



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 9-ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥΠΟΛΗ ΖΩΓΡΑΦΟΥ, ΑΘΗΝΑ 15780, Τηλ: 7721305

Επιβλέπων: Καθηγητής Γεώργιος Τζαμπίρας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ
ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΙΣΤΙΟΠΛΟΪΚΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ**

ΒΑΣΙΛΗΣ Γ. ΠΡΙΦΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2013

Στον αγαπημένο μου πατέρα

Μέλη τριμελούς εξεταστικής επιτροπής:

Τζαμπίρας Γεώργιος Καθηγητής-Διευθυντής Ε.Ν.Θ.Υ
Γρηγορόπουλος Γρηγόριος, Καθηγητής
Μπελιμπασάκης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

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

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή και διευθυντή του Ε.Ν.Θ.Υ κ. Γεώργιο Τζαμπίρα για το ενδιαφέρον του και την υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα κα Κωνσταντίνα Σφακιανάκη για την αμέριστη συμπαράσταση, επίβλεψη και καθοδήγησή της, χωρίς την βοήθεια της οποίας δεν θα ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί μία τόσο εκτεταμένη και ακριβής σειρά μετρήσεων και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό της πειραματικής δεξαμενής και ιδιαίτερα τον κ. Ιωάννη Τραχανά χωρίς τη βοήθεια του οποίου δεν θα ήταν δυνατή η εκτέλεση των πειραμάτων καθώς και τον κ. Δημήτριο Λιαροκάπη για την άψογη συνεργασία και βοήθεια κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συνάδελφο κα. Ιωάννα Τσάμη για την βοήθειά της κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου οι οποίοι δεν έπαψαν να με στηρίζουν όλα τα χρόνια της προσπάθειας αυτής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1. ΚΙΝΗΣΗ ΙΣΤΙΟΦΟΡΟΥ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΗ	10
2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΑΕΡΟ-ΥΔΡΟΤΟΜΩΝ	17
2.1 ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ	17
2.2 ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ	23
3. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΩΣΗ Ή ΠΛΑΓΙΑ ΔΥΝΑΜΗ (LIFT)	29
4. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΙΣΤΙΟΠΛΟΪΚΩΝ ΣΚΑΦΩΝ	31
4.1 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΛΟΓΩ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (VISCOUS RESISTANCE)	31
4.2 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΛΟΓΩ ΚΥΜΑΤΟΣ	34
4.3 ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΛΟΓΩ ΚΥΜΑΤΩΝ	39
4.4 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΛΟΓΩ ΕΓΚΑΡΣΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ	39
4.5 ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ	40
4.5.1 <i>Επαγόμενη αντίσταση οφειλόμενη σε γραμμική άνοση (Lift)</i>	40
4.5.2 <i>Επαγόμενη αντίσταση οφειλόμενη σε μη γραμμική άνοση (Lift)</i>	43
5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΟΟSSANNEN (Velocity Prediction Program ΟΟSSANNEN)	.44
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	44
5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΛΑΓΙΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ	47

5.2.1 Γενική έκφραση της πλάγιας δύναμης επίπεδης επιφάνειας	47
5.2.2 Η επίδραση του σχήματος του παρελκομένου	48
5.2.3 Η κλίση και η γραμμική καμπύλη πλάγιας δύναμης (lift)	49
5.2.4 Επίδραση του ιξώδους στη κλίση της καμπύλης της πλάγιας δύναμης	49
5.2.5 Η τιμή του ενεργού λόγου επιμήκους	.50
5.2.6 Φαινόμενα αλληλεπίδρασης της επιφάνειας της γάστρας και της επιφάνειας του βολβού	51
5.2.7 Η πλάγια δύναμη της γάστρας και του βολβού	54
5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	55
5.3.1 Υπολογισμός της επαγόμενης αντίστασης	55
5.3.2 Υπολογισμός της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance)	56
5.3.3 Υπολογισμός της αντίστασης κύματος	58
5.3.4 Υπολογισμός της αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης	61
5.3.4.1 Αντίσταση εγκάρσιας κλίσης κατά Oossanen	62
5.3.4.2 Αντίσταση εγκάρσιας κλίσης κατά Gerritsma	63
5.3.4.3 Διόρθωση της Υπόλοιπης Αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης κατά J. A. Keuning and M. Katger	63
5.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ORC VPP	65
5.4.1 Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας (Viscous Resistance)	65
5.4.1.1 Γάστρα (Canoe body)	65
5.4.1.2 Παρελκόμενα (Appendages)	66
5.4.2 Αντίσταση λόγω δημιουργίας κύματος (Residuary Resistance)	67

5.4.2.1	<i>Γάστρα (Canoe body)</i>	67
5.4.2.2	<i>Παρελκόμενα (Appendages)</i>	70
5.4.3	<i>Αντίσταση οφειλόμενη στην εγκάρσια κλίση</i>	71
5.4.3.1	<i>Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας</i>	72
5.4.3.2	<i>Υπόλοιπη Αντίσταση ή Αντίσταση λόγω δημιουργίας κύματος (Residuary Resistance)</i>	72
5.4.3.3	<i>Επαγόμενη αντίσταση (Induced Drag)</i>	72
6.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	75
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	75
6.1.1	<i>Boc Challenge Race – Σύντομο ιστορικό</i>	76
6.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	78
6.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	80
6.3.1	<i>Τοποθέτηση δυναμομέτρου</i>	84
6.3.2	<i>Προετοιμασία του προτύπου</i>	86
6.4	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ	88
6.4.1	<i>Βαθμονομήσεις στο κυρίως σώμα του δυναμομέτρου.</i>	88
6.4.2	<i>Βαθμονομήσεις στη βάση του δυναμομέτρου</i>	
7.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	99
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	99
7.2	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	136

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να καθορίσει την τυποποίηση της πειραματικής διαδικασίας η οποία θα πρέπει να ακολουθείται κατά την διεξαγωγή πειραμάτων σε ιστιοπλοϊκά σκάφη στην πειραματική δεξαμενή του Ε.Ν.Θ.Υ. Στην εργασία ακόμα υπολογίζεται πειραματικά η πλάγια δύναμη και αντίσταση που αναπτύσσεται κατά την κίνηση ενός ιστιοφόρου σκάφους. Επίσης γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τις ημιεμπειρικές μεθόδους πρόβλεψης ταχύτητας του Oossanen και του ORC VPP. Η μελέτη της αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης συγκρίθηκε επίσης και με τις εργασίες των Gerritsma και Keuning.

Η εργασία διαρθρώνεται ως ακολούθως.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται εν συντομία η κίνηση ενός ιστιοφόρου καθώς και οι βασικές έννοιες και τα μεγέθη τα οποία υπεισέρχονται προκειμένου να αναλυθεί η κίνηση του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται μία σύντομη περίληψη της θεωρίας των ρευστών σχετικά με τις δυνάμεις και αντιστάσεις οι οποίες αναπτύσσονται πάνω σε αυτές κατά τη ροή του ρευστού γύρω τους ή το ισοδύναμο, της κίνησης τους μέσα σε ρευστό. Αναλύεται η δημιουργία της άνωσης (lift) λόγω της τριδιάστατης ροής κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό για την κατανόηση του ρόλου της γωνίας πλευρικής απόκλισης (leeway angle) και της λειτουργίας της καρίνας.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνεται η έκφραση της πλάγιας δύναμης όπως αυτή προκύπτει και με την εφαρμογή των εκτεθέντων στο δεύτερο κεφάλαιο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται και οι συνιστώσες των υδροδυναμικών αντιστάσεων οι οποίες αναπτύσσονται κατά την κίνηση ενός ιστιοφόρου μέσα στο νερό.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται το ημιεμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης ταχύτητας του Oossanen (Velocity Prediction Program) καθώς επίσης και τις σχέσεις τις οποίες χρησιμοποιεί προκειμένου να εκφράσει την πλάγια δύναμη και τις διάφορες αλληλεπιδράσεις, όπως καρίνας , γάστρας κλπ. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφεται ο υπολογισμός της επαγόμενης υδροδυναμικής αντίστασης, της αντίστασης συνεκτικότητας και της αντίστασης λόγω κύματος, η τελευταία γίνεται με τη βοήθεια της υπόλοιπης αντίστασης Residual Resistance και της σειράς πολυωνύμων του πανεπιστήμιου του Delft. Εξετάζεται και υπολογίζεται το ζήτημα της αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης όπως αυτό πραγματεύονται οι i) Oossanen, ii) Gerritsma et al, iii) A. Keuning and M Katgert. Στο τέταρτο μέρος του πέμπτου κεφαλαίου περιγράφεται ο υπολογισμός των υδροδυναμικών αντιστάσεων όπως αυτός προκύπτει με το πρόγραμμα πρόβλεψης ταχύτητας του ORC VPP.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς η πειραματική διάταξη καθώς και η διαδικασία των μετρήσεων.

Τέλος στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τα διαγράμματα καθώς και ο σχολιασμός τους.

1. ΚΙΝΗΣΗ ΙΣΤΙΟΦΟΡΟΥ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΗ^(1,2,3)

Η κίνηση ενός ιστιοφόρου οφείλεται στον άνεμο και είναι προφανές ότι εξαρτάται από τη διεύθυνση και την ένταση του ανέμου που επικρατεί. Λόγω αυτής της ιδιομορφίας η μελέτη της όποιας κίνησης του σκάφους αναφέρεται ως προς τον άνεμο.

Έτσι λοιπόν ορίζουμε ως :

Πλεύση την κατεύθυνση της κίνησης του σκάφους σε σχέση με τον άνεμο

Πραγματικό άνεμο (True Wind) τον άνεμο που πνέει στην περιοχή και ορίζεται από τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου ως προς ακίνητο παρατηρητή.

Φαινόμενο άνεμο (Apparent Wind) τον άνεμο που αισθάνεται παρατηρητής επί του σκάφους και ορίζεται από τη σχετική διεύθυνση και ταχύτητα του αέρα ως προς την απόλυτη ταχύτητα του σκάφους.

Είναι προφανές ότι ισχύει η διανυσματική εξίσωση :

$$\vec{V}_{AW} = \vec{V}_{TW} - \vec{V}_B \quad (1-$$

1)

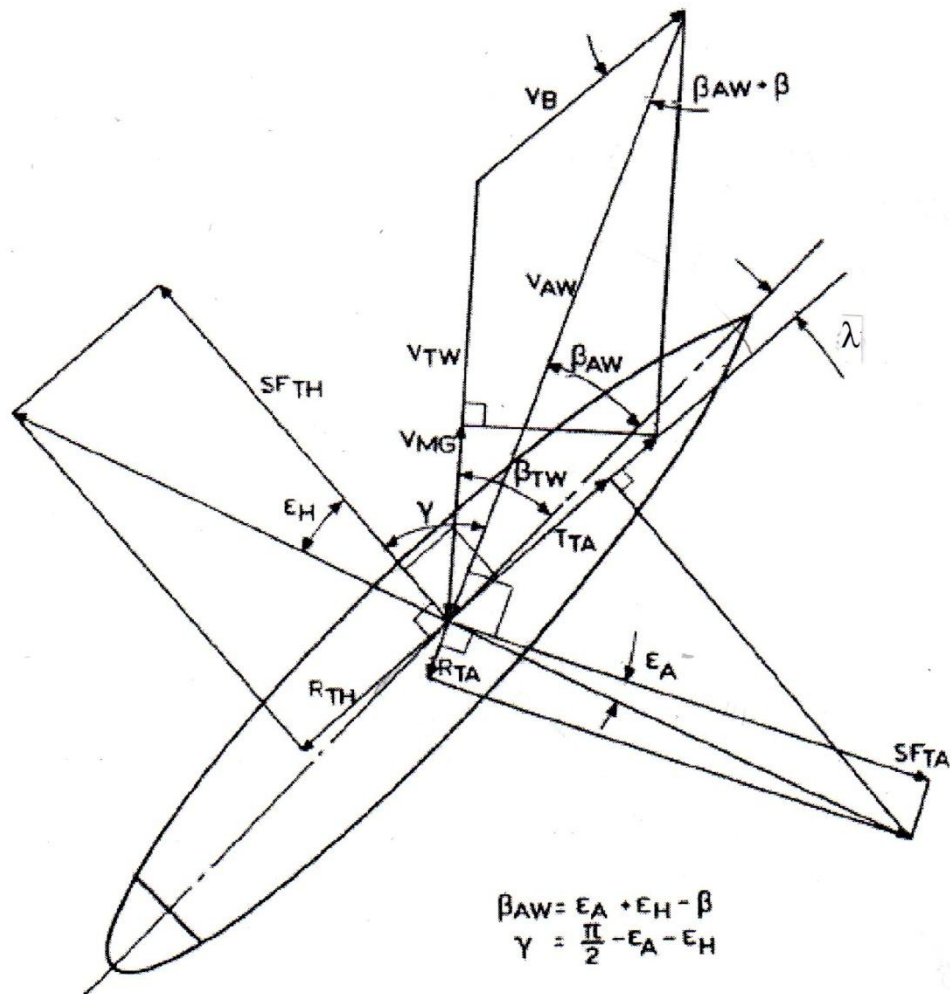
Όπου : V_{AW} η ταχύτητα φαινόμενου ανέμου, V_{TW} ταχύτητα πραγματικού ανέμου και V_B η ταχύτητα του σκάφους.

Έτσι εφόσον η διεύθυνση και η ένταση του πραγματικού ανέμου παραμένουν σταθερή, η ένταση και η διεύθυνση του φαινόμενου ανέμου

θα αλλάζουν ανάλογα με την πλεύση του σκάφους. (αλλάζει η γωνία μεταξύ V_B και V_{TW}).

Γωνία πλεύσης β , ονομάζουμε τη γωνία την οποία σχηματίζει η διεύθυνση του ανέμου με την διεύθυνση της ταχύτητας του σκάφους. Διακρίνουμε γωνία ως προς τον φαινόμενο άνεμο β_{AW} και γωνία ως προς τον πραγματικό άνεμο β_{TW} .

Γωνία πλευρικής απόκλισης ή παρεκτροπής λ , ονομάζουμε τη γωνία που σχηματίζει ο άξονας συμμετρίας του σκάφους με την διεύθυνση της ταχύτητας του.



Σχ. 1.1 Διάγραμμα των δυνάμεων οι οποίες εξασκούνται σε ένα ιστιοφόρο κινούμενο με οξεία γωνία ως προς τον άνεμο.

Οι συμβολισμοί του παραπάνω σχήματος είναι οι ακόλουθοι:

V_{TW}	Η ταχύτητα του πραγματικού ανέμου.
V_{AW}	Η ταχύτητα του φαινόμενου ανέμου.
V_{MG}	Η συνιστώσα της ταχύτητας του σκάφους στην διεύθυνση του ανέμου.
V_B	Η ταχύτητα του σκάφους.
β_{TW}	Η γωνία πραγματικού ανέμου.
β_{AW}	Η γωνία φαινόμενου ανέμου.
λ	Η γωνία πλευρικής απόκλισης.
ε_A	Η γωνία αεροδυναμικής αντίστασης.
ε_H	Η γωνία υδροδυναμικής αντίστασης.
SF_{TA}	Η συνιστώσα της αεροδυναμικής πλευρικής δύναμης στο οριζόντιο επίπεδο.
SF_{TH}	Η συνιστώσα της υδροδυναμικής πλευρικής δύναμης στο οριζόντιο επίπεδο.
R_{TA}	Η ολική αεροδυναμική αντίσταση.
R_{TH}	Η ολική υδροδυναμική αντίσταση.

Όταν η γωνία β_{TW} είναι οξεία, υπάρχει μία συνιστώσα της ταχύτητας του ιστιοπλοϊκού σε κατεύθυνση αντίθετη της V_{TW} . Το ιστιοπλοϊκό δηλαδή πλέει αντίθετα προς τη διεύθυνση του πραγματικού ανέμου (windward) με ταχύτητα που δίνεται από το μήκος της προβολής του ανύσματος V_B πάνω στη διεύθυνση του V_{TW} . Η ταχύτητα αυτή καλείται V_{MG} ή

«επιτογχανόμενη ταχύτητα κατά τη διεύθυνση του ανέμου» (speed made good to windward) Αυτή η συνιστώσα της ταχύτητας του σκάφους, όπως προκύπτει και από το Σχ.1.1, δίνεται από τη σχέση:

$$V_{MG} = V_B \cos(\beta_{TW} + \beta) \quad (1-2)$$

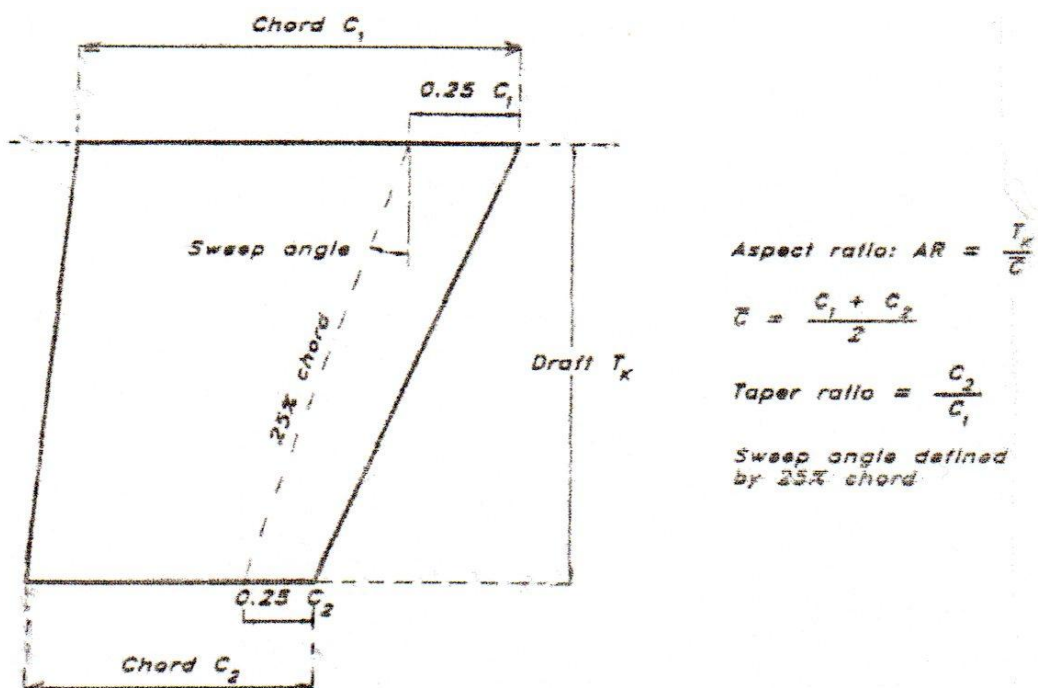
Ας σημειωθεί εδώ ότι για μια δεδομένη ταχύτητα ανέμου V_{TW} η μέγιστη ταχύτητα V_{MG} δεν αντιστοιχεί υποχρεωτικά στη μέγιστη ταχύτητα V_B . Καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου προκύπτει και μια διαφορετική $(V_{MG})_{max}$.

Καρίνα η χρησιμότητα της

Σκοπός της καρίνας σε ένα ιστιοπλοϊκό σκάφος πέρα από προφανείς λόγους ευστάθειας είναι η παραγωγή της απαραίτητης πλάγιας δύναμης ώστε να εξισορροπηθούν οι αντίστοιχες αεροδυναμικές δυνάμεις που το σκάφος δέχεται λόγω των πανιών και να περιοριστεί η πλευρική κίνηση του σκάφους ειδικά στην πλεύση των όρτσα (κίνηση σκάφους αντίθετα στη διεύθυνση του ανέμου.)

Στην πραγματικότητα η καρίνα συμπεριφέρεται όπως μία αεροτομή στον αέρα. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της ροής και της επιφάνειας είναι η ίδια με αυτή που αντιμετωπίζουμε όταν ένα κινούμενο ρευστό περνάει από μία επιφάνεια ή όταν μια επιφάνεια κινείται μέσα σε ένα ακίνητο ρευστό. Επειδή το σκάφος πρέπει να κινείται εξίσου καλά είτε δεχόμενο τον άνεμο από τα αριστερά (αριστερήνεμο) είτε από τα δεξιά (δεξήνεμο) η συμπεριφορά της καρίνας πρέπει να είναι εξίσου καλή και από τις δύο πλευρές και επομένως έχει πάντα συμμετρική διατομή.

Στο Σχήμα 1.2 παριστάνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιάς καρίνας όπως είναι η μέση χορδή \bar{C} , ο συντελεστής TR (Taper ratio, λόγος των μηκών ακροπτερυγίου και βάσης), η γραμμή 25% της χορδής (quarter chord line), η οποία ορίζεται ως ο γεωμετρικός τόπος των σημείων τα οποία απέχουν 25% του εκάστοτε μήκους της χορδής, η γωνία κλίσης μεταξύ της γραμμής 25% της χορδής και της κατακορύφου (Sweep angle).



Σχ. 1.2 Βασικές διαστάσεις μιας υδροτομής

Γωνία πλευρικής απόκλισης (leeway angle) λ .

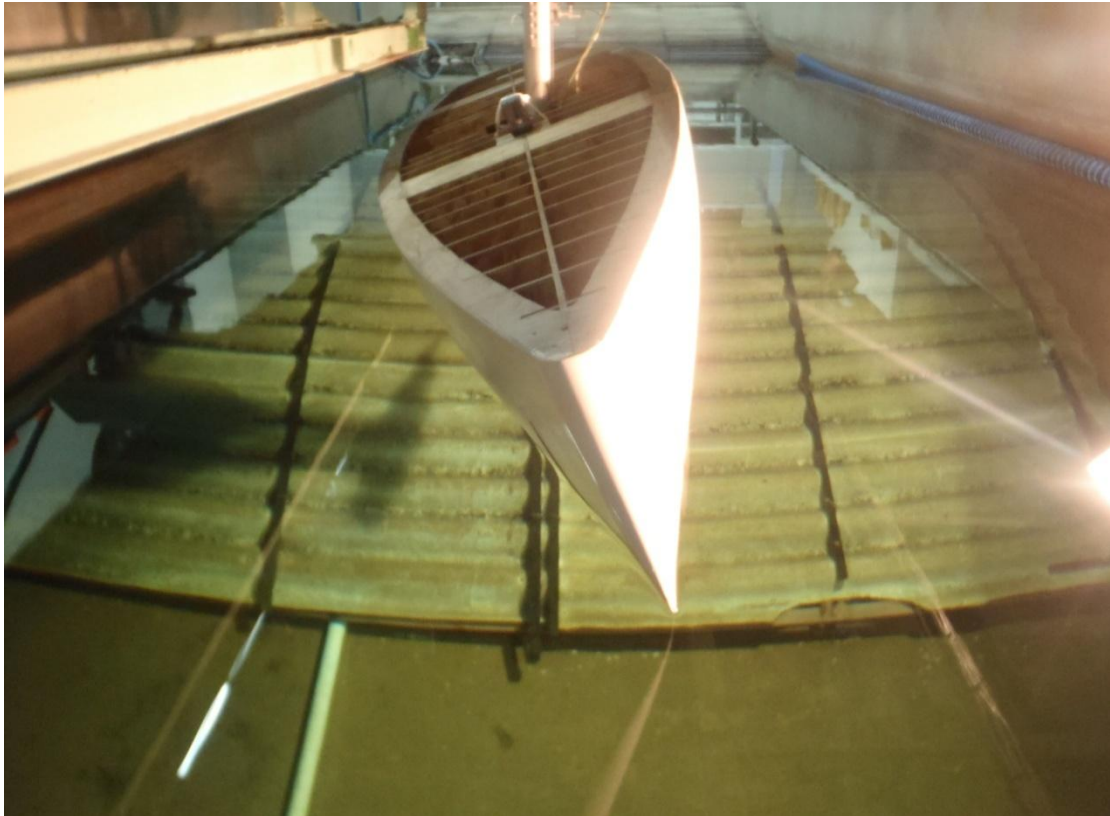
Στο φυσικό περιβάλλον όταν ένα ιστιοπλοϊκό ταξιδεύει στη θάλασσα κοντά στην εγγυτάτη (πλεύση όρτσα), έχει μία γωνία εγκάρσιας κλίσης και μία **γωνία πλευρικής απόκλισης (leeway angle) λ** , η οποία είναι η

διαφορά μεταξύ της διεύθυνσης της πορείας του σκάφους (heading) και της πραγματική πορείας την οποία το σκάφος διανύει μέσα στο νερό. Η φορά της ροής του νερού στην περίπτωση αυτή προσπίπτει στην υπήνεμη πλευρά του σκάφους δηλαδή τη βυθισμένη στη θάλασσα πλευρά του.

Έτσι καθώς το σκάφος κινείται προς τα εμπρός η καρίνα διαπερνά το νερό σε μία γωνία πρόσπτωσης ίση με την γωνία πλευρικής απόκλισης του σκάφους. Η πλάγια δύναμη που δημιουργείται είναι κάθετη στην διεύθυνση της ροής .

Η ροή του νερού γύρω από την καρίνα επηρεάζεται από την γωνία λ της πλευρικής απόκλισης. Όταν η γωνία αυτή είναι μικρή η ροή είναι στρωτή. Υπάρχει όμως μία κρίσιμη γωνία πάνω από την οποία έχουμε αποκόλληση της ροής γύρω από την καρίνα. Η καρίνα δημιουργεί μεγάλους στροβίλους και το σκάφος δεν παράγει αρκετή πλάγια δύναμη με αποτέλεσμα να πλαγιολισθαίνει..

Στην πειραματική δεξαμενή επειδή το μοντέλο είναι υποχρεωμένο να κινείται παράλληλα με το διαμήκη άξονα της δεξαμενής προκειμένου να επιτύχουμε τις ίδιες συνθήκες με το πραγματικό σκάφος σε φυσικό περιβάλλον, εκτός της εγκάρσιας κλίσης που δίνουμε λόγω της επίδρασης του ανέμου, στρέφουμε και το διαμήκη άξονα του μοντέλου κατά γωνία λ έτσι ώστε η ροή του νερού να συναντά το «πλαγιοβιθυσμένο» μέρος της γάστρας ως φαίνεται στην ακόλουθη φωτογραφία.



Εικόνα 2.1 Το μοντέλο σε γωνία πλευρικής απόκλισης $\lambda = 3,5^\circ$

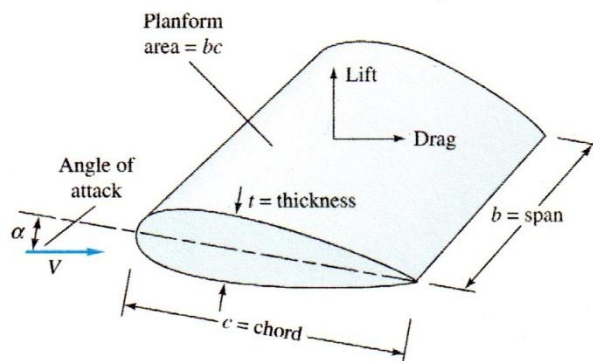
2. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΑΕΡΟ-ΥΔΡΟΤΟΜΩΝ ^(1,4,5,6,7)

2.1 ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

Έστω συμμετρική αεροτομή, η οποία έχει μήκος ή άνοιγμα (span) b , πλάτος (chord) c και το πάχος (thickness) t . Η αεροτομή χαρακτηρίζεται από τον λόγο επιμήκους AR ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$AR = \frac{b^2}{A} = \frac{b^2}{bc} = \frac{b}{c} \quad (2-1)$$

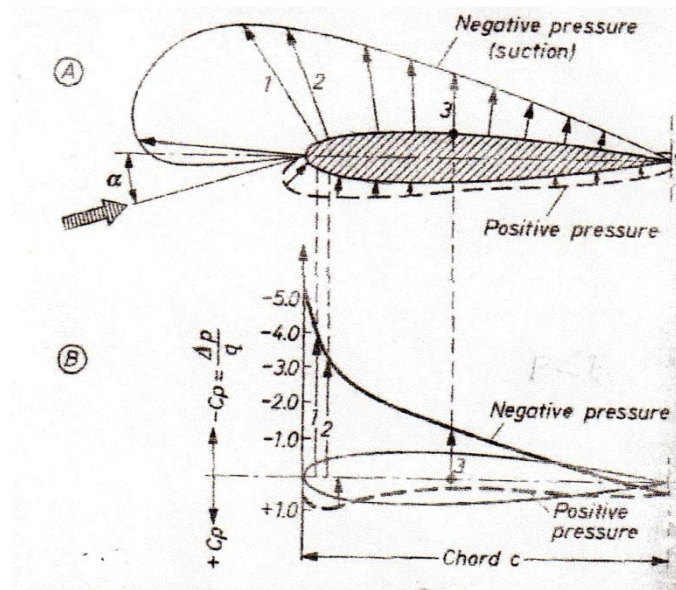
Έστω λοιπόν ότι η αεροτομή αυτή βρίσκεται μέσα σε παράλληλο πεδίο ροής ρευστού σταθερής ταχύτητας U και με γωνία πρόσπτωσης ως προς τη ροή α . Όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.1.



Σχ. 2.1 Διάγραμμα αεροτομής με τα χαρακτηριστικά της μεγέθη

Στην αεροτομή αυτή λόγω της ροής του ρευστού αναπτύσσεται υποπίεση στην άνω (πίσω) πλευρά και υπερπίεση στην κάτω (εμπρός) πλευρά έτσι η κατανομή της πίεσης έχει τη μορφή του σχήματος 2.2. Τότε στην

αεροτομή αυτή αναπτύσσεται δύναμη R , η οποία αναλύεται σε μία συνιστώσα κατά τη



Σχ. 2.2 Κατανομή πιέσεων σε αεροτομή

διεύθυνση της ροής D , (*Drag, αντίσταση*) και μία κάθετη σε αυτή L , (*Lift, άνοση ή πλάγια δύναμη*). Εφαρμόζοντας τη συνθήκη Kutta-Joukowski στο σημείο εκφυγής και θεωρώντας ότι $t \ll c$ (πολύ λεπτή διατομή) αποδεικνύεται ότι η άνοση L δίνεται από τη σχέση:

$$L = \rho U b \Gamma \quad (2-2)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού, U η ταχύτητά του ρευστού και Γ η κυκλοφορία ($\Gamma = \oint \vec{u} \cdot d\vec{s}$) γύρω από την αεροτομή, η οποία για τις προαναφερθείσες συνθήκες είναι :

$$\Gamma = \pi c U \sin \alpha \quad (2-3)$$

Ο συντελεστής άνωσης c_L ορίζεται από τη σχέση:

$$c_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 \cdot A}. \quad (2-4)$$

Όπου $A=bc$ είναι το εμβαδόν της πλευρικής επιφάνειας της διατομής. Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (2-2), (2-3), και (2-4) καθώς και ότι η γωνία πρόσπτωσης α είναι μικρή παίρνουμε:

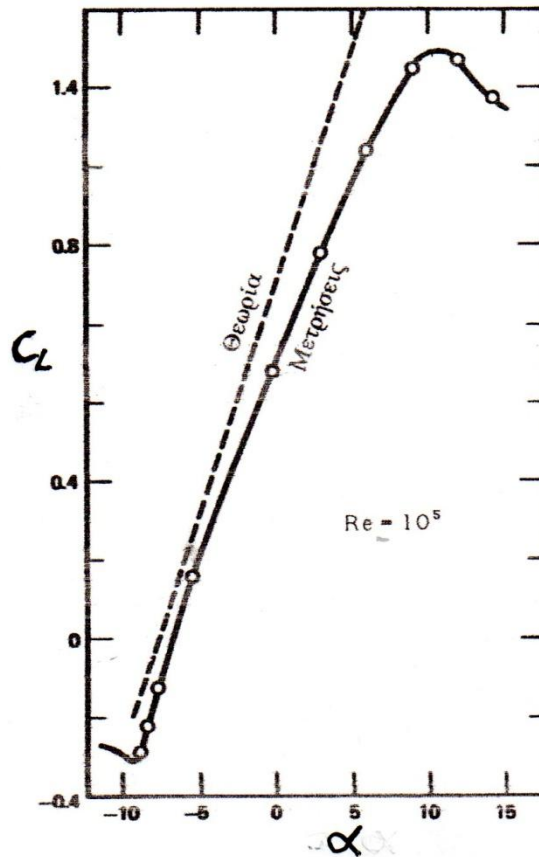
$$c_L = 2\pi \sin \alpha \cong 2\pi\alpha \quad (2-5)$$

Όπου η α προφανώς μετράται σε ακτίνια.

Σε περίπτωση που θέλουμε να την εκφράσουμε σε μοίρες η (2-5) γίνεται:

$$c_L = 2\pi \cdot (\pi/180)\alpha = 0.11\alpha \quad (2-5a)$$

Η σχέση (2-5) εκφράζει την γραμμικότητα του συντελεστή άνωσης c_L με την γωνία πρόσπτωσης α για λεπτές αεροτομές. Η σχέση αυτή ισχύει με πολύ καλή προσέγγιση στην πράξη για μικρές γωνίες πρόσπτωσης και αρχίζει να αποκλίνει για μεγαλύτερες γωνίες λόγω εμφάνισης των έντονων φαινομένων (φαινόμενο Stall) αποκόλλησης του επιφανειακού οριακού στρώματος



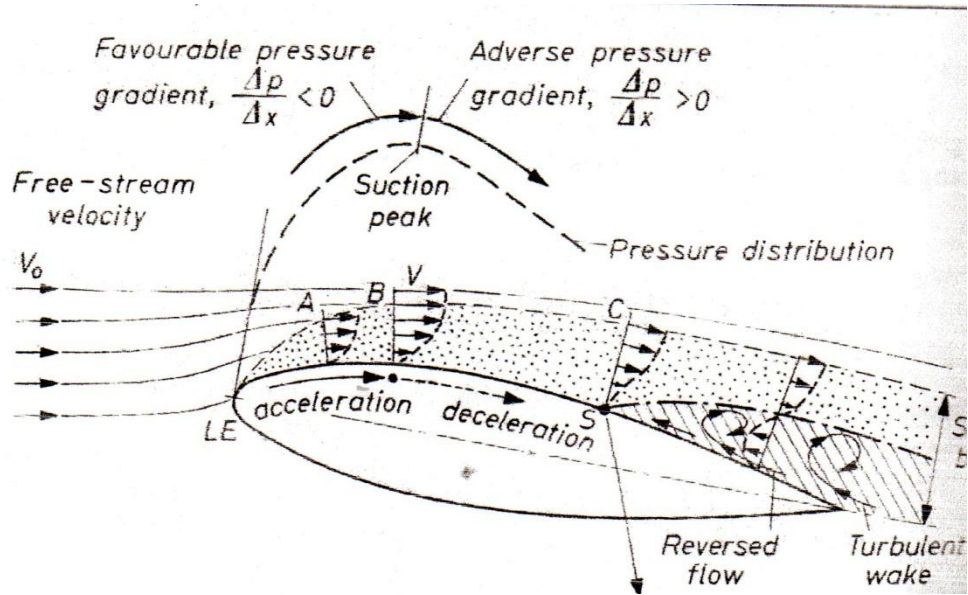
Σχ. 2.3. Χαρακτηριστική καμπύλη $c_L - \alpha$ αεροτομής. Σύγκριση θεωρίας – πειράματος

Στο Σχ. 2.3 παρουσιάζεται ο συντελεστής άνωσης c_L της αεροτομής σαν συνάρτηση της γωνίας προσπτώσεως α . Το σχήμα δείχνει μεγαλύτερες τιμές του θεωρητικά υπολογιζόμενου c_L από τις πειραματικές, όμως η κλίση είναι περίπου η ίδια. Οι πειραματικά μετρούμενες μικρότερες τιμές του c_L οφείλονται στο γεγονός ότι το παχύ οριακό στρώμα στην πάνω επιφάνεια της αεροτομής αναγκάζει τη ροή να εγκαταλείψει την αεροτομή στην ακμή εκφυγής με γωνία μικρότερη εκείνης την οποία προλέγει η συνθήκη Kutta. Όπως φαίνεται στην πειραματική καμπύλη το c_L δεν αυξάνεται συνεχώς αλλά υπάρχει ένα άνω όριο (για τη

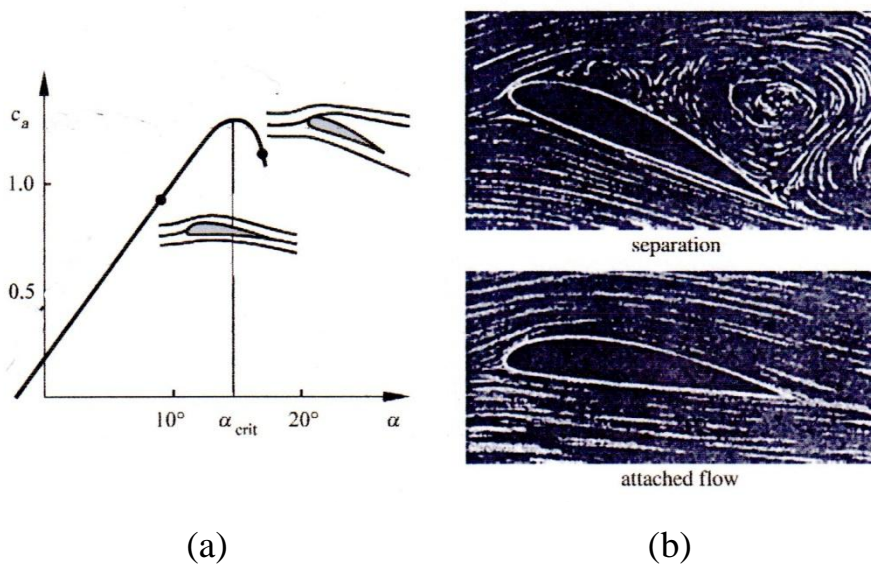
συγκεκριμένη διατομή $c_L = 1.45$ για $\alpha = 10^\circ$) πέραν του οποίου το c_L ελαττούται λόγω αποκόλλησης της ροής.

Αποκόλληση της ροής

Σε ροές με μεγάλους αριθμούς Reynolds γύρω από σώματα τα φαινόμενα συνεκτικότητας περιορίζονται σε ένα λεπτό στρώμα κοντά στο στερεό όριο το οποίο ονομάζεται οριακό στρώμα. Εάν η πίεση είναι αύξουσα κατά την κατεύθυνση της ροής ($\Delta p / \Delta x > 0$) το πάχος δ του οριακού στρώματος αυξάνεται, όπως επιβάλλει το θεώρημα της ορμής, με ταχύτερο ρυθμό και σε κάποιο σημείο τα στοιχεία του ρευστού τα οποία βρίσκονται κοντά στο στερεό και επομένως έχουν μικρή κινητική ενέργεια αναγκάζονται να αναστρέψουν την κίνησή τους Σχ.2.4. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μία περιοχή ανακυκλούμενης ροής (**περιοχή ανακυκλοφορίας**) και **αποκόλληση** του οριακού στρώματος από τη στερεά επιφάνεια. Το σημείο στο οποίο το λεπτό οριακό στρώμα αποκολλάται από την επιφάνεια και το οποίο διαχωρίζει την περιοχή που τα φαινόμενα συνεκτικότητας είναι αρκετά περιορισμένα, από την περιοχή της ανακυκλούμενης ροής ονομάζεται **σημείο αποκόλλησης** (σημείο S στο σχ.2.4). Στο Σχ. 2.5 φαίνονται δύο χαρακτηριστικές καταστάσεις της ροής πριν και μετά την αποκόλληση.



Σχ. 2.4 Τυπική εικόνα δημιουργίας δινών και αποκόλλησης. Το οριακό στρώμα δείχνεται πολύ μεγαλύτερο για λόγους ευκρίνειας.



Σχ. 2.5

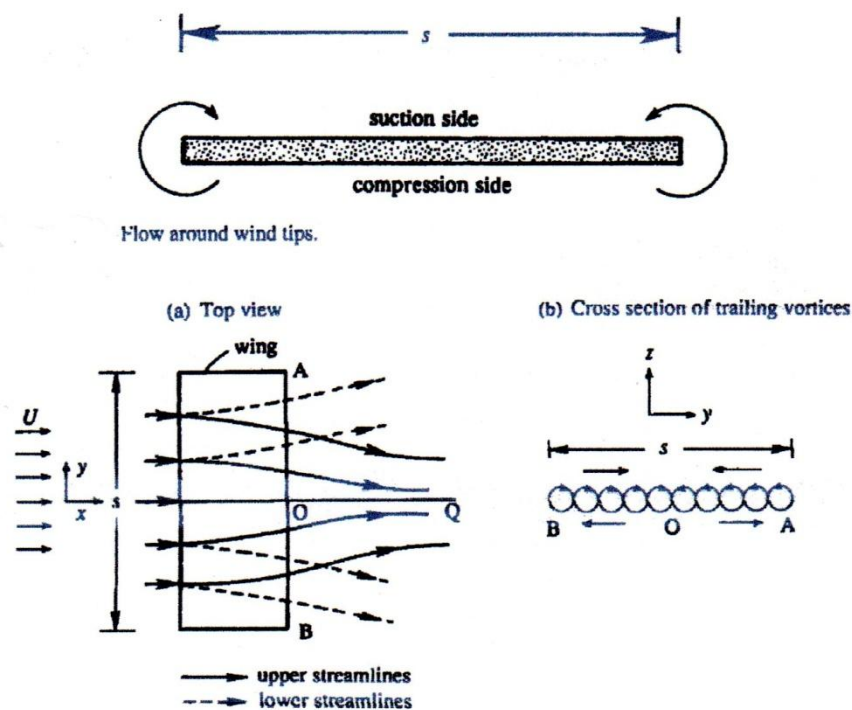
(a): Καμπύλη συντελεστή άνωσης c_L έναντι της γωνίας προσπτώσεως α .

(b): Χαρακτηριστικές μορφές ροής πριν (κάτω) και μετά (πάνω) την αποκόλληση που αντιστοιχούν στα δύο σημεία της (a).

2.2 ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗ ΡΟΗ

Η περιγραφή η οποία έγινε στην προηγούμενη παράγραφο αναφέρεται σε διδιάστατη ροή ή ισοδύναμα σε τριδιάστατη αλλά για απείρου μήκους αεροτομή ή καλύτερα άπειρο λόγο επιμήκους ($AR \rightarrow \infty$). Μόλις περιορίσουμε το μήκος της αεροτομής τότε η κατάσταση αλλάζει και παρουσιάζεται ένα πολύ ενδιαφέρον φαινόμενο το οποίο είμαστε υποχρεωμένοι να αντιμετωπίσουμε σε τρεις διαστάσεις.

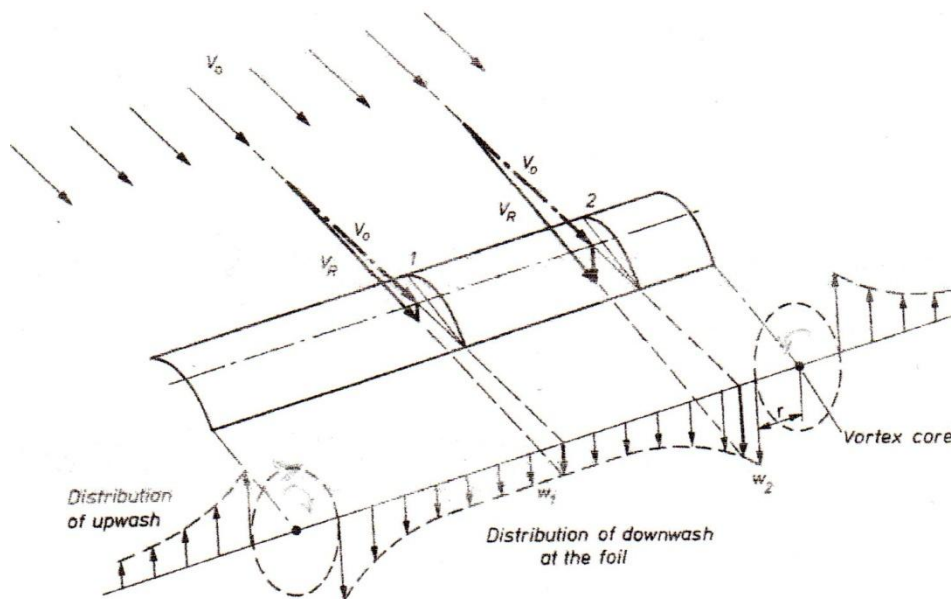
Ας θεωρήσουμε λοιπόν πάλι την αεροτομή του Σχ 2.1 στην εμπρός (κάτω) πλευρά της αεροτομής έχουμε υπερπίεση ενώ στην πίσω (άνω) υποπίεση όπως και από το Σχ 1.2 φαίνεται. Έτσι το ρευστό τώρα θα κινηθεί μέσω των άκρων



Σχ. 2.6 Ροή πάνω από αεροτομή πεπερασμένου μήκους. (α) Άποψη των γραμμών ροής πάνω και κάτω της επιφάνειας της αεροτομής. (β) Άποψη των δινών πίσω από την αεροτομή.

της διατομής από την μία πλευρά προς την άλλη της αεροτομής (κατά την τρίτη διάσταση). Είναι προφανές ότι αυτό δεν μπορούσε να συμβεί με άπειρο μήκος διατομής δεξ και Σχ. 2.6.

Η κίνηση αυτή υπερτειθέμενη στην παράλληλη ροή θα την εκτρέψει με αποτέλεσμα οι γραμμές ροής οι οποίες προσεγγίζουν την περιοχή της υποπίεσης (είναι πάνω από την αεροτομή) να εκτραπούν προς το εσωτερικό της, ενώ εκείνες οι οποίες προσεγγίζουν την περιοχή της υπερπίεσης (είναι κάτω από την αεροτομή) να εκτραπούν προς τα έξω, η ροή τώρα αλλάζει και σχηματίζονται δίνες οι οποίες τελικά καθώς η κίνηση του ρευστού συνεχίζεται από κάτω προς τα πάνω σχηματίζουν ένα φύλλο δινών όπως φαίνεται στο Σχ.2.7.



Σχ. 2.7 Απλουστευτική άποψη του πεδίου ταχυτήτων πλησίον της αεροτομής.

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι το ρευστό να αποκτά μια ταχύτητα προς τα κάτω w (downwash). Έτσι σε κάθε θέση η αρχική ταχύτητα της ροής U εκτρέπεται κατά γωνία α_i

$$\alpha_i = \tan^{-1} \frac{w}{U} \cong \frac{w}{U} \quad (2-6)$$

η οποία καλείται και **επαγόμενη γωνία (induced angle)** Δες και σχήμα 2.8 .

Η επαγόμενη ταχύτητα w είναι μικρή συγκρινόμενη με την ταχύτητα της ροής U έτσι η υπέρθεσή της με την U πρακτικώς δεν αλλάζει το μέτρο της τελευταίας ωστόσο αλλάζει την διεύθυνσή της και αυτό έχει πολύ σημαντικές συνέπειες:

α). Η ταχύτητα w ελαττώνει τη γωνία προσπτώσεως α σε μία ενεργό α_{ef} όπως φαίνεται και στο Σχ. 2.8

$$\alpha_{ef} = \alpha - \alpha_i = \alpha - \frac{w}{U} \quad (2-7)$$

Όπου α είναι η γεωμετρική γωνία προσπτώσεως η οποία καθορίζεται από την διεύθυνση της ροής μακριά από την αεροτομή και της χορδής της.

Έτσι η **άνωση Lift** η οποία δημιουργείται από την ενεργό γωνία α_{ef} είναι μικρότερη από εκείνη που αναμένεται από την γεωμετρική γωνία πρόσπτωσης α

Για αεροτομή με άπειρο λόγο επιμήκους, δηλ. για μια διδιάστατη ροή, η επαγόμενη γωνία προσπτώσεως είναι μηδέν, επομένως η γεωμετρική γωνία προσπτώσεως α και η ενεργός γωνία προσπτώσεως α_{ef} είναι ίσες.

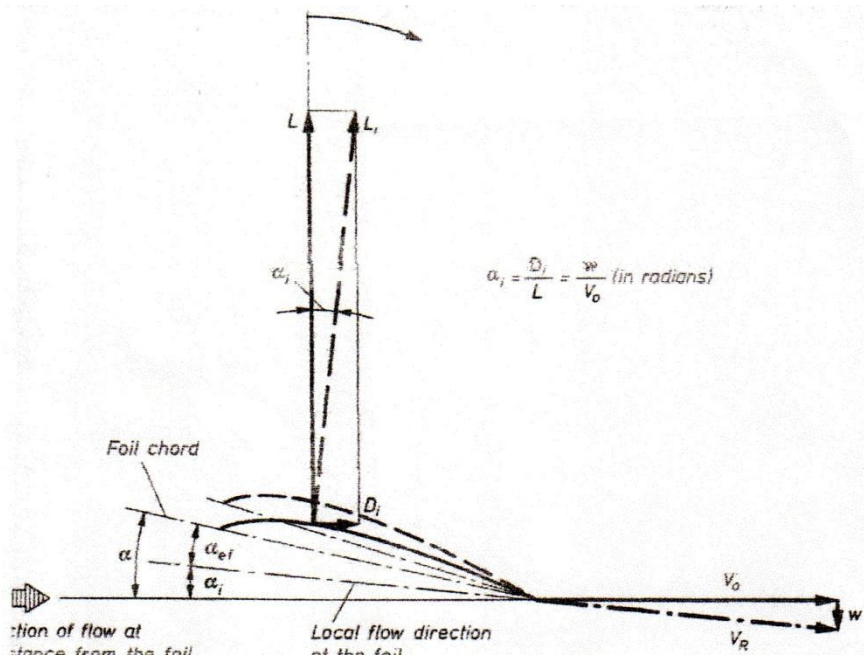
$$\alpha = \alpha_{ef} \quad (2-8)$$

Για αεροτομή με πεπερασμένο λόγο επιμήκους η γεωμετρική γωνία προσπτώσεως α είναι το άθροισμα τους.

$$\alpha = \alpha_{ef} + \alpha_i \quad (2-9)$$

Επομένως για να δημιουργηθεί η ίδια **άνωση L (Lift)** με εκείνη που δημιουργείται από διδιάστατη ροή η αεροτομή με πεπερασμένο λόγο επιμήκους πρέπει να τοποθετηθεί σε γωνία προσπτώσεως α η οποία είναι μεγαλύτερη κατά α_i από εκείνη της α_{ef} η οποία αντιστοιχεί για άπειρο

λόγο επιμήκους. Η διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 2.8 δίνει την αντίστοιχη θέση της αεροτομής να λειτουργεί σε μεγαλύτερη γωνία προκειμένου να αντισταθμίσει την επίδραση της ταχύτητας w .



Σχ. 2.8 Γεωμετρία της επαγόμενης γωνίας και της επαγόμενης αντίστασης

β). Η *άνωση* L_i (*Lift*) η οποία δημιουργείται από την πεπερασμένη αεροτομή έχει περιστραφεί κατά γωνία α_i σε σχέση με την L , η *άνωση* L_i είναι πρακτικά ίση με την L όμως τώρα δημιουργείται μια πρόσθετη αντίσταση D_i κατά τη διεύθυνση της ροής, η οποία ονομάζεται *επαγόμενη αντίσταση* καθώς οφείλεται στην επαγόμενη ροή από τα άκρα της αεροτομής. Κατά κάποιο τρόπο η επαγόμενη αντίσταση είναι μέρος της *άνωσης* η οποία δημιουργείται από μια πεπερασμένη διατομή.

Αποδεικνύεται ότι για αεροτομή με ελλειπτικό σχήμα το οποίο υπεισάγει ελλειπτική κατανομή της άνωσης με το μέγιστο στο μέσον ενώ βαθμιαία μειώνεται και μηδενίζεται στα άκρα ο συντελεστής c_{Di} δίνεται από τη σχέση:

$$c_{Di} = \frac{D_i}{0.5\rho U^2 A} = \frac{c_L^2}{\pi AR} \quad (2-10)$$

Όπου c_L ο συντελεστής άνωσης. Από το σχήμα 2.8 προκύπτει ότι

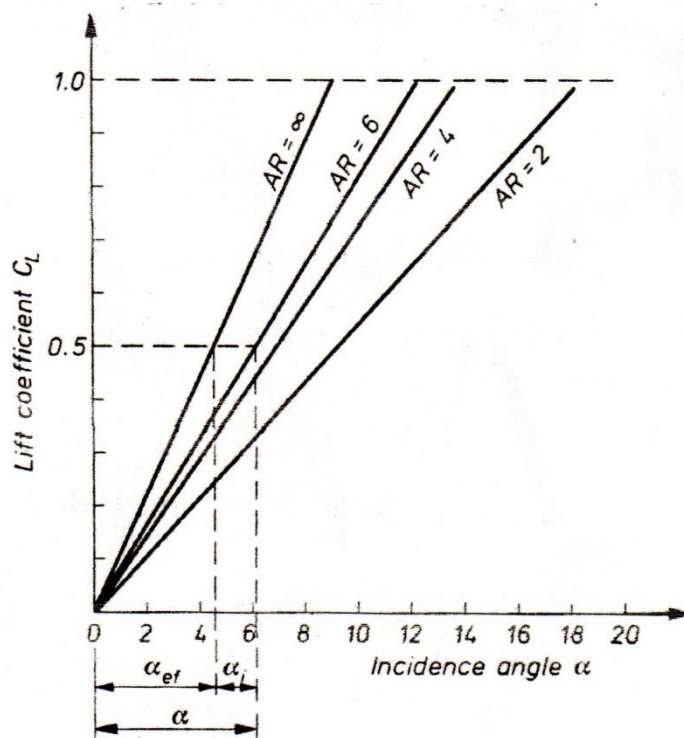
$$D_i = L \tan \alpha_i = L \alpha_i \quad (2-11)$$

Και επομένως

$$\alpha_i = \frac{D_i}{L} = \frac{c_{Di}}{c_L} = \frac{c_L}{\pi AR} \quad (2-12)$$

Παρατηρούμε ότι τόσο ο συντελεστής της επαγόμενης αντίστασης c_{Di} όσο και η επαγόμενη γωνία α_i εξαρτώνται από το λόγο επιμήκους και μάλιστα όταν αυτός τείνει στο άπειρο μηδενίζονται. Συντελεστής δηλαδή $AR \rightarrow \infty$ αντιστοιχεί σε διδιάστατη ροή.

Στο σχήμα 2.9. παριστάνεται ο συντελεστής άνωσης c_L σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης α για διάφορες τιμές του λόγου επιμήκους AR .



Σχ. 2.9. Ο συντελεστής άνωσης σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης για αεροτομές με διαφορετικό λόγο επιμήκους AR .

Παρατηρούμε ότι προκειμένου να έχουμε συντελεστή άνωσης ίσο με 0.5 ο οποίος επιτυγχάνεται για ενεργό γωνία πρόσπτωσης α περίπου 4.6° για αεροτομή με $AR = \infty$ θα πρέπει για όλα τις άλλες αεροτομές να έχουμε γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη, Για $AR=2$ η γωνία πρόσπτωσης είναι περίπου διπλάσια όπως και από το σχήμα φαίνεται

3. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΩΣΗ Ή ΠΛΑΓΙΑ ΔΥΝΑΜΗ LIFT)⁽³⁾

Καθώς το σκάφος κινείται με μια γωνία απόκλισης λ η αεροδυναμική δύναμη που αναπτύσσουν τα πανιά του αντισταθμίζεται από την υδροδυναμική δύναμη που παράγει το σκάφος (κυρίως η καρίνα, και το τιμόνι του). Μετά την ισορροπία όλων των δυνάμεων, αεροδυναμικών και υδροδυναμικών, οι οποίες ενεργούν επί του σκάφους, αποκαθίσταται μια σταθερή κατάσταση (steady state) όπου το σκάφος κινείται με σταθερή ταχύτητα V_B σε σταθερή γωνία απόκλισης λ και έχει πάρει σταθερή εγκάρσια κλίση (heel angle) φ . Τότε η γωνία πρόσπτωσης της ροής στην καρίνα είναι $\lambda \cos \varphi$.

Η οριζόντια συνιστώσα της πλάγιας δύναμης λόγω της άνωσης (lift) την οποία δημιουργεί η καρίνα μπορεί να εκφρασθεί από τη σχέση:

$$SF_k = \frac{1}{2} \rho V_B^2 \cdot (\partial C_{LK} / \partial \alpha) \cdot \lambda \cos \varphi \cdot A_{LK} \cdot \cos \varphi \cdot L_{CB_Kfact} \quad (3-1)$$

Όπου:

ρ = Η πυκνότητα του ρευστού

V_B = Η ταχύτητα του σκάφους

$\partial C_{LK} / \partial \alpha$ = Η κλίση της καμπύλης του συντελεστή άνωσης ως προς την γωνία πρόσπτωσης.

λ = Η γωνία απόκλισης

φ = Η γωνία εγκάρσιας κλίσης

A_{LK} = Το εμβαδόν της πλευράς της καρίνας. (μήκοςχμέση χορδή)

L_{CB_Kfact} = Συντελεστής μέσω του οποίου λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της γάστρας στην άνωση της καρίνας.

Παρόμοιες εκφράσεις μπορούμε να ορίσουμε για το πηδάλιο βασιζόμενοι στην κατάλληλη γωνία πρόσπτωσης καθώς και για οποιοδήποτε άλλο

παρελκόμενο που έχει το σκάφος και δημιουργεί άνωση. Για μικρές γωνίες απόκλισης (γενικά μικρότερες των 8 μοιρών περίπου) η κλίση $\partial C_{LK} / \partial \alpha$, θεωρείται σταθερά για δεδομένη μορφή υδροτομών και εφόσον ο λόγος επιμήκους δεν είναι πολύ μικρός.

Η πλάγια δύναμη για την καρίνα και το πηδάλιο μπορεί να θεωρηθεί γραμμική με την γωνία απόκλισης, αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει και για την περίπτωση της γάστρας καθώς αυτή συνεισφέρει ένα σημαντικό μη γραμμικό παράγοντα στη πλάγια δύναμη ο οποίος είναι περίπου ανάλογος με το τετράγωνο της γωνίας απόκλισης.

4. ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΙΣΤΙΟΠΛΟΪΚΩΝ ΣΚΑΦΩΝ ^(2,3)

Η υδροδυναμική αντίσταση η οποία αναπτύσσεται όταν ένα ιστιοπλοϊκό σκάφος κινείται μέσα στο νερό, μπορεί να αναλυθεί σε έξι όρους. Τρεις από αυτούς είναι κοινοί για όλα τα σκάφη συγκεκριμένα οι:

- *Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance)*
- *Αντίσταση λόγω κύματος το οποίο δημιουργεί το σκάφος (wave resistance)*
- *Πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμού (added resistance in waves)*

Λόγω όμως της σημαντικής υδροδυναμικής πλάγιας δύναμης την οποία αναπτύσσει το μέρος του σκάφους το οποίο βρίσκεται μέσα στο νερό εμφανίζονται τρεις επιπλέον όροι οι

- *Αντίσταση λόγω κλίσης (resistance due to heel)*
- *Επαγόμενη αντίσταση (induced resistance)*
- *Αντίσταση οφειλόμενη στη συμπεριφορά της γάστρας (resistance due to hull attitude)*

Τα κύρια χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των παραπάνω έξι όρων της αντίστασης θα περιγραφούν κατωτέρω

4.1 Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance)

Θεωρείται ίση με το άθροισμα των αντιστάσεων

- *Αντίσταση λόγω τριβής,*
- *Αντίσταση λόγω κατανομής πίεσης συνεκτικής υφής και*
- *Αντίσταση λόγω τραχύτητας της επιφάνειας.*

Η *Αντίσταση λόγω τριβής* είναι συνυφασμένη με τη δύναμη που απαιτείται, για την εξουδετέρωση των εφαπτομενικών τάσεων που

αναπτύσσονται μεταξύ της γυμνής γάστρας, της καρίνας, του πηδαλιού και της συνεκτικότητας του υγρού.

Η *αντίσταση λόγω κατανομής πίεσης συνεκτικής υφής* οφείλεται στη κατανομή των πιέσεων κατά μήκος του σκάφους. Αν δεν υπήρχε το οριακό στρώμα η υπέρ-πίεση στην πλώρη και την πρύμνη θα ήταν ακριβώς ίδια με την υπό-πίεση στην μέση του σκάφους. Το οριακό στρώμα (παχύτερο στην πρύμνη) διαφοροποιεί αυτή την κατανομή, με αποτέλεσμα την απώλεια πίεσης στην πρύμνη και την δημιουργία δύναμης αντίστασης..

Η *αντίσταση λόγω τραχύτητας* της βρεχόμενης επιφάνειας είναι ένα πρόβλημα το οποίο σε αρχικό επίπεδο δεν ενδιαφέρει το σχεδιαστή αφού εξαρτάται από την ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας της γάστρας. Από πειραματικές διαδικασίες έχει βρεθεί ότι αν οι παράγοντες τραχύτητας είναι μικρότεροι από το οριακό στρώμα, τότε δεν δημιουργούν πρόσθετη αντίσταση. Αν όμως είναι μεγαλύτεροι τότε δημιουργούν πρόσθετη αντίσταση η οποία εξαρτάται από το μέγεθος τους και από την ταχύτητα του σκάφους. Στα αγωνιστικά σκάφη μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η αντίσταση λόγω τραχύτητας αφού η συντήρησή τους είναι προσεκτική και μπορούμε να θεωρήσουμε πως η τραχύτητα περιορίζεται κάτω από την κρίσιμη τιμή. Η επιτρεπόμενη τραχύτητα στην πλώρη είναι μικρότερη από την επιτρεπόμενη τραχύτητα στην πρύμνη αφού το πάχος του οριακού στρώματος είναι μικρότερο στην πλώρη.

Επειδή η αντίσταση λόγω κατανομής της, πίεσης συνεκτικής υφής, είναι συνήθως μικρή και η αντίσταση λόγω τραχύτητας αμελητέα, *η αντίσταση λόγω συνεκτικότητας πρακτικά είναι ίση με την αντίσταση τριβής* η οποία εξαρτάται από:

- Την επιφάνεια της γάστρας και των παρελκόμενων που βρίσκονται σε επαφή με το νερό

- Την ταχύτητα πρόωσης
- Την συνεκτικότητα του ρευστού (ιξώδες).

Και εκφράζεται ως εξής:

$$R_V = \frac{1}{2} \rho V_B^2 C_V S \quad (4-1)$$

Όπου

$$C_V = C_F (1+k) \quad (4-2)$$

C_F = Ειδικός συντελεστής αντίστασης τριβής του σώματος, συνήθως θεωρούμενος ίσος με αυτόν επίπεδης πλάκας με ίδιο αριθμό Reynolds

$1+k$ = Τριδιάστατος συντελεστής μορφής που λαμβάνει υπ' όψιν την πρόσθετη αντίσταση του σώματος επί πλέον από αυτή της επίπεδης πλάκας.

S = Η βρεχόμενη επιφάνεια σώματος.

Για το συντελεστή C_f έχουμε κατά ITTC-57:

$$C_f = \frac{0.075}{(\text{Log}(Rn) - 2)^2} \quad (4-3)$$

Όπου R_n αριθμός Reynolds ο οποίος ορίζεται από τη σχέση

$$R_n = \frac{VL}{\nu} \quad (4-4)$$

Όπου L το μήκος, V η ταχύτητα πρόωσης, και ν η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού.

Εδώ θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι η ροή μεταβάλλεται από στρωτή σε τυρβώδη για αριθμό Reynolds περίπου $Rn = 4.5 \cdot 10^5$

Για πλοία το μήκος L λαμβάνεται ίσο με το μήκος της ισάλου. Στα ιστιοπλοϊκά σκάφη όμως μία τέτοια προσέγγιση δεν θα ήταν ρεαλιστική.

Σαν μήκος L για τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds γυμνής γάστρας

ιστιοπλοϊκού σκάφους θα πρέπει να λαμβάνεται μεταξύ 70%-90% του μήκους της ισάλου.

Ο αριθμός Reynolds στην περίπτωση της γυμνής γάστρας δίδεται από τη σχέση:

$$Rn = \frac{V \cdot 0.8 \cdot L_{WL}}{\nu} \quad (4-5)$$

Ο αριθμός Reynolds στην περίπτωση των υδροτομών δίδεται από τη σχέση:

$$Rn_k = \frac{V \cdot \bar{C}_k}{\nu} \quad Rn_r = \frac{V \cdot \bar{C}_r}{\nu}$$

Όπου \bar{C} το μέσο μήκος της χορδής της υδροτομής και k αντιστοιχεί στην καρίνα (keel) και r στο πηδάλιο (rudder)

Η ολική αντίσταση λόγω συνεκτικότητας ενός σκάφους είναι :

$$R_V = \frac{1}{2} \rho V_B^2 (C_{VC} S_C + C_{Vk} S_k + C_{Vr} S_r) \quad (4-6)$$

Όπου

C = Η γάστρα του σκάφους (canoe body)

k = Η καρίνα του σκάφους (keel)

r = Το πηδάλιο του σκάφους (rudder)

4.2 Αντίσταση λόγω κύματος

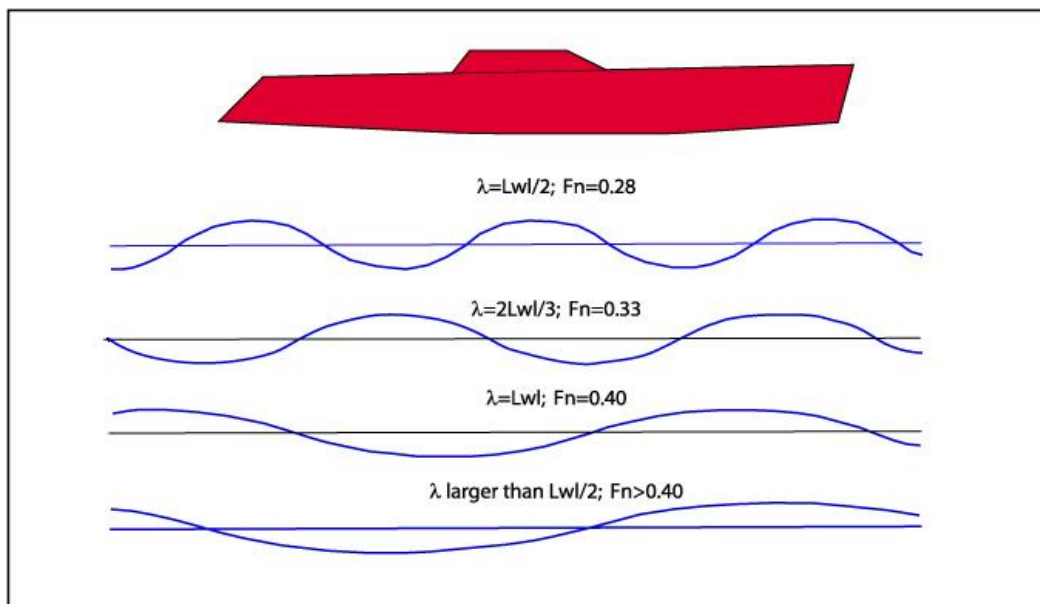
Το σύστημα κυματισμών που δημιουργεί η γάστρα των ιστιοπλοϊκών σκαφών είναι όμοιο με αυτό των συμβατικών πλοίων (κύματα Kelvin).

Σε κανονικές ταχύτητες ιστιοπλοϊκής πλεύσης και για αριθμούς Froude κοντά στην τιμή $Fn=0.35$ η ροή κατά μήκος της γυμνής γάστρας οδηγεί σε αύξηση της πίεσης στις περιοχές της πλώρης και της πρύμνης και

ελάττωση στο μέσο της γάστρας. Δημιουργούνται λοιπόν κορυφές κύματος στην πρύμνη και στην πλώρη και κοίλο κύματος στο μέσο τμήμα της γάστρας. Έτσι μπορούμε να υποθέσουμε και να λάβουμε υπόψη μας μόνο δύο συστήματα κυματισμού. Το σύστημα κυματισμού της πλώρης και το σύστημα κυματισμού της πρύμνης. Η ταχύτητα αυτών των κυματισμών είναι η ταχύτητα του σκάφους V_B , συνεπώς το μήκος τους είναι ίδιο καθώς εξαρτάται από την ταχύτητα με τη σχέση:

$$Wavespeed = V_B = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = 1.25\sqrt{\lambda} \quad (4-7)$$

Όπου λ , είναι το μήκος κύματος (Wave Length).



Σχ. 4.1 Αλληλεπίδραση κυματισμών πλώρης και πρύμνης

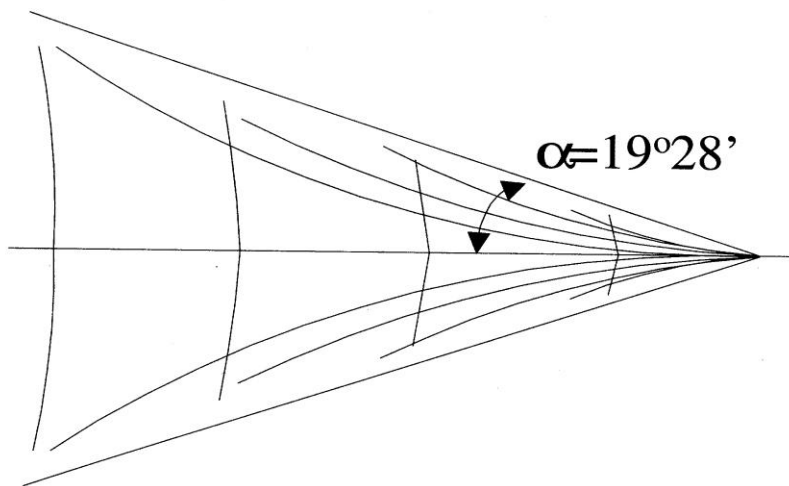
Όταν τα δύο αυτά συστήματα υπερτεθούν στην πρύμνη, ανάλογα με τη φάση τους, θα ενισχυθούν ή θα αποσβεστούν. Λαμβάνοντας υπόψη και τον αριθμό Froude F_n ο οποίος ορίζεται από τη σχέση (4-8).

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL_{WL}}} \quad (4-8)$$

βρίσκουμε ότι ο λόγος λ/L_{WL} εξαρτάται μόνο από το F_n .

$$\frac{\lambda}{L_{WL}} = 2\pi \cdot F_n^2$$

Η αντίσταση κυματισμού σχετίζεται με την ενέργεια που δαπανάται για τον σχηματισμό των κυμάτων που βλέπουμε στην επιφάνεια της θάλασσας όταν ένα σκάφος κινείται στη θάλασσα. Η ενέργεια αυτή είναι σημαντική και εξαρτάται κυρίως από το λόγο μήκος/εκτόπισμα ($L_{CB}/\nabla_{CB}^{1/3}$).



Σχ. 4.2 Η γωνία την οποία σχηματίζουν τα κύματα που δημιουργεί το σκάφος με τη διεύθυνση κίνησής του.

Μπορούμε τώρα να γράψουμε την ολική αντίσταση της γάστρας R_{TCB} στη περίπτωση, μηδενικής γωνίας εγκάρσιας κλίσης και απόκλισης, σε ήρεμο νερό:

$$R_{TCB} = R_{VCB} + R_W = \frac{1}{2} \rho V_B^2 \cdot C_{RTC B} \cdot S_{CB} \quad (4-9)$$

Με

$$C_{RTCB} = C_{RCB}(1 + k_{CB}) + C_W \quad (4-10)$$

Όπου:

R_{VCB} = Η αντίσταση λόγω συνεκτικότητας της γάστρας

R_W = Η αντίσταση λόγω κυματισμού της γάστρας

C_{RTCB} = Ο συντελεστής της ολικής υδροδυναμικής αντίστασης της γάστρας

S_{CB} = Η βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας

C_W = Ο συντελεστής της αντίστασης κυματισμού

Ο συντελεστής της αντίστασης κυματισμού μπορεί να εκφρασθεί από τη σχέση:

$$C_W = aF_n^n \quad (4-11)$$

Όπου a και n είναι σταθερές. Από διαγράμματα τύπου Prohaska, της αντίστασης σε όρθια θέση προκύπτει ότι για τα περισσότερα μοντέλα ιστιοπλοϊκών σκαφών η τιμή του n είναι περίπου ίση με 4. Χρησιμοποιώντας $n=4$ ο συντελεστής a μεταβάλλεται πολύ λίγο στη περιοχή ταχυτήτων έως $F_n=0.35$ έτσι θα έχουμε

$$R_W = \frac{1}{2} a \rho V_B^2 \cdot S_{CB} \cdot F_n^4 = \frac{1}{2} \frac{a \rho V_B^6 \cdot S_{CB}}{(gL_{CB})^2} \quad (4-12)$$

Από μελέτες της βρεχόμενης επιφάνειας σε παρόμοιες γάστρες είναι γνωστό ότι

$$S_{CB} = C_{S1} (\nabla_{CB} \cdot L_{CB})^{1/2} \quad (4-13)$$

$$\text{ή} \quad S_{CB} = C_{S2} \cdot \nabla^{2/3} \quad (4-14)$$

Όπου C_{S1} και C_{S2} είναι συντελεστές. Σημειωτέον ότι η τελευταία σχέση πάντα μπορεί να εκφρασθεί ως

$$S_{CB} = C_{S1}(\nabla_{CB} \cdot L_{CB})^{1/2} \quad (4-15)$$

καθόσον $(\nabla_{CB} \cdot L_{CB})^{1/2} = \nabla_{CB}^{2/3} \cdot (L_{CB} / \nabla_{CB}^{1/3})^{1/2}$

Επομένως

$$R_W = \frac{1}{2} \cdot \frac{a\rho V_B^6 \cdot C_{S1} (\nabla_{CB} \cdot L_{CB})^{1/2}}{(gL_{CB})^2} \quad (4-16)$$

ή

$$R_W = \frac{1}{2} \cdot \frac{a\rho C_{S1}}{g^2} \cdot \frac{V_B^6}{(L_{CB} / \nabla_{CB}^{1/3})^{3/2}} \quad (4-17)$$

Ενώ χρησιμοποιώντας την $S_{CB} = C_{S2} \cdot \nabla_{CB}^{2/3}$ τελικά προκύπτει:

$$R_W = \frac{1}{2} \cdot \frac{a\rho C_{S2}}{g^2} \cdot \frac{V_B^6}{(L_{CB} / \nabla_{CB}^{1/3})^2} \quad (4-18)$$

Είναι φανερό λοιπόν από τις δύο τελευταίες σχέσεις ότι όταν ο λόγος μήκος/εκτόπισμα $(L_{CB} / \nabla_{CB}^{1/3})$ αυξάνει κατά ένα παράγοντα f η αντίσταση κύματος ελαττώνεται κατά ένα παράγοντα τουλάχιστον $1/f^{3/2}$ αν όχι $1/f^2$.

Πρακτικά ο παραπάνω αυτός όρος της ολικής αντίστασης περιορίζει την ταχύτητα ενός μονόγαστρου ιστιοφόρου με χαμηλή προς μέτρια τιμή του λόγου μήκος/εκτόπισμα (μικρότερη του 5.5), σε μια τιμή σε κόμβους μεταξύ $2.35(L_{CB})^{1/2}$ και $2.7(L_{CB})^{1/2}$ όπου L_{CB} είναι το μήκος της ισάλου σε μέτρα. Αυτή η «**μεγίστη ταχύτητα**» αναφέρεται συχνά σαν «**ταχύτητα γάστρας**». Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι τέτοια ταχύτητα από πλευράς φυσικής δεν υφίσταται καθόσον η ταχύτητα συνεχίζει να αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ώθηση του σκάφους.

4.3 Πρόσθετη Αντίσταση λόγω κυμάτων

Όπως συμβαίνει σε όλα τα σκάφη έτσι και στα ιστιοφόρα η αντίσταση που υφίσταται στην κίνησή του λόγω των κυμάτων της θάλασσας εξαρτάται από τις κινήσεις του σκάφους στις συγκεκριμένες καταστάσεις της θάλασσας. Οι πιο σημαντικές κινήσεις είναι η κατακόρυφη κίνηση, (heave) ο προνευτασμός (pitch) και η εγκάρσια ταλάντωση (roll). Ειδικά στα ιστιοπλοϊκά σκάφη η εγκάρσια ταλάντωση είναι μικρότερης σημασίας, ενώ η σοβαρότητα του προνευτασμού επηρεάζει σημαντικά την πρόσθετη αντίσταση στα κύματα. Μειώνοντας την κίνηση του προνευτασμού η πρόσθετη αντίσταση μειώνεται. Μια άλλη σημαντική ιδιότητα αυτού του όρου είναι ότι είναι ανεξάρτητος από την αντίσταση σε ήρεμο νερό και επομένως μπορεί να προκύψει σαν διαφορά της αντίστασης σε κυματισμό σε μια κατάσταση θάλασσας σε σχέση με την αντίσταση σε ήρεμο νερό. Επίσης η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυμάτων είναι ανάλογη του τετραγώνου του ύψους των κυμάτων.

4.4 Αντίσταση λόγω εγκάρσιας κλίσης

Η αντίσταση λόγω εγκάρσιας κλίσης ορίζεται ως η διαφορά της αντίστασης στην όρθια θέση με την αντίσταση σε κεκλιμένη θέση για γωνία απόκλισης ίση με το μηδέν.

Επειδή η αντίσταση λόγω κλίσης δεν περιλαμβάνει την επαγόμενη αντίσταση, ο πειραματικός της προσδιορισμός συνίσταται στο να προεκτείνει κανείς την καμπύλη η οποία παριστάνει την μεταβολή της αντίστασης με την αύξηση της πλάγιας δύναμης (π. χ. λόγω αύξησης της γωνίας απόκλισης), για σταθερή ταχύτητα και γωνία κλίσης, στη συνθήκη όπου η εφαρμοζόμενη πλάγια δύναμη στο υπόδειγμα είναι

μηδενική. Αυτό επιτυγχάνεται με γραφική παράσταση της ολικής μετρούμενης αντίστασης σαν συνάρτηση του τετραγώνου της πλάγιας δύναμης. Είναι προφανές ότι για να μπορέσουμε να χαράξουμε τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, θα πρέπει να γίνουν πειράματα σε διάφορες τιμές της γωνίας απόκλισης και σταθερή γωνία εγκάρσιας κλίσης του μοντέλου.

Η αντίσταση λόγω εγκάρσιας κλίσης μπορεί μερικές φορές να γίνει αρνητική για γωνίες μικρότερες των είκοσι μοιρών περίπου. Αυτό συνήθως οφείλεται στην ελάττωση της βρεχόμενης επιφάνειας καθώς το σκάφος γέρνει. Σε αυτή την περίπτωση η ελάττωση της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας είναι συχνά μεγαλύτερη από την αύξηση της αντίστασης που οφείλεται στην χειρότερη ποιότητα της ροής γύρω από τη γάστρα. Ελάττωση της αντίστασης μπορεί να προέλθει και από την βελτίωση των γραμμών του σκάφους όταν αυτό ταξιδεύει με εγκάρσια κλίση.

4.5 Επαγόμενη Αντίσταση

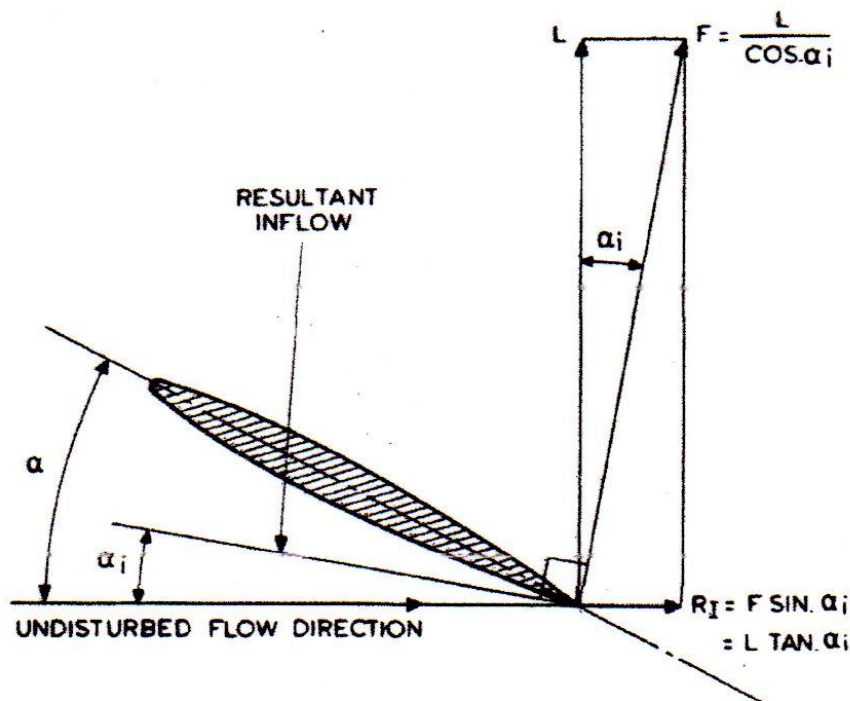
4.5.1 Επαγόμενη αντίσταση οφειλόμενη σε γραμμική άνωση (Lift)

Σε μία φέρουσα επιφάνεια όπως η καρίνα και το πηδάλιο, άνωση παράγεται με την εκτροπή της εισερχόμενης ροής πλάγια υπό γωνία, όπως ακριβώς περιγράφεται στην παράγραφο 2.2. Στην πίσω μεριά της υδροτομής δημιουργείται υποπίεση, ενώ στην μπροστινή δημιουργείται πίεση, έχουμε κίνηση του ρευστού από την μία μεριά στην άλλη μέσω της κάτω ακμής της υδροτομής. Η συνολική δύναμη ενεργεί προσεγγιστικά σε διεύθυνση κάθετη στη ροή. Η άνωση ή πλάγια συνιστώσα ορίζεται σαν την «ωφέλιμη συνιστώσα της συνολικής δύναμης η οποία ενεργεί σε

ορθή γωνία ως προς τη διεύθυνση της αδιατάρακτης ροής. (Δες σχήματα 2.8 και 4.3)

Από το παραπάνω αναφερόμενα σχήματα συμπεραίνουμε ότι σε σχέση με την άνωση, η συνολική δύναμη $F = L / \cos \alpha_i$, ενώ η συνιστώσα στη διεύθυνση της αδιατάρακτης ροής είναι $R_i = F \sin \alpha_i$ ή $R_i = L \tan \alpha_i$ και λαμβάνεται ως η συνιστώσα της αντίστασης. Ονομάζεται επαγόμενη αντίσταση διότι σχετίζεται με την επαγόμενη γωνία ροής α_i . Όπως έχει αναφερθεί (παρ. 2.2) η επαγόμενη γωνία ροής σε ένα σώμα είναι κατά προσέγγιση ίση με

$$\alpha_i = \frac{C_L(1 + \sigma)}{\pi AR_e} \quad (4-19)$$



Σχ. 4.3 Υδροτομή καρίνας ή πηδαλίου

όπου

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_L} \quad (4-20)$$

Έτσι για μικρές γωνίες α_i έχουμε:

$$R_i = L \tan \alpha_i = L \alpha_i \quad (4-21)$$

λαμβάνοντας υπόψη και τις (4-19), (4-20) παίρνουμε

$$R_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho V^2 A_L C_L^2 (1 + \sigma)}{\pi A R_e} \quad (4-22)$$

όπου :

R_i = Επαγόμενη αντίσταση

A_L = Πλευρική επιφάνεια σώματος

C_L = Συντελεστής άνωσης

$1 + \sigma$ = Διορθωτικός παράγοντας για μη ελλειπτική κατανομή στη φέρουσα επιφάνεια

$A R_e$ = Ενεργός λόγος επιμήκους

Είναι φανερό από τις σχέσεις (4-19), (4-20), (4-21), και (4-22) ότι η επαγόμενη αντίσταση R_i είναι γραμμική συνάρτηση του τετραγώνου της άνωσης ή του τετραγώνου της ενεργού γωνίας πρόσπτωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επίδραση της εγκάρσιας κλίσης επηρεάζει μόνο τον ενεργό λόγο επιμήκους $A R_e$ και γενικά την τιμή $(1 + \sigma)$. Χρησιμοποιώντας τη μετρηθείσα τιμή της πλάγιας δύναμης για τον υπολογισμό της επαγόμενης αντίστασης, θα πρέπει πρώτα να τη διαιρέσουμε με το συνημίτονο της εγκάρσιας κλίσης, προκειμένου να βρούμε την σωστή τιμή της πλάγιας δύναμης ή του συντελεστή άνωσης.

4.5.2 Επαγόμενη αντίσταση οφειλόμενη σε μη γραμμική άνοση (Lift)

Για σώματα τα οποία διαθέτουν μια σημαντική μη γραμμική εξάρτηση της άνοσης (Lift) από τη γωνία πρόσπτωσης (ειδικά στις περιπτώσεις όπου ο γεωμετρικός λόγος επιμήκους είναι μικρότερος του 0.5) η θεωρία υποδεικνύει ότι τα σώματα αυτά εκτός από ένα γραμμικό όρο της άνοσης με τη γωνία πρόσπτωσης έχουν και ένα ακόμη όρο ο οποίος κατά προσέγγιση εξαρτάται από το τετράγωνο της γωνίας πρόσπτωσης. Ο γραμμικός όρος θεωρείται ότι οφείλεται στην επαγόμενη ροή όπως στις υδροτομές με μεγαλύτερο λόγο επιμήκους, ενώ ο μη γραμμικός όρος θεωρείται ότι οφείλεται στην αποκόλληση της ροής από της πλευρικές ακμές του σώματος.

Η επαγόμενη αντίσταση η οφειλόμενη στον μη γραμμικό όρο της άνοσης $L_{\alpha 2}$ ορίζεται παρόμοια με εκείνη η οποία οφείλεται στον γραμμικό

$$R_{i\alpha 2} = L_{\alpha 2} \tan \alpha_i$$

$$\text{ή} \quad C_{Ri\alpha 2} = C_{L\alpha 2} \tan \alpha_i \quad (4-23)$$

Όπου $C_{L\alpha 2}$ είναι ανάλογο του α^2 και όχι του α . Λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι για μικρό λόγο επιμήκους η ολική επαγόμενη γωνία είναι περίπου ίση με την ολική γωνία πρόσπτωσης, τότε για μικρές γωνίες α , δηλ. $\alpha_i = \alpha/2$

$$R_{i\alpha 2} = \frac{1}{2} \rho V^2 \cdot A_L \cdot C_{L\alpha 2} \cdot \alpha \quad (4-24)$$

Όπου ο συντελεστής της μη γραμμικής άνοσης είναι

$$C_{L\alpha 2} = c_{L\alpha 2} \cdot \alpha^2 \quad (4-25)$$

Όπου ο συντελεστής $c_{L\alpha 2}$ είναι μια σταθερά για δεδομένη γεωμετρία, ταχύτητα, γωνία εγκάρσιας κλίσης, και γωνία απόκλισης.

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ OOSSANNEN^(3,8) (Velocity Prediction Program OOSSANNEN)

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θεωρία και οι υπολογισμοί οι οποίοι αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια εφαρμόζονται σε συνδυασμό με πειράματα στη δεξαμενή και δίνουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τον τελικό σχεδιασμό του σκάφους ώστε να ικανοποιούνται κατά το βέλτιστο τρόπο οι απαιτήσεις του σχεδιαστή ή πλοιοκτήτη.

Ωστόσο υπάρχει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον από πολλούς, τόσο κατασκευαστές και σχεδιαστές σκαφών όσο και ιστιοπλόους οι οποίοι ασχολούνται με αγώνες (racing), σχετικά με υπολογιστικά μοντέλα πρόβλεψης ταχύτητας ενός ιστιοπλοϊκού σκάφους. Σε αυτά τα υπολογιστικά προγράμματα, τα οποία εφαρμόζονται γενικά για σκάφη διαφορετικών κατασκευαστών, μεγεθών και δυνατοτήτων, εισάγονται ορισμένα χαρακτηριστικά του σκάφους και σαν έξοδο δίδουν την προβλεπόμενη ταχύτητα του σκάφους σε διάφορες συνθήκες ανέμου.

Τα υπολογιστικά αυτά μοντέλα γνωστά και ως VPP (Velocity Prediction Program) στηρίζονται:

- α) Στη θεωρία η οποία αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.
- β) Σε πειραματικά δεδομένα από δοκιμές σε δεξαμενές (tank test).
- γ) Σε εμπειρικές σχέσεις.

Υπάρχουν δύο, βασικά διαφορετικές, μέθοδοι που μπορεί κανείς να υιοθετήσει προκειμένου να καταστρώσει το μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της ταχύτητας ενός ιστιοφόρου σκάφους σε ένα πρόγραμμα πρόβλεψης ταχύτητας (VPP).

Η πρώτη και συχνότερα εφαρμοζόμενη μέθοδος συνίσταται στο να προσδιορίζει τη δύναμη προώθησης καθώς και την πλάγια δύναμη οι οποίες αναπτύσσονται στα ιστία από τον άνεμο και στη συνέχεια να υπολογίζει σε ποιά ταχύτητα του σκάφους, γωνία εγκάρσιας κλίσης και γωνία απόκλισης, αυτές οι αεροδυναμικές δυνάμεις ισορροπούν τις υδροδυναμικές. Για να προσδιορισθούν οι τρεις τελευταίοι άγνωστοι χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες τρεις εξισώσεις:

- Ισορροπία δυνάμεων στο οριζόντιο επίπεδο στη διεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας του σκάφους.
- Ισορροπία δυνάμεων στο οριζόντιο επίπεδο στην κάθετη διεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας του σκάφους (κατά τη διεύθυνση της πλάγιας δύναμης).
- Ισορροπία των ροπών όλων των δυνάμεων κατά την κατακόρυφο, ως προς το εγκάρσιο επίπεδο (υπεισέρχεται η γωνία εγκάρσιας κλίσης).

Στη δεύτερη μέθοδο υποθέτοντας κάποια ταχύτητα του σκάφους και γωνία απόκλισης, υπολογίζεται κατευθείαν η υδροδυναμική πλάγια δύναμη και η αντίσταση. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του σκάφους και την υδροδυναμική δύναμη, ο υπολογισμός της αεροδυναμικής δύναμης για ισορροπία είναι σχετικά εύκολος. Αυτό στη συνέχεια επιτρέπει τον υπολογισμό της ταχύτητας του πραγματικού και φαινόμενου ανέμου καθώς και των αντιστοίχων γωνιών τους. Πραγματοποιώντας αυτούς τους υπολογισμούς για μια σειρά γωνιών απόκλισης από 0° έως π.χ. 12° έχουν καλυφθεί όλα τα σημεία πλεύσης από κατάπρυμα έως την οξεία

εγγυτάτη. Με μια μέθοδο παρεμβολής στη συνέχεια παίρνουμε την ταχύτητα του σκάφους, τη γωνία εγκάρσιας κλίσης τη γωνία απόκλισης κ.λ.π. για οποιαδήποτε τιμή ταχύτητας του πραγματικού ή φαινόμενου αέρα και των γωνιών τους.

Ο Oossanen υιοθέτησε αυτή τη δεύτερη μέθοδο για να αναπτύξει το VPP πρόγραμμά του. Όπως και ο ίδιος υποστηρίζει η μέθοδος αυτή εκτός του ότι έχει απλούστερη μαθηματική διαδικασία για την εύρεση των συνθηκών για αερο-υδροδυναμική ισορροπία, τοποθετεί τις υδροδυναμικές ιδιότητες της γάστρας και των παρελκομένων της σε πιο κεντρικό ρόλο από ότι η πρώτη μέθοδος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια πιο ευνοϊκή κατάσταση σε σχέση με τον τρόπο ανάπτυξης του μαθηματικού μοντέλου, καθόσον είναι πολύ περισσότερα γνωστά σε σχέση με την υδροδυναμική της γάστρας παρά από ότι είναι με τη αεροδυναμική των ιστίων και της εξαρτίας, δεδομένου ότι υπάρχει ένας μεγάλος πλούτος πληροφοριών από πειράματα σε δεξαμενές ενώ είναι λίγα γνωστά σε σχέση με τις δυνάμεις στα ιστία.

Στις επόμενες παραγράφους αναπτύσσονται οι βασικές σχέσεις τις οποίες χρησιμοποιεί τόσο το μοντέλο Oossanen όσο και το μοντέλο ORC VPP του Διεθνούς Οργανισμού Αγώνων Ανοιχτής Θαλάσσης (Offshore Racing Congress) με τα οποία και θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας.

5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΛΑΓΙΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

5.2.1 Γενική έκφραση της πλάγιας δύναμης επίπεδης επιφάνειας.

Η γενική έκφραση της πλάγιας δύναμης SF στο οριζόντιο επίπεδο η οποία χρησιμοποιείται για όλες τις επιφάνειες οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν τέτοια πλάγια δύναμη όπως καρίνες, πηδάλια, και πτερύγια, είναι η σχέση (3-1) στην οποία έχει προστεθεί και ένας όρος για την μη γραμμική εξάρτηση της πλάγιας δύναμης όπως περιγράφεται στη παράγραφο 4.5.2. Έτσι λοιπόν θα έχουμε:

$$SF = \frac{1}{2} \rho V_B^2 (c_{L\alpha(tip)} \cdot \frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \cdot \lambda \cos \phi \cdot L_{CB_fact} + c_{L\alpha 2} (\lambda \cos \phi)^2) A_L \cdot \cos \phi$$

(5-1)

Όπου:

ρ = Πυκνότητα του νερού.

V_B = Ταχύτητα του σκάφους.

$c_{L\alpha(tip)}$ = Συντελεστής εξαρτώμενος από το σχήμα του ακροπτερυγίου (tip).

$\partial C_L / \partial \alpha$ = Η κλίση του (γραμμικού) συντελεστή πλάγιας δύναμης σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης.

λ = Η γωνία απόκλισης σε ακτίνια ($\lambda \cos \phi$ είναι η ενεργός γωνία πρόσπτωσης).

ϕ = Η γωνία εγκάρσιας κλίσης.

L_{CB_fact} = Παράγων ο οποίος λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση της πλάγιας δύναμης μεταξύ γάστρας και παρελκομένου.

$c_{L\alpha 2}$ = Σταθερά στον ορισμό του συντελεστή μη γραμμικής πλάγιας δύναμης

A_L = Εμβαδόν της πλευρικής επιφάνειας.

Ο όρος ο οποίος εξαρτάται από το τετράγωνο της γωνίας πρόσπτωσης c_{La2} περιλαμβάνει τη μη γραμμική εξάρτηση του όρου της άνωσης και είναι σημαντικός για μικρές τιμές του ενεργού λόγου επιμήκους AR_e . Η σταθερά στον ορισμό του συντελεστή μη γραμμικής άνωσης c_{La2} (όπως ορίστηκε στη παράγραφο 4.5.2) εξαρτάται από τον ενεργό λόγο επιμήκους AR_e , το συντελεστή TR και από το σχήμα του ακροπτερυγίου του παρελκομένου (tip). Δίδεται δε από τη σχέση (5-2) όπως έδειξαν οι Whicker και Fehlner.

$$c_{La2} = \frac{c_{La2(tip)} \cdot TR + 0,1}{AR_e} \quad (5-2)$$

Όπου:

$c_{La2(tip)}$ = Συντελεστής εξαρτώμενος από το σχήμα του ακροπτερυγίου του παρελκόμενου (tip).

TR = Συντελεστής Taper Ratio του παρελκομένου οριζόμενος ως το πηλίκο του μήκους της χορδής στο ακροπτερύγιο (κάτω μέρος) προς εκείνο της βάσης (άνω μέρος).

AR_e = Ενεργός λόγος επιμήκους της επιφάνειας

5.2.2 Η επίδραση του σχήματος του παρελκομένου.

Για τετραγωνικά παρελκόμενα οι τιμές των $c_{La(tip)}$ και $c_{La2(tip)}$ προσδιορίζονται να είναι 1 και 1,6 αντίστοιχα ενώ για στρογγυλεμένα παρελκόμενα οι τιμές δίδονται από τις σχέσεις (5-3) και (5-4) βάσει των δεδομένων των Whicker και Fehlner.

$$c_{La(tip)} = 1 - \frac{0,135}{AR_e^{2/3}} \quad (\text{για } AR_e > 0,75) \quad (5-3)$$

και

$$c_{La2(tip)} = 0,70 \quad (5-4)$$

5.2.3 Η κλίση και η γραμμική καμπύλη πλάγιας δύναμης (lift).

Η κλίση του γραμμικού συντελεστή πλάγιας δύναμης ως προς την γωνία πρόσπτωσης σύμφωνα με τους Whicker και Fehlner δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = \frac{2\pi k_s \cdot AR_e}{2k_s + \cos \Lambda \cdot \sqrt{\frac{AR_e^2}{\cos \Lambda^4} + 4}} \quad (5-5)$$

Όπου:

k_s = Παράγων ο οποίος λαμβάνει υπόψη την επίδραση του ιξώδους στην κλίση της καμπύλης του διδιάστατου συντελεστή πλάγιας δύναμης.

Λ = Η γωνία που σχηματίζει η ευθεία του 25% της χορδής του παρελκομένου με την κατακόρυφο (sweep angle).

Σε περίπτωση κατά την οποία η γραμμή 25% της χορδής δεν είναι ευθεία τότε για Λ υπολογίζεται ο μέσος όρος κατά μήκος του παρελκομένου.

5.2.4 Επίδραση του ιξώδους στη κλίση της καμπύλης της πλάγιας δύναμης.

Η επίδραση του ιξώδους στη κλίση της διδιάστατης γραμμικής καμπύλης της πλάγιας δύναμης δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$k_s = 1 + 0,82(t/c) - \tan \tau_T \cdot \left(\frac{0,117}{t/c} + 3,2(t/c) + 3,9(t/c)^2 \right) \quad (5-6)$$

Όπου:

t/c = Ο λόγος (μέσο πάχος)/(μήκος χορδής), της επιφάνειας που δημιουργεί άνοση (lift).

τ_T = Το ένα δεύτερο της μέσης γωνίας εκφυγής του πτερυγίου

5.2.5 Η τιμή του ενεργού λόγου επιμήκους.

Ο ενεργός λόγος επιμήκους θεωρείται ως ο διπλάσιος του γεωμετρικού λόγου επιμήκους. Αυτή η τιμή χρησιμοποιείται όταν η επιφάνεια είναι επίπεδη κάθετη στο επίπεδο της επιφάνειας της πλάγιας δύναμης .
Δηλαδή

$$AR_e = \frac{2b}{c} \quad (5-7)$$

Όπου:

b = Το γεωμετρικό μήκος ή άνοιγμα (span) του παρελκομένου από το σημείο όπου η γραμμή 25% της χορδής τέμνει τη βάση.

c = Το μέσο μήκος της χορδής του παρελκομένου.

Εάν υπάρχει βολβός στο κάτω άκρο της καρίνας τότε το ενεργό γεωμετρικό άνοιγμα είναι:

$$b_{effK} = b_K + 0,2h_{bulb} \quad (5-8)$$

Όπου:

h_{bulb} = Το μέγιστο κατακόρυφο ύψος του βολβού υποθέτοντας ότι αυτό το μέγιστο ύψος βρίσκεται πολύ κοντά στη θέση όπου περνά η γραμμή 25% της χορδής.

5.2.6 Φαινόμενα αλληλεπίδρασης της επιφάνειας της γάστρας και της επιφάνειας του βολβού.

Ο παράγων γάστρας L_{CB_fact} λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι η γάστρα δεν είναι ένα οριζόντιο επίπεδο, καθώς επίσης και το γεγονός ότι όταν η γάστρα έχει σημαντική ανύψωση (deadrise) επάγεται από την καρίνα ένα ποσό πρόσθετης πλάγιας δύναμης. Διάφορες μελέτες αποκάλυψαν ότι η

επαγόμενη πλάγια δύναμη στη γάστρα είναι σημαντική σε ορισμένες περιπτώσεις και καμιά φορά τόσο μεγάλη όσο και στην ίδια την καρίνα.

Η επίδραση της γάστρας στην πλάγια δύναμη της καρίνας και η επίδραση της καρίνας στην πλάγια δύναμη που μπορεί να αναπτύξει η γάστρα προέκυψαν, ως κατωτέρω, σύμφωνα με τα αποτελέσματα πειραματικών ελέγχων σε πλήθος προτύπων.

Ορίζεται ένα ενεργό «βύθισμα» της γάστρας, σε σχέση με την περιοχή της γάστρας η οποία επηρεάζεται από τη ροή γύρω από το παρελκόμενο που παράγει πλάγια δύναμη, ως εξής:

$$T_{CBe1} = 0,53c \sin(\alpha_{CB}) \quad (5-9)$$

Όπου:

α_{CB} = Η ενεργός γωνία ανύψωσης γάστρας (deadrise).

Το ενεργό αυτό «βύθισμα» συγκρίνεται με το τοπικό «βύθισμα» της γάστρας διορθωμένο από το βάθος του κύματος σ' αυτή τη θέση. Μια προσεγγιστική έκφραση αυτού του δευτέρου «βυθίσματος» π.χ. στην καρίνα δίνεται από τη σχέση

$$T_{CBe2} = T_{CB_K} - 0,75F_n^4 \cdot L_{CB} \cdot \cos \frac{2\pi \cdot x_K}{L_{CB}} \quad (5-10)$$

Όπου:

T_{CBe2} = Το βύθισμα μέχρι του σημείου όπου η γραμμή του 25% της χορδής συναντά την επιφάνεια της γάστρας, για F_n και $\varphi = 0$.

F_n = Ο αριθμός Froude υπολογισμένος για την ταχύτητα του σκάφους και το μήκος ισάλου της γάστρας L_{cb} , με μέγιστη τιμή το 0,4

x_k = Η απόσταση μεταξύ του σημείου όπου η γραμμή του 25% της χορδής συναντά το άνω μέρος της καρίνας και του εμπροσθεν σημείου του τέλους της ισάλου.

Το ενεργό άνοιγμα (span) της επιφάνειας η οποία δημιουργεί την άνωση ορίζεται τότε ως το $b+T_{CBe}$ και ο λόγος του ενεργού ανοίγματος προς το γεωμετρικό είναι:

$$\gamma_{CB} = \frac{b + T_{CBe}}{b} \quad (5-11)$$

Έτσι ο παράγων ο οποίος καθορίζει την αύξηση της πλάγιας δύναμης δίνεται από τη σχέση:

$$L_{CB_fact} = \frac{0,3125}{F_n^2} + (1 + \gamma_{CB})^2 - 4 \quad (5-12)$$

Η σχέση αυτή ισχύει για αριθμούς Froude από 0,25 έως και 0,40.

Νεώτερες έρευνες απέδειξαν ότι παίζουν σπουδαίο ρόλο οι λόγοι μήκος/πλάτος (L_{CB}/B_{WL}) και πλάτος /βάθος (B_{WL}/T_{CB}) της γάστρας επηρεάζοντας σημαντικά την αλληλεπίδραση γάστρας-παρελκομένου. Οι αναλύσεις κατέληξαν στις παρακάτω σχέσεις (5-13) και (5-14) με τις οποίες θα πρέπει τελικά να πολλαπλασιαστεί ο παράγων L_{CB_fact} προκειμένου να ληφθεί υπόψη η διαφορετική γεωμετρία από εκείνη η οποία ισχύει για την εξαγωγή της σχέσης (5-12).

$$L_{CB_fact(geom)1} = F_n^2 \left(\frac{5,935}{(B_{WL}/T_{CB})^{1/4}} + 0,01357 \cdot \left(\frac{B_{WL}}{T_{CB}} \right) - \frac{11,02}{(B_{WL}/T_{CB})^2} \right) - 0,003517(L_{CB}/B_{WL})^2 + 0,6698(B_{WL}/T_{CB}) + (8,526 \times 10^{-8}) \cdot (L_{CB}/B_{WL})^2 \cdot (B_{WL}/T_{CB})^4 - 0,08376 \quad (5-13)$$

και

$$L_{CB_fact(geom)2} = 1,165 - 0,1063(L_{CB}/B_{WL})F_n + 2,639F_n \cdot \phi^2 + \\ + 0,0001885(B_{WL}/T_{CB})^4 F_n^2 \phi^3 - 6,0953F_n \cdot \phi^3 - 0,09891 \cdot (B_{WL}/T_{CB}) \cdot \phi$$

(5-14)

Έτσι η τελική έκφραση για τον παράγοντα L_{CB_fact} θα είναι

$$L_{CB_fact} = \left(\frac{0,3125}{F_n^2} + (1 + \gamma_{CB})^2 - 4 \right) \cdot L_{CB_fact(geom)1} \cdot L_{CB_fact(geom)2} \cdot L_{bulb_fact}$$

(5-15)

Όπου:

F_n = Ο αριθμός Froude υπολογισμένος για την ταχύτητα του σκάφους και το μήκος ισάλου της γάστρας L_{ab} , με ελάχιστη τιμή 0,25 και μέγιστη τιμή 0,4.

B_{WL} = Το μέγιστο πλάτος της γάστρας στην ίσαλο

T_{CB} = Το μέγιστο βύθισμα της γάστρας

ϕ = Η γωνία εγκάρσιας κλίσης

Η αλληλεπίδραση βολβού και παρελκομένου υπολογίζεται ευκολότερα δεδομένου ότι ο βολβός βρίσκεται σε αρκετό βάθος και η αλληλεπίδρασή του με την ελεύθερη επιφάνεια είναι αμελητέα. Έτσι προκύπτει η ακόλουθη προσεγγιστική σχέση:

$$L_{bulb_fact} = (1 + 0,4h_{bulb}/b)^2$$

(5-16)

5.2.7 Η πλάγια δύναμη της γάστρας και του βολβού.

Η πλάγια δύναμη η οποία αναπτύσσεται μόνο από τη γάστρα, χωρίς την επίδραση του παρελκομένου δεν μπορεί να εκτιμηθεί σωστά από την σχέση (5-1). Αυτό συμβαίνει γιατί η γάστρα η οποία θεωρείται σαν μια

επιφάνεια επί της οποίας δημιουργείται άνωση (lift) έχει ένα πάρα πολύ μικρό λόγο επιμήκους για τον οποίο η άνωση δεν μπορεί πλέον να θεωρηθεί ανάλογη της γωνίας πρόσπτωσης. Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων πειραμάτων σε δεξαμενή διαφόρων μοντέλων προέκυψε η παρακάτω σχέση.

$$SF_{CB} = \frac{1}{2} \rho V_B^2 \left(\frac{1}{2} \pi T_{CB}^2 + 1,8 A_{LCB} |\lambda \cos \phi - (\lambda \cos \phi)_0| \right) \cdot (\lambda \cos \phi - (\lambda \cos \phi)_0) \quad (5-17)$$

Όπου:

- T_{CB} = Το μέγιστο βύθισμα της γάστρας (χωρίς παρελκόμενα).
 A_{LCB} = Το εμβαδόν της πλευρικής βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας για μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης. (Δίνεται σαν γινόμενο του ανοίγματος επί τη μέση χορδή).

Στην περίπτωση όπου στο άκρο της καρίνας υπάρχει βολβός θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και να υπολογισθεί χωριστά η πλάγια δύναμη και η αντίστασή του. Η πλάγια δύναμη δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$SF_{CB} = \frac{1}{2} \rho V_B^2 \left(\frac{1}{2} \pi h_{bulb}^2 + 1,8 A_{bulb} |\lambda \cos \phi| \right) \cdot \lambda \cos \phi \quad (5-18)$$

5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η υδροδυναμική αντίσταση την οποία αναπτύσσει ένα ιστιοπλοϊκό σκάφος όταν κινείται, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, είναι

άθροισμα πολλών όρων. Κατωτέρω περιγράφεται ο υπολογισμός κάθε ενός εξ' αυτών σύμφωνα με την προσέγγιση Oossanen.

5.3.1 Υπολογισμός της επαγόμενης αντίστασης.

Ο υπολογισμός της επαγόμενης αντίστασης, για κάθε παρελκόμενο, γίνεται σύμφωνα με τα εκτεθέντα στην παράγραφο 4.5.1, εφαρμόζοντας τη σχέση (4-22). Δεδομένου ότι η ολική άνωση την οποία δημιουργεί κάθε παρελκόμενο είναι $L=SF/\cos\phi$ όπου SF η πλάγια δύναμη και ϕ η γωνία εγκάρσιας κλίσης, θα έχουμε για την επαγόμενη αντίσταση R_i εφαρμόζοντας τη σχέση (4-22).

$$R_i = \frac{(SF / \cos \phi)^2 (1 + \sigma)}{1/2 \cdot \rho V_B^2 \cdot A_L \cdot \pi A R_e} \quad (5-19)$$

Όπου:

SF = Πλάγια δύναμη για κάθε ένα από τα παρελκόμενα όπως αυτή υπολογίζεται από τις εξισώσεις οι οποίες δίδονται στη παράγραφο 5.2.

$1+\sigma$ = Παράγων ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη μορφή του σχήματος του παρελκομένου.

Η επίδραση της μορφής του σχήματος του παρελκομένου στην επαγόμενη αντίσταση εξαρτάται βασικά από το συντελεστή TR . Για μέσες τιμές του συντελεστή TR , καθώς επίσης και του λόγου επιμήκους, είναι κατάλληλη να χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$1 + \sigma = 1 + (0,012 - 0,057TR + 0,095TR^2 - 0,04TR^3) AR_E \quad (5-20)$$

Όπου

TR = Ο συντελεστής Taper Ratio οριζόμενος ως το πηλίκο του μήκους της χορδής στο άκρο του παρελκομένου προς αυτό της βάσης.

Για τη γάστρα χρειάζεται μια λίγο διαφορετική προσέγγιση καθόσον είναι δύσκολο να ορίσουμε κατάλληλες τιμές για τον συντελεστή TR και το λόγο επιμήκους. Έτσι λοιπόν είναι απαραίτητο να εισάγουμε κάποιες υποθέσεις στηριζόμενοι σε αποτελέσματα πειραμάτων σε δεξαμενή με διάφορα μοντέλα. Από αυτά προκύπτει ότι για διάφορους τύπους ιστοπλοϊκών σκαφών μπορούμε να υιοθετήσουμε τις παρακάτω σχέσεις για το λόγο επιμήκους και τον συντελεστή TR μιας γάστρας.

$$AR_{CB} = 2T_{CB} / 0,75L_{CB} \quad (5-21\alpha)$$

Και

$$TR_{CB} = 0,3 \quad (5-21\beta)$$

Κατόπιν των ανωτέρω μπορούμε να εφαρμόσουμε τη γενική σχέση (4-22) η οποία για αυτή τη περίπτωση γράφεται

$$R_{iCB} = \frac{(SF_{CB} / \cos \phi)^2 (1 + \sigma_{CB})}{1/2 \cdot \rho V_B^2 \cdot A_{LCB} \cdot \pi AR_{CB}} \quad (5-22)$$

5.3.2 Υπολογισμός της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας (*viscous resistance*).

Η αντίσταση λόγω συνεκτικότητας για τα παρελκόμενα όπως την καρίνα το πηδάλιο αλλά και το βολβό προσδιορίζεται σύμφωνα με τα εκτεθέντα στη παράγραφο 4.1 και δίνεται από τη σχέση (5-23) η οποία είναι συνδυασμός των σχέσεων (4-1) και (4-2).

$$R_{VK} = \frac{1}{2} \rho V_B^2 C_{FK} (1 + k_K) S_K \quad (5-23)$$

Όπου

C_{FK} = Συντελεστής αντίστασης τριβής της καρίνας

$1+k$ = Συντελεστής μορφής που λαμβάνει υπόψη την πρόσθετη αντίσταση της καρίνας επί πλέον από αυτή της επίπεδης πλάκας.

S = Βρεχόμενη επιφάνεια της καρίνας.

Για το συντελεστή C_{FK} της καρίνας, πηδαλίου χρησιμοποιείται ο τύπος

$$C_{FK} = \frac{0.075}{(\text{Log}(R_{NK}) - 2)^2} - \frac{1800}{R_{NK}} \quad (5-24)$$

Ενώ για τον βολβό ο τύπος κατά ITTC-57:

$$C_{FB} = \frac{0.075}{(\text{Log}(R_{NB}) - 2)^2} \quad (5.25)$$

Όπου:

R_{NK}, R_{NB} = Οι αριθμοί Reynolds οι οποίοι ορίζονται με βάση το μέσο μήκος χορδής του παρελκομένου.

Ο συντελεστής μορφής $1+k$ για τη καρίνα και το πηδάλιο εξαρτάται από τον τρόπο κατανομής του πάχους και το λόγο t/c . Για σχήματα τομών όπου η θέση του μεγίστου πάχους βρίσκεται αρκετά πίσω (όπως στις αεροτομές NACA 63, 64, 65 και 66) στις οποίες ανήκει και ο τύπος της καρίνας του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της δεξιαμενής της παρούσας εργασίας εφαρμόζεται η ακόλουθη σχέση:

$$1+k = 1 + 1,2(t/c) + 70t/c)^4 \quad .. \quad (5-25\alpha)$$

Η αντίσταση λόγω συνεκτικότητας για τη γάστρα βρίσκεται από ανάλογο τύπο (5-26) με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστός ο συντελεστής μορφής

της γάστρας $1+k_{CB}$. Ο συντελεστής γάστρας προσδιορίζεται πειραματικά με τα διαγράμματα Prohaska για τιμές της αντίστασης σε όρθια θέση με μηδενική απόκλιση και σε πολύ χαμηλές ταχύτητες όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2.

$$R_{VCB} = \frac{1}{2} \rho V_B^2 C_{FCB} (1 + k_{CB}) S_{CB} \quad (5-26)$$

Όπου:

C_{FCB} = Συντελεστής αντίστασης τριβής της γάστρας

$1+k_{CB}$ = Συντελεστής μορφής που λαμβάνει υπόψη την πρόσθετη αντίσταση της γάστρας επί πλέον από αυτή της επίπεδης πλάκας.

S_{CB} = Βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας.

Για τον συντελεστή αντίστασης τριβής της γάστρας χρησιμοποιείται η σχέση (5-25) χρησιμοποιώντας όμως για τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds R_{NCB} , το μήκος της γάστρας L_{CB} .

5.3.3 Υπολογισμός της αντίστασης κύματος.

Η αντίσταση κύματος ενός σκάφους (για μηδενική πλάγια δύναμη, δηλ. γωνία απόκλισης $\lambda=0$ και εγκάρσιας κλίσης $\varphi=0$) ορίζεται ως η ολική μετρούμενη αντίσταση σε ήρεμο νερό μείον την αντίσταση συνεκτικότητας της γάστρας και των παρελκόμενων του σκάφους. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο υπολογισμός της αντίστασης συνεκτικότητας της γάστρας απαιτεί την γνώση της τιμής του συντελεστή μορφής. Εάν η τιμή του συντελεστή μορφής δεν μπορεί να προσδιορισθεί με ακρίβεια για την γάστρα, τότε γίνεται χρήση της αντίστασης τριβής της γάστρας και των παρελκόμενων και προσδιορίζεται η ονομαζόμενη **υπόλοιπη αντίσταση (residual resistance)**. Αγνοείται δηλαδή η αντίσταση λόγω

κατανομής της, πίεσης συνεκτικής υφής, καθώς και η επί πλέον αντίσταση η οφειλόμενη στο γεγονός ότι η τιμή του συντελεστή C_F της ισοδύναμης πλάκας δεν είναι ίση με εκείνη της γάστρας ή των παρελκομένων.

Ο υπολογισμός της αντίστασης κύματος γίνεται λοιπόν με βάση την υπόλοιπη αντίσταση. Ο καθηγητής Gerritsma και οι συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Delft (Delft University of Technology) σε μια συστηματική σειρά πειραμάτων πάνω σε 39 συνολικά μοντέλα ιστιοπλοϊκών σκαφών τα οποία πραγματοποίησαν στην πειραματική δεξαμενή του εκεί Εργαστηρίου Υδροδυναμικής, αναλύοντας τα πειραματικά δεδομένα προσδιόρισαν μια σειρά πολυωνύμων μέσω των οποίων μπορεί να γίνει αυτός ο υπολογισμός της υπόλοιπης αντίστασης. Κατέληξαν σε δύο σειρές πολυωνύμων μία για χαμηλές ταχύτητες η οποία εφαρμόζεται για αριθμούς Froude από 0,125 μέχρι 0,450, και μία δεύτερη για τα ελαφριά σκάφη (light displacement boat) η οποία εφαρμόζεται για αριθμούς Froude από 0,475 μέχρι 0,750.

Στα πολυώνυμα χαμηλής ταχύτητας, τα οποία και μας ενδιαφέρουν, η υπόλοιπη αντίσταση R_R , εκφράζεται σαν ποσοστό του βάρους του εκτοπίσματος της γάστρας ($1000R_R/\Delta_{CB}$) και σαν συνάρτηση του πρισματικού συντελεστή C_P , της διαμήκουσ θέσης του κέντρου πλευστότητας LCB (LCB σε % του L_{WL} πίσω από το μέσο του σκάφους), του λόγου του πλάτους της ισάλου επιφάνειας προς το βάθος της γάστρας B_{WL}/T_{CB} , και το λόγο μήκους - εκτοπίσματος $L_{CB}/\nabla_{CB}^{1/3}$. Τα πολυώνυμα αυτά δίδονται από τη ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1000R_R}{\Delta_{CB}} = a_0 + a_1 \cdot C_P + a_2 LCB + a_3 \frac{B_{WL}}{T_{CB}} + a_4 \frac{L_{CB}}{\nabla_{CB}^{1/3}} + a_5 \cdot C_P^2 +$$

$$a_6 \cdot C_P \frac{L_{CB}}{\nabla_{CB}^{1/3}} + a_7 \cdot LCB^2 + a_8 \left(\frac{L_{CB}}{\nabla_{CB}^{1/3}} \right)^2 + a_9 \left(\frac{L_{CB}}{\nabla_{CB}^{1/3}} \right)^3$$

(5-27)

Οι συντελεστές a_0 έως a_9 δίδονται στο πίνακα 5-1 για αριθμούς Froude από 0.125 έως 0.450 με βήματα των 0.025.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1

Συντελεστές των όρων της σειράς πολυωνύμων του DUT για την υπόλοιπη αντίσταση για την περιοχή ταχυτήτων από $F_n = 0,125$ έως $F_n = 0,450$.

F_N	a_0 a_5	a_1 a_6	a_2 a_7	a_3 a_8	a_4 a_9
0.125	-6.7356 -38.861	38.368 0.95659	-0.008193 -0.002171	0.055234 0.27290	-1.9972 -0.017516
0.150	-0.38287 -39.550	38.173 1.2196	0.007243 0.000052	0.026644 0.82457	-5.2953 -0.047842
0.175	-1.5035 -31.914	24.408 2.2161	0.012200 0.000074	0.067221 0.24435	-2.4486 -0.015887
0.200	11.292 -11.418	-14.519 5.6541	0.047182 0.007021	0.085176 -0.094934	-2.67302 0.006325
0.225	22.179 7.1671	-49.168 8.6003	0.086000 0.012981	0.15073 -0.32709	-2.87868 0.018271
0.250	25.909 24.121	-74.757 10.485	0.15352 0.025348	0.18857 -0.85494	-0.88947 0.048449
0.275	40.976 53.016	-114.29 13.022	0.20723 0.035934	0.25083 -0.71546	-3.0727 0.039874
0.300	45.838 132.26	-184.76 10.861	0.35703 0.066809	0.33834 -1.7192	3.8717 0.095977
0.325	89.204 331.12	-393.01 8.5981	0.61747 0.10407	0.46047 -2.8152	11.543 0.15596
0.350	212.68 667.64	-801.79 12.398	1.0873 0.16647	0.53894 -3.0261	10.803 0.16506
0.375	336.24 831.14	-1085.1 26.183	1.6442 0.23880	0.53270 -2.4505	-1.2242 0.13915
0.400	566.55 1154.1	-1609.6 51.462	2.0161 0.28805	0.26572 -0.17835	-29.244 0.018446
0.425	743.41 937.40	-1708.3 115.60	2.4358 0.36507	0.013553 1.8390	-81.162 -0.062023
0.450	1200.6 1489.3	-2751.7 196.34	3.2086 0.52823	0.25492 1.3791	-132.04 0.013577

5.3.4 Υπολογισμός της αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης.

Ένας από τους δυσκολότερους όρους της αντίστασης για να προβλεφθούν είναι η αντίσταση η οποία οφείλεται στην εγκάρσια κλίση. Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει προκειμένου να αξιολογήσουν αυτό τον όρο της αντίστασης. Υπάρχουν ἄθροισμα διαθέσιμες τέτοιες αναλύσεις που βασίζονται σε πειράματα όπως εκείνη του Oossanen ή του Gerritsma οι

οποίες διαφέρουν μεταξύ τους και εκτίθενται παρακάτω, και μια πιο πρόσφατη και πιο ενδεδειγμένη των J. A. Keuning and M. Katgert που βασίζεται και σε πειράματα σε μοντέρνα αγωνιστικά σκάφη.

Η αντίσταση λόγω εγκάρσιας κλίσης εξαρτάται από το σχήμα της κεκλιμένης γάστρας, οι ίσαλοι γίνονται ασύμμετρες και ένας αριθμός από παραμέτρους του σκάφους αλλάζουν:

- **Η βρεχόμενη επιφάνεια**, η αντίσταση συνεκτικότητας είναι ανάλογη της βρεχόμενης επιφάνειας και η αλλαγή με την κλίση μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική ιδιαίτερα για μικρές μοίρες κλίσης.
- **Το μήκος της ισάλου**
- **Ο παράγων μορφής k (form factor)**

Οι τελευταίοι δύο παράγοντες μεταβάλουν την αντίσταση κύματος. Πειράματα σε μοντέλα αποκάλυψαν ότι μερικά σκάφη έχουν σχεδόν αμελητέα αύξηση της αντίστασης με την αύξηση της γωνίας της εγκάρσιας κλίσης, ενώ άλλα δείχνουν μια αξιοσημείωτη αύξηση. Μοντέρνα σκάφη παρουσιάζουν μείωση της αντίστασης με την εγκάρσια κλίση για γωνίες μέχρι 20 μοίρες.

5.3.4.1 Αντίσταση εγκάρσιας κλίσης κατά Oossanen.

Ο Oossanen από μελέτη και ανάλυση πειραματικών δεδομένων τα οποία είχε στη διάθεσή του κατέληξε στην εξής σχέση για την αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης:

$$R_{\phi} = \frac{1}{2} \rho V_B^2 \cdot S_{CB} \cdot \phi \cdot \left(0,000891 F_N \cdot \frac{B_{WL}}{T_{CB}} + 0,004267 \phi^2 \cdot \frac{B_{WL}}{T_{CB}} - 0,003142 \right) \quad (5-28)$$

Όπου η γωνία ϕ είναι σε ακτίνια.

5.3.4.2 Αντίσταση εγκάρσιας κλίσης κατά Gerritsma.

Ο Gerritsma και οι συνεργάτες του κάνοντας ανάλυση των αποτελεσμάτων της συστηματικής σειράς του Πανεπιστημίου του Delft κατέληξαν στην ακόλουθη σχέση:

$$R_{\phi} = \frac{1}{2} \rho V_B^2 \cdot S_{CB} \cdot \phi \cdot F_N^2 \left(0,006747 \frac{T_{CB}}{T_{\max}} + 0,002517 \frac{B_{WL}}{T_{CB}} + 0,003710 \frac{B_{WL}}{T_{CB}} \cdot \frac{T_{CB}}{T_{\max}} \right) \quad (5-29)$$

5.3.4.3 Διόρθωση της Υπόλοιπης Αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης κατά J. A. Keuning and M. Katgert.

Η υπόλοιπη αντίσταση όπως αυτή υπολογίζεται με τα πολυώνυμα του Delft αντιστοιχεί σε μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης. Έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες για τον υπολογισμό της επίδρασης της κλίσης του σκάφους στην υπόλοιπη αντίσταση, η πιο πρόσφατη η οποία στηρίζεται στα αποτελέσματα της συστηματικής σειράς του Delft και ανακεφαλαιώνει και τις προηγούμενες αλλά και συμπληρώνεται με τα αποτελέσματα από μοντέρνα αγωνιστικά σκάφη είναι η εργασία των J. A. Keuning και M. Katgert, 2010. Στην εργασία αυτή καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η μεταβολή της υπόλοιπης αντίστασης κατά την εγκάρσια κλίση εξαρτάται ισχυρά από την αντίστοιχη μεταβολή του μήκους της ισάλου καθώς επίσης και από την μεταβολή του συντελεστή μέσης τομής Cm και το λόγο B/T . Έτσι για τη μεταβολή της υπόλοιπης αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης γωνίας ϕ , ΔRr_{ϕ} δίνουν την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1000 \Delta Rr_{\phi}}{\rho g \nabla} = b_0 + b_1 \cdot \Delta \frac{B_{WL}}{T_{CB}} + b_2 \cdot \Delta Cm + b_3 \cdot \frac{L_{WL\phi}}{L_{WL}} \quad (5-30)$$

Όπου:

$$\Delta \frac{B_{WL}}{T_{CB}} = \frac{B_{WL\phi}}{T_{CB\phi}} - \frac{B_{WL}}{T_{CB}} \quad \text{και} \quad \Delta Cm = Cm\phi - Cm$$

Όπου:

ΔRr_ϕ = Η μεταβολή της υπόλοιπης αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης ϕ .

Cm = Ο συντελεστής μέσης τομής.

$Cm\phi$ = Ο συντελεστής μέσης τομής υπό κλίση γωνίας ϕ .

B_{WL} = Το πλάτος της επιφανείας ισάλου για κλίση $\phi=0$.

$B_{WL\phi}$ = Το πλάτος της επιφανείας ισάλου υπό κλίση γωνίας ϕ .

T_{CB} = Το βάθος της γάστρας για κλίση $\phi=0$.

$T_{CB\phi}$ = Το βάθος της γάστρας υπό κλίση γωνίας ϕ .

Οι συντελεστές b_0 , b_1 , b_2 , και b_3 δίνονται στον Πίνακα 5-2 σαν συνάρτηση του αριθμού Froude.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2

F_n	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
b_0	-1,850	-1,032	2,061	10,881	26,984	48,633	73,015
b_1	-0,032	0,000	-0,024	-0,163	-0,494	-1,062	-1,795
b_2	1,037	0,731	0,451	-0,431	-2,208	-4,344	-6,432
b_3	1,781	0,996	-2,046	-10,773	-26,780	-48,397	-72,799

5.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΤΑ ORC_ VPP 2012⁽⁹⁾

Η μέθοδος υπολογισμού σύμφωνα με το πρόγραμμα VPP του ORC 2012 διαιρεί τις υδροδυναμικές αντιστάσεις σε δύο πηγές : Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας ή επιφανειακής τριβής (viscous or skin friction drag) λόγω της ροής του νερού επί της βρεχόμενης επιφάνειας του σκάφους και

- Υπόλοιπη αντίσταση ή αντίσταση λόγω κύματος (residuary or wave making drag) προκύπτουσα από τη δημιουργία επιφανειακών κυμάτων καθώς κινείται το σκάφος.

Αυτό δεν καταργεί την κλασσική ανάλυση της αντίστασης που ακολουθεί και ο Oossanen σε Viscous, Residual, Resistance due to heel, και Induced, απλά υπολογίζει απ' ευθείας την viscous αντίσταση και την residual resistance στην κεκλιμένη κατάσταση, ενώ εντάσσει την induced drag στην υπόλοιπη αντίσταση.

5.4.1 Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας (*Viscous Resistance*).

5.4.1.1 Γάστρα (*Canoe body*)

Ο υπολογισμός της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας της γάστρας γίνεται σύμφωνα με τη σχέση (5-31), η οποία είναι παρόμοια της (5-23)

$$R_{vc} = q \times C_{fc} \times WSA_c(\phi) \quad (5-$$

31)

Όπου:

$$C_{fc} = \frac{0,075}{(\log(Rn) - 2)^2}$$

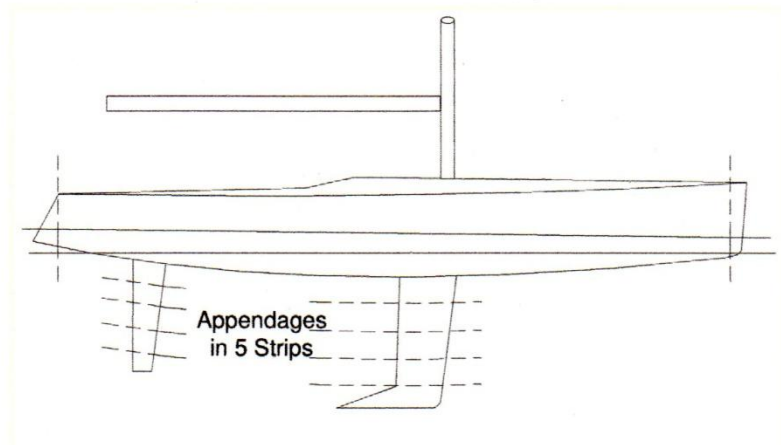
C_{fc} = Ο συντελεστής τριβής κατά ITTC-1957, ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται θέτοντας 0,7LSM1.

$WSA_C(\varphi)$ = Το εμβαδόν της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας σε γωνία φ σε ήρεμο νερό.

q = Ο «δυναμικός όρος» = $1/2 \rho V^2$.

5.4.1.2 Παρελκόμενα (Appendages)

Στη περίπτωση των παρελκομένων, κάθε ένα από αυτά χωρίζεται σε πέντε τμήματα όπως φαίνεται στο σχήμα 5-1. Για κάθε τμήμα υπολογίζεται χωριστά ο συντελεστής αντίστασης τριβής θεωρώντας τον «δικό» του τοπικό αριθμό Reynolds και λόγο t/c (πάχος/χορδή). Στη συνέχεια υπολογίζεται η αντίσταση λόγω συνεκτικότητας για το αντίστοιχο τμήμα σαν το γινόμενο του «δυναμικού όρου», της επιφάνειας κάθε τμήματος, και ενός κατάλληλου συντελεστή τριβής. Η ολική αντίσταση του παρελκομένου προκύπτει σαν άθροισμα των αντιστάσεων των τμημάτων.



Σχ. 5-1. Διαχωρισμός παρελκομένων σε 5 τμήματα

Η ολική αντίσταση λόγω συνεκτικότητας είναι το άθροισμα των αντιστάσεων της γάστρας και των παρελκομένων

$$R_{Vtotal} = R_{VCB} + R_{VA} \quad (5-32)$$

5.4.2 Αντίσταση λόγω δημιουργίας κύματος (*Residuary Resistance*)

Ο υπολογισμός της υπόλοιπης αντίστασης, ή αντίστασης λόγω δημιουργίας κύματος, στηρίζεται στα αποτελέσματα πειραμάτων τα οποία έγιναν στο Delft University of Technology σε πάνω από πενήντα μοντέλα ιστιοπλοϊκών σκαφών, καθώς και στα αποτελέσματα πειραμάτων τα οποία έγιναν στη μονάδα Wolfson σε πέντε IOR maxi μοντέλα. Η γάστρα έχει την κύρια συνεισφορά στην υπόλοιπη αντίσταση με μια μικρή συνεισφορά των παρελκομένων

5.4.2.1 Γάστρα (*Canoe body*)

Η υπόλοιπη αντίσταση σαν συνάρτηση της ταχύτητας προσδιορίζεται για μια περιοχή αριθμών Froude από 0,125 έως 0,9 σε βήματα των 0,025 χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5-33)

$$\frac{1000Rr}{\Delta} = \alpha_0 + \alpha_1 Cp + \alpha_2 \frac{B}{T} + \alpha_3 L_{VR} + \alpha_4 \frac{A_{WP}}{\nabla^{2/3}} + \alpha_5 \frac{L_{CB}}{L_{VR}} + \alpha_6 \frac{L_{CB}^2}{L_{VR}} + \alpha_7 L_{VR}^2 + SBF \quad (5-33)$$

$$\text{Όπου } L_{VR} = \frac{L}{\nabla^{1/3}}$$

Με προσαρμογή (fitting) των πειραματικών δεδομένων των αποτελεσμάτων της δεξαμενής στην παραπάνω εξίσωση, προσδιορίζονται οι συντελεστές α_0 έως α_7 με τη μέθοδο της ανάλυσης ελαχίστων τετραγώνων. Οι συντελεστές αυτοί δίδονται στην σελίδα 68.

SBF

Ιστορικά το πρόγραμμα VPP του ORC επέβαλλε ποινή στα ελαφριά σκάφη δηλ. αυτά που έχουν μεγάλο LVR (λόγο μήκους/όγκο^{1/3}) σε σχέση με τον κυρίως στόλο. Μια πιο δίκαιη αντιμετώπιση στην πρόβλεψη της ταχύτητας έχει εισαχθεί (2008) που τροποποιεί τους

συντελεστές υπόλοιπης αντίστασης στη περιοχή των αριθμών Froude από 0.225-0,375, ενώ ο όρος είναι μηδέν εκτός της περιοχής αυτής.

$$SBF = 2,5 \times SBF_Const \times \left(1 - \frac{5,5}{LVR}\right) \quad (5-34)$$

Fn	0,2	0,225	0,250	0,275	0,300	0,325	0,350	0,375	0,4
SBF_Const	0,0	0,100	0,300	0,650	1,000	1,350	1,500	1,100	0,0

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3

Συντελεστές α_0 έως α_7 της εξίσωσης (5-33).

10 Appendix B: RR Coefficients

Fn	0.125	0.150	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	0.425	0.450
Constant	1.9601	1.9673	1.4537	1.0724	1.1950	0.7886	-1.5413	-4.6139	-6.6772	-7.2105	0.8640	24.493	60.517	107.036
Cp	-3.7100	-3.0335	-1.3922	0.0186	1.0381	3.8750	10.5299	18.2764	24.4120	30.3437	25.1851	-0.2272	-31.100	-54.4307
B/T	-0.1622	-0.1044	-0.0752	-0.0809	-0.1866	-0.2648	-0.1291	-0.4683	-1.3867	-0.8502	0.7523	2.5649	4.6065	6.8301
L/VOL^{1/3}	-0.0961	-0.1690	-0.2622	-0.3965	-0.6929	-1.0170	-1.1446	-1.5104	-2.4288	-2.3700	-0.8100	1.1400	2.0500	0.0700
W/VOL^{2/3}	0.2600	0.1869	0.1636	0.2106	0.4504	0.6243	0.4693	1.0462	2.6343	2.2111	-0.3019	-3.2406	-6.5443	-10.0000
LCB/(L/VOL^{1/3})	0.2331	0.1654	0.0576	0.0133	-0.1167	-0.5327	-1.1869	-1.8767	-1.9370	-3.9500	-6.7100	-10.747	-14.750	-18.1525
LCB²/(L/VOL^{1/3})	-0.0431	-0.0310	-0.0025	0.0135	0.0413	0.1425	0.3206	0.5535	0.7049	0.9561	1.3000	1.8300	2.4400	2.9500
(L/VOL^{1/3})²	-0.0057	0.0033	0.0118	0.0209	0.0317	0.0472	0.0595	0.0575	0.0514	0.0400	-0.0082	-0.1170	-0.2053	-0.1530

Fn	0.475	0.500	0.525	0.550	0.575	0.600	0.650	0.700	0.750	0.800	0.850	0.900
Constant	185.358	278.777	376.177	455.785	504.000	534.000	578.925	617.300	649.000	677.700	705.000	734.0000
Cp	-69.851	-80.000	-85.200	-86.900	-87.290	-87.400	-87.400	-87.400	-87.400	-87.400	-87.4000	-87.4000
B/T	7.950	8.260	8.240	8.030	7.717	7.450	7.243	7.420	8.000	8.870	9.8800	11.0000
L/VOL^{1/3}	-13.140	-33.175	-56.600	-76.300	-88.300	-95.700	-107.10	-117.08	-125.5	-133.320	-140.00	-145.90
W/VOL^{2/3}	-11.500	-11.530	-10.619	-9.290	-8.240	-7.400	-6.000	-4.900	-4.000	-3.300	-2.8100	-2.4800
LCB/(L/VOL^{1/3})	-21.300	-24.100	-26.850	-29.400	-31.700	-33.800	-37.500	-40.500	-42.800	-44.500	-45.7500	-46.7000
LCB²/(L/VOL^{1/3})	3.460	3.900	4.330	4.740	5.120	5.490	6.170	6.800	7.330	7.773	8.1000	8.3500
(L/VOL^{1/3})²	0.588	1.784	3.208	4.370	5.090	5.530	6.210	6.780	7.250	7.679	1.784	4.370

Αनुψωμένη Πρύμνη (Transom Overhang)

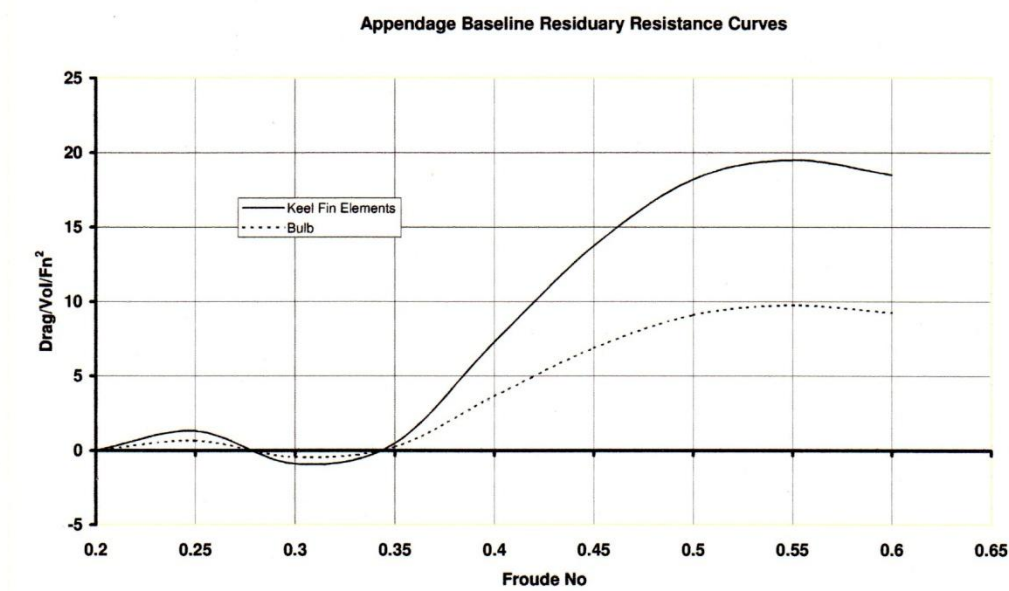
Στο VPP γίνεται επίσης μια πρόσθετη διόρθωση στους συντελεστές της υπόλοιπης αντίστασης για σκάφη τα οποία έχουν διαφορετικό μήκος ανυψωμένης πρύμνης από εκείνα της σειράς Delft SYSSER. Γίνεται δηλαδή μια διόρθωση στο F_n ανάλογα με την κλίση μεταβολής της ισάλου στην πρύμνη καθώς μέρος της πρύμνης βυθίζεται στο νερό όταν το σκάφος αρχίζει να κινείται.

5.4.2.2 Παρελκόμενα (Appendages)

Η υπόλοιπη αντίσταση των παρελκομένων υπολογίζεται με βάση ένα αλγόριθμο ο οποίος είναι ευαίσθητος και στον όγκο και στο βύθισμα της καρίνας. Ο υπολογισμός της Residual Resistance για καρίνα και βολβό βασίζεται στο σχήμα 5-2 όπου δίνεται η υπόλοιπη αντίσταση ανά μονάδα όγκου κανονικοποιημένη ως προς F_n^2 . Όπως περιγράφηκε ανωτέρω το VPP χωρίζει την καρίνα σε πέντε τμήματα. Υπολογίζεται ο όγκος και το βύθισμα κάθε τμήματος (λωρίδας) και από το σχήμα 5-2 προσδιορίζεται η υπόλοιπη αντίστασή του. Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την αντίσταση ενός τμήματος είναι:

1. Ο όγκος του
2. Το βύθισμά του από την ελεύθερη επιφάνεια
3. Την ταχύτητα του σκάφους
4. Αν είναι τμήμα του βολβού ή της καρίνας

Η ελάττωση της αντίστασης με το βύθισμα είναι γραμμική. Η αντίσταση ενός τμήματος βολβού είναι περίπου ίση το μισό του αντίστοιχου τμήματος καρίνας .



Σχ. 5-2. Υπόλοιπη αντίσταση παρελκομένων ανά μονάδα όγκου σε σταθερό βύθισμα

5.4.3 Αντίσταση οφειλόμενη στην εγκάρσια κλίση.

Η αντίσταση λόγω εγκάρσιας κλίσης οφείλεται στους εξής λόγους:

1. Τροποποίηση της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας λόγω μεταβολής της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας με την εγκάρσια κλίση, επιπλέον δε και αλλαγή της πίεσης καθώς με την κλίση αλλάζει επίσης και το σχήμα της γάστρας ως προς τη ροή του νερού.
2. Τροποποίηση της υπόλοιπης αντίστασης οφειλόμενη στη μεταβολή του μήκους της ισάλου της γάστρας.
3. Μεταβολή της υπόλοιπης αντίστασης της γάστρας λόγω της ασυμμετρίας της βρεχόμενης επιφάνειας η οποία προκύπτει με την κλίση.

Όπως και στην αρχή αναφέρθηκε στο πρόγραμμα VPP η αντίσταση διαιρείται σε αντίσταση συνεκτικότητας και υπόλοιπη αντίσταση. Έτσι η αντίσταση λόγω εγκάρσιας κλίσης υπολογίζεται απ' ευθείας για κάθε κεκλιμένη κατάσταση σαν αντίσταση συνεκτικότητας και residual

5.4.3.1 Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας

Η μεταβολή της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας με την κλίση αντανακλά τη μεταβολή της βρεχόμενης επιφάνειας στην κεκλιμένη κατάσταση.

5.4.3.2 Υπόλοιπη Αντίσταση ή Αντίσταση λόγω δημιουργίας κύματος (*Residuary Resistance*).

Η μεταβολή της υπόλοιπης αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης προσδιορίζεται σαν συνάρτηση παραμέτρων της γάστρας (Μήκος, πλάτος/βάθος, κλπ.) σε κάθε γωνία κλίσης. Επίσης συγκρίνεται η υπόλοιπη αντίσταση σε σχέση με αυτήν στην όρθια θέση. Προσδιορίζεται έτσι ένας πολλαπλασιαστής διόρθωσης (*Heeled Residuary Resistance Multiplier*)

5.4.3.3 Επαγόμενη αντίσταση (*Induced Drag*).

Το πρόγραμμα ORC VPP 2012 δεν υπολογίζει την πλάγια δύναμη υδροδυναμικά, υπολογίζει όμως τη δύναμη εγκάρσιας κλίσης από αεροδυναμικούς συντελεστές των ιστίων. Χρησιμοποιώντας τώρα τη σχέση (5-35) υπολογίζεται το induced drag

$$Drag_{INDUCED} = \frac{F_H^2}{\rho V^2 MHS D^2} \quad (5-35)$$

Όπου:

F_H = Η δύναμη εγκάρσιας κλίσης.

$MHS D$ = Το μέγιστο ενεργό βύθισμα.

Αν το σκάφος έπλεε σε ομογενές ρευστό η προηγούμενη σχέση θα ήταν αρκετή, στην πράξη όμως τόσο η ταχύτητα όσο και η κλίση επηρεάζει το ενεργό βύθισμα. Όσο το σκάφος κινείται ταχύτερα ή έχει εγκάρσια

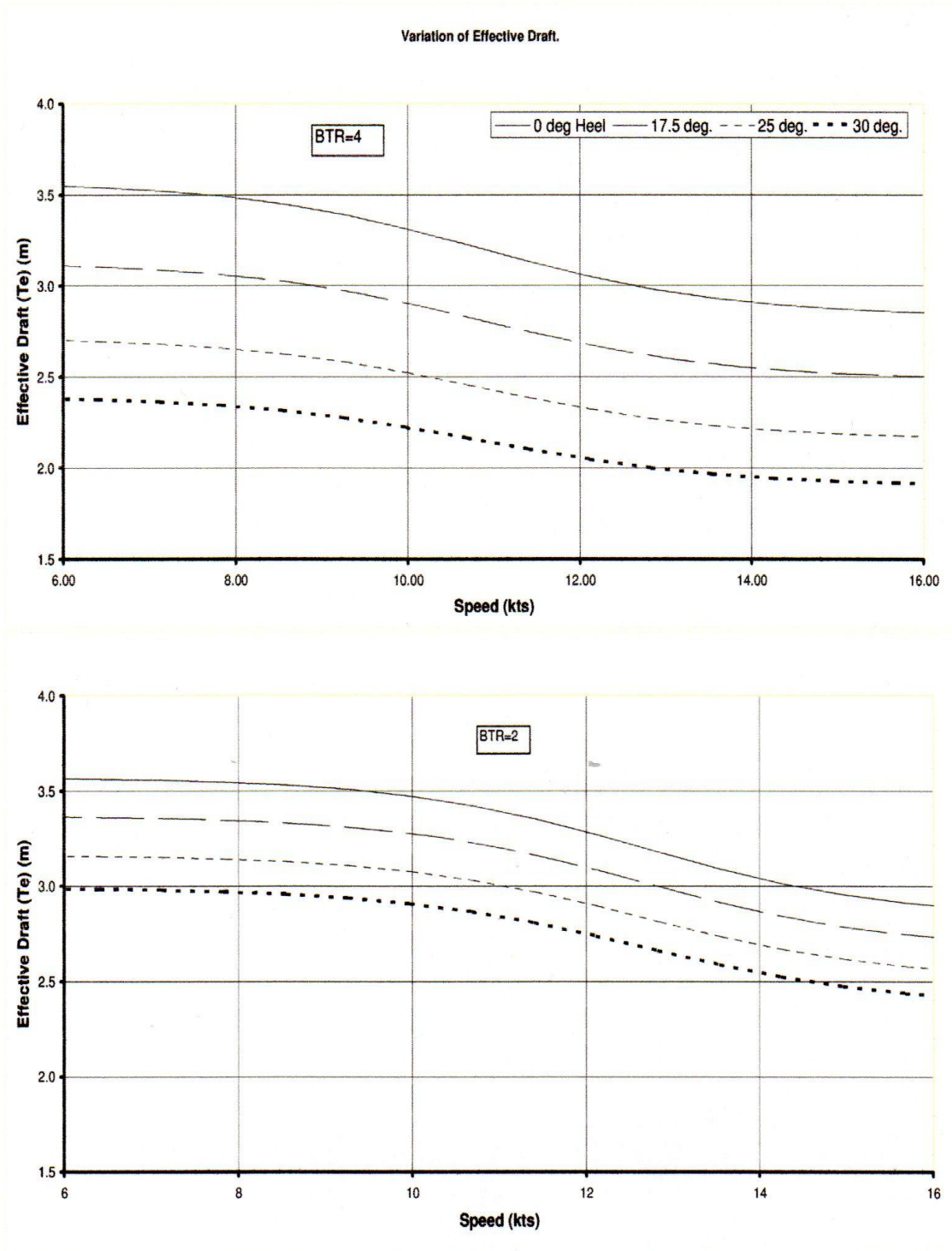
κλίση, η κατανομή πιέσεων κοντά στην καρίνα και το τιμόνι αλλάζει καθώς πλησιάζουν στην ελεύθερη επιφάνεια και η αντίσταση κυματισμού αυξάνει. Έτσι εισάγεται μια διόρθωση του ενεργού βυθίσματος σε σχέση με τον συντελεστή BTR του σκάφους (συνάρτηση $fn(\phi V_s)$ όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3).

Επίσης εισάγεται διόρθωση του ενεργού βυθίσματος που εξαρτάται από την ικανότητα του σκάφους να παράγει μεγάλη πλάγια δύναμη λόγω του μεγάλου βυθίσματος, στην αλλαγή πορείας (tack) στις πλεύσεις όρτσα. Έτσι η τελική σχέση η οποία εφαρμόζεται είναι η ακόλουθη.

$$D_I = \frac{F_H^2 / \pi \rho V^2 M H S D^2}{FUNSTEADY^2 \times [fn(\phi V_s)]^2} \quad (5-36)$$

Όπου:

$$FUNSTEADY = 0,95 + (T_R/L - 0,19)$$



Σχ. 5-3. Μεταβολή του ενεργού βυθίσματος με την ταχύτητα και τη γωνία εγκάρσιας κλίσης

6. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκάφος του οποίου μελετήθηκε η συμπεριφορά στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε από τους Mortain & Manrikios στη Γαλλία σύμφωνα με τους κανονισμούς που διέπουν τους αγώνες BOC Challenge. Είναι σκάφος εκτοπίσματος, μήκους 50 ποδών, μονόγαστρο, με εξαρτισμό τύπου Ketch. Η προτεινόμενη επιφάνεια ιστιοφορίας είναι 130 m².

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του σκάφους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-1.

Κύρια χαρακτηριστικά σκάφους τύπου BOC- 50

Ολικό μήκος (L_{OA})	15.24 m
Μήκος ισάλου (L_{WL})	14.87 m
Μέγιστο πλάτος (B)	3.50 m
Πλάτος ισάλου (B_{WL})	2.66 m
Κοίλο (D)	1.837 m
Βύθισμα γάστρας (T_{CB})	0.415 m
Μέγιστο βύθισμα (T)	4.065 m
Πρισματικός συντελεστής (C_p)	0.587
Εκτόπισμα γυμνής γάστρας (Δ_{CB})	7.175 mt
Εκτόπισμα παρελκομένων	0.569 mt

Όσο αναφορά τα παρελκόμενα το BOC- 50 διαθέτει δύο όμοια πηδάλια και μια καρίνα που έχει προσκολλημένο βολβό στο κάτω άκρο της. Καθένα από τα πηδάλια είναι υδροτομή τύπου NACA 0015, ενώ η θέση τοποθέτησης τους είναι εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας με κλίση 20° ως προς την κατακόρυφο στο εγκάρσιο επίπεδο. Η καρίνα είναι και αυτή υδροτομή τύπου NACA 64A015. Ο βολβός είναι ελλειψοειδούς μορφής κατά το εγκάρσιο, με την μικρή ακτίνα στην κατακόρυφο. Το προφίλ του κατά το διάμηκες επίπεδο είναι υδροτομή τύπου NACA 65A018, ενώ κατά το οριζόντιο επίπεδο NACA 65A021.

Ακολουθεί μία σύντομη αναφορά στους αγώνες αυτούς, κύρια ιδιαιτερότητα των οποίων είναι το πλήρωμα του σκάφους να αποτελείται από ένα μόνο άτομο.

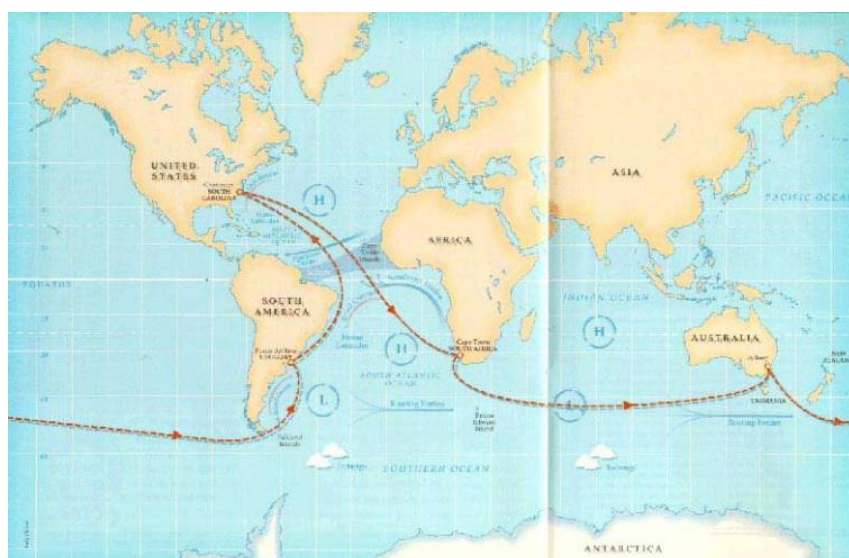
6.1.1 Boc Challenge Race – Σύντομο ιστορικό

Ήταν το έτος 1979 όταν ο μοναχικός ιστιοπλόος David White ονειρεύτηκε έναν ιστιοπλοϊκό αγώνα ο οποίος επρόκειτο να γίνει γνωστός σε όλη την υφήλιο και να αναδείξει μερικούς από τους καλλίτερους ιστιοπλόους του κόσμου. Ο White είχε κατασκευάσει ένα αγωνιστικό σκάφος αλλά δεν το είχε τελειώσει εγκαίρως για να συμμετάσχει στον αγώνα OSTAR (Original Singlehanded Transatlantic Race) του έτους 1980. Επειδή όμως πάντοτε έψαχνε για μια μεγαλύτερη, δυσκολότερη και μεγαλύτερης διάρκειας περιπέτεια, πρότεινε σε άλλους ιστιοπλόους την ιδέα-πρόκληση ενός αγώνα για μοναχικούς ιστιοπλόους κάνοντας τον γύρο του κόσμου. Τρία χρόνια αργότερα, το φθινόπωρο του 1982, 17 άνδρες άνοιξαν πανιά από το Goat Island, Newport, Rhode Island για να εγκαινιάσουν τον αγώνα BOC

όπως ονομάστηκε από το όνομα του χορηγού την εταιρία British Oxygen Corporation.

Ο αγώνας χωρίστηκε σε τέσσερες ιστιοδρομίες με σταθμούς στο Cape Town, Sydney και Rio de Janeiro πριν τερματίσει πάλι στο Newport. Κατά την διάρκεια του αγώνα ιστιοπλοϊκά ρεκόρ ταχύτητας συνετρίβησαν, απίστευτα κατορθώματα αντοχής έγιναν γνωστά και η προσοχή όλου του κόσμου στράφηκε προς τους αγώνες των ωκεανών.

Αποτελεί μια μοναδική πρόκληση για κάθε αθλητή καθώς ο αγώνας αυτός αποτελεί τη μεγαλύτερη σε μήκος ατομική κούρσα όπου οι αθλητές καλούνται να διανύσουν απόσταση 2700 ναυτικών μιλίων.



Εικόνα 6.1: Τυπικό παράδειγμα διαδρομής αγώνα τύπου Around Alone

Υπάρχουν δύο κατηγορίες σκαφών:

- CLASS 1 Περιλαμβάνει σκάφη μήκους 50-60 ποδών
- CLASS 2 Περιλαμβάνει σκάφη μήκους 40-50 πόδων

Λόγω του γεγονότος ότι το πλήρωμα του σκάφους αποτελεί μόνο ένα άτομο προκύπτουν ορισμένα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τα

σκάφη του αγώνα αυτού από τα συνήθη. Επιτρέπεται η χρήση αυτόματου πιλότου, ηλεκτρικών αντλιών και υδραυλικών βιτσιρέλων. Το τριμάρισμα των πανιών, καθώς και όλες οι βασικές λειτουργίες θα πρέπει να γίνονται και από τις δύο πλευρές του cockpit. Επιπλέον, η χρήση μηχανής εσωτερικής καύσεως επιτρέπεται για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος ενώ επιτρέπεται η χρήση μη μόνιμου έρματος είτε με θαλασσινό νερό είτε με γλυκό, η πυκνότητα του οποίου δεν είναι μεγαλύτερη από αυτή της θάλασσας.

Οι αυστηρότατοι κανονισμοί ασφαλείας επηρεάζουν οπωσδήποτε τη σχεδίαση του σκάφους. Για παράδειγμα επιβάλλεται από τους κανονισμούς ότι το σκάφος θα δύναται να περιορίσει την εγκάρσια κλίση του στις 20 μοίρες σε κάθε πιθανή κατάσταση πλεύσης αλλά και η ύπαρξη τεσσάρων στεγανών διαμερισμάτων.

6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η κατασκευή του προτύπου έγινε στο ξυλουργείο του εργαστηρίου σε κλίμακα 1:4 με ολικό μήκος 3,888 μέτρα. Η κλίμακα αυτή θεωρείται ικανοποιητική για την ακρίβεια των δοκιμών ώστε αφενός μεν να μην εμφανίζονται φαινόμενα διαφορετικής ροής από ότι στο πραγματικό σκάφος, αφετέρου δε να μην μεγαλώνουν τα σφάλματα, δεδομένου ότι για την αναγωγή των αποτελεσμάτων σε πραγματική κλίμακα θα πρέπει αυτά να πολλαπλασιαστούν με τον αντίστροφο λόγο της κλίμακας εις την τρίτη δύναμη. Έτσι ένα σφάλμα στη πλάγια δύναμη πχ. 0,1 Kp στο πρότυπο 1:10, θα γίνει $0,1 \cdot 10^3 = 100$ Kp στο πραγματικό, ενώ για ένα πρότυπο 1:4 μόλις $0,1 \cdot 4^3 = 6,4$ Kp. Το υλικό κατασκευής όλου του προτύπου είναι από ξύλο ώστε να εξασφαλισθεί η ακριβής αναπαράσταση της μορφής του σκάφους και η ευκολία κατασκευής, με

εξαίρεση του άξονες των δύο πηδαλίων, και της ακμής στο πίσω μέρος του βολβού, τα οποία είναι μεταλλικά για λόγους αντοχής. Ο τρόπος σύνδεσης της καρίνας με τη γάστρα επιτρέπει τον σχετικά εύκολο αποχωρισμό της από αυτή.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου το οποίο μελετήθηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-2. Τα κύρια χαρακτηριστικά του προτύπου.

Ολικό μήκος (Length Over All)	L_{OA}	3,888 m
Μήκος ισάλου (Length of Water Line)	L_{WL}	3,815 m
Πλάτος (Beam)	B	0,875 m
Πλάτος ισάλου (Beam at Water Line)	B_{WL}	0,6616 m
Βύθισμα (Draft)	T	1.012 m
Βύθισμα γάστρας (Draft of the Hull or Canoe Body)	T_{CB}	0,104 m
Εκτόπισμα γάστρας	Δ_{CB}	100.6 kg
Βρεχόμενη Επιφάν. γάστρας (Wetted Surface Canoe Body)	S_{CB}	1,831 m ²
Πλευρική Επιφάν. γάστρας (Lateral Surface Canoe Body)	A_{LCB}	0,3967m ²
Καρίνα άνοιγμα (Span)	b_K	0,80 m
(Sweep angle)	Λ	15.4°
Χορδή βάσης	C_1	0,29 m
Χορδή άκρου	C_2	0,14 m
Μέσος λόγος πάχους/μήκους χορδής	t/c	0,18
0,5x(Μέση γωνία εκφυγής)	τ_T	10,71deg
Ύψος βολβού	h_{bulb}	0,108 m
Επιφάνεια βολβού	A_{bulb}	0,0565m ²

Ενώ στο Σχ. 6-1 παρουσιάζεται μια φωτογραφία του μοντέλου από πλάγια όψη, όπως αυτό βρίσκεται τοποθετημένο στη βάση του.



Σχ. 6-1. Φωτογραφία του προτύπου από πλάγια όψη, όπως βρίσκεται τοποθετημένο στη βάση του.

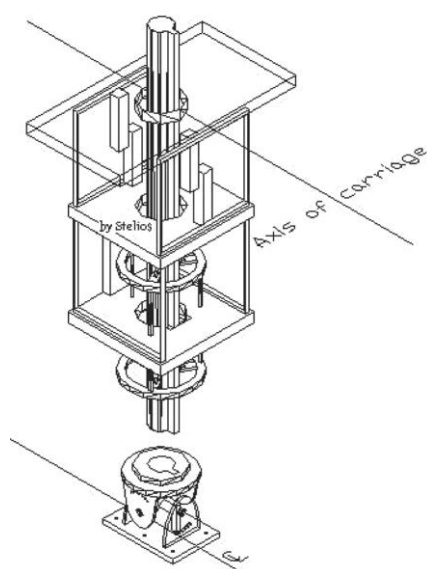
6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η πειραματική διάταξη με την οποία έγιναν οι μετρήσεις στο ΕΝΘΥ είναι αυτή κατά Davidson. Το μοντέλο δένεται από σημείο πάνω στο LCG με γωνία απόκλισης λ , γωνία εγκάρσιας κλίσης φ και ρυμουλκείται με ταχύτητα V αφήνοντας ελεύθερη την κίνηση κατά την κατακόρυφο (heave).

Με αυτή τη διάταξη μετρούνται και καταγράφονται για κάθε ταχύτητα τα παρακάτω μεγέθη:

- *Η Αντίσταση (Drag) κατά την κατεύθυνση της ροής (σε δύο σημεία αριστερά, δεξιά του σημείου στήριξης με απόσταση 240 mm)*
- *Η Πλάγια δύναμη SF κάθετα στην διεύθυνση της ροής (σε δύο κατά μήκος σημεία με απόσταση 381 mm εκατέρωθεν του σημείου στήριξης του μοντέλου)*
- *Δυναμική κατακόρυφη ανύψωση του Κ.Β. του προτύπου (heave)*
- *Δυναμική γωνία διαγωγής (trim)*
- *Γωνία εγκάρσιας κλίσης(heel)*
- *Ροπή γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (Yaw Moment)*
- *Ροπή γύρω από τον διαμήκη άξονα (Roll Moment)*

Στο σχήμα 6-2 φαίνεται το δυναμόμετρο που χρησιμοποιείται στο ΕΝΘΥ για τις μετρήσεις μοντέλων ιστιοπλοϊκών σκαφών. Αποτελείται από δύο τμήματα το καθένα από τα οποία μετράει διαφορετικά μεγέθη.



Σχ. 6-2 Το δυναμόμετρο

Το πρώτο, είναι το κυρίως σώμα του, το οποίο τοποθετείται πάνω στο φορείο της δεξαμενής και στο οποίο έχουν τοποθετηθεί οι αισθητήρες αντίστασης ,πλάγιας δύναμης και ανύψωσης του κέντρου βάρους (heave).

Το δεύτερο κομμάτι του δυναμομέτρου, η βάση του, συνδέεται σταθερά με το μοντέλο. Η βάση είναι κατασκευασμένη με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να δώσει στο μοντέλο τις απαιτούμενες για τις δοκιμές γωνίες εγκάρσιας κλίσης και απόκλισης και σε αυτή είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες για τη δυναμική διαγωγή (trim), τη γωνία εγκάρσιας κλίσης (heel) και τη ροπή εγκάρσιας κλίσης (roll moment).

Η βάση του δυναμομέτρου προσδένεται σταθερά πάνω στο ποδάρι του δυναμομέτρου, που μεταφέρει την κίνηση από το μοντέλο στο



Σχ. 6-3 Το σώμα του δυναμομέτρου και το ποδάρι του

δυναμόμετρο. Το ποδάρι έχει την δυνατότητα να κινείται ελεύθερα κατά την κατακόρυφο με τη βοήθεια οδηγών και μετράει τη βύθιση-ανύψωση του Κ.Β. του μοντέλου (heave) . Στο προηγούμενο σχήμα 6-3 φαίνεται το ποδάρι του δυναμομέτρου και το κυρίως σώμα του.

Το κυρίως σώμα του δυναμομέτρου δένεται πάνω στο φορείο με την βοήθεια ειδικά κατασκευασμένης πλάκας. Η πλάκα έχει κατασκευαστεί σαν βαριά και άκαμπτη κατασκευή προκειμένου να συνεισφέρει στην αποφυγή παραμορφώσεων στο σώμα του δυναμομέτρου αλλά και στην διατήρηση της θέσης του παράλληλα με την επιφάνεια του νερού. Στο σχήμα 6.4 που ακολουθεί διακρίνεται η άκαμπτη πλάκα που τοποθετείται σε ειδικές ράγες πάνω στο φορείο της δεξαμενής και το ποδάρι του δυναμομέτρου.



Σχ. 6-4 Το πόδι του δυναμόμετρο και η άκαμπτη πλάκα στήριξης του κυρίως σώματος του δυναμομέτρου πάνω στο φορείο.

Η αρχή λειτουργίας της μέτρησης αντίστασης, και της πλάγιας δύναμης βασίζεται στην μέτρηση της παραμόρφωσης τεσσάρων πλαισίων τοποθετημένων στο κύριο σώμα του δυναμόμετρου (σχήμα 6-2) δύο κάθετα στην ροή (SF) και δύο παράλληλα με αυτή (Drag).

Όλα τα παραπάνω συνδέονται με τις κατάλληλες ηλεκτρονικές διατάξεις. Με τη βοήθεια αυτών λαμβάνονται τα σήματα των μετρητικών οργάνων σαν αναλογικά σήματα τάσης, ή απολαβής (mV/V) και στη συνέχεια ψηφιοποιούνται και καταγράφονται στον υπολογιστή μέσω της συσκευής Spider 8. Στον υπολογιστή καταγράφεται μέσω της μονάδας Spider 8 και η ταχύτητα του φορείου με την μορφή μέτρησης συχνότητας.

6.3.1 Τοποθέτηση δυναμομέτρου

Η τοποθέτηση του δυναμομέτρου στο φορείο είναι μια διαδικασία η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο για την ομαλή και αξιόπιστη έκβαση της πειραματικής διαδικασίας. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την τοποθέτηση λόγω του υψηλού κόστους κτήσης του δυναμομέτρου αλλά και σχολαστικότητα και ακρίβεια προκειμένου να οδηγηθούμε σε σωστές μετρήσεις.

Τα κύρια στοιχεία τα οποία πρέπει να λάβουμε υπ' όψη μας για μία ορθή τοποθέτηση του δυναμομέτρου είναι τα εξής:

α) Το δυναμόμετρο να είναι παράλληλο με την κίνηση του φορείου.

Για το σκοπό αυτό το κυρίως μέρος του δυναμόμετρου με την άκαμπτη πλάκα, τοποθετείται σε ράγες του φορείου, τις οποίες θεωρούμε παράλληλες με την κίνησή του.

β) Το δυναμόμετρο να είναι κάθετο στο επίπεδο του νερού, δηλαδή η πλάκα να είναι παράλληλη με το προαναφερθέν επίπεδο.

Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό αλφάδι προς κάθε κατεύθυνση πάνω στην πλάκα κατά την τοποθέτηση του δυναμόμετρου.

Στην συνέχεια πρέπει να βρεθεί το μέσο από τις δύο ράγες, όπου εδράζεται η πλάκα. Η ευθεία από το μέσο του ποδαριού προς το σημείο αυτό θεωρούμε ότι είναι παράλληλη με την κίνηση του φορείου. Στο σημείο αυτό τοποθετούμε το μέσο μεταλλικού χάρακα. Η διεύθυνση του χάρακα είναι κάθετη στην κίνηση του φορείου. Πάνω σε αυτό τον χάρακα θα μετριέται η πλευρική απόκλιση.



Σχ. 6-5 Τοποθέτηση μεταλλικού χάρακα και εύρεση μέσου, για την μέτρηση της πλευρικής απόκλισης

Στην συνέχεια μετριέται η απόσταση από το κέντρο του ποδαριού στο χάρακα. Η απόσταση αυτή θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της γωνίας πλευρικής απόκλισης.

6.3.2 Προετοιμασία του μοντέλου

Το πρότυπο κατασκευάστηκε στο ξυλουργείο του εργαστηρίου σε κλίμακα 1:4, με ολικό μήκος 3.888m. Η κλίμακα καταρχήν κρίνεται ικανοποιητική αν πρόκειται να αναχθούν τα αποτελέσματα σε φυσική κλίμακα αλλά πρέπει να προσεχθούν τα όρια λειτουργίας του δυναμόμετρου. Στην προκειμένη περίπτωση οι τιμές της πλάγιας δύναμης για ταχύτητες $v \geq 2$ m/sec και γωνίες πλευρικής απόκλισης $\lambda \geq 7^\circ$ ξεπερνούν τα όρια γραμμικής περιοχής του δυναμόμετρου στην μέτρηση της πλάγιας δύναμης.

Πριν την τοποθέτηση του μοντέλου μέσα στη δεξαμενή πρέπει πρώτα να τοποθετηθεί η βάση του δυναμόμετρου μέσα στο μοντέλο οριζόντια, παράλληλα με το κατάστρωμα και ευθυγραμμισμένη με τον διαμήκη άξονα του σκάφους.

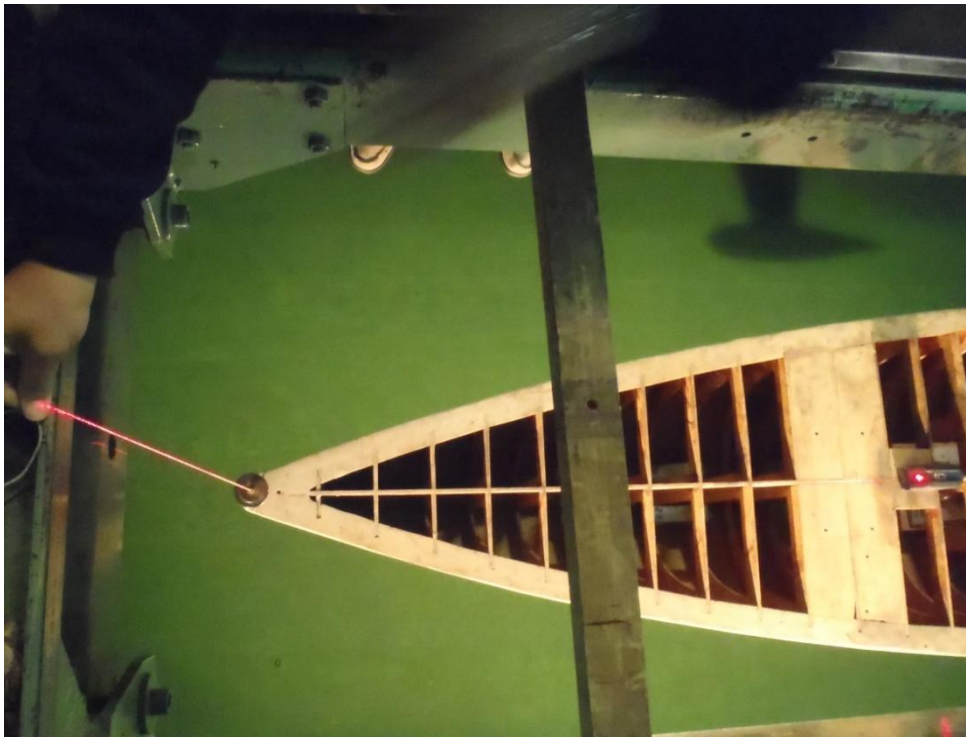
Πρέπει επίσης να χαραχθούν οι γραμμές των Freeboards πλώρα και πρίμα στα 355 mm από τη Base Line (γραμμή καταστρώματος), στην ειδική οριζόντια τράπεζα του εργαστηρίου.

Επίσης πρέπει να τοποθετηθούν οι διεγέρτες τύρβης. Οι διεγέρτες υπολογίζονται με το πρόγραμμα TWIRE του εργαστηρίου και για την συγκεκριμένη κατάσταση που μετρήθηκε, είχε τοποθετηθεί λεπτό σύρμα (trip wire) στη γάστρα και το βολβό, ενώ η καρίνα δεν είχε διεγέρτη τύρβης.

Αμέσως μετά ακολούθησε το ζύγισμα του μοντέλου στην ζυγαριά ακριβείας του εργαστηρίου. Έγινε η απαραίτητη προσθήκη βαρών στο μοντέλο προκειμένου να έχουμε το επιθυμητό ύψος εξάλων. Ιδιαίτερη

προσοχή χρειάζεται στο γεγονός ότι η προσθήκη των βαρών γίνεται με το ποδάρι του δυναμόμετρου τοποθετημένο, έτσι ώστε το μοντέλο να πλέει μαζί με αυτό στην τελική του θέση, στο επιθυμητό ύψος εξάλων.

Πλώρα από το ποδάρι του δυναμόμετρου πάνω στο κατάστρωμα του μοντέλου τοποθετείται συσκευή laser. Η δέσμη της φωτίζει τον διαμήκη άξονα του μοντέλου. Το μοντέλο ευθυγραμμίζεται σε μηδέν γωνία πλευρικής απόκλισης όταν η κατακόρυφος από το μέσο του χάρακα περνά από την κεντρική γραμμή του σκάφους. Ευθυγράμμιση του laser, οριζόντια ώστε η δέσμη του να φωτίζει το μέσο του χάρακα. αλλά και την κατακόρυφο.



Σχ. 6-6 Ευθυγράμμιση του μοντέλου σε μηδέν γωνία πλευρικής απόκλισης και οριζόντια τοποθέτηση του laser.

6.4 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ

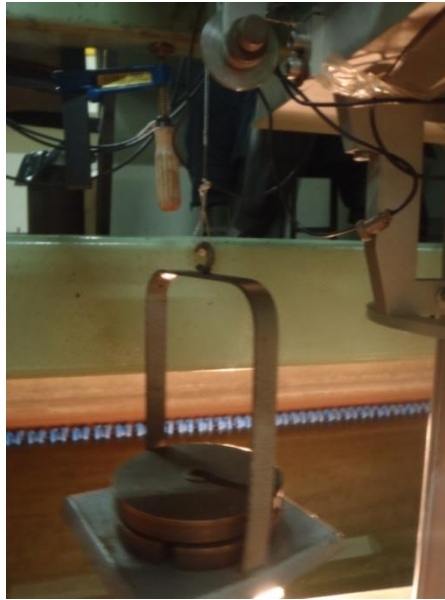
Η βαθμονόμηση (calibration) των οργάνων είναι μία πάρα πολύ σημαντική διαδικασία, και λάμβανε χώρα καθημερινά ακριβώς πριν την εκκίνηση της πειραματικής διαδικασίας και αφού είχε ήδη διενεργηθεί ένας τυπικός έλεγχος συνδεσμολογίας και λειτουργίας των οργάνων. Η καθημερινή βαθμονόμηση των οργάνων γίνεται προκειμένου να διαπιστωθεί η αξιοπιστία στην λειτουργία των αισθητήρων και η καλή λειτουργία των οργάνων. Ουσιαστικά πρόκειται για μία λεπτομερή βαθμονόμηση του δυναμομέτρου, την εύρεση δηλαδή των συναρτήσεων μεταφοράς που μετατρέπουν τις μονάδες της τάσης (Volts) ή απολαβής (mV/V) , που καταγράφει ο υπολογιστής, σε τυποποιημένες γνωστές τιμές προτύπων μεγεθών που δοκιμάζονται.

Στο δυναμόμετρο το οποίο χρησιμοποιήθηκε η βαθμονόμηση αφορούσε το Drag R-L, Side Force R-L, Heave, Heel, Trim. Ορισμένες από τις βαθμονομήσεις γίνονται στο κυρίως σώμα του δυναμομέτρου και άλλες στη βάση αυτού όπως αναλύεται στη συνέχεια.

6.4.1 Βαθμονομήσεις στο κυρίως σώμα του δυναμομέτρου.

Βαθμονόμηση Drag R-L .

Από ειδικό σημείο του δυναμομέτρου στο πρυμίο τμήμα του, αναρτώνται πρότυπα βάρη σε λεπτό συρματόσχοινο, (σχήμα 6.7) το οποίο με την βοήθεια ράουλου μεταφέρει την δύναμη στο σώμα του δυναμομέτρου ενώ ο υπολογιστής καταγράφει την τιμή σε mVolt/Volt.

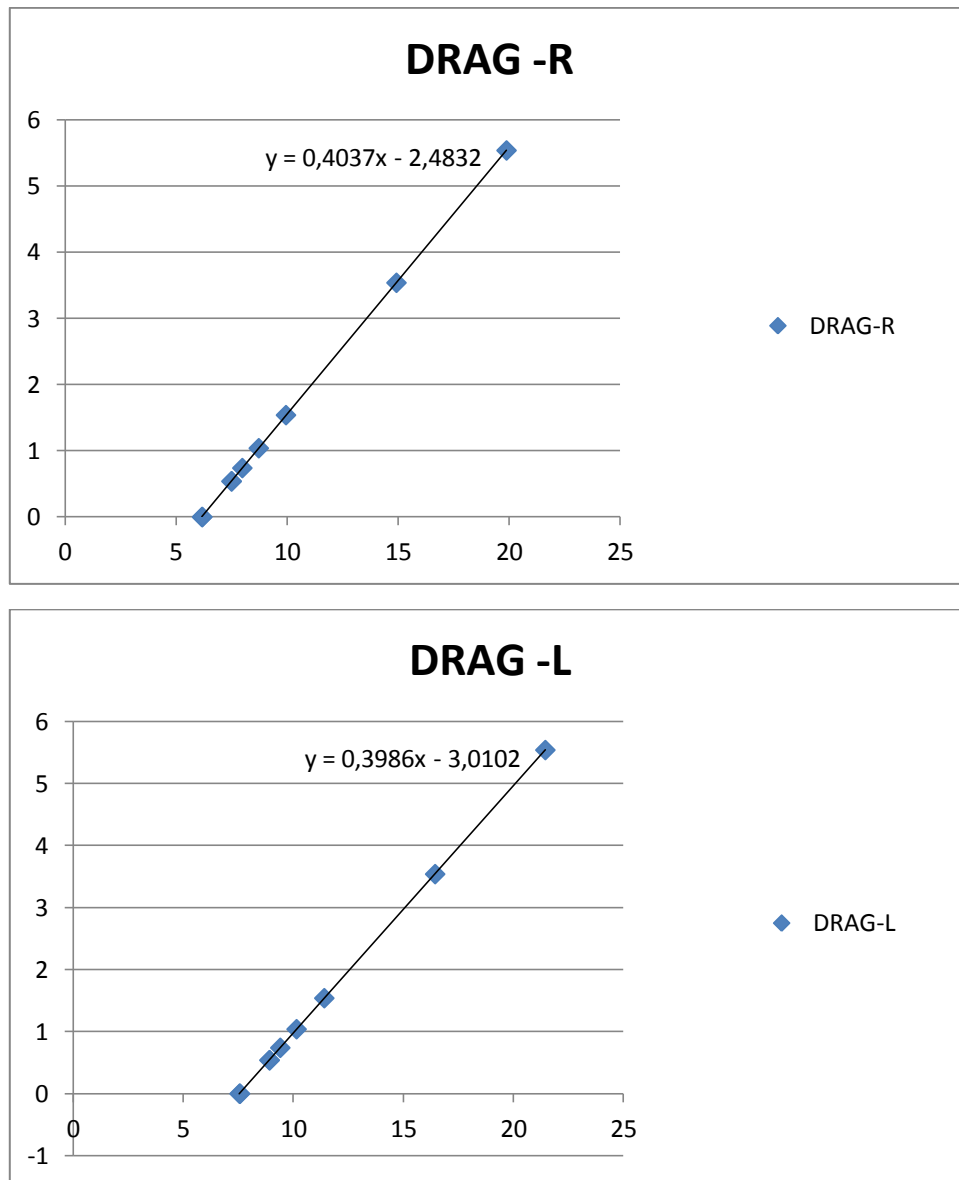


Σχ. 6-7 Βαθμονόμηση Drag R-L

Τα βάρη που κρεμάστηκαν με τις τιμές για την βαθμονόμηση του Drag R-L ήταν:

Drag R		Drag L	
Kg	mV/V	Kg	mV/V
0	6,16	0	7,55
0,54	7,49	0,54	8,91
1,04	8,715	1,04	10,14
1,54	3,54	1,54	11,40
3,54	14,92	3,54	16,44
5,54	19,88	5,54	21,45
0,74	7,975	0,74	9,4
0,54	7,49	0,54	8,92
0	6,17	0	7,57

Ενώ μια τυπική συνάρτηση μεταφοράς φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχ. 6-8 Τυπική συνάρτηση μεταφοράς για το Drag R-L

Βαθμονόμηση Side Force :

Από ειδικό σημείο του δυναμόμετρου στο πλευρικό τμήμα του, αναρτώνται πρότυπα βάρη σε λεπτό συρματόσχοινο, (σχήμα 6.9) το οποίο με την βοήθεια ράουλου μεταφέρει την δύναμη στο σώμα του δυναμόμετρου ενώ ο υπολογιστής καταγράφει την τιμή σε mV/V.

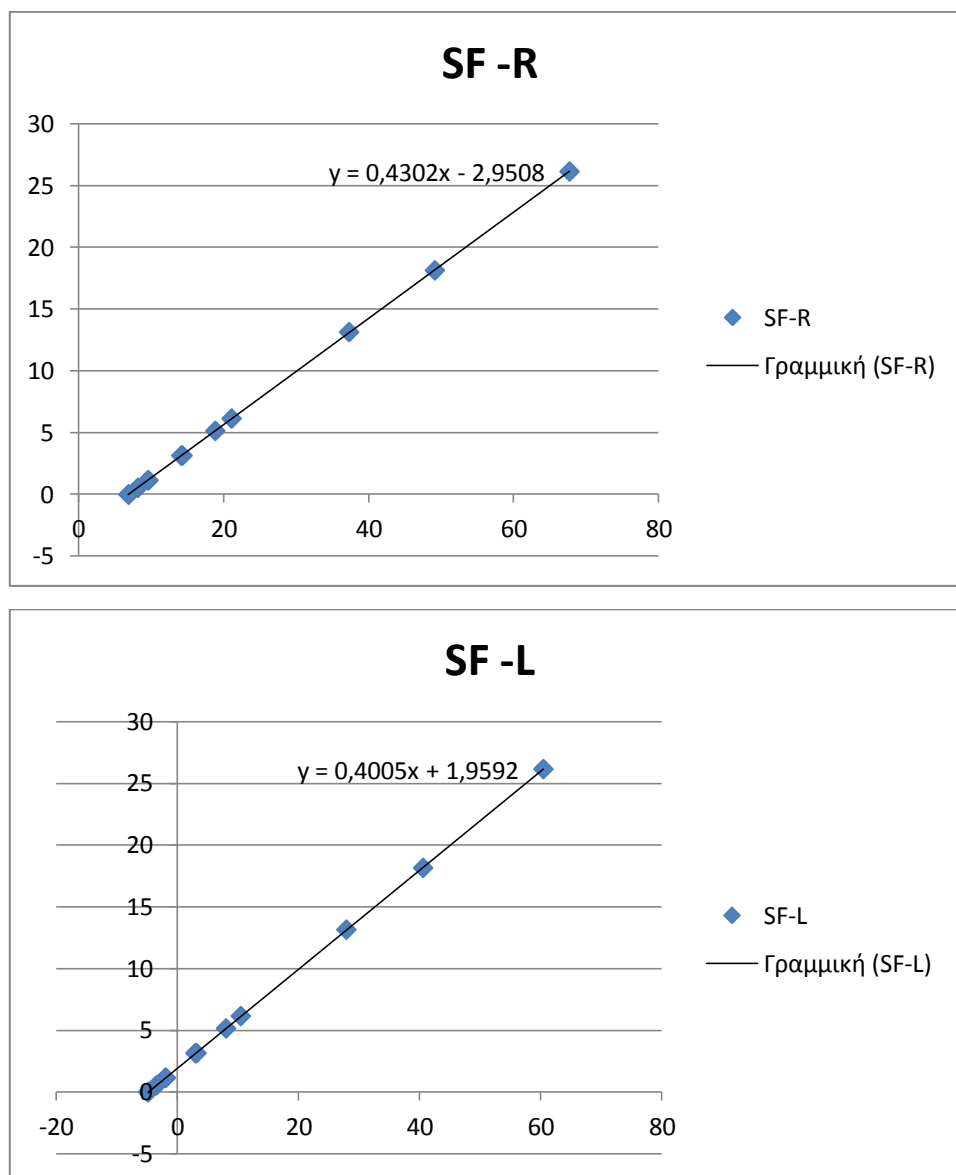


Σχ. 6-9 Βάρη που κρεμάστηκαν για την βαθμονόμηση του Side Force

Τα βάρη που κρεμάστηκαν για την βαθμονόμηση του Side Force και οι αντίστοιχες τιμές ήταν:

Side Force R		Side Force L	
Kg	mV/V	Kg	mV/V
0	6,85	0	-4,93
1,15	9,51	1,15	-2,06
3,15	14,12	3,15	2,91
6,15	21,07	6,15	10,41
13,15	37,28	13,15	27,85
26,15	67,69	26,15	60,39
18,15	49,11	18,15	40,52
5,15	18,82	5,15	7,97
3,15	14,30	3,15	3,105
1,15	9,61	1,15	-1,96
0,54	8,14	0,54	-3,53
0	6,875	0	-4,89

Μια τυπική συνάρτηση μεταφοράς φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



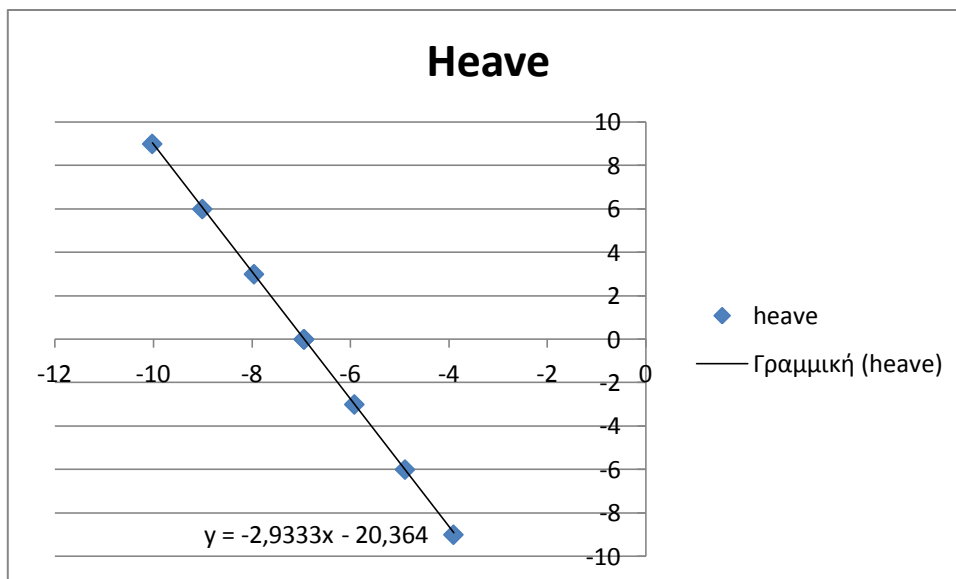
Σχ. 6-10 Τυπική συνάρτηση μεταφοράς για το Side Force R-L

Βαθμονόμηση Heave:

Το ποδάρι του δυναμόμετρου μετακινήθηκε καθ' ύψος σε προκαθορισμένες θέσεις προς τα επάνω και προς τα κάτω (βύθιση και ανύψωση του Κ.Β του μοντέλου) και έγινε λήψη των τιμών Volts.

Heave	
cm	V
0	-6,94
9	-10,02
6	-9,00
3	-7,952
0	-6,933
-3	-5,913
-6	-4,88
-9	-3,90
0	-6,94

Μια τυπική καμπύλη βαθμονόμησης δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχ. 6-11 Τυπική συνάρτηση μεταφοράς για το Heave

6.4.2 Βαθμονομήσεις στη βάση του δυναμόμετρου.

Βαθμονόμηση γωνίας εγκάρσιας κλίσης (Heel).

Δόθηκαν όλες οι προκαθορισμένες γωνίες εγκάρσιας κλίσης στο μοντέλο ($0^{\circ}, 5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}$ αριστερά και δεξιά) και καταγράφηκαν οι τιμές των Volts.

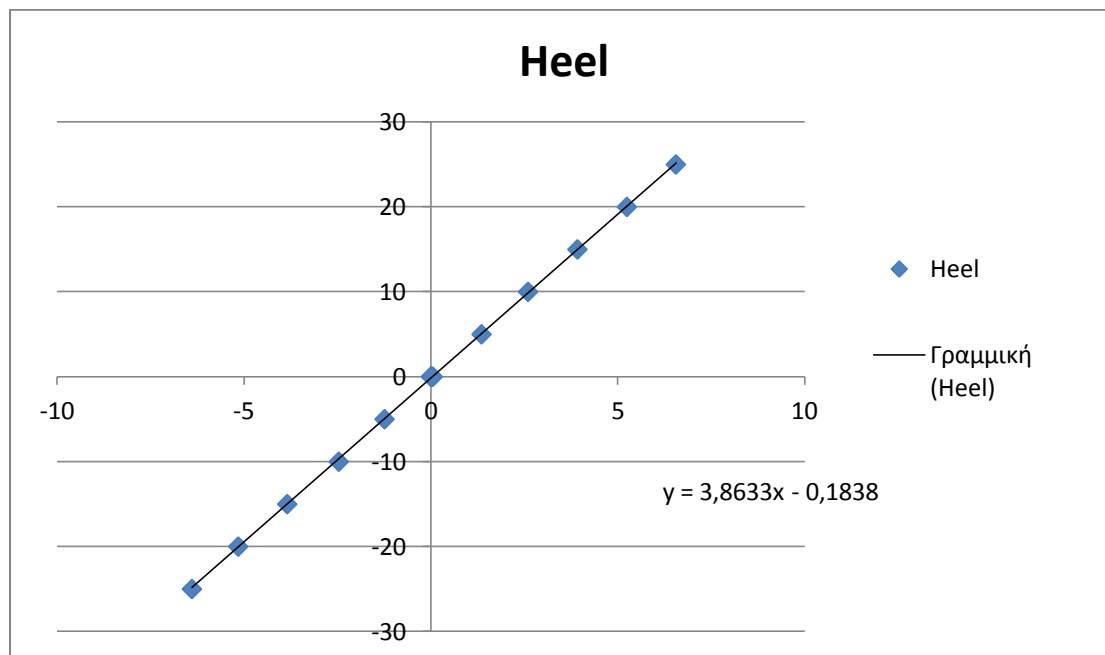


Σχ. 6-12 Βαθμονόμηση σε θέση 25° γωνίας εγκάρσιας κλίσης

Μία τυπική βαθμονόμηση ακολουθεί:

Heel Degree	V
0	0.017
5	1.36
10	2.60
15	3.93
20	5.25
25	6.56
0	0.057
-5	-1.24
-10	-2.46
-15	-3.84
-20	-5.15
-25	-6.39
0	0.009

Μια τυπική καμπύλη βαθμονόμησης δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχ. 6-13 Τυπική καμπύλη βαθμονόμησης Heel

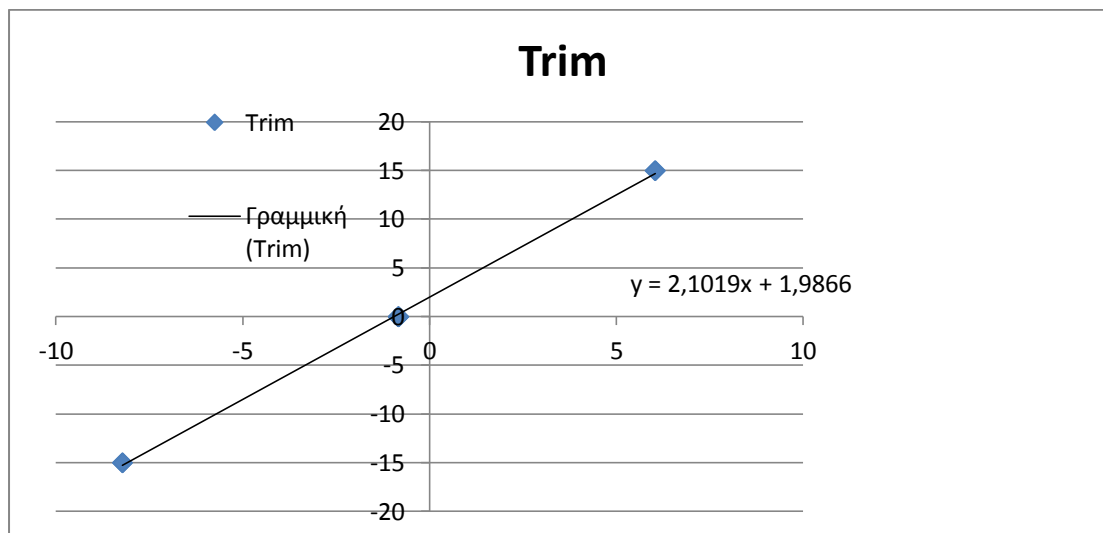
Βαθμονόμηση γωνίας διαγωγής (Trim):

Δόθηκαν όλες οι γωνίες διαγωγής και καταγράφηκαν οι τιμές των Volts.

Μια τυπική βαθμονόμηση ακολουθεί:

Trim Deggree	V	
0	-0,84	
-15	-8.22	Έμπλωρο
0	-0.83	
15	6.05	Έμπρυμνο
15	6.036	Έμπρυμνο
0	-0.83	
-15	-8.21	Έμπλωρο
0	-0.82	
0	-0.83	

Μια τυπική καμπύλη βαθμονόμησης δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχ. 6-14 Καμπύλη βαθμονόμησης Trim

Μέτρηση θερμοκρασίας νερού.

Λήψη της τιμής της θερμοκρασίας του νερού γινόταν δύο φορές σε κάθε ημέρα μετρήσεων. Η πρώτη λήψη γινόταν το πρωί αμέσως μετά τη βαθμονόμηση και ενός δοκιμαστικού “run” προκειμένου να έχει γίνει ανάδευση του νερού της δεξαμενής και να έχουμε μία πιο αξιόπιστη μέτρηση. Η δεύτερη λήψη της θερμοκρασίας γινόταν μετά το πέρας των πειραματικών δοκιμών. Στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων λήφθηκε ο μέσος όρος των τιμών. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε αδιάβροχο θερμόμετρο υδραργύρου.

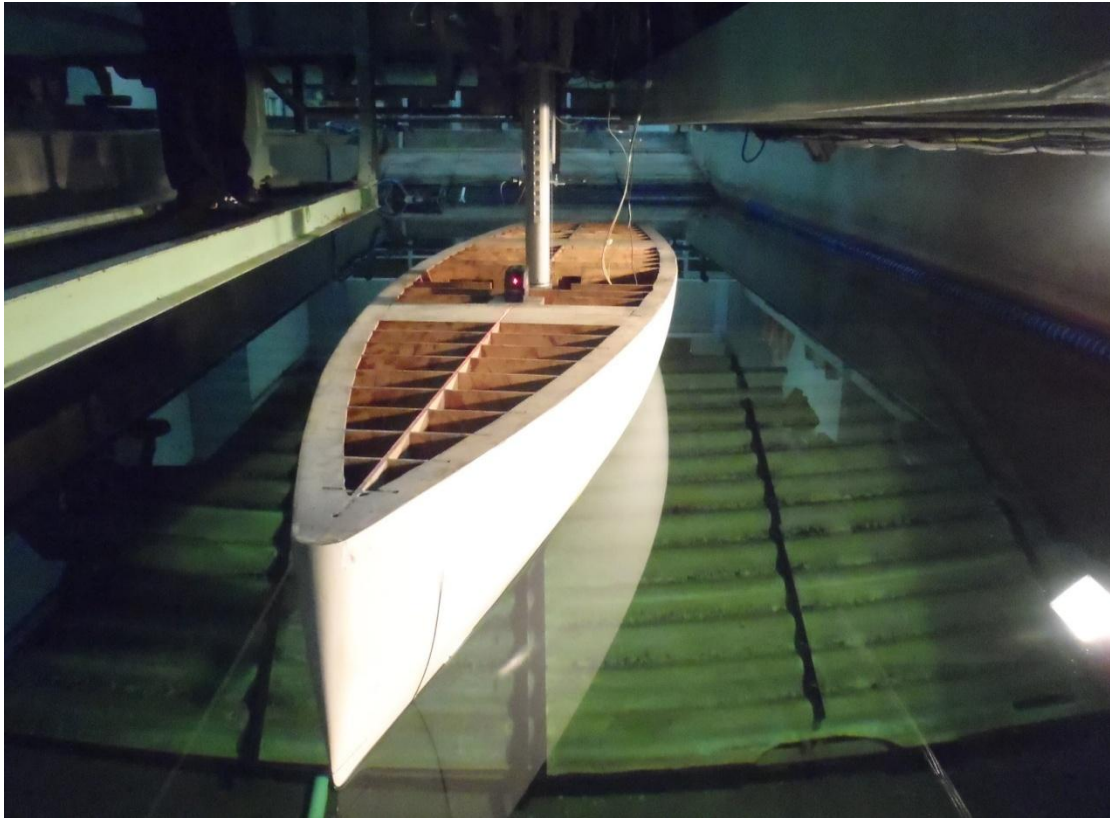
Ως γενικές παρατηρήσεις για την βαθμονόμηση του δυναμομέτρου θα πρέπει να αναφέρουμε τα εξής:

Πριν αρχίσει η διαδικασία της βαθμονόμησης προτείνεται τουλάχιστον η ωριαία προθέρμανση των οργάνων της γωνίας διαγωγής και εγκάρσιας κλίσης. Παρατηρήθηκαν πολύ μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές των Volts αμέσως μετά την εκκίνηση των οργάνων αυτών σε σχέση με τις τιμές που λήφθηκαν μία ώρα μετά. Μετά το πέρας του χρόνου αυτού οι τιμές ήταν περίπου σταθερές για το υπόλοιπο της ημέρας. Οι τιμές των Volts κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης της γωνίας διαγωγής και εγκάρσιας κλίσης παρουσίαζαν αποκλίσεις από τη μία ημέρα στην άλλη κάτι το οποίο πιθανώς να οφείλεται κυρίως στη διαφορά των συνθηκών περιβάλλοντος (θερμοκρασίας, υγρασίας) μεταξύ των ημερών που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Οι διαφορές αυτές είναι και ο λόγος για τον οποίο γινόταν καθημερινή βαθμονόμηση. Αντίθετα οι τιμές της αντίστασης και της πλάγιας δύναμης είχαν καλή επαναληψιμότητα.

Πριν την εκκίνηση των πειραμάτων στην δεξαμενή απλώνεται σύστημα απόσβεσης κυματισμών στα τοιχώματα της δεξαμενής έτσι ο χρόνος αναμονής που μεσολαβεί από πείραμα σε πείραμα ήταν της τάξης των 4 λεπτών.

Πριν από κάθε μέτρηση το μοντέλο πρέπει να τοποθετηθεί σε γωνία εγκάρσιας κλίσης και πλευρικής απόκλιση. Το μοντέλο στρέφεται από την βάση στην επιθυμητή γωνία πλευρικής απόκλισης και ευθυγραμμίζεται με την βοήθεια συσκευής δέσμης laser.(Σχήμα 6.10).

Πριν από κάθε “run” πρέπει να γίνει μέτρηση, με ακίνητο το φορείο και να καταγραφούν οι τιμές όλων των οργάνων σε ηρεμία. Αυτό βοηθά στο να αφαιρεθούν τα σφάλματα από τις μετρήσεις, που προέρχονται από το γεγονός ότι το νερό δεν είναι τελείως ήρεμο, παραμένει δηλαδή έστω και ένας ελάχιστος κυματισμός από την τελευταία μέτρηση.



Σχ. 6.15 Τοποθέτηση του μοντέλου σε γωνία πλευρικής απόκλισης με τη βοήθεια δέσμης Laser και χάρακα

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα πειράματα είχαν ξεκινήσει πολύ νωρίτερα και συνεχίζονταν από την ΥΔ κα Κ. Σφακιανάκη, και ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων είχαν ήδη ολοκληρωθεί, Η παρούσα εργασία αφορά τη συμμετοχή μου στο τελευταίο στάδιο των πειραμάτων αυτών του μοντέλου BOC-50 με καρίνα και βολβό, που είχε στόχο την διεξαγωγή πειραμάτων σε επιπλέον γωνίες εγκάρσιας κλίσης 20° και μεγάλες γωνίες απόκλισης 8° και 12° καθώς και συμπληρωματικές μετρήσεις σε κάποιες γωνίες πλευρικής απόκλισης.

Προκειμένου να ληφθούν αποτελέσματα και να εξαχθούν συμπεράσματα, σε αυτή την κατάσταση του μοντέλου, έχουν γίνει συνολικά μετρήσεις για τέσσερις ταχύτητες (0.5 , 1, 1.5, 2m/sec) σε γωνίες πλευρικής απόκλισης ($0, \pm 1^\circ, \pm 3.5^\circ, \pm 6^\circ, \pm 7^\circ, \pm 8^\circ, \pm 12^\circ$), το \pm αναφέρεται γιατί έχουν γίνει μετρήσεις και από τις δύο πλευρές της απόκλισης. Επίσης για κάθε γωνία πλευρικής απόκλισης δεξιά ή αριστερά ακόμα και για την τιμή 0° , έχουν γίνει μετρήσεις για γωνίες εγκάρσιας κλίσης ($0^\circ, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, 20^\circ$). Έτσι για παράδειγμα για γωνία πλευρικής απόκλισης δεξιά 3.5° έχουν γίνει μετρήσεις για γωνίες εγκάρσιας κλίσης και δεξιά (+) και αριστερά (-) της κλίσης των 10° . Αρκετές από τις καταστάσεις αυτές δεν υπάρχουν στην πράξη, έγιναν όμως πειραματικά για να υπολογιστεί και να διορθωθεί στα αποτελέσματα το σφάλμα ευθυγράμμισης του δυναμόμετρου και του μοντέλου σε σχέση με την κίνηση του φορείου.

Η διόρθωση αυτή γίνεται από ειδικό πρόγραμμα πολυωνυμικής προσαρμογής μετρήσεων, που έχει γραφεί από τον καθηγητή κ.

Γ.Τζαμπίρα και έχει τροποποιηθεί και αναπτυχθεί από την κα Κ. Σφακιανάκη ώστε να περιλαμβάνει γωνίες εγκάρσιας κλίσης και μεγάλες γωνίες απόκλισης (μη γραμμικές μεταβολές), καθώς και να καταγράφει τα σφάλματα της διαδικασίας

Συνολικά μαζί με τις επαναληπτικές μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί κατά μέσο όρο 100 μετρήσεις ανά ταχύτητα, προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή αποτελέσματα και συμπεράσματα τα οποία και παρουσιάζονται παρακάτω.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

$\lambda\phi$ = degrees , Side Force\Resistance = kp

Side Force- Exp V=1,5 m/sec Fn=0,2452					
V=1,5m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	0	0,13	0,17	0,52
	1	2,03	2,11	2	0,73
	3,5	7,645	7,83	7,61	5,4
	6	13,39	13,48	13,24	11,04
	7	15,54	15,34	15,06	13,24
	8	17,53	16,9	16,45	15,26
	12	22,68	17,09	14,87	19,34

Resistance -Exp V=1,5 m/sec Fn=0,2452					
V=1,5m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	1,27	1,27	1,27	1,27
	1	1,28	1,28	1,28	1,27
	3,5	1,44	1,45	1,44	1,36
	6	1,74	1,75	1,73	1,6
	7	1,92	1,9	1,87	1,73
	8	2,15	2,07	2,01	1,89
	12	3,54	2,09	1,86	2,47

Side Force- Exp V=2 m/sec Fn=0,3269					
V=2m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	0	0,54	0,92	0,38
	1	3,7	3,86	3,68	1,44
	3,5	14,53	14,92	14,68	11,32
	6	24,92	25,08	24,51	20,47
	7	28,15	27,51	26,11	20,75

Resistance - Exp V=2 m/sec Fn=0,3269					
V=2m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	2,4	2,4	2,4	2,4
	1	2,41	2,41	2,41	2,4
	3,5	2,73	2,75	2,74	2,58
	6	3,45	3,46	3,43	3,14
	7	3,51	3,52	3,5	3,17

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ ΟΟSSANEN

$\lambda\phi$ = degrees , Side Force\Resistance = kp

Side Force- Oossanen					
V=1,5m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	0	0	0	0
	1	1,44838	1,382	1,295	1,0034
	3,5	5,32815	5,0813	4,7666	3,7682
	6	9,59322	9,1622	8,6102	6,8695
	7	11,4124	10,9065	10,2567	8,2083
	8	13,299	12,7174	11,968	9,6054
	12	21,5624	20,6692	19,5021	15,8116

Resistance - Oossanen					
V=1,5m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	1,2689	1,24102	1,2354	1,4085
	1	1,27942	1,2518	1,2465	1,4137
	3,5	1,37647	1,3456	1,3357	1,4777
	6	1,59521	1,5548	1,5331	1,6299
	7	1,72351	1,6772	1,6485	1,7207
	8	1,87848	1,8251	1,7879	1,8311
	12	2,81904	2,7226	2,6344	2,5111

Side Force - Oossanen					
V=2m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	0	0	0	0
	1	3,2204	3,0863	2,91384	2,34237
	3,5	11,7328	11,2095	10,5565	8,5617
	6	20,9392	20,0194	18,8685	15,3862
	7	24,8268	23,746	22,3906	18,2939

Resistance - Oossanen					
V=2m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	2,47637	2,4422	2,4491	2,79066
	1	2,49529	2,4615	2,4683	2,8059
	3,5	2,69518	2,6521	2,6475	2,9466
	6	3,15642	3,0875	3,0538	3,2669
	7	3,42808	3,3436	3,2926	3,456

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ORC VPP

$\lambda\phi$ = degrees , Side Force\Resistance = kp

Side Force- ORC				
V=1,5m/sec	$\lambda\phi$	0	10	20
	0	0	0	0
	1	2,2844	2,2496	2,1466
	3,5	7,9954	7,8739	7,5132
	6	13,7064	13,4982	12,8798
	7	15,9908	15,7478	15,0264
	8	18,2572	17,9975	17,11306
	12	27,41278	26,9963	25,7596

Resistance - ORC				
V=1,5m/sec	$\lambda\phi$	0	10	20
	0	1,177	1,15787	1,123054
	1	1,192245	1,172199	1,135633
	3,5	1,36708	1,333414	1,273485
	6	1,725685	1,673757	1,565135
	7	1,923819	1,86005	1,724775
	8	2,152436	2,075	1,908975
	12	3,371726	3,221422	2,891377

Side Force- ORC				
V=2m/sec	$\lambda\phi$	0	10	20
	0	0	0	0
	1	4,0611	3,9994	3,8162
	3,5	14,214	13,9981	13,3568
	6	24,3369	23,9967	22,8974
	7	28,4281	27,9962	26,7136

Resistance - ORC				
V=2m/sec	$\lambda\phi$	0	10	20
	0	2,167986	2,12713	2,112341
	1	2,195081	2,1526	2,1341
	3,5	2,4999	2,43921	2,37977
	6	3,143418	3,04426	2,898262
	7	3,495657	3,37545	3,18206

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ GERRITSMΑ ΚΑΙ LEXKENING

$\lambda\phi$ = degrees , Resistance = $k\mu$

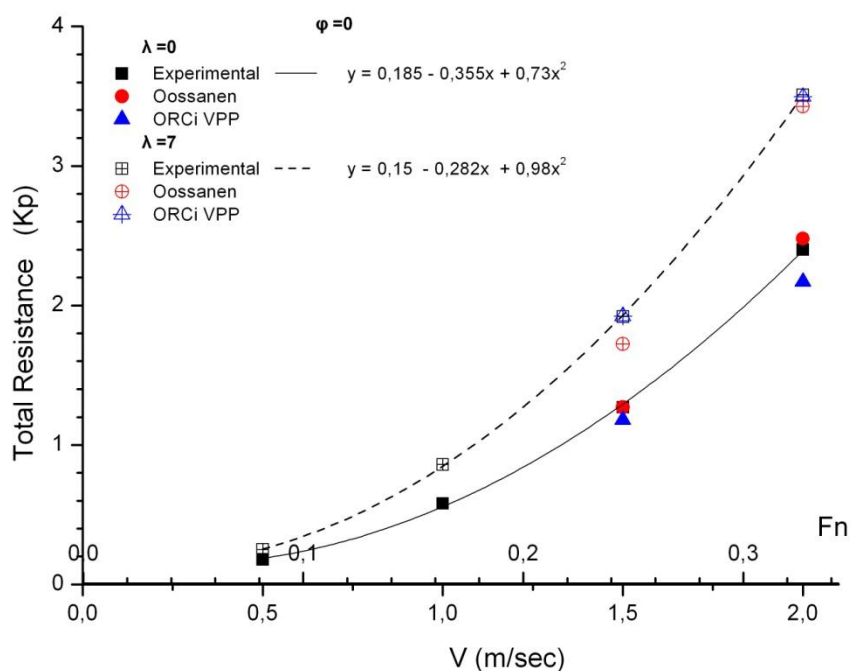
Resistance - Geritsma					
V=1,5m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	1,2689	1,2905	1,3121	1,3555
	1	1,27942	1,3013	1,3227	1,3607
	3,5	1,37647	1,3951	1,4118	1,4247
	6	1,59521	1,6043	1,6092	1,5769
	7	1,72351	1,7267	1,7247	1,6677
	8	1,87848	1,8745	1,864	1,7781
	12	2,81904	2,7721	2,7105	2,4581

Resistance - Lexkening					
V=1,5m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	1,2689	2,2719	1,2755	1,2822
	1	1,27942	1,2827	1,286	1,2875
	3,5	1,37647	1,3765	1,3752	1,3515
	6	1,59521	1,5857	1,5726	1,5038
	7	1,72351	1,7081	1,688	1,5945
	8	1,87848	1,8559	1,8274	1,7049
	12	2,81904	2,7535	2,6739	2,3849

Resistance - Geritsma					
V=2m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	2,47637	2,5442	2,6129	2,755
	1	2,49529	2,5636	2,632	2,7703
	3,5	2,69518	2,7541	2,8112	2,9109
	6	3,15642	3,1895	3,2175	3,2313
	7	3,42808	3,4457	3,4564	3,4204

Resistance - Lexkening					
V=2m/sec	$\lambda\phi$	0	5	10	20
	0	2,47637	2,5075	2,5434	2,4933
	1	2,49529	2,5268	2,5625	2,5085
	3,5	2,69518	2,7174	2,7417	2,6492
	6	3,15642	3,1528	3,148	2,9695
	7	3,42808	3,4089	3,3869	3,1586

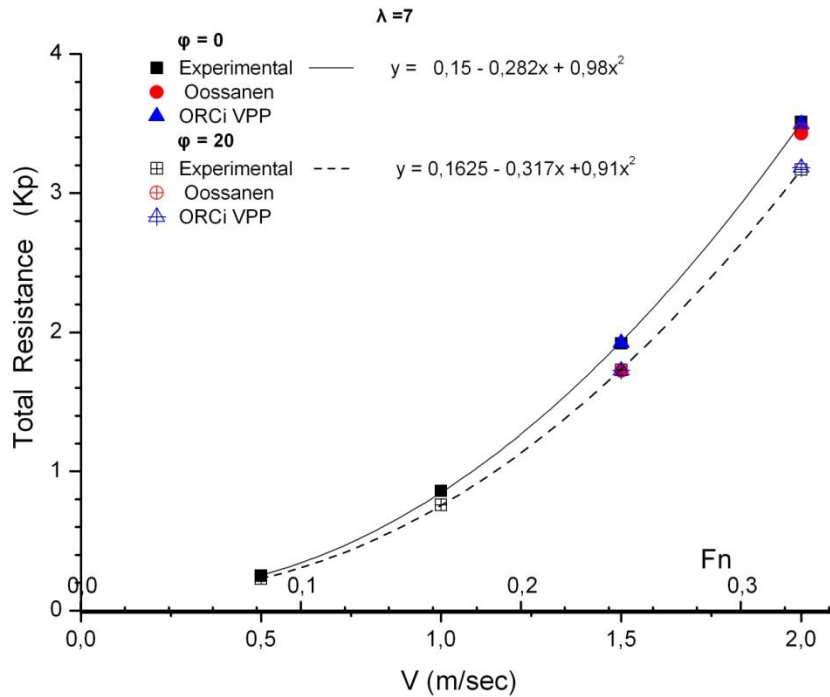
7.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ



Δ_1 : Αντίσταση συναρτήσει της ταχύτητας για μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης ($\phi=0^\circ$) και δύο γωνίες πλευρικής απόκλισης $\lambda=0^\circ$ και $\lambda=7^\circ$

Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται η αντίσταση συναρτήσει της ταχύτητας για μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης ($\phi=0^\circ$) και δύο γωνίες πλευρικής απόκλισης $\lambda=0^\circ$ και $\lambda=7^\circ$

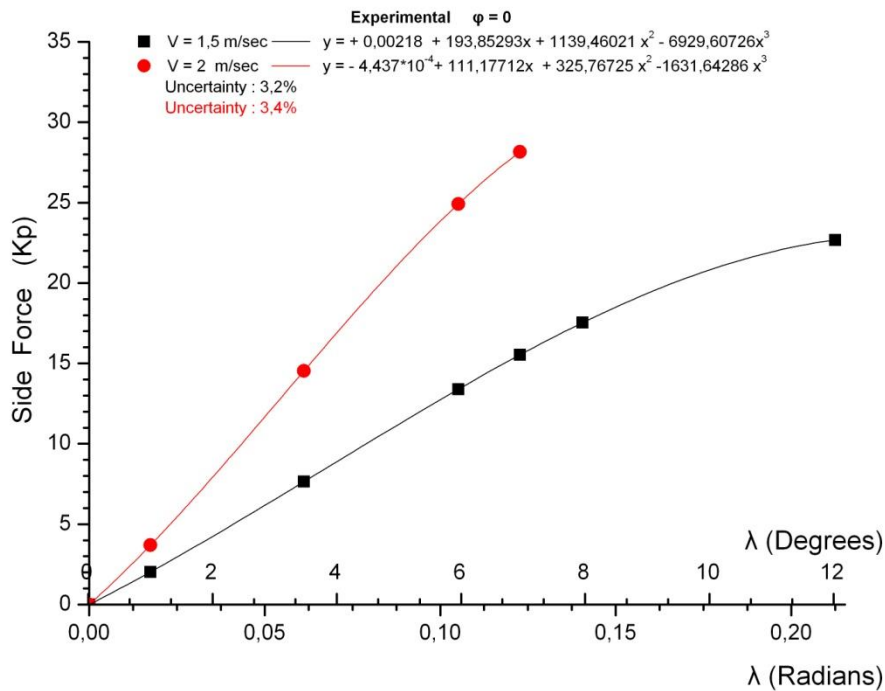
Βλέπουμε μία αύξηση της αντίστασης για ίδια ταχύτητα καθώς αυξάνεται η γωνία πλευρικής απόκλισης. Παρατηρούμε επίσης ότι με τη μέθοδο του Oossanen αλλά και του ORC_VPP 2012 επιτυγχάνουμε μία αρκετά καλή προσέγγιση της αντίστασης όπως αυτή μετρήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία.



Δ_2 : Αντίσταση συναρτήσει της ταχύτητας για γωνία πλευρικής απόκλισης $\lambda=7^\circ$ σε δύο γωνίες εγκάρσιας κλίσης $\phi=0^\circ$ και $\phi=20^\circ$

Στο Διάγραμμα 2 παρουσιάζεται η αντίσταση συναρτήσει της ταχύτητας για γωνία πλευρικής απόκλισης $\lambda=7^\circ$ σε δύο γωνίες εγκάρσιας κλίσης $\phi=0^\circ$ και $\phi=20^\circ$

Παρατηρούμε ότι η τιμή της αντίστασης υπό κλίση είναι μικρότερη από την τιμή της αντίστασης σε όρθια θέση, λόγω της μικρότερης πλάγιας δύναμης SF, που παράγουν τα παρελκόμενα με την κλίση που έχει σαν συνέπεια την μείωση της επαγόμενης αντίστασης (induced drag).



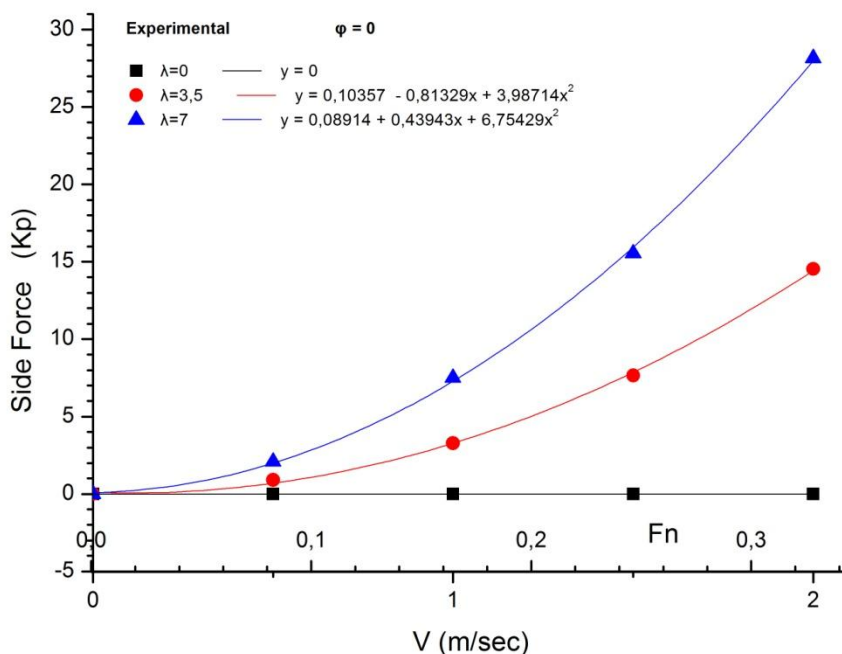
Δ_3 : Πειραματικές τιμές πλάγιας δύναμης SF για ταχύτητες $V=1,5 \text{ m/sec}$ και $V=2 \text{ m/sec}$ συναρτήσεως της πλευρικής απόκλισης λ για μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης ($\phi=0^\circ$)

Στο ανωτέρω διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές πλάγιας δύναμης SF για ταχύτητες $V=1,5 \text{ m/sec}$ και $V=2 \text{ m/sec}$ συναρτήσεως της πλευρικής απόκλισης λ για μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης ($\phi=0^\circ$)

Παρατηρούμε αύξηση του SF με την γωνία πλευρικής απόκλισης, η οποία είναι γραμμική για μικρές γωνίες απόκλισης (μέχρι 8 μοίρες για $V=1,5 \text{ m/sec}$ και μέχρι 6 μοίρες για $V=2 \text{ m/sec}$). Για μεγαλύτερες γωνίες απόκλισης εμφανίζεται το φαινόμενο Stall, λόγω κυρίως της αποκόλλησης της ροής και επομένως η μεταβολή της πλάγιας δύναμης SF παύει να είναι γραμμική.

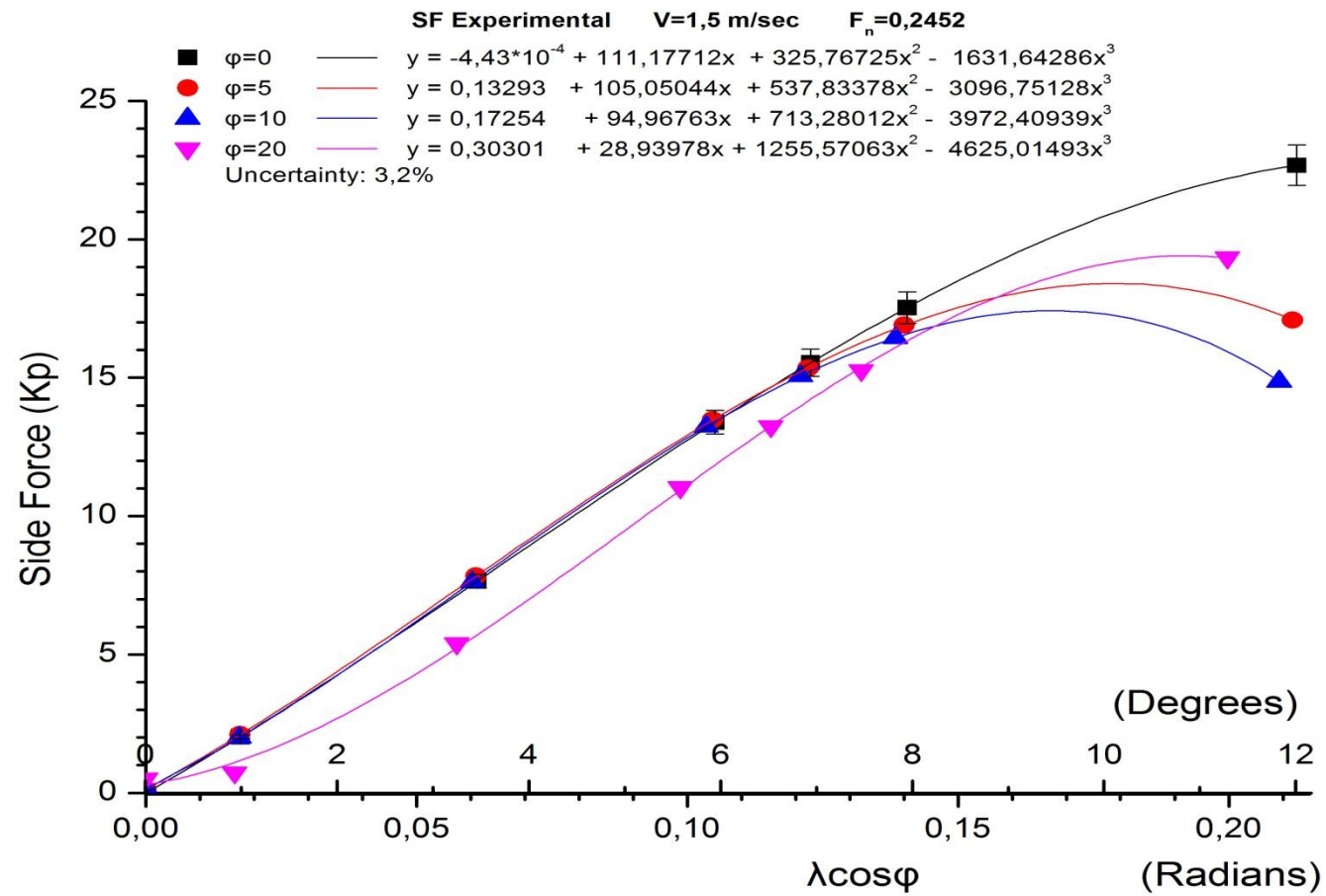
Επίσης παρατηρούμε την αύξηση της πλάγιας δύναμης με την ταχύτητα.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της πλάγιας δύναμης με την ταχύτητα για τρεις γωνίες πλευρικής απόκλισης σε μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης.

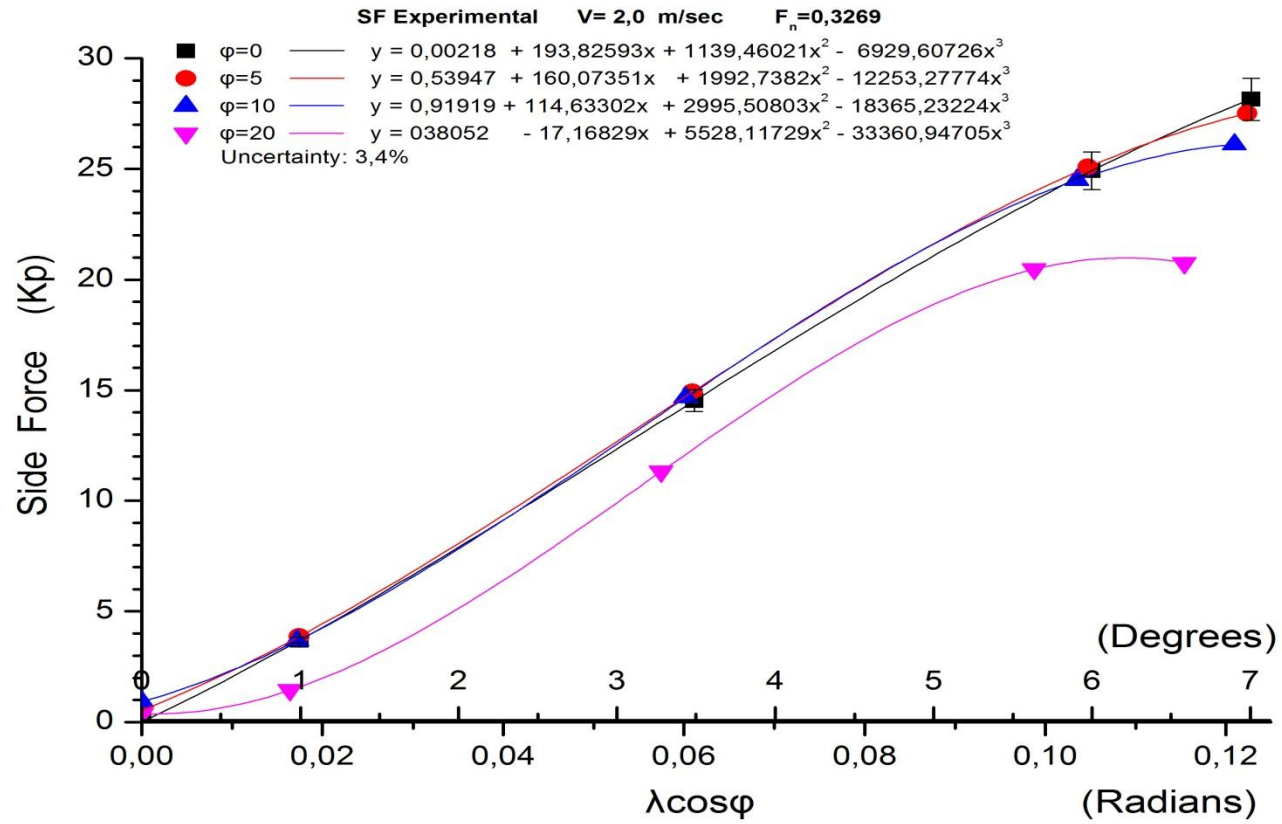


Δ_4 : Πειραματικές τιμές πλάγιας δύναμης SF συναρτήσει της ταχύτητας για γωνίες πλευρικής απόκλισης $\lambda = 0^\circ$, $\lambda = 3.5^\circ$ και $\lambda = 7^\circ$ και για μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης ($\phi = 0^\circ$)

Στο ανωτέρω διάγραμμα παρατηρούμε ότι η πλάγια δύναμη, SF αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας, για σταθερή γωνία πλευρικής απόκλισης.



Δ_5 : Πλάγια δύναμη SF για V=1,5 m/sec συναρτήσει της γωνίας απόκλισης λcosφ σε τέσσερις γωνίες εγκάρσιας κλίσης. (φ=0°, φ=5°, φ=10°, φ=20°).



Δ_6 : Πλάγια δύναμη SF για V=2 m/sec συναρτήσει της γωνίας απόκλισης $\lambda\cos\phi$ σε τέσσερις γωνίες εγκάρσιας κλίσης. ($\phi=0^\circ$, $\phi=5^\circ$, $\phi=10^\circ$, $\phi=20^\circ$)

Διάγραμμα 5

Παρατηρούμε μια γραμμική μεταβολή της πλάγιας δύναμης SF με τη γωνία απόκλισης $\lambda \cos \varphi$ (για γωνίες εγκάρσιας κλίσης, φ μέχρι 10 μοίρες και για τιμές της γωνίας απόκλισης, $\lambda \cos \varphi$ μέχρι περίπου 6.5° - 7° μοίρες). Για μεγαλύτερες τιμές η αύξηση της πλάγιας δύναμης SF είναι μικρότερη της γραμμικής μέχρι που εμφανίζεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το φαινόμενο stall, όπου η πλάγια δύναμη μειώνεται.

Η τιμή της πλάγιας δύναμης SF για $\varphi=20^\circ$ μοίρες είναι σημαντικά μικρότερη της SF για $\varphi=0^\circ$ μοίρες και εμφανίζεται φαινόμενο stall λίγο νωρίτερα από την καμπύλη $\varphi=0^\circ$ αλλά αρκετά αργότερα από τις καμπύλες $\varphi=5^\circ$ και $\varphi=10^\circ$ μοίρες αντίστοιχα.

Οι τιμές της πλάγιας δύναμης δεν είναι μηδέν για γωνίες $\lambda \cos \varphi=0$ όταν $\varphi \neq 0^\circ$ λόγω της ασυμμετρίας που παρουσιάζει η γάστρα για $\varphi \neq 0^\circ$ και $\lambda=0^\circ$.

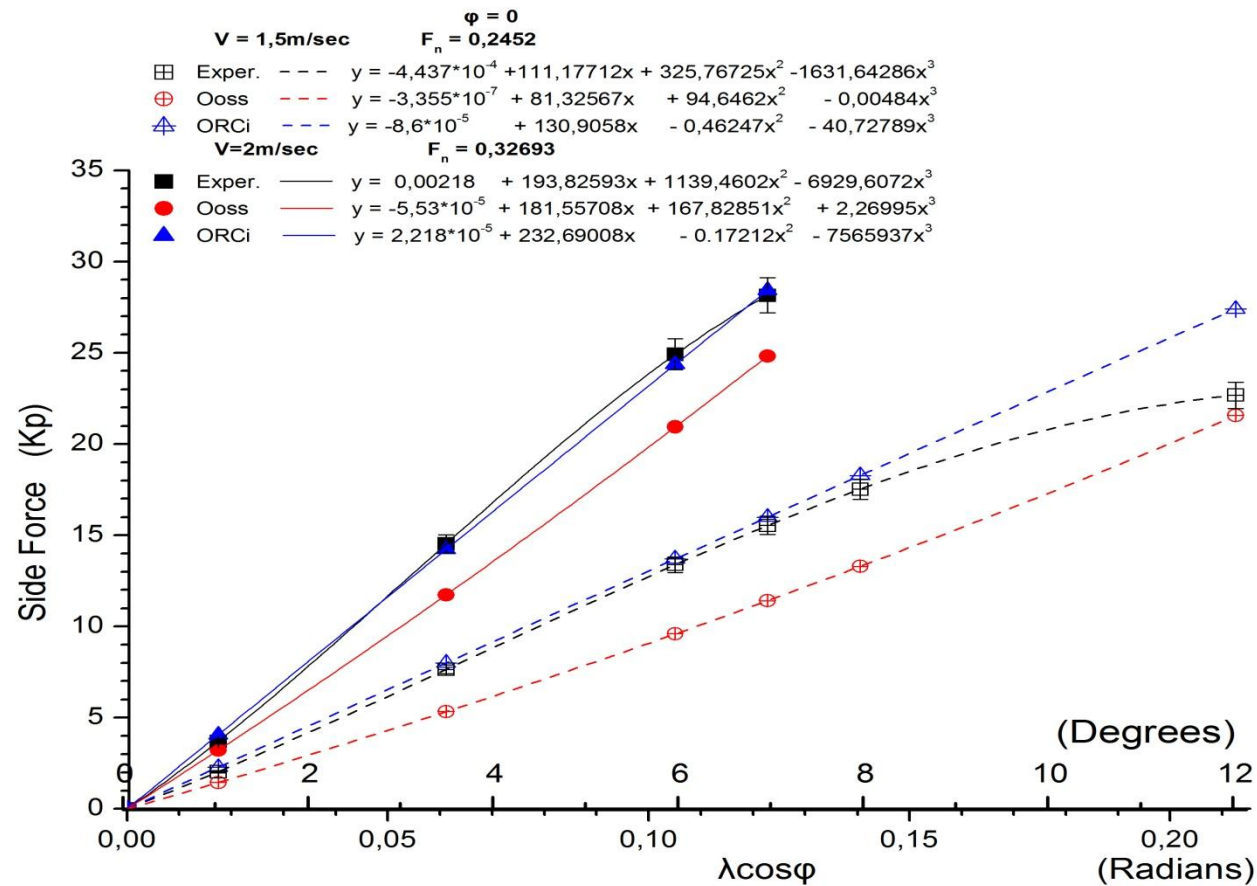
Διάγραμμα 6

Παρατηρείται ότι και στο διάγραμμα 5 με τη μόνη διαφορά ότι το φαινόμενο stall εμφανίζεται νωρίτερα με την αύξηση της ταχύτητας.

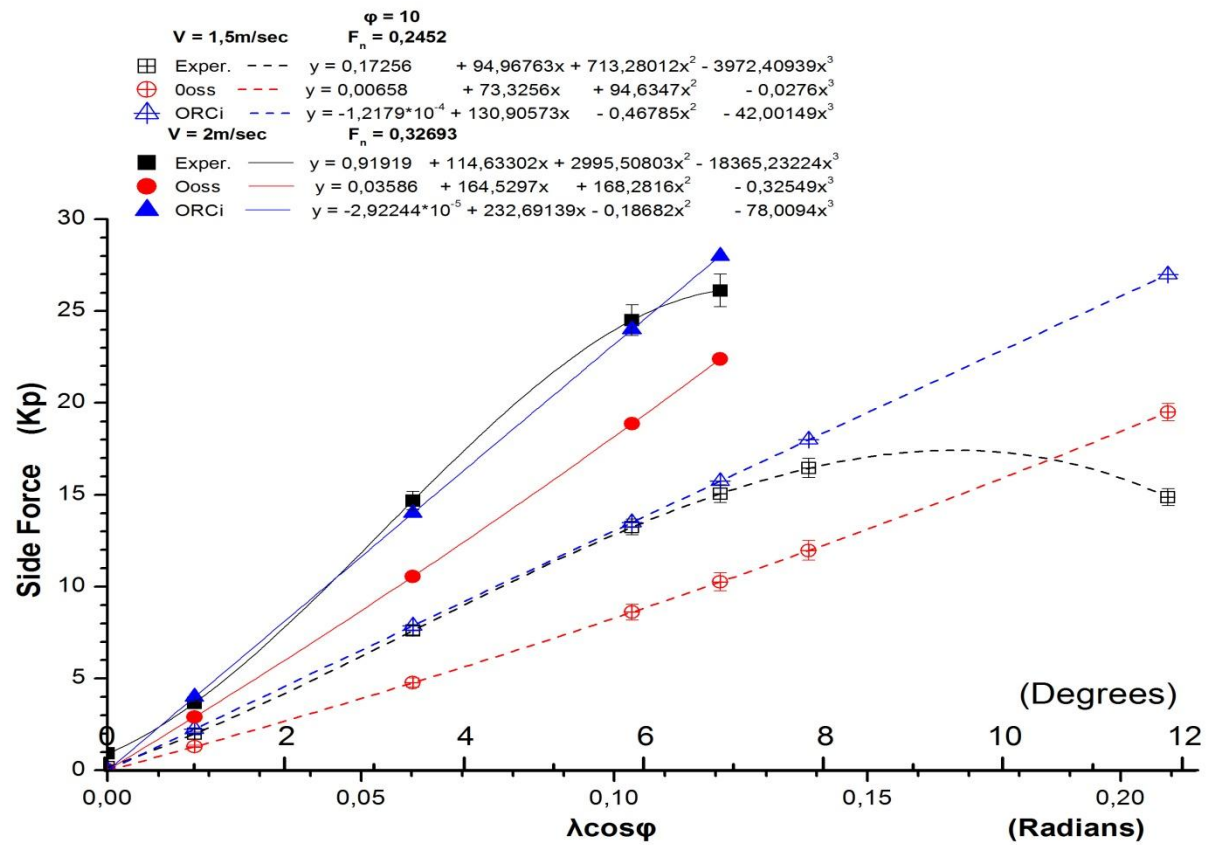
Το φαινόμενο stall για την γωνία $\varphi=20^\circ$ αρχίζει νωρίτερα από τις καμπύλες $\varphi=5^\circ$ και $\varphi=10^\circ$ σε αντίθεση με την ταχύτητα 1.5 m/sec.

Παρατηρούμε επίσης μικρές διαφοροποιήσεις από την γραμμική περιοχή για γωνίες πλευρικής απόκλισης $\lambda \cos \varphi$ από 3.5° και πάνω για γωνίες εγκάρσιας κλίσης $\varphi=5^\circ$ και $\varphi=10^\circ$ μοίρες.

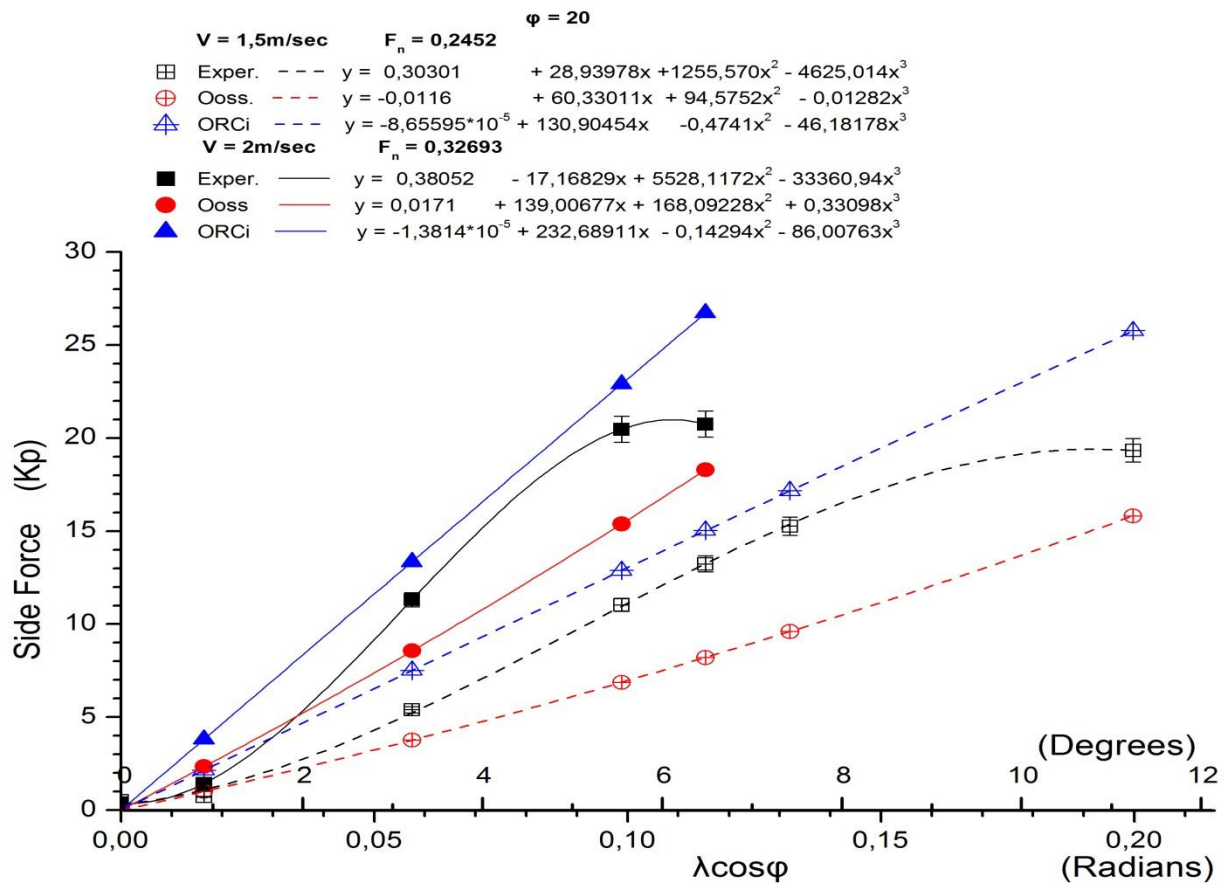
Επίσης παρατηρούμε πιο έντονα τις διαφοροποιήσεις από την γραμμική περιοχή των καμπύλων για $\varphi \neq 0^\circ$ για τιμές της απόκλισης μικρότερης της 1° μοίρας.



Δ_7 : Σύγκριση πειραματικών τιμών πλάγιας δύναμης SF συναρτήσει της απόκλισης $\lambda \cos \varphi$ για δύο ταχύτητες $V=1,5 \text{ m/sec}$ και $V=2 \text{ m/sec}$ και μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης ($\varphi=0^\circ$)



Δ_8 : Σύγκριση πειραματικών τιμών πλάγιας δύναμης SF συναρτήσει της απόκλισης $\lambda \cos \phi$ για δύο ταχύτητες, $V=1,5$ m/sec και $V=2$ m/sec και γωνία εγκάρσιας κλίσης $\phi=10^\circ$.



Δ_9 : Σύγκριση πειραματικών τιμών πλάγιας δύναμης SF συναρτήσει της απόκλισης $\lambda \cos \phi$ για δύο ταχύτητες, $V=1,5$ m/sec και $V=2$ m/sec και γωνία εγκάρσιας κλίσης $\phi=20^\circ$.

Διάγραμμα 7

Παρατηρούμε μια καλή σύμπτωση των πειραματικών τιμών με την τιμή του VPP_ORC 2012, αν και οι τιμές της πλάγιας δύναμης SF όσο αναφορά το VPP_ORC 2012 έχουν να κάνουν με τους βέλτιστους αεροδυναμικούς συντελεστές που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα VPP με τους οποίους και υπολογίζεται η οριζόντια δύναμη εγκάρσιας κλίσης FH (Horizontal Heeling Force). Η FH ισούται αριθμητικά σε κατάσταση ισοροπίας με την οριζόντια πλάγια δύναμη SF.

Οι τιμές που έχουν υπολογιστεί αριθμητικά με βάση το VPP του Oossanen είναι πολύ μικρότερες.

Δεν υπάρχει πρόβλεψη για το φαινόμενο stall στους υπολογισμούς του VPP του Oossanen και φυσικά όπως αναφέρθηκε, το VPP_ORC 2012 δεν υπολογίζει το SF για κάθε γωνία πλευρικής απόκλισης επομένως δεν αναλύεται το φαινόμενο του stall.

Διάγραμμα 8

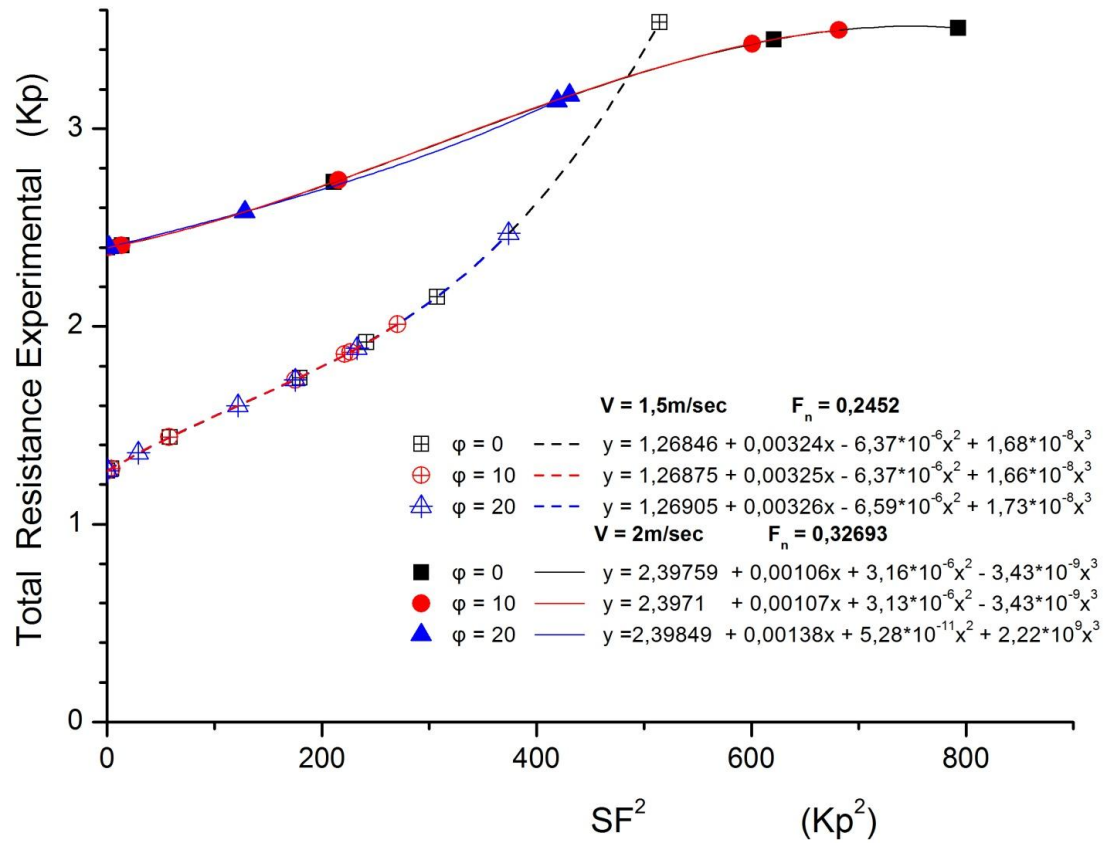
Το Διάγραμμα 8 απεικονίζει σύγκριση πειραματικών τιμών πλάγιας δύναμης SF συναρτήσει της απόκλισης $\lambda \cos \varphi$ για δύο ταχύτητες, $V=1,5$ m/sec και $V=2$ m/sec αλλά για γωνία εγκάρσιας κλίσης $\varphi=10^\circ$. Τα σχόλια είναι ανάλογα με το Διάγραμμα 7.

Διάγραμμα 9

Το Διάγραμμα 8 απεικονίζει σύγκριση πειραματικών τιμών πλάγιας δύναμης SF συναρτήσει της απόκλισης $\lambda \cos \varphi$ για δύο ταχύτητες, $V=1,5$ m/sec και $V=2$ m/sec αλλά για γωνία εγκάρσιας κλίσης $\varphi=20^\circ$. Οι παρατηρήσεις είναι ανάλογες με το διάγραμμα 7.

Επιπλέον στο διάγραμμα αυτό οι τιμές αποκλίνουν τόσο του VPP_ORC 2012 όσο και από το VPP του Oossanen.

Οι τιμές για το VPP_ORC 2012 προέρχονται από τις τιμές των μέγιστων τιμών των αεροδυναμικών συντελεστών, ενώ όταν το σκάφος έχει γωνία εγκάρσιας κλίσης φ αναπτύσσει δύναμη εγκάρσιας κλίσης (heeling force) ίση με $FH \cdot \cos\varphi$. Οι τιμές όμως αυτές, όπως είδη έχουμε δει στα διαγράμματα 5 και 6 απέχουν από τις πραγματικές τιμές.



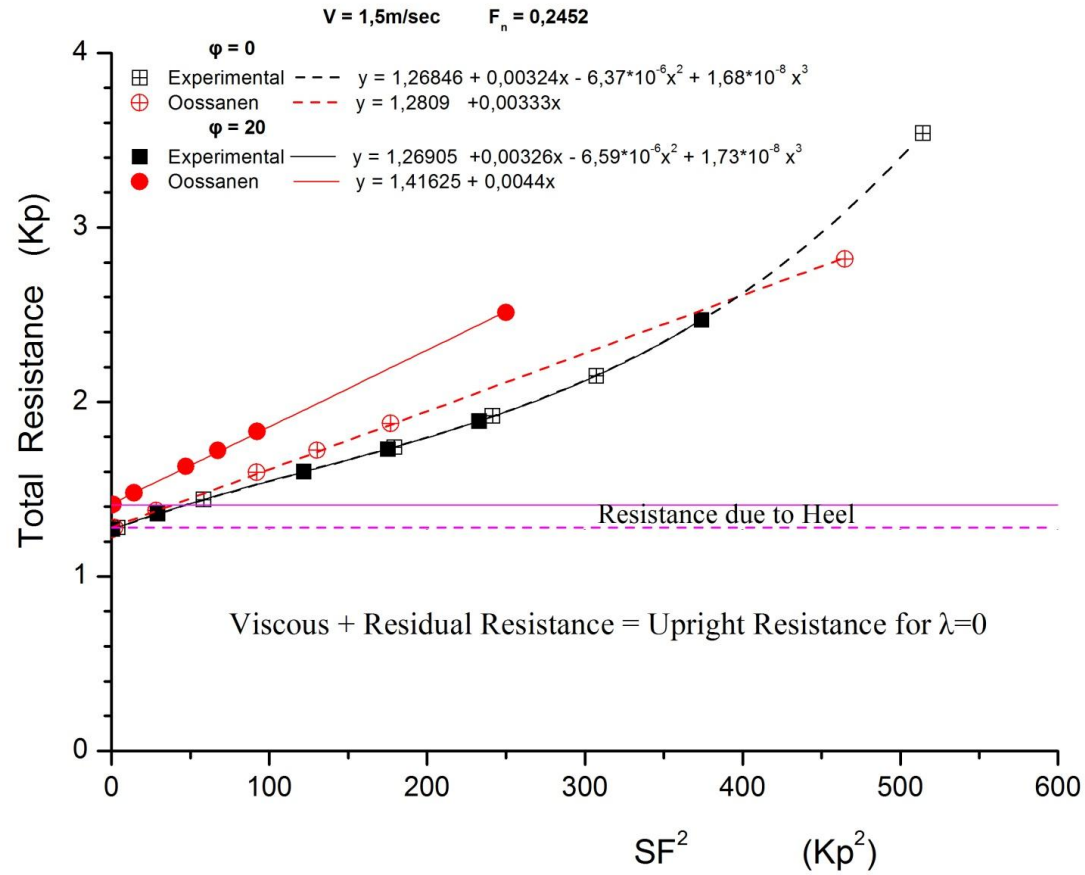
Δ_10 : Απεικόνιση πειραματικών αποτελεσμάτων Συνολικής Αντίστασης συναρτήσει του SF² για γωνίες εγκάρσιας κλίσης φ=0°, φ=10°, φ=20° και ταχύτητες V=1,5 m/sec και V=2 m/sec

Διάγραμμα 10

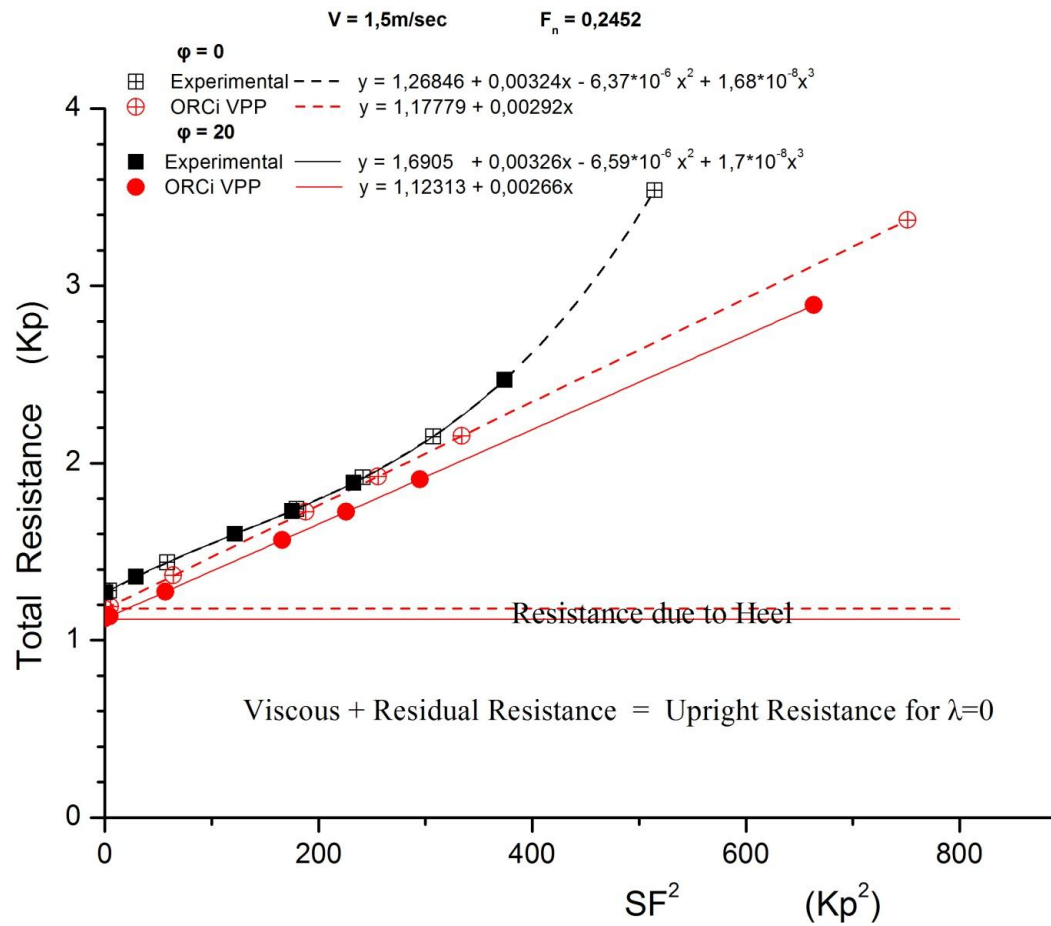
Παρατηρούμε ότι η μεταβολή της αντίστασης με την γωνία εγκάρσιας κλίσης είναι μικρή.

Η μεταβολή της αντίστασης με το τετράγωνο της πλάγιας δύναμης είναι σχεδόν γραμμική μέχρι $SF \approx 16Kp$ για ταχύτητα $V=1,5m/sec$. Για μεγαλύτερες τιμές των $16Kp$ κάθε αύξηση της πλάγιας δύναμης οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη αύξηση της αντίστασης από το τετράγωνο της SF . Βεβαίως όπως βλέπουμε και στο σχήμα, λόγω του πρώιμου φαινομένου stall, οι μέγιστες τιμές της πλάγιας δύναμης άρα και της αντίστασης είναι περιορισμένες για $\varphi=10^\circ$ και $\varphi=20^\circ$.

Για ταχύτητα $V=2 m/sec$ η αντίσταση τείνει να γίνει γραμμική καθ' όλο το εύρος των τιμών της πλάγιας δύναμης στο τετράγωνο.



Δ_11 : Ανάλυση της συνολικής αντίστασης συναρτήσει του SF^2 για $V=1,5$ m/sec και για δύο γωνίες εγκάρσιας κλίσης $\varphi=0^\circ$ και $\varphi=20^\circ$.



Δ_{12} : Ανάλυση της συνολικής αντίστασης συναρτήσει του SF^2 για $V=1,5$ m/sec και γωνίες εγκάρσιας κλίσης $\varphi=0^\circ$ και $\varphi=20^\circ$.

Διάγραμμα 11

Στο διάγραμμα 11 εμφανίζονται οι τιμές των συνιστωσών της αντίστασης: Η Ολική (total), η Αντίσταση στην Όρθια Θέση (Upright Resistance), η Αντίσταση η οφειλόμενη στην Εγκάρσια Κλίση (Resistance due to heel), η Επαγόμενη Αντίσταση (Induced Resistance), η Συνολική Αντίσταση με την μέθοδο Oossanen και η σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα.

Παρατηρούμε μια καλή σύμπτωση των τιμών για πλάγια δύναμη $SF=0$ και $\varphi=0^\circ$.

Η αντίσταση κατά Oossanen μεγαλώνει γραμμικά με το τετράγωνο της SF ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα προσεγγίζονται με 3^{ου} βαθμού καμπύλη που λαμβάνει υπόψη της τις μη γραμμικότητες τόσο από το τη γάστρα (Canoe body), μικρό AR , όσο και την επίδραση στις μεγάλες γωνίες απόκλισης. Βεβαίως για μικρές γωνίες απόκλισης ή SF^2 μπορεί να θεωρηθεί γραμμική.

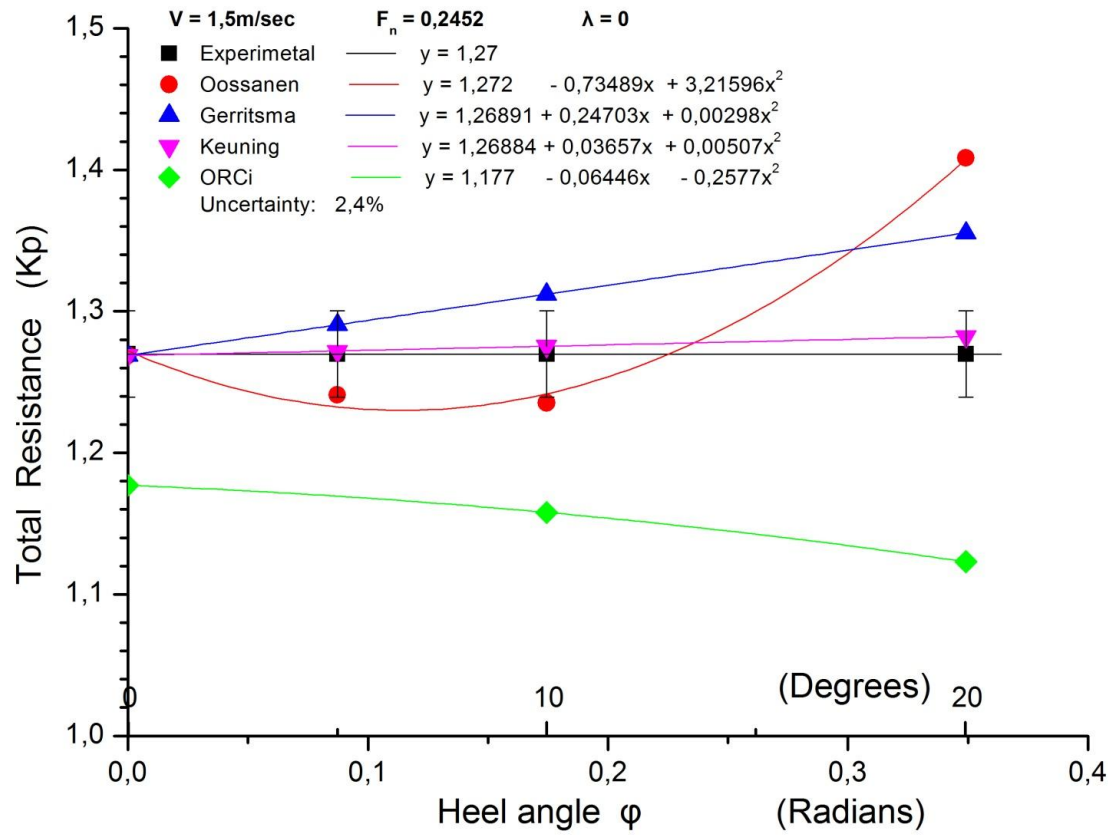
Η αντίσταση λόγο κλίσης κατά Oossanen, έχει μια δεδομένη τιμή, όπως φαίνεται στο σχεδιάγραμμα, που δεν επαληθεύεται όμως πειραματικά. Επίσης παρατηρούμε και αλλαγή κλίσης της καμπύλης για $\varphi=20^\circ$ που επίσης δεν επαληθεύεται πειραματικά.

Διάγραμμα 12

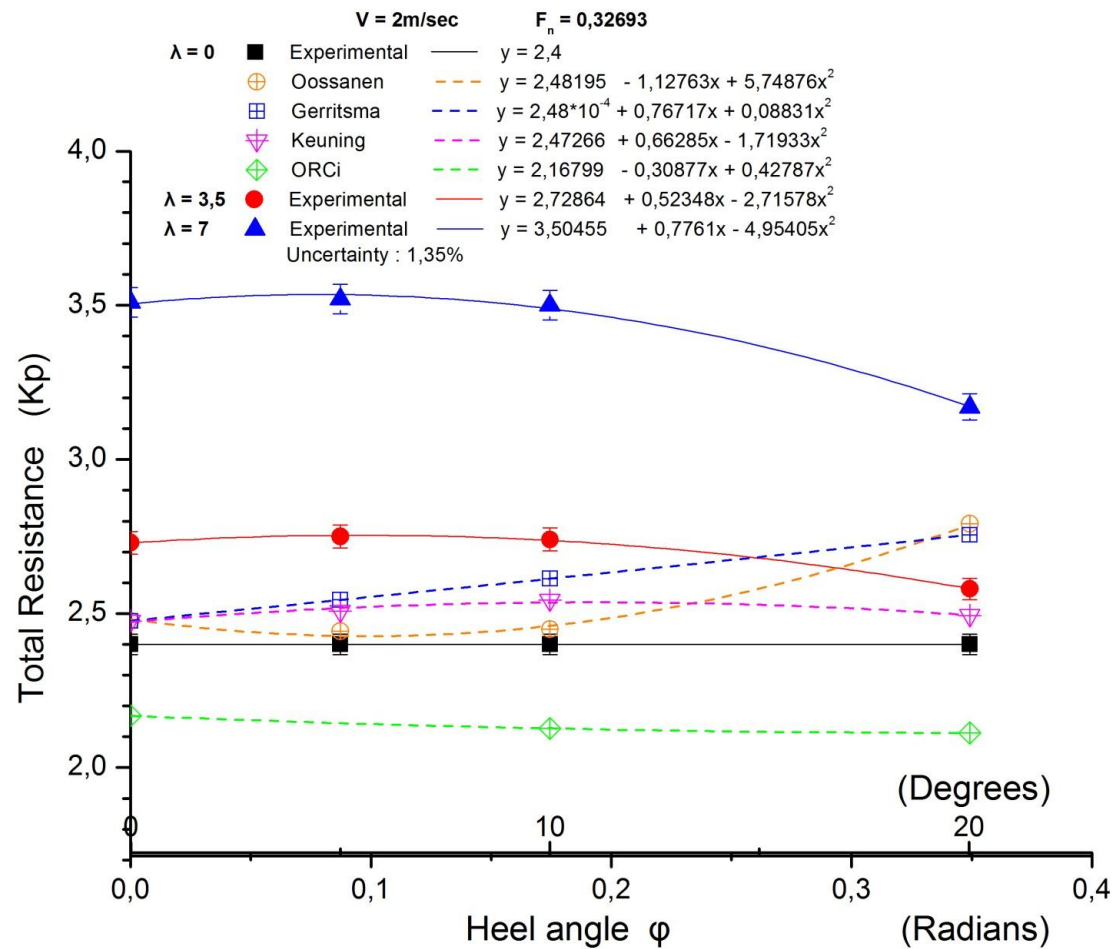
Στο διάγραμμα 12 εμφανίζονται οι τιμές των συνιστωσών της αντίστασης: Η Ολική (total), η Αντίσταση στην Όρθια Θέση (Upright Resistance), η Αντίσταση η οφειλόμενη στην Εγκάρσια Κλίση (Resistance due to heel), η Επαγόμενη Αντίσταση (Induced Resistance), η Συνολική Αντίσταση με την μέθοδο ORC_VPP 2012 και η σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα. Επίσης υπάρχει γραμμική εξάρτηση της αντίστασης με το τετράγωνο της πλάγιας δύναμης για το ORC VPP 2012.

Εδώ η τιμή της αντίστασης είναι μικρότερη από τα πειραματικά για πλάγια δύναμη $SF=0$ και $\varphi=0^\circ$. Ενώ η κλίση της ευθείας του της επαγόμενης αντίστασης (induced drag) παραμένει για το μεγαλύτερο μέρος κοντά στα πειραματικά.

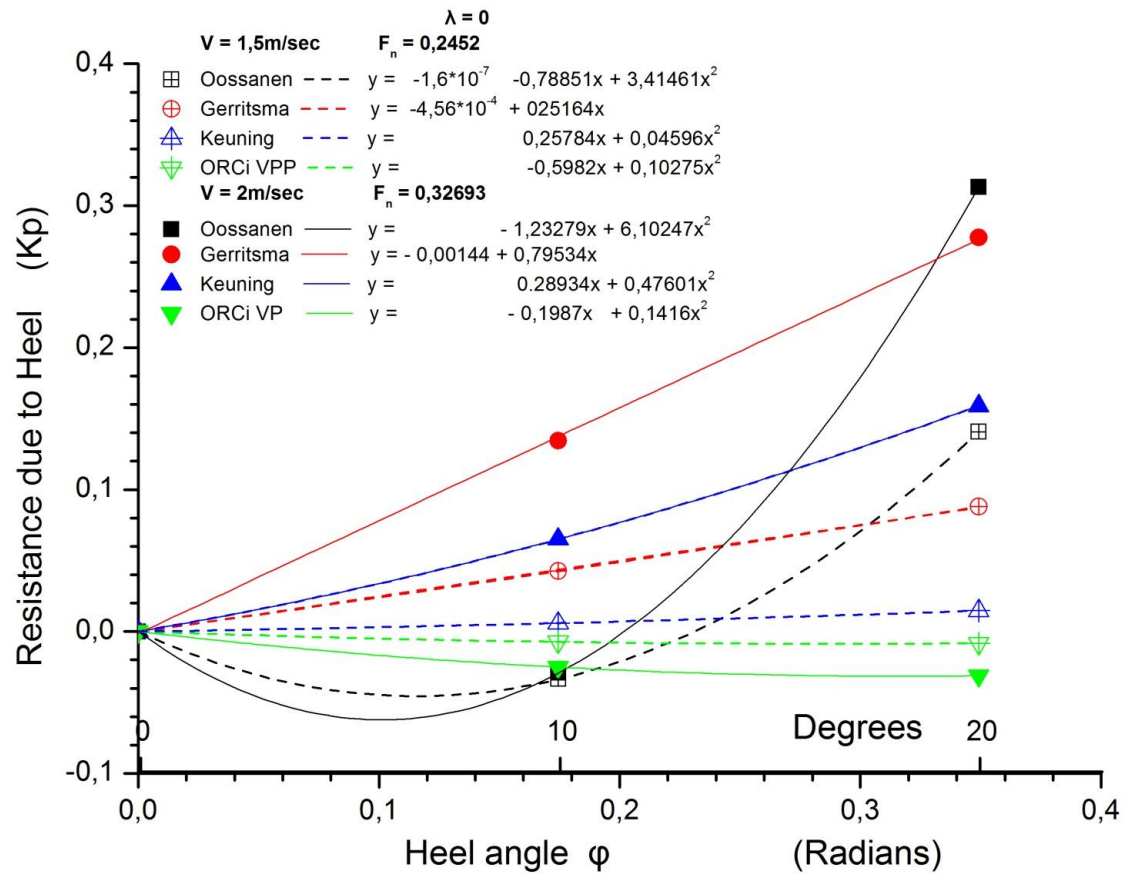
Η συνολική αντίσταση μειώνεται με την κλίση ($\varphi=20^\circ$) κατά ORC VPP, ενώ η κλίση τροποποιείται ελάχιστα.



Δ_13 : Συνολική αντίσταση συναρτήσει της γωνίας κλίσης φ για V=1,5 m/sec (Πειραματικά, Oossanen, Gerritsma, Keuning, VPP_ORC 2012)



Δ_14 : Συνολική αντίσταση συναρτήσει της γωνίας κλίσης φ για V=2 m/sec (Πειραματικά, Oossanen, Gerritsma, Keuning, VPP_ORC 2012) και Πειραματικά αποτελέσματα για γωνίες πλευρικής απόκλισης λ=3.5° και λ=7°



Δ_{15} : Ανάλυση της επιπλέον συνιστώσας της αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης, συναρτήσεως της εγκάρσιας κλίσης για ταχύτητες $V=1,5$ m/sec και $V=2$ m/sec.

Διάγραμμα 13

Η αντίσταση όπως προκύπτει από τα πειραματικά αποτελέσματα είναι σταθερή για $\lambda=0^\circ$, στην πράξη διαπιστώσαμε ότι έχει την τάση να μειώνεται ελάχιστα με την γωνία κλίσης. Η μείωση αυτή είναι κάτω από τα όρια στρογγύλλευσης και τα όρια του πειραματικού σφάλματος, άρα δεν είναι μετρήσιμη και μόνο σαν τάση μπορεί να καταγράφεται.

Η προσέγγιση κατά Keuning 2010 είναι πάρα πολύ κοντά στα πειραματικά δεδομένα και μέσα στα όρια του πειραματικού σφάλματος. Σημειώνουμε ότι για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση η αντίσταση λόγω κλίσης που υπολογίζει ο Keuning προστέθηκε στην ιξώδη (viscous) και υπόλοιπη (residual) αντίσταση κατά Oossanen.

Η προσέγγιση κατά Oossanen μπορεί να θεωρηθεί μέσα στα όρια πειραματικού σφάλματος μέχρι $\varphi=10^\circ$ αλλά ξεφεύγει για μεγαλύτερη γωνία εγκάρσιας κλίσης φ .

Η προσέγγιση Gerritsma καταγράφει μία αύξηση που δεν επαληθεύεται. Σημειώνουμε ότι για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση η αντίσταση λόγω κλίσης που υπολογίζει ο Gerritsma προστέθηκε στην ιξώδη (viscous) και υπόλοιπη (residual) αντίσταση κατά Oossanen.

Η προσέγγιση VPP ORC 2012 αν και παρουσιάζει μειωμένη τιμή συνολικής αντίστασης καταγράφει την τάση μείωσης της αντίστασης με την γωνία κλίσης.

Διάγραμμα 14

Η τάση μείωσης της συνολικής αντίστασης με την εγκάρσια κλίση στα πειραματικά δεδομένα είναι πιο εμφανής για $\lambda>0$ και εκτός ορίων πειραματικού σφάλματος άρα μετρήσιμη. Για $\lambda=0^\circ$ έχουμε πρακτικά σταθερή αντίσταση.

Η προσέγγιση κατά Keuning 2010 έχει μικρή διακύμανση με την γωνία εγκάρσιας κλίσης φ . Αν θεωρηθεί ότι ξεκινά από ίδια αντίσταση όρθιας θέσης (upright resistance) είναι μέσα στα όρια του πειραματικού σφάλματος. Σημειώνουμε ότι για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση η αντίσταση λόγω κλίσης που υπολογίζει ο Keuning προστέθηκε στην ιξώδη (viscous) και υπόλοιπη (residual) αντίσταση κατά Oossanen.

Η προσέγγιση κατά Oossanen έχει μεγαλύτερη τιμή αντίστασης όρθιας θέσης (upright resistance) από τα πειραματικά δεδομένα για $\varphi=0^\circ$, $\lambda=0^\circ$ για ταχύτητα $V=2\text{m/sec}$. Αν θεωρηθεί ίδια η αντίστασης όρθιας θέσης (upright resistance) με τα πειραματικά για $\varphi=0^\circ$, δείχνει να παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι $\varphi=10^\circ$ και αυξάνεται για μεγαλύτερη γωνία εγκάρσιας κλίσης φ .

Η προσέγγιση Gerritsma για $\lambda=0^\circ$ καταγράφει μία αύξηση με την γωνία εγκάρσιας κλίσης που δεν επαληθεύεται. Σημειώνουμε ότι για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση η αντίσταση λόγω κλίσης που υπολογίζει ο Gerritsma προστέθηκε στην στην ιξώδη (viscous) και υπόλοιπη (residual) αντίσταση κατά Oossanen.

Η προσέγγιση VPP ORC 2012 δείχνει μικρή μείωση της αντίστασης με την γωνία εγκάρσιας κλίσης φ . Το VPP ORC 2012 υπολογίζει την αντίσταση για κάθε γωνία φ χωριστά (viscous, residual).

Διάγραμμα 15

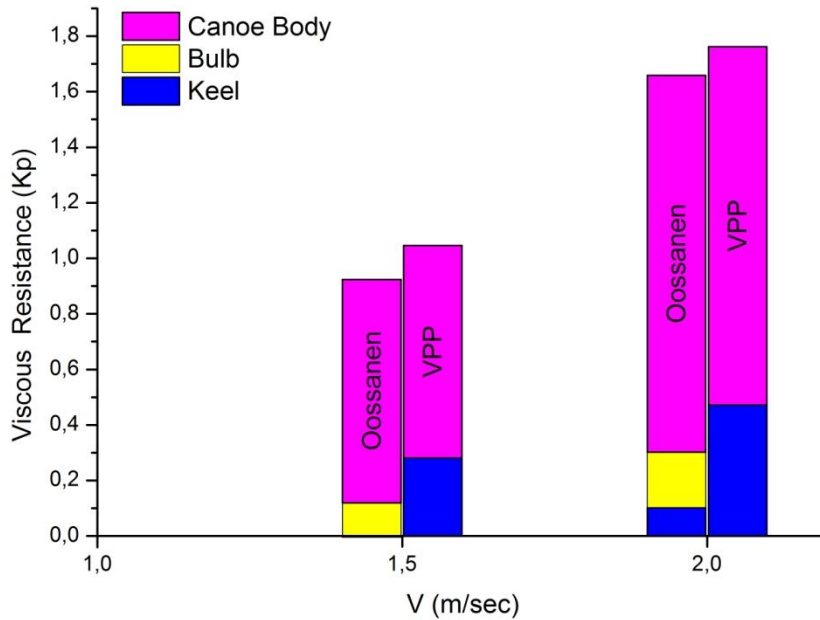
Ο υπολογισμός της αντίστασης λόγω εγκάρσιας κλίσης (Resistance due to heel) διαφέρει στις αναλύσεις:

Η προσέγγιση κατά Keuning 2010 καταγράφει μια ελάχιστη αύξηση με την γωνία εγκάρσιας κλίσης για ταχύτητα $V=1.5\text{ m/sec}$ και λίγο μεγαλύτερη για ταχύτητα $V=2\text{ m/sec}$.

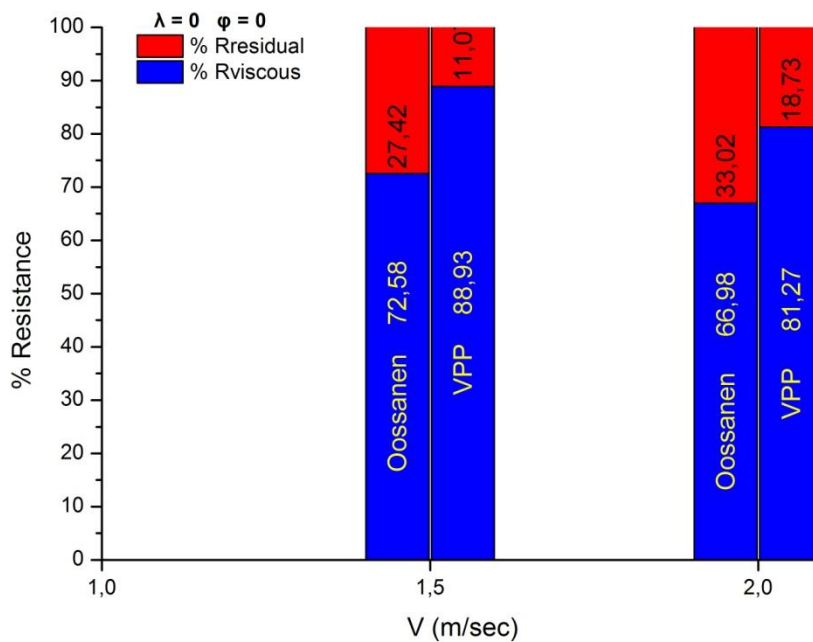
Η προσέγγιση κατά Oossanen καταγράφει μείωση για γωνίες εγκάρσιας κλίσης μικρότερες των $\varphi=10^\circ$ και μεγάλη αύξηση στην συνέχεια.

Η προσέγγιση Gerritsma καταγράφει μία αύξηση που δεν επαληθεύεται πειραματικά.

Η προσέγγιση κατά ORC_VPP 2012 καταγράφει μείωση της αντίστασης με την εγκάρσια κλίση, σε συμφωνία με αυτό που παρατηρούμε και πειραματικά. Σημειώνουμε ότι στο μοντέλο ORC_VPP 2012 υπολογίζεται η αντίσταση για κάθε κλίση χωριστά από τους παράγοντες που επηρεάζουν την αντίσταση L/B , B/T , LWL_{cor} , $L/Vol^{1/3}$.



Δ_16 : Ανάλυση της Viscous Resistance συναρτήσει της ταχύτητας κατά Oossanen και VPP_ORC 2012.



Δ_17 : Επί τοις εκατό (%) ποσοστό των συνιστωσών της αντίστασης στην συνολική αντίσταση Upright ($\phi=0^\circ$) για γωνία πλευρικής απόκλισης $\lambda=0^\circ$ και δύο ταχύτητες $V=1,5$ m/sec και $V=2$ m/sec.

Διάγραμμα 16

Παρατηρούμε, όπως και αναμενόταν άλλωστε ότι το μεγαλύτερο μέρος της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας (Viscous Resistance) προέρχεται από την γάστρα, το αμέσως επόμενο από το βολβό και ένα μικρό μέρος από την καρίνα, στην κατά Oossanen προσέγγιση. Μάλιστα για ταχύτητα 1.5 m/sec δεν είναι ορατό στο διάγραμμα (πολύ χαμηλό Reynolds, στρωτή ροή).

Στο ORC_VPP 2012 η καρίνα και ο βολβός αντιμετωπίζονται σαν ένα ενιαίο σύνολο (keel) και έτσι δεν μπορεί πρακτικά να γίνει διάκριση καρίνας και βολβού.

Παρατηρούμε επίσης ότι ενώ στον υπολογισμό της αντίστασης της γάστρας τα δύο προγράμματα έχουν κοντινές τιμές (ITTC'57, ο Oossanen περιλαμβάνει τον Form Factor k), το σύνολο της αντίστασης καρίνας βολβού δίνει μεγαλύτερη αντίσταση στο ORC_VPP 2012 από την αντίσταση του Oossanen. Έτσι και η συνολική αντίσταση λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance) στο ORC_VPP 2012 είναι αρκετά μεγαλύτερη εκείνης του Oossanen.

Διάγραμμα 17

Η συνολική αντίσταση αποτελείται από την αντίσταση λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance) και την υπόλοιπη αντίσταση (residual resistance).

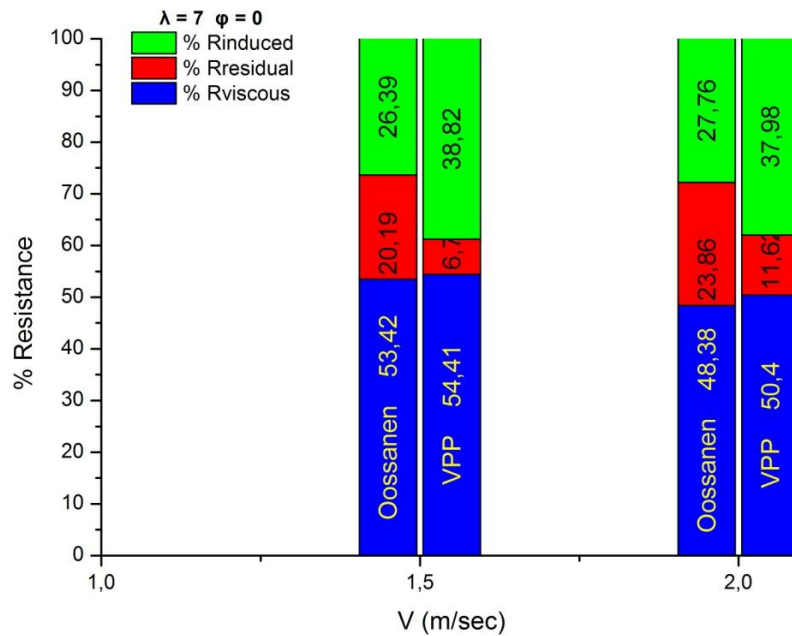
Παρατηρούμε μείωση του ποσοστού της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance) και αντίστοιχη αύξηση του ποσοστού της υπόλοιπης αντίστασης (residual resistance) με την ταχύτητα (λόγω της αντίστασης κυματισμού).

Είναι διαφορετικός ο υπολογισμός των αντιστάσεων λόγω συνεκτικότητας (viscous) και υπόλοιπης αντίστασης (residual) στα δύο

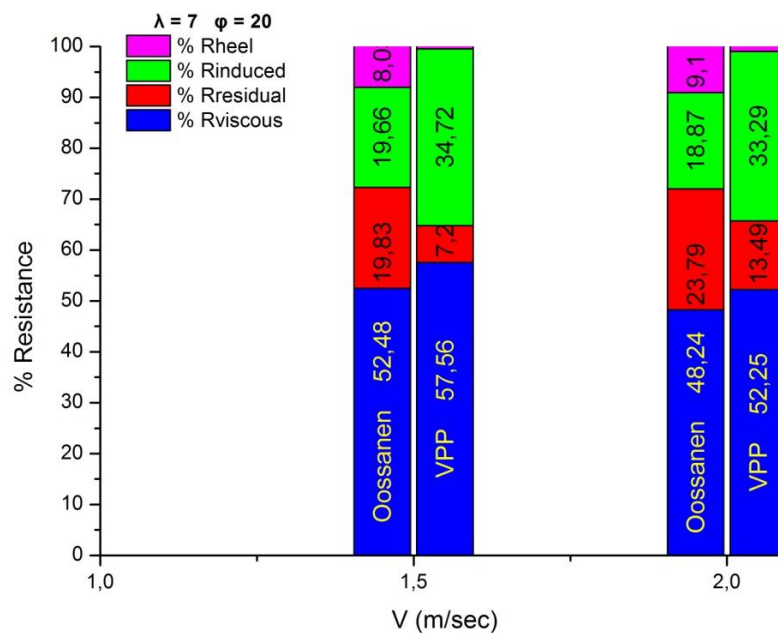
προγράμματα. Η υπόλοιπη αντίσταση (residual resistance) στο ORC_VPP 2012 είναι πολύ μικρότερη από αυτή στο VPP Oossanen. Το ποσοστό της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance) είναι από 67% μέχρι 89% ανάλογα με το πρόγραμμα και επομένως αποτελεί συντριπτικό ποσοστό της αντίστασης ακόμα και στην ταχύτητα 2 m/sec (Fr= 0.32693).

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ 17

Resistance	$\lambda = 0$		$\phi = 0$	
	V=1,5m/sec, $F_n = 0,2452$		V=2m/sec, $F_n = 0,32693$	
	Oossanen	ORC-VPP	Oossanen	ORC-VPP
Viscous	72,58	88,93	66,98	81,27
Residual	27,42	11,07	33,02	18,73



Δ_{18} : Επί τοις εκατό (%) ποσοστό των συνιστωσών της αντίστασης στην συνολική αντίσταση Upright ($\varphi=0^\circ$) για γωνία πλευρικής απόκλισης $\lambda=7^\circ$ και δύο ταχύτητες $V=1,5$ m/sec και $V=2$ m/sec.



Δ_{19} . Επί τοις εκατό (%) ποσοστό των συνιστωσών της αντίστασης στην συνολική αντίσταση για γωνία εγκάρσιας κλίσης ($\varphi=20^\circ$), γωνία πλευρικής απόκλισης $\lambda=7^\circ$ και δύο ταχύτητες $V=1,5$ m/sec και $V=2$ m/sec.

Διάγραμμα 18

Η συνολική αντίσταση αποτελείται από τις αντιστάσεις:

- Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance),
- Υπόλοιπη αντίσταση (residual resistance) και
- Επαγόμενη αντίσταση (induced resistance).

Είναι διαφορετικός ο υπολογισμός των ανωτέρω αντιστάσεων στα δύο προγράμματα. Η υπόλοιπη αντίσταση (residual resistance) στο ORC_VPP 2012 είναι πολύ μικρότερη από αυτή στο VPP Oossanen σε αντίθεση με την επαγόμενη αντίσταση (induced resistance) η οποία είναι μεγαλύτερη.

Το ποσοστό της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance) αποτελεί το 50% περίπου της συνολικής αντίστασης. Η επαγόμενη αντίσταση (induced resistance) που κυμαίνεται από 26% μέχρι 39% ανάλογα με το πρόγραμμα και την ταχύτητα αποτελεί επίσης ένα πολύ σημαντικό ποσοστό της αντίστασης.

Παρατηρούμε επίσης μείωση του ποσοστού της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance) και την αύξηση της υπόλοιπης αντίστασης (residual resistance) με την ταχύτητα (λόγο της αντίστασης κυματισμού).

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ 18

Resistance	$\lambda = 7$		$\phi = 0$	
	$V=1,5\text{m/sec, } F_n = 0,2452$		$V=2\text{m/sec, } F_n = 0,32693$	
	Oossanen	ORC-VPP	Oossanen	ORC-VPP
Viscous	53,42	54,41	48,38	50,4
Residual	20,19	6,77	23,86	11,62
Induced	26,39	38,82	27,76	37,98

Διάγραμμα 19

Η συνολική αντίσταση αποτελείται από τις αντιστάσεις:

- Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance),
- Υπόλοιπη αντίσταση (residual resistance),
- Επαγόμενη αντίσταση (induced resistance) και
- Αντίσταση οφειλόμενη στην εγκάρσια κλίση (resistance due to heel)

Είναι διαφορετικός ο υπολογισμός όλων των ανωτέρω αντιστάσεων στα δύο προγράμματα. Η υπόλοιπη αντίσταση (residual resistance) και η αντίσταση οφειλόμενη στην εγκάρσια κλίση (resistance due to heel) στο ORC_VPP 2012 είναι πολύ μικρότερες από αυτές στο VPP Oossanen, σε αντίθεση με την επαγόμενη αντίσταση (induced resistance) η οποία είναι μεγαλύτερη.

Το ποσοστό της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας (viscous resistance) αποτελεί το 50% περίπου της συνολικής αντίστασης. Η επαγόμενη αντίσταση (induced resistance) που κυμαίνεται από 20% μέχρι 35% ανάλογα με το πρόγραμμα και την ταχύτητα αποτελεί επίσης ένα πολύ σημαντικό ποσοστό της αντίστασης. Η υπόλοιπη αντίσταση (residual resistance) κυμαίνεται από 7% μέχρι 24% ανάλογα με το πρόγραμμα και την ταχύτητα, ενώ η αντίσταση η οφειλόμενη στην εγκάρσια κλίση (resistance due to heel) αποτελεί το μικρότερο ποσοστό (0.5% - 9% ανάλογα με το πρόγραμμα και την ταχύτητα).

Παρατηρούμε επίσης μείωση του ποσοστού της viscous resistance και την αύξηση της residual resistance και της αντίστασης due to heel με την ταχύτητα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ 19

Resistance	$\lambda = 7$		$\varphi = 20$	
	V=1,5m/sec, $F_n = 0,2452$		V=2m/sec, $F_n = 0,32693$	
	Oossanen	ORC-VPP	Oossanen	ORC-VPP
Viscous	52,48	57,56	48,24	52,25
Residual	19,83	7,24	23,79	13,49
Induced	19,66	34,72	18,87	33,29
Heel	8,03	0,48	9,1	0,97

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. MARCHAJ C. A., “Aero-Hydrodynamics of Sailing”, Granada Publishing, 1978.
2. ΛΟΥΚΑΚΗΣ Θ. Α. - ΓΡΗΓΟΡΟΠΟΥΛΟΣ Γ. Ι., «Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών», ΕΜΠ, Αθήνα, 1996.
3. OOSSANEN P. van, “Predicting the Speed of Sailing Yachts”, SNAME Transactions, Vol. 101, pp 337-397, (1993).
4. WHITE F. “Fluid Mechanics”, 4th ed. McGraw-Hill.
5. ΤΣΑΓΓΑΡΗΣ Σ. «Μηχανική των Ρευστών», Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα 2005.
6. OERTEL HERBERT, Editor, “Prandtl’s Essentials of Fluid Mechanics”, 2nd ed. Springer-Verlag N. York, 2004.
7. KUNDU P.-COHEN I., “Fluid Mechanics”, 2nd ed. Academic Press, 2002.
8. J. A. KEUNING AND M. KATGERT, “The influence of heel on the bare hull, resistance of sailing yacht”, The 2nd International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts, Lorient, France. 2010:Royal Institution of Naval Architects.
9. VPP ORC 2012 Documentation, Offshore Racing Congress (www.orc.org)