητα μοντέλου 0,92m/s



Εικόνα 13.3 Γραμμές ροής χωρίς WED(δεξιά) και με WED(αριστερά) για ταχύτητα μοντέλου 0,997m/s



Εικόνα 13.4 Γραμμές ροής χωρίς WED(δεξιά) και με WED(αριστερά) για ταχύτητα μοντέλου 1,074m/s

14. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ (Computer Fluid Dynamics)

14.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Ο βασικός λόγος ανάπτυξης αριθμητικών μεθόδων για την κατανόηση προβλημάτων ναυτικής υδροδυναμικής (CFD) είναι το γεγονός ότι τα προβλήματα αυτά χαρακτηρίζονται από αδιάστατους αριθμούς Reynolds και Froude οι οποίοι δεν μπορούν να προσομοιωθούν 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 μεταροπές βασίζονται σε εμπειρικές υποθέσεις. Δημιουργήθηκε έτσι η ανάγκη ανάπτυξης αριθμητικών μεθόδων επίλυσης τέτοιων προβλημάτων που θα οδηγούν σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

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

Εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho u_2) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\rho u_3) = 0 \quad (14.1)$$

, όπου για πεδίο σταθερής πυκνότητας ισχύει:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i) = 0 \quad (14.1\alpha)$$

Εξίσωση ορμής (Navier Stokes)

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho X_i + \frac{\partial \sigma_{i1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{i2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{i3}}{\partial x_3} \quad (14.2)$$

, όπου X_i εξωτερική δύναμη.

Η σχέση (14.2) για ασυμπύεστο ρευστό σταθερής πυκνότητας και με βάση την (14.1α) μπορεί να γραφεί στην παρακάτω μορφή:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_1 u_i)}{\partial x_1} + \frac{\partial(u_2 u_i)}{\partial x_2} + \frac{\partial(u_3 u_i)}{\partial x_3} = X_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{i1}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{i2}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{i3}}{\partial x_3} \right] \quad (14.3)$$

, όπου ρ η πίεση.

Συνεπώς καταλήγουμε σε τρεις εξισώσεις ορμής (14.3) για $i=1,2,3$ και την εξίσωση συνέχειας (14.1α) οι οποίες συνιστούν ένα σύστημα τεσσάρων διαφορικών εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους (u_1, u_2, u_3, p). Βέβαια υπάρχουν ουσιαστικές δυσκολίες στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων αυτών λόγω της τυρβώδους ροής γύρω από το πλοίο 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 ταλαντούμενου πεδίου ταχυτήτων πάνω σε μια ροή. Στην φυσική κλίμακα του πλοίου για υψηλούς αριθμούς Reynolds η ροή είναι πάντα τυρβώδης και το προφίλ της ταχύτητας είναι ανομοιόμορφο. Για την επίλυση λοιπόν 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 (turbulence models) και κάποιων απλοποιητικών παραδοχών προσεγγίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια η παράμετροι της ροής. Ο O.Reynolds υποθέτει πως ένα βαθμωτό μέγεθος Φ αναλύεται ως εξής:

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

, όπου Φ' η εναλλασόμενη συνιστώσα και $\bar{\Phi}$ η μέση τιμή η οποία ορίζεται ως εξής:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \Phi(t) dt \quad (14.4)$$

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

Εάν εισάγουμε την σχέση (14.4) για τις συνιστώσες της ταχύτητας και την πίεση στις εξισώσεις (14.1α) και (14.3) θα καταλήξουμε στις παρακάτω σχέσεις:

Εξίσωση συνέχειας για ασυμπίεστο ρευστό

$$\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial x_3} = 0 \tag{14.5}$$

Εξίσωση ορμής

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_1 \bar{u}_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial (\bar{u}_2 \bar{u}_1)}{\partial x_2} + \frac{\partial (\bar{u}_3 \bar{u}_1)}{\partial x_3} = X_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1} \right) - \overline{u_1' u_1'} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_1} \right) - \overline{u_1' u_2'} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_3} + \frac{\partial \bar{u}_3}{\partial x_1} \right) - \overline{u_1' u_3'} \right] \end{aligned} \tag{14.6}$$

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

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{2}{3} k \delta_{ij} \tag{14.7}$$

, όπου ν_t είναι η τυρβώδης συνεκτικότητα και ο υπολογισμός αυτής χαρακτηρίζει το εκάστοτε μοντέλο τύρβης και k η κινητική ενέργεια της τύρβης η οποία ορίζεται ως εξής:

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

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

$$\varepsilon = \nu \left[\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \right] \quad (14.8)$$

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

$$\nu_t = f_\mu C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (14.9)$$

, όπου $C_\mu=0,09$ και f_μ συνάρτηση ανάλογα με την παραλλαγή του μοντέλου.

Το πρόβλημα λειτουργίας της έλικας σε μόνιμα ή μη μόνιμα πεδία αντιμετωπίζεται επαρκώς χρησιμοποιώντας μεθόδους συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Methods , BEM) που επιλύουν το μη συνεκτικό πεδίο με γνωστές οριακές συνθήκες . Όταν όμως είναι απαραίτητη η σύζευξη των μεθόδων αυτών με τις εξισώσεις Navier Stokes ανακύπτουν προβλήματα καθώς το φαινόμενο είναι τοπικά μη μόνιμο και αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος.

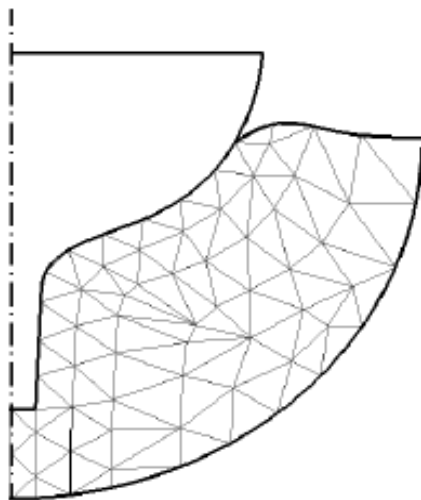
Προκειμένου να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα οποιαδήποτε υπολογιστική μέθοδος πρέπει επιπλέον να ασχοληθεί με την ύπαρξη ελεύθερης επιφάνειας γύρω από το πλοίο. Ένας τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων που αφορούν την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού πριν την επίλυση του πλήρους προβλήματος είναι η εκτέλεση πειραμάτων σε δεξαμενή. Κάτι τέτοιο όμως είναι χρονοβόρο και δαπανηρό. Συνεπώς δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης μιας υπολογιστικής μεθόδου για την ελεύθερη επιφάνεια γύρω από το πλοίο εφόσον στην πραγματικότητα το σύνορο του πεδίου που μελετάται δεν είναι εξαρχής γνωστό. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα επίλυσης με βάση την θεωρία δυναμικού (potential flow) το οποίο υιοθετεί μια επαναληπτική διαδικασία

για τον υπολογισμό της ελεύθερης επιφάνειας. Η δυναμική ροή συνιστά την ιδανική, μη συνεκτική ή χωρίς τριβή ροή. Οι γραμμές ροής είναι συνεχείς και ακολουθούν το στερεό σύνορο. Κατά την μελέτη δυναμικής ροής οι εξισώσεις Navier Stokes εκφυλίζονται στον Νόμο του Bernoulli. Στην πραγματικότητα βέβαια τα παραπάνω αποτελούν μια παραδοχή η οποία διευκολύνει τους υπολογισμούς αφού η πραγματική ροή γύρω από το πλοίο είναι ροή με τριβή η οποία ονομάζεται συνεκτική ροή (viscous flow). Λόγω της τριβής αυτής δημιουργείται το οριακό στρώμα γύρω από τη γάστρα και το πεδίο ομόρρου στο πίσω μέρος της γάστρας (πεδίο λειτουργίας της έλικας).

Οι εξισώσεις Navier Stokes θα πρέπει να επιλυθούν στις τρεις διαστάσεις. Για τον λόγο αυτό μέσω της μεθόδου των Όγκων Ελέγχου (Control Volume) οι εξισώσεις Navier Stokes καθώς και η εξίσωση συνέχειας ολοκληρώνονται σε κατάλληλους όγκους. Οι τιμές της ταχύτητας και της πίεσης αντικαθίστανται από τις μέσες τιμές τους (βλ. 14.4), οι οποίες θεωρούνται σταθερές στα κέντρα των εδρών των όγκων ελέγχου (RANS, Reynolds averaged Navier-Stokes) και τελικά καταλήγουμε σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων για κάθε ένα από τα ζητούμενα μεγέθη το οποίο επιλύεται αριθμητικά. Για την εφαρμογή λοιπόν της μεθόδου αυτής απαιτείται η κατασκευή κατάλληλου αριθμητικού πλέγματος γύρω από το πλοίο. Με άλλα λόγια η περιοχή του ρευστού γύρω από το πλοίο χωρίζεται σε όγκους των οποίων οι έδρες εφάπτονται μεταξύ τους. Στην περίπτωση του πλοίου, το οποίο συνιστά περίπλοκη γεωμετρία, η κατασκευή τέτοιων πλεγμάτων είναι μια περίπλοκη διαδικασία.

Μπορούμε να χωρίσουμε τα αριθμητικά πλέγματα σε δύο μεγάλες 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 τριδιάστατων 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. Παρόλαυτα οι πίνακες που προκύπτουν από τη χρήση των μη δομημένων πλεγμάτων δεν έχουν

εξ'αρχής 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 14.3 Μη δομημένο πλέγμα γύρω από νομέα

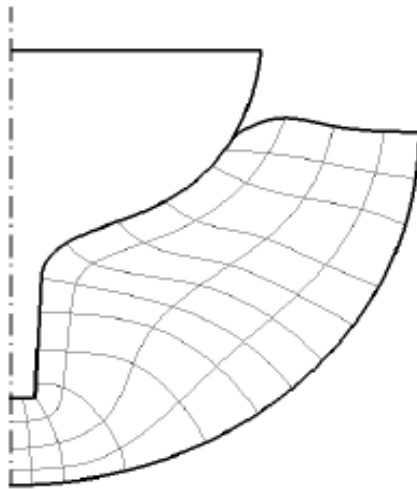
Μια κατηγορία δομημένων πλεγμάτων είναι τα καρτεσιανά ορθογώνια πλέγματα τα οποία αποτελούνται από ορθογώνια παραλληλόγραμμα σε δύο ή ορθογώνια παραλληλεπίπεδα σε τρεις διαστάσεις και όσο εύκολο είναι να κατασκευαστούν τόσο δύσκολο είναι να περιγράψουν οποιαδήποτε γεωμετρία.



Εικόνα 14.4 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 14.5 Καμπυλόγραμμο πλέγμα γύρω από νομέα

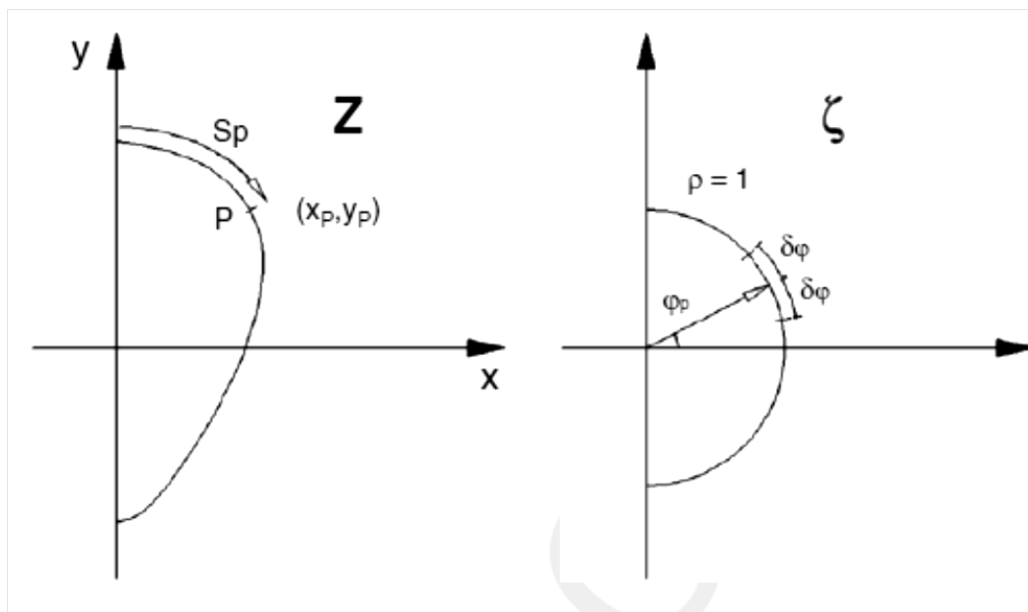
Το αριθμητικό πλέγμα λοιπόν που παράγεται γύρω από την γάστρα του πλοίου αποτελείται από διδιάστατα ορθογώνια καμπυλόγραμμα πλέγματα, κάθε ένα από τα οποία δημιουργείται μέσω της σύμμορφης απεικόνισης της αντίστοιχης τομής σε κύκλο, προκειμένου να λυθούν οι μέσες χρονικά εξισώσεις Navier-Stokes (RANS). Η βασική ιδιότητα του σύμμορφου μετασχηματισμού είναι ότι από το επίπεδο του νομέα στο επίπεδο του κύκλου είναι εφικτό να διατηρούνται οι γωνίες. Η γενική μορφή του σύμμορφου μετασχηματισμού για ένα νομέα πλοίου γράφεται ως εξής:

$$z = c_0 + c_{-1}\zeta + \sum_{n=1}^N c_n \zeta^{-n} \quad (14.10)$$

, όπου ζ είναι το μιγαδικό επίπεδο του μοναδιαίου κύκλου και 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:

$$\begin{aligned} x &= a_{-1} \cos \varphi + \sum_{n=1}^N a_n \cos(-n\varphi) \\ y &= a_0 + a_{-1} \sin \varphi + \sum_{n=1}^N a_n \sin(-n\varphi) \end{aligned} \quad (14.11)$$

Το περίγραμμα της εκάστοτε τομής ορίζεται από έναν αριθμό σημείων (x,y) που αντιστοιχούν σε γωνίες ϕ πάνω στο μοναδιαίο κύκλο. Στις παραπάνω εξισώσεις (14.11) 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 14.6 Ο σύμμορφος μετασχηματισμός νομέα πλοίου στο μοναδιαίο κύκλο

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

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

$$a_n^{(1)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} x(\varphi) \cos(n\varphi) d\varphi, n > 2 \tag{14.12}$$

ή

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

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

$$\alpha_n^{(2)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y(\varphi) \sin(n\varphi) d\varphi, n > 2 \quad (14.13)$$

Είναι φανερό πως 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 έχουμε πεπερασμένο αριθμό N οι σχέσεις 14.12 και 14.13 οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Προκειμένου λοιπόν να βρεθεί η βέλτιστη απεικόνιση ενός διδιάστατου πλέγματος χρησιμοποιείται η παρακάτω γραμμική σχέση παρεμβάλλοντας τις παραπάνω εξισώσεις:

$$a_n = r a_n^{(1)} + (1 - r) a_n^{(2)}, n = -1, \dots, N \quad (14.14)$$

, 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 που προκύπτουν από τις εξισώσεις 14.11. Εισάγοντας τον συντελεστή βάρους r στις εξισώσεις 14.11 έχουμε:

$$\begin{aligned} x_{aP} &= [r a_{-1}^{(1)} + (1 - r) a_{-1}^{(2)}] \cos \varphi_P + \sum_{n=1}^N [r a_n^{(1)} + (1 - r) a_n^{(2)}] \cos(-n\varphi_P) \\ y_{aP} &= [r a_0^{(1)} + (1 - r) a_0^{(2)}] + [r a_{-1}^{(1)} + (1 - r) a_{-1}^{(2)}] \sin \varphi_P + \sum_{n=1}^N [r a_n^{(1)} + \\ &1 - r a_n^{(2)}] \sin(-n\varphi_P) \end{aligned} \quad (14.15)$$

Έτσι ο συντελεστής βάρους r προκύπτει επιλύοντας την γραμμική εξίσωση:

$$\frac{\partial E_t}{\partial r} = 0 \quad (14.16)$$

Ο υπολογισμός των εξισώσεων 14.12 και 14.13 προϋποθέτει τον υπολογισμό της γωνίας ϕ_P , της γωνίας δηλαδή που αντιπροσωπεύει τα σημεία P στο επίπεδο του κύκλου. Στην εργασία των Von Kerczek και Tuck 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 όμως αυτή αποτυγχάνει όταν εφαρμόζεται σε περίπλοκες μορφές νομέων και οδηγεί σε ακανόνιστες αναπαραστάσεις. Για την άρση του προβλήματος αυτού έχει εισαχθεί μια βελτίωση της μεθόδου κατά την οποία υπολογίζεται η γωνία μέσα από μια διαδικασία δύο βημάτων. Αρχικά υποτίθεται ότι η γωνία είναι μια συνάρτηση του S_P , όπου S είναι το περίγραμμα του νομέα υπολογιζόμενο ως εξής:

$$S_P = S_{P-1} + \sqrt{(x_P - x_{P-1})^2 + (y_P - y_{P-1})^2} \quad (14.17)$$

Στη συνέχεια, εισάγοντας μια σειρά γνωστών γωνιών ϕ_i , οι τιμές S_i υπολογίζονται αναλυτικά μέσω του σύμμορφου μετασχηματισμού. Τότε οι γωνίες ϕ_P ορίζονται μέσω γραμμικής παρεμβολής του αντίστοιχου μήκους S_P σε σχέση με το S_i . Η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί σταθερή και γρήγορη αλλά εφόσον βασίζεται σε προσέγγιση του S_P μέσω των σημείων μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς αναπαραστάσεις σε περιοχές νομέων με υψηλή καμπυλότητα. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται μόνο στα αρχικά στάδια της μεθόδου ενώ στα τελευταία στάδια (μέγιστος αριθμός N) ακολουθείται μια δεύτερη διαδικασία κατά την οποία η γωνία ϕ_P υπολογίζεται μέσω εύρεσης της ελάχιστης απόστασης του σημείου P από την αναλυτική αναπαράσταση του νομέα στο διάστημα $[\phi_P - \delta\phi, \phi_P + \delta\phi]$.

Για μια τυπική μορφή πλοίου, η οποία είναι επίσης συμμετρική και κατά τον άξονα x η γενική σχέση του σύμμορφου μετασχηματισμού (14.10) απλοποιείται στην παρακάτω:

$$z = \sum_{n=1}^N a_n \zeta^{3-2n} \quad (14.18)$$

Προκειμένου να δημιουργηθεί το απαραίτητο πλέγμα για τους υπολογισμούς που αφορούν συνεκτική αλλά και δυναμική ροή (viscous flow and potential flow), εκτός από τον σύμμορφο μετασχηματισμό για μια σειρά νομέων, είναι απαραίτητη και η δημιουργία των ενδιάμεσων νομέων. Μέχρι τώρα οι μέθοδοι που βασίζονται σε κυβική παρεμβολή και παρεμβολή spline αποτυγχάνουν να δημιουργήσουν τους ενδιάμεσους σταθμούς. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος εισάγεται μια νέα μέθοδος κατά την οποία αρχικά παράγονται σημεία στο επιθυμητό εγκάρσιο επίπεδο μέσω κυβικής παρεμβολής των τεσσάρων γειτονικών νομέων. Στη συνέχεια αυτό το περίγραμμα που έχει δημιουργηθεί τροποποιείται σύμφωνα με το σύμμορφο μετασχηματισμό που αναφέρθηκε και έτσι η αντίστοιχη αναπαράσταση του ενδιάμεσου νομέα είναι πολύ κοντά στα πραγματικά offsets.

Αφού η διαδικασία ολοκληρωθεί μπορεί να δημιουργηθεί ένα διδιάστατο 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 τριδιάστατο 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 πλέγματος προσεγγίζεται ικανοποιητικά από ένα ορθογώνιο καμπυλόγραμμο πλέγμα.

14.2 POTENTIAL FLOW

Το πεδίο ροής γύρω από πλοία, όπως αναφέρθηκε, περιγράφεται από τις μη γραμμικές μερικές διαφορικές εξισώσεις Navier-Stokes και την εξίσωση συνέχειας. Εάν θεωρήσουμε το ρευστό ασυμπίεστο και ατριβές τότε οι εξισώσεις απλοποιούνται σε εξισώσεις τύπου Euler. Εάν επίσης θεωρηθεί αστρόβιλο τότε περιγράφονται από μια εξίσωση Laplace. Μέσω των απλουστεύσεων αυτών η θεωρία δυναμικού μπορεί να περιγράψει πλήθος ροών. Το πρόβλημα όμως που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η παρουσία ελεύθερης επιφάνειας καθώς το σύνορο του πεδίου που μελετάται δεν είναι εξ' αρχής γνωστό. Για την άρση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα που βασίζεται στην θεωρία δυναμικού το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου από τον καθηγητή Γεώργιο Τζαμπίρα. Μέσω των παραπάνω παραδοχών για την ροή και με την βοήθεια του προγράμματος αυτού μπορεί να υπολογισθεί η ελεύθερη επιφάνεια προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στην επίλυση του πλήρους προβλήματος της συνεκτικής ροής (viscous flow).

Το πρόγραμμα αυτό βασίζεται σε μια επαναληπτική διαδικασία με σκοπό τον υπολογισμό της ελεύθερης επιφάνειας. Οι συνθήκες που επικρατούν στην ελεύθερη επιφάνεια είναι η κινηματική οριακή συνθήκη και η δυναμική οριακή συνθήκη. Σύμφωνα με την κινηματική οριακή συνθήκη οι ταχύτητες κάθετες στην επιφάνεια είναι μηδέν, δηλαδή η επιφάνεια είναι σταθερή. Σύμφωνα με την δυναμική οριακή συνθήκη η πίεση θεωρείται ίση με την υδροστατική πίεση. Αρχικά θεωρούμε γνωστή και ξεκινάμε από μια επίπεδη ελεύθερη επιφάνεια στην οποία θεωρούμε ότι ικανοποιείται η κινηματική οριακή συνθήκη. Για την επιφάνεια αυτή λύνουμε το πρόβλημα μέσω των εξισώσεων της θεωρίας δυναμικού υπολογίζοντας τις συνιστώσες της ταχύτητας u_x , u_y , u_z καθώς και την πίεση p^* από την εξίσωση του Bernoulli. Όπως έχει προαναφερθεί για ένα ασυμπίεστο και ατριβές πεδίο η πυκνότητα ρ είναι σταθερή και το δυναμικό και κινηματικό ιξώδες, μ και ν

αντίστοιχα, είναι μηδένικα. Για τον λόγο αυτό οι εξισώσεις Navier Stokes παίρνουν την μορφή των εξισώσεων Euler.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho u_x}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u_x \mathbf{U}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u_x) + S_{M_x} \\ \frac{\partial \rho u_y}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u_y \mathbf{U}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u_y) + S_{M_y} \\ \frac{\partial \rho u_z}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u_z \mathbf{U}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} u_z) + S_{M_z} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} + \operatorname{div}(u_x \mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + \operatorname{div}(u_y \mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} + \operatorname{div}(u_z \mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (14.19)$$

Η εξίσωση συνέχειας απλοποιείται στην παρακάτω μορφή:

$$\operatorname{div}(\mathbf{U}) = 0 \quad (14.20)$$

Για την επίλυση των εξισώσεων (14.19) και (14.20) απαιτούνται οι οριακές συνθήκες σε όλο το σύνορο S του πεδίου:

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}|_S = F \quad (14.21)$$

, όπου n είναι το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα σε κάποιο σημείο του S και $F=F(x,t)$ είναι μια γνωστή συνάρτηση της θέσης πάνω στο S και του χρόνου. Στο πρόβλημα μας τα σύνορα θεωρούνται ακίνητα, συνεπώς:

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}|_S = 0 \quad (14.22)$$

Επιπλέον χρειάζεται και κατάλληλη συνθήκη στο άπειρο.

Οι παραπάνω εξισώσεις ορίζουν ένα ασυμπίεστο και ατριβές πεδίο. Σε ένα πεδίο δυναμικής ροής, το άνυσμα της ταχύτητας ισούται με την αρνητική κλίση μιας βαθμωτής συνάρτησης δυναμικού ϕ .

$$\mathbf{U} = -\nabla\varphi$$

(14.23)

Σύμφωνα με την διανυσματική ανάλυση η στροβιλότητα ενός δυναμικού πεδίου ισούται με μηδέν:

$$\nabla \times \mathbf{U} = 0$$

(14.24)

Συνεπώς ένα πεδίο δυναμικού είναι ένα αστρόβιλο πεδίο.

Σύμφωνα με τη θεωρία του Hess το άνυσμα της ταχύτητας \mathbf{U} εκφράζεται ως το άθροισμα της ταχύτητας του πεδίου στο άπειρο και της διαταραχής λόγω παρουσίας του συνόρου:

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_\infty + \mathbf{u}$$

(14.25)

Θεωρούμε ότι η διαταραχή της ταχύτητας είναι δυναμικό πεδίο:

$$\mathbf{u} = -\text{grad}\varphi$$

(14.26)

Συνεπώς η \mathbf{u} ικανοποιεί την (14.20):

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

(14.27)

Το δυναμικό φ της διαταραχής ικανοποιεί την εξίσωση Laplace:

$$\nabla^2\varphi = 0$$

(14.28)

και οι οριακές συνθήκες για το φ γράφονται ως εξής:

$$\text{grad}\varphi \cdot \mathbf{n}|_S = \left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_S = \mathbf{U}_\infty \cdot \mathbf{n}|_S$$

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

(14.29)

Για τον υπολογισμό της πίεσης χρησιμοποιούμε την εξίσωση Bernoulli:

$$p - p_{\infty} = \frac{1}{2} \rho (|\mathbf{U}_{\infty}|^2 - |\mathbf{U}|^2) \quad (14.30)$$

, όπου $p(=\infty)$ η πίεση στο άπειρο.

Όμως η πίεση που προκύπτει για την επιφάνεια αυτή δεν ικανοποιεί την δυναμική οριακή συνθήκη, δηλαδή η πίεση p^* είναι διαφορετική από το άθροισμα της στατικής πίεσης $p_s(=\infty)$ και της υδροστατικής πίεσης $\rho g z$. Η διαφορά εισάγεται σαν όρος πηγής στην εξίσωση μεταφοράς για την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας u_z^* :

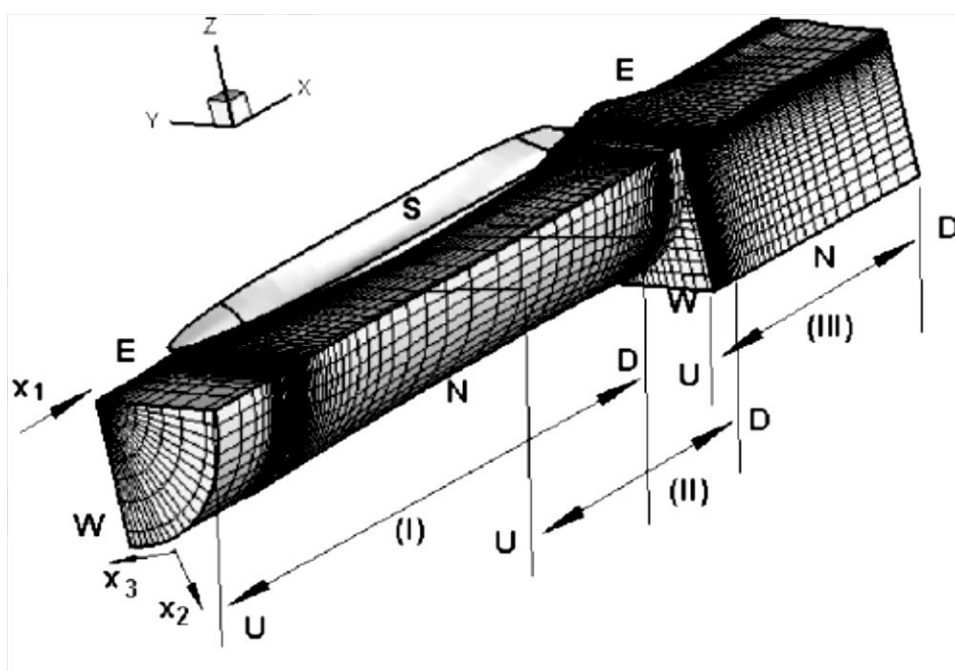
$$\rho \left[\frac{\partial u_x u_z^*}{\partial x} + \frac{\partial u_y u_z^*}{\partial y} + \frac{\partial u_z u_z^*}{\partial z} \right] = - \frac{\partial p^*}{\partial z} \quad (14.31)$$

Η εξίσωση αυτή επιλύεται αριθμητικά και προκύπτει μια νέα επιφάνεια η οποία βέβαια και πάλι δεν είναι η επιθυμητή αλλά δεν είναι πλέον επίπεδη. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την νέα επιφάνεια και επιλύοντας την εξίσωση για την u_z^* προκύπτει μια νέα συνιστώσα της κατακόρυφης ταχύτητας, και συνεπώς μια μεταβολή της επιφάνειας. Η μέση τιμή μετατόπισης της επιφάνειας δz όσο προχωρά η επαναληπτική διαδικασία θα είναι ένα μειούμενο μέγεθος το οποίο θα συγκλίνει σε μια μέση τιμή. Όταν αυτή η σύγκλιση φτάσει σε αποδεκτά επίπεδα η διαδικασία ολοκληρώνεται.

Η θεωρία δυναμικού μπορεί να περιγράψει ροές όπου η συνεκτικότητα και η στροβιλότητα είναι αμελητέες. Αυτό σημαίνει πως αποτυγχάνει σε οριακά στρώματα και στην περιοχή του ομμόρου. Όμως για τον υπολογισμό της ελεύθερης επιφάνειας η μέθοδος αυτή καταλήγει σε αποδεκτά αποτελέσματα, εκτός από την περιοχή της πρύμνης.

14.3 ΕΠΙΛΥΣΗ RANS ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Αφού έχει δημιουργηθεί ένα τριδιάστατο πλέγμα γύρω από την γάστρα του πλοίου και έχει ορισθεί πλήρως η ελεύθερη επιφάνεια, για την επίλυση των RANS εξισώσεων, η γάστρα χωρίζεται σε τρία τμήματα(blocks). Το πρώτο τμήμα (block I) καλύπτει την περιοχή της πλώρης και εκτείνεται έως την μέση της γάστρας. Το δεύτερο τμήμα (block II) ξεκινά από την μέση της γάστρας και φτάνει μέχρι το τέλος της, ενώ το τρίτο τμήμα(block III) καλύπτει τον καθέκτη και τον ομόρρου της πρύμνης. Σε κάθε ένα από αυτά τα τμήματα έχει δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό πλέγμα τύπου H-O που αποτελείται από μια σειρά εγκάρσιων νομέων. Η ειδικότερη διάσπαση του κάθε τμήματος λαμβάνει υπόψη 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.



Εικόνα 14.7 Τα τρία υπολογιστικά τμήματα(blocks) του πεδίου επίλυσης

Στα δυο πρώτα τμήματα (block I και II) έχει δημιουργηθεί ένα διδιάστατο πλέγμα γύρω από κάθε νομέα μέσω του σύμμορφου μετασχηματισμού. 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. Τελικά το τριδιάστατο πλέγμα που δημιουργείται γύρω από τη γάστρα είναι μη ορθογώνιο. Σε κάθε τμήμα οι RANS εξισώσεις επιλύονται αριθμητικά μέσω των εξισώσεων ορμής:

$$\frac{\rho}{h_i h_j h_l} \left[\frac{\partial(h_j h_l u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(h_i h_l u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial(h_i h_j u_l)}{\partial x_l} \right] = -\frac{1}{h_i} \frac{\partial p^*}{\partial x_i} + \rho u_j^2 K_{ji} + \rho u_l^2 K_{li} - \rho u_i u_j K_{ij} - \rho u_i u_l K_{il} + (\sigma_{ii} - \sigma_{jj}) K_{ji} + (\sigma_{ii} - \sigma_{ll}) K_{li} + \sigma_{ij} (2K_{ij} + K_{lj}) + \sigma_{il} (2K_{il} + K_{jl}) + \frac{1}{h_i} \frac{\partial \sigma_{ii}}{\partial x_i} + \frac{1}{h_j} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{1}{h_l} \frac{\partial \sigma_{il}}{\partial x_l} \quad (14.32)$$

, 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 πίεση

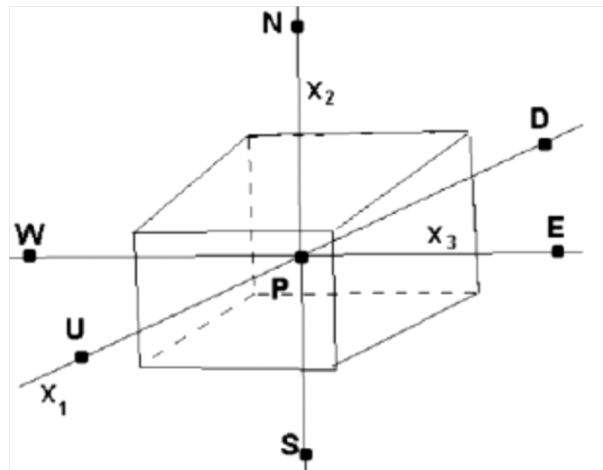
Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των συνιστωσών του τανυστή τάσεων σ_{ij} είναι το μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων k-ε, το οποίο αναλύθηκε παραπάνω.

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:

$$A_P \Phi_P = A_N \Phi_N + A_S \Phi_S + A_E \Phi_E + A_W \Phi_W + [A_D \Phi_D + A_U \Phi_U] + S_\Phi \quad (14.33)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το Φ αντιπροσωπεύει τα $u_1, u_2, u_3, k, \epsilon$ 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 14.8 Ο όγκος ελέγχου

Για την αριθμητική επίλυση της εξίσωσης 14.33 απαιτούνται συνοριακές συνθήκες στα σύνορα του κάθε τμήματος. Στον Πίνακα 14.1 που ακολουθεί φαίνονται οι επιβληθείσες συνθήκες Dirichlet ή Neumann στις έδρες των όγκων ελέγχου.

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

Πίνακας 14.1 Οι συνοριακές συνθήκες των τμημάτων

Ένας επαναληπτικός αλγόριθμος επιβάλλεται σε κάθε τμήμα προκειμένου να επιλύσει τις διακριτοποιημένες εξισώσεις μεταφοράς (εξ. 14.33). Οι εξισώσεις ορμής και μοντέλου τύρβης επιλύονται με την σειρά για κάθε ένα εγκάρσιο νομέα μέχρι την ολοκλήρωση κάθε τμήματος. Η εξίσωση συνέχειας επιλύεται μέσω μιας εξίσωσης διόρθωσης πίεσης απλού τύπου. Αφού ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί των εξισώσεων μεταφοράς σε κάποιο τμήμα τότε επιβάλλεται μια τριδιάστατη μέθοδος επίλυσης και διορθώνεται η πίεση στο τμήμα αυτό που εξετάζεται. Τότε ένα βήμα του αλγορίθμου έχει ολοκληρωθεί και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι όλες οι εξισώσεις μεταφοράς να συγκλίνουν.

14.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν αριθμητικοί υπολογισμοί με κώδικα που χρησιμοποιεί την θεωρία δυναμικού για την εύρεση της ελεύθερης επιφάνειας και εν συνεχεία με χρήση του κώδικα PARALOS, ο οποίος έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής από τον καθηγητή Γ. Τζαμπίρα. Ο κώδικας αυτός επιλύει τις 3D RANS εξισώσεις σε ασυμπιεστο συνεκτικό ρευστό, με δεδομένη την ελεύθερη επιφάνεια που προέκυψε από την θεωρία δυναμικού, στο πεδίο ροής γύρω από την γάστρα του μοντέλου ή του πλοίου.

Πραγματοποιήθηκε χρήση του κώδικα αυτού από τον καθηγητή Γ.Τζαμπίρα και τα αποτελέσματα για ταχύτητα πλοίου $V_s=14\text{kn}$, η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα μοντέλου $V_m=1,074\text{m/s}$, χωρίς την παρουσία των ημιδακτυλίων είναι αυτά που φαίνονται στον Πίνακα 14.3. Τα στοιχεία που αφορούν τους κώδικες φαίνονται στον Πίνακα 14.2.

Δυναμική ροή	44000 panels
	4000 panels πάνω στο πλοίο
Συνεκτική ροή	
Πρωραίο grid	1741500 κόμβοι
Πρυμναίο grid	3669000 κόμβοι
Απόσταση εξωτερικής διαμέτρου από πλευρά πλοίου	B
Επίπεδο εξόδου	L/2 από πρύμνη
Μοντέλο τύρβης	k-w-sst με wall function
Προσομοίωση έλικας	Δίσκος ορμής

ΜΕΓΕΘΗ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

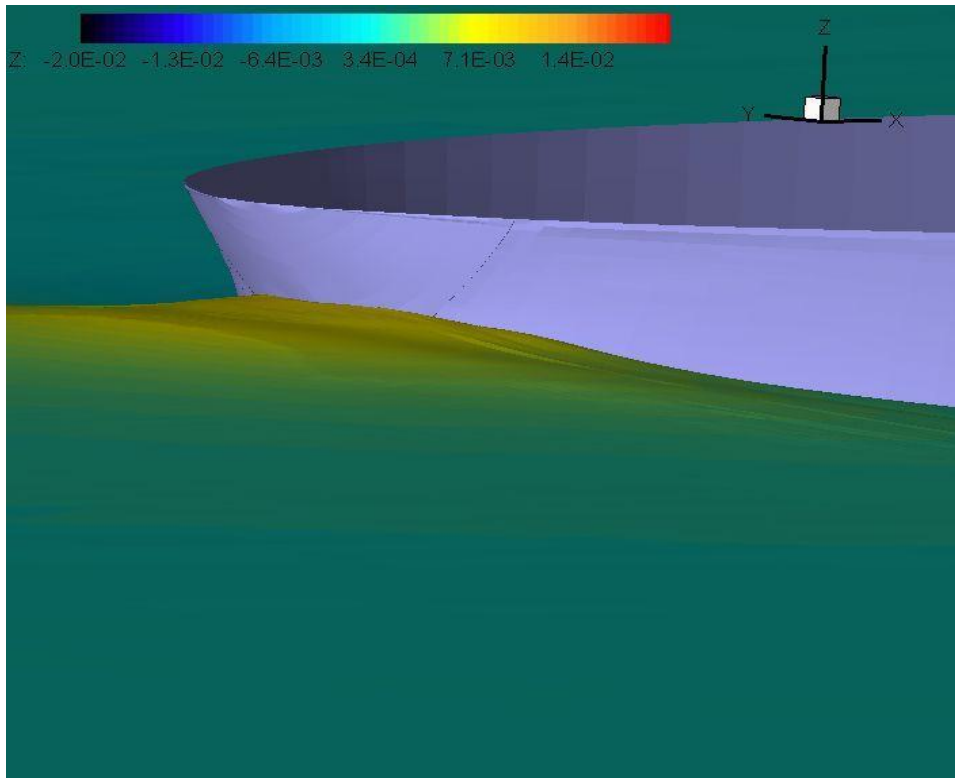
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
R_{TM}[kp]	2,08	1,987
C_{TM}	$4,93 \cdot 10^{-3}$	$4,649 \cdot 10^{-3}$
C_{FM}	$3,398 \cdot 10^{-3}$	$3,279 \cdot 10^{-3}$
C_{FM,ITC}	$3,459 \cdot 10^{-3}$	
C_{FM,ATC}	$3,350 \cdot 10^{-3}$	
k	0,425	0,407

ΜΕΓΕΘΗ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΤΗΣ ΑΥΤΟΠΡΩΣΗΣ

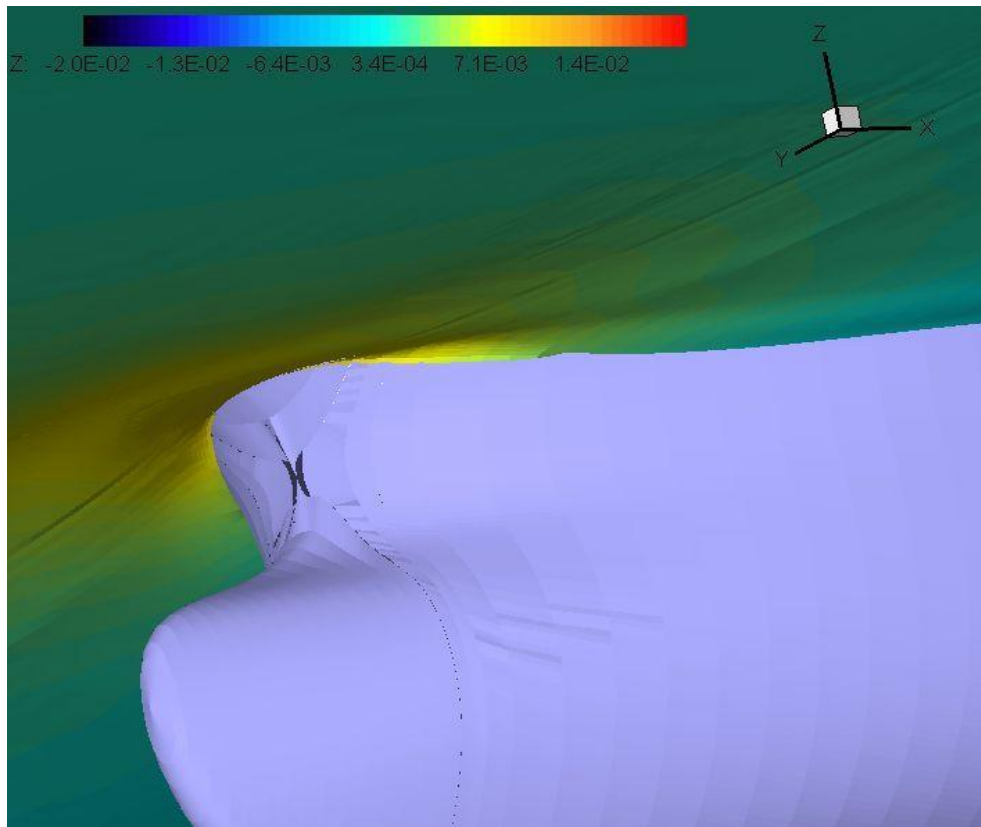
	ΣΗΜΕΙΟ ΑΥΤΟΠΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ		ΣΗΜΕΙΟ ΑΥΤΟΠΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
1-w	0,61	0,639	0,57	0,609
kT	0,219	0,227	0,192	0,196
n[RPM]	760	757	599	599
T[kp]	2,346	2,412	1,278	1,300
J	0,32	0,34	0,38	0,408
η_ο	0,40	0,485	0,48	0,485

Πίνακας 14. 3 Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

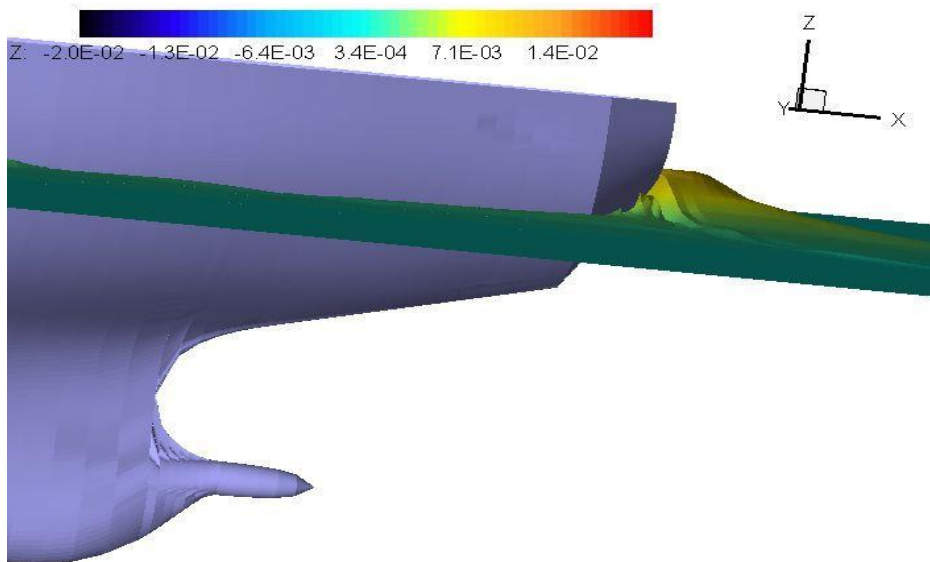
Μετά την χρήση του προγράμματος υπολογισμού της ελεύθερης επιφάνειας με βάση την θεωρία δυναμικού (potential flow) προέκυψαν τα ακόλουθα σχήματα. Στην Εικόνα 14.7 και 14.8 βλέπουμε το κύμα της πλώρης, στην Εικόνα 14.9 το κύμα που δημιουργείται στην πρύμνη ενώ στην Εικόνα 14.10 φαίνεται συνολικά η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας στο πεδίο γύρω από την γάστρα.



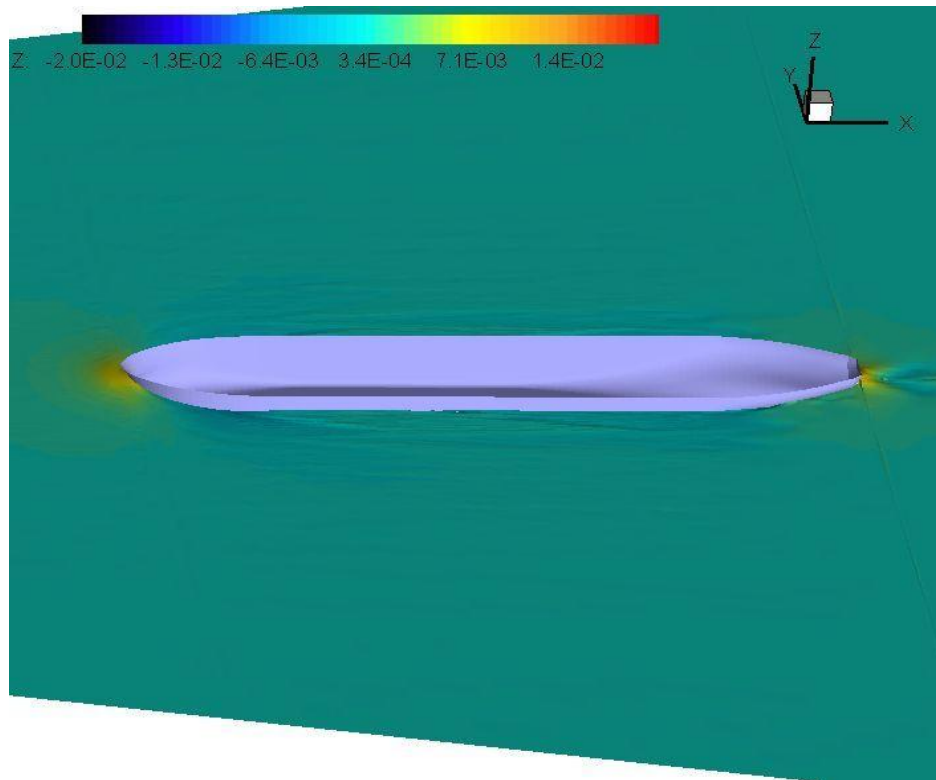
Εικόνα 14.7



Εικόνα 14.8

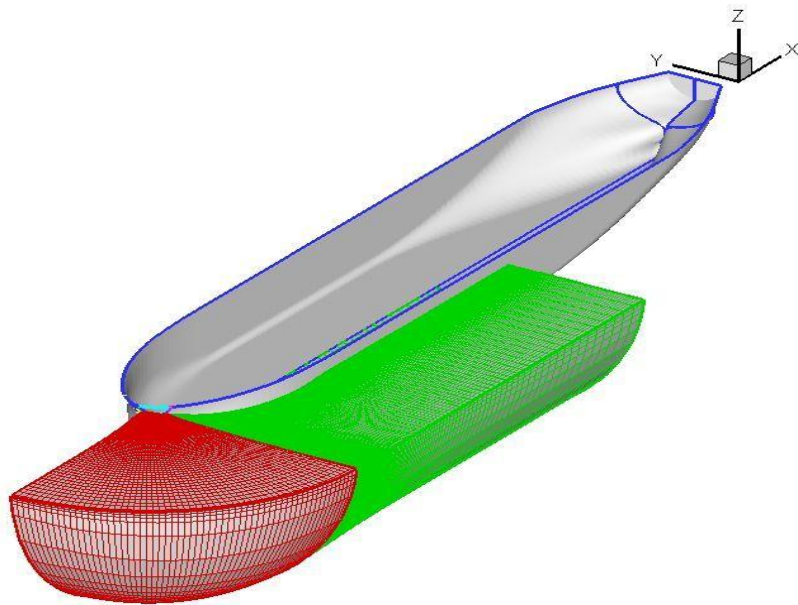


Εικόνα 14.9

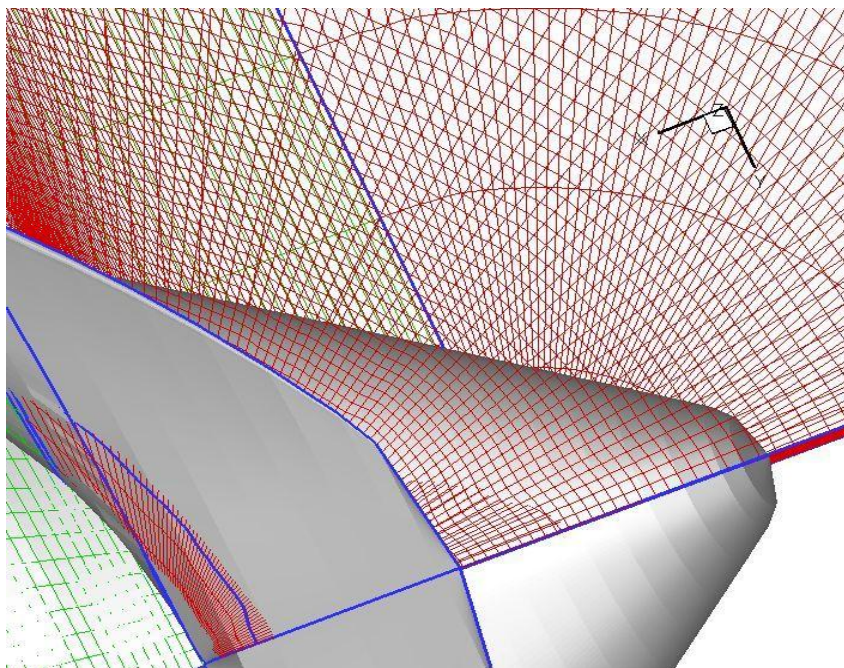


Εικόνα 14.10

Στις επόμενες δυο εικόνες(Εικόνα 14.11 και 14.12) φαίνονται το τριδιάστατο πλέγμα που έχει παραχθεί στην πλώρη 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.

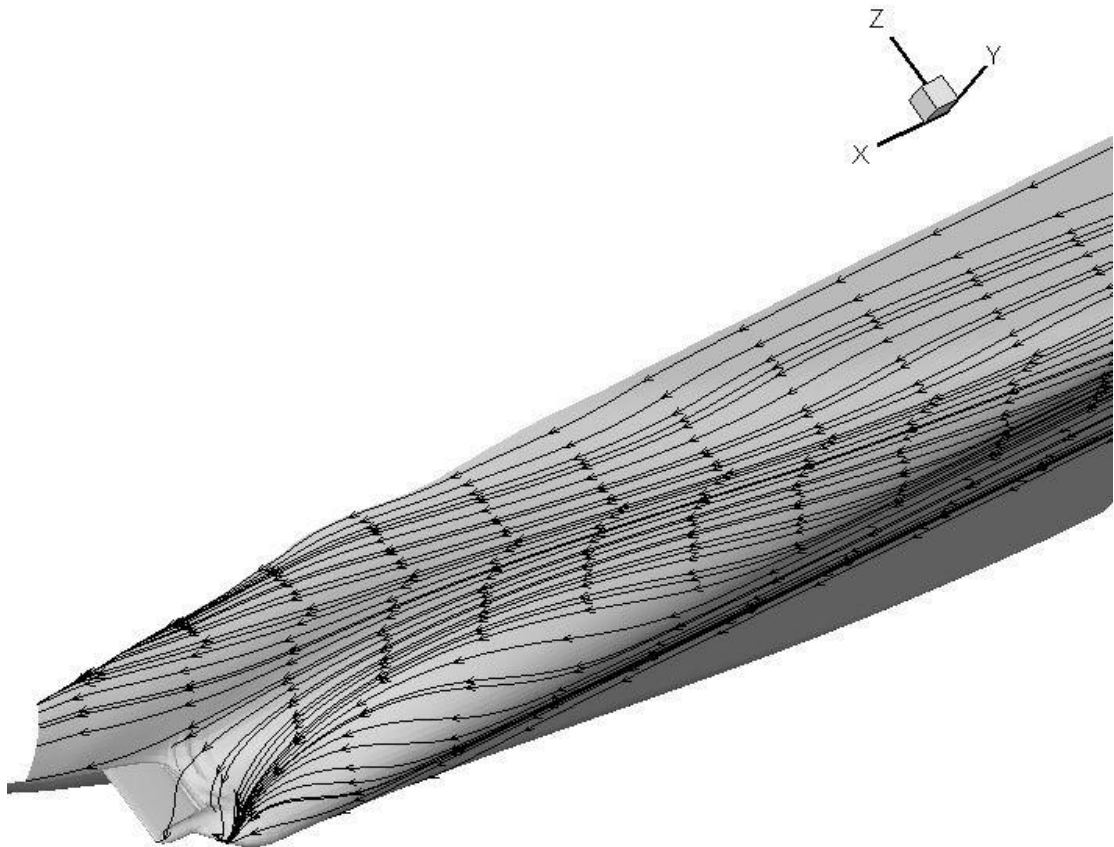


Εικόνα 14.11

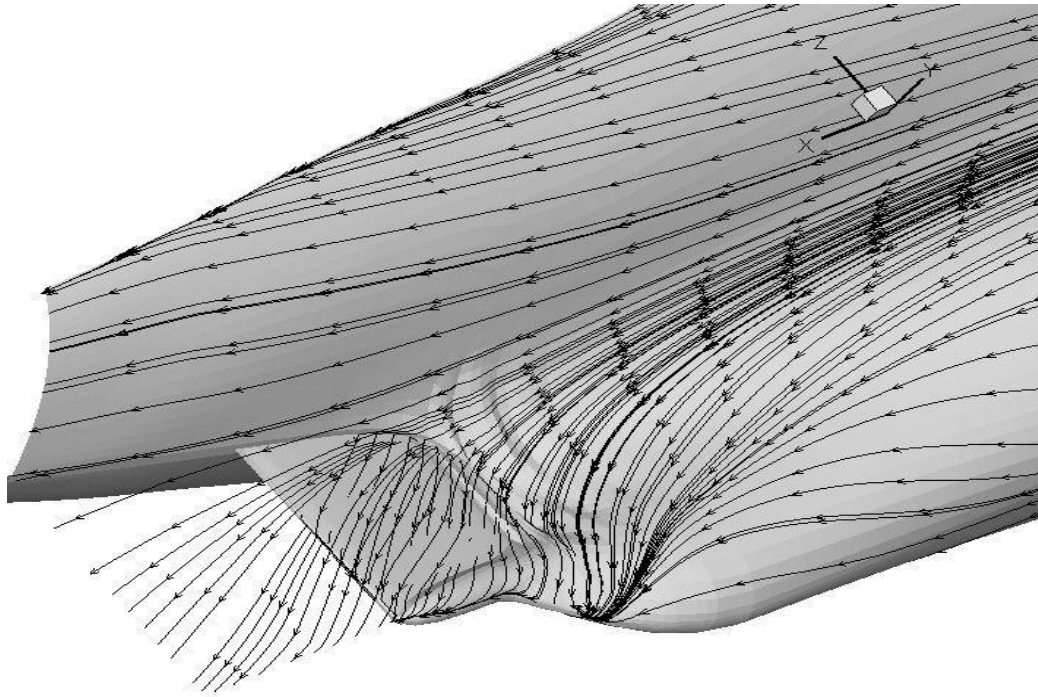


Εικόνα 14.12

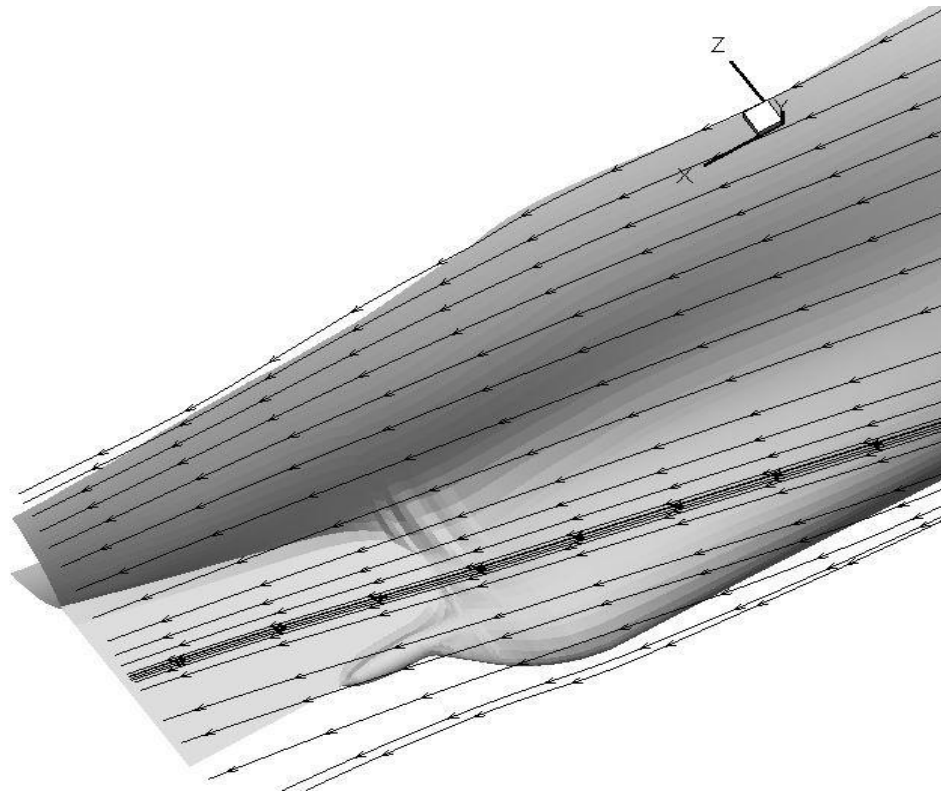
Στην Εικόνα 14.13 φαίνονται οι γραμμές ροής γύρω από την γάστρα του πλοίου ενώ στην Εικόνα 14.14 βλέπουμε ξανά τις γραμμές ροής με πιο πυκνή διακριτοποίηση. Στην Εικόνα 14.15 παρουσιάζονται οι γραμμές ροής όχι πάνω στη γάστρα του πλοίου αλλά σε μια απόσταση από αυτή.



Εικόνα 14.13

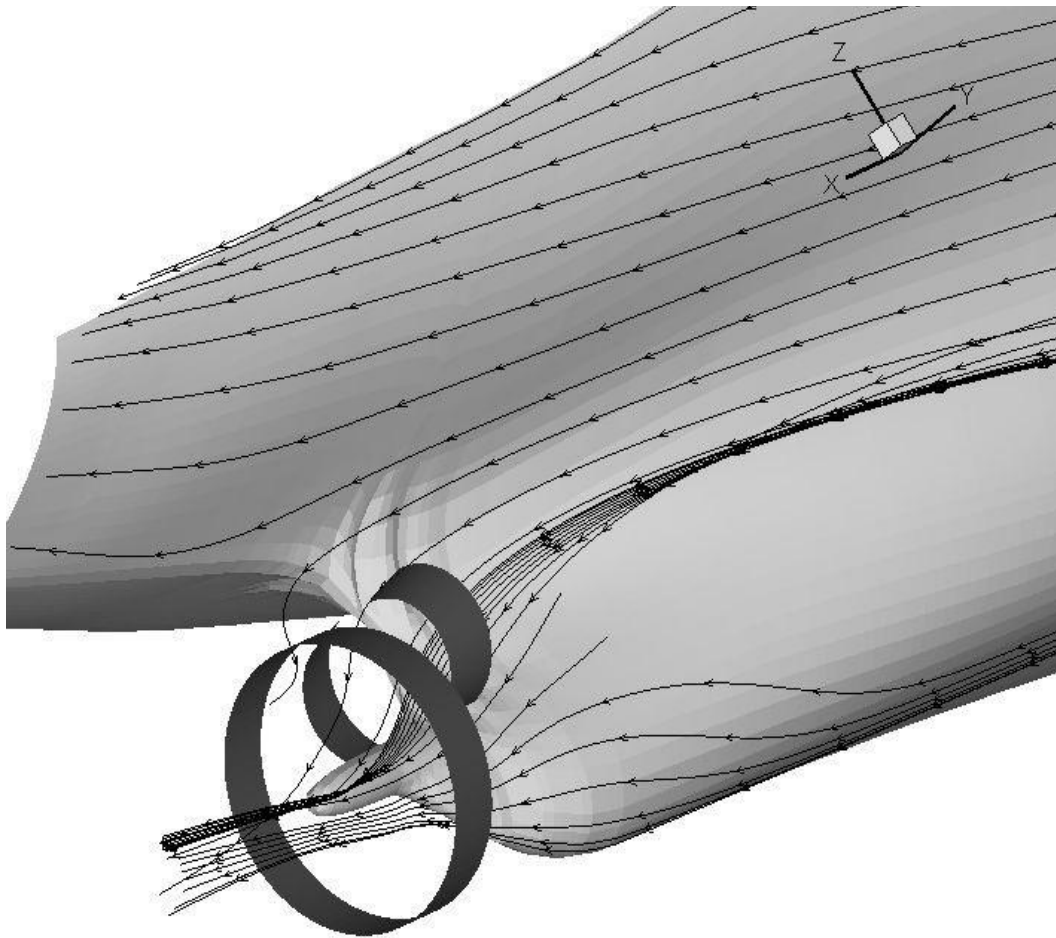


Εικόνα 14.14

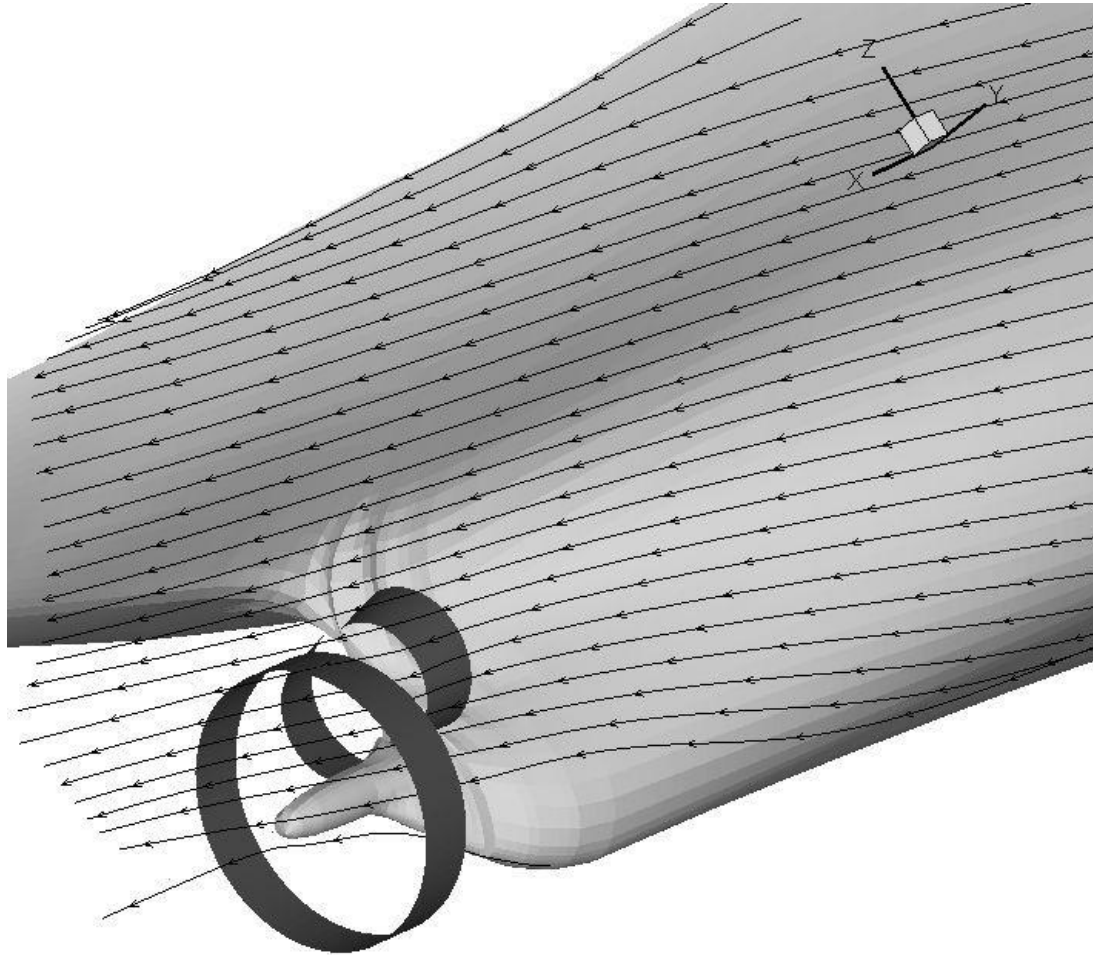


Εικόνα 14.15

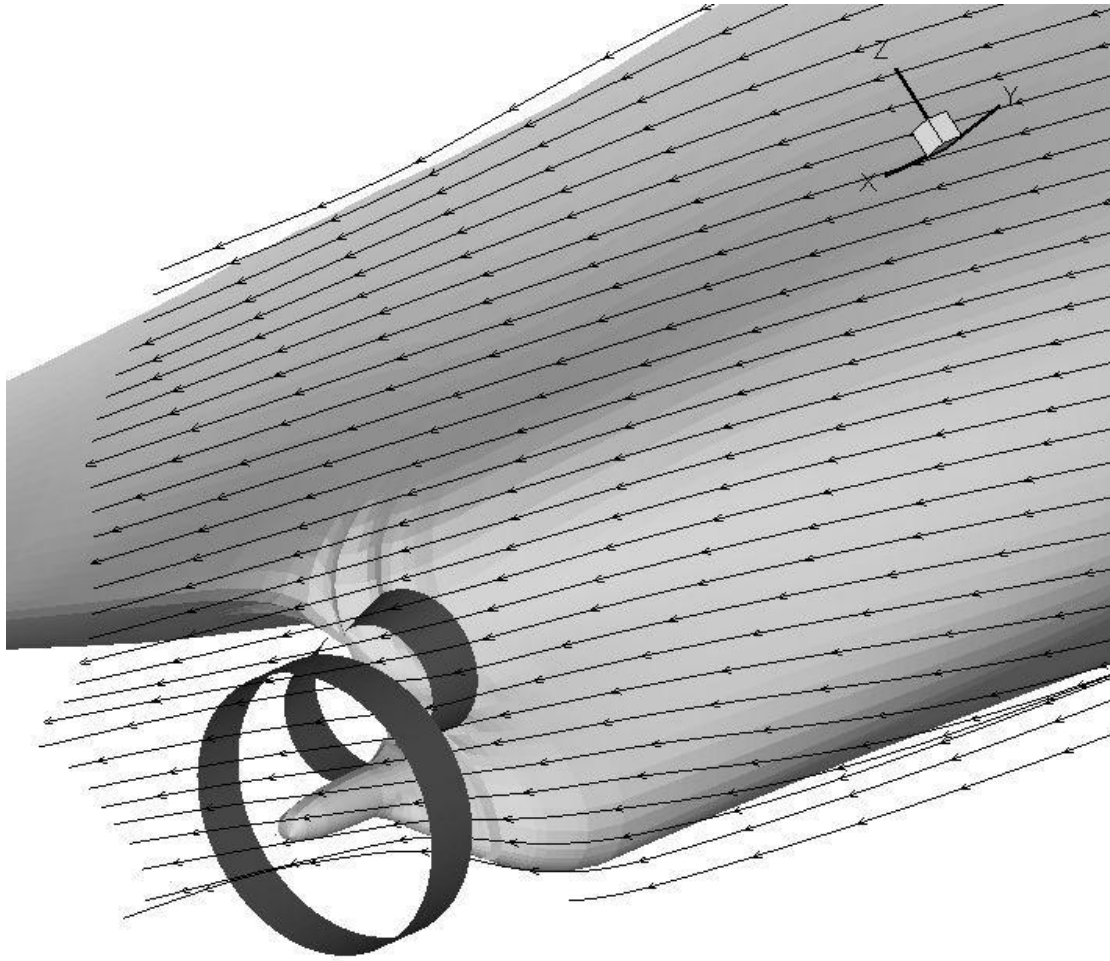
Στις επόμενες εικόνες φαίνονται οι γραμμές ροής με την έλικα σε λειτουργία. Στην πρώτη εικόνα(Εικόνα 14.16) παρουσιάζονται οι γραμμές ροής με πυκνότερη διακριτοποίηση στην περιοχή της γάστρας όπου τοποθετούνται οι ημιδακτύλιοι. Στην δεύτερη εικόνα (Εικόνα 14.17) φαίνεται η περιοχή στην εξωτερική επιφάνεια των ημιδακτυλίων ενώ στην τρίτη εικόνα(Εικόνα 14.18) οι γραμμές ροής βρίσκονται μακριά από την γάστρα.



Εικόνα 14.16

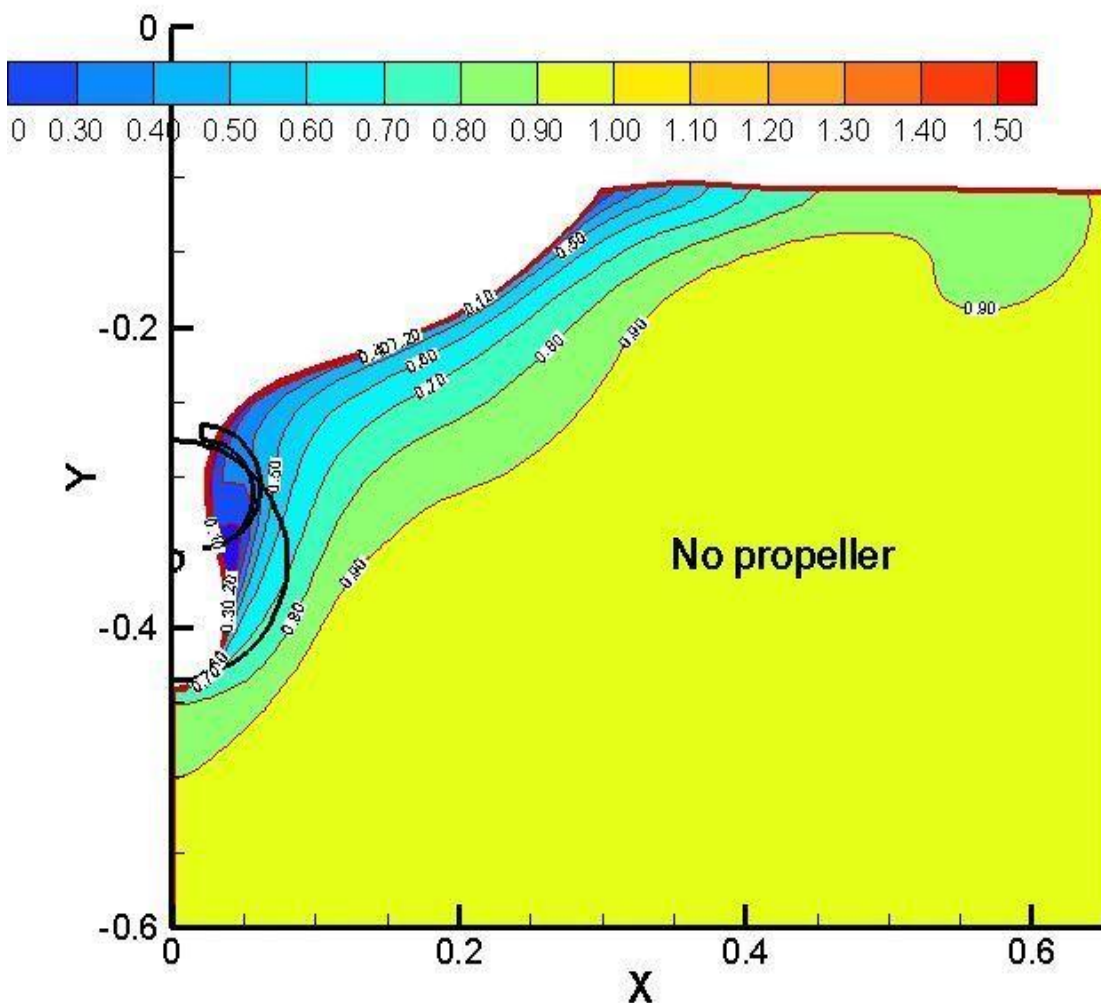


Εικόνα 14.17

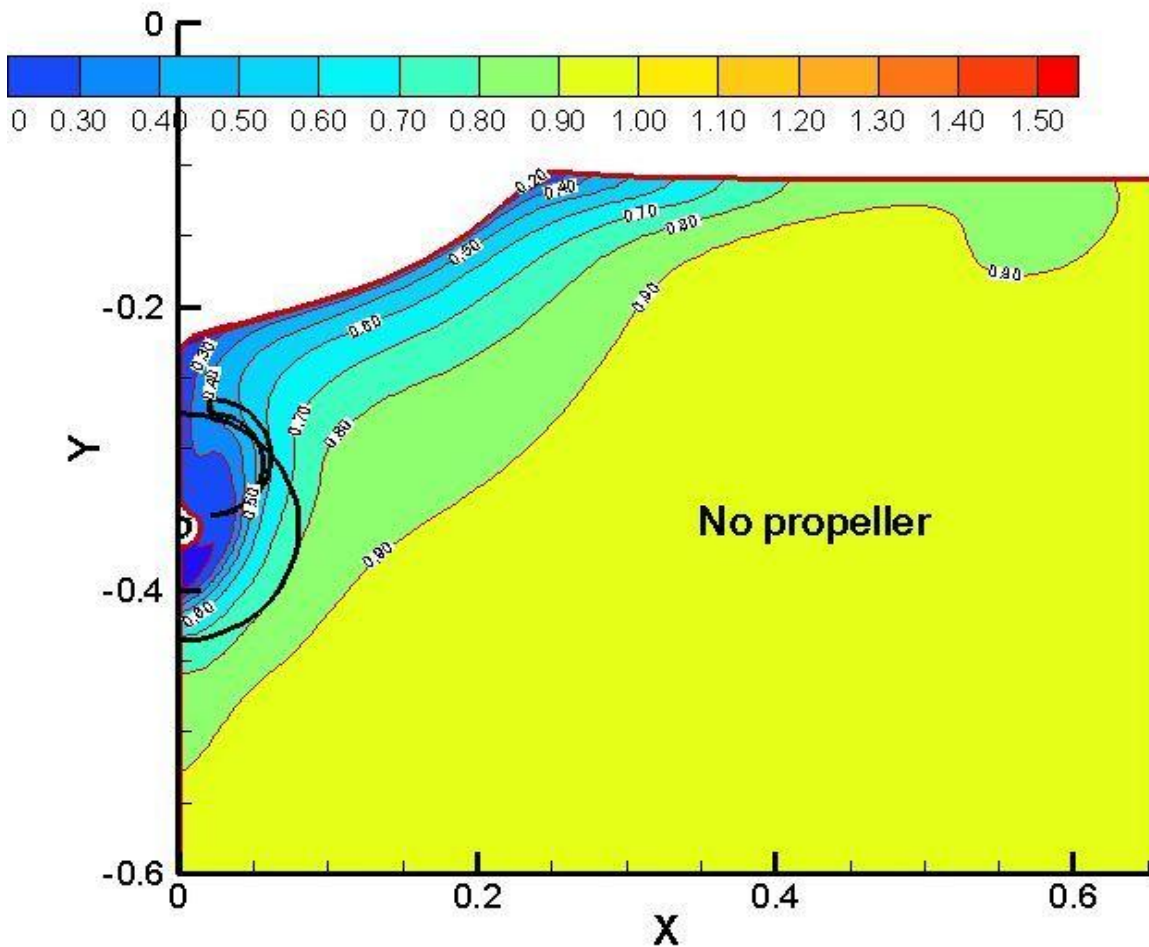


Εικόνα 14.18

Στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται οι ισοψείς καμπύλες της αξονικής ταχύτητας στην περιοχή της γάστρας πριν το σημείο τοποθέτησης των ημιδακτυλίων(Εικόνα 14.19) αλλά και στην περιοχή της έλικας(Εικόνα 14.20). Και τα δυο αυτά διαγράμματα αφορούν το πλοίο χωρίς την έλικα. Τα ίδια διαγράμματα αλλά για το πλοίο με την έλικα σε λειτουργία παρουσιάζονται παρακάτω(Εικόνα 14.21 και 14.22).

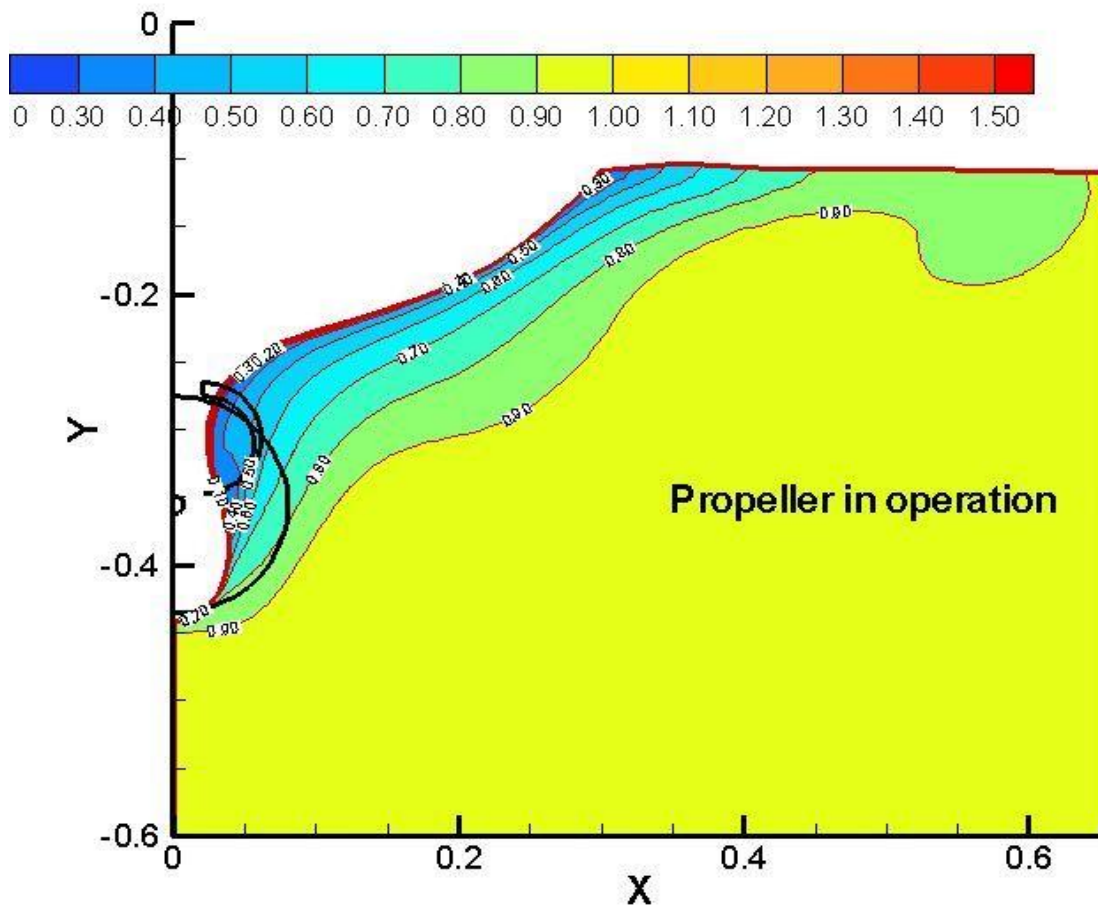


Εικόνα 14.19

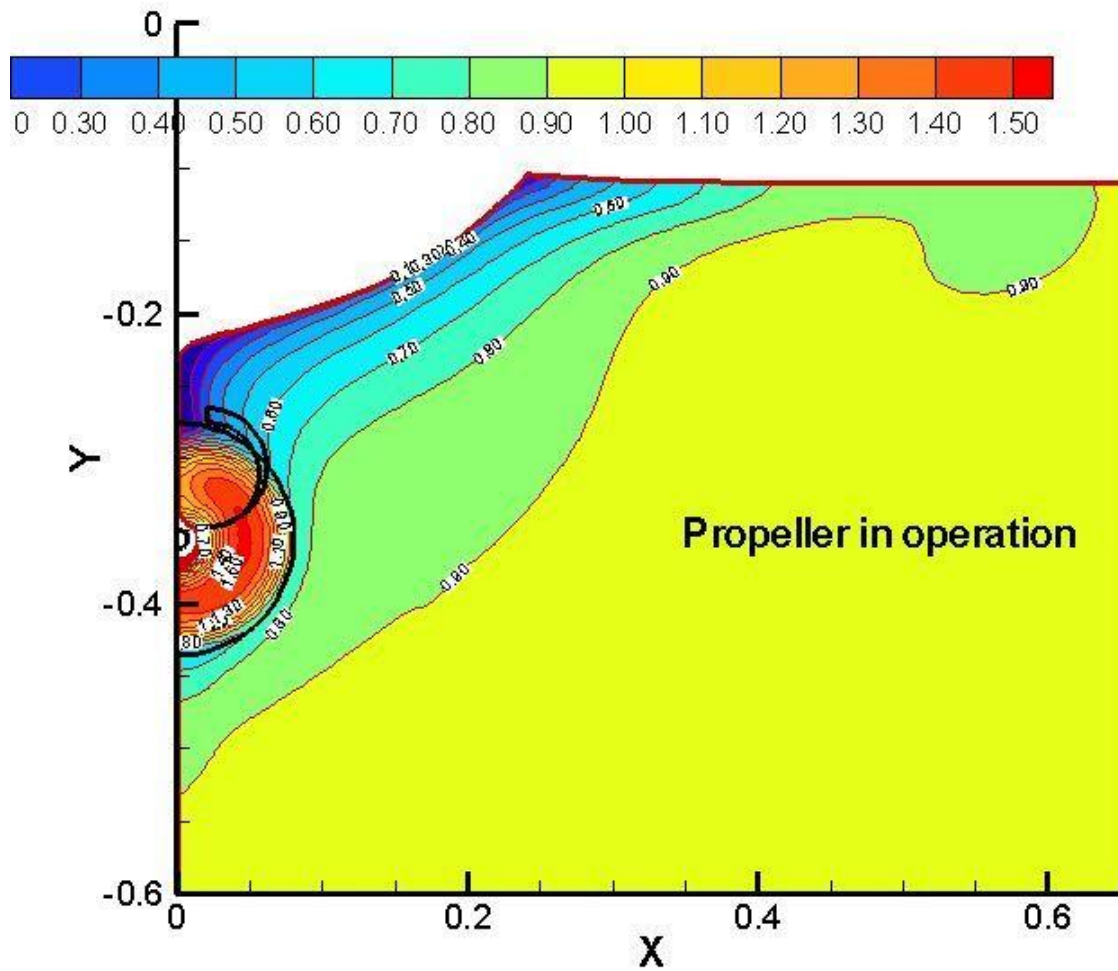


Εικόνα 14.20

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό πως η περιοχή της γάστρας στην πρύμνη όπου παρουσιάζεται η χαμηλότερη ταχύτητα της ροής συμπίπτει με την περιοχή που φάνηκε και από το πείραμα παρατήρησης των γραμμών ροής στο μοντέλο στο Κεφάλαιο 8.

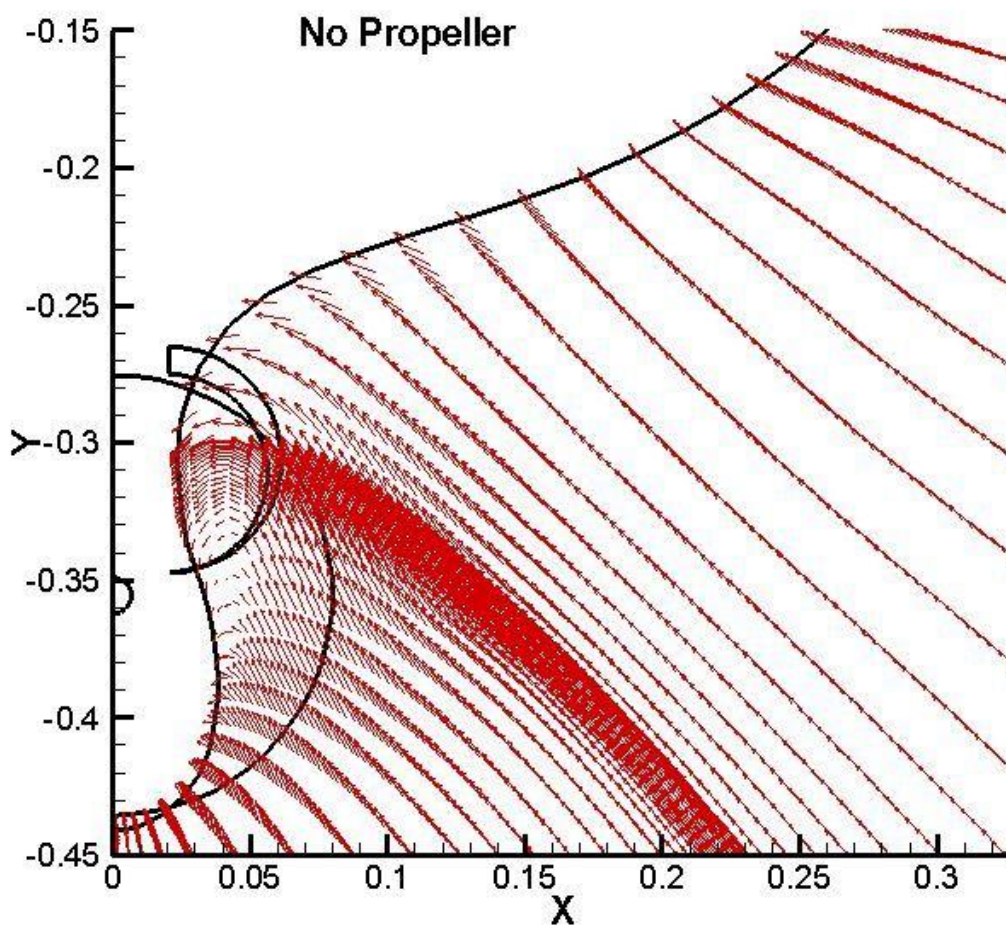


Εικόνα 14.21

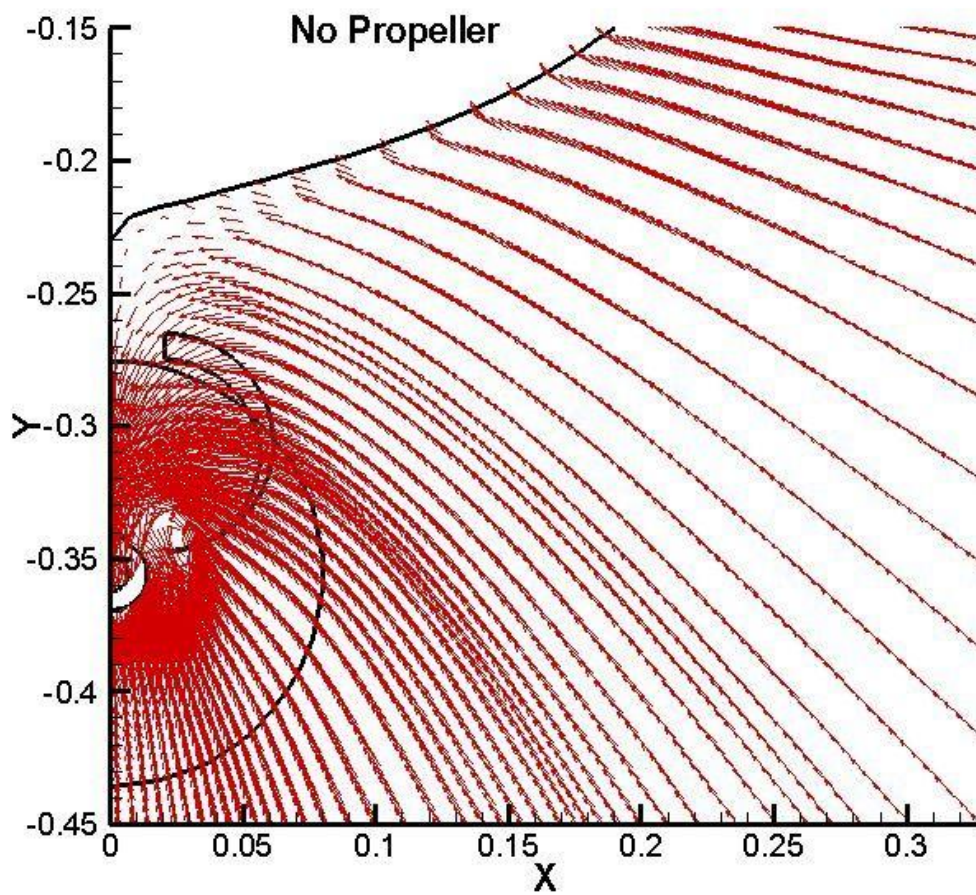


Εικόνα 14.22

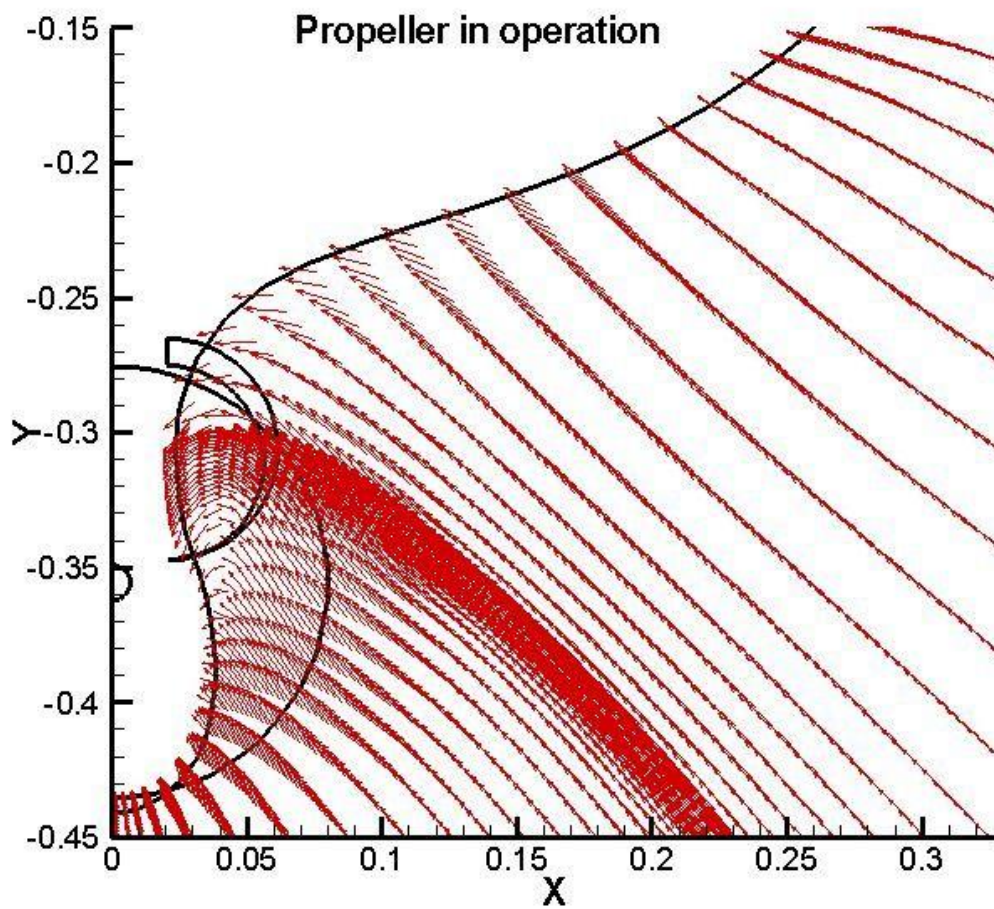
Τέλος στις Εικόνες 14.23 και 14.24 παρουσιάζεται η εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας πριν το σημείο τοποθέτησης των ημιδακτυλίων και μετά αντίστοιχα, χωρίς την παρουσία της έλικας. Δυο όμοια διαγράμματα με μοναδική διαφορά την λειτουργία της έλικας είναι αυτά που φαίνονται στις Εικόνες 14.25 και 14.26.



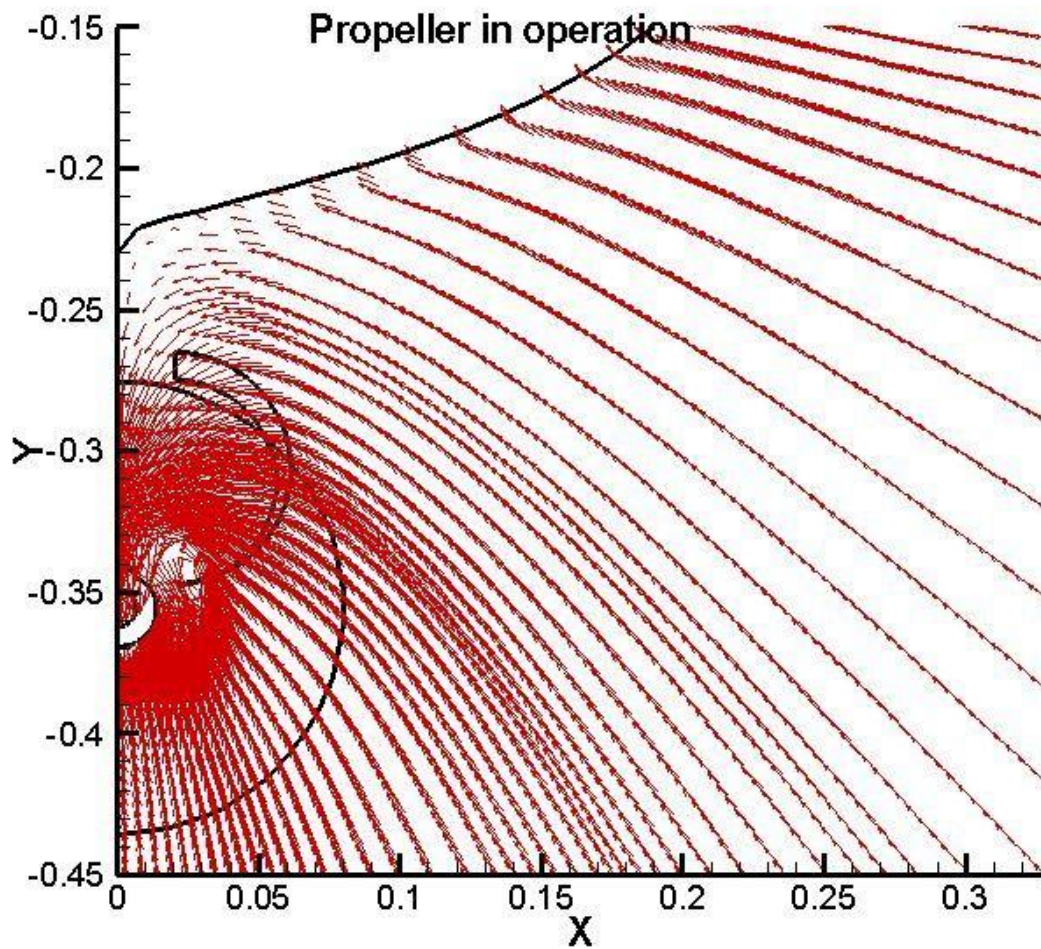
Εικόνα 14.23



Εικόνα 14.24



Εικόνα 14.25



Εικόνα 14.26

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- H. Schneekluth and V. Bertram, "Ship Design for Efficiency and Economy", Second edition, Butterworth-Heinemann, 1998
- ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, 'Testing and extrapolation methods-Resistance Test', 2002
- ITTC-Recommended Procedures and Guidelines, "1978 ITTC Performance Prediction Method", 2011
- Φυλλάδιο 9, "Υπολογισμός αντίστασης με την μέθοδο Lap-Keller"
- George Tzabiras-Kostantinos Kontogiannis, "An integrated method for predicting the hydrodynamic resistance of low-Cb ships", Computer Aided Design, 2009
- Γ. Πολίτης, "Αντίσταση και πρόωση πλοίου", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008
- Θ. Λουκάκης-Γ.Τζαμπίρας-Π.Πέρρας, "Υδροστατική και Ευστάθεια Πλοίου", Τόμος Β, Αθήνα 2000