

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ,ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεωρητικά στοιχεία για υδροπτερύγια αγωνιστικών σκαφών και εισαγωγή στην υπολογιστική τους διερεύνηση.

Ιουλία Ντινοπούλου

246597

Επιβλέποντες Διονύσιος Μάργαρης, Ομότιμος Καθηγητής Θρασύβουλος Πανίδης, Καθηγητής

ПАТРА, 02/2023

ΠανεπιστήμιοΠατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών Ιουλία Ντινοπούλου

©2023 -Μετηνεπιφύλαξηπαντόςδικαιώματος

Η έγκριση της σπουδαστικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

Θεωρητικά στοιχεία για υδροπτερύγια αγωνιστικών σκαφών και εισαγωγή στην υπολογιστική τους διερεύνηση.

Ιουλία Ντινοπούλου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά την ροή γύρω από υδροπτερύγια παρουσιάζονται δυνάμεις που δρουν πάνω τους, η δύναμη οπισθέλκουσας και η δύναμη άνωσης. Η συγκεκριμένη σπουδαστική εργασία επικεντρώθηκε στην παρουσίαση των εισαγωγικών στοιχείων για την υπολογιστική διερεύνηση των δυνάμεων οπισθέλκουσας και άνωσης σε τρεις υδροτομές της σειράς ΝΑCA καθώς και στην θεωρητική ανάλυση αυτών. Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή στα βασικά στοιχεία που διέπουν την αρχή λειτουργίας των υδροπτερυγίων και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Έπειτα παρουσιάζονται τα μοντέλα υδροτομών που λάβαμε υπόψη μας και πόσο έντονα μεταβάλλονται οι συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας με βάση την γεωμετρία, την κλίση της γωνίας προσβολής και την ταχύτητα του ρευστού. Τέλος, εμφανίζεται η διερεύνηση μέσω του υπολογιστικού περιβάλλοντος του προγράμματος ANSYS Fluent των υδροτομών και των εξισώσεων που το διέπουν.

Λέξεις κλειδιά: συντελεστής άνωσης, συντελεστής οπισθέλκουσας, γωνία προσβολής.

Theoretical elements of racing hydrofoils and an introduction to their computational investigation

Ioulia Ntinopoulou

ABSTRACT

During the flow around hydrofoils, there are forces that act on them, the drag force and the lift force. This academic work focused on the presentation of introductory data for the computational investigation of drag and lift forces on three NACA series hydrofoils as well as the theoretical analysis. First, an introduction is made to the basic elements that govern the operating principle of hydrofoils and their geometric characteristics. We then present the hydrofoil models of NACA and how intense the lift and the drag coefficients vary, based on the geometry, angle of attack and fluid velocity. Finally, the investigation through the computational environment of ANSYS Fluent based on these hydrofoils and the governing equations is presented.

Key words: lift coefficient, drag coefficient, angle of attack.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.Βασικά χαρακτηριστικάμιας υδροτομής[8]	3
Εικόνα 2. Ροή πάνω από αεροτομή που απεικονίζεται με απλές γραμμές, γραμμές σή	μανσης και
διανύσματα δύναμης [10]	9
Εικόνα 3: Οριακό στρώμα στην επάνω επιφάνεια αεροτομής και το πάχος του, δ[13].	10
Εικόνα 4. Υδροπτερύγια στην περιοχή της καρίνας και του πηδαλίου [18]	12
Εικόνα 5. Πλεύση σκάφους πάνω από την επιφάνεια του νερού [19]	12
Εικόνα 6. (a) Σκάφος με υδροπτερύγιο τύπου «Τ» [20] και (b) αγωνιστικό catamara	n με τύπου
«L»	13
Εικόνα 7: Η αεροτομή ΝΑCA63-618	14
Εικόνα 8: Η αεροτομή ΝΑCA63-218	15
Εικόνα 9: Η αεροτομή ΝΑCA4418	16
Εικόνα 10: Κοντινή όψη του πλέγματος που προκύπτει για την υδροτομή ΝΑCA63-61	1820
Εικόνα 11: Απεικόνιση ολόκληρου του πλέγματος που προκύπτει για την υδροτομή	NACA63-
618	21
Εικόνα 12. Υπολογισμός του συντελεστή οπισθέλκουσας (Cd)	25
Εικόνα 13. Υπολογισμός του συντελεστή άνωσης (Cl)	

Σύμβολα	Επεξήγηση
ρ	Πυκνότητα νερού
V	Ταχύτητα ιστιοπλοϊκού
S	Επιφάνεια υδροτομής
cl	Συντελεστής άνωσης
cd	Συντελεστής αντίστασης
α	Γωνία προσβολής
$\overrightarrow{V}_{\chi}$	Αξονική ταχύτητα
\overrightarrow{V}_r	Ακτινική ταχύτητα
\overrightarrow{g}	Βαρυτικές δυνάμεις
р	Στατική πίεση
\overrightarrow{V}_{Z}	Ταχύτητα δίνης
$\overline{\overline{ au}}$	Τανυστής τάσης
\overrightarrow{F}	Εξωτερικές δυνάμεις
μ	Μοριακό ιξώδες
Ι	Τανυστής μονάδας
x	Αξονική συντεταγμένη
r	Ακτινική συντεταγμένη

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

xiii

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	V
ABSTRACT	VII
<u>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</u>	IX
<u>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ</u>	XI
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ	XV
<u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u>	1
<u>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	3
<u>2. ΟΙ ΥΔΡΟΤΟΜΕΣ</u>	5
<u>2.1. ΧΡΗΣΕΙΣ ΥΔΡΟΤΟΜΩΝ</u>	5
<u>2.2. ΟΙ ΥΔΡΟΠΤΕΡΥΓΕΣ ΝΑCA</u>	5
<u>2.2.1. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΤΟΜΩΝ</u>	6
<u>2.2.2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΠΤΕΡΥΓΙΩΝ</u>	8
<u>2.3. ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΓΗΘΗΚΑΝ</u>	13
<u>3. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΥΔΡΟΤΟΜΩΝ ΣΤΟ ANSYS</u>	17
<u>3.1. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYSFLUENT</u>	17
<u>3.2. ΔΗΜΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ</u>	19
<u>3.3. ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ</u>	23
<u>3.4. ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ CL ΚΑΙ CD</u>	25
<u>4. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ</u>	27
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος	xiv

<u>3ΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u> 28

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας σπουδαστικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες της εργασίας μου, Καθ. Θρασύβουλο Πανίδη και Ομότ.Καθ. Διονύσιο-Ελευθέριο Μάργαρη, για την αμέριστη υπομονή τους, την πολύτιμη καθοδήγηση τους, καθώς και την άριστη συνεργασία. Με την άμεση ανταπόκριση και βοήθεια τους σε κάθε ζήτημα που προέκυψε, κατέστησαν δυνατή την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω το σύνολο των καθηγητών του τμήματος για τις γνώσεις που αποκόμισα καθ' όλη την διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Τέλος, ευχαριστώ εγκάρδια την οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξη τους όλο αυτό το διάστημα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ροή πάνω από ένα δισδιάστατο υδροπτέρυγο δείχνει διαφορετικά χαρακτηριστικά υδροδυναμικής και δυναμικής ροής, τα οποία βασικά εξαρτώνται από το σχήμα του υδροπτέρυγιου και τις παραμέτρους ελεύθερης ροής.

Το σχήμα και η γωνία προσβολής της υδροτομής καθορίζει την κατανομή της πίεσης που αντιστοιχεί στη μεταβολή των δυνάμεων άνωσης και οπισθέλκουσας [1]. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη δυναμική ροής είναι ο αριθμός Mach, η γωνία προσβολής (AOA) και ο αριθμός Reynolds[2]. Σε χαμηλό αριθμό Reynolds και σε μικρή γωνία προσβολής η ροή παραμένει στρωτή κοντά στο πρόσθιο άκρο της υδροτομής, αλλά σε υψηλότερο αριθμό Reynolds και αυξανόμενη γωνία προσβολής το υγρό αρχίζει να διαχωρίζεται κοντά στο πίσω άκρο σχηματίζοντας δίνες. Ο διαχωρισμός του οπίσθιου άκρου κινείται ανάντη και η διαχωρισμένη ροή αυξάνεται με την αυξανόμενη γωνία προσβολής. Αυτός ο διαχωρισμός ροής και ο σχηματισμός στροβίλων κάνει τη ροή να ταλαντώνεται και αυτό το φαινόμενο ονομάζεται στροβιλισμός[3].

Οι κύριες δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την ροή πάνω σε ένα υδροπτερύγιο, είναι η δύναμη άνωσης και η δύναμη αντίστασης. Η συνιστώσα της δύναμης που έχει την κατεύθυνση της ροής του νερού ονομάζεται «αεροδυναμική δύναμη αντίστασης» (DragForce) και υπολογίζεται:

 $D = \frac{1}{2}\rho V^2 SC_D.$ Η δύναμη που είναι κάθετη στην δύναμη αντίστασης ονομάζεται «αεροδυναμική δύναμη άνωσης» (Liftforce) και υπολογίζεται μαθηματικά ως εξής: $L = \frac{1}{2}\rho V^2 SC_L.$ [4]

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται τα στοιχεία που απαιτούνται για την υπολογιστική διερεύνηση μέσω του ANSYSFluent, της ροής πάνω από τα προφίλ υδροτομών NACA4418, NACA 63-218 και NACA 63-618 για γωνίες προσβολής -12°, -6°, -4°, -2°, 0°, 2°, 4°, 6°, 12° και για ταχύτητες 6 m/s και 10m/s. Ο σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθούν θεωρητικά και να γίνει η εισαγωγή των στοιχείων (γεωμετρίες, οριακές συνθήκες) αντίστοιχα σε κάθε περίπτωση υδροτομής. Τα αποτελέσματα και η υπολογιστική διερεύνηση θα πραγματοποιηθούν στην διπλωματική εργασία που έπεται μετά την παρούσα σπουδαστική.

2. ΟΙ ΥΔΡΟΤΟΜΕΣ

Οι υδροτομές είναι αντικείμενα κατάλληλα σχεδιασμένα ώστε να αναπτύσσουν σημαντική δυναμική άνωση (lift) και ταυτόχρονα μικρή αντίσταση (drag). Οι υδροτομές και οι αεροτομές χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε αντικείμενα που κινούνται στο νερό ή στον αέρα, αντίστοιχα. Γιά παράδειγμα, η τομή πτέρυγας του αεροπλάνου, πτερυγίου προπέλλας, πηδαλίου πλοίου έχουν σχήμα υδροτομής[5].

2.1. ΧΡΗΣΕΙΣ ΥΔΡΟΤΟΜΩΝ

Ένα υδροπτέρυγο μπορεί να είναι οριζόντιο για να παρέχει κάθετη στήριξη, κατακόρυφο για πλευρικούς ελιγμούς ή συνδυασμός και των δύο.Τα δύο κύρια είδη υδροπτέρυγων που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι τα επιφανειακά και τα βυθισμένα.[6]

Ένα βαθιά βυθισμένο υδροπτέρυγο συμπεριφέρεται σαν ένα κλασικό φύλλο αλουμινίου στον αέρα ή το νερό. Ωστόσο, τα περισσότερα υδροπτέρυγα λειτουργούν σε σχετικά κοντινή απόσταση από μια ελεύθερη επιφάνεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολύπλοκη συμπεριφορά, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας άνωσης, της δημιουργίας πεδίου κύματος με προκύπτουσα αντίσταση, αερισμού ελεύθερης επιφάνειας με απώλεια άνωσης και σπηλαίωσης σε υψηλές ταχύτητες με απώλεια άνωσης. Οι εφαρμογές των υδροπτερυγίων περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων υποστηριζόμενα από υδροπτερύγια εμπορικά σκάφη, γιοτ που υποστηρίζονται από υδροπτέρυγια, σανίδες αλουμινίου, καρίνες γιοτ, υποβρύχια φτερά ανεμόπτερου και κινητές επιφάνειες ελέγχου, όπως πηδάλια, πτερύγια σταθεροποίησης και υδροπλάνα.[6]

2.2. ΟΙ ΥΔΡΟΠΤΕΡΥΓΕΣ ΝΑCΑ

Η πρώιμη σειρά αεροτομών NACA, η 4ψήφια, 5ψήφια και τροποποιημένη 4-/5ψήφια, δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας αναλυτικές εξισώσεις που περιγράφουν την καμπυλότητα (καμπυλότητα) της μέσης γραμμής (γεωμετρική κεντρική γραμμή) του το τμήμα της αεροτομής καθώς και η κατανομή του πάχους του τμήματος κατά μήκος της αεροτομής.[7]

Η πρώτη οικογένεια αεροτομών που σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας αυτή την προσέγγιση έγινε γνωστή ως NACA Four-Digit Σειρά. Το πρώτο ψηφίο καθορίζει τη μέγιστη κάμπερ (m) σε ποσοστό της χορδής (μήκος αεροτομής), το δεύτερο δείχνει τη θέση της μέγιστης καμπέρας (p) σε δέκατα της χορδής και τα δύο τελευταία Οι αριθμοί παρέχουν το μέγιστο πάχος (t) της αεροτομής σε ποσοστό χορδής.[7]

Η σειρά πέντε ψηφίων της NACA χρησιμοποιεί τις ίδιες φόρμες πάχους με τη σειρά τεσσάρων ψηφίων, αλλά η μέση γραμμή κύρτωμα ορίζεται διαφορετικά και η σύμβαση ονομασίας είναι λίγο πιο περίπλοκη. Το πρώτο ψηφίο, όταν πολλαπλασιαστεί επί 3/2, αποδίδει τον σχεδιαστικό συντελεστή άνωσης (cl) σε δέκατα. Τα επόμενα δύο ψηφία, όταν διαιρούνται με το 2, δίνουν τη θέση του μέγιστου κάμπερ (p) σε δέκατα της χορδής. Τα τελευταία δύο ψηφία υποδεικνύουν και πάλι το μέγιστο πάχος (t) σε ποσοστό χορδής.[7]

2.2.1. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΡΟΤΟΜΩΝ

Μια λεπτομερής αναπαράσταση μίας υδροτομής και η ορολογία που την διέπειπαρουσιάζεται στηνΕικόνα 1. Η υδροτομή έχει πάνω και κάτω επιφάνεια. Στις περισσότερες υδροτομές, η καμπυλότητα της άνω επιφάνειας είναι μεγαλύτερηαπό αυτή της κάτω επιφάνειας. Τα σημεία

τομής τωνδύο επιφανειών στις εμπρός και πίσω περιοχές είναιγνωστά ως ακμή προσβολής και ακμή εκφυγής, αντίστοιχα. Ηεπίπεδη γραμμή που συνδέει την ακμή προσβολής και την ακμή εκφυγήςονομάζεται χορδή της αεροτομής και το μήκος της συμβολίζεται με c. Η μέση γραμμή είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που ισαπέχουν από την πάνω και την κάτω επιφάνεια της υδροτομής. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ της χορδής και της μέσης γραμμής είναι γνωστή ως γραμμή camber. Η κάθετη στην γραμμή χορδής απόσταση μεταξύ της άνω καιτης κάτω επιφάνειας είναι το πάχος του υδροπτερυγίου. Τέλος, η γωνία προσβολής, η οποία συμβολίζεται ως α είναι η γεωμετρική γωνίαμεταξύ του διανύσματος σχετικής ταχύτητας, U_{rel} και της χορδής.[8]



Εικόνα 1. Βασικά χαρακτηριστικάμιαςυδροτομής[8].

Οι υδροτομές χαρακτηρίζονται από τις συντεταγμένες τόσο της άνω όσο και της κάτω επιφάνειας. Γενικάαριθμούνται χρησιμοποιώντας μερικές παραμέτρους όπως το μέγιστο πάχος,

την μέγιστηκαμπύλη camber, τη θέση του μέγιστου πάχους, τη θέση της μέγιστηςcamber και την ακτίνα της «μύτης».

2.2.2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΥΔΡΟΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό να διευκρινιστεί ο τρόπος λειτουργίας των υδροπτερύγων και η φυσική αυτών, λογική η οποία είναι πανομοιότυπη με αυτήν μιας αεροτομής. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο υδροπτέρυγο είναι η δύναμη αντίστασης ή οπισθέλκουσα, D, δύναμη άνωσης, L και ροπή κλίσης, MP. Η δύναμη έλξης είναι η δύναμη που ασκείται στο σώμα από το ρευστό, παράλληλα με την κατεύθυνση ροής. Η τριβή λόγω ιξώδους και οι άνισες πιέσεις στις επιφάνειες των υδροπτέρυγων προκαλούν τη δύναμη οπισθέλκουσας [8]. Όταν το ρευστό κινείται πάνω από το υδροπτέρυγο, η ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού στην επάνω επιφάνεια γίνεται υψηλότερη από αυτή της κάτω επιφάνειας λόγω της καμπυλότητας της και της γωνίας προσβολής. Η υψηλή ταχύτητα δημιουργεί μια ζώνη χαμηλής πίεσης στην επάνω επιφάνεια του υδροπτέρυγου ενώ η χαμηλή ταχύτητα στην κάτω επιφάνεια δημιουργεί μια ζώνη υψηλής πίεσης. Η άνιση κατανομή πίεσης μεταξύ δύο επιφανειών της υδροτομής δημιουργεί τη δύναμη άνωσης. Η κατεύθυνση της δύναμης άνωσης είναι κάθετη στη γραμμή χορδής. Ομοίως, η ροπή κλίσης προέρχεται ως συνάρτηση του ολοκληρώματος των ροπών των δυνάμεων πίεσης πάνω στις επιφάνειες της υδροτομής. Το σημείο εφαρμογής αυτών των τριών φορτίων στο υδροπτέρυγο είναι γενικά αποδεκτό ότι βρίσκεται σε απόσταση c/4 από την πρόσθια ακμή στη γραμμή χορδής. Τα υδροδυναμικά φορτία ποικίλλουν ανάλογα με την ταχύτητα ροής, την πυκνότητα του ρευστού και την μετωπική επιφάνεια καθώς και με το μέγεθος, το σχήμα και τον προσανατολισμό του σώματος[8,9].



Εικόνα 2. Ροή πάνω από αεροτομή που απεικονίζεται με απλές γραμμές, γραμμές σήμανσης και διανύσματα δύναμης [10].

Με δεδομένο τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε ότι σε γενικές γραμμές η άνωση αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης. Σε μεγάλες όμως γωνίες προσβολής η άνωση μειώνεται και παρατηρούνται έντονα φαινόμενα τύρβης και αστάθειας, λόγω έντονης αποκόλλησης των ροϊκών γραμμών από το σώμα της αεροτομής [11].

<u>Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ REYNOLD, ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ</u> ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Ο όρος οριακό στρώμα περιγράφει ένα λεπτό στρώμα παχύρρευστου υγρού κοντά στην επιφάνεια του στερεού. Μέσα στο οριακό στρώμα, η ταχύτητα της ροής κινείται από το μηδέν στην επιφάνεια όπου το υγρό προσκολλάται στο τοίχωμα λόγω του ιξώδους, μέχρι την ταχύτητα Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος 9

που αντιστοιχεί στην ταχύτητα της ανεπηρέαστης ροής υγρού, στην άκρη του οριακού στρώματος. Η τιμή του πάχους του οριακού στρώματος εξαρτάται από την τάση τριβής, εκφράζοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ των μορίων του υγρού και του στερεού. Η μέγιστη τιμή της τάσης τριβής εμφανίζεται στην επιφάνεια του στερεού και στη συνέχεια μειώνεται στο μηδέν στην άπειρη απόσταση από το στερεό. Η βασική ιδέα του οριακού στρώματος εισήχθη από τον LudwigPrandtl. Μιλάει για το οριακό στρώμα ως στρώμα που σχηματίζεται σε ρεύμα, το οποίο έχει σχετικά χαμηλό ιξώδες σε σύγκριση με τις εσωτερικές δυνάμεις.[12]



Εικόνα 3: Οριακό στρώμα στην επάνω επιφάνεια αεροτομής και το πάχος του, δ[13].

Ο αριθμός Reynolds (Re) έχει μεγάλη σημασία στη συμπεριφορά των υδροτομών. Όταν ο αριθμός Re μειώνεται, το σχετικό μέγεθος των ιξωδών δυνάμεων γίνεται μεγαλύτερο από τις δυνάμεις αδράνειας. Έτσι, η επιφανειακή τριβή και οι κλίσεις πίεσης αυξάνονται[8]. Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συντελεστή οπισθέλκουσας και μείωση του συντελεστή άνωσης[14]. Στις συμμετρικέςυδροτομές, ο συντελεστής άνωσης είναι μηδέν για μηδενική γωνία προσβολής (α). Σε χαμηλή γωνία προσβολής, ο συντελεστής άνωσης είναι μικρός και αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της γωνίας προσβολής. Το Cl μπορεί να αυξηθεί Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος

σε χαμηλή τιμή α χρησιμοποιώντας μια αεροτομή με υψηλή καμπυλότητα[14,15]. Αφού το α φτάσει σε ένα συγκεκριμένο σημείο, παρατηρείται απότομη πτώση στην απόδοση της υδροτομής. Αυτό το σημείο είναι γνωστό ως μέγιστη ανύψωση. Η συμπεριφορά άνωσης είναι λίγο πολύ η ίδια για αρνητική γωνία προσβολής [14,15]. Γενικά, ο συντελεστής οπισθέλκουσας αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας προσβολής.

2.2.3. Η ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΣΤΗΝ ΙΣΤΙΟΠΛΟΪΑ

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της χρήσης και της αποτελεσματικότητας των υδροπτερυγίων είναι στην αγωνιστική ιστιοπλοΐα. Τα αγωνιστικά σκαφίδια που χρησιμοποιούνται στο άθλημα αυτό, είναι εξοπλισμένα με υδροπτέρυγες (hydrofoils) τοποθετημένες στην περιοχή της καρίνας και του πηδαλίου[16,17]. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι τα σκαφίδια να αγγίζουν μεγάλες ταχύτητες πορείας και σε ορισμένες περιπτώσεις μέγιστες, καθώς παρατηρείται το λεγόμενο «flyinghydrofoilsboats». Το φαινόμενο αυτό επιτυγχάνεται πάνω από κάποιες συγκεκριμένες ταχύτητες (άνω τον 20 κόμβων), όπου το κύτος του σκάφους αναγκάζεται εξολοκλήρου να ανασηκωθεί από την επιφάνεια του νερού [16,17].



Εικόνα 4. Υδροπτερύγια στην περιοχή της καρίνας και του πηδαλίου[18].



Εικόνα 5. Πλεύση σκάφους πάνω από την επιφάνεια τουνερού [19].

Τα πτερύγια αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τα «T-shapedhydrofoils» και τα «Lshapedhydrofoils». Τα πρώτα χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρά σκάφη και έχουν σχήμα «T» ενώ τα δεύτερα ως επί το πλείστον σε αγωνιστικά τύπου Catamaranμε διπλό κύτος[16,17].



(a) (b) Εικόνα 6.(a) Σκάφος με υδροπτερύγιο τύπου «Τ»[20] και (b) αγωνιστικό catamaranμε τύπου «L» υδροπτερύγια[21].

2.3. ΑΕΡΟΤΟΜΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙ ΗΘΗΚΑΝ

Στην παρούσα εργασία οι υδροτομές που χρησιμοποιήθηκαν και μελετήθηκαν είναι η υδροτομή τεσσάρων ψηφίων NACA 4418 και οι υδροτομές πέντε ψηφίων NACA63-618 και NACA63-218.

NACA63-618

Η αεροτομή NACA 63-618 έχει μέγιστο πάχος 18%, συντελεστή άνωσης σχεδιασμού 0,9 και μέγιστο κύρτωμα που βρίσκεται 18% πίσω από το μπροστινό άκρο.



Εικόνα 7: Η αεροτομή ΝΑCA63-618.

NACA63-218

Η αεροτομή NACA 63-218 έχει μέγιστο πάχος 18%, συντελεστή άνωσης σχεδιασμού 0,9 και μέγιστο κύρτωμα που βρίσκεται 16% πίσω από το μπροστινό άκρο.



Εικόνα 8: Η αεροτομή ΝΑCA63-218.

NACA4418

Η αεροτομή NACA 4418 έχει μέγιστο πάχος 18% με κάμπερ 4% που βρίσκεται 40% πίσω από το πρόσθιο άκρο της αεροτομής (ή 0,4c).



Εικόνα 9: Η αεροτομή ΝΑCA4418.

3. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΥΔΡΟΤΟΜΩΝ ΣΤΟ ANSYS

3.1.ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYSFLUENT

Το Ansys Fluent είναι ένα λογισμικό υπολογιστικής δυναμικής ρευστών γενικής χρήσης (CFD) που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της ροής ρευστού, της μεταφοράς θερμότητας και μάζας, των χημικών αντιδράσεων και πολλά άλλα. Το Fluent είναι γνωστό για τις προηγμένες του δυνατότητες μοντελοποίησης φυσικής, οι οποίες περιλαμβάνουν μοντελοποίηση τύρβης, μονοφασικές και πολυφασικές ροές, καύση, κα. Είναι διαθέσιμες πολλές επιλογές επίλυσης, για παράδειγμα με βάση την πίεση και την πυκνότητα για την κάλυψη όλων των τύπων ροών. Στην υπό μελέτη περίπτωση το Fluentεπιλύει εξισώσεις διατήρησης μάζας και ορμής.

ΕΞΙΣΩΣΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας εκφράζεται μέσω της εξής σχέσης:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho \vec{v}) = S_m$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί την γενικευμένη σχέση αρχής διατήρησης της μάζας, η οποία έχει ως πεδίο εφαρμογής τόσο ασυμπίεστες, όσο και συμπιεστές ροές.Για την υπό μελέτη περίπτωση, δηλαδή για δισδιάστατες γεωμετρίες η εξίσωση διατήρησης της μάζας γίνεται:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m$$

Όπου:

- x: η αξονική συντεταγμένη,
- r: η ακτινική συντεταγμένη,
- *v_x*: η αξονική ταχύτητα,
- $v_{r:}$ η ακτινική ταχύτητα.

ΕΞΙΣΩΣΗ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΟΡΜΗΣ

Η διατήρηση της ορμής ορίζεται ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla * (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla * (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

Όπου $\overline{\overline{\tau}}$ ο τανυστής τάσης ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3}\nabla * \vec{v}I]$$

Για την υπό μελέτη περίπτωση, δηλαδή για δισδιάστατες γεωμετρίες οι εξισώσεις διατήρησης της ορμής για την αξονική και ακτινική διεύθυνση αντίστοιχα ορίζονται ως εξής:

•
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_{x}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_{x}v_{x}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_{r}v_{x}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v_{x}}{\partial x} - \frac{2}{3}(\nabla * \vec{v})\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(\frac{\partial v_{x}}{\partial r} + \frac{\partial v_{r}}{\partial x}\right)\right] + F_{X}$$

•
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r}\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3}(\nabla * \vec{v})\right)\right] - 2\mu\frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3}\frac{\mu}{r}(\nabla * \vec{v}) + \rho\frac{v_z^2}{r} + F_r$$

με,

$$\nabla * \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r}$$

3.2.ΔΗΜΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Προκειμένου να μπορέσει να ολοκληρωθεί η κατάστρωση του προβλήματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής και η επίλυση του, επόμενοβήμα, είναιη δημιουργία του πλέγματος (mesh)δηλαδήηδιακριτοποίησητηςγεωμετρίαςμας.Για κάθε υπό μελέτη υδροτομή το πλέγμα είναι τύπου C και δημιουργείται στο περιβάλλον meshing του ANSYS με όρια απομακρυσμένου Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος 19 πεδίου ίσο με 12,5 χορδές μακριά από την ακμή εκφυγής προς όλες τις κατευθύνσεις (Εικόνα 5, Εικόνα 6). Το πλέγμα που προκύπτει έχει τουλάχιστον 250.000 κόμβους. Η ροή γύρω είναι σχετικά απλό να προσεγγιστεί σε μικρές γωνίες προσβολής. Ωστόσο σε μεγάλες γωνίες προσβολής είναι σχετικά περίπλοκη με την εμφάνιση δινών. Ως εκ τούτου, επιλέχθηκε η δημιουργία ορθογωνικού πλέγματος με μέγιστο πλάτος κυψέλης 0,07 m σε κάθε σημείο του πεδίου και πύκνωση στην μπροστινή και πίσω επιφάνεια της υδροτομής, το οποίο είναι σε θέση να προσεγγίσει τα φαινόμενα που δημιουργούνται, αλλά οδηγεί σε αύξηση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας.



Εικόνα 10: Κοντινή όψη του πλέγματος που προκύπτει για την υδροτομήΝΑCA63-618.



Εικόνα 11: Απεικόνιση ολόκληρου του πλέγματος που προκύπτει για την υδροτομήΝΑCA63-618.

3.3. ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

Μοντελοποίηση τύρβης

Το μοντέλο k-omega επιλέχθηκε ως το πλέον κατάλληλο για την παρούσα μελέτη αεροτομής. Στη δυναμική υπολογιστικών ρευστών, το μοντέλο αναταράξεων k-omega (k-ω) είναι ένα μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων, το οποίο χρησιμοποιείται ως προσέγγιση για τις εξισώσεις Navier-Stokes. Το μοντέλο επιχειρεί να προβλέψει τις αναταράξεις με δύο μερικές διαφορικές εξισώσεις για δύο μεταβλητές, k και ω, με την πρώτη μεταβλητή να είναι η κινητική ενέργεια στροβιλισμού (k) ενώ η δεύτερη (ω) είναι ο ειδικός ρυθμός διάχυσης (της κινητικής ενέργειας στροβιλισμού k σε εσωτερική θερμική ενέργεια)[22].Παρόλο που το μοντέλο θεωρείται αναξιόπιστο σε υψηλούς αριθμούς Reynolds και στην περίπτωση μας έχουμε Re>5·10⁶, το μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί σε αντίστοιχες περιπτώσεις με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, αποφασίστηκε να διερευνηθεί το μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras (SA) μιας εξίσωσης για τους παρόντες υπολογισμούς και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά του μοντέλου k-omega για επικύρωση των υπολογισμών[23]. Οι υπολογισμοί και η επικύρωση

Οριακές συνθήκες

Οριακές συνθήκες εισόδου

Το πεδίο ταχύτητας στο όριο εισόδου προδιαγράφεται ως συνάρτηση της γωνίας προσβολής και μεταβάλλεται σε κάθε προσομοίωση. Η πίεση στην είσοδο ορίζεται με μια οριακή συνθήκη zeroGradient για την προσομοίωση της αδιατάρακτης ροής μακρινού πεδίου.

Οριακές συνθήκες αεροτομής

Μια οριακή συνθήκη ταχύτητας μη ολίσθησης χρησιμοποιείται στην επιφάνεια της αεροτομής. Η ταχύτητα της αεροτομής τίθεται πάντα στο μηδέν κατά τις προσομοιώσεις και η κίνησή της υπολογίζεται με τις οριακές συνθήκες εισόδου. Για την πίεση χρησιμοποιείται μια οριακή συνθήκη zeroGradient, αυτή είναι συνήθως μια καλή προσέγγιση για ιξώδεις ροές.

Οριακές συνθήκες πάνω και κάτω ορίου

Μια οριακή συνθήκη ολίσθησης χρησιμοποιείται για τα πεδία ταχύτητας και πίεσης στα άνω και κάτω όρια. Αυτό συνεπάγεται μηδενική ταχύτητα κάθετη προς το όριο και καμία προϋπόθεση για την εφαπτομενική διεύθυνση. Η συνθήκη πίεσης ορίστηκε ως οριακή συνθήκη zeroGradient. Αυτό προσομοιώνει ότι το μακρινό πεδίο συμπεριφέρεται ως ένα μη ορατό ρευστό.

Οριακές συνθήκες εξόδου

Η ταχύτητα στην έξοδο ορίζεται με μια οριακή συνθήκη zeroGradient για να προσομοιωθεί ότι η ροή αναπτύσσεται πλήρως κατάντη της αεροτομής. Επιλέγεται τιμή μηδέν για την πίεση.

Ρυθμίσεις επίλυσης

Πραγματοποιείται επίλυση με βάση την πίεση με το μέσο ροής να είναι το θαλασσινό νερό και ο αριθμός Mach μικρότερος από 0,3. Ως εκ τούτου, το ρευστό θεωρείται ότι είναι ασυμπίεστο με σταθερή πυκνότητα 1,225 kg/m³ και δυναμικό ιξώδες 0.001054 kg/m-s. Τέλος, ως μέθοδο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Αεροναυτικής και Περιβάλλοντος 24

αρχικοποίησης, επιλέγουμε την υβριδική αρχικοποίηση, και στην συνέχεια τρέχουμε τους υπολογισμούς για καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων (1000-4000 στις υπό μελέτη περιπτώσεις).

3.4. ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ CL ΚΑΙ CD

Αφού ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί ανατρέχουμε στην καρτέλα των «αναφορών» (Reports) του λογισμικού και επιλέγουμε το πεδίο των «δυνάμεων» (Forces). Για να υπολογίσουμε τον συντελεστή οπισθέλκουσας, ως διεύθυνση Χ ορίζουμε το συνημίτονο της υπό μελέτη γωνίας προσβολής, ενώ ως διεύθυνση Υορίζουμε το ημίτονο της γωνίας αυτής, αντίστοιχα (**Εικόνα 9**). Ομοίως κατά τον υπολογισμό του συντελεστή άνωσης, ορίζουμε X=sin(Alpha) και Y=cos(Alpha) (**Εικόνα 10**).

Force Reports				\times
Options Forces Moments Center of Pressure Save Output Paramet	Direction Vector X 0.99756405 Y 0.069756474 Z 0 er	Wall Zones Fil hydrofoil wall-surface_body		F
1	Print Write	Close Help)	Þ
	unce unce.		J	1

Εικόνα 12. Υπολογισμός του συντελεστή οπισθέλκουσας (Cd).

Force Reports			×
Options Forces Moments Center of Pressure Save Output Paramet	Direction Vector X -0.069756474 Y 0.99756405 Z 0	Wall Zones Fil hydrofoil wall-surface_body	Ŧ
			 Y
	Print Write	. Close Help	

Εικόνα 13. Υπολογισμός του συντελεστή άνωσης (Cl).

3. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Ανακεφαλαιώνοντας αναφέρουμε ότι στην παρούσα σπουδαστική εργασία παρουσιάστηκαν θεωρητικά τα στοιχεία που αποτελούν τον βασικό « κορμό» των υδροπτερυγίων στην αγωνιστική ιστιοπλοΐα. Έγινε μία ανάλυση των εισαγωγικών στοιχείων που χρειάζονται για την υπολογιστική διερεύνηση ,με την χρήση του ANSYS, στα προφίλ ορισμένων υδροτομών, και παρουσιάσθηκαν οι παράμετροι που πρέπει να λάβουμε υπόψην μας (οριακές συνθήκες, μοντέλο τύρβης που θα επιλεγεί, γεωμετρία υδροτομής) ώστε να γίνει μία κατάλληλη και επαρκής προσομοίωση των συνθηκών που επικρατούν κατά την διάρκεια της κίνησης στο νερό. Με τον τρόπο αυτόν θα μπορούσαμε να εξάγουμε κάποια αποτελέσματα και συμπεράσματα για τις ταχύτητες και τις τάσεις που επικρατούν στην επιφάνεια του υδροπτερυγίου και τι επίδραση έχουν τελικά στην αγωνιστική ιστιοπλοΐα, τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικά στην διπλωματική που ακολουθεί της παρούσας σπουδαστικής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Agromayor R, Rúa J, Kristoffersen R. Simulation of Starting and Stopping Vortices of an Airfoil. 2017. 66–75 p.
- 2. Balakumar P. Direct Numerical Simulation of Flows over an NACA-0012 Airfoil at Low and Moderate Reynolds Numbers. In: 47th AIAA Fluid Dynamics Conference [Internet]. American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2017. (AIAA AVIATION Forum). Available from: https://doi.org/10.2514/6.2017-3978
- 3. Singh S, Danish M, Saha K, Ranjan V. Numerical simulation of Vortex-shedding from NACA4418 hydrofoil. Vol. 21, Vibroengineering PROCEDIA. 2018.
- 4. Abbott IH, Von Doenhoff AE. Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil data. Press. 1959;11.
- 5. Γ. Σ. Τριανταφύλλου. Θεωρία λεπτών υδροτομών. Αθήνα; 2018.
- MollandAF, TurnockSR. Marine Rudders, Hydrofoils and Control Surfaces (Second Edition): Chapter 2 Control surface types. In: Molland AF, Turnock Hydrofoils and Control Surfaces (Second Edition) SRBT-MR, editors. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2022. p. 13–9. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128243787000147
- 7. Stanford University. The NACA Airfoil series [Internet]. Stanford: Course material-Applied Aerodynamics; Available from: https://web.stanford.edu/~cantwell/AA200 Course Material/The NACA airfoil series.pdf
- 8. Muratoglu A, Yuce M. Performance Analysis of Hydrokinetic Turbine Blade Sections. Adv Renew Energy. 2015 Dec 23;2:1–10.
- 9. Safi'i M. Fluid Mechanics Fundamentals and Applications. 2020.
- 10. Liu T. Evolutionary understanding of airfoil lift. Adv Aerodyn [Internet]. 2021;3(1):37. Available from: https://doi.org/10.1186/s42774-021-00089-4
- 11. Post M, Corke T. Separation Control on HIgh Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators. Aiaa J AIAA J. 2004 Nov 1;42:2177–84.
- 12. Růžička P. Modeling of boundary layer and the influence on heat transfer with help of CFD. AIP Conf Proc [Internet]. 2018 Nov 28;2047(1):20021. Available from: https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5081654
- 13. Kundu PK, Cohen IM, Dowling DRBT-FM (Fifth E, editors. Chapter 9 Boundary Layers and Related Topics. In Boston: Academic Press; 2012. p. 361–419. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123821003100095
- 14. Manwell J, Mcgowan J, Rogers A. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. 2009.
- 15. Letcher TM. Wind Energy Engineering. Wind Energy Eng A Handb Onshore Offshore Wind Turbines [Internet]. 2017;1–600. Available from: elsevier.com
- 16. Φασουράκης Κ-Χ. Υπολογιστική διερεύνηση δισδιάστατης και τρισδιάστατης

υδροδυναμικής συμπεριφοράς υδροπτέρυγας ιστιοπλοϊκού σκάφους για διάφορα μοντέλα τύρβης με χρήση του CFD-κώδικα ANSYS FLUENT [Internet]. Πάτρα; 2019 [cited 2023 Jan 5]. Available from: http://hdl.handle.net/10889/12677

- 17. Nigg DJ. A Sailing Hydrofoil Development. Mar Technol SNAME News [Internet]. 1968 Apr 1 [cited 2023 Jan 5];5(02):150–7. Available from: https://onepetro.org/MTSN/article/5/02/150/176325/A-Sailing-Hydrofoil-Development
- Hydrofoil Sailing Boat Prototype Rendering Car Body Design [Internet]. [cited 2023 Jan 5]. Available from: https://www.carbodydesign.com/gallery/2014/02/politecnico-di-milano-master-in-yacht-design-2013-2014/18/
- 19. Lloyd Images [Internet]. [cited 2023 Jan 5]. Available from: https://www.lloydimages.com/index
- 20. keyassets.timeincuk.net [Internet]. [cited 2023 Jan 5]. Available from: https://keyassets.timeincuk.net/inspirewp/live/wpcontent/uploads/sites/18/2021/03/Teaser-620x388.jpg
- 21. F1X Hydrofoiling Catamaran Hydrofoil | DNA Performance Sailing [Internet]. [cited 2023 Jan 5]. Available from: https://dnaperformancesailing.com/hydrofoil-manufacturer/f1x-hydrofoils-manufacturer/
- 22. Wilcox DC. Formulation of the k-w Turbulence Model Revisited. AIAA J [Internet]. 2008 Nov 1;46(11):2823–38. Available from: https://doi.org/10.2514/1.36541
- Jain S, Sitaram N, Krishnaswamy S. Effect of Reynolds Number on Aerodynamics of Airfoil with Gurney Flap. Han J, editor. Int J Rotating Mach [Internet]. 2015;2015:628632. Available from: https://doi.org/10.1155/2015/628632