

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ
ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ

ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ
ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΛΕΞΑΝΔΡΗ ΜΑΡΙΑ

Αθήνα 2012

Επιβλέπων : Σ.Α Μαυράκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 6 |
| ABSTRACT | 7 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 8 |
| ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΥΠΟΒΡΥΧΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ | 8 |
| ΠΡΟΤΕΡΗΜΑΤΑ ΕΝΑΝΤΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ | 8 |
| ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ | 9 |
| ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ..... | 11 |
| ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ | 12 |
| ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ AUV'S | 13 |
| ΑΝΑΣΤΑΛΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΤΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΥΠΟΒΡΥΧΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ..... | 14 |
| ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΥΔΡΟΠΤΕΡΑ (UNDERWATER GLIDERS) | 16 |
| SLOCUM | 19 |
| SPRAY | 22 |
| SEAGLIDER..... | 24 |
| ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΙς ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΩΝ ΥΔΡΟΠΤΕΡΩΝ..... | 29 |
| GLIDER MODEL: ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ | 29 |
| ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ | 29 |
| ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ..... | 29 |
| ΣΩΜΑΤΟΠΑΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ | 29 |
| ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ | 31 |
| ΡΕΥΜΑΤΑ..... | 32 |
| ΔΥΝΑΜΙΚΗ | 33 |
| ΓΕΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ | 33 |
| ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΡΜΑΤΟΣ | 34 |
| ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΜΑΖΕΣ (CONTROLLED INTERNAL MASSES) | 34 |
| ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ : ΑΝΤΩΣΗ ΚΑΙ ΒΑΡΥΤΗΤΑ | 35 |
| ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ | 37 |
| ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ | 37 |
| ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΕΠΙΠΕΔΟ | 41 |
| ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ-ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΟΡΟΙ | 44 |
| LIFT, DRAG, MOMENT, GLIDE ANGLE..... | 44 |
| ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ | 47 |
| ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΕ ΠΕΡΙΡΡΕΟΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ ΣΩΜΑΤΑ | 47 |
| ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ | 49 |

| | |
|--|-----|
| ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΑΕΡΟΤΟΜΗ ΣΕ ΜΕΓΑΛΟΥΣ ΑΡΙΘΜΟΥΣ RE | 54 |
| ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ | 55 |
| ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ | 55 |
| ΕΞΙΣΩΣΗ NAVIER-STOKES..... | 56 |
| ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ..... | 57 |
| ΣΤΕΓΑΝΟ ΤΟΙΧΩΜΑ | 57 |
| ΣΥΝΑΦΕΙΑ | 58 |
| ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΥΟ ΡΕΥΣΤΩΝ | 58 |
| ΡΟΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ REYNOLDS..... | 58 |
| ΣΤΡΩΤΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ..... | 58 |
| ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΤΗΤΑΣ | 63 |
| ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ..... | 64 |
| ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ | 65 |
| ΓΕΝΙΚΑ | 65 |
| ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΗ ΤΥΡΒΗ - ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ..... | 65 |
| ΤΥΡΒΩΔΗ ΟΡΙΑΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ | 68 |
| ΓΕΝΙΚΑ | 68 |
| ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΣΕ ΚΑΥΜΠΥΛΩΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ- ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ | 70 |
| ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ | 72 |
| ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ | 72 |
| ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΡΟΩΝ..... | 75 |
| ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLUENT-Ο ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ GAMBIT | 77 |
| ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ FLUENT..... | 77 |
| ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΤΗΣ CFD ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ..... | 78 |
| ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ CFD ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ | 79 |
| ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΡΒΗΣ SST-K OMEGA | 80 |
| ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΥΡΒΗΣ SST-K OMEGA..... | 80 |
| ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ | 81 |
| ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ | 82 |
| ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΙΘΑΝΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΥΔΡΟΠΤΕΡΩΝ | 82 |
| ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ 2D ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ..... | 82 |
| ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ (2D) | 83 |
| ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 112 |
| ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ..... | 119 |
| ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ | 129 |
| ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΩΣΗ..... | 129 |
| ΓΩΝΙΑ ΙΧΝΟΥΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (GLIDE ANGLE) | 133 |

| | |
|--|-----|
| ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 134 |
| ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ | 134 |
| ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ | 134 |
| ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΟΡΦΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ | 136 |
| ΥΔΡΟΠΤΕΡΑ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ NASA16-006..... | 140 |
| SEAGLIDER..... | 143 |
| ΥΔΡΟΠΤΕΡΑ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ NASA66-018..... | 144 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ GAMBIT - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ | 145 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ FLUENT-ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 147 |
| ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ..... | 149 |
| ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 170 |
| ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ | 174 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 178 |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική αυτή εργασία έχει ως στόχο την μελέτη και βελτίωση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών ενός αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος (τυπικής μορφής υδροπτέρου) οδηγούμενου με μεταβολή πλευστότητας διατηρώντας τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις λειτουργίας των τυπικών υδροπτέρων. (Seaglider, Spray, Slocum). Έτσι λοιπόν, στο πλαίσιο απαιτήσεων αποστολών σε βαθιά νερά θα επιχειρήσουμε τον σχεδιασμό ενός υποβρύχιου υδρόπτερου το οποίο θα διαθέτει μεγαλύτερο μέγιστο λόγο άνωσης προς αντίσταση ώστε να μπορεί να ταξιδεύει και σε μικρότερες ελάχιστες γωνίες πλεύσης (μικρότερα βάθη), χωρίς ταυτόχρονα να χάσει το κύριο χαρακτηριστικό του, αυτό της πλεύσης σε βαθιά νερά. Επιπλέον θα διερευνηθεί η εξάρτηση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών αυτών των οχημάτων από τις παραμέτρους του σχήματός τους και το πώς αυτές επιδρούν στον τελικό σχεδιασμό ενός οχήματος με συγκεκριμένες λειτουργικές απαιτήσεις.

Η βελτίωση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του υδρόπτερου επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση διαφορετικής μορφολογίας πτερυγίου καθώς και γάστρας χαμηλής αντίστασης. Μία τυπική μορφή αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος (Seaglider) που χρησιμοποιείται ήδη από τις εταιρίες που ασχολούνται με την παραγωγή και μελέτη των AUVs (autonomous underwater gliders) θα αποτελέσει μέτρο σύγκρισης για τα υδρόπτερα που θα σχεδιαστούν και θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία. Καθώς τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα- υδρόπτερα- φέρουν χαρακτηριστικά όμοια με τα ανεμόπτερα, θα γίνεται λόγος και για αεροδυναμική μελέτη αυτών. Η βελτίωση λοιπόν, στοχεύει στην αύξηση του συντελεστή άνωσης και κυρίως στη μείωση του υδροδυναμικού συντελεστή αντίστασης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία της βελτίωσης της ροής (υδροδυναμικής συμπεριφοράς) θα γίνει με δοκιμές και συνεχή τρεξίματα και δεν θα εφαρμοστεί κάποια μέθοδος βελτιστοποίησης. Ενδεχόμενη βελτιστοποίηση θα είχε προφανώς, πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος, αλλά θα εντόπιζε το καθολικό βέλτιστο.

Στην εργασία αυτή, η οποία βασίζεται στη διδακτορική διατριβή της Π. Μπουρμά [90], χρησιμοποιείται ο προ-επεξεργαστής GAMBIT για τη δημιουργία πλέγματος και το πρόγραμμα FLUENT (Ansys Fluent) για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes καθώς και για τον υπολογισμό των συντελεστών αντίστασης και άνωσης του υδρόπτερου. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Rhinoceros για τον σχεδιασμό των πτερυγίων και των τελικών μορφών των υδροπτέρων που εξετάζονται.

Συνοψίζοντας, η εργασία εστιάζει στον σχεδιασμό μοντέλων αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων, στη δημιουργία αποδεκτού υπολογιστικού πλέγματος γύρω από το υδρόπτερο, στην αριθμητική επίλυση της ροής γύρω από αυτό και στο τέλος καταλήγει σε συγκριτικά συμπεράσματα ως προς την επίπτωση που ο σχεδιασμός αυτός έχει στους συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας δύναμης του υδροπτέρου, καθώς και στη πορεία πλεύσης του.

ABSTRACT

This diploma thesis aims to study and improve the hydrodynamic characteristics of an autonomous underwater vehicle (standard form glider) guided by changing buoyancy while maintaining the characteristics and performance requirements of typical autonomous underwater glider (Seaglider, Spray, Slocum). So, in mission requirements in deep water will attempt to design an underwater glider which has bigger lift to drag ratio that can travel in smaller minimum glide angles (smaller depths), while not losing the main feature, the float in deep water. It will also investigate the dependence of the hydrodynamic characteristics of these vehicles on the parameters of their shape and how they affect the final design of a vehicle with specific functional requirements.

The improvement of the hydrodynamic behavior of underwater glider achieved by placing different wing morphology and low hull resistance. A typical form of autonomous underwater vehicle (Seaglider) already used by companies engaged in the production and study of AUVs (autonomous underwater gliders) will be a benchmark for underwater gliders that will be developed and studied in this project. As autonomous underwater vehicles -gliders- bearing characteristics similar to gliders, will also talk about aerodynamic study of these. The improvement, therefore, aims to increase the lift coefficient and especially to reduce the hydrodynamic drag coefficient. It should be noted that the process of improving the flow (hydrodynamics) will be tested and runs continuously and will not apply any optimization method. A possible optimization would obviously much greater computational cost, but will identify the global optimum.

The present diploma thesis, which based on P. Bourma's doctoral thesis [90], used the pre-processor GAMBIT mesh to create and program FLUENT (Ansys Fluent) for the numerical solution of the Navier-Stokes equations and the calculation of the drag and lift forces and coefficients of underwater glider. Finally, we used the Rhinoceros program for the design of the blades and the final design of underwater gliders which have examined.

In summary, the present diploma thesis focuses on the design of autonomous underwater vehicle models, to create an acceptable computational grid around the autonomous underwater glider, the numerical solution of the flow around it and finally conclude on the effect of the design on the lift and drag coefficients, and glider's cruising course.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στον σύγχρονο κόσμο οι άνθρωποι έχουν στραφεί προς τους ωκεανούς για την κάλυψη μέρους των αναγκών τους σε ενέργεια και φυσικούς πόρους. Το ωκεάνιο περιβάλλον αν και βρίσκεται κοντά μας, λόγω των μεγάλων βαθών είναι ακόμα ανεξερεύνητο, γεγονός που έχει αρχίσει να αντιστρέφεται τις τελευταίες δεκαετίες. Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (Autonomous Underwater Vehicles, AUVs) είναι σημαντικά εργαλεία στην προσπάθεια εξερεύνησης των ωκεανών και μπορούν να μας βοηθήσουν στην κατανόηση και στην προστασία των υποθαλάσσιων υποσυστημάτων. Τα οχήματα αυτά καλούνται να αντιμετωπίσουν προβλήματα που παρουσιάζονται εξαιτίας των μεγάλων πιέσεων, της αδυναμίας επικοινωνίας με ηλεκτρομαγνητικά σήματα και της λειτουργίας τους σε αχαρτογράφητες περιοχές, με απρόβλεπτες επιδράσεις από το περιβάλλον (θαλάσσια ρεύματα και κύματα) καθώς και των καιρικών συνθηκών.

Το ενδιαφέρον για τα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα ξεκίνησε όταν υπήρξε ανάγκη για εργασία και παρατήρηση σε βάθη που είναι απρόσιτα από τον άνθρωπο, κυρίως σε εφαρμογές της βιομηχανίας άντλησης πετρελαίου. Έτσι αναπτύχθηκαν τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα, των οποίων η τεχνολογία έχει εξελιχθεί τόσο ώστε σήμερα να χρησιμοποιούνται σε βάθος έως 11.000 m.

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΥΠΟΒΡΥΧΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΤΕΡΗΜΑΤΑ ΕΝΑΝΤΙ ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα, σε πολλές περιπτώσεις δεν αποτελούν τη βέλτιστη λύση γιατί έχουν εγγενείς αδυναμίες. Η κυριότερη των οποίων είναι η ύπαρξη καλωδίου παροχής ενέργειας και ανταλλαγής πληροφοριών, που επάγει υδροδυναμικές δυνάμεις και πρόσθετη αδράνεια την οποία πρέπει να υπερνικήσει το όχημα. Επίσης, η χρήση των τηλεκατευθυνόμενων οχημάτων περιορίζεται από το γεγονός ότι πρέπει να απασχολείται ένας χειριστής, πράγμα που αυξάνει το κόστος και θέτει όρια στην χρήση του οχήματος λόγω των συνθηκών που επικρατούν στην επιφάνεια. Επιπλέον, τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα λόγω της εξάρτησής τους από το μητρικό σκάφος, δεν μπορούν να εκτελέσουν αποστολές συνεχούς ωκεανογραφικής έρευνας και παρατήρησης σε εκτεταμένες περιοχές.

Για να αντιμετωπιστούν τα μειονεκτήματα των τηλεκατευθυνόμενων υποβρύχιων οχημάτων, έχουν αναπτυχθεί τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (Autonomous Underwater vehicles, AUVs) που βασίζονται στην ενέργεια των συσσωρευτών τους, στους αισθητήρες τους και σε έναν ή περισσότερους ενσωματωμένους υπολογιστές, για την εκπλήρωση των σκοπών της κάθε αποστολής. Η πλοήγηση αυτών των οχημάτων πραγματοποιείται αυτόνομα, χωρίς την παρέμβαση ανθρώπινου χειριστή παρά μόνο σε επίπεδο σχεδιασμού της αποστολής, ο οποίος γίνεται πριν την έναρξή της. Αν και έχουν γίνει πολλές σχεδιάσεις τέτοιων οχημάτων, ήδη από την δεκαετία του '60, η τεχνολογία των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων δεν

έχει φτάσει ακόμα σε επίπεδο ωριμότητας. Ο λόγος είναι ότι κατά την σχεδίαση και την χρήση τους εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα, τα κυριότερα από τα οποία είναι :

- Οι συνθήκες λειτουργίας: Η λειτουργία ενός αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος σε μεγάλο βάθος προϋποθέτει στιβαρή μεταλλική κατασκευή που συνεπάγεται αυξημένη μάζα και απαιτήσεις ενέργειας.
- Δυσκολίες στην επικοινωνία: Η εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων στο αγωγίμο περιβάλλον του θαλασσινού νερού, καθιστά αδύνατη την επικοινωνία με ηλεκτρομαγνητικά σήματα. Επίσης είναι αδύνατη η χρήση αισθητήρων εύρεσης θέσης που χρησιμοποιούν τέτοια σήματα.
- Περιορισμούς στους ενεργειακούς πόρους: Η ενέργεια που περιέχουν οι συσσωρευτές του οχήματος είναι περιορισμένη και απαιτείται ο επαναδιαχειρισμός της κατά την διάρκεια της αποστολής.
- Άγνωστο περιβάλλον: Το περιβάλλον στο οποίο κινούνται τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα δεν είναι ελεύθερο από σταθερά και κινητά εμπόδια, ενώ πιθανή σύγκρουση μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στην εξέλιξη της αποστολής και στην ασφαλή ανάκτηση του οχήματος.
- Μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες: Η δημιουργία κυμάτων και ρευμάτων εξαιτίας των απρόβλεπτων καιρικών συνθηκών επηρεάζουν άμεσα την κίνηση του οχήματος.
- Εντοπισμός του οχήματος: Η ακριβής εύρεση θέσης αποτελεί πρόβλημα για τα AUVs εξαιτίας της χρήσης ηχητικών και οπτικών αισθητήρων
- Ανάκτηση του οχήματος: απαιτείται να υπάρχει αξιόπιστη και οικονομική μέθοδος για την ασφαλή ανάκτηση του οχήματος.
- Δυσκολία ελεγχιμότητας: Λόγω της απαίτησης για εξοικονόμηση πόρων τα οχήματα που έχουν αποστολές μεγάλης διάρκειας σχεδιάζονται με κριτήριο την ελάχιστη υδροδυναμική αντίσταση. Έτσι τα περισσότερα οχήματα δεν διαθέτουν έλεγχο των κινήσεων σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας τους.
- Δυσκολία ανάπτυξης αλγορίθμων αυτόνομης λειτουργίας. Απαιτείται η ανάπτυξη αλγορίθμων που επιτρέπουν την ασφαλή και πλήρης αυτόνομη λειτουργία.

Για τους παραπάνω λόγους, τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα δεν έχουν εκτοπίσει τα τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα στις διάφορες εφαρμογές, καθώς τα τελευταία παραμένουν ακόμα πιο αξιόπιστα και ελέγξιμα. Παρ' όλα αυτά, η εμφάνιση των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων στο εμπόριο έχει ξεκινήσει, έστω με αργούς ρυθμούς. Το υψηλό κόστος και η δυσκολία χρήσης τους μέχρι στιγμής, τα καθιστούν ικανά να χρησιμοποιούνται κυρίως σε επίπεδο εξειδικευμένων περιπτώσεων, όπως αποστολές εκτεταμένης ωκεανογραφικής παρατήρησης, για στρατιωτικές εφαρμογές ανίχνευσης ναρκών και για ερευνητικούς σκοπούς. Έτσι λοιπόν, για την ολοκλήρωση της τεχνολογίας και την ευρεία αξιοποίηση των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων, πρέπει ακόμα να γίνει αρκετή έρευνα.

ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Το πρώτο μη επανδρωμένο υποβρύχιο όχημα αποδίδεται στον Robert Whitehead που κατασκεύασε το όχημα *Torpedo fish* στην Αυστρία το 1866, το οποίο αυτό κινείτο με πεπιεσμένο αέρα, είχε μέγιστη ταχύτητα 3m/s και εμβέλεια 700 m.

Περίπου 1000 μη επανδρωμένα υποβρύχια ρομποτικά οχήματα (Uninhabited Undersea Vehicles, UUV's) βρίσκονται σε λειτουργία στις μέρες μας. τα περισσότερα

είναι τηλεχειριζόμενα οχήματα (ROV's), σχεδιασμένα να εκτελούν υποβρύχιες εργασίες, όπως επιθεωρήσεις, κατασκευές και επιδιορθώσεις αγωγών και καλωδίων σε βάθη πάνω από 1000 m. Οι δυνατότητες των υποβρυχίων οχημάτων συνεχώς αυξάνονται και μπορούν πλέον να εκτελούν υψηλής ανάλυσης ακουστικές και οπτικές περιηγήσεις σε μεγάλα βάθη, κάτι που παλαιότερα θεωρείτο αδύνατο. Για παράδειγμα τα οχήματα Jason και Argo II χρησιμοποιήθηκαν το 1997 για την χαρτογράφηση και επιθεώρηση μια περιοχής ναυαγίου με έκταση 2 Km² στον Ειρηνικό ωκεανό σε βάθος 4100 m.

Ένα ROV περιγράφεται ως ένα τηλεχειριζόμενο όχημα που χαρακτηρίζεται από σχετική ευελιξία κίνησης ανάλογα με την τεχνολογία και τους βαθμούς ελευθερίας που διαθέτει και συνήθως φέρει κάμερα με δυναμικά χαρακτηριστικά (κίνηση, περιστροφή, εστίαση). Ένα τέτοιο τηλεχειριζόμενο υποβρύχιο ρομποτικό όχημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιθεωρήσεις στα ύφαλα πλοίων ή να εισχωρεί σε ναυάγια, να εξερευνεί το υποθαλάσσιο περιβάλλον, αναζητώντας στοιχεία και καταγράφοντας βίντεο με την κάμερά του. Ακόμα έχει την δυνατότητα να εισέρχεται σε μεγάλες δεξαμενές καυσίμων και σε εγκαταστάσεις ιχθυοτροφείων. Γίνεται αντιληπτό ότι ένα υποβρύχιο ρομποτικό όχημα αντικαθιστά την άμεση ανθρώπινη επέμβαση, ειδικά στις περιπτώσεις υψηλού κινδύνου, εξαλείφοντας με τον τρόπο αυτό την πιθανότητα απώλειας ανθρώπινης ζωής ή τραυματισμού.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα, αποτελεί στην τελευταία ωκεανογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στον υποθαλάσσιο χώρο του ηφαιστειακού συμπλέγματος της Σαντορίνης και στην Κρητική λεκάνη με το Ω/Κ σκάφος Nautilus από την 1η έως και την 11η Σεπτεμβρίου 2011. Το Ω/Κ σκάφος Nautilus διαθέτει τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια ρομπότ (ROV's) : Hercules και Argus, τα οποία διαθέτουν κάμερες υψηλής ευκρίνειας για την συλλογή άριστης ποιότητας φωτογραφικού και κινηματογραφικού υλικού, ειδικά όργανα δειγματοληψίας γεωλογικού και βιολογικού υλικού, θερμόμετρο και όργανα χαρτογράφησης του πυθμένα με μεγάλη λεπτομέρεια.



HERCULES ROV

Το γεγονός ότι ένα υποβρύχιο ρομποτικό όχημα δέχεται συνεχώς δυνάμεις από υποθαλάσσια ρεύματα και κύματα, σε συνδυασμό με την δυσκολία προσδιορισμού της θέσης του ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, κάνουν ιδιαίτερα ελκυστικό το πρόβλημα ελέγχου του.

Οι μεγάλες πιέσεις που ασκούνται σε ένα υποβρύχιο περιβάλλον καθιστούν δύσκολο τον σχεδιασμό και την κατασκευή των υποβρυχίων οχημάτων. Λίγα μόνο επανδρωμένα υποβρύχια μπορούν να ξεπεράσουν τα 1000 μέτρα βάθος, ενώ ένα μόνο μπορεί να φτάσει τα 6500 m. Αντίθετα, ένας μεγάλος αριθμός μη επανδρωμένων υποβρυχίων ρομπότ λειτουργούν στα 6000 m βάθος και ένα από αυτά μπορεί να φτάσει τα 11000 μέτρα. Γενικά τα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με τις αποστολές για τις οποίες προορίζονται. Όπως:

- Εμπορικές Αποστολές: Οχήματα που δημιουργούνται με σκοπό την κάλυψη πληθώρας αναγκών, όπως περιηγήσεις, επιθεωρήσεις, έρευνα, ανάκτηση αντικειμένων, υποβρύχιες εργασίες, επισκευές και συντηρήσεις εξοπλισμού.
- Αποστολές Ωκεανογραφικής Έρευνας: Οχήματα χρησιμοποιούμενα από ερευνητικά ιδρύματα για εξερεύνηση ή χαρτογράφηση υποθαλάσσιων περιοχών.
- Στρατιωτικές αποστολές: Οχήματα για αμυντική χρήση όπως συντήρηση, επιθεώρηση, έρευνα, περιπολία για εύρεση και περισυλλογή ναρκών.
- Ερευνητικές εφαρμογές: Πρωτότυπα οχήματα που κατασκευάζονται για επιστημονική έρευνα και ανάπτυξη.

Για την κάλυψη των παραπάνω εφαρμογών, έχουν κατασκευαστεί τόσο τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα όσο και αυτόνομα υποβρύχια οχήματα.

ΤΗΛΕΧΕΙΡΙΖΟΜΕΝΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Τα πιο δεδομένα οχήματα είναι τα τηλεχειριζόμενα οχήματα τα οποία συνδέονται με το μητρικό σκάφος με καλώδιο το οποίο μεταφέρει ισχύ και δεδομένα. Τα ROV's θεωρούνται πλέον ως τα επικρατέστερα εργαλεία για τις υποθαλάσσιες επιχειρήσεις και μπορούν να καλύψουν ένα αρκετά μεγάλο σύνολο εφαρμογών. Το ευρύ φάσμα των εφαρμογών τους οφείλεται στους αισθητήρες και στους ρομποτικούς βραχίονες που διαθέτουν.

Το κυριότερο πεδίο εφαρμογής των τηλεχειριζόμενων υποβρυχίων οχημάτων είναι η βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου, οι ανάγκες της οποίας για τέτοια οχήματα αυξάνονται όσο αυξάνεται το βάθος εξόρυξης. Η βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου προσπαθεί να κάνει γεωτρήσεις και να εκμεταλλευτεί εμπορικά κοιτάσματα σε βάθη που τα προηγούμενα χρόνια θα ήταν απρόσιτα ή οικονομικά ασύμφορα. Σύμφωνα με δημοσιευμένα στοιχεία, οι εξορύξεις πετρελαίου θα γίνονται σε βάθος μεγαλύτερο από 2500 m σε διάστημα λίγων ετών. Το όριο βάθους κατάδυσης για τον άνθρωπο είναι 100 m ή περίπου 300 m για πλήρως κορεσμένη κατάδυση μεικτών αερίων. Κάτω από αυτά τα βάθη όλες οι εργασίες επιθεώρησης, συντήρησης και επισκευών θα πρέπει να γίνονται με υποβρύχια οχήματα, αυτόνομα ή τηλεκατευθυνόμενα. Προς το παρόν τα υποβρύχια οχήματα αξιοποιούνται από την βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου σε εργασίες επιθεώρησης, συντήρησης και επισκευών, όπως επίσης και σε εργασίες επιθεώρησης και εξερεύνησης του πυθμένα.

Για τις ανάγκες εξόρυξης πετρελαίου έχουν δημιουργηθεί τα ROV εργασίας που είναι εφοδιασμένα με κάμερες υψηλής ευκρίνειας και ισχυρούς ρομποτικούς βραχίονες. Για εργασίες παρατήρησης, επιθεώρησης και ανεύρεσης αντικειμένων σε περιοχές όπου τα ROV εργασίας είναι πολύ μεγάλα ή πολύ ακριβά, έχουν δημιουργηθεί τα ROV παρατήρησης. Τέλος, υπάρχει η κατηγορία των μικρών ROV που είναι οχήματα μικρού

βάρους, κόστους και διαστάσεων. Τα μικρά ROV χρησιμοποιούνται για οπτικό και ακουστικό έλεγχο σε μικρά και μεσαία βάθη με σημαντικά μικρότερο κόστος.

Οι δυνατότητες των τηλεχειριζόμενων υποβρύχιων οχημάτων περιορίζονται από το καλώδιο σύνδεσης με το μητρικό σκάφος. Τα ROVs εργασίας έχουν μια κατανάλωση ενέργειας από 35 έως 150kW. Η ενέργεια που μεταφέρεται στο όχημα περιορίζεται σε σχέση με τις απώλειες λόγω μήκους του αγωγού, από την απαίτηση για μικρή διάμετρο καλωδίου με στόχο την μείωση των υδροδυναμικών δυνάμεων που επάγονται στο όχημα. Τυπικές διαμέτροι καλωδίων των τηλεχειριζόμενων υποβρυχίων οχημάτων είναι από 17mm έως 35mm. Η αύξηση της τάσης, που παρέχει μερική λύση στο πρόβλημα μεταφοράς ισχύος, σταματάει όταν καταπονείται επικίνδυνα η μόνωση. Έτσι τα οχήματα βαθιάς κατάδυσης πρέπει να λειτουργούν σε σημαντικά μικρότερη κατανάλωση από τους προγόνους τους. Ο περιορισμός της διαθέσιμης ισχύος είχε ως συνέχεια την αντικατάσταση των υδραυλικών επενεργητών των πρώτων οχημάτων με ηλεκτρικούς, για επίτευξη μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης.

ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Μια συνεχώς αναπτυσσόμενη κατηγορία οχημάτων είναι αυτή των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων (Autonomous Underwater Vehicles, AUVs). Ένα AUV είναι ένα μη επανδρωμένο, μη συνδεδεμένο υποβρύχιο όχημα, το οποίο μεταφέρει την δική του πηγή ισχύος και στηρίζεται σε ένα ενσωματωμένο υπολογιστή για την εκπλήρωση της αποστολής του. Τα AUV εκτελούν σειρά οδηγιών που μπορούν να αλλάξουν κατά την λειτουργία, από δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες τους.

Τα αυτόνομα υποβρύχια ρομποτικά οχήματα προέκυψαν από την ανάγκη συλλογής ωκεανογραφικών δεδομένων κατά μήκος σταθερών τροχιών.

Ενώ τα τηλεχειριζόμενα ROVs έχουν το πλεονέκτημα της λογικής του ανθρώπινου χειριστή και της απεριόριστης παροχής ισχύος μέχρι την δεκαετία του '80, τα AUVs έπρεπε να περιμένουν τις εξελίξεις της τεχνολογίας στους συσσωρευτές και στους υπολογιστές για να εξελιχθούν, πράγμα που έγινε τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Με την εξέλιξη των συσσωρευτών τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα μπορούν να εκτελέσουν αποστολές με μεγαλύτερη διάρκεια, ενώ η εξέλιξη των υπολογιστών συνέβαλε στην ενσωμάτωση υπολογιστικής νοημοσύνης για λύση προβλημάτων πλοήγησης. Επίσης, άλλοι τεχνολογικοί τομείς που συνέβαλαν στην εξέλιξη της τεχνολογίας των AUV είναι οι ακουστικοί αισθητήρες και οι ακουστικές επικοινωνίες.

Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα είναι τομέας όπου συγκεντρώνεται διεθνώς αρκετή ερευνητική προσπάθεια. Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό αναλύονται παρακάτω.

Με την εξέλιξη των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων έχει γίνει ευκολότερη η παρατήρηση και η ανάλυση του περιεχομένου των θαλασσών και των παράκτιων περιοχών. Τα δεδομένα με την χρήση των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων συλλέγονται με κόστος 40% έως 60% μικρότερο από αυτό των συμβατικών μεθόδων, γεγονός που δεν μένει απαρατήρητο από την επιστημονική κοινότητα.

Επιπλέον τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα βρίσκουν όλο και περισσότερες εφαρμογές στην βιομηχανία εξόρυξη πετρελαίου, σε αρχαιολογικές αποστολές και σε στρατιωτικές εφαρμογές. Στο μέλλον καθήκοντα όπως περισυλλογή ναρκών και επιτήρηση υποβρύχιων περιοχών αναμένεται να γίνονται αποκλειστικά από τέτοια οχήματα.

Τα αυτόνομα υποβρύχια ρομποτικά οχήματα άρχισαν να αναπτύσσονται στις αρχές του 1960 με το SEA SPOOK του Rebikoff και το SPURV (Self - Propelled Underwater Research Vehicle) του εργαστηρίου εφαρμοσμένη φυσικής του University of Washington. Το SPRV I ολοκληρώθηκε στις αρχές της δεκαετίας ου '60 και παρέμεινε σε χρήση για ερευνητικούς σκοπούς μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '70. Είχε εκτόπισμα 480 Kg και μπορούσε να αναπτύσσει ταχύτητα 2.2 m/s για 5.5 ώρες σε βάθος μέχρι 3 Km. Το όχημα επικοινωνούσε ακουστικά με την επιφάνεια και μπορούσε να πλοηγηθεί σε σταθερό βάθος, ανάμεσα σε δύο βάθη και με σταθερή κλίση ανάδυσης ή κατάδυσης έως 50°.

Τα οχήματα αυτά διαδέχθηκαν άλλα όπως το SKAT του ινστιτούτου Shirshov της Ρωσίας, το OSR-V (Ιαπωνία), τα EAVE West, RUMIC, UFSS (Πολεμικό Ναυτικό Η.Π.Α) τα EAVE και EAST (University of New Hampshire Η.Π.Α). Τα πρώτα αυτά οχήματα ήταν πολύ μεγάλα, ακριβά και μη αποτελεσματικά.

Το όχημα AUSS (Advanced Unmanned Search System) αναπτύχθηκε από το κέντρο ερευνών του πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ SPAWAR, το 1973 για έρευνα και εντοπισμό αντικειμένων με αφορμή την βύθιση των USS Thresher και USS Scorpion , καθώς και την απώλεια της βόμβας υδρογόνου στο Palomares της Ισπανίας. Το όχημα ολοκληρώθηκε το 1983 και βρισκόταν σε ενέργεια μέχρι την αρχή της δεκαετίας του 90.

Στο τέλος της δεκαετίας του ' 80 ξεκίνησε η εξέλιξη του αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος HUGIN της Νορβηγικής εταιρείας Kongsberg - Simrad. Έχει μήκος από 4 έως 5 μέτρα ανάλογα με το μήκος του μεσαίου τμήματος, διάμετρο γάστρας 0.75 m, εκτόπισμα 650 Kg , μέγιστη ταχύτητα 2.57 m/s (5 Knots) και αυτονομία έως 24 ώρες σε βάθος έως 1000 m. Το όχημα αυτό μπορεί να εκτελεί αποστολές αναγνώρισης χαρτογράφησης και συλλογής ωκεανογραφικών δεδομένων με τις κάμερες υψηλής ευκρίνεια που διαθέτει.

Στη δεκαετία του '90 υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον από Ακαδημαϊκά Ιδρύματα, που κατασκεύασαν αυτόνομα υποβρύχια οχήματα για ερευνητικούς σκοπούς. Το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT), εξέλιξε το όχημα Odyssey για ερευνητικούς σκοπούς στην αρχή της δεκαετίας του '90. Το όχημα εκτός των άλλων, χρησιμοποιήθηκε για συλλογή ωκεανογραφικών δεδομένων σε δίκτυο με άλλα οχήματα.

Το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα ABE (Autonomous Benthic Explorer), που αναπτύχθηκε για ωκεανογραφική έρευνα από το Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) στις αρχές της δεκαετίας του '90, έχει εκτόπισμα 680 Kg και αυτονομία μέχρι 34 ώρες με ταχύτητα 0.75 m/s, σε βάθη έως 5 Km. Έχει έξι ωθητήρες που το καθιστούν ευέλικτο και ικανό να ακολουθεί την γεωμετρία του πυθμένα. Η βαθύτερη του κατάδυση έγινε σε βάθος 4 Km. Το WHOI εξέλιξε επίσης το REMUS (Remote Environmental Monitoring Units) για ακαδημαϊκή έρευνα. Το όχημα αυτό έχει αυτονομία έως 20 ώρες, εκτόπισμα 36 Kg, μέγιστο βάθος 100m και ταχύτητα 1.5 m/s. Υπάρχουν περίπου εννέα τέτοια οχήματα σε πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα ανά τον κόσμο.

Εκτός από τα παραπάνω οχήματα, υπάρχει πληθώρα οχημάτων για ερευνητικούς και στρατιωτικούς σκοπούς σε τουλάχιστον 12 χώρες που ασχολούνται με την έρευνα και την εξέλιξή τους.

Ως προς τις αποστολές που εκτελούν, τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- Τα οχήματα ωκεανογραφικής παρατήρησης, τα οποία είναι σχεδιασμένα ώστε να είναι ενεργειακά βέλτιστα και να μπορούν συλλέγουν ωκεανογραφικά

δεδομένα ενώ πλοηγούνται σε βαθιά νερά (π. χ Odyssey, Ocean Voyager, Remus και τα μεγαλύτερα οχήματα Draper UUV και LDUUV). Τα οχήματα αυτά συνήθως κινούνται από έλικες και ελέγχονται από πτερύγια.

- Τα οχήματα, στα οποία ο έλεγχος της θέσης γίνεται από ωθητήρες, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να έχουν χαμηλή ταχύτητα ή να είναι ακίνητα πάνω από ένα αντικείμενο. Τέτοια οχήματα είναι τα OTTER, Phoenix, Marius και Vortex.

Η διαχείριση της διαθέσιμης ενέργεια είναι τομέας βασικού ενδιαφέροντος για τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα. με δεδομένη χωρητικότητα συσσωρευτών η αυτονομία επηρεάζεται κυρίως από την ταχύτητα και από την κατανάλωση των αισθητήρων του οχήματος. Η διαθέσιμη θεωρητική ενέργεια ανά μονάδα βάρους συσσωρευτή διαφέρει ανά τύπο συσσωρευτή και είναι 160 Wh/Kg για τους συσσωρευτές οξειδίου μολύβδου, 230 Wh/Kg νικελίου- καδμίου , 800 Wh/Kg για τους συσσωρευτές πυριτίου- νατρίου και 3400 Wh/Kg για τις κυψέλες υδρογόνου. Στην πράξη οι πραγματικές τιμές διαθέσιμης ενέργειας φτάνουν στο 10 έως 25 % των θεωρητικών. Σήμερα, η πλειονότητα των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων είναι εφοδιασμένα με συσσωρευτές οξειδίου μολύβδου ή νικελίου- καδμίου για λόγους κόστους, ύπαρξης τέτοιων συσσωρευτών στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία και δυνατότητα ασφαλούς φόρτισης χωρίς κίνδυνο έκρηξης, παράγοντες που δεν έχουν εξασφαλισθεί στους συσσωρευτές νέας γενιάς.

Η απουσία ανθρώπινου ελεγκτή υποδεικνύει ότι οι αποστολές των AUV περιορίζονται από το σύστημα ελέγχου, την επεξεργασία των δεδομένων και τις δυνατότητες των αισθητήρων. Η απουσία καλωδίου, που συνδέει το όχημα με κάποιο μητρικό σκάφος, περιορίζει την ποσότητα διαθέσιμης ενέργειας σε αυτήν που διαθέτουν οι συσσωρευτές του οχήματος. Έτσι περιορίζεται η διάρκεια της αποστολής. Ως αποτέλεσμα αυτών των περιορισμών, η ισχύς, η πλοήγηση και η οργάνωση της αποστολής αποτελούν κρίσιμους τεχνολογικούς τομείς για την μελλοντική ανάπτυξη των AUVs.

Τα ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν ώστε η τεχνολογία των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων να φτάσει στην ωριμότητα και να μπορεί πλήρως να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις των αποστολών που χρησιμοποιούνται είναι :

- Η ευκολία χρήσης και αξιοπιστία. Τα οχήματα θα πρέπει να γίνουν προσιτά μέσω φιλικού περιβάλλοντος προγραμματισμού και ελέγχου και να εκτελούν αξιόπιστα τις προγραμματισμένες αποστολές.
- Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός και εκτέλεση μια αποστολής σε τομείς που περιλαμβάνουν σχεδιασμό πορείας, έλεγχο πλοήγησης, ανάλυση δεδομένων και δημιουργία αναφορών.
- Η δυνατότητα αξιοποίησης διαφορετικών τύπων αισθητήρων.
- Η αξιόπιστη κατέλκυση και περισυλλογή του οχήματος, από σκάφος στο οποίο δεν απαιτείται η ύπαρξη ειδικού εξοπλισμού για τον σκοπό αυτό.

ΑΝΑΣΤΑΛΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΤΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΤΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΥΠΟΒΡΥΧΙΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Κατά την πλοήγηση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων παρουσιάζονται προβλήματα που προκύπτουν από τους εξής παράγοντες:

- Το άγνωστο υποβρύχιο περιβάλλον. Φτωχές πληροφορίες χαρτογράφησης και αντίληψης σε συνδυασμό με απρόβλεπτες συμπεριφορές.
- Πολύ περιορισμένες επιλογές επικοινωνίας με το όχημα.

- Πρακτικά άγνωστες δυναμικές εξισώσεις του οχήματος.
- Η σύνθεση των δεδομένων των αισθητήρων. Δεδομένα από διαφορετικούς αισθητήρες πρέπει να συνεκτιμηθούν και να χρησιμοποιηθούν.
- Ο συγχρονισμός πιθανά αντικρουόμενων συμπεριφορών, όπως αποφυγή συγκρούσεων και επίτευξη στόχων αποστολής.

Στις περισσότερες αποστολές αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων η πορεία του οχήματος καθορίζεται πριν την έναρξη της αποστολής από τον χρήστη ο οποίος καθορίζει μια σειρά σημείων στόχου. Στην συνέχεια το όχημα χρησιμοποιεί στρατηγικές αποφυγής εμποδίων για να τροποποιήσει τοπικά την πορεία, σε περίπτωση που ανιχνευτεί κάποιο εμπόδιο. Η παραπάνω προσέγγιση είναι ικανοποιητική σε περιπτώσεις αποστολών σε ανοικτή θάλασσα, μακριά από τον πυθμένα με προβλέψιμα ρεύματα και κύματα. Σε πιο περίπλοκες αποστολές είναι απαραίτητη η χρήση σχεδιαστών πορείας για να προσδιοριστεί η βέλτιστη πορεία, που συνήθως δεν είναι προφανής στον άνθρωπο.

Για την αυτόνομη πλοήγηση των υποβρύχιων οχημάτων βασικό πρόβλημα αποτελεί ο προσδιορισμός θέσης στο αδρανειακό σύστημα αξόνων. Ο προσδιορισμός θέσης είναι σημαντικής σημασίας για την πλοήγηση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων διότι παρέχει την ανάδραση στους ελεγκτές του οχήματος. Δεδομένου ότι στο νερό δεν υπάρχουν σήματα δορυφορικού προσδιορισμού, ο προσδιορισμός θέσης βασίζεται στις ενδείξεις των αισθητήρων. Το πρόβλημα προσδιορισμού θέσης λύνεται για τα υποβρύχια οχήματα με τις εξής τεχνικές :

- Προσδιορισμός θέσης με πρόσθεση μεταβολών.
- Προσδιορισμών θέσης με ακουστικό τριγωνισμό.
- Προσδιορισμός θέσης με σύστημα τεχνητής όρασης.
- Προσδιορισμός θέσης από γεωφυσικά χαρακτηριστικά.

Πιθανοί κίνδυνοι στην κίνηση των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων μπορεί να είναι μια απότομη ανύψωση του πυθμένα, αντικείμενα στον πυθμένα, ναυάγια και άλλα υποβρύχια οχήματα ή πλοία επιφανείας που κινούνται στην ίδια περιοχή. Τα εμπόδια στην κίνηση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες :

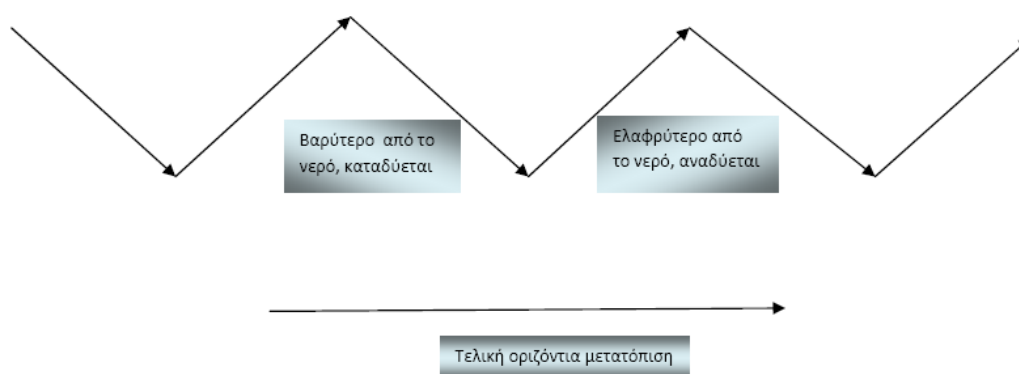
- Βαθιά εμπόδια : διαμορφώσεις πυθμένα, βράχοι, ανθρώπινες κατασκευές, ναυάγια, αλυσίδες, σχοινιά.
- Παρασυρόμενα εμπόδια του νερού : ξύλα, δίκτυα, κοπάδια ψαριών, φύκια, δύτες, άλλα υποβρύχια οχήματα
- Εμπόδια στην επιφάνεια : σημαδούρες, πλοία επιφανείας, παγόβουνα.

Η ικανότητα ανίχνευσης και αποφυγής τέτοιων εμποδίων εξασφαλίζει την ασφάλεια του οχήματος και της αποστολής. Η βασική ιδέα στην ανίχνευση εμποδίων είναι η χρήση ενός ή περισσότερων αισθητήρων υπέρηχων, που είναι τοποθετημένοι στην κατεύθυνση κίνησης. Κατά την διάρκεια της περασμένης δεκαετίας αναπτύχθηκαν διάφοροι αισθητήρες, που ποικίλουν από τους απλούς αισθητήρες υπέρηχων μέχρι τους τρισδιάστατους αισθητήρες υψηλής ευκρίνειας. Πάντως ο τομέας της ανίχνευσης και αποφυγής εμποδίων συγκεντρώνει μέχρι σήμερα αρκετή ερευνητική δραστηριότητα.

ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΥΔΡΟΠΤΕΡΑ (UNDERWATER GLIDERS)

Τα αυτόνομα υποβρύχια υδρόπτερα αποτελούν μία νέα κατηγορία των υποβρύχιων οχημάτων. Με τη βοήθεια πτερυγίων και κεραίας, μπορούν να πλοηγηθούν και να κατευθυνθούν, ελέγχοντας την άνωσή τους χρησιμοποιώντας εσωτερικές δεξαμενές και αντλίες. Η αλλαγή της άνωσης γίνεται στην ουσία με την αλλαγή του όγκου εκτοπίσματος του οχήματος ώστε, να δημιουργηθεί μία δύναμη άνωσης κοντά περίπου στο 1N. Έτσι λοιπόν, μαζί με τη βοήθεια των πτερυγίων το όχημα παίρνει την κατάλληλη κλίση καθ' όλη τη διάρκεια της πορείας του, αναπτύσσοντας ταχύτητα το εύρος της οποίας, κατά την οριζόντια συνιστώσα, είναι περίπου 25 cm/s. Η κίνηση των gliders θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως πριονωτή. Οι κινήσεις του προνευτασμού (pitch) επιτυγχάνονται από την μετακίνηση της κινούμενης μάζας (μπαταρίες) μπροστά και πίσω.

Τα υπάρχοντα gliders έχουν κατασκευαστεί με εξωτερικά πτερύγια και κεραία, ελέγχοντας την συμπεριφορά τους από την κίνηση εσωτερικών μαζών και εξωτερικών ελεγχόμενων επιφανειών οι οποίες λειτουργούν σαν πηδάλιο.



Η πλοήγηση των gliders γίνεται σύμφωνα με την ρύθμιση της άντωσης δίχως την βοήθεια κινητήρων ή προπελών. Έτσι, για να πραγματοποιηθεί η κίνησή τους πρέπει κάθε φορά να αλλάζει και το βύθισμά τους. Το όχημα οδηγείται σε κατάσταση θετικής και αρνητικής πλευστότητας. Τα gliders μπορούν επίσης, να διατηρήσουν την θέση τους ολισθαίνοντας ενάντια στο ρεύμα, να οδηγηθούν μαζί με το ρεύμα ή να παραμείνουν στον πυθμένα.

Χάρη στην πρόωση μέσω της ρύθμισης της άντωσης και στον οικονομικό ενεργειακό σχεδιασμό τους, τα gliders είναι κατάλληλα για μεγάλου εύρους και υψηλής διάρκειας αποστολών. Με έναν κατάλληλο προσεκτικό σχεδιασμό, τα gliders μπορούν να γίνουν αθόρυβα κατά την λειτουργία τους και να καταναλώνουν ελάχιστη ενέργεια. Σε σύγκριση με τα υπόλοιπα AUV's οχήματα είναι πολύ πιο αργά στην ταχύτητά τους, ταξιδεύοντας περίπου με μισό κόμβο, αλλά μπορούν να εκτελέσουν αποστολές μεγαλύτερης εμβέλειας και μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας (μερικών εβδομάδων ή και μηνών). Για την καλύτερη κατανόηση του εύρους λειτουργίας του, αναφέρεται το εξής, ο Ατλαντικός Ωκεανός διασχίζει περίπου 2000 μίλια, ενώ ένα seaglider μπορεί να ολοκληρώσει αποστολές περίπου 1000 μιλίων και έχοντας ένα προσδοκώμενο εύρος περίπου των 1500 μιλίων.

Τα gliders θα μπορούσαν να αντλήσουν την ενέργεια που απαιτείται για την πρόωσή τους αυτόνομα από τον ωκεανό. Ένα πρόγραμμα στο Webb Research Corporation (WRC), έχει μελετήσει (και έχει εφαρμοστεί) την λειτουργία μηχανής, η οποία ρυθμίζει την άντωση του οχήματος, αντλώντας την ενέργεια που απαιτείται από την διαφορά θερμοκρασιών που επικρατούν στο εσωτερικό του ωκεανού. Η χρήση μιας

τέτοιας μηχανής θα επέτρεπε στο αυτόνομο υποβρύχιο υδρόπτερο να προμηθεύεται την ενέργεια που απαιτείται για την πρόωσή του απευθείας από τον ωκεανό, κάνοντας το έτσι ικανό να πραγματοποιεί πραγματικά μεγαλύτερης εμβέλειας αποστολές. Έτσι, η χρήση μπαταριών πλέον θα γίνεται μόνο για την λειτουργία των ηλεκτρονικών και των αισθητήρων που διαθέτει το όχημα στο εσωτερικό του, και όχι και για την κίνηση των αντλιών (η οποία ρυθμίζει την άντωση του).

Στην επιστήμη τις ωκεανογραφίας χρησιμοποιείται μεγάλη ποικιλία τεχνικών μέσων ώστε να πραγματοποιούνται οι επιθυμητές μετρήσεις. Μερικά από αυτά αναφέρονται παρακάτω:

1. Ειδικά πλοία, είτε εκ κατασκευής είτε εκ μετατροπής μεγάλων αλιευτικών. Χαρακτηρίζονται ως Ωκεανογραφικά, Υδρογραφικά ή Ερευνητικά. Αυτά διαθέτουν ενδιαιτήσεις για πρόσθετο επιστημονικό και τεχνικό προσωπικό, χώρους για εργαστήρια, βαρούλκα, ειδικό εξοπλισμό αποστολής κλπ.
2. Μισθωμένα σκάφη (συνήθως αλιευτικά).
3. Υποβρύχια, επανδρωμένα και μη.
4. Βαθυσκάφη.
5. Λοιπά πλωτά μέσα, σημαντήρες, εξέδρες.
6. Όργανα μετρήσεων πεδίου (θερμογράφοι, sonar πλευρικής σάρωσης, ηχοβολιστικά βυθόμετρα, παλιρροιογράφοι κλπ)
7. Τοπογραφικά όργανα και συστήματα προσδιορισμού θέσης (π.χ. GPS).
8. Εργαστηριακό εξοπλισμό (εργαστήρια φυσικών και χημικών μετρήσεων σε δείγματα, εργαστήρια βιολογίας).
9. Καταδυτικός εξοπλισμός, ιδιαίτερα χρήσιμος στην Υδροβιολογία.
10. Υποβρύχια φωτογραφικές μηχανές και μηχανές εικονοληψίας.

Σημαντική είναι η χρήση κατά τις τελευταίες δεκαετίες της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Πληροφορικών Συστημάτων (GIS).

Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα λοιπόν, γίνονται ελκυστικά στην εφαρμογή σε διάφορους τομείς της ωκεανογραφίας καθώς εξαιτίας του μηχανισμού πρόωσης και του σχεδιασμού τους έχουν χαμηλό κόστος σε σχέση με άλλα υποβρύχια οχήματα. Πέρα απ' αυτό όμως, ο συνδυασμός της αυτόνομης λειτουργίας τους, της αντοχής και της εμβέλειάς τους τα κάνει κατάλληλα για παρατεταμένες αποστολές συλλογής στοιχείων κατά μήκος μίας προδιαγεγραμμένης πορείας (ή από σταθερή θέση) και επιπλέον έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν αυτόνομα ή μέσα σε ομάδα υδροπτέρων.

Τα υποβρύχια υδρόπτερα διαθέτουν τρεις βασικούς αντιπροσώπους : το Slocum glider, το Spray glider και το Seaglider. Τα τρία αυτά υδρόπτερα είναι τα πρώτα που κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιούνται ευρέως σε ωκεανογραφικές αποστολές σε όλο το κόσμο.

Ακολουθούν μερικές σημαντικές ημερομηνίες πάνω στην ανάπτυξη και χρήση των ωκεανογραφικών gliders.

- **1989** “The Slocum Mission” δημοσιεύεται στο περιοδικό Oceanography.
- **1991** Γίνονται δοκιμές στο πρωτότυπο Slocum στη λίμνη Seneca στη Νέα Υόρκη.
- **1992** Πρώτη αποστολή του υδρόπτερου του ALBAC, το οποίο αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Τόκιο, στο εργαστήριο του Tamaki Ura
- **1993** Η εργασία Autonomous Oceanographic Sampling Networks δημοσιεύεται στο Oceanography .
- **1999** Γίνονται δοκιμές των υδροπτέρων Slocum στο αστεροσκοπείο LEO-15 και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για ωκεανογραφικές έρευνες μέχρι το 2005.
- **1999** Το Autonomous Ocean Sampling Network (AOSN) I πραγματοποιείται στο κόλπο του Monterey. Εκεί αναπτύχθηκαν και τρία Seaglider. Χρησιμοποιούνται

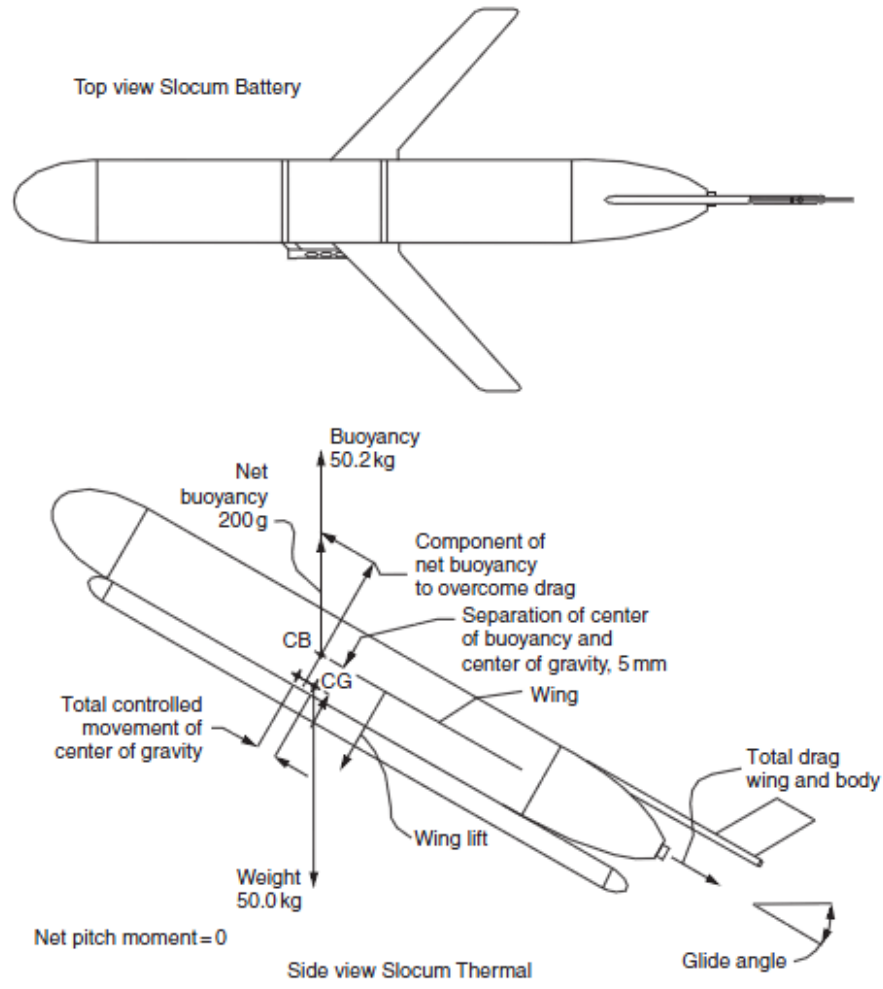
- gliders για ωκεανογραφικές μελέτες. Το πρωτότυπο Spray λειτουργεί για 11 μέρες.
- **2000** Μέχρι εκείνον τον χρόνο τα τρία gliders, Spray, Slocum και Seaglider έχουν ολοκληρώσει αποστολές 10 ημερών.
 - **2001** Το Spray glider διασχίζει 280 km από το San Diego.
 - **2002** Ένα Seaglider ταξιδεύει πάνω από 100 km στην Ακτή Washington .Ενώ ένα άλλο Seaglider λειτουργεί για ένα μήνα ανοιχτά της υφαλοκρηπίδας κοντά στο Seward της Αλάσκας.
 - **2003** Τον Ιανουάριο αναπτύσσονται τρία Slocum Gliders στις Bahamas από το WHOI. Επίσης γίνονται δοκιμές του πρωτότυπου thermal Slocum.
 - **2003** Τον Φεβρουάριο γίνονται δοκιμές στον κόλπο του Μεξικού τριών Slocum Electric gliders τα οποία είναι εξοπλισμένα με ακουστικά modems(acoustic modems), από την συνεργασία των SPAWAR και το Καναδικό Ναυτικό (The Canadian Navy).
 - **2003** Την περίοδο Αύγουστος- Σεπτέμβριος διεξάγεται στον κόλπο του Μοντερέι το AOSN II. Χρησιμοποιούνται συνολικά 12 Slocum και 5 Spray υδρόπτερα για εκτεταμένες ωκεανογραφικές μελέτες διάρκειας άνω των έξι εβδομάδων.
 - **2004** Την περίοδο Σεπτέμβριο- Νοέμβριο ένα υδρόπτερο Spray ταξιδεύει κατά μήκος του Gulf Stream, αρχίζοντας περίπου 100 μίλια νότια του Nantucket, και φτάνοντας κοντά στη Bermuda περίπου ένα μήνα αργότερα. Το υδρόπτερο κάλυψε απόσταση 600 μιλίων, με ταχύτητα 0.5 μίλια/ώρα ή 12 μίλια/ημέρα. Το Spray είναι το πρώτο AUV που διέσχισε το κόλπο του Stream.
 - **2006** Διεξάγεται στον κόλπο του Μοντερέι το AOSN III.
 - **2009** Δύο υδρόπτερα Seaglider ταξιδεύουν στον Αρκτικό ωκεανό στα πλαίσια του προγράμματος Arctic Observing Network. Το ένα θα διασχίσει 450 μίλια κάτω από τον πάγο για 25 εβδομάδες.
 - Η εταιρεία iRobot κατασκευάζει και διαθέτει σε ολόκληρο τον κόσμο πάνω από 80 Seaglider υδρόπτερα.
 - **2009** Τον Μάρτιο δύο gliders από το Ωκεανογραφικό Κέντρο του Πανεπιστημίου της Κύπρου ξεκινάνε έρευνα μελετώντας υδρογραφικά περιοχή στο Μεσανατολικό Πέλαγος (Levantine Sea), αντλώντας μετρήσεις θερμοκρασίας, αλατότητας, διαλυμένου οξυγόνου, οπτικής οπισθοσκέδασης και φθορισμού. Στη συνέχεια τον Νοέμβριο του 2009, το σχέδιο "Eye of the Levantine", πραγματοποιείται κάνοντας χρήση 6 υδροπτέρων, μεταξύ αυτών Slocum και Seaglider, για την περαιτέρω διερεύνηση θερμού πυρήνα που εντοπίστηκε νωρίτερα στην Κύπρο το ίδιο έτος.
 - Από το **2009** γίνεται εντατική χρήση των Acoustic Seaglider. Ακολουθούν κάποιες έρευνες που έγιναν για εντοπισμό ραμφοειδής φάλαινας. (Beaked Whale detection)
 - KONA I: Kona Coast, Island of Hawai'i
27/10/2009 – 17/11/2009
Seaglider™ S/N 022: 116 dives, 173.1GB acoustic data recorded
 - KONA II: Kona Coast, Island of Hawai'i
16/3/2010 – 26/3/2010
Seaglider™ S/N 022: 61 dives, 82.6GB acoustic data recorded
Seaglider™ S/N 023: 94 dives, 86.9GB acoustic data recorded
 - AUTEK: Atlantic Undersea Test and Evaluation Center, Bahamas
7/7/2010 – 11/7/2010
Seaglider™ S/N 178: 35 dives, 47.5GB acoustic data recorded
Seaglider™ S/N 179: 27 dives, 58.2GB acoustic data recorded

- **2010** Στην περιβαλλοντική Καταστροφή στον Κόλπο του Μεξικού, τον Μάιο του ίδιου χρόνου Seaglider από την εταιρεία iRobot βοηθά στην παρακολούθηση της πετρελαιοκηλίδας και στη συλλογή θαλάσσιων δεδομένων.
- **2011** Τον Μάιο πραγματοποιήθηκε επιτυχής δοκιμή στη Βόρεια Θάλασσα από τον Bastien Queste του Seaglider 510, γνωστό και ως Orca. Μια δοκιμαστική λειτουργία ακριβώς βόρεια της Dogger Bank (55 ° 40.76 'N 02 ° 16.16' A) έγινε για να αξιολογηθεί η ικανότητα του Seaglider να αντιμετωπίζει παλιρροιακά ρεύματα και για να εκτιμηθεί η διαρροή (drain) της μπαταρίας σε αυτή την αβαθή περιοχή.

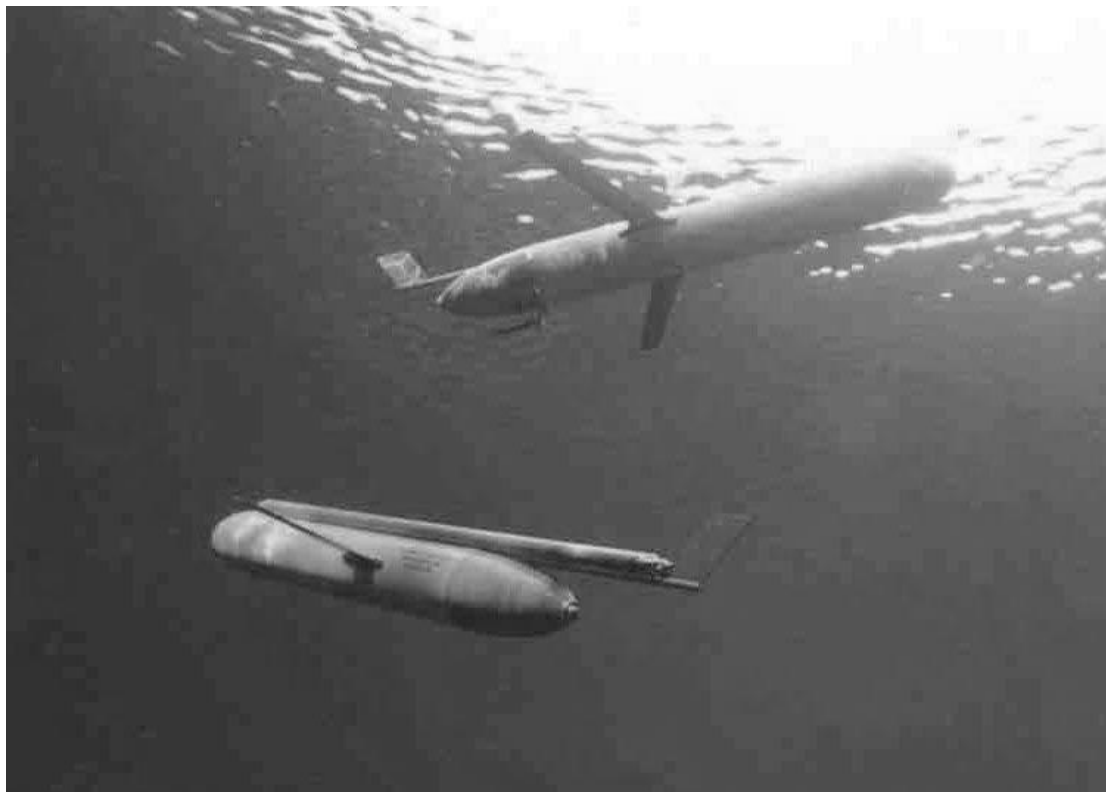
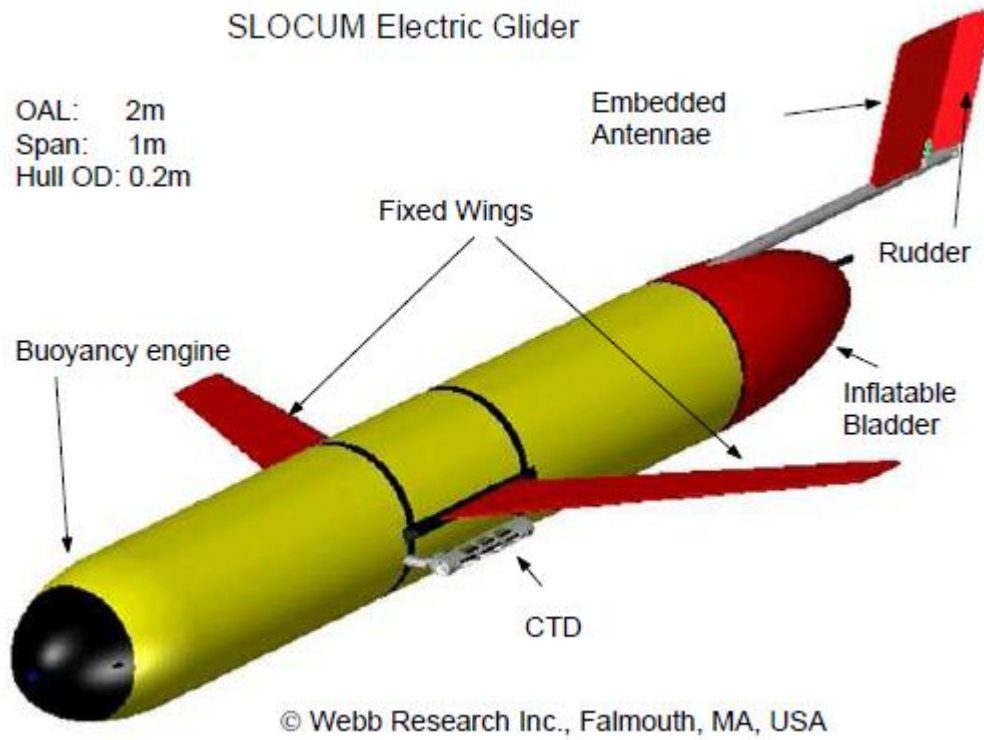
SLOCUM

Υπάρχουν τρεις τύποι Slocum Gliders, το Electric Slocum glider το οποίο μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες αυτό με εύρος λειτουργίας τα 200 m και αυτό με εύρος περί τα 1000m βάθος χρησιμοποιώντας αντλία έρματος τύπου σήραγγας, και το Thermal Slocum glider με εύρος λειτουργίας τα 1200 m

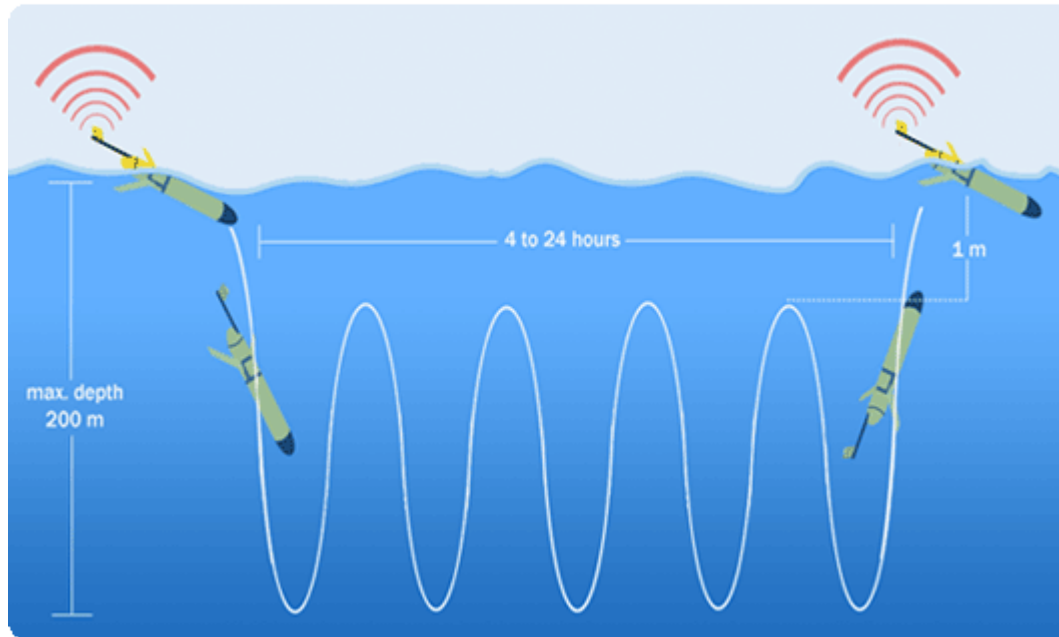
Το electric Slocum glider έχει μήκος περί το 1.5 m. Αυτό ολισθαίνει σε βάθη πάνω από 200m και η ταχύτητά του κυμαίνεται στα 0.5 m/s. Το σώμα του (η γάστρα του) έχει μήκος 1.5m και 21cm διάμετρο. Το Slocum glider χρησιμοποιεί μία αντλία έρματος σχήματος σήραγγας με 500cc όγκο χωρητικότητας. Ο προνευτασμός (pitch) ελέγχεται από την κίνηση ενός πακέτου μπαταριών, το οποίο στεγάζεται στο πρωραίο τμήμα του σώματος. Το Slocum διαθέτει ενσωματωμένα πτερύγια (wings), τα οποία έχουν σχήμα επίπεδης πλάκας. Στο πρυμναίο τμήμα βρίσκεται ένα κάθετο μικρότερο πτερύγιο (tail), όπου στεγάζεται η κεραία για το GPS και για την επικοινωνία του οχήματος με μήκος 0.3 m, και τέλος το πηδάλιο.



SLOCUM BATTERY (ΚΑΤΟΨΗ) ΚΑΙ SLOCUM THERMAL (ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ)



SLOCUM BATTERY (ΠΑΝΩ) ΚΑΙ SLOCUM THERMAL (ΚΑΤΩ)



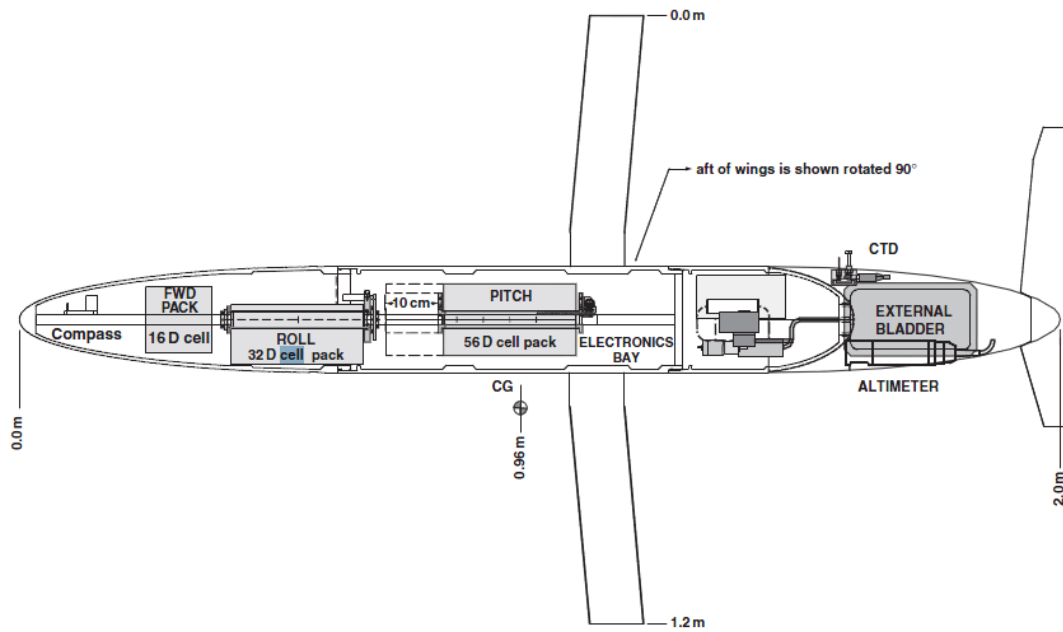
ΠΡΙΟΝΩΤΗ ΚΙΝΗΣΗ SLOCUM

SPRAY

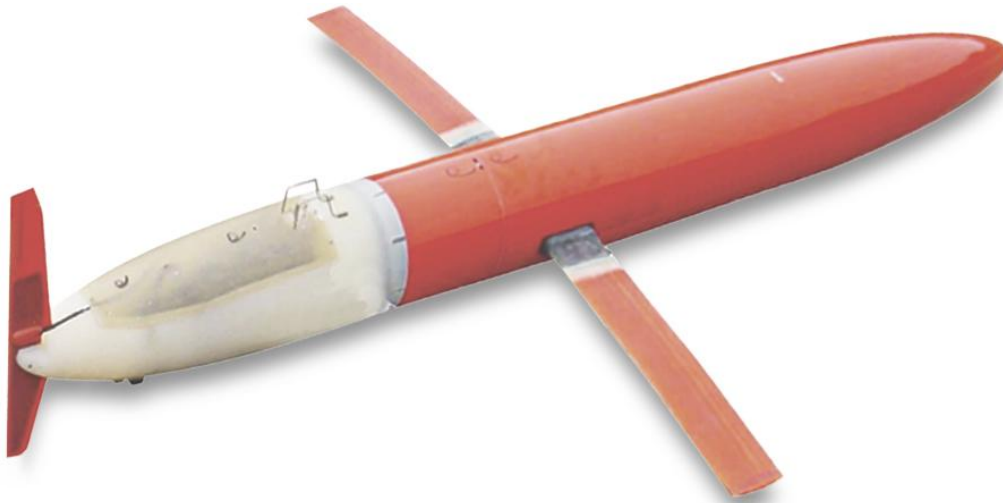
Το spray glider έχει μήκος περί τα 2 m και βάρος 50 Kg και η εμβέλεια του φτάνει τα χιλιάδες χιλιόμετρα. Ένα παράδειγμα αποτελεί τα 4000Km με 0.35 m/s οριζόντια ταχύτητα. Το spray glider χρησιμοποιεί μπαταρίες λιθίου, οι οποίες έχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση από της αλκαλικές μπαταρίες. Το spray glider έχει κυλινδρικό σώμα με δύο πτερύγια εκατέρωθεν και ένα κάθετο στο πρυμναίο μέρος του, όπου βρίσκεται και η υδραυλική αντλία έρματος.

Το spray glider χρησιμοποιεί δύο εσωτερικές μετακινούμενες μάζες, μία για την κίνηση του προνευτασμού (pitch) και μία για την κίνηση του διατοιχισμού (roll), σε αντίθεση με τα Slocum και Seaglider, όπου χρησιμοποιείται ένα μετακινούμενο πακέτο μπαταριών. Το πακέτο μπαταριών που είναι υπεύθυνο για την κίνηση του διατοιχισμού στεγάζεται στο πρωραίο τμήμα και έχει την δυνατότητα να περιστρέφεται 360 μοίρες. Το πακέτο μπαταριών που είναι υπεύθυνο για την κίνηση του προνευτασμού, μετακινείται πάνω σε ράγες οδηγούμενο από DC κινητήρες, διασχίζοντας περίπου τα 10 cm. Έτσι με την κίνηση αυτή, αλλάζει το κέντρο βάρους του οχήματος πάνω από 17 mm.

Τα δεδομένα που συλλέγει το όχημα εκπέμπονται μέσω κεραίας, η οποία είναι ενσωματωμένη σ' ένα από τα πτερύγιά του. Με τον τρόπο αυτό κάθε φορά το όχημα πρέπει να στρέψει το πτερύγιο αυτό προς την επιφάνεια για να μπορέσει να στείλει τα δεδομένα (μέσω σημάτων).



ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ SPRAY GLIDER. ΠΡΩΡΑΘΕΝ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ Η ΚΑΤΟΨΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ ΕΝΩ ΠΡΥΜΝΗΘΕΝ ΜΙΑ ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ ΤΟΥ. ΞΕΧΩΡΙΣΤΟ ΠΑΚΕΤΟ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΜΕΤΑΚΙΝΕΙΤΑΙ ΓΙΑ ΝΑ ΕΛΕΓΧΕΙ ΤΙΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΝΕΥΤΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ. Η ΚΕΡΑΙΑ ΒΡΙΣΚΕΤΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΗ Σ'ΕΝΑ ΑΠ'ΤΑ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΣΤΟ ΜΕΣΟΝ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ. ΠΡΥΜΝΗΘΕΝ ΣΤΕΓΑΖΟΝΤΑΙ ΚΑΠΟΙΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΚΑΙ Η ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΤΛΙΑ ΎΕΡΜΑΤΟΣ.



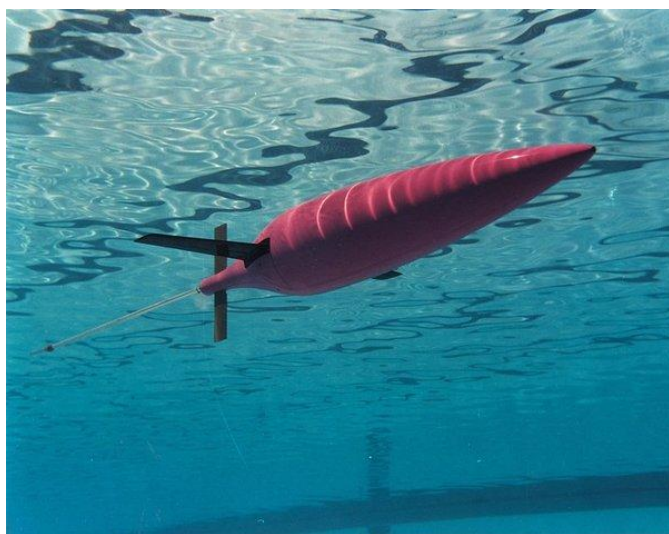
SPRAY GLIDER

SEAGLIDER

Το Seaglider είναι κατάλληλα σχεδιασμένο για μια αποτελεσματική ενεργειακή εκμετάλλευση που το καθιστά ικανό να λειτουργεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και σε δύσκολες συνθήκες. Προσαρμοσμένα σε αυτό είναι δύο πτερύγια και ένα τρίτο στο πρυμναίο τμήμα του, το οποίο βοηθά για την ισορροπία του. Τέλος, φέρει μία κεραία στο πίσω μέρος. Το περίβλημά του είναι ένα χαμηλής αντίσταση υδροδυναμικό σχήμα (με μέγιστη διάμετρο στο 70% του μήκους του), το οποίο διατηρεί ένα γραμμικό οριακό στρώμα μπροστά από το σημείο μέγιστης διαμέτρου.

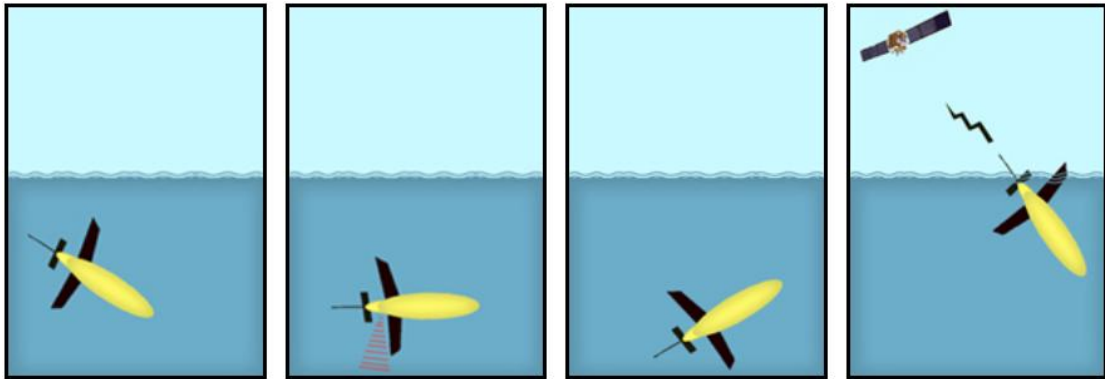
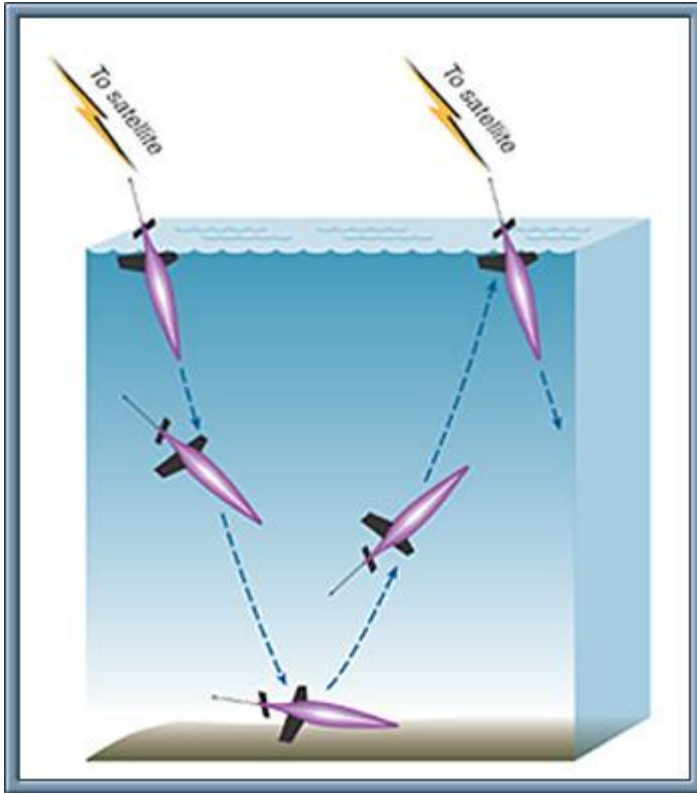
Το εσωτερικό του σκάφους βρίσκεται σε συνθήκες υπό πίεση με συμπιεστότητα παρόμοια με αυτή του θαλασσινού νερού έτσι ώστε να μην έχουμε απώλειες στην πλευστότητά του καθώς το όχημα αλλάζει βυθίσματα. Το περίβλημα αποτελείται από σχετικά εύκαμπτα ελάσματα τα οποία συγκροτούνται από ενισχυτικά μορφής δακτυλίου. Σε σύγκριση με μια συμβατική άκαμπτη γάστρα, το κύτος ενός ουδέτερης συμπιεστότητας οχήματος, μπορεί να διατηρήσει την άντληση (pumping) πάνω από 100 cm³ σε καλά επίπεδα σε κατάδυση 1000m. Το ποσό της σχετικής εξοικονόμησης ενέργειας αυξάνει ανάλογα με το βύθισμα στο τετράγωνο. Το Seaglider διατηρεί αποτελεσματικά την θέση του σε ασθενή ρεύματα πραγματοποιώντας την κίνηση του προνευτασμού σχεδόν κάθετα (pitching to near vertical) χρησιμοποιώντας την ελάχιστη δύναμη άνωσης.

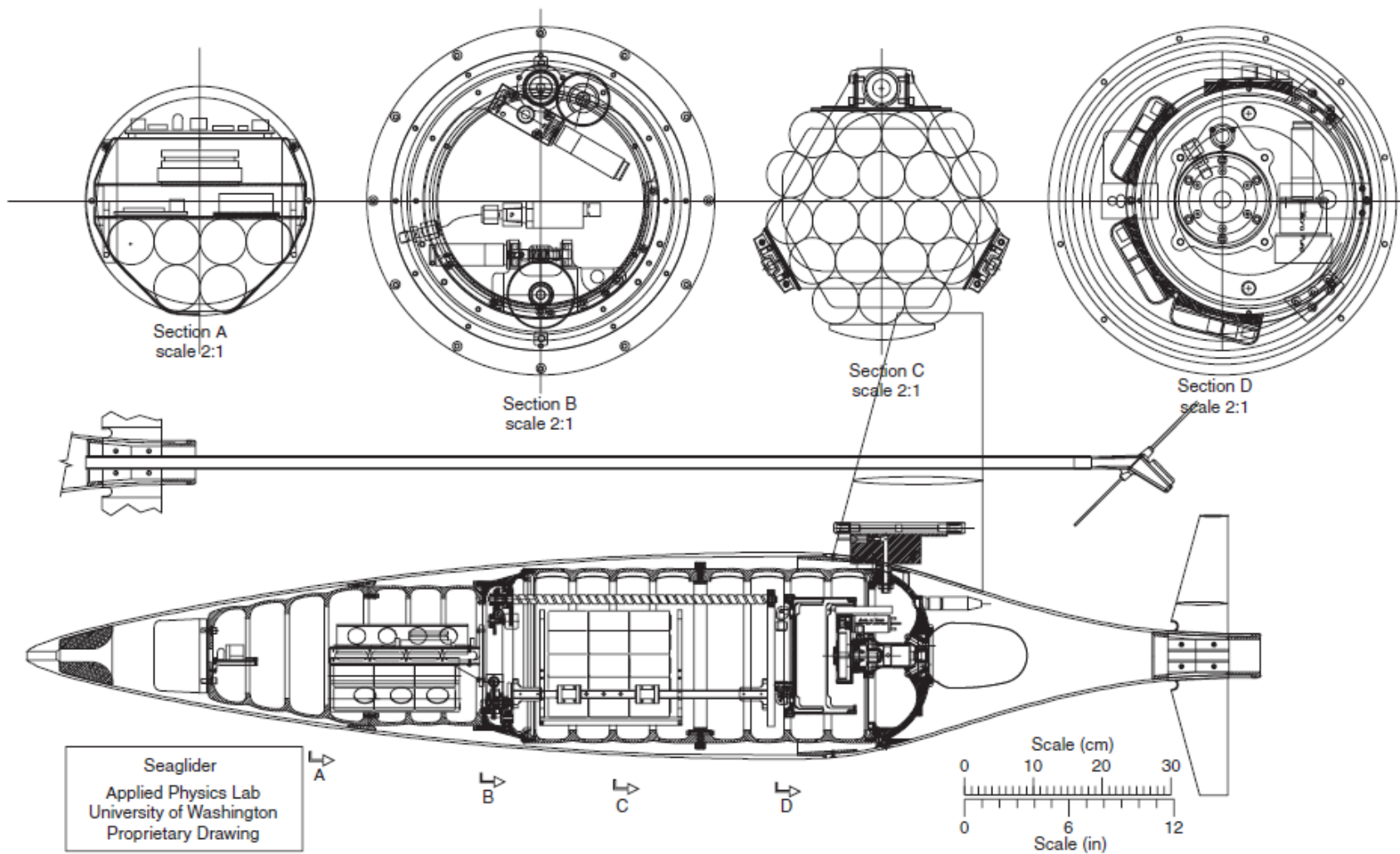
Ο έλεγχος πλευστότητας του Seaglider γίνεται από ένα υδραυλικό σύστημα τύπου ALACE. Η κίνηση κατά μήκος του οχήματος των εσωτερικών μαζών ελέγχει την ολίσθηση του οχήματος και τις κινήσεις του προνευτασμού. Κατά την κατάβαση του οχήματος, η δεξιόστροφη κίνησή του πραγματοποιείται ως εξής: το αριστερό του πτερύγιο πέφτει τόσο ώστε η δύναμη της άντωσης του πτερυγίου να στρέψει την πρύμνη προς τα αριστερά, υπερνικώντας της ανυψωτική δύναμη του stabilizer (στο πρυμναίο τμήμα του). Έτσι λοιπόν, μέσω της υδροδυναμικής δύναμης της ανώσεως δημιουργείται κεντρομόλος δύναμη η οποία καμπυλώνοντας δεξιόστροφα την πορεία του οχήματος. Αντιστρόφως, κατά την ανάβαση μία κλίση του αριστερού πτερυγίου του οχήματος προκαλεί αριστερόστροφη πορεία (και όχι δεξιόστροφη όπως κατά την κατάβαση όπως αναφέρθηκε παραπάνω).



SEAGLIDER

ΚΙΝΗΣΗ SEAGLIDER





ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ SEAGLIDER

Ακολουθούν κάποιοι συγκεντρωτικοί πίνακες με τα χαρακτηριστικά των πιο γνωστών gliders που αναλύθηκαν παραπάνω.

Slocum Electric

| | |
|---------------|---|
| Hull | Length 150 cm, Diameter 21cm, Mass 52 Kg, Payload 5 kg |
| Lift surfaces | Wing Span (chord) 120(9)cm swept 45°, stabiliser length (chord) 15(18) cm |
| Batteries | Alkaline, 260C cells, Energy 8 MJ at 21°C, Mass 18 kg |
| Volume change | Max 0.521, 90W motor and single-stroke pump, Efficiency 50% |
| Communication | RF LAN, 5700 bytes/s, 3J/Mbyte, 30 Km range, GPS navigation |
| Operating | Max P 200 dbar, Max V 0.40 m/s, Control on depth + altitude + attitude + vertical W |
| Endurance | V= 0.25m/s, 20° glide, Buoyancy 0.26 kg, Range 2.300km(estimated) |
| Cost | Construction \$50.000, Refuelling \$800 |

Slocum Thermal

| | |
|---------------|--|
| Hull | Length 150 cm (210 overall), Diameter 21cm, Displacement 52 Kg, Payload 2 kg |
| Lift surfaces | Wing Span (chord) 120(9)cm swept 45°, stabiliser length (chord) 15(13) cm |
| Batteries | Alkaline (for instrumentation, communication), Energy 6 MJ at 21°C, Mass 14 kg |
| Volume change | Max 0.41, 6kj harvested each cycle, 10°C minimum temperature difference |
| Operating | Max P 1,200 dbar, Max V 0.27 m/s, Control on depth + attitude + vertical W |
| Endurance | V= 0.25m/s, 38° glide, Buoyancy 0.235 kg, Range 30.000km(estimated) |
| Cost | Construction \$70.000, Refuelling \$800 |

Spray

| | |
|---------------|--|
| Hull | Length 200 cm, Diameter 20cm, Mass 51 Kg, Payload 3.5 kg |
| Lift surfaces | Wing Span (chord) 120(10)cm, vertical stabilizer length (chord) 49(7) cm |
| Batteries | Primary lithium sulfuryl chloride, 52D cells in 3 packs, Energy 13 MJ at 0°C, Mass 12 kg |
| Volume change | Max 0.91, Motor and reciprocating pump, 50(20) % efficient at 1000(100)dbar |
| Communication | Orbocomm satellite, 2-way, 0.5 byte/s net, 400 j/kbyte, GPS navigation |
| Operating | Max P 1500 dbar, Max V 0.45 m/s, Control on depth + altitude + attitude + vertical W |
| Endurance | V= 0.25m/s, 18° glide, Buoyancy 0.15 kg, Range 7000km, endurance330 days |
| Cost | Construction \$25.000, Refuelling \$2.850 |

Seaglider

| | |
|---------------|--|
| Hull | Length 180 cm (overall 330), Diameter 30cm, Mass 52 Kg, Payload 4kg |
| Lift surfaces | Wing Span (av chord) 100(16)cm, vertical stabilizer span (chord) 40(7) cm |
| Batteries | Primary lithium thionyl chloride, 81D cells in 2 packs, Energy 10 MJ at 0°C, Mass 9.4 kg |
| Volume change | Max 0.8401, Motor and reciprocating pump, 40(8) % efficient at 1000(100)dbar |
| Communication | Cellular 450 byte/s net, 26 J/Kbyte, Iridium 40 byte/s, 110 J/Kbyte (predicted) |
| Operating | Max P 1,000 dbar, Max V 0.45 m/s, Control on depth + attitude + vertical W |
| Endurance | V= 0.25m/s, 18° glide, Buoyancy 0.22 kg, Range 4500km, endurance220 days |
| Cost | Construction \$60.000, Refuelling \$1.375 |

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΔΟΣΙΑΚΩΝ ΥΔΡΟΠΤΕΡΩΝ

| Χαρακτηριστικά | Slocum Electric | Spray | Seaglider |
|---------------------------|--|--|--|
| Μέγεθος | 1.5m μήκος, 21.3 cm διάμετρος | 2m μήκος, 20 cm διάμετρος | 1.8 m μήκος, 30 cm διάμετρος |
| Μάζα | 52 Kg | 51 Kg | 52 Kg |
| Μπαταρίες | 260 alkaline C Cells, 8 MJ | 52 Lithium CSC DD cells, 13 MJ | 81 Lithium D Cells, 10 MJ |
| Μεταβολή όγκου | 520cc | 900cc | 840cc |
| Οριζόντια ταχύτητα | 0.4 m/s | 0.45 m/s | 0.45 m/s |
| Εμβέλεια | 2300Km, 30 μέρες 20° glide, 0.25 m/s οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας | 7000 Km, 330 μέρες, 18° glide, 0.25m/s οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας | 4500 Km, 220 μέρες, 18° glide, 0.25m/s οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας |
| Μέγιστο Βύθισμα | 200 m | 1500 m | 1000 m |
| Πτερύγια | 98 cm span, 14 cm chord | 120 cm span, 10cm chord | 100 cm span, 16 cm chord |

GLIDER MODEL: ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

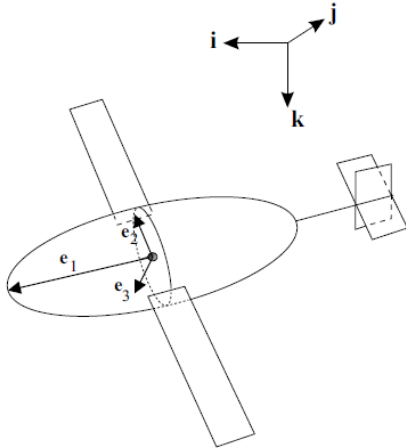
ΑΔΡΑΝΕΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Ας θεωρήσουμε ένα αδρανειακό, μη περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς xyz. Οι άξονες x και y ορίζουν το οριζόντιο επίπεδο, κάθετο στη βαρύτητα. Ο άξονας z έχει την ίδια διεύθυνση με το διάνυσμα της βαρύτητας και είναι θετικός προς τα κάτω. Ως i, j, k ορίζονται τα μοναδιαία διανύσματα των x,y,z κατευθύνσεων αντίστοιχα. Μπορεί να επιλεγεί ένα αδρανειακό σύστημα στο οποίο για z=0 να αντιστοιχεί στην θαλάσσια επιφάνεια, οπότε το z να συμβολίζει το μέγεθος του βάθους.

ΣΩΜΑΤΟΠΑΓΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ

Ας προσδιορίσουμε ένα σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων στο σώμα του glider με την αρχή των αξόνων του συστήματος να συμπίπτει με το κέντρο άντωσης (CB) του σώματος. Ως άξονας 1 ορίζεται ο διαμήκης άξονας του σώματος με θετική

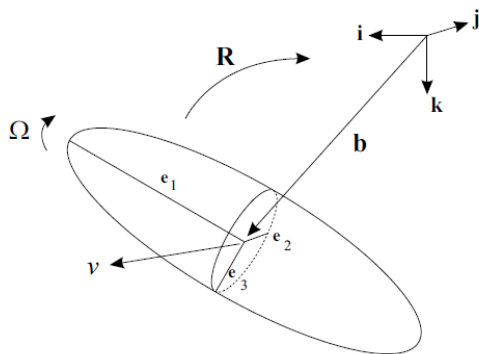
φορά προς την πλώρη του οχήματος, ως άξονας 2 ορίζεται ο άξονας παράλληλος ως προς τα πλευρικά πτερύγια του οχήματος και ως άξονας 3 ορίζεται ο κάθετος άξονας στο επίπεδο των πτερυγίων.



FRAME ASSIGNMENT ON UNDERWATER GLIDER

Ο προσανατολισμός του glider δίνεται από τον πίνακα στροφής R . Με τη βοήθεια του πίνακα στροφής R γίνεται η μετατροπή των συντεταγμένων από το σωματοπαγές σύστημα του glider στο αδρανειακό σύστημα. Η μετατροπή από το αδρανειακό στο σωματοπαγές σύστημα εξαρτάται από τρεις γωνίες : ψ (yaw) , θ (pitch) , φ (roll). Η γωνία ψ είναι θετική σύμφωνα με τους δείκτες του ρολογιού, η γωνία θ είναι θετική όταν η πλώρη είναι προς τα πάνω και η γωνία φ είναι θετική όταν το δεξί πτερύγιο κοιτά προς τα κάτω.

Η θέση του οχήματος προσδιορίζεται από το διάνυσμα $b = (x \ y \ z)^T$ που η αρχή του είναι η αρχή των αξόνων του αδρανειακού συστήματος και το τέλος του είναι η αρχή των αξόνων του σωματοπαγές συστήματος.



GLIDER POSITION AND ORIENTATION VARIABLES

Η κίνηση του οχήματος χαρακτηρίζεται από την μεταφορική ταχύτητα $u = (u_1, u_2, u_3)^T$ και την γωνιακή ταχύτητα $\Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3)^T$ εκφραζόμενες και οι δύο στο σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων.

Με το σύμβολο \hat{x} για το διάνυσμα $x = (x_1, x_2, x_3)^T$ έχουμε το εξής

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ x_2 & x_1 & 0 \end{pmatrix}$$

Στη συνέχεια για το διάνυσμα $\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3)^T$

$$\hat{\mathbf{x}}\mathbf{y} = \begin{pmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ x_2 & x_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}$$

Με αυτή τη σημειογραφία, η κινηματική του glider δίνεται ως εξής :

$$\dot{R} = R\hat{\Omega}$$

$$\dot{b} = Ru$$

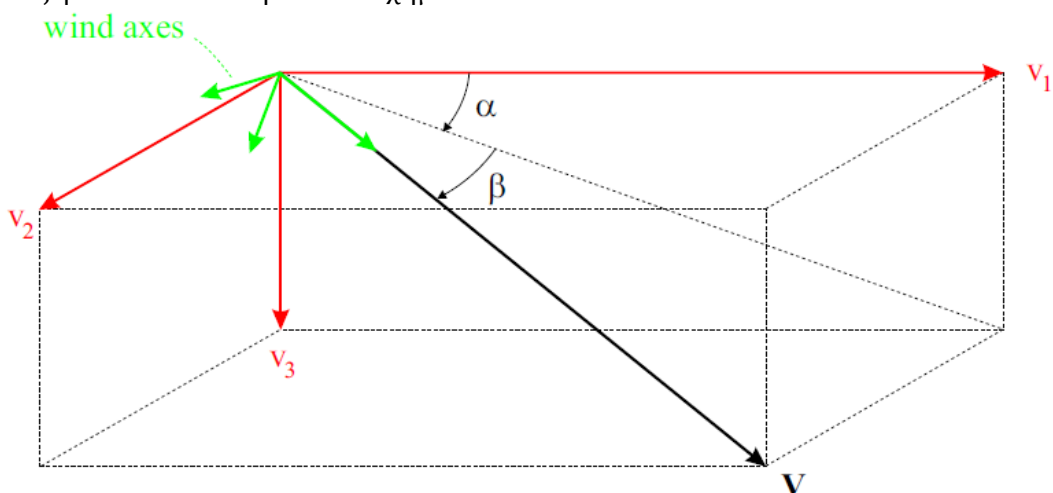
ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΡΕΥΣΤΟΥ

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις στο υποβρύχιο όχημα εξαρτώνται από την ταχύτητα και τον προσανατολισμό του οχήματος σχετικά με το ρευστό στο οποίο κινείται. Η ταχύτητα του υποβρυχίου υδροπτέρου σε σχέση με το ρευστό συμβολίζεται ως \mathbf{u}_r . Χωρίς την παρουσία ρευμάτων, όταν το ρευστό βρίσκεται σε ηρεμία σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς, η ταχύτητα \mathbf{u}_r είναι ίση με την ταχύτητα του οχήματος \mathbf{v} . Ορίζεται ένα σύστημα αναφοράς του περιρρέοντος ρευστού για να παρακολουθείται ο προσανατολισμός του υδροπτέρου σε σχέση με τη σχετική ταχύτητά του μέσα στο νερό.

Ο προσανατολισμός του συστήματος περιρρέοντος ρευστού σε σχέση με το σωματοπαγές σύστημα θα περιγραφεί με δύο υδροδυναμικές γωνίες, την γωνία προσβολής (angle attack) α και την γωνία πλαγιολίσθησης (sideslip) β . Το σύστημα αναφοράς του περιρρέοντος ρευστού ορίζεται με τον έναν άξονά του να συμπίπτει με την κατεύθυνση της ταχύτητας \mathbf{u}_r . Οι υδροδυναμικές γωνίες ορίζονται ως εξής :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{v_{r3}}{v_{r1}} \right) \text{ και } \beta = \tan^{-1} \left(\frac{v_{r2}}{\|\mathbf{v}_r\|} \right)$$

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Το σύστημα αναφοράς του ρευστού $X_c Y_c Z_c$ έχει την αρχή του στο κέντρο άντωσης CB του υδροπτερού ενώ ο άξονας x_c έχει την κατεύθυνση της σχετικής ταχύτητας του υδροπτερού στο νερό u_r . Οι άξοντες y_c και z_c προκύπτουν από την εξής ακολουθία περιστροφών:

1. Αρχικά το σύστημα αναφοράς που κινείται με το ρευστό ταυτίζεται με το σωματοπαγές, δηλαδή οι άξονες $X_c Y_c Z_c$ ταυτίζονται με του $X_b Y_b Z_b$ αντίστοιχα.
2. Περιστρέφουμε κατά γωνία α γύρω από τον άξονα y_c . Η περιστροφή αυτή εκφράζεται από το μητρώο $R_\alpha(\alpha)$.
3. Περιστρέφουμε γύρω από τον άξονα Z_c κατά γωνία β . Η περιστροφή αυτή γράφεται σαν $R_\beta(\beta)$.

Ο άξονας Z_c βρίσκεται στο επίπεδο X_b-Z_b . Η περιστροφή από το σωματοπαγές στο σύστημα του ρευστού δίνεται από το μητρώο $R_{BC}(\alpha, \beta)$.

$$R_\alpha(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \quad R_\beta(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_{BC}(\alpha, \beta) = R_\beta R_\alpha = \begin{pmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \sin\beta & \sin\alpha \cos\beta \\ -\cos\alpha \sin\beta & \cos\beta & -\sin\alpha \sin\beta \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix}$$

Όπου το μητρώο $R_{BC}(\alpha, \beta)$ μετατρέπει τα διανύσματα που δίνονται ως προς το σύστημα του ρευστού, στο σωματοπαγές.

ΠΕΥΜΑΤΑ

Η λειτουργία του υποβρύχιου οχήματος μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία ρευμάτων, όπου το νερό βρίσκεται σε κίνηση σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς.

Συμβολίζοντας ως u_r την ταχύτητα του υδροπτερού ως προς το ρευστό εκφρασμένη στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς και ως $V_c = (V_{cx} \ V_{cy} \ V_{cz})$ την ταχύτητα του ρευστού ως προς το αδρανειακό σύστημα εκφρασμένη σε αδρανειακές συντεταγμένες έχουμε ότι:

$$u_r = u - R^T V_c$$

και

$$\dot{b} = Ru = Ru_r + V_c$$

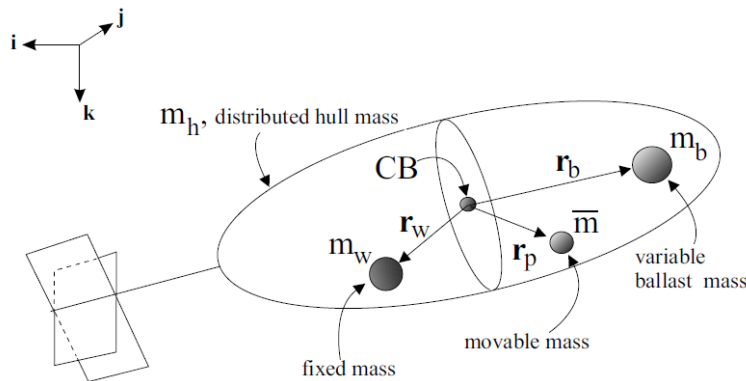
Έχοντας κάνει την υπόθεση ότι οι διατμητικές επιδράσεις των πτερυγίων είναι αμελητέες.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΓΕΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ

Στη συνέχεια γίνεται μελέτη της δυναμικής ενός γενικού μοντέλου αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος, το οποίο θεωρείται ως στερεό σώμα, βυθισμένο στο νερό και αποτελείται από πτερύγια και ουρά. Το όχημα περιλαμβάνει ρυθμιστή άντωσης και μια ελεγχόμενη κινούμενη εσωτερική μάζα. Το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων έχει την αρχή του στο κέντρο άντωσης (CB) του σώματος και οι άξονές του εκτείνονται όπως έχει περιγραφεί λίγο παραπάνω.

Η συνολική στατική μάζα του glider m_s , επίσης αναφέρεται και ως η μάζα του σώματος, είναι το άθροισμα τριών μαζών: $m_s = m_h + m_w + m_b$. Ως m_h συμβολίζεται η μάζα της γάστρας του οχήματος. Τρεις εσωτερικές σημειακές μάζες περιλαμβάνονται στο υπό μελέτη μοντέλο. Οι m_w και m_b , οι οποίες εμπεριέχονται στην m_s , είναι η σταθερή σημειακή μάζα και η σημειακή μεταβλητή μάζα έρματος αντίστοιχα, οι οποίες ορίζονται από το κέντρο άντωσης CB. Και τέλος, η τρίτη σημειακή μάζα είναι η κινούμενη εσωτερική σημειακή μάζα \bar{m} . Οι εσωτερικές μάζες και τα διανύσματα θέσεών τους σκιαγραφούνται στην εικόνα που ακολουθεί.



GLIDER MASS DEFINITIONS

Έτσι, η ολική μάζα του υδροπτερού είναι :

$$m_v = m_h + m_w + m_b + \bar{m} = m_s + \bar{m}$$

Οι θέσεις, στο σωματοπαγές σύστημα, των σημειακών μαζών m_w και m_b δίνονται από τα διανύσματα r_w και r_b με αρχή το κέντρο άντωσης CB και τέλος τις αντίστοιχες μάζες. Το διάνυσμα $r_p(t)$ περιγράφει τη θέση της κινούμενης μάζας \bar{m} στο σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων την χρονική στιγμή t .

Οι παράμετροι της στατικής μάζας m_w και r_w μπορεί να καθοριστούν για την ισορροπία της ροπής προνευτασμού (pitching) και διατοιχισμού (rolling) και να προσδιορίσουν την αδράνεια του οχήματος.

Η μάζα του εκτοπισμένου ρευστού από το όχημα συμβολίζεται ως m . Μπορούμε να ορίσουμε την ποσότητα $m_o = m_v - m$, ώστε το όχημα να αποκτά αρνητική (θετική) πλευστότητα όταν το m_o είναι θετικό (αρνητικό).

Συμβολίζοντας με J_h τον πίνακα αδρανείας, προσδιορισμένο στο σωματοπαγές σύστημα, για την ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα της γάστρας, τότε ο αδρανειακός

πίνακας για την στατική μάζα του σώματος εκφρασμένος κι αυτός στο σωματοπαγές σύστημα θα είναι :

$$J_s = J_h - m_w \widehat{r}_w \widehat{r}_w - m_b \widehat{r}_b \widehat{r}_b$$

Ο έλεγχος πραγματοποιείται μέσω δύο σημειακών μαζών μέσα στο όχημα: της μεταβλητής μάζας έρματος m_b σταθερής θέσης r_b και της σταθερής μάζας m_m μεταβλητής θέσης $r_m(t)$. Το σήμα εισόδου \dot{m}_b καθορίζει το ρυθμό αλλαγής της υπό έλεγχο μεταβλητής μάζας, ενώ ένα άλλο σήμα εισόδου αντιστοιχεί στη δύναμη που ασκείται στη μετακινούμενη μάζα.

ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΡΜΑΤΟΣ

Στο γενικό μοντέλο που εξετάζουμε, η επιλογή των εσωτερικών μαζών έγινε βασισμένη στις γεωμετρίες των Slocum, Spray και Seaglider. Έτσι, αρχικά για το σχέδιο του Slocum, η μάζα έρματος (ballast mass) m_b και η εσωτερική κινούμενη μάζα \bar{m} βρίσκονται και οι δύο ορισμένες στο προωαίο τμήμα του οχήματος (πρώραθεν του κέντρου αντώσεως CB). Αντιθέτως, στο Spray και στο Seaglider, τα συστήματα έρματος βρίσκονται στο πρυμναίο μέρος του οχήματος (πρύμνηθεν του CB). Για το Slocum glider το σύστημα έρματος είναι μία δεξαμενή σε μορφή σύριγγας η οποία προσλαμβάνομενη νερό, θέτει το όχημα σε αρνητική πλευστότητα, δίνοντας έτσι μία κλίση προς τα κάτω της μύτης (του προωαίου μέρους) του glider.

Στο Spray και στο Seaglider ο έλεγχος του έρματος γίνεται με την χρήση μίας ελαίου γεμισμένης εξωτερικής κοιλότητας (external oil-filled bladder). Αυτό πρόκειται για ένα μπαλόνι συνδεδεμένο μέσω αντλίας με μία δεξαμενή ελαίου στο εσωτερικό της γάστρας. Αντλώντας έλαιο από την εσωτερική δεξαμενή στην εξωτερική κοιλότητα αντικαθίσταται το νερό (μικρότερη πυκνότητα) με το έλαιο και έτσι αυξάνεται η άντωση (buoyancy) του οχήματος, ενώ αντλώντας έλαιο από την εξωτερική κοιλότητα στην δεξαμενή ελαίου στο εσωτερικό της γάστρας μειώνεται η άντωση (buoyancy).

Συστήματα έρματος αυτού του τύπου μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας το γενικό μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ. Ο όγκος της γεμισμένης φουσκωμένης εξωτερική κοιλότητας (fully inflated external bladder) μπορεί να αντιστοιχιστεί ως ο όγκος ελέγχου (control volume) και η αντίστοιχη μάζα στο εσωτερικό του, ως η σημειακή μάζα έρματος (ballast point mass). Όταν η εξωτερική κοιλότητα είναι φουσκωμένη (inflated), η μάζα έρματος (ballast mass) είναι η μάζα της εξωτερικής κοιλότητας και του ελαίου. Ενώ, όταν η εξωτερική κοιλότητα είναι ξεφούσκωτη, η μάζα έρματος είναι ίση με την μάζα του νερού στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου. Η εσωτερική δεξαμενή ελαίου μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μία ξεχωριστή μάζα έρματος, ή μαζί με την εξωτερική δεξαμενή έρματος να αποτελέσουν μία σημειακή μάζα έρματος τοποθετούμενη σε ένα ενδιάμεσο σημείο. Η επιλογή για το αν θα διαμορφωθούν μία ή δύο μάζες έρματος εξαρτάται από την απόσταση των δύο δεξαμενών

ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΜΑΖΕΣ (CONTROLLED INTERNAL MASSES)

Σε δύο σημειακές μάζες γίνεται έλεγχος στο εσωτερικό του οχήματος: στην μεταβλητή μάζα του έρματος (ballast mass) η οποία έχει μεταβλητό μέγεθος αλλά

σταθερό διάνυσμα θέσης r_b και στην κινητή σημειακή μάζα \bar{m} η οποία έχει σταθερό μέγεθος και μεταβλητό διάνυσμα θέσης r_p . Ο έλεγχος για την m_b μας δίνει ένα εύρος των αλλαγών που γίνονται στο μέγεθος της μάζας έρματος, ενώ ο έλεγχος στην κινητή μάζα μας δίνει δεδομένα για την δύναμη που ασκείται πάνω σε αυτήν.

Στο Spray glider, υπάρχουν δύο κινητές μάζες, η μία μάζα επηρεάζει την κίνηση του διατοιχισμού και η άλλη την κίνηση του προνευτασμού. Για να μοντελοποιηθεί αυτό το σύστημα, η δεύτερη ελεγχόμενη κινητή μάζα μπορεί να προστεθεί στο γενικό μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ και να προσδιοριστεί με όμοιους όρους όπως για τις m_b , m_w , \bar{m} .

ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ : ΑΝΤΩΣΗ ΚΑΙ ΒΑΡΥΤΗΤΑ

Τα υποβρύχια οχήματα υπόκεινται στις δυνάμεις βαρύτητας και άντωσης. Συχνά αυτές οι δύο δυνάμεις αναφέρονται στην ορολογία για τα υποβρύχια οχήματα ως δυνάμεις επαναφοράς. Η βαρυτική δύναμη του οχήματος, $m_w g$ δρα στο κέντρο βάρους (CG) του, έχοντας θετική φορά (προς τα κάτω) και διεύθυνση στον αδρανειακό άξονα κ. Η θέση του κέντρου βάρους CG ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{r}_{CG} = \frac{\int \mathbf{r} \rho(\mathbf{r}) dV}{\int \rho(\mathbf{r}) dV}.$$

Όπου $\rho(\mathbf{r})$ είναι η πυκνότητα, dV ο στοιχειώδης όγκος και η ολοκλήρωση γίνεται πάνω στον όγκο του οχήματος. Για τις μάζες του glider που έχουν οριστεί προηγουμένως έχουμε ότι :

$$\mathbf{r}_{CG} = \frac{\sum_i m_i \mathbf{r}_i}{\sum m_i} = \frac{m_h \mathbf{r}_h + m_w \mathbf{r}_w + m_b \mathbf{r}_b + \bar{m} \mathbf{r}_p}{m_h + m_w + m_b + \bar{m}} \quad (1).$$

Να σημειωθεί ότι και οι δύο ελεγχόμενες μάζες, m_b και \bar{m} , εμφανίζονται στην παραπάνω εξίσωση. Επίσης, το διάνυσμα θέσεως \mathbf{r}_h , της μάζας της γάστρας του σώματος, είναι πάντα μηδενικό επειδή η μάζα της γάστρας έχει μοντελοποιηθεί να είναι ομοιόμορφα κατανομημένη, οπότε το κέντρο βάρους της CG συμπίπτει πάντα με το κέντρο άνωσης του υποβρύχιου οχήματος CB (το οποίο είναι και η αρχή των αξόνων του σωματοπαγούς συστήματος), έτσι $\mathbf{r}_h = 0$.

Η δύναμη της άνωσης, σύμφωνα με την Αρχή του Αρχιμήδη, οφείλεται στο εκτόπισμα του υγρού από τον όγκο του υποβρύχιου οχήματος. Η δύναμη αυτή προκύπτει από την πίεση που ασκείται από το περιβάλλοντα υγρό στην επιφάνεια του υποβρύχιου οχήματος. Το κέντρο άνωσης του glider εκφράζει το κέντρο του εκτοπιζόμενου όγκου. Η δύναμη της άνωσης έχει αρνητική φορά (προς τα πάνω) στον άξονα κ.

Εκφραζόμενες στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων η δύναμη της βαρύτητας και της άνωσης είναι :

$$\mathbf{f}_{gravity} = m_w g(\mathbf{R}^T \mathbf{k}) \quad \text{και} \quad \mathbf{f}_{buoyancy} = -m g(\mathbf{R}^T \mathbf{k})$$

Το διάνυσμα θέσης του κέντρου βάρους CG ως προς το κέντρο άνωσης CB είναι το \mathbf{r}_{CG} , οπότε η ροπή εξαιτίας της βαρυτικής δύναμης που προκαλείται στο όχημα εκφραζόμενη στο σωματοπαγές σύστημα είναι :

$$\boldsymbol{\tau}_{gravity} = \mathbf{r}_{CG} \times m_v \mathbf{g}(\mathbf{R}^T \mathbf{k}) = m_v \mathbf{g} \widehat{\mathbf{r}}_{CG}(\mathbf{R}^T \mathbf{k}).$$

Καθώς η αρχή των αξόνων του σωματοπαγούς συστήματος συμπίπτει με το κέντρο άνωσης του οχήματος CB, η ροπή εξαιτίας της δύναμης άντωσης θα είναι μηδενική στο σωματοπαγές σύστημα. Από την εξίσωση (1) έχουμε ότι :

$$m_v \mathbf{r}_{CG} = m_w \mathbf{r}_w + m_b \mathbf{r}_b + \bar{m} \mathbf{r}_p$$

έτσι η ροπή κλίσης είναι ίση με:

$$\boldsymbol{\tau}_{gravity} = (m_w \widehat{\mathbf{r}}_w + m_b \widehat{\mathbf{r}}_b + \bar{m} \widehat{\mathbf{r}}_p) \mathbf{g}(\mathbf{R}^T \mathbf{k}).$$

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Οι εξισώσεις κίνησης του υδροπτερού θα προκύψουν υπολογίζοντας την ορμή από την συνολική ενέργεια του συστήματος όχημα-ρευστού και κάνοντας εφαρμογή του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα.

Ως \mathbf{p} συμβολίζεται η συνολική ορμή του συστήματος οχήματος-ρευστού και ως $\boldsymbol{\pi}$ η συνολική στροφορμή του, όλες εκφρασμένες στο αδρανειακό σύστημα. Ως p_p συμβολίζεται η συνολική ορμή της κινούμενης σημειακής μάζας \bar{m} ως προς το αδρανειακό σύστημα. Παρομοίως, ως p_b και p_w συμβολίζονται η συνολική ορμή της μάζας έρματος (ballast mass) m_b και της σημειακής μάζας m_w αντίστοιχα, εκφρασμένες κι αυτές στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων. Έτσι από τον νόμο του Νεύτωνα έχουμε ότι :

$$\dot{\mathbf{p}} = \sum_{i=1}^I \mathbf{f}_{ext_i}$$

$$\dot{\boldsymbol{\pi}} = \sum_{i=1}^I (\mathbf{x}_i \times \mathbf{f}_{ext_i}) + \sum_{j=1}^J \boldsymbol{\tau}_{ext_j}$$

$$\dot{p}_p = \bar{m}g\mathbf{k} + \sum_{k=1}^K \mathbf{f}_{int_pointmass_k}$$

$$\dot{p}_b = m_b g \mathbf{k} + \sum_{l=1}^L \mathbf{f}_{int_ballast_l}$$

$$\dot{p}_w = m_w g \mathbf{k} + \sum_{n=1}^N \mathbf{f}_{int_w_n}$$

Όπου \mathbf{k} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα του κ άξονα, \mathbf{f}_{ext_i} μία εξωτερική δύναμη εφαρμοζόμενη στο σύστημα και $\boldsymbol{\tau}_{ext_j}$, εξωτερική ροπή. Όλα τα διανύσματα είναι εκφρασμένα στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων. Το διάνυσμα \mathbf{x}_i αντιπροσωπεύει το σημείο εφαρμογής της εξωτερικής δύναμης \mathbf{f}_{ext_i} , εκφρασμένο στο αδρανειακό σύστημα αξόνων. Σ' αυτές τις εξωτερικές δυνάμεις και ροπές συμπεριλαμβάνονται κι αυτές που οφείλονται από την δύναμη της βαρύτητας και της άνωσης. Εν τούτοις, η δύναμη της βαρύτητας συμπεριλαμβάνεται στις τρεις τελευταίες εξισώσεις καθώς είναι η μόνη εξωτερική δύναμη που δρα πάνω σε αυτές τις σημειακές μάζες. Η δύναμη $\mathbf{f}_{int_pointmass_k}$ είναι η εφαρμοσμένη δύναμη που ασκείται από το σώμα του οχήματος στην σημειακή μάζα. Παρόμοια και για τις δυνάμεις $\mathbf{f}_{int_ballast_l}$ και $\mathbf{f}_{int_w_n}$.

Ως P, Π, P_p, P_b, P_w συμβολίζονται οι αντίστοιχες ορμές όπως ορίστηκαν παραπάνω εκφρασμένες όμως στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων. Οπότε έχουμε ότι :

$$\mathbf{p} = R\mathbf{P}$$

$$\boldsymbol{\pi} = R\Pi + \mathbf{b} \times \mathbf{p}$$

$$\mathbf{p}_p = RP_p$$

$$\mathbf{p}_b = RP_b$$

$$\mathbf{p}_w = RP_w$$

Παραγωγίζοντας τις παραπάνω εξισώσεις και κάνοντας χρήση τις ακόλουθες εκφράσεις

$$\dot{R} = R\hat{\Omega}$$

$$\dot{\mathbf{b}} = R\mathbf{u}$$

Έχουμε,

$$\dot{\mathbf{p}} = R(\dot{\mathbf{P}} + \hat{\Omega}\mathbf{P})$$

$$\dot{\boldsymbol{\pi}} = R(\dot{\Pi} + \hat{\Omega}\Pi) + R\mathbf{u} \times \mathbf{p} + \mathbf{b} \times \dot{\mathbf{p}}$$

$$\dot{\mathbf{p}}_p = R(\dot{P}_p + \hat{\Omega}P_p)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_b = R(\dot{P}_b + \hat{\Omega}P_b)$$

$$\dot{\mathbf{p}}_w = R(\dot{P}_w + \hat{\Omega}P_w)$$

Συνδυάζοντας τα παραπάνω, προκύπτουν οι δυναμικές εξισώσεις σε συντεταγμένες του σωματοπαγούς συστήματος.

$$\begin{aligned}\dot{P} &= P \times \Omega + R^T \sum_{i=1}^I f_{ext_i} \\ \dot{\Pi} &= \Pi \times \Omega + P \times u + R^T \left(\sum_{i=1}^I (x_i - b) \times f_{ext_i} \right) + R^T \sum_{j=1}^J \tau_{ext_j} \\ \dot{P}_p &= P_p \times \Omega + \bar{m}g(R^T k) + R^T \sum_{k=1}^K f_{int_pointmass_k} \\ \dot{P}_b &= P_b \times \Omega + m_b g(R^T k) + R^T \sum_{l=1}^L f_{int_ballast_l} \\ \dot{P}_w &= P_w \times \Omega + m_w g(R^T k) + R^T \sum_{n=1}^N f_{int_w_n}\end{aligned}$$

Όπου $R^T \sum_{k=1}^K f_{int_pointmass_k}$ είναι η εσωτερική δύναμη που δρα στην σημειακή μάζα \bar{m} σε συντεταγμένες σωματοπαγούς συστήματος.

Έστω,

$$\bar{u} = \begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{u}_3 \end{pmatrix} = \dot{P}_p$$

$$u_b = \begin{pmatrix} u_{b_1} \\ u_{b_2} \\ u_{b_3} \end{pmatrix} = \dot{P}_b$$

$$u_w = \begin{pmatrix} u_{w_1} \\ u_{w_2} \\ u_{w_3} \end{pmatrix} = \dot{P}_w$$

Στη συνέχεια γίνεται μελέτη της κινητικής ενέργειας του συστήματος οχήματος-ρευστού ώστε να προκύψουν εξισώσεις για τις P, Π, P_p, P_b και P_w που να περιλαμβάνουν τις ταχύτητες u και Ω .

Η κινητική ενέργεια του σώματος με συνολική μάζα m_s είναι :

$$T_s = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u \\ \Omega \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_s I & -m_s \hat{r}_s \\ m_s \hat{r}_s & J_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ \Omega \end{pmatrix}$$

Έστω u_p η απόλυτη ταχύτητα της κινούμενης σημειακής μάζας \bar{m} εκφρασμένη σε συντεταγμένες σωματοπαγούς συστήματος. Δεδομένου ότι η ταχύτητα της \bar{m} στο σωματοπαγές σύστημα είναι \dot{r}_p , υπολογίζουμε ότι :

$$u_p = u + \dot{r}_p + \Omega \times r_p$$

Έτσι η κινητική ενέργεια της κινούμενης σημειακής μάζας είναι:

$$T_p = \frac{1}{2} \bar{m} \|u_p\|^2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u \\ \Omega \\ \dot{r}_p \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{m}I & -\bar{m}\hat{r}_p & \bar{m}I \\ \bar{m}\hat{r}_p & -\bar{m}\hat{r}_p\hat{r}_p & \bar{m}\hat{r}_p \\ \bar{m}I & -\bar{m}\hat{r}_p & \bar{m}I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ \Omega \\ \dot{r}_p \end{pmatrix}$$

Υπολογίζοντας με τον ίδιο τρόπο την κινητική ενέργεια και για τις άλλες μάζες έχουμε :

$$T_b = \frac{1}{2} m_b \|u_b\|^2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u \\ \Omega \\ \dot{r}_b \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_b I & -m_b \hat{r}_b & m_b I \\ m_b \hat{r}_b & -m_b \hat{r}_b \hat{r}_b & m_b \hat{r}_b \\ m_b I & -m_b \hat{r}_b & m_b I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ \Omega \\ \dot{r}_b \end{pmatrix}$$

$$T_w = \frac{1}{2} m_w \|u_w\|^2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u \\ \Omega \\ \dot{r}_w \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_w I & -m_w \hat{r}_w & m_w I \\ m_w \hat{r}_w & -m_w \hat{r}_w \hat{r}_w & m_w \hat{r}_w \\ m_w I & -m_w \hat{r}_w & m_w I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ \Omega \\ \dot{r}_w \end{pmatrix}$$

Η συνολική (total fluid kinetic energy) κινητική ενέργεια είναι

$$T = T_s + T_p + T_f + T_b + T_w$$

$$T = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} u \\ \Omega \\ \dot{r}_p \\ \dot{r}_b \\ \dot{r}_w \end{pmatrix} I \begin{pmatrix} u \\ \Omega \\ \dot{r}_p \\ \dot{r}_b \\ \dot{r}_w \end{pmatrix}$$

Μπορούμε να υπολογίσουμε τις ροπές ως τις παρακάτω εξισώσεις:

$$P = \frac{\partial T}{\partial v}$$

$$\Pi = \frac{\partial T}{\partial \Omega}$$

$$P_p = \frac{\partial T}{\partial \dot{r}_p}$$

$$P_b = \frac{\partial T}{\partial \dot{r}_b}$$

$$P_w = \frac{\partial T}{\partial \dot{r}_w}$$

Συνολικά, οι εξισώσεις κίνησης ενός αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος κινούμενο στο τρισδιάστατο χώρο είναι :

$$\begin{pmatrix} \dot{R} \\ \dot{b} \\ \dot{\Omega} \\ \dot{v} \\ \dot{r}_p \\ \dot{r}_b \\ \dot{r}_w \\ \dot{P}_p \\ \dot{P}_b \\ \dot{P}_w \\ \dot{m}_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R\dot{\Omega} \\ Rv \\ J^{-1}\bar{T} \\ M^{-1}\bar{F} \\ \frac{1}{\bar{m}}P_p - v - \Omega \times r_p \\ \frac{1}{m_b}P_b - v - \Omega \times r_b \\ \frac{1}{m_w}P_w - v - \Omega \times r_w \\ \bar{u} \\ u_b \\ u_w \\ u_{ballast_rate} \end{pmatrix}$$

Όπου

$$\begin{aligned} \bar{T} = & (J\Omega + \widehat{r}_p P_p + \widehat{r}_b P_b + \widehat{r}_w P_w) \times \Omega + (Mv \times v) + (Mv \times v) + \\ & (\Omega \times r_p) \times P_p + (\Omega \times r_b) \times P_b + (\Omega \times r_w) \times P_w + (\bar{m}\widehat{r}_p + m_b\widehat{r}_b + m_w\widehat{r}_w)gR^T k \\ & + T_{ext} - \widehat{r}_p \bar{u} - (\widehat{r}_b u_b + \widehat{r}_w u_w) \end{aligned}$$

$$\bar{F} = (Mv + P_p + P_b + P_w) \times \Omega + m_o g R^T k + F_{ext} - \bar{u} - (u_b + u_w)$$

με

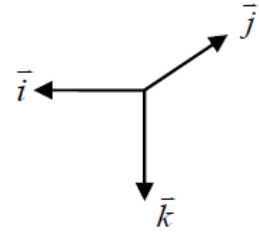
$$F_{ext} = R^T \sum f_{ext_i}$$

$$T_{ext} = R^T \sum (x_i - b) \times f_{ext_i} + R^T \sum \tau_{ext_j}$$

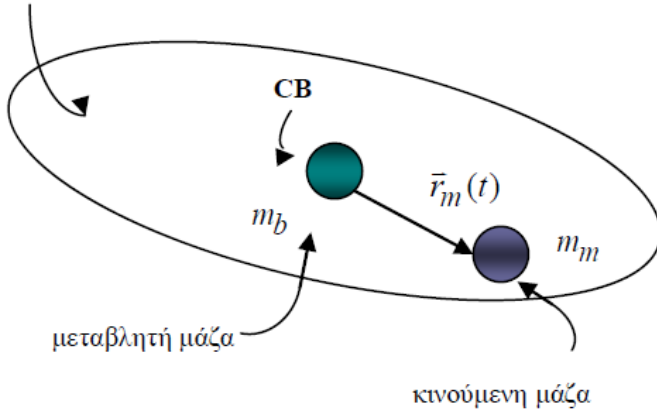
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Η πορεία του υδροπτέρου μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις κίνησης στο κατακόρυφο επίπεδο, οι οποίες προκύπτουν από το τρισδιάστατο μοντέλο μέσω περιορισμού και των εσωτερικών μαζών. Η ροπή λόγω της μεταβλητής μάζα εκτός του κεντροειδούς δεν υπάρχει. Οι περισσότερες αποστολές των υδροπτέρων περιλαμβάνουν πολλές διαδρομές στο κατακόρυφο επίπεδο έτσι η δυναμική ανάλυση ενός απλουστευμένου μοντέλου έχει άμεση εφαρμογή. Ένα τέτοιο μοντέλο δίνει τη δυνατότητα να μελετηθούν διάφορες σταθερές διαδρομές όπου το όχημα ισορροπεί, να διερευνηθεί η σταθερότητά τους συναρτήσει του σχεδιασμού του οχήματος και της θέσης των εσωτερικών μαζών καθώς και η μετάβαση μεταξύ ευθέων σταθερών διαδρομών κατά την ανάδυση και την κατάδυση.

Στο μοντέλο αυτό, η κινούμενη μάζα καθορίζει κυρίως τον προσανατολισμό του υδροπτέρου ενώ η διάταξη μεταβλητής πλευστότητας την άνωσή του. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το μοντέλο του υδροπτέρου με απλοποιημένη εσωτερική διάταξη εσωτερικών μαζών.



m_h , ομοιόμορφα κατανομημένη μάζα της γάστρας



Έτσι οι εξισώσεις κίνησης περιορισμένες στο κατακόρυφο επίπεδο περιγράφονται ως εξής:

$$\dot{\chi} = u \cos \theta + w \sin \theta$$

$$\dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta$$

$$\dot{\theta} = q$$

$$\dot{q} = \frac{1}{J_2} [(m_3 - m_1)uw - (r_{mx}p_{mx} + r_{mz}p_{mz})q - m_m g(r_{mx} \cos \theta + r_{mz} \sin \theta) + M_{DL} - r_{mz}h_{mx} + r_{mx}h_{mz}]$$

$$\dot{u} = \frac{1}{m_1} (-m_3 w q - p_{mz} q - m_o g \sin \theta + L \sin \alpha - D \cos \alpha - h_{mz})$$

$$\dot{w} = \frac{1}{m_3} (-m_1 u q + p_{mx} q + m_o g \cos \theta - L \cos \alpha - D \sin \alpha - h_{mx})$$

$$\dot{r}_{mx} = \frac{1}{m_m} p_{mx} - u - r_{mz} q$$

$$\dot{r}_{mz} = \frac{1}{m_m} p_{mz} - w + r_{mx} q$$

$$\dot{p}_{mx} = h_{mx}$$

$$\dot{p}_{mz} = h_{mz}$$

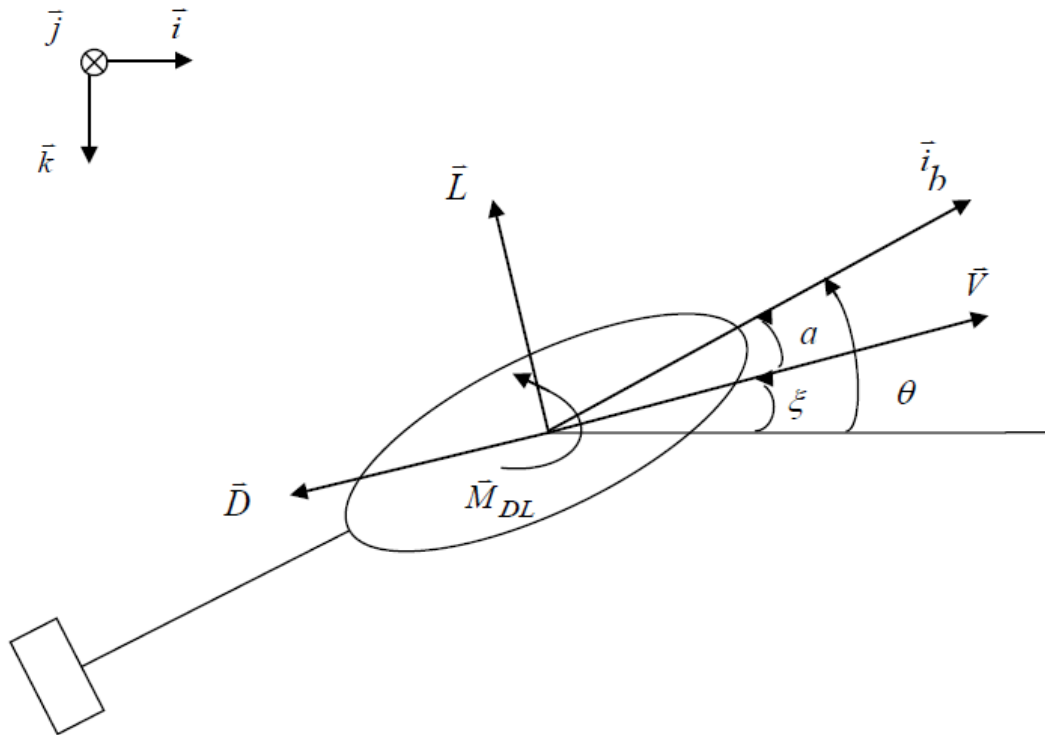
$$\dot{m}_b = b_{ballast_rate}$$

όπου

$$h_{mx} = -p_{mz}q - m_m g \sin\theta + \cos\theta F_{xint_m} - \sin\theta F_{zint_m}$$

$$h_{mz} = p_{mx}q + m_m g \cos\theta + \sin\theta F_{xint_m} + \cos\theta F_{zint_m}$$

Εδώ α είναι η γωνία προσβολής (angle of attack), D είναι η δύναμη αντίστασης (drag), L η δύναμη άντωσης (Lift) και M_{DL} η ροπή λόγω συνεκτικών δυνάμεων (viscous moment) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Ισχύει ότι $\xi = \theta - \alpha$ και $V = \sqrt{u^2 + w^2}$ όπου ξ η γωνία ίχνους ολίσθησης (glide path angle). Ενώ αποδεικνύεται ότι στην κατάσταση ισορροπίας ισχύει :

$$\xi_{eq} = -\tan^{-1}\left(\frac{D_{eq}}{L_{eq}}\right)$$

Μία σημαντική ιδιότητα των εξισώσεων της ισορροπίας είναι ότι η γωνία του ίχνους ολίσθησης είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα της ολίσθησης. Η γωνία ξ εξαρτάται μόνο από την γωνία προσβολής κατά την ισορροπία. Όταν επιλέγεται μία διαδρομή σε ισορροπία είναι δυνατόν να οριστούν οι γωνία ίχνους ολίσθησης ξ και η ταχύτητα ολίσθησης V ανεξάρτητα. Η ταχύτητα μπορεί να ρυθμίζεται μεταβάλλοντας την άντωση του υποβρύχιου οχήματος ενώ η γωνία ξ μεταβάλλοντας το κέντρο βάρους του.

Για να καθοριστούν οι σταθερές διαδρομές για το υδρόπτερο, απαιτείται πρώτα να υπολογιστούν οι παράμετροι του μοντέλου που αντιπροσωπεύουν τη μάζα του σώματος και τα υδροδυναμικά του χαρακτηριστικά. Όσον αφορά τις υδροδυναμικές

παραμέτρους αυτές μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη CFD διαδικασία χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Fluent. Τα αποτελέσματα αυτά θα αναλυθούν και θα παρουσιαστούν στο πειραματικό μέρος της εργασίας αυτής.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ-ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΙ ΟΡΟΙ

LIFT, DRAG, MOMENT, GLIDE ANGLE

Στην ενότητα αυτή, θα γίνει η εισαγωγή των υδροδυναμικών όρων στις δυναμικές εξισώσεις του υποβρύχιου μοντέλου.

Οι εξωτερικές δυνάμεις και ροπές στο όχημα F_{ext} και T_{ext} , συμπεριλαμβάνουν και τις υδροδυναμικές δυνάμεις F_{hydro} και ροπές T_{hydro} , εξαιτίας της κίνησης του υδροπτερού διασχίζοντας το νερό. Αυτές οι υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές προκύπτουν εξίσου από την επίδραση της συνεκτικότητας και άλλων ιδεατών επιδράσεων. Δυνάμεις και ροπές εξαιτίας της πρόσθετης μάζας και της αδράνειας συμπεριλαμβάνονται ξεχωριστά στο μοντέλο του υδροπτερού όπως παρουσιάστηκε παραπάνω.

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται στο υδρόπτερο μπορούν να διατυπωθούν ως προς το σύστημα του περιρρέοντος ρευστού ως άνωση (lift), οπισθέλκουσα δύναμη (drag) και πλάγια δύναμη (sideforce). Οι υδροδυναμικές ροπές, επίσης, εκφράζονται ως προς το σύστημα του περιρρέοντος ρευστού.

Έτσι έχουμε, για τις υδροδυναμικές δυνάμεις:

$$F_{hydro} = \begin{pmatrix} -D \\ SF \\ -L \end{pmatrix}$$

και για τις υδροδυναμικές ροπές:

$$M_{hydro} = \begin{pmatrix} M_{DL1} \\ M_{DL2} \\ M_{DL3} \end{pmatrix}$$

Όπου L, D, SF είναι η δύναμη της άνωσης, η οπισθέλκουσα και η πλάγια δύναμη αντίστοιχα. Όπου M_{DLi} είναι η υδροδυναμική ροπή ως προς τον i^{th} άξονα του συστήματος του περιρρέοντος ρευστού. Όλα αυτά εκφράζονται στο σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων με $R_{WB}F_{hydro}$ και $R_{WB}M_{hydro}$.

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις του αυτόνομου υποβρύχιου υδροπτερού είναι πολύπλοκες συναρτήσεις εξαρτώμενες από την γεωμετρία του οχήματος και από το είδος της κίνησης στο ρευστό. Έτσι, χρησιμοποιούνται μοντέλα βασισμένα σε συντελεστές ώστε να μπορούν να υπολογιστούν τα μεγέθη των υδροδυναμικών δυνάμεων στο όχημα. Οι υδροδυναμικοί συντελεστές μπορούν να προσδιοριστούν με διάφορους τρόπους όπως με πειράματα σε πραγματική κλίμακα, δεδομένα αναφοράς και με τον μοντελισμό CFD. Ο τελευταίος χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία με την βοήθεια των προγραμμάτων GAMBIT και FLUENT. Οι συντελεστές δύναται να συμπεριλαμβάνουν όρους εξαρτώμενοι από την ταχύτητα, την επιτάχυνση και τα αντίστοιχα γωνιακά μεγέθη τους.

Ένα απλό ημι-σταθερό μοντέλο υδροδυναμικών δυνάμεων παίρνει την μορφή:

$$F_{hydro} = \begin{pmatrix} -D \\ SF \\ -L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_D(\alpha, \beta, \delta cs, Re) \\ \frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_{SF}(\alpha, \beta, \delta cs, Re) \\ -\frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_L(\alpha, \beta, \delta cs, Re) \end{pmatrix}$$

όπου C_D, C_{SF}, C_L είναι οι υδροδυναμικοί συντελεστές για την οπισθέλκουσα δύναμη (drag), πλάγια δύναμη (sideforce) και την άνωση αντίστοιχα. Η ποσότητα $\frac{1}{2}\rho V_r^2$ αντιπροσωπεύει την δυναμική πίεση. Α είναι η χαρακτηριστική επιφάνεια (area) του υδροπτερού στην οποία οι συντελεστές ορίζονται. Ενώ, α και β είναι οι υδροδυναμικές γωνίες όπως έχουν οριστεί σε προηγούμενη παράγραφο, δcs ένας παράγοντας που αναφέρεται στις επιφάνειες ελέγχου (control surface settings)(συνήθως σε μοίρες) και τέλος Re είναι ο αριθμός Reynolds της ροής του οχήματος.

Το μοντέλο για τις υδροδυναμικές ροπές στο όχημα παίρνει την μορφή:

$$M_{hydro} = \begin{pmatrix} M_{DL1} \\ M_{DL2} \\ M_{DL3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_{M1}(\alpha, \beta, \delta cs, Re) \\ \frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_{M2}(\alpha, \beta, \delta cs, Re) \\ -\frac{1}{2}\rho V_r^2 AC_{M3}(\alpha, \beta, \delta cs, Re) \end{pmatrix} + K_{\Omega^1} + \Omega K_{\Omega^2} \Omega$$

Όπου C_{M1}, C_{M2}, C_{M3} είναι οι συντελεστές για την υδροδυναμική ροπή στους άξονες 1,2,3 αντίστοιχα. K_{Ω^1} και K_{Ω^2} είναι οι περιστροφικοί πίνακες απόσβεσης, για τον γραμμικό και τετραγωνικό όρο απόσβεσης αντίστοιχα.

Στο κάθετο, διάμηκες επίπεδο, οι υδροδυναμικές δυνάμεις και η ροπή που δέχεται το υδρόπτερο παίρνουν την εξής μορφή (ημισταστική προσέγγιση) :

$$D = \frac{1}{2}\rho C_D(a)AV^2 \approx (K_{D0} + K_D a^2)(v_1^2 + v_3^2)$$

$$L = \frac{1}{2}\rho C_L(a)AV^2 \approx (K_{L0} + K_L a^2)(v_1^2 + v_3^2)$$

$$M_{DL} = \frac{1}{2}\rho C_M(a)AV^2 \approx (K_{M0} + K_M a^2)(v_1^2 + v_3^2) + K_{\Omega_2^1} \Omega_2 + K_{\Omega_2^2} \Omega_2^2$$

Όπου ρ η πυκνότητα του ρευστού.

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να παρουσιάσουμε τα όρια όσον αφορά τη γωνία ίχνους ολίσθησης μέσα στα οποία μπορεί να λειτουργήσει το υδρόπτερο ώστε η ευθεία διαδρομή που θα ακολουθήσει κατά την κατάδυση ή ανάδυση να είναι σε ισορροπία.

Το τρίωνυμο που προκύπτει ως προς α_d , από τις δισδιάστατες εξισώσεις κίνησης του οχήματος σε κατάσταση ισορροπίας, εξασφαλίζοντας $V_d \neq 0$ και $\xi_d \neq \pm \frac{\pi}{2}$:

$$\alpha_d^2 + \frac{K_L}{K_D} \tan \xi_d \alpha_d + \frac{1}{K_D} (K_{D0} + K_{L0} \tan \xi_d) = 0$$

Έτσι η γωνία α_d θα προκύψει εφόσον η ξ_d ικανοποιεί την εξίσωση:

$$\left(\frac{K_L}{K_D} \tan \xi_d \right)^2 - \frac{4}{K_D} (K_{D0} + K_{L0} \tan \xi_d) \geq 0$$

Παραδεκτές τιμές της γωνίας ξ_d μεταξύ $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ θα πρέπει να επιλεγούν από την περιοχή:

$$\xi_d \in \left[\tan^{-1} \left(2 \frac{K_D}{K_L} \left(\frac{K_{Lo}}{K_L} + \sqrt{\left(\frac{K_{Lo}}{K_L} \right)^2 + \frac{K_{Do}}{K_D}} \right) \right), \frac{\pi}{2} \right]$$

ή

$$\xi_d \in \left[-\frac{\pi}{2}, \tan^{-1} \left(2 \frac{K_D}{K_L} \left(\frac{K_{Lo}}{K_L} - \sqrt{\left(\frac{K_{Lo}}{K_L} \right)^2 + \frac{K_{Do}}{K_D}} \right) \right) \right]$$

Αυτές οι συνθήκες προκύπτουν από το γεγονός ότι μία σταθερή διαδρομή σε κατάσταση ισορροπίας είναι μόνο δυνατή για γωνίες ξ που αντιστοιχούν σε πραγματοποιήσιμους λόγους άνωσης/αντίστασης (Lift/Drag), δεδομένων των υδροδυναμικών παραμέτρων για ένα συγκεκριμένο υδρόπτερο. Έτσι ο μέγιστος λόγος άνωσης/ αντίστασης καθορίζει την ελάχιστη γωνία διαδρομής (κατ' απόλυτη τιμή). Η μία συνθήκη καθορίζει τη ρηχότερη γωνία όταν το υδρόπτερο καταδύεται ενώ η άλλη τη μικρότερη γωνία όταν αυτό αναδύεται.

Το παραπάνω τριώνυμο έχει δύο λύσεις για το α_d . επιλέγεται η λύση με το μικρότερο μέγεθος, λόγω του ότι η μικρότερη γωνία δίνει μικρότερη αντίσταση (Drag) από ότι η μεγαλύτερη. Στην περίπτωση που $\xi_d = \pm \frac{\pi}{2}$ τότε $a_d = \frac{K_{Lo}}{K_L}$. Στην περίπτωση που το όχημα είναι συμμετρικό ως προς το $\vec{i}_b - \vec{j}_b$ επίπεδο, τότε $K_{Lo} = 0$. Σε αυτή την περίπτωση για την κατάσταση ισορροπίας που αντιστοιχεί σε κάθετη πορεία όπου $\xi_d = \pm \frac{\pi}{2}$, ευθεία προς τα πάνω ή προς τα κάτω, η επιθυμητή γωνία προσβολής θα είναι μηδενική. Κάτι το οποίο φαίνεται και από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στο πειραματικό μέρος.

Μέσα στα όρια που επιβάλλονται για τη γωνία ξ_{eq} υπολογίζεται και η γωνία προσβολής α_{eq} την οποία θα πρέπει να έχει το όχημα σε σχέση με το ρευστό για κάθε γωνία ίχνους οίσθησης ξ_{eq} ή αντιστοίχως για κάθε γωνία πρόννευσης θ_{eq} ώστε η κίνησή του να γίνεται σε ισορροπία.

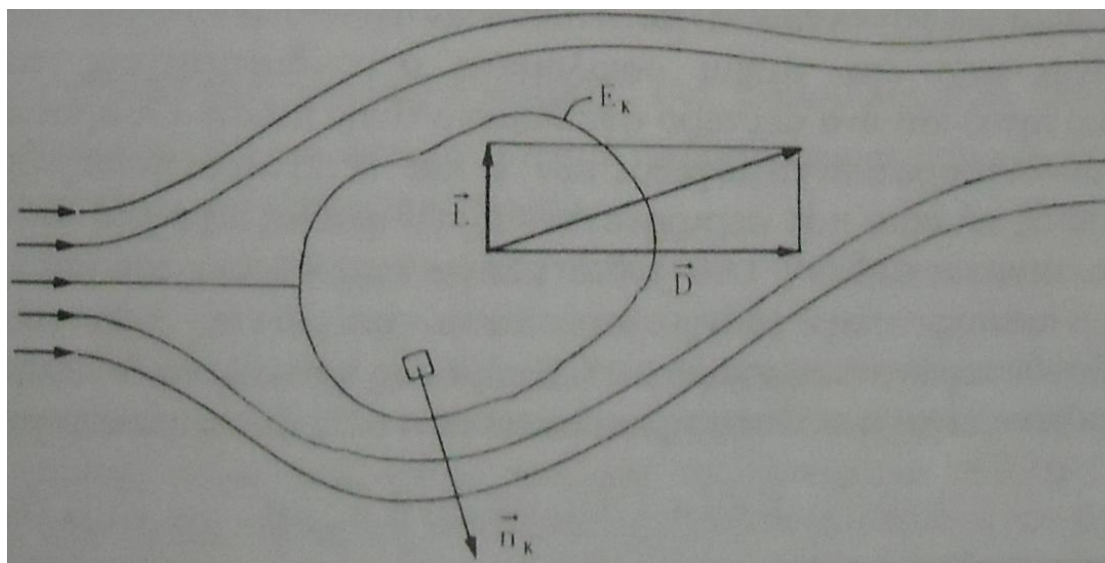
Μία ακόμη παράμετρος που μπορεί επιπλέον να προσδιοριστεί για τις διάφορες γωνίες ίχνους ολίσθησης ξ είναι η κατακόρυφη ταχύτητα του υποβρύχιου ως προς αδρανειακό παρατηρητή, δηλαδή η μεταβολή του βάθους στο οποίο βρίσκεται κάθε στιγμή το όχημα:

$$\dot{z} = -V \sin \xi = -V \sin(\theta - \alpha)$$

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΕ ΠΕΡΙΡΡΕΟΜΕΝΑ ΣΤΕΡΕΑ ΣΩΜΑΤΑ

Όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ ενός στερεού σώματος και ρευστού το οποίο περιβάλλει το σώμα, τότε πάνω στο σώμα ασκείται δύναμη \vec{K} , που οφείλεται στην επενέργεια του ρευστού. Γενικά η δύναμη που ενεργεί στο στοιχείο της επιφάνειας του στερεού έχει μία κάθετη $-t_n dE$ και μία εφαπτομενική συνιστώσα $-t_t dE$.



ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΑΣΚΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΡΕΥΣΤΟ ΣΤΟ ΣΤΕΡΕΟ.

Η συνολική δύναμη \vec{K} που ασκείται από το ρευστό στο στερεό είναι:

$$\vec{K} = \int_{E_K} \vec{t}_k dE = \int_{E_K} \vec{t}_k^T \vec{n}_k dE - \int_{E_K} p \vec{n}_k dE$$

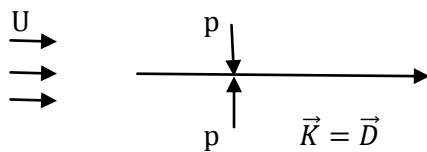
Στην παραπάνω σχέση πρέπει να προσέξουμε ότι το διάνυσμα των τάσεων \vec{t}_k είναι το ασκούμενο στο στοιχείο dE του στερεού και είναι αντίθετο από το ασκούμενο στο στοιχείο dE του στερεού και είναι αντίθετο από το ασκούμενο από το στερεό στο αντίστοιχο στοιχείο dE της επιφάνειας του ρευστού ($\vec{t}_k = -\vec{t}$), ενώ το μοναδιαίο διάνυσμα \vec{n}_k στην επιφάνεια του στερεού "βλέπει" προς τα έξω. Τα μεγέθη \vec{t}_k^T και p είναι συνεχή στην επιφάνεια που χωρίζει στερεό και ρευστό.

Ο προσδιορισμός των δυνάμεων καθώς επίσης και των ροπών που ασκούνται στα περιρρεόμενα στερεά είναι ένα από τα βασικά προβλήματα της Μηχανικής των Ρευστών και της Αεροδυναμικής. Ο προσδιορισμός των δυνάμεων και ροπών είναι εφικτός είτε πειραματικά είτε θεωρητικά υπολογίζοντας το πεδίο ροής και επομένως από την δοθείσα σχέση υπολογίζοντας την δύναμη στο στερεό. Εάν θεωρήσουμε ένα στερεό σε παράλληλη ροή ταχύτητας U , τότε η συνολική δύναμη \vec{K} δύναται να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες μία κατά την κατεύθυνση της παράλληλης ταχύτητας U , την D , που λέγεται αντίσταση και την κάθετη σε αυτή L , που λέγεται άνωση. Συνήθως τα εξεταζόμενα σώματα είναι συμμετρικά ως προς επίπεδο διερχόμενο από την U , οπότε η

άνωση L βρίσκεται στο επίπεδο συμμετρίας και δεν υπάρχει κάθετη συνιστώσα S στο επίπεδο ονομαζόμενη πλάγια δύναμη.

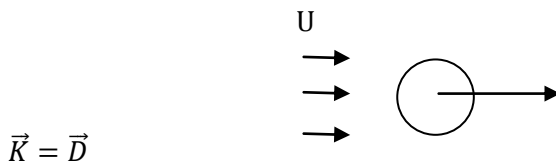
Εξετάζοντας την έκφραση της \vec{K} , η εξίσωση, βλέπουμε ότι αυτή αποτελείται από ένα τμήμα οφειλόμενο στις διατμητικές τάσεις (συνεκτικότητα) και ένα δεύτερο οφειλόμενο στην πίεση. Οι όροι αυτοί επηρεάζουν διαφορετικά το μέγεθος των L και D . Έτσι στην περίπτωση της επίπεδης πλάκας που περιρρέεται παράλληλα ως προς το επίπεδο της άνωσης είναι μηδέν ($L=0$), διότι λόγω συμμετρίας του πεδίου οι δυνάμεις πίεσης στην πάνω και κάτω επιφάνεια της πλάκας αλληλοεξουδετερώνονται. Επομένως η συνολική δύναμη στην επίπεδη πλάκα είναι η αντίσταση και οφείλεται στις διατμητικές τάσεις:

$$L = 0, \quad \vec{K} = \vec{D} = \int \vec{\tau} \vec{n}_k dE = 2\vec{i} \int \tau_{xy} dE$$



ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΕΠΙΠΕΔΗ ΠΛΑΚΑ

Στην γενική περίπτωση π. χ της σφαίρας σε παράλληλη ροή, η άνωση θα είναι πάλι μηδενική λόγω συμμετρίας και επομένως η συνολικά ασκούμενη δύναμη θα είναι η αντίσταση κατά την κατεύθυνση της παράλληλης ταχύτητας, δηλαδή:



ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΣΦΑΙΡΑ

$$L = 0, \quad \vec{K} = \vec{D} = \int \vec{\tau} \vec{n}_k dE - \int_{E_K} p \vec{n}_k dE$$

Η αντίσταση εν γένει αποτελείται από δύο προσθετέους, όπως φαίνεται και από το προηγούμενο παράδειγμα:

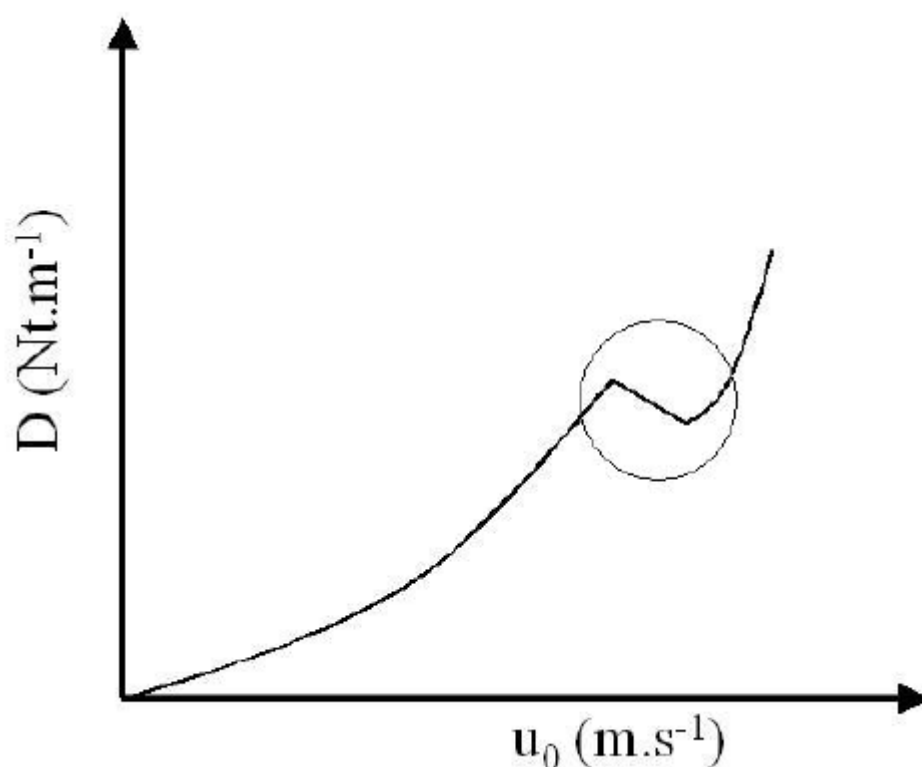
$$\vec{D} = \vec{D}_f + \vec{D}_s$$

όπου ο πρώτος όρος λέγεται αντίσταση συνεκτικότητας και ο δεύτερος αντίσταση πίεση ή μορφής. Για τον υπολογισμό των δύο όρων που συνθέτουν τη συνολική αντίσταση, θα μιλήσουμε παρακάτω.

Για την γενική περίπτωση ισχύει ότι για την άνωση σημαντική συμμετοχή στην διαμόρφωση της τιμής της έχει το ολοκλήρωμα των δυνάμεων πίεσης, το δε ολοκλήρωμα των δυνάμεων συνεκτικότητας παίζει δευτερεύοντα ρόλο. Οπωσδήποτε όμως στην διαμόρφωση της κατανομής της πίεσης σημαντικό ρόλο παίζουν τα φαινόμενα ιξώδους. Για την διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης στα λεπτά σώματα που βρίσκονται σε μικρή κλίση στην ροή στον κυριότερο ρόλο παίζουν οι δυνάμεις ιξώδους και όχι οι δυνάμεις πίεσης. Στα μη αεροδυναμικής μορφής σώματα, όπου η σχέση πάχους προς μήκος είναι μεγάλη (όπως στη σφαίρα), για τις μικρές ταχύτητες (στρωτή ροή) οι δυνάμεις ιξώδους και πίεσης είναι συγκρίσιμες.

ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ

Όταν ένας κύλινδρος κινείται με σταθερή ταχύτητα \vec{u}_0 μέσα σε ρευστό που ηρεμεί (ή αν ο ίδιος κύλινδρος είναι ακίνητος και γύρω του ρέει ρευστό με ομοιόμορφη ταχύτητα και ίση με \vec{u}_0 μακριά από αυτόν, τότε παρατηρούμε διάφορα φαινόμενα. Ένα από αυτά είναι ότι στον κύλινδρο ασκείται μία δύναμη \vec{D} , που ονομάζεται αντίσταση ή οπισθέλκουσα (drag). Η διεύθυνση της \vec{D} είναι η ίδια με τη διεύθυνση της ταχύτητας του κυλίνδρου, ενώ η φορά της είναι αντίθετη. Ως προς το μέτρο, η \vec{D} είναι ανάλογη ενός αδιάστατου συντελεστή C_D ο οποίος ονομάζεται συντελεστής οπισθέλκουσας. Η \vec{D} εξαρτάται επίσης από την μετωπική επιφάνεια του κυλίνδρου και μεταβάλλεται συναρτήσει της ταχύτητας όπως στο σχήμα 1. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρούμε το εξής παράδοξο: στην περιοχή που περικλείεται από τον κύκλο ενώ η ταχύτητα ροής αυξάνεται, το μέτρο της \vec{D} μειώνεται.



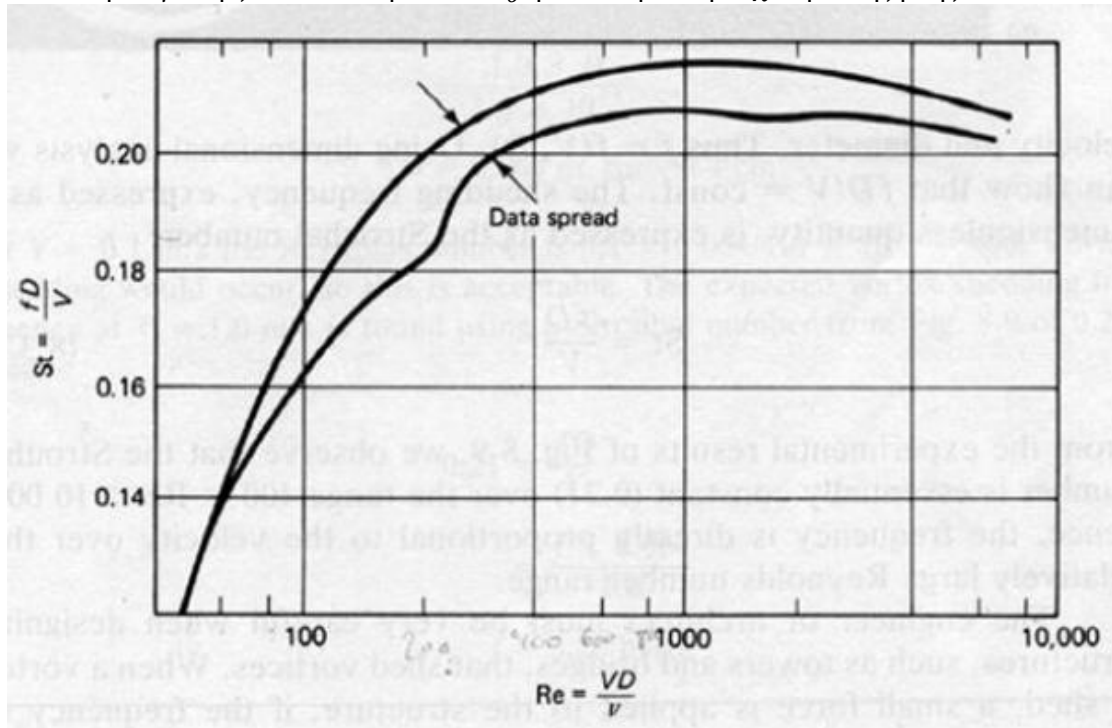
ΣΧΗΜΑ 1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ \vec{D} (ΕΚΦΡΑΣΜΕΝΗ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΜΗΚΟΥΣ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΡΟΗΣ \vec{u}_0 .

Ένα άλλο φαινόμενο που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι να ακούσουμε κάποιο ήχο που μοιάζει με σφύριγμα. Ακόμα και όταν οι συνθήκες που προκαλούν τη ροή είναι μόνιμες (π.χ αδιατάρακτη ταχύτητα σταθερή ή κίνηση του κυλίνδρου μέσα στο ρευστό με σταθερή ταχύτητα) είναι δυνατόν η προκαλούμενη ροή να είναι μη μόνιμη (δηλαδή χρονικά μεταβαλλόμενη). Αυτό εκδηλώνεται με τη δημιουργία στροβίλων οι οποίοι δонούν τον κύλινδρο με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ο ήχος που προαναφέραμε.

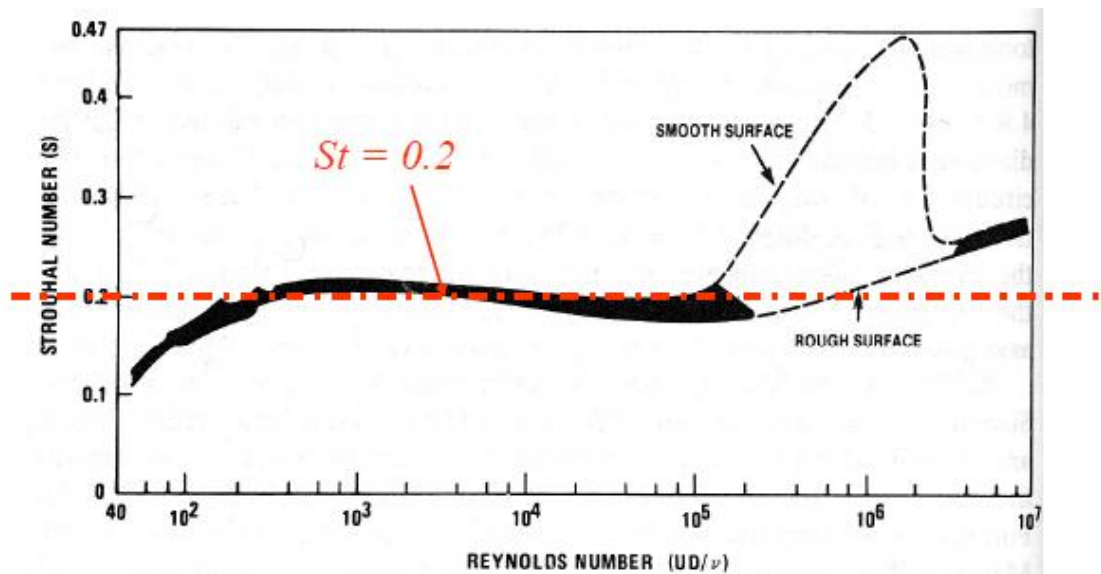
η συχνότητα ω με την οποία δονείται ο κύλινδρος εξαιτίας των στροβίλων, συνδέεται με ένα αδιάστατο αριθμό, οποίος ονομάζεται αριθμός Strouhal και ορίζεται από την σχέση :

$$St = \frac{\omega d}{u_0}$$

όπου d η διάμετρος του κυλίνδρου και u_0 η αδιατάρακτη ταχύτητα της ροής.



ΣΧΗΜΑ 2Α STROUHAL =F(RE)



ΣΧΗΜΑ 2Β Ο ΑΡΙΘΜΟΣ STROUHAL ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ REYNOLDS ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΚΥΚΛΙΚΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

Εφόσον από τον ορισμό του ο St εξαρτάται από την ταχύτητα ροής, θα εξαρτάται και από ένα άλλο αδιάστατο αριθμό, τον αριθμό Reynolds, Re , ο οποίος ορίζεται ως εξής:

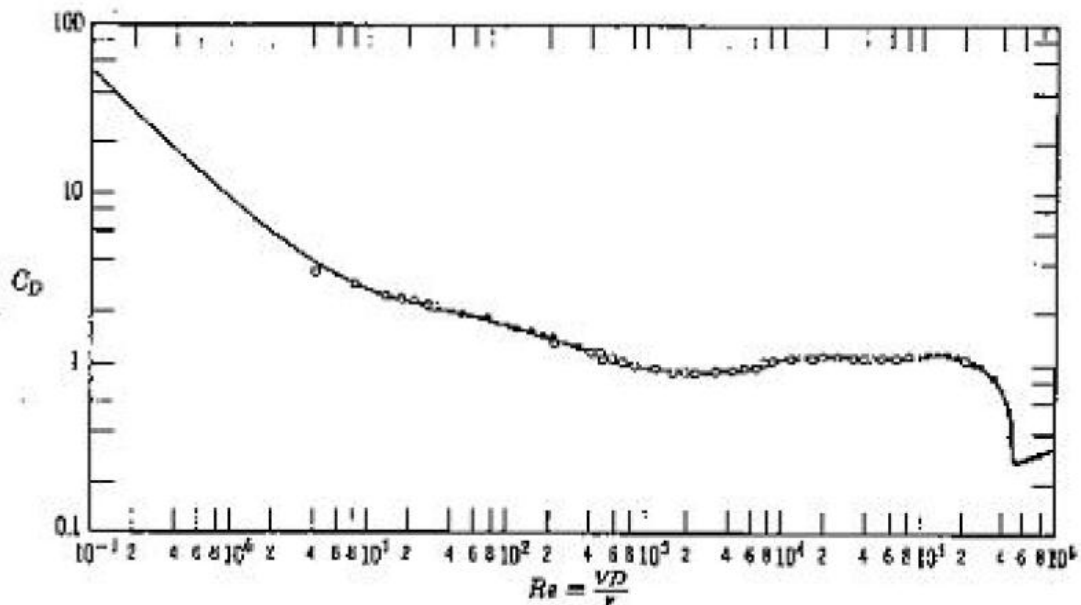
$$Re = \frac{\rho u_0 d}{\mu}$$

όπου μ μία χαρακτηριστική φυσική ιδιότητα των ρευστών που ονομάζουμε δυναμικό ιξώδες. Η εξάρτηση αυτή φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος 2B. Αν βρεθούμε στο οριζόντιο τμήμα της καμπύλης, τότε η συχνότητα είναι ανάλογη της ταχύτητα για δεδομένο κύλινδρο.

Θα προσπαθήσουμε τώρα να εξηγήσουμε το παράδοξο που παρατηρούμε στο διάγραμμα της Εικόνας 1, γιατί δηλαδή υπάρχει μία περιοχή ταχύτητας ροής, στην οποία η οπισθέλκουσα D μειώνεται και μετά αυξάνεται και πάλι. Η μαθηματική σχέση η οποία επιτρέπει τον υπολογισμό του D είναι:

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho u_o^2 d L \quad (1)$$

όπου ρ , η πυκνότητα του ρευστού, d η διάμετρος και L το μήκος του κυλίνδρου. Ο συντελεστής οπισθέλκουσας C_D ορίζεται λύνοντας (1) ως προς C_D . Ας αρκεστούμε, προς το παρόν ότι η σχέση αυτή μας επιτρέπει να εκφράσουμε το μέτρο D της οπισθέλκουσας σε αδιάστατη μορφή. Μπορούμε τώρα να αποδώσουμε το διάγραμμα της Εικόνας 1 σε αδιάστατη μορφή. Προκύπτει έτσι το σχήμα 3, στο οποίο παρατηρούμε δύο σημαντικά πράγματα:



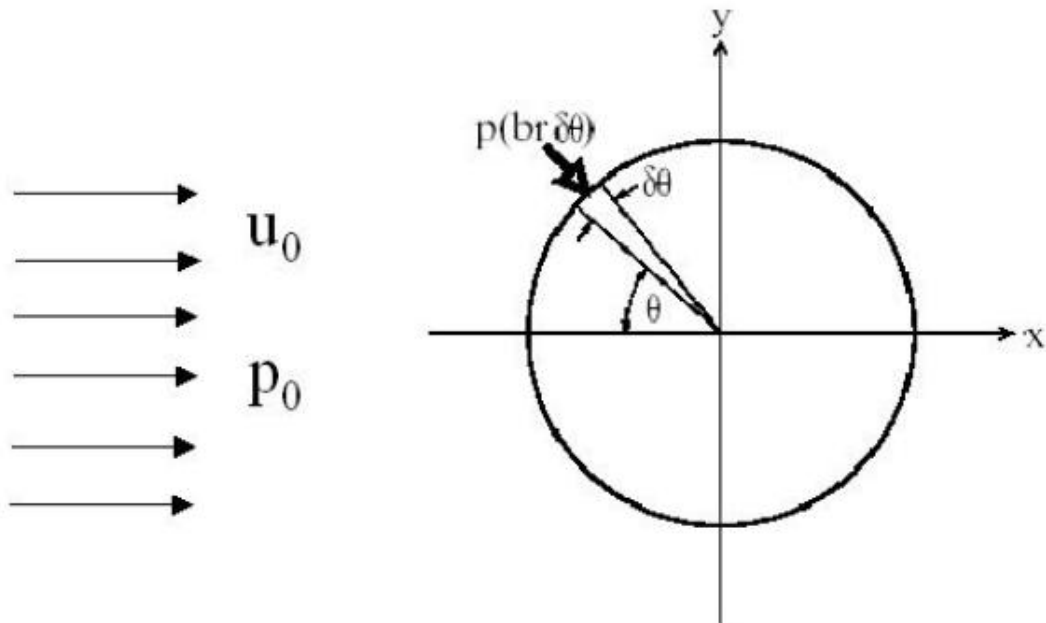
ΣΧΗΜΑ 3 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ C_D

- Ο C_D είναι ανεξάρτητος του Re για $10^2 < Re < 5 \times 10^5$. Στην περίπτωση αυτή, σχέση (1) μας λέει ότι για δεδομένο ρευστό και δεδομένη επιφάνεια, η οπισθέλκουσα D εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα της ροής και πιο συγκεκριμένα, είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας ροής.
- Παρατηρούμε ότι "το παράδοξο" φαινόμενο της Εικόνας 1 εμφανίζεται και εδώ, όταν ο Re πλησιάζει την τιμή 5×10^5 .

Για να εξηγήσουμε τη συμπεριφορά αυτή πρέπει να μελετήσουμε την ροή λεπτομερέστερα, μετρώντας την κατανομή της πίεσης γύρω από τον κύλινδρο. Χρησιμοποιούμε πάλι μία αδιάστατη αναπαράσταση, ώστε να μπορέσουμε να δούμε συνοπτικά διάφορες δυνατές καταστάσεις. Ορίζουμε για το λόγο αυτό έναν αδιάστατο συντελεστή πίεσης, C_p βάσει της σχέσης :

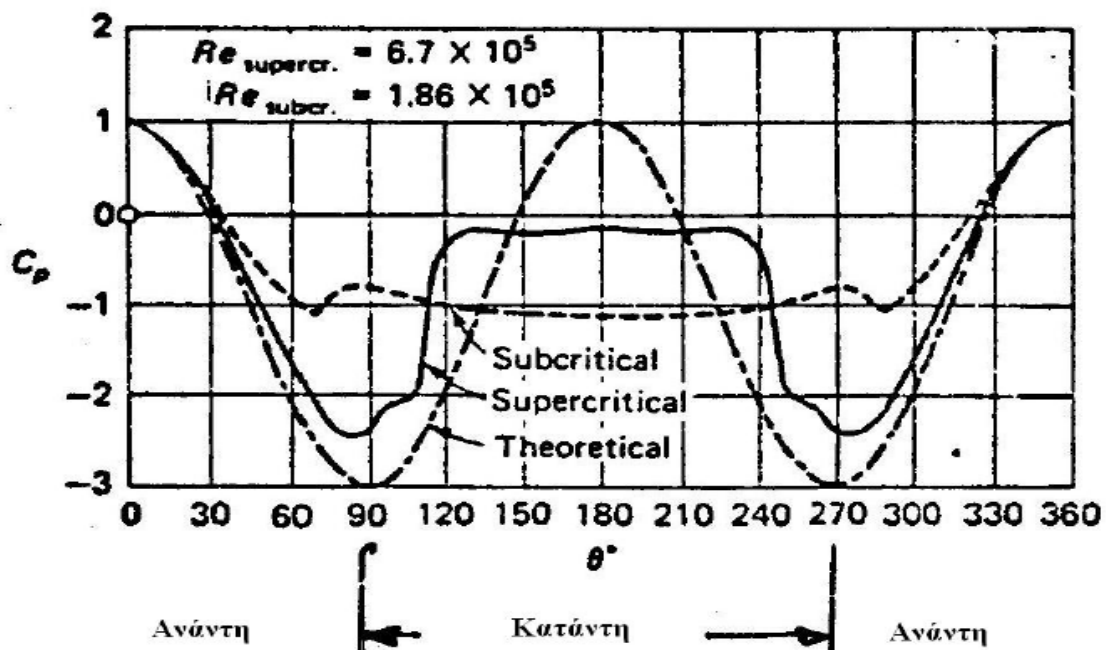
$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho u_0^2} \quad (2)$$

όπου p η πίεση στην επιφάνεια του κυλίνδρου, p_0 η πίεση μακριά από τον κύλινδρο και u_0 η αδιατάρακτη ταχύτητα.



ΣΧΗΜΑ 4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ C_p

Η κατανομή της πίεσης p συναρτήσει της γωνίας θ δίνεται στο Σχήμα 5.



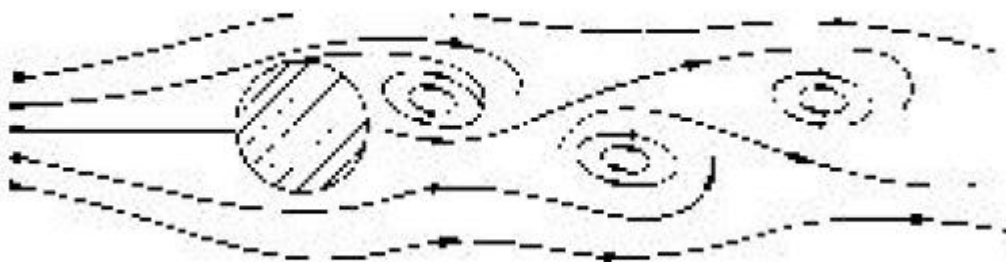
ΣΧΗΜΑ 5 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

Το μέγεθος των στροβίλων αυξάνεται με τον Re και όταν αυτός πάρει τιμές μεγαλύτερες ή ίσες του 40, οι στρόβιλοι αρχίζουν να αποκολλώνται εναλλάξ από της δύο πλευρές του κυλίνδρου (σχήμα 7) και σχηματίζουν τον λεγόμενο στροβιλόδρομο Von Karman. Οι στρόβιλοι της μία και της άλλη πλευράς του κυλίνδρου έχουν αντίθετες φορές. Αν μετρήσουμε την ταχύτητα σε ένα σημείο M του απορρεύματος, θα δούμε ότι αυτή μεταβάλλεται ημιτονοειδών, λόγω της διέλευσης των στροβίλων. Αυτή η αυξομείωση της ταχύτητας, προκαλεί και αυξομείωση της πίεσης, η οποία μεταδίδεται σε όλο το ρευστό και ενδέχεται να προκαλέσει ταλαντώσεις των στερεών σωμάτων που βρίσκονται μέσα σ' αυτό.



ΣΧΗΜΑ 6 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΓΙΑ $Re > 4$.

Έτσι εξηγείται και το φαινόμενο το οποίο περιγράψαμε στην αρχή, γιατί δηλαδή στρόβιλοι οι οποίοι αναπτύσσονται κατά την ροή προκαλούν δονήσεις των σωμάτων, οι οποίες ενδέχεται να έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ήχου.



ΣΧΗΜΑ 7 ΣΤΡΟΒΙΛΟΔΡΟΜΟΣ VON KARMAN.

Παρατηρούμε επομένως ότι όταν αυξάνεται ο Re η ροή δεν ακολουθεί ακριβώς την επιφάνεια του κυλίνδρου, αλλά προκαλεί πίσω του απόρρευμα στην περιοχή του οποίου, η τιμή της πίεσης είναι περίπου ίση της πίεσης του περιβάλλοντος. Όταν ο Re πλησιάσει σε μία κρίσιμη τιμή, ένα νέο φαινόμενο εμφανίζεται : η ροή στην περιοχή η

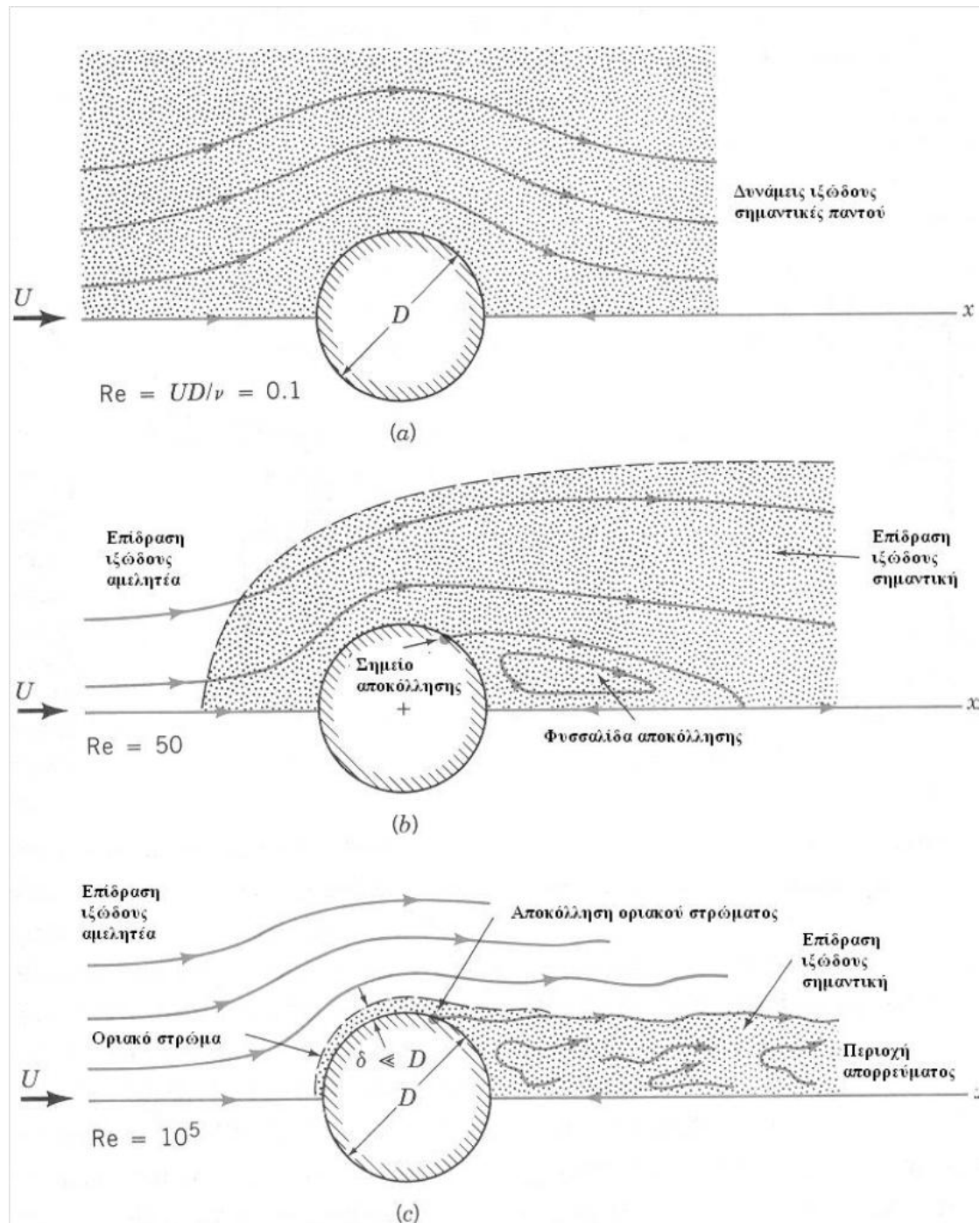
οποία έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του κυλίνδρου γίνεται τυρβώδης, με αποτέλεσμα να μπορεί να ακολουθεί την επιφάνεια σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση (σχήμα 8). Το γεγονός αυτό εξηγεί την αύξηση της πίεσης και τη μείωση της οπισθέλκουσας D .

ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΑΕΡΟΤΟΜΗ ΣΕ ΜΕΓΑΛΟΥΣ ΑΡΙΘΜΟΥΣ RE

Το πρόβλημα της αποκόλλησης της ροής το οποίο εμφανίζεται κατά την ροή γύρω από ένα σώμα, όπως στον κύλινδρο, αποφεύγεται αν δώσουμε στο σώμα κατάλληλο σχήμα, το οποίο έχει επικρατήσει να λέγεται αεροδυναμικό. Σε αυτή την κατηγορία σχημάτων ανήκει και η αεροτομή, όταν η γωνία προσβολής της είναι μικρή ($<10^\circ$). Εάν η γωνία προσβολής αυξηθεί, τότε μπορούν να εμφανιστούν δύο τύποι αποκόλλησης :

- Αν η αεροτομή είναι σημαντικού πάχους, τότε η ροή αποκολλάται στην περιοχή του χείλους προσβολής της.
- Αν η αεροτομή είναι λεπτή, τότε η ροή αποκολλάται μερικώς στην περιοχή του χείλους εκφυγής της.

Και στις δύο περιπτώσεις, η αποκόλληση επιδρά δυσμενώς στην αεροδυναμική απόδοση της αεροτομής.



ΣΧΗΜΑ 8 ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ REYNOLDS

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

Η υπόθεση των ιδανικών ρευστών δεν είναι σε θέση να ερμηνεύσει το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητο να εξετάσουμε το τι συμβαίνει μέσα στο οριακό στρώμα ώστε να καταλήξουμε σε μονοσήμαντη λύση των εξισώσεων της ροής. Έτσι, στην ενότητα αυτή θα

διατυπώσουμε και θα εξετάσουμε τις εξισώσεις κίνησης των πραγματικών ρευστών, όπου αναφέρεται και το πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας.

ΕΞΙΣΩΣΗ NAVIER-STOKES

Η κίνηση των ιδανικών ρευστών περιγράφεται από την εξίσωση Euler, η οποία προκύπτει από το συνδυασμό των εξισώσεων διατήρησης της μάζας - συνέχειας και διατήρησης της ορμής. Η εξίσωση συνεχείας στη γενική της μορφή, ισχύει όχι μόνο για τα ιδανικά ρευστά, αλλά και για τα πραγματικά ρευστά. Η εξίσωση όμως διατήρησης της ορμής, θα πρέπει να τροποποιηθεί, ώστε να λάβουμε υπ' όψιν μας τις ιδιότητες των πραγματικών ρευστών.

Η εξίσωση διατήρησης της ορμής ιδανικού ρευστού εμπεριέχει τον τανυστή πυκνότητας κινητικής ορμής T_m . Η πυκνότητα της κινητικής ορμής αντιστοιχεί σε μία πλήρως αντιστρεπτή μεταφορά ορμής, η οποία οφείλεται αφ' ενός μεν στην κίνηση των διαφόρων στοιχείων του ρευστού από σημείο σε σημείο, αφ' ετέρου δε στις δυνάμεις πίεσεως που ασκούνται στο ρευστό. Στην περίπτωση αυτή (του ιδανικού ρευστού) η σχετική ταχύτητα μεταξύ των σωματιδίων του ρευστού είναι μηδέν. Οι διεργασίες όμως εσωτερικής τριβής εκδηλώνονται μόνο όταν τα στοιχεία του ρευστού έχουν σχετική ταχύτητα διάφορη του μηδενός. Άρα σε πραγματικό ρευστό υπάρχει σχετική ταχύτητα μεταξύ των στοιχείων του, με αποτέλεσμα μία επί πλέον μεταφορά ορμής, η οποία οφείλεται στις δυνάμεις τριβής.

Σε ισότροπο ελαστικό μέσο ο τανυστής τάσης T συνδέεται με τη βαθμωτή διαστολή θ και τη συμμετρική διάτμηση Σ , μέσω της σχέσης :

$$T = -K\theta g - 2\mu\Sigma$$

Κατ' αναλογία με την εξίσωση αυτή, μπορούμε να γράψουμε ότι η συνεισφορά της εσωτερικής τριβής στον τανυστή των τάσεων θα είναι:

$$T_{visc} = -\zeta\theta g - 2\eta\sigma$$

όπου ο συντελεστής ζ ονομάζεται ιξώδες όγκου, ο συντελεστής η ονομάζεται διατμητικό ή δυναμικό ιξώδες και

$$\theta = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\sigma = \frac{d\Sigma}{dt}$$

Τα ρευστά για τα οποία ισχύει αυτή η αναλογία ονομάζονται Νευτώνεια.

Άρα στην περίπτωση αυτή η εξίσωση Euler γράφεται:

$$\rho \frac{d\vec{u}}{dt} = -\vec{\nabla}p + \rho\vec{g} + \vec{\nabla}(\zeta\theta) + 2\vec{\nabla} \cdot (\eta\sigma) \quad (1)$$

Αυτή είναι η γενική μορφή της εξίσωσης Navier- Stokes, οι δύο τελευταίοι όροι της οποίας εκφράζουν την επίδραση του ιξώδους.

Σε αρκετές περιπτώσεις μπορούμε να αγνοήσουμε την επίδραση του ιξωδικού όρου και να λάβουμε υπ' όψιν μας μόνο το διατμητικό ιξώδες. Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση (1) απλοστεύεται και αποκτά τη μορφή :

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -\frac{\vec{\nabla}p}{\rho} + \vec{g} + \nu\nabla^2\vec{u} \quad (2)$$

όπου $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ το κινηματικό ιξώδες.

Αυτή είναι η εξίσωση Navier- Stokes για νευτώνεια ρευστά. Η δυσκολία επίλυσής της έγκειται στο ότι έχει μη γραμμικούς όρους και ως εκ τούτου δεν ισχύει η αρχή της υπέρθεσης των λύσεων. Για το λόγο αυτό, στις περισσότερες περιπτώσεις η εξίσωση Navier- Stokes επιλύεται με αριθμητικές μεθόδους.

ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

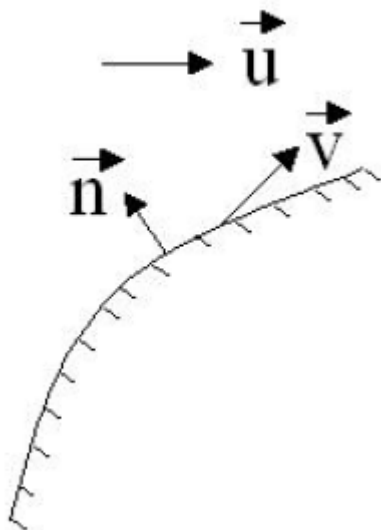
Ξέρουμε ότι για να λύσουμε διαφορικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν φυσικά συστήματα, χρειαζόμαστε τις αρχικές και οριακές συνθήκες. Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε το ποιες είναι οι οριακές εκείνες συνθήκες τις οποίες μπορούμε να εφαρμόσουμε στη μηχανική των ρευστών.

Για να είναι η επιφάνεια $\vec{F}(x, y, z, t)$ οριακή επιφάνεια για την κίνηση ενός ρευστού, θα πρέπει η υλική παράγωγος της επιφανείας να είναι μηδέν. Θα πρέπει δηλαδή, να ισχύει η σχέση:

$$\frac{d\vec{F}}{dt} = 0$$

ΣΤΕΓΑΝΟ ΤΟΙΧΩΜΑ

Στην περίπτωση στεγανού τοιχώματος δεν είναι δυνατόν να έχουμε ροή ρευστού δια μέσου του τοιχώματος



Αν \vec{u} είναι η ταχύτητα του (αδιατάρακτου) ρευστού και η \vec{v} η ταχύτητα του τοιχώματος, η οριακή αυτή συνθήκη εκφράζεται από την εξίσωση :

$$\vec{u} \cdot \hat{n} = \vec{v} \cdot \hat{n}$$

Αν το τοίχωμα είναι ακίνητο, τότε $\vec{v} = 0$, οπότε η προηγούμενη σχέση περιορίζεται στην :

$$\vec{u} \cdot \hat{n} = 0$$

ΣΥΝΑΦΕΙΑ

Η συνθήκη της συνάφειας μας λέει ότι η κίνηση του ρευστού παράλληλα προς την επιφάνεια είναι αδύνατη. Η μαθηματική της έκφραση για κινητή και ακίνητη επιφάνεια αντιστοίχως, είναι:

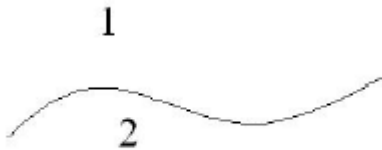
$$\vec{u} \times \hat{n} = \vec{v} \times \hat{n}$$

$$\vec{u} \times \hat{n} = 0$$

Όταν ισχύουν και οι δύο συνθήκες (στεγανού τοιχώματος και συνάφειας) ταυτοχρόνως, τότε για τα στοιχεία του ρευστού που βρίσκονται σε επαφή με την επιφάνεια θα ισχύει: $\vec{u} = 0$.

ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΥΟ ΡΕΥΣΤΩΝ

Έστω η διεπιφάνεια δύο ρευστών 1 και 2. Σε κάθε σημείο της διεπιφάνειας ισχύει:



$$\vec{u}_1 = \vec{u}_2$$

$$p_1 = p_2$$

Επίσης, η διατμητική τάση η οποία ασκείται από το ρευστό 1 στο ρευστό 2, ισούται με τη διατμητική τάση που ασκείται από το ρευστό 2 στο ρευστό 1:

$$n_1 \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_1 = n_2 \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_2$$

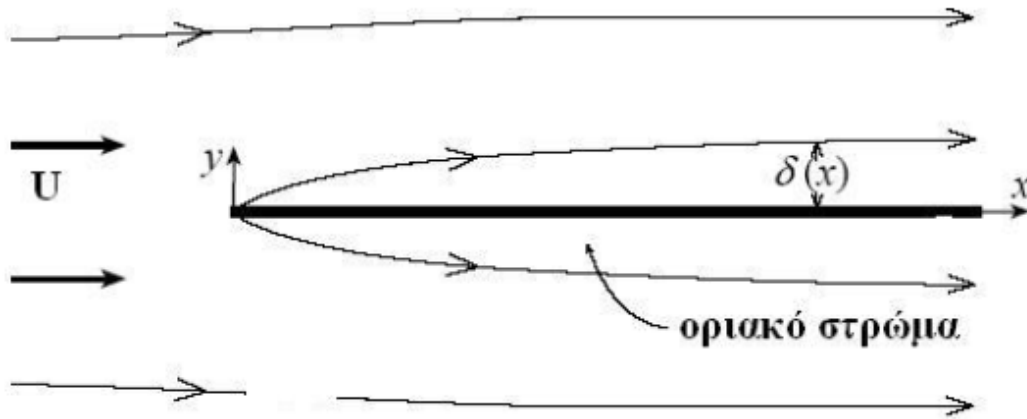
ΡΟΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ REYNOLDS

ΣΤΡΩΤΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Αφού η ροή κοντά σε στερεά επιφάνεια δημιουργεί στροβιλότητα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα να μην μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$\vec{u} = \vec{\nabla}\psi$$

δηλαδή ως βαθμίδα μίας συναρτήσεως δυναμικού. Αν όμως ο αριθμός Re είναι μεγάλος, τότε η στροβιλότητα περιορίζεται εντός λεπτού οριακού στρώματος (σχήμα 9) και η ροή μπορεί να πάρει τη μορφή $\vec{u} = \vec{\nabla}\psi$ στην περιοχή εκτός του οριακού στρώματος.



ΣΧΗΜΑ 9 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΡΩΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.

Έστω το οριακό στρώμα του σχήματος (9), το οποίο προκαλείται όταν ρευστό αδιατάρακτης ταχύτητας, έχει έρθει σε επαφή με επίπεδη οριζόντια επιφάνεια. Αν το μήκος της πλάκας δεν είναι πολύ μεγάλο, τότε η ροή εντός του οριακού στρώματος θα είναι στρωτή, δηλαδή μόνιμη και δύο διαστάσεων, οπότε θα είναι συνάρτηση των συντεταγμένων x και y . Υποθέτουμε τη ροή υποηχητική, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστη. Καθώς οι δυνάμεις ιξώδους επιβραδύνουν το ρευστό κοντά στην επιφάνεια, αυτό πρέπει να ανακλαστεί από αυτήν ώστε να αποφευχθεί η συσσώρευσή του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ταχύτητας ροής v κατά τη συνιστώσα y η οποία είναι μικρότερη της u . Η ταχύτητα μακριά από την επιφάνεια είναι ομοιόμορφη, άρα η πίεση είναι σταθερή εκτός του οριακού στρώματος. Υποθέτουμε ότι αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πίεση να είναι σταθερή και μέσα στο οριακό στρώμα. Αργότερα θα ελέγξουμε την ισχύ αυτής μας της υπόθεσης.

Με την πίεση σταθερή και τη ροή μόνιμη, η εξίσωση Navier- Stokes στο εσωτερικό του οριακού στρώματος γράφεται :

$$(\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \approx \nu \nabla^2 \vec{u}$$

Η εξίσωση αυτή πρέπει να λυθεί σε συνδυασμό με την εξίσωση συνεχείας $\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$ και τις οριακές συνθήκες :

$$y \rightarrow 0 \Rightarrow \vec{u} \rightarrow 0$$

$$y \rightarrow \infty \Rightarrow \vec{u} \rightarrow \vec{U}$$

Το ρευστό συναντά κατ' αρχήν την οριακή συνθήκη συνάφειας στο σημείο $(x,y) = (0,0)$ δηλαδή στο εμπρός μέρος της επιφάνειας. Στο σημείο αυτό το ρευστό επιβραδύνεται απότομα η ταχύτητά του γίνεται μηδενική, δημιουργώντας έτσι μια απότομη βαθμίδα ταχύτητας, η οποία προκαλεί και το έναυσμα της στροβιλότητας, άρα τη γένεση του οριακού στρώματος. Καθώς το ρευστό ρέει κατά μήκος της επιφάνειας, η στροβιλότητα

διαχέεται από την επιφάνεια προς το ρευστό, προκαλώντας την αύξηση του πάχους του οριακού στρώματος. Θα προσπαθήσουμε να εκτιμήσουμε αυτό το πάχος.

Επειδή η ροή υπερέθλη ασυμπύεστη, ισχύει η εξίσωση της συνέχειας στη μορφή:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$$

Αυτό έχει ως συνέπεια να ισχύει:

$$\frac{u}{x} \approx \frac{v}{\delta(x)} \Rightarrow \delta(x) = \frac{v}{u}x$$

Η τάξη μεγέθους του όρου αδρανείας στην εξίσωση Navier- Stokes θα είναι:

$$(\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} = \frac{U^2}{x}$$

και του όρου ιξώδους

$$v \frac{U}{\delta^2(x)}$$

Άρα

$$\frac{U^2}{x} \approx \frac{vU}{\delta^2(x)} \Rightarrow \delta(x) = \sqrt{\frac{vx}{U}}$$

Η τελευταία εξίσωση μας λέει ότι το οριακό στρώμα έχει παραβολικό σχήμα.

Θεωρούμε τώρα ότι βρισκόμαστε στην ανάντη πλευρά της στερεάς επιφάνειας, όπου το οριακό στρώμα είναι ιδιαίτερα λεπτό ($\delta(x) \ll x$) και η ταχύτητα είναι σχεδόν παράλληλη με την επιφάνεια δεδομένου ότι:

$$v \approx \frac{\delta(x)}{x}u \ll u$$

Στη συνέχεια, διατυπώνουμε την ακόλουθη υπόθεση ομοιότητας: Αφού το οριακό στρώμα είναι λεπτό, η κατανομή της ροής (δηλαδή η κατανομή της ταχύτητας ως προς y) είναι ανεξάρτητη της θέσης x . Αυτό σημαίνει ότι η συνιστώσα $u(x,y)$ (τάξης μεγέθους U) και ο όρος $\frac{x}{\delta(x)}v$ (επίσης τάξης μεγέθους U), εξαρτώνται μόνο από την αδιάστατη παράμετρο:

$$\xi = \frac{y}{\delta(x)} = y \sqrt{\frac{U}{vx}}$$

Άρα το πρόβλημα ανάγεται στον προσδιορισμό της ταχύτητας $\vec{u}(\xi)$, λαμβανομένων υπ'οψιν των οριακών συνθηκών $\vec{u} = 0$ για $\xi=0$ και $\vec{u} = U\hat{e}_x$ για $\xi \gg 1$.

Ξέρουμε ότι κάθε άνυσμα μπορεί να γραφεί ως άθροισμα μια βαθμίδας βαθμωτού πεδίου συν μία στροφή διανυσματικού πεδίου, άρα η ταχύτητα ροής μπορεί να γραφεί:

$$\vec{u} = \vec{\nabla}\psi + \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

Αν η ροή μας ήταν αστρόβιλη, τότε θα χρειαζόμασταν για την περιγραφή της ταχύτητας, μόνο τον πρώτο προσθετέο $\vec{\nabla}\psi$. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει γιατί στο οριακό στρώμα η στροβιλότητα είναι σημαντική. Άρα, η ταχύτητα εκφράζεται μόνο ως στροφή διανυσματικού δυναμικού:

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$$

Δεδομένου επίσης ότι η ροή είναι δισδιάστατη (διαστάσεων x και y), θα πρέπει το διανυσματικό δυναμικό να έχει μία μόνο συνιστώσα την $\vec{A} = A\hat{e}_z$. Ονομάζουμε αυτή τη συνιστώσα, $A_z = \zeta(x,y)$, ρευματική συνάρτηση. Οι συνιστώσες της ταχύτητας ροής, εκφράζονται τότε μέσω της ρευματικής συνάρτησης ως:

$$u = \frac{\partial \zeta}{\partial y}, v = -\frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

Δεδομένου ότι η ροή μας είναι ασυμπίεστη, θα πρέπει να ισχύει η εξίσωση συνεχείας. Παρατηρούμε ότι οι τελευταίες εκφράσεις την ικανοποιούν. Δεδομένου ότι η ρευματική συνάρτηση ζ μεταβάλλεται εντός του οριακού στρώματος, δηλαδή εντός κλίμακας μήκους $\approx \delta(x)$, για να μπορεί να προκαλέσει ταχύτητα $\approx U$, θα πρέπει να είναι τάξης μεγέθους $\approx U\delta(x)$. Άρα η ζ θα πρέπει να έχει την ακόλουθη μαθηματική μορφή:

$$\zeta = U\delta(x)f(\xi)$$

όπου $f(\xi)$ αδιάστατη συνάρτηση τάξης μεγέθους μονάδος.

Έτσι προκύπτει ότι :

$$u = \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial y} = U\delta(x)f'(\xi) \frac{1}{\delta(x)} \Rightarrow$$

$$u = Uf'(\xi)$$

και

$$v = -\frac{\partial \zeta}{\partial x} = -f(\xi)U \frac{\partial}{\partial x}(\delta(x)) - U\delta(x) \frac{\partial f(\xi)}{\partial x} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v = -f(\xi)U \frac{\partial}{\partial x}(\delta(x)) - U\delta(x) \frac{\partial f(\xi)}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

Καταλήγοντας:

$$v = -f(\xi)U \frac{\delta(x)}{2x} + U\delta(x)f'(\xi) \frac{\xi}{2x} = -\frac{U\delta(x)}{2x} f(\xi) + U \frac{\delta(x)}{2x} \xi f'(\xi) \Rightarrow$$

$$v = \frac{U\delta(x)}{2x} (\xi f'(\xi) - f(\xi))$$

Επανερχόμαστε τώρα στην εξίσωση Navier-Stokes. Η x συνιστώσα γράφεται :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

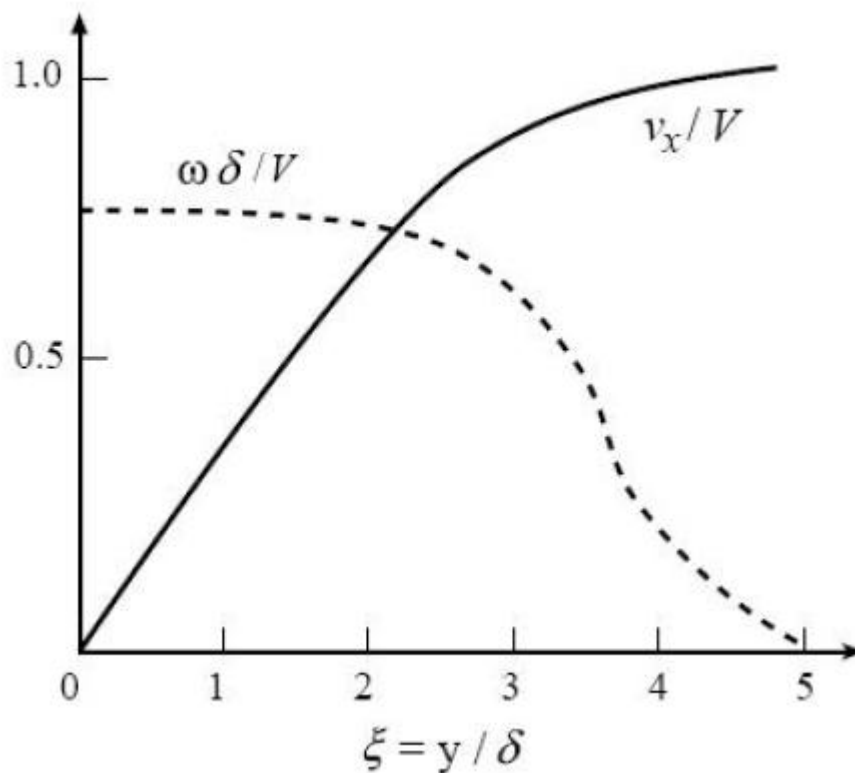
δεδομένου ότι η ταχύτητα εντός του οριακού στρώματος μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διεύθυνση y αλλά πολύ λιγότερο κατά τη διεύθυνση x , με αποτέλεσμα οι παράγωγοι ως προς x να είναι αμελητέες συγκρινόμενες με τις παραγώγους ως προς y .

Η τελική μορφή της χ συνιστώσας γίνεται :

$$\begin{aligned}
 & -Uf'(\xi)\frac{U}{2x}\xi f''(\xi) + \frac{U\delta(\chi)}{2\chi}(\xi f'(\xi) - f(\xi))\frac{U}{\delta(\chi)}f''(\xi) = v\frac{U}{\delta^2(\chi)}f'''(\xi) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow -\frac{U^2}{2x}f(\xi)f''(\xi) = v\frac{U}{\delta^2(\chi)}f'''(\xi) \Rightarrow v\frac{U}{\delta^2(\chi)}f'''(\xi) + \frac{U^2}{2x}f(\xi)f''(\xi) = 0 \Rightarrow \\
 & \Rightarrow \frac{1}{\delta^2(\chi)}f'''(\xi) + \frac{f(\xi)}{2}f''(\xi) = 0 \Rightarrow \\
 & \Rightarrow f'''(\xi) + \frac{f(\xi)}{2}f''(\xi) = 0 \quad (3)
 \end{aligned}$$

Η εξίσωση αυτή λύνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η ταχύτητα του ρευστού μηδενίζεται επάνω στην στερεά επιφάνεια και επίσης ότι τείνει στην τιμή U στην αδιατάρακτη ροή, δηλαδή εκτός του οριακού στρώματος:

- $y = 0 \Rightarrow u = 0$, άρα $f(0) = f'(0) = 0$ και
- $y \rightarrow \infty \Rightarrow u = U$, άρα $f'(\infty) = 1$



ΣΧΗΜΑ 10 ΚΑΤΑΝΟΜΗ BLASIUS

και η αριθμητική λύση της φαίνεται στο σχήμα 10 και ονομάζεται κατανομή Blasius (Blasius profile).

Παρατηρούμε ότι η λύση συμπεριφέρεται κατά τα αναμενόμενα: Η ταχύτητα u μηδενίζεται στο σημείο $y=0$ της επιφάνειας και αυξάνεται έως την τιμή U ομαλά καθώς απομακρυνόμαστε από αυτήν, έχοντας πλησιάσει την τάξη μεγέθους της αδιατάρακτης ταχύτητας U για y αρκετά μεγαλύτερο του $\delta(x)$.

Επανερχόμαστε τώρα στην υπόθεση την οποία βασιστήκαμε για να καταλήξουμε στην κατανομή Blasius, ότι δηλαδή η πίεση στο εσωτερικό του εσωτερικού στρώματος είναι σταθερή, αφού είναι σταθερή και στην περιοχή έξω από αυτό. Η υπόθεση αυτή ευσταθή καθώς η τάξη μεγέθους μεταβολής της πίεσης είναι κατά μεν τη διεύθυνση x ίση με ρU^2 κατά δε τη διεύθυνση y ίση με $\rho U^2 (\delta^2(x)/\chi^2)$.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{x} \approx \frac{U^2}{x} \Rightarrow \Delta p \approx \rho U^2$$

Δηλαδή η μεταβολή της πίεσης ως προς y είναι πολύ μικρή, δεδομένου ότι:

$$\frac{\delta^2}{\chi^2} \ll 1$$

Θα υπολογίσουμε τώρα τη δύναμη τριβής την οποία ασκεί το ρευστό επάνω στην επιφάνεια. Η δύναμη τριβής ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από την σχέση

$$\sigma_{xy} = \eta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}, \text{ η οποία γράφεται:}$$

$$\sigma_{xy} = \eta \frac{U}{\delta(x)} f''(0)$$

Αν το μήκος της επιφάνειας είναι L και το πλάτος της w , τότε το μέτρο της δύναμης τριβής θα είναι:

$$D = 2w \int_0^L \eta \frac{U}{\delta(x)} f''(0) dx \Rightarrow$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 (2wL)$$

όπου $C_D = 4f''(0)Re^{-\frac{1}{2}}$, ο συντελεστής αντίστασης και $2wL$ είναι το διπλάσιο του εμβαδού της επιφάνειας, δεδομένου ότι η δύναμη τριβής ασκείται εν προκειμένω και στις δύο πλευρές του σώματος. Από το σχήμα (10) μπορούμε να βρούμε ότι $f''(0) \cong 0,332$, άρα:

$$C_D = 1,328 Re^{-\frac{1}{2}}$$

Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται το Re , επειδή ο Re αυξάνεται, ο C_D θα μειώνεται. Αυτός ο νόμος όμως παύει να ισχύει για $Re > 10^6$, δεδομένου ότι τότε το οριακό στρώμα μεταπίπτει στην τυρβώδη κατάσταση.

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΤΗΤΑΣ

Δεδομένου ότι στην έως τώρα ανάλυσή μας, υποθέτουμε τη ροή διδιάστατη (συνιστώσες x και y) της οποίας η ταχύτητα είναι αποτέλεσμα στροφή ανυσματικού δυναμικού:

$$\vec{u} = \vec{\nabla} \times (\zeta \hat{e}_z)$$

η στροβιλότητα θα είναι:

$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times (\zeta \hat{e}_z) = -\nabla^2 (\zeta \hat{e}_z)$$

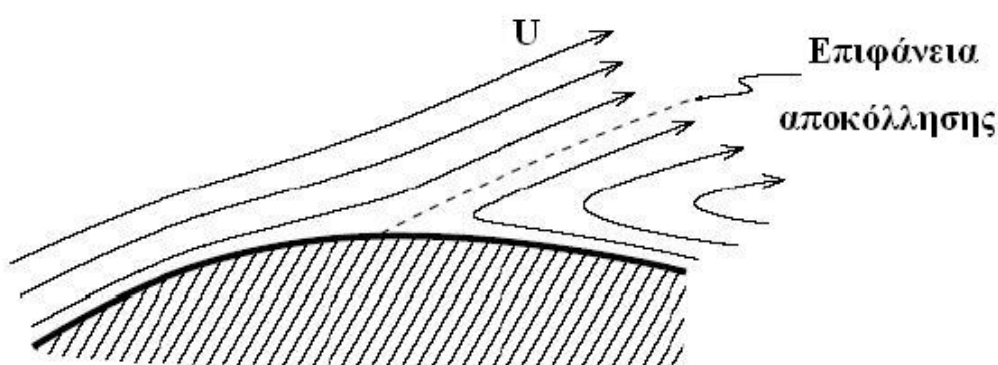
της οποίας η μόνη μη μηδενική συνιστώσα θα είναι:

$$\omega = \omega_z = -\nabla^2 \zeta \cong -\frac{U}{\delta \chi} f''(\xi)$$

Η μεταβολή της στροβιλότητας φαίνεται στο σχήμα (10). Από την τελευταία αυτή σχέση και την εξίσωση (3) παρατηρούμε ότι η βαθμίδα στροβιλότητας μηδενίζεται επάνω στην επιφάνεια ($y=0$). Αυτό σημαίνει ότι η στροβιλότητα δεν μπορεί να διαχυθεί μέσα στην επιφάνεια, αλλά ούτε μπορεί και να μεταφερθεί μακριά από την επιφάνεια, δεδομένου ότι η κάθετη προς αυτή συνιστώσα της ταχύτητας είναι μηδενική. Επειδή όμως δεν υπάρχει στροβιλότητα στα ανάντη της ροής, αυτή πρέπει κάπου να έχει δημιουργηθεί. Το σημείο αυτό είναι το χείλος προσβολής της επιφάνειας, όπου όπως ήδη αναφέραμε, οι υποθέσεις μας καταρρέουν. Η στροβιλότητα η οποία δημιουργείται σε αυτό το σημείο, διαχέεται στα κατάντη της ροής. Η απόσταση στην οποία η στροβιλότητα έχει διαχυθεί μετά από χρόνο t είναι $\sqrt{\nu t}$. Η μορφή αυτής της σχέσης, εξηγεί το παραβολικό σχήμα του οριακού στρώματος.

ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Θεωρούμε μία καμπύλη επιφάνεια, π.χ. μία αεροτομή. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει γενικά μία βαθμίδα πίεσης κατά μήκος τους οριακού στρώματος η οποία δεν μπορεί να αγνοηθεί, αν αντιθέσει με τη βαθμίδα πίεσης σε μία εγκάρσια τομή του οριακού στρώματος. Αν η πίεση μειώνεται κατά μήκος της ροής, το ρευστό θα επιταχύνεται με αποτέλεσμα να δημιουργείται περισσότερη στροβιλότητα επάνω στην επιφάνεια, η οποία θα διαχέεται εν συνεχεία μακριά της. Αν όμως υπάρχει αντίθετη βαθμίδα πίεσης και το ρευστό επιβραδυνθεί, πρέπει να δημιουργηθεί στην επιφάνεια αρνητική στροβιλότητα. Για σημαντικά αρνητική βαθμίδα πίεσης, η αρνητική στροβιλότητα γίνεται τόσο μεγάλη με αποτέλεσμα να μην μπορεί να διαχυθεί στο οριακό στρώμα με τρόπο ώστε να μπορεί να συντηρηθεί μία ροή οριακού στρώματος, σαν αυτή την οποία μελετήσαμε. Έτσι, το οριακό στρώμα αποκολλάται από την επιφάνεια, με αποτέλεσμα να δημιουργείται αντίθετη ροή.



ΣΧΗΜΑ 11 ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΡΟΗ

ΓΕΝΙΚΑ

Μία ροή ρευστού λέγεται τυρβώδης όταν μεταβάλλεται ακανόνιστα, τόσο στο χώρο, όσο και στο χρόνο. Η τύρβη εμφανίζεται για μεγάλους αριθμούς Re . Στην καθημερινότητα συναντάμε ροές νερού ή αέρα των οποίων το ιξώδες είναι $10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ και $10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ αντιστοίχως. Μία συνήθης ταχύτητα ροής είναι $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, η οποία για χαρακτηριστικό μήκος 1 m δίνει $Re = Ud/\nu = 10^{-6} \cdot 10^7$. Δεν είναι λοιπόν παράδοξο το ότι γύρω μας συναντάμε κυρίως τυρβώδεις ροές.

Η τυρβώδης ροή αναγνωρίζεται εύκολα, αλλά ο ακριβής ορισμός της είναι δυσχερής, όπως δυσχερής είναι και η ποσοτική περιγραφή της.

ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΤΗ ΤΥΡΒΗ - ΡΟΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ

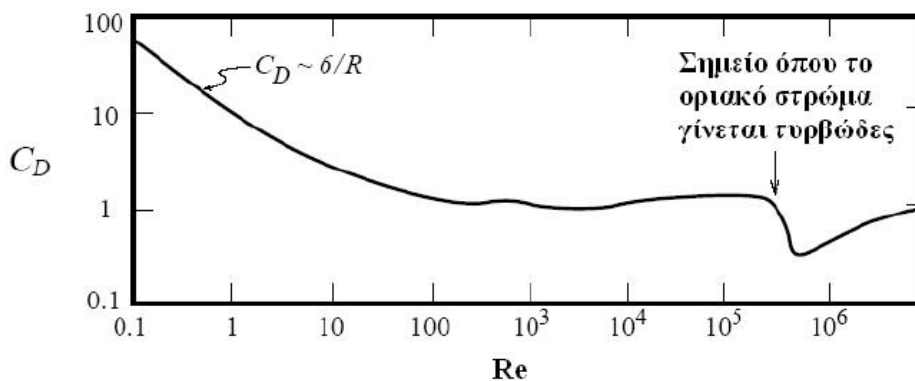
Στην ενότητα αυτή θα δείξουμε ποιοτικά το πως μία ροή εξαρτάται από το αριθμό Re και ειδικά το πως μεταβαίνει στην τυρβώδη ροή, μελετώντας τη ροή ομογενώς κινούμενου ρευστού γύρω από κύλινδρο, του οποίου ο διαμήκης άξονας είναι κάθετος στη ροή. θεωρούμε ότι η ροή είναι υποηχητική, επομένως μπορεί να θεωρηθεί ως ασυμπίεστη. Έστω ότι η διάμετρος του κυλίνδρου είναι d , την οποία επιλέγουμε ως χαρακτηριστική διάσταση του προβλήματος. Ως χαρακτηριστική ταχύτητα θεωρούμε την αδιατάρακτη ταχύτητα U στα ανάντη της ροής. Υποθέτοντας ότι η ροή είναι αρχικώς μόνιμη (δεν υπάρχει τύρβη), όπως και ασυμπίεστη και αγνοώντας την επίδραση του πεδίου βαρύτητας, μπορούμε να περιγράψουμε τη ροή με τη βοήθεια των εξής εξισώσεων :

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{u} &= 0 \\ (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u} &= -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}p + \nu\nabla^2\vec{u}\end{aligned}$$

Το πεδίο ροής υπολογίζεται λύνοντας αυτές τις εξισώσεις, λαμβάνοντας υπ' όψιν μας τις οριακές συνθήκες, ότι δηλαδή η ταχύτητα μηδενίζεται στην επιφάνεια του κυλίνδρου και γίνεται εκ νέου ομοιόμορφη σε πολύ μεγάλη απόσταση από αυτόν. Αν εφαρμόσουμε τη διαστατική ανάλυση, μπορούμε να αποδείξουμε ότι μεταξύ των αδιάστατων αριθμών του προβλήματος, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\vec{u}}{U} = f\left(\frac{\vec{x}}{d}, Re\right)$$

όπου συναρτησιακή μορφή της αδιάστατης f διαφοροποιείται σημαντικά, αναλόγως της τιμής του Re , όπως φαίνεται και στο σχήμα (12)



ΣΧΗΜΑ 12 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ REYNOLDS.

Εισάγουμε εδώ την έννοια της πίεσης αποκοπής, η οποία θα είναι η πίεση την οποία θα έχει το ρευστό, βάσει της σχέσης του Bernoulli $p + \frac{\rho u^2}{2} + \rho gh = constant$, όταν μηδενιστεί η ταχύτητα επί του χείλους προσβολής του κυλίνδρου. Η πίεση αποκοπής θα είναι τότε ίση με :

$$p_{stag} = p_0 + \frac{\rho U^2}{2}$$

όπου p_0 η αδιατάρακτη πίεση στα ανάντη της ροής. Υποθέτουμε ότι στην εμπρός επιφάνεια του κυλίνδρου ασκείται η πίεση αποκοπής ενώ στην πίσω, η πίεση p . Στην περίπτωση αυτή η συνισταμένη δύναμη επί του κυλίνδρου ανά μονάδα μήκους θα είναι $\frac{\rho U^2}{2}$.

Αυτή είναι μία πρώτη εκτίμηση της οπισθέλκουσας η οποία ασκείται στον κύλινδρο. Ο λόγος της πραγματικής οπισθέλκουσας ανά μονάδα μήκους προς την πρώτη αυτή εκτίμηση, ονομάζεται συντελεστής οπισθέλκουσας :

$$C_D = \frac{2F}{\rho U^2 d}$$

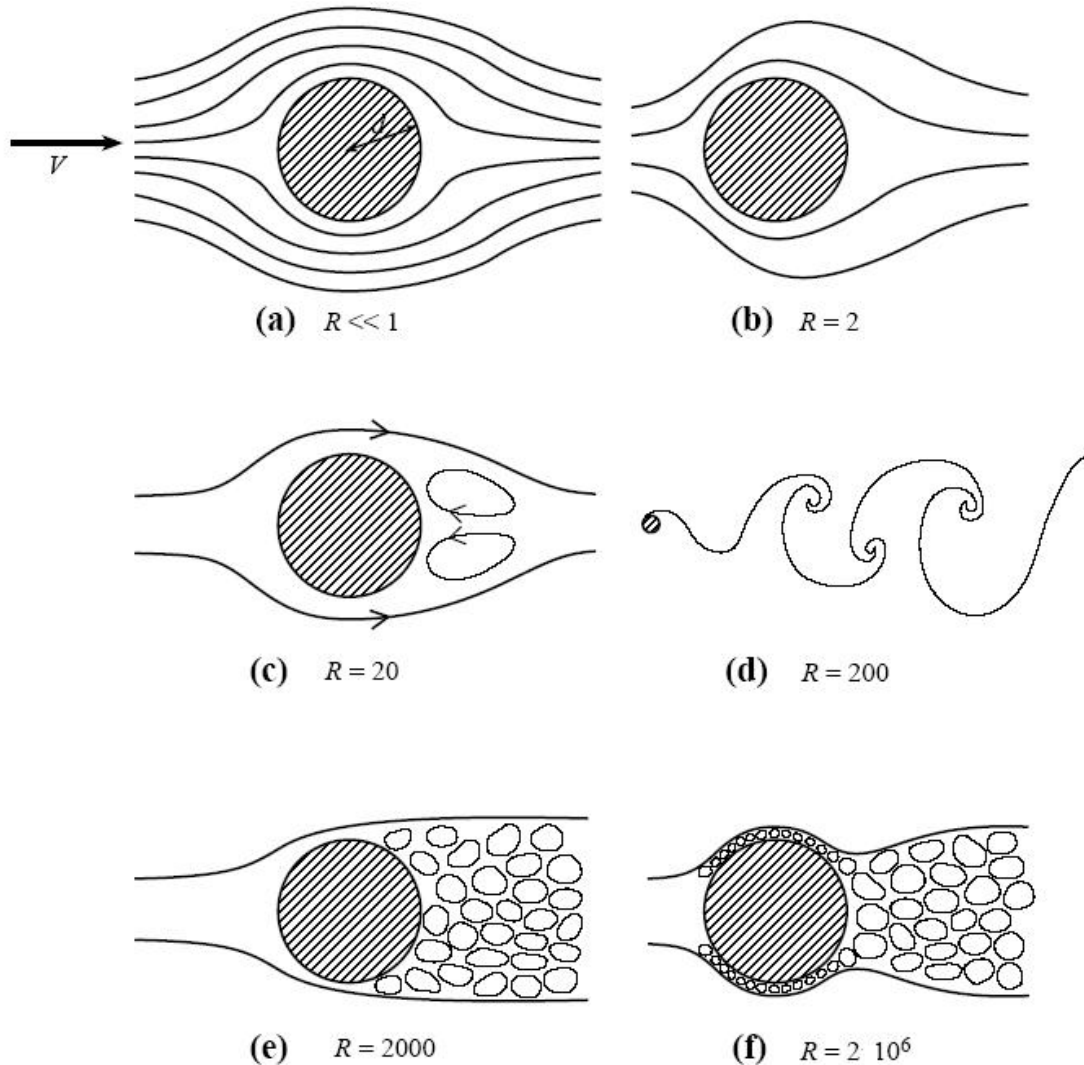
Δεδομένου ότι ο συντελεστής οπισθέλκουσας είναι ένα αδιάστατο χαρακτηριστικό της ροής, εξαρτάται από τον αριθμό Re καθώς και από το σχήμα του σώματος.

Θα εξετάσουμε τώρα πως ο αριθμός Re επιδρά στη ροή. Για χαμηλούς αριθμούς Re ($Re \ll 1$) έχουμε έρπουσα ροή, όπως στην περίπτωση της ροής Stokes. Όπως φαίνεται στο σχήμα (13), οι ρευματικές γραμμές είναι συμμετρικές στα ανάντη και τα κατάντη του κυλίνδρου. Το ρευστό επιβραδύνεται εξ αιτίας των δυνάμεων ιξώδους καθώς περνά από τον κύλινδρο και η πίεση επίσης μειώνεται στα κατάντη, με αποτέλεσμα στον κύλινδρο να ασκείται μία δύναμη. Η ορμή η οποία αφαιρείται από το ρευστό, προσδίδεται στον κύλινδρο. Στην περίπτωση αυτή η ενεργός διατομή μέσω της οποίας το ρευστό και ο κύλινδρος ανταλλάσσουν ορμή είναι της τάξης μεγέθους $d Re$.

Όταν $Re \approx 1$, η ενεργός διατομή ανταλλαγής ορμής γίνεται ίση με την γεωμετρική διατομή του κυλίνδρου, οπότε τότε ο συντελεστής οπισθέλκουσας γίνεται περίπου ίσος με τη μονάδα. Στην περιοχή τιμών του Re η συμμετρία των ρευματικών γραμμών αρχίζει να χαλάει.

Για μεγαλύτερες τιμές του Re, ένα στρωτό οριακό στρώμα αρχίζει να σχηματίζεται γύρω από τον κύλινδρο. Για τιμή του $Re \approx 5$ η ροή αρχίζει να αποκολλάται

στα κατάντη του κυλίνδρου και αντικαθίσταται από δύο στροβίλους, οι οποίοι έχουν αντίθετη φορά. Αυτό οφείλεται στο ότι δημιουργείται μία δυσμενής διαφορά πίεσης. Αυξανόμενου του Re , μέχρι την τιμή $Re \approx 100$ οι παραγόμενοι στρόβιλοι αυξάνονται εναλλάξ χρονικά, με αποτέλεσμα να παρατηρείται στα κατάντη της ροής μία σειρά εναλλασσομένων στροβίλων. Η διάταξη αυτή είναι γνωστή και ως στροβιλόδρομος von Karman. Για $Re \approx 1000$, οι στρόβιλοι στα κατάντη της ροής δεν είναι πλέον ορατοί. Το πεδίο ταχυτήτων του απορρεύματος είναι τελείως ακανόνιστο σε όλες τις κλίμακες, χωρική και χρονική. Η ροή στα κατάντη έχει γίνει τυρβώδης. Τέλος για $Re \approx 30 \times 10^4$, το οριακό στρώμα, το οποίο μέχρι τώρα ήταν στρωτό, έχει γίνει τυρβώδες, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του συντελεστή οπισθέλκουσας.



ΣΧΗΜΑ 13 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟ, ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΟΥ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ REYNOLDS.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ροής είναι ότι για $Re \ll 1000$, πριν αναπτυχθεί η τυρβώδης ροή, η ροή (μόνιμη ή δυναμική), εμφανίζει συμμετρία ως προς τη μετατόπιση, δηλαδή είναι ανεξάρτητη από την συντεταγμένη z , επομένως είναι διδιάστατη. Αυτό ισχύει ακόμη και για το στροβιλόδρομο von Karman. Αντιθέτως, το τυρβώδες πεδίο ροής, το οποίο εμφανίζεται για $Re \approx 1000$ είναι πλήρως τρισδιάστατη. Για αυτές της μεγάλης τιμές του αριθμού Re , μικρές μη συμμετρικές ως προς τη μετατόπιση μεταβολές, αναπτύσσονται σε έντονη τυρβώδη ροή τριών διαστάσεων. Αυτό αποτελεί ένδειξη του ότι οι ροές δύο διαστάσεων δεν μπορούν να εμφανίσουν

πραγματική τύρβη. Η πραγματική τύρβη απαιτεί χαοτικές κινήσεις στις τρεις διαστάσεις.

Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό αυτού του είδους των ροών είναι ότι υπάρχει ένας κρίσιμος αριθμός Re πάνω από τον οποίο εμφανίζεται η τύρβη. Αυτός ο κρίσιμος αριθμός κυμαίνεται από τις τιμές 30 έως 10^5 , αναλόγως της γεωμετρίας της ροής και πιο συγκεκριμένα αναλόγως του μήκους και της ταχύτητας η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του Re .

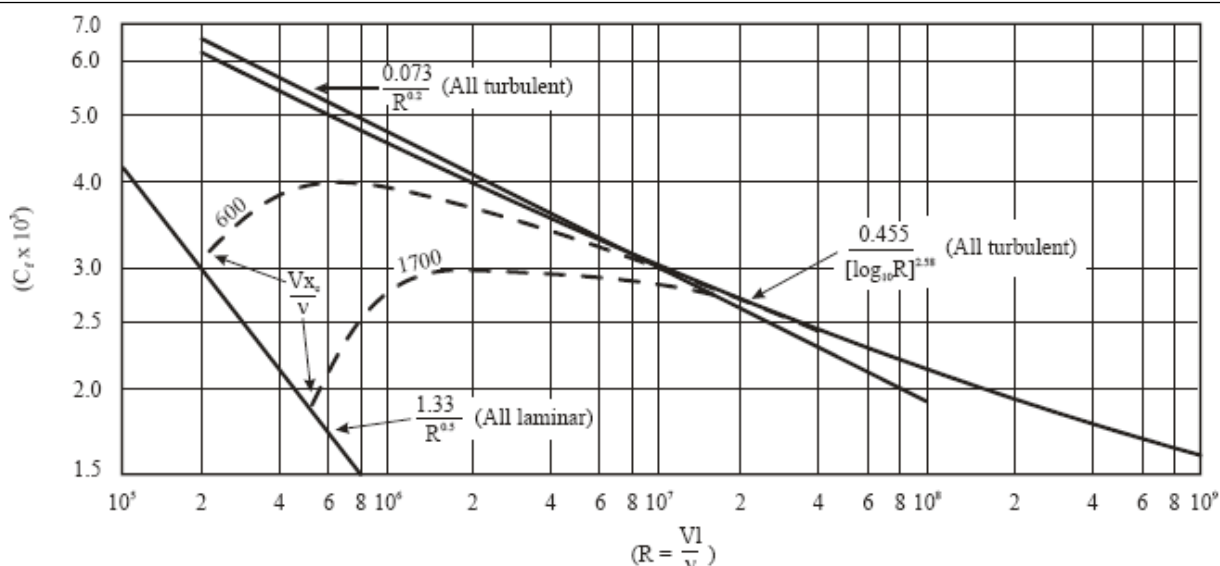


Figure 17. Friction drag coefficient C_f versus Reynolds number R for a flat plate parallel to the undisturbed flow.

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει την μεταβολή της τριβής με τον αριθμό Reynolds. Το σχήμα δείχνει ότι το οριακό στρώμα που είναι εξ' ολοκλήρου στρωτό, υπάρχει μόνο σε χαμηλούς αριθμούς Re , ενώ το τυρβώδες οριακό στρώμα υπάρχει από αριθμό $Re > 10^9$.

ΤΥΡΒΩΔΗ ΟΡΙΑΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ

ΓΕΝΙΚΑ

Για μεγάλους αριθμούς του Reynolds ροή παράλληλα προς τοίχωμα χαρακτηρίζεται από ένα λεπτό οριακό στρώμα πλάι στο τοίχωμα. Μέσα στο οριακό στρώμα η ταχύτητα του ρευστού παράλληλα προς το τοίχωμα μεταβάλλεται από την τιμή της έξω από το οριακό στρώμα στην τιμή μηδέν που επιβάλλει η φυσική οριακή συνθήκη πάνω στο τοίχωμα. Το ρευστό που βρίσκεται μέσα στο οριακό στρώμα κινείται βραδύτερα απ' ό,τι το ρευστό εκτός οριακού στρώματος. Κατά συνέπεια το οριακό στρώμα χαρακτηρίζεται από ελαττωμένη ροή μάζας και ελαττωμένη ροή ορμής.

Μεγέθη που χαρακτηρίζουν το οριακό στρώμα, ανεξαρτήτως του αν είναι τυρβώδες ή όχι, είναι τα εξής:

- Το πάχος του οριακού στρώματος δ ορίζεται σαν η απόσταση από το τοίχωμα όπου η ταχύτητα (η μέση ταχύτητα αν το στρώμα είναι τυρβώδες) έχει γίνει ίση με τα 99% της εξωτερικής ταχύτητας της ροής.
- Το πάχος μετατόπισης του οριακού στρώματος δ^* ορίζεται σαν το πάχος στρώματος ρευστού που κινείται με την εξωτερική ταχύτητα της ροής που μεταφέρει παροχή ίση με την απώλεια παροχής που προκαλεί το οριακό στρώμα. Μαθηματικά γράφουμε τον ακόλουθο ορισμό:

$$\delta^* U_o = \int_0^{\delta} (U_o - \bar{u}) dy$$

- Το πάχος ορμής του οριακού στρώματος θ ορίζεται σαν το πάχος στρώματος ρευστού που κινείται με την εξωτερική ταχύτητα της ροής που μεταφέρει ορμή ίση προς την απώλεια ορμής του οριακού στρώματος. Μαθηματικά γράφουμε τον ακόλουθο ορισμό:

$$\theta U_o^2 = \int_0^{\delta} \bar{u}(U_o - \bar{u}) dy$$

- Τέλος σημαντικό μέγεθος είναι η τάση στο τοίχωμα τ_w (μέση τάση για τυρβώδες οριακό στρώμα) και ο τοπικός συντελεστής τριβής C_f . Τα δυο αυτά μεγέθη ορίζονται αντίστοιχα ως εξής:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0}$$

$$C_f = \frac{\tau_w}{\rho U_o^2 / 2}$$

Στην γενική περίπτωση ο τοπικός συντελεστής τριβής εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds βασισμένο στην απόσταση από το ανάντη άκρο, και στην τραχύτητα της επιφάνειας.

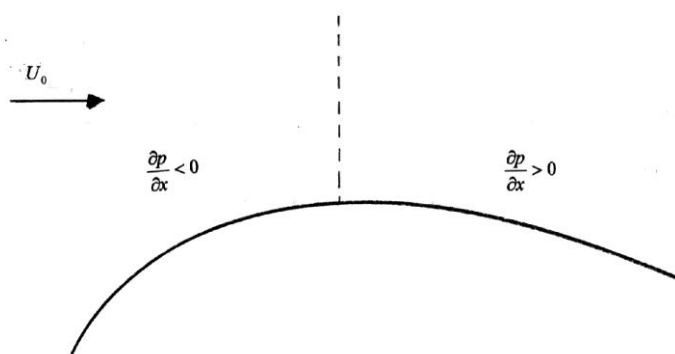
Σε μικρή απόσταση από το ανάντη άκρο της επιφάνειας η ροή στο οριακό στρώμα παραμένει στρωτή. Στην συνέχεια όμως η ροή γίνεται υδροδυναμικά ασταθής, δηλαδή μικρές διαταραχές αυξάνονται καθώς διαδίδονται κατάντη. Λόγω της υδροδυναμικής αστάθειας η ροή στο οριακό στρώμα μετατρέπεται σε τυρβώδη. Για λεία επιφάνεια η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή ολοκληρώνεται όταν ο αριθμός του Reynolds βασισμένος στην απόσταση από το ανάντη άκρο υπερβεί την τιμή 500000. Η ροή παραμένει στρωτή μόνο σε ένα πολύ λεπτότερο στρώμα κοντά στην επιφάνεια, το οποίο λέγεται οριακό υπόστρωμα.

Καθώς στην παρούσα εργασία θα εξετάσουμε τη ροή γύρω από σώματα στα οποία η επιφάνειά τους είναι καμπυλωμένη αναπτύσσεται παρακάτω η θεωρία για το

οριακό στρώμα γύρω από καμπυλωμένη επιφάνεια και το φαινόμενο της αποκόλλησής του.

ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ ΣΕ ΚΑΥΜΠΥΛΩΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ- ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ

Σε ροή πάνω από καμπυλωμένη επιφάνεια το οριακό στρώμα αναπτύσσεται υπό την επίδραση εξωτερικής κλίσης πίεσης. Στην περιοχή μέχρι το σημείο μεγίστου πλάτους η εξωτερική ροή επιταχύνεται και κατά συνέπεια από τον νόμο του Bernoulli η κλίση πίεσης είναι αρνητική. Αρνητική κλίση πίεσης λέγεται «ευνοϊκή» γιατί προκαλεί δυνάμεις σε κατεύθυνση παράλληλη προς το τοίχωμα που βοηθούν τα σωματίδια του ρευστού να υπερνικήσουν την τριβή στο τοίχωμα. Αντίθετα στην περιοχή μετά το σημείο μεγίστου πάχους η κλίση της πίεσης γίνεται θετική, γιατί η εξωτερική ροή επιβραδύνεται. Θετική κλίση πίεσης λέγεται «δυσμενής» γιατί προκαλεί δυνάμεις σε κατεύθυνση παράλληλη προς το τοίχωμα που αντιτίθενται στην κίνηση των σωματιδίων του ρευστού (δες σχήμα)



Στην εικόνα : Πριν από το σημείο μεγίστου πλάτους η κλίση πίεσης είναι ευνοϊκή (μεγαλύτερες πιέσεις ανάντη). Μετά το σημείο μεγίστου πλάτους η κλίση πίεσης γίνεται δυσμενής (μεγαλύτερες πιέσεις κατόντη). Το οριακό στρώμα αποκολλάται σε κάποιο σημείο, του οποίου η θέση εξαρτάται από την καμπυλότητα του αντικειμένου και από τον αριθμό Reynolds.

Η επίδραση της δυσμενούς κλίσης πίεσης γίνεται κατ' εξοχή αισθητή στα σωματίδια του ρευστού που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, επειδή έχουν μικρότερη ταχύτητα, και κατά συνέπεια μικρότερη αδράνεια. Συνεχής μείωση της ταχύτητας παράλληλα προς την επιφάνεια έχει σαν αποτέλεσμα η τελευταία να γίνει συγκρίσιμη με την συνιστώσα της ταχύτητας κάθετα προς την επιφάνεια. Τότε τα σωματίδια που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια κινούνται ανοδικά προς την εξωτερική ροή. Το φαινόμενο λέγεται αποκόλληση του οριακού στρώματος.

Τα σωματίδια που αποκολλούνται από την επιφάνεια έχουν σημαντική στροβιλότητα την οποία και διατηρούν όταν μπουν στην εξωτερική ροή (λόγω διατήρησης της στροφορμής). Η αποκόλληση του οριακού στρώματος μεταφέρει στροβιλότητα σε περιοχή που η ροή ήταν αστρόβιλη.

Εξίσωση οριακού στρώματος

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} (\overline{-u'v'}) + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \quad (1)$$

Ακριβής πρόβλεψη του σημείου της επιφάνειας όπου θα συμβεί η αποκόλληση είναι εξαιρετικά δυσχερές. Κατ' αρχήν σημειώνουμε ότι η εξίσωση του οριακού στρώματος ισχύει και για καμπυλωμένη επιφάνεια με μικρή καμπυλότητα με την μεταβλητή να συμβολίζει την κατεύθυνση παράλληλη προς την επιφάνεια και y την κατεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια. Κοντά στο σημείο αποκόλλησης όμως η βασική παραδοχή της θεωρίας οριακού στρώματος ότι η ροή μέσα στο οριακό στρώμα είναι σχεδόν παράλληλη προς την επιφάνεια του σώματος παύει να ισχύει οπότε και η σχετική θεωρία παύει να ισχύει. Μπορεί να αποδειχθεί μάλιστα ότι σε σημείο αποκόλλησης η εξίσωση (1) παρουσιάζει ανώμαλο σημείο. Απαιτείται κατά συνέπεια η χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes για να προσδιορισθεί το σημείο αποκόλλησης.

Χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν εφαρμόζοντας την εξίσωση (1) μακριά από το σημείο αποκόλλησης. Παίρνοντας το όριο της εξίσωσης (1) όταν $y \rightarrow 0$ καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\bar{p}}{dx} = \nu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \Big|_{y=0} \quad (1)$$

Συμπεραίνουμε ότι η δεύτερη παράγωγος της μέσης ταχύτητας στο τοίχωμα είναι αρνητική σε περιοχές ευνοϊκής κλίσης πίεσης, ενώ είναι θετική σε περιοχές δυσμενούς κλίσης πίεσης. Μακριά από την επιφάνεια του σώματος η πρώτη παράγωγος της μέσης ταχύτητας τείνει στο μηδέν ότι και να είναι η κλίση πίεσης συνεπώς η δεύτερη παράγωγος της μέσης ταχύτητας είναι αρνητική. Συμπεραίνουμε επομένως ότι σε περιοχές δυσμενούς κλίσης πίεσης η δεύτερη παράγωγος της μέσης ταχύτητας μηδενίζεται κατ' ανάγκη για κάποιο y . Συμπεραίνουμε ότι η ταχύτητα έχει σημείο ανάκαμψης στην περιοχή δυσμενούς κλίσης πίεσης. Η απόσταση του σημείου ανάκαμψης από την επιφάνεια του σώματος είναι συνάρτηση του x . Στο σημείο όπου $d\bar{p}/dx = 0$ το σημείο ανάκαμψης βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια του σώματος. Κατά συνέπεια η ύπαρξη σημείου ανάκαμψης στην ταχύτητα είναι αναγκαία συνθήκη για αποκόλληση (δεν είναι όμως και ικανή, επειδή είναι δυνατόν η ροή κάτω από την επίδραση δυσμενούς κλίσης πίεσης να μην αποκολληθεί).

Γενικά, η αποκόλληση οριακού στρώματος έχει παρατηρηθεί να συμβαίνει σε σημείο όπου η τάση μηδενίζεται στο στερεό όριο. Δηλαδή στο σημείο αποκόλλησης, έχουμε την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$$

(όπου u εν προκειμένω είναι η συνιστώσα της ταχύτητας παράλληλη προς την επιφάνεια, και y η διεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια). Ο μηδενισμός της πρώτης παραγώγου της ταχύτητας στο όριο συνεπάγεται ότι σε μια περιοχή κοντά στον τοίχο η ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού παράλληλα προς το όριο είναι αμελητέα. Τα σωματίδια αυτής της περιοχής αποκολλούνται από το σώμα και εξέρχονται στην κυρίως ροή, ενώ ταυτόχρονα, από διατήρηση της μάζας, μια άλλη μάζα ρευστού κινείται αντίθετα προς την εξωτερική ροή και καταλαμβάνει την θέση τους. Στην περιοχή μετά το σημείο αποκόλλησης παρατηρείται δηλαδή αναστροφή της ροής.

Η αποκόλληση οριακού στρώματος συνοδεύεται από αύξηση της αντίστασης και μείωση της δυναμικής άνωσης. Η αποκόλληση είναι κατά συνέπεια ανεπιθύμητο φαινόμενο. Ο σχεδιασμός πλοίων, υποβρυχίων, αεροπλάνων κλπ γίνεται με σκοπό να αποφευχθεί η αποκόλληση του οριακού τους στρώματος. Σώματα στα οποία το οριακό στρώμα δεν αποκολλάται πριν από το άκρο εκφυγής λέγονται υδροδυναμικά (η αεροδυναμικά). Γενικός κανόνας σχεδιασμού για να γίνει ένα σώμα υδροδυναμικό είναι ότι στο άκρο πρόσπτωσης το σχήμα του σώματος πρέπει να είναι στρογγυλεμένο, ώστε αρχικά το οριακό στρώμα να δέχεται ισχυρή ευνοϊκή κλίση πίεσης, ενώ στο άκρο εκφυγής το σχήμα πρέπει να είναι αιχμηρό, ώστε το οριακό στρώμα να εγκαταλείπει το σώμα στο πίσω άκρο. Κλασικό παράδειγμα τέτοιου σχεδιασμού είναι οι υδροτομές. (Ο κανόνας αυτός παρατηρείται και στο σχήμα των ψαριών, ιδιαίτερα των μεγαλύτερων που έχουν και μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds).

Αποκόλληση οριακού στρώματος μπορεί να προκληθεί και από άλλους παράγοντες εκτός από την καμπυλότητα της επιφάνειας όπως γωνίες που σχηματίζει η επιφάνεια, οι διάφορες μικροπροεξοχές της επιφάνειας, που μπορούν να προκαλέσουν αποκόλληση ακόμα και σε μια κατά τ' άλλα τελείως επίπεδη επιφάνεια. Γι' αυτό επιβάλλεται οποιεσδήποτε μικροπροεξοχές έχει η επιφάνεια να είναι πλήρως βυθισμένες στο οριακό υπόστρωμα.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Παραδοσιακές μέθοδοι για την ανάπτυξη της ρευστομηχανικής είναι οι πειραματικές, οι αναλυτικές και οι αναλυτικές προσεγγιστικές μέθοδοι. Οι πειραματικές μέθοδοι υπήρχαν από την αρχαιότητα (Αρχιμήδης), ενώ οι αναλυτικές προσεγγιστικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν κατά κύριο λόγο τον 19^ο αιώνα μέχρι και τη σύγχρονη εποχή. Οι προσεγγιστικές μέθοδοι βρήκαν μεγάλη ανάπτυξη ως μέθοδοι διαταραχών μεταξύ 1950-1970. Η σημερινή ανάπτυξη της μηχανικής των ρευστών οφείλεται κατά μεγάλο μέρος στην τελειοποίηση των μετρητικών τεχνικών οφειλόμενη στην ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και της πληροφορικής αλλά συγχρόνως και στην ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων και της τεχνολογίας των υπολογιστών και του προγραμματισμού τους. Η ανάπτυξη της μηχανικής των ρευστών ωθήθηκε από την ανάπτυξη της αεροδυναμικής με την εξέλιξη του αεροπλάνου και της πυραυλικής.

Η Υπολογιστική Ρευστοδυναμική είναι η επιστήμη της πρόβλεψης της ροής των ρευστών, της μετάδοσης θερμότητας & μάζας, των χημικών αντιδράσεων και άλλων σχετικών φαινομένων μέσω της επίλυσης των μαθηματικών εξισώσεων που διέπουν τις διεργασίες χρησιμοποιώντας μία αριθμητική μέθοδο (δηλ. σε H/Y).

Τα πρώτα επιτεύγματα της αριθμητικής ρευστομηχανικής αναφέρονται σποραδικά πριν από τον 2^ο παγκόσμιο πόλεμο, η δε πρώτη αριθμητική επίλυση για τη συνεκτική ροή χαμηλών ταχυτήτων γύρω από κυκλικό κύλινδρο αποδίδεται στον A. Thom (1933). Η μεγάλη ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων έγινε μετά τη λήξη του 2ου παγκοσμίου πολέμου με την εμφάνιση των H/Y , που θα λέγαμε έδωσε σάρκα και οστά σ' αυτό που σήμερα ονομάζεται υπολογιστική ρευστομηχανική (CFD

Computational Fluid Mechanics). Η μεγάλη ανάπτυξη της υπολογιστικής ρευστομηχανικής έγινε το 1970-1979 και οφείλεται στην ανάπτυξη των αλγορίθμων για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes για τις τότε ανάγκες, που οφείλονται στην αύξηση της ταχύτητας των επιβατικών αεροσκαφών σε διηχητικές ταχύτητες ($M=0.8\div 0.9$). Η δεκαετία αυτή χαρακτηρίζεται από την ταχεία εξέλιξη των μεθοδολογιών για την επίλυση των βασικών εξισώσεων του μη συνεκτικού ρευστού (Εξισώσεις Euler). Η τελευταία δεκαετία 1980-1989 χαρακτηρίζεται από μία προοδευτικά ταχεία εξέλιξη των μεθοδολογιών για την επίλυση εξισώσεων του συμπιεστού συνεκτικού ρευστού (εξισώσεις Navier-Stokes), που όμως είχε αρχίσει ήδη από την προηγούμενη δεκαετία 1970-1979. Προηγήθηκε η ανάλυση σε δισδιάστατες μορφές πτερυγίων, αργότερα σε τρισδιάστατες απλές μορφές (πτέρυγες, άτρακτοι), μετά συνθετότερες μορφές (συνδυασμός ατράκτου-πτέρυγας) και τελευταία σε μορφές πλήρους αεροσκάφους. Παράλληλα υπήρξε ανάπτυξη και εφαρμογή για ασυμπίεστες ροές και εφαρμογές για εσωτερικές ροές (στροβιλομηχανές) και για μηχανές εσωτερικής καύσης (με ή χωρίς φαινόμενα καύσης).

Τα πλεονεκτήματα των υπολογιστικών μεθόδων είναι ότι εν γένει δεν θέτουν μεγάλους περιορισμούς και όρια, εφαρμόζονται σε σύνθετες γεωμετρίες, δίνουν πληροφορίες σε όλο το χώρο και όχι σε μεμονωμένα σημεία, επιτρέπουν την εύκολη ανάλυση σεναρίων και την παραμετρική ανάλυση και τέλος, είναι οικονομικότερες και γρηγορότερες των πειραματικών.

Εν γένει σήμερα η υπολογιστική ρευστομηχανική (συμπεριλαμβανομένης και της υπολογιστικής αεροδυναμικής) έχει εφαρμογή στις ακόλουθες κατηγορίες προβλημάτων:

- Ανάλυση σύνθετων προβλημάτων ρευστομηχανικής -αεροδυναμικής
- Φυσική των ρευστών
- Συμπληρώνει πειράματα ή επεξεργάζεται μεγάλο αριθμό δεδομένων

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας CFD είναι αμέτρητες. Ακολουθούν ορισμένα παραδείγματα :

- Ροή ρευστού και μετάδοση θερμότητας σε βιομηχανικές διεργασίες (λέβητες, εναλλάκτες, συσκευές καύσης, αντλίες, ανεμιστήρες, σωληνώσεις, κ.λπ.)
- Αεροδυναμική οχημάτων εδάφους, αεροσκαφών, πυραύλων
- Επένδυση φιλμ, θερμο-διαμόρφωση σε εφαρμογές επεξεργασίας υλικών
- Ροή ρευστού και μετάδοση θερμότητας σε συστήματα πρόωσης και παραγωγής ενέργειας
- Αερισμός, θέρμανση και ψύξη σε κτίρια
- Χημική επικάθιση ατμών (CVD) για παραγωγή ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων
- Μετάδοση θερμότητας για ψύξη ηλεκτρονικών συστημάτων

Τα αποτελέσματα μίας ανάλυσης CFD είναι χρήσιμα δεδομένα για έναν μηχανικό ώστε να τα χρησιμοποιήσει:

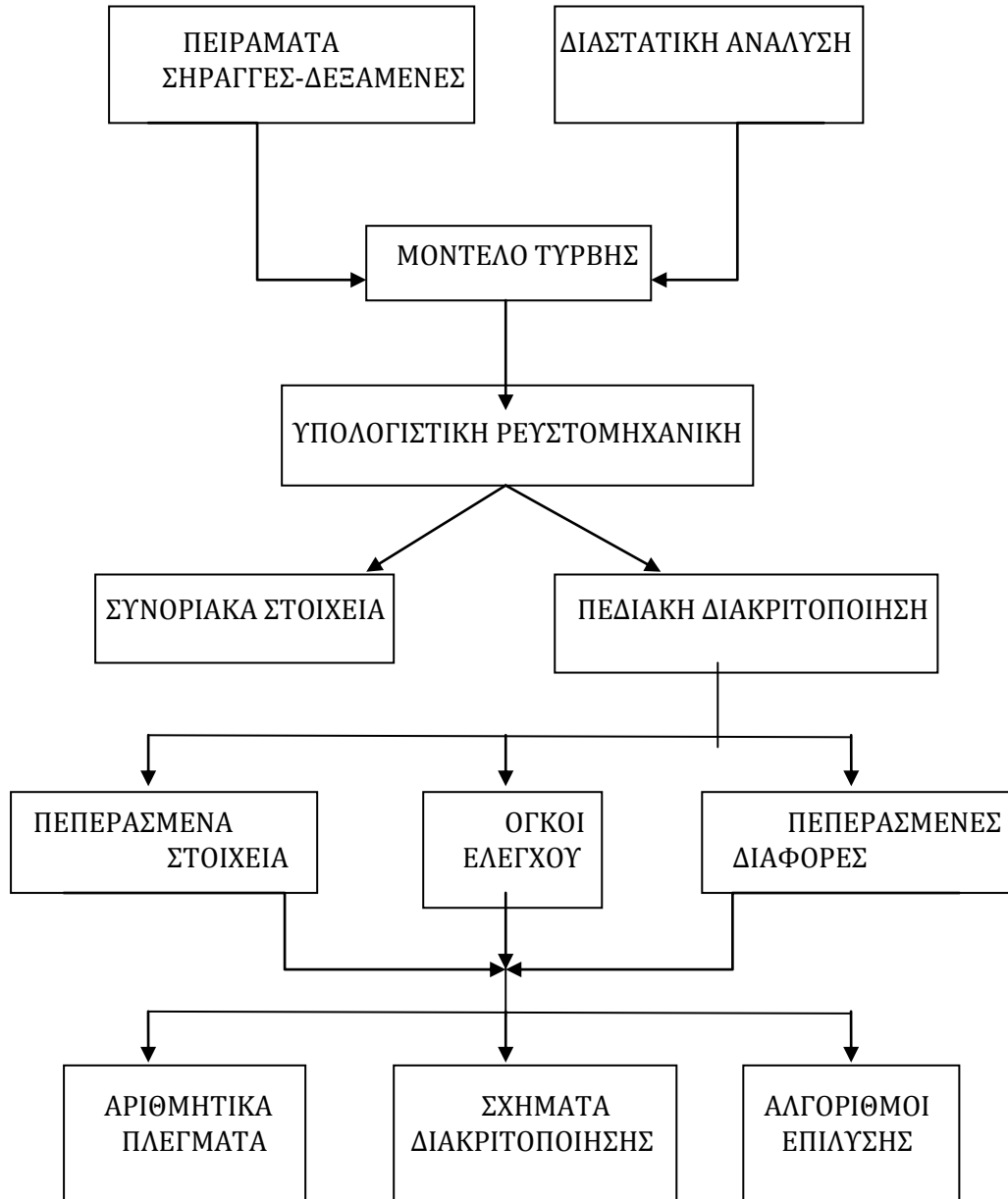
- Στην αρχική μελέτη νέων σχεδίων (conceptual design)
- Στη λεπτομερή ανάπτυξη προϊόντων (detailed development)
- Στην ανίχνευση προβλημάτων (troubleshooting)
- Στον ανασχεδιασμό – βελτιστοποίηση (redesign-optimization)

Πιο συγκεκριμένα για την υπολογιστική υδροδυναμική, η αδυναμία πρόλεξης των ροϊκών φαινομένων που χαρακτηρίζουν τα προβλήματα της ναυτικής

υδροδυναμικής ουσιαστικά επέβαλε την ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων για την, αφ' ενός καλύτερη κατανόησή τους και αφ' ετέρου για την κατά το δυνατό ακριβέστερη εκτίμηση ορισμένων βασικών μεγεθών. Σε αντίθεση με τις περισσότερες αεροδυναμικές ροές των ασυμπίεστων ρευστών που μπορούν να μελετηθούν πειραματικά, τα προβλήματα που αφορούν την υδροδυναμική του πλοίου, χαρακτηρίζονται από αδιάστατους αριθμούς Reynolds και Froude που δεν μπορούν να προσομοιωθούν σε πειραματικές δεξαμενές. Η αδυναμία αυτή, που αναφέρεται ως επίδραση της κλίμακας (scale effect) εισάγει ένα σοβαρό πρόβλημα αβεβαιότητας στην προεκτίμηση των μεγεθών της φυσικής (ή πραγματικής) κλίμακας από μετρήσεις που γίνονται σε πρότυπα. Για παράδειγμα, οι συνήθεις αριθμοί Reynolds για πρότυπα πλοίων είναι της τάξεως του 10^6 έως 10^7 ενώ στα πραγματικά πλοία είναι της τάξεως του 10^9 . Επομένως, οι αδιάστατοι συντελεστές αντίστασης που μετρώνται πρέπει να τροποποιηθούν με κάποιο τρόπο ώστε να συμπεριλάβουν την επίδραση αυτής της διαφοράς των αριθμών Reynolds. Μέχρι σήμερα εφαρμόζονται οι παραδοσιακές μέθοδοι του Froude ή των συντελεστών μορφής, που βασίζονται σε καθαρά εμπειρικές υποθέσεις. Από την άλλη πλευρά, η ταχύτατη ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει επιτρέψει στην εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων, τα αποτελέσματα των οποίων είναι πολύ ενθαρρυντικά για τη θεωρητική πρόβλεψη των συντελεστών αντιστάσεων (και προώσεως), και δικαιολογημένα, θεωρείται ως ο εναλλακτικός τρόπος αντιμετώπισης των βασικών υδροδυναμικών προβλημάτων.

Οι βασικές εξισώσεις μεταφοράς που διέπουν τα υδροδυναμικά προβλήματα είναι οι εξισώσεις Navies-Stokes (N-S) και φυσικά η εξίσωση της συνέχειας. Η αριθμητική επίλυση των εξισώσεων συνιστά ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα της υπολογιστικής ρευστομηχανικής.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται σχηματικά οι μέθοδοι ανάλυσης και υπολογισμού των ροών σύμφωνα με τις μεθόδους που ακολουθεί η υπολογιστική ρευστομηχανική (Computational Fluid Dynamics -CFD). Τα πειράματα σε συνδυασμό με τη θεωρία διαστατικής ανάλυσης αποτελούν δεδομένα που υπό τη μορφή μοντέλων τύρβης, χρησιμοποιούνται από τις μεθόδους CFD. Οι μέθοδοι επίλυσης διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις μεθόδους συνοριακών στοιχείων (BEM) και τις μεθόδους πεδιακής διακριτοποίησης (Field Methods) οι οποίες χρησιμοποιούνται για προβλήματα ροών πραγματικών (συνεκτικών, viscous) ρευστών.



Οι πιο δημοφιλείς αριθμητικές μέθοδοι που ακολουθούνται για την επίλυση των πεδιακών εξισώσεων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Methods -FEM) , των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method -FDM) και των όγκων ελέγχου (Finite Volume Method - FVM) που είναι βασικά μεθοδολογία πεπερασμένων διαφορών. Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων απαιτεί τη χρησιμοποίηση αριθμητικών πλεγμάτων (numerical grids-meshes) για την παραγωγή των οποίων έχουν επίσης αναπτυχθεί πολλές και διαφορετικές μεθοδολογίες.

Συναφής με την αριθμητική ανάλυση ενός προβλήματος, που διατυπώνεται αρχικά από τις διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς, είναι και ο βαθμός προσέγγισης του αριθμητικού μοντέλου (σχήμα διακριτοποίησης). Τέλος, ο τρόπος επίλυσης των αριθμητικών εξισώσεων που αντιστοιχεί πάντοτε σε μία επαναληπτική διαδικασία (καθώς τα προβλήματα είναι μη γραμμικά) ποικίλει ανάλογα με τη μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης που ακολουθείται. Στα προβλήματα της υδροδυναμικής έχουν επικρατήσει οι μέθοδοι που βασίζονται στην ολοκλήρωση και διακριτοποίηση σε όγκους ελέγχου (FVM).

ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLUENT-Ο ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ GAMBIT

Το Fluent είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα για τη μοντελοποίηση ροών και μεταφοράς θερμότητας σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Ο προ- επεξεργαστής Gambit είναι ένας ολοκληρωμένος προ-επεξεργαστής για ανάλυση CFD για τη δημιουργία γεωμετρίας, την κατασκευή πλέγματος, την εξέταση της ποιότητάς του και τον ορισμό των οριακών συνθηκών.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ FLUENT

Το Fluent βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Το πεδίο χωρίζεται σε πεπερασμένο αριθμό όγκων ελέγχου (υπολογιστικό πλέγμα) και η γενική εξίσωση μεταφοράς (διατήρησης) για τη μάζα, ορμή, ενέργεια κτλ διακριτοποιείται πάνω στο πλέγμα και παίρνει τη μορφή συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων. Όλες αυτές οι εξισώσεις επιλύονται για την εύρεση λύσης.

Γενική εξίσωση μεταφοράς:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{μη μόνιμος}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi V dA}_{\text{συναγωγή}} = \underbrace{\oint_A \Gamma \nabla \phi dA}_{\text{διάχυση}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{παραγωγή}} \Rightarrow$$

Η διαδικασία προσομοίωσης στο Fluent αρχίζει ρυθμίζοντας τις παραμέτρους επίλυσης. Επιλέγεται ο επιλύτης (pressure- density based, coupled-segregated (implicit), steady-unsteady) και τα σχήματα διακριτοποίησης, επιτυγχάνεται μία αρχική λύση και στη συνέχεια παρακολουθείται η σύγκλιση και η ευστάθειά της, ρυθμίζοντας την υπο-χαλάρωση. Τέλος ελέγχεται η ακρίβεια.

Οι βασικές εξισώσεις ροής που επιλύει το Fluent είναι αυτές της διατήρησης μάζας και ορμής.

Εξίσωση διατήρησης μάζας :

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

Ο όρος S_m εκφράζει τις σημειακές πηγές ή καταβόθρες μάζας που μπορεί να υπάρχουν σε διάφορα σημεία του πεδίου.

Εξίσωση διατήρησης της ορμής

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

Η διατύπωση αυτή για την εξίσωση διατήρησης της ορμής ισχύει για ένα αδρανειακό (μη επιταχυνόμενο) σύστημα αναφοράς. Το μέγεθος p είναι η στατική πίεση ενώ $\bar{\tau}$ είναι ο τανυστής των τάσεων και $\rho\vec{g}$ και \vec{F} είναι η βαρυτική και οι εξωτερικές δυνάμεις αντίστοιχα.

ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΤΗΣ CFD ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Καθορισμός προβλήματος και προεπεξεργασία

- Καθορισμός στόχων μοντελοποίησης
- Καθορισμός πεδίου που θα επιλυθεί (χώρος και χρόνος)
- Σχεδιασμός και κατασκευή υπολογιστικού πλέγματος

Εκτέλεση των Υπολογισμών

- Δημιουργία ενός αριθμητικού, μαθηματικού μοντέλου
- Επίλυση και παρακολούθηση της λύσης

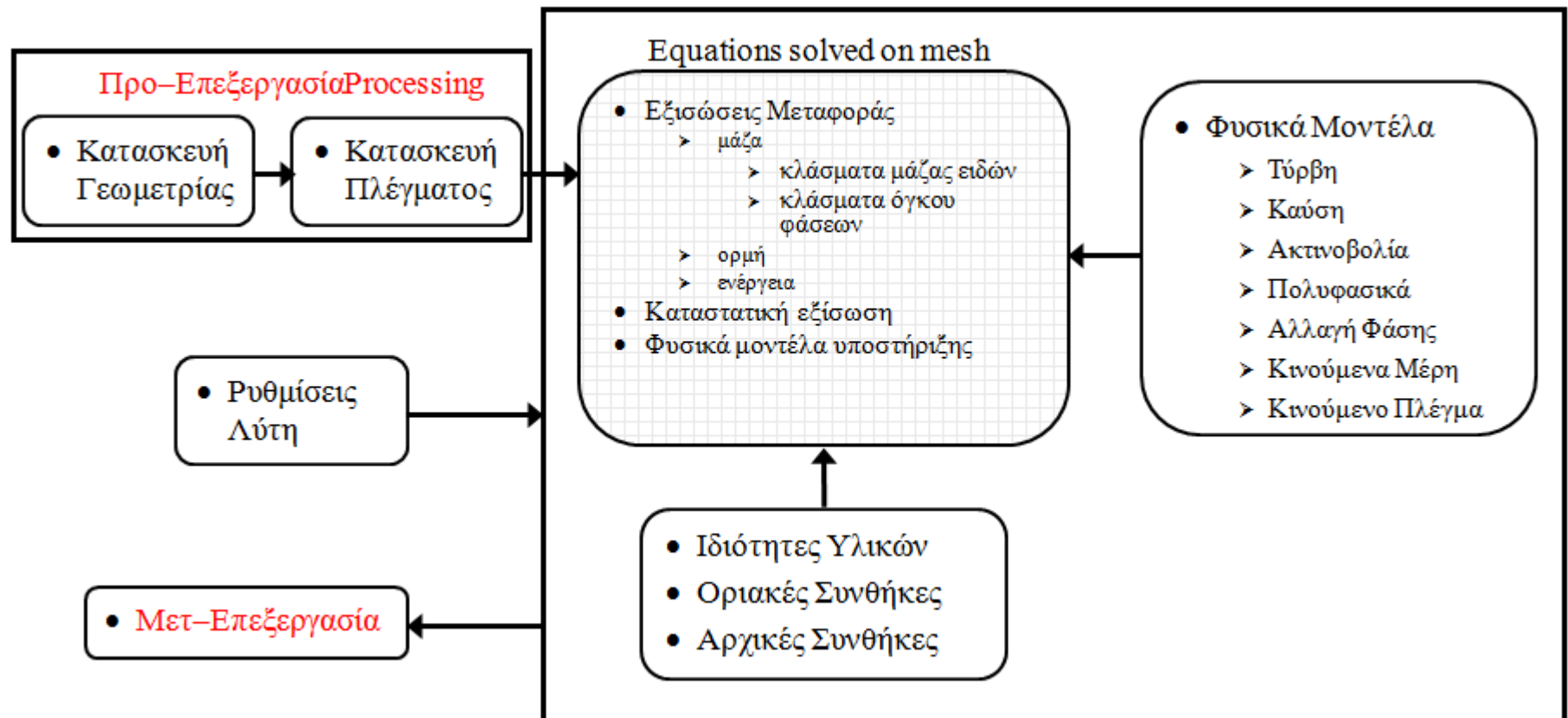
Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

- Έλεγχος των αποτελεσμάτων
- Θεώρηση μετατροπών στο μοντέλο

Παρακάτω εμφανίζεται σε σχηματική αναπαράσταση της επισκόπησης για τη CFD διαδικασία.

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ CFD ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Λύτης



ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΡΒΗΣ SST-K OMEGA

Στην παρούσα εργασία έχοντας δημιουργήσει τα υπολογιστικά πλέγματα που αναλύονται παρακάτω, τόσο για την δισδιάστατη όσο και για την τρισδιάστατη μελέτη, το επόμενο βήμα πριν ξεκινήσει η επίλυση της ροής είναι να γίνει επιλογή του μοντέλου τύρβης που θα χρησιμοποιηθεί. Από την πηγή [90] καταλληλότερο μοντέλο είναι το μοντέλο τύρβης k- ω SST (Shear stress transport), το οποίο είναι ένα μοντέλο δύο εξισώσεων, ενός κλασικού k- ω κοντά στα στερεά τοιχώματα και του k- ϵ στην ελεύθερη ροή. Έχει παρατηρηθεί ότι το μοντέλο αυτό είναι πολύ ευαίσθητο στις συνθήκες τύρβης που καθορίζονται στην είσοδο και έχει καλή συμπεριφορά σε αποκολλημένες ροές.

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΥΡΒΗΣ SST-K OMEGA

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι εξισώσεις του μοντέλου τύρβης δύο εξισώσεων SST (Shear-Stress transport) k- ω , που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική επίλυση της ροής από το λογισμικό πακέτο FLUENT. Το συγκεκριμένο μοντέλο τύρβης είναι συνδυασμός δύο διαφορετικών μοντέλων τύρβης.

- του k- ω για την εσωτερική περιοχή του οριακού στρώματος
- και του k- ϵ για οπουδήποτε αλλού.

Το k είναι η τυρβώδης κινητική (Kinetic Energy) ενέργεια ενώ το ω είναι ο ρυθμός διάχυσης της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (turbulent frequency).

Οι εξισώσεις του μοντέλου είναι οι παρακάτω :

$$1. \frac{Dk}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta * \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k * v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$2. \frac{D\omega}{Dt} = \frac{\gamma}{v_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta * \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_\omega * v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

Οι σταθερές του μοντέλου υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2$$

όπου η ποσότητα φ_1 αντιστοιχεί στην εκάστοτε σταθερά του k- ω και η ποσότητα φ_2 στις αντίστοιχες του k- ϵ

Επίσης ισχύουν και τα παρακάτω για τις σταθερές για το k- ω :

$$\sigma_{k1}=0.85$$

$$\sigma_{\omega 1}=0.0750$$

$$\alpha_1=0.31$$

$$\beta^*=0.09$$

$$\kappa=0.41$$

$$\gamma_1=\beta_1/\beta^*-\sigma_{\omega 1}\kappa^2/\beta^*$$

Για την τυρβώδη συνεκτικότητα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)}$$

όπου $F_2 = \tanh(\text{arg}_2^2)$ και $\text{arg}_2^2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega}\right)$

Ενώ για το k-ε ισχύουν τα παρακάτω:

$$\sigma_{k2} = 1.0$$

$$\sigma_{\omega 2} = 0.0828$$

$$\beta^* = 0.09$$

$$\kappa = 0.41$$

$$\gamma_2 = \beta_2 / \beta^* - \sigma_{\omega 2} \kappa^2 / \sqrt{\beta^*}$$

όπου $F_1 = \tan(\text{arg}_1^4)$ και $\text{arg}_1 = \min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega}\right); \frac{4 \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2}\right)$

όπου y είναι η απόσταση από την επόμενη επιφάνεια και το CD ισούται με:

$$CD_{k\omega} = \max\left(2 \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20}\right)$$

και τέλος η τυρβώδης συνεκτικότητα:

$$v_t = \frac{k}{\omega}$$

Επίσης ισχύει:

$$\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \approx \frac{1}{2} v_t \left| \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right|^2$$

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για την υδροδυναμική μελέτη των υδροπτερών ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Αρχικά γίνεται ο σχεδιασμός της γεωμετρίας στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros. Στη συνέχεια, η γεωμετρία αυτή εισάγεται στον προ-επεξεργαστή Gambit, όπου σχεδιάζεται η γεωμετρία του πεδίου και δημιουργείται το δισδιάστατο (ή τρισδιάστατο) πλέγμα. Ακολούθως γίνεται η εισαγωγή του πλέγματος στον επιλυτή FLUENT. Εκεί θα γίνει ο προσδιορισμός των φυσικών μοντέλων, οι οριακές συνθήκες, οι ιδιότητες των υλικών, η επίλυση του πεδίου ροής και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΙΘΑΝΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΥΔΡΟΠΤΕΡΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται κάποιες πιθανές γεωμετρίες υδροπτέρων, που έχουν δημιουργηθεί αλλάζοντας κάποιες διαστάσεις (ή κρατώντας σταθερά κάποια άλλα χαρακτηριστικά τους), από τις ήδη υπάρχοντες γεωμετρίες των Seaglider (μήκος 1.80m), G35 (μήκος 1.80m) και H62 (μήκος 1.80m). Τα σχήματα που προκύπτουν είναι εκ περιστροφής συμμετρικά, όπως και τα αρχικά.

Έτσι λοιπόν, δημιουργήθηκαν και αναλύονται οι εξής νέες γεωμετρίες :

- **ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 1:** Το seaglider 2m, το οποίο προέκυψε από την αναλογική αύξηση των διαστάσεων του seaglider 1.80m έως ότου το μήκος του να είναι 2m. Δηλαδή, αυξήθηκαν όλες οι διαστάσεις του seaglider κατά 11.11% (περίπου).
- **ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 2:** Το H62 το οποίο έχει μήκος 1.80m
- **ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 3:** Το H62 2m το οποίο προέκυψε από την αναλογική αύξηση των διαστάσεων του H62 (1.80m) έως ότου το μήκος του να είναι 2m.
- **ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 4:** Το H62 το οποίο έχει ίδιο όγκο με το seaglider μήκους 1.80m, προκύπτοντας με αναλογική αύξηση των διαστάσεών του.
- **ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 5:** Το H62 το οποίο έχει ίδιο όγκο με το seaglider μήκους 2m, προκύπτοντας με αναλογική αύξηση των διαστάσεών του.
- **ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 6:** Το G35 το οποίο έχει μήκος 1.80m
- **ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 7:** Το G35 2m, το οποίο προέκυψε από την αναλογική αύξηση των διαστάσεων του G35 (1.80m) έως ότου το μήκος του να είναι 2m
- **ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 8:** Το G35 το οποίο έχει ίδιο όγκο με το seaglider , προκύπτοντας με αναλογική αύξηση των διαστάσεών του.
- **ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 9:** Το G35 το οποίο έχει ίδιο όγκο με το seaglider μήκους 2m, προκύπτοντας με αναλογική αύξηση των διαστάσεών του.

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται η δισδιάστατη υδροδυναμική μελέτη των νέων γεωμετριών που σχηματίστηκαν και αναλύονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Αρχικά δίνονται τα αποτελέσματα για κάθε μία γεωμετρία. Η μελέτη γίνεται σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης. Ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές των δυνάμεων και των αδιάστατων τιμών τους, διαγράμματα με τις επιλεγμένες γεωμετρίες και τέλος διαγράμματα σύγκρισης των συντελεστή πίεσης (pressure coefficient) και συντελεστή τριβής (skin friction coefficient) για τέσσερις ομάδες γεωμετριών, μία ομάδα που εμπεριέχει τις γεωμετρίες με μήκος 1.80m (seaglider 1.80m, G35 με μήκος 1.80m και H62 με μήκος 1.80m), η άλλη ομάδα που εμπεριέχει τις γεωμετρίες με μήκος 2m (αντίστοιχα όπως στην προηγούμενη ομάδα), μία που αναφέρεται στις γεωμετρίες που έχουν τον ίδιο όγκο με το Seaglider (1.80m) και τέλος μία που έχουν τον ίδιο όγκο με το Seaglider των 2m.

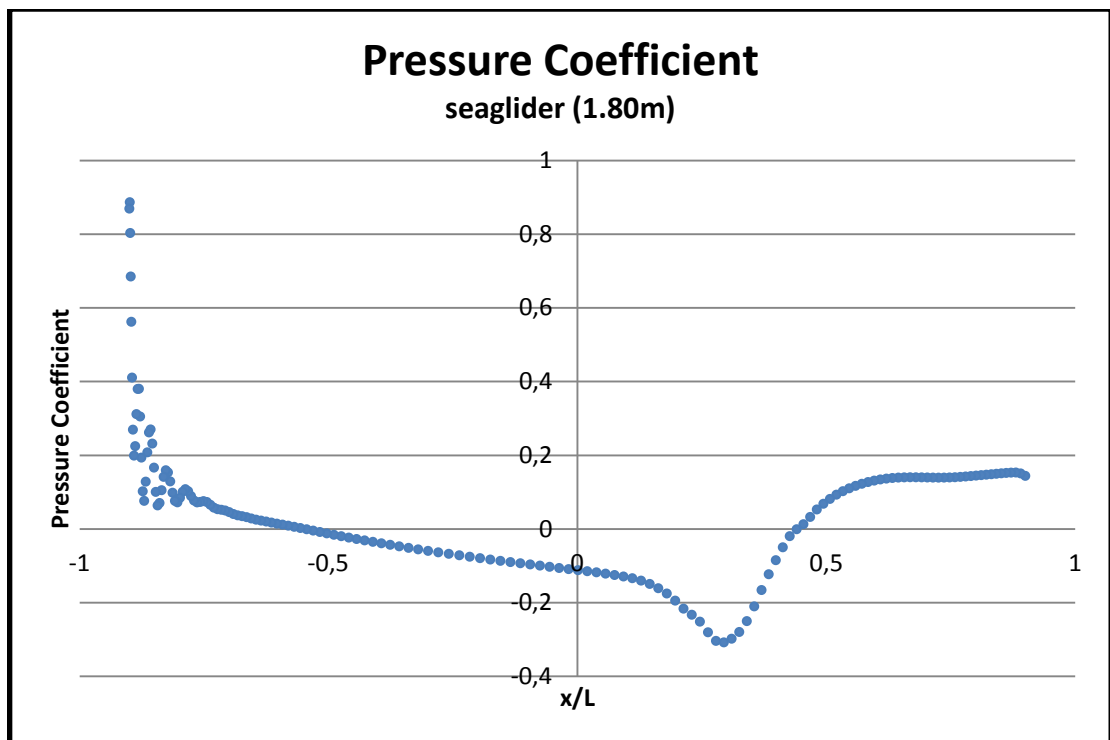
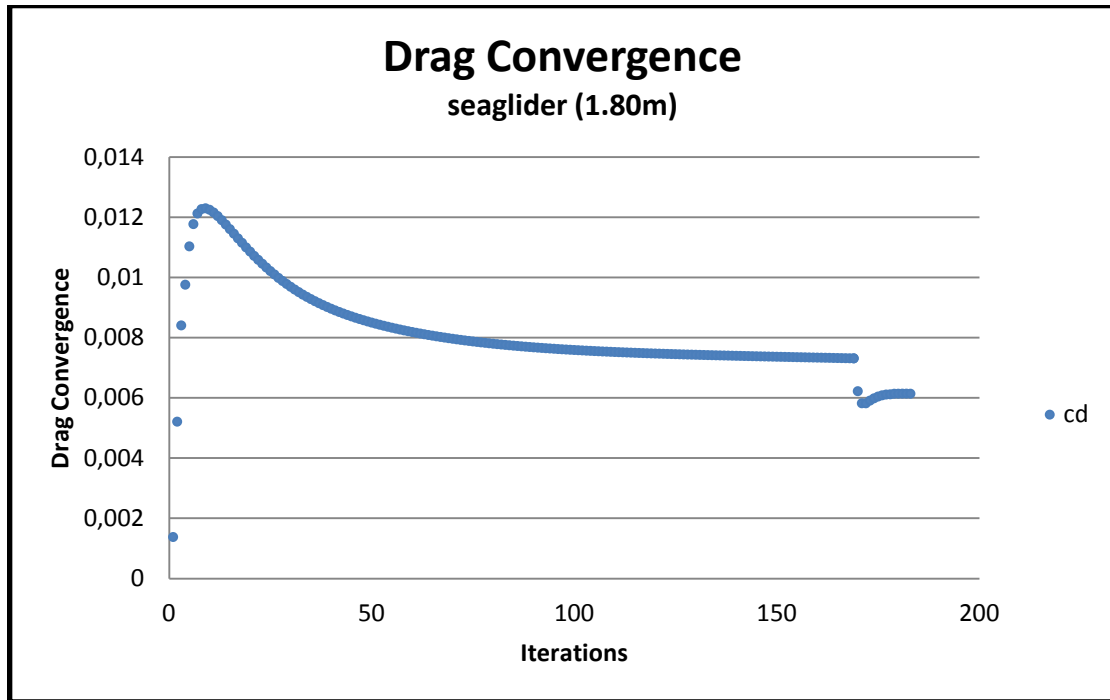
ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ 2D ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

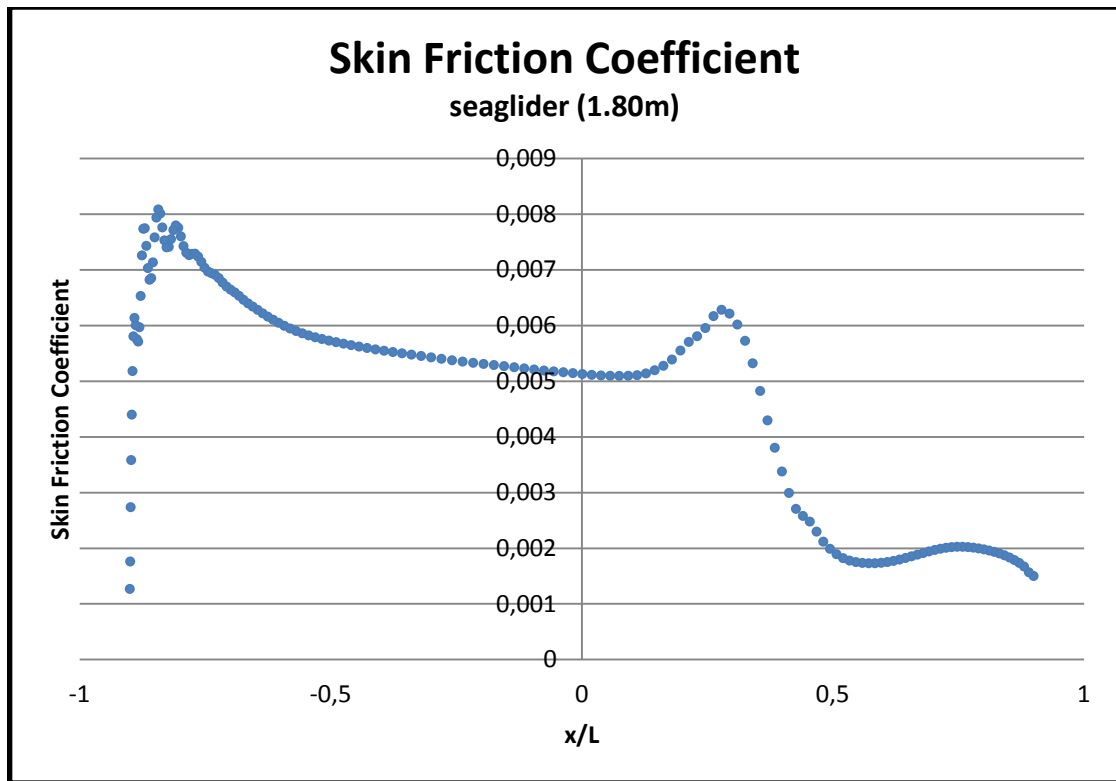
Για να επιτευχθεί μοντελοποίηση του πεδίου ροής γύρω από την γεωμετρία της γάστρας των υδροπτέρων που εξετάζονται απαιτείται η δημιουργία ενός πλέγματος για κάθε γεωμετρία. Το πλέγμα αυτό πρέπει να έχει κάποια χαρακτηριστικά έτσι ώστε να οδηγήσει σε σωστή μοντελοποίηση του πεδίου ροής. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι:

- Το μέγεθος του πλέγματος: Πρέπει να υπάρχει ικανοποιητική απόσταση των ορίων του πλέγματος από τη γεωμετρία έτσι ώστε να μην χάνονται φαινόμενα ροής. Η απόσταση πρέπει να είναι τέτοια που στα όρια του πλέγματος να επικρατούν συνθήκες αδιατάρακτης ροής.
- Η πυκνότητα του πλέγματος: Το πλέγμα πρέπει να είναι ιδιαίτερα πυκνό κοντά στην γεωμετρία όπου συμβαίνουν έντονα ροϊκά φαινόμενα. Αντίθετα, κοντά στα όρια του υπολογιστικού χώρου δεν υπάρχουν μεγάλες μεταβολές έτσι δεν απαιτείται τόσο μεγάλη πύκνωση, απλά θα σπαταλάει χωρίς νόημα υπολογιστικό χρόνο. Ακολουθώς επιλέγεται ο κατάλληλος αριθμός σημείων του πλέγματος ο οποίος με διάφορες εντολές (όπως για παράδειγμα η πύκνωση της κατανομής των σημείων στην αρχή και στο τέλος της κάθε πλευράς) πυκνώνει προς την γεωμετρία και αραιώνει στα όρια του πλέγματος.
- Δυνατότητα υποδιαίρεσης πλέγματος: Η δυνατότητα υποδιαίρεσης πλέγματος είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό το οποίο υποβοηθάει πολύ την επίλυσή του. Εάν η επιλογή σημείων είναι ιδανική τότε το πρόγραμμα αυτόματα μπορεί να δημιουργήσει υποδιαίρεσεις αραιότερου πλέγματος. κατά την επίλυση λύνει πρώτα τα αραιότερα πλέγματα. Η λύση που δίδουν αυτά δεν είναι ικανοποιητική καθώς λόγω της μεγάλης αραιότητας χάνουν πάρα πολλά ρευστοδυναμικά φαινόμενα. Η λύση αυτή όμως χρησιμοποιείται ως αρχική λύση για το αμέσως πυκνότερο πλέγμα μειώνοντας αρκετά τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτεί η συνολική επίλυση του προβλήματος. Επιλέγεται η χρήση τέτοιου αριθμού σημείων στις πλευρές του πλέγματος έτσι ώστε να δημιουργούνται δυο υποδιαίρεσεις του κύριου πλέγματος, αρκετά ικανοποιητικός αριθμός.
- Ορθογωνικότητα του πλέγματος: Το πλέγμα πρέπει να είναι κάθετο στην ροή έτσι ώστε να μπορεί να δίδει ποιοτικότερα αποτελέσματα και πολύ πιο σύντομα. Ειδικά κοντά στην γεωμετρία είναι απαραίτητο αλλά και αρκετά δύσκολο να γίνει.
- Μη ύπαρξη αρνητικών κελιών: Η δημιουργία καθετότητας συνήθως δημιουργεί ένα άλλο πρόβλημα, την ύπαρξη αρνητικών κελιών, κελιών που αλληλοκαλύπτονται, στο πίσω μέρος της γεωμετρίας. Τα κελιά αυτά εξομαλύνονται ώστε να μην υπάρχουν αρνητικά κελιά.
- Οριακές συνθήκες πλέγματος: Οι οριακές συνθήκες του πλέγματος πρέπει να αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες που αντιμετωπίζει η πραγματική ροή στον υπολογιστικό χώρο. Εν προκειμένω, όσες από τις πλευρές του πλέγματος συμπίπτουν με την γεωμετρία έχουν οριακές συνθήκες "τοιχού" .

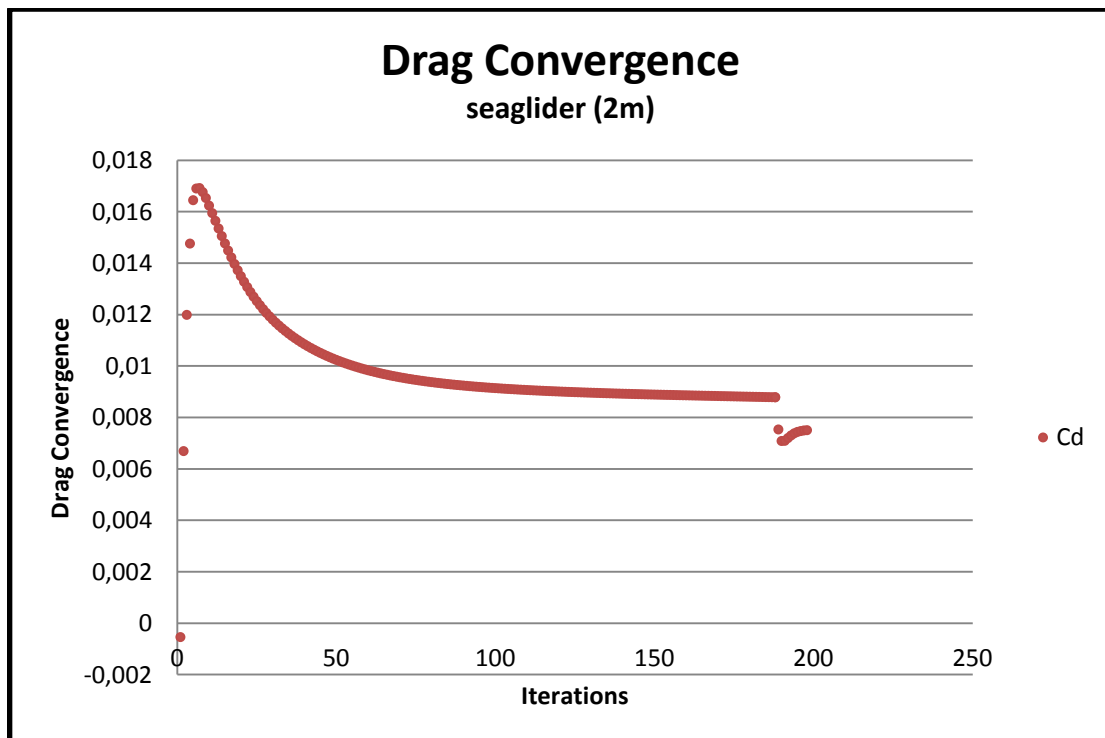
ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ (2D)

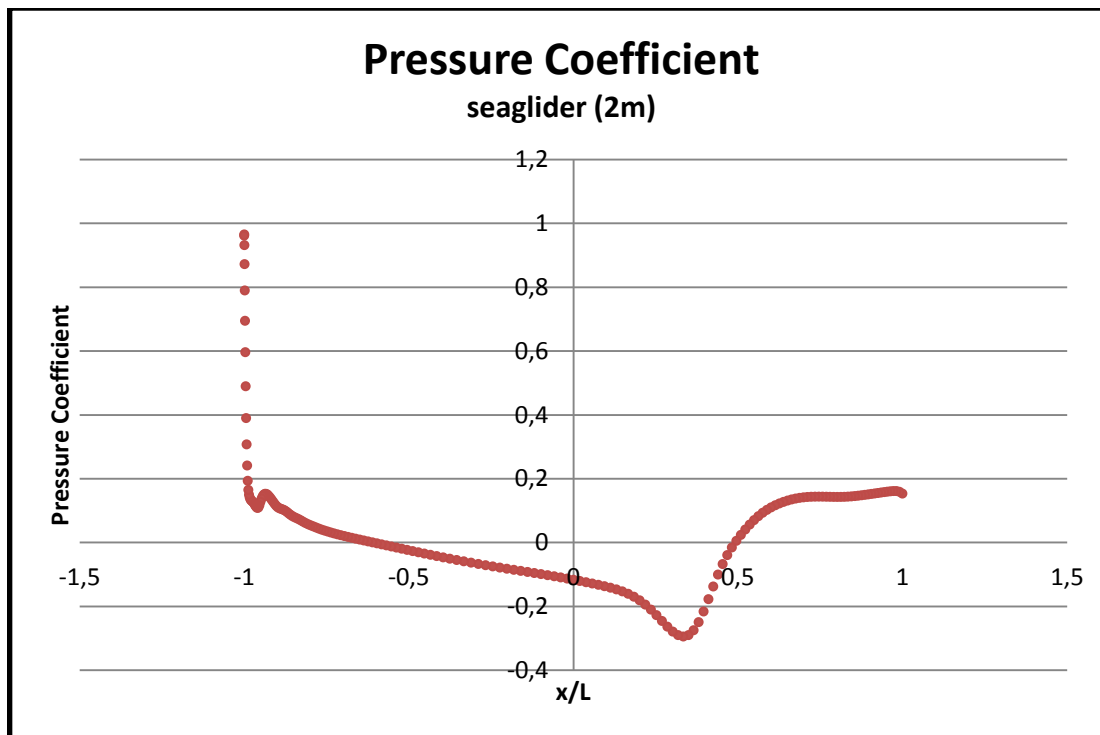
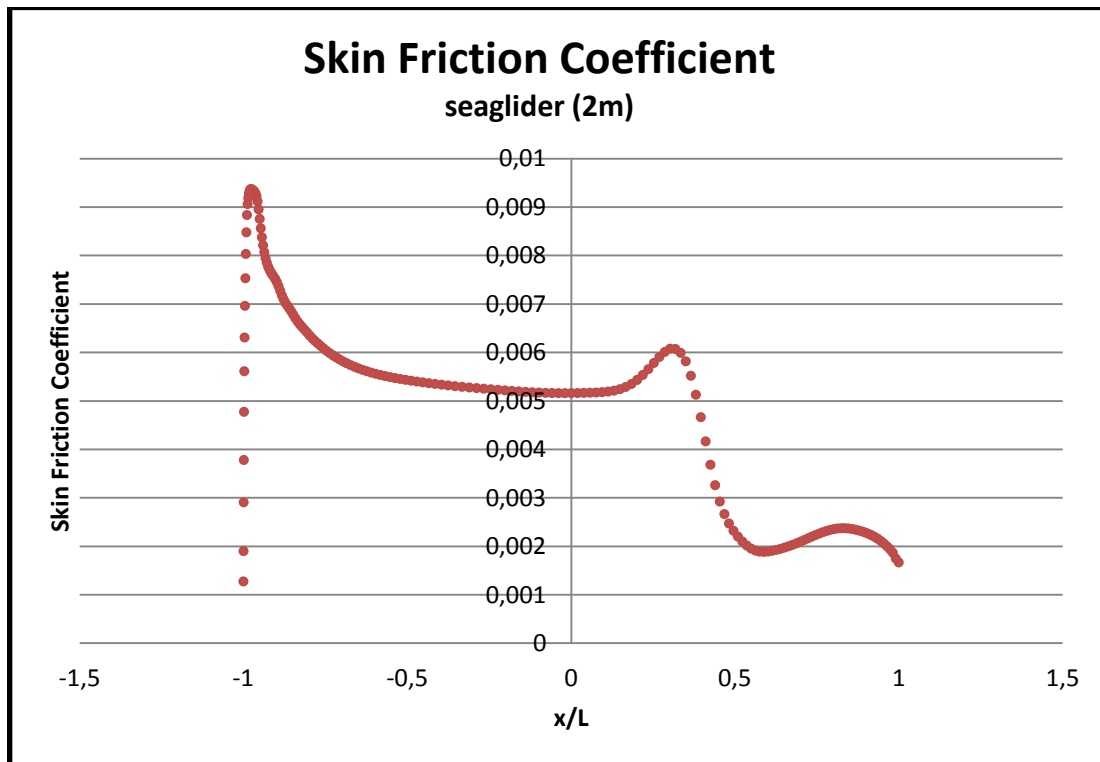
Ακολουθούν τα διαγράμματα της σύγκλισης της αντίστασης, του συντελεστή πίεσης (Pressure Coefficient) και του συντελεστή τριβής (skin friction coefficient) καθώς και ενδεικτικές εικόνες από το δισδιάστατο πλέγμα κάθε γεωμετρίας που μελετήθηκε.

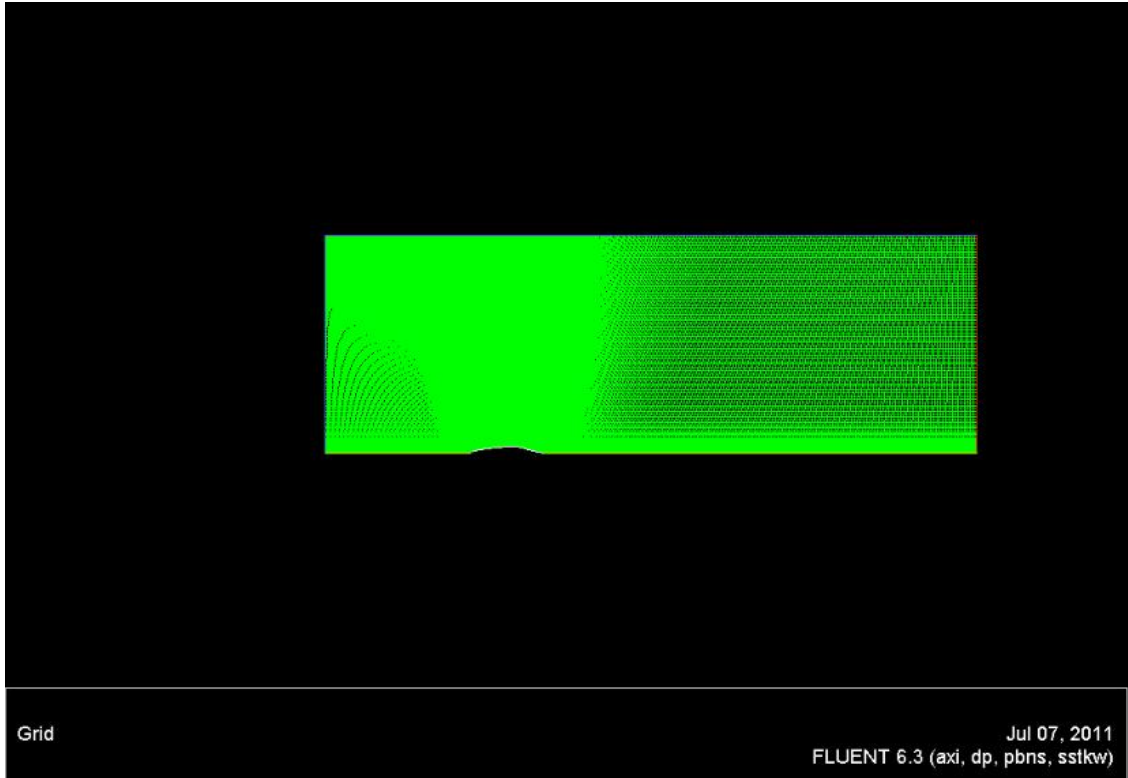




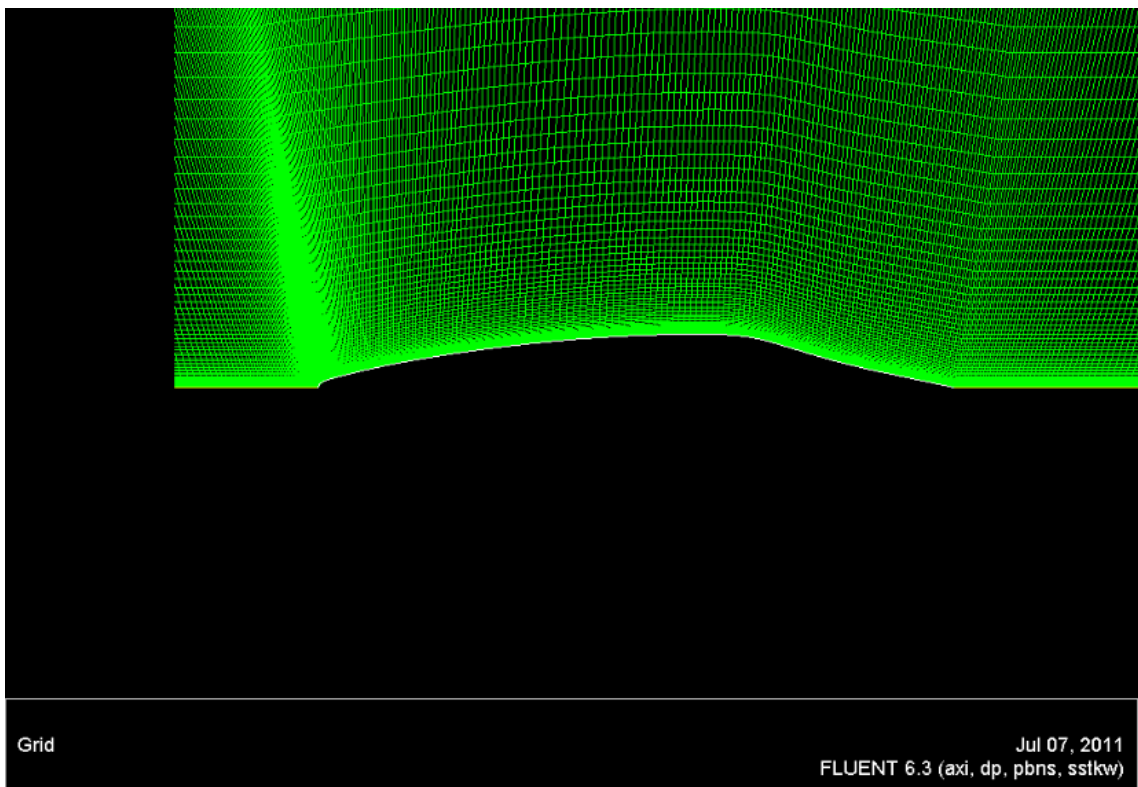
ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ 1



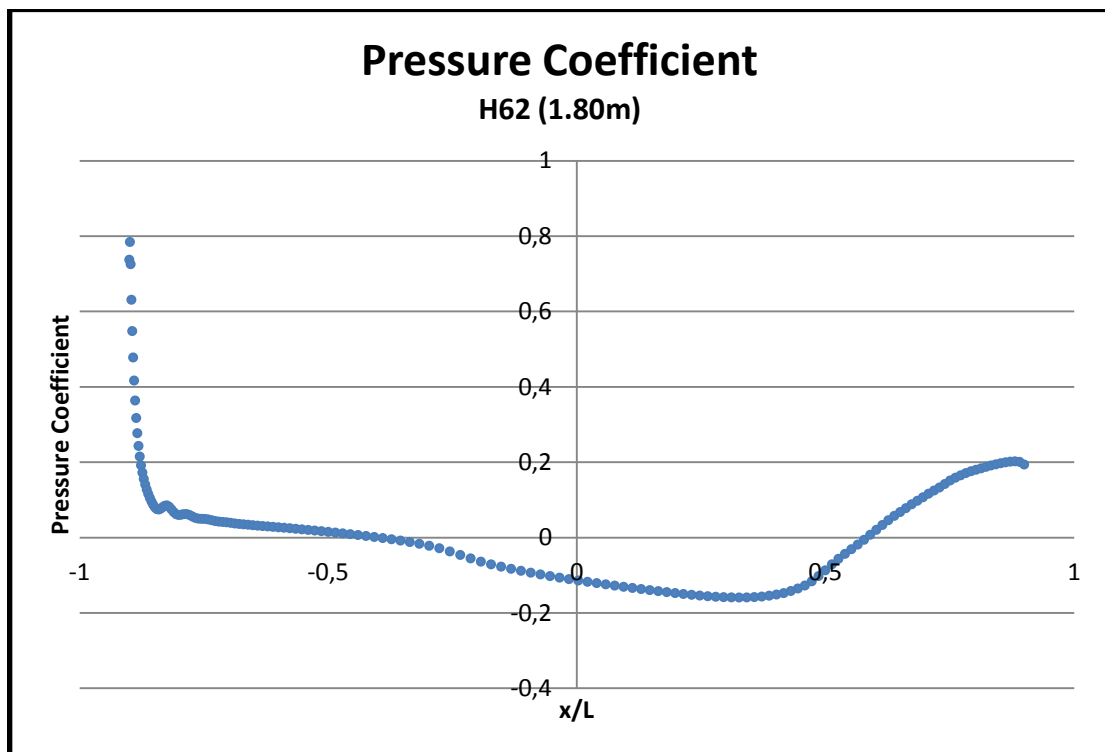
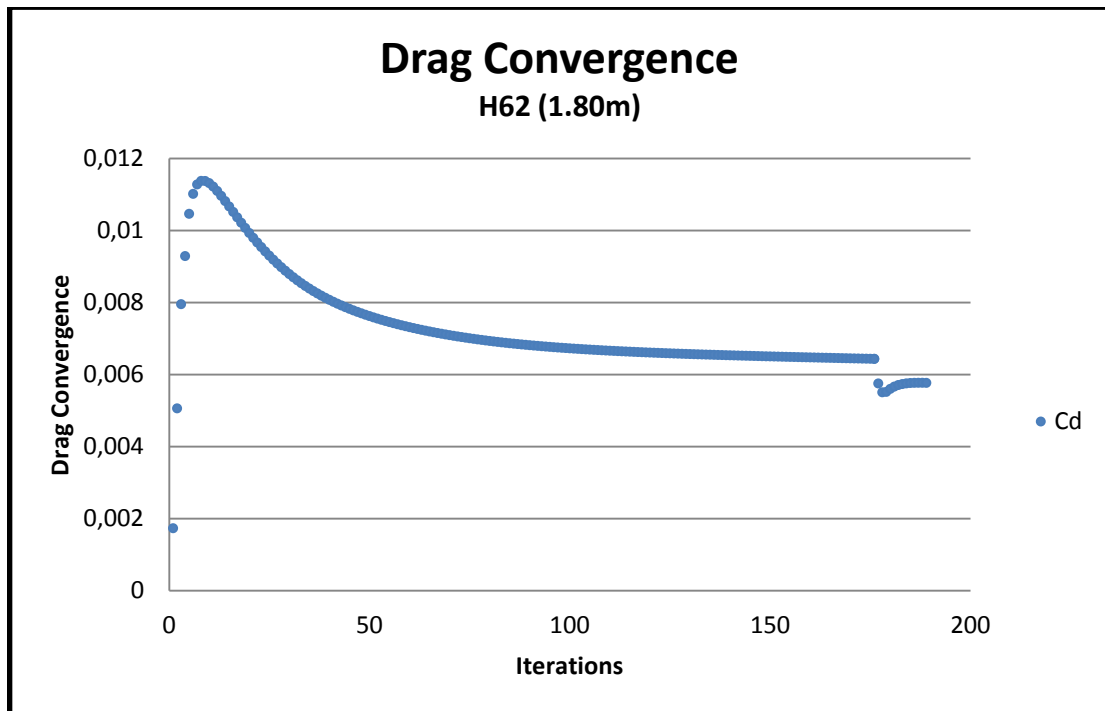


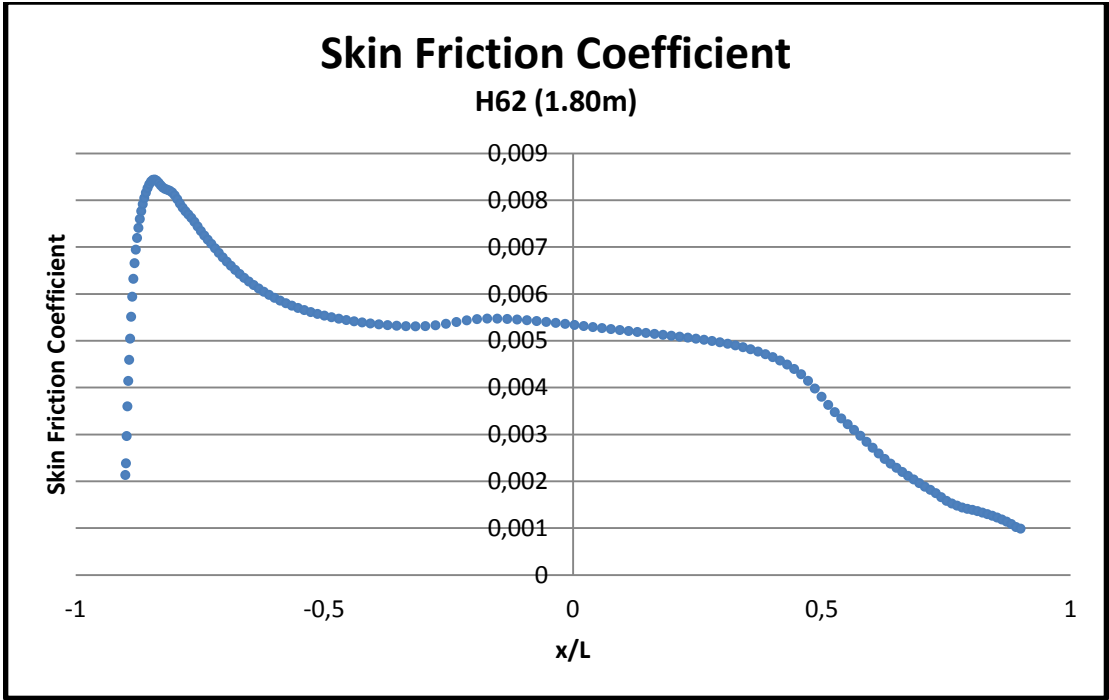


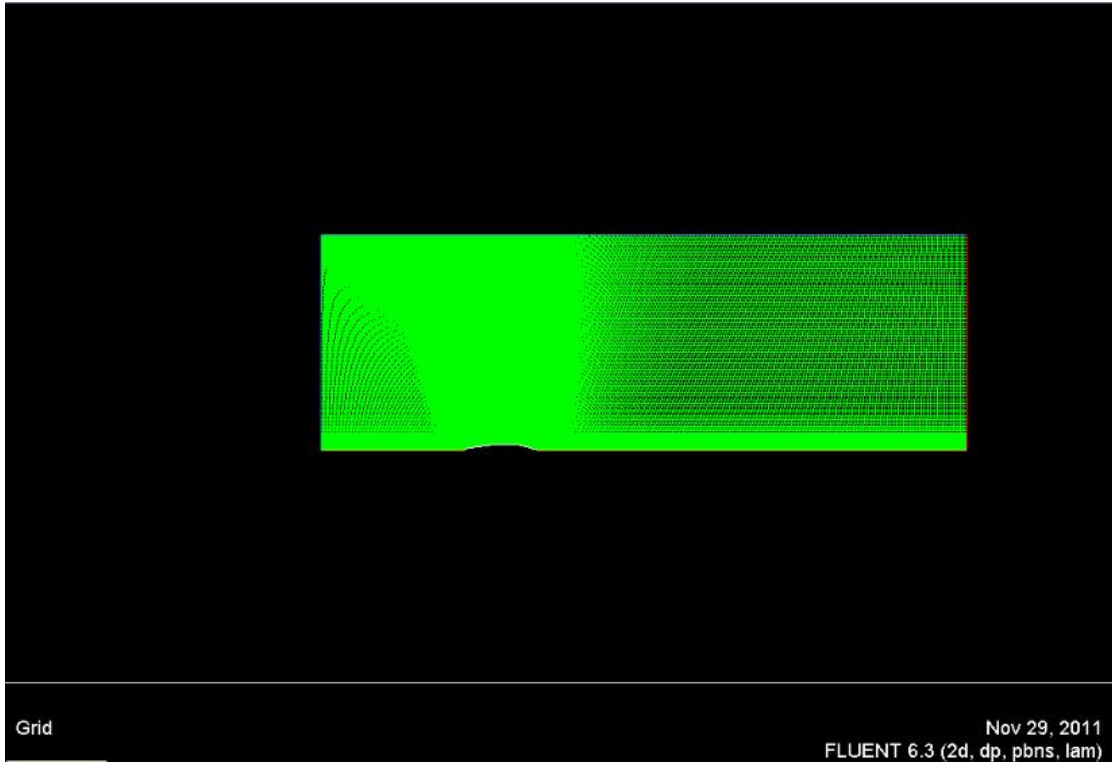
GRID - ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 1- SEAGLIDER 2M



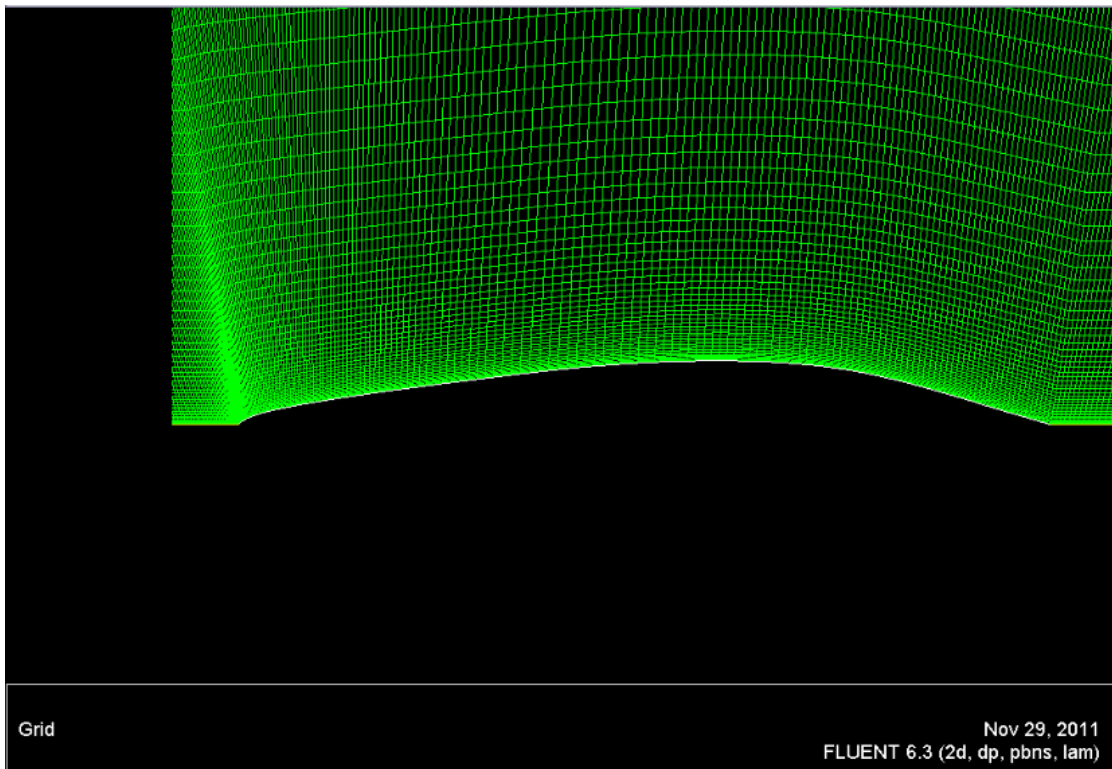
GRID ZOOM - ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 1 -SEAGLIDER 2M



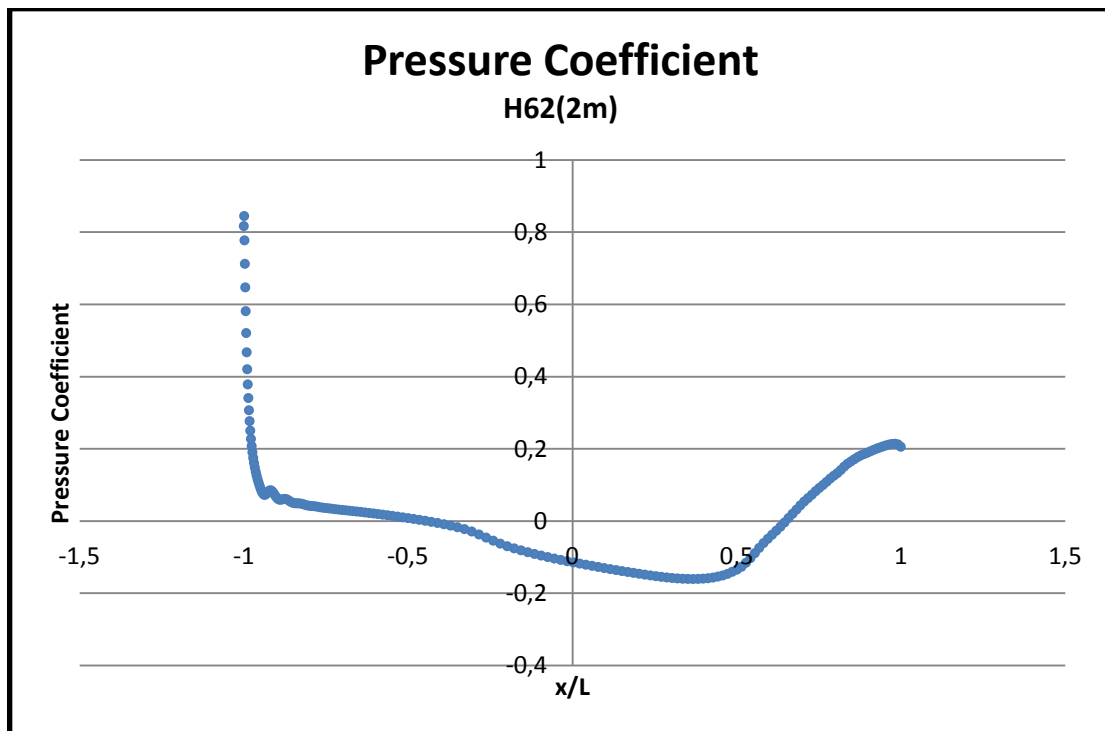
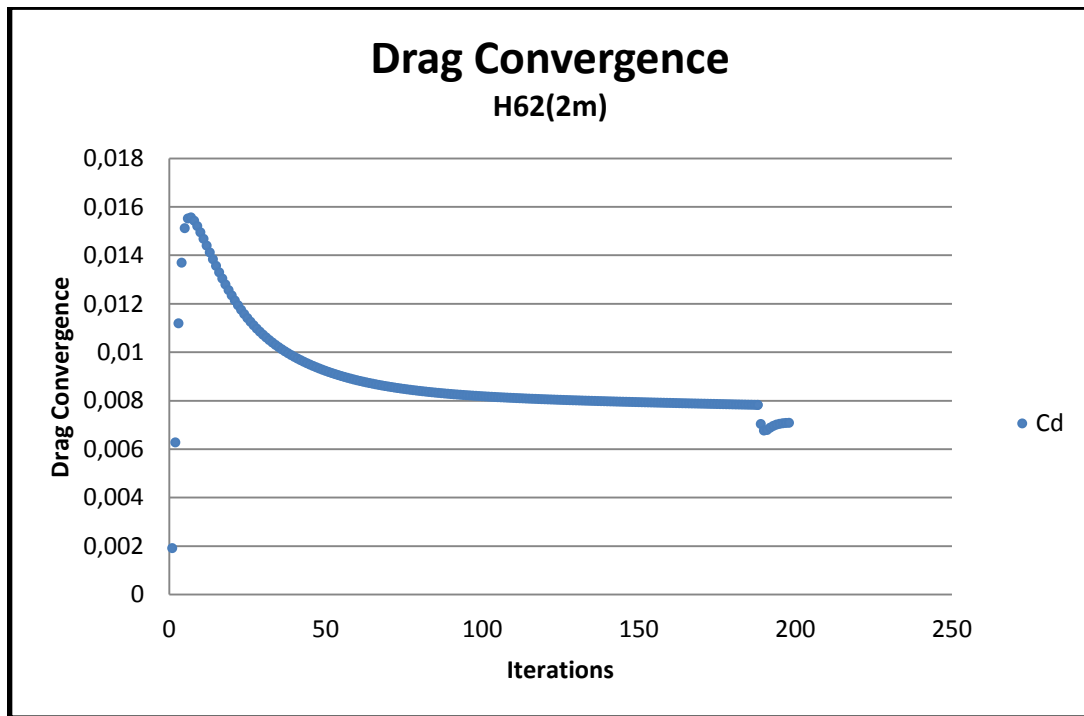


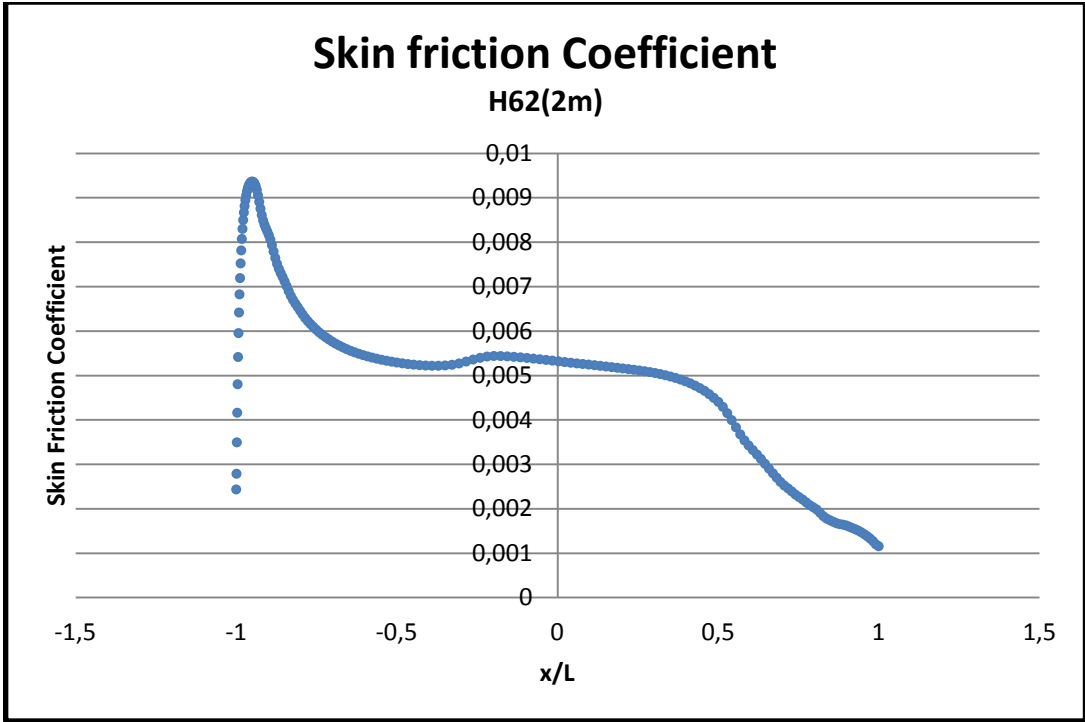


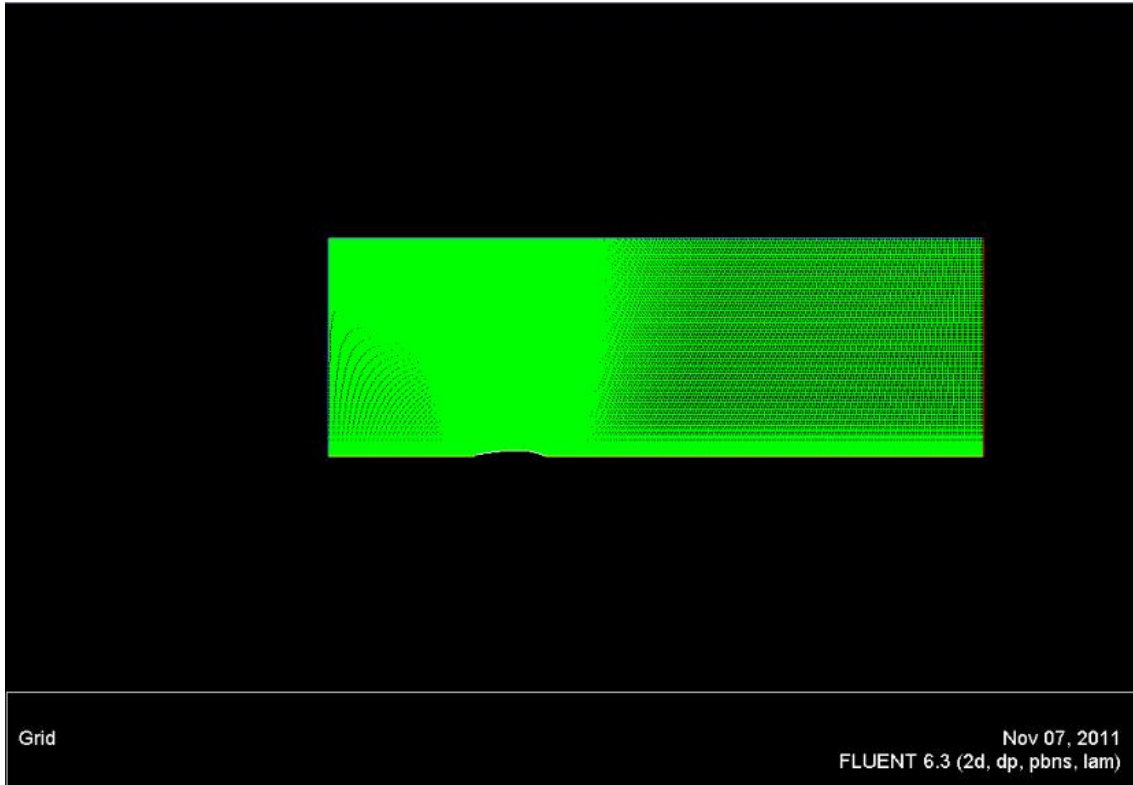
GRID-ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 2- H62 ΜΕ ΜΗΚΟΣ 1.80Μ



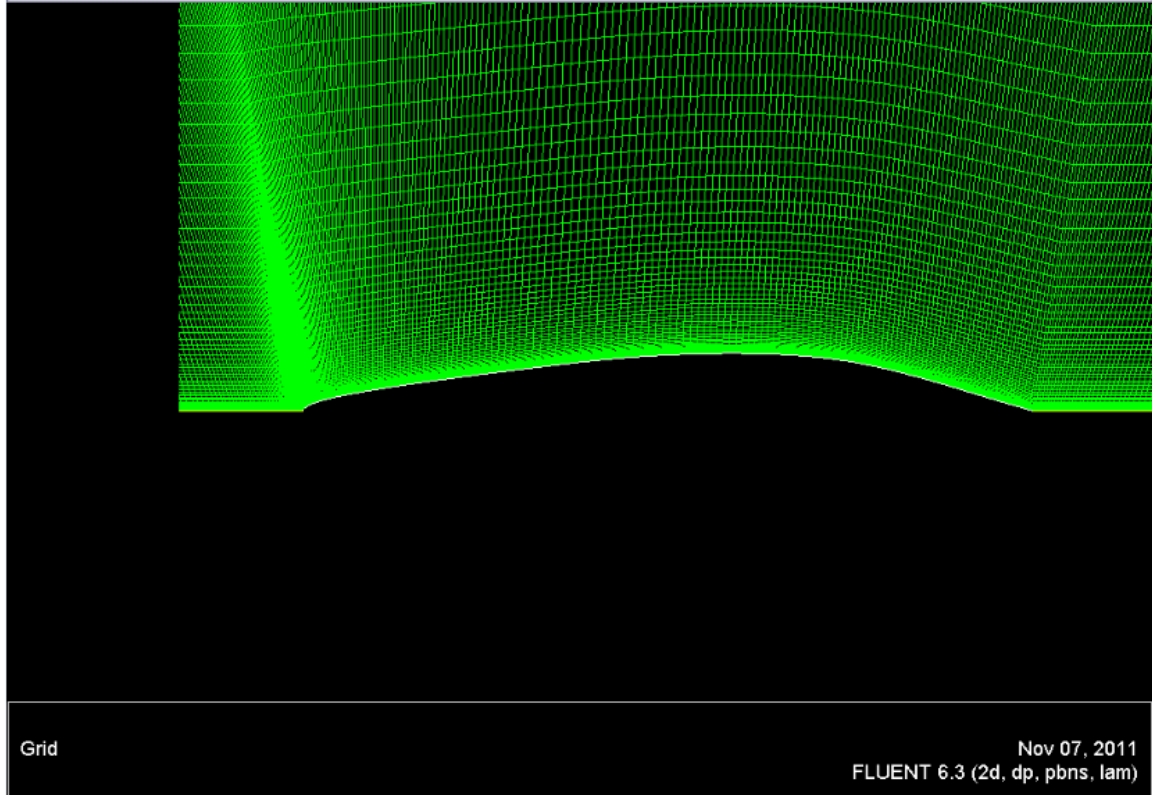
GRID ZOOM -ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 2- H62 ΜΕ ΜΗΚΟΣ 1.80 Μ



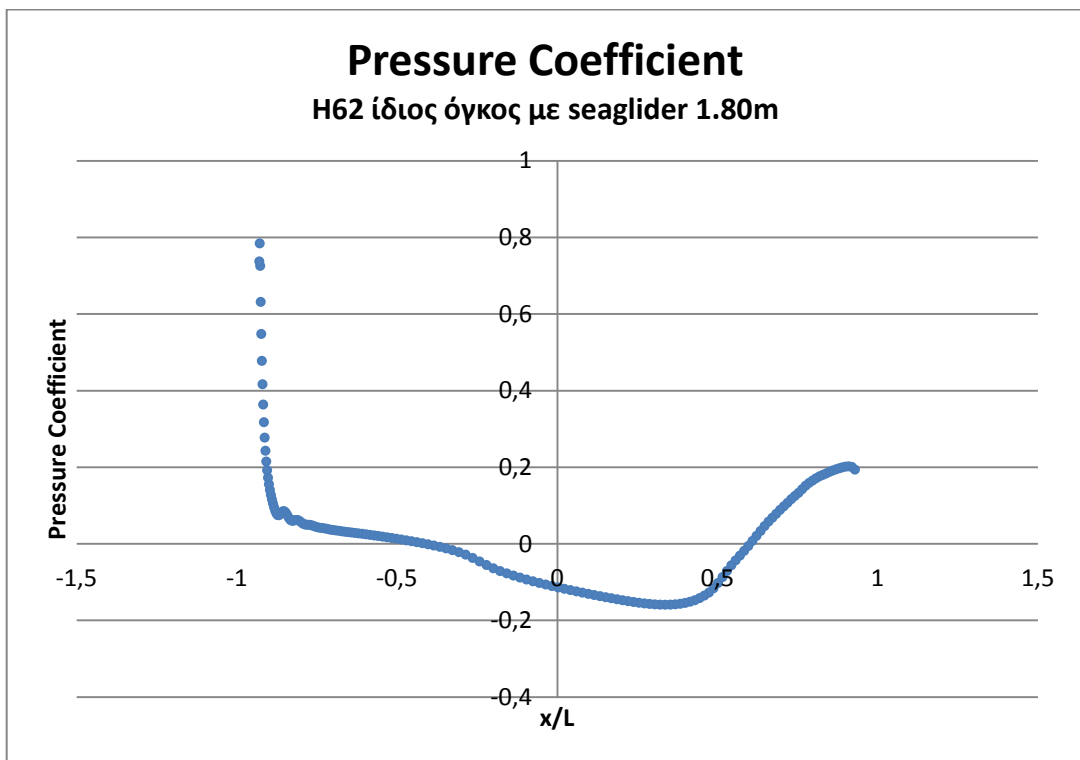
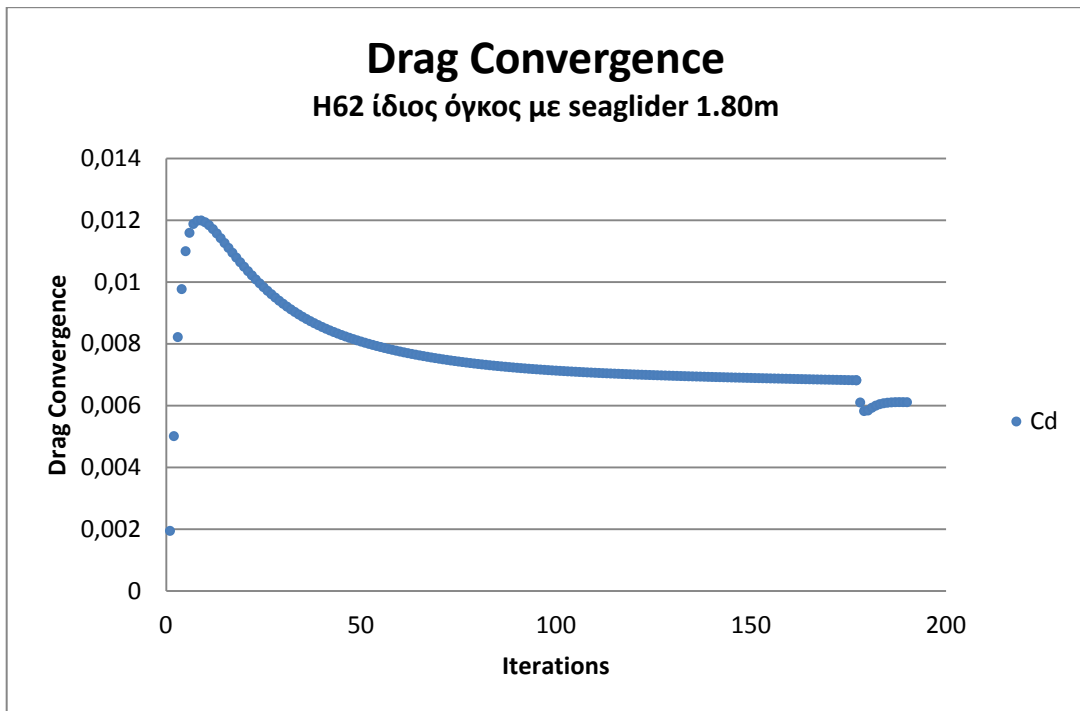




GRID-ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 3 - H62 (2M)

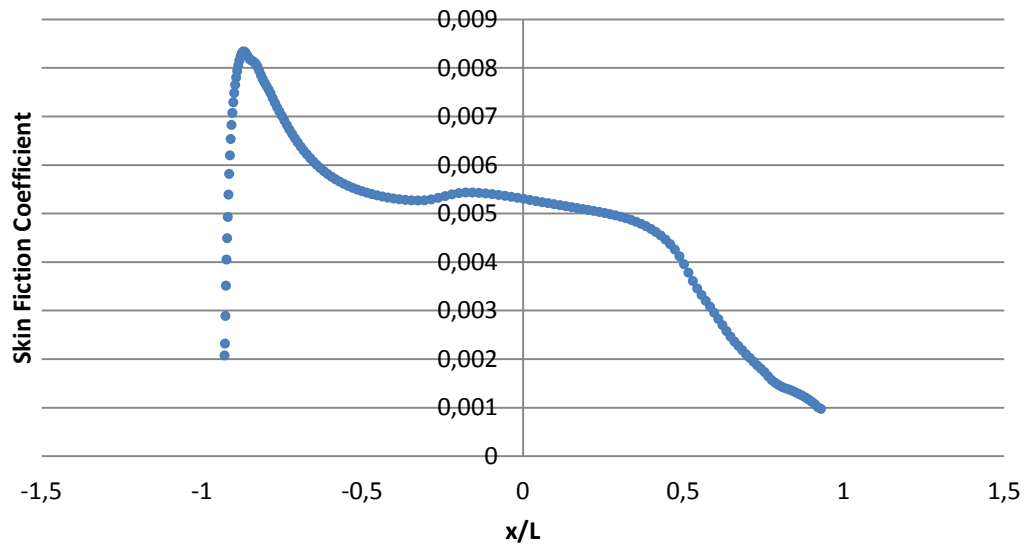


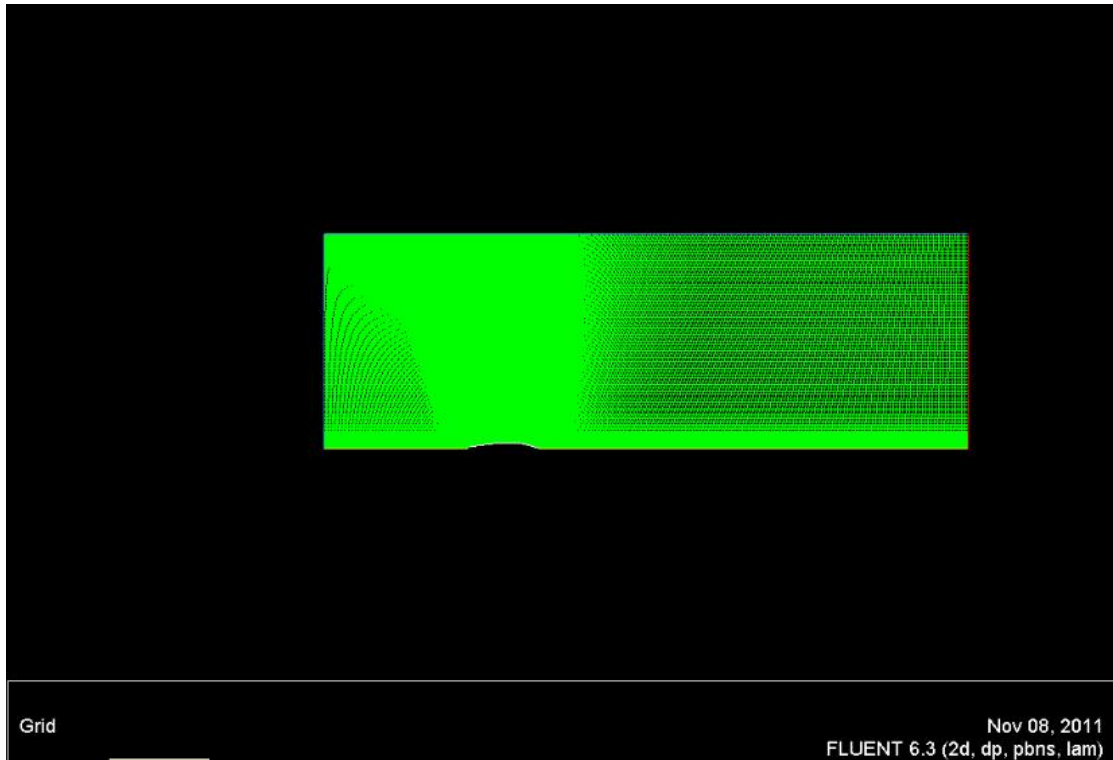
GRID ZOOM-ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 3 - H62 (2M)



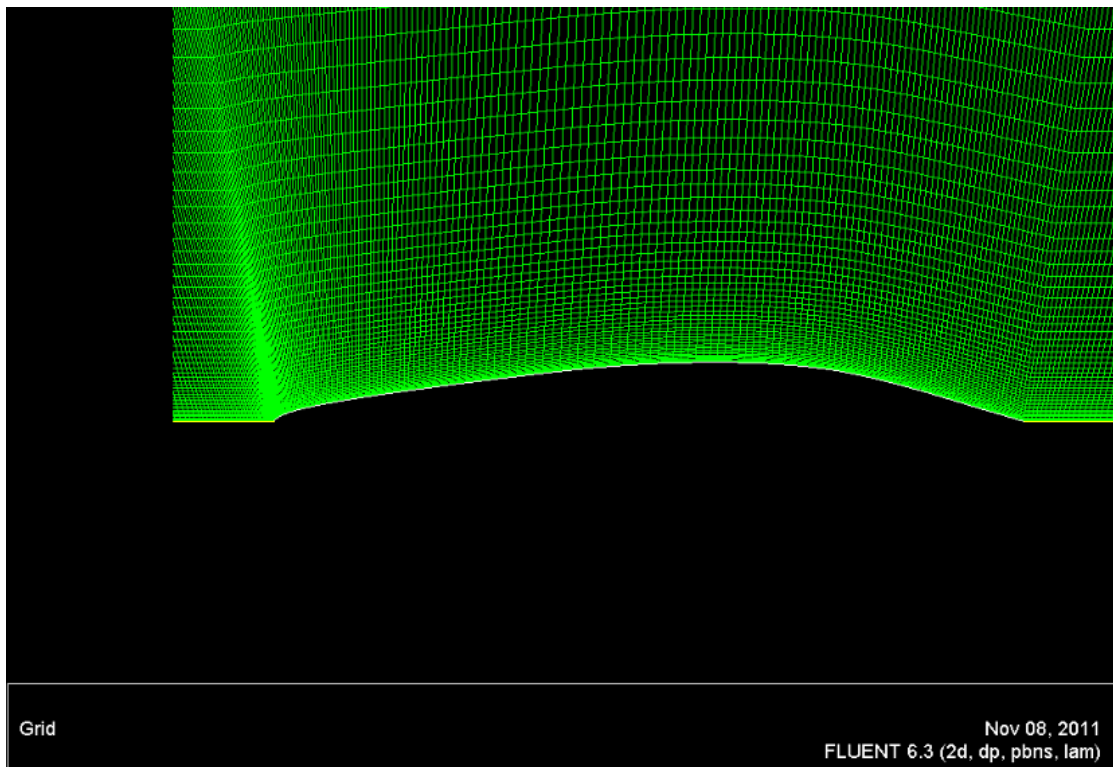
Skin Friction Coefficient

H62 ίδιος όγκος με seaglider 1.80

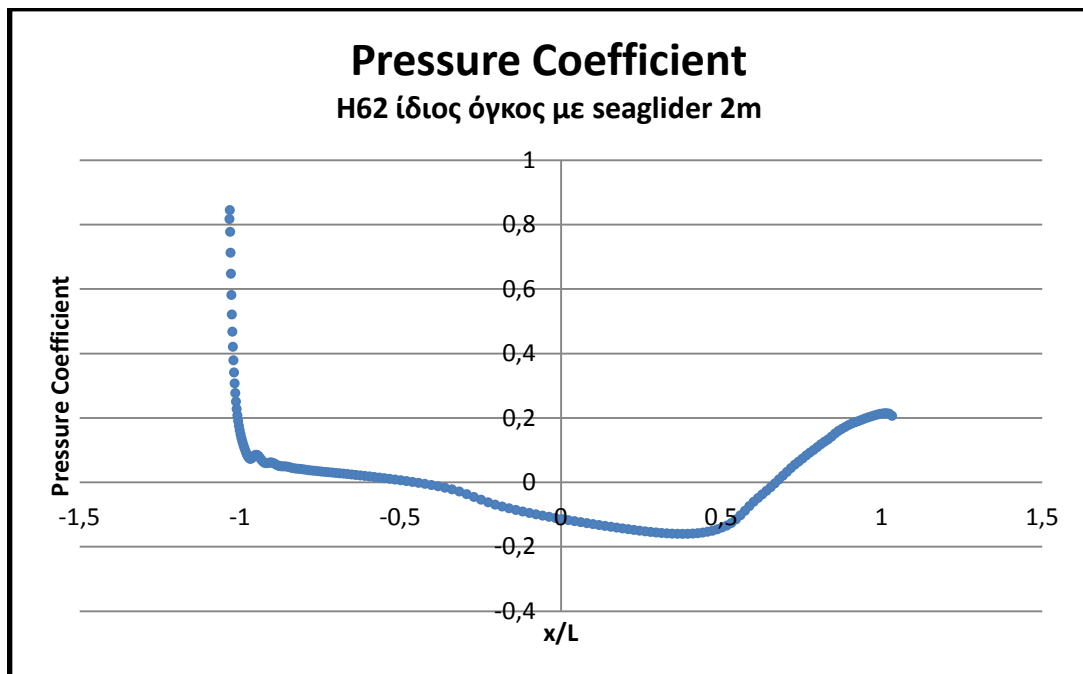
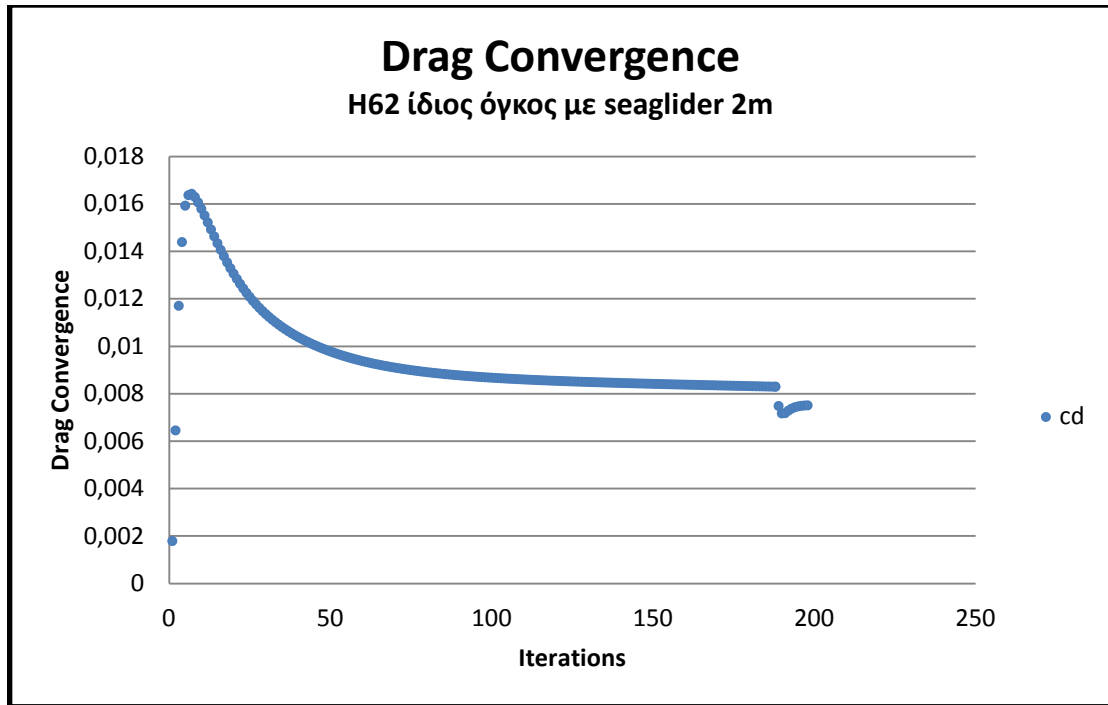




GRID-ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 4 - H62 ΙΔΙΟΣ ΟΓΚΟΣ ΜΕ SEAGLIDER 1.80M

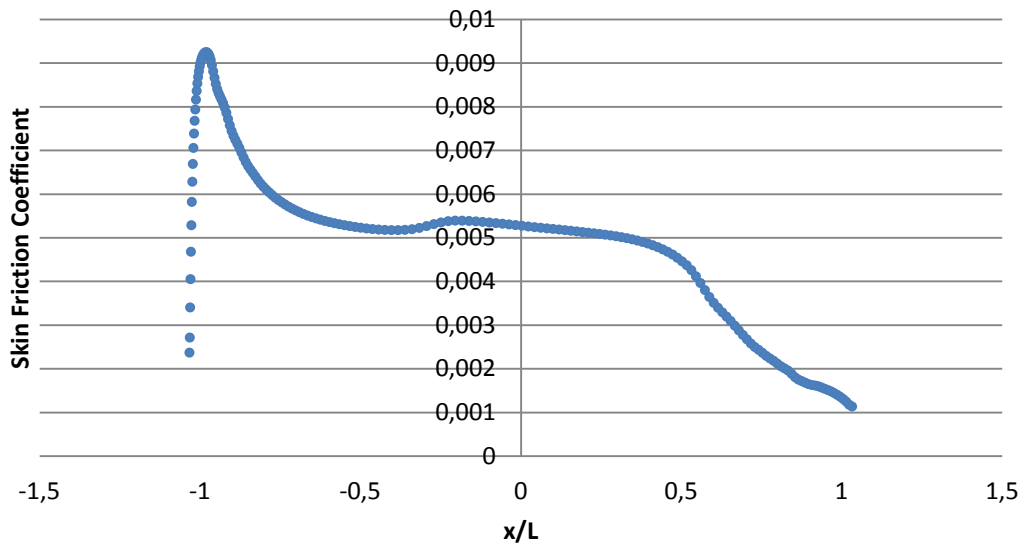


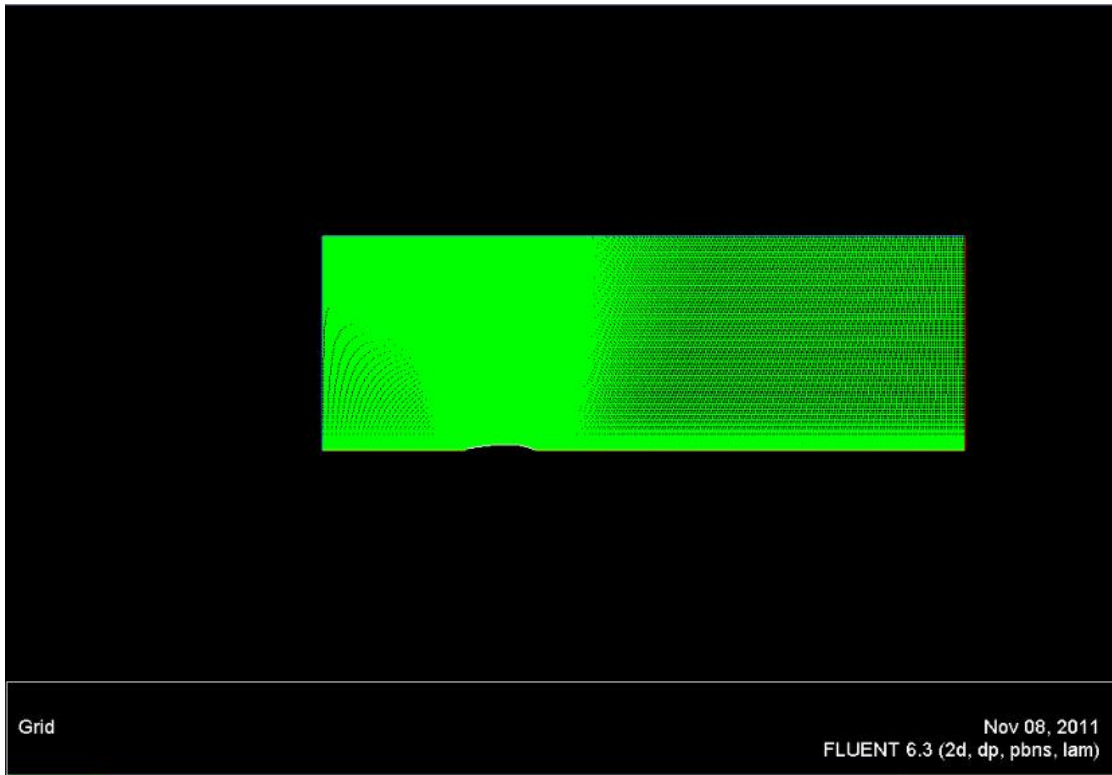
GRID ZOOM -ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 4 - H62 ΙΔΙΟΣ ΟΓΚΟΣ ΜΕ SEAGLIDER 1.80M



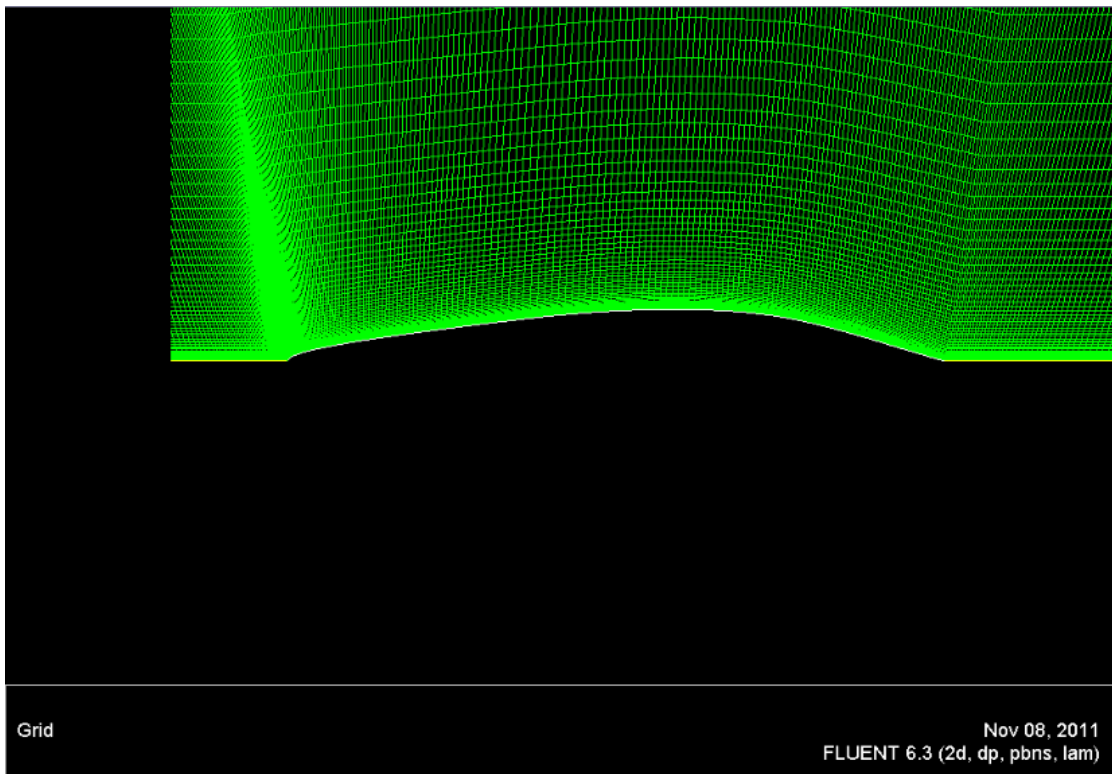
Skin Friction Coefficient

H62 ίδιος όγκος με seaglider 2m

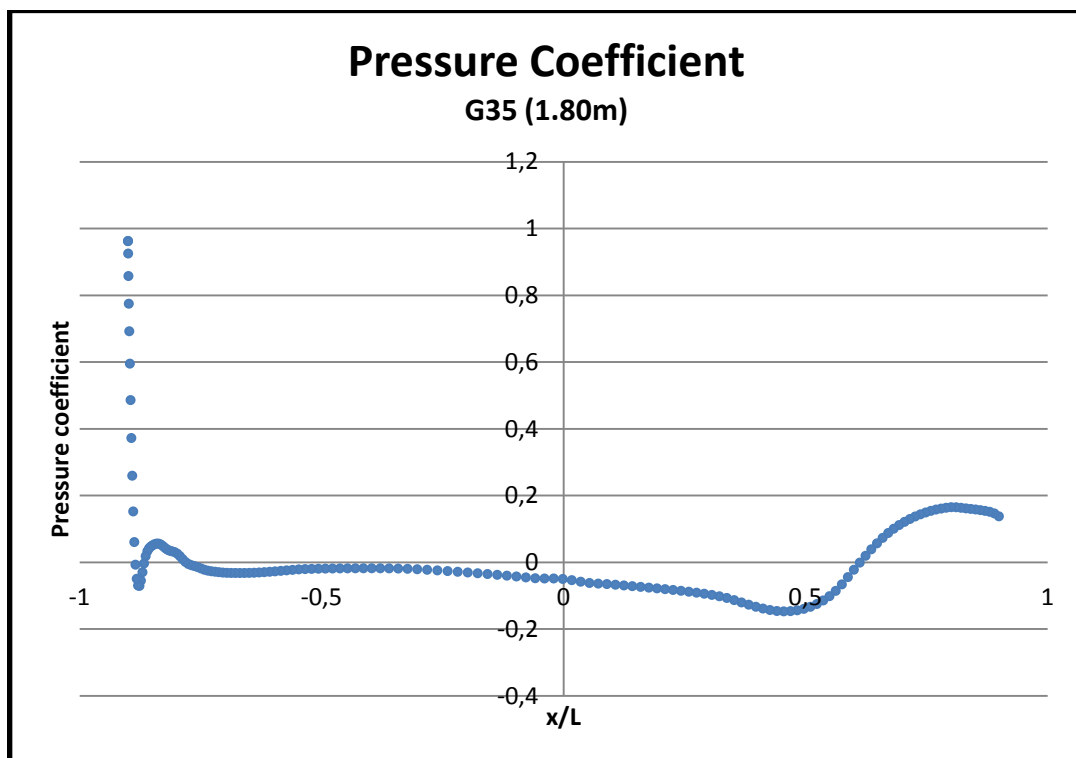
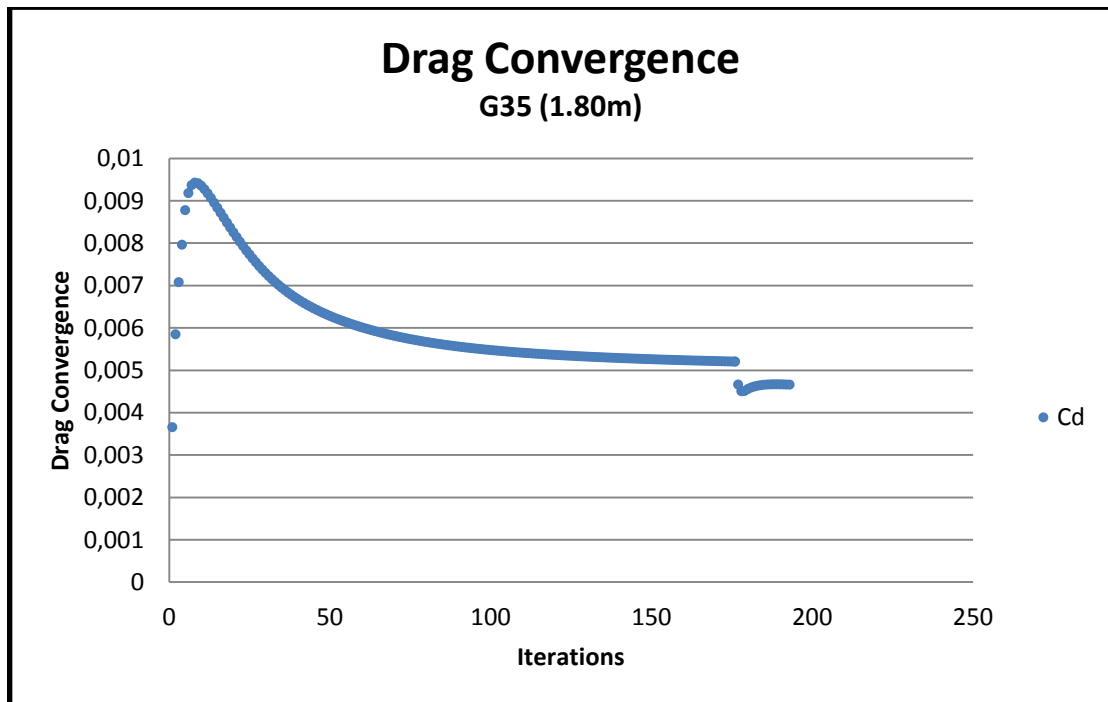


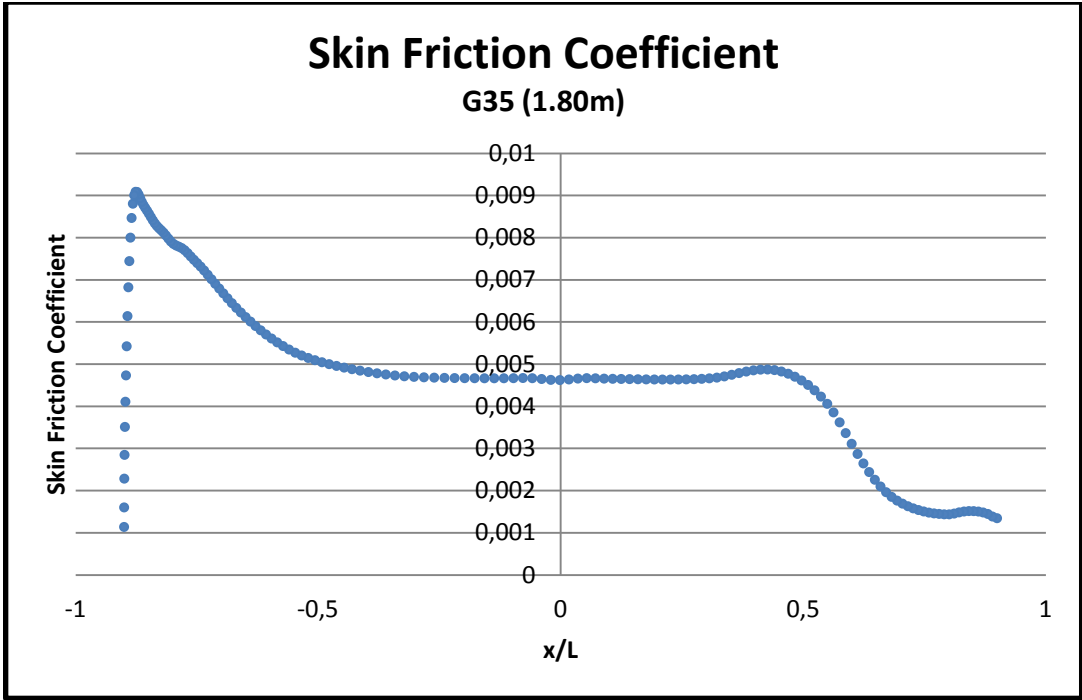


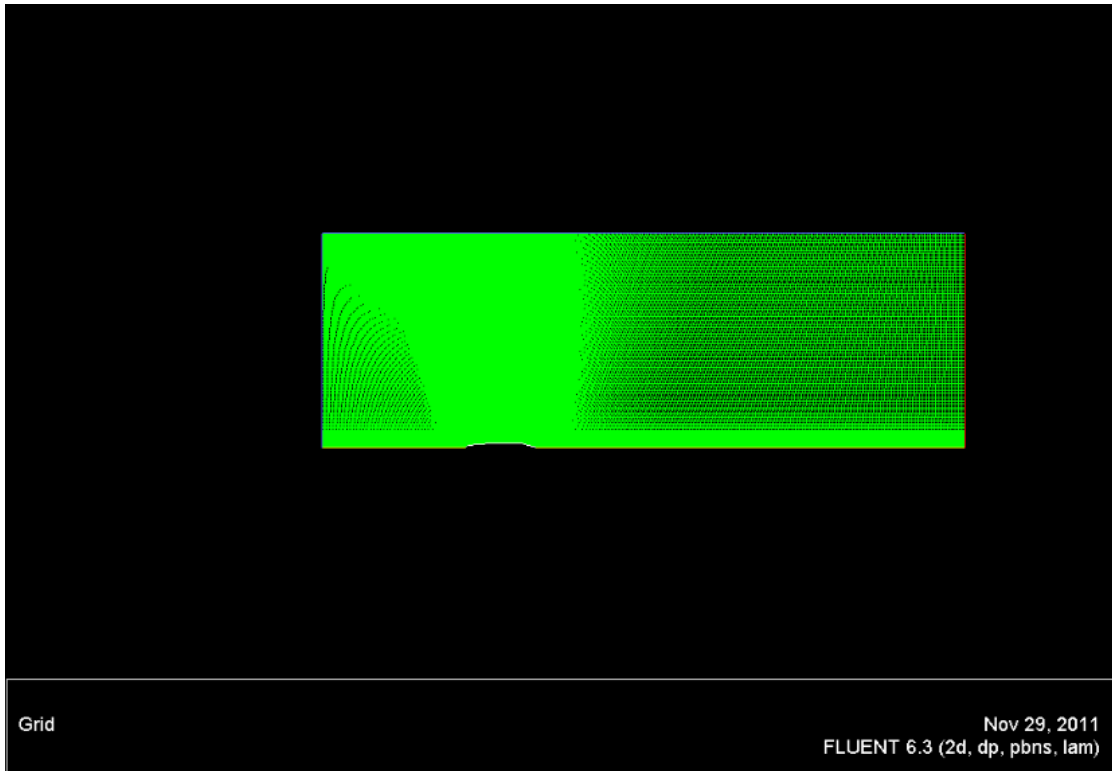
GRID-ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 5 - H62 ΙΔΙΟΣ ΟΓΚΟΣ ΜΕ SEAGLIDER 2M



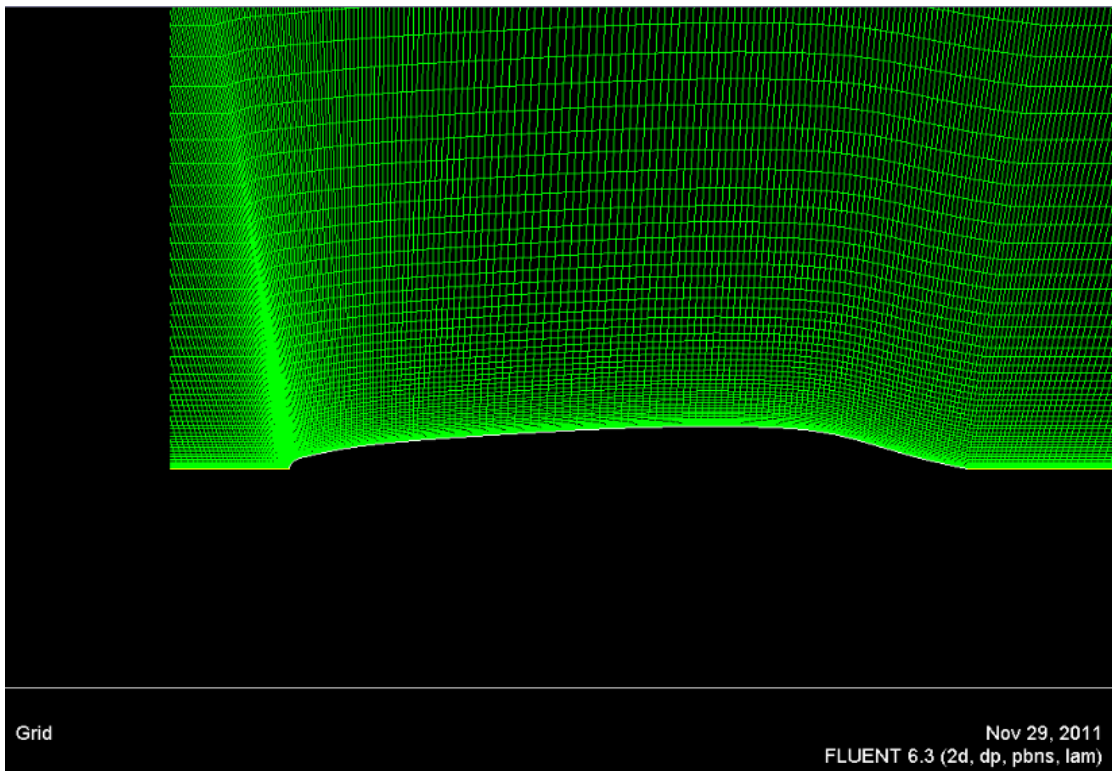
GRID ZOOM -ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 5 - H62 ΙΔΙΟΣ ΟΓΚΟΣ ΜΕ SEAGLIDER 2M



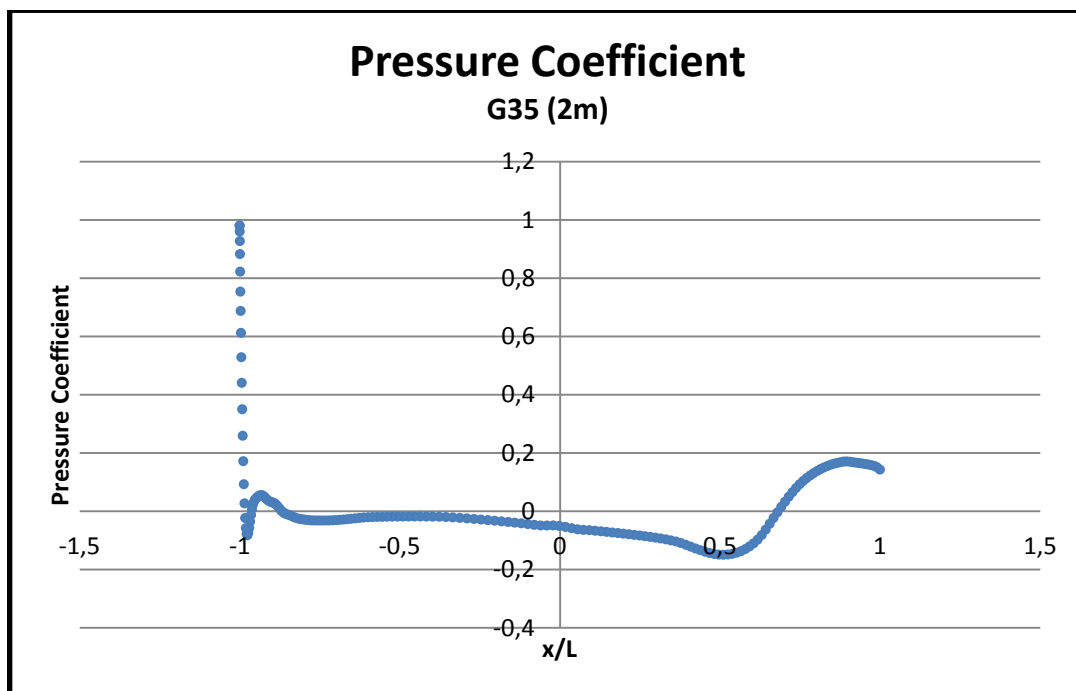
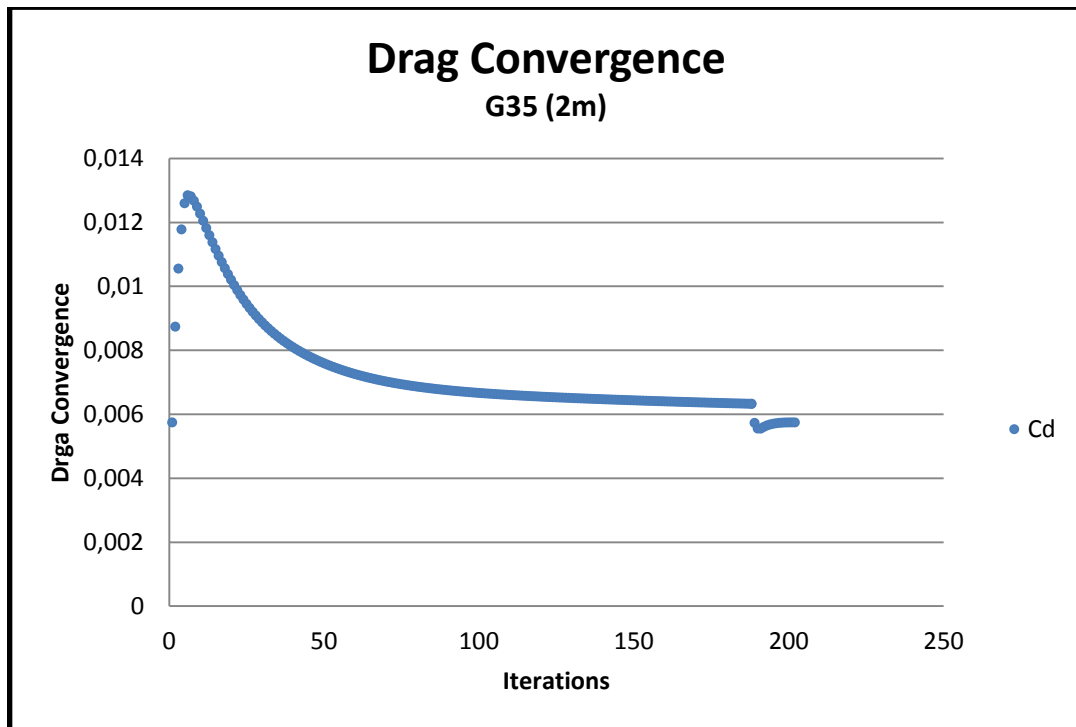


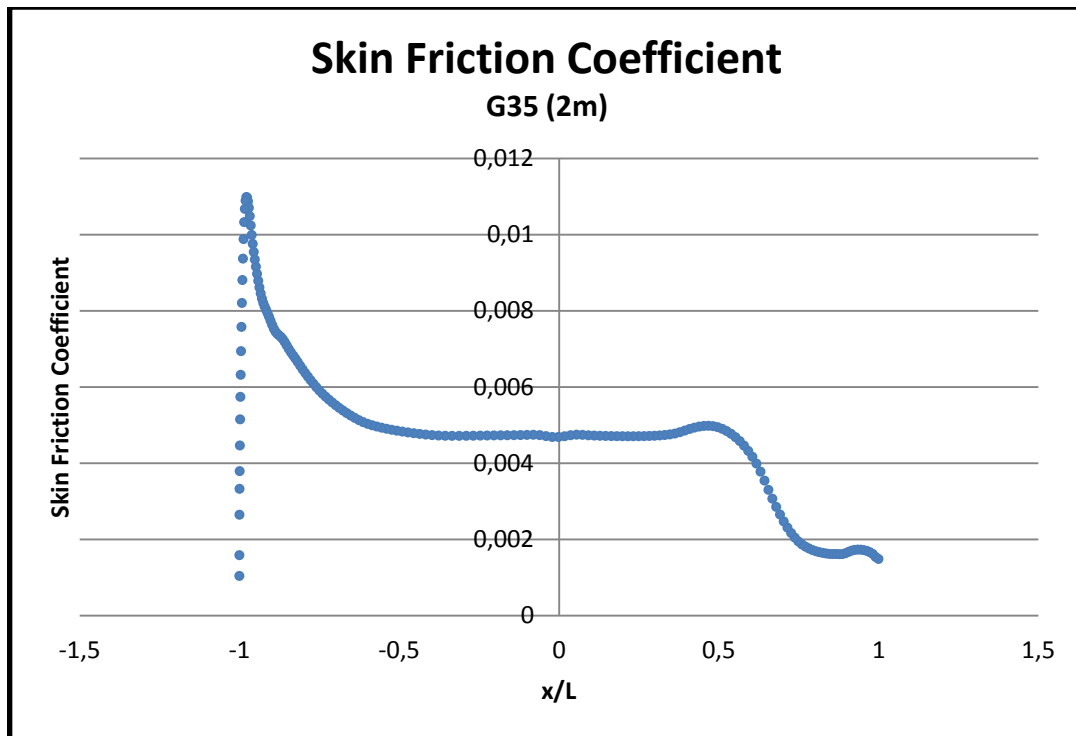


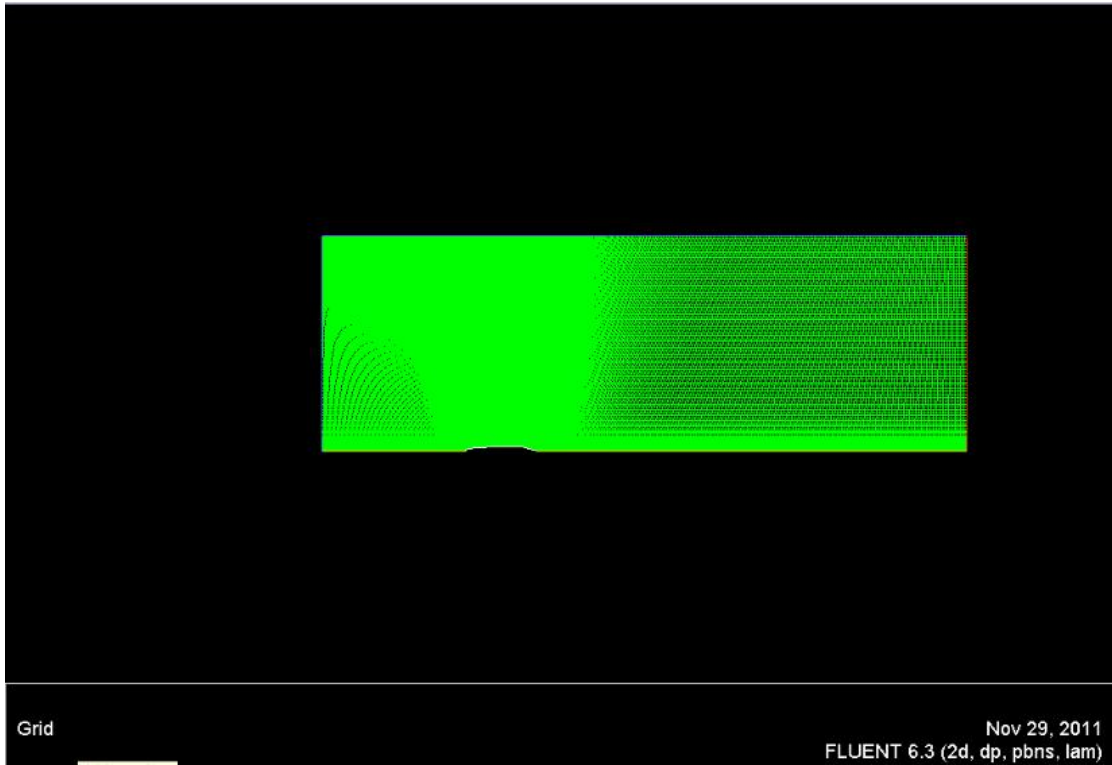
GRID - ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 6-G35 ΜΕ ΜΗΚΟΣ 1.80M



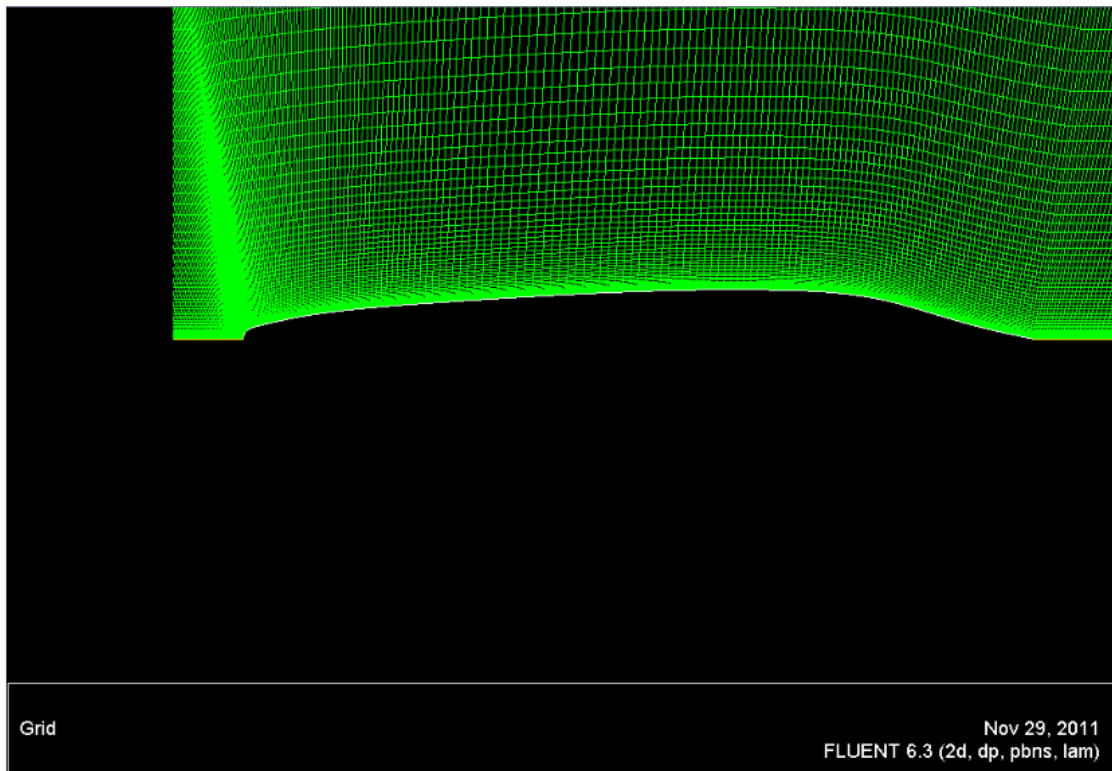
GRIDZOOM - ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 6-G35 ΜΕ ΜΗΚΟΣ 1.80M



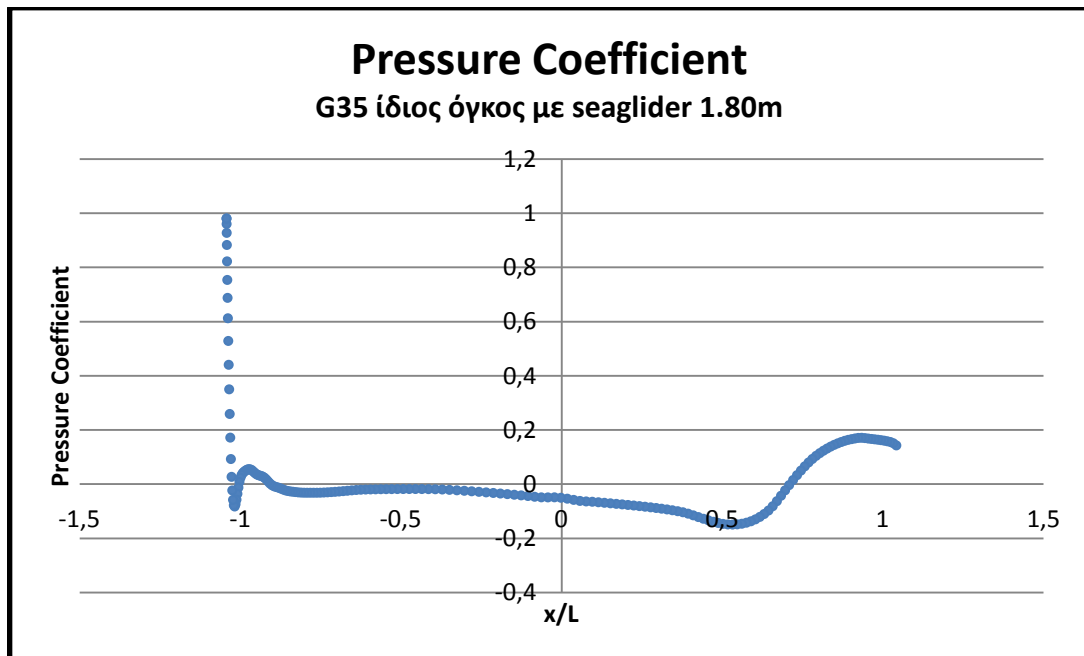
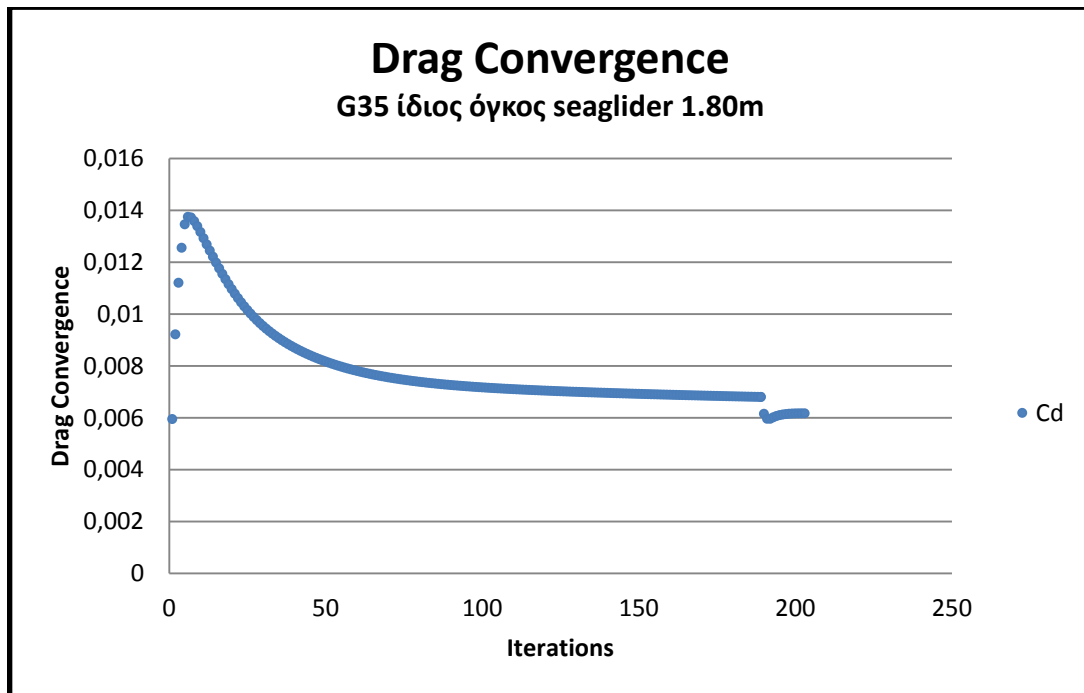




GRID- ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 7-G35 ΜΕ ΜΗΚΟΣ 2Μ

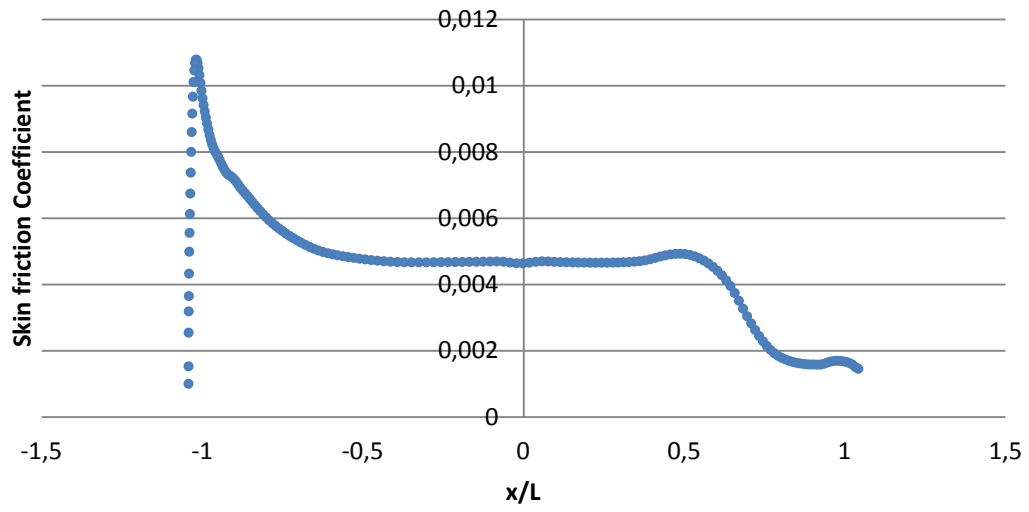


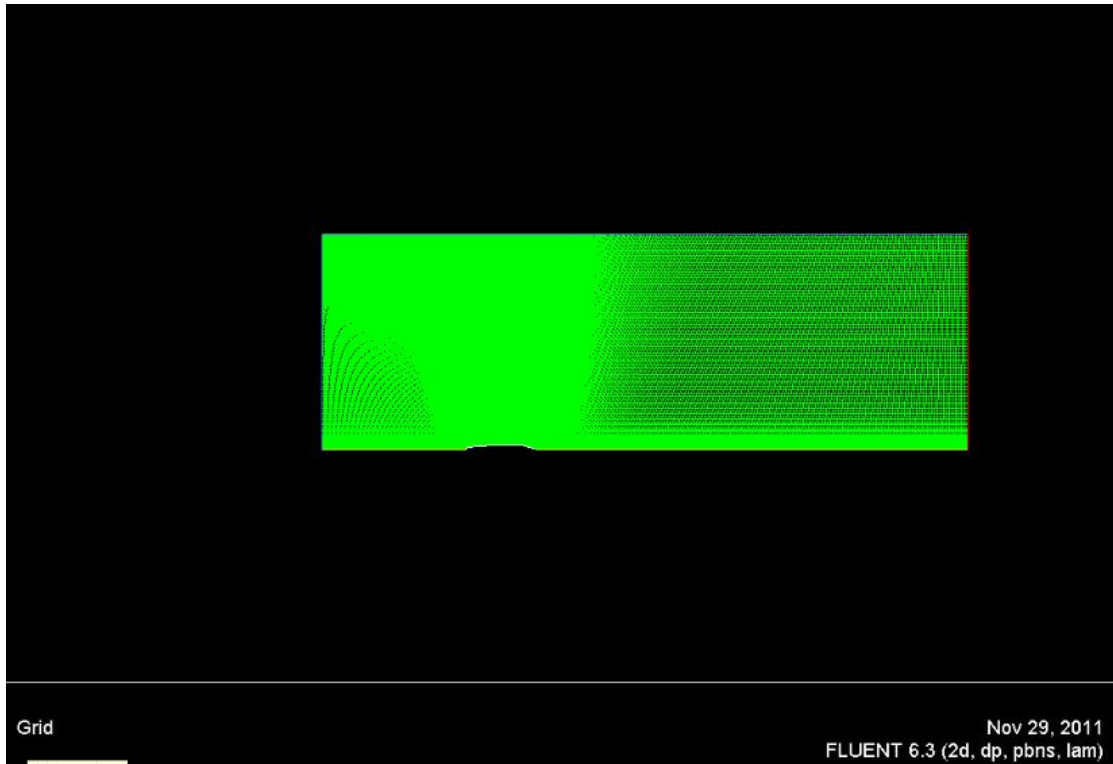
GRIDZOOM -ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 7-G35 ΜΕ ΜΗΚΟΣ 2Μ 1



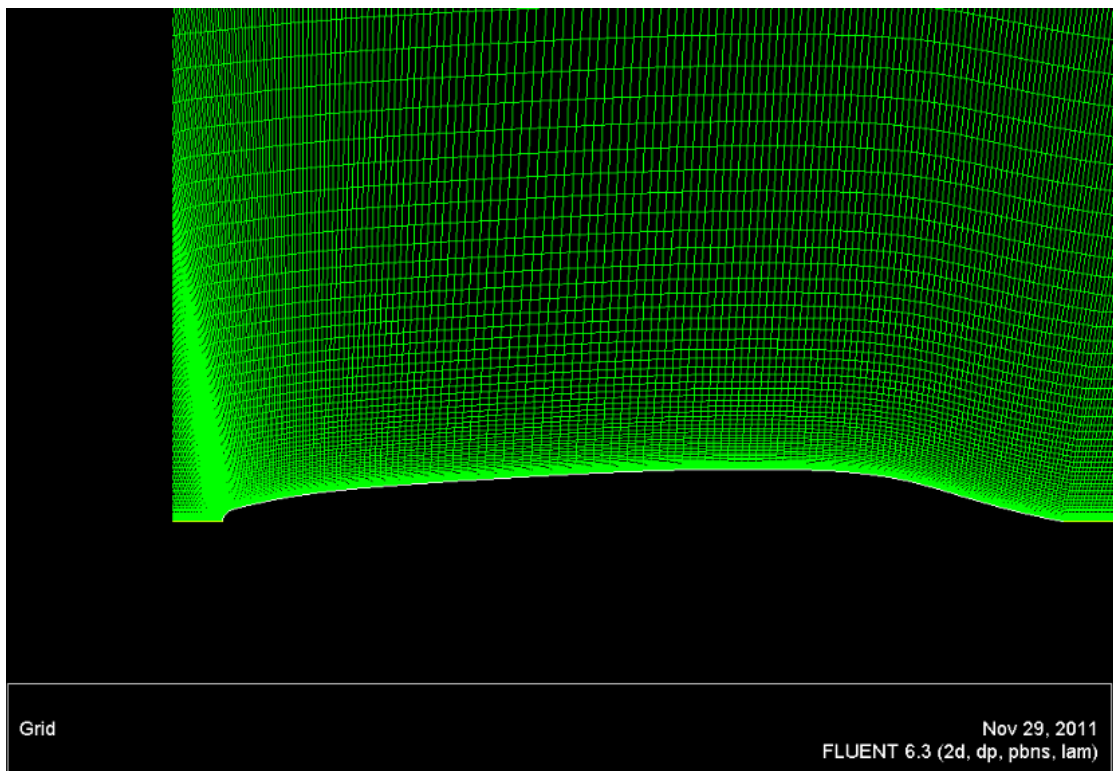
Skin Friction Coefficient

G35 ίδιος όγκος με seaglider 1.80m

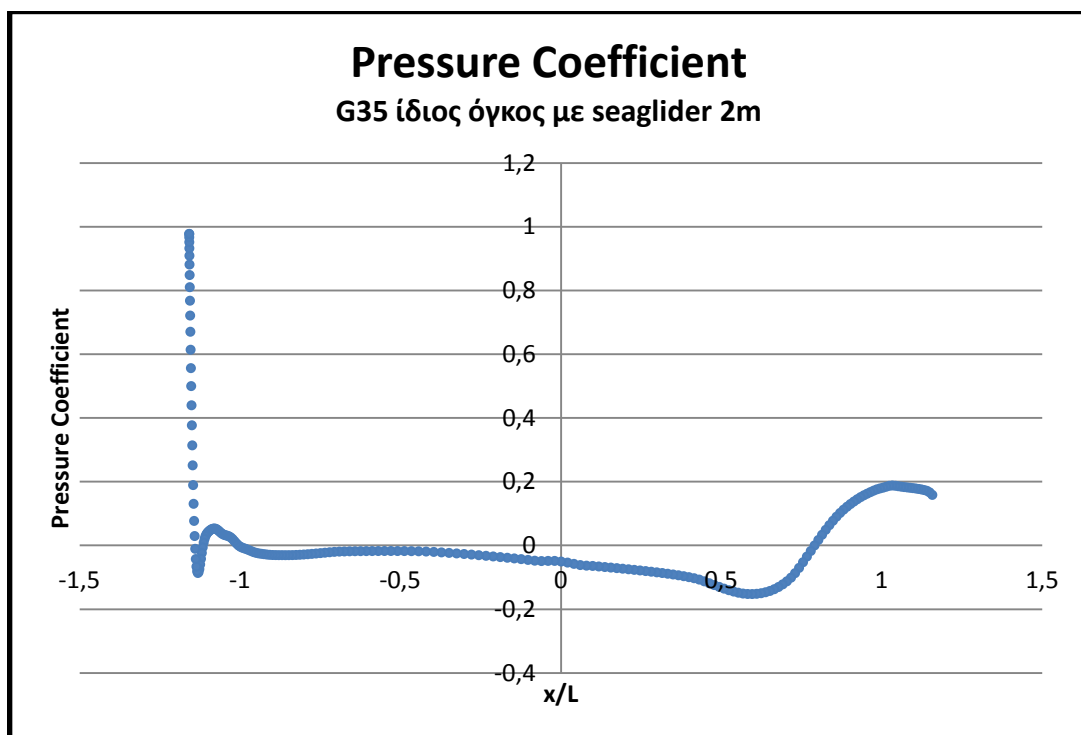
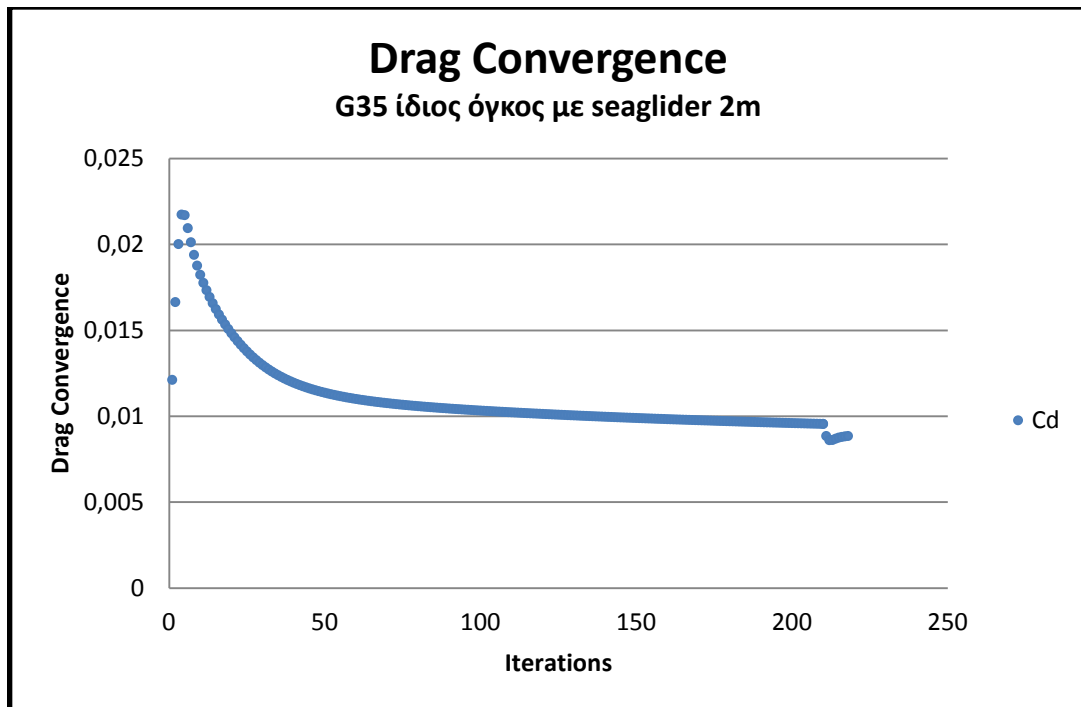




GRID -ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 8-G35 ΊΔΙΟΣ ΌΓΚΟΣ ΜΕ SEAGLIDER 1.80M

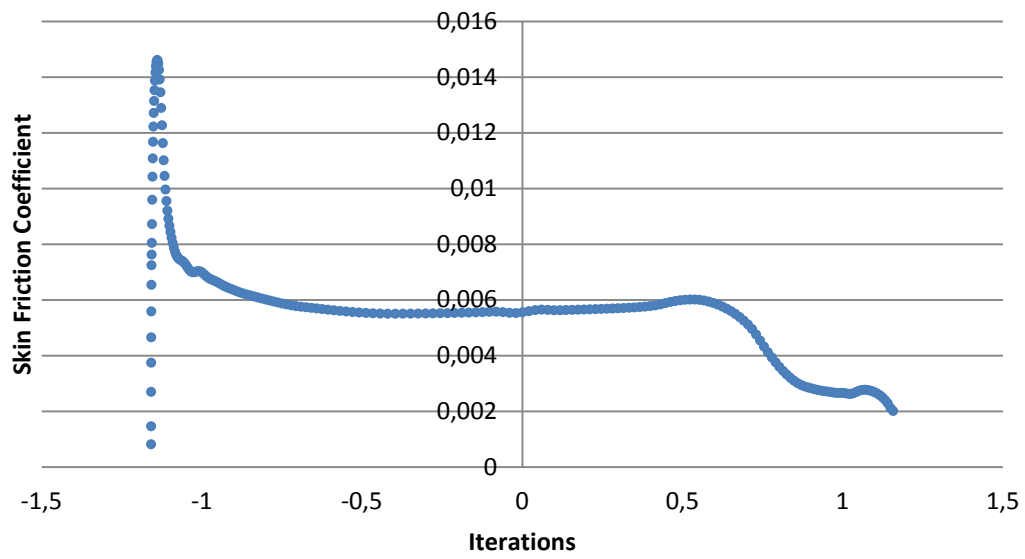


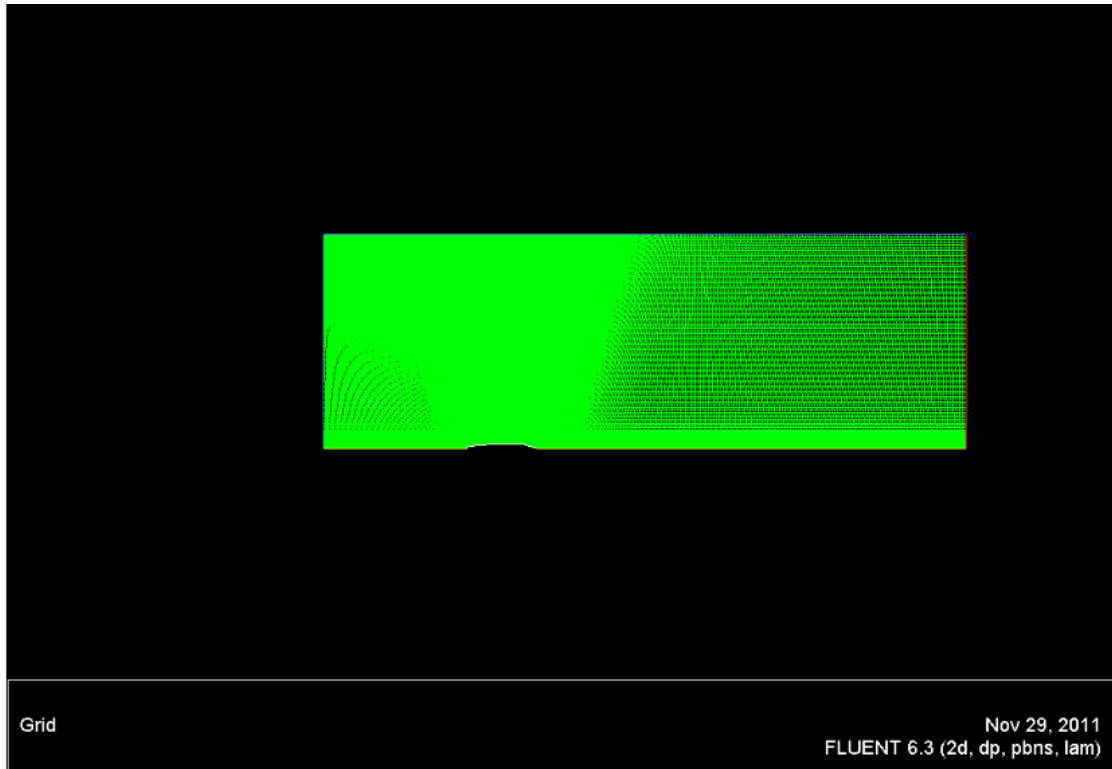
GRIDZOOM -ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 8-G35 ΊΔΙΟΣ ΌΓΚΟΣ ΜΕ SEAGLIDER 1.80M



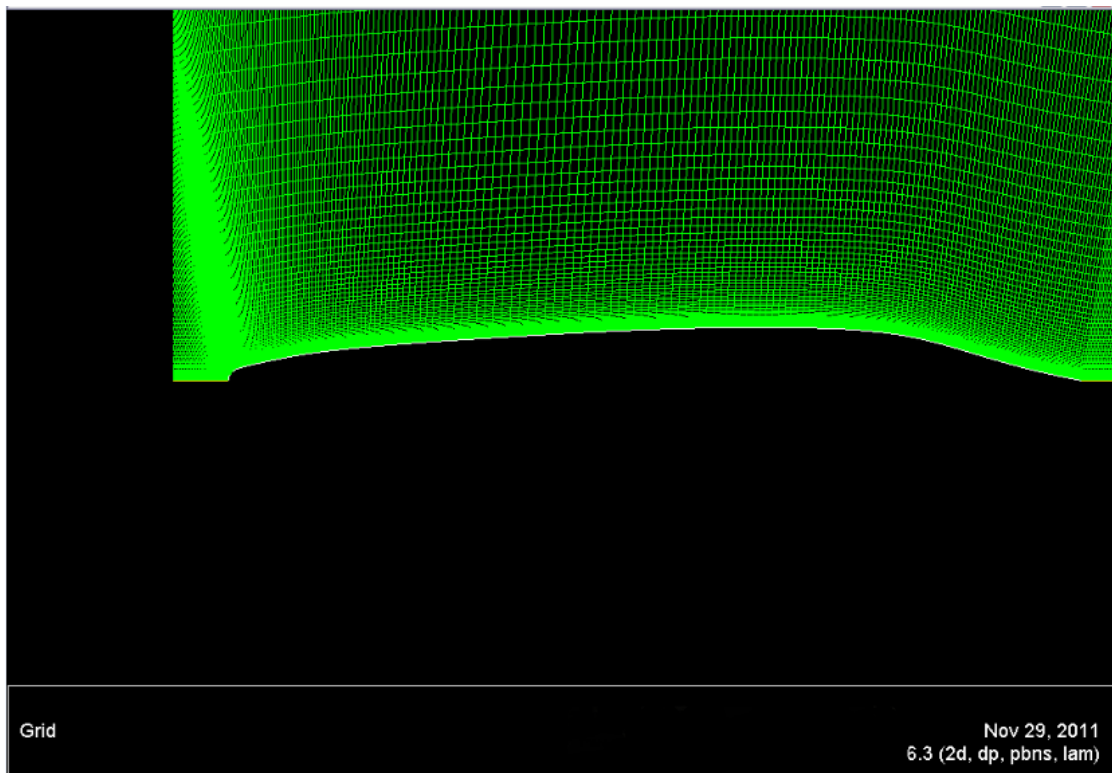
Skin Friction Coefficient

G35 ίδιος όγκος με seaglider 2m





GRID-ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 9- G35 ΊΔΙΟΣ ΌΓΚΟΣ ΜΕ SEAGLIDER 2M



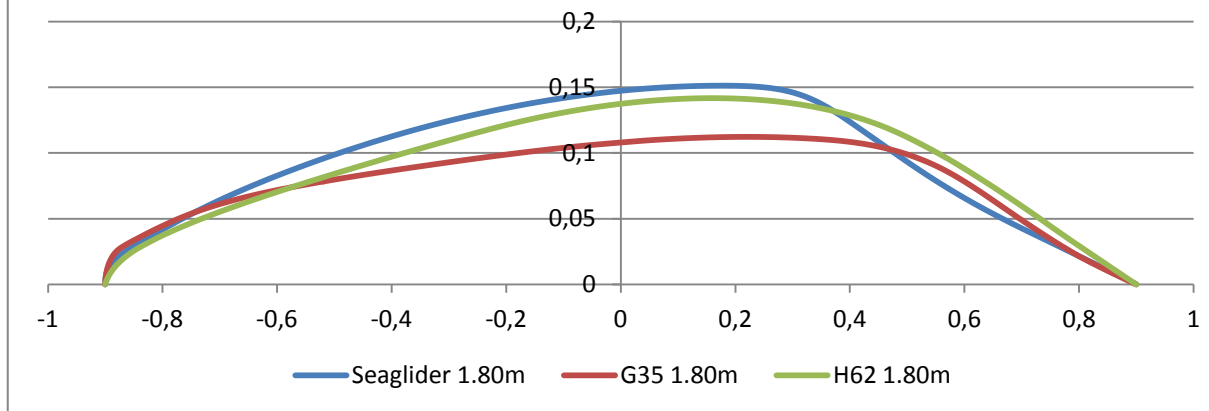
GRIDZOOM -ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 9 G35 ΊΔΙΟΣ ΌΓΚΟΣ ΜΕ SEAGLIDER 2M

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

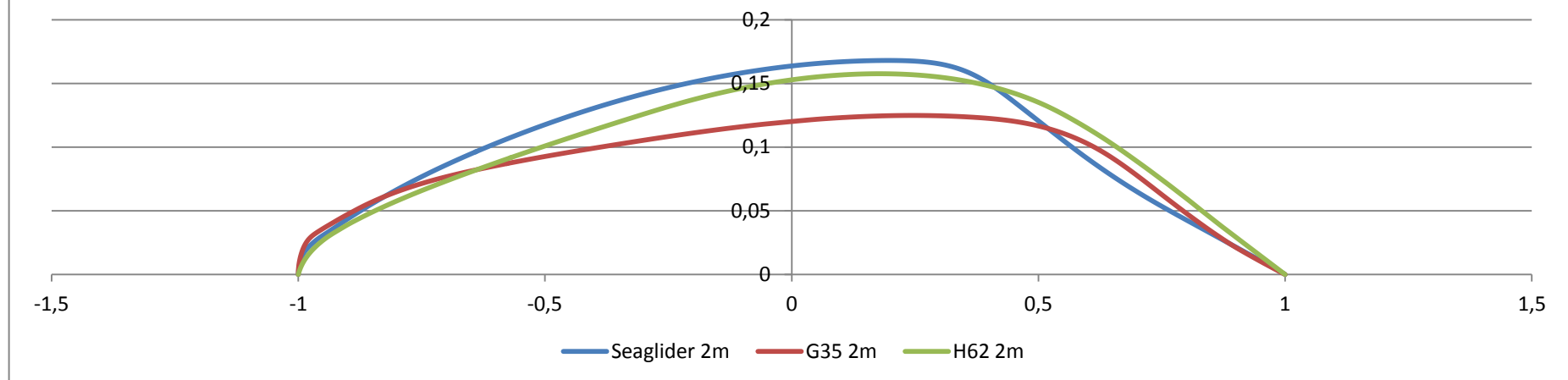
Δύναμη κατά την διεύθυνση x .

| ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΕΣ | Pressure force n | Viscous force n | Total force n | Pressure coefficient | Viscous coefficient | Total coefficient |
|---|---------------------|--------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| Seaglider (1.80m) | 0.08239 | 0.65914 | 0.74153 | 0.000682119 | 0.005457076 | 0.006139195 |
| ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 1 Seaglider 2m | 0.09902 | 0.80828 | 0.90731 | 0.000819856 | 0.006691814 | 0.007511671 |
| ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 2 H62 1.80 m | 0.06092 | 0.63624 | 0.69716 | 0.000504417 | 0.005267493 | 0.005771912 |
| ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 3 H62 2m | 0.07445 | 0.78238 | 0.85684 | 0.000613882 | 0.006477456 | 0.007093845 |
| ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 4 H62 -ίδιος όγκος με Seaglider 1.80m | 0.06425 | 0.67399 | 0.73824 | 0.000531981 | 0.005579999 | 0.006111981 |
| ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 5 H62 - ίδιος όγκος με Seaglider 2m | 0.07876 | 0.82755 | 0.90631 | 0.000652099 | 0.006851356 | 0.007503455 |
| ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 6 G35 1.80 m | 0.04123 | 0.52221 | 0.56344 | 0.000341372 | 0.004323390 | 0.004664762 |
| ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 7 G35 2m | 0.04901 | 0.64543 | 0.69444 | 0.000405754 | 0.005343614 | 0.005749369 |
| ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 8 G35 ίδιος όγκος με Seaglider 1.80m | 0.05256 | 0.69356 | 0.74612 | 0.000435149 | 0.005742078 | 0.006177227 |
| ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ 9 G35 ίδιος όγκος με Seaglider 2m | 0.05242 | 1.01574 | 1.06817 | 0.000434021 | 0.008440945 | 0.008843480 |

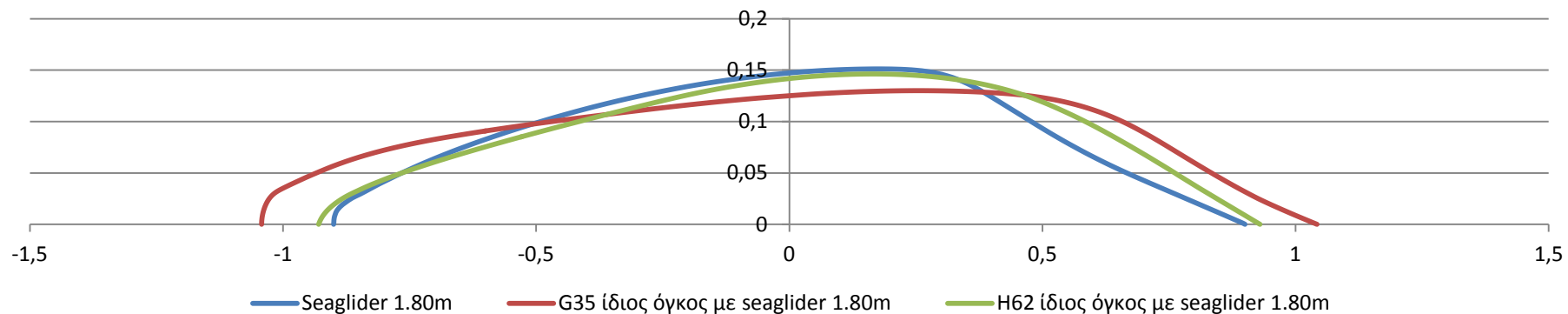
Επιλεγμένες Γεωμετρίες με μήκος 1.80m



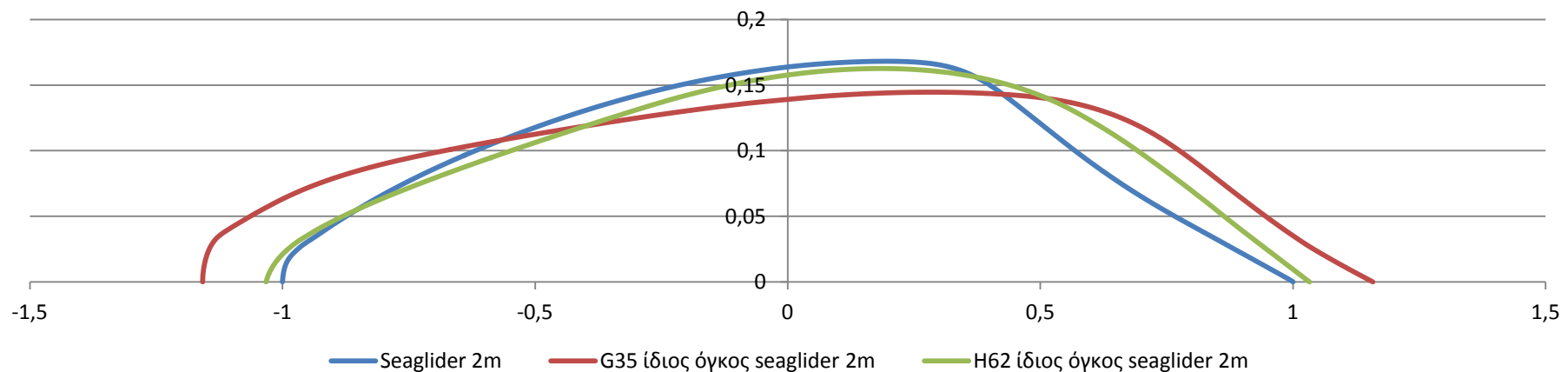
Επιλεγμένες Γεωμετρίες με μήκος 2m

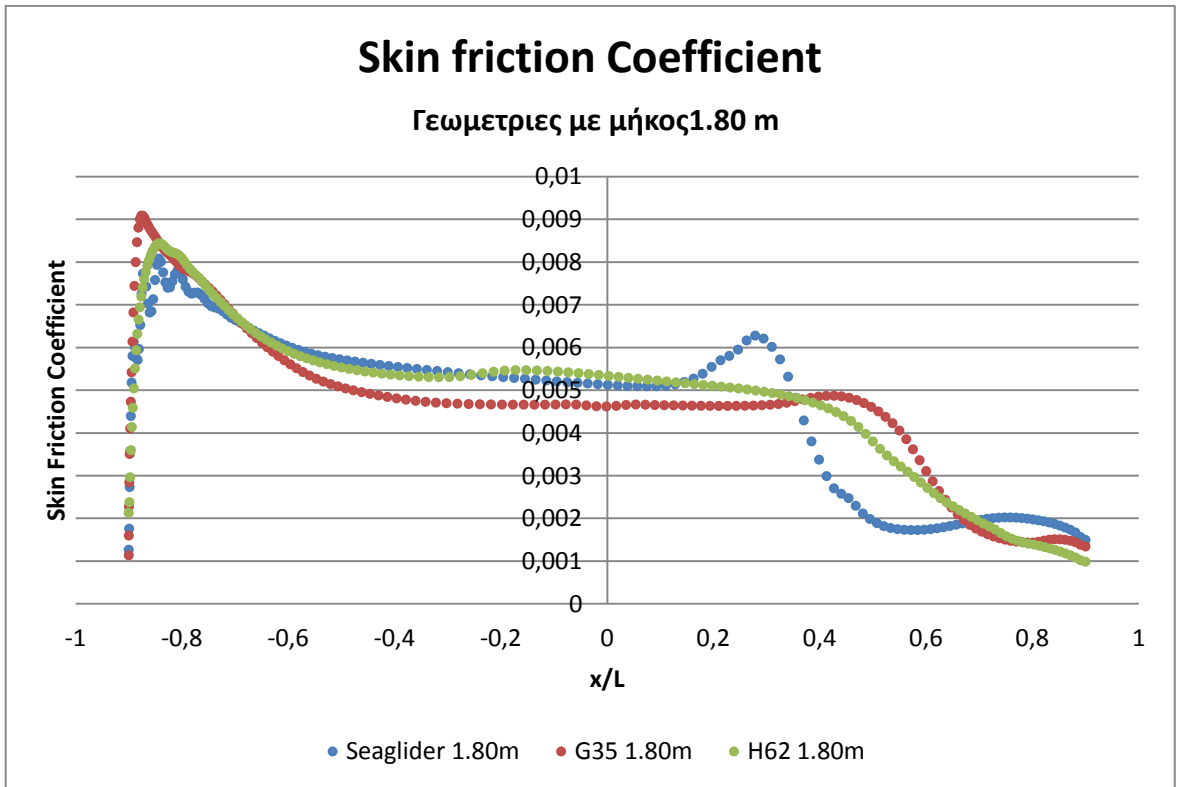
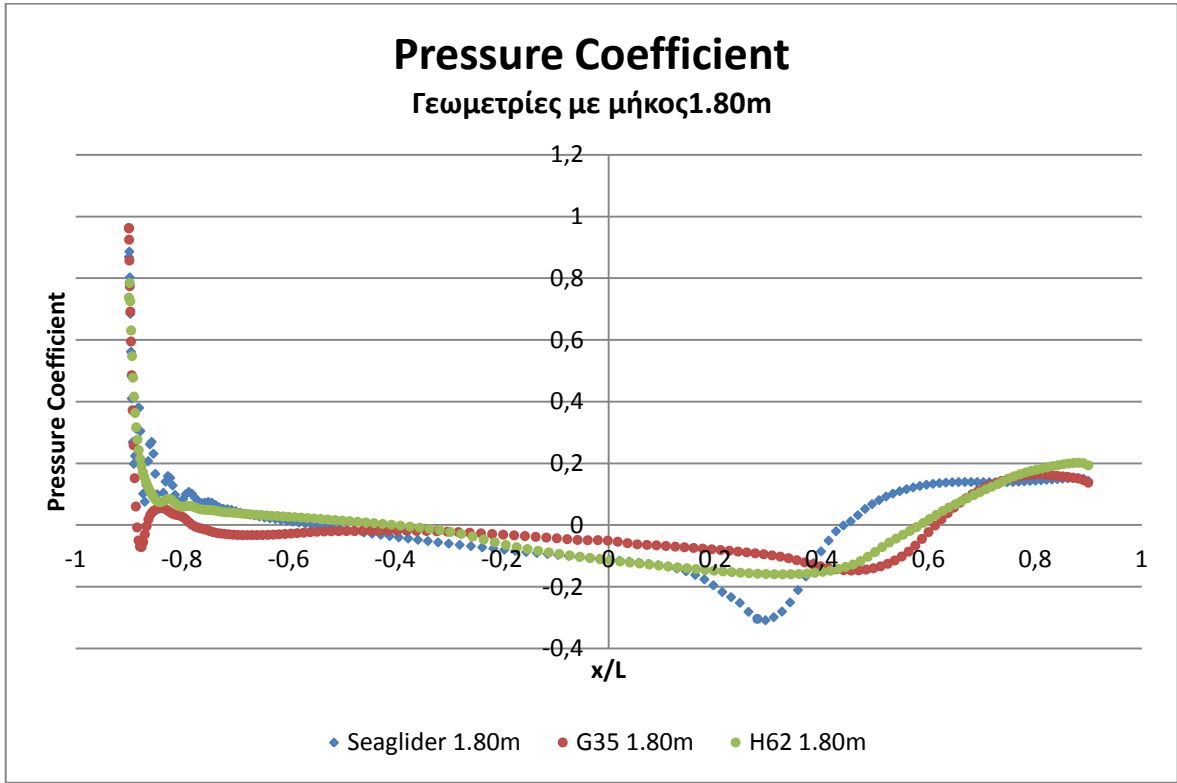


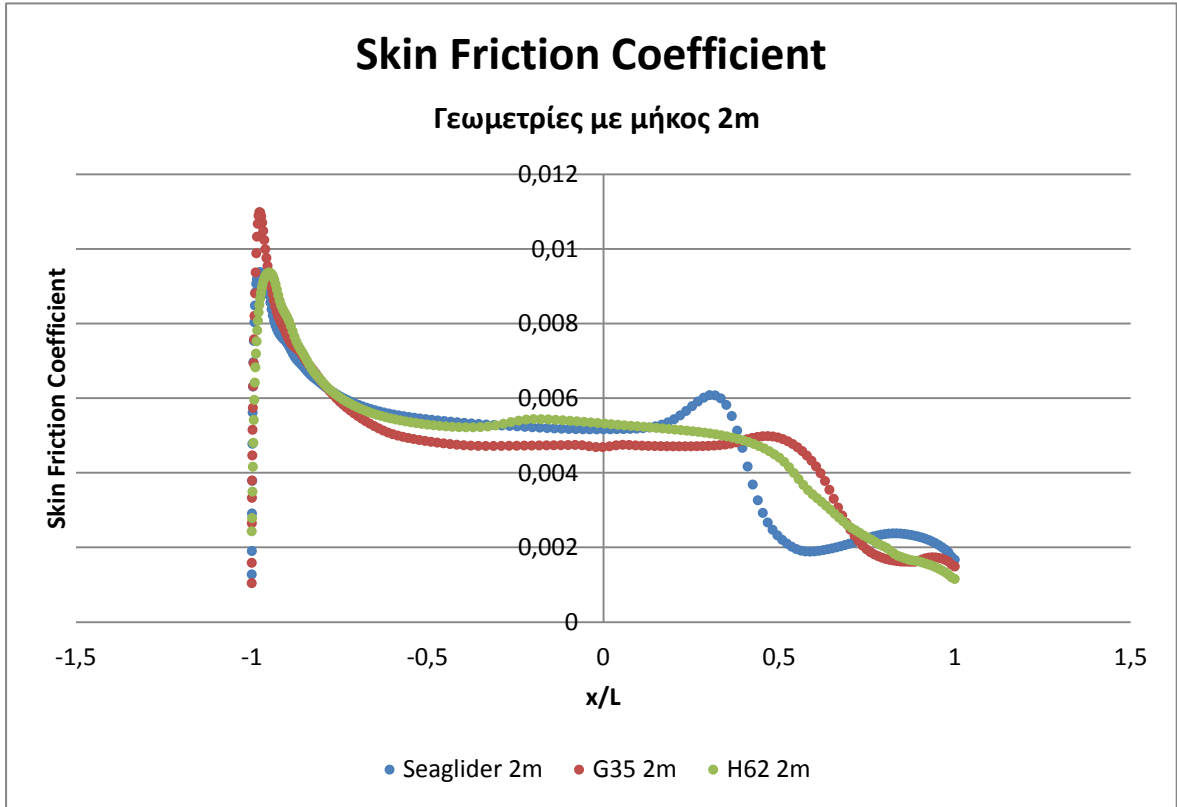
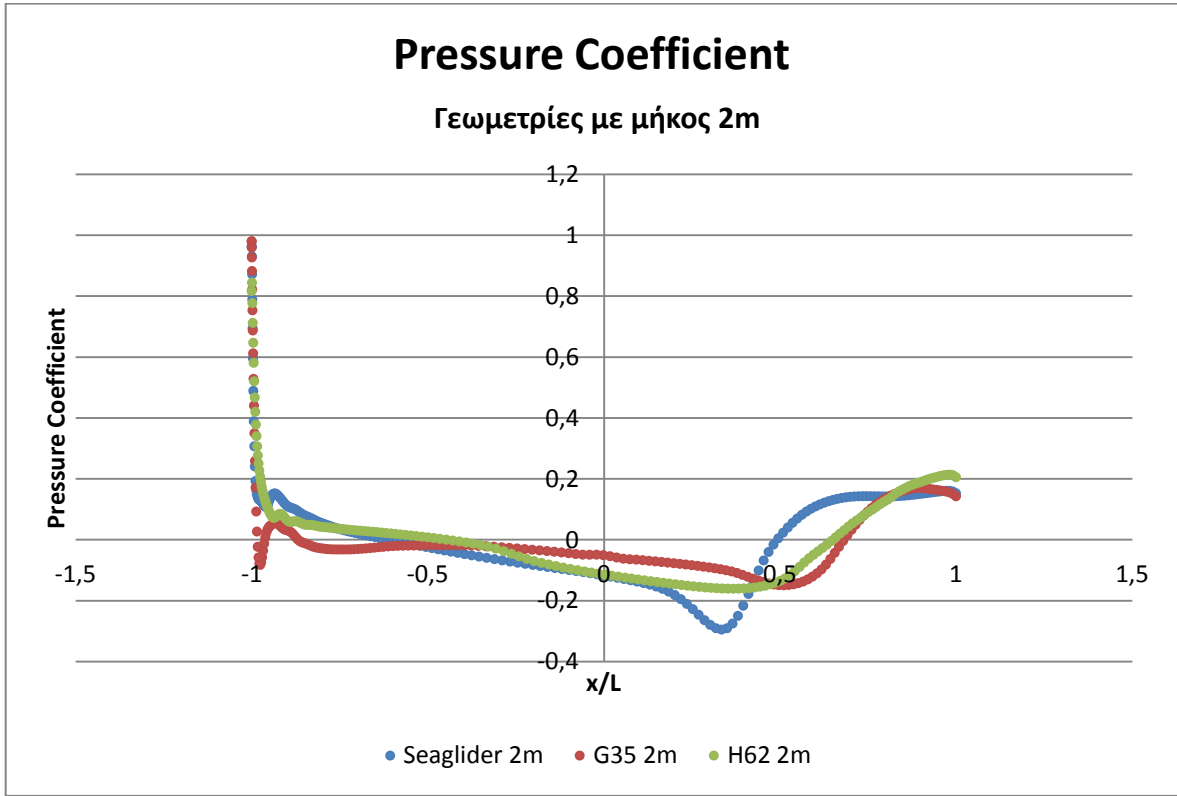
Γεωμετρίες που έχουν όγκο ίδιο με τον όγκο του seaglider των 1.80m

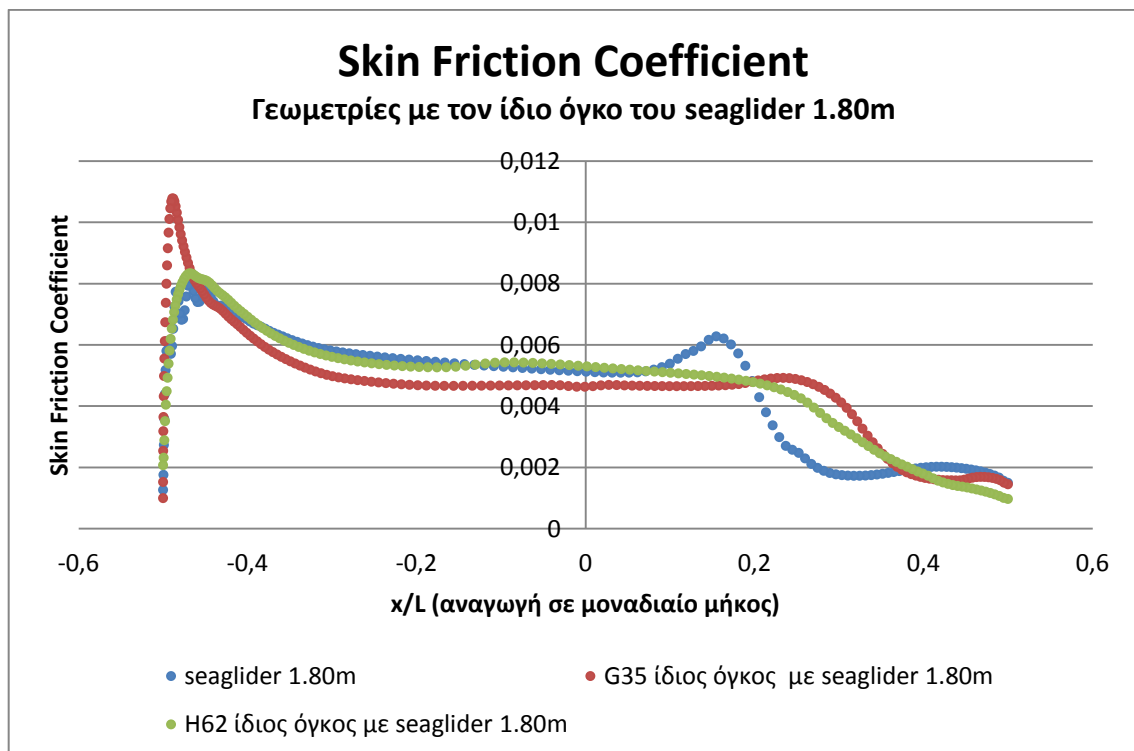
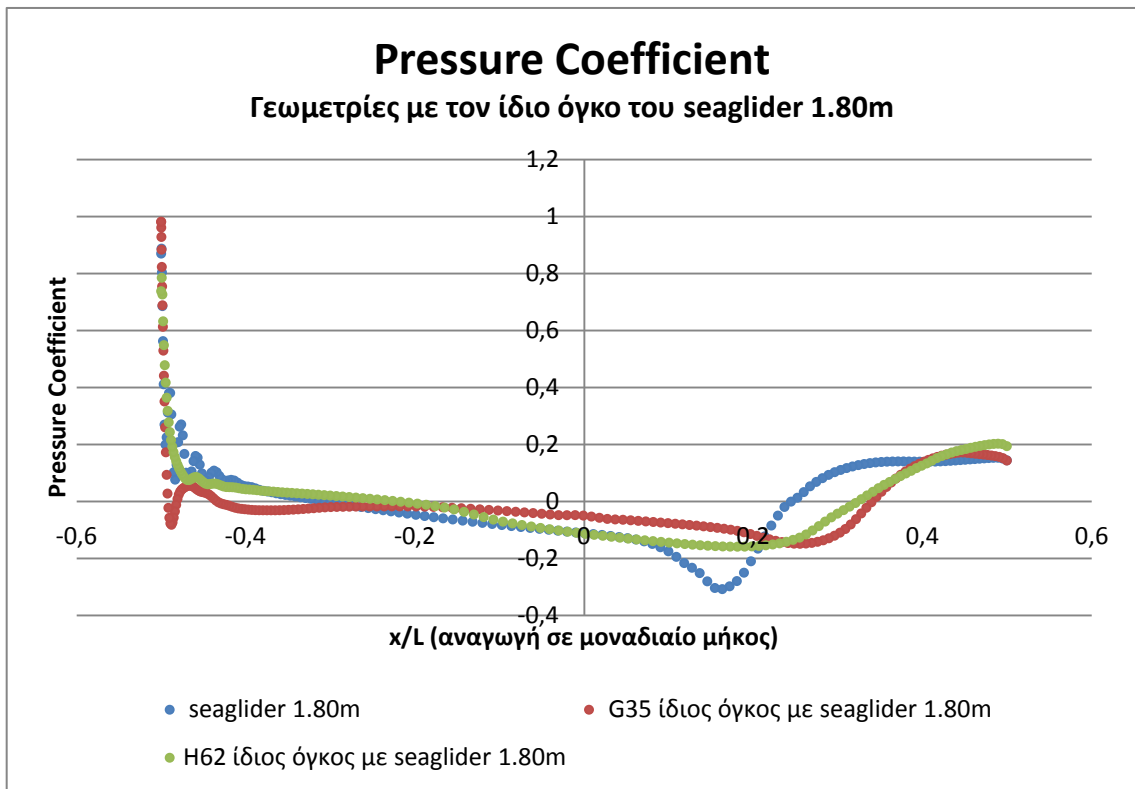


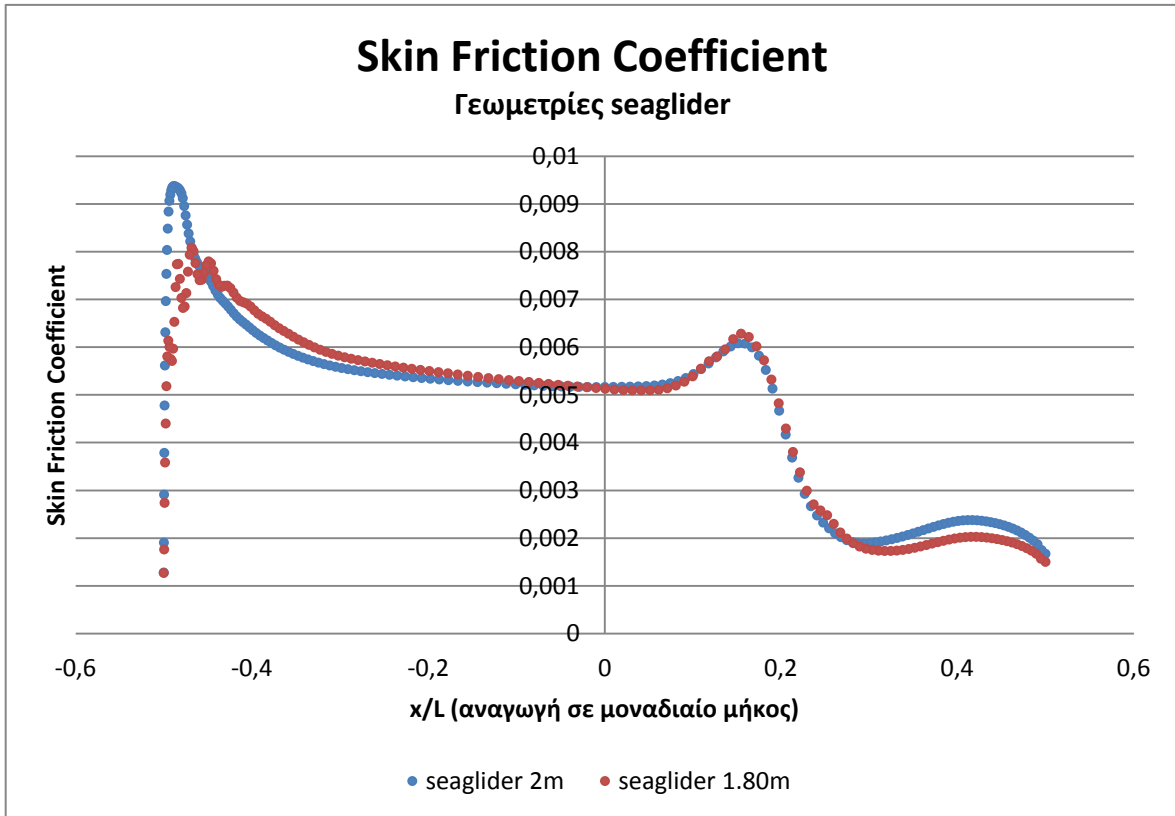
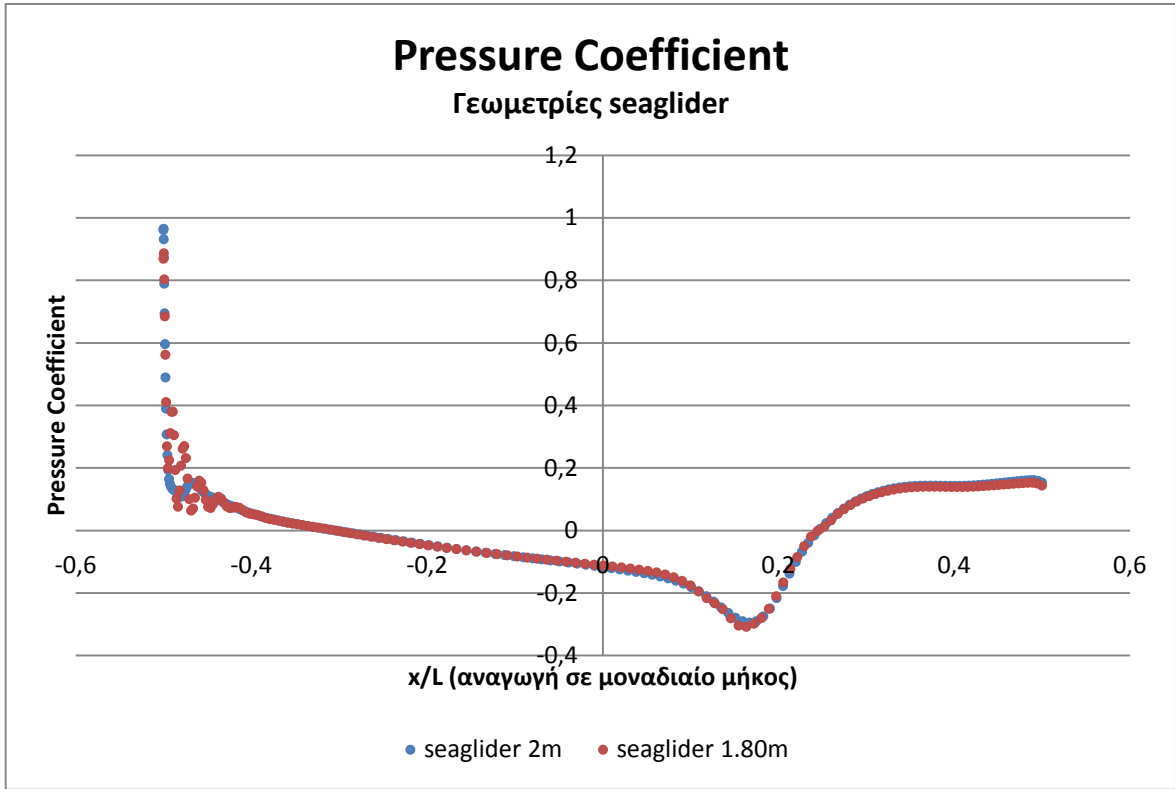
Γεωμετρίες που έχουν όγκο ίδιο με τον όγκο του seaglider των 2m









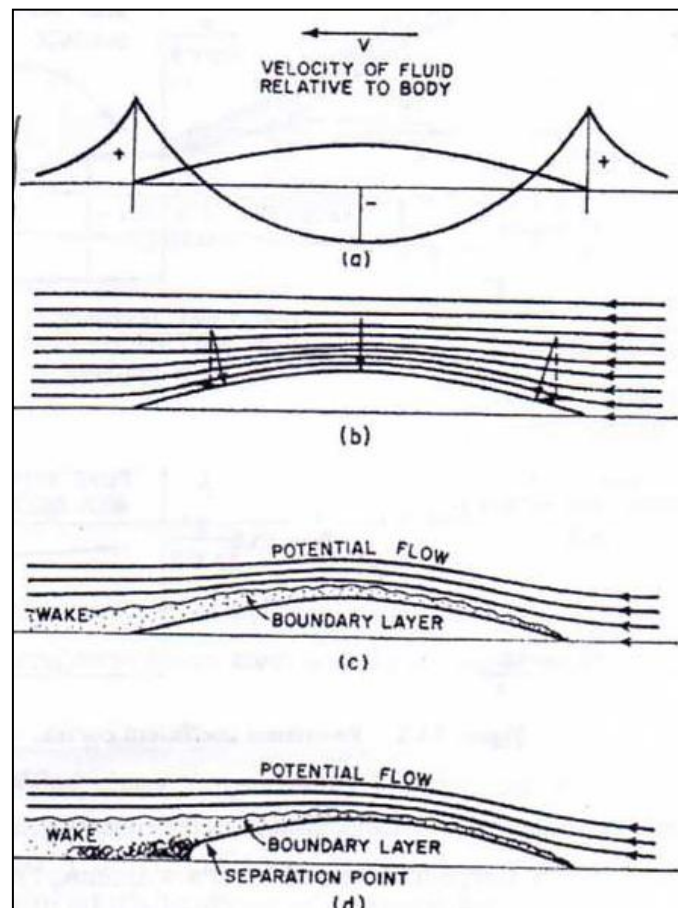


ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Όπως έχει αναφερθεί, οι δύο βασικοί παράγοντες της υποβρύχιας αντίστασης της γυμνής γάστρας είναι η αντίσταση λόγω πίεσης (η αντίσταση συνεκτικότητας) και η αντίσταση λόγω τριβής. Πιο αναλυτικά:

Αντίσταση πίεσης

Δημιουργείται από τις γραμμές ροής που αποκλίνουν κατάντι της ροής, δηλαδή στο πίσω μέρος του σώματος, αφού εκεί η γεωμετρία της επιφάνειας αλλάζει λόγω του ότι το οριακό στρώμα που δημιουργείται από την πλώρη προς την πρύμνη, μεγαλώνει προς την περιοχή της πρύμνης.



Στο παραπάνω σχήμα έχουμε μία οπτική άποψη των πιέσεων και του οριακού στρώματος που δημιουργείται.

Η αντίσταση πίεσης είναι η συνιστώσα της αντίστασης που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των κάθετων τάσεων (δυνάμεις πίεσης) και προβολή κατά την διεύθυνση της ροής.

Η αύξηση της πίεσης δίπλα στην "ουρά" του σώματος καθώς οι γραμμές ροής ανοίγουν, γίνονται δηλαδή πιο ευρείες, δεν είναι τόσο μεγάλη όσο θα ήταν χωρίς το οριακό στρώμα. Η διαφοροποίηση που υπάρχει μεταξύ πλώρης και πρύμνης δημιουργεί μία καθαρή δύναμη πίεσης στο υποβρύχιο που δρα σαν δύναμη αντίστασης.

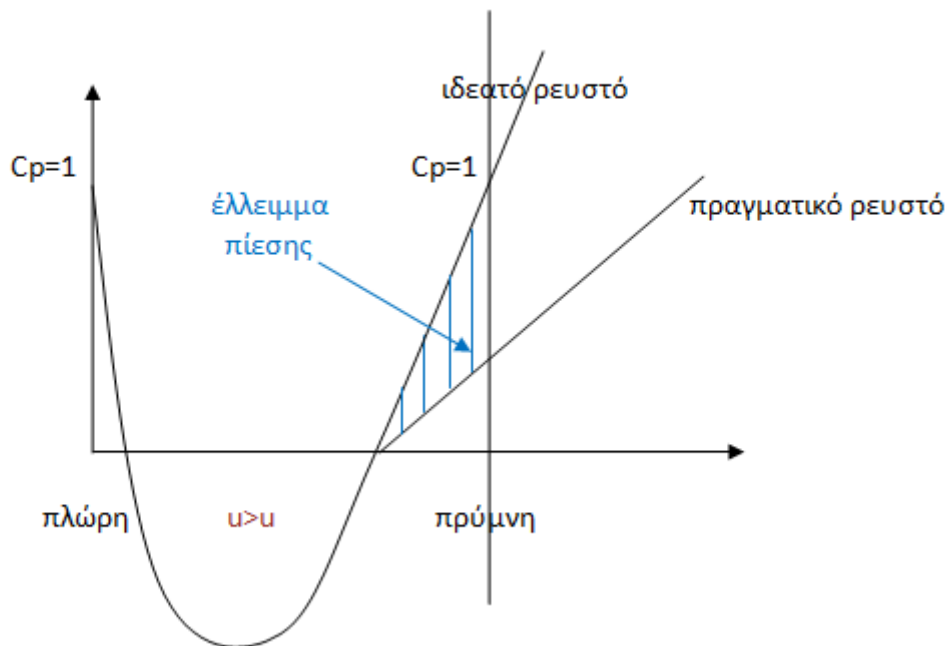
Η πίεση διαφέρει από σημείο σε σημείο της επιφάνειας και γίνεται μέγιστη στο σημείο ανακοπής της πλώρης, όπου οι γραμμές ροής χωρίζονται. Η πίεση ελαχιστοποιείται εκεί που οι ροϊκές γραμμές είναι πιο κοντά η μία στην άλλη και αυξάνεται εκεί που αυτές διασκορπίζονται (από εξίσωση Bernoulli). Σ' ένα μη συνεκτικό ρευστό, η πίεση στην πρύμνη θα είχε ακριβώς την ίδια τιμή με το σημείο ανακοπής στην πλώρη. Το ολοκλήρωμα όλων των πιέσεων που δρουν σε κάθε σημείο του σώματος θα προέκυπτε ίσο με μηδέν.

$$\oint p dA = 0$$

Αυτό μας εξηγεί αρκετά όσον αφορά στα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν (C_p-x/L) στα οποία φαίνεται ότι στην πλώρη έχουμε και την μέγιστη τιμή του συντελεστή, στη συνέχεια υφίσταται κάποιες αυξομειώσεις που σχετίζονται με την ταχύτητα και τις διαστάσεις του σώματος, έπειτα παρουσιάζει και πάλι ένα τοπικό μέγιστο στην πρύμνη το οποίο όμως δεν φτάνει εκείνο της πλώρης.

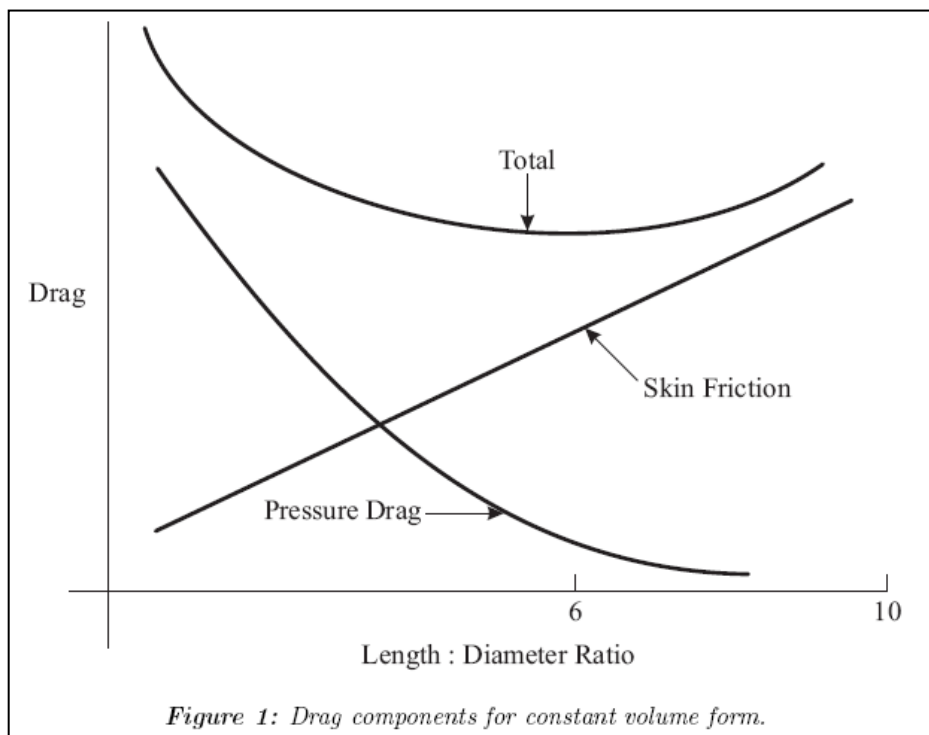
Λόγω συνεκτικότητας, η επαφή του σώματος με το περιβάλλον ρευστό, έχει σαν αποτέλεσμα να χάνεται ενέργεια η οποία μεταφράζεται με το ότι η πίεση δεν ανακάττει τελικά στην πρύμνη. Υπάρχουν βεβαίως κι άλλοι παράγοντες που οφείλονται για το γεγονός αυτό, όπως η γεωμετρία του σώματος, η ποιότητα και το πάχος του οριακού στρώματος που δημιουργείται.

Τέλος κάτι που παρατηρούμε και στα διαγράμματα στο σημείο ανακοπής έχουμε τον συντελεστή πίεσης (C_p) να ισούται με την μονάδα.



Αντίσταση τριβής

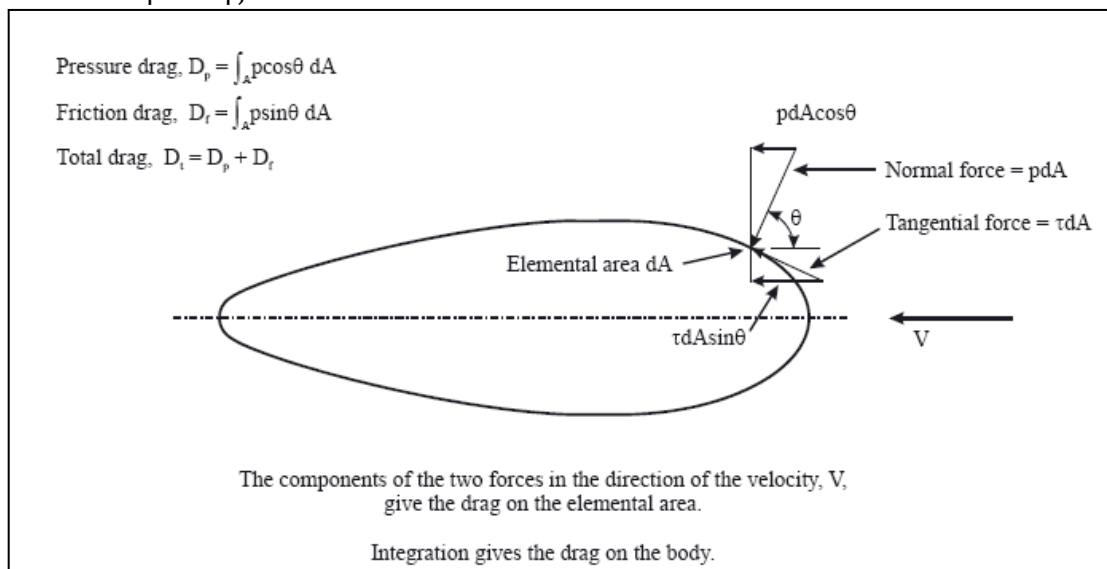
Η αντίσταση αυτή είναι η συνιστώσα της αντίστασης συνεκτικότητας που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των εφαπτομενικών τάσεων και προβολή κατά την κατεύθυνση της ροής. Είναι ανάλογη της βρεχόμενης επιφάνειας. Όσο μεγαλύτερη είναι η βρεχόμενη επιφάνεια, τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντίσταση τριβής. Συνεπώς, εάν ο εκτοπιζόμενος όγκος του υποβρυχίου αντιστοιχεί σε ένα μακρύ και λεπτόγραμμα σχήμα τότε η αντίσταση τριβής είναι μεγαλύτερη από ένα κοντότερο και μεγαλύτερου πλάτους υποβρύχιο του ίδιου όγκου το οποίο έχει μικρότερη βρεχόμενη επιφάνεια.



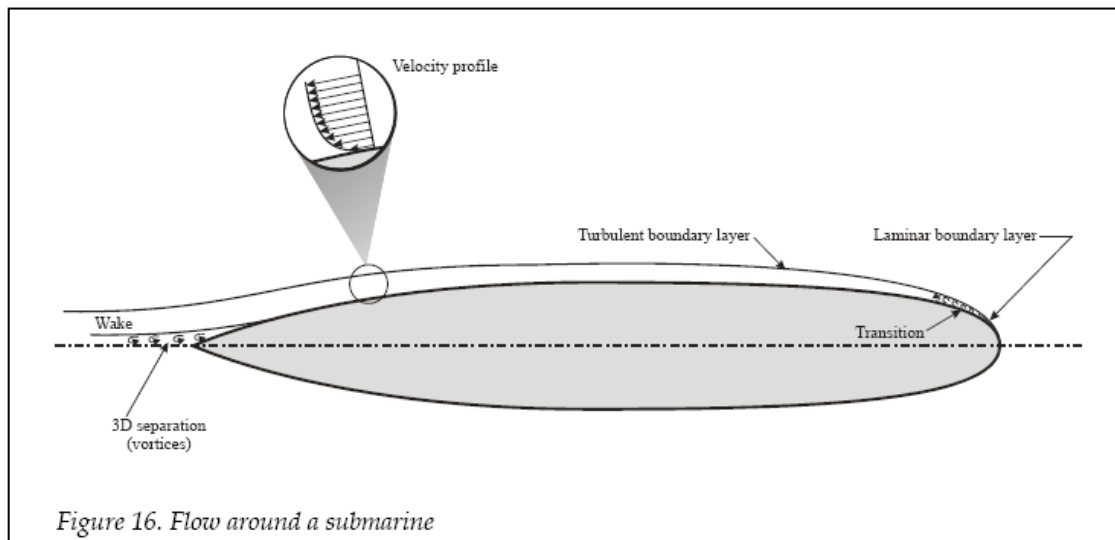
Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται οι μεταβολές των δύο συνιστωσών της αντίστασης.

Η ολική αντίσταση έχει ένα ελάχιστο στο L/D περίπου ίσο $6 \div 7$. Όπως και στις γεωμετρίες που θα εξετάσουμε αναλυτικότερα παρακάτω και στην τρισδιάστατη ανάλυση τους, ο λόγος τους L/D είναι ίσος με $(1.80/0.30 \div 1.86/0.30 \rightarrow 6 \div 6.2)$

Κάτι άλλο που παρατηρούμε στα διαγράμματα είναι η διαφορά τάξης μεγέθους μεταξύ του συντελεστή τριβής και του συντελεστή πίεσης σε κάθε περίπτωση. Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής τριβής είναι τρεις με τέσσερις τάξεις μικρότερος του αντίστοιχου συντελεστή πίεσης.

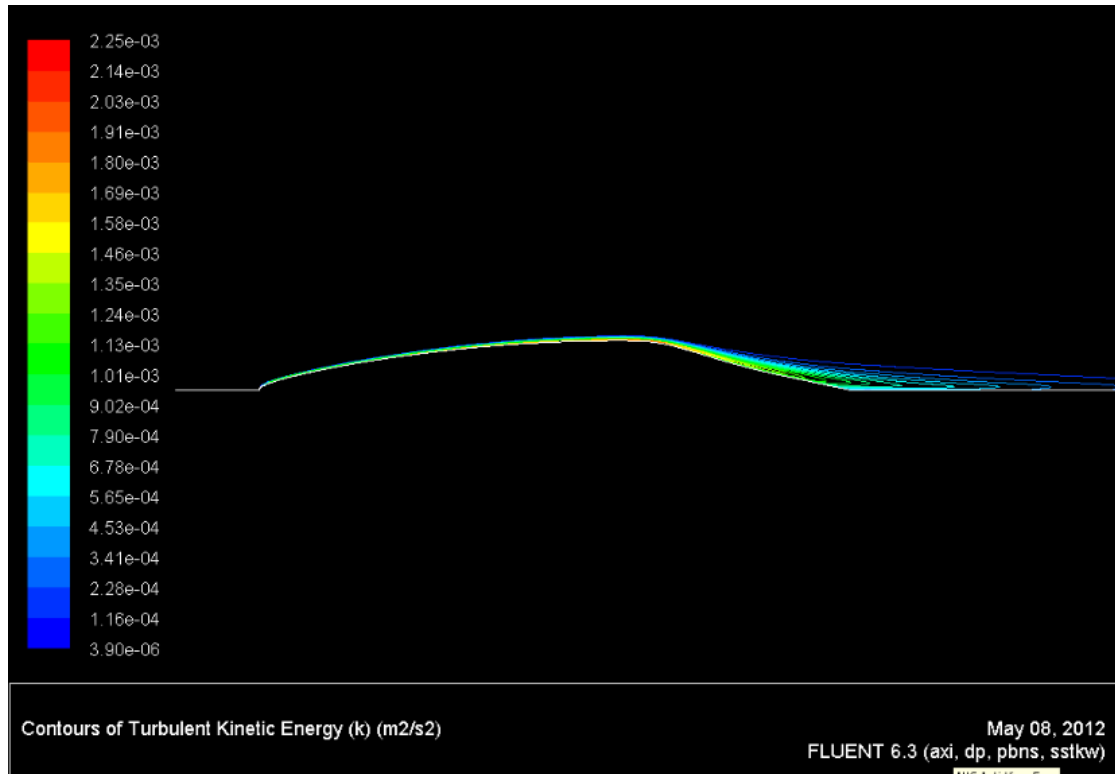


Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται η επίδραση της τριβής και της πίεσης στο σώμα καθώς και η συνισταμένη τους δύναμη.

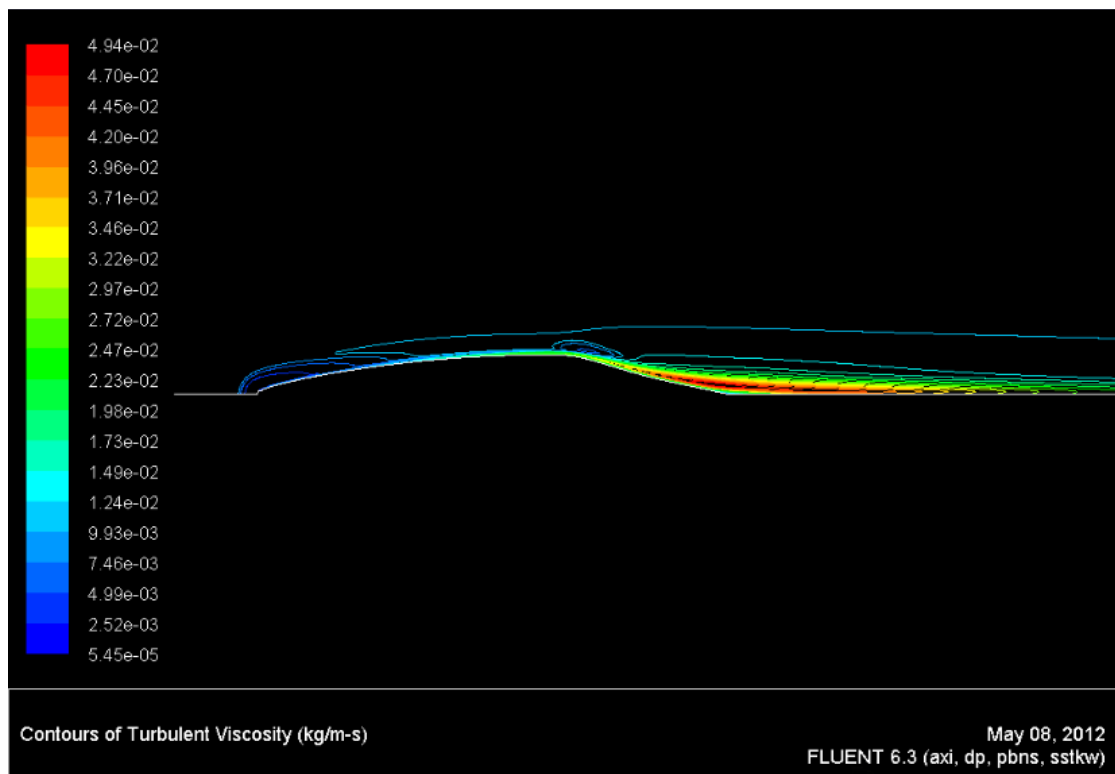


Το παραπάνω σχήμα φαίνεται το οριακό στρώμα που μεγαλώνει καθώς εκτείνεται γύρω από το υποβρύχιο. Η στρωτή ροή μπορεί να εμφανιστεί στην περιοχή της "μύτης" αλλά έπειτα θα μεταβεί στην τυρβώδη κατάσταση. Παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας στο οριακό στρώμα από μηδενική στην επιφάνεια, στην τιμή της ελεύθερης ροής σε κάποια απόσταση από την επιφάνεια. Εάν το στρωτό οριακό στρώμα σχηματίζεται σε αμβλεία γωνία του υποβρυχίου τότε μπορεί να προκύψει φουσαλίδα αποκόλλησης.

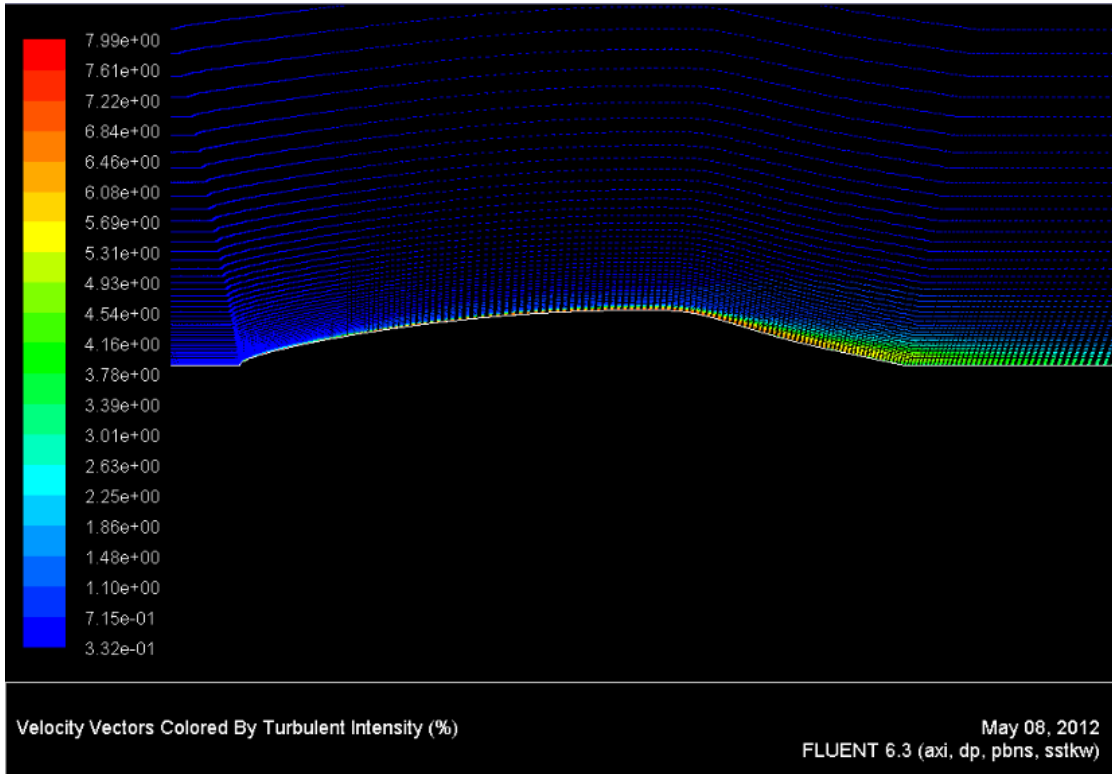
Οι γεωμετρίες που επιλέχθηκαν για περαιτέρω ανάλυση είναι η γεωμετρία του Seaglider (1.80m), η γεωμετρία (6) δηλαδή το σώμα G35 με μήκος 1.80m και τέλος η γεωμετρία (8), δηλαδή το σώμα H62 που έχει τον ίδιο όγκο με το Seaglider (1.80m). Η επιλογή των γεωμετριών έγινε με το κριτήριο της χαμηλότερης συνολικής αντίστασης. Το G35 που έχει ίδιο μήκος με το Seaglider (1.80m) έχει την χαμηλότερη αντίσταση απ' όλες τις γεωμετρίες που μελετήθηκαν, ενώ το H62 έχει την χαμηλότερη αντίσταση από τα σώματα με τον ίδιο όγκο του Seaglider.



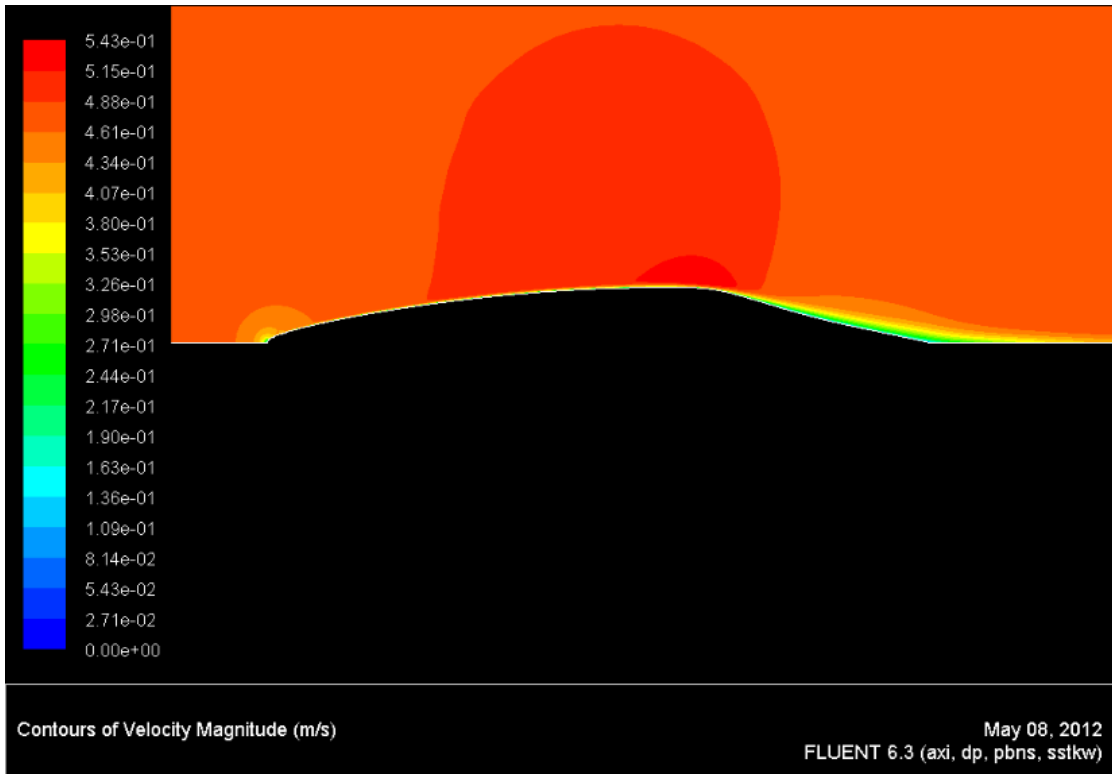
CONTOURS OF TURBULENT KINETIC ENERGY



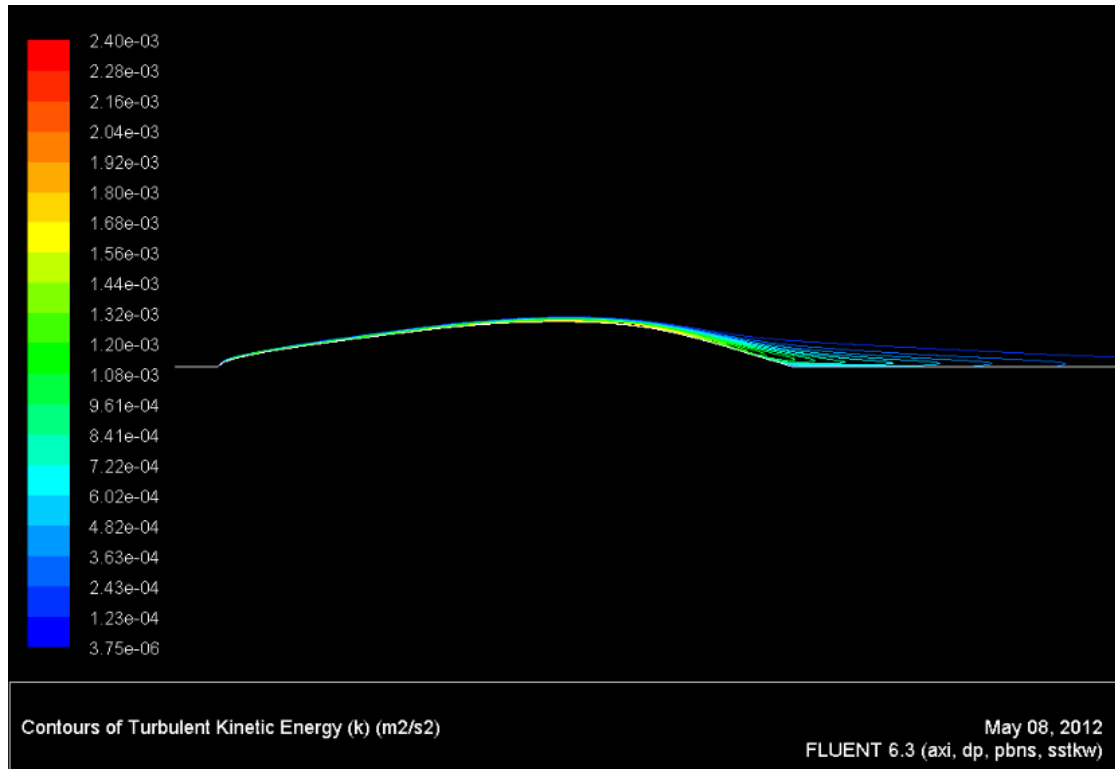
CONTOURS OF TURBULENT VISCOSITY



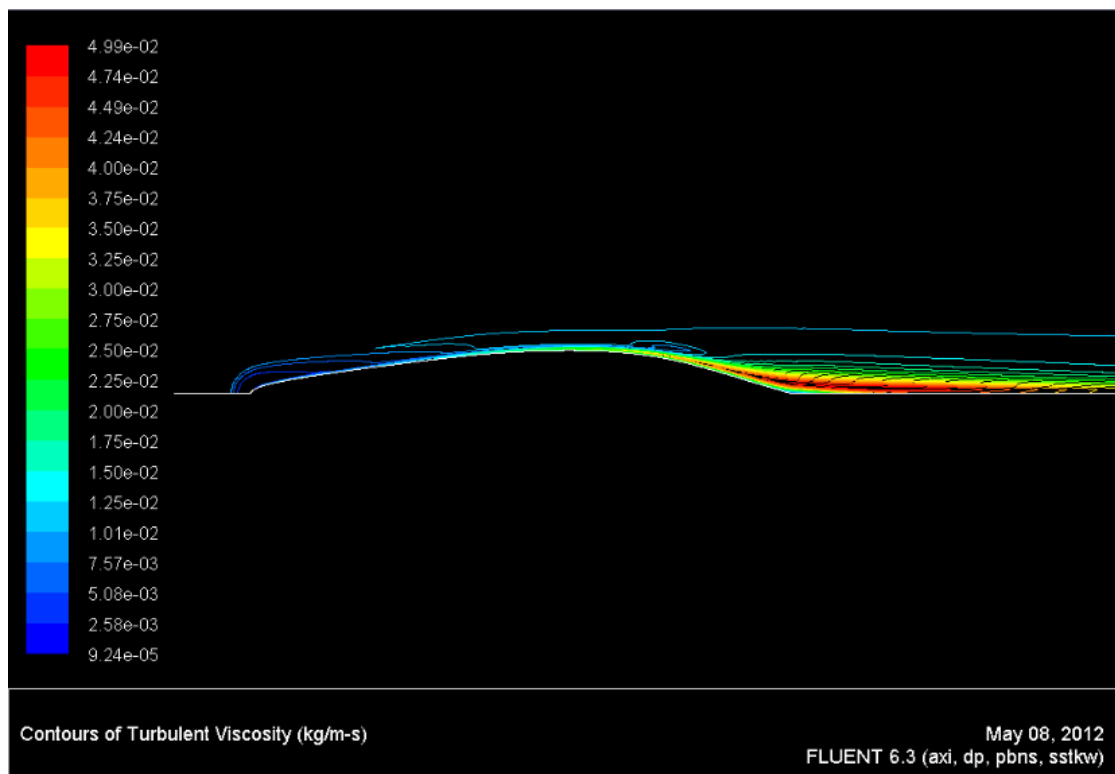
VELOCITY VECTORS



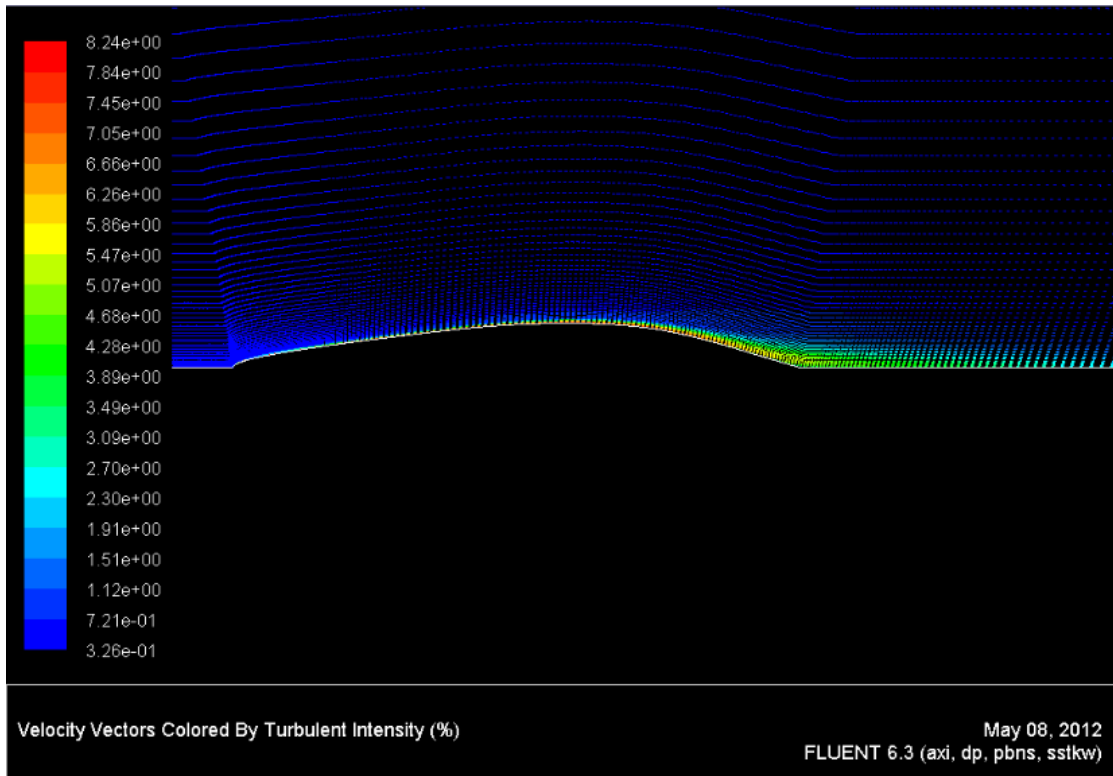
CONTOURS OF VELOCITY MAGNITUDE



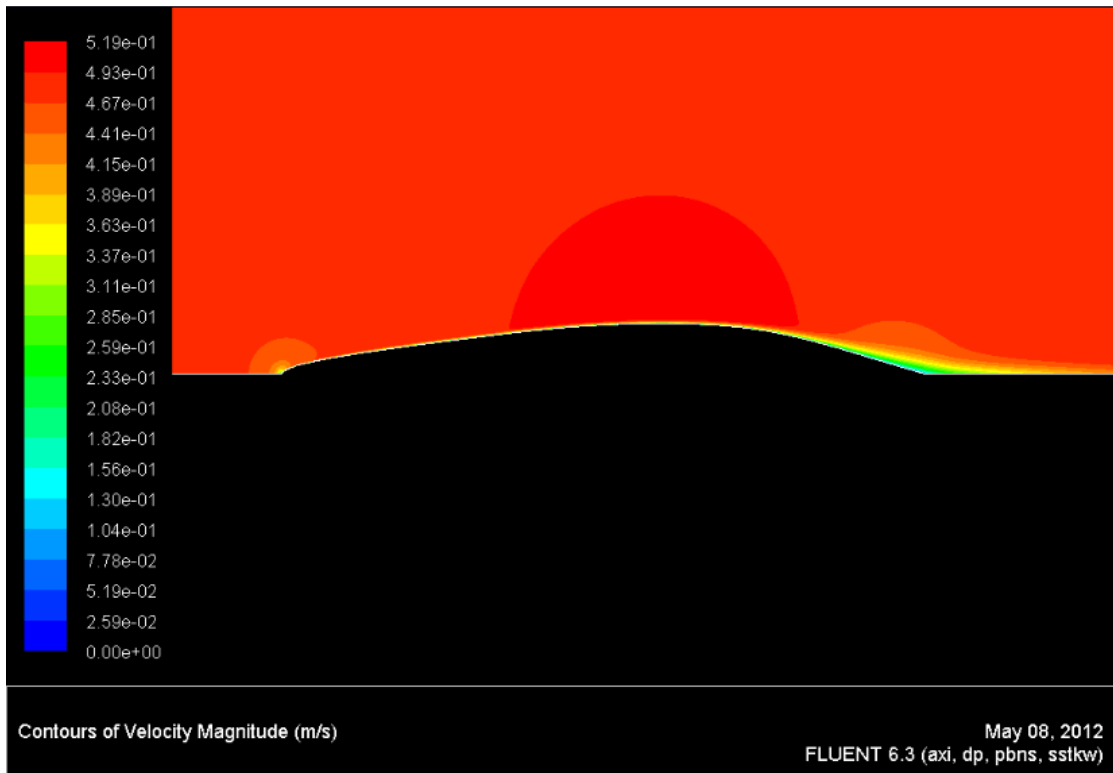
CONTOURS OF TURBULENT KINETIC ENERGY



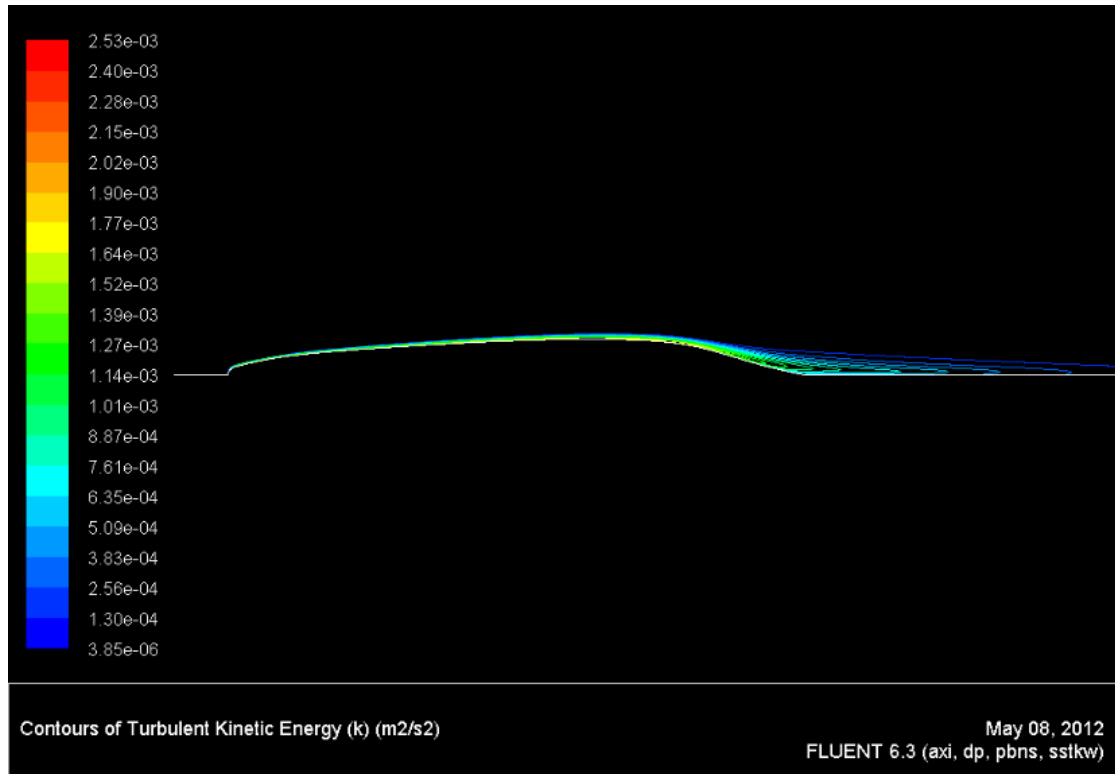
CONTOURS OF TURBULENT VISCOSITY



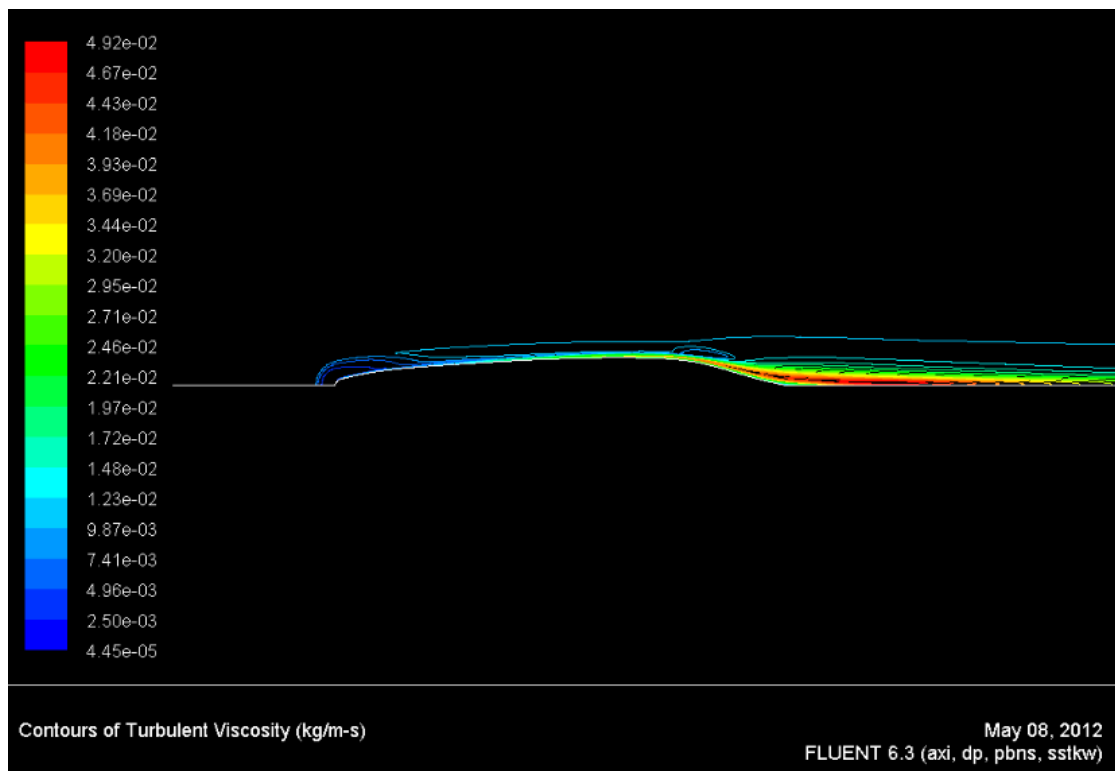
VELOCITY VECTORS



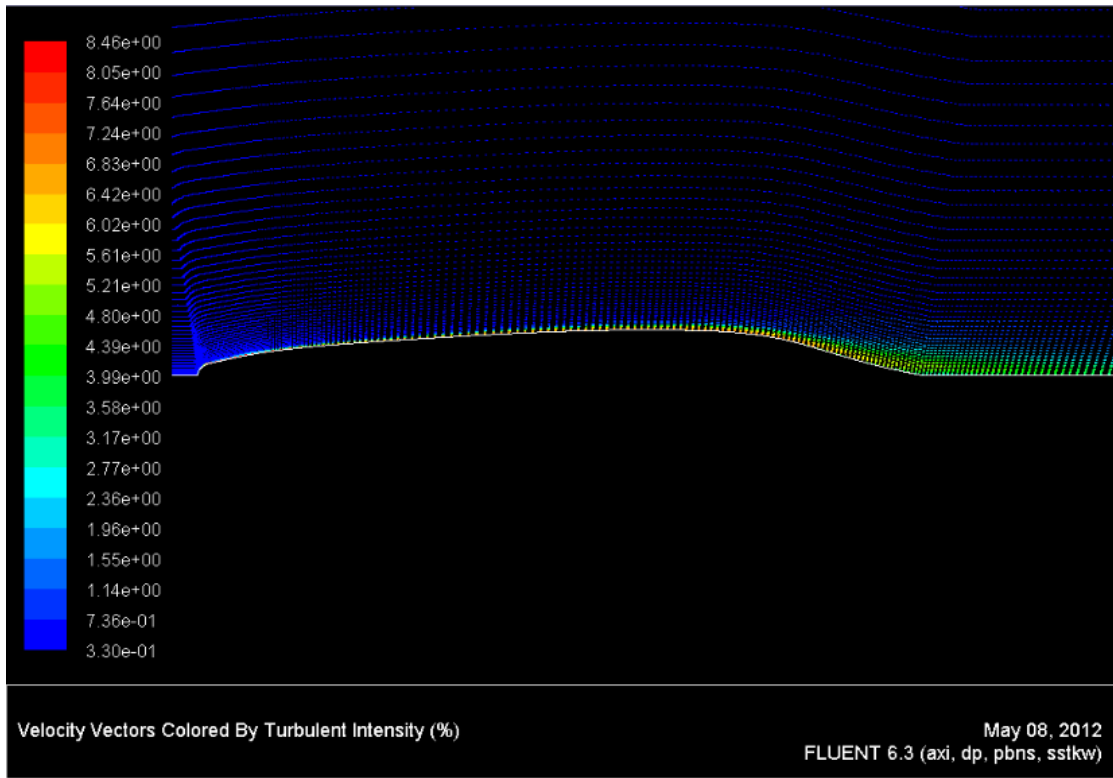
CONTOURS OF VELOCITY MAGNITUDE



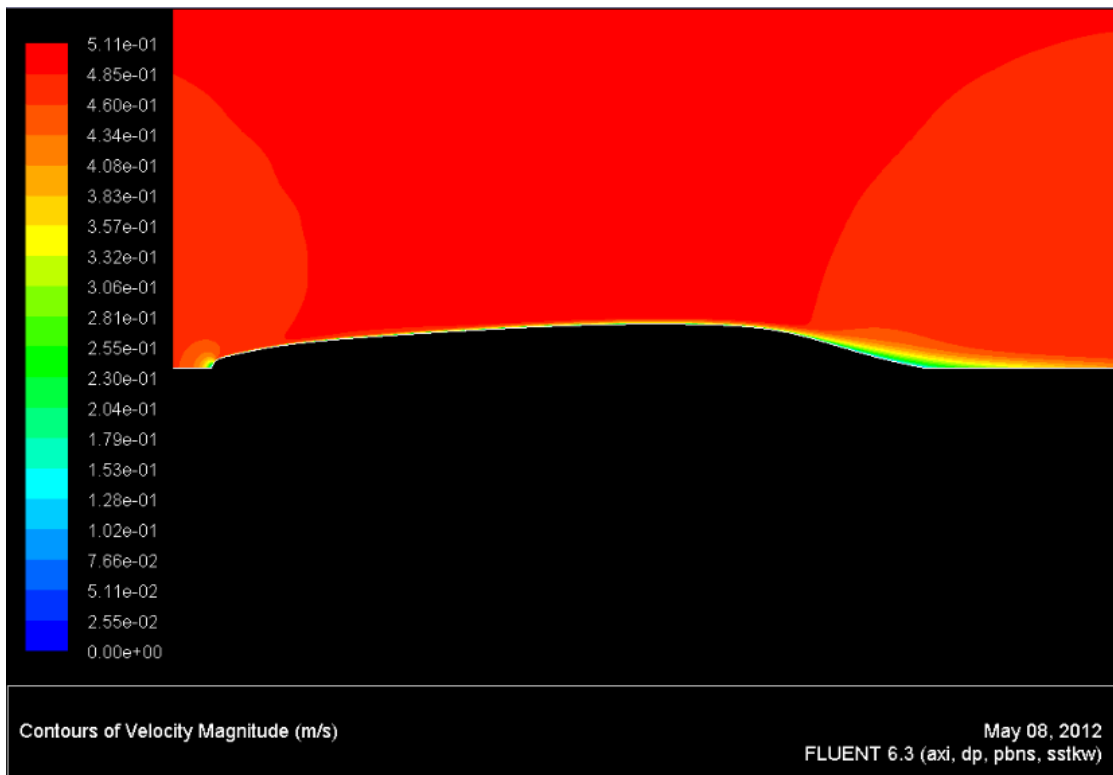
CONTOURS OF TURBULENT KINETIC ENERGY



CONTOURS OF TURBULENT VISCOSITY



VELOCITY VECTORS



CONTOURS OF VELOCITY MAGNITUDE

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των τρισδιάστατων μοντέλων, θα αναπτυχθεί η θεωρία και το σκεπτικό πάνω στο οποίο βασίστηκε η ανάλυση των αποτελεσμάτων.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΩΣΗ

Δυναμική άνωση (lift) λέγεται η συνιστώσα της δύναμης πάνω στο αντικείμενο που είναι κάθετη προς την ροή. Μόνιμη δυναμική άνωση αναπτύσσεται μόνο σε μη συμμετρικά αντικείμενα ή σε συμμετρικά αντικείμενα που έχουν κλίση ως προς την ροή. Η δυναμική άνωση είναι μερικές φορές ανεπιθύμητη, όπως για παράδειγμα στα αγωνιστικά αυτοκίνητα, τα οποία κινδυνεύουν να απογειωθούν εξ αιτίας της. Σε πολλές εφαρμογές όμως η δυναμική άνωση χρησιμοποιείται για ανύψωση (αεροπλάνα), πλοήγηση (πηδάλια) κλπ. Υπάρχουν γι' αυτό τον λόγο ειδικά σχεδιασμένες κατασκευές, οι υδροτομές, που αναπτύσσουν σημαντική δυναμική άνωση ενώ παρουσιάζουν μικρή αντίσταση. Η χρήση των υδροτομών σε υδροδυναμικές και αεροδυναμικές εφαρμογές είναι ευρύτατη.

Ο συντελεστής άνωσης της υδροτομής C_L ορίζεται ως εξής:

$$C_L = \frac{L}{1/2\rho U^2 A} \quad (1)$$

όπου L είναι η δυναμική άνωση, ρ η πυκνότητα του ρευστού, U η ταχύτητα του ρευστού ως προς την υδροτομή, και A η επιφάνεια της υδροτομής.

Για λόγους σύγκρισης ο συντελεστής αντίστασης της υδροτομής ορίζεται επίσης με βάση την επιφάνεια A , δηλαδή:

$$C_D = \frac{D}{1/2\rho U^2 A} \quad (2)$$

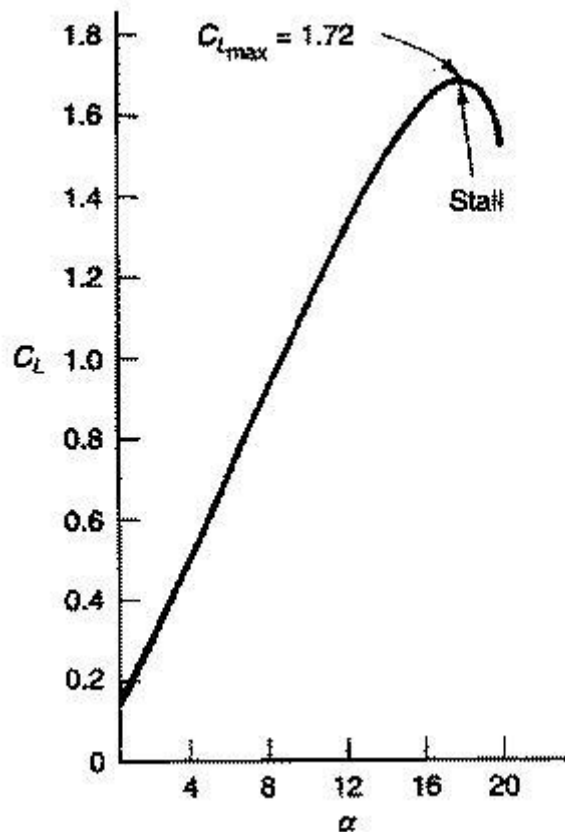
Γενικά επιδιώκουμε ο λόγος C_L / C_D να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερος.

Η άνωση δημιουργείται από την κυρτότητα προς τα άνω της υδροτομής (αν η υδροτομή είναι μη συμμετρική) και από την γωνία κλίσης α της υδροτομής ως προς την εξωτερική ροή. Η τελευταία λέγεται γωνία πρόσπτωσης. Η καμπυλότητα και η γωνία πρόσπτωσης προκαλούν υποπίεση στην άνω πλευρά της υδροτομής, λόγω τοπικής επιτάχυνσης της ροής, και υπερπίεση στην κάτω πλευρά της υδροτομής λόγω τοπικής επιβράδυνσης της ροής. Η διαφορά πίεσης ανάμεσα στην κάτω και στην άνω πλευρά της υδροτομής διατηρείται (με την προϋπόθεση ότι η ροή δεν αποκολλάται) μέχρι την ακμή εκφυγής και δημιουργεί την δυναμική άνωση. Λόγω της επιτάχυνσης της ροής στην άνω πλευρά και στην επιβράδυνση της ροής στην κάτω πλευρά, η ακόλουθη ποσότητα Γ έχει μη μηδενική τιμή.

$$\Gamma = \oint u_i dl$$

όπου u_i είναι η συνιστώσα της ταχύτητας παράλληλης προς την υδροτομή. Η ολοκλήρωση γίνεται σε επίπεδο παράλληλο προς τον άξονα των x γύρω από την υδροτομή εκεί που τελειώνει το οριακό της στρώμα. Η ποσότητα Γ είναι ως γνωστόν η κυκλοφορία γύρω από την υδροτομή.

Αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης προκαλεί αύξηση του συντελεστή άνωσης. Αυτό δεν συνεχίζεται επ' άπειρο, γιατί πάνω από μια ορισμένη γωνία πρόσπτωσης (τυπικά γύρω στις 15 με 20 μοίρες ανάλογα με την υδροτομή) επέρχεται αποκόλληση του οριακού στρώματος στην άνω πλευρά της υδροτομής κοντά στην ακμή πρόσπτωσης. Η αποκόλληση του οριακού στρώματος έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της άνωσης και την αύξηση της αντίστασης. Το φαινόμενο λέγεται stall. Η μέγιστη δυνατή άνωση παρατηρείται κατά συνέπεια λίγο πριν την εμφάνιση του stall. Η μεταβολή του συντελεστή άνωσης σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης α απεικονίζεται στην εικόνα που ακολουθεί για μια τυπική υδροτομή.



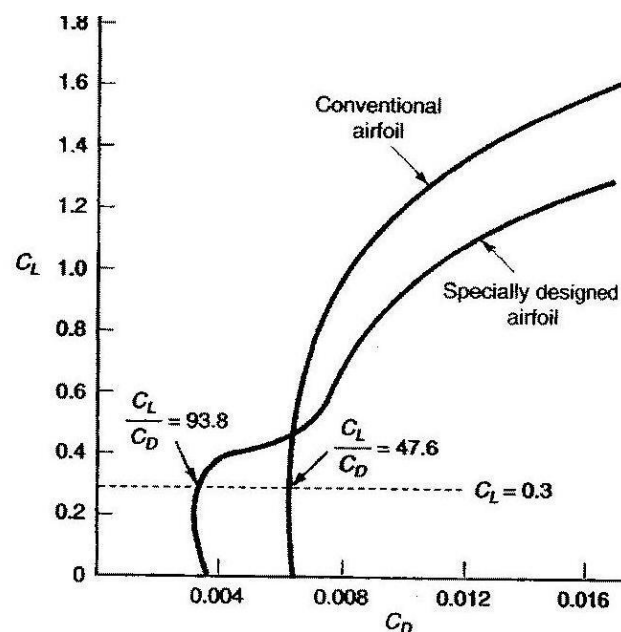
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΩΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΥΠΙΚΗ ΥΔΡΟΤΟΜΗ (NACA 23015) ΜΕ ΑΡΙΘΜΟ REYNOLDS 9×10^6

Στην περιοχή καλής λειτουργίας της υδροτομής το οριακό στρώμα παραμένει λεπτό, και ο ομόρρους παραμένει επίσης λεπτός. Η ροή είναι τότε τυρβώδης μόνο σε μια πολύ μικρή περιοχή του πεδίου ροής γύρω και πίσω από το σώμα, και η δυναμική άνωση μπορεί τότε να υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια χρησιμοποιώντας θεωρία αστρόβιλης ροής.

Η αντίσταση της υδροτομής οφείλεται εν μέρει σε τριβή, και εν μέρει στις δίνες ακροπτερυγίων που σχηματίζονται στα δύο της άκρα. Η αντίσταση λόγω των δινών

των ακροπτερυγίων λέγεται «επαγόμενη αντίσταση». Ο σχηματισμός των δινών ακροπτερυγίων είναι αναπόφευκτη συνέπεια της διαφοράς πίεσης ανάμεσα στην κάτω και στην άνω πλευρά της υδροτομής, η οποία διαφορά προκαλεί ροή του ρευστού γύρω από τα δύο άκρα. Η ροή αυτή όταν φτάσει στο άκρο εκφυγής της υδροτομής μετατρέπεται σε στροβιλισμό γύρω από άξονα παράλληλο προς την ταχύτητα της υδροτομής. Οι δίνες αυτές διατηρούνται σε μεγάλη απόσταση πίσω από την υδροτομή και απαιτούν σημαντικό ποσό ενέργειας, που προσφέρεται από την επαγόμενη αντίσταση. Η ροή γύρω από τα άκρα της υδροτομής αυξάνει όταν αυξάνεται η διαφορά πίεσης ανάμεσα στην κάτω και στην άνω πλευρά της υδροτομής, δηλαδή όταν αυξάνεται η άνωση στην υδροτομή. Κατά συνέπεια, αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης προκαλεί αύξηση όχι μόνο της άνωσης, που είναι το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα, αλλά και της επαγόμενης αντίστασης της υδροτομής, που είναι ανεπιθύμητη.

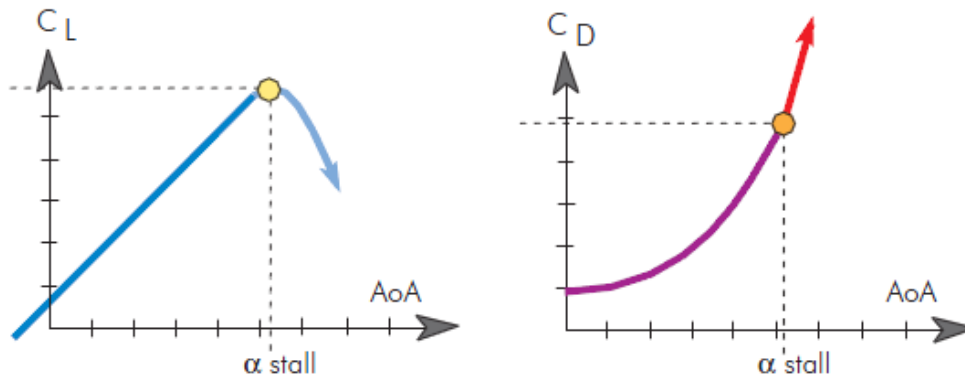
Για να εκτιμηθεί καλύτερα η επίδοση της υδροτομής μεταχειριζόμαστε γραφήματα όπου οι δύο άξονες αντιστοιχούν στον συντελεστή αντίστασης και τον συντελεστή άνωσης. Ένα τέτοιο γράφημα φαίνεται παρακάτω:



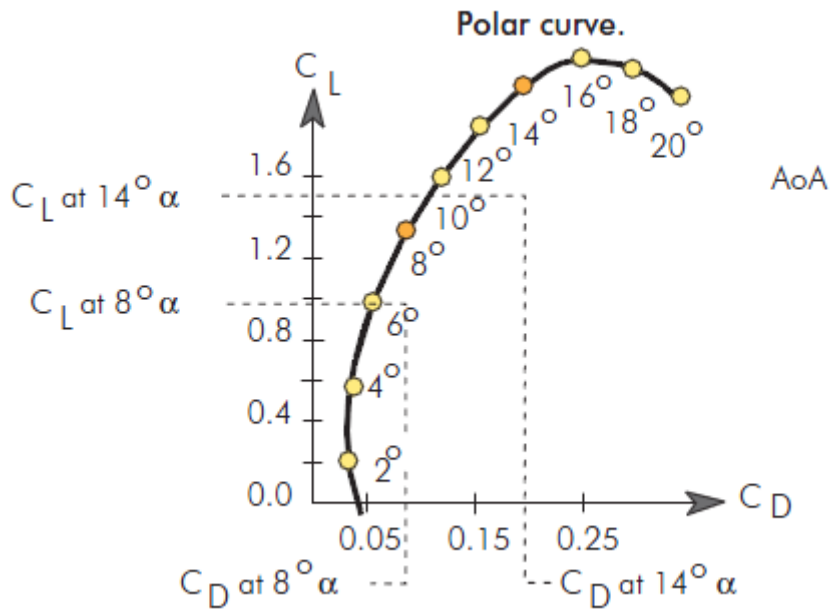
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΥΠΙΚΗ ΥΔΡΟΤΟΜΗ (NACA 23015) ΜΕ ΑΡΙΘΜΟ REYNOLDS 9×10^6 (Η ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΗΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ΣΑΝ "CONVENTIONAL AIRFOIL" ΚΑΙ ΓΙΑ ΕΙΔΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΕΝΗ ΥΔΡΟΤΟΜΗ (ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΗΜΕΙΩΝΕΤΑΙ ΣΑΝ "SPECIALLY DESIGNED AIRFOIL")

Παρόμοια με τα παραπάνω μπορούμε να αναλύσουμε και την πτήση ενός αεροπλάνου ή την κατάδυση/ανάδυση ενός υδροπτέρου, με διαγράμματα όπως Αντίσταση -Γωνία πρόσπτωσης (Drag- angle of attack ή C_D - angle of attack), Άνωσης-Γωνία πρόσπτωσης (Lift- angle of attack ή C_L -angle of attack), Λόγος L/D -Γωνία πρόσπτωσης. Να σημειωθεί ότι είτε χρησιμοποιήσουμε τους συντελεστές των δυνάμεων C_D και C_L είτε τις δυνάμεις D , L συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι ακριβώς τα ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

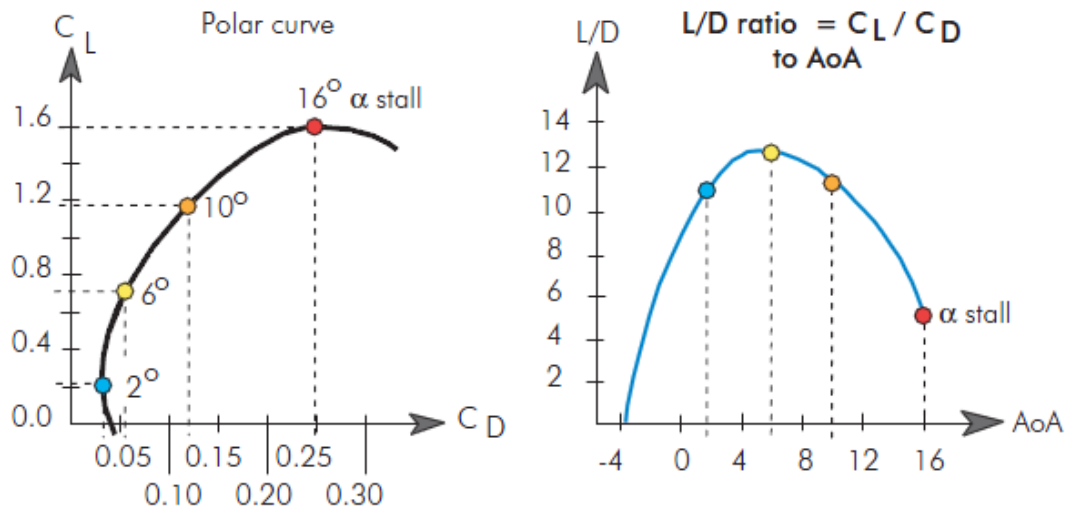
Στην παρούσα εργασία θα γίνει προσπάθεια να δημιουργηθούν τέτοια διαγράμματα για τα υδρόπτερα που θα μελετηθούν.



ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΕΤΑΙ Η ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ C_L VS ANGLE OF ATTACK ΚΑΙ C_D VS ANGLE OF ATTACK



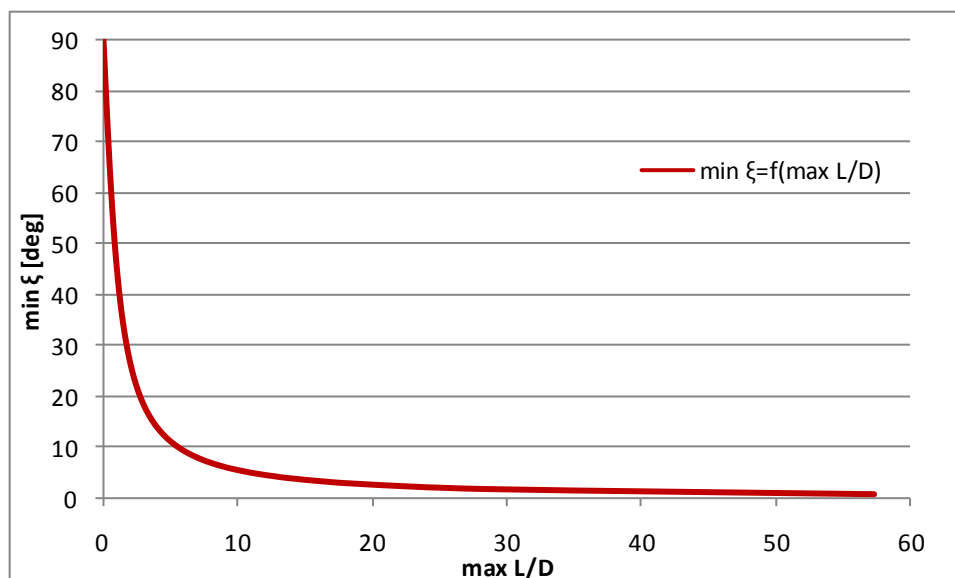
ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ POLAR CURVE



ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ POLAR CURVE ΜΠΟΡΟΥΜΕ ΝΑ ΟΔΗΓΗΘΟΥΜΕ ΣΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ L/D VS ANGLE OF ATTACK.

ΓΩΝΙΑ ΙΧΝΟΥΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (GLIDE ANGLE)

Η ελάχιστη δυνατή γωνία ίχνους ολίσθησης που αντιστοιχεί στο μέγιστο λόγο άνωσης/ αντίστασης όπως αυτή προκύπτει από τις εξισώσεις ισορροπίας λόγω των οποίων υπενθυμίζουμε ότι πρέπει να είναι $\xi_{eq} = \tan^{-1}\left(\frac{D_{eq}}{L_{eq}}\right)$. Αυτό σημαίνει ότι κάθε γωνία ίχνους ολίσθησης αντιστοιχεί σε ένα δεδομένο λόγο λειτουργίας άνωσης/ αντίστασης. Ο μέγιστος λόγος άνωσης/ αντίστασης καθορίζεται από τα πτερύγια και τον σχεδιασμό του οχήματος. Η επιλογή μίας σταθερής γωνίας ίχνους ολίσθησης καθορίζει και το λόγο L/D που απαιτείται σε μία σταθερή διαδρομή. Διαδρομές περισσότερο απότομες από 10 μοίρες απαιτούν ένα λειτουργικό λόγο L/D κάτω από 5 το οποίο είναι πολύ χαμηλό για την περίπτωση αεροπλάνων και ανεμοπτέρων. Έτσι αν είναι επιθυμητή μια πολύ μικρή γωνία ίχνους ολίσθησης, θα πρέπει να σχεδιαστεί ένα υδρόπτερο με πολύ μεγάλο λόγο L/D.



ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΓΩΝΙΑ ΙΧΝΟΥΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΛΟΓΟ ΑΝΩΣΗΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Στην παρούσα εργασία λοιπόν, επιτυγχάνεται ο σχεδιασμός ενός υδροπτερού ο οποίος να έχει μεγαλύτερο λόγο L/D σε σχέση με το Seaglider το οποίο είναι σχεδιασμένο για μεγάλα βάθη και απότομες γωνίες ολίσθησης ώστε να έχει τη δυνατότητα να πλεύσει και με λιγότερο απότομες γωνίες, χωρίς να χάσει το κύριο χαρακτηριστικό λειτουργίας σε βαθιά νερά. Σκοπός είναι δηλαδή να μεγαλώσει ο λόγος L/D και ταυτόχρονα να μειώσουμε την απόλυτη τιμή της γωνίας ξ , όσο το δυνατόν, με βάση τον περιορισμό της λειτουργίας σε βαθιά νερά.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Μετά την μελέτη των δισδιάστατων διατομών διάφορων γεωμετριών πιθανών glider ακολουθεί ο σχεδιασμός των τρισδιάστατων μοντέλων τους. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός πέντε σε αριθμό μοντέλων τα οποία αποτελούνται από σώμα εκ περιστροφής συμμετρικό από τις δισδιάστατη διατομές που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελούμενα από συνολικά τέσσερα πτερύγια το καθένα σχεδιασμένα με βάση την αεροτομή NACA 16-006 και NACA66-018 και τέλος, κεραία μήκος ενός μέτρου ακτίνας 10 εκατοστών. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας σχεδιασμού τους. Στη συνέχεια, αναλύεται η υδροδυναμική μελέτη με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα Fluent και τέλος συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διαδικασίας αυτής.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ

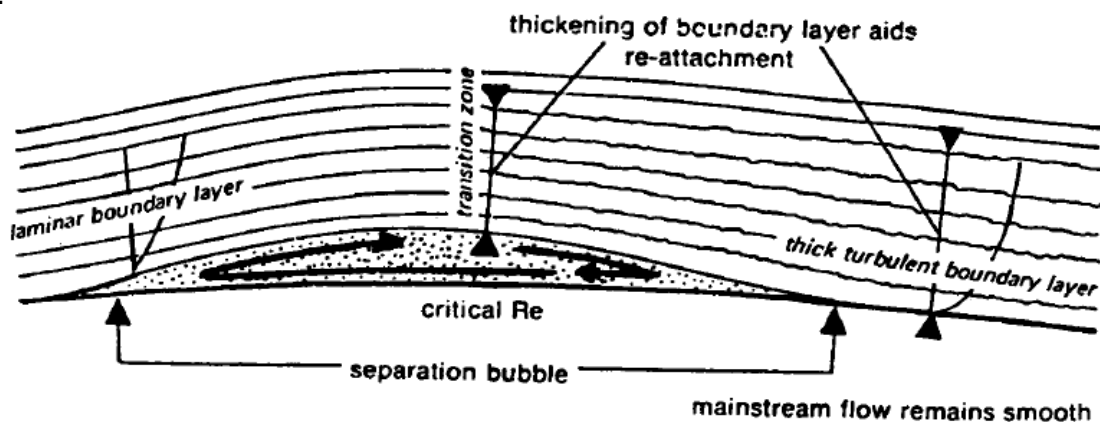
ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ

Τρία εκ των πέντε μοντέλων που μελετώνται αποτελούνται από πτερύγιο το οποίο είναι σχεδιασμένο με βάση την αεροτομή NACA 16-006 και το τελικό του σχήμα είναι επηρεασμένο από πτερύγια που συναντάμε στο υποθαλάσσιο ζωικό βασίλειο (δελφίνια κτλ.) αλλά και για το λόγο που θα εξηγήσουμε παρακάτω. Τα σημεία της αεροτομής είναι τα ακόλουθα:

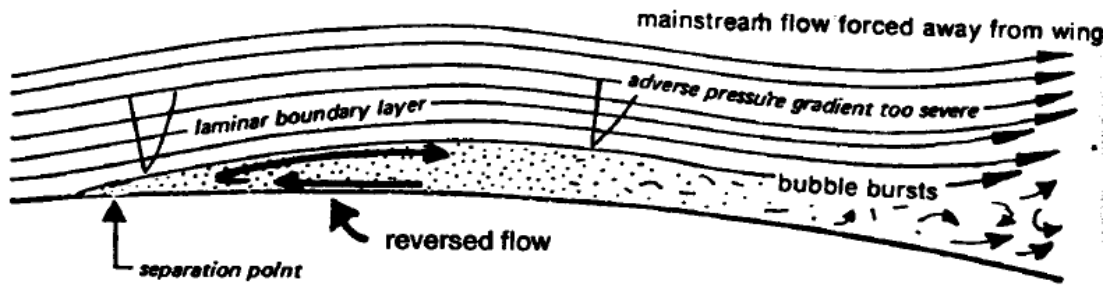
| NACA 16-006 | |
|-------------|-----------|
| 1.000000, | 0.000600 |
| 0.950000, | 0.007070 |
| 0.900000, | 0.012590 |
| 0.800000, | 0.020990 |
| 0.700000, | 0.026350 |
| 0.600000, | 0.029170 |
| 0.500000, | 0.030000 |
| 0.400000, | 0.029270 |
| 0.300000, | 0.027090 |
| 0.200000, | 0.023320 |
| 0.150000, | 0.020670 |
| 0.100000, | 0.017290 |
| 0.075000, | 0.015160 |
| 0.050000, | 0.012550 |
| 0.025000, | 0.009030 |
| 0.012500, | 0.006460 |
| 0.000000, | 0.000000 |
| 0.012500, | -0.006460 |
| 0.025000, | -0.009030 |
| 0.050000, | -0.012550 |
| 0.075000, | -0.015160 |
| 0.100000, | -0.017290 |
| 0.150000, | -0.020670 |
| 0.200000, | -0.023320 |
| 0.300000, | -0.027090 |
| 0.400000, | -0.029270 |
| 0.500000, | -0.030000 |
| 0.600000, | -0.029170 |
| 0.700000, | -0.026350 |
| 0.800000, | -0.020990 |
| 0.900000, | -0.012590 |
| 0.950000, | -0.007070 |
| 1.000000, | -0.000600 |

Η αεροτομή αυτή ονομάζεται και αεροτομή στρωτής ροής και προσφέρει το πλεονέκτημα της πολύ μικρότερης αντίστασης τριβής η οποία μειώνει τον συνολικό συντελεστή αντίστασης. Η κατασκευή τους στοχεύει στο να καθυστερήσουν όσο το δυνατό περισσότερο την μετάβαση του οριακού στρώματος από στρωτό σε τυρβώδες. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνει να εκμεταλλεύεται το πλεονέκτημα της στρωτής ροής που δεν είναι τίποτα άλλο παρά μειωμένη αντίσταση. Από τη στιγμή όμως που θα ξεκινήσει η μετάβαση και θα εμφανιστεί η φυσαλίδα αποκόλλησης πρέπει να υπάρχει άμεσα επανακόλληση και στην συνέχεια το οριακό στρώμα θα είναι τυρβώδες. Εάν δεν υπάρξει επανακόλληση μέχρι το τέλος της αεροτομής τότε το μόνο που θα έχει επιτευχθεί με αυτή την επιλογή είναι η αύξηση της αντίστασης, η εκμηδένιση της άνωσης και εν τέλει η απώλεια στήριξης των πτερυγίων.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η αποκόλληση του οριακού στρώματος και τα δύο ενδεχόμενα που την ακολουθούν. Το πρώτο ενδεχόμενο είναι η επανακόλληση του με την δημιουργία της φυσαλίδας αποκόλλησης και το δεύτερο και απευκταίο είναι η μη επανακόλληση του που οδηγεί σε πλήρη καταστροφή του οριακού στρώματος και την απώλεια στήριξης των πτερυγίων.



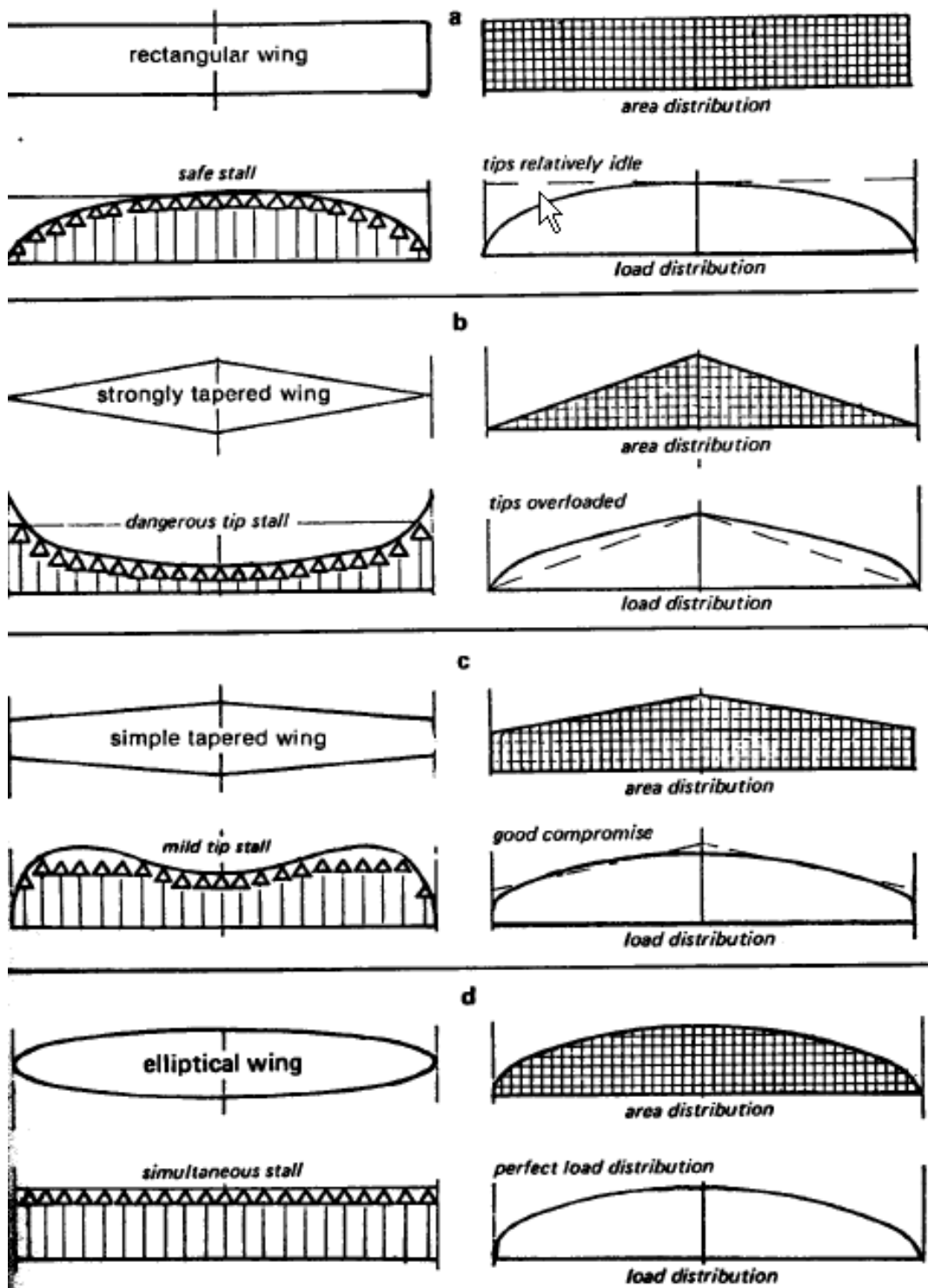
ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΣΤΡΩΤΟ ΣΕ ΤΥΡΒΩΔΕΣ ΜΕ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΕΠΑΝΑΚΟΛΛΗΣΗ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΦΥΣΑΛΙΔΑΣ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ



ΔΙΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΚΑΘΩΣ ΔΕΝ ΕΠΙΤΕΥΧΘΗΚΕ ΕΠΑΝΑΚΟΛΛΗΣΗ ΕΤΣΙ Η ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ ΕΚΜΗΔΕΝΙΖΕΤΑΙ

ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΟΡΦΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ

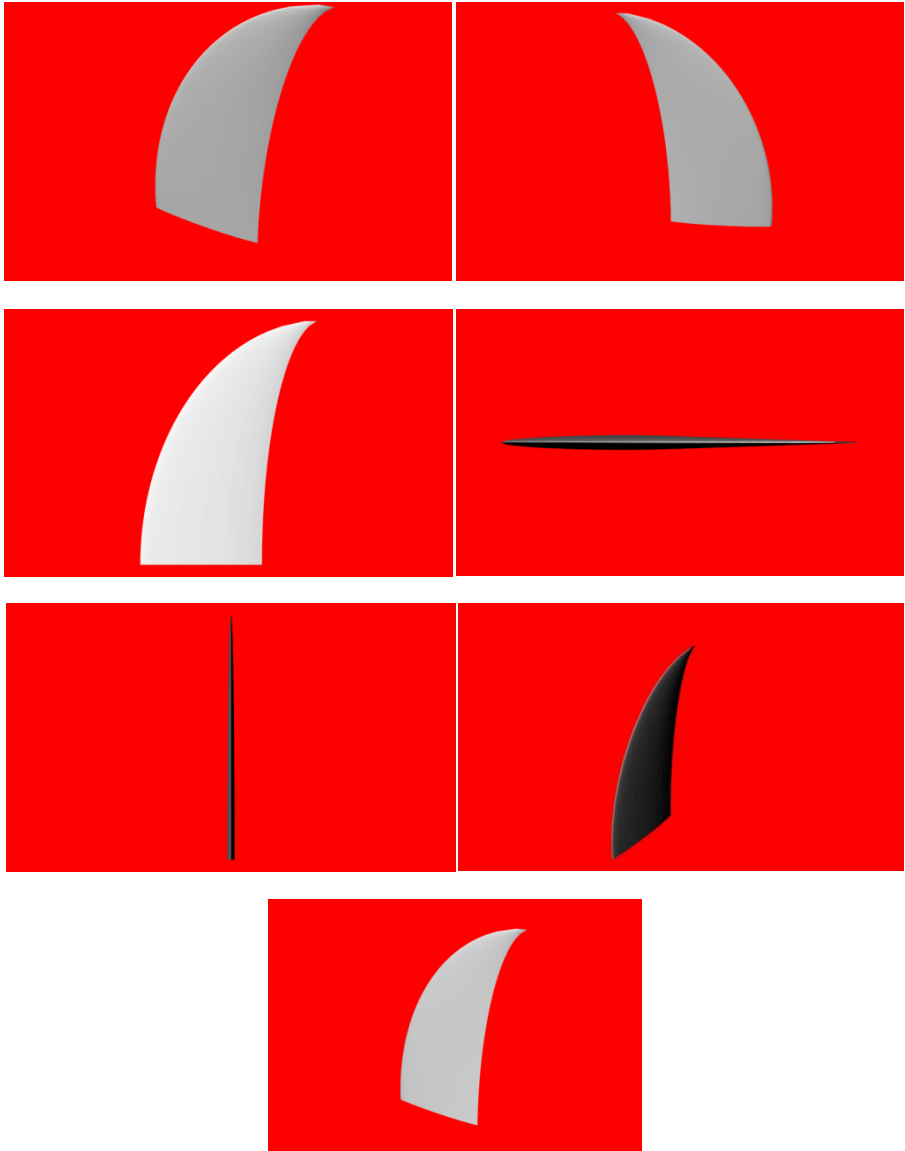
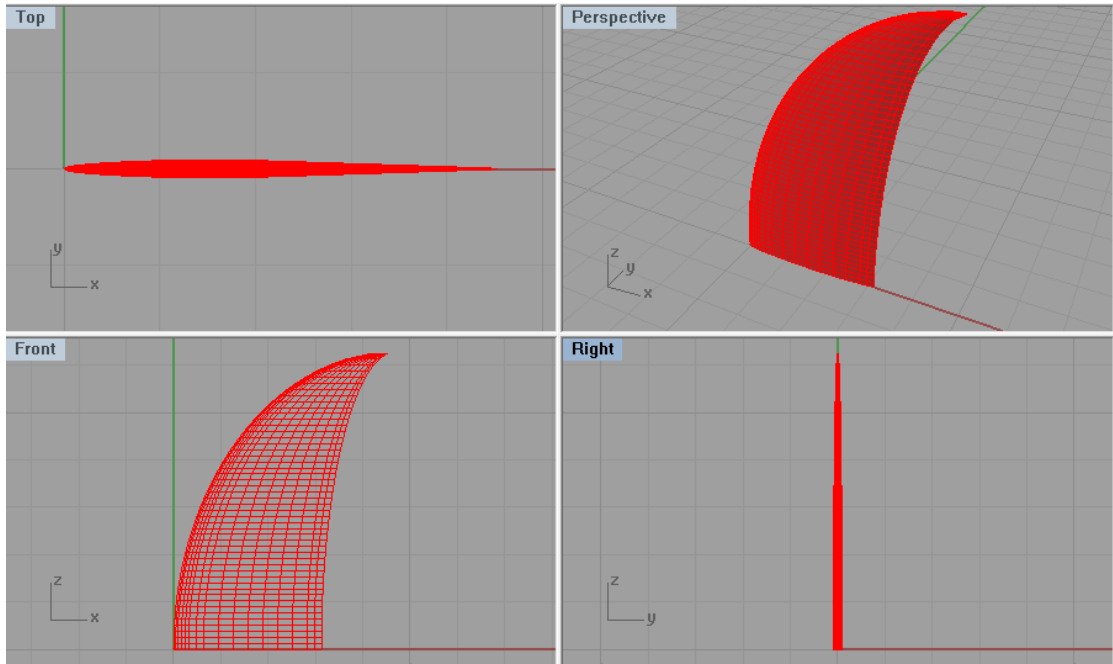
Όπως και στα ανεμόπτερα, η μορφή της πτέρυγας είναι καθοριστικός παράγοντας τόσο για την άνοση όσο και για την αντίσταση την οποία θα παράγει. Η βέλτιστη επιλογή είναι η πτέρυγα της οποίας η κάτωψη είναι έλλειψη καθώς οδηγεί σε τέλεια κατανομή του φορτίου σε σχέση με αυτή. Με αυτό τον τρόπο αξιοποιείται πλήρως όλη η πτέρυγα. Αντίθετα, μια τετραγωνική πτέρυγα δέχεται πολύ μικρό φορτίο στα άκρα της τα οποία όμως έχουν το ίδιο μέγεθος με το κέντρο της πτέρυγας. Αυτό έχει ως συνέπεια την πολύ μικρή φόρτιση αυτών.



ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΗΝ ΠΤΕΡΥΓΑ ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΧΟΡΔΩΝ ΒΑΣΗΣ-ΚΟΡΥΦΗΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΗΝ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΗ ΠΤΕΡΥΓΑ

Στο παραπάνω διάγραμμα επιβεβαιώνεται το πλεονέκτημα της πτέρυγας ελλειπτικής κατόψεως. Στο ίδιο διάγραμμα όμως παρατηρείται ότι υπάρχουν και οι μέσες λύσεις οι οποίες είναι πτέρυγες με λόγο χορδών βάσης κορυφής μικρότερο της μονάδας. Σε αυτές τις πτέρυγες, και αναλόγως του λόγου αυτού η κατανομή του φορτίου γίνεται καλύτερα από την πτέρυγα τετραγωνικής διατομής αλλά χειρότερα από την πτέρυγα ελλειπτικής διατομής. Για την βελτίωση της κατανομής των φορτίων χρησιμοποιούνται και άλλες λύσεις οπισθόκλιση ή η περιστροφή της πτέρυγας.

Ο σχεδιασμός του πτερυγίου έγινε στο πρόγραμμα Rhinoceros. Ακολουθούν κάποιες όψεις του πτερυγίου.



Τα πτερύγια που είναι ενσωματωμένα στα τρισδιάστατα μοντέλα έχουν τις ακόλουθες διαστάσεις :

- Τα δύο μεγάλα πτερύγια έχουν ύψος (κατά τον άξονα y) ίσο με 400mm, ενώ το μήκος της χορδής (chord) στη βάση του πτερυγίου έχει μήκος 200mm που εκτείνεται κατά τον άξονα x.
- Τα δύο μικρά πτερύγια, στο πρυμναίο μέρος του υποβρυχίου, έχουν ύψος (κατά τον άξονα z) ίσο με 160mm , ενώ η το μήκος της χορδής (chord) στη βάση του πτερυγίου έχει μήκος 80mm που εκτείνεται κατά τον άξονα x.

Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν με βάση το παραπάνω πτερύγιο είναι:

- Το Seaglider (1.80m)
- Το H62 (1.86m), το οποίο έχει τον ίδιο όγκο με το Seaglider
- Το G35 (1.80m)

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υδροπτέρων που μελετώνται στην εργασία αυτή φαίνονται συνολικά στον ακόλουθο πίνακα:

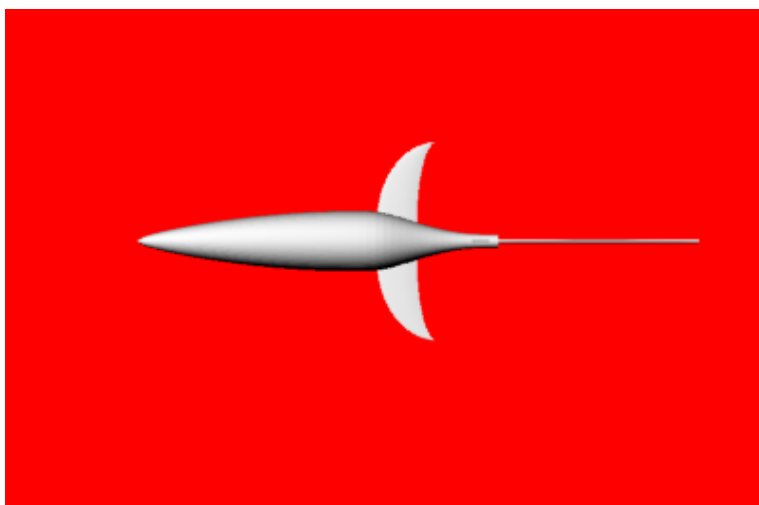
| | Μονάδες (units) | Seaglider | Seaglider Fin16-006 | H62 Fin16-006 | G35 Fin16-006 | Seaglider Fin66-018 |
|---|--------------------|-----------|------------------------|------------------|------------------|------------------------|
| L_{OA} (ολικό μήκος) | m | 1.80 | 1.80 | 1.86 | 1.80 | 1.80 |
| Μέγιστη ακτίνα γάστρας R_{max} (maximum hull radius) | m | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.11 | 0.15 |
| Βρεχόμενη Επιφάνεια S_{wa} (wetted surface) | m ² | 1.493 | 1.455 | 1.518 | 1.336 | 2.850 |
| Όγκος εκτοπίσματος ∇ (volume of displacement) | m ³ | 0.066 | 0.065 | 0.065 | 0.041 | 0.134 |

Ενώ τα βασικά χαρακτηριστικά των αεροτομών που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία και σχεδιασμό των πτερυγίων φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

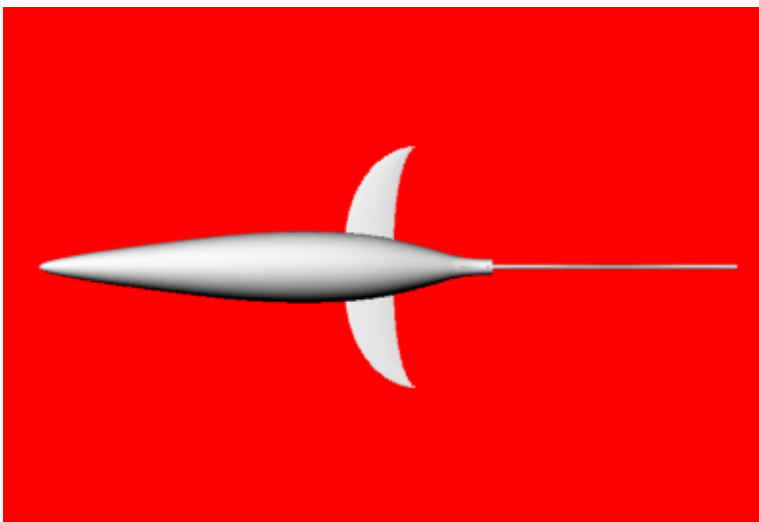
| | NACA 66-018 | NACA 16-006 |
|-----------------------------------|-------------|-------------|
| Thickness | 18.0% | 6.0% |
| Camber | 0.2% | 0.0% |
| Trailing edge angle | 12.9° | 14.4° |
| Lower Flatness | 4.5% | 85.3% |
| Leading edge radius | 2.0% | 2.1% |
| Max C_L | 1.021 | 0.524 |
| Max C_L angle | 15.0° | 10.5° |
| Max L/D | 29.906 | 21.471 |
| Max L/D angle | 6.0 | 2.5 |
| Max L/D C_L | 0.651 | 0.269 |
| Stall angle | 1.0° | 2.5° |
| Zero-lift angle | 0 | 0.0 |

Ο τελικός σχεδιασμός των υδροπτέρων έγινε στο πρόγραμμα Rhinoceros. Η τελική μορφολογία τους απεικονίζονται παρακάτω.

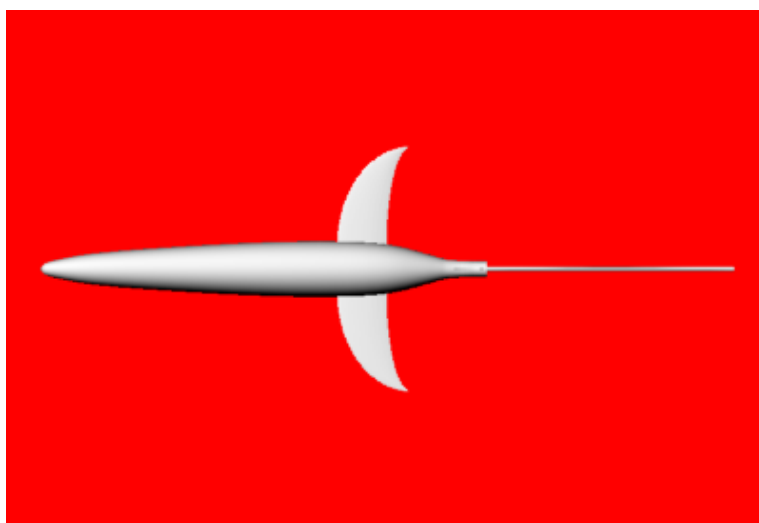
ΥΔΡΟΠΤΕΡΑ ΜΕ ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΑΕΡΟΤΟΜΗΣ NASA16-006



ΕΙΚΟΝΑ 1 SEAGLIDER (1.80M)

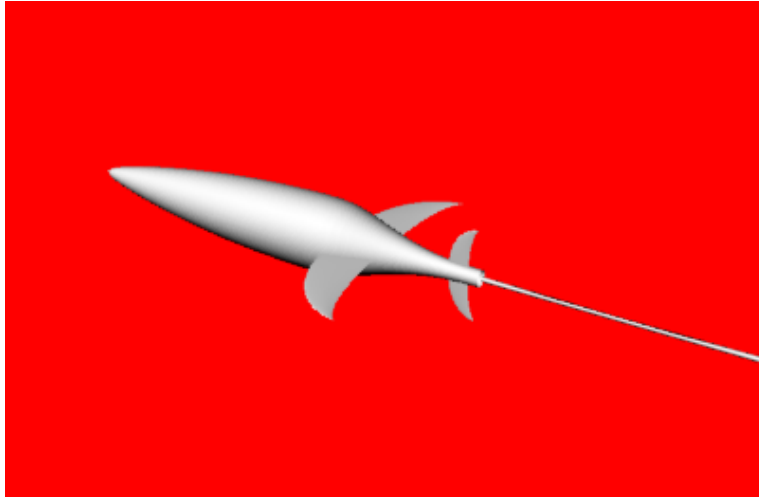


ΕΙΚΟΝΑ 2 Η62 ΙΔΙΟΣ ΟΓΚΟΣ ΜΕ SEAGLIDER

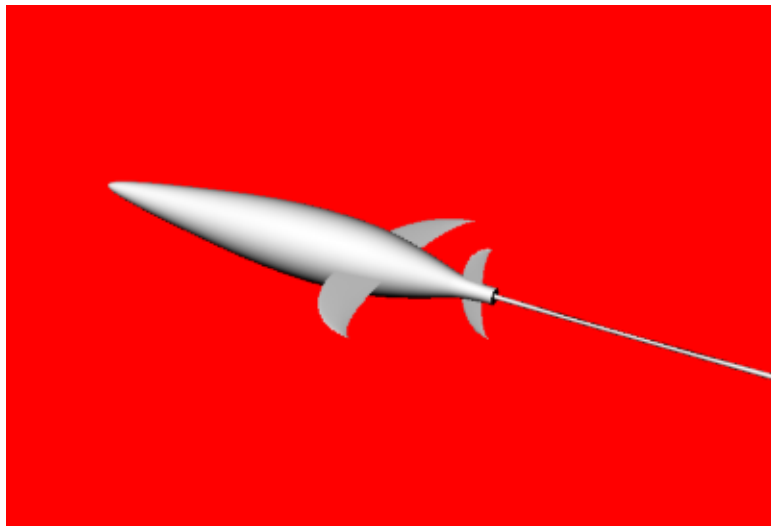


ΕΙΚΟΝΑ 3 G35 (1.80M)

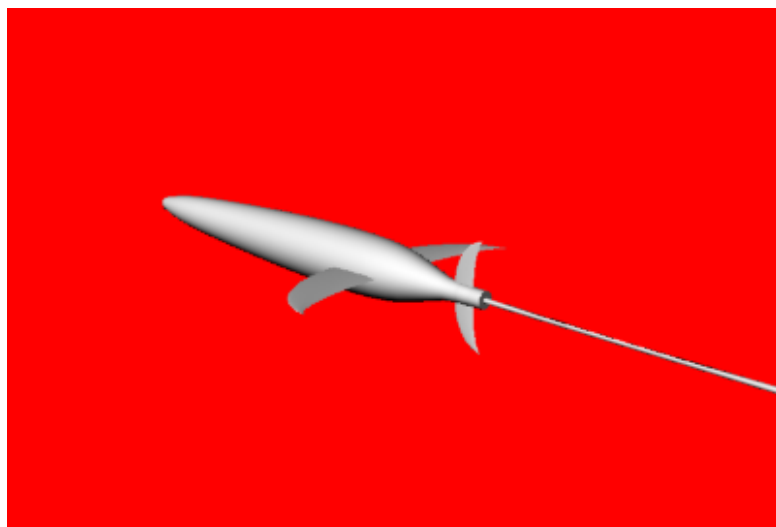
Perspective View



EIKONA 4 SEAGLIDER (1.80M)



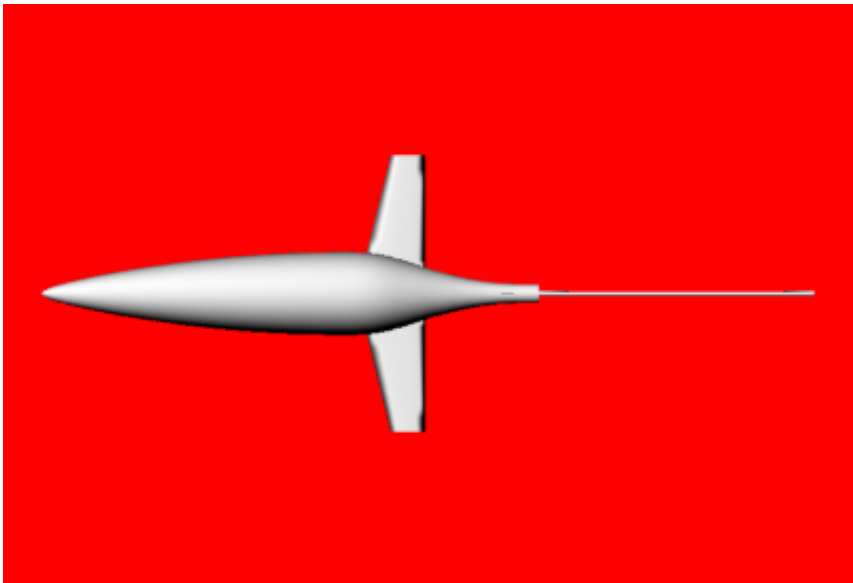
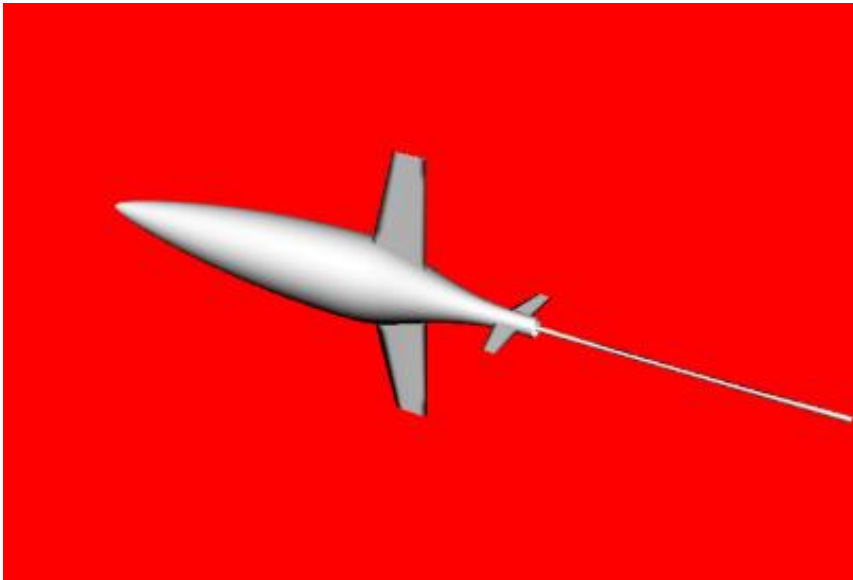
EIKONA 5 H62 ΙΔΙΟΣ ΟΓΚΟΣ ΜΕ SEAGLIDER



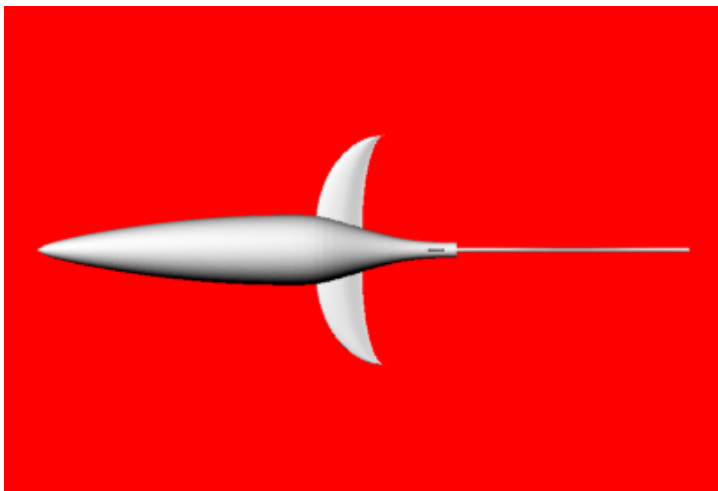
EIKONA 6 G35(1.80M)

Το επόμενο μοντέλο που σχεδιάστηκε είχε ως σώμα το H62 (1.86m) το οποίο έχει τον ίδιο όγκο με το σώμα του Seaglider και σε αυτό ενσωματώθηκαν τα πτερύγια τα οποία είναι σχεδιασμένα με βάση την αεροτομή NACA66-018, πτερύγια που χρησιμοποιήθηκαν και στο μοντέλο που σχεδιάστηκε στη διδακτορική διατριβή έχοντας ως σώμα αυτό του Seaglider. Ακολουθούν η τελική μορφή των δυο αυτών μοντέλων, καθώς θα μελετηθούν περαιτέρω μαζί με τα προαναφερθέντα μοντέλα.

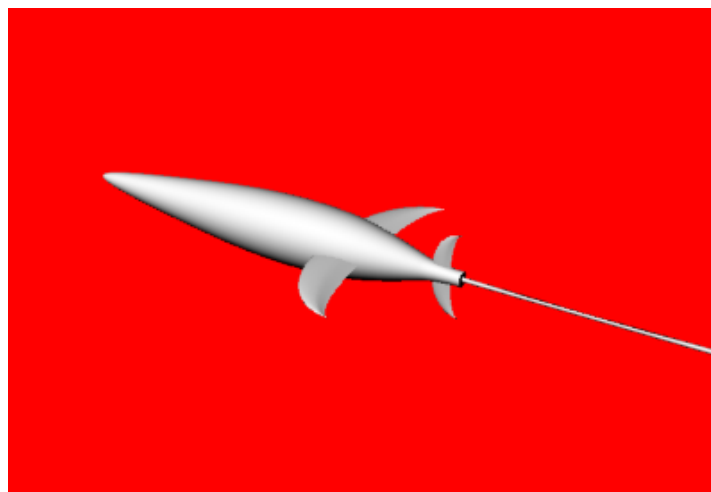
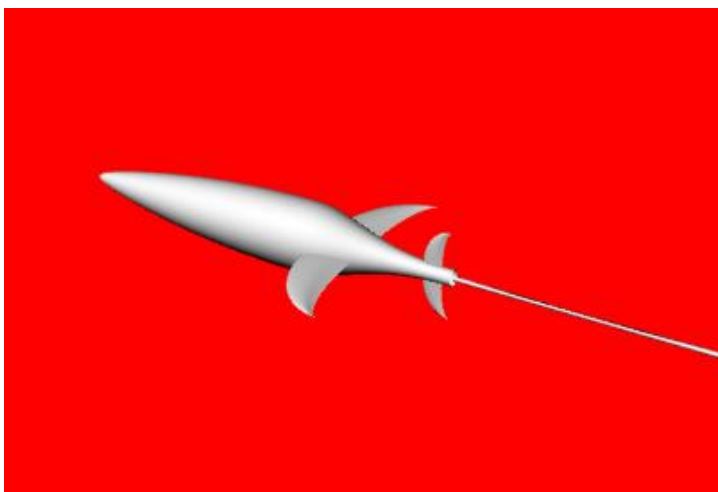
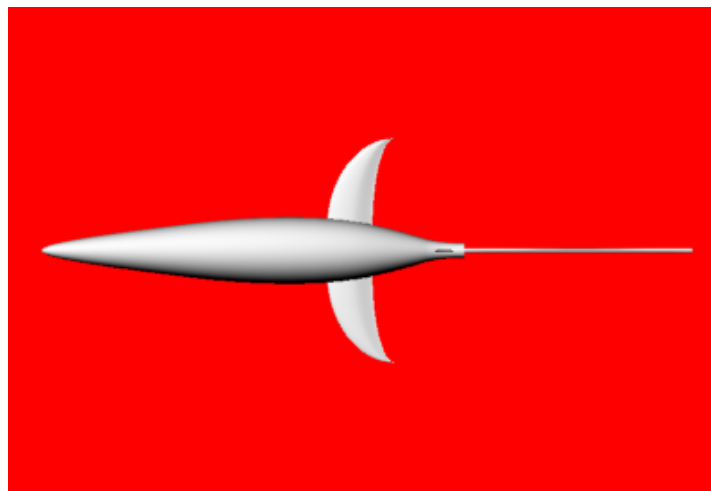
Τέλος, ακολουθεί η αναπαράσταση του Seaglider σχεδιασμένο στο πρόγραμμα Rhinoceros σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που έχουν αναφερθεί στα πρώτα κεφάλαια.



Seaglider (1.80m)



H62 (ίδιος όγκος με Seaglider)

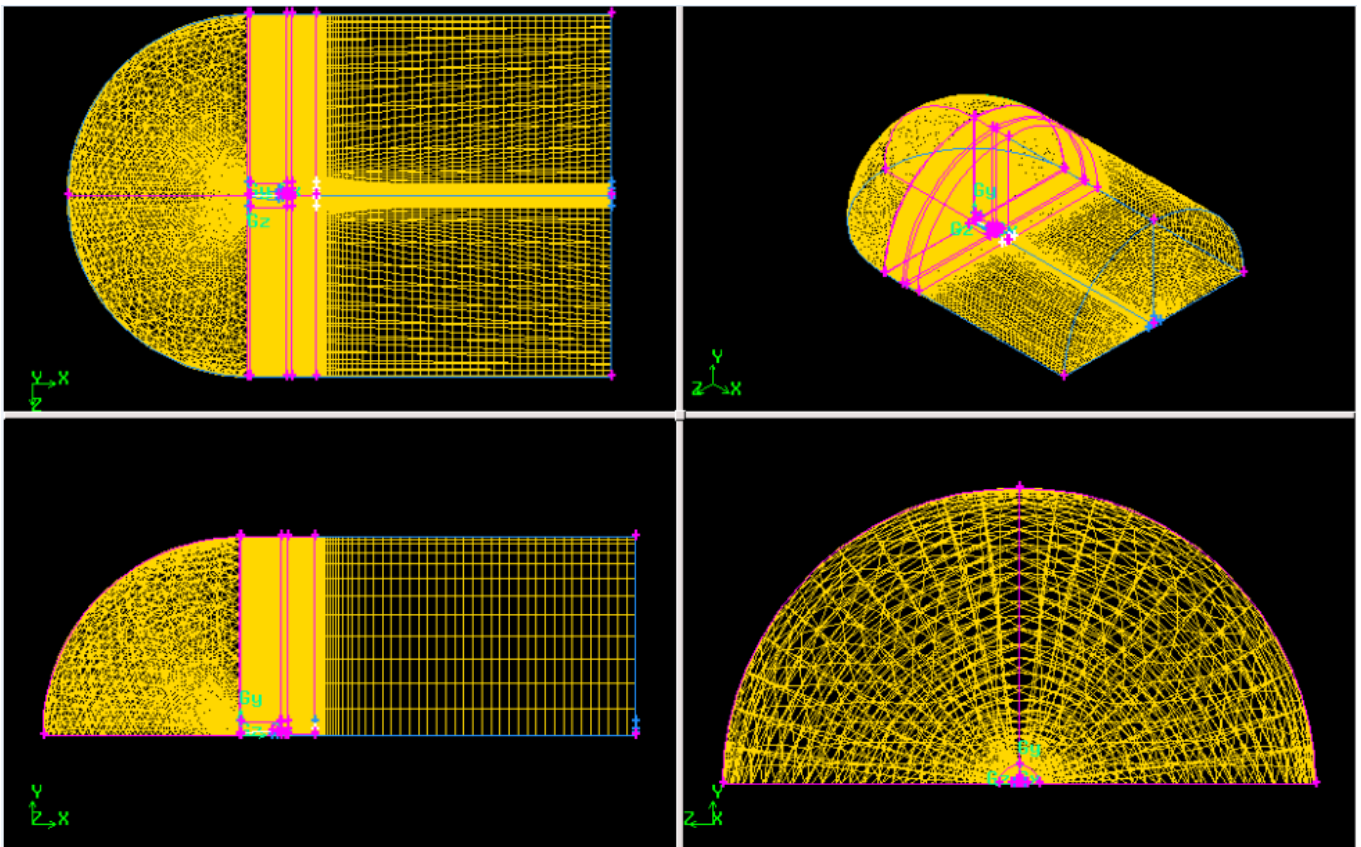


Εφόσον έχει ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός των υδροπτέρων στο πρόγραμμα Rhinoceros, εισάγεται η γεωμετρία τους στον προεπεξεργαστή GAMBIT ώστε να δημιουργηθεί το πλέγμα ροής για κάθε ένα από τα υδρόπτερα και να καθοριστούν οι συνοριακές συνθήκες.

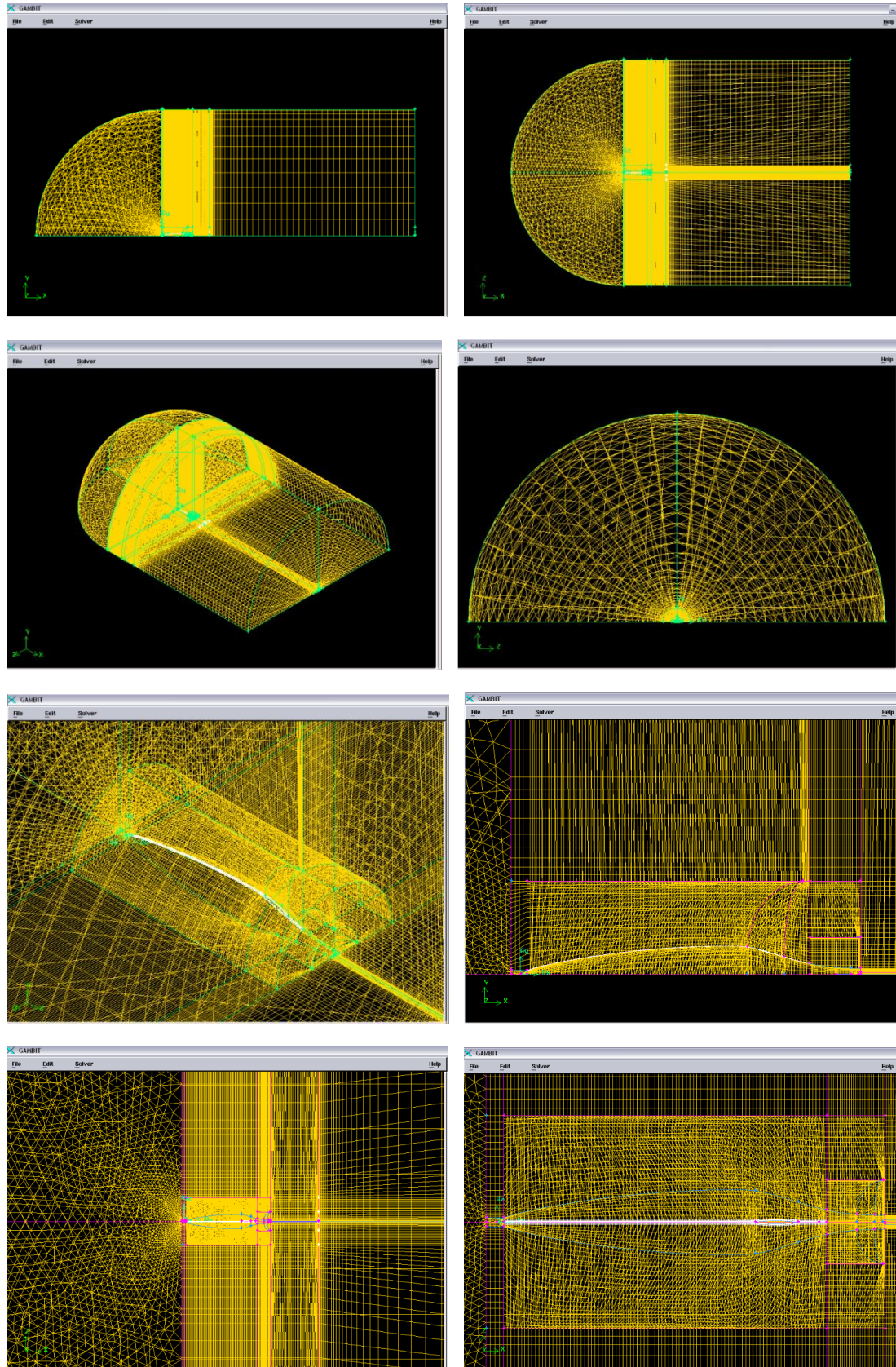
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ GAMBIT - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Αρχικά, οι επιφάνειες από τις οποίες αποτελείται το κάθε υδρόπτερο μετατρέπονται σε κατάλληλο πλέγμα, στη συνέχεια σχεδιάζεται ένας χώρος μέσα στον οποίο θα εισρέει το ρευστό γύρω από το υδρόπτερο, κατάλληλα μεγάλος, όπου διακριτοποιείται και γίνεται ο σχηματισμός επίσης του πλέγματός του. Τέλος, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες και γίνεται εξαγωγή του συνολικού πλέγματος ώστε να εισαχθεί στο Fluent. Η διαδικασία αυτή όπως έχει αναφερθεί γίνεται για κάθε ένα από τα πέντε υδρόπτερα που έχουν σχεδιαστεί στην εργασία αυτή.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η δημιουργία του τελικού πλέγματος στο προεπεξεργαστή GAMBIT. (Επειδή τα πλέγματα που δημιουργήθηκαν είναι παρόμοια, για χάρην συντομίας απεικονίζεται μόνο ένα εκ των πέντε πλεγμάτων που δημιουργήθηκαν).



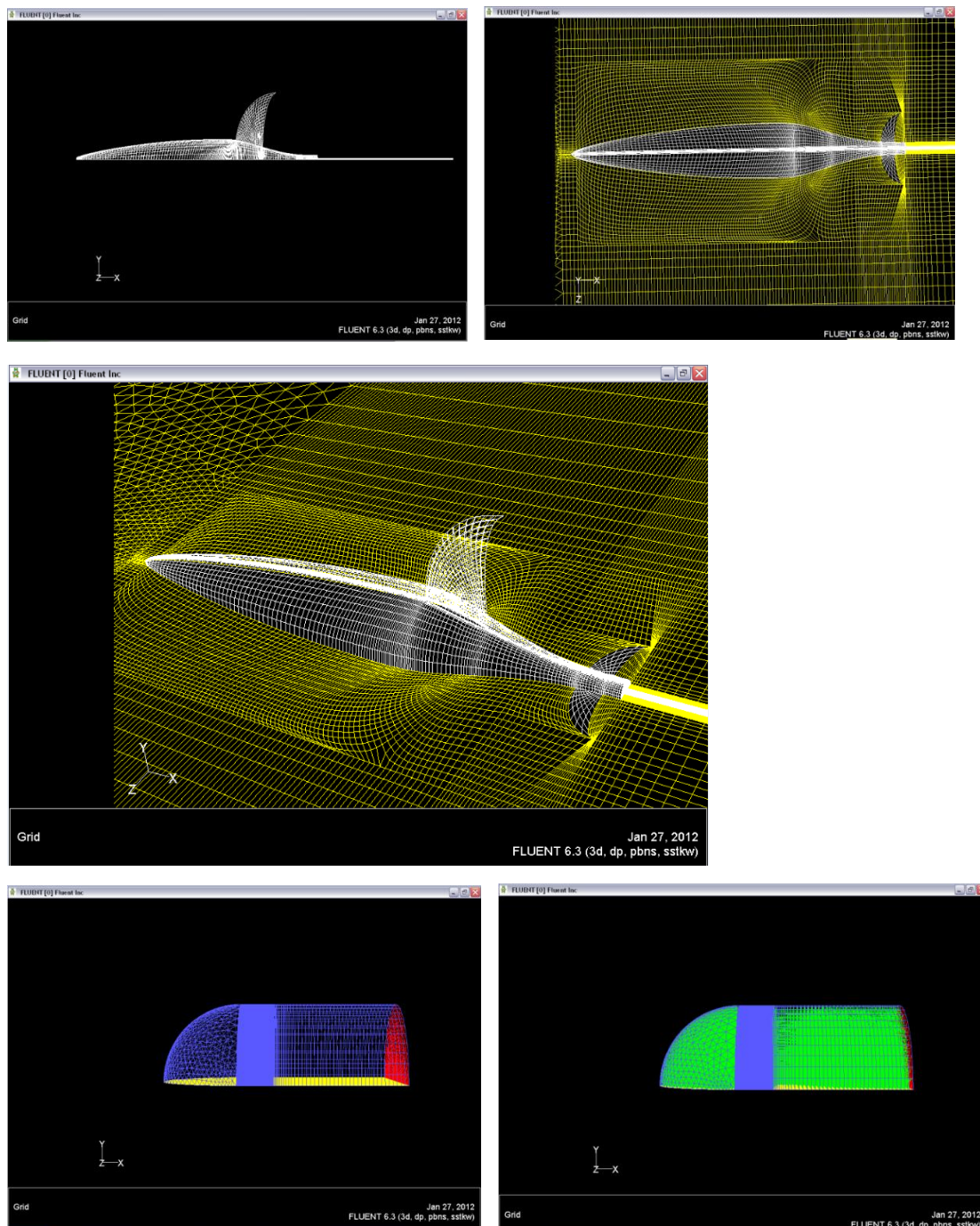
ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΟΨΕΙΣ ΤΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ GAMBIT



ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΟΨΕΙΣ ΤΟΥ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ GAMBIT

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ FLUENT-ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Εφόσον έχουν ορισθεί και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος, το τελικό πλέγμα που έχει δημιουργηθεί εισάγεται στον λύτη Fluent.



ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΕΦΟΣΟΝ ΕΧΕΙ ΕΙΣΑΧΘΕΙ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FLUENT.

Οι οριακές συνθήκες που έχουν ορισθεί συνοψίζονται ως ακολούθως:

- **Fluid** : Έχοντας ορίσει όλο τον όγκο γύρω από το υδρόπτερο
- **Velocity Inlet** : Έχοντας ορίσει τις μπροστινές και πλαϊνές πλευρές του πλέγματος
- **Pressure Outlet** : Ορίζοντας την πίσω πλευρά του πλέγματος (πρυμναία του υδροπτέρου)
- **Wall** : Όλες τις επιφάνειες του υδροπτέρου
- **Symmetry** : Τις συμμετρικές πλευρές του πλέγματος

Στο πρόγραμμα Fluent ορίστηκαν ο επιλυτής, το μοντέλο τύρβης, το υλικό της ροής, οι οριακές συνθήκες, οι συντελεστές υποχαλάρωσης και οι απαραίτητες σταθερές. Πιο αναλυτικά έχουμε:

| | |
|-----------------------|------------------------|
| Solver: | Pressure Based |
| Formulation: | Implicit |
| Space: | 3D |
| Time: | Steady |
| Velocity Formulation: | Absolute |
| Gradient Option: | Green-Gause Node based |
| Porous Formulation: | Superficial Velocity |

| | |
|---------------------------|---------------------|
| Model-->Viscous | |
| Model: | K- ω (2 eqn) |
| K- ω model: | SST |

| | |
|------------------------------|-----------------------|
| Material: Fluid Water | |
| density | 1025kg/m ³ |
| viscosity | 0.001kg/ms |

| | |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Reference Values | |
| Area: | 1 |
| Density: | 1025 |
| Enthalpy: | 0 |
| Length: | 1.8 (ή 1,86 ανάλογα με το υδρόπτερο) |
| Pressure: | 0 |
| Temperature: | 288,16 |
| Velocity: | 0,486 |
| Viscosity: | 0,001 |
| Ratio of specific heats: | 1,4 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| Under Relaxation Factors | |
| Pressure: | 0.5 |
| Density: | 1 |
| Body Forces: | 1 |
| Momentum: | 0.3 |
| Turbulent Kinetic Energy: | 0.5 |
| Specific Dissipation Rate | 0.5 |
| Turbulent Viscosity: | 0.7 |

Επιπλέον για τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται σχήματα ελέγχου δευτέρου βαθμού ακριβείας.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Ακολουθούν παρακάτω τα αποτελέσματα για τις δυνάμεις και ροπές υπό μηδενική γωνία πρόσπτωσης με αναφορά στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων και ταχύτητα ίση με 0,486m/s. (Angle of attack =0°)

| Κατεύθυνση Δύναμης (X Y Z)- (1 0 0) | Pressure Force [Nt] | Viscous Force [Nt] | Total Force [Nt] | Pressure Coefficient | Viscous Coefficient | Total Coefficient |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| Seaglider | 0.1509 | 0.7573 | 0.9082 | 0.001249 | 0.006270 | 0.007519 |
| Seaglider Fin 16-006 | 0.1901 | 0.7131 | 0.9032 | 0.001574 | 0.005904 | 0.007477 |
| H62 Fin 16-006 | 0.1477 | 0.7695 | 0.9172 | 0.001223 | 0.006371 | 0.007593 |
| G35 Fin 16-006 | 0.1856 | 0.6238 | 0.8094 | 0.001536 | 0.005164 | 0.006701 |
| H62 Fin 66-018 | 0.3952 | 0.7674 | 1.1626 | 0.003272 | 0.006354 | 0.009625 |
| Seaglider Fin 66-018 | 0.5462 | 0.7819 | 1.3281 | 0.004522 | 0.006474 | 0.010996 |

| Κατεύθυνση Δύναμης (X Y Z)- (0 0 1) | Pressure Force [Nt] | Viscous Force [Nt] | Total Force [Nt] | Pressure Coefficient | Viscous Coefficient | Total Coefficient |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| Seaglider | 0.00651 | 0.000036 | 0.006546 | 0.000054 | 0 | 0.000054 |
| Seaglider Fin 16-006 | -0.00016 | -0.000141 | -0.000299 | -0.000001 | 0 | 0.000002 |
| H62 Fin 16-006 | -0.00008 | -0.000027 | -0.0001040 | 0 | 0 | 0 |
| G35 Fin 16-006 | 0.00314 | 0.00017 | 0.003313 | 0.000026 | 0 | 0.000027 |
| H62 Fin 66-018 | -0.01059 | -0.000006 | -0.010595 | -0.000088 | 0 | 0.000088 |
| Seaglider Fin 66-018 | -0.01639 | 0.000098 | 0.016292 | -0.000136 | 0 | 0.000134 |

| Ροπή ως προς τον άξονα Y (Pitch) | Pressure Moment [Ntm] | Viscous Moment [Ntm] | Total Moment [Ntm] | Pressure Coefficient | Viscous Coefficient | Total Coefficient |
|----------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| Seaglider | -0.002572 | 0.000113 | -0.002459 | -0.000012 | 0 | -0.000011 |
| Seaglider Fin 16-006 | 0.001257 | -0.000267 | 0.00099 | 0.000006 | -0.000001 | 0.000005 |
| H62 Fin 16-006 | 0.000075 | -0.000113 | -0.00004 | 0 | 0 | 0 |
| G35 Fin 16-006 | -0.000939 | -0.000063 | -0.001003 | -0.000004 | 0 | -0.000005 |
| H62 Fin 66-018 | 0.006081 | 0.000055 | 0.006136 | 0.000027 | 0 | 0.000027 |
| Seaglider Fin 66-018 | -0.008152 | 0.000046 | 0.0081 | -0.000038 | 0 | -0.000038 |

Παρατηρούμε ότι για τα δύο τελευταία υδρόπτερα εκ των πινάκων η αντίσταση που παρουσιάζουν είναι μεγαλύτερη εκ των υπολοίπων έτσι προχωρούμε σε περαιτέρω ανάλυση των τεσσάρων πρώτων υδροπτέρων (Seaglider, Seaglider Fin 16-006, H62 Fin 16-006, G35 Fin 16-006). Πιο κάτω όμως θα χρησιμοποιήσουμε και τα αποτελέσματα του Seaglider Fin 66-018 για να προβούμε σε συγκρίσεις.

Η επίδραση των πτερυγίων και της κεραίας στην συνολική αντίσταση του υδροπτέρου επί της γυμνής γάστρας φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

| Total Force (N) Δύναμη Οπισθέλκουσας (1 0 0) | Σώμα χωρίς την προσθήκη πτερυγίων και κεραίας | Σώμα με προσθήκη πτερυγίων Fin16-006 και κεραίας | Σώμα με προσθήκη πτερυγίων Fin66-018 και κεραίας | Σώμα με προσθήκη πτερυγίου ορθογωνικής μορφής (16-006) |
|---|--|---|---|---|
| Seaglider | 0.7416 | 0.9032 | 1.3281 | 0.9082 |
| H62 (1.86m- ίδιος όγκος με Seaglider) | 0.7382 | 0.9172 | 1.1626 | -- |
| G35 (1.80m) | 0.5634 | 0.8094 | -- | -- |

Τα ποσοστά αύξησης επί της αντιστάσεως στο γυμνό σώμα λόγω της προσθήκης πτερυγίων και κεραίας φαίνονται παρακάτω:

| Ποσοστό αύξησης επί της αντιστάσεως | Σώμα χωρίς την προσθήκη πτερυγίων και κεραίας | Σώμα με προσθήκη πτερυγίων Fin16-006 και κεραίας | Σώμα με προσθήκη πτερυγίων Fin66-018 και κεραίας | Σώμα με προσθήκη πτερυγίου ορθογωνικής μορφής (16-006) |
|--|--|---|---|---|
| Seaglider | 0 | 0.2179% | 0.7908% | 0.2246% |
| H62 (1.86m- ίδιος όγκος με Seaglider) | 0 | 0.2425% | 0.4244% | -- |
| G35 (1.80m) | 0 | 0.4366% | -- | -- |

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι για το ίδιο σώμα υδροπτέρου (μορφής Seaglider) τα πτερύγια που έχουν την μικρότερη επίδραση επί της αντίστασης της γυμνής γάστρας είναι τα πτερύγια σχεδιασμένα με βάση την αεροτομή Naca16-006, καμπυλωτής μορφής.

Σκοπός για την δημιουργία κάθε πλέγματος στο προ επεξεργαστή Gambit ήταν να έχουν περίπου τον ίδιο αριθμό κόμβων, με την ίδια μορφολογία πλέγματος σε αντίστοιχες επιφάνειες και τις ίδιες διαστάσεις ως προς τον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους και να μην έχουμε μεγάλες αποκλίσεις εξ αιτίας του σχεδιασμού του πλέγματος στη CFD διαδικασία.

| | Seaglider | Seaglider Fin16-006 | H62 Fin16-006 | G35 Fin16-006 | Seaglider Fin66-018 |
|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Κόμβοι πλέγματος (Nodes) | 338676 | 334712 | 340002 | 340402 | 291977 |

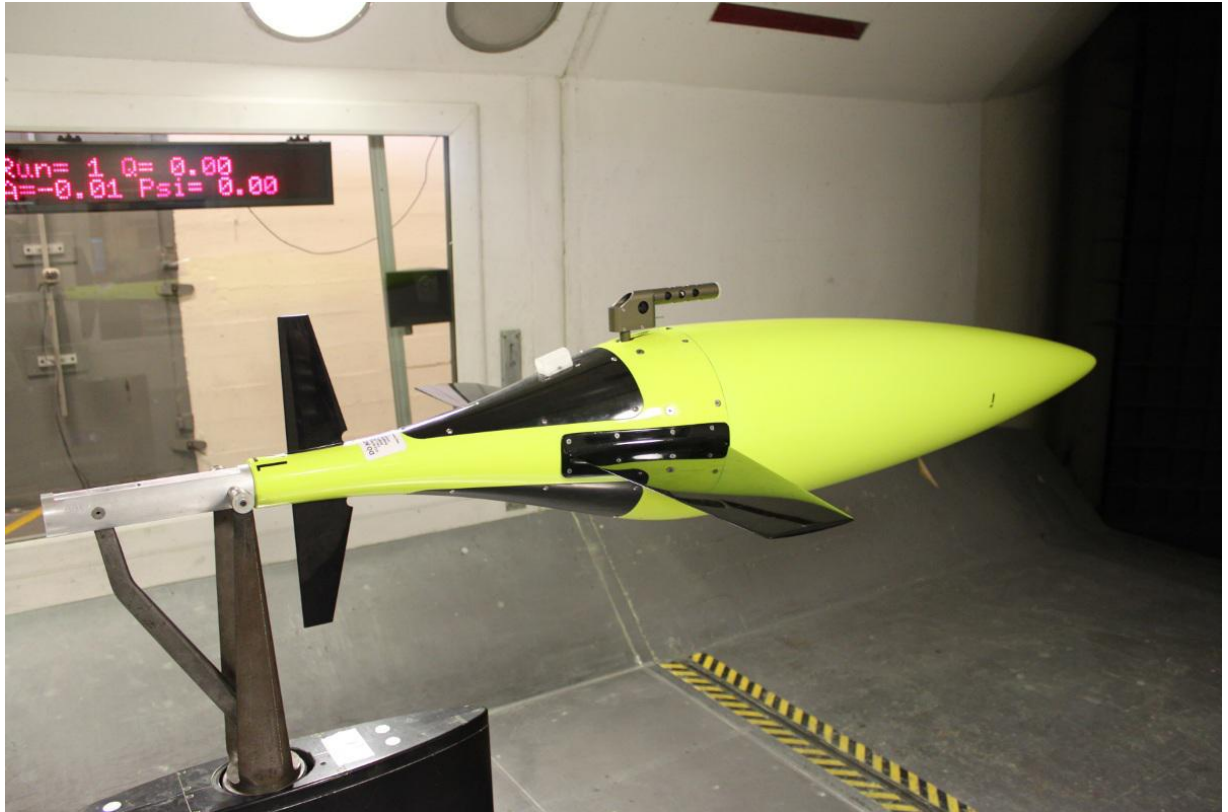
Θα εξετάσουμε τα υδροπτερά σε διάφορες γωνίες πρόσπτωσης έτσι ώστε να έχουμε μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την συμπεριφορά τους στο περιβάλλον ρευστό και αυτό γιατί θέλουμε να διεξαχθούν οι υδροδυναμικοί συντελεστές τους (αντίστοιχα αεροδυναμικοί για τα ανεμόπτερα). Επίσης και για το λόγο ότι, όπως έχει αναφερθεί, η κίνησή τους δεν είναι μόνο οριζόντια, αλλά ακολουθεί και μία "πριονωτή" διαδρομή.

Ο προσδιορισμός των υδροδυναμικών (αεροδυναμικών) συντελεστών (δυνάμεων και ροπών) είναι σημαντικός για διάφορους λόγους:

- Οι παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες επιδόσεων του υδροπτερού για να βοηθήσουν στον προσδιορισμό μιας πτήσης με βέλτιστες συνθήκες. Η εκτίμηση αυτών των παραμέτρων χρησιμοποιούνται ώστε να καθοριστούν η επιθυμητή θέση της μάζας που βοηθάει στην κίνηση του προνευτασμού και η άνωση - σαν συνάρτηση οδήγησης - ορίζοντας παραμέτρους της αποστολής, όπως η διάρκεια της πτήσης και το επιθυμητό βάθος. Η γνώση με μεγαλύτερη ακρίβεια των παραμέτρων αυτών βελτιώνει την πρόβλεψη μέσω αλγορίθμου της πλοήγησης του υδροπτερού.
- Οι υδροδυναμικοί (αεροδυναμικοί) παράμετροι είναι απαραίτητοι για την ανάπτυξη της υψηλής πιστότητας προσομοιώσεων πτήσεων του υδροπτερού. Οι προσομοιώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη και επικύρωση της αποτελεσματικότητας των διαφορετικών στρατηγικών σχεδιασμού κίνησης τους.
- Συγκρίνοντας τον συντελεστή αντίστασης για διάφορες περιπτώσεις υδροπτέρων βοηθά στο να καθοριστεί ένα χαμηλής αντίστασης προφίλ σώματος και μπορεί να οδηγήσει στο σχεδιασμό μελλοντικών υδροπτέρων.
- Οι συντελεστές σήμερα χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των διαδρομών του υδροπτερού και για να απεικονιστεί η διαδρομή του στο οριζόντιο επίπεδο.

Για να διαπιστώσουμε ότι η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην εργασία αυτή είναι σωστή, θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τα αποτελέσματα που έχουν διεξαχθεί από πείραμα που έγινε σε αεροσήραγγα στο Πανεπιστήμιο της Ουάσινγκτον στο Εργαστήριο Αεροδυναμικής (University of Washington Aerodynamic Laboratory (UWAL)) όπως αναφέρεται στο επιστημονικό άρθρο "Full- Scale Wind Tunnel Study of the Seaglider Underwater Glider " των Laszlo Techy, Ryan Tomokiyo, Jake Quenzer, Tyler Beauchamp, Kristi Morgansen, δημοσιευμένο τον Σεπτέμβρη του 2010.

Στη συνέχεια παραθέτουμε κάποια στοιχεία του πειράματος στην αεροσήραγγα και μετέπειτα τις συγκρίσεις με τα αποτελέσματα της CFD διαδικασίας που ακολουθήσαμε.



SEAGLIDER ΣΤΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΔΟΚΙΜΗΣ (UWAL)

Οι παράμετροι του πειράματος στην αεροσήραγγα ήταν οι εξής:

| Παράμετροι | Συμβολισμός | SI μονάδες |
|--|---------------|----------------------------|
| Kinematic Viscosity of Water | ν_w | 1.1882e-6m ² /s |
| Kinematic Viscosity of Air | ν_α | 1.5236m ² /s |
| Density of Water | ρ_w | 1025.6kg/m ³ |
| Density of Air | ρ_α | 1.2369kg/m ³ |
| Bare Hull Volume | V | 6.4211e-2m ³ |
| Total Vehicle Length | L | 1.8m |
| Bare Hull Displaced Mass | m_w | 65.8551kg |
| Distance from Nose to Wing Aero.Ctr | x_{ac} | 1.26m |
| Distance from Nose to C.B. | x_{cg} | 0.9m |
| Distance between Wing Aero Ctr and C.B | x_{ac} | 0.358m |
| Planform Area of 1m Wing | S_{w1m} | 0.1706m ² |
| MAC of 1m Wing | C_{1m} | 0.1743 |

Τα αποτελέσματα του πειράματος στην αεροσήραγγα για μία τυπική ταχύτητα των 0.27m/s έδωσαν τους ακόλουθους αεροδυναμικούς συντελεστές για το Seaglider :

| | |
|---------------------------------|---|
| $C_l(\beta)=C_{l\beta}\beta$ | $C_L(\alpha)=C_{L\alpha}\alpha$ |
| $C_m(\alpha)=C_{m\alpha}\alpha$ | $C_D(\alpha, \beta)=C_{D0}+C_{D\alpha}\alpha^2+C_{D\beta}\beta^2$ |
| $C_n(\beta)=C_{n\beta}\beta$ | $C_s(\beta)=C_{s\beta}\beta$ |

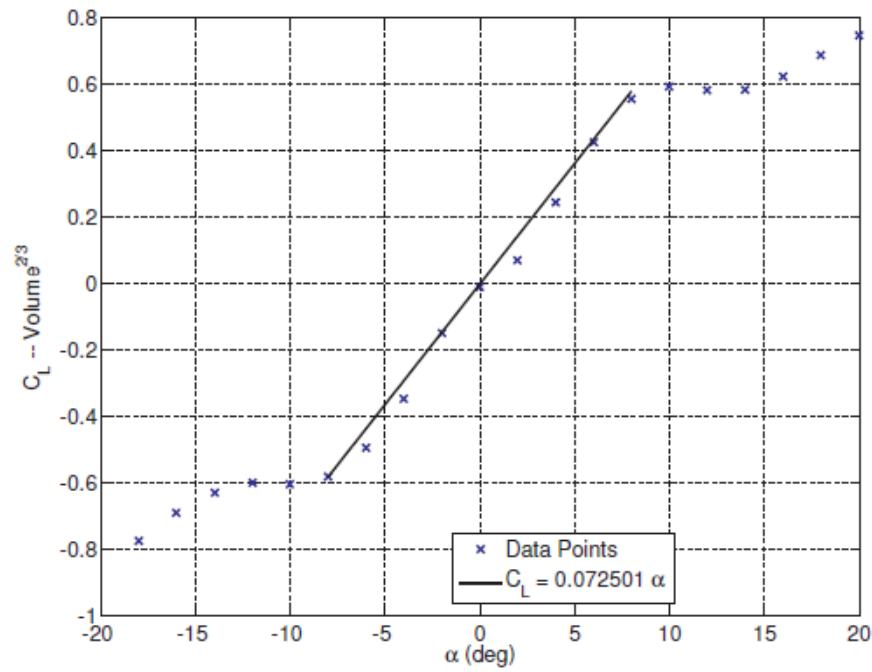
| | | | | | | | | |
|-----------|---------------|----------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| | $C_{L\alpha}$ | C_{D0} | $C_{D\alpha}$ | $C_{D\beta}$ | $C_{S\beta}$ | $C_{l\beta}$ | $C_{m\alpha}$ | $C_{n\beta}$ |
| Using deg | 0.0725 | 0.0831 | 0.000929 | 0.000382 | 0.0145 | -0.00556 | 0.0258 | -0.00086 |

$$L = ql^2 C_\alpha a$$

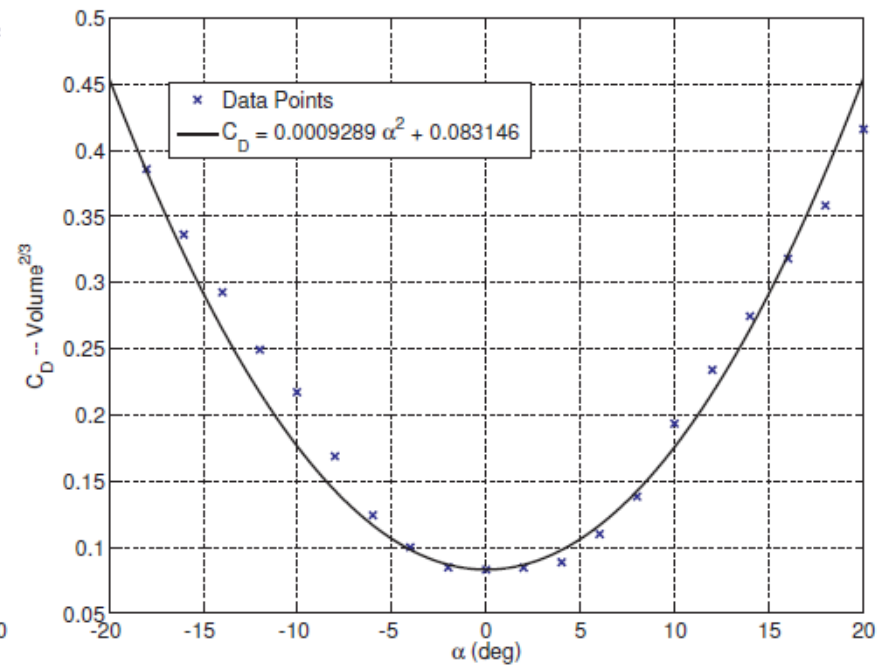
$$D = ql^2 (C_b q^{-1/4} + C_c a^2)$$

| | | | |
|-----------|------------|---------|-----------|
| | C_α | C_b | C_c |
| Using deg | 0.00299 | 0.00290 | 0.0000439 |

Να σημειωθεί ότι για την αδιαστατοποίηση των αποτελεσμάτων έχει χρησιμοποιηθεί ως χαρακτηριστική επιφάνεια, ο όγκος του οχήματος εις την δύναμη 2/3, και ως χαρακτηριστικό μήκος ο όγκος του οχήματος εις την δύναμη 1/3. Για το λόγο αυτό και στα διαγράμματα που ακολουθούν οι κάθετοι άξονες αναγράφουν και τον όγκο στην αντίστοιχη δύναμη.

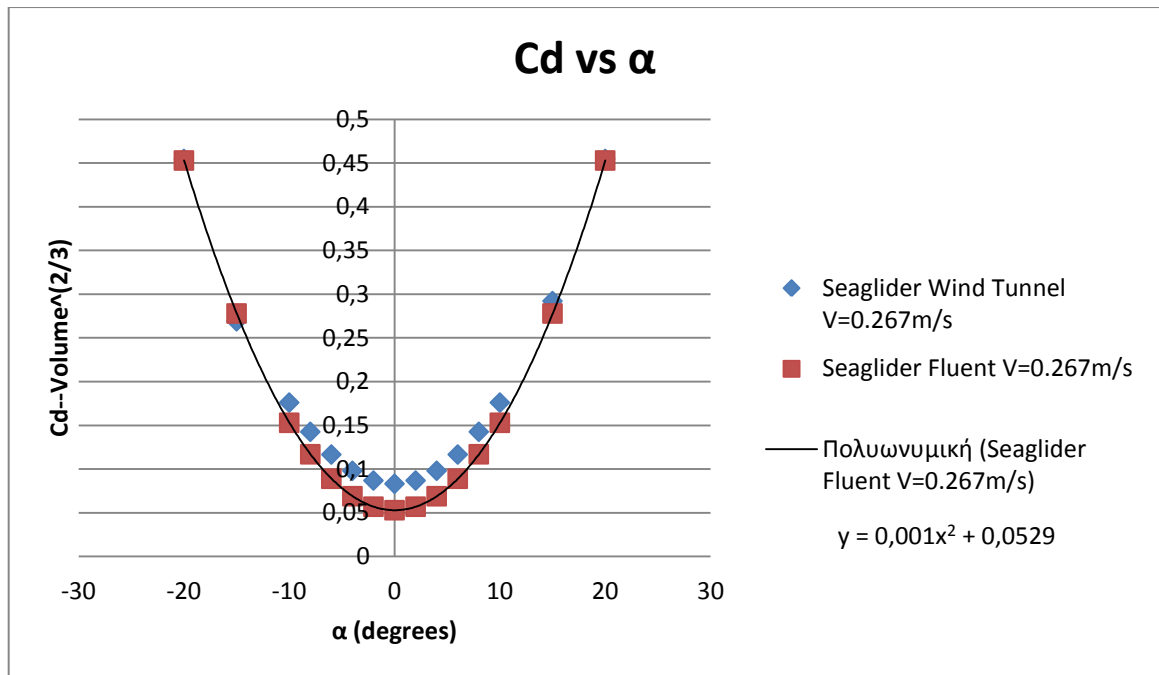


(a) C_L vs. α

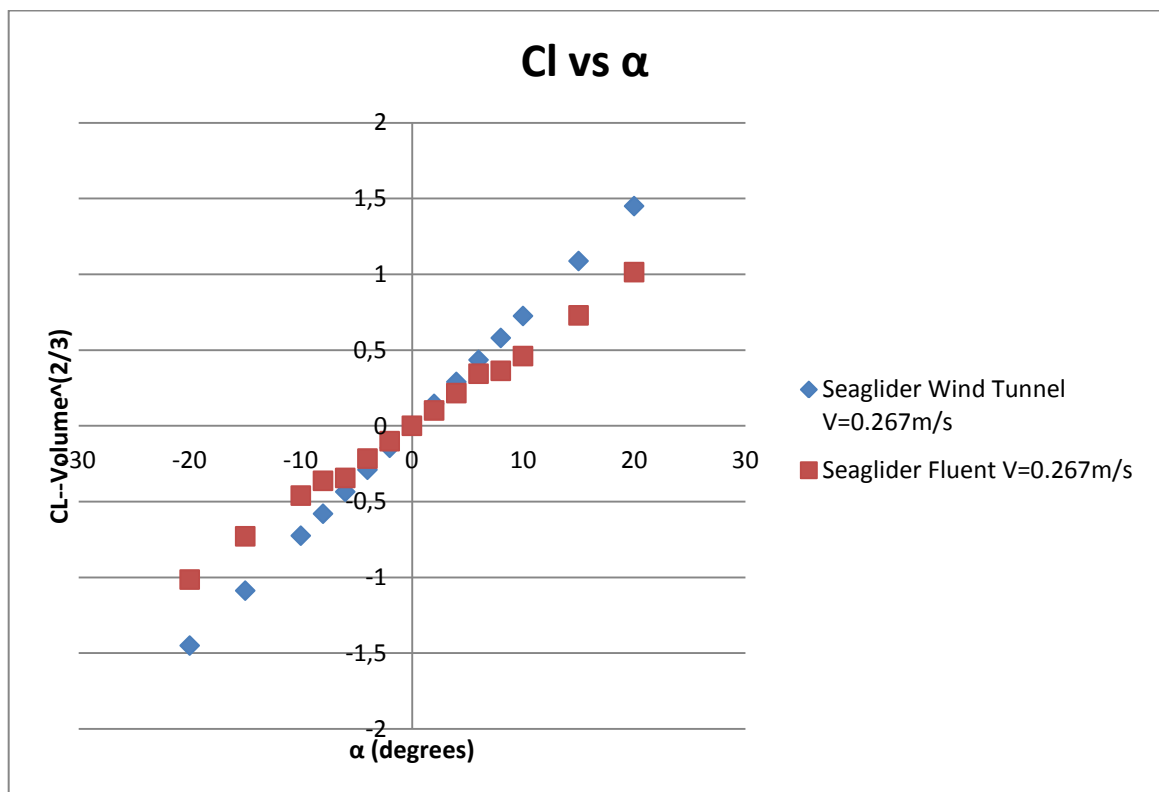


(b) C_D vs. α

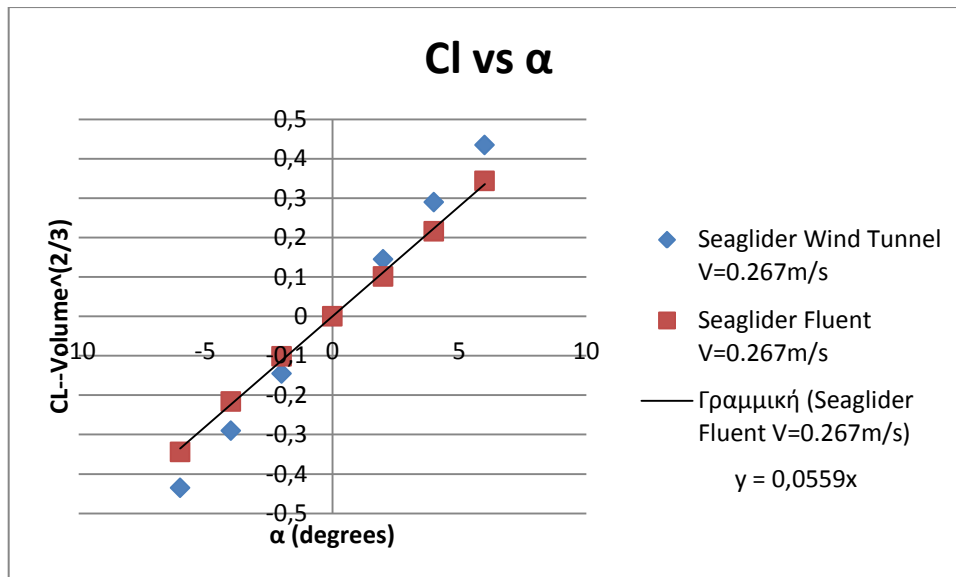
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ (UWAL) ΤΟΥ SEAGLIDER



ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ SEAGLIDER ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΙ ΣΤΗ CFD ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ (FLUENT)



ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ SEAGLIDER ΑΝΑΜΕΣΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑΣ ΚΑΙ ΣΤΗ CFD ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ (FLUENT)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΩΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ SEAGLIDER ΣΤΗ CFD ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η πολυωνυμική εξίσωση για το Seaglider στην αεροσήραγγα με ταχύτητα $V=0.267\text{m/s}$ όπως φαίνεται και στα προηγούμενα διαγράμματα για τον συντελεστή αντίστασης και τον συντελεστή άνωσης αντίστοιχα :

$$C_D=0.0009289\alpha^2+0,083146$$

$$C_L=0.072501\alpha$$

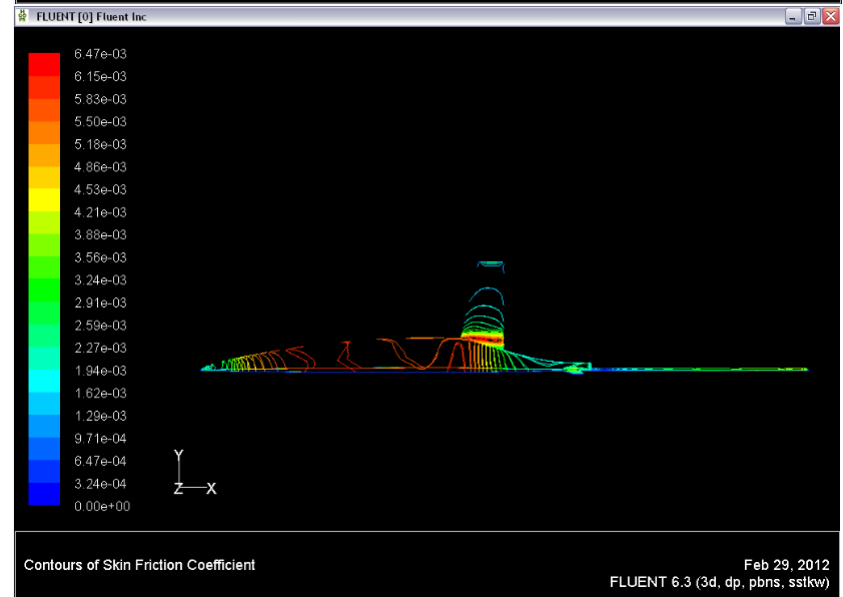
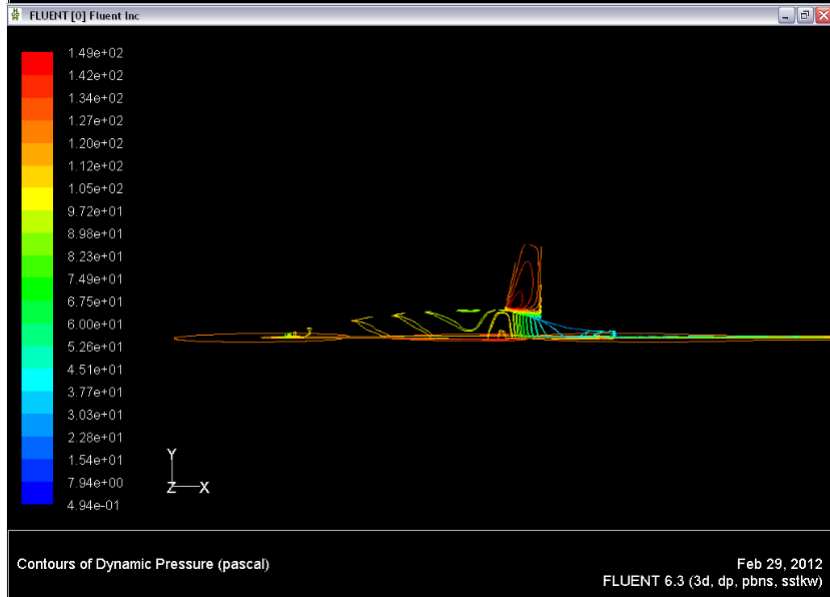
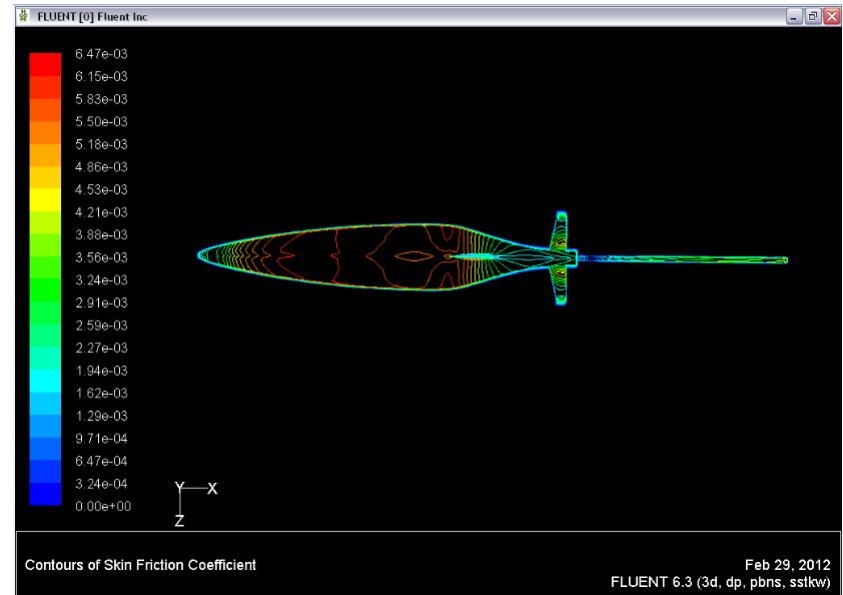
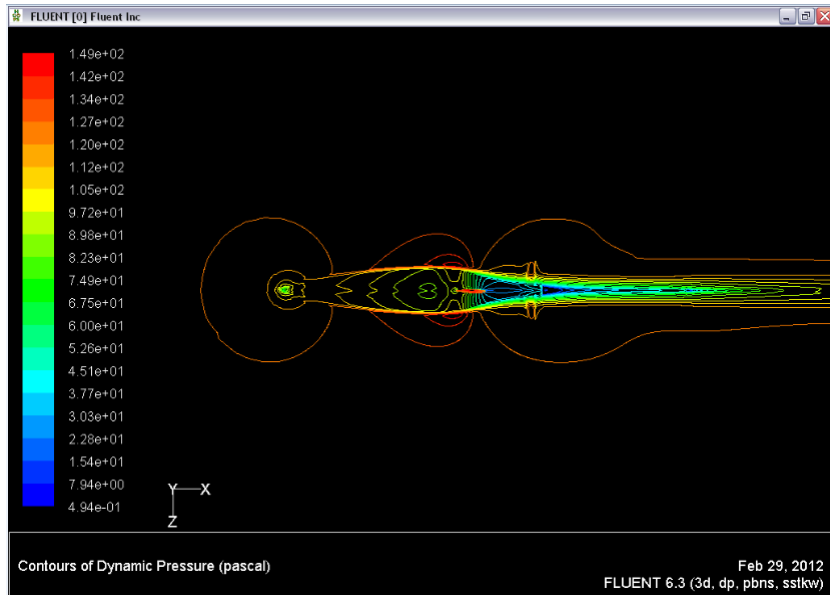
Ενώ όπως φαίνεται στα συγκριτικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων από το Fluent με αυτά της αεροσήραγγας παίρνουμε ότι οι πολυωνυμικές που χαρακτηρίζουν τους συντελεστές αντίστασης και άνωσης που αντιστοιχούν στις δοκιμές στο Fluent αντίστοιχα είναι:

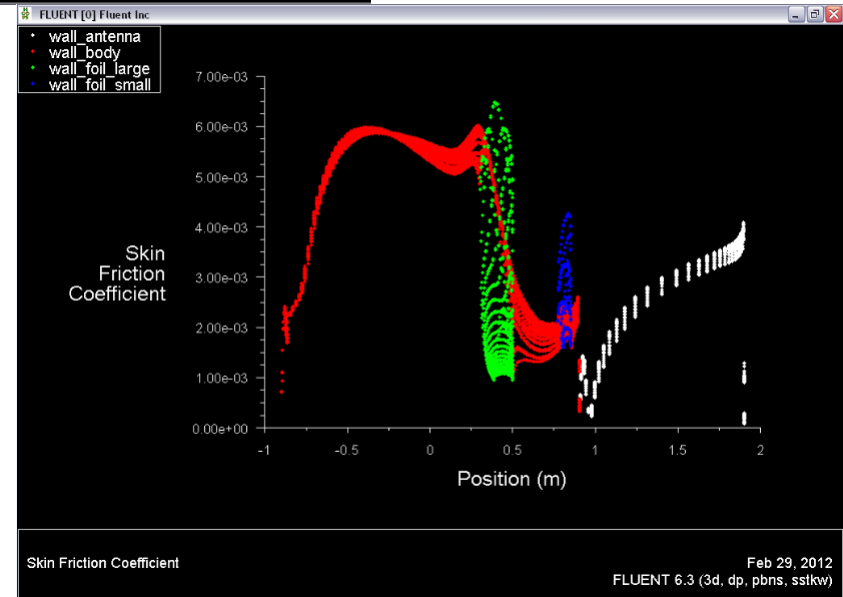
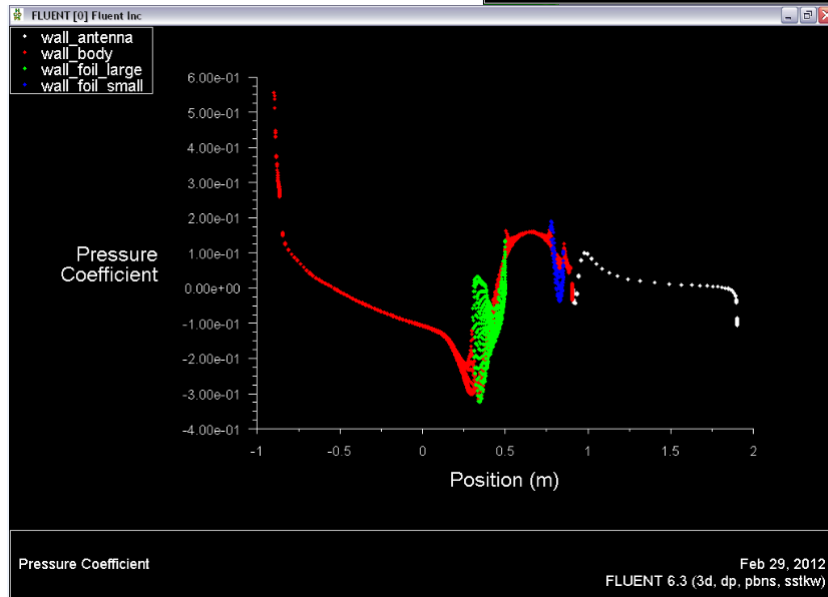
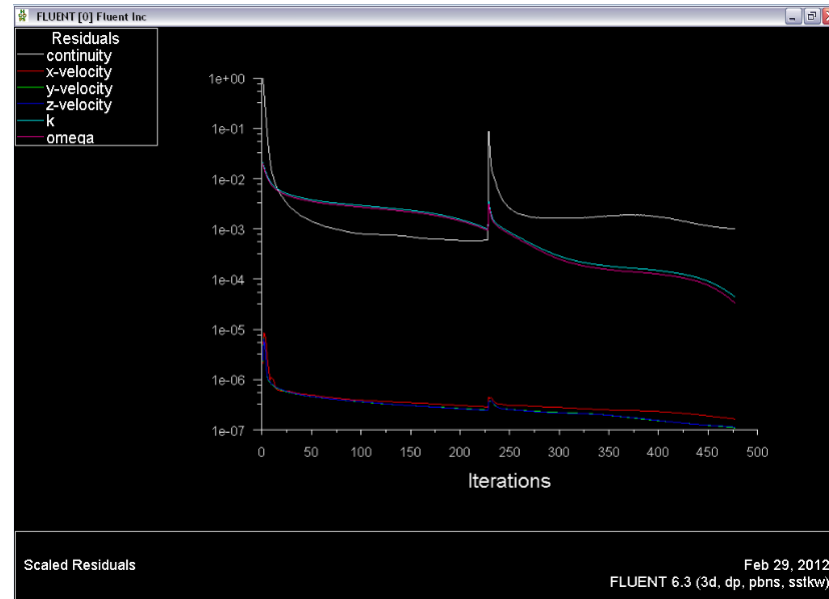
$$C_D=0.001\alpha^2+0.0529$$

$$C_L=0.0559\alpha$$

Παρατηρούμε λοιπόν, πως τα αποτελέσματα είναι τις ίδιες τάξης μεγέθους και συγκρίσιμα μεταξύ τους. Η απόκλιση που παρουσιάζουν μεταξύ τους είναι μικρή. Παρατηρούμε ότι για τον συντελεστή αντίστασης και για τον σταθερό του όρο στις δοκιμές που έγινε στην αεροσήραγγα παρουσιάζεται σχετικά αυξημένος κατά 37.5% σε σχέση με τον σταθερό όρο του συντελεστή αντίστασης του Fluent. Όπως αναφέρεται και στο δημοσιευμένο άρθρο στα πειράματα που έγιναν έχει αφεθεί ο σένσορας οξυγόνου λόγω αφέλειας κάτι που αυξάνει περίπου την αντίσταση κατά 12.4%. Μία άλλη διαφορά που παρατηρείται είναι η μικρή διαφορά ως προς τον όγκο του οχήματος. Το Seaglider που σχεδιάστηκε έχει όγκο ίσο με $0,066\text{m}^3$ (μέγεθος που έχει υπολογιστεί από το πρόγραμμα Rhinoceros) ενώ ο όγκος που αναφέρεται στο άρθρο είναι ίσος $0,0642\text{m}^3$. Ένας επιπλέον λόγος διαφοράς, είναι ο διαφορετικός τρόπος εκτέλεσης των δοκιμών (CFD - πειραματική διαδικασία), υπό τις ίδιες όμως προσδιορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος.

Έτσι παρακάτω δίνονται κάποια διαγράμματα από την ανάλυση που έγινε στο Fluent για γωνία πρόσπτωσης ίση με μηδέν για το Seaglider που απεικονίζουν τις ισοϋψείς καμπύλες της δυναμικής πίεσης, της αντίστασης τριβής χάρην πληρότητας.



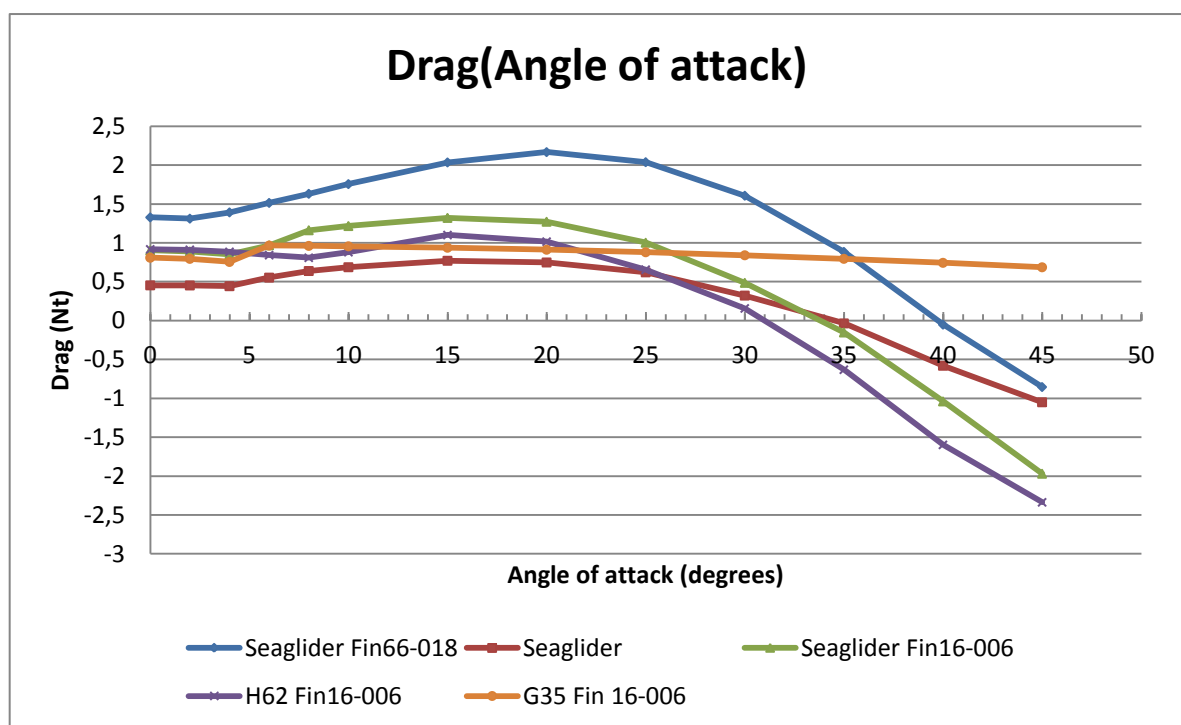


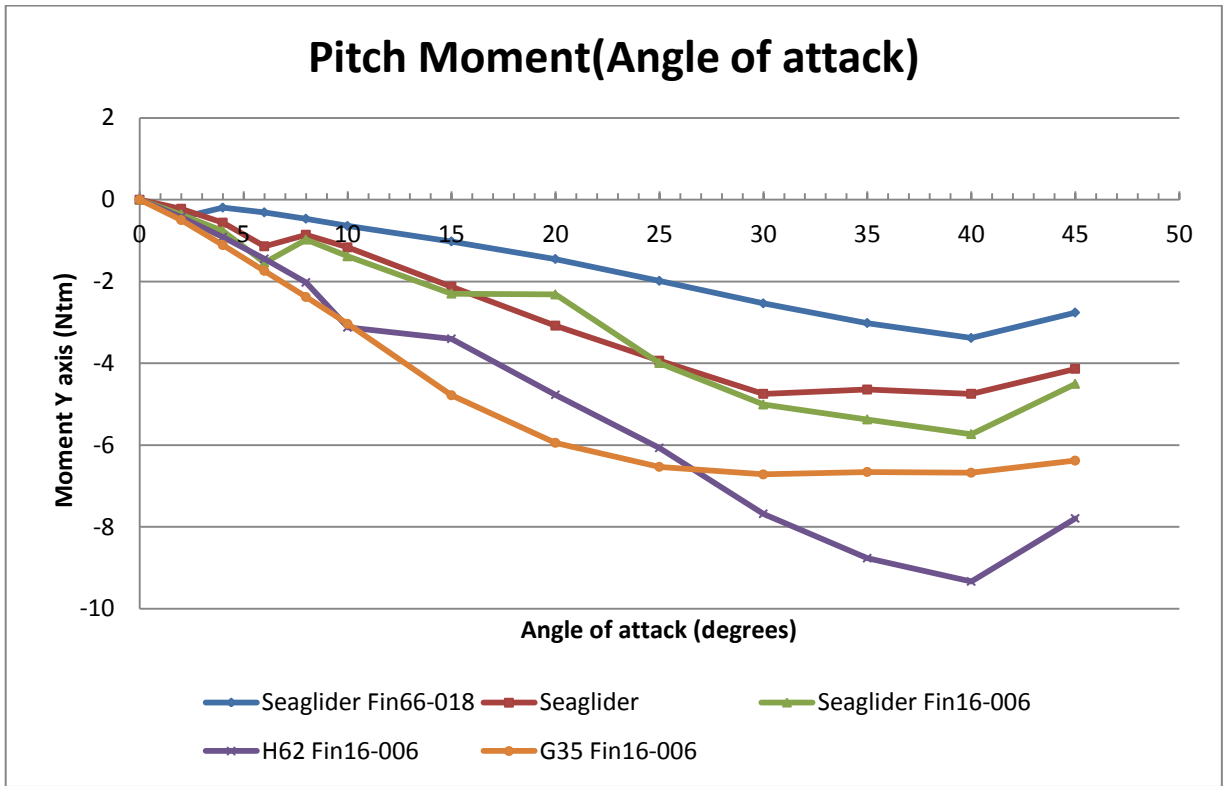
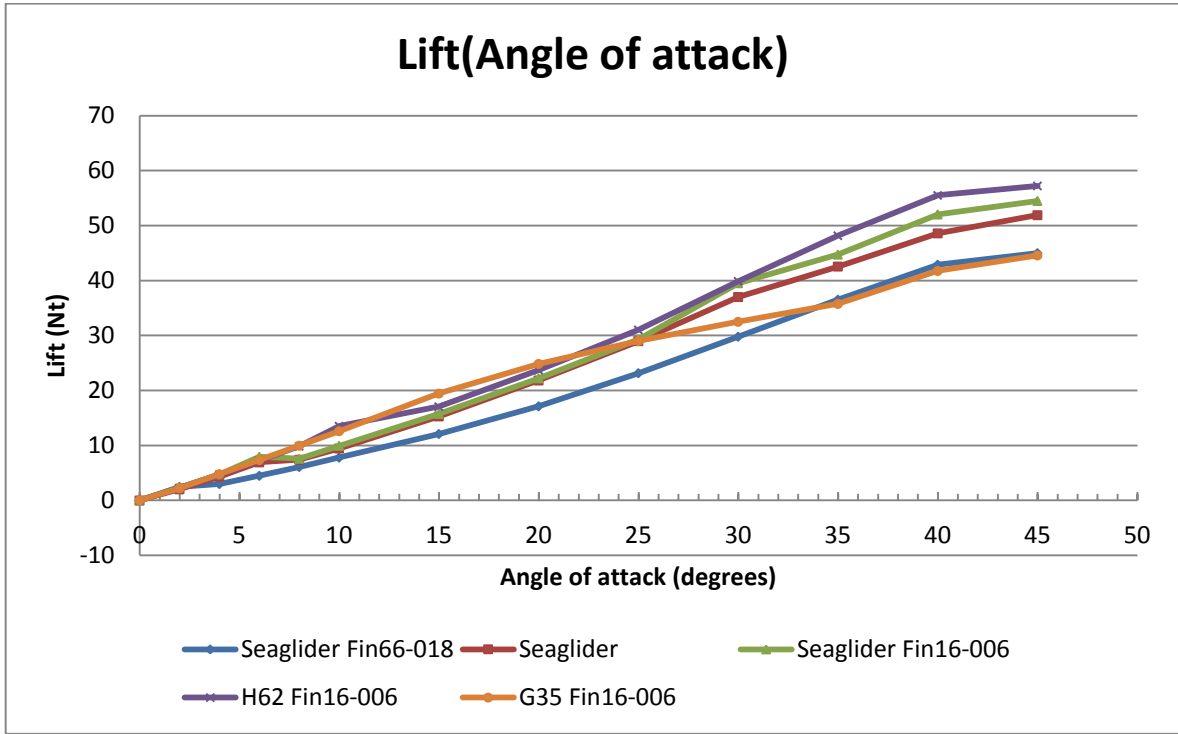
Με τα παραπάνω λοιπόν, συμπεραίνουμε ότι με την CFD διαδικασία μπορούμε να οδηγηθούμε σε σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα και να προβλέψουμε με σχετική καλή ακρίβεια αποτελέσματα που θα προέκυπταν και από πειραματική διαδικασία (όπως στην αεροσήραγγα). Κάτι που ωφελεί σε χρόνο και οικονομία πόρων.

Έχοντας λοιπόν συγκρίνει τα αποτελέσματα από το Fluent με αυτά των πειραμάτων στην αεροσήραγγα και έχοντας βεβαιωθεί ότι η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο Fluent βγάξει αξιόπιστα αποτελέσματα συνεχίζουμε στην περαιτέρω ανάλυση των υδροπτέρων που έχουν αναφερθεί παραπάνω.

Τα υδρόπτερα που υπάρχουν είναι σχεδιασμένα για συλλογή ωκεανογραφικών δεδομένων και έχουν ταχύτητες μέχρι 0.5 m/s. Η μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας τους έχει επιλεγεί με βάση τα αναμενόμενα μέσης ταχύτητας ωκεάνια ρεύματα και έχουν ικανοποιητικές ικανότητες δειγματοληψίας. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση θα συνεχιστεί εξετάζοντας τα υδρόπτερα σε ταχύτητα κοντά στα 0.5m/s.

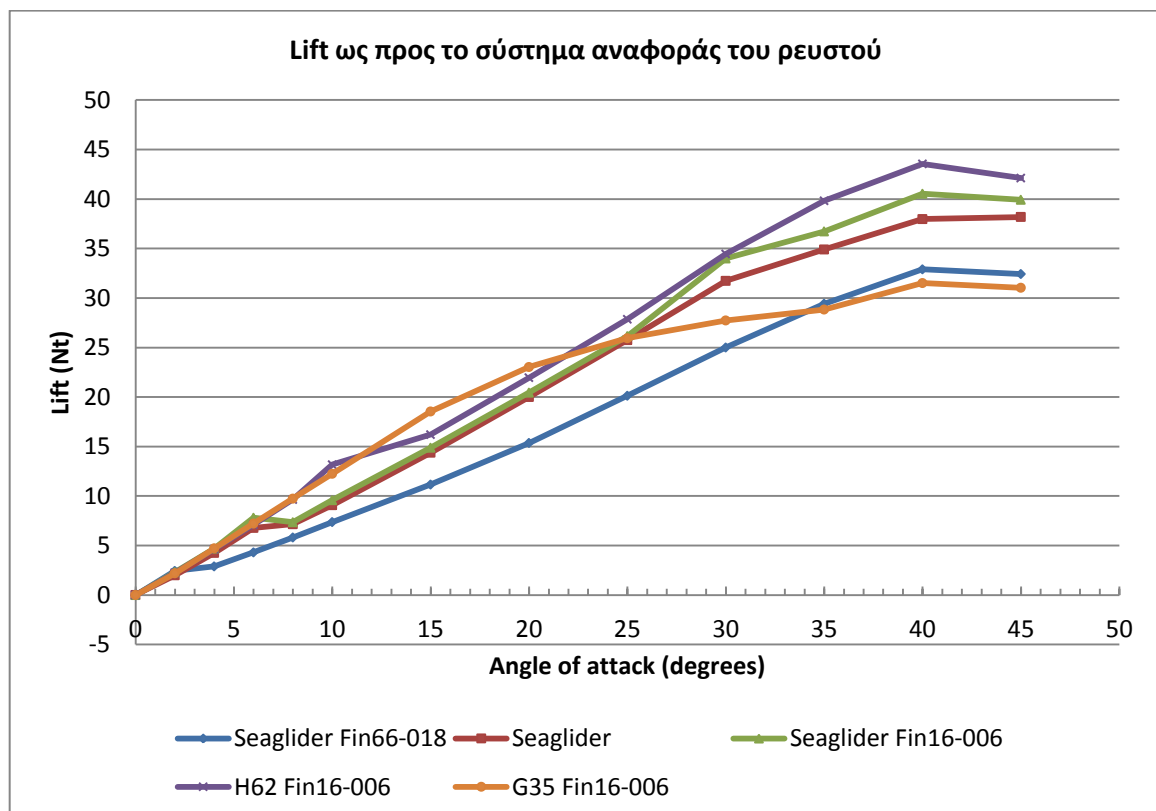
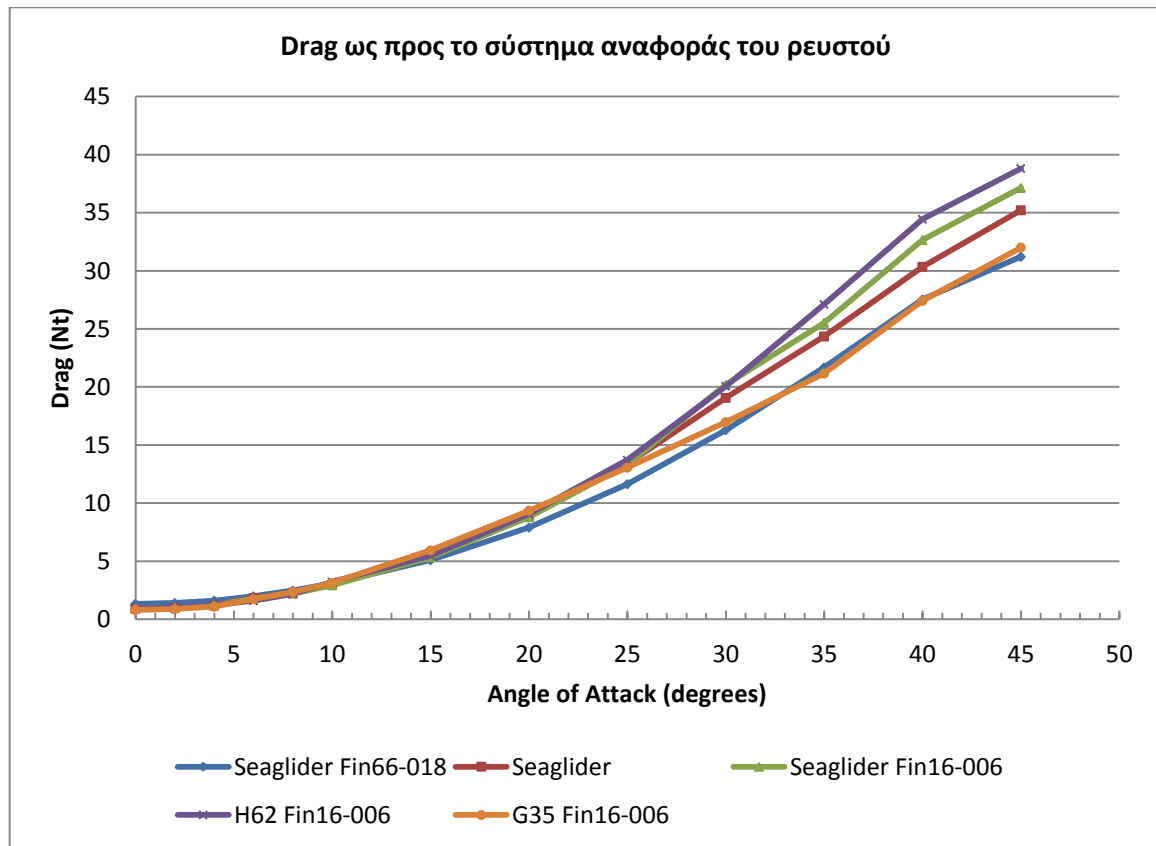
Ακολουθούν διαγράμματα που αναφέρονται στη δύναμη αντίστασης και της άνωσης ως προς το σωματοπαγές σύστημα αξόνων σε συναρτήσε με την γωνία πρόσπτωσης

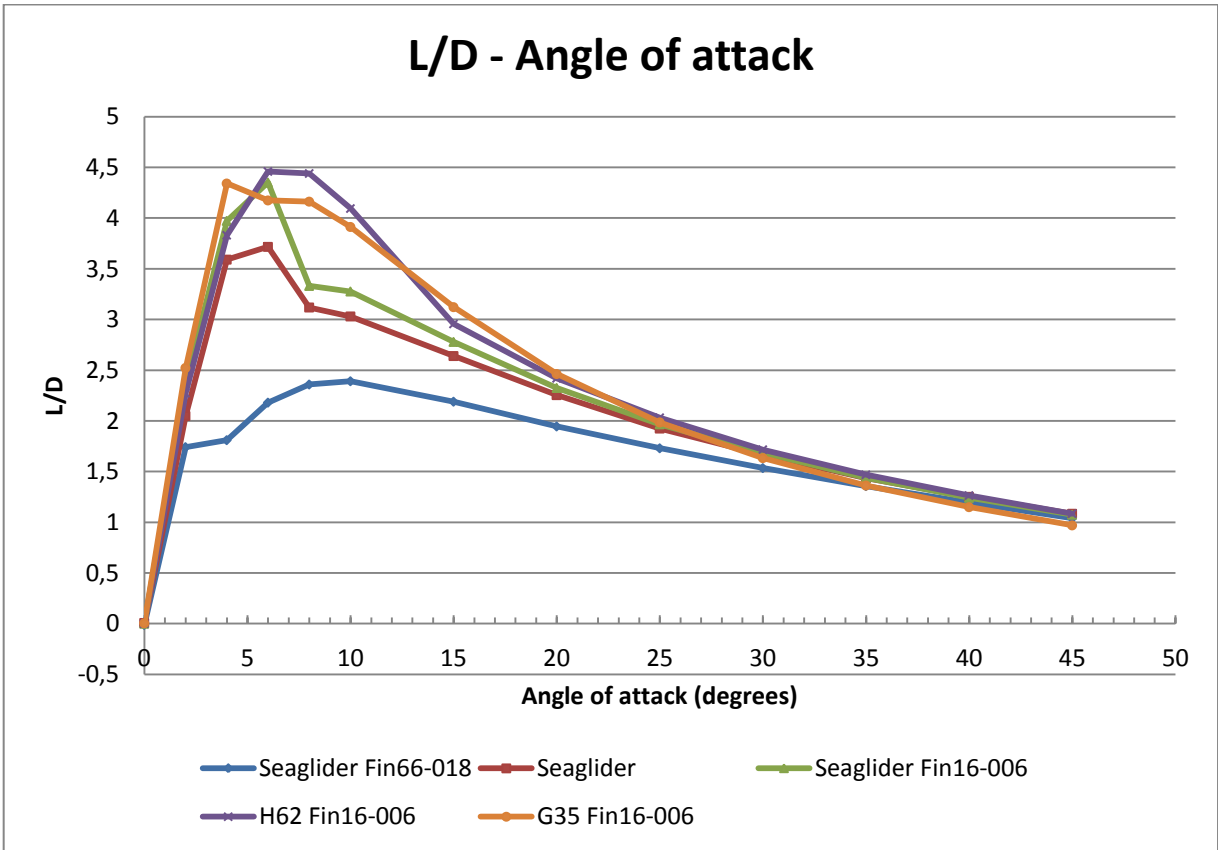
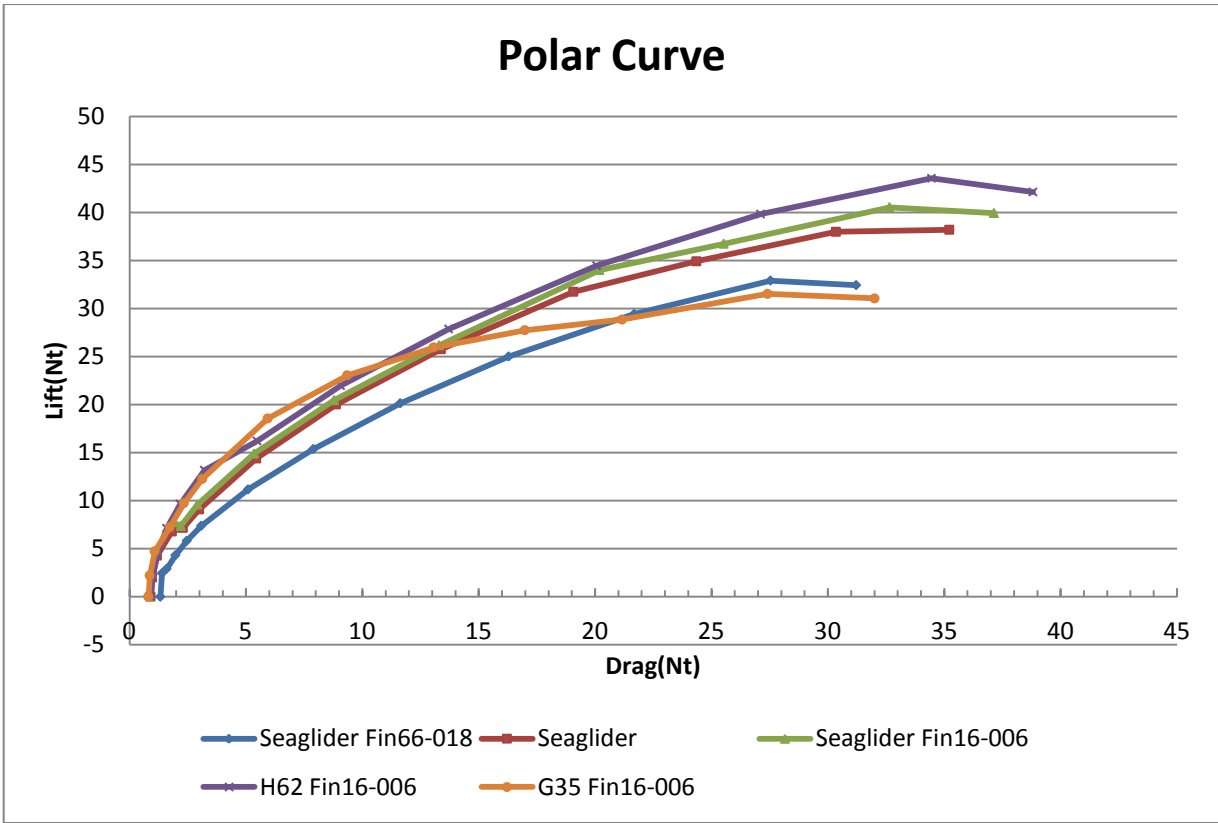




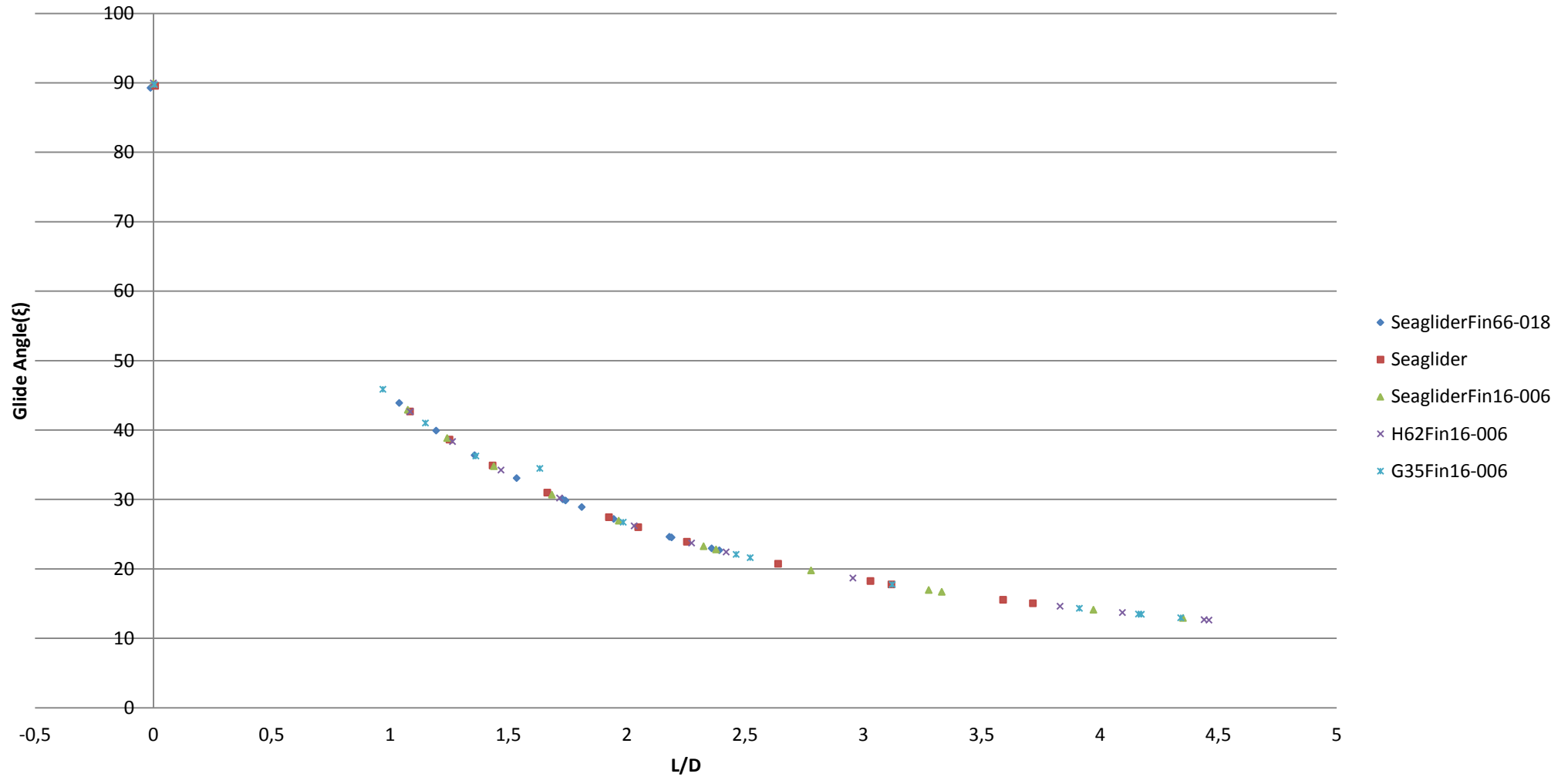
Όμως για να προβούμε σε καλύτερες συγκρίσεις μετατρέπουμε τα αποτελέσματα από το σωματοπαγές στο σύστημα αναφοράς του ρευστού σύμφωνα με τα μητρώα περιστροφής που έχουν αναλυθεί στα πρώτα κεφάλαια.

Έτσι έχουμε :

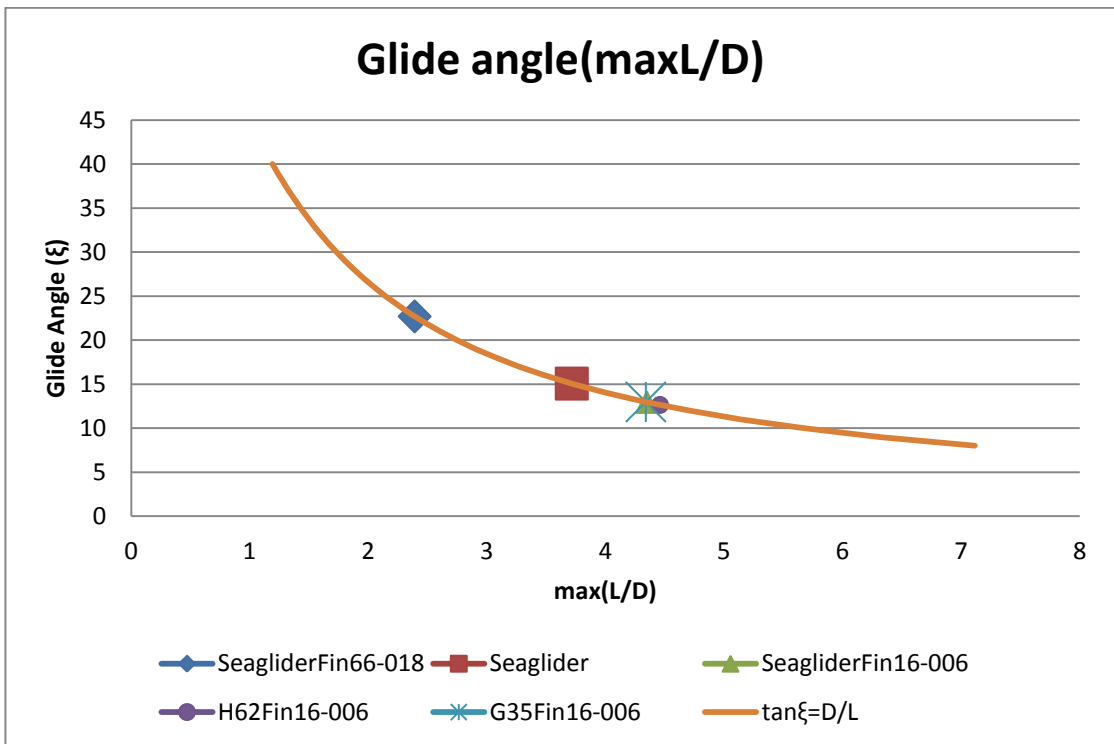
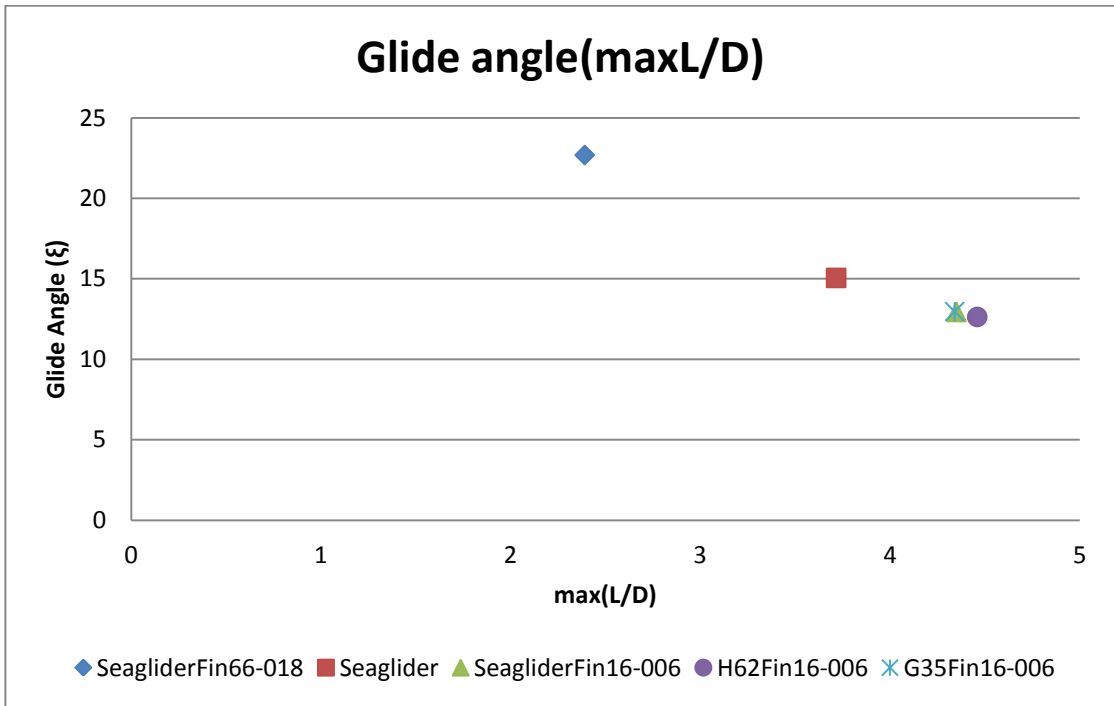




Glide Angle (ξ)



ΓΩΝΙΑ ΙΧΝΟΥΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ L/D ΓΙΑ ΟΛΑ ΤΑ ΥΔΡΟΠΤΕΡΑ ΠΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΝΤΑΙ



ΓΩΝΙΑ ΙΧΝΟΥΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (GLIDE ANGLE) ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ L/D

Συγκεντρωτικά από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε τα εξής :

| | Seaglider | Seaglider Fin16-006 | H62 Fin16-006 | G35 Fin16-006 | Seaglider Fin66-018 |
|--|------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Stall angle (angle of attack) | 45° | 40° | 40° | 40° | 40° |
| Drag (min) (Nt) | 0.9082 (0°) | 0.9032 (0°) | 0.9172 (0°) | 0.8094 (0°) | 1.3282 (0°) |
| Lift (max) (Nt) | 38.1943 | 40.5391 | 43.5519 | 31.5176 | 32.9019 |
| (L/D)max | 3.7164 | 4.3505 | 4.4602 | 4.3412 | 2.3912 |
| Most efficient angle of attack → (L/D)max | 6° | 6° | 6° | 4° | 10° |
| Glide angle (ξ) | 15,6° | 12.9° | 12.6° | 13.5° | 22.7° |

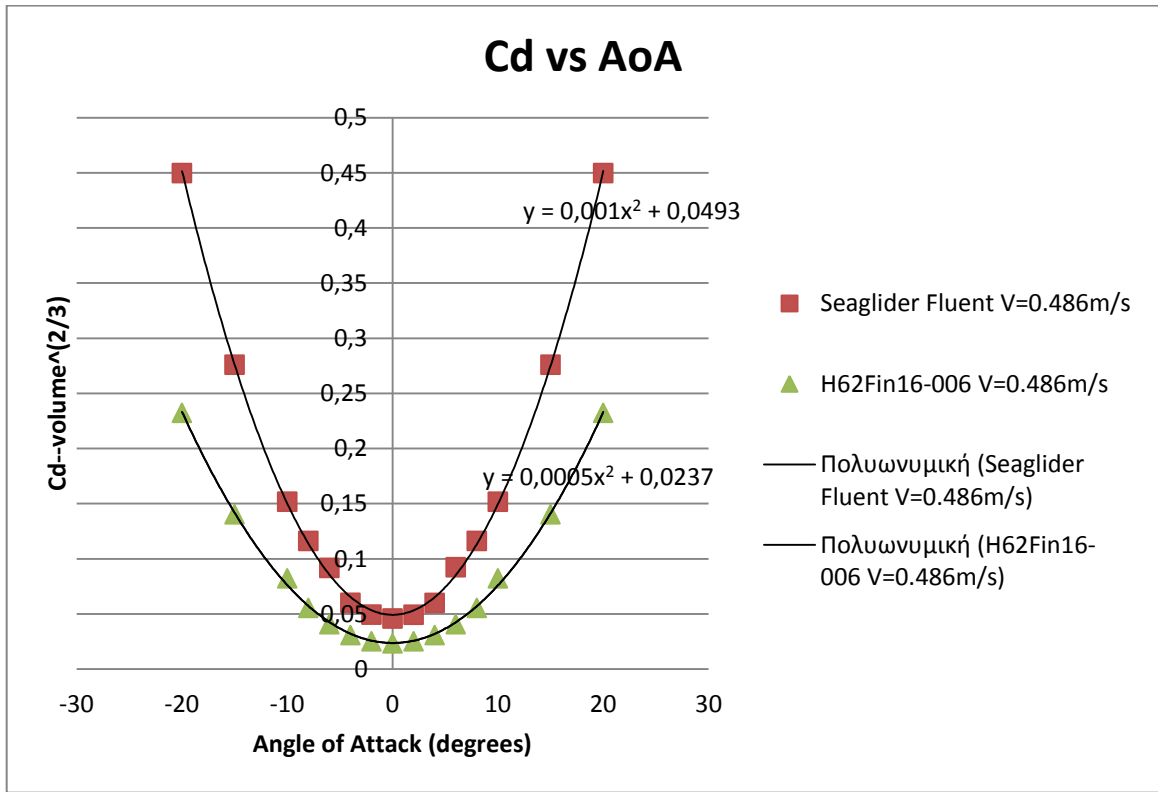
Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι για το ίδιο πτερύγιο Fin16-006 και διαφορετικά σώματα, εκείνο που μας δίνει συνολικά την μικρότερη αντίσταση είναι το σώμα με την μικρότερη αντίσταση όπως είχε μελετηθεί και στην δισδιάστατη μελέτη. Δηλαδή το G35 Fin16-006.

Ενώ για ίδιο σώμα (Seaglider) εκείνο που μας δίνει την μικρότερη αντίσταση είναι αυτό με το πτερύγιο βασισμένο στην αεροτομή NACA16-006 της μη ορθογωνικής επιφάνειας.

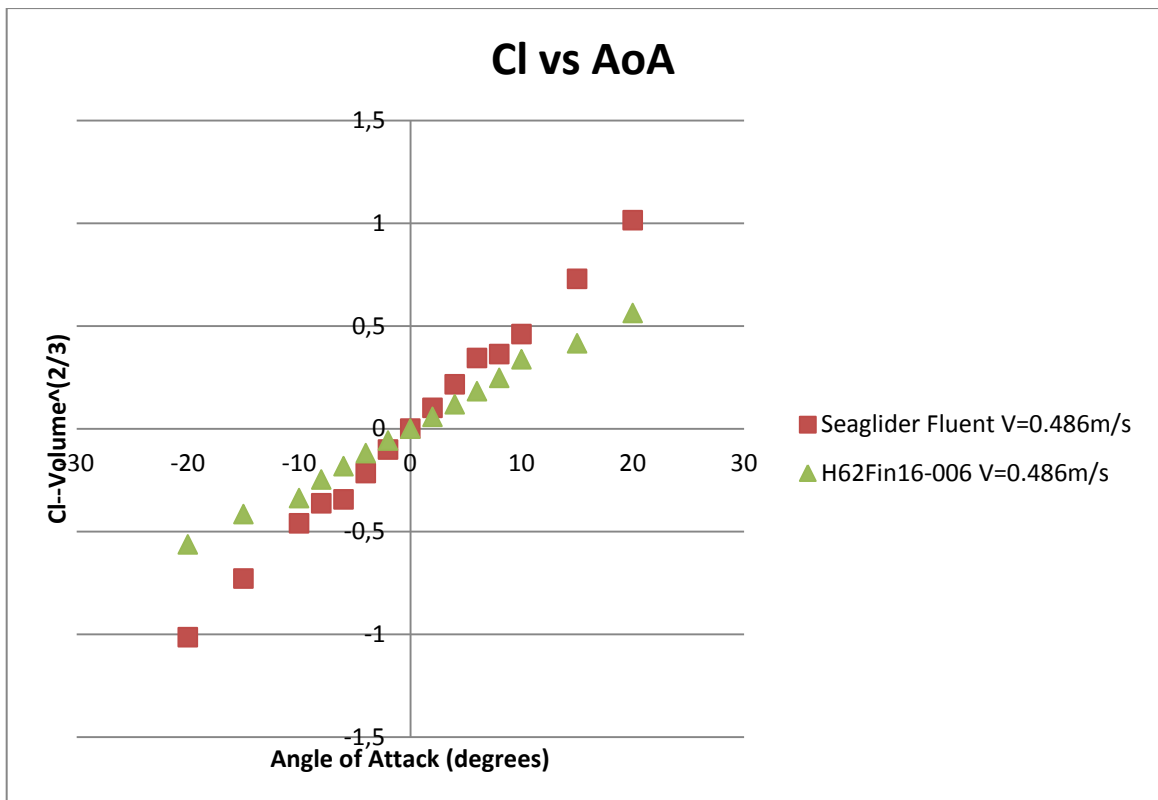
Από τα παραπάνω συμπεράσματα, επιλέξαμε το πτερύγιο Fin16-006 και σαν σώμα μία γεωμετρία χαμηλής αντίστασης η οποία να έχει τον ίδιο όγκο με το Seaglider. Έτσι σχεδιάστηκε το H62FIN16-006. Και όπως παρατηρούμε και στο πίνακα αλλά και στα διαγράμματα έχει δώσει τα καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με τα υπόλοιπα υδρόπτερα. Αν συγκρίνουμε στο διάγραμμα "polar curve" τις καμπύλες θα διαπιστώσουμε ότι για την ίδια τιμή της αντίστασης έχουμε την μεγαλύτερη άνωση στο υδρόπτερο H62FIN16-006 τόσο για τις μικρές γωνίες πρόσπτωσης όσο και για τις μεγαλύτερες. Επίσης, από το διάγραμμα L/D βλέπουμε ότι κατέχει και την μεγαλύτερη τιμή του λόγου αυτού κάτι το οποίο επιθυμούσαμε. Ταυτόχρονα δίνει και την μικρότερη γωνία ολίσθησης (12.6°). Έτσι ο σκοπός μας επιτεύχθηκε.

Στη συνέχεια δίνονται περισσότερα στοιχεία για το υδρόπτερο H62FIN16-006. Και δίνονται οι υδροδυναμικοί συντελεστές που το χαρακτηρίζουν.

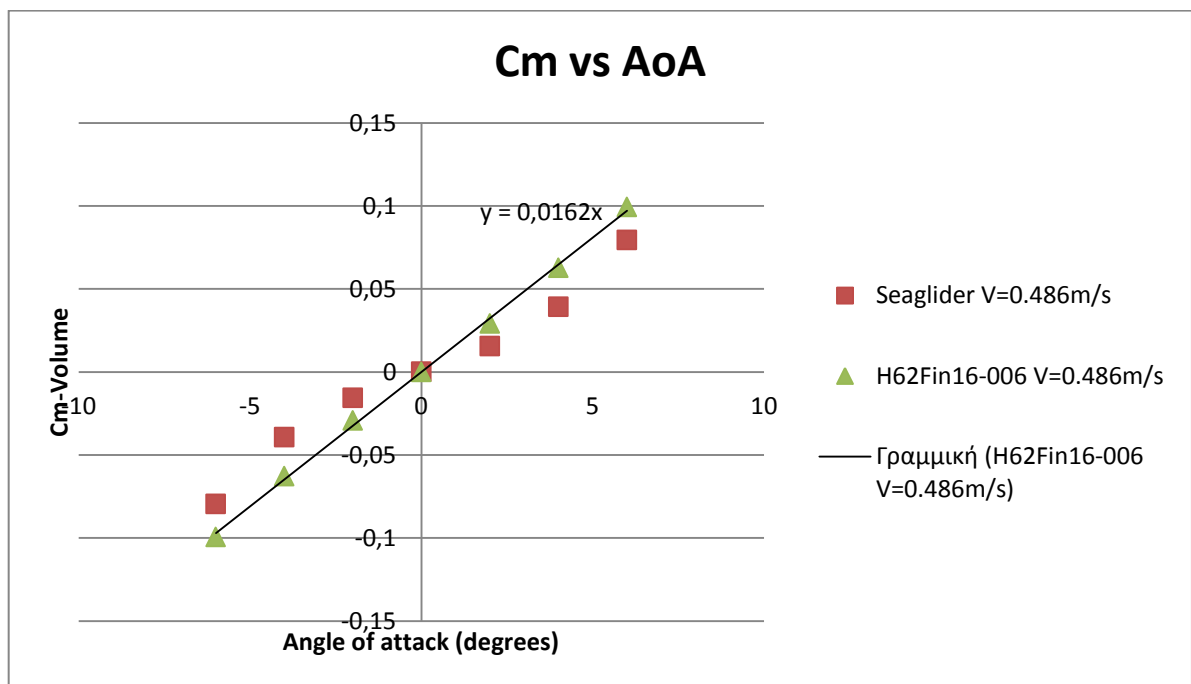
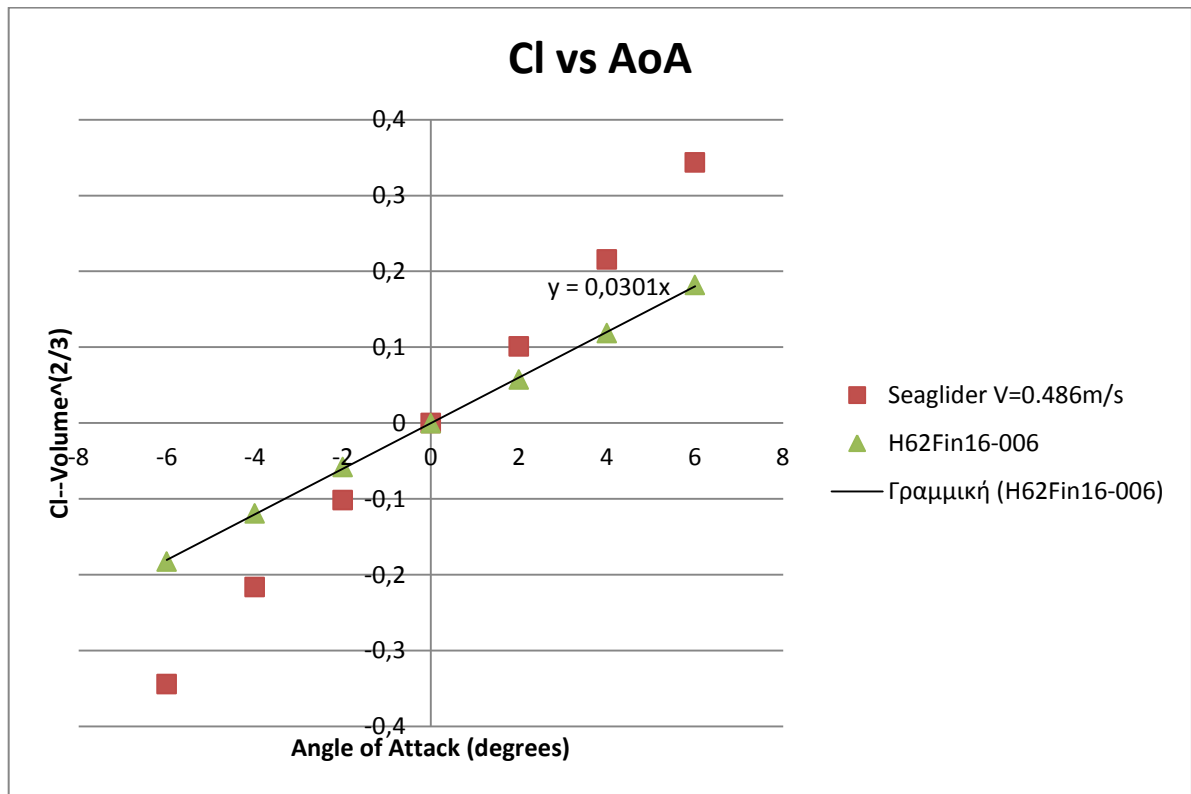
Η περαιτέρω μελέτη έγινε σε ταχύτητα ίση με 0,486 m/s μία μέση μέγιστη ταχύτητα που μπορούν να αναπτύξουν τα υδρόπτερα (όπως έχει δοθεί και στα χαρακτηριστικά τους στο πρώτο κεφάλαιο) έτσι ώστε να εξετασθεί η συμπεριφορά τους σε περιβάλλον ρευστό σε συνθήκες μέγιστης λειτουργίας.



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΝΩΣΗΣ



ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΡΟΠΗΣ (PITCH)

Από τα παραπάνω διαγράμματα για το υδρόπτερο H62Fin16-006 έχουμε τα ακόλουθα:

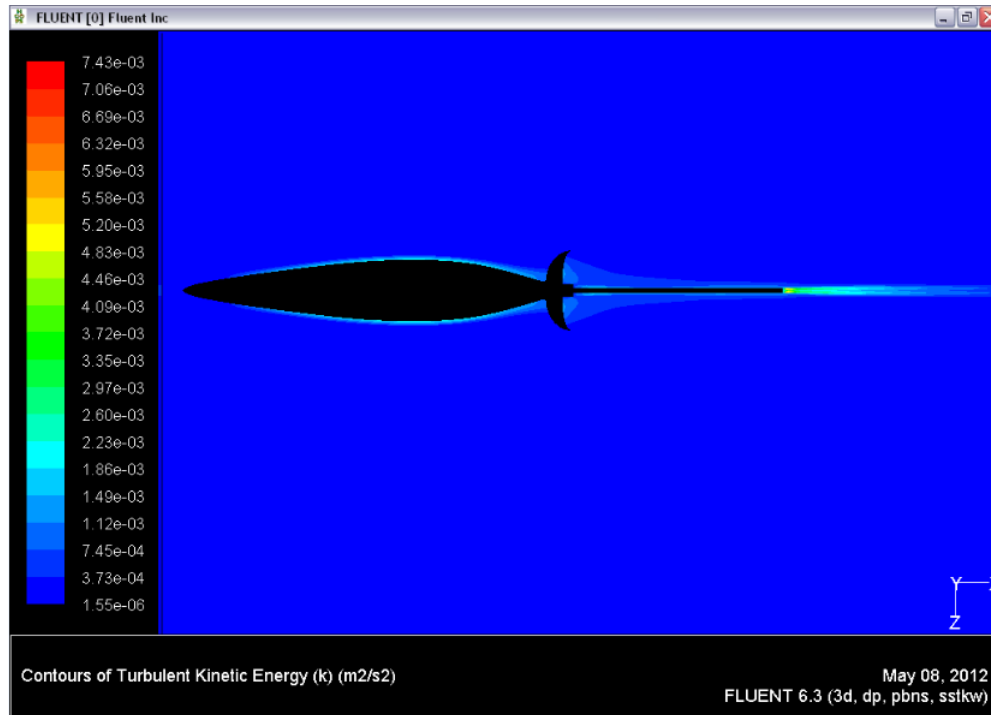
$$C_D = 0.0005a^2 + 0.0237$$

$$C_L = 0.0301a$$

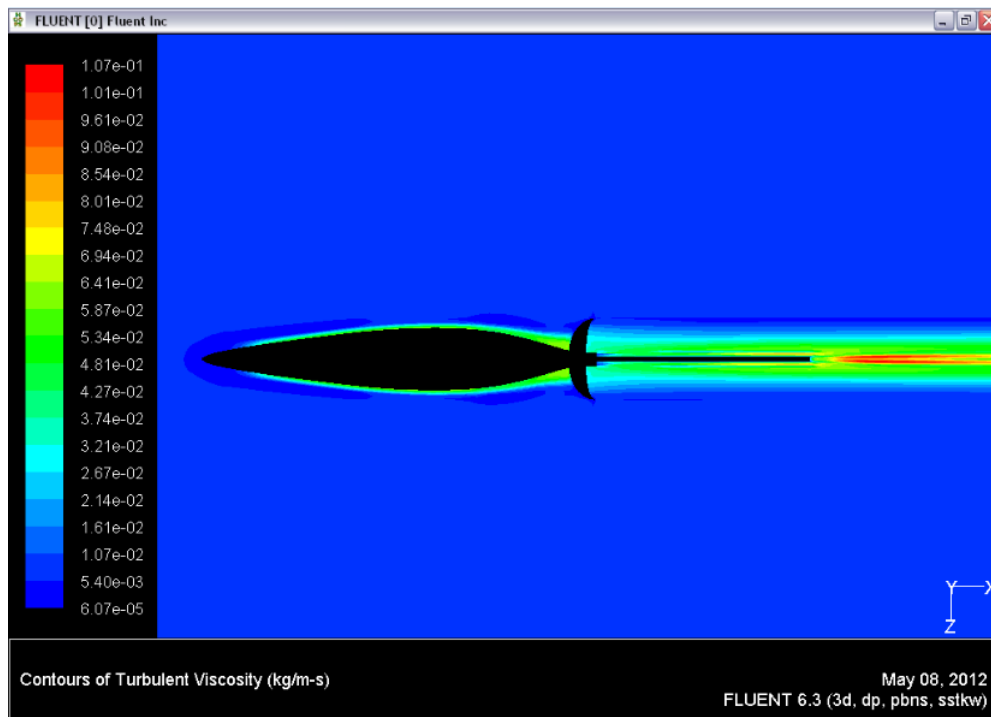
$$C_m = 0.0162a$$

Ακολουθεί πίνακας με τους υδροδυναμικούς (αεροδυναμικούς) συντελεστές του Seaglider και του H62Fin16-006

| | C_{D0} | $C_{D\alpha}$ | $C_{L\alpha}$ | $C_{m\alpha}$ |
|--------------|----------|---------------|---------------|---------------|
| Seaglider | 0.0493 | 0.0010 | 0.0559 | 0.0119 |
| H62Fin16-006 | 0.0237 | 0.0005 | 0.0301 | 0.0162 |



CONTOURS OF TURBULENT KINETIC ENERGY H62FIN16-006

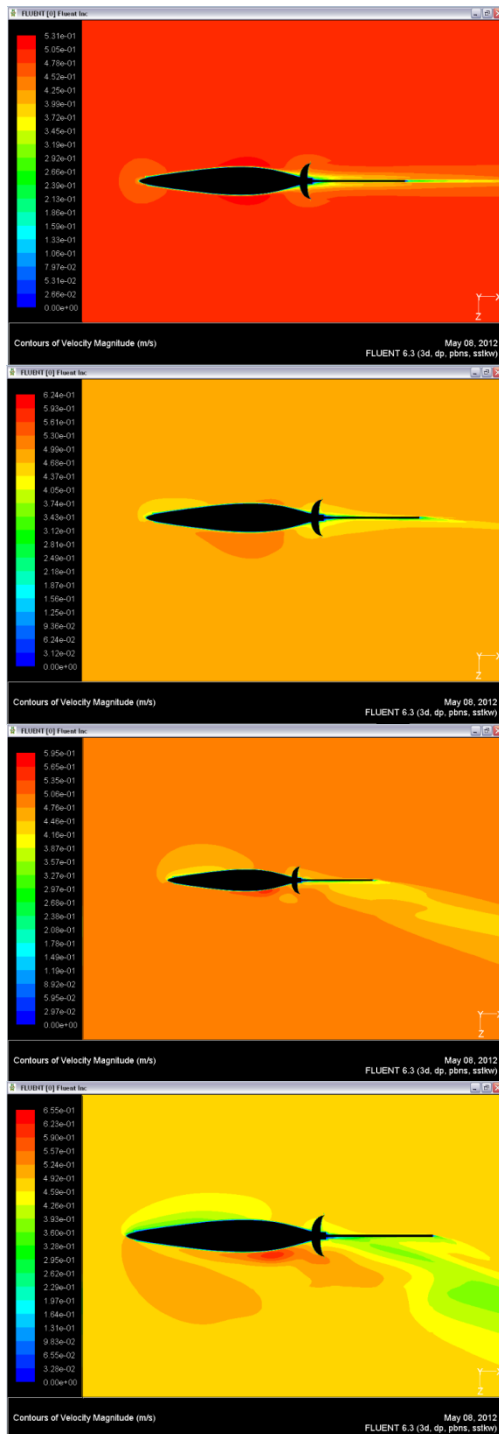


CONTOURS OF TURBULENT VISCOSITY H62FIN16-006

Από την επίλυση του ροϊκού πεδίου εξάγεται η κατανομή των ταχυτήτων στην διεύθυνση x. Με την γνώση του πεδίου των ταχυτήτων είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ύπαρξη αποκολλήσεων, διαφορών δυνών και απώλειας πίεσης στο υδρόπτερο. Τα φαινόμενα αυτά μεταβάλλουν την κατανομή της πίεσης στο ροϊκό πεδίο και κατά συνέπεια μεταβάλλουν την παραγωγή άνωσης. Έτσι, με προσεκτική ανάλυση της μεταβολής του πεδίου ταχυτήτων είναι δυνατή η επεξήγηση της μεταβολής του πεδίου πιέσεων και η παρουσίαση της αιτίας της μεταβολής των δυνάμεων άνωσης και αντίστασης.

Στις εικόνες που ακολουθούν αναπαρίστανται οι ισούψεις καμπύλες της ταχύτητας για γωνίες πρόσπτωσης 0° , 10° , 20° , 30° και 40° .

Πεδίο ταχυτήτων ανά γωνία πρόσπτωσης- Contours of Velocity Magnitude

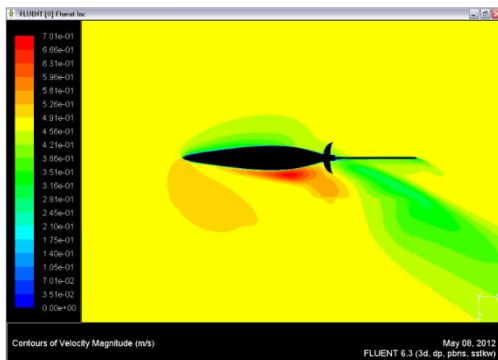


ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ 0°

ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ 10°

ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ 20°

ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ 30°



ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗΣ 40°

ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα πρώτα βήματα στον σχεδιασμό ενός υποβρυχίου οχήματος περιλαμβάνουν τον καθορισμό των απαιτήσεων των αποστολών τις οποίες θα κληθεί να πραγματοποιήσει, τον καθορισμό του μεγέθους των βασικών στοιχείων και την επιλογή μιας αρχικής γεωμετρίας του οχήματος. Οι απαιτήσεις των αποστολών περιλαμβάνουν την εμβέλεια, διάρκεια, ταχύτητα και το ωφέλιμο φορτίο. Αυτά τα στοιχεία θα καθορίσουν τις απαιτήσεις του οχήματος σε ενέργεια. Η ενέργεια είναι συνήθως ο πιο σημαντικός παράγοντας περιορισμού στις επιδόσεις του οχήματος γι αυτό απαιτείται ειδική προσοχή στο απόθεμα ενέργειας σε όλες τις φάσεις σχεδιασμού. Η ενέργεια είναι πάντα ένα κρίσιμος παράγοντας στο σχεδιασμό αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων και ακόμα περισσότερο στα υποβρύχια υδρόπτερα, δεδομένων των εκτεταμένων αποστολών τους.

Είναι γεγονός ότι, λόγω ακριβώς του σχεδιασμού τους, τα υπάρχοντα υποβρύχια υδρόπτερα (legacy gliders: Slocum, Spray, Seaglider) δεν λειτουργούν με τον πλέον αποδοτικότερο τρόπο. Σύμφωνα με τη μελέτη των (Jenkins, 2003), τα οχήματα αυτά παρουσιάζουν μια αεροδυναμική ανεπάρκεια (αναποτελεσματικότητα), η οποία εκφράζεται με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Δεν λειτουργούν με την επιθυμητή οικονομία (όπως τα πουλιά ή οι νυχτερίδες), λόγω του τρόπου που κινούνται, του ανεπαρκούς φόρτου των πτερυγίων τους, της υπερβολικής βρεχόμενης επιφάνειας και της ανεπάρκειας των μηχανισμών πλευστότητας.
- Δεν λειτουργούν με τον πιο αποδοτικό τρόπο λόγω των μεγάλων (απότομων) γωνιών στις οποίες κινούνται ώστε να πραγματοποιούν κατατομές ωκεάνιων θαλασσίων μαζών. Αν έπλεαν σε πιο επίπεδες κλίσεις (μέσα στις παρούσες δυνατότητές τους L/D_{max}) η οικονομία κατά μεταφορά/λειτουργία τους θα βελτιώνονταν κατά τρεις φορές).
- Τα υπάρχοντα υδρόπτερα έχουν τέτοια μορφή ώστε η συνολική βρεχόμενη επιφάνειά τους είναι πολύ μεγάλη για το φόρτο πτέρυγας στο οποίο λειτουργούν τα υδρόπτερα.
- Η μέγιστη ταχύτητα κατά μήκος της πορείας του οχήματος επιτυγχάνεται πάντα στις 35 μοίρες γωνίας ίχνους ολίσθησης ανεξάρτητα από το σχήμα και τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος.

Έτσι για να διερευνηθεί η ανεπάρκεια που παρατηρείται όσον αφορά στην υδροδυναμική των υποβρυχίων υδροπτέρων αναφέρουμε μία αναλυτική έκφραση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας συναρτήσεως των υδροδυναμικών του χαρακτηριστικών όπως δίνεται από (Jenkins, 2003). Η ειδική κατανάλωση ενέργειας εκφράζει την ενέργεια που δαπανάται ώστε το όχημα να ξεπεράσει την αντίσταση.

Η δαπάνη ενέργειας ανά μέτρο που ταξιδεύει το όχημα είναι ανάλογη με το βαθμό κατολίσθισης (glide slope D/L) ή ισοδύναμα τον αντίστροφο λόγο άνωσης αντίστασης (Lift-to-drag ratio L/D). Έτσι προδίδοντας σε ένα underwater glider χαρακτηριστικά χαμηλού drag και υψηλού lift, η κατανάλωση ενέργειας κατά τη μετακίνηση του οχήματος μπορεί να μειωθεί σε αυτή που καταναλίσκεται από το μηχανισμό μεταβλητής πλευστότητας για τη μεταβολή της καθαρής πλευστότητας μεταξύ θετικής και αρνητικής. Με λίγα λόγια μπορούν τα υδρόπτερα να μην καταναλίσκουν ενέργεια κατά τη μετακίνησή τους (ευθεία κίνηση σε κατάσταση ισορροπίας).

$$E_e = DU/Bu = Bw/Bu \sim D/L = C_D/C_L$$

C_D και C_L είναι οι συντελεστές αντίστασης και άνωσης οι οποίοι κανονικοποιούν την αντίσταση και την άνωση αντίστοιχα ως προς την επιφάνεια πτερυγίου A .

Εισάγοντας την αναλυτική έκφραση για την ειδική κατανάλωση ενέργειας προκύπτει η έκφραση:

$$E_e = \frac{D}{L} = \frac{C_D}{C_L} = K_0(\rho v^2/2)^{\gamma/2} C_L^{\gamma/2-1} (AR/Mg)^{\gamma/2} \frac{A_t}{A} + KC_L/(\pi AR)$$

Ή πιο γενικά

$$E_e \sim (M)^q \left(\frac{A_t}{A}\right)^r (AR)^s$$

Έτσι προκύπτουν δυο εκφράσεις ανάλογα με την επιλογή εκθέτη γ στην έκφραση της αντίστασης λόγω τριβής της εξαρτώμενης από τον αριθμό Reynolds:

$$E_e \sim (M)^{-1/7} \left(\frac{A_t}{A}\right)^{4/7} (AR)^{-2/7} \quad \text{all laminar boundary layer}$$

$$E_e \sim (M)^{-1/19} \left(\frac{A_t}{A}\right)^{10/19} (AR)^{-8/19} \quad \text{all turbulent boundary layer}$$

(McMasters, 1974)

Έτσι και για τις δύο καταστάσεις τύρβης (στρωτή και τυρβώδη) η λύση παρουσιάζει εξάρτηση από το βάρος (πλευστότητα) η οποία υποδεικνύει ότι η πλεύση σε μεγαλύτερες μάζες (loaded mass) είναι πιο αποτελεσματική (οικονομική) καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια ανά μέτρο που ταξιδεύει το όχημα για κάθε επιπλέον κιλό ωφέλιμου φορτίου. Το διάταμα AR του πτερυγίου παρουσιάζει μεγαλύτερη επιρροή με την ειδική κατανάλωση ενέργειας να μειώνεται με την αύξηση του AR. Ο άλλος παράγοντας σχετικός με το σχήμα του ο οποίος επηρεάζει έντονα την ειδική κατανάλωση ενέργειας είναι το ποσό την βρεχόμενης επιφάνειας η οποία παράγει άνωση και εκφράζεται με το λόγο της συνολικής βρεχόμενης επιφάνειας προς την επιφάνεια πτερυγίου A_t/A . Η κατανάλωση ενέργειας κατά την πτήση αυξάνεται ραγδαία και στις δυο περιπτώσεις στρωτής και τυρβώδους ροής όσο προστίθεται στο όχημα επιφάνεια η οποία δεν παράγει άνωση.

Η παρούσα υπερβολική κατανάλωση ενέργειας από τα υποβρύχια υδρόπτερα μπορεί τώρα να κατανοηθεί. Λειτουργώντας σε καταστάσεις μικρής φαινόμενης μάζας (loaded mass) ($M \sim 100 - 300g$) τα υπάρχοντα υδρόπτερα λειτουργούν σε ένα καθεστώς χαμηλής αποτελεσματικότητας. Η εκμετάλλευση του χώρου - όγκου που δεν χρησιμοποιείται ώστε να αυξηθεί η καθαρή πλευστότητα σε 1 - 3 Kg θα μείωνε την ειδική κατανάλωση ενέργειας κατά 72% (στρωτή ροή) και 89% (τυρβώδης ροή). Αυτό θα ήταν μία πολύ σημαντική βελτίωση στην απόδοση των υποβρυχίων υδροπτέρων χωρίς ουσιαστική αλλαγή στην διαμόρφωση του οχήματος.

Αν και η σχέση για την ειδική κατανάλωση ενέργειας δείχνει ότι αυτή μπορεί να μειωθεί ακόμα με πτερύγια όλο και μεγαλύτερου διατάματος, στην πραγματικότητα υπάρχει ένα όριο στο μέγεθος μέχρι το οποίο μπορούμε να επιτύχουμε βελτιώσεις στην απόδοση του οχήματος με αυτή την προσέγγιση σχεδίασης. Η ειδική κατανάλωση ενέργειας E_e μειώνεται όσο ο λόγος άνωσης αντίστασης L/D_{max} αυξάνεται. Όμως ο λόγος αυτός παρουσιάζει μία κατακόρυφη μείωση αν η χορδή (chord) του πτερυγίου σχεδιαστεί τόσο λεπτή στην προσπάθεια να επιτευχθεί το υψηλό διάταμα.

Έτσι μπορούν να γίνουν 4 μεταβολές στα χαρακτηριστικά του οχήματος ώστε να βελτιωθεί η απόδοσή τους:

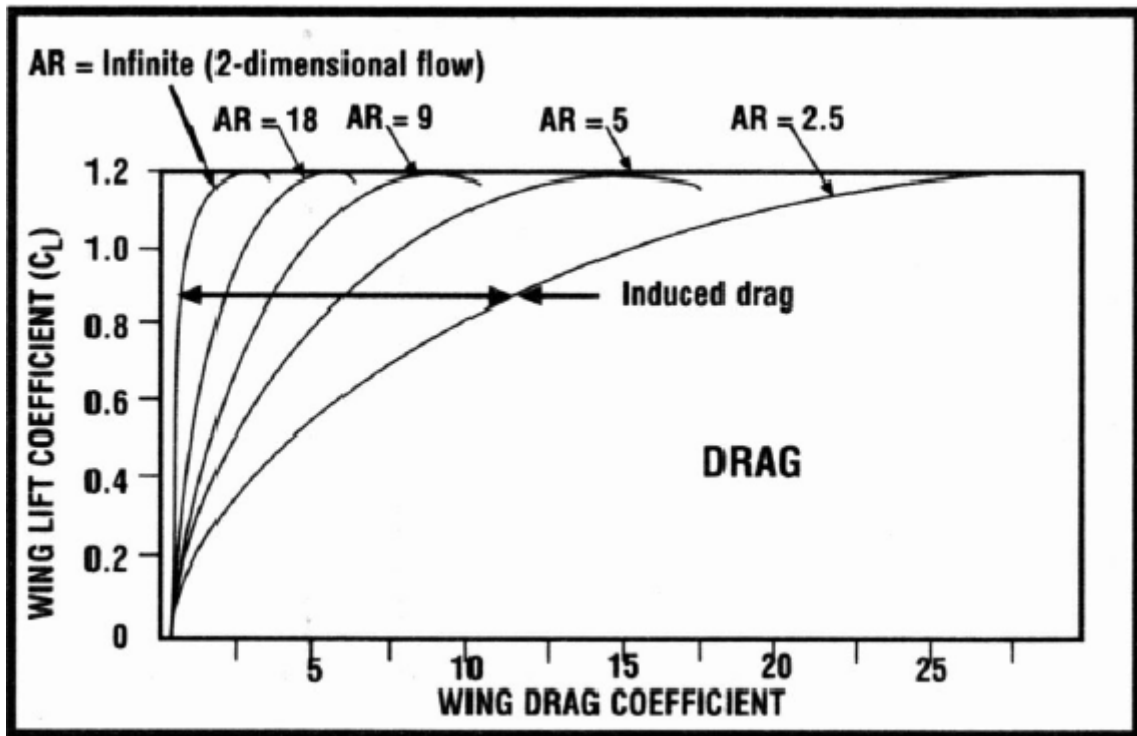
1. Αύξηση της ικανότητας του πνεύμονα μεγιστοποιώντας τον εσωτερικό όγκο που διατίθεται για το μηχανισμό μεταβολής της πλευστότητας.
2. Στη συνέχεια αύξηση του μεγέθους του οχήματος συνολικά.
3. Μείωση του λόγου $\frac{A_t}{A}$ στο μέγιστο δυνατό βαθμό μειώνοντας τις επιφάνειες του σώματος και της ουράς οι οποίες δεν παράγουν άνωση.
4. Αύξηση του διατάματος των πτερυγίων το μέγιστο δυνατό ώστε να μην γίνει η χορδή τόσο μικρή ώστε ο αριθμός Reynolds να φτάσει 10^4

Η επιλογή εκπέτασματος στο σχεδιασμό των υδροπτέρων παίζει καθοριστικό ρόλο. Το εκπέτασμα είναι το άνοιγμα των πτερυγίων του υδροπτερού (δανειζόμενοι όροι από τα ανεμόπτερα). Η επιλογή του εκπέτασματος της πτέρυγας είναι σημαντικός παράγοντας επιτυχίας της σχεδίασης γιατί είναι ένα εκ των δύο μεγεθών που επηρεάζουν το Aspect Ratio. Το aspect ratio (AR) είναι ο λόγος του τετραγώνου του εκπέτασματος προς την επιφάνεια της πτέρυγας και δίδεται από την παρακάτω εξίσωση

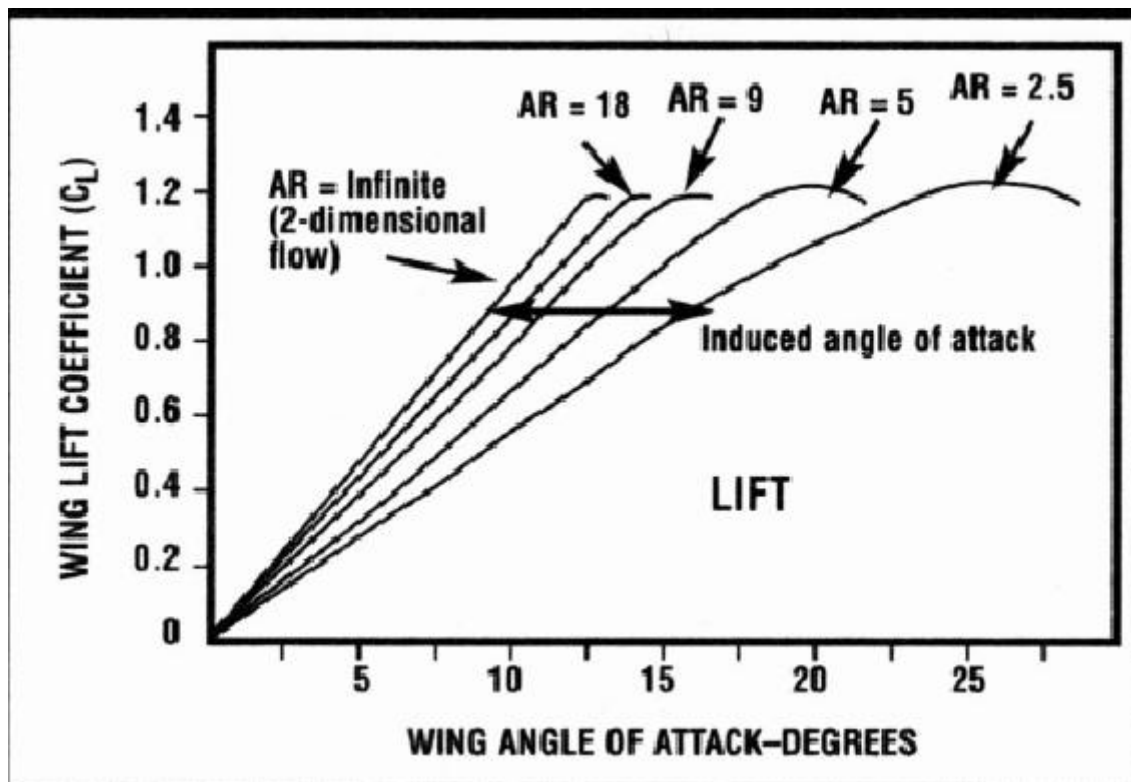
$$AR = \frac{b^2}{S}$$

- AR: Aspect Ratio
- b: Εκπέτασμα πτέρυγας υδροπτερού [m]
- S: Επιφάνεια πτέρυγας υδροπτερού [m²]

Αυξημένο AR συνεπάγεται μεγαλύτερο εκπέτασμα και μικρότερη χορδή. Η αύξηση του AR προκαλεί μείωση της επαγόμενης από τις δίνες ακροπτερυγίου αντίστασης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι γιατί σε μεγαλύτερα AR η πτέρυγα προσομοιάζει περισσότερο την πτέρυγα άπειρου μήκους. Όμως η αύξηση του AR οδηγεί σε ταυτόχρονη μείωση της γωνίας προσβολής στην οποία επέρχεται απώλεια στήριξης. Έτσι συμπεραίνουμε πως θα πρέπει να επιλεχθεί το μέγιστο δυνατό εκπέτασμα ώστε να είναι όσο το δυνατό αυξημένο το AR.



ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΤΟΥ ASPECT RATIO ΤΗΣ ΠΤΕΡΥΓΑΣ



ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΣΒΟΛΗΣ ΑΝΑΛΟΓΩΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ AR

ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

Ο σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας ήταν η βελτίωση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών ενός αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος (τυπικής μορφής υδροπτέρου) οδηγούμενου με μεταβολή πλευστότητας διατηρώντας τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις λειτουργίας των τυπικών υδροπτέρων.

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα υποβρύχιο υδρόπτερο είναι:

- τη γάστρα
- τα πτερύγια και την ουρά
- τη διάταξη μεταβλητής πλευστότητας
- τον υπολογιστή
- τους ενεργοποιητές ελέγχου
- το σύστημα τροφοδοσίας (μπαταρίες)
- το ωφέλιμο φορτίο

Δεδομένων των απαιτήσεων των αποστολών, για παράδειγμα αποστολές με σκοπό την λήψη επιστημονικών δεδομένων, το ωφέλιμο φορτίο θα πρέπει να καταλαμβάνει συγκεκριμένο όγκο, μάζα και να του αντιστοιχεί συγκεκριμένο κόστος ενέργειας. Η γεωμετρία του οχήματος και το σύστημα μεταβλητής μάζας μπορούν να καθοριστούν με βάση την επιθυμητή επίδοση σε σταθερές διαδρομές. Το μέγεθος της μπαταρίας θα καθοριστεί από τις απαιτήσεις σε εμβέλεια και σε ταχύτητα αλλά ταυτόχρονα και από το μέγεθος του υπόλοιπου φορτίου. Η διαδικασία σχεδίασης κανονικά πρέπει να περιλαμβάνει πολλές επαναλήψεις και καλή μελέτη των εναλλακτικών λύσεων που μπορούν να προκύψουν ανάμεσα στις ακραίες καταστάσεις της μεγιστοποίησης της ταχύτητας ή της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας κτλ.

Στην εργασία αυτή δόθηκε έμφαση στην γεωμετρία του υδροπτέρου. Στόχος ήταν να δημιουργηθεί ένα βελτιωμένο όχημα το οποίο να διαθέτει μεγαλύτερο μέγιστο λόγο άνωσης προς αντίσταση ώστε να μπορεί να ταξιδεύει και σε μικρότερες ελάχιστες γωνίες πλευσης (μικρότερα βάθη), χωρίς ταυτόχρονα να χάνει το κύριο χαρακτηριστικό του, αυτό της πλευσης σε βαθιά νερά, και να παρουσιάζει παρόμοια λειτουργία με το Seaglider.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα και συνοψίζοντας τα συμπεράσματα κάθε σταδίου:

- Αρχικά, έγινε ο σχεδιασμός του Seaglider στο πρόγραμμα Rhinoceros και μετά η υδροδυναμική μελέτη του με τη βοήθεια του προγράμματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής FLUENT ώστε τα αποτελέσματα από τη CFD διαδικασία να συγκριθούν με τα πειραματικά αποτελέσματα που έγιναν σε πείραμα αεροσήραγγας. Είδαμε, ότι τα αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα και καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η CFD διαδικασία μπορεί να κάνει μία αξιόπιστη πρόβλεψη των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του υδροπτέρου.
- Στη συνέχεια, έγινε ο σχεδιασμός ενός υδροπτέρου, για το οποίο χρησιμοποιήθηκε η ίδια γάστρα με αυτή του Seaglider. Τα πτερύγια όμως που τοποθετήθηκαν σχημάτιζαν πτέρυγα ελλειπτικής κάτοψης (για το λόγο της τέλει κατανομής φορτίων, όπως έχει αναλυθεί και στο κεφάλαιο για το σχεδιασμό του πτερυγίου) με την ίδια αεροτομή που σχεδιάστηκαν και τα πτερύγια του Seaglider, τα οποία όμως δημιουργούν τετραγωνική μορφής πτέρυγα. Έτσι λοιπόν, με την αλλαγή αυτή των πτερυγίων επιτεύχθηκε αύξηση του λόγου L/D κατά 17% ενώ η συνολική μείωση της βρεχόμενης επιφάνειας ήταν περίπου 2.5%. Η μεταβολή της γωνίας ολίσθησης από 15.6° μειώθηκε στις 12.9°, κάτι το οποίο επιθυμούσαμε καθώς μας οδηγεί

πιο κοντά στο στόχο μας, τη δυνατότητα της πλεύσης με απότομες αλλά και μικρότερες γωνίες. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι τα πτερύγια αυτά μας δίνουν έναν ικανοποιητικό λόγο L/D συνολικά για το όχημα, χωρίς να έχουμε αλλάξει καθόλου τη γάστρα σώματος του Seaglider. Το υδρόπτερο αυτό το ονομάσαμε Seaglider Fin16-006.

- Η αύξηση του λόγου L/D επιτυγχάνεται και με τη μείωση της αντίστασης. Έτσι το επόμενο βήμα ήταν να μειώσουμε την αντίσταση του οχήματος έχοντας όμως κάποιους περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί ήταν να διατηρήσουμε τον ίδιο όγκο του οχήματος καθώς θέλαμε να έχουμε την ίδια ποσότητα ωφέλιμου φορτίου όπως στο Seaglider.

Επιλέχθηκαν έτσι κάποιες γεωμετρίες χαμηλής αντίστασης και μελετήθηκαν οι διαστάσεις διατομές τους. Από αυτές επιλέχθηκε η γεωμετρία του H62, η οποία παρουσιάζει την μικρότερη αντίσταση σε σχέση με τις υπόλοιπες γεωμετρίας που είχαν τον ίδιο όγκο με το Seaglider, καθώς και ελαφρώς μικρότερη αντίσταση σε σχέση με την ίδια διατομή του Seaglider. Η γεωμετρία του H62 μοιάζει αρκετά με αυτή του Seaglider, η κύρια διαφορά όμως είναι ότι το ολικό μήκος της είναι αυξημένο κατά 3.33% περίπου (1.86m έναντι 1.80m του Seaglider).

Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε ένα νέο υδρόπτερο με χαμηλότερης αντίστασης σώμα, διατηρώντας όμως το προτέρημα των πτερυγίων που επιλέχθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση. Το υδρόπτερο αυτό το ονομάσαμε H62Fin16-006. Η αύξηση στην βρεχόμενη επιφάνεια σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση ήταν της τάξης 1.7%. Εξαιτίας της αύξησης αυτής παρατηρήθηκε μία αύξηση τελικά στην συνολική αντίσταση του υδροπτερού (παρατηρώντας τη μέγιστη αντίσταση, την οποία συναντάμε σε γωνία πρόσπτωσης 0°) της τάξης του 0.99% σε σχέση με αυτή του Seaglider, την οποία θεωρούμε και αμελητέα. Τελικά ο λόγος L/D αυξήθηκε κατά 2.5% (σε σύγκριση με το SeagliderFin16-006) και η γωνία ολίσθησης μειώθηκε από 12.9°, που είχαμε επιτύχει στην προηγούμενη περίπτωση, στις 12.6°. Να σημειωθεί ότι ο μέγιστος λόγος L/D και για τις τρεις περιπτώσεις (Seaglider, SeagliderFin16-006,H62Fin16-006) τον συναντάμε στην ίδια γωνία πρόσπτωσης (angle of attack= 6°).

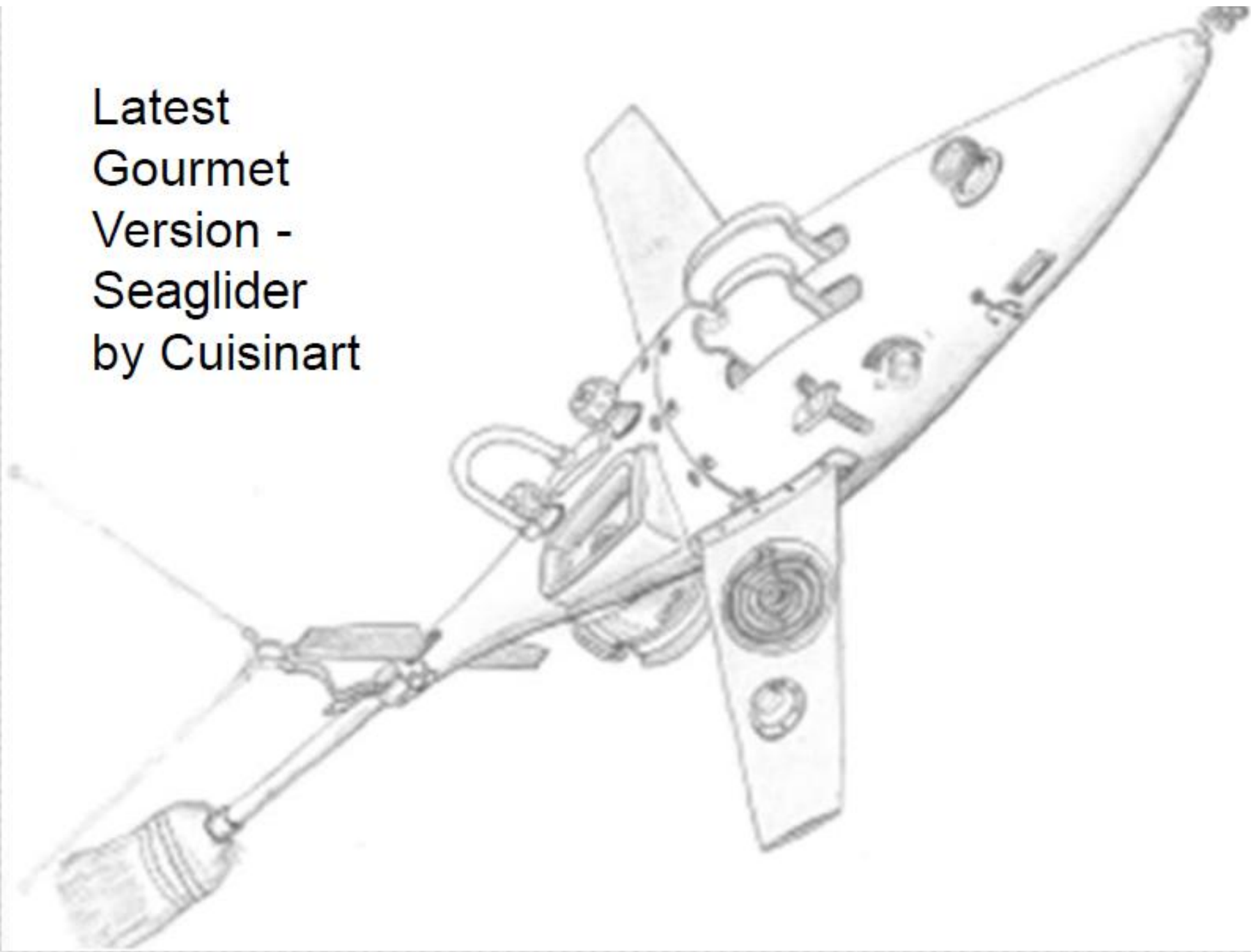
- Προς την ίδια κατεύθυνση με προηγουμένως, έγινε και ο σχεδιασμός του G35 Fin16-006, η διαφορά όμως με τα προηγούμενα υδρόπτερα που σχεδιάστηκαν ήταν ότι ο όγκος του ήταν μικρότερος του Seaglider κατά 38% περίπου. Ο σχεδιασμός αυτό έγινε για να δούμε την διαφορά στη μείωση της αντίστασης συνολικά του οχήματος, διατηρώντας όμως παράλληλα σχεδόν τον ίδιο λόγο L/D με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Ο σκοπός αυτό επετεύχθη καθώς, η αντίσταση μειώθηκε περίπου κατά 11% συνολικά και ο λόγος L/D παρέμεινε στο ίδιο εύρος τιμών, αλλά η γωνία πρόσπτωσης που τον συναντάμε μειώθηκε κατά 2°. Το βασικό ελάττωμα του υδροπτερού αυτού είναι ο μειωμένος όγκος του καθώς δεν μας βοηθά στο να έχουμε το ίδιο ωφέλιμο φορτίο σαν κι αυτό του Seaglider.
- Καθώς τα πτερύγια που χρησιμοποιήθηκαν, σχεδιάστηκαν με βάση την ίδια αεροτομή (NACA16-006), με αυτή των πτερυγίων του Seaglider, μία ακόμα αλλαγή που θα μπορούσαμε να κάνουμε είναι να σχεδιαστούν τα πτερύγια με άλλη επιλογή αεροτομής. Η διαδικασία αυτή έγινε σε προηγούμενη διδακτορική διατριβή [90]. Η αεροτομή ήταν η NACA66-018. Η μορφολογία των πτερυγίων είναι κι εδώ ελλειπτικής κάτοψης πτέρυγας. Ενώ η NACA66-018 παρουσιάζει μεγαλύτερο λόγο L/D σε σχέση με την NACA16-006, δεν οδηγεί στην ίδια αύξηση του λόγου L/D του οχήματος. Αυτό εξηγείται στην μεγάλη αύξηση της αντίστασης (46.24% περίπου σε σχέση με το Seaglider), κάτι το οποίο ερμηνεύεται με την συνολική αύξηση της βρεχόμενης επιφάνειας λόγω των πτερυγίων. Επιπλέον στην διαστάσι μελέτη της αεροτομής δεν παρουσιάζεται το φαινόμενο της αντίστασης λόγω άνωσης, μέγεθος που προστίθεται στη συνολική αντίσταση του οχήματος κατά την τρισδιάστατη μελέτη του.

Έτσι λοιπόν, από τα παραπάνω υδρόπτερα θεωρήθηκε καλύτερο το H62Fin16-006 καθώς, έχει τον ίδιο όγκο με το Seaglider, μεγαλύτερο λόγο L/Dmax, μικρότερη γωνία ίχνους ολίσθησης (αλλά ταυτόχρονα στα ίδια επίπεδα με αυτή του Seaglider- ώστε να χαρακτηρίζεται ως όχημα το

οποίο να μπορεί να πλεύσει και σε μεγαλύτερα αλλά και σε μικρότερα βάθη), παρουσιάζοντας ταυτόχρονα μεγαλύτερη ροπή προνευτασμού σε σχέση με το Seaglider.

Συνοψίζοντας, η επιλογή πτερυγίου, ελλειπτικής κάτοψης πτέρυγας, σε συνδυασμό με χαμηλότερης αντίστασης διατομής γάστρας σώματος, οδήγησε στον σχεδιασμό ενός βελτιωμένου υδροδυναμικά υδρόπτερου με παρόμοια χαρακτηριστικά λειτουργίας τυπικού αυτόνομου υποβρύχιου υδρόπτερου (Seaglider).

Latest
Gourmet
Version -
Seaglider
by Cuisinart



BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Joshua Grady Graver (2005), Underwater gliders : DYNAMICS, CONTROL and DESIGN
2. R.Bachmayer, N. Ehrich Leonard, J.Graver, E. Florelli, P. Bhatta and D.Paley (2004), Underwater Gliders : Recent Developments and Future Applications
3. Αθανάσιος Α.Αργυρίου Πάτρα (2005), Μηχανική των Ρευστών, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις
4. Ευάγγελος Κανακάκης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Πλοήγηση Αυτόνομων Υποβρύχιων Οχημάτων με Ασαφή Λογική και Εξελικτικούς Αλγορίθμους
5. Danie L. Rudnick, Russ E.Davis, Scripps Institution of Oceanography Charles C.Eriksen University of Washington, David M. Fratantoni Woods Hole Oceanographic Institution, Mary Jane Perry Darling Marine Center, Univerity of Maine, Underwater Gliders for Ocean Research
6. Paris G.Perdikaris, Computational study of flow structure and forces on a cylinder vibration transversely and in-line to a steady flow : of sub-harmonic excitation
7. Ευάγγελος Κανακάκης (2007), Ανάπτυξη Υβριδικής Αρχιτεκτονικής Πλοήγησης Αυτόνομων Υποβρύχιων Οχημάτων με Ασαφή Λογική και Γενετικούς Αλγορίθμους
8. David Bingham and Tony Drake, United Kingdom, Andrew HILL, USA and Roger LOTT, United Kingdom, The application of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Technology in the Oil Industry- Vision and Experiences
9. Gwyn Griffiths, Southampton Oceanography Centre Southampton, UK, Glider and Autonomous Underwater Vehicle Observing Systems
10. Russ E.Davis, Charles C.Eriksen and Clayton P.Jones, Autonomous buoyancy- driven underwater glider
11. Sea Lodge, La Jolla CA Charles C.Eriksen, School of Oceanography, University of Washington, Seattle WA, Workshop (2003) Autonomous Underwater Gliders, Prepared of the Autonomous and Lagrangian Platforms and Sensors (ALPS)
12. B.Skillings (August 2004), Buoyancy Engine Construction and Design for underwater Glider
13. Faisal Sagale & Riyanto T. Mambang (2011), Development of sea glider autonomous underwater vehicle platform for marine exploration and monitoring
14. Griffiths,G., Jones CD, Fergusin J., Bose N., UnderSea gliders
15. Charles C. eriksen, T. James Osse, Russell D. Light, Timothy Wen, Thomas W. Lehman, Peter L.Sabin, John W.Ballard and Andrew M.Chiodi, A Long-Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research
16. Douglas C.Webb, Paul J.Simonetti and Clayton P.Jones, SLOCUM : An underwater Glider Propelled by Environmental Energy
17. Jeff Sherman, Russ E.Davis, W.B Owens and J Valeds, The Autonomous Underwater Glider "Spray"
18. Pradeep Bhatta and Naomi Ehrich Leonard, A Lyapunov Fuction for Vehicles with Lift and Drag : Stability of Gliding
19. Neil M. Bogue and Jim Luby, Acoustic Seaglider™ for Beaked Whale Detection
20. Asher Bender, Daniel Matthew Steinberg, Ariell Lee Friedman, Stefan B. Williams (2006), Analysis of an Autonomous Underwater Glider
21. Pradeep Bhatta, Naomi Ehrich Leonard, Nonlinear Gliding Stability and Control for Vehicles with Hydrodynamic Forcing
22. Joshua G.Graver and Naomi Ehrich Leonard (2001), Underwater glider Dynamics and Control
23. Eddy, D.R. Hayes, G.Zodiatis, G.Konnaris, A.Hannides, D.Solovyov, Glider Transects in the Levantine Sea : Characteristics of the Warm Core Cyprus
24. Shaowei Zhang, Jiancheng Yu, Aiqun Zhang and Fumin Zhang, Steady three dimensional gliding motion of an underwater glider

25. Naomi Ehrich Leonard, Joshua G.Graver, Model- based Feedback Control of Autonomous Underwater Gliders
26. C.A. Woosley & N.E. Leonard, Moving Mass Control for Underwater Vehicles
27. Karen J. Heywood, Gwyn Griffiths, Sophie Fielding and Chris Yanker, New acoustic sensors on Seaglidrs
28. Carol D. Janzen, Elizabeth L.Creed, Physical Oceanographic Data from Seaglider Trials in Stratified Coastal Waters Using a New Pumped Payload CTD
29. Lora Van Uffelen,Univeristy of Hawaii, Acoustic Seaglider Deployment Cruise report & Mid-Deployment Seaglider Status update
30. Kenichi Asakawa, Masahiko nakamura, Taiyo Koboyashi, Yoshitaka Watanabe, Tabahiro Hyakudome, Yuzuru Ito and Junichi Kojima, Design Concept of Tsukuyomi-Underwater Glider Prototype for Virtual Mooring
31. Khairul Izman Abdul Rahim, AR Othman &Mohd Rizal Arshad, Pressure hull development using hybrid composite with metal liner concept
32. Nina Mahmoudian and Graig Woosley, Underwater Glider Motion Control
33. G.A Dowdeswell, J.Evans, R.Mugford, G. Griffiths, S. McPhail, N.Millard, P.Stevenson, M.A. Brandon, C. Banks, K.J. Heywood, M.R. Price, P.A. Dodd, A. Jenkins, K.W. Nicholls, D.Hayes, E.P.Abrahamsen, P. Tyler, B.Bett, D. Jones, P.Wadhams, J.P. Wilkinson, K.Stansfield, S. Ackley, Instruments and Methods-Autonomous underwater vehicles (AUVs) and investigations of the ice-ocean interface in Antarctic and Arctic waters
34. Daniel R. Hayes and James Morison, Ice ocean turbulent exchange in the Arcic summer measured by an autonomous underwater vehicle
35. Joao L.D Dantas, Antonio M. Pascaol, Elgar de Sa, Investigation of Normal Force and Moment Coefficients for an AUV at Nonlinear Angle of Attack and Sideslip Range
36. Jesse stuart Geisbert (2007), Hydrodynamic Modeling for Autonomous Underwater Vehicles using computational and semi-empirical methods
37. Nina Mahmoudian, Jesse Geisbert and Craig Woolsey (2010), Approximate Analytical Turning Conditions for underwater Gliders
38. Chunzhao Guo, Naomi Kato, Mini underwater Glider (MVG) for Education
39. N.Mahmoudian, J. Geisbert & C. Woolsey, Dynamics & Control of underwater gliders I:Steady Motions
40. N.Mahmoudian & C.Woolsey, Dynamics & Control of underwater gliders II:Motion planning and Control
41. Jasson Evans, Meyer Nahon, Dynamics modeling and performance evaluation of an autonomous underwater vehicle
42. Dr. Peter Ridley, Juien Fontan, Dr Peter Corke, Submarine Dynamics Modeling
43. Christopher Michael Smith, Action Selection and Vertical Plane Dynamic Control for Survey-Class Autonomous Underwater Vehicles
44. D.A. Jones, D.B. Clarke, I.B Brayshav, J.L. Barrilon and B.Anderson, The calculation og hydrodynamic Coefficients for underwater Vehicles
45. D.A. Jones and D.B Clarke, An evaluation of the FIDAP Computational Fluid Dynamics COde for the Calculation of Hydrodynamic Forces on Underwater Platforms
46. James Glynn (2006), Design of Biomimetic Passice Control for Optimisation of Oscillating Hydrofoils in Tidal Energy Capture
47. Eng YH, Lau WS, Low E. and Seet GGL, Identification of the Hydrodynamics Coefficients of an Underwater Vehicle wing Free Decay Pendulum Motion
48. Md Mashud Karim, Md Mahbubar Rahman, Md Abdul Alim, Numerical Computation of viscous drag for axisymmetric underwater Vehicles
49. Mathieu Serrer, Total induced drag of a trimmed sailplane
50. P. Jagadeesh and K.Murali, Rans Predictions of free surface effects on axisymmetric underwater body
51. Zahurin Samad & Mohd Rizal Arshad, CFD simulation of cooperative AUV motion
52. Xiaojuan Lan, Hanxu San, Qingxuan Jia, The hydrodynamics analysis for the underwater robot with a spherical hull

53. U.N.Mughal, M.S. Sarfaraz, S.M. Sarim, 2D Hydrodynamic Comparatice Analysis of Outer Shell of an Underwater Vehicle for Best Lift to Drag Ration
54. Charles C. Eriksen , Mary Jane Perry, The Nurturing of Seaglider by the National Oceanographic Partnership Program
55. Wood Stephen, Autonomous Underwater Gliders
56. Christopher W.Brown, Jan Kaiser, Karen Heywood, Carol Robinson, Effects of biofouling on optical measurements and flight behaviour of gliders
57. Sumit Roy, Payman Arabshahi, Dan Rouseff, Warren Fox, Wide Area Ocean Networks : Architecture & System Design
58. Neal Peters, Performance testing and Design of a UUV
59. C.A. Woolsey, N.E. Leonard, Stabilizing underwater vehicle motion using internal rotors
60. Steven D.Miller, Lift,Drag an Moment of a NACA0015 Airfoil
61. Dong Cheol Seo, Christopher D. Wiliams (2010), CFD Predictions of Drag force for a Slocum ocean glider
62. Wu Jianguo, Zhang Minge, Sun Xiujun, Hydrodynamic Characteristics of the Main Parts of a Hybrid-Driven Underwater Glider PETREL
63. Christopher Baker, Estimating Drag Forces on Submarine Hulls
64. Sumit Roy, Payman Arabshahi, Dan Rouseff, Warren Fox, Wide Area Ocean Networks : Architecture and System Design Considerations
65. Muljavidodo K., Sapto Adi N., Heading Lock Maneuver Testing of Autonomous Underwater Vehicle : Sotong ITB
66. P.Jagadeesh, K.Murali, V.G.Idichandy, Experimental investigation of hydrodynamics force coefficients over AUV hull form
67. Christopher C.Sotzing, David M. Lane, Improving the Coordinate Efficiency of Limited Communication Multi-AUV Operations using a Multi-Agent Architecture
68. Christopher Mark Watts, A comparison Study of biologically Inspired Propulsion Systems for an Autonomous Underwater Vehicle
69. A. Avarez, V. bertram, L.Gualdesi, Hull hydrodynamic optimaztion of autonomous underwater vehicles operating at snorkeling depth
70. J.Cartwright, N.Johnson, B.Davis, Z.Qianf, T.L. Bravo, A. Enoch, G. Lemaitre, H. Roth, Y.Petillot, Nessie III Autonomous Underwater Vehicle for SAUC-E 2008
71. Guilherme Vaz, Chrisophe Mabilat, Paul gallagher, remmelt van der Wal, Viscous flow computations on smooth cylinders a detailed numerical study with validation
72. David L. Martin (2005), Autonomous Platforms in Persistent Littoral Undersea Surveillance : Scientific and Systems Engineering Challenges
73. A. Aguiar, A. Pascal, Stabilization of Autonomous Vehicles with Nonholonomic Constraints : Open Problems and Future Directions
74. C.D. Williams, T.L. Curtis, J.M Doucet, M.T. Issac, F. Azarsing, Effects of Hull Length on the Hydrodynamic Loads on a Slender Underwater Vehicle during Manoeuvres
75. Williams C.D. Bach mayer R, Young B, Progress in predicting the performance of ocean gliders from at- sea measurements
76. J. Liu, M.E. Furlong, A. Palmer, A.B. Phillips, s.R. Turnak, S.M. Sharkth, Design and Control of a Flight - Style AUV with Hovering Capability
77. f.R. Menter, M. Kuntz, R. Laugtry (2003), Ten years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model
78. Hassan Assalih, Joel Cartwright, Vincent Chalencon, Ben Davis, Andrew Durrant, Emeric Faraud, Flora Figiel, dan Harber, Mara Jiminez, Nick Johnoson, Andrew Lees, Peter Long, Javier Mayor Perez, Zhizhuang Qiang, Jamil Sawas, Chris C. Sotsing, Yvan Petillot, Nessie I Autonomous Underwater Vehicle
79. Lasslo Techy, Ryan Tomokiyo, Jake Quenzer, Tyler Beauchan, Kristi Morgansen, Full-Scale Wind Tunnel Study of the Seaglider Underwater Glider
80. School of Oceanography-University of Washington- Seaglider Lithium Primary Pattery Safety and Handling Guidelines

81. Jun Zhang, OCEN 201 Introduction to Ocean & Coastal Engineering Instruments & Measurements
82. Jos Akhtman, Mocaten Furlong, Pakpong Jantapremjit, Alistair Palmer, Alexander Phillips, Suleiman Sharkh, Stephen Turnock, Sandor Veres, Soton AUV : University of Southampton Entry into the 2007 Student Autonomous Underwater Challenge- Europe
83. Lars Davidson : MTF270 Turbulence Modelling-The SST Model
84. jakhtman, M. Furlong, A. Palmer, A. Phillips, SM Sharkh, SR Turnock, Soton AUV : The design and development of a small, manoeuvrable autonomous underwater vehicle
85. I.C. Clark ,Ship Dynamics For Mariners, Published by The Nautical Institute,London
86. Σωκράτης Τσάγγαρης,Μηχανική των Ρευστών, εκδόσεις Συμεών Αθήνα 2005
87. Γ.Κ Πολίτης, Σημειώσεις μαθήματος: Αντίστασης και Πρόωσης Πλοίου, ΕΜΠ
88. Δυναμική Πλοίου και Εργαστήριο-Τεύχος Α-Δυναμική Συμπεριφορά πλοίου σε κυματισμούς-Αθήνα 2008, ΕΜΠ
89. Γεώργιος Δ.Τζαμπίρας,Αθήνα (1998), Αριθμητικές Προσομοιώσεις Υδροδυναμικών Ροών-Σημειώσεις
90. Παρασκευή Δ.Μπουρμά (2010),διδακτορική διατριβή, Σχεδίαση Αυτόνομου Υποβρύχιου Καταγραφικού Οχήματος Οδηγούμενο με μεταβολή πλευστότητας
91. Καρασιάλης Αιμίλιος, Χατζηλιάση Ηλίας (2012), διπλωματική εργασία, Σχεδιομελέτη μοντέλου ανεμόπτερου

