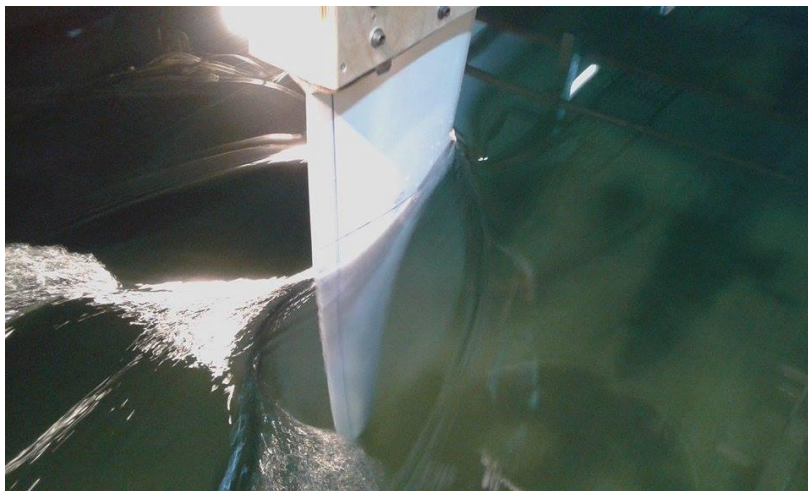


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:
"ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΑΡΙΝΑ
ΙΣΤΙΟΠΛΟΪΚΟΥ "



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:ΚΑΘΗΓΗΤΗΣΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΖΑΜΠΙΡΑΣ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ : ΣΑΣΣΑΝΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ : 08112019

ΕΞΑΜΗΝΟ : 10^ο

Αθήνα 2017

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

1. Εισαγωγή	6
1.1 Γενικές πληροφορίες ιστιοπλοϊκών σκαφών	6
1.2 Ο ρόλος της καρίνας	8
2. Ροή γύρω από σώμα και υδροδυναμικές δυνάμεις	9
2.1 Θεωρητική μελέτη-Ρευστό χωρίς συνεκτικότητα.....	9
2.2 Πραγματικό ρευστό	9
3. Χαρακτηριστικά και υδροδυναμική μελέτη καρίνας ιστιοπλοϊκού.....	11
3.1 Βασικές αρχές λειτουργίας της καρίνας	11
3.2 Ανωστική δύναμη Lift	12
3.3 Πραγματικές συνθήκες/τρισεπίπεδο πρόβλημα.....	14
3.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά καρίνας.....	15
3.5 Κριτήρια επιλογής διατομής NACA.....	19
4. Διεγέρτες τύρβης.....	24
4.1 Ομοιότητα	24
4.2 Ρόλος του διεγέρτη τύρβης	25
4.3 Τύποι διεγερτών τύρβης.....	28

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

5. Πειραματική διαδικασία	30
5.1 Περιγραφή.....	30
5.2 Επιλογή διατομής NACA	30
5.3 Κατασκευή καρίνας	31
5.4 Δυναμόμετρο και Διαιρέτης.....	35
5.5 Ευθυγράμμιση καρίνας με την υπόλοιπη διάταξη.....	38
5.6 Διεξαγωγή πειραμάτων	42
5.7 Βαθμονομηση δυναμομέτρου	43

5.7.1 Ευθυγράμμιση συστήματος βαθμονόμησης	43
5.7.2 Διαδικασία βαθμονόμησης	46
6. Αποτελέσματα πειραμάτων	49
6.1 Μέθοδος επεξεργασίας αριθμητικών αποτελεσμάτων	49
6.2 Αριθμητικά αποτελέσματα για τους διάφορους τύπους διεγερτών τύρβης.....	51
6.2.1 Καρίνα χωρίς διεγέρτη τύρβης	52
6.2.2 Καρίνα με διεγέρτη σύρματος	56
6.2.3 Καρίνα με διεγέρτη τύπου λωρίδας άμμου.....	62
6.2.4 Καρίνα με διεγέρτη τύπου λωρίδας άμμου ίδιας τραχύτητας διπλού πλάτους	63
7. Συμπεράσματα	65
7.1 Αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων	65
7.2 Σχολιασμός	70
Επίλογος.....	71
Βιβλιογραφία	72

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Γεώργιο Τζαμπίρα, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου και για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, Δ. Λιαροκάπη (μέλος Ε.ΤΕΠ), Ι.Τραχανά (μέλος Ε.ΤΕΠ), Φ. Κασάπη (μέλος Ε.ΔΙΠ) και Γ.Μυλωνά (μέλος Ε.ΤΕΠ). Ευχαριστώ τους φίλους(ες) και συμφοιτητές μου για την ηθική υποστήριξή τους.

Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στην οικογένεια μου για την ολόψυχη υποστήριξή της όλα αυτά τα χρόνια και της αφιερώνω αυτή την εργασία.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα της υδροδυναμικής μελέτης μοντέλου καρίνας ιστιοπλοϊκού σκάφους. Η καρίνα μελετάται μεμονωμένα και ξεχωριστά από το υπόλοιπο ιστιοπλοϊκό σκάφος έτσι ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της σε συνθήκες πειραμάτων σε δεξαμενή, ως αυτόνομο στοιχείο αφού η ίδια συμβάλλει σημαντικά στην ολική συμπεριφορά του σκάφους.

Η εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται αναφορά στα θεωρητικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για την διεξαγωγή των πειραμάτων και την ολοκληρωμένη επισκόπηση των αποτελεσμάτων. Αρχικά παρουσιάζονται γενικά στοιχεία ιστιοπλοϊκών σκαφών με ιδιαίτερη έμφαση στον ρόλο της καρίνας. Εν συνεχεία, η εργασία πραγματεύεται θέματα ροής ρευστού γύρω από πτερύγιο χρησιμοποιώντας τις βασικές αρχές της αερο/υδροδυναμικής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει. Αναλυτική παρουσίαση γίνεται γύρω από την ανωστική δύναμη (lift), καθώς και της παρουσίας διαφόρων ειδών αντίστασης των πτερυγίων. Επιπροσθέτως, τίθεται το ζήτημα της χρήσης διεγερτών τύρβης στο πείραμα έτσι ώστε να διασφαλισθούν ίδιες συνθήκες πειραμάτων στην δεξαμενή με την πραγματική κατάσταση της θάλασσας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται εκτενής σχολιασμός γύρω από την καταλληλότητα κάθε είδους διεγέρτη αφού η καρίνα παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις διάφορες αλλαγές του ροϊκού πεδίου που την περιβάλλει. Τέλος, παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μία καρίνας ιστιοπλοϊκού και σχολιάζεται η σημασία του καθενός από αυτά στα χαρακτηριστικά της.

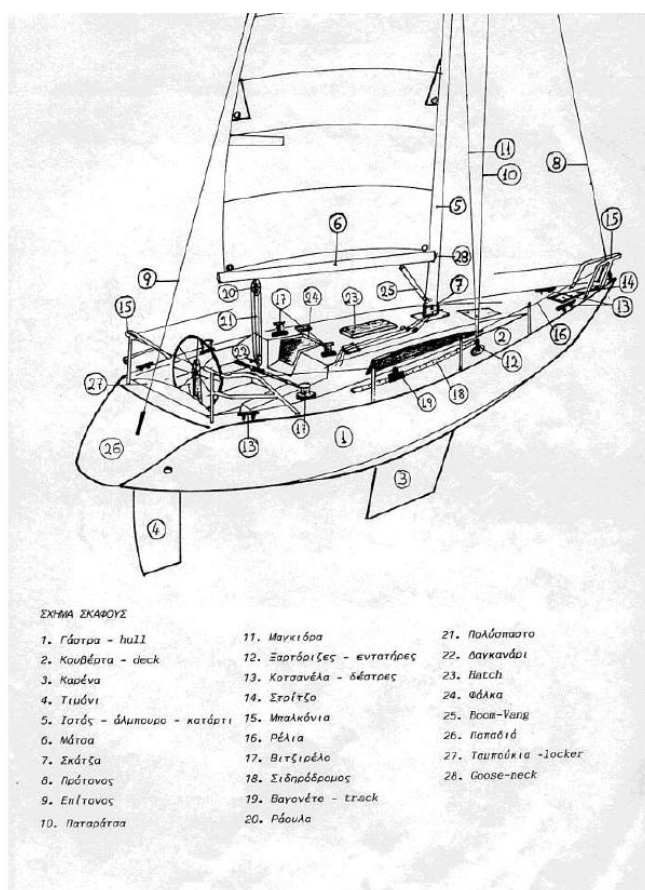
Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, που είναι και το πειραματικό παρουσιάζεται αρχικά η περιγραφή της πειραματικής διάταξης, ξεκινώντας από την επιλογή των χαρακτηριστικών της καρίνας και την κατασκευή της, έως τον σχηματισμό της ολοκληρωμένης διάταξης στο φορείο της δεξαμενής. Ακολουθεί περιγραφή του τρόπου διεξαγωγής των πειραμάτων καθώς και αναφορά στις δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν καθώς και πως αυτές ξεπεράστηκαν στα διάφορα στάδια της εργασίας.

Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα στα οποία περιλαμβάνονται διαγράμματα συνολικών αποτελεσμάτων. Επιπλέον, γίνεται η σύγκριση των τύπων διεγερτών τύρβης στην υδροδυναμική συμπεριφορά της καρίνας με σκοπό την ορθή χρήση τους σε μελλοντικά πειράματα σε δεξαμενή.

1.Εισαγωγή

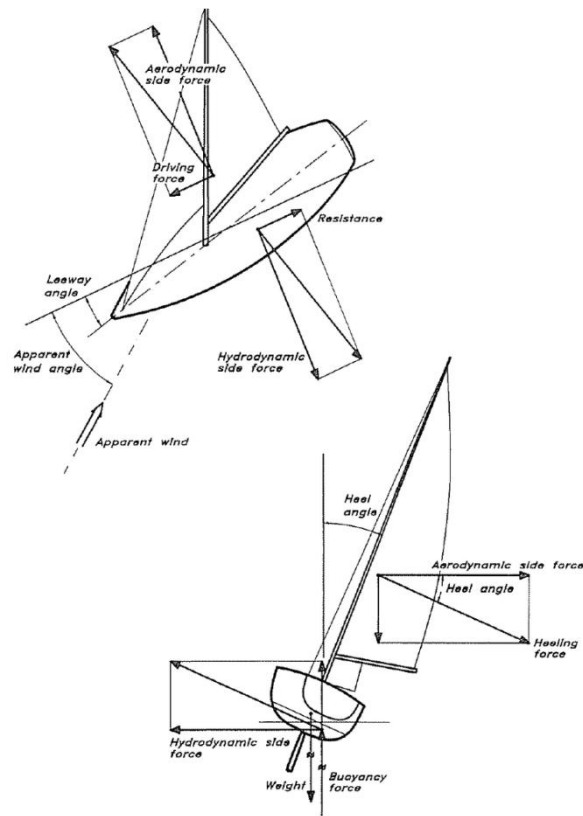
1.1 Γενικές πληροφορίες ιστιοπλοϊκών σκαφών

Τα ιστιοπλοϊκά σκάφη χρησιμοποιούνται ως σκάφη αναψυχής αλλά και ως αγωνιστικά σκάφη, γεγονός το οποίο προϋποθέτει την λεπτομερή αερο/υδροδυναμική σχεδίασή τους. Σε αγωνιστικές συνθήκες, κάθε είδους χαρακτηριστικό που είναι δυνατόν να επηρεάσει την συμπεροφορά του σκάφους πρέπει να ληφθεί υπόψη, έτσι ώστε το σκάφος να ανταποκρίνεται με βέλτιστο τρόπο στις απαιτήσεις του αγώνα. Επιπλέον, το ιστιοπλοϊκό αποτελεί μία ιδιαίτερη περίπτωση σκάφους καθώς συνδυάζει την αεροδυναμική με την υδροδυναμική, μέσω των πανιών και της βρεχόμενης γάστρας αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει σε διαφορετικές προσεγγίσεις της μορφολογίας του στο πέρασμα των χρόνων, καθεμία από τις οποίες οδήγησε στα αντίστοιχα συμπεράσματα, όσον αφορά την σχεδίαση. Σε αυτό το σημείο εμφανίζεται ο ρόλος των πειραματικών δεξαμενών, όπου μοντέλα σκαφών δοκιμάζονται στα χαρακτηριστικά τους με στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων που να προσεγγίζουν την συμπεριφορά σε πραγματικές συνθήκες θαλάσσης.



Εικόνα 1.1 : Σχηματική αναπαράσταση ιστιοπλοϊκού σκάφους όπου φαίνονται τα επιμέρους στοιχεία του

Η ιστιοπλοΐα βασίζεται πλήρως στην πλεύση με την ενέργεια του αέρα. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε ένα πολύπλοκο σύστημα συζευγμένων αεροδυναμικών και υδροδυναμικών δυνάμεων που τελικά κινούν το σκάφος σε κατεύθυνση και ταχύτητα ανάλογα με την φορά του αέρα και της θέσης των πανιών. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το συγκεκριμένο σύστημα σε δύο διαφορετικές όψεις:



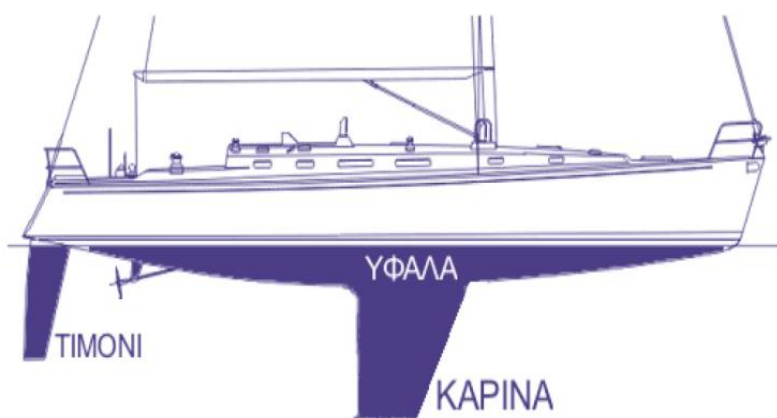
Εικόνα 1.2 : Σύστημα αερο/υδροδυναμικών δυνάμεων στο ιστιοπλοϊκό σκάφος.

Συνολικά, οι δυνάμεις που ενεργούν πάνω στο σκάφος περιλαμβάνουν τις δυνάμεις που ενεργούν στην γάστρα (υδροστατικές, υδροδυναμικές), καθώς και τις αεροδυναμικές οι οποίες οφείλονται στα πανιά. Βασικές συνιστώσες είναι η αντίσταση γάστρας(προβολή στον χάρσωνα) ,η πλάγια δύναμη στην γάστρα, η δύναμη ώσης από τα πανιά (drivingforce) και η πλάγια δύναμη από τα πανιά (aerodynamicssideforce). Λόγω της ύπαρξης και πλάγιας δύναμης στα πανιά, το σκάφος δεν κινείται σε ίδια διεύθυνση με το επίπεδο συμμετρίας του, αλλά έχει και μία ελαφρώς πλάγια κίνηση με γωνία που ορίζεται ως leewayangle (σχήμα 1.2)

1.2 Ο ρόλος τη καρίνας

Η καρίνα ενός ιστιοπλοϊκού σκάφους αποτελεί ένα κατακόρυφο πτερύγιο στο κάτω μέρος της γάστρας του πλοίου και η εφαρμογή του μοιάζει σε μεγάλο βαθμό με αυτήν ενός πηδαλίου σε ένα πλοίο. Όπως και το πηδάλιο, η καρίνα είναι συμμετρική στις δύο της πλευρές έτσι ώστε να λειτουργεί κατά τον ίδιο τρόπο σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης του νερού.

Ο σχεδιασμός της καρίνας είναι πρωτεύοντος σημασίας στα ιστιοπλοϊκά. Οι βασικές απαιτήσεις τις οποίες πρέπει να ικανοποιεί είναι δύο και η πρώτη αφορά την παραγωγή πλάγιας δύναμης ενώ η δεύτερη αφορά την διατήρηση του κέντρου βάρους του σκάφους σχετικά χαμηλά, έτσι ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική ευστάθεια. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι αεροδυναμικές δυνάμεις που προκύπτουν από τα πανιά, έχουν και μία πλάγια συνιστώσα (κατά το y), η οποία είναι αναπόφευκτο επακόλουθο του γεγονότος ότι το πανί λειτουργεί σαν αεροτομή. Η συγκεκριμένη δύναμη πρέπει να εξισορροπηθεί από το σκάφος και σε αυτό το σημείο επέρχεται ο ρόλος της καρίνας, η οποία παράγει την απαιτούμενη πλάγια δύναμη στα ύφαλα, αντίθετης φοράς από την πρώτη. Μάλιστα, η αποτελεσματικότητα της καρίνας κρίνεται σύμφωνα με την ικανότητά της να παράγει πλάγια δύναμη με όσον το δυνατό λιγότερη αντίσταση.



Εικόνα 1.3 : Η καρίνα σε πλάγια όψη ιστιοπλοϊκού σκάφους.

2 . ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΩΜΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

2.1 Θεωρητική Μελέτη- Ρευστό χωρίς συνεκτικότητα

Η αντίσταση και οι γενικότερα οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα το οποίο περιβάλλεται από κινούμενο ρευστό είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο φαινόμενο. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, είναι προτιμότερη η μελέτη αυτών των δυνάμεων όχι σαν ένα, συνολικό μέγεθος, αλλά αφού πρώτα αυτό συμβατικά διασπαστεί σε επιμέρους συνιστώσες. Παρακάτω συνοψίζονται τα είδη των συνιστωσών των υδροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα από το περιβάλλον του ρευστού.

Σε κάθε σημείο επαφής ενός στερεού σώματος με το περιβάλλον ρευστό ασκείται μία στοιχειώδης δύναμη, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως η συνισταμένη μίας κάθετης στην επιφάνεια συνιστώσας, που οφείλεται στην πίεση, καθώς και μίας εφαπτόμενης στην επιφάνεια συνιστώσας, που οφείλεται στην συνεκτικότητα του ρευστού. Η συνιστώσα της δύναμης που παράγεται με ολοκλήρωση των εφαπτομενικών δυνάμεων στην επιφάνεια του πτερυγίου αποτελεί την αντίσταση τριβής.

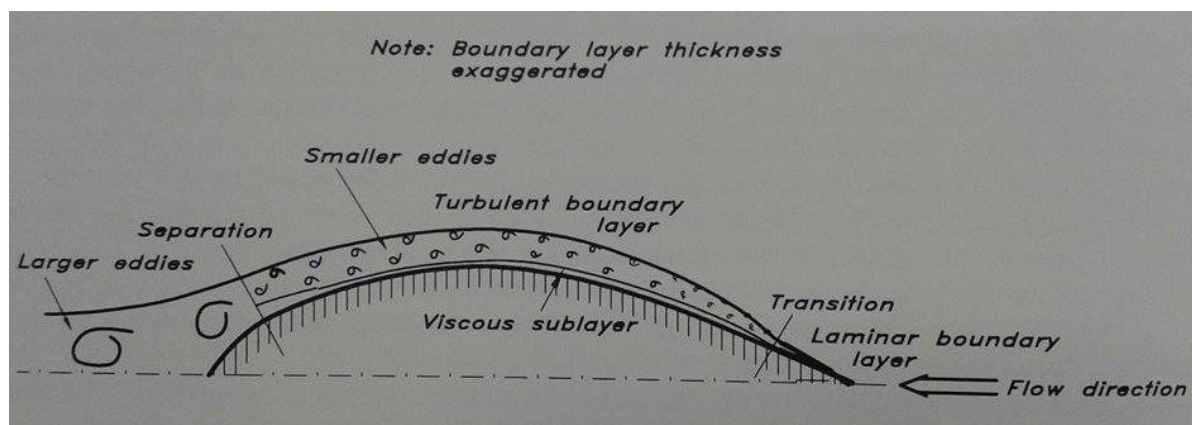
Όταν το ρευστό είναι μη πραγματικό, δηλαδή δεν έχει συνεκτικότητα, καθώς και όταν το σώμα είναι πλήρως βυθισμένο στο νερό, δηλαδή δεν έχουμε ελεύθερη επιφάνεια, έχουμε και την απλούστερη περίπτωση ροής γύρω από το σώμα. Εφόσον δεν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια, δεν έχουμε ρευστά διαφορετικών πυκνοτήτων σε επαφή και επομένως δεν παράγονται κυματισμοί, απαλείφοντας έτσι την αντίσταση κυματισμού. Επίσης, καθώς το ρευστό είναι μη συνεκτικό, οι δυνάμεις τριβής θα είναι μηδενικές και οι μόνες δυνάμεις που θα υπάρχουν θα είναι αυτές λόγω πίεσης, οι οποίες όμως όντας κάθετες στη επιφάνεια του σώματος από τις δύο πλευρές και λόγω συμμετρίας θα αλληλοεξουδετερώνονται. Η συνολική λοιπόν δύναμη που ασκεί το ρευστό στο σώμα θα είναι μηδενική.[3]

2.2 Πραγματικό ρευστό

Η παραπάνω περίπτωση παρουσιάζει μόνο θεωρητικό ενδιαφέρον καθώς όλα τα ρευστά έχουν συνεκτικότητα και άρα ισχύει και η συνθήκη της μη ολίσθησης, σύμφωνα με την οποία τα υλικά σημεία επαφής του ρευστού με την επιφάνεια του σώματος πρέπει να έχουν την ίδια ταχύτητα. Κατά αυτόν τον τρόπο και λόγω συνεκτικότητας, τα αμέσως επόμενα στρώματα ρευστού θα τεθούν σε κίνηση ίδιας διεύθυνσης με το σώμα, με σταδιακά μειούμενης ταχύτητας όσον μεγαλώνει η απόσταση του ρευστού από το σώμα, έως ότου η ταχύτητα του ρευστού να μην επηρεάζεται από την ταχύτητα του σώματος. Έτσι δημιουργείται το οριακό στρώμα (σχήμα 2.1) το οποίο επηρεάζει άμεσα τις συνιστώσες της αντίστασης και της άνωσης στη περίπτωση που μας ενδιαφέρει. Συγκεκριμένα το οριακό

στρώμα, του οποίου το πάχος σταδιακά αυξάνεται κατά το μήκος του σώματος και κατά την φορά της ροής, αλλάζει εικονικά το σχήμα του τελευταίου με αποτέλεσμα το πεδίο πιέσεων να μεταβάλλεται και έχουμε την αύξηση την διαφοράς της πίεσης στην μπροστά(πρώρα) και στην πίσω(πρύμα) μεριά του σώματος με επακόλουθο να αυξάνεται σημαντικά η αντίσταση.

Ανάλογα με το σχήμα του σώματος, την τραχύτητα της επιφάνειάς του, την γωνία προσπτώσεως και τον αριθμό Reynolds, η ροή μπορεί να αποκολληθεί σε κάποιο σημείο, το οποίο ονομάζεται σημείο αποκόλλησης(separationpoint), δημιουργώντας τοπικά δίνες που δεν μπορούν να ακολουθήσουν την κανονική πορεία του ρευστού. Κατά αυτόν τον τρόπο μειώνεται η πίεση πίσω από το σημείο αποκόλλησης και έτσι η αντίσταση αυξάνεται.



[Σχήμα 2.1 : Διαφορετικές περιοχές της ροής γύρω από την γάστρα ενός πλοίου \[2\]](#)

Επιπλέον, όταν η ροή αποκολλάται και ενώ βρίσκεται στην επιφάνεια του σώματος, αλλάζει και το πεδίο των επαφαινετικών τάσεων, καθώς τμήματα της ροής αναστρέφονται και απομακρύνονται από την επιφάνειά του. Τέλος, έχουμε και την δημιουργία δινών στην ροή που μπορούν να προσομοιαστούν με ένα κανάλι συγκεντρωμένης ενέργειας που εκπέμπεται από το σώμα, γεγονός το οποίο οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της αντίστασης η οποία εκφράζεται ως απώλειες ενέργειας. Μάλιστα, αυτές οι δίνες εκπέμπονται από την επιφάνεια του σώματος με συγκεκριμένη συχνότητα η οποία και προκαλεί δονήσεις στην κατασκευή. Εάν αυτές οι συχνότητες πλησιάζουν την ιδιοσυχνότητα του τελευταίου, έχουμε ισχυρή ταλάντωση και μηχανική καταπόνηση. Το παραπάνω φαινόμενο μας ενδιαφέρει για την περίπτωση μας πτέρυγας, όπου λόγω των μικρών διαστάσεων και των μεγάλων δυνάμεων που ασκούνται, είναι περισσότερο επιρρεπής σε καταπονήσεις.

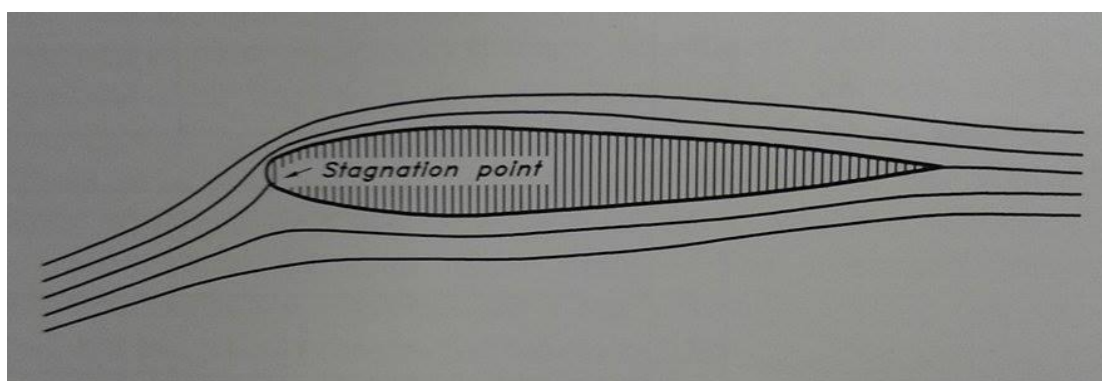
Στην προκειμένη περίπτωση μας ενδιαφέρει η υδροδυναμική μελέτη ενός πτερυγίου, γύρω από το οποίο ρέει ρευστό με σταθερή ταχύτητα. Το πτερύγιο δεν είναι πλήρως βυθισμένο, οπότε έχουμε και την επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας στο σύστημα των δυνάμεων, η οποία και θα επεξηγηθεί παρακάτω.

3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΡΙΝΑΣ ΙΣΤΙΟΠΛΟΪΚΟΥ

3.1 Βασικές αρχές λειτουργίας καρίνας

Στην σχεδίαση των καρίνων ιστιοπλοϊκών σκαφών βρίσκουν εφαρμογή οι βασικές αρχές της αεροδυναμικής συμπεριφοράς πτερυγίων που περιβάλλονται από κινούμενο αέρα. Παρόλο που τα περισσότερα πτερύγια που αφορούν εναέρια λειτουργία βρίσκουν εφαρμογή σε ταχύτητες που το περιβάλλον ρευστό δεν μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστο (περισσότερο από 100 m/s, καθώς από αυτήν την ταχύτητα και μετά η ταχύτητα του ήχου είναι συγκρίσιμη με την ταχύτητα του ήχου στον αέρα), είναι γεγονός ότι πολλές πληροφορίες μπορούν να αποκομισθούν για την περίπτωση που μελετάμε, δηλαδή την συμπεριφορά του πτερυγίου σε υδάτινες συνθήκες υπό την επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας. Να υπενθυμίσουμε ότι η ταχύτητα του ήχου στο νερό είναι 4.33 φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου στον αέρα, καθώς και ότι η τάξη μεγέθους των ταχυτήτων του ρευστού που μας ενδιαφέρουν είναι κατά πολύ μικρότερες από την ταχύτητα του ήχου. Επομένως, το ρευστό θεωρείται με μεγάλη ακρίβεια ασυμπίεστο.

Εάν κάνουμε την θεωρητική υπόθεση ότι το πτερύγιο έχει άπειρο μήκος, με σταθερή διατομή και ότι η διεύθυνση της ροής είναι παράλληλη με το άνοιγμά του, δηλαδή το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας του πτερυγίου είναι παρράλληλο με την διεύθυνση της ροής, υπάρχει ένα σημείο στην εμπρός όψη στο οποίο η ταχύτητα ρευστού είναι μηδενική, το λεγόμενο στάσιμο σημείο (stagnation point). Το σημείο αυτό βρίσκεται κοντά στο χείλος πρόσπτωσης και από εκεί και έπειτα η ροή διακλαδώνεται προς δύο κατευθύνσεις, ακολουθώντας τις δύο πλευρές του πτερυγίου. Η ταχύτητα στο σημείο επαφής είναι μηδενική και δεν υπάρχει ροή προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, καθώς η επιφάνεια του πτερυγίου είναι αδιαπέραστη. Ένα παρόμοιο σημείο βρίσκεται στο χείλος εκφυγής του πτερυγίου, όπου και εκεί οι ταχύτητα είναι μηδενική.



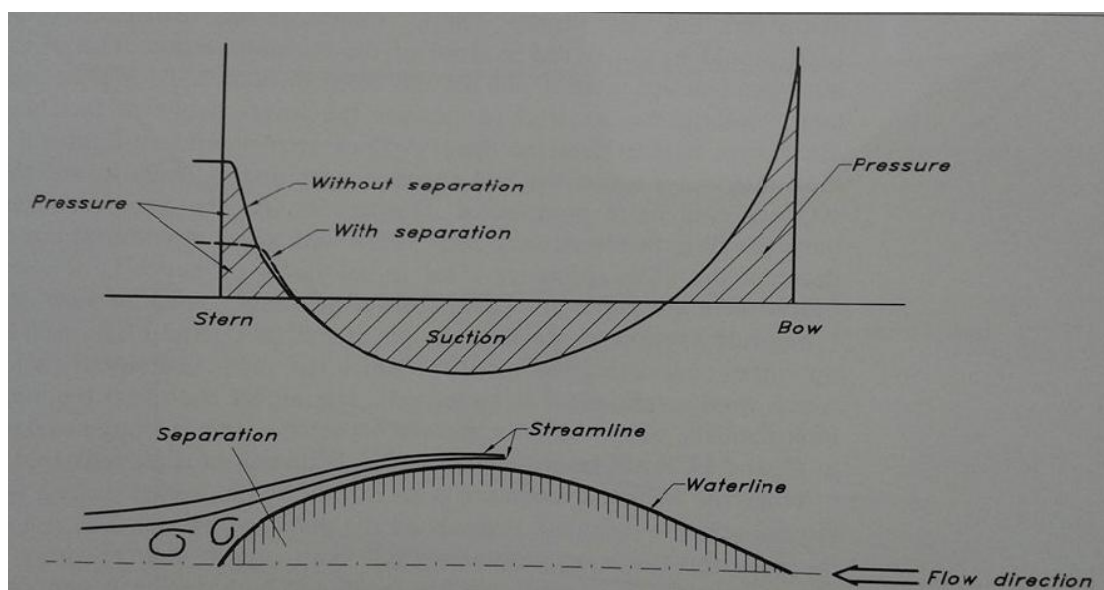
Σχήμα 3.1: Ροή γύρω από μία εγκάρσια τομή πτερυγίου[2]

Η αποκαλούμενη διδιάστατη ροή αφορά τις παραπάνω συνθήκες στις οποίες τα χαρακτηριστικά της ροής σε οποιαδήποτε τομή του πτερυγίου είναι ίδια. Στην πράξη, αυτό

επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός πτερυγίου σταθερής διατομής μεταξύ δύο τοιχωμάτων που εμποδίζουν το ρευστό να ξεφύγει από τα άκρα του.

3.2 Ανωστική δύναμη (Lift)

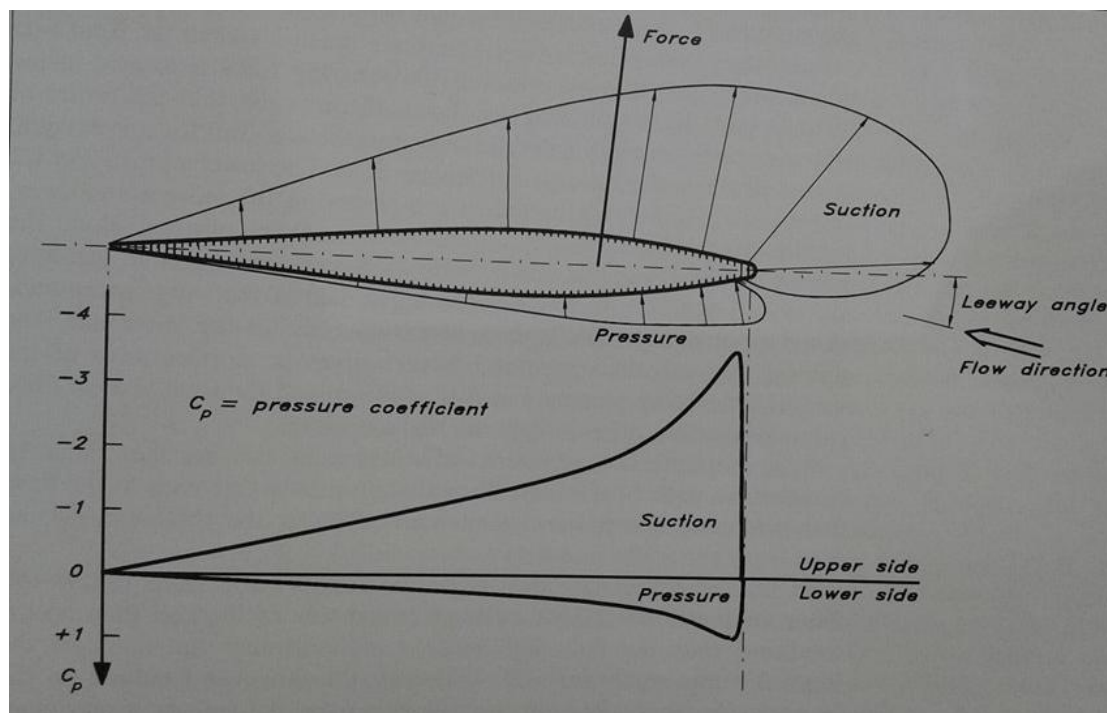
Τα περισσότερα πτερύγια που χρησιμοποιούνται ως καρίνες ιστιοπλοϊκού είναι συμμετρικά και αυτό γιατί πρέπει να λειτουργούν το ίδιο και από τις δύο πλευρές, δηλαδή να υπάρχει συμμετρία στις υδροδυναμικές δυνάμεις στις διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης του νερού. Σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης, η κατανομή της πίεσης κατά το μήκος μια εγκάρσιας τομής, μοιάζει αυτήν που αναπτύσσεται γύρω από ένα πλοίο σε οριζόντια τομή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2. Όπως παρατηρείται, υπάρχει υψηλή πίεση στην πλώρη και στην πρύμνη, ενώ παρατηρείται πτώση πίεσης προς τα αρνητικά στο ενδιάμεσο τμήμα της γάστρας. Εάν είχαμε άτριβη ροή, δηλαδή ένα μη πραγματικό ρευστό, οι δυνάμεις πίεσης στην πλώρη θα εξισοροπούσαν πλήρως τις δυνάμεις πίεσης στην πρύμνη, οδηγώντας έτσι σε μηδενική δύναμη πίεσης συνολικά. Το οριακό στρώμα επηρεάζει όμως την κατανομή της πίεσης, ιδιαίτερα στην πρύμνη όπου και είναι παχύτερο, μειώνοντας έτσι την πίεση και αυξάνοντας την αντίσταση.



Σχήμα 3.2: Κατανομή πίεσης με και χωρίς αποκόλληση της ροής γύρω από γάστρα πλοίου[2]

Στην περίπτωση όπου η διεύθυνση της ροής διαφέρει από την διεύθυνση του επιπέδου συμμετρίας της καρίνας, δηλαδή υπάρχει γωνία πρόσπτωσης διάφορη του μηδενός, το πεδίο πίεσης αλλάζει αισθητά και γίνεται μη συμμετρικό. Η ροή χωρίζεται σε δύο τμήματα, το ένα εκ το οποίων έρχεται σε επαφή με τμήμα του πτερυγίου με μεγάλη καμπυλότητα, πάντα σε σχέση με την γωνία προσπτώσεως, ενώ το άλλο τμήμα ακολουθεί μια πιο ήπια μεταβολή στην διεύθυνση ροής του. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα του τμήματος της ροής που αναγκάζεται να ακολουθήσει την επάνω πλευρά της τομής του πτερυγίου, όπως κινείται από το στάσιμο σημείο, έχει υψηλότερη τιμή από την αντίστοιχη ταχύτητα του κάτω μέρους της. Διαφορετικό τότε πεδίο πιέσεων αναπτύσσεται στην άνω

και κάτω πλευρά του πτερυγίου, αφού σύμφωνα με την εξίσωση του Bernoulli η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται σε βάρος τις πίεσης ή αντίστροφα. Σαν αποτέλεσμα, στην πλευρά όπου υπάρχει η μεγάλη καμπυλότητα και έχουμε την αύξηση της ταχύτητας, έχουμε μεγάλη πτώση τις πιέσεως η οποία και λαμβάνει αρνητικές τιμές (υποπίεση). Η πίεση στην κάτω πλευρά είναι θετική, με μικρότερη όμως απόλυτη τιμή απο την πίεση στην μεριά της υποπίεσης.



[Σχήμα 3.3: Κατανομή Πίεσης γύρω από μία εγκάρσια τομή πτερυγίου\[2\]](#)

Όπως παρατηρείται και στο σχήμα 3.3, τόσο η πίεση όσο και η υποπίεση λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές του κοντά στο χείλος πρόσπτωσης και σταδιακά μειώνονται όσο η ροή πλησιάζει το χείλος εκφυγής. Επίσης, στο σχήμα η αρνητική πίεση(υποπίεση) αυξάνει προς τα άνω στον κατακόρυφο άξονα. Αυτό συμβαίνει για να υπάρχει αντιστοιχία στην άνω πλευρά της τομής με την άνω πλευρά του διαγράμματος κατανομής πίεσης. Η απόσταση μεταξύ δύο σημείων τομής μίας κατακόρυφης στον άξονα X με τις καμπύλες θετικής και αρνητικής πίεσης, είναι αντιπροσωπευτική της κάθετης δύναμης που αναπτύσσεται λόγω διαφοράς πιέσεων σε κάθε θέση της τομής, κατά το μήκος της χορδής.

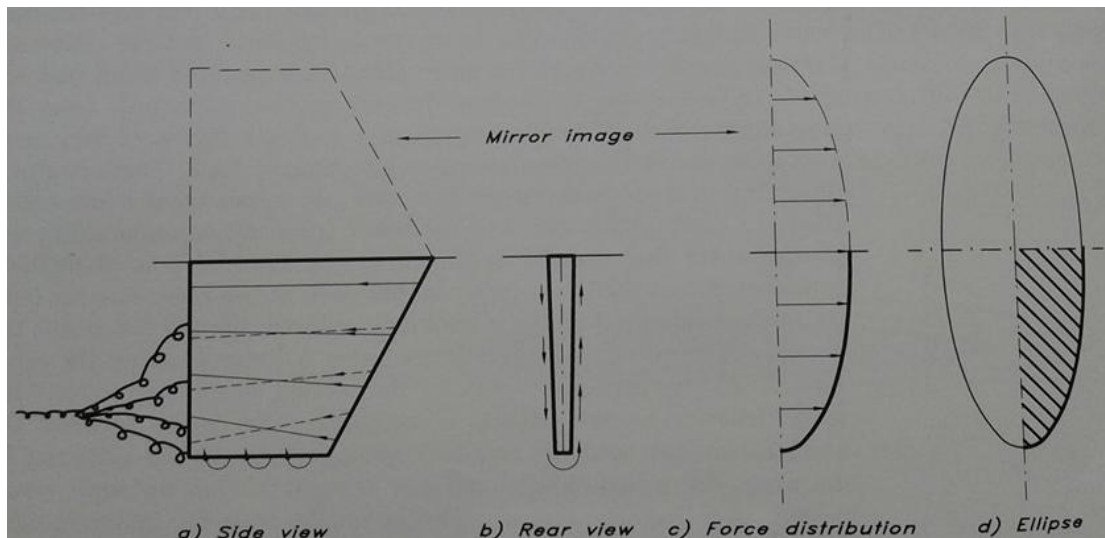
Εάν τώρα οι δυνάμεις πιέσεως προστεθούν συνολικά, προκύπτει μία δύναμη λόγω υποπίεσης η οποία έχει φορά προς την άνω μεριά του πτερυγίου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3. Η δύναμη αυτή ονομάζεται άνωση (lift) και οφείλεται στις διαφορετικές κατανομές της πίεσης στις δύο πλευρές του πτερυγίου. Η γωνία μεταξύ της δύναμης ανώσεως και της διεύθυνσης της ροής εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα του πτερυγίου. Για μία διδιάστατη περίπτωση χωρίς τριβές (μη πραγματικό ρευστό), η γωνία αυτή θα ήταν 90 μοίρες. Σε μία πραγματική περίπτωση όμως η γωνία αυτή μειώνεται (με φορά προς την πίσω όψη του πτερυγίου) μειώνοντας την συνολική απόδοση του πτερυγίου σε άνωση όπως θα επεξηγηθεί και παρακάτω.

Καθώς οι πιέσεις λαμβάνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους κοντά στο χείλος πρόσπτωσης, αυτή είναι και η περιοχή του πτερυγίου που παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Μάλιστα, αποδεικνύεται θεωρητικά ότι το κέντρο πιέσεων (άρα και το σημείο εφαρμογής την άνωσης) βρίσκεται στο $1/4$ της απόστασης της χορδής της κάθε τομής από το χείλος πρόσπτωσης (για ένα συμμετρικό πτερύγιο άπειρου μήκους σε ροή χωρίς τριβή). Παρόλα αυτά, η υπόθεση ότι το κέντρο εφαρμογής της δύναμης βρίσκεται στο 25% της εκάστοτε χορδής αποτελεί μία καλή προσέγγιση για καρίνες ιστιοπλοϊκών σε συνηθισμένους λόγους επιμήκους(AR).

3.3 Πραγματικές συνθήκες/Τρισδιάστο πρόβλημα

Σε πραγματικές συνθήκες προφανώς, τα πτερύγια δεν έχουν άπειρο μήκος και συνεπώς υπάρχουν ελεύθερα άκρα που οδηγούν σε καινούργια φαινόμενα που χαρακτηρίζουν την τρισδιάστατη/πραγματική ροή. Λόγω της διαφοράς πιέσεων στις δύο πλευρές του πτερυγίου, σχηματίζεται ροή γύρω από το ελεύθερο άκρο του (tip), κάνοντας το ρευστό να κινείται από την μεριά της υψηλής στην μεριά της χαμηλής πίεσης, με εντονότερη την ροή καθώς κινούμαστε από την βάση του πτερυγίου(root) στο ελεύθερο άκρο του (tip) (Σχήμα 3.4). Δηλαδή το ρευστό που βρίσκεται στην μεριά της υψηλής πίεσης τείνει να κινηθεί προς τα κάτω, ενώ το ρευστό στη πλευρά της χαμηλής προς τα άνω(κατά την έννοια του βυθίσματος τηςκαρίνας). Κατά αυτόν τον τρόπο, οι γραμμές ροής δεν συναντώνται στο ίδιο καθ'ύψος σημείο στο χείλος εκφυγής και έτσι σχηματίζεται μία ισχυρή δίνη πίσω από το πτερύγιο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.4, όλες οι επιμέρους δίνες τείνουν να συγκεντρωθούν σε μία μεγαλύτερη η οποία περιέχει μεγάλη ενέργεια στροβιλότητας δημιουργώντας έτσι και μία νέα συνιστώσα αντίστασης, την επαγόμενη αντίσταση(induceddrag) που δρα αρνητικά στην αποτελεσματικότητα της πτέρυγας.

Επίσης, οριακά στο κάτω άκρο της καρίνας δεν μπορεί να υπάρξει διαφορά πιέσεων στις δύο πλευρές και έτσι δεν παράγεται άνωση. Αντιθέτως, στο άνω άκρο της καρίνας που βρίσκεται σε επαφή με την γάστρα του σκάφους, η ροή είναι σχεδόν ανεπηρέαστη και έτσι παράγεται ισχυρή δύναμη lift, καθώς η γάστρα δρα σαν τοίχωμα, προσομοιάζει δηλαδή την κατάστατη με την διδιάστατη περίπτωση. Στο σχήμα 3.4, η συμβολή του τοιχώματος στο πεδίο ροής προσομοιάζεται με την αντικατάσταση του τελευταίου με μία συμμετρική καρίνα ως προς την βάση της. Κατά αυτόν τον τρόπο αυξάνει φαινομενικά ο λόγος επιμήκους και προσδιορίζεται ως ενεργός λόγος επιμήκους (effectiveaspectratio, AR_e) που εν γένει είναι μεγαλύτερος από τον γεωμετρικό λόγο επιμήκους, ο οποίος θα οριστεί παρακάτω.



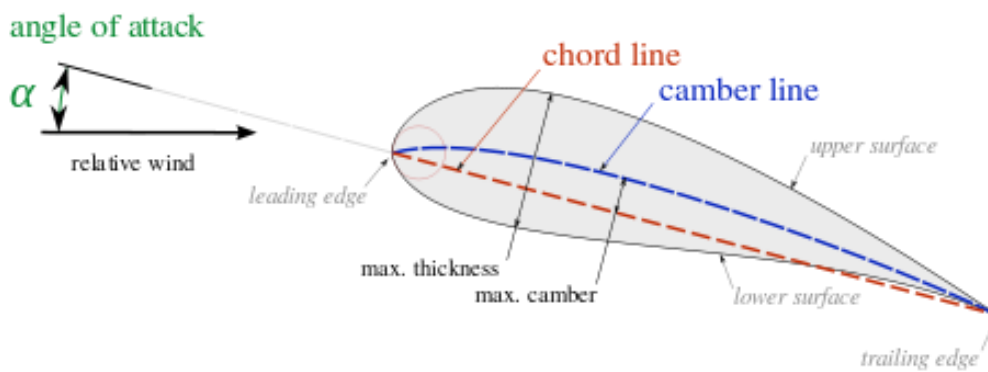
[Σχήμα 3.4 : Κατανομή δύναμης και δημιουργία δινών σε μία πτέρυγα\[2\]](#)

Η μεταβολή της παραγόμενης δύναμης ανώσεως από το άνω στο κάτω άκρο του πτερυγίου εξαρτάται από το σχήμα του προφίλ του τελευταίου και μπορεί να δειχθεί ότι η ιδανικότερη περίπτωση είναι αυτή του ελλειπτικού προφίλ, καθώς έτσι επιτυγχάνεται η και η ελάχιστη δυνατή απώλεια ενεργείας λόγω της σχηματιζόμενης δίνης στο άκρο (tip) του πτερυγίου.

3.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά καρίνας

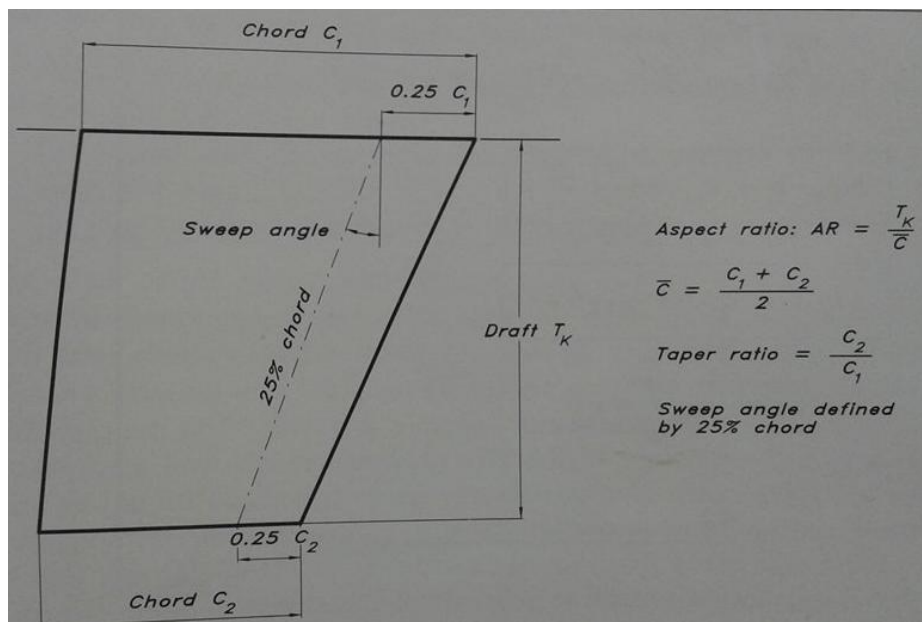
Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός πτερυγίου είναι τα εξής:

- **Εκπέτασμα (Span S):** Ονομάζεται η απόσταση μεταξύ των άκρων μιας πτέρυγας.
- **Εμβαδό της πτέρυγας (Area A):** Είναι το εμβαδόν της κάτοψης της πτέρυγας. (στις ορθογώνιες πτέρυγες $A = \text{chord} * \text{span}$)
- **Χείλος Πρόσπτωσης (Leading Edge):** Ονομάζεται το σημείο της τομής στο οποίο προσκρούει το ρευστό και από το οποίο ξεκινά η μέση γραμμή της.
- **Ακμή διαφυγής (Trailing Edge):** Ονομάζεται το σημείο της τομής στο οποίο καταλήγει η μέση γραμμή της.
- **Χορδή (Chord):** Ονομάζεται το ευθύγραμμο τμήμα τα άκρα της μέσης γραμμής, δηλαδή το χείλος πρόσπτωσης και το χείλος διαφυγής.
- **Μέση γραμμή καμπυλότητας (Mean Camber Line):** Είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που απέχουν ίση απόσταση ανάμεσα στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια της τομής. Σε συμμετρικές υδροτομές η μέση γραμμή καμπυλότητας ταυτίζεται με την χορδή.
- **Πάχος αεροτομής (Thickness t):** Είναι η συνάρτηση που καθορίζει την κατανομή πάχους σε όλο το μήκος της μέσης γραμμής της τομής.



Σχήμα 3.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά τομής πτερυγίου

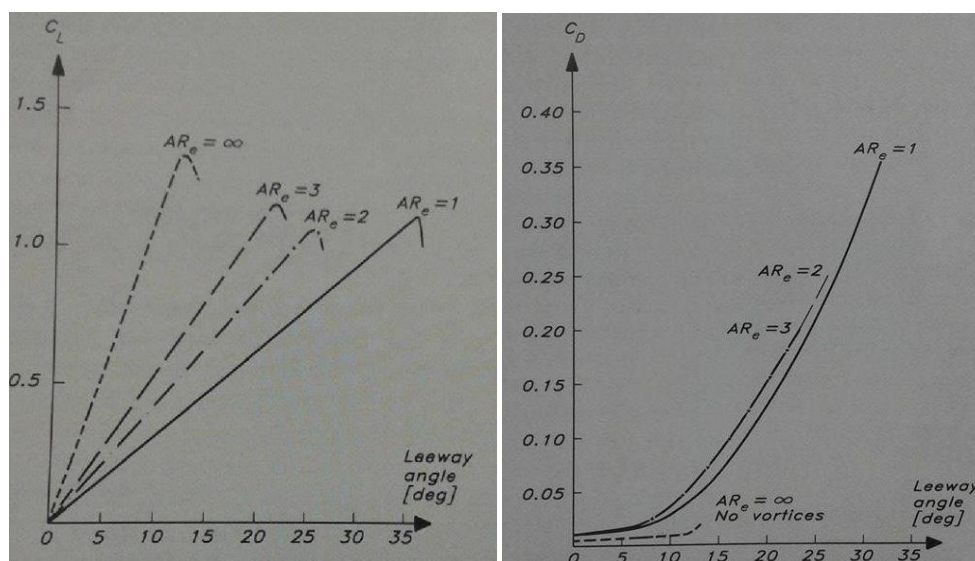
Όσον αφορά ένα τραπεζοειδές πτερύγιο, όπως είναι και οι περισσότερες καρίνες ιστιοπλοϊκών, μας ενδιαφέρουν και κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά, όπως η χορδή στο άνω και το κάτω άκρο, C_1 και C_2 αντίστοιχα, έτσι ώστε να οριστεί η μέση χορδή ως $\bar{C} = (C_1 + C_2) / 2$. Η πιο σημαντική όμως παράμετρος για να εξετασθεί η αποτελεσματικότητα του πτερυγίου, είναι ο λόγος επιμήκους (AR), που ορίζεται σαν $AR = T_k / \bar{C}$, όπου T_k το βύθισμα του πτερυγίου.



Σχήμα 3.6: Ορισμός του προφίλ καρίνας[2]

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ένα ενδιαφέρον φαινόμενο που σχετίζεται με τον λόγο επιμήκους είναι το γεγονός ότι η περιοχή της γάστρας του σκάφους που είναι το σημείο επαφής της καρίνας με το τελευταίο, μπορεί να θεωρηθεί σαν μία επίπεδη πλάκα μεγάλων διαστάσεων. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ροή του ρευστού γύρω από το πτερύγιο στην συγκεκριμένη περιοχή θα έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με την περίπτωση που το κάτω μέρος της γάστρας αντικαθιστούταν με ένα συμμετρικό ως προς την άνω εγκάρσια τομή πτερύγιο. Γενικώς, μία επίπεδη πλάκα στο άκρο του λειτουργεί σαν την ύπαρξη συμμετρικής πλάκας, αυξάνοντας έτσι τον ενεργό λόγο επιμήκους AR_e , ο οποίος είναι τελικά μεγαλύτερος από τον γεωμετρικό λόγο επιμήκους $AR=T_k/C$.

Στα παρακάτω δύο σχήματα, φαίνεται η επίδραση του ενεργού λόγου επιμήκους (AR_e) τόσο στον συντελεστή άνωσης (c_l) όσο και στον συντελεστή αντίστασης (c_D).



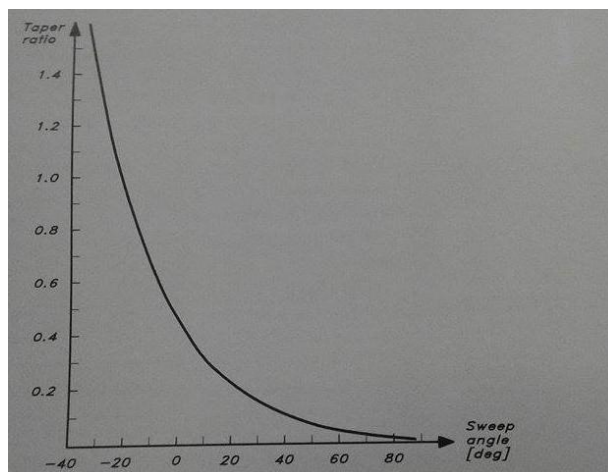
Διάγραμμα 3.7: Επίδραση του AR στην άνωση και την αντίσταση συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.[2]

Να παρατηρήσουμε την θετική επίδραση στην άνωση αυξανόμενου λόγου επιμήκους και ταυτόχρονα την αρνητική επίδραση (αύξηση) στην αντίσταση. Μάλιστα, ο ρυθμός αύξησης στην αντίσταση, όσο μεγαλώνει η τιμή του λόγου επιμήκους, είναι κατά πολύ μικρότερος από τον ρυθμό αύξησης στην ανωστική δύναμη για την ίδια μεταβολή γωνίας πρόσπτωσης. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει τη σημασία του συντελεστή για την αποδοτικότητα της καρίνας.

Τέλος, ορίζεται και ο λόγος (taperratio) της κάτω (C_2) προς την άνω (C_1) χορδή ($\lambda=C_2/C_1$), η σημασία του οποίου θα επεξηγηθεί παρακάτω.

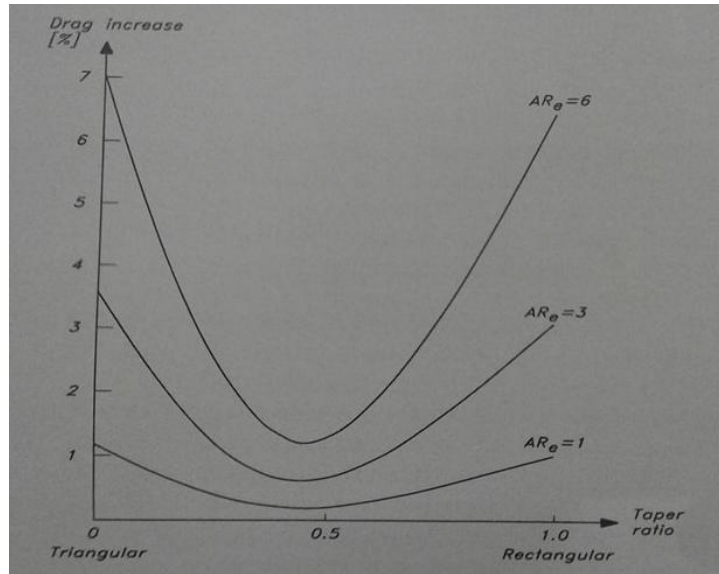
Οι καρίνες ιστιοπλοϊκών έχουν συνήθως τραπεζοειδή μορφή με μία ελαφρά κλίση της πίσω ακμής προς τα πρύμα και ακόμα μεγαλύτερη κλίση της εμπρός ακμής προς την ίδια κατεύθυνση. Η γωνία που σχηματίζει η κεκλιμένη γραμμή στο 25% της κάθε εγκάρσιας τομής ορίζεται ως γωνία "sweeprangle". Όπως αναφέρθηκε, οι ελλειπτικές μορφές προφίλ πτερυγίων έχουν καλύτερη συμπεριφορά από οποιοδήποτε άλλο σχήμα, καθώς η κατανομή

της δύναμης κατά το προφίλ έχει ελλειπτικό σχήμα. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται και η μικρότερη δυνατή δίνη στο άκρο(tip). Η καθιέρωση των τραπεζοειδών προφίλ βασίζεται στο γεγονός ότι είναι εφικτή μία κοντινή στην ελλειπτική κατανομή της δύναμης, που είναι και το ζητούμενο, με τραπεζοειδές προφίλ. Αυτό είναι εφικτό εάν επιλεγθεί κατάλληλος λόγος μεγάλης προς μικρή χορδή(taper ratio) όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (σχήμα 3.7), ανάλογα με την γωνία που σχηματίζει η γραμμή στο 25% των χορδών του πτερυγίου με την κατακόρυφο (sweeprangle).



[Διάγραμμα 3.8 : Βέλτιστη σχέση μεταξύ γωνίας ακμής πρόσπτωσης\(sweeprangle\) και συντελεστή TaperRatio\[2\]](#)

Εάν η γωνία είναι περίπου 20 με 30 μοίρες, σύμφωνα με το ανώτερο διάγραμμα , σημαίνει ότι ο λόγος χορδών πρέπει να είναι περίπου 0.15 .Χρειάζεται όμως προσοχή έτσι ώστε να διατηρηθεί ο λόγος χορδών(taper ratio) σε όχι πολύ χαμηλά επίπεδα έτσι ώστε να μην είναι πολύ ψηλά το κέντρο βάρους της καρίνας έχοντας έτσι δυσμενείς συνέπειες στην ευστάθεια του σκάφους. Στην πράξη, οι περισσότεροι σχεδιαστές χρησιμοποιούν λόγους χορδών αρκετά μεγάλους, 0.4-0.6 , για λόγους ευστάθειας. Στο σχήμα φαίνεται επίσης και η αύξηση στην αντίσταση σε μηδενική γωνία κλίσης πτέρυγας(sweeprangle=0), όταν ο λόγος χορδών διαφέρει από τον ενδεικνύμενο, δηλαδή όταν έχουμε απόκλιση από την ελλειπτική κατανομή της δύναμης. Να παρατηρήσουμε ότι για μικρούς λόγους επιμήκους, η αύξηση στην αντίσταση είναι αμελητέα. Στο σχήμα φαίνεται ότι το ελάχιστο της αντίστασης πραγματοποιείται σε taper ratio περίπου ίσο με 0.45, πράγμα αναμενόμενο , όπως προκύπτει από το διάγραμμα 3.7.



[Διάγραμμα 3.9 : Αύξηση στην επαγόμενη αντίσταση για μη βέλτιστο συντελεστή TapperRatio\[2\]](#)

3.5 : Κριτήρια επιλογής διατομής NACA [1],[2]

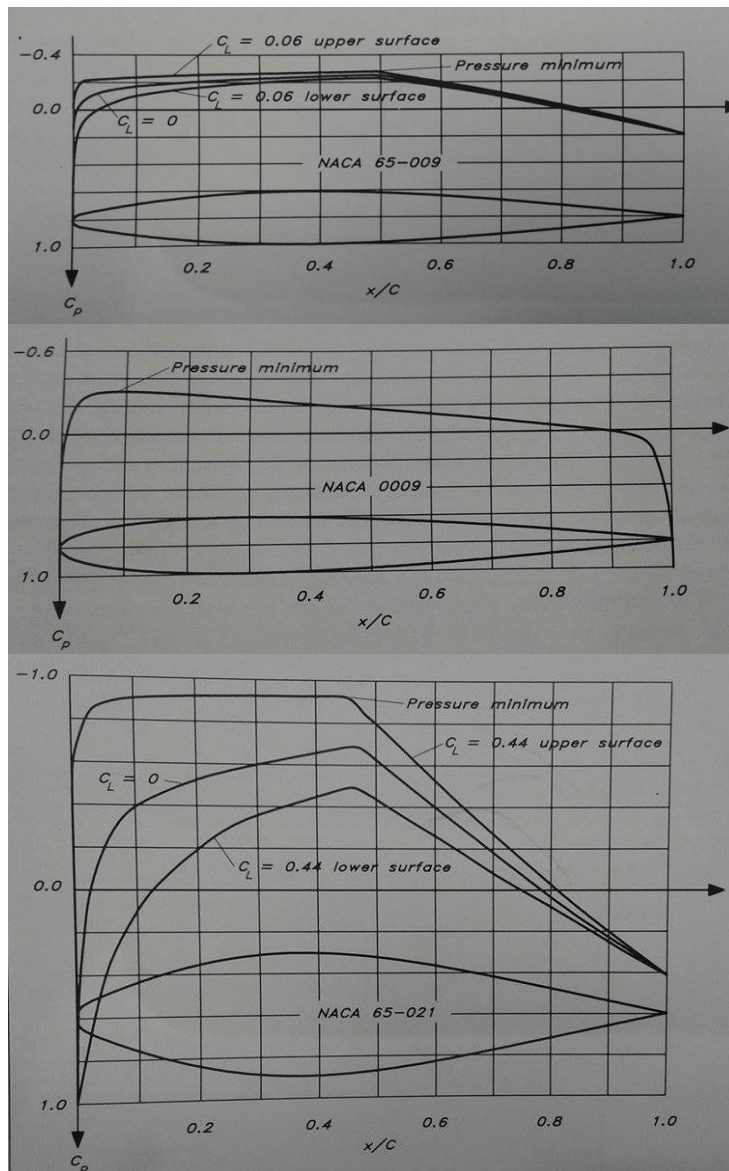
Όπως έχει ήδη αναλυθεί, ο ρόλος της καρίνας του ιστιοπλοϊκού είναι να παράγει την μεγαλύτερη δυνατή δύναμη άνωσης, με όσον το δυνατόν μικρότερη αντίσταση. Γενικώς, το σχέδιο μίας εγκάρσιας τομής του πτερυγίου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα και απαιτεί εμπειρία και γνώσεις γύρω από το αντικείμενο. Ένα ευρέως γνωστό βιβλίο γύρω από το θέμα είναι το *Theory of Wing Section*, Abbott & von Doenhoff, όπου γίνεται μία αναλυτική περιγραφή των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ροής και παρουσιάζονται οι διάφορες εγκάρσιες τομές, η καθεμία με ξεχωριστά χαρακτηριστικά (Airfoil Data).

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η επιρροή του σχήματος της εγκάρσιας τομής μίας καρίνας, πρέπει να γίνει αναφορά στο σχήμα 2.1 (κεφάλαιο 2) στο οποίο φαίνεται η ροή γύρω από την γάστρα ενός πλοίου. Σε γενικές γραμμές, η ίδια μορφή των ροϊκών γραμμών μπορούν να ληφθούν στην ροή γύρω από ένα πτερύγιο, όταν βέβαια η γωνία πρόσπτωσης είναι μηδενική. Υπάρχει ένα στρωτό οριακό στρώμα που ξεκινάει από το χείλος πρόσπτωσης και εξελίσσεται καθώς το ρευστό κινείται πρὸς πηγή. Μετά από κάποια συγκεκριμένη απόσταση, η ροή χάνει την σταθερότητα της και σταδιακά εξελίσσεται σε τυρβώδη κατάσταση. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο στάδιο, υπό τις κατάλληλες συνθήκες μπορεί να συμβεί και αποκόλληση της ροής και δημιουργία ανάστροφης ροής και δινών. Τώρα σε ένα πτερύγιο τύπου NACA, η βασική διαφορά είναι ότι δεν έχουμε μηδενική γωνία πρόσπτωσης, έτσι ώστε να παράγεται άλλωστε και ανωστική δύναμη.

Τόσο στην περίπτωση του πλοίου, όσο και στην περίπτωση της καρίνας, το υδροδυναμικό οριακό στρώμα είναι συνάρτηση του πεδίου πιέσεων, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από το σχήμα της κατασκευής και την γωνία πρόσπτωσης της ροής. Η επιθυμητή κατάσταση είναι αυτή που σταθεροποιεί την ροή έτσι ώστε αυτή να διατηρείται συνεχώς σε επαφή με την γάστρα (ή πτερύγιο), πράγμα που συμβαίνει όταν η πίεση

ελαττώνεται. Αντίθετα, μία αυξανόμενη πίεση αποσταθεροποιεί την ροή με τέτοιον τρόπο έτσι ώστε η αποκόλλησή της να είναι πιθανότερη.

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παρατηρήσεις, είναι φανερό ότι η προσοχή για την κατάλληλη επιλογή ενός προφίλ NACA, πρέπει να δοθεί στην υπάρχουσα κατανομή της πίεσης της ροής γύρω από το πτερύγιο. Στο Διάγραμμα 3.10 φαίνονται τρεις τυπικές τομές , NACA 0009, NACA 65-009, NACA 65-021. Η πρώτη είναι 'παλαιού' τύπου , όπου τα δύο πρώτα ψηφία αφορούν την χορδή (η ένδειξη "00" αφορά συμμετρική NACA), ενώ τα δύο τελευταία το επί τις εκατό της χορδής μέγιστο πάχος της τομής. Οι επόμενες δύο NACA είναι της οικογένειας 6-series και είναι περισσότερο "μοντέρνες", όπου το δεύτερο ψηφίο δείχνει το σημείο της μέγιστης υποπίεσης κατά το μήκος της χορδής. Έτσι, η NACA 65-009 έχει το σημείο της μέγιστης υποπίεσης στο 50% του μήκους της χορδής από το χείλος πρόσπτωσης. Το επόμενο ψηφίο μας δείχνει της μορφή της χορδής, ενώ τα τελευταία δύο το πάχος του πτερυγίου.

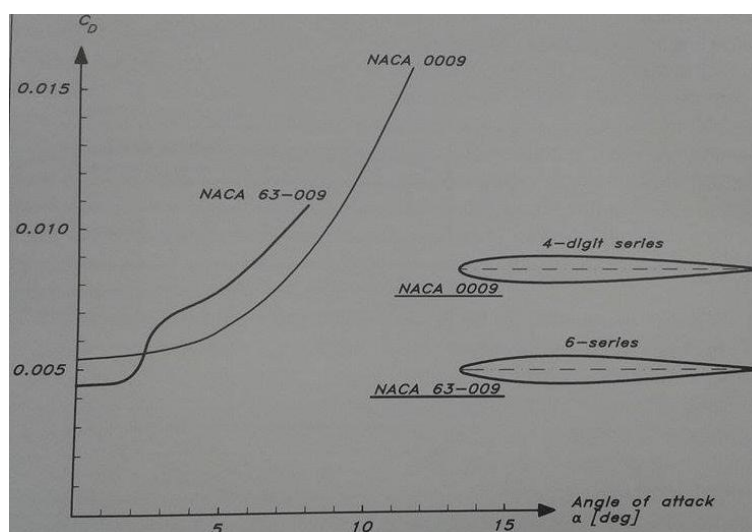


[Διάγραμμα 3.10 : Επιρροή σχήματος εγκάρσιας τομής στην κατανομή πίεσης.\[2\]](#)

Στα διαγράμματα, όπως και προηγούμενα, η αρνητική πίεση δείχνεται προς τα άνω (θετικά του κατακόρυφου άξονα). Η κατανομή της πίεσης της NACA 0009 μας δείχνει ότι το μέγιστο της υποπίεσης λαμβάνει τόπο πολύ κοντά στο χείλος πρόσπτωσης και συγκεκριμένα στο 10%. Αυτό σημαίνει ότι η επιθυμητή μορφή της κατανομής της πίεσης υπάρχει μόνο στο 10% της χορδής, μετρούμενο από το χείλος πρόσπτωσης, καθώς και ότι η αποκόλληση είναι πολύ πιθανόν να συμβεί όσο προχωράει η ροή, αφού το μέγιστο της κατανομής είναι πολύ κοντά στο χείλος πρόσπτωσης. Αντιθέτως, στις άλλες δύο υδροτομές, το μέγιστο της υποπίεσης συμβαίνει αρκετά πιο πίσω (στο 50% της χορδής), εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερη περιοχή ευσταθούς και στρωτής ροής με σημαντική μείωση στην αντίσταση. Στις δύο τελευταίες υδροτομές παρατηρούμε και δύο ξεχωριστές καμπύλες οι οποίες και δείχνουν την πίεση στην άνω και κάτω πλευρά της τομής στην μέγιστη γωνία πρόσπτωσης στην οποία η τελευταία δουλεύει αποδοτικά. Σε αυτές τις καμπύλες φαίνεται

ότι η επιθυμητή κατανομή της πίεσης διατηρείται έως και την στιγμή που θα συμβεί αποκόλληση της ροής και το πτερύγιο θα πάψει να είναι αποδοτικό.

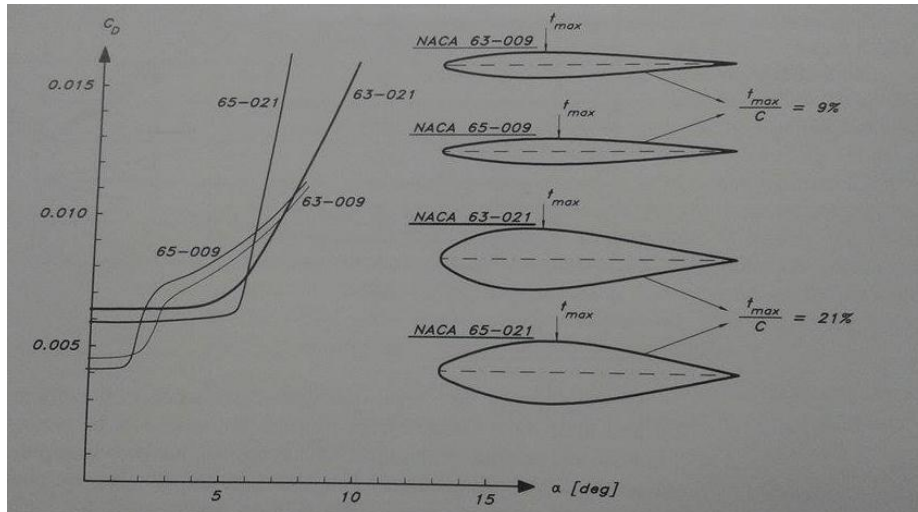
Στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται κάποιες ποιοτικές διαφορές μεταξύ διαφόρων τύπων τομών NACA και σχολιάζεται η καταλληλότητα για την εφαρμογή που μας ενδιαφέρει. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.10, στο οποίο συγκρίνονται δύο τομές ίδιου πάχους σε σχέση με την αντίσταση που παρουσιάζουν στις ίδιες συνθήκες ροής για τις διάφορες γωνίες πρόσπτωσης, η τομή τύπου 63 έχει χαμηλότερη αντίσταση για μικρές γωνίες πρόσπτωσης (έως περίπου 2 μοίρες), ενώ για μεγαλύτερες γωνίες η NACA τεσσάρων ψηφίων είναι σαφώς αποδοτικότερη. Να επισημάνουμε ότι τα διαγράμματα αναφέρονται σε διδιάστατη ροή γύρω από πτέρυγα απείρου AR.



Διάγραμμα 3.11: Σύγκριση μεταξύ δύο προφίλ NACA[2]

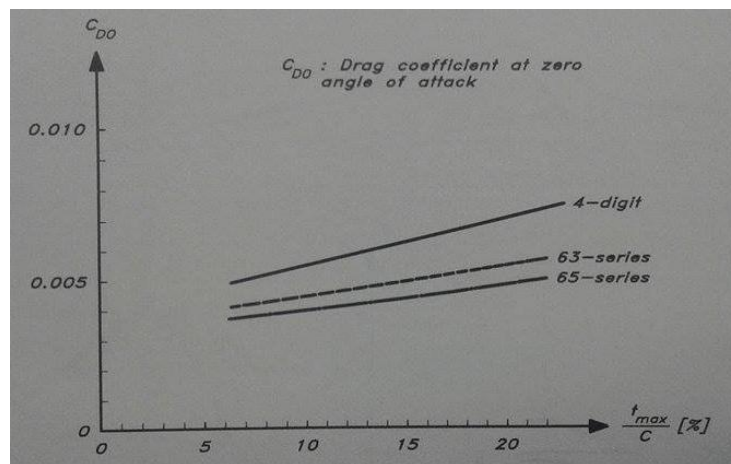
Στην συνέχεια εξετάζεται η επιρροή του πάχους της υδροτομής, όπου ίδιου τύπου τομές NACA με διαφορετικά πάχη εξετάζονται ως προς την αντίσταση για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης. Εξετάζονται δύο τύπου NACA (65 & 63 series) για δύο διαφορετικά πάχη (9 & 21%). Οι λεπτότερες υδροτομές ($t=9\%$) έχουν μικρότερη αντίσταση σε χαμηλότερες γωνίες πρόσπτωσης, όμως οι παχύτερες τομές ($t=21\%$) διατηρούν τα χαμηλά επίπεδα αντίστασης σε ευρύτερο πεδίο, όσον αφορά την γωνία πρόσπτωσης.

Η διαφορά στις τομές με ίδιο πάχος αλλά διαφορετικής οικογένειας NACA (65 & 63) έγκειται στο γεγονός ότι το σημείο ελάχιστης δύναμης άνωσης επί της χορδής (άρα και του ελαχίστου της πίεσης) διαφέρει στις δύο τομές. Όπως φαίνεται, σε χαμηλές γωνίες πρόσπτωσης της ροής, οι τομές που εμφανίζουν το μέγιστο της υποπίεσης σε μεγαλύτερη απόσταση από το χέλιος πρόσπτωσης πλεονεκτούν σε σχέση με τις άλλες καθώς παρουσιάζουν χαμηλότερη αντίσταση.

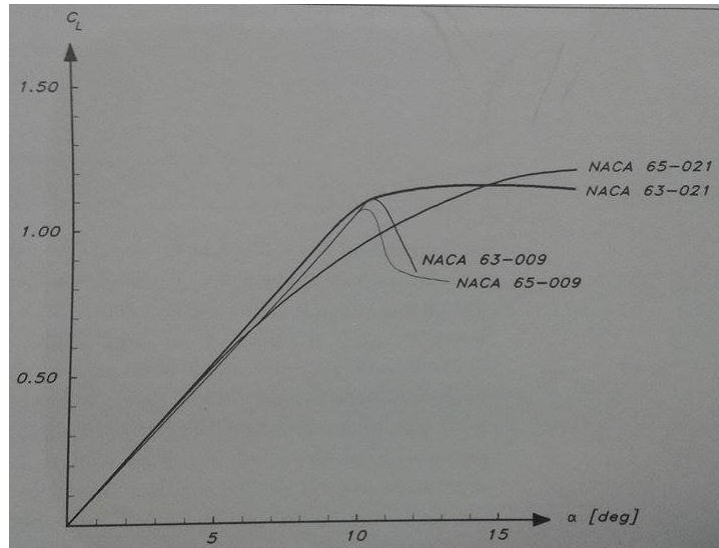


Διάγραμμα 3.13: Επίδραση του σχήματος και του πάχους εγκάρσιας τομής στην αντίσταση[2]

Συνεχίζοντας, στα δύο επόμενα διαγράμματα φαίνονται η σύγκριση στην αντίσταση για μηδενική γωνία πρόσπτωσης για τα διάφορα πάχη και τους αντίστοιχους τύπους τομών. Από το διάγραμμα 3.13 φαίνεται εμφανώς η υστέρηση των τετραψήφιων NACA σε σχέση με τις άλλες δύο. Όσον αφορά την ανωστική δύναμη από το διάγραμμα 3.14, βλέπουμε ότι λεπτότερες τομές εμφανίζουν ταχύτερα αποκόλληση της ροής, που οδηγεί σε άμεση μείωση της άνωσης. Εντούτοις, η επιρροή του τύπου εγκάρσιας τομής έχει μικρή επίδραση στην άνωση σε σχέση με την επίδραση στην αντίσταση.



Διάγραμμα 3.13: Επίδραση του πάχους εγκάρσιας τομής στην αντίσταση για μηδενική γωνία πρόσπτωσης[2]



Διάγραμμα 3.14: Επίδραση της εγκάρσιας τομής στην ανωστική δύναμη LIFT [2]

Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη καθώς και τις συνθήκες στις οποίες λειτουργεί μία συνήθης καρίνα ιστιοπλοϊκού σκάφους, δηλαδή σχετικά μικρές γωνίες πρόσπτωσης του νερού, είναι προτιμότερες οι τύπου 63 ή 65 σειρές NACA αλλά το πάχος δεν θα πρέπει να είναι πολύ μικρό για να διατηρείται η χαμηλή αντίσταση για μεγάλο εύρος γωνιών (διάγραμμα 3.13). Παράλληλα το πάχος έχει ένα άνω όριο που σχετίζεται με την αυξημένη αντίσταση σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης, άλλα και από το γεγονός ότι εμπειρικά έχει δειχθεί ότι καρίνες με μεγάλο πάχος στην επαφή τους με την γάστρα, εκεί δηλαδή που έχουμε και την μέγιστη χορδή, παράγουν ισχυρούς κυματισμούς όταν το ιστιοπλοϊκό βρίσκεται υπό διατοιχισμό. Μία καλή προσέγγιση είναι να επιλεγεί μία σχετικά μεγάλου πάχους υδροτομή, περίπου 15 - 18 % που να ανήκει στην οικογένεια NACA 63 ή 65.

4. Διεγέρτες Τύρβης

4.1 : Ομοιότητα

Προκειμένου να γίνει ολοκληρωμένη σχεδίαση σκάφους με την χρήση μοντέλου σε δεξαμενή, το πλοίο και το μοντέλο πρέπει να βρίσκονται σε συνθήκες πλήρους ομοιότητας. Η ομοιότητα εξασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα πειράματα στην δεξαμενή είναι υπό κλίμακα ίδια με αυτά που προκύπτουν με το πλοίο σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης. [9]

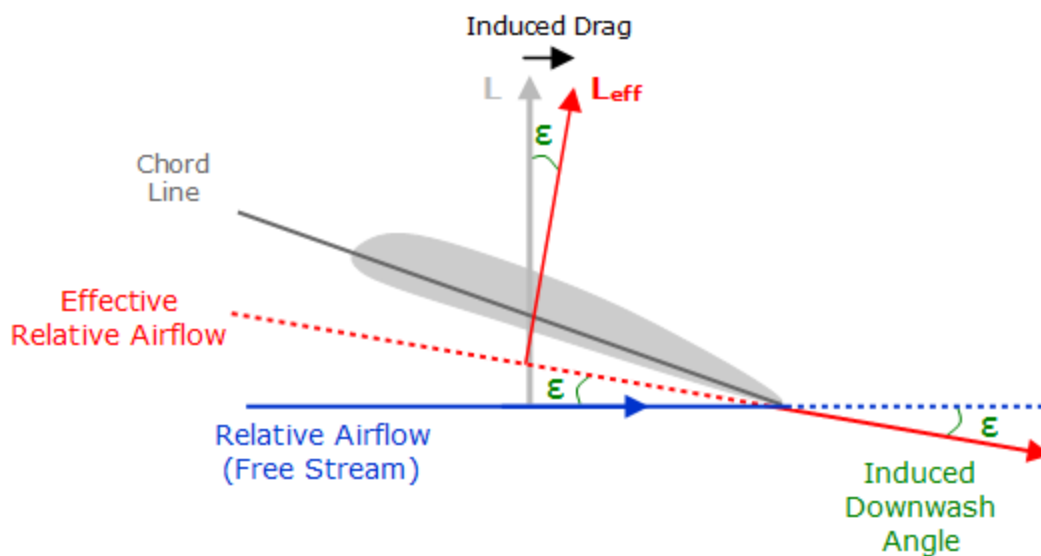
Υπάρχουν τρεις συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται έτσι ώστε πλοίο και μοντέλο να μπορεί να θεωρηθούν ότι βρίσκονται σε ομοιότητα. Η πρώτη από αυτές αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο και απαιτεί ότι όλοι οι λόγοι διαστάσεων μήκους πρέπει να είναι ίδιοι. Για παράδειγμα, εάν το μήκος του πλοίου είναι 100 μέτρα και το μήκος του μοντέλου 1 μέτρο, όλοι οι υπόλοιποι λόγοι που αφορούν μήκος πρέπει να έχουν την ίδια αναλογία.

Η δεύτερη συνθήκη αποτελεί την κινηματική συνθήκη και προϋποθέτει το πεδίο ροής γύρω από μοντέλο και πλοίο έχουν όμοια χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τα μέτρα και τις διεθύνσεις των ταχυτήτων και των ροϊκών γραμμών και εξασφαλίζουν ίδια χαρακτηριστικά ροϊκού πεδίου στις δύο περιπτώσεις.

Τόσο η γεωμετρική όσο και η κινηματική συνθήκη είναι σχετικά εύκολο να ικανοποιηθούν σε σύγκριση με την δυναμική συνθήκη, η οποία είναι και η τρίτη απαιτούμενη για να έχουμε πλήρη ομοιότητα. Η δυναμική ομοιότητα προϋποθέτει ότι οι δυνάμεις που σχετίζονται με το πεδίο ροής έχουν μέτρα και διεθύνσεις όμοιες και υπό κλίμακα. Σε πειράματα που αφορούν πειράματα σε μοντέλα πλοίων, οι δυνάμεις αυτές σχετίζονται με την αντίσταση του μοντέλου η οποία αποτελείται από την αντίσταση τριβής και την υπόλοιπη αντίσταση (William Froude). Όπως είναι γνωστό, η αντίσταση τριβής αφορά τις εφαιπτομενικές δυνάμεις που ασκούνται στην γάστρα λόγω της συνεκτικότητας του ρευστού ενώ η υπόλοιπη αντίσταση αφορά την κατανομή της πίεσης που επηρεάζεται από τα κύματα και τις δίνες που σχηματίζονται λόγω της κίνησης της γάστρας. Γενικώς, η υπόλοιπη αντίσταση αφορά όλα τα είδη αντίστασης με δεν σχετίζονται με την τριβή. Παραδείγματα υπόλοιπης αντίστασης είναι η αντίσταση μορφής, δηλαδή η αλλαγή στο πεδίο πιέσεων λόγω της ύπαρξης της γάστρας και η αντίσταση κυματισμών. Η υπόλοιπη αντίσταση σχετίζεται με τον αριθμό Froude, ο οποίος είναι αδιάστατος αριθμός και εκφράζει τον λόγο των δυνάμεων αδράνειας του σώματος προς τις βαρυτικές δυνάμεις. Η περίπτωση των δυνάμεων τριβής συσχετίζεται με τον αριθμό Reynolds που εκφράζει τον λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας και επίσης μας δείχνει εάν η ροή είναι στρωτή ή έχει μεταβεί σε τυρβώδη περιοχή.

4.2 Ρόλος του διεγέρτη τύρβης

Στην περίπτωση που μελετάμε, δηλαδή στην ροή γύρω από εάν σώμα το οποίο παράγει ανωστική δύναμη, υπάρχει και μία επιπλέον συνιστώσα αντίστασης (lift-induced drag) που σχετίζεται με την καθ' ύψος αλλαγή πορείας των ροϊκών γραμμών, σε ένα πραγματικό τρισδιάστατο πρόβλημα. Συγκεκριμένα, η induced drag σχετίζεται με το φαινόμενο το οποίο έχει ήδη περιγραφεί και αφορά την ύπαρξη κυκλοφορίας της ροής από την μεριά της υψηλής στην χαμηλή πίεση στο άκρο του πτερυγίου (downwash). Το φαινόμενο downwash είναι πολύ σχυρό στο άκρο και σταδιακά μειώνεται ως την βάση της πτέρυγας. Η αλλαγή στην ροή στις τομές που επηρεάζονται από το φαινόμενο downwash επιδρά αρνητικά στην επιθυμητή κατανομή της πίεσης, πειώνοντας έτσι την παραγωγή άνωσης. Ως αποτέλεσμα είναι το γεγονός ότι η ενεργή γωνία πρόσπτωσης είναι χαμηλότερη από την πραγματική ενώ παράλληλα σχηματίζεται και η αντίστοιχη συνιστώσα αντίστασης που δεν θα υπήρχε σε περίπτωση διδιάστατης ροής. Με τις υπόλοιπες παραμέτρους να μένουν σταθερές, η induced drag αυξάνεται για αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης του ρευστού στην επιφάνεια.



Εικόνα 4.1: Επίδραση της induced drag στην ανωστική δύναμη/

/Φαινόμενα και πραγματική γωνία πρόσπτωσης της ροής.

Επιστρέφοντας τώρα στο πρόβλημα της ομοιότητας, η δυναμική ομοιότητα επιτυγχάνεται με την ισότητα των αριθμών Froude και Reynolds, πράγμα το οποίο ως γνωστόν δεν είναι εφικτό σε ρεαλιστικές συνθήκες. Το πρόβλημα λύνεται με την εξασφάλιση του ίδιου αριθμού Froude και την χρήση του εμπειρικού τύπου της ITTC (International Towing Tank Conferences) :

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2}$$

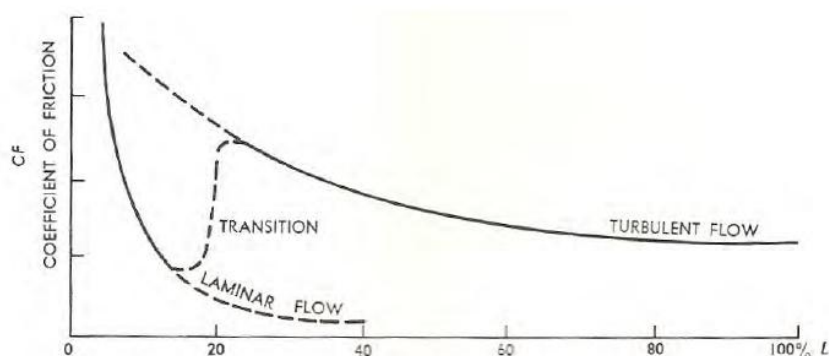
Ο παραπάνω τύπος βασίζεται στην αντίσταση τριβής που παρουσιάζει μία επίπεδη πλάκα υπό τον ίδιο αριθμό Reynolds. Εάν μετρηθεί πειραματικά η συνολική αντίσταση στο μοντέλο, μπορεί να αφαιρεθεί από αυτήν η αντίσταση λόγω τριβής, όπως βρέθηκε από τον παραπάνω τύπο. Εφόσον ο αριθμός Froude είναι ο ίδιος, τότε ο συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης είναι ο ίδιος σε μοντέλο και πλοίο. Επομένως, με χρήση του τύπου της ITTC για το πλοίο, μπορεί να βρεθεί και η υπό κλίμακα αντίσταση του πλοίου.

Παρόλο που η παραπάνω μέθοδος είναι αποδοτική σε αρκετές περιπτώσεις, σε μία πειραματική διαδικασία προκύπτουν και ορισμένα επιπλέον προβλήματα. Με την διατήρηση του χαμηλού Reynolds στο πείραμα η ροή παραμένει σε μεγάλο βαθμό στρωτή και έτσι τα επίπεδα του συντελεστή αντίστασης τριβής χαμηλότερα από τον συντελεστή τριβής στο πλοίο, στο οποίο η ροή είναι στο κύριο μέρος ή και σε ολόκληρη την γάστρα της τυρβώδης.

Η λύση στο πρόβλημα της δυναμικής ομοιότητας επέρχεται με την χρήση των διεγερτών τύρβης, καθώς η χρήση του τύπου της ITTC προϋποθέτει τυρβώδη ροή σε όλη την έκταση του πτερυγίου, ενώ σε πειραματική βάση το πτερύγιο έχει μεγάλες ζώνες στρωτής ροής. Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη περιοχή αναμένεται να επιφέρει μειώσεις στην παραγωγή ανωστικής δύναμης καθώς επηρεάζεται η επιθυμητή κατανομή της πίεσης, ενώ ταυτόχρονα η αντίσταση αυξάνεται.

Έτσι, τα πειράματα στην δεξαμενή χρησιμοποιούν διεγέρτες τύρβης για να εξασφαλίσουν όμοιες συνθήκες ροής σε μοντέλο και πλοίο, αντιμετωπίζοντας έτσι και το πρόβλημα της μη δυνατότητας εξασφάλισης ίδιου αριθμού Reynolds με σταθερό Froude στις δύο περιπτώσεις.

Επιπλέον, το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής μπορεί να περιορισθεί με την χρήση των διεγερτών οι οποίοι προκαλούν βεβιασμένα την μετατροπή του είδους της ροής. Το στρωτό οριακό στρώμα μετατρέπεται σε τυρβώδες, το οποίο έχει και υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο από το πρώτο με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερη πίεση για την αποκόλληση της ροής. Έτσι, το σημείο αποκόλλησης μετατοπίζεται προς τα πίσω (πρύμα) και είναι ακόμα δυνατό να μην παρατηρηθεί καθόλου το φαινόμενο. Η τύρβη, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αλλάζει και το πεδίο των εφαιπτομενικών τάσεων στην επιφάνεια του ρευστού, αυξάνοντας έτσι την αντίσταση τριβής. Όμως, η αύξηση αυτή είναι κατά πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη αύξηση της αντίστασης που θα υπήρχε λόγω αποκόλλησης.



Εικόνα 4.2 : Μεταβολή συντελεστή άνωσης σε στρωτή και τυρβώδη περιοχή [9]

Συνήθως χρησιμοποιούνται εμπειρικοί κανόνες για να προκύψουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του διεγέρτη όπως για παράδειγμα την διάμετρο, αν πρόκειται για σύρμα, καθώς και η θέση του από το πρωραίο άκρο . Ακόμα λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως η ταχύτητα του σκάφους και η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Η μελέτη της καρίνας του ιστιοπλοϊκού σε πειραματικές συνθήκες είναι ιδιαίτερα δύσκολη όπως και αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτό συμβαίνει διότι ο διεγέρτης επιδρά σημαντικά στο πεδίο ροής μιας πτέρυγας,περισσότερο από το πόσο θα επηρεαζόταν το πεδίο ενός μοντέλου πλοίου. Σε πειραματικές συνθήκες, η καρίνα έχει μεγάλες περιοχές στρωτής ροής που επηρεάζει τόσο την αντίσταση όσο την ανωστική δύναμη. Αντίθετα, το πεδίο ροής στην θάλασσα είναι κυρίως τυρβώδες και σε πολλές περιπτώσεις δεν παρουσιάζει καθόλου στρωτή περιοχή.

Πιο συγκεκριμένα, καθώς η καρίνα επιδρά σημαντικά στην ολική συμπεριφορά του ιστιοπλοϊκού, ως παραγωγή πλάγιας ανωστικής δύναμης και αύξησης της συνολικής αντίστασης του σκάφους, έχει ιδιαίτερη σημασία να εξετασθεί η ευαισθησία του πτερυγίου τόσο στα δύο είδη ροής, όσο και στους διάφορους τύπους διεγερτών τύρβης.

Οι αυξομειώσεις στον συντελεστή ανωστικής δύναμης και της αντίστασης ανάλογα με τον τύπο του διεγέρτη και το είδος της ροής είναι μη αμελητέες και πρέπει να εξετασθούν εκτενώς για να λαμβάνονται ορθά αποτελέσματα από τα πειράματα στην δεξαμενή. Παλαιότερες μετρήσεις έχουν δείξει ότι η καρίνα είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην παρουσία βεβιασμένης τύρβης , με πτώση της ανώσεως έως και 20 % στην μετάβαση της στρωτής ροής σε τυρβώδη. Προφανώς τέτοιες αποκλίσεις οφείλουν να εξεταστούν για να έχουν νόημα τα πειράματα και να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα ως προς την ολική συμπεριφορά της καρίνας σε θαλάσσιο περιβάλλον.

4.3 Τύποι διεγερτών τύρβης

Παραδοσιακά, δύο ειδών τρόποι υπήρχαν για να διασφαλισθεί η μετρατροπή της ροής σε τυρβώδη και αυτοί ήταν είτε με χρήση κατάλληλων αντικειμένων (πλεγαγμάτων, ραβδίων, πλακών κλπ) εμπρός από το μοντέλο, τα οποία εισάγουν την τύρβη στην ροή πριν αυτή έρθει σε επαφή με το μοντέλο(freestreamturbulencestimulation), είτε με την τοποθέτηση των διεγερτών επί του σκάφους σε κατάλληλη θέση. Στο πέρασμα των χρόνων όμως αποδείχθηκε ότι η εμφάνιση της τύρβης μέσω διαγερτών επί του μοντέλου είναι αποδοτικότερη και γι'αυτό έχει επικρατήσει για τα πειράματα όλων των τύπων πλοίου.

Υπάρχουν τεσσάρων ειδών διεγέρτες τύρβης που είναι πλέον καθιερωμένοι και χρησιμοποιούνται στις πειραματικές δεξαμενές: διεγέρτες σύρματος, λωρίδες άμμου, λωρίδες υλικού HAMA και οι κοινές καρφίτσες. Η επιλογή του τύπου του διεγέρτη σχετίζεται και με την ελάχιστη δυνατή αντίσταση που θα προκληθεί από την εφαρμογή του.

Παρόλο που οι διεγέρτες τύπου σύρματος είναι πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενοι, στην περίπτωση της υδροδυναμικής μελέτης μίας υδροτομής

ΝΑCΑκρίνοντα ακατάλληλοι, όπως επιβαιώνεται και πειραματικά σε επόμενο στάδιο της εργασίας. Αυτό συμβαίνει διότι σε μία τέτοιου είδους υδροτομή, το πεδίο πιέσεων του ρευστού αλλάζει δραστικά καθώς αυτό έρχεται σε επαφή με την πτέρυγα, ιδιαίτερα στην πλευρά της υποπίεσης. Επομένως, η παρουσία ενός "ξένου σώματος" με απότομη αλλαγή της γεωμετρίας κοντά στο χείλος πρόσπτωσης θα επιφέρει μεγάλες αλλαγές στο πεδίο ροής και δεν θα υπάρχει η ζητούμενη ομοιότητα με τις πραγματικές συνθήκες. Αντιθέτως, οι διεγέρτες τύρβης τύπου λωρίδας άμμου, παρόλο που επιφέρουν συνολική αντίσταση, δημιουργούν πιο ήπιες αυξομειώσεις στην πίεση του νερού γύρω από την περιοχή τοποθέτησής τους. Έτσι κρίνονται καταλληλότεροι για την εφαρμογή που μας ενδιαφέρει, το οποίο και διαπιστώνεται πειραματικά στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

5.1 : Περιγραφή

Η πειραματική διεργασία διεξήχθη στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα πρώτα στάδια της διπλωματικής εργασίας ήταν η επιλογή μιας συγκεκριμένης διατομής της καρίνας, για να ξεκινήσει και η κατασκευή της στο ξυλουργείο του εργαστηρίου. Η επιλογή της διατομής της καρίνας και η ολοκληρωμένη κατασκευή της πραγματοποιήθηκε ύστερα από μία προσεκτική μελέτη με υδροδυναμικά, κατασκευαστικά και λειτουργικά κριτήρια όπως αυτά αναφέρθηκαν προηγουμένως. Παρόλο που η κατασκευή της καρίνας του ιστιοπλοϊκού έγινε με επιτυχία, η διεξαγωγή των πειραμάτων δεν έγινε εφικτή με την συγκεκριμένη υδροτομή, αλλά χρειάστηκε να επιλεγεί άλλη καρίνα ήδη κατασκευασμένη και που βρισκόταν στο εργαστήριο της σχολής. Τα πειράματα στην δεύτερη περίπτωση έγιναν επιτυχώς, καταλήγοντας στα αντίστοιχα αποτελέσματα που ήταν και οι αρχικοί στόχοι της εργασίας.

Εντούτοις, για λόγους πληρότητας, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί ολοκληρωμένα και το στάδιο που δεν βρήκε εφαρμογή, δηλαδή η πειραματική διαδικασία με την αρχική υδροτομή. Έτσι, παρακάτω θα γίνει μία αναλυτική περιγραφή όλων των σταδίων της διπλωματικής, παρουσιάζοντας το θεωρητικό υπόβαθρο και τα αντίστοιχα πρακτικά της μέρη.

5.2 Επιλογή διατομής NACA

Αρχικά, έγινε επιλογή της διατομής NACA σύμφωνα με τις ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας και χαρακτηριστικά που εμφανίζει μία καρίνα κατά την πλεύση του ιστιοπλοϊκού. Δηλαδή, η διατομή επιλέχθηκε έτσι ώστε να αντιπροσωπεύσει ένα σύνολο περιπτώσεων καρίνων πραγματικών σκαφών, ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιεί και τις θεωρητικές απαιτήσεις που σχολιάσθηκαν εκτενώς παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε διατομή τύπου NACA-63015, της οποίας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα (“TheoryofWingSections: SummaryofAirfoilData”).

x (per cent c)	y (per cent c)	$(y/V)^2$	y/V	$\Delta x_y/V$
0	0	0	0	2.048
0.5	1.131	0.714	0.845	1.586
0.75	1.371	0.781	0.884	1.417
1.25	1.750	0.891	0.944	1.195
2.5	2.412	1.059	1.029	0.880
5.0	3.255	1.187	1.089	0.660
7.5	3.962	1.243	1.115	0.553
10	4.553	1.280	1.131	0.476
15	5.488	1.328	1.152	0.382
20	6.198	1.359	1.166	0.326
25	6.734	1.383	1.176	0.282
30	7.122	1.401	1.184	0.252
35	7.376	1.416	1.190	0.227
40	7.496	1.427	1.195	0.204
45	7.467	1.437	1.199	0.181
50	7.269	1.419	1.191	0.161
55	6.903	1.368	1.170	0.142
60	6.393	1.311	1.145	0.124
65	5.772	1.249	1.118	0.109
70	5.063	1.186	1.089	0.094
75	4.282	1.123	1.060	0.080
80	3.451	1.056	1.028	0.067
85	2.598	0.986	0.993	0.055
90	1.743	0.913	0.956	0.041
95	0.887	0.841	0.917	0.026
100	0.032	0	0	0

L.E. radius: 1.446 per cent c
T.E. radius: 0.038 per cent c

Πίνακας 5.1 : Σύνολο συντεταγμένων X και Y του περιγράμματος του σχεδίου εγκάρσιας τομής NACA-63015 [1]

Οι πρώτες δύο στήλες του πίνακα αφορούν τις συντεταγμένες του σχήματος μίας εγκάρσιας τομής σε αναλογία με το μήκος χορδής (c). Για κάθε μία τετμημένη X κατά την οριζόντιο της τομής, υπάρχει μία τεταγμένη Y η οποία υποδηλώνει το πάχος στην συγκεκριμένη θέση. Και οι δύο συντεταγμένες εκφράζονται ως ποσοστό επί της εκατό της χορδής, επομένως γνωρίζοντας την χορδή στο άνω και στο κάτω άκρο της καρίνας, καθώς και το βύθισμα, μπορούν να υπολογιστούν οι συντεταγμένες της εγκάρσιας τομής για κάθε διαφορετική χορδή κατά την έννοια του βυθίσματος της πτέρυγας. Οι υπόλοιπες στήλες του πίνακα αφορούν τις κατανομές των πιέσεων.

Η διατομή NACA-63015 είναι της οικογένειας 6-series NACA, όπου η θέση που λαμβάνει τόπο το μέγιστο της υποπίεσης είναι στο 30 τοις εκατό της χορδής, το οποίο δίνει το πλεονέκτημα της διατήρησης της επιθυμητής κατανομής πίεσης σε σχετικά μεγάλο εύρος χορδής, περιορίζοντας ή και εξαλείφοντας έτσι την αποκόλληση.

Οι καρίνες ιστιοπλοϊκών λειτουργούν σε σχετικά μικρές γωνίες πρόσπτωσης της ροής. Επομένως επιλέχθηκε διατομή 6-series που εμφανίζει μειωμένη αντίσταση σε χαμηλές γωνίες, σε σχέση με τις απλές τετραπήφειες διατομές (διάγραμμα 3.10).

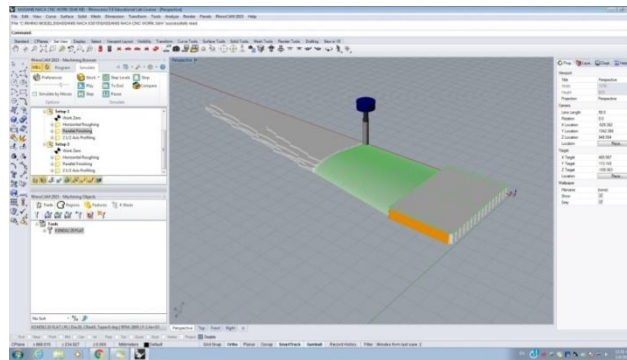
Επιπλέον, το πλάτος διατηρήθηκε σε υψηλή τιμή (15 τοις εκατό της χορδής) έτσι ώστε το εύρος περιοχής χαμηλής αντίστασης, σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης, να παραμείνει μεγάλο (διάγραμμα 3.11).

Το μήκος της άνω χορδής επιλέχθηκε 30 cm ενώ της κάτω 15 cm. Το βύθισμα της καρίνας επιλέχθηκε 80 cm και η πίσω κατακόρυφη ακμή της έγινε κατακόρυφη. Επομένως, το προφίλ της καρίνας ήταν ένα τραπέζιο με ύψος 80 cm και με δύο βάσεις 30 και 15 cm. Οι συγκεκριμένες διαστάσεις οδηγούν στις τιμές των συντελεστών TapperRatio ($tapperratio = c_2/c_1 = 15/30 = 0.5$), μέσης χορδής C ($C = (C_1 + C_2)/2 = (15 + 30)/2 = 22.5$ cm) και aspectratio ($AR = T_k/C = 80/22.5 = 3.56$). Η τιμή του TapperRatio αποτελεί μία συνηθισμένη περίπτωση η οποία προκύπτει για να παραμείνει το κέντρο βάρους της καρίνας σχετικά χαμηλά και να συνεισφέρει έτσι θετικά στην συνολική ευστάθεια του σκάφους. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με το διάγραμμα 3.7, φαίνεται η θετική απίδραση που έχει ο συγκεκριμένος λόγος επιμήκους στην απόδοση της πτέρυγας, αφού αυτή παρουσιάζει υψηλές τιμές δύναμης Lift σε σχέση με την αντίσταση.

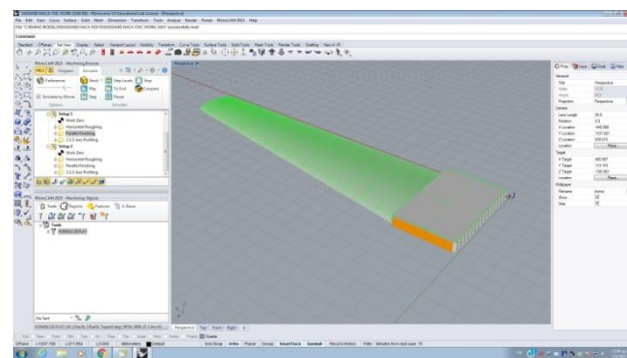
5.3 Κατασκευή καρίνας

Εν συνέχεια, στο ξυλουργείο του εργαστηρίου ξεκίνησε η κατασκευή της πτέρυγας ύστερα από την χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος RHINO (CAD/CAM), όπου προσομοιάστηκε η πτέρυγα στο πρόγραμμα πριν ξεκινήσει η κατασκευή της. Αυτό ήταν απαραίτητο διότι ολόκληρη η διαδικασία κατασκευής της καρίνας έγινε αυτοματοποιημένα, με συνεργασία του υπολογιστή με την φρέζα, αφού τοποθετήθηκε κατάλληλα το κομμάτι ξύλου στην βάση της.

5.2.1

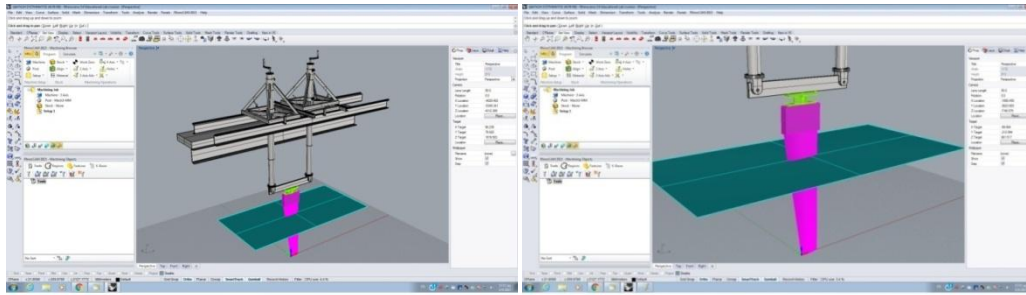


5.2.2



Εικόνες 5.2: 5.2.1: Αναπαράσταση της διεργασίας μέσω του προγράμματος RHINO : διαδικασία υπό εξέλιξη όπου φαίνεται η φρέζα που κατεργάζεται το ξύλο 5.2.2 τελειοποιημένη καρίνα.

Επίσης, μέσω του προγράμματος έγινε και η αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης όπως θα στηθεί στην δεξαμενή. Ως τρόπος στήριξης της καρίνας επιλέχθηκε μία οριζόντια αλουμινένια δοκός, πακτωμένη σε δύο της άκρα όπου στο μέσο της θα στηρίζεται σταθερά η καρίνα. Η στήριξη της καρίνας έγινε μέσω του δυναμομέτρου και του διαιρέτη, δηλαδή, μεταξύ της δοκού και της πτέρυγας παρεμβλήθηκαν ο διαιρέτης και το δυναμόμερο. Η όλη διάταξη συνθέθηκε σταθερά μεταξύ της, με μόνη επιτρεπόμενη κίνηση αυτή που γινόταν μέσω του διαιρέτη, δηλαδή της ελεγχόμενης κίνησης γύρω από τον κατακόρυφο άξονα($\gamma\omega\omega$) έτσι ώστε να ελέγχεται η γωνία πρόσπτωσης του νερού.



Εικόνα 5.3: Αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης στο φορείο της δεξαμενής, μέσω του προγράμματος RHINO

Στην συνέχεια ξεκίνησε η κατασκευή της καρίνας, η οποία επιλέχθηκε να κατασκευαστεί σε δύο κομμάτια (διαιρούμενη κατά το κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, δηλαδή το επίπεδο στο οποίο βρίσκονται όλες οι χορδές στις διάφορες θέσεις κατά το βύθισμα). Ο λόγος που η επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διαδικασία είναι αφενώς για την διευκόλυνση φρέζας, λόγω της καμπυλότητας της κατασκευής και από τις δύο πλευρές, όσο και για την τοποθέτηση ενισχυτικών στο μέσο της καρίνας κατά την έννοια του ύψους. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν δύο κατακόρυφες μεταλλικές λάμες επίπεδο συμμετρίας, που συνεισφέρουν στην αντοχή και με τις οποίες θα γινόταν και η σύνδεση με την υπόλοιπη διάταξη. Επίσης, καθώς η συγκεκριμένη διατομή NACA καταλήγει σε μηδενικό πάχος για όλες τις χορδές, η πίσω περιοχή της καρίνας ήταν εξαιρετικά ευαίσθητη και εύθραυστη. Κατά συνέπεια έπρεπε να τοποθετηθεί ενίσχυση (αλουμινένια ελασμα ελάχιστου πάχους) κατά την επαφή των δύο τμημάτων μόνο στην περιοχή κοντά στο χείλος εκφυγής.



Εικόνες 5.4: 5.4.1 Το ένα εκ των δύο τμήματα της καρίνας πριν 5.5.2 μετά την αυτοματοποιημένη διεργασία



Εικόνες 5.5: 5.5.1 Η φρέζα και το άνω τμήμα στήριξης της καρίνας (ορθογώνιο ενσωματωμένο τμήμα ξύλου για καλύτερη στήριξη), 5.5.2 διάταξη φρέζας όπου φαίνονται οι τάκοι στήριξης των ξύλινων τεμαχίων



Εικόνα 5.6 :Εσωτερική (επίπεδη) όψη των ολοκληρωμένων τμημάτων της καρίνας όπου φαίνονται οι υποδοχές των δοκών στήριξης και η μία δοκός



Εικόνα 5.7: Ένωση των τμημάτων της καρίνας

5.4 : Δυναμόμετρο και Διαιρέτης

Ως μετρητικό όργανο των δυνάμεων που δρούσαν επί της καρίνα κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων επιλέχθηκε το δυναμόμετρο *DeltaIP65(FT8499)* της εταιρείας *ATI INDUSTRIAL AUTOMATION*. Το συγκεκριμένο δυναμόμετρο δίνει την δυνατότητα μέτρησης δυνάμεων κατά τις τρεις διευθύνσεις, με ή χωρίς ταυτόχρονη φόρτιση, καθώς και των ροπών γύρω από τους τρεις άξονες. Το δυναμόμετρο είναι εσωτερικά εφοδιασμένο με σύνολο επιμηκυνσιομέτρων, το καθένα είτε για δύναμη είτε για ροπή διαφορετικής κάθε φορά διεύθυνσης. Το τελευταίο συνδέεται ηλεκτρονικά και μέσω καλωδίου με ηλεκτρονική κάρτα της εταιρείας *NATIONAL INSTRUMENTS* η οποία τοποθετείται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο έχει εγκατασταθεί το αντίστοιχο πρόγραμμα.

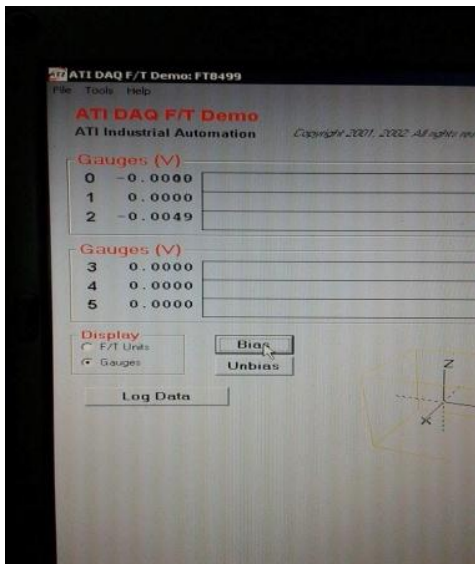


[Εικόνα 5.8: Ηλεκτρονική Κάρτα η οποία συνδέει το δυναμόμετρο με τον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή](#)

Η όλη μετρητική διαδικασία ελέγχεται μέσω του προγράμματος στον Η/Υ, όπου φαίνονται οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται στο δυναμόμετρο κάθε χρονική στιγμή. Η συχνότητα δειγματοληψίας επιλέχθηκε 50 Hz (50 μετρήσεις το δευτερόλεπτο) η οποία καλύπτει πλήρως τις ανάγκες του πειράματος σε έγκαιρη εκτίμηση των τιμών των δυνάμεων.

Ως γνωστόν, η μέτρηση των ενδείξεων του δυναμομέτρου γίνεται με χρήση ηλεκτρικού ρεύματος, επομένως τα τελευταία εξάγονται ως Volts. Η εταιρεία μαζί με το δυναμόμετρο, παρείχε το αρχείο Calibration (SI-660-60) το οποίο και φορτωνόταν πριν από κάθε χρήση του προγράμματος στον Η/Υ. Το αρχείο calibration είναι μορφής Notepad και πρέκυψε πειραματικά με εργαστηριακές δοκιμές από τους κατασκευαστές. Συγκεκριμένα, μετατρέπει τις ενδείξεις Volts σε ενδείξεις μονάδων δύναμης (Kg, gr, kp, κλπ) και ροπής (kg*m, kg*cm, kp*cm κλπ). Το παραπάνω γίνεται με χρήση της συνάρτησης μεταφοράς, η οποία είναι της μορφής $y=ax+b$, όπου x είναι τα μετρούμενα από το όργανο Volts και y τα μεγέθη αντιστοίχισης. Η πειραματική διαδικασία εξαγωγής της συνάρτησης μεταφοράς περιλαμβάνει την χρήση συγκεκριμένων βαρών, των οποίων οι τιμές είναι καθορισμένες και γνωστές και φορτίζουν το δυναμόμετρο έτσι ώστε το τελευταίο να δώσει τη ηλεκτρική ένδειξη Volts. Επομένως, γνωρίζουμε την ακριβή αντιστοίχιση ανάμεσα σε Volts και μονάδες βάρους (Kg), για το συγκεκριμένο βάρος.

Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για ένα σύνολο βαρών διαφορετικού βάρους το καθένα, λαμβάνουμε τα αντίστοιχα μεγέθη Voltesπου αντιστοιχίζονται με αυτά. Προκύπτει έτσι , από το σύνολο των σημείων Voltes/kg, μία συνάρτηση με τετμημένη Voltesκαι τεταγμένη Kg, η οποία ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς. Το αρχείο Calibration της εταιρείας περιλαμβάνει ένα σύνολο (πλέγμα) τέτοιων συναρτήσεων μεταφοράς , μία για κάθε είδους φόρτιση του δυναμομέτρου. Με άλλα λόγια, επειδή το δυναμόμετρο έχει την ευχέρεια μέτρησης συνδυασμένης φόρτισης, για κάθε είδους συνδυασμό προκύπτει διαφορετική συνάρτηση μεταφοράς. Έτσι, το αρχείο calibration περιέχει ένα πλέγμα συναρτήσεων και επομένως, ανάλογα με τον συνδυασμό φόρτισης στο δυναμόμετρο, χρησιμοποιείται και η ανάλογη συνάρτηση μεταφοράς. Κατά αυτόν τον τρόπο τα Voltesμετατρέπονται σε μονάδες που μας ενδιαφέρουν (στην προκειμένη περίπτωση Kgγια τις δυνάμεις και Kg*cmγια τις ροπές). Λόγω όμως του ότι το δυναμόμετρο είχε παραμείνει αρκετό καιρό εκτός λειτουργίας και λόγω πιθανής φθοράς στο πέρασμα του χρόνου, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί εκ νέου βαθμονόμηση του οργάνου, δηλαδή εξαγωγή νέων συναρτήσεων μεταφοράς. Η αναλυτική διαδικασία βαθμονόμησης παρουσιάζεται εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.



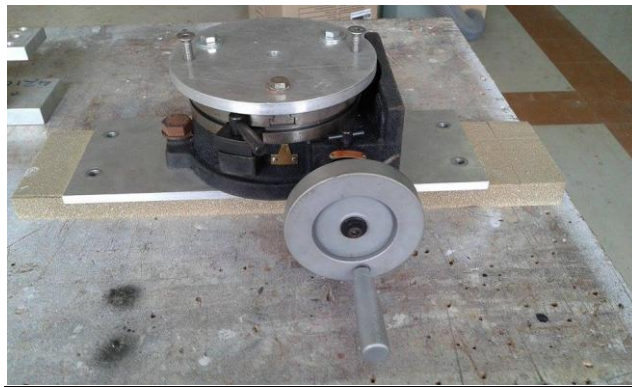
Εικόνα 5.9: Ενδείξεις Voltes στο πρόγραμμα, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση έχει πραγματοποιηθεί μηδενισμός των τιμών(BIAS)



Εικόνα 5.10: Φόρτιση του οργάνου και εξαγωγή αποτελεσμάτων σε Kgκαι Kg*cm με χρήση της συνάρτησηςμεταφοράς του κατασκευαστή.



Εικόνα 5.11: Δυναμόμετρο πριν την τοποθέτησή του στην διάταξη, στο οποίο είναι και τοποθετημένες οι δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες στήριξης στην άνω και κάτω πλευρά του



Εικόνα 5.12 : Διαιρέτης πριν την τοποθέτησή του στην διάταξη

Ο διαιρέτης συνδέεται από την πάνω πλευρά του με την αλουμινένια ράβδο, ενώ με την κάτω του πλευρά με το δυναμόμετρο. Ο ρόλος του διαιρέτη είναι η κίνηση γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (κίνηση $\gamma\omega\upsilon$), όπως άλλωστε μας ενδιαφέρει στην περίπτωση της υδροδυναμικής μελέτης της καρίνας, αφού κατά αυτόν τον τρόπο αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης του ρευστού στην πτέρυγα. Οι μοίρες που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ήταν οι μηδενικές (upstream), 3.5 και 7, με τις δύο τελευταίες τόσο στην ωρολογιακή, όσο και στην αντιωρολογιακή φορά. Η αναγραφόμενες τιμές και η μετρητική διάταξη του διαιρέτη στις μοίρες φαίνονται στην εικόνα 5.13. Η πρώτη εικόνα (5.13.1) δείχνει τις μοίρες ενώ η δεύτερη (5.13.2) δείχνει τις υποδιαιρέσεις της μοίρας. Συγκεκριμένα, κάθε πλήρης περιστροφή της δεύτερης διάταξης είναι οχτώ μοίρες και έτσι μετακινώντας τον συγκεκριμένο μοχλό περιστροφικά, αλλάζει και η ένδειξη της μοίρας και στην πρώτη διάταξη. Η γωνία που αναγράφεται στο σχήμα είναι η γωνία upstream στην καρίνα και η ένδειξη δεν είναι μηδέν, αφού το μηδέν ορίστηκε αυθαίρετα ως προς τις μοίρες που δείχνει το όργανο. Δηλαδή, πρώτα βρέθηκε η γωνία upstream της καρίνας και εν συνεχεία τοποθετήθηκε ο δείκτης του διαιρέτη σε κάποια θέση (125 μοίρες) η οποία λειτούργησε ως θέση αναφοράς (upstream).



Εικόνα 5.14: Μετρητική ένδειξη διαιρέτη 5.14.1: Μοίρες 5.14.2: υποδιαίρεση της μοίρας



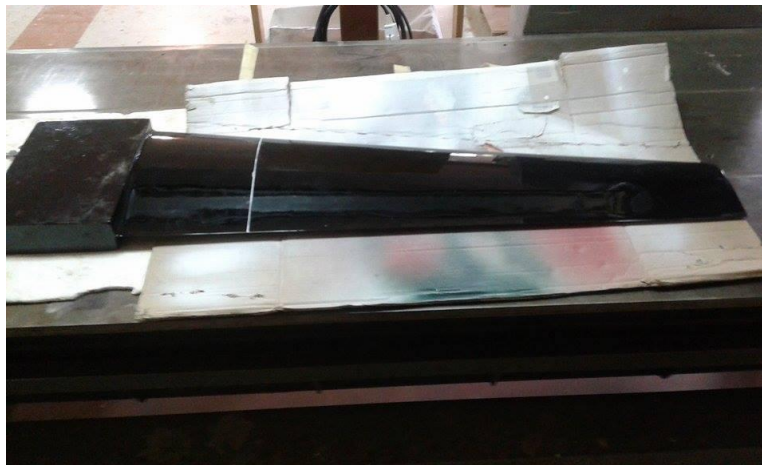
Εικόνα 5.15: Ολοκληρωμένη διάταξη όπου φαίνονται το δυναμόμετρο, ο διαιρέτης και η δοκός στήριξης της κατασκευής σε ανάστροφη φορά.

5.5 : Ευθυγράμμιση καρίνας με την υπόλοιπη διάταξη

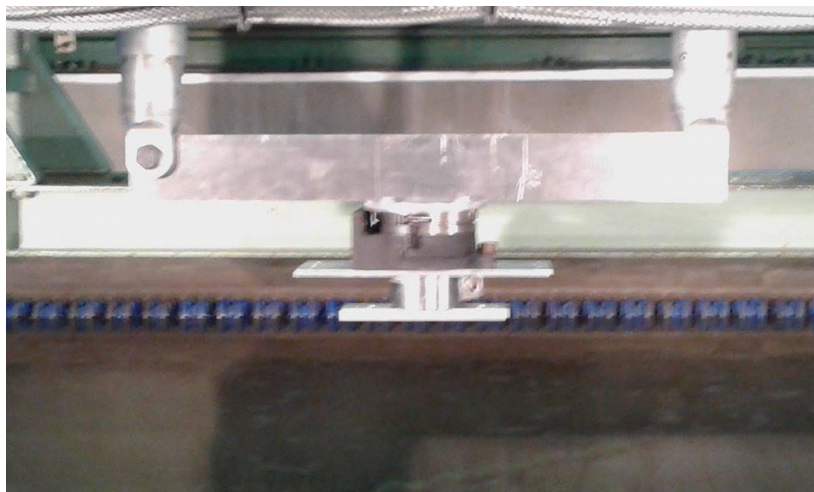
Αφού πραγματοποιήθηκε η κατασκευή των δύο τμημάτων της καρίνας στο ξυλουργείο του εργαστηρίου και όταν αυτά συνδέθηκαν μεταξύ τους, έγινε και η τελική βαφή. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε ευθυγράμμιση της όλης διάταξης στο φορείο, έτσι ώστε τα κέντρα του δυναμομέτρου, της καρίνας και του διαιρέτη να βρίσκονται είναι συνευθειακά για να είναι τα αποτελέσματα ακριβή. Η ευθυγράμμιση έγινε με την βοήθεια laser, σύμφωνα με το οποίο δείχνεται η σταθερή οριζόντιος ευθεία (παράλληλη με την επιφάνεια του νερού) και η κατακόρυφη ευθεία (κάθετη στην επιφάνεια του νερού). Επομένως, η ευθυγράμμιση εξασφάλισε ότι η υδροτομή βρισκόταν σε καθετότητα με την επιφάνεια του νερού και αντιστοιχία γεωμετρικών κέντρων του επιμέρους στοιχείων της διάταξης. Επίσης, με χρήση του laser χαράχθηκε και η παράλληλη με την ίσαλο γραμμή των 80 cm έτσι ώστε να γνωρίζουμε το βύθισμα.



Εικόνα 5.17: Χάραξη ισάλου



Εικόνα 5.16: Τελική καρίνα βαμμένη , όπου έχει χαραχθεί και η ίσαλος πλεύσης



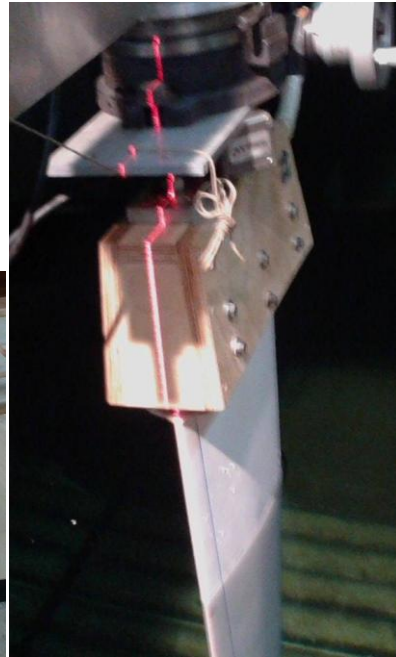
Εικόνα 5.17: Η μεταλλική δοκός, τα σημεία πάκτωσης, ο διαιρέτης και το δυναμόμετρο



Εικόνα 5.18: Η τελική διάταξη

Τελικώς όμως η παραπάνω καρίνα, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, δεν κατάφερε να χρησιμοποιηθεί καθώς οι δυνάμεις και οι ροπές που αναπτύσσονταν κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν αρκετά μεγάλες. Αυτό συνέβη λόγω το μεγάλου μοχλοβραχίονα από το δυναμόμετρο, δηλαδή της κατακόρυφης απόστασης του σημείου εφαρμογής της πλάγιας δύναμης της άνωσης από το δυναμόμετρο. Κατά αυτόν τον τρόπο, αναπτύσσονταν ισχυρές ροπές γύρω από τον άξονα στα όρια αντοχής του οργάνου. Το πρόβλημα αυτό ήταν πολύ έντονο στις περιοχές ταχυτήτων και γωνιών πρόσπτωσης που μας ενδιαφέρουν. Συγκεκριμένα, όταν η ταχύτητα του φορείου ήταν 2m/s και η γωνία πρόσπτωσης 7 μοίρες, οι ροπές που αναπτύσσονταν λόγω του μεγάλου μοχλοβραχίονα καθιστούσαν αδύνατη την χρήση του οργάνου. Επιπλέον, λόγω του εξαιρετικά λεπτού άκρου της καρίνας (στο χείλος εκφυγής) υπήρξαν προβλήματα ρωγμών και εισχώρησης νερού, ύστερα από κάποιον αριθμό δοκιμαστικών πειραμάτων.

Επομένως, η συγκεκριμένη καρίνα δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί αλλά αντί αυτής χρησιμοποιήθηκε μία άλλη διαθέσιμη στο εργαστήριο, με παραπλήσια χαρακτηριστικά και μέγιστο πάχος της εγκάρσιας τομής ίσο με 18% της χορδής. Η τελική διάταξη του πειράματος ήταν η ίδια όπως αυτή που αναλύθηκε προηγουμένως. Η ευθυγράμμιση πραγματοποιήθηκε ξανά και το βύθισμα αυτήν την φορά επιλέχθηκε στα 60 cm έτσι ώστε να μειωθεί η ροπή περί τον άξονα για αυξημένη δύναμη άνωσης. Στην συγκεκριμένη καρίνα η ακμή εκφυγής είχε μία μικρή κλίση προς τα πρύμα (1.2 μοίρες) που συνηθίζεται στα ιστιοπλοϊκά. Επομένως, με χρήση του laser, χαρακτήκεται στην NACA η κάθετη στην επιφάνεια του νερού ευθεία έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η σωστή ευθυγράμμιση, εξασφαλίζοντας έτσι ότι μία εγκάρσια τομή σε κάθε θέση βυθίσματος είναι παράλληλη με την ίσαλο επιφάνεια.



Εικόνες 5.19: 5.19.1:Η καρίνα διεξαγωγής των πειραμάτων, όπου είναι τοποθετημένος διεγέρτης τύρβης τύπου λωρίδας άμμου 5.19.2:Ευθυγράμμιση με laser στην τελική πειραματική διάταξη

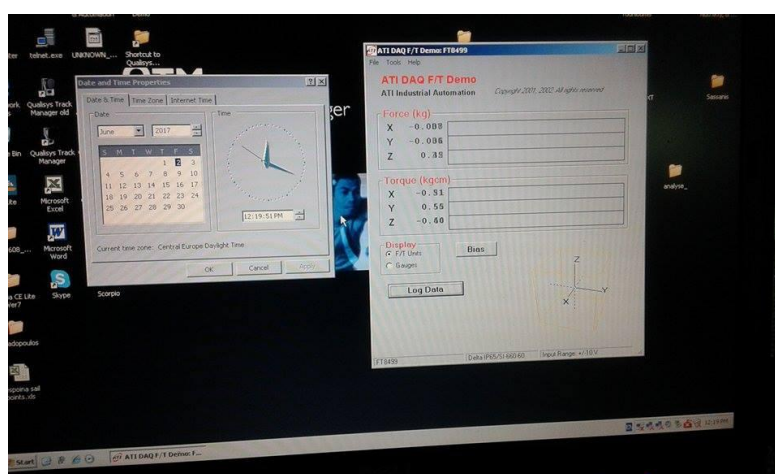


Εικόνες 5.20: 5.20.1, 5.20.2, 5.20.3 :Διαφορετικές όψεις της τελικής διάταξης , με τοποθετημένη την καρίνα στο φορείο

5.6 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την εξαγωγή των καμπυλών άνωσης και αντίστασης για διάφορες περιπτώσεις. Κύριος στόχος ήταν η μελέτη της επίδρασης διεγερτών τύρβης διαφόρων ειδών στην ανωστική δύναμη, έτσι ώστε να διασαφηνιστεί η καταλληλότητα του καθενός για επόμενα πειράματα που αφορούν την ολοκληρωμένη πειραματική μελέτη ιστιοπλοϊκού σκάφους σε πειραματική εξαμενή. Η επιλογή του διεγέρτη είναι μεγάλης σημασίας λόγω της ευαισθησίας της καρίνας στις διάφορες μεταβολές του πεδίου ροής. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο στάδιο της εργασίας, είναι προτιμότερη η χρήση διεγερτών που προκαλούν όσο το δυνατόν μικρότερη επίδραση στο πεδίο πιέσεων από το οποίο εξαρτάται η παραγωγή ανωστικής δύναμης. Έτσι κρίνονται καταλληλότεροι οι διεγέρτες τύπου ταινίας άμμου σε σύγκριση με το κοινό σύρμα, το οποίο επιβάλλει μεγάλες αλλαγές στο ροϊκό πεδίο λόγω της γεωμετρίας του. Η ακριβής επίδραση της επιβολής τύρβης εξετάζεται μέσω των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, στα οποία και θα δεχθεί ο καταλληλότερος τύπος διεγέρτη.

Η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε μία επαναληπτική διαδικασία με διαφορετικές παραμέτρους κάθε φορά. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε 1 και 2 m/s για γωνίες πρόσπτωσης της ροής 0 μοίρες, 3.5 μοίρες και 7 μοίρες για την κάθε ταχύτητα. Στις δύο τελευταίες, οι μετρήσεις έγιναν και από την ωρολογιακή και από την αντιωρολογιακή φορά με σκοπό να δειχθεί η συμμετρία των αποτελεσμάτων. Όπως θα φανεί και στα σχήματα παρακάτω, οι αποκλίσεις μεταξύ των τιμών των δυνάμεων που προκύπτουν στις δύο συμμετρικές πλευρές κρίθηκαν αμελητέες, πράγμα το οποίο δείχνει ότι η ευθυγράμμιση πραγματοποιήθηκε επιτυχώς και η γωνία μηδενικής πρόσπτωσης του διαιρέτη προσέγγιζε με καλή ακρίβεια την πραγματική γωνία Upstream της καρίνας.



Εικόνα 5.21: Διαδικασία μέτρησης στην οθόνη του H/Y με το χρονόμετρο στα αριστερά για να διατηρείται συγκεκριμένος χρόνος μέτρησης.

Επομένως, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δέκα διαφορετικές καταστάσεις (0 μοίρες, 3.5 ωρολογιακά, 3.5 αντιωρολογιακά, 7 μοίρες ωρολογιακά, 7 μοίρες αντιωρολογιακά για 1 και 2m/s αντίστοιχα). Σε κάθε περίπτωση το πείραμα διεχρήθη τρεις φορές για καλύτερη προσέγγιση, ενώ λήφθηκε η μέση τιμή από τις τρεις μετρήσεις για κάθε

περίπτωση. Η χρονική διάρκεια αναμονής μεταξύ δύο μετρήσεων ήταν 10 λεπτά και αυτό για να επέλθει ηρεμία και απόσβεση των κυματισμών που δημιουργήθηκαν από την προηγούμενη μέτρηση. Η διαδικασία μέτρησης αποτελούνταν αρχικά με φόρτωση του CalibrationFile του κατασκευαστή του δυναμομέτρου, και στην συνέχεια μηδενισμός των ενδείξεων (Bias) για να εξαιρεθούν οι παραμένουσες τάσεις στην διάταξη που προέρχονταν από την σύσφιξη των διαφόρων τεμαχίων. Ο μηδενισμός γινόταν αμέσως πριν την έναρξη των πειραμάτων και αφού είχε επέλθει ηρεμία στην επιφάνεια του νερού. Πριν από κάθε μέτρηση λαμβανόταν μηδενική μέτρηση για 30 δευτερόλεπτα, έτσι ώστε η τελευταία να αφαιρεθεί από την κανονική μέτρηση, για τυχόν μικροενδείξεις του δυναμομέτρου που δεν οφείλονταν στο πεδίο ροής. Ο χρόνος των 30 δευτερολέπτων προέκυψε διότι οι κυματισμοί που παράγονταν στην δεξαμενή είχαν περίοδο περίπου 33 sec, επομένως η μέτρηση γινόταν στον συγκεκριμένο χρόνο για να συναντήσει η καρίνα δύο διαδοχικές κοιλάδες ή κορυφές του κυματισμού.

Μετά από κάθε μέτρηση το αρχείο Notepad με το σύνολο των δειγματοληψιών το οποίο εξήγαγε το πρόγραμμα (από 1500 έως 2500 μετρήσεις ανάλογα με την περίπτωση, για συχνότητα 50Hz) επεξεργαζόταν με το excel και υπολογιζόταν ο μέσος όρος όλων των μετρήσεων. Έτσι, από τον μέσο όρο των μετρήσεων μίας μέτρησης σε συγκεκριμένη ταχύτητα φορείου αφαιρούνταν οι αντίστοιχες μηδενικές τιμές που είχαν μετρηθεί πριν από κάθε επανάληψη. Προέκυψαν κατά αυτόν τον τρόπο οι ακριβείς ενδείξεις του οργάνου που οφείλονταν μόνο στην φορτίσεις λόγω της κίνησης της καρίνας, μέσω το φορείου στο νερό της δεξαμενής.

5.7 Βαθμονόμηση Δυναμομέτρου

5.7.1 Ευθυγράμμιση συστήματος βαθμονόμησης

Μετά το τέλος των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του δυναμομέτρου έτσι ώστε να εξαχθεί νέα συνάρτηση μεταφοράς με σκοπό να εξαιρεθούν τυχόν αποκλίσεις από τα πραγματικά μεγέθη σε σύγκριση με τις τιμές που προέκυψαν με βάση το Calibrationfile της εταιρείας. Πιο συγκεκριμένα, επιδιώχθηκε η αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης έτσι όπως έγιναν τα πειράματα, σε διάταξη βαθμονόμησης εκτός φορείου. Με άλλα λόγια, αφού το δυναμόμετρο τοποθετήθηκε στην κατασκευή, το τελευταίο εξετάστηκε από διάφορες φορτίσεις, διαφορετικού μέτρου και διεύθυνσης κατά τους τρεις άξονες. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια μίας ξύλινης δοκού, που προσομοιάζει την καρίνα, στο κάτω μέρος της οποίας ασκήθηκαν διάφορα φορτία, ενώ το επάνω συνδέθηκε με το δυναμόμετρο μέσω μίας ξύλινης βάσης(θήκης). Αυτό έγινε για να επιτευχθεί ο μοχλοβραχίονας των ροπών (απόσταση εφαρμογής των δυνάμεων με το δυναμόμετρο) όπως αυτός υπήρχε και κατά την πειραματική διαδικασία. Δηλαδή, καθώς το κέντρο εφαρμογής των δυνάμεων υπολογίστηκε περίπου στο 65%, επιδιώχθηκε να φορτίζεται το δυναμόμετρο στον ίδιο μοχλοβραχίονα που υπήρχε κατά το πείραμα στην δεξαμενή. Η τιμή αυτής της απόστασης μας ενδιαφέρει μόνο προσεγγιστικά καθώς στόχος είναι το δυναμόμετρο να δουλεύει σε παρόμοιες συνθήκες με τα πειράματα για να

συμπεριφερθεί με τον ίδιο τρόπο. Εντούτοις, καθώς η δύναμη της άνωσης είναι ευθέως ανάλογη με το εμβαδό της εκάστοτε εγκάρσιας τομής, ο ζητούμενος μοχλοβραχίονας προκύπτει ως ένα απλό ολοκλήρωμα επιφάνειας επί την απόσταση από το δυναμόμετρο, στα διάφορα βυθίσματα:

$$\int_0^T S(z) \cdot z \cdot dz = V * Z_{\text{ζητούμενο}}$$

Όπου,

S: εμβαδό της εγκάρσιας τομής σε συγκεκριμένο βύθισμα

Z: απόσταση της εγκάρσιας τομής από κάποιο σημείο αναφοράς

V: ο ολικός όγκος της καρίνας

Z_{ζητούμενο}: η απόσταση του κέντρου εφαρμογής των δυνάμεων αντίστασης και άνωσης από το σημεία αναφοράς.

Το S προκύπτει συναρτήσει της χορδής και εφόσον η μεταβολή της χορδής κατά το βύθισμα είναι γνωστή, μπορεί να υπολογιστεί ο εμβαδό της κάθε τομής. Το εμβαδό υπολογίζεται με την βοήθεια του προγράμματος Autocad με την εντολή Area, εφόσον η καμπύλη του περιγράμματος της εγκάρσιας τομής είναι γνωστή (Theory of Wing Sections Summary of Airfoil Data). Στην συνέχεια, αφού λήφθηκαν οι τιμές του εμβαδού για διάφορες τιμές χορδών, με χρήση του κανόνα του Simpson υπολογίστηκε το ζητούμενο ολοκλήρωμα.

Έτσι, με την βοήθεια τροχαλιών, τα φορτία που ασκήθηκαν στον ίδιο μοχλοβραχίονα και οι ροπές που ασκήθηκαν στο δυναμόμετρο λόγω της δύναμης Y (ροπή ως προς X-άξονα) και της αντίστασης (ροπή ως προς Y-άξονα), ήταν ίδιες για πείραμα και βαθμονόμηση. Μάλιστα, στην περίπτωση της βαθμονόμησης, εάν μέσω των τροχαλιών ασκούσαν τα ίδια φορτία που προέκυπταν από το πείραμα στην δεξαμενή, αυτομάτως προέκυπταν και οι ίδιες ροπές.



Εικόνα 5.22: Διάταξη Βαθμονόμησης



Εικόνα 5.23: Πρότυπα βάρη που χρησιμοποιήθηκαν στην βαθμονόμηση

Η διάταξη της βαθμονόμησης χρειάστηκε να ευθυγραμιστεί με ακρίβεια έτσι ώστε οι δυνάμεις να ασκούνται σε καθετότητα με το δυναμόμερο. Για παράδειγμα, μία οριζόντια δύναμη θα πρέπει να ασκούνται σε ίδια διεύθυνση με τον διαμήκη άξονα του δυναμομέτρου έτσι ώστε να μην υπάρχουν συνιστώσες στις άλλες διευθύνσεις. Η ευθυγράμμιση πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια laser, όπου επιδιώχθηκε η ταύτιση των κέντρων εφαρμογής των δυνάμεων μέσω των τροχαλιών, με τους άξονες του δυναμομέτρου.



[Εικόνες 5.24: Ευθυγράμμιση συστήματος βαθμονόμησης](#)

5.7.2 : Διαδικασία Βαθμονόμησης

Η διαδικασία βαθμονόμησης περιλάμβανε την συστηματική άσκηση φορτίων στο δυναμόμετρο, μέσω των τροχαλιών και της ξύλινης δοκού. Τα πρότυπα βάρη τοποθετούνταν στην τροχαλία με την βοήθεια βάσης, ενώ την ίδια στιγμή γινόταν μέτρηση των Volttestου δυναμομέτρου και εξαγωγή των μέσω των όρων. Επομένως, πραγματοποιήθηκε η αντιστοιχία ανάμεσα σε Volttest και πραγματικά κιλά από τα πρότυπα βάρη. Κατά αυτόν τον τρόπο και επιδιώκοντας την λήψη τιμών (Voltes) κοντά στην περιοχή λειτουργίας που είχαν προκύψει πειραματικά από τις μετρήσεις στην δεξαμενή, εξαγόταν η πραγματική συνάρτηση μεταφοράς του οργάνου. Έτσι, εισάγοντας τα Volttest του πειράματος της καρίνας στην τελευταία, προέκυψαν οι πραγματικές τιμές των τιμών των δυνάμεων αντίστασης και άνωσης σε κιλά.

Αρχικά τοποθετήθηκαν βάρη σε μονοαξονική φόρτιση σε καθέναν από τους τρεις άξονες. Στον άξονα Y, τα φορτία ασκήθηκαν και από τις δύο πλευρές του δυναμομέτρου συμμετρικά, για να εξετασθεί η περίπτωση της ωρολογιακής και αντιωρολογιακής στροφής της καρίνας συμμετρικά κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Στην συνέχεια, τοποθετήθηκε ένα σταθερό βάρος κατά τον άξονα διαμήκη άξονα(X) και διάφορα βάρη στον άξονα Y, με σταθερό πάντα βάρος στον Χάξονα. Έτσι, εξήχθη μία συνάρτηση μεταφοράς η οποία χρησιμοποιήθηκε εκ των νυστέρων για να προκύψουν οι τιμές της άνωσης(δύναμη Y άξονα) σε Kgόταν η αντίσταση είναι περίπου ίση με το βάρος που τοποθετήθηκε. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε για διάφορα βάρη στον διαμήκη άξονα, ενώ η αλλαγή των βαρών στον Yάξονα ήταν σταθερή. Για κάθε ένα διάμηκες βάρος, που αντιπροσωπεύει την αντίσταση, προέκυψε μία συνάρτηση μεταφοράς που συσχετίζει τιμές Voltοργάνου, σε τιμές βάρους Y άξονα (Lift) σε κιλά. Αυτό έγινε για να σχηματισθεί ένα πλέγμα συναρτήσεων μεταφοράς που να καλύπτει όλο το φάσμα λειτουργίας του δυναμομέτρου.

Αναλυτικότερα, η διαδικασία σχηματισμού του πλέγματος όπως αναφέρθηκε αποτελούνταν από μία επαναληπτική διαδικασία συστηματικής αλλαγής βαρών κατά το Y (Clockwise&CounterClockwise) , όπου σε κάθε επανάληψη το βάρος κατά την διεύθυνση X άλλαζε. Επομένως, για να μετατραπούνγια την δύναμη Y τα Volt πειράματος σε kg, επιλεγόντουσαν οι δύο συναρτήσεις μεταφοράς των οποίων τα βάρη στον X άξονα περιλάμβαναν τη δύναμη κατά το X που είχε προκύψει από το πείραμα. Με άλλα λόγια, εάν είχε βρεθεί από μία συνάρτηση μεταφοράς (Volt σε Kg -Y) για καθένα από τα βάρη στον διαμήκη άξονα, 3 kg και 4 kg αντίστοιχα, και η μέτρηση είχε δείξει τιμή δύναμης κατά τον X μεταξύ των δύο προηγούμενων τιμών, τότε με γραμμική παρεμβολή βρισκόντουσαν τα κιλά Y για το δεδομένο βάρος στον X άξοναπειράματος. Η παραπάνω διαδικασία γινόταν με τιμές Voltσεκαι όχι kg. Να επισημάνουμε ότι οι δυνάμεις βαθμονόμησης στον Zάξονα ήταν περίπου ταυτόσημες με του πειράματος για τον ίδιο άξονα, εάν είχε επιτευχθεί ταύτιση δυνάμεων μεταξύ πειράματος και βαθμονόμησης στους δύο άλλους άξονες. Αυτό γιατί μία δύναμη κατά το χγια παράδειγμα, με τον δεδομένο μοχλοβραχίονα από το δυναμόμετρο, ασκούσε και μεγάλη δύναμη Ζστο δυναμόμετρο, καθώς το δοκάρι λόγω ροπής πίεζε το δυναμόμετρο με τέτοιο τρόπο που αυξανόταν η δύναμη στον Zάξονα.

Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού της συνάρτησης μεταφοράς (Y-Voltes σεY-Kg) για φόρτιση από τα αριστερά (CounterClockwise)για μηδενικό βάρος στον Χάξονα.

Με μηδενική φόρτιση κατά το X, τοποθετήθηκαν διαδοχικά βάρη κατά το Y με τιμές: 0.2 ,0.7 , 1.5 , 1 , 2 , 2.5 , 3 , 4, 5, 6 , 7, 8 και 9 κιλά. Ταυτόχρονα λαμβάνονταν και οι ενδείξεις τους δυναμομέτρου σε Voltes, οπότε και προέκυπτε και η ζητούμενη γραμμική συνάρτηση μεταφοράς από τους μέσους όρους των μετρήσεων. Όπως και στα πειράματα, πριν τοποθετηθεί το κάθε βάρος πραγματοποιούνταν μηδενισμός (bias) στο δυναμόμετρο, καθώς και λήψη μηδενικής τιμής για κάποια δευτερόλεπτα, έτσι ώστε να αφαιρεθεί από την τιμή της τελικής μέτρησης. Τα παραπάνω φαίνονται στον πίνακα 5.25, όπου παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα μέρος των μετρήσεων βαθμονόμησης.

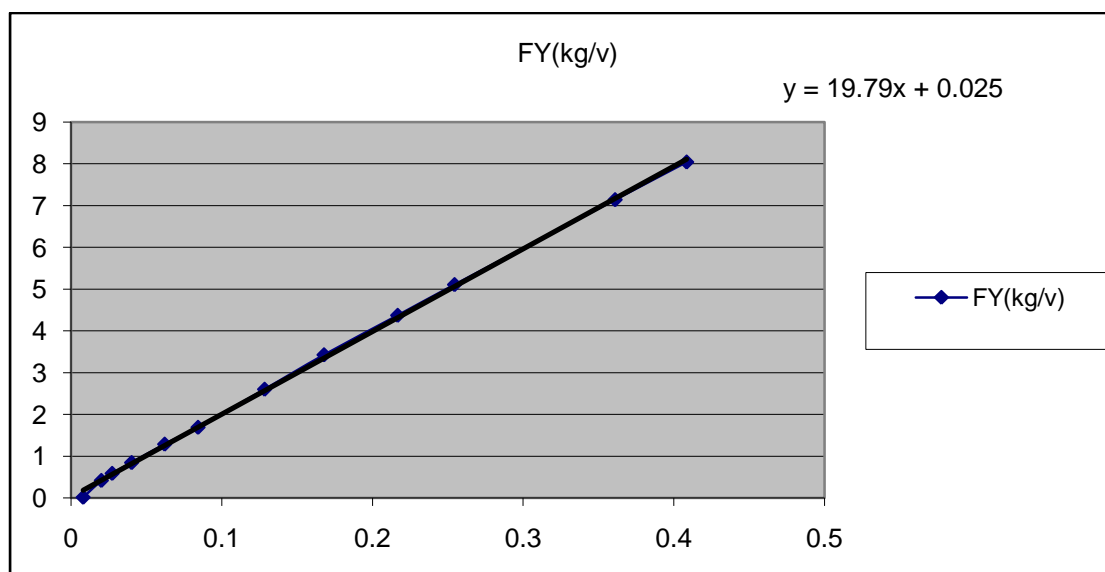
Να επισημάνουμε ότι οι δυνάμεις αντίστασης στο πείραμα, όπως θα δειχθεί σε επόμενο εδάφιο της εργασίας, δεν προέκυψαν σωστές διότι το δυναμόμετρο παρουσίασε προβλήματα για την μέτρηση στην συγκεκριμένη διεύθυνση. Εντούτοις, στην περίπτωση της βαθμονόμησης του οργάνου, μας ενδιαφέρει να πετύχουμε παρόμοιες συνθήκες φόρτισης και να εξάγουμε την συνάρτηση μεταφοράς της δύναμης FY. Επομένως,η

διαδικασία βαθμονόμησης που στηρίχθηκε στις δυνάμεις κατά το Χυνεχίστηκε κανονικάέτσι ώστε επιτευχθούν όμοιες συνθήκες με το πείραμα, χωρίς βέβαια στο τέλος να λαμβάνονται υπόψη οι δυνάμεις κατά το Χ(αντίσταση), λόγω των λανθασμένων ενδείξεων του οργάνου.

200gr	zero	0,079789	0,075646	0,033894	0,306153	0,257766	0,190989	0,178815	0,188768	0,254943	0,200071	0,406646	0,179774
	μετρηση	0,079615	0,09097	0,073462	12,16523	0,226397	0,319138	0,178647	0,180707	0,37254	0,199671	0,526196	0,172478
		0,000174	0,015324	0,039568	11,85907	0,03137	0,12815	0,000168	0,008061	0,117597	0,0004	0,119551	0,007296
500gr		-0,08354	0,075086	0,023983	0,298523	0,30338	0,221504	-0,17863	0,188334	-0,25532	0,199953	0,406136	-0,18033
		-0,08573	-0,34294	0,132162	30,08306	0,173975	0,536482	-0,17865	0,1682	-0,55014	0,199165	0,706893	-0,16205
		0,002191	0,41803	0,108179	29,78453	0,129404	0,314978	1,87E-05	0,020134	0,294819	0,000788	0,300757	0,01828
700 gr		0,008971	-0,03058	-0,05587	0,095972	-0,15625	0,055418	-0,17875	0,18747	-0,25601	0,199947	0,40639	-0,17974
		0,038985	-0,61789	-0,01058	41,93778	-0,7144	0,408687	-0,18465	0,160177	-0,67093	0,197884	0,828285	-0,15117
		0,030014	0,587305	0,04529	41,84181	0,558149	0,353269	0,0059	0,027293	0,414926	0,002063	0,421895	0,028571
1kg		0,043693	-0,04499	-0,16278	0,449411	-0,6727	-0,11989	-0,18619	0,188663	-0,25971	0,200209	0,41031	-0,17517
		0,053982	-0,89089	0,053216	60,11027	-1,03392	0,45252	-0,18703	0,148446	-0,85006	0,198731	1,013361	-0,13678
		0,010289	0,845901	0,215999	59,66086	0,361219	0,572414	0,000846	0,040216	0,590354	0,001478	0,603051	0,038384
1.5 kg		0,031674	0,061818	0,065449	-0,0826	-0,19119	-0,0137	-0,19013	0,190178	-0,2595	0,201504	0,415059	-0,17092
		0,066102	-1,22555	0,378742	89,61542	1,201094	0,928128	-0,16907	0,128034	-1,15875	0,197861	1,310789	-0,11365
		0,034428	1,287363	0,313293	89,69802	1,392283	0,941825	0,021052	0,062144	0,899257	0,003643	0,89573	0,057271

Πίνακας 5.25 : Αρχείο επεξεργασίας των μετρήσεων. Το κάθε νούμερο είναι ο μέσος όρος για την συγκεκριμένη μέτρηση και φαίνεται η αφαίρεση της μηδενικής από την κανονική μέτρηση.

Για σταθερό βάρος Χ(μηδενικό), φαίνονται οι τιμές βαρών που τοποθετήθηκαν διαδοχικά κατά το Υ (200 gr, 500 gr, ...) και οι ενδείξεις του δυναμομέτρου. Επιλέγοντας τα Voltes(10^1 στήλη), σχηματιζόταν η ζητούμενη συνάρτηση μεταφοράς:



Διάγραμμα 5.26: Διαγραμματική αναπαράσταση συνάρτησης μεταφοράς για μηδενικό βάρος κατά τον Χ άξονα

Η ίδια διαδικασία επανλήφθηκε για διάφορες τιμές βαρών στην τροχαλία Χ, που να καλύπτουν το εύρος τιμών της αντίστασης της καρίνας στα διάφορα πειράματα.

6. Αποτελέσματα Πειραμάτων

6.1 Μέθοδος επεξεργασίας αριθμητικών αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αναλύθηκαν μέσω του προγράμματος excel, από το οποίο λήφθηκαν οι μέσοι όροι των μετρήσεων για κάθε μία διαφορετική περίπτωση. Στους πρώτους τρεις από τους επόμενους πίνακες φαίνονται οι μετρήσεις του δυναμομέτρου μετά την καταγραφή σε αρχείο Notepad και στην συνέχεια εξαγωγή σε Excel για να είναι δυνατή η επεξεργασία. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η συχνότητα λήψης των μετρήσεων ήταν 50 Hz (50 μετρήσεις το δευτερόλεπτο), οι οποίες αυτόματα καταγράφονται και αποθηκεύονται από το πρόγραμμα σε μορφή Notepad. Στον πρώτο πίνακα φαίνεται το αρχείο εξαγωγής του προγράμματος του δυναμομέτρου, όπου στην πρώτη στήλη φαίνεται η ώρα της μέτρησης (με ακρίβεια δευτερολέπτου) και στις υπόλοιπες στήλες φαίνονται οι διάφορες δυνάμεις και ροπές. Οι συμβολισμοί F, T αφορούν τις δυνάμεις και τις ροπές σε μονάδες Kg και Kg*cm αντίστοιχα, όπως αυτές προέκυψαν με χρήση του Calibration file της εταιρείας. Οι υπόλοιπες στήλες (με τον συμβολισμό G) αφορούν τα Voltes. Για παράδειγμα η στήλη G0 αφορά τα Voltes κατά την φόρτιση στον διαμήκη άξονα X, η στήλη G1 τα Voltes στην διεύθυνση Y, κλπ.

Time	Fx	Fy	Fz	Tx	Ty	Tz	G0	G1	G2	G3	G4	G5	G6
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.186982796041521	-2.70279540978186	1.47689014511025	201.521716571562	5.84961060504681	6.07694122754588	0.209						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.356991819117972	-3.00001609946612	2.03649538432036	201.410140324263	-0.283990296123098	7.33485593834929	0.146						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.318531362329828	-3.14793658235725	1.41639712096633	202.576139643912	7.68484572015025	6.67099885663022	0.224						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.322416960293902	-2.79772487025615	1.42303013115835	200.581482024271	4.60614175173512	6.61250268992938	0.190						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.322416960293902	-2.79772487025615	1.42303013115835	200.581482024271	4.60614175173512	6.61250268992938	0.190						
6/6/2017 3:38:33 PM	0.163148116519499	-2.63376778480592	0.914931972024731	203.928258416316	4.78912930645848	6.50432068305832	0.185						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.163148116519499	-2.63376778480592	0.914931972024731	203.928258416316	4.78912930645848	6.50432068305832	0.185						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.2902054930673	-2.92092156425289	2.07435417664727	202.326767173628	4.55093720671179	6.7769643414644	0.205						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.249930397282848	-2.98466297517064	1.93206570579981	201.42169236358	2.61514063303777	6.34005710688937	0.1806640625						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.249930397282848	-2.98466297517064	1.93206570579981	201.42169236358	2.61514063303777	6.34005710688937	0.1806640625						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.461668431408634	-2.99741489104449	1.29387397443956	200.915812020729	3.96571441293509	6.99243039255894	0.173						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.264851567600549	-2.9682019102345	1.8450433793933	199.09619783856	6.22972410905146	6.434908660537	0.2197265625						
6/6/2017 3:38:33 PM	0.249760488001294	-2.85715839245574	2.06826226675989	202.711603643508	4.01123057036465	6.38236218842418	0.200						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.249760488001294	-2.85715839245574	2.06826226675989	202.711603643508	4.01123057036465	6.38236218842418	0.200						
6/6/2017 3:38:33 PM	-0.558616285202711	-3.04413275841549	1.29548610258295	201.589428532364	2.89770469991398	6.7293603018076	0.161						

Πίνακας 6.1: Ενδεικτικό αρχείο εξαγωγής αποτελεσμάτων σε αρχείο Notepad

Τα αποτελέσματα στην συνέχεια επεξεργάστηκαν με την βοήθεια του προγράμματος Excel, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση AVERAGE(μέσος όρος) της κάθε στήλης.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Time	Fx	Fy	Fz	Tx	Ty	Tz	G0	G1	G2	G3	G4	G5	G6	
2	06/06/2017 15:38	-0,18698	-2,7028	1,47689	201,5217	5,849611	6,076941	0,209961	0,087891	-2,22168	0,185547	2,109375	-0,33203	-1,54297
3	06/06/2017 15:38	-0,35699	-3,00002	2,036495	201,4101	-0,28399	7,334856	0,146484	0,048828	-2,17773	0,19043	2,163086	-0,3418	-1,54297
4	06/06/2017 15:38	-0,31853	-3,14796	1,416397	202,5761	7,684846	6,670999	0,224609	0,048828	-2,25098	0,200195	2,119141	-0,33203	-1,54297
5	06/06/2017 15:38	-0,32242	-2,79772	1,42303	200,5815	4,606142	6,612503	0,19043	0,073242	-2,20703	0,19043	2,109375	-0,3418	-1,54297
6	06/06/2017 15:38	-0,32242	-2,79772	1,42303	200,5815	4,606142	6,612503	0,19043	0,073242	-2,20703	0,19043	2,109375	-0,3418	-1,54297
7	06/06/2017 15:38	-0,16315	-2,63377	0,914932	203,9283	4,789129	6,504321	0,185547	0,087891	-2,25098	0,175781	2,124023	-0,33691	-1,53809
8	06/06/2017 15:38	-0,16315	-2,63377	0,914932	203,9283	4,789129	6,504321	0,185547	0,087891	-2,25098	0,175781	2,124023	-0,33691	-1,53809

Πίνακας 6.2: Ενδεικτικό αρχείο excel αποτελεσμάτων

2510	06/06/2017 15:39	-2,10E-03	-3,16857	0,189126	200,1908	6,008378	6,000247	0,185547	0,053711	-2,25098	0,19043	2,075195	-0,30762	-1,54297
2511	06/06/2017 15:39	-0,23063	-3,17678	2,709861	199,7455	4,464929	6,033902	0,219727	0,053711	-2,17773	0,205078	2,138672	-0,31738	-1,53809
2512	06/06/2017 15:39	-0,23063	-3,17678	2,709861	199,7455	4,464929	6,033902	0,219727	0,053711	-2,17773	0,205078	2,138672	-0,31738	-1,53809
2513	06/06/2017 15:39	-9,05E-02	-3,34378	1,987859	198,838	4,780621	5,791113	0,209961	0,043945	-2,19238	0,205078	2,114258	-0,30273	-1,54297
2514	06/06/2017 15:39	-9,05E-02	-3,34378	1,987859	198,838	4,780621	5,791113	0,209961	0,043945	-2,19238	0,205078	2,114258	-0,30273	-1,54297
2515	06/06/2017 15:39	-0,48878	-3,42194	0,939706	197,2137	3,135736	6,703509	0,15625	0,024414	-2,1875	0,219727	2,089844	-0,33203	-1,53809
2516	06/06/2017 15:39	-0,30693	-3,16387	3,050532	202,5606	9,919161	6,334292	0,288086	0,053711	-2,22656	0,205078	2,143555	-0,32715	-1,54297
2517	06/06/2017 15:39	-0,30693	-3,16387	3,050532	202,5606	9,919161	6,334292	0,288086	0,053711	-2,22656	0,205078	2,143555	-0,32715	-1,54297
2518	06/06/2017 15:39	-0,48204	-2,9096	0,310305	198,0841	-3,43819	6,423098	0,068359	0,063477	-2,16309	0,205078	2,109375	-0,3418	-1,53809
2519	06/06/2017 15:39	-8,14E-02	-2,90249	2,045493	201,5728	9,668905	6,581519	0,268555	0,068359	-2,23633	0,180664	2,104492	-0,32715	-1,54297
2520		-0,249	-3,058	1,584	198,635	3,640	6,443	0,184	0,056	-2,185	0,197	2,105	-0,327	-1,542
2521														
2522														

Πίνακας 6.3: Εξαγωγή των μέσων όρων όλων των μετρήσεων για ένα "run" στην δεξαμενή. Παρατηρούμε ότι λήφθηκαν 2519 μετρήσεις. Η μέτρηση ήταν για 45 δευτερόλεπτα(f=50Hz)

Μετά από την διεξαγωγή τριών επαναλήψεων σε κάθε περίπτωση παραμέτρων, λαμβανόταν ο μέσος όρος από τις τρεις αυτές μετρήσεις. Έτσι, προέκυπτε η τιμή των δυνάμεων για μία συγκεκριμένη ταχύτητα και σε συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης. Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για τρεις διαφορετικούς τύπους διεγέρτη τύρβης, καθώς και για την περίπτωση της καθαρής υδροτομής, δηλαδή χωρίς διεγέρτη, όπου είναι κυρίαρχη η στρωτή ροή.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2			FX(kg)	FY	FZ	TX(kg*cm)	TY	TZ	G0(VOLTES)	G1	G2	G3	G4	G5
3	ZERO		-0.040	-0.042	0.856	-0.529	2.110	-1.475	0.166	0.280	-0.197	0.251	0.102	-
4	RUN		-0.247	-3.046	1.575	197.865	3.543	6.417	0.183	0.056	-2.177	0.197	2.097	-
5	RUN-ZERO		-0.207	-3.004	0.719	198.395	1.433	7.891	0.017	-0.224	-1.980	-0.054	1.995	-
6														
7														
8														
9														
10														
11	ΜΕΣΕΣ ΤΙΜΕΣ													
12	ZERO	a	-0.033	-0.032	0.857	-0.605	2.089	-1.434	0.166	0.281	-0.196	0.250	0.101	-
13		b	-0.045	-0.041	0.865	-0.493	2.128	-1.491	0.166	0.281	-0.197	0.251	0.102	-
14		c	-0.042	-0.052	0.847	-0.490	2.113	-1.499	0.165	0.280	-0.198	0.252	0.102	-
15		d												
16		e												
17		f												
18		g												
19		h												
20	MESH TIMH		-0.040	-0.042	0.856	-0.529	2.110	-1.475	0.166	0.280	-0.197	0.251	0.102	-
21														
22														
23	RUN	a	-0.249	-3.015	1.567	195.547	3.301	6.339	0.180	0.058	-2.153	0.198	2.075	-
24		b	-0.249	-3.058	1.584	198.635	3.640	6.443	0.184	0.056	-2.185	0.197	2.105	-
25		c	-0.243	-3.064	1.573	199.413	3.689	6.468	0.185	0.055	-2.194	0.197	2.112	-
26		d												
27		e												
28		f												
29		g												
30		h												
31	MESH TIMH		-0.247	-3.046	1.575	197.865	3.543	6.417	0.183	0.056	-2.177	0.197	2.097	-

Πίνακας 6.7: Υπολογισμός μέσων όρων των τριών επαναληπτικών μετρήσεων για τις 7 μοίρες αντιρωλογιακά στο 1 m/s, χωρίς διεγέρτη τύρβης

Ενδεικτικά παρουσιάζεται το παραπάνω σχήμα, στο οποίο φαίνεται ο υπολογισμός των μέσων όρων των μετρήσεων για τις 7 μοίρες αντιρωλογιακά στο 1 m/s, χωρίς διεγέρτη τύρβης. Βλέπουμε ότι πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναληπτικές μετρήσεις αφού πρώτα μετρήθηκαν και αντίστοιχες μηδενικές πριν από κάθε μία από αυτές. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι τόσο των μηδενικών όσο και των υπό ταχύτητα φορείου. Έπειτα, αφαιρέθηκαν οι δύο πηγουμένους τιμές(μέσοι όροι), προκύπτοντας έτσι η ζητούμενη τιμή για κάθε μία δύναμη(FX,FY,FZ) και κάθε μία ροπή(TX,TY,TZ), καθώς και για τα αντίστοιχα Voltes(G0 για FX, G1 για FY,....., G5 για TZ).

6.2 Αριθμητικά αποτελέσματα για τους διάφορους τύπους διεγέρτη τύρβης

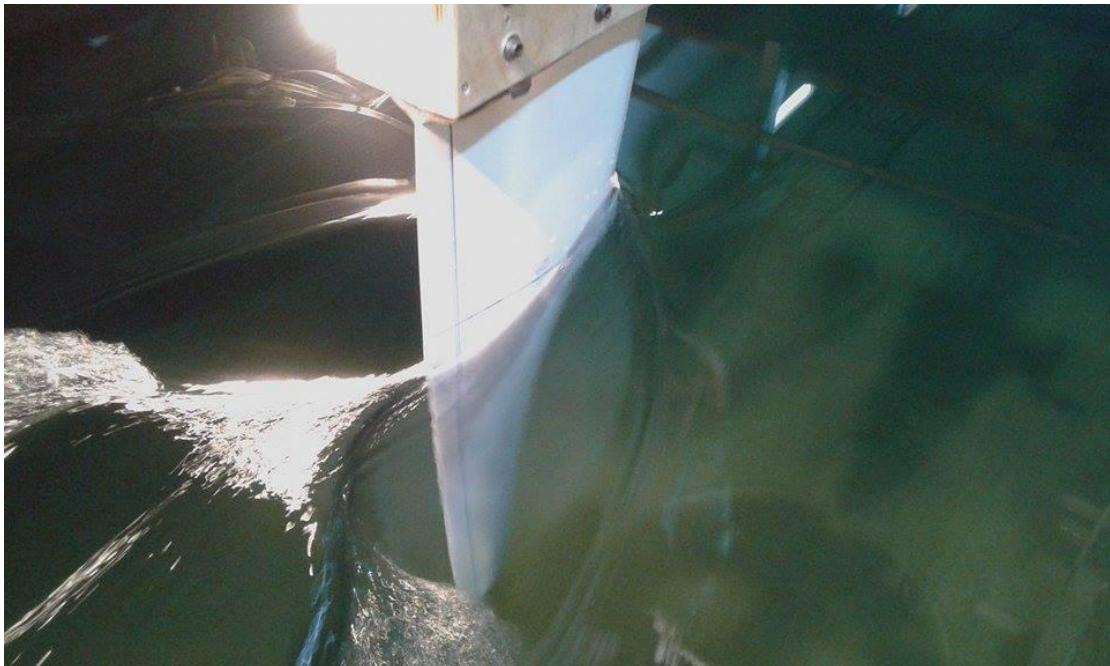
Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για όλες τις διαδικασίες και τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάστηκαν με την μορφή πίνακα EXCEL και διαγραμμάτων όπως φαίνεται παρακάτω, με ομαδοποιημένους πίνακες και εικόνες για κάθε είδους διεγέρτη τύρβης.

6.2.1 Καρίνα χωρίς διεγέρτη τύρβης

1 m/s	ΧΩΡΙΣ ΔΙΕΓΕΡΤΗ ΤΥΡΒΗΣ											
	kgr						VOLTES					
	FX(kg)	FY	FZ	TX(kg*cm)	TY	TZ	G0(Voltes) (FX)	G1 (FY)	G2 (FZ)	G3 (TX)	G4 (TY)	G5 (TZ)
UPSTREAM	-0,212	-0,019	0,120	-0,051	-11,392	0,531	-0,134	-0,011	0,069	0,006	0,068	-0,010
3.5 CCW	-0,256	-1,408	0,438	95,181	-8,867	3,951	-0,103	-0,110	-0,892	-0,020	1,014	0,019
3.5 CW	-0,083	1,374	-0,150	-94,024	-6,947	-2,814	-0,081	0,089	0,979	0,027	-0,904	-0,040
7 CCW	-0,207	-3,004	0,719	198,395	1,433	7,891	0,017	-0,224	-1,980	-0,054	1,995	0,053
7 CW	0,171	2,946	-0,414	-198,448	4,650	-7,650	0,058	0,219	1,953	0,055	-2,021	-0,059
2 m/s	kgr						VOLTES					
	FX(kg)	FY	FZ	TX(kg*cm)	TY	TZ	G0(Voltes) (FX)	G1 (FY)	G2 (FZ)	G3 (TX)	G4 (TY)	G5 (TZ)
UPSTREAM	-0,294	0,003	0,336	-2,116	-17,204	1,478	-0,198	-0,024	0,128	0,000	0,086	-0,023
3.5 CCW	-0,435	-4,062	1,273	287,637	-9,488	7,408	-0,102	-0,255	-2,792	-0,033	2,959	0,111
3.5 CW	0,129	4,072	-0,364	-291,150	-2,054	-4,425	-0,019	0,213	2,915	0,018	-2,906	-0,155
7 CCW	-0,569	-7,931	2,249	573,539	24,366	12,643	0,295	-0,457	-5,816	-0,063	5,646	0,232
7 CW	0,818	8,098	-0,757	-573,959	35,131	-10,105	0,427	0,453	5,520	0,018	-5,956	-0,284

Πίνακας 6.7: Συγκεντρωτικός πίνακας μέσωσ όρων (ο καθένας τριών μετρήσεων) , καθένας από τους οποίους αναφέρεται είτε σε διαφορετική γωνία πρόσπτωσης, είτε σε διαφορετική ταχύτητα ροής, για την περίπτωση της καρίνας χωρίς διεγέρτη τύρβης. Οι τιμές προκύπτουν με το Calibrationfile του κατασκευαστή του δυναμομέτρου. (CCW: CounterClockwise, CW: Clockwise).

Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα είναι για την καρίνα χωρίς διεγέρτη τύρβης όπου αναμένονται και οι υψηλότερες τιμές της δύναμης Lift και οι χαμηλότερες τιμές της αντίστασης, σε σχέση με τα πειράματα με διεγέρτη τύρβης. Να παρατηρήσουμε ότι οι δυνάμεις αντίστασης δεν έχουν μετρηθεί σωστά από το δυναμόμετρο, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις η δύναμη αντίστασης μειώνεται είτε με αύξηση της ταχύτητας είτε με αύξηση της γωνίας προσπτώσεως της ροής. Προφανώς μία τέτοια μέτρηση είναι απαγορευτική και φανερώνει την ελλειμματικότητα του οργάνου για μέτρηση δύναμης στην συγκεκριμένη διεύθυνση. Επομένως, η δύναμη αντίστασης δεν συμπεριλήφθηκε στα αποτελέσματα των πειραμάτων και σχολιάστηκε μόνο η κάθετη δύναμη (Lift) η οποία είναι και ο σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Παρακάτω φαίνονται ορισμένες φωτογραφίες κατά τα πειράματα στο φορείο για την περίπτωση της καρίνας χωρίς διεγέρτη τύρβης.





Εικόνες 6.8.1 ,6.8.2 : Χωρίς διεγέρτη τύρβης, 1m/supstream





Εικόνες 6.9.1, 6.9.2 : Χωρίς διεγέρτη τύρβης, 2m/supstream

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες, υπάρχει εμφανής συμμετρία των κυματισμών από τις δύο πλευρές της καρίνας, χαρακτηριστικό της μηδενικής γωνίας πρόσπτωσης της ροής. Προφανώς η επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας παίζει σημαντικό ρόλο στις κατανομές των δυνάμεων, αυξάνοντας την αντίσταση λόγω ύπαρξης αντίστασης κυματισμών. Στην γωνία Upstream η δύναμη άνωσης είναι μηδενική λόγω συμμετρικού πεδίου πιέσεων.

Προχωρώντας τώρα στις 3.5 μοίρες αντιωρολογιακά, καθώς και αντιωρολογιακά, το πεδίο κυματισμών γίνεται αντισυμμετρικό από τις δύο πλευρές. Επίσης, φαίνεται ξεκάθαρα η τάση που έχει η ροή να κινείται από την πλευρά της υψηλής πίεσης(υποπίεση) στην μεριά της χαμηλής. Καθώς οι γραμμές ροές συναντώνται σε διαφορετικές καθ' ύψος θέσεις, φαίνεται και η δημιουργία δίνης στο πίσω μέρος της καρίνας. Στα 2 m/στα φαινόμενα γίνονται εντονότερα και αυξάνει η αντίσταση αλλά έχουμε και την ανάλογη αύξηση στην ανωστική δύναμη.



Εικόνα 6.10: 3.5 μοίρες Clockwise 1m/s, χωρίς διεγέρτη τύρβης.

6.2.2 Καρίνα με διεγέρτη σύρμα

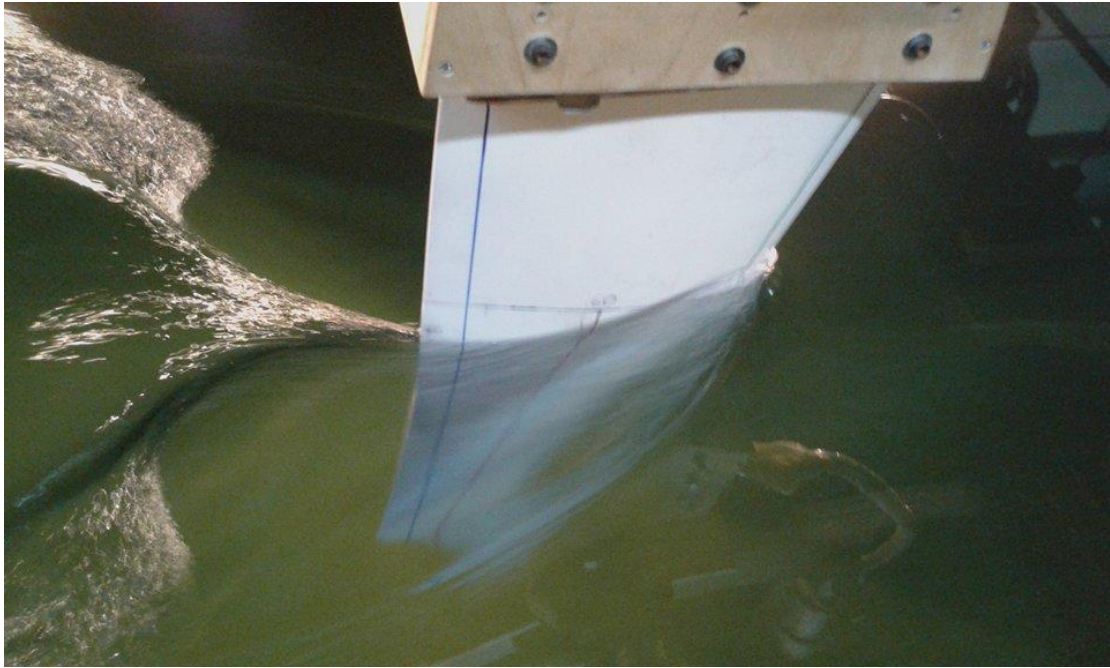
1 m/s												
	ME ΣΥΡΜΑ											
	kgr						VOLTES					
	FX(kg)	FY	FZ	TX(kg*cm)	TY	TZ	G0(Voltes) (FX)	G1 (FY)	G2 (FZ)	G3 (TX)	G4 (TY)	G5 (TZ)
UPSTREAM	-0,245	-0,015	0,141	-0,575	-13,874	0,469	-0,162	-0,011	0,089	0,009	0,078	-0,010
3.5 CCW	-0,281	-1,237	0,399	82,635	-11,504	2,614	-0,134	-0,087	-0,752	-0,004	0,903	0,025
3.5 CW	-0,125	1,149	-0,101	-80,711	-9,830	-1,776	-0,115	0,065	0,863	0,019	-0,753	-0,041
7 CCW	-0,214	-2,591	0,644	170,996	-1,386	4,913	-0,014	-0,170	-1,691	-0,023	1,736	0,066
7 CW	0,070	2,397	-0,315	-161,770	0,707	-4,115	0,010	0,150	1,610	0,025	-1,630	-0,073
2 m/s												
	kgr						VOLTES					
	FX(kg)	FY	FZ	TX(kg*cm)	TY	TZ	G0(Voltes) (FX)	G1 (FY)	G2 (FZ)	G3 (TX)	G4 (TY)	G5 (TZ)
UPSTREAM	-0,547	0,025	0,399	-5,927	-33,760	-0,354	-0,392	-0,005	0,263	0,035	0,145	-0,009
3.5 CCW	-0,656	-3,677	1,253	258,411	-25,277	6,870	-0,289	-0,238	-2,409	-0,017	2,758	0,093
3.5 CW	-0,215	3,688	-0,304	-266,948	-22,669	-7,252	-0,262	0,227	2,794	0,072	-2,542	-0,112
7 CCW	-0,978	-7,579	2,177	543,387	-3,892	18,561	-0,044	-0,530	-5,356	-0,109	5,504	0,140
7 CW	0,330	7,739	-0,718	-547,722	6,878	-17,157	0,095	0,523	5,426	0,128	-5,527	-0,198

Πίνακας 6.11: Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων όρων (ο καθένας τριών μετρήσεων), καθένας από τους οποίους αναφέρεται είτε σε διαφορετική γωνία πρόσπτωσης, είτε σε διαφορετική ταχύτητα ροής, για την περίπτωση της καρίνας με διεγέρτη τύπου σύρματος. Οι τιμές προκύπτουν με το Calibrationfile του κατασκευαστή του δυναμομέτρου. (CCW: CounterClockwise, CW: Clockwise).

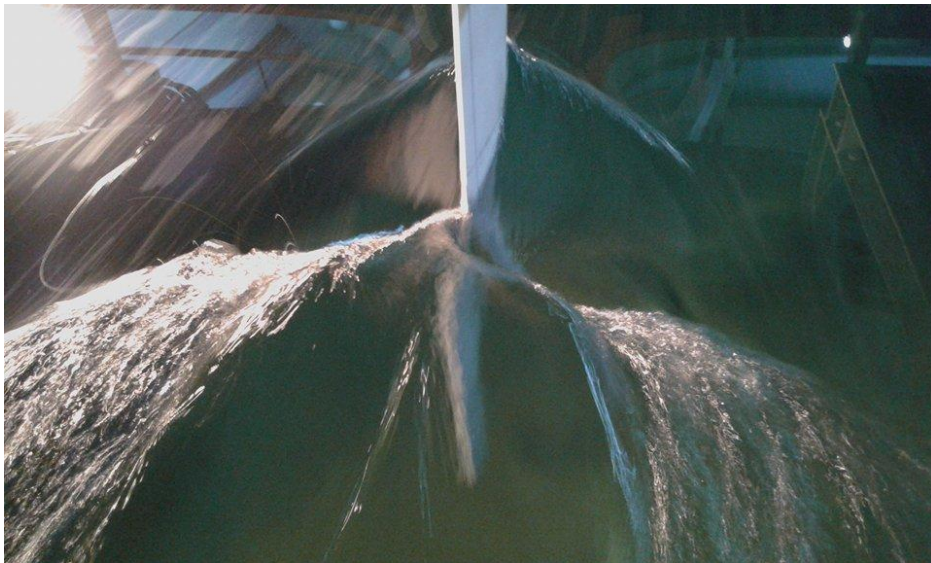
Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σύρματος ήταν διάμετρος ίσης με $\frac{1}{2}$ του χιλιοστού και θέση εφαρμογής στα 23 χιλιοστά από το χείλος πρόσπτωσης καθόλο το ύψος της καρίνας. Η επιλογή έγινε με βάση την θερμοκρασία του νερού της δεξαμενής και των ταχυτήτων φορέιου που έγιναν τα πειράματα.

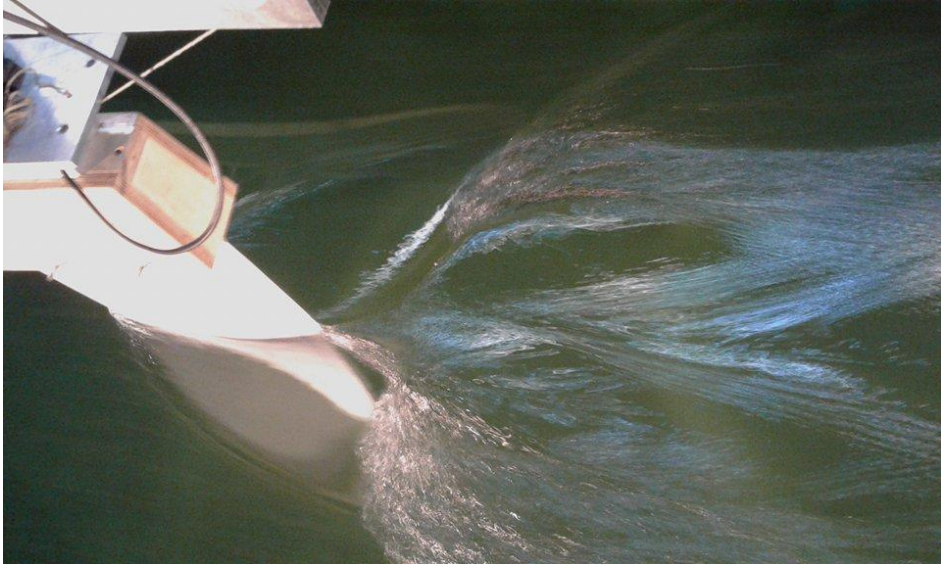


Εικόνες : 6.12.1 , 6.12.2 : Η καρίνα με τοποθετημένο το σύρμα κοντά στο χείλος πρόσπτωσης. Η μπλε γραμμή είναι η κατακόρυφη γραμμή που σημαδεύτηκε με την βοήθεια του laser και χρησιμοποιήθηκε κατά την ευθυγράμμιση.

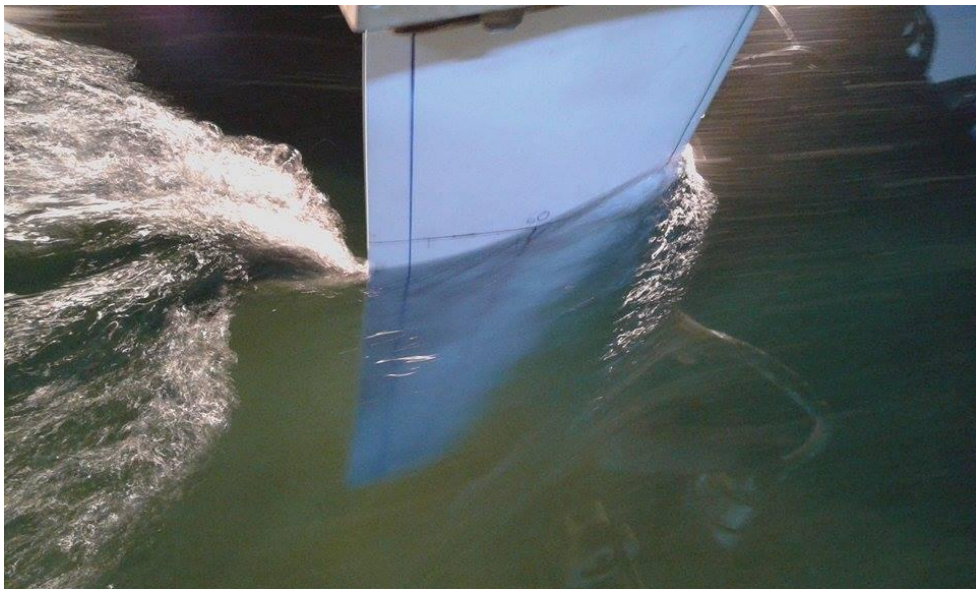


Εικόνα 6.13: 1m/supstream με διεγέρτη σύρματος.





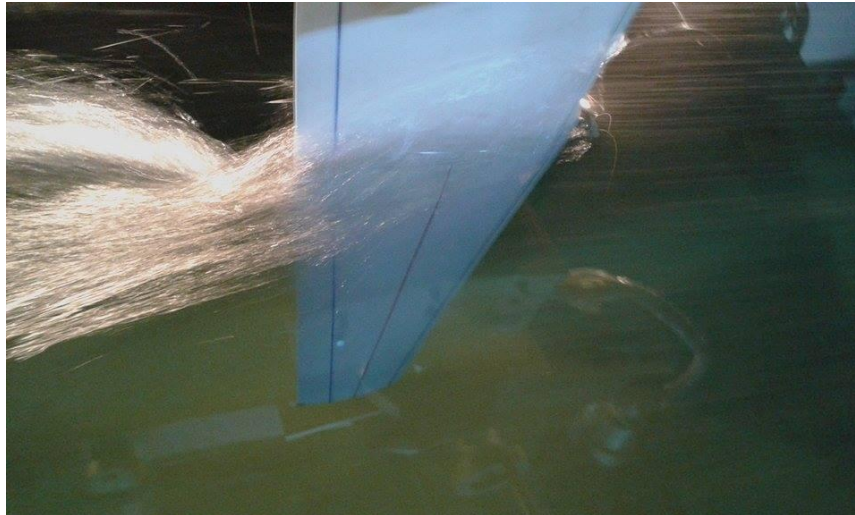
Εικόνες 6.14.1 , 6.14.2 : 1m/s μεδιεγέρτησύρμα 3.5 μοίρες Counter clockwise





Εικόνες 6.15.1 ,6.15.2 : 1m/s μεδιεγέρτησύρμα 7 μοίρες Counter clockwise





Εικόνες : 6.16.1 ,6.16.2, 6.16.3: 2m/s μεδιεγέρτησύρμα 7 μοίρες Counter clockwise

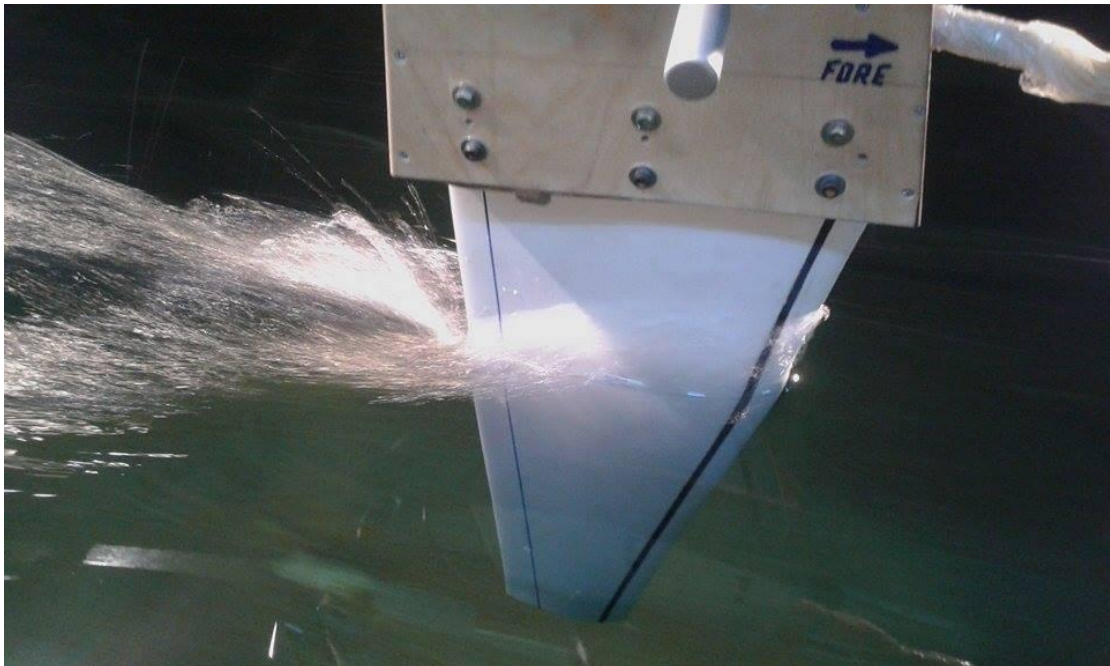
Παρατηρούμε ότι το σύρμα προκαλεί ισχυρή αποκόλληση της ροής μόνο στην πλευρά της υποπίεσης, ενώ στην πλευρά της θετικής πίεσης η ροή δεν αποκολλάται. Η αποκόλληση της ροής στην πλευρά υποπίεσης είναι πολύ ισχυρή αφήνοντας μεγάλη δίνη πίσω από την καρίνα. Τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι διεγέρτες τύρβης τύπου σύρματος κρίνονται ακατάλληλοι για την περίπτωση πτερυγίων υπό κλίση, όπως η καρίνα, λόγω της μεγάλης ευαισθησίας που έχει η ροή στην απότομη μεταβολή της καμπυλότητας στην μεριά της χαμηλής πίεσης. Αντιθέτως, όπως θα δούμε και παρακάτω, οι διεγέρτες τύπου λωρίδας άμμου κρίνονται καταλληλότεροι.

6.2.3 Καρίνα με διεγέρτη τύπου λωρίδας άμμου

1 m/s												
ΜΕ ΔΙΕΓΕΡΤΗ ΛΩΡΙΔΑΣ ΑΜΜΟΥ												
kgr						VOLTES						
	FX(kg)	FY	FZ	TX(kg*cm)	TY	TZ	G0(Voltes) (FX)	G1 (FY)	G2 (FZ)	G3 (TX)	G4 (TY)	G5 (TZ)
UPSTREAM	-0,228	-0,026	0,128	-0,108	-13,181	0,491	-0,154	-0,012	0,080	0,008	0,078	-0,010
3.5 CCW	-0,271	-1,216	0,395	82,281	-11,151	2,770	-0,130	-0,087	-0,750	-0,007	0,897	0,023
3.5 CW	-0,114	1,216	-0,104	-83,890	-8,823	-1,698	-0,103	0,068	0,889	0,017	-0,791	-0,045
7 CCW	-0,213	-2,534	0,657	168,024	-1,865	4,971	-0,019	-0,168	-1,658	-0,024	1,709	0,063
7 CW	0,114	2,498	-0,315	-168,279	2,532	-4,151	0,032	0,155	1,665	0,022	-1,706	-0,077
2 m/s												
kgr						VOLTES						
	FX(kg)	FY	FZ	TX(kg*cm)	TY	TZ	G0(Voltes) (FX)	G1 (FY)	G2 (FZ)	G3 (TX)	G4 (TY)	G5 (TZ)
UPSTREAM	-0,469	-0,044	0,411	-1,010	-29,502	1,625	-0,342	-0,032	0,189	0,009	0,169	-0,026
3.5 CCW	-0,593	-3,876	1,289	270,564	-21,550	4,851	-0,243	-0,219	-2,552	0,004	2,860	0,127
3.5 CW	-0,112	3,415	-0,243	-247,367	-17,157	-1,600	-0,198	0,146	2,566	0,004	-2,379	-0,158
7 CCW	-0,637	-7,072	2,040	504,984	5,960	8,185	0,081	-0,375	-5,032	-0,012	5,063	0,241
7 CW	0,566	7,416	-0,608	-524,312	19,915	-6,111	0,246	0,372	5,115	-0,010	-5,370	-0,298

Πίνακας 6.17: Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων όρων (ο καθένας τριών μετρήσεων), καθένας από τους οποίους αναφέρεται είτε σε διαφορετική γωνία πρόσπτωσης, είτε σε διαφορετική ταχύτητα ροής, για την περίπτωση της καρίνας με διεγέρτη τύπου λωρίδας άμμου. Οι τιμές προκύπτουν με το Calibrationfile του κατασκευαστή του δυναμομέτρου. (CCW: CounterClockwise, CW: Clockwise).

Στην περίπτωση αυτού του τύπου διεγέρτη δεν παρατηρήθηκε αποκόλληση της ροής ακόμα και στις 7 μοίρες στα 2m/s, οδηγώντας έτσι στο συμπέρασμα ότι οι λωρίδες άμμου είναι ιδανικότερες για την εφαρμογή.



Εικόνες 6.18.1 ,6.18.2 : 7 μοίρες CounterClockwise στα 2m/s, όπου φαίνεται ότι δεν πραγματοποιείται αποκόλληση της ροής και στις δύο πλευρές της καρίνας

6.2.4 Καρίνα με διεγέρτη λωρίδας άμμου ίδιας τραχύτητας διπλού πλάτους

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν πειράματα με διεγέρτη τύπου άμμου διπλάσιου πάχους από την αμέχως προηγούμενη περίπτωση, για να εξετασθεί η επίδραση του πλάτους του διεγέρτη στις τιμές της αντίστασης και της δύναμης Lift.

1 m/s	ΜΕ ΔΙΠΛΟ ΔΙΕΓΕΡΤΗ ΤΥΡΒΗΣ											
	kgr						VOLTES					
	FX(kg)	FY	FZ	TX(kg*cm)	TY	TZ	G0(Voltes) (FX)	G1 (FY)	G2 (FZ)	G3 (TX)	G4 (TY)	G5 (TZ)
UPSTREAM	-0,240	0,018	0,171	-2,714	-13,009	0,297	-0,152	-0,007	0,107	0,010	0,052	-0,010
3.5 CCW	-0,287	-1,258	0,401	83,889	-11,439	2,601	-0,133	-0,088	-0,765	-0,004	0,915	0,026
3.5 CW	-0,132	1,218	-0,141	-84,918	-9,700	-1,850	-0,114	0,069	0,903	0,020	-0,796	-0,044
7 CCW	-0,228	-2,514	0,641	166,368	-2,447	4,720	-0,027	-0,164	-1,638	-0,020	1,696	0,064
7 CW	0,077	2,423	-0,330	-162,627	0,448	-4,066	0,006	0,151	1,620	0,023	-1,638	-0,074
2 m/s												
	kgr						VOLTES					
	FX(kg)	FY	FZ	TX(kg*cm)	TY	TZ	G0(Voltes) (FX)	G1 (FY)	G2 (FZ)	G3 (TX)	G4 (TY)	G5 (TZ)
UPSTREAM	-0,488	0,024	0,393	-7,162	-31,023	1,378	-0,360	-0,027	0,259	0,013	0,117	-0,027
3.5 CCW	-0,596	-3,513	1,210	244,964	-24,596	3,921	-0,278	-0,194	-2,280	0,013	2,619	0,120
3.5 CW	-0,136	3,567	-0,274	-259,175	-18,164	-1,663	-0,211	0,152	2,689	0,005	-2,492	-0,166
7 CCW	-0,694	-7,005	2,035	500,873	4,961	7,251	0,069	-0,360	-4,984	0,002	5,028	0,246
7 CW	0,479	7,148	-0,658	-504,004	14,632	-5,540	0,181	0,353	4,941	-0,010	-5,139	-0,292

Πίνακας 6.17: Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων όρων (ο καθένας τριών μετρήσεων), καθένας από τους οποίους αναφέρεται είτε σε διαφορετική γωνία πρόσπτωσης, είτε σε διαφορετική ταχύτητα ροής, για την περίπτωση της καρίνας με διεγέρτη τύπου λωρίδας άμμου διπλού πάχους. Οι τιμές προκύπτουν με το Calibrationfile του κατασκευαστή του δυναμομέτρου. (CCW: CounterClockwise, CW: Clockwise).

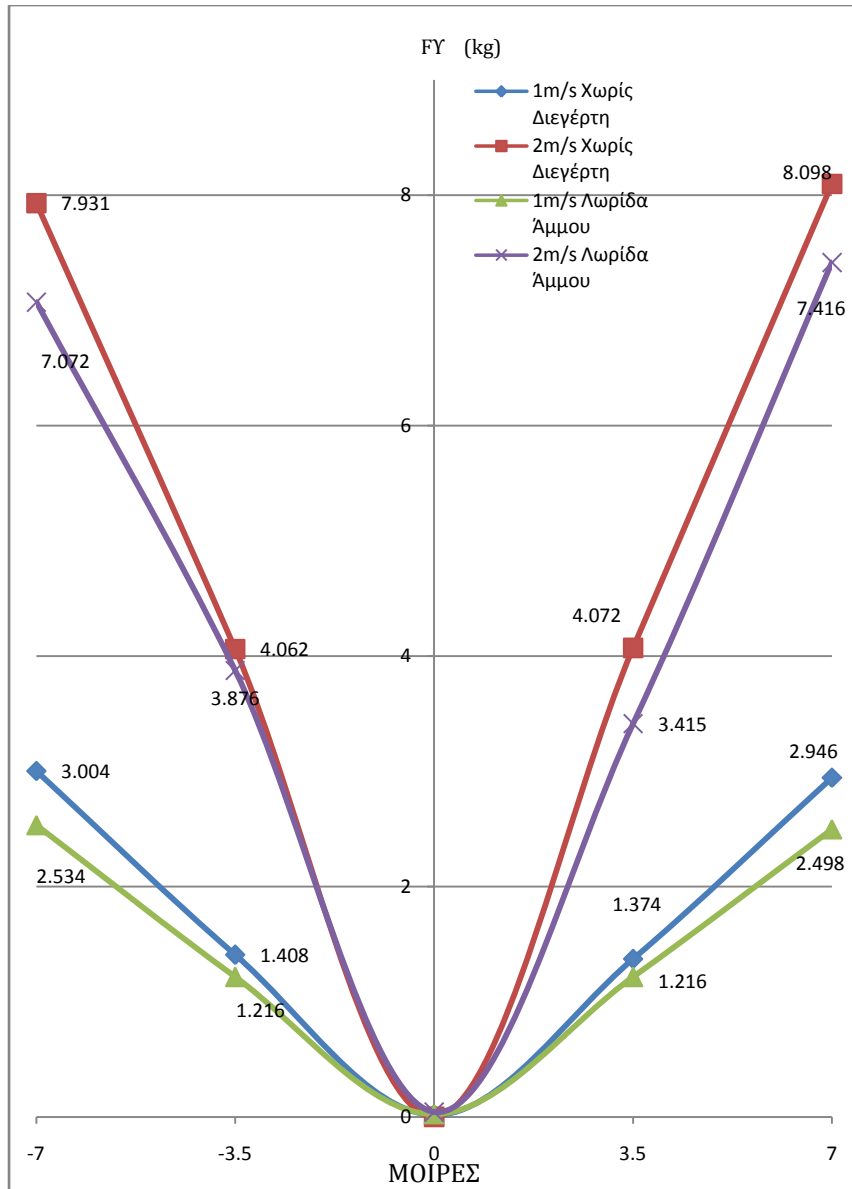


Εικόνα 6.18: Καρίνα με τοποθετημένο διεγέρτη τύρβης τύπου λωρίδας άμμου με διπλάσιο πλάτος.

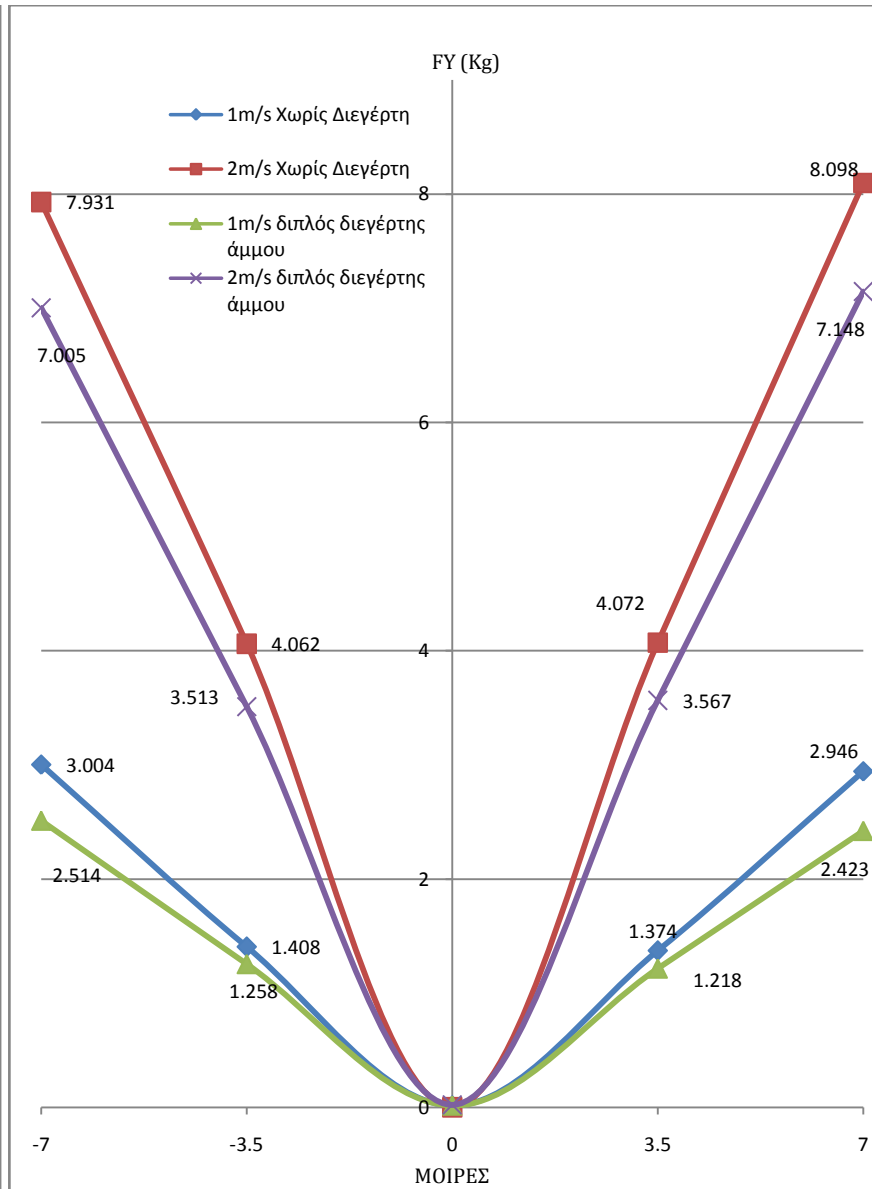
7. Συμπεράσματα

7.1 Αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων

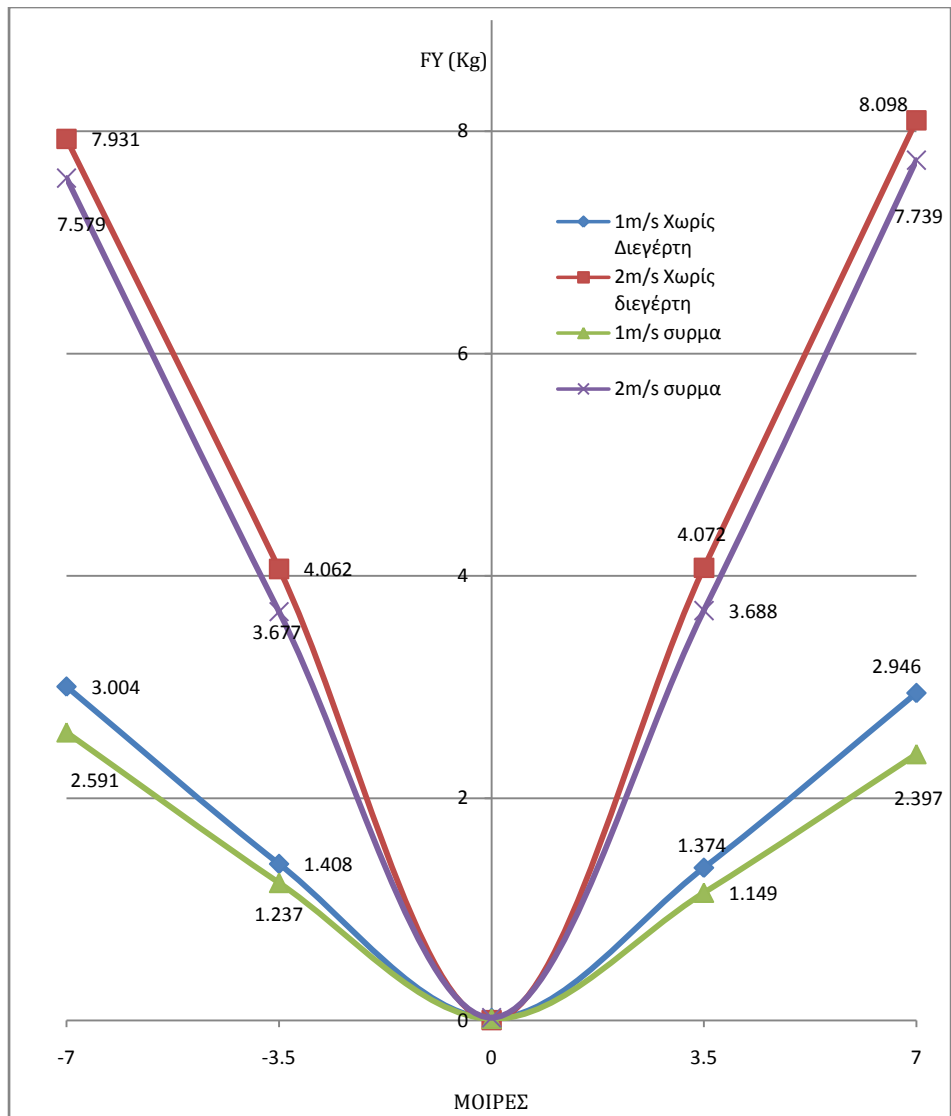
Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων. Αρχικά παρουσιάζεται η δύναμη Lift για τους διάφορους τύπος διεγερτών τύρβης καθώς γίνεται και η σύγκριση μεταξύ τους, όσον αφορά την πτώση της ανωστικής δύναμης σε κάθε περίπτωση, το οποίο είναι και το ζητούμενο της εργασίας. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης του δυναμομέτρου και συγκεκριμένα, οι νέες τιμές άνωσης σε κιλά βάρους που προέκυψαν ύστερα απο την χρήση των συναρτήσεων μεταφοράς. Η δύναμη αντίστασης παραλείπεται, όπως επισημάνθηκε παραπάνω, λόγω της ελλειματικότητας του οργάνου που διαπιστώθηκε για την συγκεκριμένη φόρτιση. Τα συμπεράσματα και οι σχολιασμοί από τα παρακάτω διαγράμματα, επισημαίνονται στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.



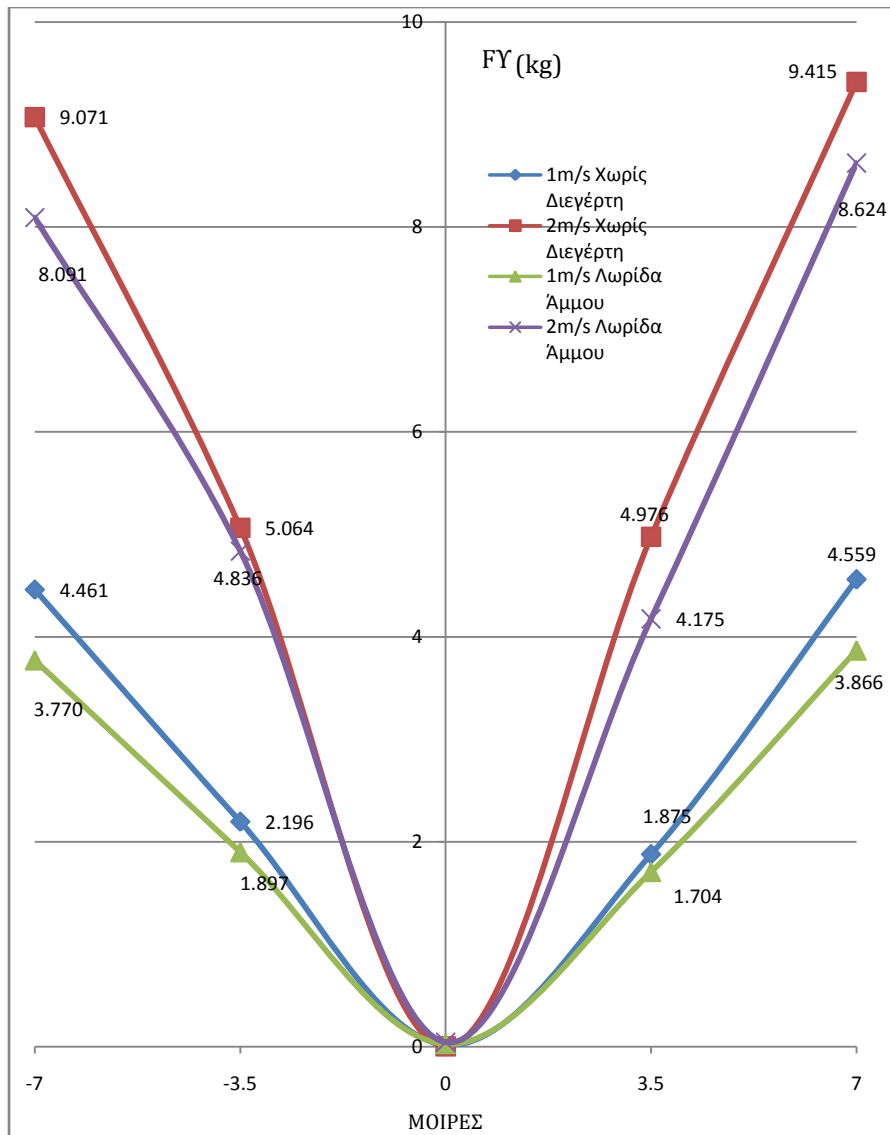
Διάγραμμα 6.19 : Σύγκριση Δύναμης Lift χωρίς διεγέρτη τύρβης και με διεγέρτη λωρίδας άμμου, με calibration εταιρείας.



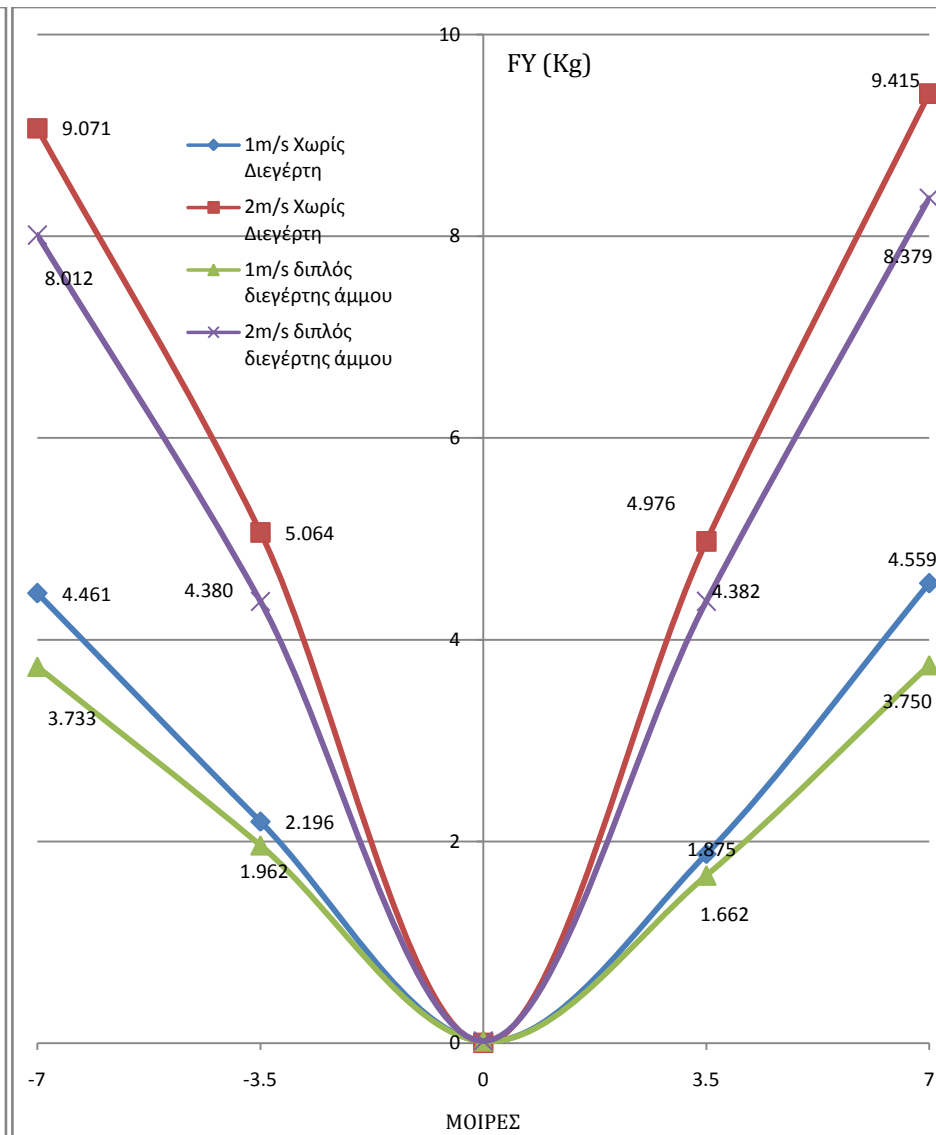
Διάγραμμα 6.20 : Σύγκριση Δύναμης Lift χωρίς διεγέρτη τύρβης και με διεγέρτη άμμου διπλού πλάτους, με calibration εταιρείας .



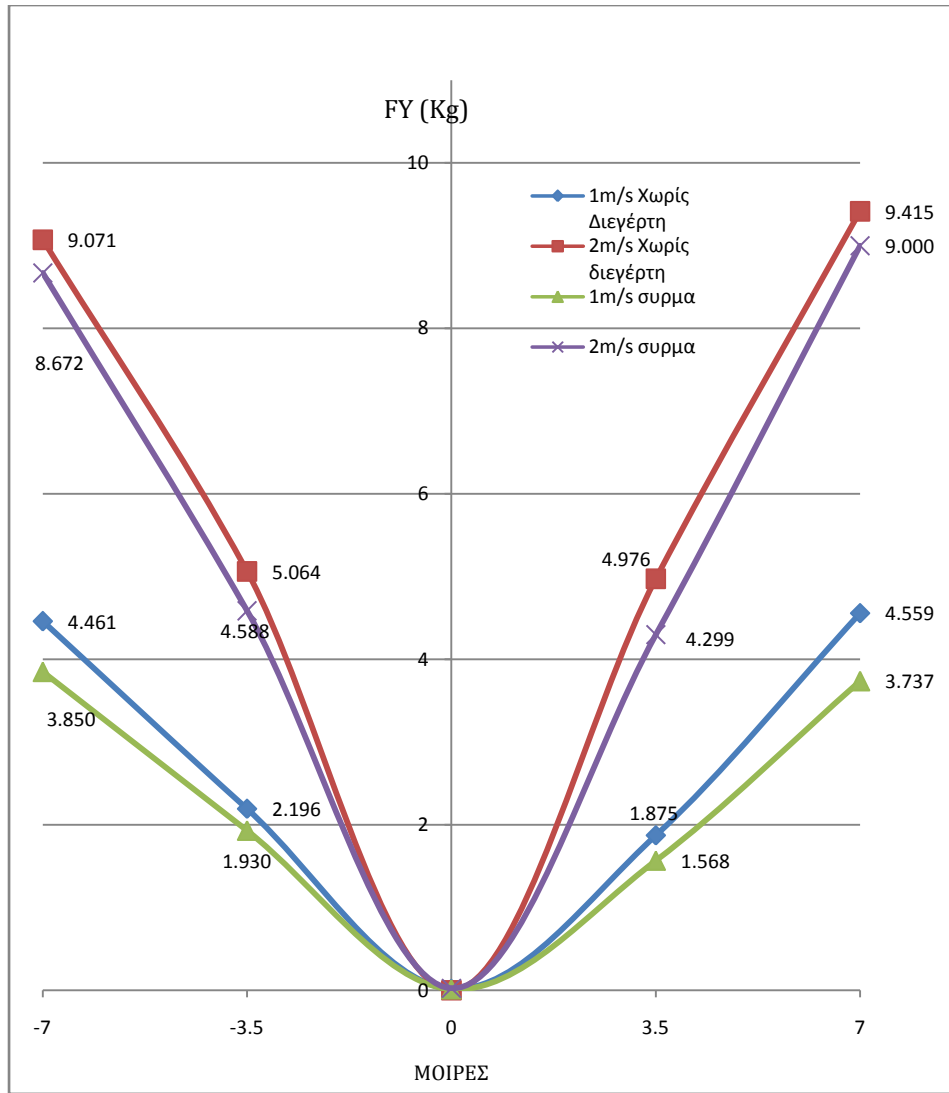
Διάγραμμα 6.21: Σύγκριση Δύναμης Lift χωρίς διεγέρτη τύρβης και με διεγέρτη τύπου σύρματος, με calibration εταιρείας



Διάγραμμα 6.22: Σύγκριση Δύναμης Lift χωρίς διεγέρτη τύρβης και με διεγέρτη λωρίδας άμμου, μετά από την βαθμονόμηση.



Διάγραμμα 6.23: Σύγκριση Δύναμης Lift χωρίς διεγέρτη τύρβης και με διεγέρτη λωρίδας άμμου διπλού πλάτους μετά από την βαθμονόμηση.



Διάγραμμα 6.24: Σύγκριση Δύναμης Lift χωρίς διεγέρτη τύρβης και με διεγέρτη τύπου σύρματος, μετά από την βαθμονόμηση

4.2 Σχολιασμός

Τα πειράματα έδειξαν την ποσοστιαία επίδραση των διαφορετικών ειδών διεγερτών τύρβης στην δύναμη άνωσης. Η περίπτωση της καρίνας χωρίς διεγέρτη ήταν αυτή που έδωσε και τις υψηλότερες τιμές άνωσης, με όλες τις άλλες περιπτώσεις οδηγούν σε σημαντική μείωση της τελευταίας σε διαφορετικό ποσοστό κάθε φορά, με ταυτόχρονα αυξανόμενη αντίσταση. Ιδιαίτερα σε υψηλές γωνίες όπως αυτές που μας ενδιαφέρουν στην πράξη, οι διεγέρτες δημιουργούν υψηλά επίπεδα τυρβώδους ροής και η άνωση ελαττώνεται περαιτέρω. Επομένως, η αποδοτικότητα του πτερυγίου επηρεάζεται άμεσα(ελαττώνεται) και επιβεβαιώνεται η ευαισθησία της καρίνας στην παρουσία διεγέρτη τύρβης. Βέβαια, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι τα δεδομένα πειράματα δεν μπορούν να εξαλείψουν τον παράγοντα της επίδρασης της ελεύθερης επιφάνειας στον συντελεστή άνωσης και κατά πόσο ο τελευταίος συνεισφέρει στην ελάττωση της δύναμης. Η συγκεκριμένη παρατήρηση μένει να εξετασθεί περαιτέρω σε επόμενες πειραματικές μελέτες. Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας όπου περιλαμβάνει όλα τα ποσοστά μείωσης, προκειμένου να γίνει ευκολότερα η σύγκριση.

ΛΩΡΙΔΑ ΑΜΜΟΥ					
ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΛΑΤΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΔΥΝΑΜΗ ΑΝΩΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΔΙΕΓΕΡΤΗ ΤΥΡΒΗΣ	ΜΟΙΡΕΣ				
	-7	-3,5	0	3,5	7
1m/s	15,30%	12,80%	-	12,60%	15,20%
2m/s	10,80%	4,50%	-	16,10%	8,42%

ΛΩΡΙΔΑ ΑΜΜΟΥ ΔΙΠΛΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ					
ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΛΑΤΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΔΥΝΑΜΗ ΑΝΩΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΔΙΕΓΕΡΤΗ ΤΥΡΒΗΣ	ΜΟΙΡΕΣ				
	-7	-3,5	0	3,5	7
1m/s	16,31%	11,22%	-	11,35%	17,75%
2m/s	11,72%	13,51%	-	12,40%	11,73%

ΣΥΡΜΑ					
ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΛΑΤΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΔΥΝΑΜΗ ΑΝΩΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΔΙΕΓΕΡΤΗ ΤΥΡΒΗΣ	ΜΟΙΡΕΣ				
	-7	-3,5	0	3,5	7
1m/s	13,75%	12,14%	-	12,40%	18,63%
2m/s	4,64%	9,47%	-	9,43%	4,43%

Πίνακας 6.25 : Σύγκριση πτώσης δύναμης άνωσης για τους διάφορους τύπους διεγέρτη

Ο πίνακας δείχνει την ευαισθησία της καρίνας όχι μόνο στην παρουσία τύρβης, αλλά και στην επιλογή του συγκεκριμένου τύπου διεγέρτη. Όπως διαπιστώθηκε, ο διεγέρτης τύπου σύρματος δεν συνίσταται για χρήση καθώς δημιουργεί απότομες μεταβολές στην ροή λόγω της γεωμετρίας του, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μεγάλη αποκόλληση της ροής. Αντίθετα, οι διεγέρτες τύπου λωρίδας άμμου κρίνονται καταλληλότεροι για τα τα πειράματα, καθώς επιτρέπουν την μετατροπή της στρωτής ροής σε τυρβώδη, χωρίς να παρατηρείται αποκόλληση.

Επιπλέον, να παρατηρήσουμε ότι το πλάτος της λωρίδας άμμου, αν πρόκειται για την ίδια τραχύτητα επιφάνειας, δεν επηρεάζει σημαντικά την άνωση καθώς και στις δύο περιπτώσεις (μονού και διπλού πλάτους), παρατηρήθηκαν παρόμοια ποσοστά μείωσης σε σχέση με την καρίνα χωρίς διεγέρτη. Πάντως, σε όλες τις περιπτώσεις, τα ποσοστά μείωσης της δύναμης Lift είναι αξιοσημείωτα και δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να υποεκτιμηθούν σε μελλοντικές μελέτες και πειράματα, καθώς άλλωστε η αποτελεσματικότητα της καρίνας σχετίζεται άμεσα με την ικανότητά της να παράγει πλάγια δύναμη.

Επίλογος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς της καρίνας ενός ιστιοπλοϊκού σε συνθήκες δεξαμενής δοκιμών. Το είδος και η γεωμετρία της επιλέχθηκαν με σκοπό να αναπαριστούν μία συνηθισμένη περίπτωση καρίνας σε ρεαλιστική βάση. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους και επιδιώχθηκε η λήψη μετρήσεων με ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Η καρίνα εξετάστηκε υπό διαφορετικούς τύπους διεγερτών τύρβης και σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα έτσι ώστε να εξεταστεί η καταλληλότητα του καθενός. Τέλος, ένας επιπλέον στόχος της εργασίας είναι να συνεισφέρει σε μελέτες και πειράματα που πιθανόν να διεξαχθούν μελλοντικά και θα αφορούν την ολική συμπεριφορά ιστιοπλοϊκών σκαφών σε πειραματικές συνθήκες, όπου ο ρόλος της καρίνας είναι καθοριστικός.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] “THEORY OF WING SECTIONS - INCLUDING A SUMMARY OF AIRFOIL DATA)”, By IRA H.ABBOTT AND ALBERT E. VON DOENHOFF.

[2] “PRINCIPLES OF YACHT DESIGN”, By LARS LARSSON & ROLF E ELIASSON.

[3]“ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗ ΠΛΟΙΟΥ” Μέρος 1^ο : Αντίσταση Πλοίου, Γ.Κ. Πολίτη, Αναπ. Καθηγητή, Φ.Α. Σκαμνέλης.

[4] “EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TURBULENCE STIMULATOR ON A SAILING YACHT MODEL” Dimitris E. Liarokapis, Dina D. Sfakianaki, Stelios G. Perissakis, George D. Tzabiras.

[5]“ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΣΚΑΦΩΝ” , Γ.Ι. ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ, Καθηγητής ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώμβριος 1996.

[6]“ ΙΣΤΙΟΠΛΟΪΑ ΚΑΙ ΝΑΥΤΙΚΗ ΤΕΧΝΗ” , ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Γ. ΣΤΡΟΥΖΑ, Πειραιάς 2001.

[7]“THE EVOLVING ROLE OF TOWING TANK”, KIRKMAN, K.L., Proc. 4th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, SNAME, pp. 129-155, Jan.1979.

[8]“TURBULANCE STIMULATION ON SHIP MODELS”, HUGHES, J.F. ALLAN., Trans. SNAME, Vol. 59, 1951.

[9] “A Novel Approach to Turbulence Stimulation for Ship-Model Testing” ,Murphy, Jason Christopher,2010.

[10] “ SKIN FRICTION AND TURBULANCE STIMULATION” , Prof. C. W. Prohaska, Capt. M.L. Acevedo, Dr. G. Hugues, Dr. M. Kinoshita, Prof. L. Landweber, Ir. A. J. W. Lap., Prof. K. Wieghardt.

[11] “ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ”, ΑΓΓΕΛΟΥ Θ. ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ.

[12]“<https://web.stanford.edu/class/me469b/handouts/turbulence.pdf>”