



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

***ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ
ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΟΥΜΕΝΟΥ ΜΕ
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΛΕΥΣΤΟΤΗΤΑΣ***

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ Δ. ΜΠΟΥΡΜΑ

Φυσικού

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

Αθήνα, Απρίλιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

**ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ
ΚΑΤΑΓΡΑΦΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΟΔΗΓΟΥΜΕΝΟΥ ΜΕ
ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΠΛΕΥΣΤΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ Δ. ΜΠΟΥΡΜΑ

Φυσικού Ε.Κ.Π.Α., M.Sc. Ε.Μ.Π.

Συμβουλευτική επιτροπή: Καθ. Σπύρος Μαυράκος (Επιβλέπων)
Καθ. Γιώργος Τζαμπίρας
Α. Καθ. Γιάννης Χατζηγεωργίου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή στις 6 Μαΐου 2010:

.....
Σ. Μαυράκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Τζαμπίρας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Χατζηγεωργίου
Α. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Β. Παπάζογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Παπανικολάου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Τριανταφύλλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Ζαραφονίτης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2010

Περίληψη

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη τεχνογνωσίας και η σχεδίαση μετρητικού οργάνου σε μορφή υποβρύχιου οχήματος, ικανού να πραγματοποιεί αυτόνομες ωκεανογραφικές μετρήσεις με προγραμματισμένη διαδρομή και πορεία (υδρόπτερο).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή διατυπώνονται αρχικά οι εξισώσεις κίνησης αυτόνομου υποβρύχιου υδρόπτερου με σκοπό την επίλυσή τους σε κατάσταση ισορροπίας ώστε να γίνει ο σχεδιασμός σταθερών διαδρομών για συγκεκριμένο όχημα. Ο σχεδιασμός του υδρόπτερου έγινε με βασικό γνώμονα την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια των αποστολών.

Μέσα από τη διαδικασία αυτή αναπτύχθηκε μεθοδολογία σχεδιασμού αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων (υδρόπτερων) οδηγούμενων με μεταβολή πλευστότητας. Υπολογίσθηκαν οι υδροδυναμικές δυνάμεις, επιλύθηκαν οι εξισώσεις κίνησης, καθορίστηκαν οι παράμετροι κίνησης σε κατάσταση ισορροπίας, καθώς και οι παράμετροι ελέγχου της σε τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή διαδρομή με την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε στην περίπτωση πρότυπης σχεδίασης υποβρύχιου οχήματος ενώ συγκρίθηκαν τα χαρακτηριστικά του με αυτά άλλων υφιστάμενων υδρόπτερων.

Τα υποβρύχια υδρόπτερα δεν χρησιμοποιούν κινητήρες και προπέλες για την πρόωσή τους. Η υποθαλάσσια πορεία τους επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας την πλευστότητά τους με τη βοήθεια εσωτερικών δεξαμενών και αντλιών και τη θέση τους στο χώρο μετακινώντας εσωτερικές μάζες.

Στα πλαίσια αυτής της διατριβής δίνονται αρχικά οι γενικές δυναμικές εξισώσεις κίνησης του οχήματος και διατυπώνεται η σύζευξη της κίνησής του με τις εσωτερικές μάζες. Στη συνέχεια οι εξισώσεις προσαρμόζονται στο όχημα που σχεδιάστηκε στο ΕΜΠ. Ο υδροδυναμικός σχεδιασμός του περιβλήματος έγινε με στόχο την βελτιστοποίηση του σχήματος ώστε να ελαχιστοποιείται η επαγόμενη αντίσταση. Μελετήθηκε η υδροδυναμική συμπεριφορά του οχήματος και τα χαρακτηριστικά του υιοθετήθηκαν από το αναλυτικό μοντέλο. Ο περιορισμός της κίνησης στο επίπεδο και η επίλυση των δυναμικών εξισώσεων οδήγησε στην εύρεση των βέλτιστων διαδρομών όπου ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας. Σε συνδυασμό με ένα εύρωστο σύστημα ελέγχου το υδρόπτερο που σχεδιάστηκε είναι

ικανό να πραγματοποιεί τις αποστολές του με ευελιξία και οικονομία στην κατανάλωση ενέργειας. Με αυτό το στόχο σχεδιάστηκαν αλγόριθμοι ανάδυσης, κατάδυσης και βρόγχοι ανατροφοδότησης για τη διόρθωση της πορείας του ενώ προτάθηκαν για περαιτέρω εφαρμογή μέθοδοι βελτίωσης τέτοιων συστημάτων με τη βοήθεια του αναλυτικού μοντέλου. Το αναλυτικό μοντέλο έχει εφαρμογή και στη σχεδίαση του οχήματος. Διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ διαφόρων παραμέτρων του συστήματος όπως ταχύτητα, μεταβλητή μάζα και μέγεθος του οχήματος. Έτσι προέκυψε μία βασική δομή στη διαδικασία σχεδιασμού και κάποιες θεμελιώδεις αρχές για την επιλογή των χαρακτηριστικών του. Τέλος παρουσιάστηκαν οι τεχνολογικές του αρχές με το μηχανολογικό του σχεδιασμό και μια προκαταρκτική περιγραφή των ηλεκτρονικών του συνιστωσών.

Abstract

This dissertation concerns the design of an underwater gliding vehicle and the study of its dynamics and motion, hydrodynamics, control, and navigation. Underwater gliders are a novel type of autonomous underwater vehicle that are travelling through the sea collecting data along a desired path.

In this work the dynamic equations of motion of an underwater glider are formulated. The longitudinal model is derived from the three dimensional glider model and is used to determine equilibria and their stability. The equations of motion in the plane are determined and the equilibria steady glides are found in order to design steady glide paths for a specific vehicle that was designed. The principle challenge in the design of the vehicle was power conservation. This has been taken into account in every step of glider design.

Through this process a methodology of designing buoyancy driven underwater gliders has been developed. The hydrodynamic forces were calculated and the equations of motion were solved. Furthermore, equilibrium motion parameters during steady glides were set and suitable control parameters were chosen, to accomplish the desirable path with the minimal power consumption. The methodology was applied in the design of an underwater vehicle prototype, the features of which were compared with those of other existing gliders.

Underwater gliders do not use thrusters or propellers for propulsion. They are buoyancy driven and their buoyancy is controlled through the use of internal tanks and pumps while their position by moving internal masses and using external control surfaces such as a rudder.

Initially in this work the general dynamic equations of the vehicle's motion are formulated including hydrodynamic forces, buoyancy and added mass effects, as well as the nonlinear coupling between glider and moving internal masses. Then the equations of motions are adapted to the specific vehicle that was designed in NTUA. The hydrodynamic design of the hull and its shape optimization aimed to minimize the induced drag. The hydrodynamic behavior of the vehicle was studied and its characteristics were adopted in the analytical model. The three dimensional glider model was confined to the vertical plane and the equations were solved in order to

derive the optimal glide paths, where the energy consumption is minimal. Using a robust control system the glider is capable of operating efficiently with low power consumption. Dive control algorithms and feedback control loops were designed and analyzed, while recommendations for future applications and optimization methods based on the analytical model were made. The glider analytical model can also be applied to the design of the underwater vehicle. The relation between system parameters like glide velocity, glider and ballast sizing was investigated. Thus a basic structure for the designing process and some basic principles for the selection of its characteristics form. Finally its technological principles are presented in terms of its mechanical design and a preliminary description of its electrical components.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	13
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
2. ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΥΔΡΟΠΤΕΡΑ	21
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	21
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ	27
ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ	28
Οι μετασχηματισμοί των ταχυτήτων	31
Ρεύμα.....	34
Σύστημα αναφοράς ρευστού.....	34
ΔΥΝΑΜΙΚΗ	37
Το μοντέλο	37
Δυνάμεις Άντωσης και Βαρύτητας.....	39
Εξισώσεις Κίνησης	40
Το μοντέλο με απλοποιημένη διάταξη εσωτερικών μαζών.....	51
Φυσική περιγραφή των όρων του μοντέλου	52
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	55
Ολισθήσεις σε κατάσταση ισορροπίας	60
Το φυγοειδές μοντέλο.....	66
ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ.....	71
Σπειροειδείς ολισθήσεις.....	72
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ – ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	75
ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ FLUENT – Ο ΕΠΙΛΥΤΗΣ (SOLVER) FLUENT ΚΑΙ Ο ΠΡΟ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ GAMBIT.....	76
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	77
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	81
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗΣ.....	84
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ DREVOL.....	84
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΟ FLUENT	87
ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ.....	97
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΑΙ ΚΕΡΑΙΑΣ	100
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ FLUENT	104
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ GAMBIT.....	104
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΟ FLUENT – ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	111
Υπολογισμός πεδίου ροής υπό γωνία 10 deg θεωρώντας SST k- ω μοντέλο τύρβης και Reynolds Stress Model – Συγκριτικά αποτελέσματα	115
Προσομοίωση του πεδίου ροής με το μαθηματικό μοντέλο τύρβης SST (Shear – Stress Transport) k- ω	116
Προσομοίωση του πεδίου ροής με το μαθηματικό μοντέλο τύρβης Reynolds Stress Model (RSM)	118

Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μοντέλων τύρβης κ-ω και RSM	123
Υπολογισμός πεδίου ροής υπό οριζόντια ταχύτητα	126
Μεταβολή των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του υποβρυχίου με την προσθήκη πτερυγίων και κεραίας	129
Ταχύτητα ροής υπό γωνία	131
Πρόσπτωση υπό γωνία 2 deg.....	132
Πρόσπτωση υπό γωνία -2 deg	134
Μεταβολή αντίστασης με τη γωνία πρόσπτωσης	135
Συνυπολογισμός ρεύματος $V_{current}=0,7 \text{ m/s}$	137
ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΝΑΔΥΣΕΙΣ.....	139
ΠΡΩΩΣΗ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΣΤΟ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΟΔΙΚΗ ΠΟΡΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟ ΡΕΥΣΤΟ	150
4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ	159
ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ.....	159
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	162
Μοντελοποίηση διαφορετικών διατάξεων μεταβλητής πλευστότητας	165
ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	166
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	179
ΑΡΧΙΚΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ.....	183
ΑΛΛΑΓΗ ΠΟΡΕΙΑΣ.....	185
ΑΝΤΙΠΑΡΑΒΟΛΗ: ΥΔΡΟΠΤΕΡΟ Ε.Μ.Π. vs ΥΔΡΟΠΤΕΡΟ SLOCUM.....	189
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ ΣΤΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	193
5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	199
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΔΡΟΠΤΕΡΩΝ	199
ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ	200
ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ - ΑΝΑΔΥΣΗΣ	202
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΠΡΟΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΡΟΠΗΣ	204
ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	205
ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	205
ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΝΕΚΡΕΣ ΖΩΝΕΣ	207
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	208
ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	209
Γραμμικοποίηση.....	212
Ελεγκσιμότητα.....	215
Παρατηρησιμότητα	218
6. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	221
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ.....	223
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΑΝΤΙΔΙΑΣΤΟΛΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΜΑΖΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	226
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΓΩΝΙΑ.....	228

<i>ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ</i>	230
7. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ	233
<i>ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ</i>	233
<i>ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ</i>	253
8. ΕΠΙΛΟΓΟΣ	257
Ευχαριστία	259
Δημοσιεύσεις	259
9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	261
A. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ EULER (QUATERNIONS)	261
B. ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ C ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΠΡΟΝΕΥΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΝΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ ΑΝΑΔΥΣΗΣ	263
C. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ROUTH	265
D. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΞΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΑΞΗΣ (CONTRLABILITY RANK CONDITION)	267
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ	269

ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Μεταβλητή	Περιγραφή
$\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$	Μοναδιαία διανύσματα αδρανειακού συστήματος
$\bar{i}_b, \bar{j}_b, \bar{k}_b$	Μοναδιαία διανύσματα σωματοπαγούς συστήματος
$\bar{i}_c, \bar{j}_c, \bar{k}_c$	Μοναδιαία διανύσματα συστήματος αναφοράς του ρευστού
$\bar{r} = (x \quad y \quad z)^T$	Διάνυσμα θέσης του οχήματος από το αδρανειακό σύστημα
$\bar{v} = (u \quad v \quad w)^T$	Ταχύτητα υδροπτέρου στις σωματοπαγείς συντεταγμένες
u, v, w	Συνιστώσες της ταχύτητας \bar{v} ως προς τους x, y, z σωματοπαγείς άξονες
\bar{v}_m	Ταχύτητα της εσωτερικής κινούμενης μάζας m_m στις σωματοπαγείς συντεταγμένες
\bar{v}_b	Ταχύτητα της εσωτερικής μεταβλητής μάζας m_b στις σωματοπαγείς συντεταγμένες
\bar{v}_t	Ταχύτητα της εσωτερικής σημειακής μάζας m_t στις σωματοπαγείς συντεταγμένες
\bar{V}_c	Ταχύτητα ρεύματος ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς
\bar{v}_r	Ταχύτητα υδροπτέρου σε σχέση με το ρευστό εκφρασμένη στο σωματοπαγές σύστημα
$\bar{\omega} = (p \quad q \quad r)^T$	Γωνιακή ταχύτητα στις σωματοπαγείς συντεταγμένες
$\bar{E} = (\phi, \theta, \psi)^T$	Διάνυσμα γωνιών Euler
R	Μητρώο περιστροφής από το αδρανειακό στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς
R^T	Μητρώο περιστροφής από το σωματοπαγές στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς
R_{BC}	Μητρώο περιστροφής από το σωματοπαγές στο σύστημα αναφοράς του ρευστού
R_{CB}	Μητρώο περιστροφής από το σύστημα αναφοράς του ρευστού στο σωματοπαγές σύστημα
CB	Κέντρο άντωσης και αρχή του σωματοπαγούς συστήματος αναφοράς
CG	Κέντρο βάρους του οχήματος
α	Γωνία προσβολής (angle of attack)
β	Πλευρική ολίσθηση/πλαγιολίσθηση (sideslip angle)
ξ	Γωνία ίχνους ολίσθησης (glide path angle)
φ	Γωνία διατοιχισμού (roll angle)
θ	Γωνία πρόνευσης (pitch angle)
ψ	Γωνία εκτροπής/πορείας (yaw/heading angle)

m	Μάζα εκτοπισμένου ρευστού
m_0	Φαινόμενη μάζα $m_0 = m_b - m$
m_s	Ολική στατική μάζα υδροπτέρου $m_s = m_h + m_t + m_b$
m_h	Ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα της γάστρας
m_m	Κινούμενη σημειακή μάζα
m_b	Σημειακή μεταβλητή μάζα
m_t	Σταθερή εσωτερική σημειακή μάζα εξισορρόπησης
m_v	Ολική μάζα υδροπτέρου $m_v = m_s + m_m$
$\bar{r}_m(t)$	Διάνυσμα θέσης της κινούμενης μάζας στο σωματοπαγές σύστημα
\bar{r}_b	Διάνυσμα θέσης της μεταβλητής μάζας στο σωματοπαγές σύστημα
\bar{r}_t	Διάνυσμα θέσης της στατικής μάζας στο σωματοπαγές σύστημα
\mathbf{J}_s	Μητρώο αδράνειας της στατικής μάζας του σώματος ως προς το σωματοπαγές σύστημα $\mathbf{J}_s = \mathbf{J}_h - m_t [\bar{r}_t \times][\bar{r}_t \times] - m_b [\bar{r}_b \times][\bar{r}_b \times]$
\mathbf{J}_h	Μητρώο αδράνειας της ομοιόμορφα κατανεμημένης μάζας της γάστρας (δεν περιλαμβάνει αδράνεια λόγω της κινούμενης και της στατικής μάζας m_m, m_t)
\mathbf{J}_a	Μητρώο πρόσθετης αδράνειας
\mathbf{J}	$\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_a$
J_i	Το i διαγώνιο στοιχείο του πίνακα \mathbf{J}
\mathbf{M}_a	το μητρώο της πρόσθετης μάζας
\mathbf{M}	Το άθροισμα της μάζας του σώματος και της πρόσθετης μάζας $\mathbf{M} = m_s \mathbf{I} + \mathbf{M}_a$
\mathbf{D}_a	το μητρώο πρόσθετης μάζας των εκτός της κυρίας διαγωνίου όρων
\mathbf{I}	το γενικευμένο μητρώο μάζας/αδράνειας του συστήματος οχήματος ρευστού
m_i	Το i διαγώνιο στοιχείο του πίνακα \mathbf{M}
m_{a_i}	Το i διαγώνιο στοιχείο του πίνακα \mathbf{M}_a
T_s	η κινητική ενέργεια άκαμπτου στερεού σώματος μάζας m_s
T_p	η κινητική ενέργεια της κινούμενης μάζας
T_b	η κινητική ενέργεια της μεταβλητής μάζας
T_t	η κινητική ενέργεια της στατικής μάζας
T_f	η κινητική ενέργεια απεριόριστου όγκου ιδανικού ρευστού λόγω της κίνησης μέσα σε αυτό ενός βυθισμένου άκαμπτου στερεού σώματος
\mathbf{I}	ο 3×3 μοναδιαίος πίνακας
\bar{F}_{ext_i}	η εξωτερική δύναμη εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα

\bar{T}_{ext_j}	η εξωτερική ροπή εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα
$\bar{F}_{int_movable_k}$	δυνάμεις που ασκεί το όχημα στη σημειακή μάζα m_m
$\bar{F}_{int_ballast_t}$	δυνάμεις που ασκεί το όχημα στη σημειακή μάζα m_b
$\bar{F}_{int_offset_n}$	δυνάμεις που ασκεί το όχημα στη σημειακή μάζα m_t .
\bar{P}	η συνολική ορμή του συστήματος οχήματος – ρευστού εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα
$\bar{\Pi}$	η συνολική στροφορμή του συστήματος ως προς την αρχή του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων εκφρασμένη στο αδρανειακό σύστημα
\bar{P}_m	η συνολική ορμή του βάρους της κινούμενης μάζας m_m στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς
\bar{P}_b	η συνολική ορμή του βάρους της μεταβλητής μάζας m_b στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς
\bar{P}_t	η συνολική ορμή του βάρους της σταθερής m_t στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς
\bar{p}	η ολική ορμή του συστήματος οχήματος – ρευστού στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς
$\bar{\pi}$	$\bar{\pi}$ η ολική στροφορμή ως προς την αρχή του σωματοπαγούς συστήματος στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς
\bar{p}_m	ορμή της εσωτερικής μάζας m_m στις σωματοπαγείς συντεταγμένες
\bar{p}_b	ορμή της εσωτερικής μάζας m_b στις σωματοπαγείς συντεταγμένες
\bar{p}_t	ορμή της εσωτερικής μάζας m_t στις σωματοπαγείς συντεταγμένες
\bar{D}	Δύναμη αντίστασης (Drag)
\bar{L}	Δύναμη άνωσης (Lift)
\bar{M}_{DL}	Ροπή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη τεχνογνωσίας και η σχεδίαση ενός καινοτόμου μετρητικού οργάνου σε μορφή υποβρυχίου οχήματος, ικανού να πραγματοποιεί αυτόνομες ωκεανογραφικές μετρήσεις με προγραμματισμένη διαδρομή και πορεία (glider). Ο τρόπος αυτός μετρήσεων παρουσιάζει ουσιώδη πλεονεκτήματα σε σύγκριση με κλασικές μεθόδους απόληψης μετρήσεων από τα πλοία καθώς και σε σχέση με μεθόδους απόληψης δεδομένων με την χρήση ποντισμένων οργάνων, πλωτών προβλητών, drifters, floats, AUVs κ.α. (μικρό κόστος, πλήθος δεδομένων, αυτονομία, ικανότητα μεγάλου μήκους και παρατεταμένης χρονικής διάρκειας αποστολών, κ. α.).

Συγκεκριμένα με την επιλεγμένη μεθοδολογία επιτυγχάνονται τα ακόλουθα:

- Διάρκεια μιας πόντισης – αποστολής μέχρι 6 –12 μήνες, με συνεχή απόληψη δεδομένων και αποστολή των σε σχεδόν πραγματικό χρόνο στην ξηρά.
- Δυνατότητα μετρήσεων πολλαπλών στοιχείων (π.χ. θερμοκρασίας, αλατότητας, διαλυτότητας. οξυγόνου κ.α.), δηλ. φυσικών και γεωχημικών παραμέτρων εν γένει.
- κατασκευαστικό κόστος της τάξης των 50000 δολαρίων, μικρό κόστος συντήρησης της συσκευής.
- Μικρό βάρος και διαστάσεις μετρητικού οργάνου (τυπική μάζα περίπου 50 kg, μήκος 2m, και βάθος μετρήσεων της τάξης των 0-2000m).
- πλοήγηση μέσω GPS, δυνατότητα να δέχονται εντολές και να μεταφέρουν δεδομένα, και εσωτερική επεξεργασία των δεδομένων σε επίπεδο PC

Η μεθοδολογία καθορισμού της πορείας του οχήματος βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων κινήσεως της πορείας του οχήματος σε πραγματικό χρόνο λαμβάνοντας υπ' όψη την υδροδυναμική συμπεριφορά του και την ανάδραση από τα αισθητήρια της πορείας του. Η διόρθωση της πορείας του πραγματοποιείται με τη μεταβολή της πλευστότητάς του καθώς και τη δυναμική μεταβολή των αδρανειακών χαρακτηριστικών του. Εφαρμόζονται σύγχρονες τεχνολογίες απόληψης μετρήσεων από το θαλάσσιο περιβάλλον καθώς και τεχνολογίες δορυφορικών τηλεπικοινωνιών για μεταφορά δεδομένων, εντοπισμό στίγματος κ. α.

Οι μεθοδολογίες αυτές είναι πρόσφατες στο διεθνή χώρο, εκμεταλλεύονται την υπολογιστική ισχύ των μικροεπεξεργαστών για τον εντοπισμό της προδιαγεγραμμένης πορείας του σκάφους κατά την διάρκεια της απόληψης μετρήσεων. Η μικρή κατανάλωση ενέργειας (μεγάλη εμβέλεια) επιτυγχάνεται με στρωτή ροή γύρω από το σώμα (υδροδυναμικός σχεδιασμός γάστρας, μικρές ταχύτητες πορείας) και αργή, ελεγχόμενη κίνηση εντός του νερού με μεταβολή πλευστότητας.

Για την κατάστροψη των εξισώσεων κίνηση εφαρμόζεται μία μαθηματική μέθοδος δυναμικής επίλυσης των εξισώσεων κινήσεως του υδροπτέρου εντός του νερού, λαμβάνοντας υπόψη τα επί πλέον δεδομένα από τους αισθητήρες κίνησης του οχήματος με μη γραμμική ανάδραση [57], έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερος έλεγχος της κίνησης του οχήματος μέσα στο νερό και η διόρθωση της πορείας του. Η μέθοδος ανάδρασης (αυτόματος έλεγχος) συνίσταται στη δυναμική ρύθμιση του κέντρου βάρους του σώματος με τη μηχανική μετακίνηση μαζών εντός της συσκευής. Ο καθορισμός των κινήσεως του υδροπτέρου γίνεται στο τρισδιάστατο πεδίο και στον χρόνο. Καθώς το όχημα κινείται διάφοροι αισθητήρες (πυξίδα, κλισιόμετρα, GPS, βυθόμετρο) προσεγγίζουν την ακριβή θέση του στον χώρο. Μεταβάλλοντας το κέντρο βάρους του οχήματος αλλά και την πλευστότητα του είναι δυνατόν, να επέλθουν μικρές αλλά καθοριστικής σημασίας διορθώσεις στην παρεκκλίνουσα πορεία του καθ' όλη την διάρκεια της πλοήγησης του οχήματος.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος καθορίζονται με βάση τη φιλοσοφία της ελάχιστης κατανάλωσης και της εξοικονόμησης της ενέργειας, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή μεγάλη εμβέλεια των αποστολών. Ο μηχανισμός μεταβολής της πλευστότητας και των αδρανειακών χαρακτηριστικών του υποστηρίζουν την κίνηση του υδροπτέρου με μικρές ταχύτητες, σχεδόν ολισθαίνοντας.

Το υδρόπτερο θα πληροί και θα υποστηρίζει τις παρακάτω λειτουργίες:

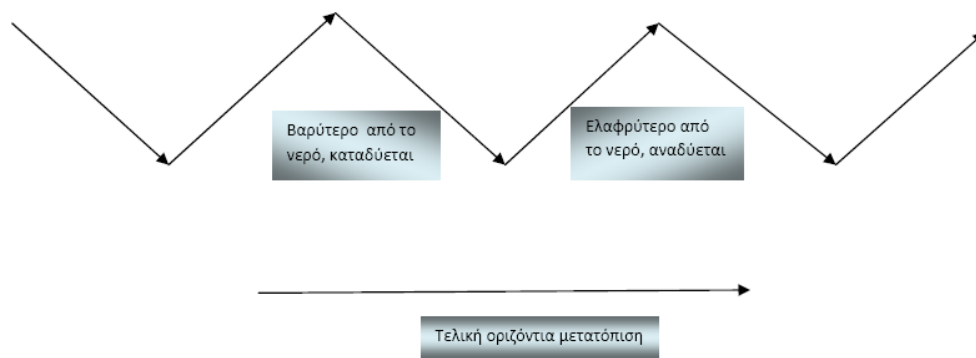
- Αυτόνομη λειτουργία στο βυθό της θάλασσας χωρίς φυσική επαφή με την επιφάνεια ή κάποιο επίγειο σταθμό ελέγχου .
- Σχεδίαση πολλαπλών σκοπών (multipurpose design), με χώρο ωφέλιμου φορτίου (2 kg – 4 kg) για αισθητήρια όργανα που έχουν άμεση επαφή με το θαλάσσιο περιβάλλον.
- Βελτιστοποιημένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας
- Αυτόνομη επιχειρησιακή λειτουργία
- Γραφικό λογισμικό έλεγχου για δημιουργία ολοκληρωμένου σχεδίου αποστολής, εντοπισμό στίγματος, ανανέωση πορείας, αποστολή και καταγραφή δεδομένων κατά τη διάρκεια της αποστολής.
- Μέγιστο βάθος λειτουργίας τα 2000 m
- Εμβέλεια τα 1000 km
- Μήκος όχι πάνω από 2.00 m
- Βάρος όχι πάνω από 70 kg
- Μέγιστη ταχύτητα τα 50 cm/sec

2. ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΥΔΡΟΠΤΕΡΑ

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα υποβρύχια υδροπτερα (underwater gliders) είναι μια ειδική κατηγορία της ευρύτερης οικογένειας των Αυτόνομων Υποβρυχίων Οχημάτων (AUVs) που τη διαφοροποιεί η έλλειψη κινούμενων μελών και κινητήρων. Τα τελευταία έντεκα χρόνια πραγματοποιούνται θαλάσσιες αποστολές των υποβρυχίων υδροπτέρων οι οποίες οδήγησαν στην ανάγκη βελτιστοποίησης του σχεδιασμού τους και βαθύτερης κατανόησης της δυναμικής τους ώστε να υπάρξει περαιτέρω αξιοποίηση των μοναδικών πλεονεκτημάτων που διαθέτουν. Η υποθαλάσσια πορεία τους επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας τον όγκο και άρα την πλευστότητά τους με τη βοήθεια εσωτερικών δεξαμενών και αντλιών. Τα ήδη υπάρχοντα υδροπτερα διαθέτουν ακίνητα φτερά και ουρά και ελέγχουν την κλίση τους μετακινώντας εσωτερικές μάζες και χρησιμοποιώντας εξωτερικά στοιχεία ελέγχου, όπως πηδάλιο. Η πορεία τους αποτελείται από μία σειρά προς τα πάνω και προς τα κάτω ολισθήσεις (αναδύσεις και καταδύσεις). Χαρακτηριστικές κινήσεις του υδροπτέρου περιλαμβάνουν ευθείες κινήσεις προς τα πάνω και προς τα κάτω σε πριονωτή διάταξη, στροφές και κίνηση σε κάθετη έλικα.

Η τροχιά τους καθορίζεται από την άντωση και σε αντίθεση με τα άλλα AUVs δεν χρησιμοποιούν κινητήρες και προπέλες, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η αλλαγή βάθους ώστε να ολισθήσουν. Τα υδροπτερα έχουν τη δυνατότητα να αναδύονται ή να καταδύονται ελέγχοντας την πλευστότητά τους, να διατηρούν σταθερή τη θέση τους πλέοντας αντίθετα στο ρεύμα, καθώς και να αποκτούν ουδέτερη πλευστότητα με αποτέλεσμα να παρασύρονται από το ρεύμα ή να κείτονται στον πυθμένα.



Σχήμα 2.1: Εικονική αναπαράσταση της οριζόντιας κίνησης του υδροπτέρου.

Τα υπάρχοντα ωκεανογραφικά υδροπτερα είναι σχεδιασμένα για αποστολές μεγάλης εμβέλειας, διάρκειας και ανθεκτικότητας. Διαθέτουν προσεκτικό σχεδιασμό ώστε να κινούνται αθόρυβα και να χρησιμοποιούν την ελάχιστη ισχύ. Σε σύγκριση με άλλα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUVs) είναι σχετικά αργά, ταξιδεύοντας με μισό περίπου κόμβο (0,25 m/s), αλλά έχουν την ικανότητα πραγματοποίησης αποστολών μεγάλης εμβέλειας της τάξης των εκατοντάδων και χιλιάδων χιλιομέτρων καθώς και μεγάλης χρονικής διάρκειας της τάξης των εβδομάδων ή και μηνών. Σαν παράδειγμα των μέχρι τώρα ικανοτήτων τους μπορούμε να αναφέρουμε το γεγονός ότι ο Ατλαντικός ωκεανός έχει μήκος 2000 μιλίων και το Seaglider έχει πραγματοποιήσει αποστολές άνω των 1000 μιλίων ενώ διαθέτει αναμενόμενη εμβέλεια άνω των 1500 μιλίων [23].

Η ιδέα του υποβρυχίου υδροπτέρου είναι απλή και κομψή. Μπορεί εν δυνάμει να εκμεταλλευτεί τα ρεύματα και τα εσωτερικά κύματα της θάλασσας ώστε να πραγματοποιεί αποτελεσματικές, γρήγορες και μεγάλου μήκους διαδρομές. Μέσα από προσεκτικό σχεδιασμό θα μπορούσε να χρησιμοποιεί για να ταξιδεύει τα οριζόντια ωκεάνια ρεύματα [34], καθώς και τις κάθετες ροές.

Τα υδροπτερα θα μπορούσαν επίσης να αντλούν την προωστική ενέργεια που χρειάζονται από τον ίδιο τον ωκεανό. Μία ιδέα που αναπτύσσεται στο Web Research Corporation (WRC) είναι η δημιουργία μίας ανωστικά οδηγούμενης συσκευής που θα μεταβάλλει θερμικά την άντωση της και θα οδηγείται μέσω των διαφορών θερμοκρασίας κατά μήκος του ωκεάνιου θερμοκλινούς [83]. Η χρήση τέτοιων συσκευών θα επέτρεπε στο υδροπτερο να παίρνει την προωθητική ενέργεια που χρειάζεται από τον ωκεανό, πραγματοποιώντας αποστολές πολύ μεγάλης εμβέλειας. Ένα τέτοιο υδροπτερο θα έκανε χρήση μπαταριών μόνο για τον ηλεκτρονικό

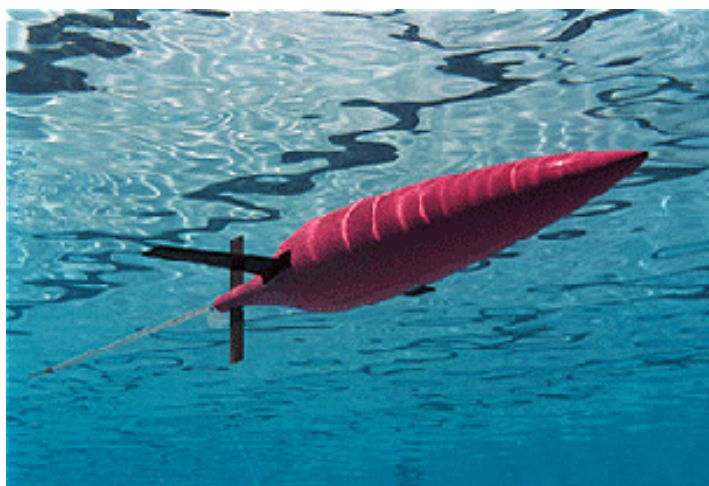
εξοπλισμό και τους αισθητήρες του. Τα συμβατικά υδρόπτερα καταναλίσκουν το 80% της ενέργειας του οχήματος στην άντληση και απάντληση της δεξαμενής μη σταθερού όγκου που διαθέτουν ώστε να μεταβάλλουν την άντωσή τους και να αλλάξουν πορεία. Αν η ενέργεια άντλησης παρεχόταν από μία θερμική συσκευή και η ενέργεια των μπαταριών υποστήριζε μόνο τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό του οχήματος τότε η εμβέλεια του υδροπτέρου θα αυξανόταν κατά τον παράγοντα 5. Η εμβέλεια και η διάρκεια της πορείας του θα περιοριζόταν μόνο από την παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια και η εμβέλεια του υδροπτέρου θα ξεπέρασε τα τριάντα χιλιάδες χιλιόμετρα [49].

Εξαιτίας του μηχανισμού πρόωσης και του σχεδιασμού τους τα υδρόπτερα έχουν χαμηλό κόστος σε σχέση με άλλα υποβρύχια οχήματα. Ο συνδυασμός δε με την αυτόνομη λειτουργία τους, την αντοχή και την εμβέλεια, τα κάνει ελκυστικά στην εφαρμογή σε διάφορους τομείς της ωκεανογραφίας. Είναι 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.

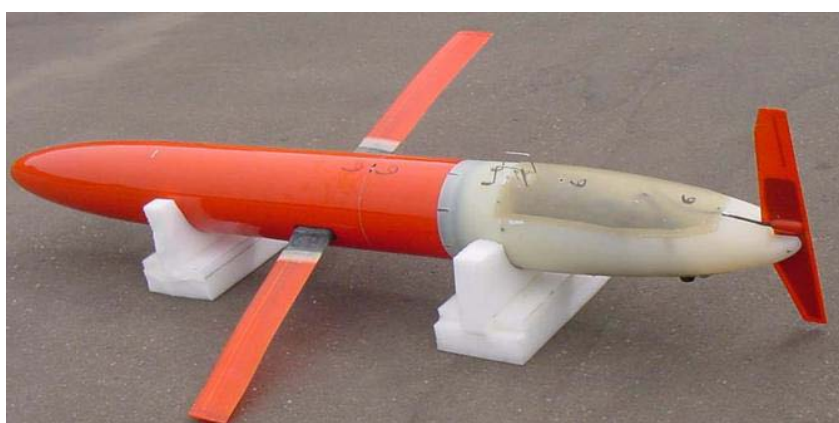
Ο αρχικός σχεδιασμός του υποβρυχίου υδροπτέρου έγινε αρχικά με σκοπό τη συλλογή ωκεανογραφικών στοιχείων. Η ιδέα αυτή περιγράφηκε αρχικά από τον Henry Stommel στο επιστημονικής φαντασίας άρθρο “The Slocum Mission” που δημοσιεύτηκε το 1989 στο περιοδικό Oceanography [76] και έγινε αφορμή να κατασκευαστούν τρία υδρόπτερα, το Slocum glider [83] στο Webb Research Corporation (WRC), το Spray glider [71] στο Scripps Institution of Oceanography (SIO) και το Seaglider [23] στο Πανεπιστήμιο της Ουάσινγκτον.



Σχήμα 2.2: Slocum



Σχήμα 2.3: Seaglider



Σχήμα 2.4: Spray

Κάποια χαρακτηριστικά γεγονότα στην πορεία εξέλιξης των υδροπτέρων είναι τα εξής:

- Το 1989 δημοσιεύεται στο περιοδικό Oceanography το άρθρο “The Slocum mission”.
- Το 1991 γίνονται τεστ στο πρωτότυπο Slocum στη λίμνη Seneca στη Νέα Υόρκη.
- Το 1992 πραγματοποιείται η πρώτη αποστολή του υδροπτερου ALBAC το οποίο κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο του Τόκιο.
- Το 1999 υδρόπτερα Slocum δοκιμάζονται στο αστεροσκοπείο LEO – 15 και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για ωκεανογραφικές έρευνες μέχρι το 2005.
- Το 1999 επίσης διεξάγεται το Autonomous Ocean Sampling Network (AOSN) στον κόλπο του Μοντερέι. Εκεί το πρότυπο Spray λειτουργεί για 11 συνεχόμενες μέρες.
- Το 2001 το υδρόπτερο Spray πραγματοποιεί πορεία 280 km από το Σαν Ντιέγκο.
- Το Seaglider ταξιδεύει πάνω από 1000 km από τις ακτές της Ουάσινγκτον.
- Το 2003 διεξάγεται στον κόλπο του Μοντερέι το AOSN II. Τα υδρόπτερα που χρησιμοποιούνται εκεί πραγματοποιούν αποστολές διάρκειας άνω των έξι εβδομάδων. Χρησιμοποιούνται συνολικά 12 Slocum και 5 Spray υδρόπτερα.
- Το 2004 ένα υδρόπτερο Spray ταξιδεύει κατά μήκος του Gulf Stream καλύπτοντας απόσταση 600 μιλίων σε ένα μήνα με ταχύτητα 0,5 μίλια την ώρα ή 12 μίλια τη μέρα.
- Το 2006 διεξάγεται και πάλι στον κόλπο του Μοντερέι το AOSN III.
- Το 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 [43].
- Η εταιρεία iRobot κατασκευάζει και διαθέτει σε ολόκληρο τον κόσμο πάνω από 80 Seaglider υδρόπτερα.

Τα τρία αυτά παραδοσιακά υδρόπτερα (Slocum electric, Spray, Seaglider), τα οποία συνηθίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία να αποκαλούνται “Legacy gliders”, έχουν όλα αυτά τα χρόνια της χρήσης τους αποδείξει την αξία τους σαν ωκεανογραφικά – δειγματοληπτικά εργαλεία χαμηλού κόστους, αξιόπιστα και αποτελεσματικά. Είναι κατάλληλα για εκτενείς και μεγάλης διάρκειας αποστολές, ενώ η πριονωτή τους κίνηση είναι η καταλληλότερη για κάθετη και ταυτόχρονα οριζόντια παρατήρηση της στήλης ύδατος. Κάποια χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Προδιαγραφές των παραδοσιακών υδροπτέρων.

Χαρακτηριστικά	Slocum Electric	Seaglider	Spray
Τύπος σώματος	κυλινδρικό	δάκρυ	κυλινδρικό
Μέγεθος ατράκτου [m] (LxD)	1,5x0,21	1,8x0,3	2,0x0,2
Υλικό γάστρας	Αλουμίνιο	Γυαλί σε μορφή ινών (Fiberglass)	Αλουμίνιο
Μάζα [kg]	52	52	51,8
Μέγιστο βάθος [m]	200	1000	1500
Διάρκεια [h]	3800	5333,3	6666,7
Εμβέλεια [km]	1500	4600	4500
Τυπική ταχύτητα [m/s]	0,4	0,25	0,25
Μπαταρίες	260 alkaline C cells, 8 MJ	Lithium primaries, 24 V και 10 V, 10 MJ	81 Lithium D cells, 10 MJ
Μεταβολή όγκου [cc]	520	800	250
Πτερύγια	98 cm span, 14 cm chord	100 cm span, 16 cm chord	110 cm span, 10 cm chord

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ

Αρχικά παρουσιάζεται ένα δυναμικό μοντέλο, χωρίς να γίνει εξειδίκευση σε κάποια συγκεκριμένη μορφή και μέγεθος, το οποίο αποφεύγει την περιττή πολυπλοκότητα. Τα βασικά στοιχεία του μοντέλου είναι η δομή και γεωμετρία του υδροπτερού, οι υδροδυναμικές δυνάμεις, οι δυνάμεις άντωσης και βαρύτητας, τα φαινόμενα πρόσθετης μάζας καθώς και αδρανειακά εξαιτίας της κίνησης σε ρευστό. Επίσης προνοείται ώστε να μπορούν να συμπεριληφθούν εξωτερικά στοιχεία ελέγχου, όπως πηδάλιο και πτερύγια. Το μοντέλο ολοκληρώνεται με τη μη γραμμική σύζευξη της κίνησης του υδροπτερού και εσωτερικά κινουμένων μαζών.

Η ανάπτυξη του δυναμικού μοντέλου ενός γενικευμένου υποβρυχίου υδροπτερού είναι απαραίτητη για το μετέπειτα συστηματικό έλεγχο και σχεδιασμό ενός τέτοιου οχήματος.

Εν πρώτοις διαμορφώθηκε η κινηματική του οχήματος (με την εξαγωγή των κινηματικών συνθηκών), ώστε να καθοριστούν ο προσανατολισμός, η θέση και η κίνησή του. Ακολούθως ορίστηκαν τα συστήματα αναφοράς που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση (αδρανειακό, σωματοπαγές) και οι μετατροπές μεταξύ τους καθώς και ένα σύστημα αναφοράς που κινείται μαζί με το ρευστό, ώστε να υπολογίζουμε την σχετική ταχύτητα του υδροπτερού στο νερό. Προνοήθηκε ο συνυπολογισμός των ρευμάτων.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε το δυναμικό μοντέλο το οποίο ολοκληρώθηκε με την εξαγωγή των εξισώσεων κίνησης στις τρεις διαστάσεις. Στο μοντέλο συμπεριλήφθηκαν τρεις εσωτερικές μάζες: μία ελεγχόμενα μεταβλητή μάζα σταθερής θέσης, μία σταθερή μάζα ελεγχόμενα μεταβλητής θέσης και μία στατική μάζα (σταθερή θέση και μάζα) που προσφέρει στο σύστημα μία αντισταθμιστική ροπή. Ελήφθησαν υπόψη οι δυνάμεις άντωσης και βαρύτητας και εξήχθησαν οι τρισδιάστατες εξισώσεις κίνησης. Ο έλεγχος πραγματοποιείται στις δύο μάζες: στην κινούμενη σταθερής μάζας (moving mass) μέσω δύναμης που ασκείται πάνω της και στην ακίνητη μεταβλητής μάζας (ballast mass) μέσω του ρυθμού άντλησης.

Το δυναμικό μοντέλο περιορίστηκε στη συνέχεια στο κατακόρυφο επίπεδο και απλοποιήθηκε ώστε να διερευνηθούν στην πορεία οι καταστάσεις ισορροπίας των κινήσεων. Η σύνθεση τέτοιων κινήσεων με τη βοήθεια ελέγχου στην κινούμενη και τη μεταβλητή μάζα οδήγησαν στην ανάλυση της δημοφιλούς πριονωτής διαδρομής.

Διερεύνηση έγινε και για το απλοποιημένο φυγοειδές μοντέλο στο οποίο δεν παρεμβαίνει αυτόματος έλεγχος. Η επίλυση αυτού του μοντέλου οδήγησε σε διαδρομές ποιοτικά όμοιες με αυτές των αεροπλάνων και των υδροπτερόν.

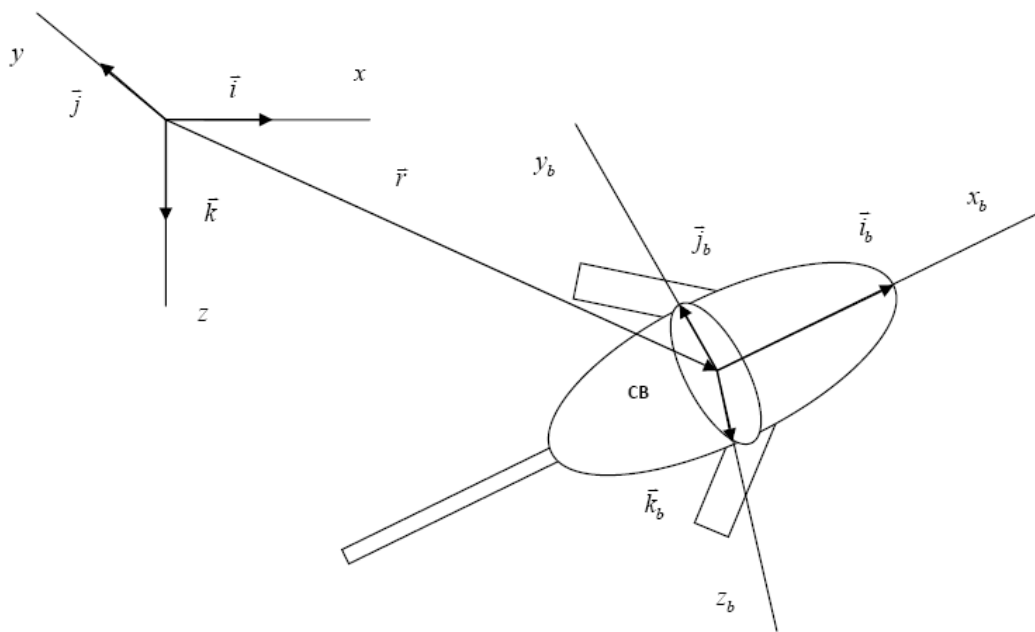
ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ

Για την περιγραφή της θέσης και της κίνησης ενός υποβρυχίου οχήματος χρησιμοποιούνται δύο συστήματα συντεταγμένων: το *αδρανειακό* και το *σωματοπαγές*.

Το αδρανειακό σύστημα αξόνων θεωρείται ακίνητο και έτσι δεν λαμβάνεται υπόψη η συνεισφορά λόγω κίνησης της γης στην κίνηση του οχήματος. Αυτή η υπόθεση είναι επαρκής όταν μελετώνται υποβρύχια οχήματα.

Αδρανειακό σύστημα αναφοράς: Θεωρείται αδρανειακό, μη περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς xyz (σχήμα 2.5). Στην περίπτωση των θαλασσίων οχημάτων, αυτό μπορεί να είναι ένα σύστημα αναφοράς σταθερό πάνω στη γη, όπου μπορούν να αγνοηθούν οι γεωστροφικές επιταχύνσεις. Ορίζουμε x και y τους αδρανειακούς άξονες στο οριζόντιο επίπεδο, κάθετο στη βαρύτητα. Ο κατακόρυφος z άξονας θα βρίσκεται τότε πάνω στην κατεύθυνση του διανύσματος της βαρύτητας με θετική διεύθυνση προς τα κάτω. Τα μοναδιαία διανύσματα είναι τα $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ στις διευθύνσεις x, y, z αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Το αδρανειακό σύστημα αναφοράς μπορεί να επιλεγεί έτσι ώστε η αρχή του άξονα $z=0$ να βρίσκεται στην επιφάνεια του ωκεανού, οπότε σε αυτή την περίπτωση z είναι το βάθος.

Σωματοπαγές σύστημα αναφοράς: Ορίζεται σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων x_b, y_b, z_b με μοναδιαία κατά αντιστοιχία $\vec{i}_b, \vec{j}_b, \vec{k}_b$, του οποίου η αρχή βρίσκεται στο κέντρο άντωσης του υδροπτερόν CB και οι άξονές του συμπίπτουν με τους κύριους άξονες του οχήματος. Ο άξονας x_b κείται κατά μήκος του μεγάλου άξονα του οχήματος (θετικός προς τη διεύθυνση του ρύγχους του υδροπτερόν), ο άξονας y_b βρίσκεται πάνω στο επίπεδο των πτερυγίων του ενώ ο άξονας z_b στην κάθετη διεύθυνση των πτερυγίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5



Σχήμα 2.5: Συστήματα αναφοράς, διάνυσμα θέσης και προσανατολισμός του υδροπτερού.

Η θέση του υδροπτερού στο χώρο και ο προσανατολισμός του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων προκύπτουν από το αδρανειακό σύστημα όταν αυτό μεταφερθεί παράλληλα κατά το διάνυσμα θέσης \vec{r} και ακολούθως υποστεί τρεις συνεχόμενες περιστροφές με την ακολουθία των γωνιών Euler.

Ο προσανατολισμός του υδροπτερού καθορίζεται από το μητρώο περιστροφής \mathbf{R} το οποίο εκφράζει σε σωματοπαγείς συντεταγμένες τα διανύσματα που δίνονται ως προς το αδρανειακό σύστημα [31]. Το μητρώο \mathbf{R} μπορεί να διατυπωθεί χρησιμοποιώντας τις γωνίες Euler ή quaternion παραμέτρους (Παράρτημα Α).

Οι γωνίες Euler περιγράφουν τον προσανατολισμό του σωματοπαγούς συστήματος αναφοράς του οχήματος σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα μέσω μιας αλληλουχίας τριών περιστροφών του στερεού σώματος γύρω από συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων. Η σειρά εκτέλεσης των διαδοχικών περιστροφών είναι συγκεκριμένη ανάλογα με τη σύμβαση που έχει γίνει. Η αλλαγή της σειράς εκτέλεσης των διαδοχικών περιστροφών οδηγεί σε λανθασμένη τελική θέση του οχήματος και για το λόγο αυτό οι περιστροφές δεν μπορούν να περιγραφούν ως άθροισμα διανυσμάτων, αλλά πρέπει να εκτελούνται με τη σειρά που κατά σύμβαση θεωρείται σωστή. Παραλλαγές στη διαδοχή περιστροφών Euler οδηγούν σε δώδεκα

διαφορετικούς συνδυασμούς. Η σύμβαση κατά την οποία η διαδοχή των περιστροφών ακολουθεί τη σειρά yaw, pitch, roll είναι η κλασική που χρησιμοποιείται στη δυναμική υποβρυχίων και αεροσκαφών και θα χρησιμοποιηθεί και στο παρόν.

Η μετατροπή από το ένα σύστημα συντεταγμένων στο άλλο γίνεται με χρήση των γωνιών Euler θεωρώντας τις διαδοχικές στροφές κατά yaw, pitch, roll με τις αντίστοιχες γωνίες ψ , θ , φ . Η γωνία ψ ορίζεται θετική προς τα δεξιά όπως φαίνεται από πάνω (κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού), η θ θετική με το ρύγχος του οχήματος προς τα πάνω ενώ η φ προς τα κάτω του δεξιού φτερού.

Πριν από την πρώτη περιστροφή το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων ταυτίζεται με το αδρανειακό, $\bar{r}_b^0 = \bar{r}$

Περιστρέφουμε το σωματοπαγές σύστημα ως προς τον yaw άξονα z κατά μία γωνία ψ . Το διάνυσμα που προκύπτει στο νέο σωματοπαγές σύστημα θα είναι

$$\bar{r}_b^1 = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \bar{r}_b^0 = \mathbf{R}_\psi \bar{r}_b^0$$

Η περιστροφή γύρω από τον z δεν αλλάζει τη z-συντεταγμένη του σημείου, ενώ οι υπόλοιποι άξονες μεταβάλλονται σύμφωνα με τη βασική τριγωνομετρία.

Η δεύτερη περιστροφή pitch γίνεται κατά γωνία θ γύρω από τον νέο άξονα y:

$$\bar{r}_b^2 = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \bar{r}_b^1 = \mathbf{R}_\theta \bar{r}_b^1$$

Τέλος περιστρέφουμε το σωματοπαγές σύστημα κατά μία γωνία φ γύρω από το νέο άξονα x (roll):

$$\bar{r}_b^3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \bar{r}_b^2 = \mathbf{R}_\varphi \bar{r}_b^2$$

Το τελευταίο διάνυσμα προσδιορίζει τη θέση του αρχικού σημείου στο ολοκληρωτικά μετασχηματισμένο σωματοπαγές σύστημα.

Στην περίπτωση που το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων έχει διαφορετική αρχή από το αδρανειακό:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \mathbf{R}^T \vec{r}_b$$

Έτσι οι διαδοχικές περιστροφές εκφράζονται από τα μητρώα:

$$\mathbf{R}_\psi = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}, \mathbf{R}_\varphi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Η περιστροφή από το αδρανειακό στο σωματοπαγές σύστημα γίνεται με το μητρώο:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\psi \mathbf{R}_\theta \mathbf{R}_\varphi = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & \cos \psi \cos \varphi + \sin \varphi \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \sin \varphi \\ \sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi \sin \theta & -\cos \psi \sin \varphi + \sin \theta \sin \psi \cos \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{pmatrix}$$

ενώ η περιστροφή από το σωματοπαγές στο αδρανειακό σύστημα με το μητρώο:

$$\mathbf{R}^T = \mathbf{R}_\varphi^T \mathbf{R}_\theta^T \mathbf{R}_\psi^T = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & \sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \varphi + \sin \varphi \sin \theta \sin \psi & -\cos \psi \sin \varphi + \sin \theta \sin \psi \cos \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Οι μετασχηματισμοί των ταχυτήτων

Ρυθμός μεταβολής των γωνιών Euler

Στην περίπτωση απειροστών γωνιών Euler ισχύει ότι ο ρυθμός μεταβολής τους ισούται με το ρυθμό μεταβολής της περιστροφής του σωματοπαγούς συστήματος αναφοράς (γωνιακής ταχύτητας). Αυτό ισχύει μόνο σε αυτή την περίπτωση που οι γωνίες Euler θεωρούνται απειροστά μικρές και όχι στη γενική περίπτωση. Για παράδειγμα αν θεωρηθεί ότι η διαδοχή των γωνιών είναι [yaw pitch roll] η γωνία Euler yaw που εφαρμόζεται πρώτη σίγουρα δεν είναι ως προς τον τελικό σωματοπαγή yaw άξονα. Οι pitch και roll περιστροφές μετακίνησαν τον άξονα.. Είναι σημαντικό να προσδιοριστεί κατά συνέπεια το πως μεταβάλλεται με τον χρόνο το διάνυσμα των γωνιών Euler σε σχέση με τη γωνιακή ταχύτητα.

Θεωρούμε μικρές αλλαγές σε κάθε γωνία Euler και καθορίζουμε τις επιδράσεις πάνω στο διάνυσμα περιστροφής. Η πρώτη γωνία υφίσταται δύο επιπλέον περιστροφές, η δεύτερη μία επιπλέον περιστροφή, ενώ η τελευταία γωνία Euler καμία επιπλέον περιστροφή.

$$\begin{aligned} \bar{\omega} &= \mathbf{R}_\varphi \mathbf{R}_\theta \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{d\psi}{dt} \end{Bmatrix} + \mathbf{R}_\varphi \begin{Bmatrix} 0 \\ \frac{d\theta}{dt} \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{d\varphi}{dt} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \Rightarrow \\ \bar{\omega} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \cos \theta \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \cos \theta \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\varphi}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} \\ \frac{d\psi}{dt} \end{Bmatrix} \Rightarrow \frac{d\bar{\mathbf{E}}}{dt} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \varphi \tan \theta & \cos \varphi \tan \theta \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \frac{\sin \varphi}{\cos \theta} & \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} \end{pmatrix} \bar{\omega} \Rightarrow \\ & \frac{d\bar{\mathbf{E}}}{dt} = \Gamma(\bar{\mathbf{E}})\bar{\omega} \end{aligned}$$

Από την παραπάνω σχέση βλέπουμε ότι ο πίνακας μετασχηματισμού της γωνιακής ταχύτητας δεν ορίζεται για $\cos \theta = 0 \Rightarrow \theta = \left\{ \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \right\}$. Αυτό είναι σημαντικό σε περιπτώσεις όπου που τα υποβρύχια αναμένεται να λειτουργούν σε κατακόρυφη θέση πράγμα που είναι σπάνιο. Είναι όμως συχνή περίπτωση σε εφαρμογές όπως για παράδειγμα σε δορυφόρους υπό τροχιά και σε ρομποτικά όπλα. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να θεωρείται διαφορετική σειρά περιστροφών οπότε προκύπτει ανωμαλία σε διαφορετική θέση του οχήματος ή να χρησιμοποιείται παραμετροποίηση των μετασχηματισμών με παραμέτρους quaternion [Παράρτημα Α].

Οι εξισώσεις κίνησης

Η θέση του υδροπτέρου καθορίζεται με το διάνυσμα $\vec{r} = (x \ y \ z)^T$ από την αρχή του αδρανειακού στην αρχή του σωματοπαγούς συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5. Η μεταφορική και περιστροφική του ταχύτητα σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα είναι $\vec{v} = (u \ v \ w)^T$ και $\bar{\omega} = (p \ q \ r)^T$ αντίστοιχα. Αμφότερες

εκφράζονται στις σωματοπαγείς συντεταγμένες. Τέλος $\bar{E} = (\phi, \theta, \psi)^T$ είναι το διάνυσμα των γωνιών Euler.

Οι κινηματικές εξισώσεις του υδροπτέρου είναι οι εξής:

Η χρονική μεταβολή του ανύσματος θέσης του υδροπτέρου σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων, δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{\bar{r}} = \mathbf{R}^T (\bar{E}) \bar{v} \quad (2.1)$$

ενώ οι γωνίες Euler:

$$\dot{\bar{E}} = \mathbf{\Gamma}(\bar{E}) \bar{\omega} \quad (2.2)$$

Επίσης χρήσιμη για την μετέπειτα κατάστρωση των δυναμικών εξισώσεων κίνησης θα αποδειχτεί και η σχέση που περιγράφει την χρονική μεταβολή του μητρώου περιστροφής \mathbf{R}^T :

$$\dot{\mathbf{R}}^T = \mathbf{R}^T [\bar{\omega} \times] \quad (2.3)$$

όπου $[\bar{\omega} \times] = \begin{pmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{pmatrix}$ ο τελεστής εξωτερικού διανύσματος.

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από την (2.1) θεωρώντας την περίπτωση της διαφορικής περιστροφής όπου η ταχύτητα \bar{v} μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και που

ισχύει ότι $\frac{d\dot{\bar{r}}}{dt} = \bar{\omega} \times \dot{\bar{r}}$

Έτσι

$$\begin{aligned} \dot{\bar{r}} = \mathbf{R}^T \bar{v} &\Rightarrow \frac{d\dot{\bar{r}}}{dt} = \mathbf{R}^T \dot{\bar{v}} + \dot{\mathbf{R}}^T \bar{v} = \dot{\mathbf{R}}^T \bar{v} \Rightarrow \\ \dot{\mathbf{R}}^T \bar{v} &= \bar{\omega} \times \dot{\bar{r}} = \bar{\omega} \times \mathbf{R}^T \bar{v} \Rightarrow \\ \dot{\mathbf{R}}^T &= \bar{\omega} \times \mathbf{R}^T \end{aligned}$$

Ρεύμα

Η πλοήγηση ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς πρέπει να συνυπολογίζει τη δράση των ρευμάτων. Είναι σημαντικό για τη συλλογή των ωκεανογραφικών στοιχείων και για την πλοήγηση του σκάφους να υπολογίζεται κάθε στιγμή η τοπική ταχύτητα των ρευμάτων, κάτι που γίνεται με τη χρήση αισθητήρων.

Έστω \bar{v}_r η ταχύτητα του υδροπτέρου ως προς το ρευστό εκφρασμένη στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς και $\bar{V}_c = (V_{cx} \quad V_{cy} \quad V_{cz})$ η ταχύτητα του ρευστού σχετικά με το αδρανειακό σύστημα εκφρασμένη στις αδρανειακές συντεταγμένες. Τότε:

$$\bar{v} = \bar{v}_r + \mathbf{R}\bar{V}_c \quad (2.4)$$

$$\dot{\bar{r}} = \mathbf{R}^T \dot{\bar{v}} = \mathbf{R}^T \dot{\bar{v}}_r + \dot{\bar{V}}_c \quad (2.5)$$

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις λόγω ρευμάτων στο όχημα είναι συνάρτηση της \bar{v}_r εκτός της περίπτωσης που δε θεωρείται ρεύμα, οπότε $\bar{v} = \bar{v}_r$. Η θεώρηση αυτή δεν επηρεάζει τη δυναμική του υδροπτέρου. Η διαφορά στις κινήσεις του παρουσία ή μη ρευμάτων είναι απλά η υπέρθεση της ταχύτητας των ρευμάτων στην κίνηση του οχήματος απουσία ρευμάτων.

Στις ωκεανογραφικές εφαρμογές η ικανότητα των υδροπτέρων να μετρούν την ταχύτητα του ρεύματος είναι πολύ σημαντική τόσο για (την πλοήγηση) τον προσδιορισμό της πορείας και της θέσης του, όσο και για τη συλλογή των επιστημονικών δεδομένων. Αισθητήρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό είναι acoustic Doppler current profilers (ADCPs) και Doppler velocity logs (DVLs).

Σύστημα αναφοράς ρευστού

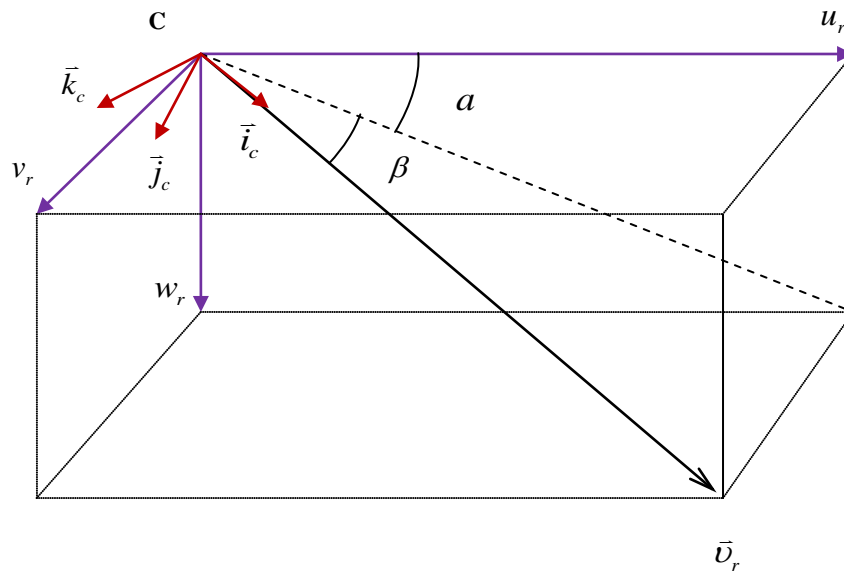
Τα υποβρύχια υδροπτερα ταξιδεύουν υπό την παρουσία ρευμάτων με συνέπεια το ρευστό μέσα στο οποίο κινούνται να μην είναι σταθερό σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Επιπλέον οι δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο όχημα από το ρευστό εξαρτώνται από την ταχύτητα και τον προσανατολισμό του σε σχέση με το ρευστό μέσα στο οποίο κινείται.

Ορίζεται σύστημα αναφοράς που κινείται μαζί με το ρευστό, ώστε να μπορεί να περιγραφεί η κίνηση και ο προσανατολισμός του υδροπτέρου σε σχέση με το σύστημα αυτό.

Ο προσανατολισμός του συστήματος αναφοράς του ρευστού ως προς το σωματοπαγές εκφράζεται μέσω δύο γωνιών τη γωνία προσβολής α και την πλαγιολίσθηση β :

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{w_r}{u_r}\right) \text{ και } \beta = \tan^{-1}\left(\frac{v_r}{\|\bar{v}_r\|}\right) \quad (2.6)$$

Το σύστημα αναφοράς που κινείται με το ρευστό ορίζεται έτσι ώστε ο ένας του άξονας να ταυτίζεται με το διάνυσμα της ταχύτητας \bar{v}_r . Η γωνία α είναι αυτή που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα x_b του σωματοπαγούς συστήματος και του διανύσματος $(u_r, 0, w_r)^T$, που είναι η προβολή του διανύσματος της ταχύτητας \bar{v}_r στο επίπεδο $x_b - z_b$. Η γωνία β ορίζεται μεταξύ της προβολής της ταχύτητας \bar{v}_r στο $x_b - z_b$ επίπεδο και στο διάνυσμα \bar{v}_r , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Το σύστημα αναφοράς που κινείται με το ρευστό και οι γωνίες α , β ως προς το σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Το σύστημα αναφοράς του ρευστού x_c, y_c, z_c έχει την αρχή του στο κέντρο άντωσης CB του υδροπτέρου ενώ ο άξονας x_c έχει την κατεύθυνση της σχετικής

ταχύτητας του υδροπτερου στο νερό \bar{v}_r . Οι άξονες 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 τους x_b, y_b, z_b αντίστοιχα.
2. Περιστρέφουμε κατά γωνία a γύρω από τον άξονα y_c . Η περιστροφή αυτή εκφράζεται από το μητρώο $\mathbf{R}_a(a)$.
3. Περιστρέφουμε γύρω από τον άξονα z_c κατά γωνία β . Η περιστροφή αυτή γράφεται σαν $\mathbf{R}_\beta(\beta)$.

Σημειωτέον δε ότι ο άξονας z_c βρίσκεται στο επίπεδο $x_b - z_b$. Η περιστροφή από το σωματοπαγές στο σύστημα του ρευστού δίνεται από το μητρώο $\mathbf{R}_{BC}(a, \beta)$.

$$\mathbf{R}_a(a) = \begin{pmatrix} \cos a & 0 & \sin a \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin a & 0 & \cos a \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_\beta(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{R}_{BC}(a, \beta) = \mathbf{R}_\beta \mathbf{R}_a = \begin{pmatrix} \cos a \cos \beta & \sin \beta & \sin a \cos \beta \\ -\cos a \sin \beta & \cos \beta & -\sin a \sin \beta \\ -\sin a & 0 & \cos a \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Η αντίστροφη μετατροπή από το σύστημα του ρευστού στο σωματοπαγές γίνεται απλά πολλαπλασιάζοντας με τον ανάστροφο του $\mathbf{R}_{BC}(a, \beta)$ πίνακα:

$$\mathbf{R}_{CB}(a, \beta) = \mathbf{R}_a^T \mathbf{R}_\beta^T = \begin{pmatrix} \cos a \cos \beta & -\cos a \sin \beta & \sin a \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \sin a \cos \beta & -\sin a \sin \beta & \cos a \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

όπου το μητρώο $\mathbf{R}_{BC}(a, \beta)$ μετατρέπει τα διανύσματα που δίνονται ως προς το σύστημα του ρευστού, στο σωματοπαγές.

Τέλος ισχύουν η σχέση μεταξύ των ταχυτήτων:

$$\bar{v}_r = \begin{pmatrix} u_r \\ v_r \\ w_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\bar{v}_r| \cos \beta \cos a \\ |\bar{v}_r| \sin \beta \\ |\bar{v}_r| \cos \beta \sin a \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

ΔΥΝΑΜΙΚΗ

Στην ενότητα αυτή εξάγονται οι εξισώσεις κίνησης του υδροπτέρου μέσω του υπολογισμού της συνολικής ενέργειας του συστήματος ώστε να προκύψει η ορμή του οχήματος και στη συνέχεια να εφαρμοστούν οι νόμοι του Νεύτωνα.

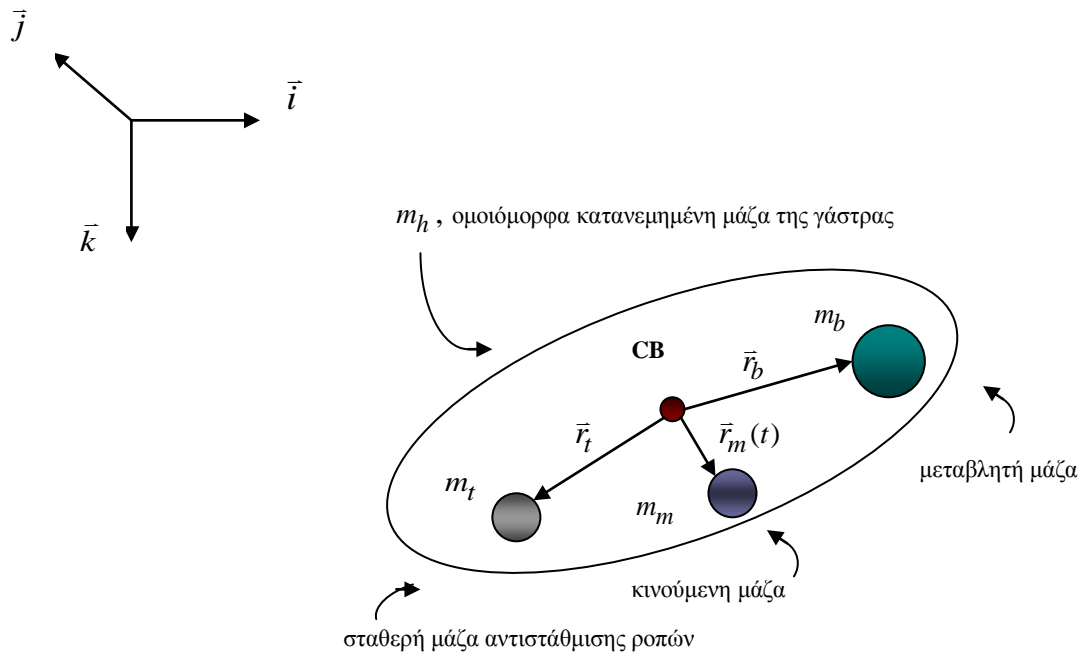
Η επιλογή των εσωτερικών μαζών του οχήματος βασίστηκε στα ήδη υπάρχοντα υδρόπτερα. Σε αυτά οι μεταβλητές μάζες τοποθετούνται στο ρύγχος ή στην ουρά των οχημάτων ώστε να παρέχεται με κάθε μεταβολή μία ροπή πρόνευσης (pitch). Οι κινούμενες εσωτερικές μάζες τοποθετούνται σε θέσεις ανάλογα με τη γεωμετρία του εκάστοτε οχήματος και το χώρο που διατίθεται και περιορίζονται σε συγκεκριμένη ακτίνα μετακίνησης. Η στατική αντισταθμιστική μάζα χρησιμοποιείται στο μοντέλο ώστε να προσδιορίζονται ακριβέστερα το κέντρο βάρους του οχήματος και η στατική του ισορροπία. Προσαρμόζοντας ανάλογα τις παραμέτρους που αντιστοιχούν στη στατική αυτή μάζα μπορούμε να προσεγγίσουμε καλύτερα τη στατική ισορροπία και αδράνεια ενός υδροπτέρου, λαμβάνοντας έτσι υπόψη την εσωτερική διαρρύθμιση των διαφόρων μαζών που μπορεί να περιέχει (λειτουργικά και ωκεανογραφικά όργανα).

Το μοντέλο

Η ολική στατική μάζα του υδροπτέρου είναι m_s , αναφέρεται και ως μάζα σώματος και αποτελεί το άθροισμα τριών όρων: $m_s = m_h + m_t + m_b$. Η μάζα της γάστρας m_h θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένη, η μάζα m_t είναι μία σταθερή σημειακή μάζα και η m_b είναι σημειακή μεταβλητή μάζα (ballast). Η δε ολική μάζα του υδροπτέρου θα είναι το άθροισμα της κινούμενης μάζας m_m και της στατικής m_s :

$$m_v = m_h + m_t + m_b + m_m = m_s + m_m \quad (2.11)$$

Οι εσωτερικές μάζες και τα διανύσματα θέσης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.7: Μάζες και διανύσματα θέσης

Στο σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων, οι θέσεις των σημειακών μαζών m_t και m_b καθορίζονται από τα διανύσματα \bar{r}_t και \bar{r}_b , ενώ το διάνυσμα $\bar{r}_m(t)$, περιγράφει τη θέση της κινούμενης μάζας m_m στο σωματοπαγές σύστημα τη χρονική στιγμή t .

Οι παράμετροι m_t, \bar{r}_t που αντιστοιχούν στη στατική μάζα μπορούν να οριστούν έτσι ώστε να εξισορροπούν τις pitching και rolling ροπές λόγω των υπολοίπων σημειακών μαζών καθώς και να ρυθμίζουν την αδράνεια του σώματος.

Έστω m η μάζα του εκτοπισμένου ρευστού από το όχημα. Μπορούμε να ορίσουμε την ποσότητα $m_0 = m_0 - m$ ώστε το όχημα να αποκτά αρνητική (θετική) πλευστότητα όταν το m_0 είναι θετικό (αρνητικό).

Το μητρώο αδράνειας της στατικής μάζας του σώματος ως προς το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων εκφράζεται:

$$\mathbf{J}_s = \mathbf{J}_h - m_t [\bar{r}_t \times][\bar{r}_t \times] - m_b [\bar{r}_b \times][\bar{r}_b \times] \quad (2.12)$$

όπου \mathbf{J}_h το μητρώο αδράνειας της ομοιόμορφα κατανεμημένης μάζας της γάστρας m_h ως προς το σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Ο έλεγχος πραγματοποιείται μέσω δύο σημειακών μαζών μέσα στο όχημα.: της μεταβλητής μάζας (ballast mass) m_b σταθερής θέσης \bar{r}_b και της σταθερής μάζας m_m μεταβλητής θέσης $\bar{r}_m(t)$. 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.

Δυνάμεις Άντωσης και Βαρύτητας

Τα υποβρύχια υδρόπτερα υπόκεινται στις δυνάμεις της βαρύτητας και της άντωσης. Η βαρυτική δύναμη m_0g δρα στη θετική (προς τα κάτω) αδρανειακή κατεύθυνση \bar{k} στο κέντρο βαρύτητας CG του οχήματος. Η θέση του κέντρου βαρύτητας καθορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{r}_{CG} = \frac{\sum_i m_i \bar{r}_i}{\sum_i m_i} = \frac{m_h \bar{r}_h + m_t \bar{r}_t + m_b \bar{r}_b + m_m \bar{r}_m}{m_h + m_t + m_b + m_m} \quad (2.13)$$

Σημειώνεται ότι εμφανίζονται στην εξίσωση και οι δύο εσωτερικές μάζες ελέγχου m_b και m_m . Επιπλέον το διάνυσμα θέσης στις σωματοπαγείς συντεταγμένες \bar{r}_h του κεντροειδούς της γάστρας είναι πάντα μηδέν, αφού η μάζα της θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένη. Έτσι το κέντρο βάρους CG της γάστρας θα ταυτίζεται πάντα με το κέντρο άντωσης CB του υδροπτέρου, δηλαδή $\bar{r}_h = 0$.

Η δύναμη της άντωσης ασκείται πάνω στο υδρόπτερο λόγω του όγκου του ρευστού που εκτοπίζεται και είναι αποτέλεσμα της πίεσης που ασκείται από το ρευστό πάνω στην επιφάνεια του οχήματος. Το κέντρο άντωσης του οχήματος βρίσκεται στο κεντροειδές του εκτοπισμένου όγκου. Η δύναμη της άντωσης που ασκείται στο CB είναι ίση με mg , όπου m η μάζα του εκτοπισμένου ρευστού και δρα προς την αρνητική (προς τα πάνω) \bar{k} κατεύθυνση. Η πλευστότητα του οχήματος καθορίζεται από τη δύναμη $m_0g = (m_v - m)g$, ώστε να είναι αρνητική (θετική) όταν το m_0 είναι θετικό (αρνητικό). Οι δυνάμεις άντωσης και βαρύτητας εκφράζονται στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς ως εξής:

$$\bar{f}_{gravity} = m_v g(\mathbf{R}\bar{k}) \quad \text{και} \quad \bar{f}_{buoyancy} = -mg(\mathbf{R}\bar{k}) \quad (2.14)$$

Το κέντρο βάρους του οχήματος CG δεν συμπίπτει με το κέντρο άντωσης CB καθορίζεται από το μη μηδενικό διάνυσμα θέσης \mathbf{r}_{CG} που αρχίζει από το CB. Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας ροπής κλίσης λόγω βάρους, η οποία στο σωματοπαγές σύστημα ισούται με:

$$\bar{\tau}_{gravity} = \bar{r}_{CG} \times m_v g(\mathbf{R}\bar{k}) = m_v g [\bar{r}_{CG} \times](\mathbf{R}\bar{k}) \quad (2.15)$$

Παράλληλα, επειδή η αρχή του σωματοπαγούς συστήματος εκλέχθηκε να συμπίπτει με το κέντρο άντωσης CB η ροπή επαναφοράς λόγω άντωσης είναι μηδενική στο σωματοπαγές σύστημα. Από την σχέση (2.11) προκύπτει:

$$m_v \bar{r}_{CG} = m_i \bar{r}_i + m_b \bar{r}_b + m_m \bar{r}_m \quad (2.16)$$

και συνεπώς η ροπή κλίσης θα γίνει:

$$\bar{\tau}_{gravity} = (m_m [\bar{r}_m \times] + m_i [\bar{r}_i \times] + m_b [\bar{r}_b \times]) g(\mathbf{R}\mathbf{k}) \quad (2.17)$$

Εξισώσεις Κίνησης

Οι εξισώσεις κίνησης του υδροπτερού θα προκύψουν εφαρμόζοντας τους νόμους του Νεύτωνα αφού υπολογίσουμε τις ορμές από τη συνολική ενέργεια οχήματος – ρευστού.

Έστω \bar{P} η συνολική ορμή του συστήματος οχήματος – ρευστού και $\bar{\Pi}$ η συνολική στροφορμή του συστήματος ως προς την αρχή του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων, εκφρασμένες αμφότερες στο αδρανειακό σύστημα. Παρομοίως ορίζονται \bar{P}_b και \bar{P}_i η συνολική ορμή των βαρών της μεταβλητής μάζας m_b και της σταθερής m_i στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς, καθώς και η ορμή \bar{P}_m της κινούμενης μάζας m_m . Οι νόμοι του Νεύτωνα δίνουν τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
\dot{\vec{P}} &= \sum_{i=1}^I \vec{F}_{ext_i} \\
\dot{\vec{\Pi}} &= \sum_{i=1}^I (\vec{x}_i \times \vec{F}_{ext_i}) + \sum_{j=1}^J \vec{T}_{ext_j} \\
\dot{\vec{P}}_m &= m_m g \vec{k} + \sum_{k=1}^K \vec{F}_{int_movable_k} \\
\dot{\vec{P}}_b &= m_b g \vec{k} + \sum_{l=1}^L \vec{F}_{int_ballast_l} \\
\dot{\vec{P}}_t &= m_t g \vec{k} + \sum_{n=1}^N \vec{F}_{int_offset_n}
\end{aligned} \tag{2.18}$$

όπου \vec{k} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κατά τη διεύθυνση της βαρύτητας, \vec{F}_{ext_i} είναι η εξωτερική δύναμη που ασκείται στο σύστημα και \vec{T}_{ext_j} είναι η εξωτερική ροπή. Όλα τα διανύσματα εκφράζονται στο αδρανειακό σύστημα. Το διάνυσμα \vec{x}_i προσδιορίζει το σημείο στο οποίο ασκείται η εξωτερική δύναμη \vec{F}_{ext_i} στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων. Οι εξωτερικές δυνάμεις και ροπές περιλαμβάνουν και τις δυνάμεις άντωσης και βαρύτητας. Στις τρεις τελευταίες εξισώσεις, τα βάρη των τριών εσωτερικών σημειακών μαζών εκφράζονται κατά διακριτό τρόπο, μιας και η βαρύτητα είναι η μόνη εξωτερική δύναμη που ασκείται στις μάζες αυτές. Η δύναμη $\sum_{k=1}^K \vec{F}_{int_movable_k}$ είναι η δύναμη που ασκεί το όχημα στη σημειακή μάζα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δύναμη ελέγχου. Οι δυνάμεις $\sum_{l=1}^L \vec{F}_{int_ballast_l}$ και $\sum_{n=1}^N \vec{F}_{int_offset_n}$ είναι οι δυνάμεις που ασκεί το όχημα στις σημειακές μάζες m_b και m_t . Οι δύο αυτές τελευταίες μάζες έχουν σταθερή καθορισμένη θέση μέσα στο όχημα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει. Παρατηρούμε ότι οι εξισώσεις (2.18) που αντιστοιχούν στις σταθερές μάζες m_b και m_t έχουν την ίδια μορφή με αυτή που αντιστοιχεί στη μεταβλητή μάζα m_m . Επειδή όμως οι μάζες m_b και m_t έχουν σταθερή θέση μέσα στο όχημα, οι εσωτερικές δυνάμεις που ασκούνται πάνω τους δε θεωρούνται δυνάμεις ελέγχου και καθορίζονται από την κίνηση του υδροπτέρου.

Έστω \vec{p} η ολική ορμή του συστήματος οχήματος – ρευστού και $\vec{\pi}$ η ολική στροφορμή ως προς την αρχή του σωματοπαγούς συστήματος αναφοράς. Σημειωτέον δε ότι οι όροι αυτοί συμπεριλαμβάνουν και τις αντίστοιχες ροπές και ορμές των

εσωτερικών μαζών. Στη σχέση που συνδέει την στροφορμή $\bar{\Pi}$ ως προς την αρχή του αδρανειακού σε αδρανειακές συντεταγμένες με την στροφορμή $\bar{\pi}$ ως προς την αρχή του σωματοπαγούς σε σωματοπαγείς συντεταγμένες, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το θεώρημα μεταφοράς (των παραλλήλων αξόνων) για τη στροφορμή. Τέλος, οι όροι \bar{p}_m , \bar{p}_b και \bar{p}_t αντιπροσωπεύουν τις ορμές των εσωτερικών μαζών στις σωματοπαγείς συντεταγμένες επίσης. Δηλαδή:

$$\begin{aligned}
\bar{P} &= \mathbf{R}^T \bar{p} \\
\bar{\Pi} &= \mathbf{R}^T \bar{\pi} + \bar{r} \times \bar{P} \\
\bar{P}_m &= \mathbf{R}^T \bar{p}_m \\
\bar{P}_b &= \mathbf{R}^T \bar{p}_b \\
\bar{P}_t &= \mathbf{R}^T \bar{p}_t
\end{aligned} \tag{2.19}$$

Παραγωγίζοντας τις παραπάνω εξισώσεις ως προς χρόνο και χρησιμοποιώντας τις κινηματικές εξισώσεις προκύπτει:

$$\begin{aligned}
\dot{\bar{P}} &= \mathbf{R}^T (\dot{\bar{p}} + \bar{\omega} \times \bar{p}) \\
\dot{\bar{\Pi}} &= \mathbf{R}^T (\dot{\bar{\pi}} + \bar{\omega} \times \bar{\pi}) + \mathbf{R}^T \bar{v} \times \bar{P} + \bar{r} \times \dot{\bar{P}} \\
\dot{\bar{P}}_m &= \mathbf{R}^T (\dot{\bar{p}}_m + \bar{\omega} \times \bar{p}_m) \\
\dot{\bar{P}}_b &= \mathbf{R}^T (\dot{\bar{p}}_b + \bar{\omega} \times \bar{p}_b) \\
\dot{\bar{P}}_t &= \mathbf{R}^T (\dot{\bar{p}}_t + \bar{\omega} \times \bar{p}_t)
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Αντικαθιστώντας την αδρανειακή ορμή και ροπή, δηλαδή τις εξισώσεις (2.18) στις εξισώσεις (2.20) λαμβάνονται οι δυναμικές εξισώσεις ως προς το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων:

$$\begin{aligned}
\dot{\bar{p}} &= \bar{p} \times \bar{\omega} + \mathbf{R} \sum_{i=1}^I \bar{F}_{ext_i} \\
\dot{\bar{\pi}} &= \bar{\pi} \times \bar{\omega} + \bar{p} \times \bar{v} + \mathbf{R} \left(\sum_{i=1}^I (\bar{x}_i - \bar{r}) \times \bar{F}_{ext_i} \right) + \mathbf{R} \sum_{j=1}^J \bar{T}_{ext_j} \\
\dot{\bar{p}}_m &= \bar{p}_m \times \bar{\omega} + m_m g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{F}_{int_movable_k} \\
\dot{\bar{p}}_b &= \bar{p}_b \times \bar{\omega} + m_b g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{l=1}^L \bar{F}_{int_ballast_l} \\
\dot{\bar{p}}_t &= \bar{p}_t \times \bar{\omega} + m_t g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{n=1}^N \bar{F}_{int_offset_n}
\end{aligned} \tag{2.21}$$

όπου $\mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{\mathbf{F}}_{\text{int_movable}_k}$ είναι η εσωτερική δύναμη που ασκείται στη σημειακή μάζα m_m στις σωματοπαγείς συντεταγμένες.

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές λόγω τριβής πάνω στο υδρόπτερο συμπεριλαμβάνονται στις εκφράσεις $\sum_{i=1}^I \bar{\mathbf{F}}_{\text{ext}_i}$ και $\sum_{j=1}^J \bar{\mathbf{T}}_{\text{ext}_j}$ και εξαρτώνται από τις ταχύτητες $\bar{\mathbf{v}}$ και $\bar{\boldsymbol{\omega}}$. Έτσι οι εξισώσεις κίνησης (2.21) μεταβάλλονται στη συνέχεια ώστε οι όροι των ταχυτήτων $\bar{\mathbf{v}}$ και $\bar{\boldsymbol{\omega}}$ να συμπεριλαμβάνονται στην έκφρασή τους.

Ακολουθώς θα οριστεί η συνολική κινητική ενέργεια του συστήματος οχήματος – ρευστού ώστε να εξάγουμε τις εκφράσεις για τα μεγέθη \bar{p} , $\bar{\pi}$, \bar{p}_m , \bar{p}_b και \bar{p}_t σύμφωνα με τις:

$$\bar{p} = \frac{\partial T}{\partial \bar{\mathbf{v}}}, \quad \bar{\pi} = \frac{\partial T}{\partial \bar{\boldsymbol{\omega}}}, \quad \bar{p}_m = \frac{\partial T}{\partial \dot{\bar{\mathbf{r}}}_m}, \quad \bar{p}_b = \frac{\partial T}{\partial \dot{\bar{\mathbf{r}}}_b}, \quad \bar{p}_t = \frac{\partial T}{\partial \dot{\bar{\mathbf{r}}}_t} \quad (2.22)$$

Η κινητική ενέργεια T_s απαραμόρφωτου στερεού σώματος με συνολική μάζα m_s , διάνυσμα θέσης του κέντρου βάρους του $\bar{\mathbf{r}}_s$ στο σωματοπαγές σύστημα ($\bar{\mathbf{r}}_{CG}$) και μητρώο αδράνειας \mathbf{J}_s θα είναι:

$$T_s = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{v}} \\ \bar{\boldsymbol{\omega}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_s \mathbf{I} & -m_s [\bar{\mathbf{r}}_s \times] \\ m_s [\bar{\mathbf{r}}_s \times] & \mathbf{J}_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{v}} \\ \bar{\boldsymbol{\omega}} \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

όπου \mathbf{I} είναι ο 3×3 μοναδιαίος πίνακας.

Έστω $\bar{\mathbf{v}}_m$ η απόλυτη ταχύτητα της κινούμενης μάζας m_m στις σωματοπαγείς συντεταγμένες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η σχετική ταχύτητα της μάζας ως προς το σωματοπαγές σύστημα είναι $\dot{\bar{\mathbf{r}}}_m$, η ταχύτητα $\bar{\mathbf{v}}_m$ θα είναι:

$$\bar{\mathbf{v}}_m = \bar{\mathbf{v}} + \dot{\bar{\mathbf{r}}}_m + \bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_m \quad (2.24)$$

Η κινητική ενέργεια της κινούμενης μάζας T_m θα υπολογίζεται τότε από τον τύπο:

$$T_m = \frac{1}{2} m_m \|\bar{\mathbf{v}}_m\|^2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{v}} \\ \bar{\boldsymbol{\omega}} \\ \dot{\bar{\mathbf{r}}}_m \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_m \mathbf{I} & -m_m [\bar{\mathbf{r}}_m \times] & m_m \mathbf{I} \\ m_m [\bar{\mathbf{r}}_m \times] & -m_m [\bar{\mathbf{r}}_m \times][\bar{\mathbf{r}}_m \times] & m_m [\bar{\mathbf{r}}_m \times] \\ m_m \mathbf{I} & -m_m [\bar{\mathbf{r}}_m \times] & m_m \mathbf{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{v}} \\ \bar{\boldsymbol{\omega}} \\ \dot{\bar{\mathbf{r}}}_m \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

Οι κινητικές ενέργειες της μεταβλητής m_b και της σταθερής μάζας m_t υπολογίζονται αντιστοίχως, αφού πρώτα ορίσουμε τις απόλυτες ταχύτητές τους \bar{v}_b και \bar{v}_t :

$$T_b = \frac{1}{2} m_b \|\bar{v}_b\|^2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{\omega} \\ \dot{\bar{r}}_b \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_b \mathbb{I} & -m_b [\bar{r}_b \times] & m_b \mathbb{I} \\ m_b [\bar{r}_b \times] & -m_b [\bar{r}_b \times][\bar{r}_b \times] & m_b [\bar{r}_b \times] \\ m_b \mathbb{I} & -m_b [\bar{r}_b \times] & m_b \mathbb{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{\omega} \\ \dot{\bar{r}}_b \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

και

$$T_t = \frac{1}{2} m_t \|\bar{v}_t\|^2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{\omega} \\ \dot{\bar{r}}_t \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} m_t \mathbb{I} & -m_t [\bar{r}_t \times] & m_t \mathbb{I} \\ m_t [\bar{r}_t \times] & -m_t [\bar{r}_t \times][\bar{r}_t \times] & m_t [\bar{r}_t \times] \\ m_t \mathbb{I} & -m_t [\bar{r}_t \times] & m_t \mathbb{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{\omega} \\ \dot{\bar{r}}_t \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

Ο Kirchoff [51] απέδειξε ότι η κινητική ενέργεια απέρατου όγκου ιδανικού ρευστού λόγω της κίνησης μέσα σε αυτό ενός βυθισμένου άκαμπτου στερεού σώματος έχει τη μορφή:

$$T_f = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{\omega} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{M}_\alpha & \mathbf{D}_\alpha^T \\ \mathbf{D}_\alpha & \mathbf{J}_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{\omega} \end{pmatrix}$$

θεωρώντας το γενικευμένο μητρώο πρόσθετης μάζας/αδράνειας του συστήματος

οχήματος - ρευστού $\mathbf{I}_\alpha = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_\alpha & \mathbf{D}_\alpha^T \\ \mathbf{D}_\alpha & \mathbf{J}_\alpha \end{pmatrix}$ όπου \mathbf{M}_α είναι το μητρώο της πρόσθετης μάζας,

\mathbf{J}_α το διαγώνιο μητρώο πρόσθετης αδράνειας και \mathbf{D}_α το μητρώο των εκτός της κυρίας διαγωνίου όρων. Τα μητρώα αυτά εξαρτώνται από το εξωτερικό σχήμα του σώματος και την πυκνότητα του ρευστού. Το ρευστό θεωρείται μη συνεκτικό, ασυμπιεστο, αστρόβιλο και ακίνητο στο άπειρο.

Φαινόμενα λόγω συνεκτικότητας όπως δυνάμεις άνωσης (lift) και αντίστασης (drag) συμπεριλαμβάνονται μέσα στο μοντέλο με τη μορφή εξωτερικών δυνάμεων και ροπών.

Το κλειδί που απλοποιεί τη θεώρηση του Kirchoff είναι το να αντιμετωπίσει το συνολικό σύστημα ρευστού – σώματος σαν ένα απλό δυναμικό σύστημα έτσι ώστε η δύναμη του ρευστού πάνω στην επιφάνεια του οχήματος να μη χρειάζεται να υπολογιστεί. Το γενικευμένο μητρώο μάζας/αδράνειας αποτελείται από επιμέρους συνιστώσες που αντιπροσωπεύουν τη συνεισφορά από το στερεό σώμα αλλά και από το ρευστό.

Το μητρώο αδράνειας \mathbf{J} αποτελείται από δύο ξεχωριστά αδρανειακά μητρώα: το μητρώο αδράνειας της στατικής μάζας \mathbf{J}_s και το μητρώο πρόσθετης αδράνειας \mathbf{J}_a . Το \mathbf{J}_s παριστάνει την αδράνεια που οφείλεται στην δεδομένη γεωμετρία του σώματος και την αδράνεια που οφείλεται τόσο στην κινούμενη όσο και στην εσωτερική στατική μάζα, ενώ το μητρώο \mathbf{J}_a εξηγεί την πρόσθετη μάζα του συστήματος καθώς το ρευστό επιταχύνεται κατά την περιστροφή του οχήματος. Εφόσον η εξωτερική γεωμετρία του υδροπτέρου είναι τέτοια ώστε τα επίπεδα $\bar{i}_b - \bar{j}_b$ και $\bar{i}_b - \bar{k}_b$ είναι επίπεδα συμμετρίας, το μητρώο πρόσθετης αδράνειας είναι διαγώνιο.

Αντιστοίχως το μητρώο μάζας του συστήματος \mathbf{M} είναι το άθροισμα του μητρώου της στατικής μάζας του οχήματος $m_s \mathbb{I}$ και του μητρώου πρόσθετης μάζας \mathbf{M}_a . Λόγω των επιπέδων συμμετρίας το μητρώο πρόσθετης μάζας θα είναι και σε αυτή την περίπτωση διαγώνιο.

Η ολική κινητική ενέργεια του συστήματος οχήματος – ρευστού $T = T_s + T_m + T_f + T_b + T_t$ υπολογίζεται ως εξής:

$$T = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{\omega} \\ \dot{\bar{r}}_m \\ \dot{\bar{r}}_b \\ \dot{\bar{r}}_t \end{pmatrix} \cdot \mathbf{I} \begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{\omega} \\ \dot{\bar{r}}_m \\ \dot{\bar{r}}_b \\ \dot{\bar{r}}_t \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

όπου:

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} (m_s + m_m) \mathbb{I} + \mathbf{M}_a & -m_m [\bar{r}_m \times] - m_b [\bar{r}_b \times] - m_t [\bar{r}_t \times] - \mathbf{D}_a^T & m_m \mathbb{I} & m_b \mathbb{I} & m_t \mathbb{I} \\ m_m [\bar{r}_m \times] + m_b [\bar{r}_b \times] + m_t [\bar{r}_t \times] + \mathbf{D}_a & \mathbf{J}_h - m_m [\bar{r}_m \times][\bar{r}_m \times] - m_b [\bar{r}_b \times][\bar{r}_b \times] - m_t [\bar{r}_t \times][\bar{r}_t \times] + \mathbf{J}_a & m_m [\bar{r}_m \times] & m_b [\bar{r}_b \times] & m_t [\bar{r}_t \times] \\ m_m \mathbb{I} & -m_m [\bar{r}_m \times] & m_m \mathbb{I} & 0 & 0 \\ m_b \mathbb{I} & -m_b [\bar{r}_b \times] & 0 & m_b \mathbb{I} & 0 \\ m_t \mathbb{I} & -m_t [\bar{r}_t \times] & 0 & 0 & m_t \mathbb{I} \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Μπορούμε τότε να υπολογίσουμε την ορμή και τη ροπή ως εξής:

$$\bar{p} = \frac{\partial T}{\partial \bar{v}} = (m_s \mathbf{I} + \mathbf{M}_a) \bar{v} + \mathbf{D}_a^T \bar{\omega} + m_m (\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_m + \dot{\bar{r}}_m) + m_b (\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_b + \dot{\bar{r}}_b) + m_t (\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_t + \dot{\bar{r}}_t) \quad (2.30)$$

$$\bar{\pi} = \frac{\partial T}{\partial \bar{\omega}} = \mathbf{D}_\alpha \bar{v} + (\mathbf{J}_h + \mathbf{J}_\alpha) \bar{\omega} + m_m [\bar{r}_m \times] (\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_m + \dot{\bar{r}}_m) + m_b [\bar{r}_b \times] (\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_b + \dot{\bar{r}}_b) + m_t [\bar{r}_t \times] (\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_t + \dot{\bar{r}}_t) \quad (2.31)$$

$$\bar{p}_m = \frac{\partial T}{\partial \dot{\bar{r}}_m} = m_m (\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_m + \dot{\bar{r}}_m) \quad (2.32)$$

$$\bar{p}_b = \frac{\partial T}{\partial \dot{\bar{r}}_b} = m_b (\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_b + \dot{\bar{r}}_b) \quad (2.33)$$

$$\bar{p}_t = \frac{\partial T}{\partial \dot{\bar{r}}_t} = m_t (\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_t + \dot{\bar{r}}_t) \quad (2.34)$$

Ας θεωρήσουμε πρώτα την περίπτωση όπου η γεωμετρία του οχήματος είναι τέτοια ώστε τα μητρώα πρόσθετης μάζας και αδράνειας να είναι διαγώνια. Αυτό συμβαίνει όταν το όχημα διαθέτει τρία επίπεδα συμμετρίας και επιτυγχάνεται με ένα απλό ελλειψοειδές σχήμα ή ένα πιο πολύπλοκο που θα συμπεριλαμβάνει πτερύγια και ουρά ενσωματωμένα συμμετρικά στο υδρόπτερο. Σε αυτή την περίπτωση τα μητρώα \mathbf{M}_α και \mathbf{J}_α είναι διαγώνια ενώ το $\mathbf{D}_\alpha = 0$. Έστω $\mathbf{M}_\alpha = \text{diag}(m_{\alpha 1}, m_{\alpha 2}, m_{\alpha 3})$ και $\mathbf{J}_\alpha = \text{diag}(J_{\alpha 1}, J_{\alpha 2}, J_{\alpha 3})$. Ορίζεται:

$$\mathbf{M} = m_h \mathbb{I} + \mathbf{M}_\alpha \quad (2.35)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_h + \mathbf{J}_\alpha \quad (2.36)$$

όπου \mathbb{I} είναι ο 3×3 μοναδιαίος πίνακας. Τότε:

$$\begin{pmatrix} \bar{p} \\ \bar{\pi} \\ \bar{p}_m \\ \bar{p}_b \\ \bar{p}_t \end{pmatrix} = \mathbf{I} \begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{\omega} \\ \dot{\bar{r}}_m \\ \dot{\bar{r}}_b \\ \dot{\bar{r}}_t \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

όπου ο \mathbf{I} γίνεται:

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} \mathbf{M} + (m_m + m_b + m_t) \mathbb{I} & -m_m [\bar{r}_m \times] - m_b [\bar{r}_b \times] - m_t [\bar{r}_t \times] & m_m \mathbb{I} & m_b \mathbb{I} & m_t \mathbb{I} \\ m_m [\bar{r}_m \times] + m_b [\bar{r}_b \times] + m_t [\bar{r}_t \times] & \mathbf{J} - m_m [\bar{r}_m \times][\bar{r}_m \times] - m_b [\bar{r}_b \times][\bar{r}_b \times] - m_t [\bar{r}_t \times][\bar{r}_t \times] & m_m [\bar{r}_m \times] & m_b [\bar{r}_b \times] & m_t [\bar{r}_t \times] \\ m_m \mathbb{I} & -m_m [\bar{r}_m \times] & m_m \mathbb{I} & 0 & 0 \\ m_b \mathbb{I} & -m_b [\bar{r}_b \times] & 0 & m_b \mathbb{I} & 0 \\ m_t \mathbb{I} & -m_t [\bar{r}_t \times] & 0 & 0 & m_t \mathbb{I} \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

Αντιστρέφοντας τις σχέσεις (2.37) παίρνουμε τις ταχύτητες του οχήματος σε όρους ορμής και ροπής:

$$\begin{pmatrix} \bar{v} \\ \bar{\omega} \\ \dot{\bar{r}}_m \\ \dot{\bar{r}}_b \\ \dot{\bar{r}}_t \end{pmatrix} = \mathbf{I}^{-1} \begin{pmatrix} \bar{p} \\ \bar{\pi} \\ \bar{P}_m \\ \bar{P}_b \\ \bar{P}_t \end{pmatrix} \quad (2.39)$$

όπου

$$\mathbf{I}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}^{-1} & 0 & -\mathbf{M}^{-1} & -\mathbf{M}^{-1} & -\mathbf{M}^{-1} \\ 0 & \mathbf{J}^{-1} & -\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_m \times] & -\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_b \times] & -\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_t \times] \\ -\mathbf{M}^{-1} & [\bar{r}_m \times]\mathbf{J}^{-1} & \mathbf{I}^{-1}(3,3) & \mathbf{I}^{-1}(3,4) & \mathbf{I}^{-1}(3,5) \\ -\mathbf{M}^{-1} & [\bar{r}_b \times]\mathbf{J}^{-1} & \mathbf{I}^{-1}(4,3) & \mathbf{I}^{-1}(4,4) & \mathbf{I}^{-1}(4,5) \\ -\mathbf{M}^{-1} & [\bar{r}_t \times]\mathbf{J}^{-1} & \mathbf{I}^{-1}(5,3) & \mathbf{I}^{-1}(5,4) & \mathbf{I}^{-1}(5,5) \end{pmatrix} \quad (2.40)$$

και

$$\begin{aligned} \mathbf{I}^{-1}(3,3) &= \mathbf{M}^{-1} - [\bar{r}_m \times]\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_m \times] + \frac{1}{m_m} \mathbb{I} \\ \mathbf{I}^{-1}(3,4) &= \mathbf{M}^{-1} - [\bar{r}_m \times]\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_b \times] \\ \mathbf{I}^{-1}(3,5) &= \mathbf{M}^{-1} - [\bar{r}_m \times]\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_t \times] \\ \mathbf{I}^{-1}(4,3) &= \mathbf{M}^{-1} - [\bar{r}_b \times]\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_m \times] \\ \mathbf{I}^{-1}(4,4) &= \mathbf{M}^{-1} - [\bar{r}_b \times]\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_b \times] + \frac{1}{m_b} \mathbb{I} \\ \mathbf{I}^{-1}(4,5) &= \mathbf{M}^{-1} - [\bar{r}_b \times]\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_t \times] \\ \mathbf{I}^{-1}(5,3) &= \mathbf{M}^{-1} - [\bar{r}_t \times]\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_m \times] \\ \mathbf{I}^{-1}(5,4) &= \mathbf{M}^{-1} - [\bar{r}_t \times]\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_b \times] \\ \mathbf{I}^{-1}(5,5) &= \mathbf{M}^{-1} - [\bar{r}_t \times]\mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_t \times] + \frac{1}{m_t} \mathbb{I} \end{aligned}$$

Οι εξισώσεις κίνησης του οχήματος σε όρους ταχύτητας, εξάγονται παραγωγίζοντας τις εξισώσεις (2.39) ως προς το χρόνο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εισαχθούν στις εξισώσεις κίνησης όροι που περιέχουν τον ρυθμό άντλησης \dot{m}_b . Θεωρείται ότι η άντληση γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να οι προκαλούμενες ωθήσεις και ροπές πάνω στο όχημα να είναι αμελητέες. Έτσι οι όροι που περιέχουν το ρυθμό \dot{m}_b εξαλείφονται από τις παρακάτω εξισώσεις.

Οι δυνάμεις που δημιουργούνται κατά την άντληση είναι ισοδύναμες με την ώθηση λόγω εκτόξευσης μάζας. Στα υπάρχοντα υδροπτερα τέτοιες δυνάμεις είναι αμελητέες, αφού οι μεταβλητές μάζες είναι πολύ μικρές σε σχέση με τη μάζα του υδροπτερου. Επιπλέον ο ρυθμός άντλησης είναι πολύ χαμηλός και η μάζα εκτοξεύεται με μία πολύ μικρή σχετική ταχύτητα (δηλαδή στο σύστημα του οχήματος). Επίσης η άντληση γίνεται μόνο κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων, κατά τη μετάβαση από ανάδυση σε κατάδυση, έτσι ο ρυθμός \dot{m}_b ισούται με μηδέν κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της λειτουργίας του υδροπτερου και δεν επηρεάζει την σταθερή κίνηση. Στην περίπτωση όπου οι μεταβλητές μάζες είναι συγκρίσιμης τάξης μεγέθους με τη μάζα του υδροπτερου, ή όταν η ταχύτητα άντλησης είναι σημαντική, τότε ο σχεδιασμός του υδροπτερου είναι δυνατός όταν η άντωση αλλάζει με συμμετρικό τρόπο έτσι ώστε η προκαλούμενη ώθηση ή η ροπή πάνω στο όχημα να είναι αμελητέα

Έστω ότι η μεταβλητή ελέγχου $u_{ballast_rate}$ ορίζεται ως εξής:

$$u_{ballast_rate} = \dot{m}_b \quad (2.41)$$

Παραγωγίζοντας τις εξισώσεις (2.39) προκύπτει:

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \\ \ddot{r}_m \\ \ddot{r}_b \\ \ddot{r}_t \end{pmatrix} = \mathbf{I}^{-1} \begin{pmatrix} \dot{\bar{p}} \\ \dot{\bar{\pi}} \\ \dot{\bar{p}}_m \\ \dot{\bar{p}}_b \\ \dot{\bar{p}}_t \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} (\mathbf{I}^{-1}) \begin{pmatrix} \bar{p} \\ \bar{\pi} \\ \bar{p}_m \\ \bar{p}_b \\ \bar{p}_t \end{pmatrix} \quad (2.42)$$

όπου:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{I}^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mathbf{J}^{-1} [\dot{\bar{r}}_m \times] & -\mathbf{J}^{-1} [\dot{\bar{r}}_b \times] & -\mathbf{J}^{-1} [\dot{\bar{r}}_t \times] \\ 0 & [\dot{\bar{r}}_m \times] \mathbf{J}^{-1} & \frac{d}{dt} \mathbf{I}^{-1}(3,3) & \frac{d}{dt} \mathbf{I}^{-1}(3,4) & \frac{d}{dt} \mathbf{I}^{-1}(3,5) \\ 0 & [\dot{\bar{r}}_b \times] \mathbf{J}^{-1} & \frac{d}{dt} \mathbf{I}^{-1}(4,3) & \frac{d}{dt} \mathbf{I}^{-1}(4,4) & \frac{d}{dt} \mathbf{I}^{-1}(4,5) \\ 0 & [\dot{\bar{r}}_t \times] \mathbf{J}^{-1} & \frac{d}{dt} \mathbf{I}^{-1}(5,3) & \frac{d}{dt} \mathbf{I}^{-1}(5,4) & \frac{d}{dt} \mathbf{I}^{-1}(5,5) \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

αφού $\frac{d}{dt} \mathbf{M}^{-1} = 0$, $\frac{d}{dt} \mathbf{J}^{-1} = 0$, και

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(3,3) &= -[\dot{\bar{r}}_m \times] \mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_m \times] - [\bar{r}_m \times] \mathbf{J}^{-1}[\dot{\bar{r}}_m \times] \\
\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(3,4) &= -[\dot{\bar{r}}_m \times] \mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_b \times] - [\bar{r}_m \times] \mathbf{J}^{-1}[\dot{\bar{r}}_b \times] \\
\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(3,5) &= -[\dot{\bar{r}}_b \times] \mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_t \times] - [\bar{r}_m \times] \mathbf{J}^{-1}[\dot{\bar{r}}_t \times] \\
\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(4,3) &= -[\dot{\bar{r}}_b \times] \mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_m \times] - [\bar{r}_b \times] \mathbf{J}^{-1}[\dot{\bar{r}}_m \times] \\
\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(4,4) &= -[\dot{\bar{r}}_b \times] \mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_b \times] - [\bar{r}_b \times] \mathbf{J}^{-1}[\dot{\bar{r}}_b \times] \\
\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(4,5) &= -[\dot{\bar{r}}_b \times] \mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_t \times] - [\bar{r}_b \times] \mathbf{J}^{-1}[\dot{\bar{r}}_t \times] \\
\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(5,3) &= -[\dot{\bar{r}}_t \times] \mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_m \times] - [\bar{r}_t \times] \mathbf{J}^{-1}[\dot{\bar{r}}_m \times] \\
\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(5,4) &= -[\dot{\bar{r}}_t \times] \mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_b \times] - [\bar{r}_t \times] \mathbf{J}^{-1}[\dot{\bar{r}}_b \times] \\
\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(5,5) &= -[\dot{\bar{r}}_t \times] \mathbf{J}^{-1}[\bar{r}_t \times] - [\bar{r}_t \times] \mathbf{J}^{-1}[\dot{\bar{r}}_t \times]
\end{aligned}$$

Οι όροι $\frac{d}{dt}\mathbf{I}^{-1}(i, j)$ είναι γενικά μικροί. Οι όροι $\dot{\bar{r}}_t$ και $\dot{\bar{r}}_b$ είναι μηδενικοί ενώ ο $\dot{\bar{r}}_m$ είναι μηδενικός στην κατάσταση ισορροπίας και πολύ μικρός κατά τη διάρκεια μεταβάσεων μεταξύ καταστάσεων ισορροπίας. Τα μεγέθη των στοιχείων των πινάκων \mathbf{J} είναι σχετικά μεγάλα συγκρινόμενα με τα στοιχεία των \bar{r}_t , \bar{r}_b και \bar{r}_m . Αυτοί οι όροι γίνονται σημαντικοί στην περίπτωση πολύ μεγάλων ή μικρών υδροπτέρων ή σε υδρόπτερα που διαθέτουν γρήγορους μηχανισμούς κίνησης των εσωτερικών μαζών.

Με αντικατάσταση στις εξισώσεις (2.42) των παραγώγων $\dot{\bar{p}}$, $\dot{\bar{\pi}}$, $\dot{\bar{p}}_m$, $\dot{\bar{p}}_b$ και $\dot{\bar{p}}_t$ από τις εξισώσεις (2.19) έως (2.23), τον όρο $d/dt(\mathbf{I}^{-1})$ από την εξίσωση (2.43) και τέλος τους όρους \bar{p} , $\bar{\pi}$, \bar{p}_m , \bar{p}_b και \bar{p}_t από τις εξισώσεις (2.37), οι ολοκληρωμένες εξισώσεις κίνησης του υποβρυχίου υδροπτέρου κινούμενου στις τρεις διαστάσεις γίνονται:

$$\begin{aligned}
\dot{\bar{E}} &= \mathbf{\Gamma}(\bar{E})\bar{\omega} \\
\dot{\bar{r}} &= \mathbf{R}^T(\bar{E})\bar{v} \\
\dot{\bar{\omega}} &= \mathbf{J}^{-1}\bar{T} \\
\dot{\bar{v}} &= \mathbf{M}^{-1}\bar{F} \\
\dot{\bar{r}}_m &= (1/m_m)\bar{p}_m - \bar{v} - \bar{\omega} \times \bar{r}_m \\
\dot{\bar{r}}_b &= (1/m_b)\bar{p}_b - \bar{v} - \bar{\omega} \times \bar{r}_b \\
\dot{\bar{r}}_t &= (1/m_t)\bar{p}_t - \bar{v} - \bar{\omega} \times \bar{r}_t \\
\dot{\bar{p}}_m &= \bar{p}_m \times \bar{\omega} + m_m g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{F}_{\text{int_movable}_k} \\
\dot{\bar{p}}_b &= \bar{p}_b \times \bar{\omega} + m_b g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{l=1}^L \bar{F}_{\text{int_ballast}_l} \\
\dot{\bar{p}}_t &= \bar{p}_t \times \bar{\omega} + m_t g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{n=1}^N \bar{F}_{\text{int_offset}_n} \\
\dot{m}_b &= b_{\text{ballast_rate}}
\end{aligned} \tag{2.44}$$

Όπου

$\dot{m}_b = b_{\text{ballast_rate}}$ η μεταβλητή ελέγχου $b_{\text{ballast_rate}}$,

$$\begin{aligned}
\bar{T} &= (\mathbf{J}\bar{\omega} + \bar{r}_m \times \bar{p}_m + \bar{r}_b \times \bar{p}_b + \bar{r}_t \times \bar{p}_t) \times \bar{\omega} + (\mathbf{M}\bar{v} \times \bar{v}) + (\bar{\omega} \times \bar{r}_m) \times \bar{p}_m + (\bar{\omega} \times \bar{r}_b) \times \bar{p}_b + (\bar{\omega} \times \bar{r}_t) \times \bar{p}_t \\
&+ (m_m [\bar{r}_m \times] + m_b [\bar{r}_b \times] + m_t [\bar{r}_t \times]) g\mathbf{R}\bar{k} + \bar{\tau}_{\text{ext}} - [\bar{r}_m \times] (\bar{p}_m \times \bar{\omega} + m_m g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{F}_{\text{int_movable}_k}) \\
&- \left\{ [\bar{r}_b \times] (\bar{p}_b \times \bar{\omega} + m_b g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{l=1}^L \bar{F}_{\text{int_ballast}_l}) + [\bar{r}_t \times] (\bar{p}_t \times \bar{\omega} + m_t g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{n=1}^N \bar{F}_{\text{int_offset}_n}) \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\bar{F} &= (\mathbf{M}\bar{v} + \bar{p}_m + \bar{p}_b + \bar{p}_t) \times \bar{\omega} + m_0 g\mathbf{R}\bar{k} + \bar{f}_{\text{ext}} - (\bar{p}_m \times \bar{\omega} + m_m g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{F}_{\text{int_movable}_k}) \\
&- \left\{ (\bar{p}_b \times \bar{\omega} + m_b g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{l=1}^L \bar{F}_{\text{int_ballast}_l}) + (\bar{p}_t \times \bar{\omega} + m_t g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{n=1}^N \bar{F}_{\text{int_offset}_n}) \right\}
\end{aligned}$$

και

$$\bar{f}_{\text{ext}} = \mathbf{R} \sum \bar{F}_{\text{ext}_i} \tag{2.45}$$

$$\bar{\tau}_{\text{ext}} = \mathbf{R} \sum (\bar{x}_i - \bar{r}) \times \bar{F}_{\text{ext}_i} + \mathbf{R} \sum \bar{T}_{\text{ext}_j} \tag{2.46}$$

όπου \bar{x}_i είναι το σημείο στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς όπου δρα η εξωτερική δύναμη \bar{F}_{ext} , η οποία αντιπροσωπεύει εξωτερικές δυνάμεις συμπεριλαμβανομένων των δυνάμεων άνωσης (lift), αντίστασης (drag) και τις αντίστοιχες υδροδυναμικές ροπές ως προς το σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Οι εκφράσεις \bar{T} και \bar{F} αντιπροσωπεύουν κατά αντιστοιχία αθροίσματα ροπών και δυνάμεων που δρουν στο σύστημα.

Η μοντελοποίηση του υδροπτέρου θα μπορούσε να γίνει επίσης με μία κινούμενη και επιπλέον μεταβλητή μάζα, ή με δύο κινούμενες μεταβλητές μάζες. Επίσης είναι δυνατό να μετατραπεί το μοντέλο σε ένα με μία κινούμενη δεξαμενή μεταβλητής μάζας και με αυθαίρετο αριθμό σημειακών μαζών.

Το μοντέλο με απλοποιημένη διάταξη εσωτερικών μαζών

Στην περίπτωση που οι εσωτερική μάζα m_i εξαλειφθεί από το μοντέλο ενώ η μεταβλητής μάζας m_b σταθεροποιηθεί στο κέντρο άντωσης CB, οι δυναμικές εξισώσεις του μοντέλου μπορούν να απλοποιηθούν θέτοντας $\bar{r}_b = \bar{r}_i = \dot{\bar{r}}_b = \dot{\bar{r}}_i = \dot{\bar{p}}_b = \dot{\bar{p}}_i = 0$ και $m_i = 0$. Στην περίπτωση αυτή δημιουργείται ένα απλοποιημένο μοντέλο υδροπτέρου με έλεγχο μεταβλητής μάζας στο οποίο η μοναδική μάζα αντιστάθμισης είναι η εσωτερική κινούμενη μάζα. Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις (2.44) του γενικότερου μοντέλου προκύπτουν οι εξισώσεις κίνησης για το απλοποιημένο μοντέλο του υδροπτέρου. Στην περίπτωση αυτή το διάνυσμα ελέγχου $\dot{\bar{p}}_m$ είναι η δύναμη πάνω στην εσωτερική κινούμενη μάζα m_m ενώ ο έλεγχος στη μεταβλητή μάζα γίνεται με τον ρυθμό άντλησης $b_{ballast_rate}$. Ας σημειωθεί ότι στο μητρώο μάζας \mathbf{M} δεν συμπεριλαμβάνεται η μεταβλητή μάζα m_b . Έτσι το δυναμικό μοντέλο με μία εσωτερική κινούμενη μάζα m_m και τη μεταβλητή m_b σταθερή στο κέντρο άντωσης CB θα γίνει:

$$\begin{aligned}
\dot{\bar{E}} &= \mathbf{\Gamma}(\bar{E})\bar{\omega} \\
\dot{\bar{r}} &= \mathbf{R}^T(\bar{E})\bar{v} \\
\dot{\bar{\omega}} &= \mathbf{J}^{-1}\bar{T} \\
\dot{\bar{v}} &= \mathbf{M}^{-1}\bar{F} \\
\dot{\bar{r}}_m &= (1/m_m)\bar{p}_m - \bar{v} - \bar{\omega} \times \bar{r}_m \\
\dot{\bar{p}}_m &= \bar{p}_m \times \bar{\omega} + m_m g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{F}_{\text{int_movable}_k} \\
\dot{m}_b &= b_{\text{ballast_rate}}
\end{aligned} \tag{2.47}$$

όπου \bar{T} και \bar{F} εκφράζουν τις ροπές και τις δυνάμεις στο μοντέλο με τις απλοποιημένες μάζες και είναι:

$$\bar{T} = (\mathbf{J}\bar{\omega} + \bar{r}_m \times \bar{p}_m) \times \bar{\omega} + (\mathbf{M}\bar{v} \times \bar{v}) + (\bar{\omega} \times \bar{r}_m) \times \bar{p}_m + m_m [\bar{r}_m \times] g\mathbf{R}\bar{k} + \bar{\tau}_{\text{ext}} - [\bar{r}_m \times] (\bar{p}_m \times \bar{\omega} + m_m g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{F}_{\text{int_movable}_k})$$

$$\bar{F} = (\mathbf{M}\bar{v} + \bar{p}_m) \times \bar{\omega} + m_0 g\mathbf{R}\bar{k} + \bar{f}_{\text{ext}} - (\bar{p}_m \times \bar{\omega} + m_m g(\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{F}_{\text{int_movable}_k})$$

με

$$\bar{f}_{\text{ext}} = \mathbf{R} \sum \bar{F}_{\text{ext}_i}$$

$$\bar{\tau}_{\text{ext}} = \mathbf{R} \sum (\bar{x}_i - \bar{r}) \times \bar{F}_{\text{ext}_i} + \mathbf{R} \sum \bar{T}_{\text{ext}_j}$$

Φυσική περιγραφή των όρων του μοντέλου

Κάποιοι όροι του μοντέλου εμφανίζονται επειδή ακριβώς οι δυναμικές εξισώσεις κίνησης εκφράζονται στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς. Τέτοιοι όροι είναι τα γινόμενα $\bar{p} \times \bar{\omega}$, $\bar{\pi} \times \bar{\omega}$ (στις εξισώσεις 2.21). Αν αμελήσουμε τις εσωτερικές σημειακές μάζες, θέσουμε τις εξωτερικές δυνάμεις και ροπές ίσες με μηδέν και θεωρήσουμε το υδρόπτερο στο κενό αντί για το ρευστό, τότε οι δύο πρώτες των εξισώσεων (2.21) μετατρέπονται στις εξισώσεις Euler ελεύθερου στερεού σώματος. Οι όροι $\mathbf{J}_h \bar{\omega} \times \bar{\omega}$ και $m_h \mathbb{I} \bar{v} \times \bar{\omega}$ που εμφανίζονται στις εκφράσεις των \bar{T} και \bar{F} των εξισώσεων (2.44) και (2.47) αντιπροσωπεύουν ροπές και δυνάμεις οι οποίες εμφανίζονται όταν μελετάται η δυναμική στερεού σώματος σε ένα περιστρεφόμενο μη αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Αυτοί οι όροι εμφανίζονται στο δυναμικό

μοντέλο όπου είναι καθιερωμένο να εκφράζονται οι εξισώσεις κίνησης του οχήματος στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Οι όροι που περιέχουν τα μητρώα \mathbf{M}_a , \mathbf{J}_a αντιπροσωπεύουν δυνάμεις και ροπές λόγω πρόσθετης μάζας και αδράνειας του οχήματος που κινείται μέσα σε μη συνεκτικό ρευστό. Τέτοιοι όροι είναι οι $\mathbf{J}_a \bar{\omega} \times \bar{\omega}$ και $\mathbf{M}_a \bar{v} \times \bar{v}$ οι οποίοι περιέχονται στις εξισώσεις του Kirchhoff για ένα στερεό σώμα σε μη συνεκτικό ρευστό αλλά και στην έκφραση της ροπής \bar{T} των εξισώσεων (2.44) και (2.47).

Οι δυναμικές εξισώσεις του υδροπτέρου περιέχουν όρους οι οποίοι αντιπροσωπεύουν δυνάμεις πάνω στις εσωτερικές σημειακές μάζες και τις αντίστοιχες δυνάμεις και ροπές πάνω στο όχημα. Οι όροι που αναφέρονται στην κάθε εσωτερική μάζα είναι παρεμφερείς. Αυτοί οι όροι εμφανίζονται σε ομάδες των τριών, αντιπροσωπεύοντας τον ίδιο φυσικό μηχανισμό που δρα σε κάθε μία από τις τρεις σημειακές μάζες. Έτσι η ερμηνεία των δυνάμεων πάνω στις κινούμενη μάζα m_m είναι κατάλληλη και για τις αντίστοιχες δυνάμεις πάνω στις υπόλοιπες σημειακές μάζες.

Ας θεωρήσουμε τους όρους που αντιπροσωπεύουν δυνάμεις εμφανιζόμενες στην έκφραση \bar{F} των εξισώσεων (2.44):

Ο όρος $\mathbf{M} \bar{v} \times \bar{\omega}$ ισούται με $m_h \mathbb{I} \bar{v} \times \bar{\omega} + \mathbf{M}_a \bar{v} \times \bar{\omega}$ (από τον ορισμό της μάζας \mathbf{M}), δηλαδή με το άθροισμα της αδρανειακής δύναμης πάνω στο όχημα στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς και των δυνάμεων λόγω πρόσθετης μάζας, λόγω της περιστροφής του σώματος μέσα στο ρευστό.

Ο όρος $\bar{p}_m \times \bar{\omega}$ είναι η αδρανειακή δύναμη από την κινούμενη εσωτερική μάζα στο περιστρεφόμενο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς

Ο όρος $m_0 g \mathbf{R} \bar{k}$ αντιπροσωπεύει την καθαρή άντωση πάνω στο όχημα, δηλαδή το άθροισμα των δυνάμεων βάρους και άντωσης.

Ο όρος $\bar{p}_m \times \bar{\omega} + m_m g (\mathbf{R} \bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{F}_{\text{int_movable}_k}$ είναι η δύναμη ελέγχου πάνω στην σημειακή μάζα m_m .

Τώρα θεωρούμε τις ροπές που εμφανίζονται στη έκφραση \bar{T} των εξισώσεων (2.44).

Το γινόμενο ($\mathbf{M}\bar{\omega} \times \bar{\omega}$) είναι η ροπή πάνω στο όχημα από την επίδραση της πρόσθετης μάζας. Αντικαθιστώντας το \mathbf{M} σύμφωνα με τον ορισμό παίρνουμε $m_h \mathbb{I}\bar{\omega} \times \bar{\omega} + \mathbf{M}_a \bar{\omega} \times \bar{\omega} = \mathbf{M}_a \bar{\omega} \times \bar{\omega}$. Αυτή η ροπή λόγω πρόσθετης μάζας γίνεται μηδενική όταν το μητρώο πρόσθετης μάζας \mathbf{M}_a είναι πολλαπλάσιο του \mathbf{I} (στην περίπτωση συμμετρικού οχήματος, για παράδειγμα σφαίρας ή κύβου) ή όταν το διάνυσμα της ταχύτητας ταυτίζεται με τον κύριο άξονα του \mathbf{M} .

Ο όρος $\mathbf{J}\bar{\omega} \times \bar{\omega}$ είναι η ροπή πάνω στο στερεό σώμα στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς συν τη ροπή λόγω πρόσθετης αδράνειας και περιστροφής του οχήματος. Αντικαθιστώντας από τον ορισμό του \mathbf{J} προκύπτουν δύο όροι, ο $\mathbf{J}_h \bar{\omega} \times \bar{\omega}$ που είναι η ροπή στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς λόγω της περιστροφής του στερεού σώματος και ο όρος $\mathbf{J}_a \bar{\omega} \times \bar{\omega}$ που είναι η ροπή που προκαλεί η πρόσθετη μάζα λόγω της περιστροφής του οχήματος μέσα στο ρευστό.

Ο όρος $m_m [\bar{r}_m \times] g \mathbf{R}\bar{k}$ αντιπροσωπεύει τη ροπή πάνω στο όχημα από το βάρος της κινούμενης μάζας στη θέση \bar{r}_m από το κέντρο του σωματοπαγούς συστήματος.

Ο όρος $[\bar{r}_m \times] (\bar{p}_m \times \bar{\omega} + m_m g (\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{F}_{\text{int_movable}_k})$ είναι μία ροπή πάνω στο σώμα από τη δύναμη που ασκείται πάνω στη σημειακή μάζα (εκτός της $m_m g$). Το σώμα του υδροπτερου και οι εσωτερικές μάζες είναι συζευγμένες. Οι δυνάμεις $(\bar{p}_m \times \bar{\omega} + m_m g (\mathbf{R}\bar{k}) + \mathbf{R} \sum_{k=1}^K \bar{F}_{\text{int_movable}_k})$ που ασκούνται πάνω στις εσωτερικές μάζες έχουν σαν αποτέλεσμα ίσες και αντίθετες δυνάμεις και αντίστοιχες ροπές πάνω στο σώμα.

Τα υδρόπτερα οδηγούνται μεταβάλλοντας την πλευστότητά τους. Έτσι, η καθαρή άντωση $m_0 g$ καθορίζει την τάξη μεγέθους των δυνάμεων που δρουν πάνω στο υδρόπτερο. Στην περίπτωση μιας σταθερής διαδρομής οι δυνάμεις λόγω άνωσης (lift) και αντίστασης (drag) είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την καθαρή άντωση. Το μέγεθος της άνωσης (lift) είναι μικρότερο από την καθαρή άντωση ενώ η αντίσταση (drag) είναι ίση ή μικρότερη από την άντωση, ανάλογα με την γωνία του ίχνους ολίσθησης. Στην περίπτωση που η γωνία είναι γύρω στις 45 degrees το μέγεθος των

δυνάμεων άνωσης (lift) και αντίστασης (drag) είναι το μισό της καθαρής άντωσης $m_0 g$.

Στην περίπτωση που η πορεία του υδροπτέρου είναι ευθεία και σταθερή, η γωνιακή ταχύτητα είναι μηδενική, έτσι πολλοί από τους παραπάνω όρους είναι μικροί. Τα υπάρχοντα υδρόπτερα πραγματοποιούν πορείες με μικρή γωνιακή ταχύτητα, έτσι αυτοί οι όροι ενδέχεται να είναι μικροί συγκρινόμενοι με τη δύναμη άντωσης. Σε αυτά τα υδρόπτερα ο σχεδιασμός του μηχανισμού κίνησης της εσωτερικής μάζας είναι τέτοιος ώστε η ταχύτητα \dot{r}_m να είναι γενικά μικρή (επίσης είναι μηδενική κατά την ισορροπία).

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

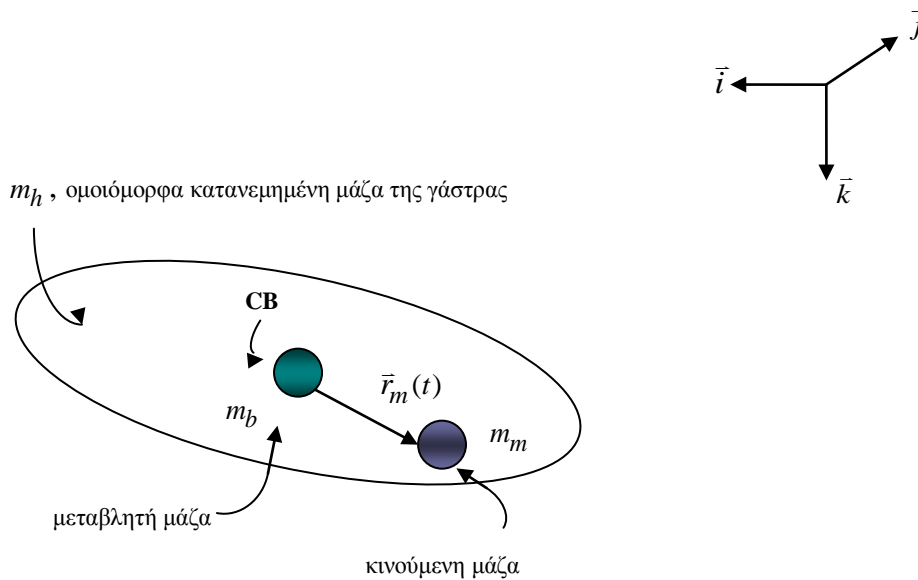
Οι εξισώσεις κίνησης που περιγράφουν την πορεία του υδροπτέρου στο κατακόρυφο επίπεδο μπορούν να εξαχθούν από το τρισδιάστατο μοντέλο. Η δυναμική ανάλυση ενός τέτοιου απλουστευμένου μοντέλου έχει άμεση εφαρμογή στα πραγματικά υδρόπτερα αφού οι περισσότερες αποστολές τους περιλαμβάνουν πολλές διαδρομές αποκλειστικά στο κατακόρυφο επίπεδο. Ειδικότερα τον περισσότερο χρόνο σε κατάσταση λειτουργίας πραγματοποιούν ευθείες διαδρομές λόγω της ικανότητας τους να ολισθαίνουν, της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια τέτοιων κινήσεων και της φύσης των αποστολών δειγματοληψίας που πραγματοποιούν.

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 προς τα πάνω και προς τα κάτω.

Το κατακόρυφο μοντέλο προκύπτει από το τρισδιάστατο μέσω περιορισμού και των εσωτερικών μαζών. Η αντισταθμιστική μάζα m_f καταργείται και ταυτόχρονα η μεταβλητή μάζα m_b τοποθετείται στο κεντροειδές του υδροπτέρου ώστε $\bar{r}_b = 0$. Έτσι η ροπή λόγω της μεταβλητής μάζας εκτός του κεντροειδούς δεν υπάρχει.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην προκειμένη περίπτωση επιδιώκει να διερευνήσει τα σημαντικότερα στοιχεία του δυναμικού μοντέλου αποφεύγοντας περαιτέρω πολυπλοκότητα. Έτσι η κινούμενη μάζα καθορίζει κυρίως τον

προσανατολισμό του υδροπτέρου ενώ η διάταξη μεταβλητής πλευστότητας την άντωση του. Η συνολική δυναμική της πορείας είναι παρόμοια με την περίπτωση που αναλύεται εδώ, ακόμα και όταν περιλαμβάνεται η αντισταθμιστική μάζα m_t και η μεταβλητή μάζα m_b τοποθετείται εκτός του κεντροειδούς του υδροπτέρου. Κάποιες μικρές διαφορές σημειώνονται, όπως η εξάρτηση της γωνίας πρόνευσης (pitch) από τη μεταβολή της πλευστότητας όταν ο μηχανισμός τοποθετείται εκτός κεντροειδούς. Όροι που αντιστοιχούν σε αυτές τις εσωτερικές μάζες εμφανίζονται στο συνολικό δυναμικό μοντέλο και μπορούν να συμπεριληφθούν εύκολα στην ανάλυση που ακολουθεί.



Σχήμα 2.8: Το μοντέλο του υδροπτέρου με απλοποιημένη διάταξη εσωτερικών μαζών.

Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο περιορίζεται στο $\bar{i} - \bar{k}$ αδρανειακό επίπεδο και στο $\bar{i}_b - \bar{k}_b$ σωματοπαγές επίπεδο.

$$\mathbf{R}^T = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$\bar{\mathbf{r}} = \begin{pmatrix} x \\ 0 \\ z \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{v}} = \begin{pmatrix} u \\ 0 \\ w \end{pmatrix}, \quad \bar{\boldsymbol{\omega}} = \begin{pmatrix} 0 \\ q \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{r}}_m = \begin{pmatrix} x_m \\ 0 \\ z_m \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{p}}_m = \begin{pmatrix} p_{mx} \\ 0 \\ p_{mz} \end{pmatrix}$$

όπου θ είναι η γωνία πρόνευσης (pitch).

Έτσι οι εξισώσεις κίνησης του υδροπτέρου περιορισμένες στο κατακόρυφο επίπεδο γίνονται:

$$\dot{x} = u \cos \theta + w \sin \theta \quad (2.48)$$

$$\dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta \quad (2.49)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (2.50)$$

$$\dot{q} = \frac{1}{J_2} [(m_3 - m_1)uw - (r_{mx}p_{mx} + r_{mz}p_{mz})q - m_m g (r_{mx} \cos \theta + r_{mz} \sin \theta) + M_{DL} - r_{mz}h_{mx} + r_{mx}h_{mz}] \quad (2.51)$$

$$\dot{u} = \frac{1}{m_1} (-m_3 w q - p_{mz} q - m_0 g \sin \theta + L \sin \alpha - D \cos \alpha - h_{mx}) \quad (2.52)$$

$$\dot{w} = \frac{1}{m_3} (m_1 u q + p_{mx} q + m_0 g \cos \theta - L \cos \alpha - D \sin \alpha - h_{mz}) \quad (2.53)$$

$$\dot{r}_{mx} = \frac{1}{m_m} p_{mx} - u - r_{mz} q \quad (2.54)$$

$$\dot{r}_{mz} = \frac{1}{m_m} p_{mz} - w + r_{mx} q \quad (2.55)$$

$$\dot{p}_{mx} = h_{mx} \quad (2.56)$$

$$\dot{p}_{mz} = h_{mz} \quad (2.57)$$

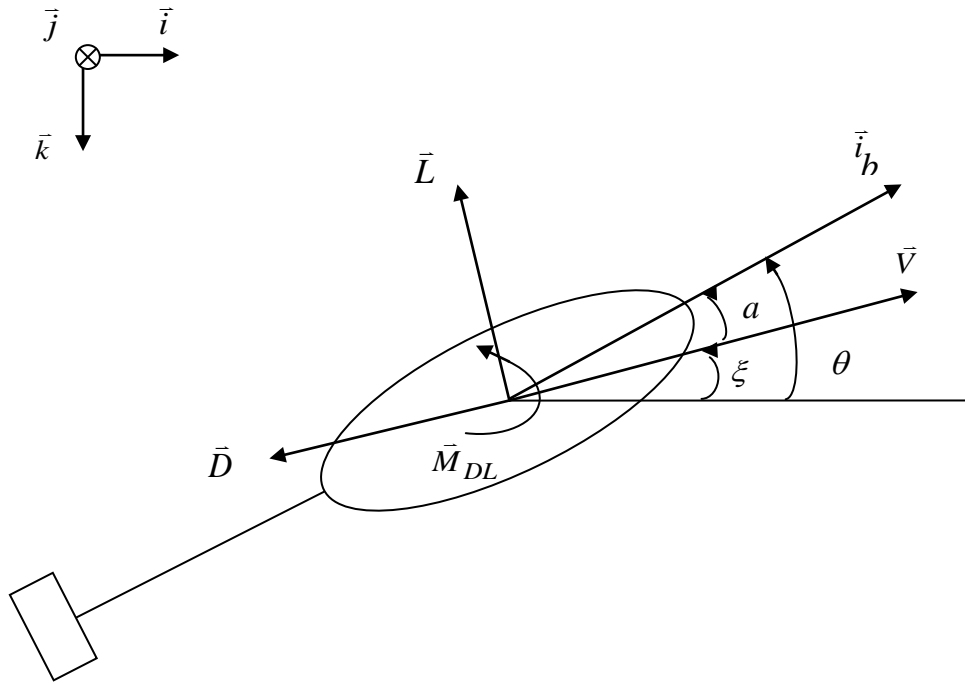
$$\dot{m}_b = b_{ballast_rate} \quad (2.58)$$

όπου

$$h_{mx} = -p_{mz} q - m_m g \sin \theta + \cos \theta F_{x_{int_m}} - \sin \theta F_{z_{int_m}} \quad (2.59)$$

$$h_{mz} = p_{mx} q + m_m g \cos \theta + \sin \theta F_{x_{int_m}} + \cos \theta F_{z_{int_m}} \quad (2.60)$$

Εδώ α είναι η γωνία προσβολής (angle of attack), D είναι η δύναμη αντίστασης (drag), L η δύναμη άνωσης (lift) και M_{DL} η ροπή λόγω συνεκτικών δυνάμεων (viscous moment), όπως φαίνονται στο σχήμα (2.9):



Σχήμα 2.9: Δυνάμεις και ροπή στο επίπεδο x-z.

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

Στη συνέχεια μπορεί να καθοριστεί μία επιθυμητή διαδρομή του υδροπτέρου (glide path) που θα καθορίζεται από την επιθυμητή γωνία ξ_d και την επιθυμητή ταχύτητα V_d .

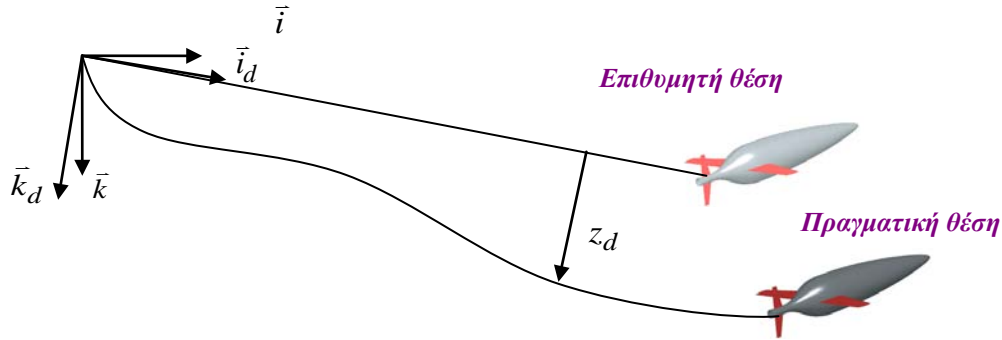
Ορίζονται αδρανειακές συντεταγμένες (x_d, z_d) τέτοιες ώστε x_d να είναι η θέση του οχήματος κατά μήκος της ζητούμενης διαδρομής:

$$\begin{pmatrix} x_d \\ z_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \xi_d & -\sin \xi_d \\ \sin \xi_d & \cos \xi_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \quad (2.61)$$

Το z_d θα μετράει τη θέση του οχήματος σε διεύθυνση κάθετη στην επιθυμητή διαδρομή.

$$\dot{z}_d = \sin \xi_d (u \cos \theta + w \sin \theta) + \cos \xi_d (-u \sin \theta + w \cos \theta) \quad (2.62)$$

Στόχος είναι η πορεία να πραγματοποιείται με $z_d = 0$, τον οποίο προσεγγίζουμε μέσω ελέγχου του οχήματος.



Σχήμα 2.10: Διαδρομή στις δύο διαστάσεις ελεγχόμενη πάνω σε μια γραμμή.

Στο πλήρες μοντέλο του υδροπτερόου η κινούμενη μάζα μπορεί να ελεγχθεί σε όλες τις διευθύνσεις, δηλαδή μιλάμε για δύο βαθμούς ελευθερίας στο δισδιάστατο μοντέλο. Παρόλα αυτά σε κάποιες περιπτώσεις ο έλεγχος μετακίνησης της μάζας γύρω από το κέντρο βάρους του οχήματος περιορίζεται, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση μπαταρίας η οποία κινείται μόνο σε μία κατεύθυνση. Έτσι στο δισδιάστατο μοντέλο μπορεί να έχουμε μία κινούμενη σημειακή μάζα με ένα μόνο βαθμό ελευθερίας. Αυτό ισχύει σε αρκετές περιπτώσεις υποβρυχίων υδροπτερόων. Τότε το r_{mz} θα είναι σταθερό και άρα $\dot{r}_{mz} = 0$, θεωρώντας ότι η μάζα m_m μπορεί να μετακινηθεί μόνο κατά το surge. Θα ισχύει:

$$p_{mz} = m_m(w - r_{mx}q) \quad (2.63)$$

Έτσι οι καινούργιες εξισώσεις για την περίπτωση αυτή προκύπτουν αντικαθιστώντας την ορμή κατά το heave από τη σχέση (2.63), ενώ η \dot{p}_{mz} πλέον προκύπτει διαφορίζοντας την (2.63):

$$\dot{x} = u \cos \theta + w \sin \theta \quad (2.64)$$

$$\dot{z} = -u \sin \theta + w \cos \theta \quad (2.65)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (2.66)$$

$$\dot{q} = \frac{1}{J_2} [(m_3 - m_1)uw - (r_{mx}p_{mx} + r_{mz}m_m(w - r_{mx}q))q - m_m g (r_{mx} \cos \theta + r_{mz} \sin \theta) + M_{DL} - r_{mz}h_{mx} + r_{mx}m_m(\dot{w} - \dot{r}_{mx}q - r_{mx}\dot{q})] \quad (2.67)$$

$$\dot{u} = \frac{1}{m_1} (-m_3 w q - m_m (w - r_{mx} q) q - m_0 g \sin \theta + L \sin \alpha - D \cos \alpha - h_{mx}) \quad (2.68)$$

$$\dot{w} = \frac{1}{m_3} (m_1 u q + p_{mx} q + m_0 g \cos \theta - L \cos \alpha - D \sin \alpha - m_m (\dot{w} - \dot{r}_{mx} q - r_{mx} \dot{q})) \quad (2.69)$$

$$\dot{r}_{mx} = \frac{1}{m_m} p_{mx} - u - r_{mz} q \quad (2.70)$$

$$\dot{p}_{mx} = h_{mx} \quad (2.71)$$

$$\dot{p}_{mz} = m_m (\dot{w} - \dot{r}_{mx} q - r_{mx} \dot{q})$$

$$\dot{m}_b = b_{ballast_rate} \quad (2.72)$$

όπου

$$h_{mx} = -m_m (w - r_{mx} q) q - m_m g \sin \theta + \cos \theta F_{xint_m} - \sin \theta F_{zint_m} \quad (2.73)$$

Ολισθήσεις σε κατάσταση ισορροπίας

Μπορεί να καθοριστεί μία συγκεκριμένη διαδρομή που επιθυμούμε να πραγματοποιήσει το υδρόπτερο, προσδιορίζοντας τη γωνία ξ_d και την ταχύτητα V_d . Αυτά τα μεγέθη μπορούν να προσδιοριστούν ώστε να καθορίζουν μία διαδρομή σε κατάσταση ισορροπίας.

Αν θέσουμε $\dot{z}_d = 0$, $\dot{q} = 0$, $\dot{u} = 0$, $\dot{w} = 0$, $\dot{r}_{mx} = 0$, $\dot{r}_{mz} = 0$ και $\dot{m}_b = 0$ θα προκύψει η ισορροπία για το δισδιάστατο μοντέλο. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι εξισώσεις του γενικού δισδιάστατου μοντέλου σε κατάσταση ισορροπίας και δεν περιορίζεται στην περίπτωση που το r_{mz} είναι σταθερό.

Η διερεύνηση των διαδρομών σε κατάσταση ισορροπίας και της σταθερότητάς τους συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας, κατά τη διάρκεια των αποστολών. Η συνήθης πριονωτή διαδρομή που εκτελούν τα υδρόπτερα μπορεί να αποτελείται από αναδύσεις και καταδύσεις σε κατάσταση ισορροπίας, κατά τη διάρκεια των οποίων η CPU μπορεί να μένει σε απραξία ενώ ανάμεσα σε δύο τέτοιες καταστάσεις να γίνεται ανατροφοδότηση παραμέτρων ώστε να πραγματοποιείται η μετάβαση από τη μία στην άλλη.

Στην κατάσταση ισορροπίας:

$$z_d = q_d = h_{mx_d} = h_{mz_d} = b_{ballast_rate} = 0 \quad (2.74)$$

και

$$\begin{aligned} m_{1_d} &= m_{b_d} + m_h + m_{a1}, \\ m_{3_d} &= m_{b_d} + m_h + m_{a3}, \\ m_{0_d} &= m_{b_d} + m_h + m_m - m \end{aligned} \quad (2.75)$$

οι οποίες μάζες όλες εξαρτώνται από την τιμή ισορροπίας της μεταβλητής μάζας m_{b_d} .

Οι εξισώσεις γίνονται:

$$\sin \xi_d (u_d \cos \theta_d + w_d \sin \theta_d) + \cos \xi_d (-u_d \sin \theta_d + w_d \cos \theta_d) = 0 \quad (2.76)$$

$$\frac{1}{J_2} \left[(m_{a3} - m_{a1}) u_d w_d - m_m g (r_{mx_d} \cos \theta_d + r_{mz_d} \sin \theta_d) + M_{DL} \right] = 0 \quad (2.77)$$

$$\frac{1}{m_{1_d}} (-m_{0_d} g \sin \theta_d + L_d \sin \alpha_d - D_d \cos \alpha_d) = 0 \quad (2.78)$$

$$\frac{1}{m_{3_d}} (m_{0_d} g \cos \theta_d - L_d \cos \alpha_d - D_d \sin \alpha_d) = 0 \quad (2.79)$$

$$P_{mx_d} = u_d m_m \quad (2.80)$$

$$P_{mz_d} = w_d m_m \quad (2.81)$$

Δεδομένου του ξ_d , οι εξισώσεις (2.78) και (2.79) μπορούν να λυθούν για την α_d ανεξάρτητα από την ταχύτητα V_d . Αυτό είναι δυνατό επειδή η γωνία ξ_d είναι συνάρτηση του λόγου άνωσης προς την αντίσταση lift/drag στην ισορροπία. Γενικά η σχέση άνωσης (lift) και αντίστασης (drag) ενός οχήματος είναι συνάρτηση της γεωμετρίας και δεν αλλάζει για κάποιο εύρος αριθμών Reynolds, δηλ μπορούμε να το θεωρήσουμε αμετάβλητο σε σχέση με την ταχύτητα V , δεδομένου ενός επιχειρησιακού εύρους ταχυτήτων για το όχημα. Δεδομένης της σχέσης άνωσης – αντίστασης (lift/drag polar) ο λόγος άνωσης προς την αντίσταση (lift/drag ratio) θα είναι συνάρτηση μόνο της γωνίας α .

Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε :

$$\theta_d = \xi_d + a_d, \quad u_d = V_d \cos a_d, \quad w_d = V_d \sin a_d$$

Το m_{b_d} μπορεί να καθοριστεί από τις εξισώσεις (2.78) και (2.79). Η εξίσωση (2.77) δίνει μία μονοπαραμετρική οικογένεια λύσεων για τα $(r_{mx_d}, r_{mz_d})^T$.

Στη συνέχεια θα διερευνηθούν οι καταστάσεις ισορροπίας και κάποιες ενδιαφέρουσες ιδιότητές τους. Η ταχύτητα V και η γωνία ξ που καθορίζει τη γωνία της διαδρομής του οχήματος μπορούν να επιλεγθούν ανεξάρτητα, μέσα στα πλαίσια κάποιων δυνατών τιμών για το m_0 και το \bar{r}_m . Συγκεκριμένη επιλογή των V και ξ οδηγούν σε οικογένεια λύσεων για το \bar{r}_m , δηλαδή σε συγκεκριμένες θέσεις της εσωτερικής κινούμενης μάζας. Η γωνία a επίσης καθορίζεται επιλύοντας τις εξισώσεις της ισορροπίας και ένα επιτρεπτό εύρος γωνιών ξ ώστε το όχημα να πραγματοποιεί πορεία σε κατάσταση ισορροπίας. Οι τιμές αυτές που αντιστοιχούν στην ξ , εξαρτώνται από τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Έτσι, για τη διερεύνηση των καταστάσεων ισορροπίας σε αυτή τη φάση θα χρησιμοποιηθεί ένα υδροδυναμικό μοντέλο εύχρηστο, χωρίς περιττή πολυπλοκότητα το οποίο αναπαριστά επαρκώς τις υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές πάνω στο σώμα. Σε επόμενο κεφάλαιο θα ακολουθήσει λεπτομερής σχεδιασμός και μελέτη του υδροδυναμικού μοντέλου με αποτελεσματικότερα εργαλεία και καθορισμός των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών με υπολογιστική ρευστομηχανική.

Υιοθετείται ημιστατικό υδροδυναμικό μοντέλο το οποίο θεωρεί ότι η δύναμη άνωσης (lift) είναι ανάλογη της γωνίας προσβολής a και η δύναμη αντίστασης (drag) ανάλογη του τετραγώνου της [31]. [51]. Το μοντέλο αυτό είναι επαρκές για μικρές γωνίες προσβολής των 10 degrees, ή και μικρότερες. Με αυτό μπορούμε να προσδιορίσουμε μια περιοχή τιμών στην οποία θα πρέπει να ανήκει η γωνία ξ_d ώστε να πραγματοποιήσει πορεία σε κατάσταση ισορροπίας. Η λύση αυτή εξαρτάται από υδροδυναμικούς συντελεστές. Η ημιστατική προσέγγιση που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των δυνάμεων είναι η εξής:

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D(a) AV^2 \approx (K_{D_0} + K_D a^2)(u^2 + w^2) \quad (2.82)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L(a) AV^2 \approx (K_{L_0} + K_L a)(u^2 + w^2) \quad (2.83)$$

$$M_{DL} = \frac{1}{2} \rho C_M(a) AV^2 \approx (K_{M_0} + K_M a)(u^2 + w^2) + K_1 q + K_2 q \quad (2.84)$$

Αποτελεί ένα καθιερωμένο μοντέλο το οποίο έχει εξαχθεί χρησιμοποιώντας θεωρία αεροτομών και υπολογισμούς δυναμικής ροής και είναι ελεγμένο με πειραματικά αποτελέσματα. Ας σημειωθεί ότι αυτές οι δυνάμεις και ροπές είναι εκφρασμένες ως προς το κέντρο του συστήματος αναφοράς του ρευστού, που είναι ταυτόχρονα και το κέντρο αναφοράς του σωματοπαγούς συστήματος.

Στην ανάλυση για το δισδιάστατο μοντέλο οι υδροδυναμικές δυνάμεις μοντελοποιούνται όπως παραπάνω. C_D , C_L , C_M είναι οι συντελεστές αντίστασης, άνωσης και ροπής ως προς την επιφάνεια A , τη μέγιστη επιφάνεια διατομής του υδροπτέρου και ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού. Η ποσότητα $\frac{1}{2} \rho V^2$ είναι η δυναμική πίεση. Θεωρώντας το δισδιάστατο ημιστατικό μοντέλο ρευστού, θεωρούμε ότι τα C_D , C_L , C_M είναι συναρτήσεις του α και K είναι σταθεροί συντελεστές.

Αρχικά υπολογίζεται η γωνία a_d από τις εξισώσεις (2.78), (2.79). Αυτές γίνονται:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \cos \theta_d \cos a_d + \sin \theta_d \sin a_d & -\cos \theta_d \sin a_d + \sin \theta_d \cos a_d \\ -\sin \theta_d \cos a_d + \cos \theta_d \sin a_d & \sin \theta_d \sin a_d + \cos \theta_d \cos a_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D \\ L \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ m_0 g \end{pmatrix} \Rightarrow \\ \begin{pmatrix} \cos \xi_d & \sin \xi_d \\ -\sin \xi_d & \cos \xi_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D \\ L \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ m_0 g \end{pmatrix} \Rightarrow \\ \begin{pmatrix} \cos \xi_d & \sin \xi_d \\ -\sin \xi_d & \cos \xi_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_{D_0} + K_D a_d^2 \\ K_{L_0} + K_L a_d \end{pmatrix} V_d^2 &= \begin{pmatrix} 0 \\ m_0 g \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.85)$$

Προκύπτει τριώνυμο ως προς a_d εξασφαλίζοντας $V_d \neq 0$ και $\xi_d \neq \pm \frac{\pi}{2}$:

$$a_d^2 + \frac{K_L}{K_D} \tan \xi_d a_d + \frac{1}{K_D} (K_{D_0} + K_{L_0} \tan \xi_d) = 0 \quad (2.86)$$

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

$$\left(\frac{K_L}{K_D} \tan \xi_d \right)^2 - \frac{4}{K_D} (K_{D_0} + K_{L_0} \tan \xi_d) \geq 0 \quad (2.87)$$

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

$$\xi_d \in \left[\tan^{-1} \left(2 \frac{K_D}{K_L} \left(\frac{K_{L_0}}{K_L} + \sqrt{\left(\frac{K_{L_0}}{K_L}\right)^2 + \frac{K_{D_0}}{K_D}} \right) \right), \frac{\pi}{2} \right] \quad (2.88)$$

ή

$$\xi_d \in \left[-\frac{\pi}{2}, \tan^{-1} \left(2 \frac{K_D}{K_L} \left(\frac{K_{L_0}}{K_L} - \sqrt{\left(\frac{K_{L_0}}{K_L}\right)^2 + \frac{K_{D_0}}{K_D}} \right) \right) \right] \quad (2.89)$$

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 a_d . Επιλέγεται η λύση με το μικρότερο μέγεθος, λόγω του ότι η μικρότερη γωνία δίνει μικρότερη αντίσταση (drag) από ότι η μεγαλύτερη. Επιπλέον το υδροδυναμικό μοντέλο αναμένεται να είναι ακριβέστερο για μικρότερες γωνίες προσβολής. Υπολογίζεται:

$$a_d = \frac{1}{2} \frac{K_L}{K_D} \tan \xi_d \left(\sqrt{1 - 4 \frac{K_D}{K_L^2} \cot \xi_d (K_{D_0} \cot \xi_d + K_{L_0})} - 1 \right) \quad (2.90)$$

Στην περίπτωση που $\xi_d = \pm \frac{\pi}{2}$ τότε $a_d = -\frac{K_{L_0}}{K_L}$. Στην περίπτωση που το όχημα είναι συμμετρικό ως προς το $\bar{i}_b - \bar{j}_b$ επίπεδο, τότε $K_{L_0} = 0$. Σε αυτήν 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.

Η ζητούμενη τιμή της μεταβλητής μάζας για την σταθερή διαδρομή θα προκύψει σαν λύση από τις εξισώσεις (2.85).

$$m_{b_d} = (m - m_h - m_m) + \frac{1}{g} \left(-\sin \xi_d (K_{D_o} + K_D a_d^2) + \cos \xi_d (K_{L_o} + K_L a_d) \right) V_d^2 \quad (2.91)$$

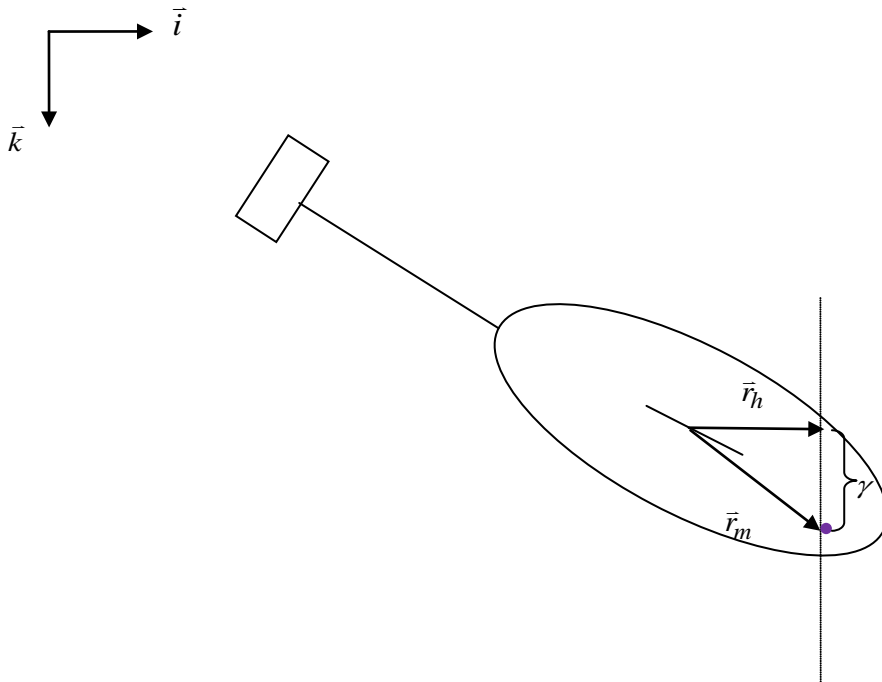
Η οικογένεια λύσεων $(r_{m_x_d}, r_{m_z_d})^T$ που θα προσδιορίζει τη θέση της κινούμενης μάζας προκύπτει από την εξίσωση (2.77).

$$\bar{r}_{m_d} = \bar{r}_h + \gamma \begin{pmatrix} -\sin \theta_d \\ \cos \theta_d \end{pmatrix} \quad (2.92)$$

όπου

$$\bar{r}_h = \frac{1}{m_m g} \left((m_{a_3} - m_{a_1}) u_d w_d + (K_{M_o} + K_M a_d) V_d^2 \right) \begin{pmatrix} \cos \theta_d \\ \sin \theta_d \end{pmatrix} \quad (2.93)$$

και γ ένας πραγματικός αριθμός. Το διάνυσμα \bar{r}_h είναι μια ιδιαίτερη λύση και είναι ορθογώνιο στη διεύθυνση της βαρύτητας, όπου ο όρος $(-\sin \theta, \cos \theta)^T = (R\bar{k})$ είναι η διεύθυνση της βαρύτητας σε σωματοπαγείς συντεταγμένες. Η φυσική σημασία αυτών των διανυσμάτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.11: Δυνατές θέσεις της κινούμενης μάζας για μία σταθερή διαδρομή.

Η σταθερότητα μιας διαδρομής κατά την πρόνευση (pitch) διασφαλίζεται από τη διάταξη των εσωτερικών μαζών και την απόσταση μεταξύ CB και CG. Η απόσταση αυτή εκφράζεται μέσω του γ (σχήμα 2.11).

Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως η επιλογή για τον σχεδιασμό του οχήματος της παραμέτρου r_{mz_d} είναι καλύτερη από τη γ . Σε πολλά υπαρκτά υδρόπτερα το r_{mz_d} είναι επιπλέον σταθερό, οπότε δεδομένης της τιμής της παραμέτρου r_{mx_d} και $\theta_d \neq \pm \frac{\pi}{2}$:

$$r_{mx_d} = -r_{mz_d} \tan \theta_d + \frac{1}{m_m g \cos \theta_d} \left((m_{a3} - m_{a1}) u_d w_d + (K_{Mo} + K_M a_d) V_d^2 \right) \quad (2.94)$$

Αν $\theta_d = \pm \frac{\pi}{2}$ τότε υπάρχει ισορροπία αν και μόνο αν η τιμή της παραμέτρου r_{mz_d} ικανοποιεί την:

$$r_{mz_d} = \frac{1}{m_m g \cos \theta_d} \left((m_{a3} - m_{a1}) u_d w_d + (K_{Mo} + K_M a_d) V_d^2 \right) \quad (2.95)$$

Αν η παραπάνω σχέση ικανοποιείται, η r_{mx_d} είναι ελεύθερη παράμετρος και η επιλογή της θα επηρεάζει το γ του οχήματος και την σταθερότητα της πορείας. Για όχημα συμμετρικό ως προς το $\bar{i}_b - \bar{j}_b$ σωματοπαγές επίπεδο, $\theta_d = \pm \frac{\pi}{2}$ συνεπάγεται ότι $K_{Mo} = 0$ και $a_d = 0$. Σε αυτή την περίπτωση η τελευταία συνθήκη (2.95) απαιτεί $r_{mz_d} = 0$.

Το φυγοειδές μοντέλο

Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστεί το απλοποιημένο δυναμικό μοντέλο της φυγοειδούς κίνησης του υδροπτέρου. Παρουσιάζεται η αντίστοιχη κίνηση με αυτή των αεροπλάνων εφαρμόζοντας τις υποθέσεις του Lanchester [27]. Η κίνηση αυτή είναι μία μακράς περιόδου ταλαντωτική κίνηση όπου το αεροπλάνο διαδοχικά κατεβαίνει και στη συνέχεια ανεβαίνει διατηρώντας σταθερή γωνία προσβολής. Το φυγοειδές μοντέλο συνίσταται σε τέσσερις εξισώσεις οι οποίες καθορίζουν τη θέση του, τον προσανατολισμό του και την ταχύτητά του. Οι διαδρομές που έχει σα λύση

το δυναμικό αυτό μοντέλο του υδροπτέρου είναι ποιοτικά όμοιες με αυτές των αεροπλάνων και των υποβρυχίων υδροπτέρων.

Το φυγοειδές μοντέλο προκύπτει απλοποιώντας το δισδιάστατο μοντέλο εξισώσεων κίνησης του υδροπτέρου. Εφαρμόζονται σε αυτό οι υποθέσεις που έκανε ο Lanchester στο αντίστοιχο δισδιάστατο μοντέλο στην περίπτωση αεροπλάνων. Αυτές είναι:

- Η δύναμη αντίστασης (drag) αντισταθμίζεται από μία ίση και αντίθετη ώση (thrust) (ή εναλλακτικά οι δυνάμεις αντίστασης και ώσης είναι και οι δύο μηδενικές).
- Η ροπή αδράνειας J είναι πολύ μικρή ή αντίστοιχα η ροπή πρόνευσης (pitching moment) M_{DL} είναι πολύ μεγαλύτερη από την J . Η ροπή M_{DL} θεωρείται ότι σταθεροποιεί το σώμα προς μία γωνία α , έτσι αυτό θα ισορροπήσει γρήγορα σε μία σταθερή γωνία α στην οποία η ροπή M_{DL} θα είναι μηδενική.
- Η γωνία προσβολής α είναι σταθερή. Έτσι και η διαφορά $\theta - \xi = \alpha$ θα είναι σταθερή.

1^η περίπτωση: $\alpha=0$ (ολοκληρώσιμες εξισώσεις, συντηρητικό σύστημα)

Οι εξισώσεις κίνησης γίνονται:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V \cos \theta \\ \dot{z} &= -V \sin \theta \\ \dot{V} &= \frac{1}{m_1} (-m_0 g \sin \theta) \\ \dot{\theta} &= \frac{1}{m_1 V} (L - m_0 g \cos \theta)\end{aligned}$$

όπου

m_1 : η κατά την surge διεύθυνση συνολική μάζα του σώματος (μάζα συν πρόσθετη μάζα)

m_0 : είναι η φαινόμενη μάζα του υδροπτέρου στο νερό που ισούται με τη μάζα του υδροπτέρου στον αέρα αφαιρούμενης της μάζας του εκτοπιζόμενου ρευστού

Το σύστημα ισορροπεί για $\theta=0$ και

$$V = V_L = \left(\frac{2m_0 g}{r C_L A_r} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Επίσης έχει δύο διατηρούμενες ποσότητες, την συνολική ενέργεια του συστήματος και την ποσότητα που εκφράζεται από τη συνάρτηση A .

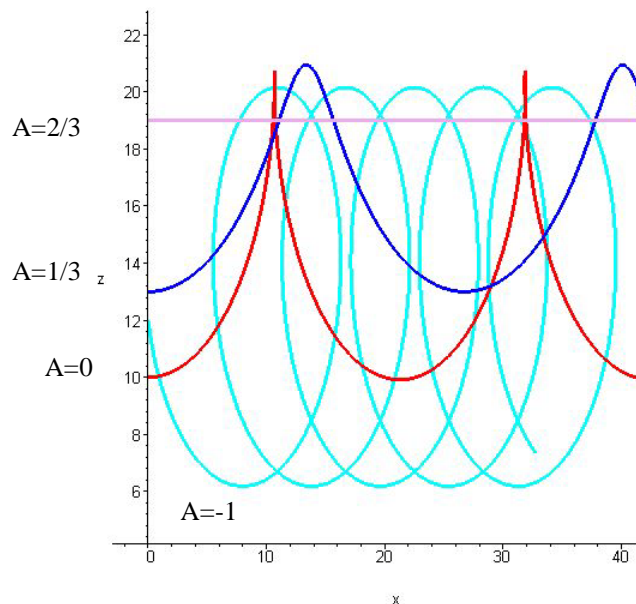
$$A = \frac{V}{V_L} \cos \theta - \frac{1}{3} \left(\frac{V}{V_L} \right)^3$$

$$E = \frac{1}{2} m_1 V^2 - m_0 g z$$

Η διατήρηση της ενέργειας δίνει:

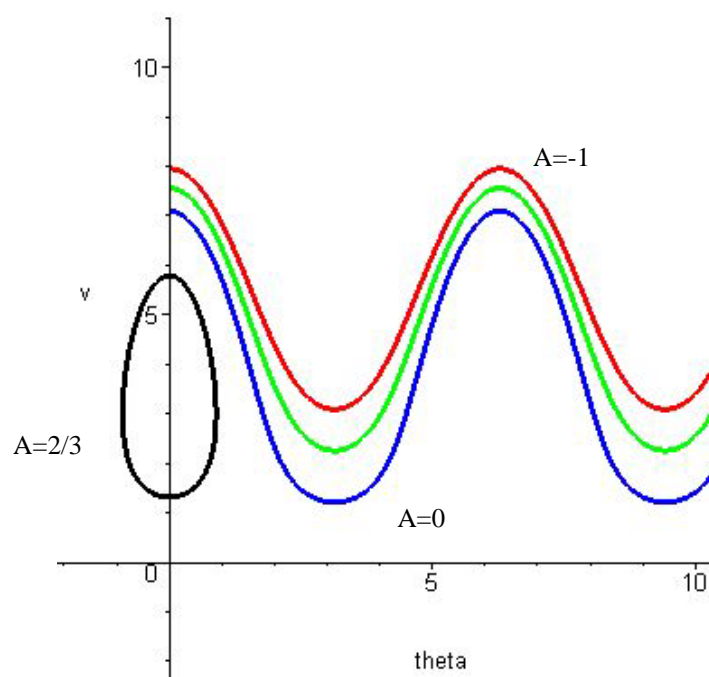
$$V^2 = 2 \frac{m_0}{m_1} g z + C$$

Αν επιλέξουμε το $C=0$ τότε το $z=0$ γίνεται το μέγιστο ύψος διαδρομής.. Έτσι προκύπτουν οι διαδρομές με την ίδια ενέργεια $E=0$ (η δύναμη άνωσης είναι συνεχώς κάθετη στο άνυσμα της ταχύτητας και έτσι δεν επιδρά καθόλου). Άλλες δυνάμεις δεν υπάρχουν σε αυτή την περίπτωση ($\alpha=0$).



Σχήμα 2.12: Τροχιές που προκύπτουν από το φυγοειδές μοντέλο, $\alpha = 0$.

Στο σχήμα 2.12 φαίνονται οι διάφορες διαδρομές για τέσσερις διαφορετικές αρχικές συνθήκες που αντιστοιχούν στην ίδια ενέργεια και διαφορετικές τιμές του A . Το τι μορφή θα έχει η πορεία του οχήματος εξαρτάται από την A . Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται για αρχικές συνθήκες $\theta=0$ και διάφορες τιμές του $A=2/3, 1/3, 0, -1$. Η τιμή $A=2/3$ αντιστοιχεί στην ισορροπία και είναι το μέγιστο A που αντιστοιχεί σε φυσική λύση του προβλήματος. Για $0 < A < \frac{2}{3}$ η πορεία είναι κυματοειδής γύρω από την οριζόντια τροχιά.



Σχήμα 2.13: Φασικό επίπεδο για το φυγοειδές μοντέλο, $\alpha = 0$.

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει τις αντίστοιχες τροχιές στο φασικό επίπεδο. Τέτοια συστήματα χαρακτηρίζονται από την ανταλλαγή δυναμικής και κινητικής ενέργειας όταν το glider πέφτει και επιταχύνεται ή ανεβαίνει και επιβραδύνεται.

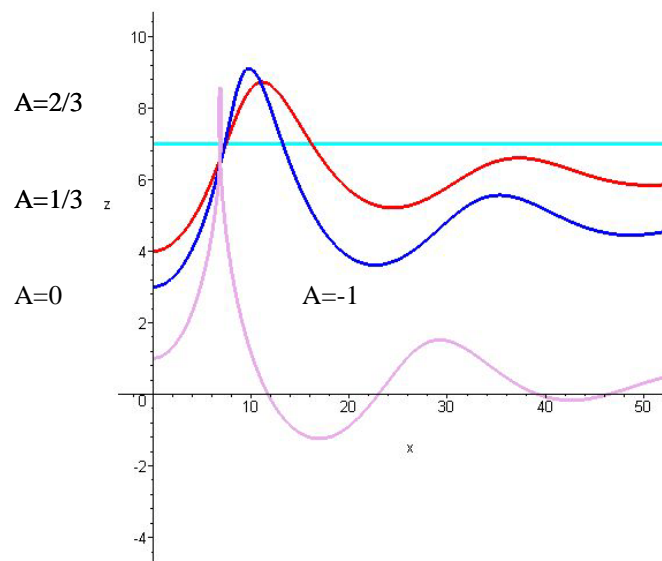
2^η περίπτωση: $\alpha \neq 0$ (μη ολοκληρώσιμες εξισώσεις, μη συντηρητικό σύστημα)

Αντίστοιχη διερεύνηση γίνεται για την περίπτωση όπου $\alpha \neq 0$, οπότε οι εξισώσεις κίνησης θα γίνουν:

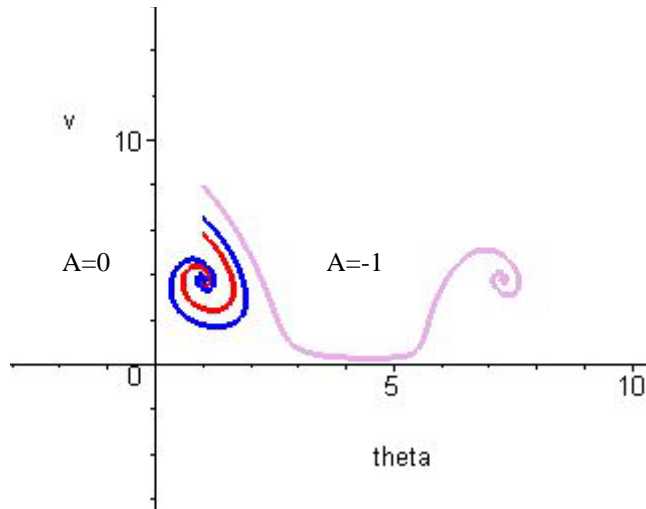
$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos(\theta - a) \\ \dot{z} &= -V \sin(\theta - a) \\ \dot{V} &= \frac{1}{m_1 \cos a} (m_3 V \dot{\theta} \sin a - m_0 g \sin \theta + L \sin a) \\ \dot{\theta} &= \frac{-m_0 g \left(\frac{1}{m_1} \tan a \sin \theta + \frac{1}{m_3} \cos \theta \right) + L \left(\frac{1}{m_1} \tan a \sin a + \frac{1}{m_3} \cos a \right)}{V \left(\frac{m_1}{m_3} \cos a + \frac{m_3}{m_1} \tan a \sin a \right)} \end{aligned}$$

Το σύστημα ισορροπεί για $\theta = a$, $V = V_L$. Η ισορροπία αυτή αντιστοιχεί στην επίπεδη τροχιά. Οι ποσότητες A και E δεν διατηρούνται σε αυτή την περίπτωση.

$$\begin{aligned} A &= \frac{V}{V_L} \cos \theta - \frac{1}{3} \left(\frac{V}{V_L} \right)^3 \\ E &= \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_3 v_3^2 - m_0 g z \end{aligned}$$



Σχήμα 2.14: Τροχιές που προκύπτουν από το φυγοειδές μοντέλο για $\alpha = 1$.



Σχήμα 2.15: Φασικό διάγραμμα για $\alpha = 1$.

Στα παραπάνω σχήματα φαίνονται οι διαδρομές του υδροπτέρου και τα αντίστοιχα φασικά διαγράμματα, στην περίπτωση που $\alpha = 1 \text{ deg}$.

ΚΙΝΗΣΗ ΣΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Στην περίπτωση που εξετάζουμε την κίνηση του σώματος στο χώρο, μας ενδιαφέρουν τρία είδη σταθερών διαδρομών.

1. Ευθείες σταθερές ολισθήσεις με μηδενική πλαγιολίσθηση (sideslip) $\beta = 0$
2. Ευθείες σταθερές ολισθήσεις με μη μηδενική γωνία sideslip $\beta \neq 0$
3. Σπειροειδείς σταθερές ολισθήσεις

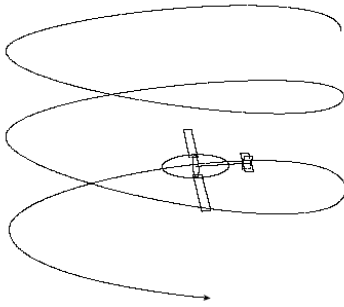
Η γωνία β ορίζεται σαν αυτή που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας με το κατακόρυφο επίπεδο.

Όπως πάντα τέτοιες καταστάσεις ισορροπίας και η σταθερότητα τους εξαρτώνται από την υδροδυναμική του glider και την εσωτερική διάταξη των μαζών του.

Οι ευθείες διαδρομές που μελετήθηκαν στο δισδιάστατο διάμηκες επίπεδο αποτελούν καταστάσεις ισορροπίας και στο τρισδιάστατο μοντέλο εξισώσεων. Όσον αφορά ευθείες ολισθήσεις με κάποια μικρή γωνία β είναι παρόμοιες με αυτές που παρουσιάστηκαν στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου.

Η πριονωτή κίνηση των υποβρυχίων υδροπτέρων αποτελεί τον κύριο τρόπο μετακίνησης αυτών των οχημάτων. Για τον λόγο αυτό σημαντικότερη θεωρείται η μελέτη των ευθέων σταθερών διαδρομών καθώς και των μεταβάσεων μεταξύ σταθερών αναδύσεων και καταδύσεων. Σε αυτό το θέμα θα γίνει αναφορά στη συνέχεια στο κεφάλαιο 4. Λιγότερο συχνή αλλά δυνατή είναι η σπειροειδής κίνηση. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε περιληπτικά στο πως προκύπτει αυτού του είδους η κίνηση από το αναλυτικό τρισδιάστατο μοντέλο.

Σπειροειδείς ολισθήσεις



Ολισθήσεις σε κατάσταση ισορροπίας θα προκύψουν από το τρισδιάστατο δυναμικό μοντέλο θέτοντας στις εξισώσεις $\dot{\bar{\omega}} = \dot{\bar{v}} = \dot{\bar{r}}_m = \dot{\bar{p}}_m = \dot{m}_b = 0$.

Σε μία σπειροειδή διαδρομή σε κατάσταση ισορροπίας $\bar{\omega} = R\bar{k}r$, όπου $\bar{k}r$ είναι η γωνιακή ταχύτητα στο αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Αν αντικαταστήσουμε τις παραπάνω συνθήκες στο τρισδιάστατο μοντέλο θα προκύψει $\bar{T} = 0$ και $\bar{F} = 0$, δηλαδή μηδενίζονται οι ροπές και οι δυνάμεις. Έτσι:

$$0 = \mathbf{J}\bar{\omega} \times \bar{\omega} + (\mathbf{M}\bar{v} \times \bar{v}) - \bar{r}_m \times [m_m(\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_m) \times \bar{\omega}] + m_m [\bar{r}_m \times] g \mathbf{R}\bar{k} + \bar{\tau}_{ext} \quad (2.96)$$

$$0 = [(\mathbf{M} + m_b I)\bar{v} + m_m(\bar{v} + \bar{\omega} \times \bar{r}_m)] \times \bar{\omega} + m_0 g \mathbf{R}\bar{k} + \bar{f}_{ext} \quad (2.97)$$

όπου $\bar{\omega} = R\bar{k}r$

Η σπειροειδής διαδρομή σε κατάσταση ισορροπίας θα προκύψει σε λύση των παραπάνω εξισώσεων αριθμητικά για δεδομένα \bar{r}_m και m_b . Μία μέθοδος για να προκύψει η λύση της σπειροειδούς διαδρομής είναι να γίνει η επιλογή των προηγούμενων μεγεθών προσδιορίζοντάς τα από τις εξισώσεις ισορροπίας του

δισδιάστατου μοντέλου, και στη συνέχεια εισάγοντας έναν παράγοντα Δr_{my} να προκύψει αριθμητικά η ισορροπία στις τρεις διαστάσεις.

Σημαντική είναι η ευστάθεια αυτών των σπειροειδών σταθερών κινήσεων. Αυτή μπορεί να εξεταστεί μέσω της διαδικασίας γραμμικοποίησης ως προς τις σταθερές αυτές διαδρομές. Οι εξισώσεις ισορροπίας δε δίνουν μοναδική λύση. Πολλές κινήσεις σε κατάσταση ισορροπίας είναι δυνατές σαν λύσεις των εξισώσεων και θα πρέπει να μελετηθούν αυτές και η ευστάθειά τους. Ο αριθμός των καταστάσεων ισορροπίας αλλά και η σταθερότητά τους είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες όσον αφορά τον έλεγχο και την πλοήγηση του οχήματος ειδικότερα κατά τις μεταβάσεις μεταξύ σταθερών διαδρομών.

Τέλος κατά την εκτίμηση των καταστάσεων ισορροπίας θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας ότι η επιλογή του συγκεκριμένου υδροδυναμικού μοντέλου επιβάλλει περιορισμούς που περιορίζουν και τις λύσεις. Υπενθυμίζεται ότι το ημιστατικό αυτό μοντέλο ισχύει για σχετική ροή σε μικρές γωνίες προσβολής και πλαγιολίσθησης.

3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ – ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Η όσο το δυνατόν ακριβέστερη πλοήγηση του υποβρυχίου απαιτεί την πρόβλεψη της υδροδυναμικής του συμπεριφοράς. Μεγάλης σημασίας είναι ο σχεδιασμός του σχήματος του υδροπτερού έτσι ώστε τα υδροδυναμικά του χαρακτηριστικά να συμβάλουν στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια των αποστολών. Επιπλέον για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός των υδροδυναμικών του παραμέτρων και των δυνάμεων που δρουν πάνω σε αυτό.

Αρχικά στο κεφάλαιο αυτό διερευνώνται τα χαρακτηριστικά διαφορών εκ περιστροφής συμμετρικών σχημάτων. Η επιλογή της καταλληλότερης γεωμετρίας για τον περαιτέρω σχεδιασμό του οχήματος γίνεται με κριτήρια την ελαχιστοποίηση της επαγόμενης αντίστασης αλλά και τις ευρύτερες ανάγκες του καταγραφικού οχήματος για την επιτυχία των αποστολών που θα πραγματοποιήσει.

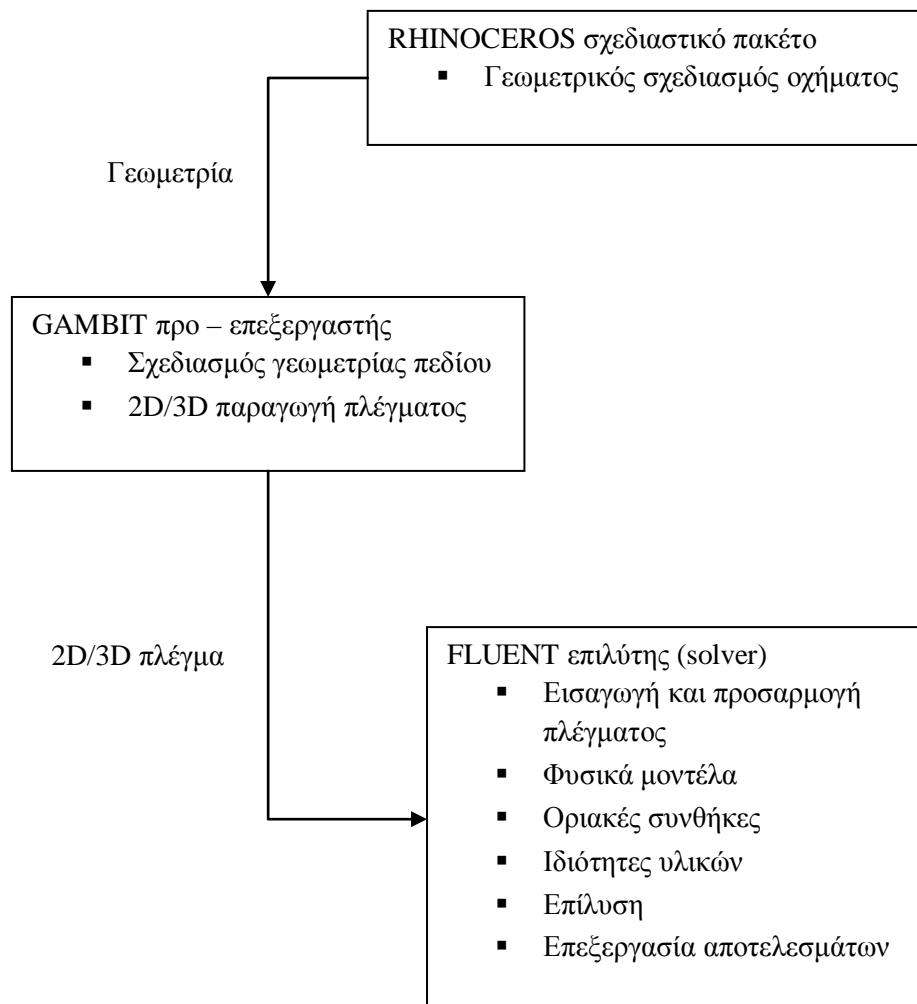
Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού, γίνεται η δισδιάστατη υδροδυναμική μελέτη του υδροπτερού με δύο μεθόδους. Αφ' ενός μεν με χρήση του κώδικα DREVOL που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής [81] και αφ' ετέρου με χρήση του λογισμικού πακέτου FLUENT [29]. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται και ο σχεδιασμός του περιβλήματος ολοκληρώνεται με την προσθήκη πτερυγίων.

Η διερεύνηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του υδροπτερού, επεκτείνεται στη συνέχεια στον τρισδιάστατο χώρο με χρήση του υπολογιστικού προγράμματος FLUENT. Εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις, όπως η ανάδυση και η κατάδυση του οχήματος θεωρώντας μόνιμη ροή. Η τύρβη μοντελοποιείται με το shear-stress transport (SST) k- ω μοντέλο δύο εξισώσεων μεταφοράς καθώς και το περίπλοκο Reynolds stress (RSM) μοντέλο τύρβης. Τέλος δε επιλύεται το πεδίο ροής γύρω από το υδροπτερό κατά τη διάρκεια διαδοχικών καταδύσεων και αναδύσεων θεωρώντας μη μόνιμη ροή.

ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ FLUENT – Ο ΕΠΙΛΥΤΗΣ (SOLVER) FLUENT ΚΑΙ Ο ΠΡΟ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗΣ GAMBIT

Το Fluent είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα για τη μοντελοποίηση ροών και μεταφοράς θερμότητας σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Χρησιμοποιήθηκε ο επιλύτης Fluent που αναφέρεται σε προβλήματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής μαζί με τον προ - επεξεργαστή Gambit. Ο τελευταίος 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.

Αυτά τα εργαλεία χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του προβλήματος σύμφωνα με την οργανωτική δομή του παρακάτω σχήματος και με τη χρήση του σχεδιαστικού πακέτου Rhinoceros.



Σχήμα 3.1: Οργανωτική δομή της διαδικασίας για την επίλυση του πεδίου ροής.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

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.

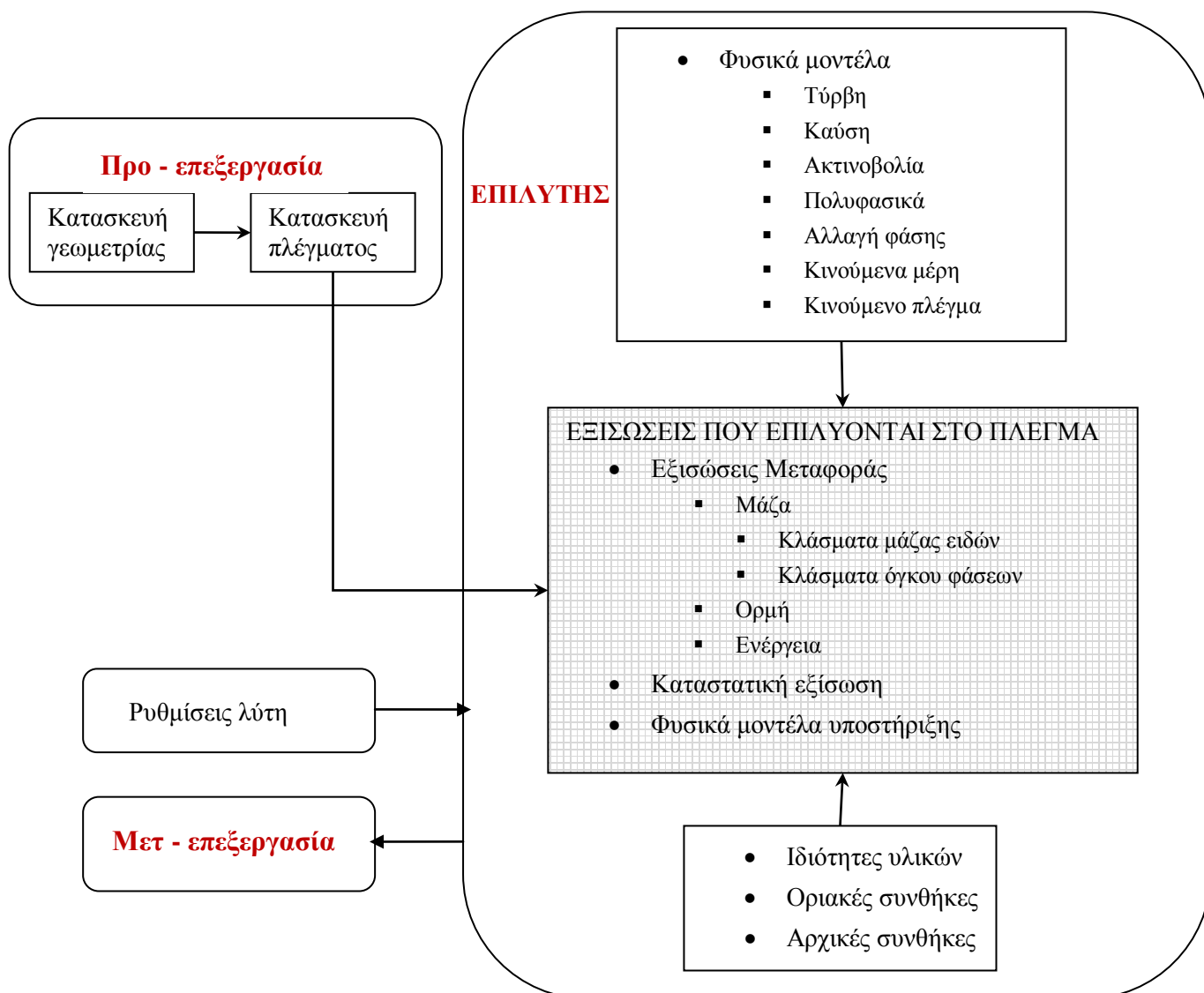
Γενική εξίσωση μεταφοράς:

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

Όπου:

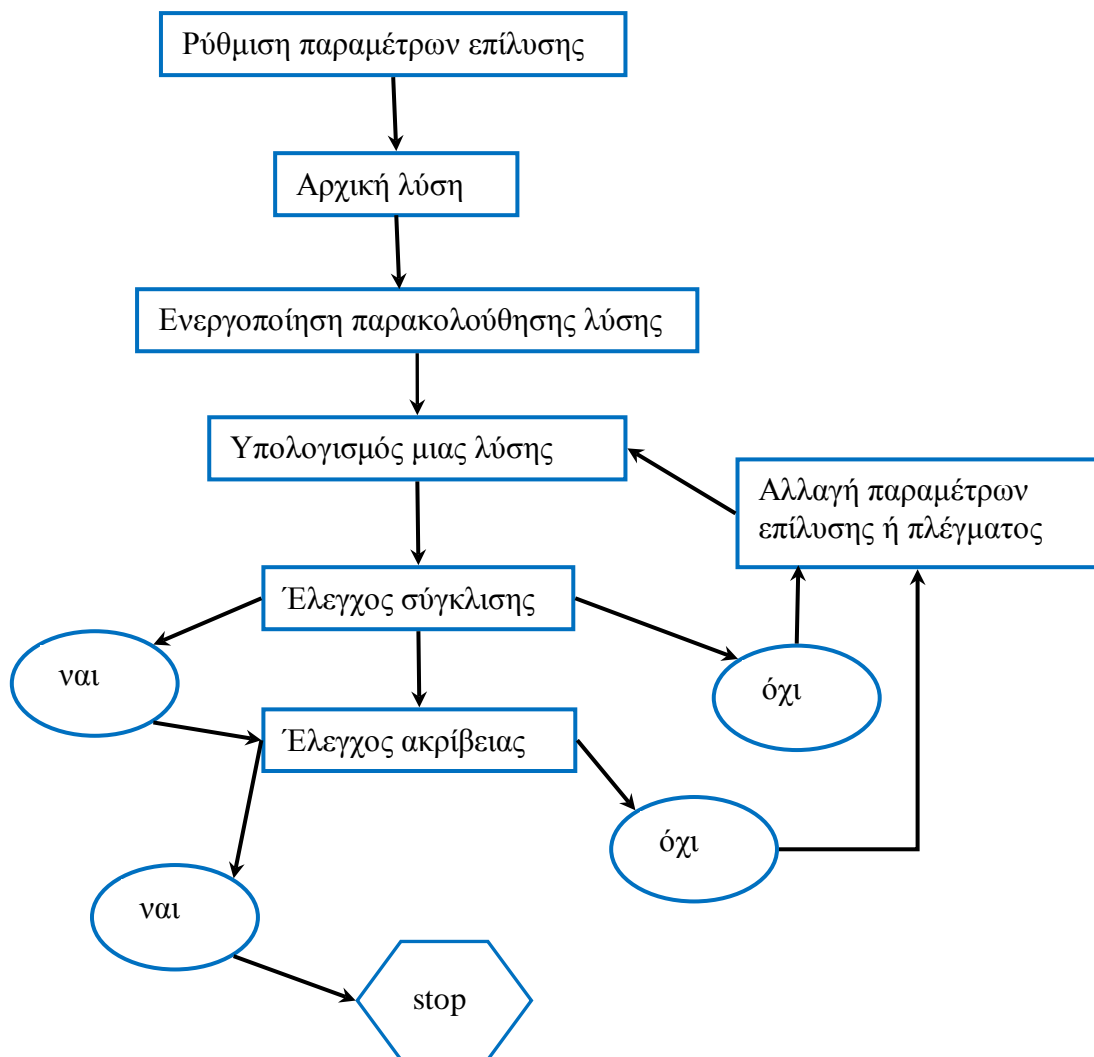
<u>Εξίσωση</u>	<u>Φ</u>
συνέχειας	1
x – ορμής	U
y – ορμής	V
ενέργειας	H

Η κατασκευή της γεωμετρίας του πεδίου ροής και η παραγωγή του πλέγματος γίνεται στον προ - επεξεργαστή Gambit. Στη συνέχεια αυτό εισάγεται στον επιλύτη Fluent όπου και ρυθμίζονται οι διάφορες παράμετροι κατάλληλα ώστε να ανταποκρίνονται στο φυσικό μοντέλο του προβλήματός μας, τις ιδιότητες των υλικών και τις οριακές και αρχικές συνθήκες. Σύμφωνα με την μοντελοποίηση που έχει γίνει επιλύονται οι εξισώσεις (μεταφοράς, καταστατικές) στο πλέγμα και γίνεται η επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Μία επισκόπηση της CFD διαδικασίας που ακολουθείται παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Επισκόπηση της CFD διαδικασίας

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. Τα στάδια της διαδικασίας επίλυσης φαίνονται στο σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Στάδια διαδικασίας επίλυσης.

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = S_m \quad \text{Εξίσωση διατήρησης της μάζας}$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} + \bar{F} \quad \text{Εξίσωση διατήρησης της ορμής}$$

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 $\rho\bar{g}$ και \bar{F} είναι η βαρυτική και οι εξωτερικές δυνάμεις αντίστοιχα.

Στην περίπτωση που έχουμε ένα σταθερά περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς με γωνιακή ταχύτητα $\bar{\omega}$ σχετικά με ένα αδρανειακό σύστημα, τότε κάθε σημείο του πεδίου θα ορίζεται με το διάνυσμα \bar{r} από την αρχή του περιστρεφόμενου συστήματος. Η ταχύτητες του ρευστού μετασχηματίζονται από το αδρανειακό στο περιστρεφόμενο σύστημα σύμφωνα με τη σχέση:

$$\bar{v}_r = \bar{v} - \bar{\omega} \times \bar{r} \quad (3.1)$$

Στην παραπάνω σχέση \bar{v}_r είναι η σχετική ταχύτητα (δηλαδή η ταχύτητα ως προς το περιστρεφόμενο σύστημα), \bar{v} είναι η απόλυτη ταχύτητα (ταχύτητα ως προς το αδρανειακό σύστημα και $\bar{\omega} \times \bar{r}$ είναι η ταχύτητα λόγω περιστροφής.

Όταν οι εξισώσεις κίνησης επιλύονται στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς, η επιτάχυνση του ρευστού αυξάνεται με δύο επιπλέον όρους που εμφανίζονται στις εξισώσεις της ορμής. Επιπλέον οι εξισώσεις μπορούν να διατυπωθούν με δύο διαφορετικούς τρόπους: χρησιμοποιώντας τις σχετικές ταχύτητες σαν ανεξάρτητες μεταβλητές στις εξισώσεις καθώς και χρησιμοποιώντας τις απόλυτες ταχύτητες σαν ανεξάρτητες μεταβλητές στις εξισώσεις της ορμής.

Οι εξισώσεις διατήρησης στην περίπτωση αυτή γίνονται (ανεξάρτητη μεταβλητή η ταχύτητα \bar{v}_r):

Εξίσωση διατήρησης της μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r) = 0 \quad (3.2)$$

Εξίσωση διατήρησης της ορμής

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}_r) + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r \bar{v}_r) + \rho (2\bar{\omega} \times \bar{v}_r + \bar{\omega} \times \bar{\omega} \times \bar{r}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}_r) + \bar{F} \quad (3.3)$$

Η εξίσωση της ορμής περιλαμβάνει δύο επιπλέον όρους επιτάχυνσης: την επιτάχυνση Coriolis $2\bar{\omega} \times \bar{v}$ και την κεντρομόλο επιτάχυνση $\bar{\omega} \times \bar{\omega} \times \bar{r}$.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η απόλυτη ταχύτητα, οι εξισώσεις της ροής για ένα σταθερά περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς γράφονται ως εξής:

Διατήρησης της μάζας

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r) = 0 \quad (3.4)$$

Διατήρησης της ορμής

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v}_r \bar{v}) + \rho(\bar{\omega} \times \bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \bar{F} \quad (3.5)$$

Σε αυτή τη διατύπωση η επιτάχυνση Coriolis και η κεντρομόλος συγχωνεύονται σε έναν μόνο όρο, τον $\bar{\omega} \times \bar{v}$.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΑΞΟΝΟΣΥΜΜΕΤΡΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

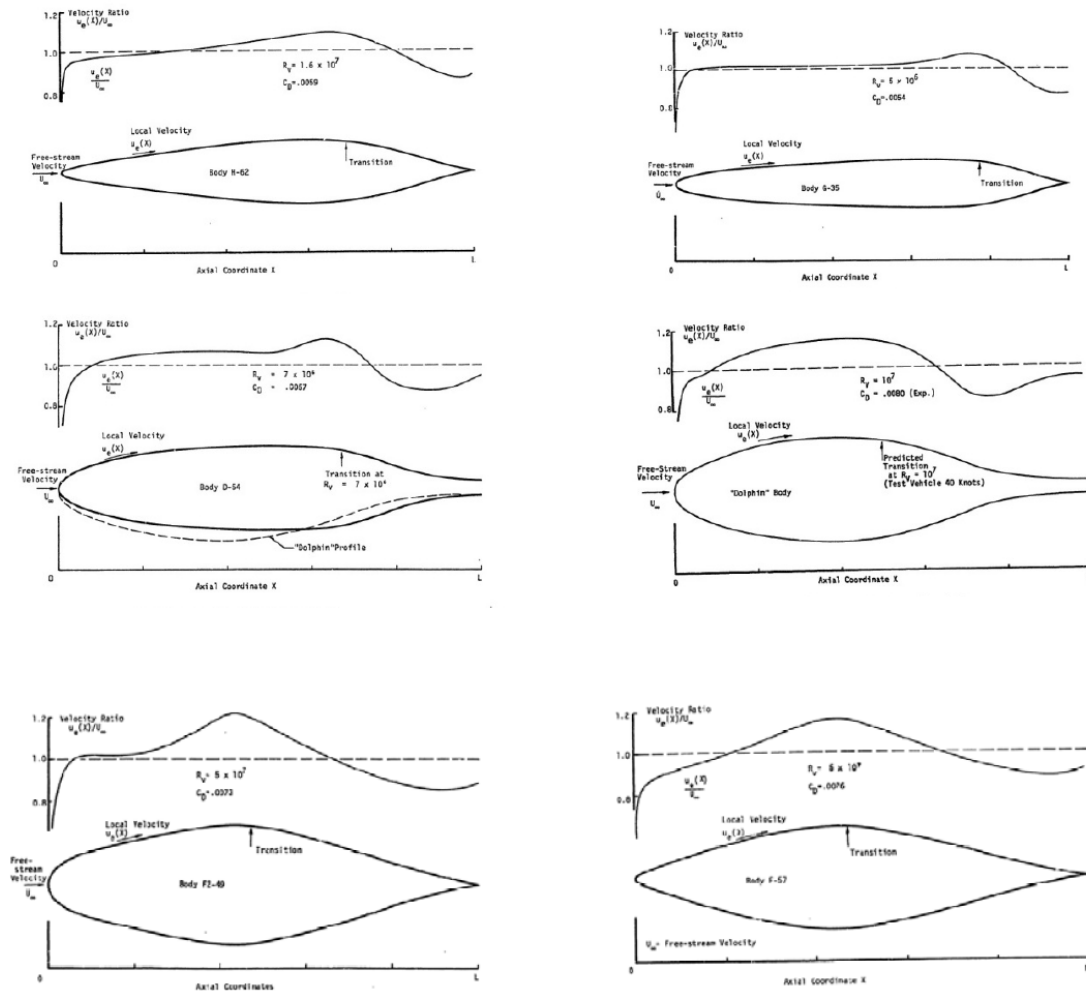
Θεμελιώδους ενδιαφέροντος στο πεδίο της υδροδυναμικής αποτελεί ο περιορισμός των ενεργειακών απαιτήσεων των υποβρυχίων οχημάτων. Σε αυτό συμβάλει σημαντικά η βελτιστοποίηση του σχήματος της γάστρας μειώνοντας την επιφανειακή τριβή και την αντίσταση της πίεσης. Η επιλογή καταλληλότερου σχήματος γίνεται με τη μελέτη διαφόρων αξονοσυμμετρικών σχημάτων τα οποία προκύπτουν ελαχιστοποιώντας την επαγόμενη αντίσταση για συγκεκριμένο όγκο οχήματος και σταθερή ταχύτητα σε ασυμπίεστη ροή χωρίς φαινόμενα αποκόλλησης και σπηλαίωσης σε μηδενική πρόσπτωση. Η διαδικασία βελτιστοποίησης των αξονοσυμμετρικών σχημάτων δεν λαμβάνει υπόψη προώθηση ή ελιγμούς και η ελάττωση της αντίστασης επιτυγχάνεται μόνο με τη γεωμετρική διαμόρφωση του σχήματος της γάστρας του υποβρυχίου [66].

Από τη διερεύνηση των μελετών που έχουν γίνει πάνω στη βελτιστοποίηση εκ περιστροφής συμμετρικών σχημάτων [66], [43], [45], [58], [59], [64], [67], επιλέχθηκαν για περαιτέρω εξέταση 4 σχήματα με αποδεδειγμένα χαμηλό συντελεστή αντίστασης. Η τελική επιλογή θα γίνει λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργικές και χωροταξικές ανάγκες του υποβρυχίου.

Η μελέτη της μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή και των επαγόμενων δυνάμεων πάνω σε εκ περιστροφής συμμετρικά σώματα που διαθέτουν μία μεγάλου μήκους πρόσω περιοχή όπου η βαθμίδα πίεσης είναι ευνοϊκή (η πίεση πέφτει και η

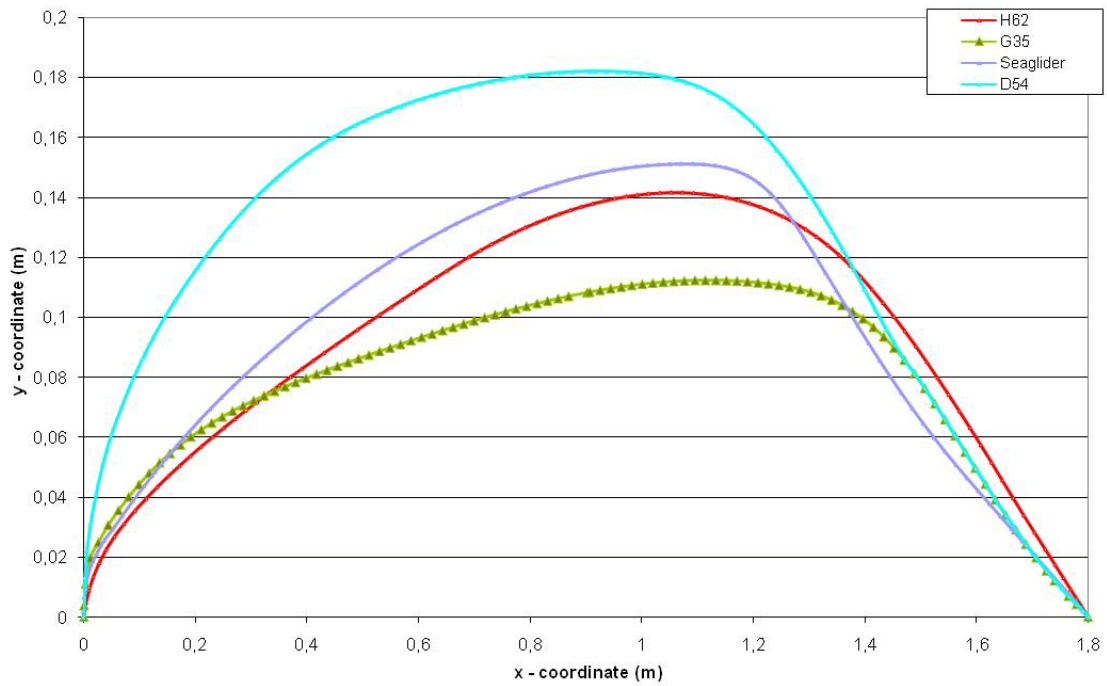
ροή επιταχύνεται) έδειξε τα εξής: σε τέτοια σώματα η ευνοϊκή βαθμίδα πίεσης που παρατηρείται φαίνεται να αναβάλλει τη μετάβαση στο σημείο αποκόλλησης της στρωτής ροής. Αυτή η εκτεταμένη περιοχή όπου η ροή παραμένει στρωτή έχει σαν αποτέλεσμα η επαγόμενη αντίσταση πάνω στο σώμα να μειώνεται κατά πολύ. Το καταλληλότερο/ευνοϊκότερο σχήμα σε κάθε περίπτωση είναι συνάρτηση του αριθμού Reynolds.

Η μορφή της γάστρας του υποβρυχίου θα προκύψει από ένα τέτοιο αποδεδειγμένα χαμηλής αντίστασης αξονοσυμμετρικό σχήμα. Επιλέχθηκαν τέσσερα τέτοια σχήματα για περαιτέρω εξέταση. Το Seaglider προήλθε επίσης από ένα από αυτά.

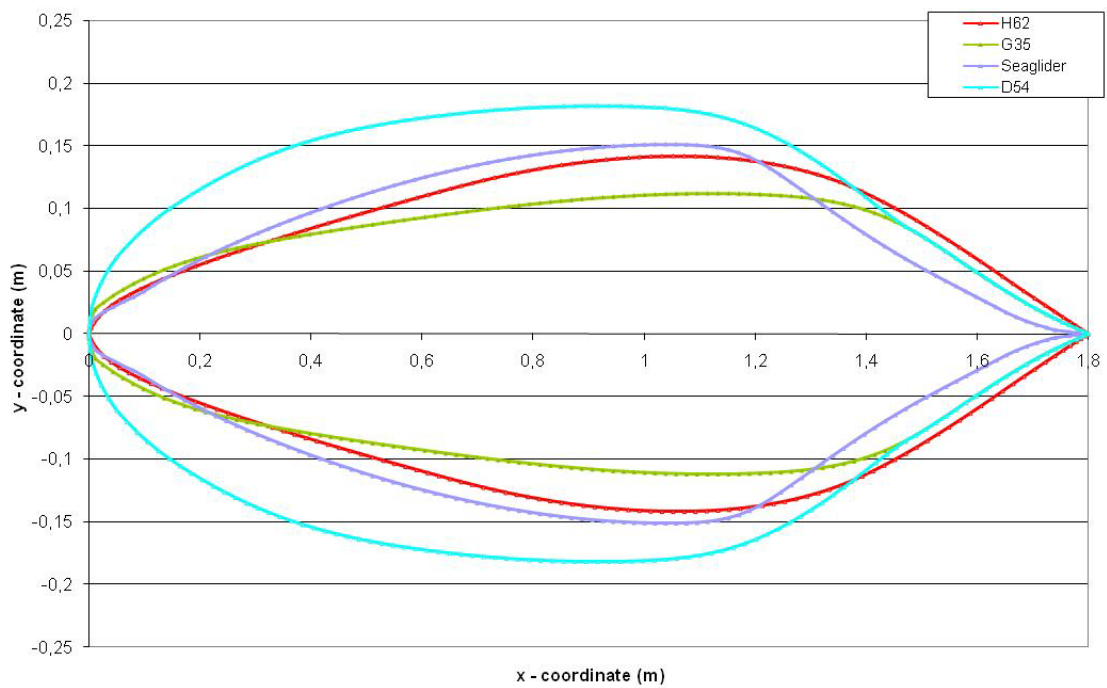


Σχήμα 3.4: Χαμηλής αντίστασης εκ περιστροφής συμμετρικές γεωμετρίες.

Στη συνέχεια επιλέγονται και μελετώνται τα χαμηλής αντίστασης αξονοσυμμετρικά σχήματα G-35, H-62 και D-54, καθώς και αυτό του Seaglider.



Σχήμα 5: Επιλεγμένες αξονοσυμμετρικές γεωμετρίες χαμηλής αντίστασης.



Σχήμα 6: Επιλεγμένες αξονοσυμμετρικές γεωμετρίες χαμηλής αντίστασης.

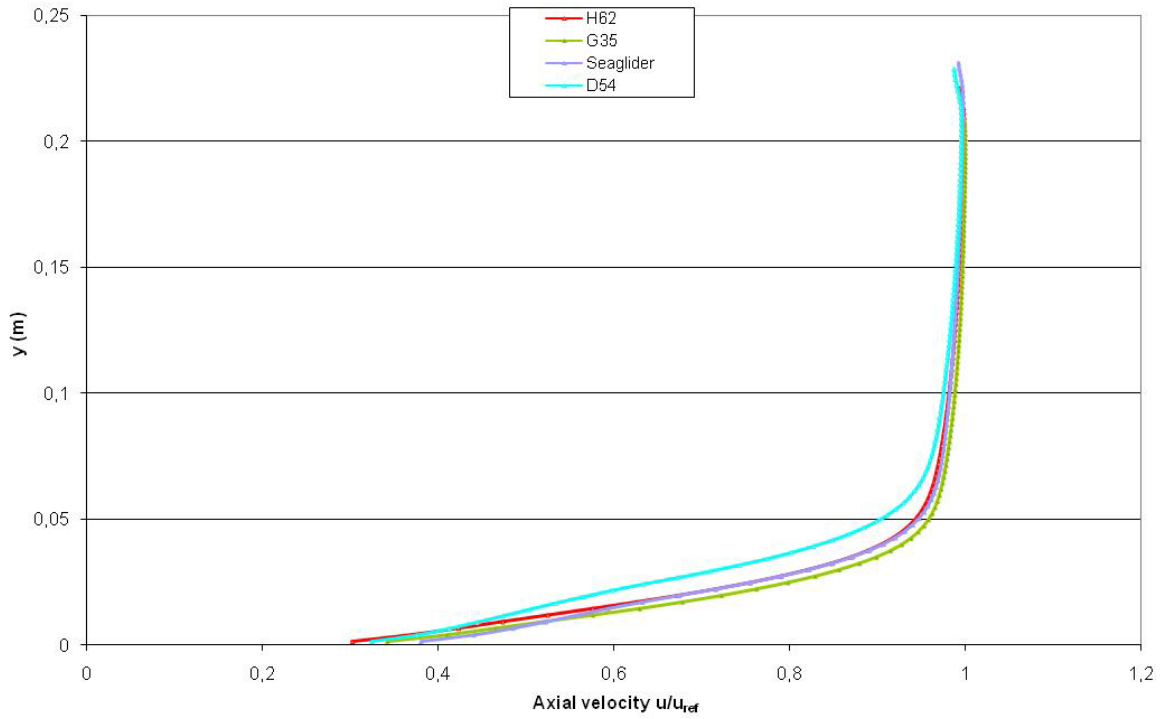
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΙΣ ΔΥΟ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗΣ

Λόγω της αξονικής συμμετρίας που υπάρχει στα γεωμετρικά σχήματα, εν πρώτης γίνεται η δισδιάστατη μελέτη τους. Οι υπολογισμοί γίνονται με CFD κώδικα (Tzabiras G., 1992) [81] καθώς και με το πρόγραμμα FLUENT [29] και τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους.

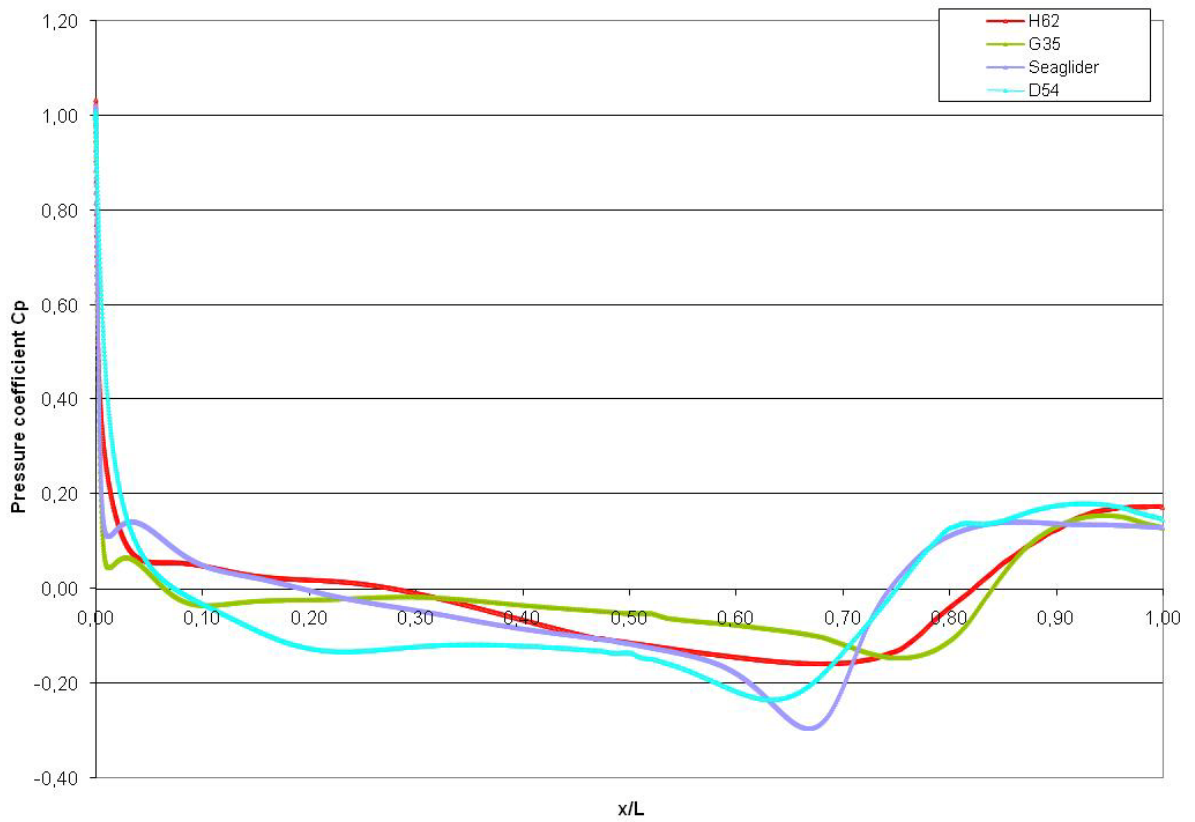
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ DREVOL

Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των αξονοσυμμετρικών σωμάτων αρχικά διερευνώνται χρησιμοποιώντας κώδικα CFD ο οποίος αναπτύχθηκε στο Ε.Μ.Π. από τον καθηγητή Γιώργο Τζαμπίρα [81]. Προκειμένου να επιλυθεί αριθμητικά το πεδίο ροής, η ροή γύρω από το σώμα μοντελοποιείται με το κατάλληλο πλέγμα και οι εξισώσεις Navier – Stokes λύνονται αριθμητικά θεωρώντας κ-ε μοντέλο τύρβης. Το σώμα θεωρείται ακίνητο και η ταχύτητα της επ’ άπειρου ροής 0.5 m/s. Αφού συγκλίνει η λύση προκύπτει το προφίλ της ταχύτητας και οι συντελεστές πίεσης και τριβής κατά μήκος του σώματος, τα οποία παρατίθενται σε παρακάτω διαγράμματα.

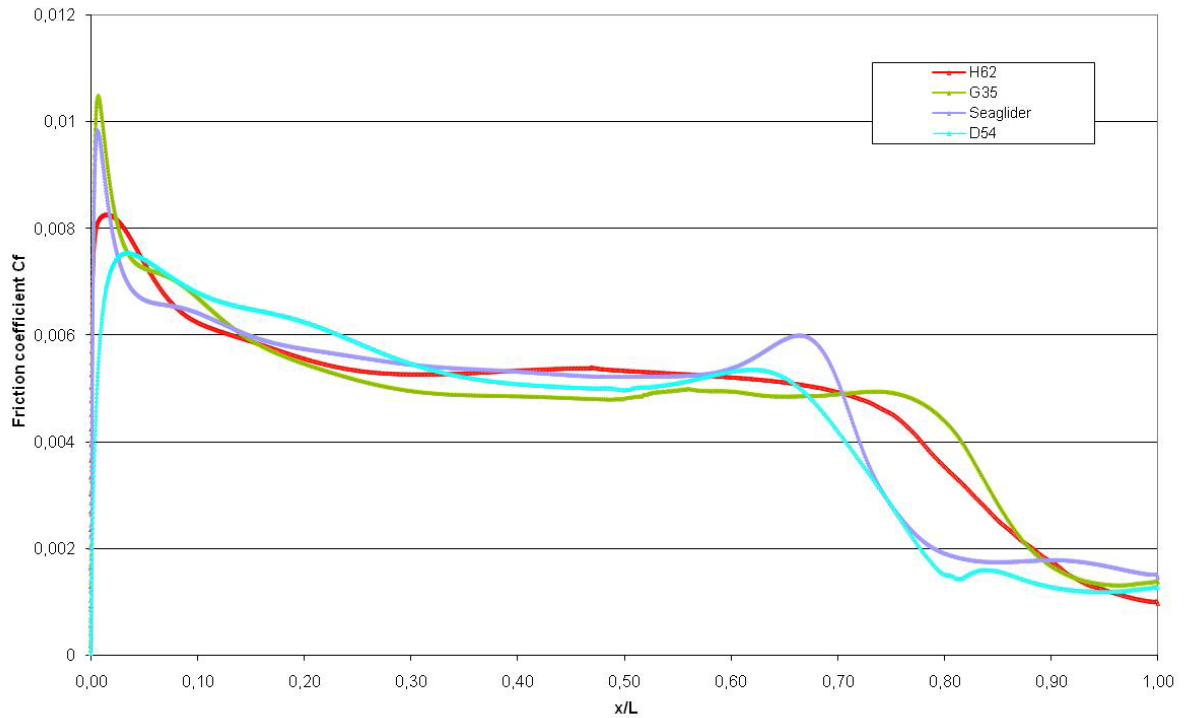
Οι συντεταγμένες των σωμάτων κανονικοποιούνται ώστε το συνολικό μήκος να είναι μοναδιαίο. Οι υπολογισμοί έγιναν για αριθμό Reynolds $9 \cdot 10^5$ ενώ το προφίλ της ταχύτητας αναφέρεται στη συνιστώσα την παράλληλη στον x άξονα. Στον κάθετο άξονα του διαγράμματος αναπαριστάται η απόσταση από την επιφάνεια του σώματος στο σημείο $x/L=0.97$. Ο τοπικός συντελεστής τριβής κατά μήκος της επιφάνειας του σώματος θα δίνεται από τη σχέση $c_f = \tau_w / (1/2 \rho u_{ref}^2)$ ενώ ο συντελεστής πίεσης ως $c_p = p / (1/2 \rho u_{ref}^2)$.



Σχήμα 3.7: Κατακόρυφο προφίλ της αξονικής ταχύτητας, $Re= 9 \cdot 10^5$



Σχήμα 3.8: Συντελεστής πίεσης κατά μήκος του σώματος, $Re= 9 \cdot 10^5$



Σχήμα 3.9: Συντελεστής τριβής κατά μήκος του σώματος, $Re = 9 \cdot 10^5$

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Γεωμετρία	Αντίσταση R [Nt]	Επιφάνεια S [m ²]	CR	CF	CP
H62	0.720	0.331	5.28E-3	4.90E-3	3.86E-4
G35	0.608	0.284	5.22E-3	4.86E-3	3.54E-4
Seaglider	0.771	0.345	5.45E-3	4.92E-3	5.25E-4
D54	1.05	0.457	5.57E-3	4.90E-3	6.71E-4

Ο ολοκληρωμένος συντελεστής τριβής C_F και πίεσης C_P υπολογίζονται ως εξής:

$$C_F = \frac{R_F}{\frac{1}{2} \rho S u_{ref}^2}, \quad C_P = \frac{R_P}{\frac{1}{2} \rho S u_{ref}^2} \quad (3.6)$$

με

$$R_F = \int_S \tau_w (\vec{s} \cdot \vec{k}) ds, \quad R_P = - \int_S p (\vec{n} \cdot \vec{k}) ds \quad (3.7)$$

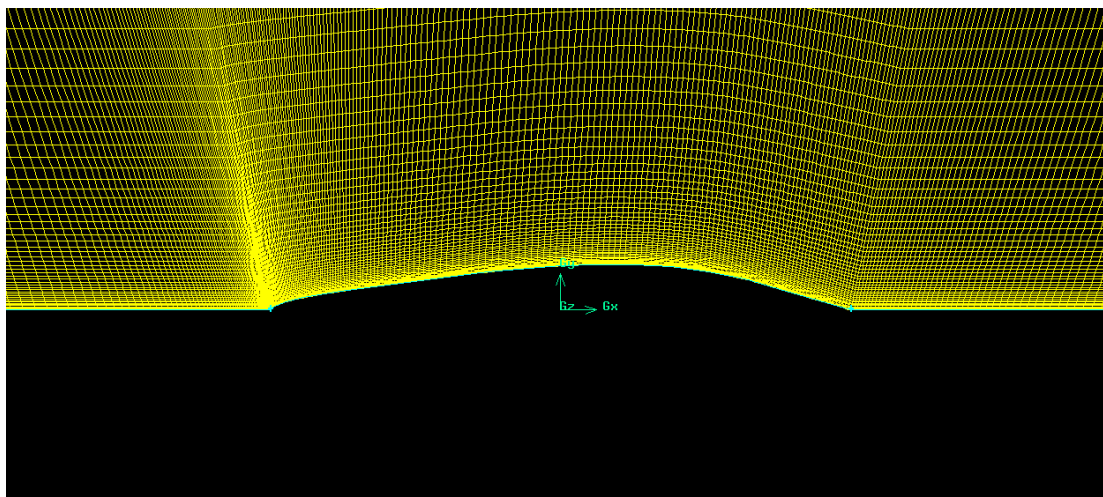
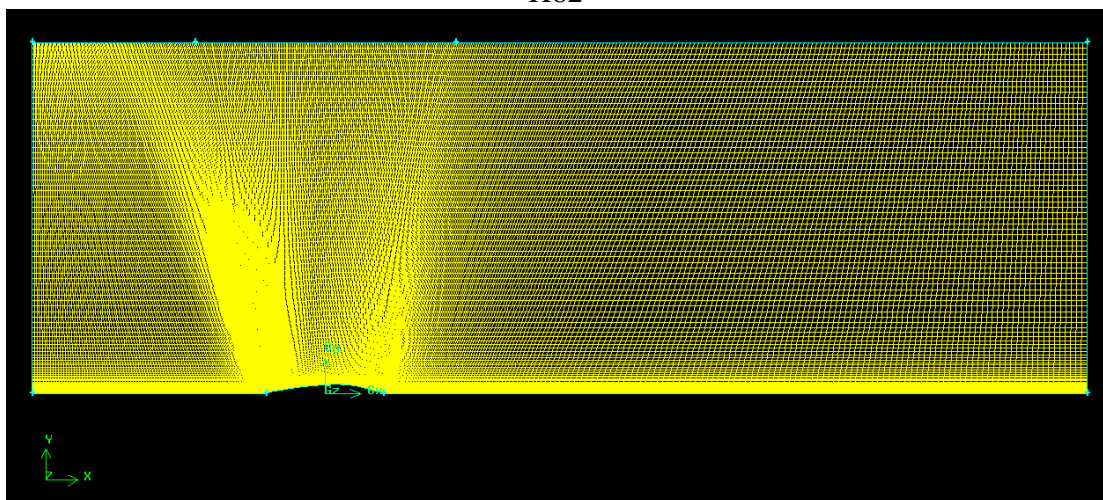
όπου S είναι η ολοκληρωθείσα επιφάνεια, \vec{s} το εφαπτομενικό διάνυσμα στο περίγραμμα του σώματος, \vec{n} το κάθετο και \vec{k} το μοναδιαίο διάνυσμα παράλληλο στον x άξονα. Οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν τη μεταβολή της επιφανειακής τριβής και της πίεσης συναρτήσει του μήκους.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΟ FLUENT

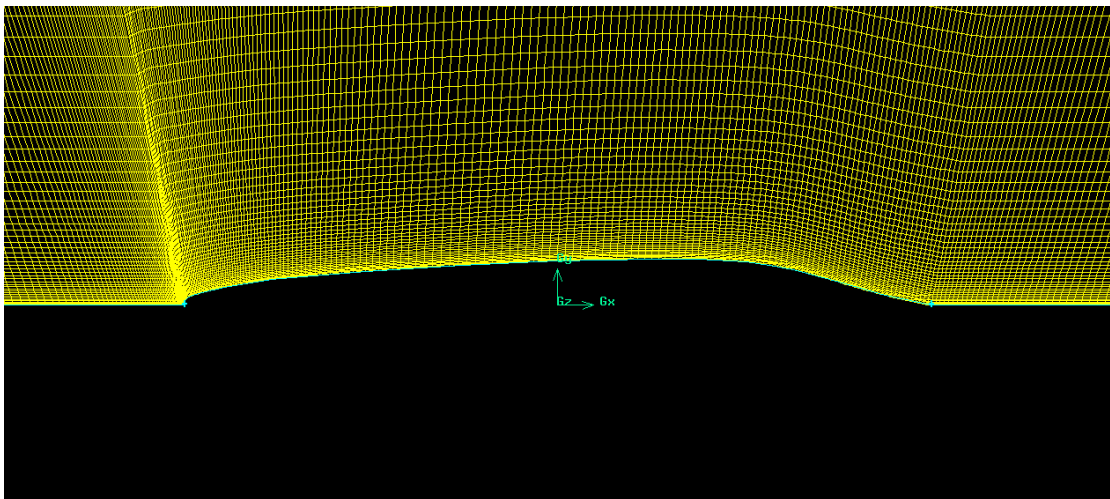
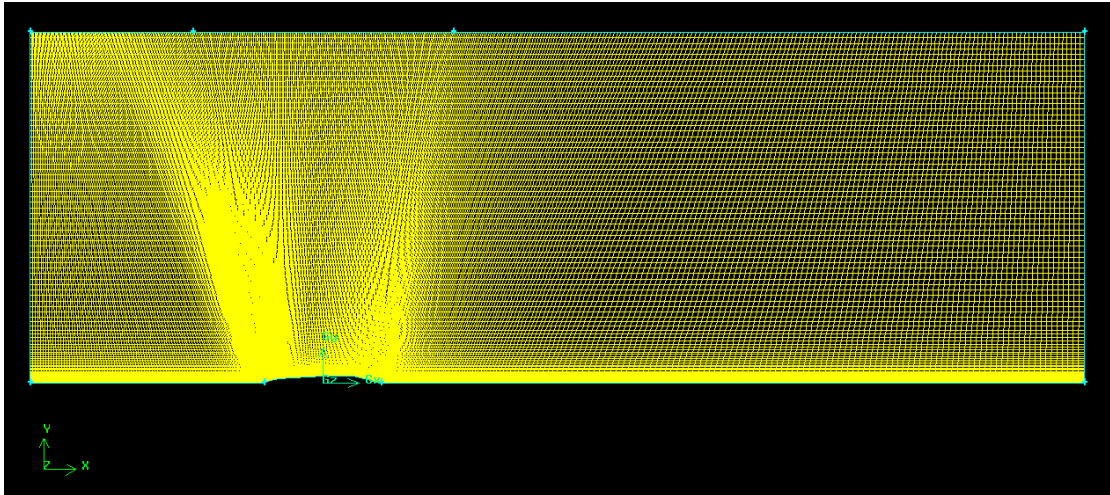
Στην ενότητα αυτή το δισδιάστατο πεδίο ροής επιλύεται με το λογισμικό Fluent. Αρχικά δημιουργείται το δισδιάστατο υπολογιστικό πλέγμα με τον προ-επεξεργαστή Gambit. Το πεδίο ροής διακριτοποιείται γύρω από το υποβρύχιο όχημα επαρκώς όσον αφορά στην πυκνότητα του πλέγματος και στο μέγεθός του, ώστε ο υπολογισμός των στοιχείων της ροής να είναι ο βέλτιστος και η λύση ανεξάρτητη του πλέγματος. (Μέγεθος πεδίου: 2 μήκη αντίθετα προς τη ροή, 6 μήκη στην κατεύθυνση της ροής και 3 μήκη προς τα πάνω, ενώ το μήκος του οχήματος είναι 1,8 m).

Το υπολογιστικό πεδίο εκτείνεται στο επίπεδο x-y. Το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων έχει την αρχή του στο μέσο του μήκους του οχήματος. Ο άξονας x είναι θετικός προς την πρόμνη ενώ ο y προς τα πάνω όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Το πλέγμα που παράχθηκε για κάθε ένα από τα προς εξέταση αξονοσυμμετρικά σώματα φαίνεται στις επόμενες εικόνες.

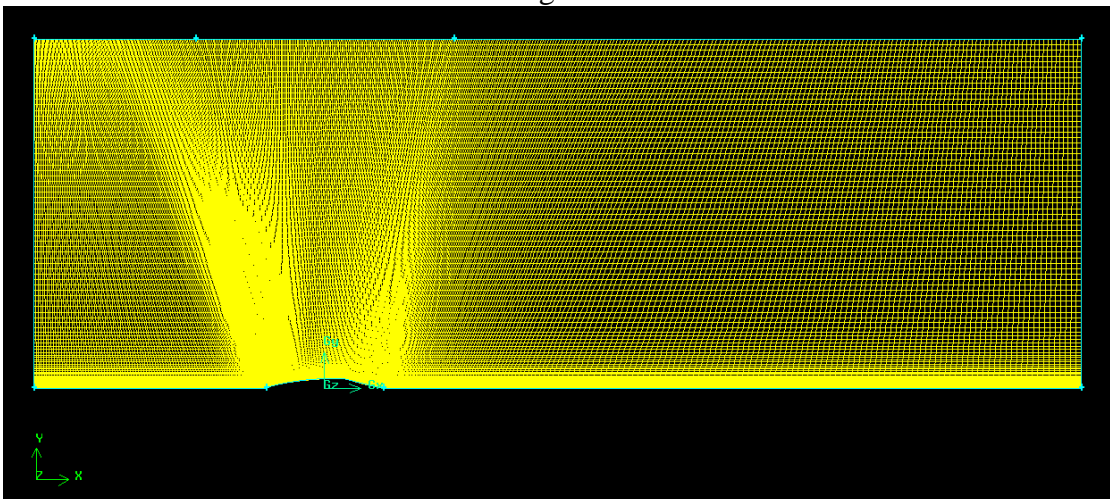
H62

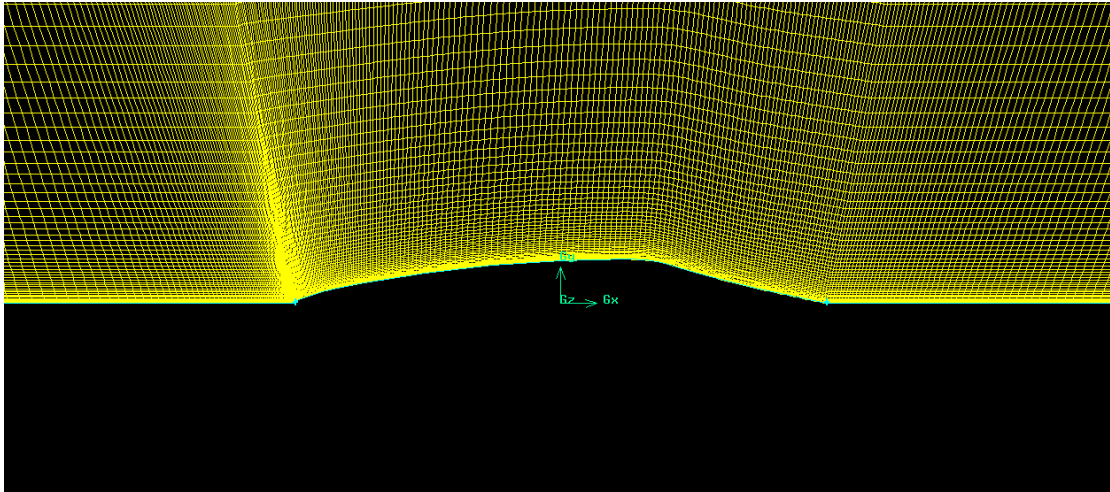


G35

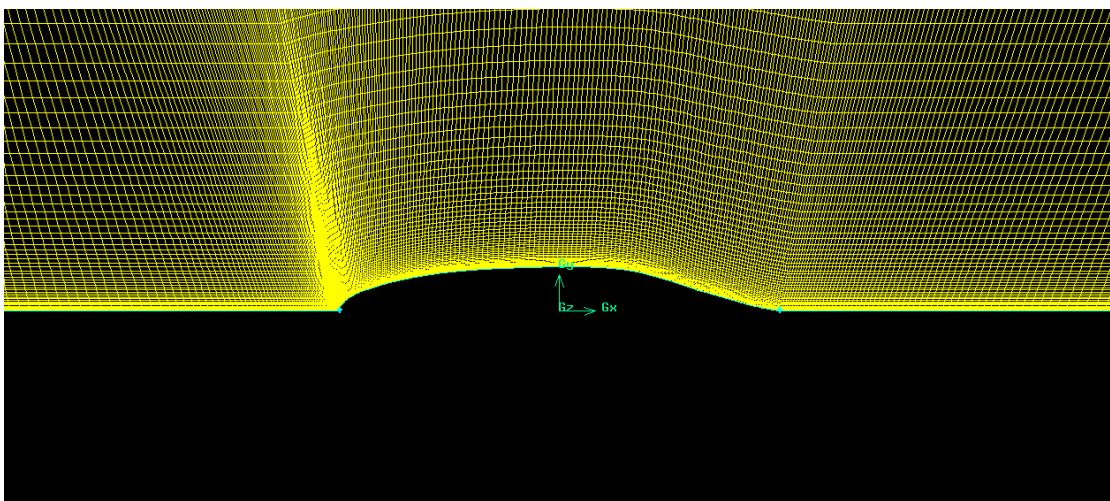
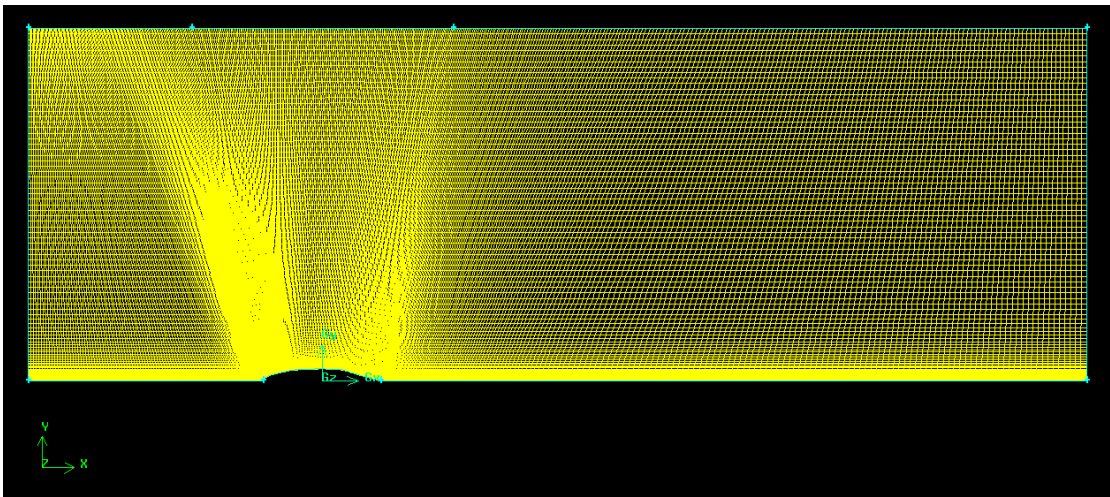


Seaglider

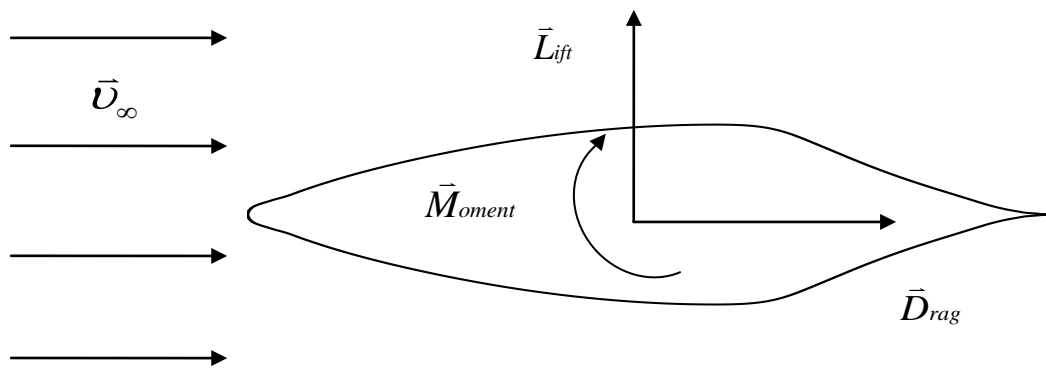




D54



Στη συνέχεια το διακριτοποιημένο πεδίο εισάγεται στο Fluent ώστε να γίνει η προσομοίωση. Το όχημα θεωρείται ακίνητο και η ροή προσπίπτει παράλληλα με ταχύτητα $v_{\infty} = 0.486m/s$.

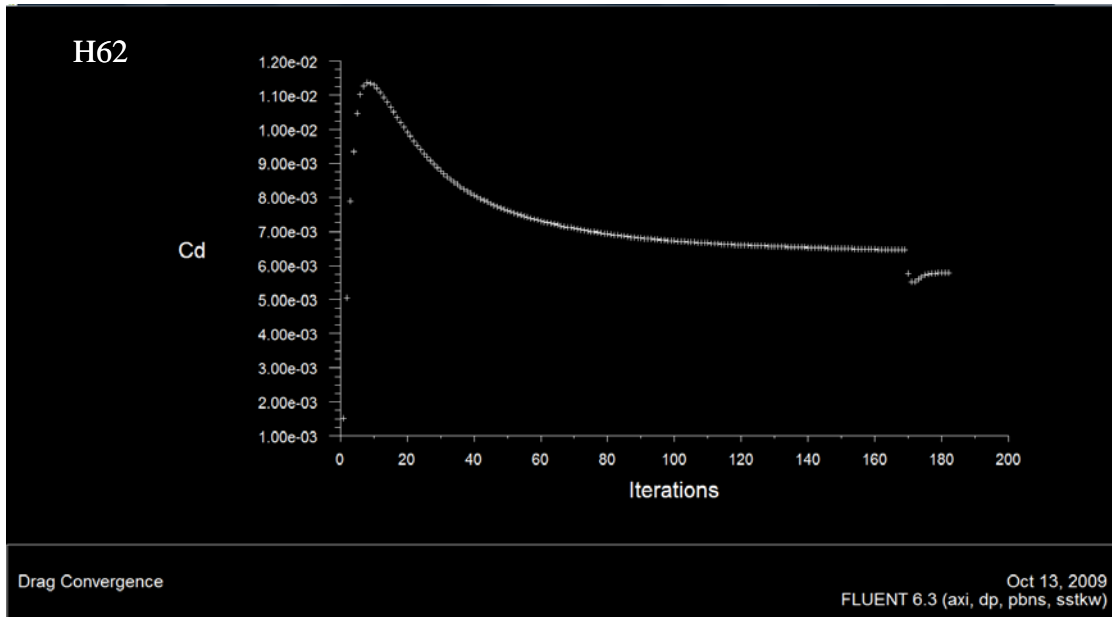


Σχήμα 3.10: Δυνάμεις και ροπές πάνω στο υδρόπτερο

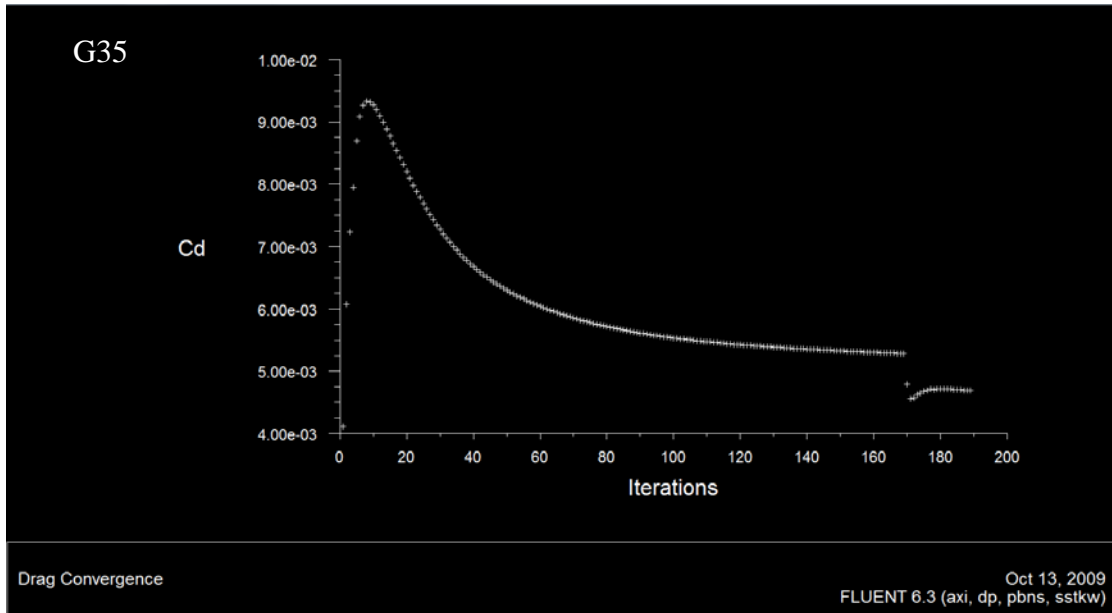
Το μοντέλο τύρβης που ορίζεται για την μοντελοποίηση της ροής είναι το μοντέλο δύο εξισώσεων SST (Shear – Stress Transport) k- ω , το οποίο παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά για ροές με τοιχώματα και χαμηλό αριθμό Reynolds. Συνδυάζει την επαρκή χρήση του κοντά σε τοιχώματα αλλά και μακριά από αυτούς χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση ανάμιξης.

Επιπλέον ορίζονται οι ιδιότητες των υλικών και οι οριακές συνθήκες, καθώς και τα σχήματα ελέγχου της επίλυσης και της σύγκλισης. Οι συντελεστές υποχαλάρωσης ορίζονται για την πίεση 0.5, για την ορμή 0.3 για το k 0.5, επίσης για το ω 0.5

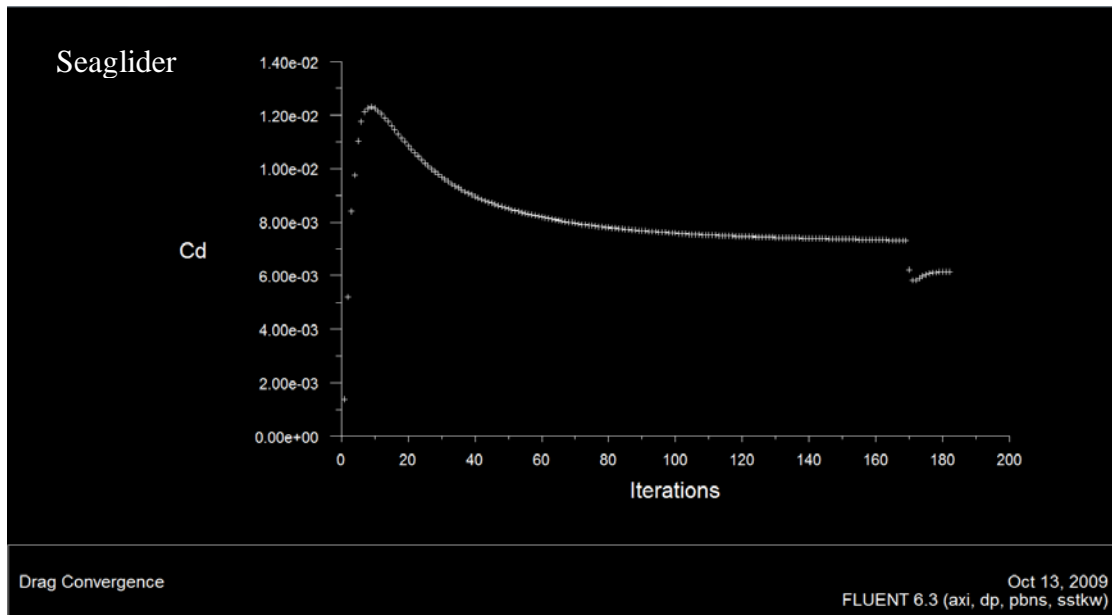
Η λύση παρακολουθείται και αφού συγκλίνει για σχήματα διακριτοποίησης πρώτου αλλά και δευτέρου βαθμού γίνεται επεξεργασία και έλεγχος των αποτελεσμάτων. Στα σχήματα 3.11, 3.12, 3.13, και 3.14 φαίνεται η ιστορία σύγκλισης για το συντελεστή αντίστασης.



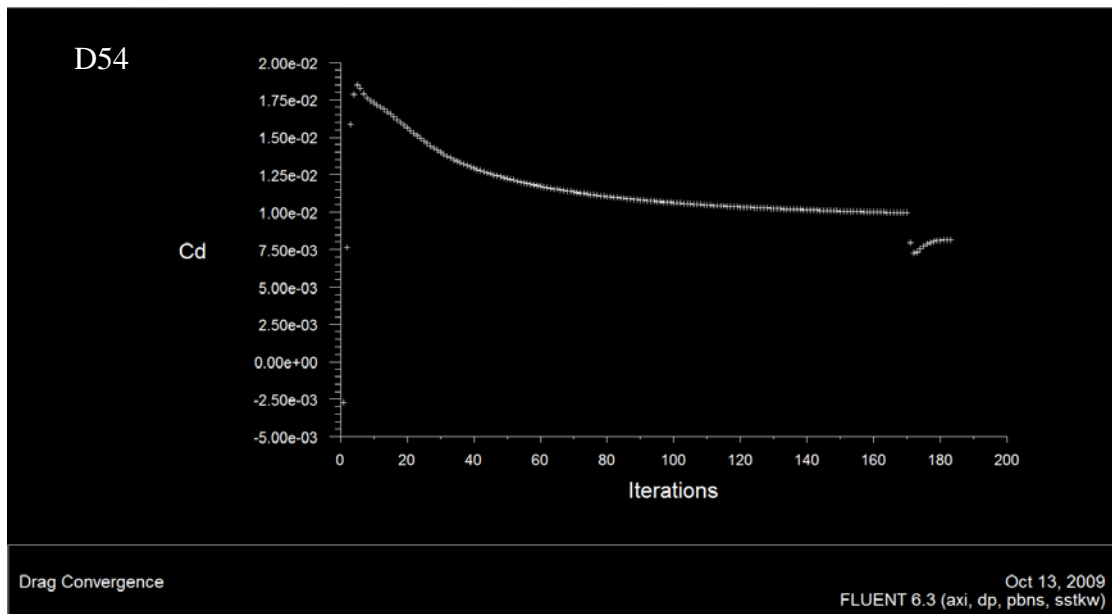
Σχήμα 3.11: Ιστορία σύγκλισης του συντελεστή αντίστασης για το σώμα H62



Σχήμα 3.12: Ιστορία σύγκλισης του συντελεστή αντίστασης για το σώμα G35

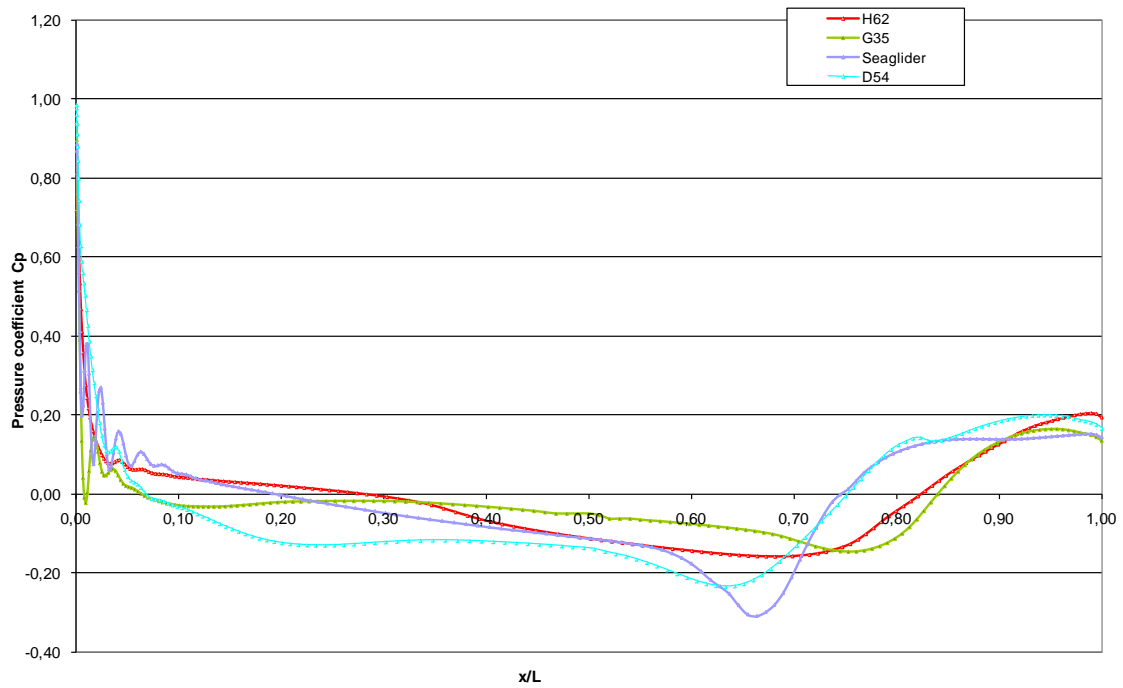


Σχήμα 3.13: Ιστορία σύγκλισης του συντελεστή αντίστασης για το σώμα Seaglider

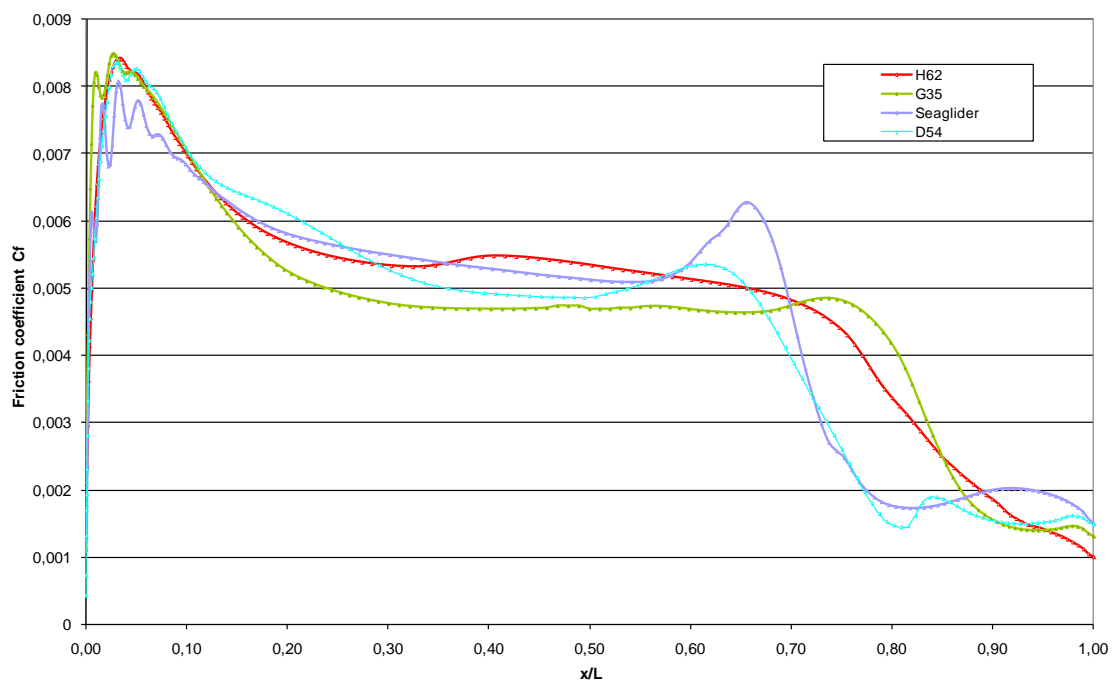


Σχήμα 3.14: Ιστορία σύγκλισης του συντελεστή αντίστασης για το σώμα D54

Αποτελέσματα για τους συντελεστές πίεσης και επιφανειακής τριβής παίρνουμε και για τα τέσσερα σώματα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα δύο επόμενα σχήματα 3.15 και 3.16.

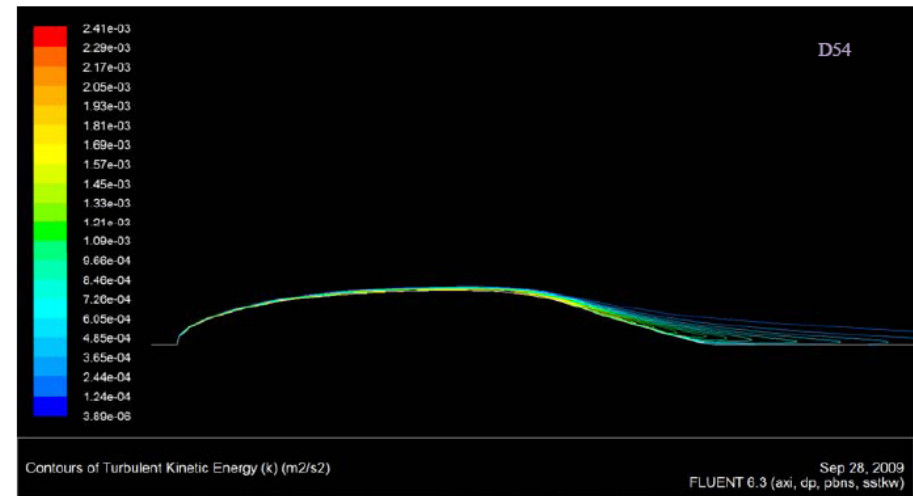
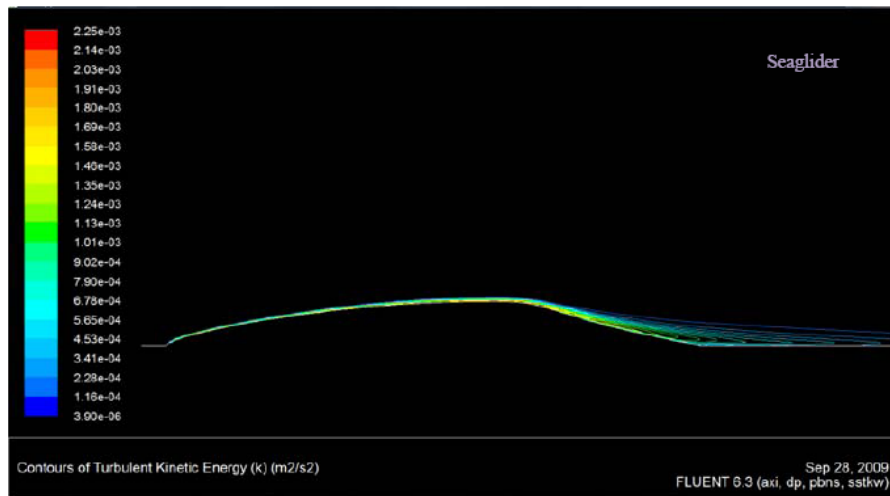
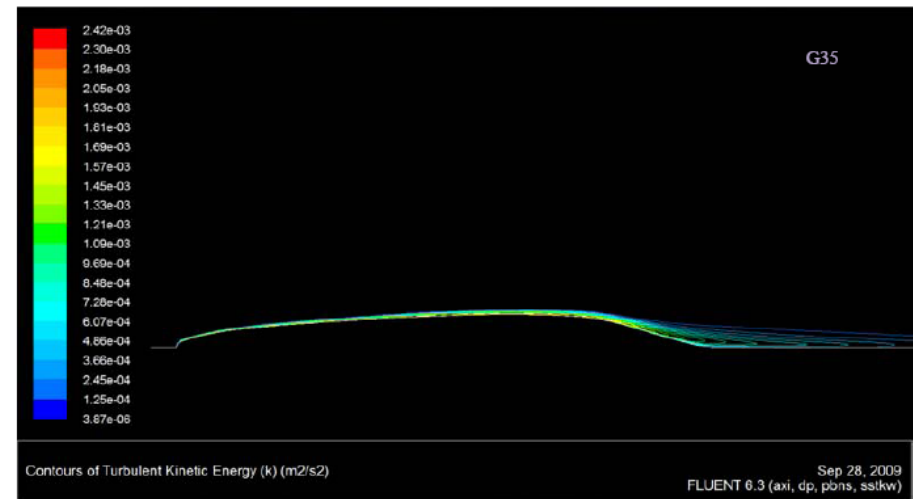
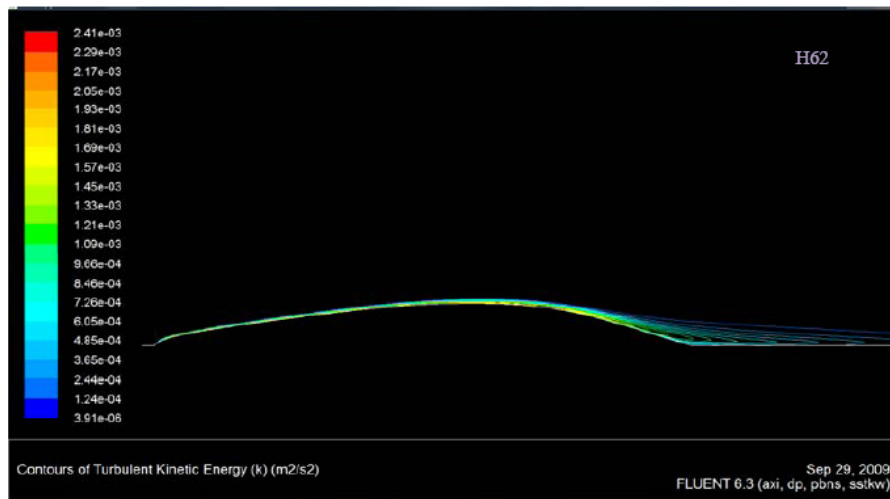


Σχήμα 3.15: Συντελεστής πίεσης κατά μήκος των σωμάτων, $Re= 9 \cdot 10^5$

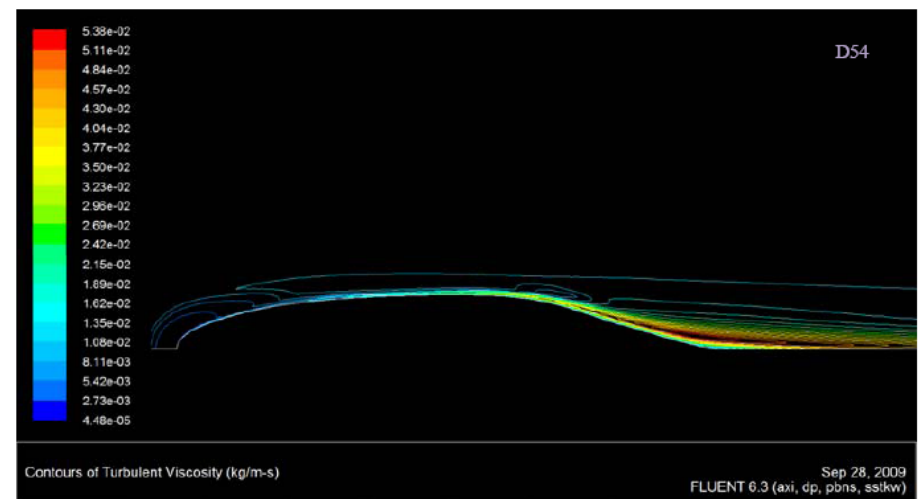
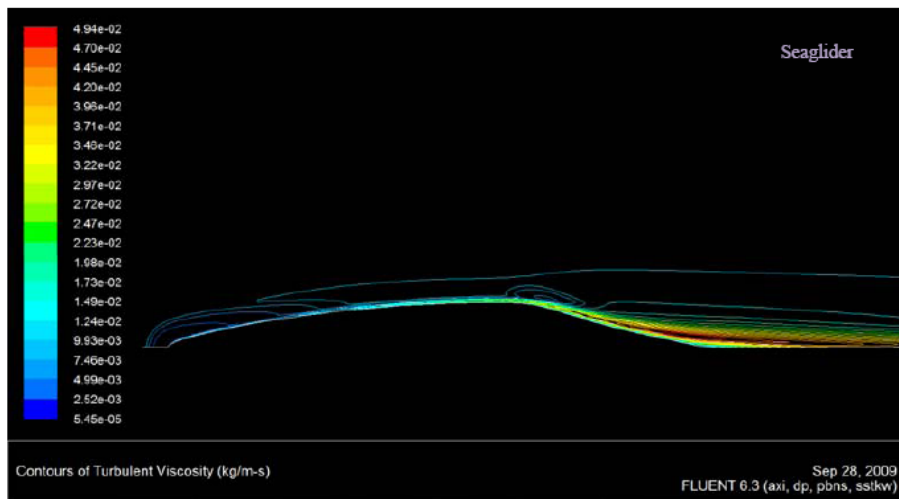
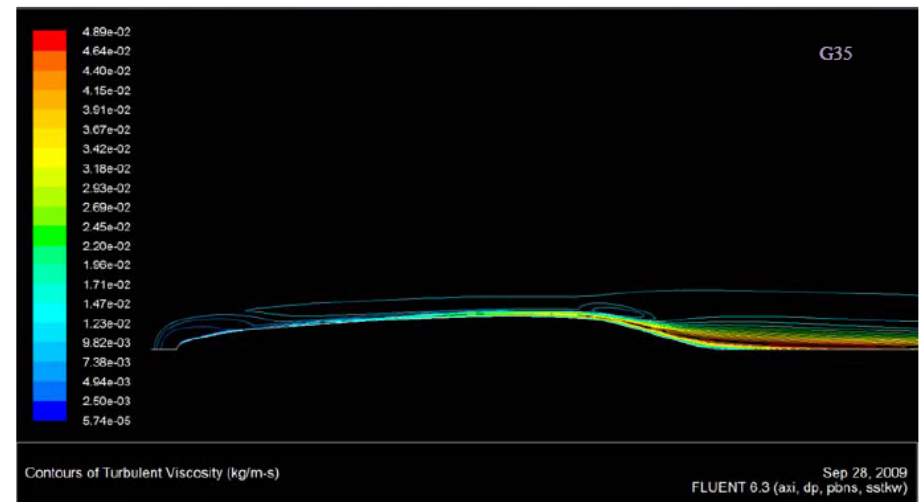
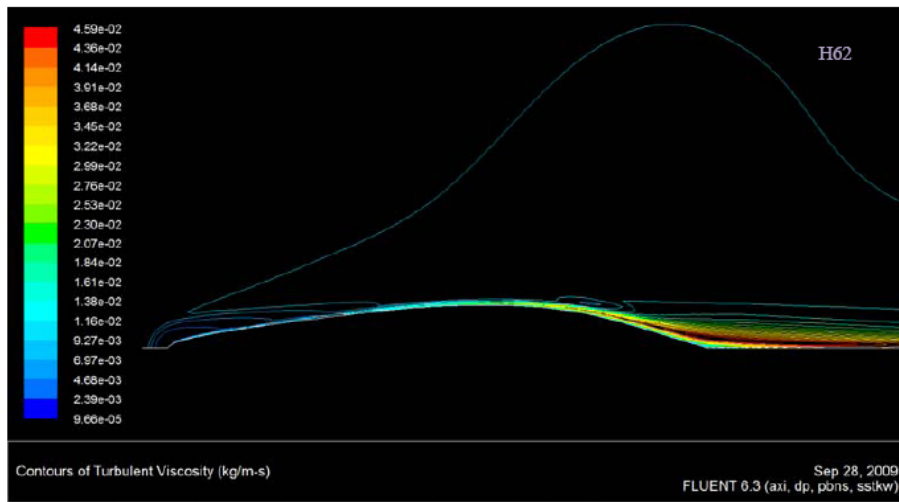


Σχήμα 3.16: Συντελεστής τριβής κατά μήκος των σωμάτων, $Re= 9 \cdot 10^5$

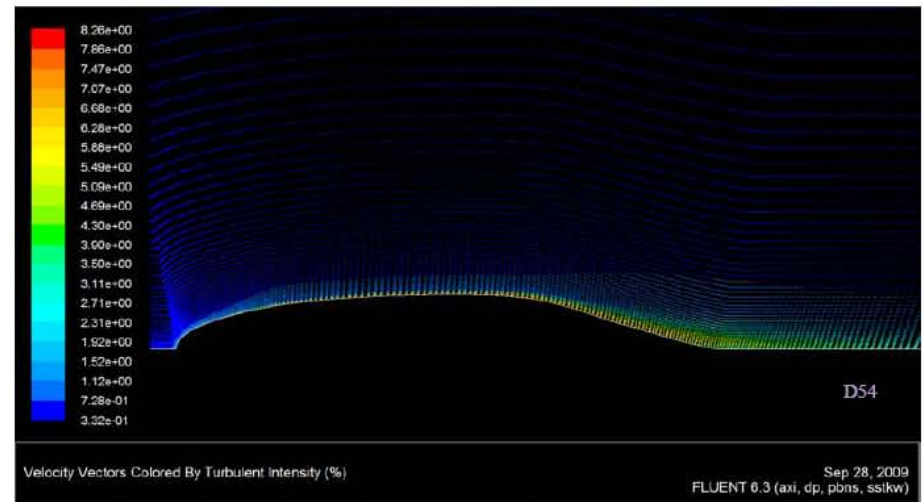
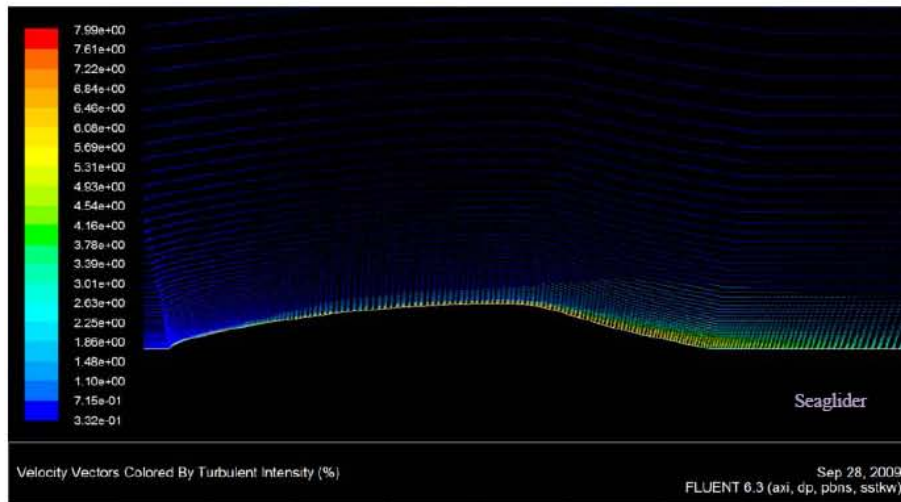
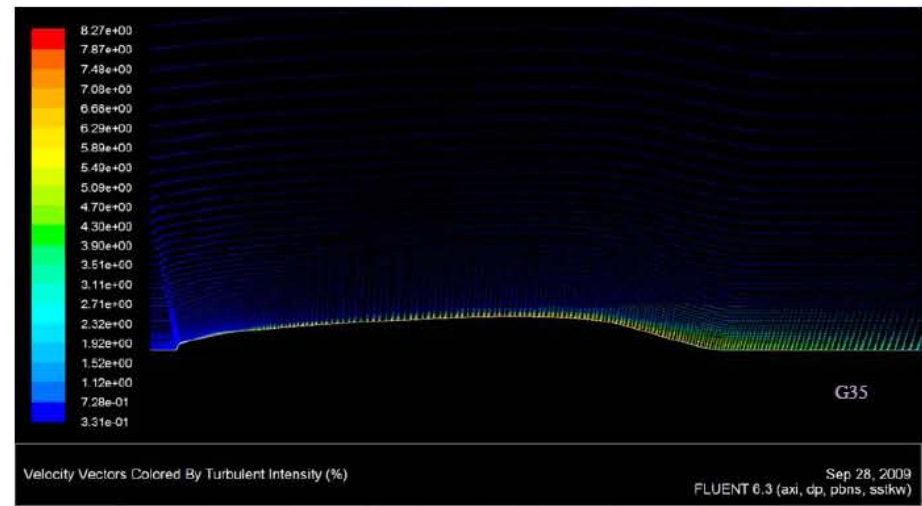
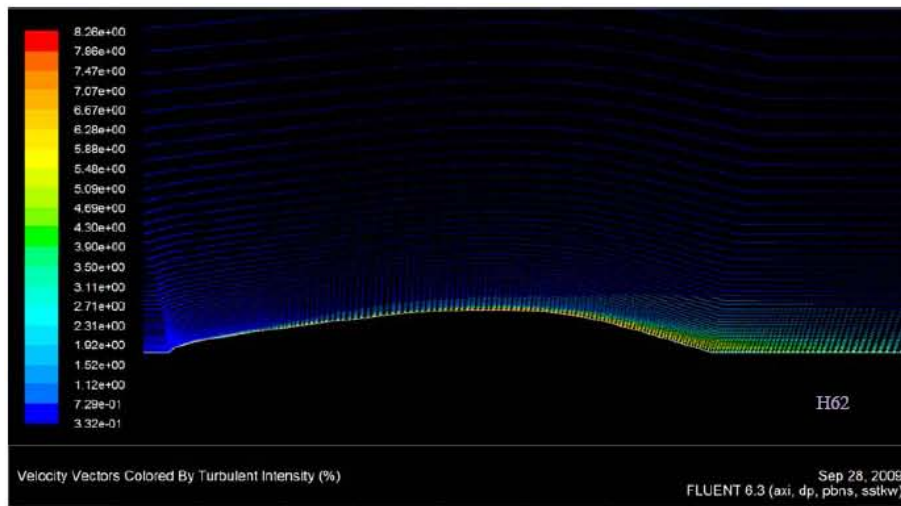
Παρακάτω παρατίθενται κάποια διαγράμματα για το πώς διαμορφώνεται η ροή γύρω από τα υπο εξέταση σώματα σύμφωνα με την τυρβώδη κινητική ενέργεια, την εσωτερική τριβή της τύρβης και την έντασή της(σχήματα 3.17, 3.18 και 3.19).



Σχήμα 3.17: Τυρβώδης κινητική ενέργεια της ροής γύρω από τα εκ περιστροφής συμμετρικά σώματα $Re= 9 \cdot 10^5$



Σχήμα 3.18: Τυρβώδης εσωτερική τριβή της ροής γύρω από τα εκ περιστροφής συμμετρικά σώματα, $Re= 9 \cdot 10^5$



Σχήμα 3.19: Ένταση της τύρβης της ροής γύρω από τα εκ περιστροφής συμμετρικά σώματα, $Re=9 \cdot 10^5$

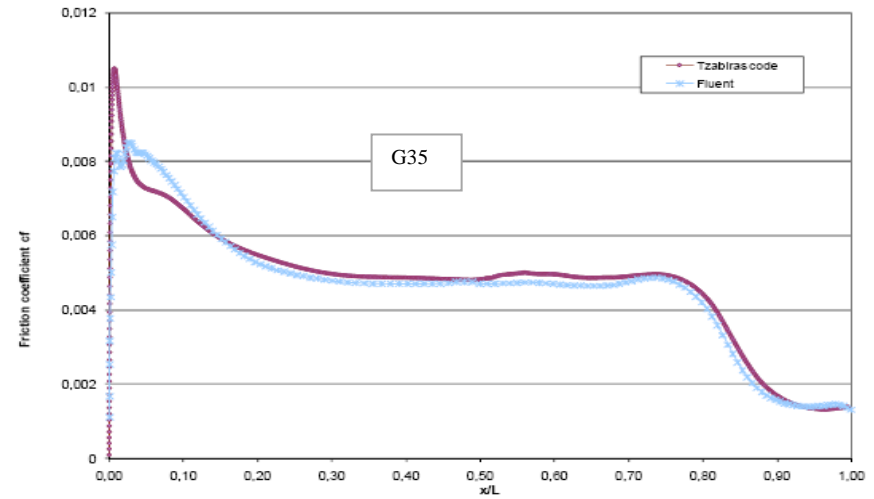
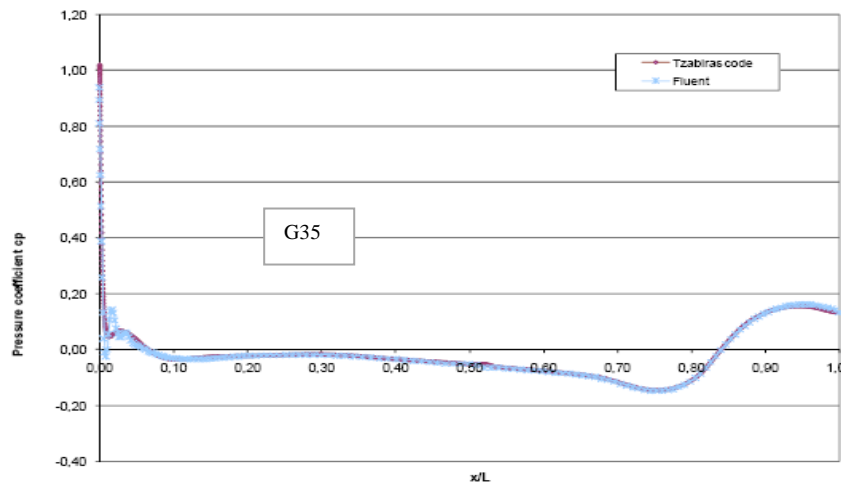
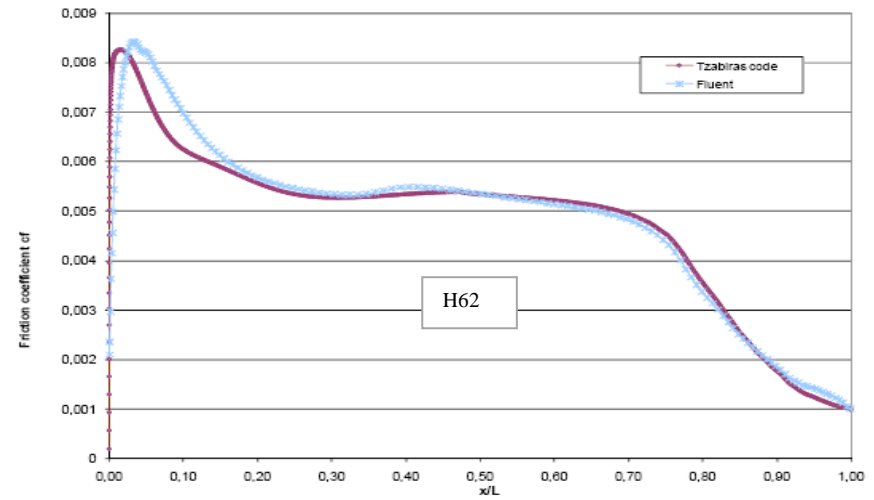
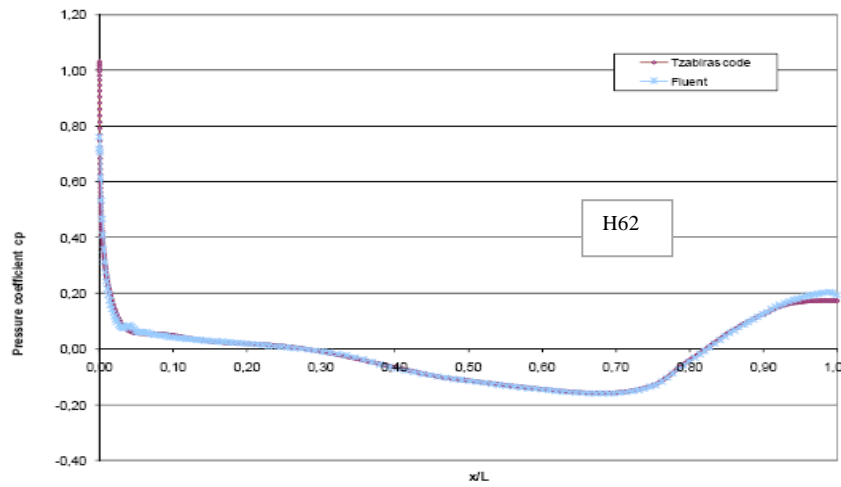
ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΡΟΗΣ

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα για την συνολική αντίσταση λόγω πίεσης και λόγω τριβής πάνω στην επιφάνεια των σωμάτων, όπως αυτά υπολογίστηκαν και με τις δύο μεθόδους προσομοίωσης της ροής. Επίσης δίνονται και τα συγκριτικά διαγράμματα των συντελεστών πίεσης και τριβής όπως αυτοί κατανέμονται κατά μήκος της επιφάνειας των σωμάτων, υπολογισμένοι και με τις δύο μεθόδους επίλυσης (κώδικας Drevol και Fluent) στα σχήματα 3.20 και 3.21.

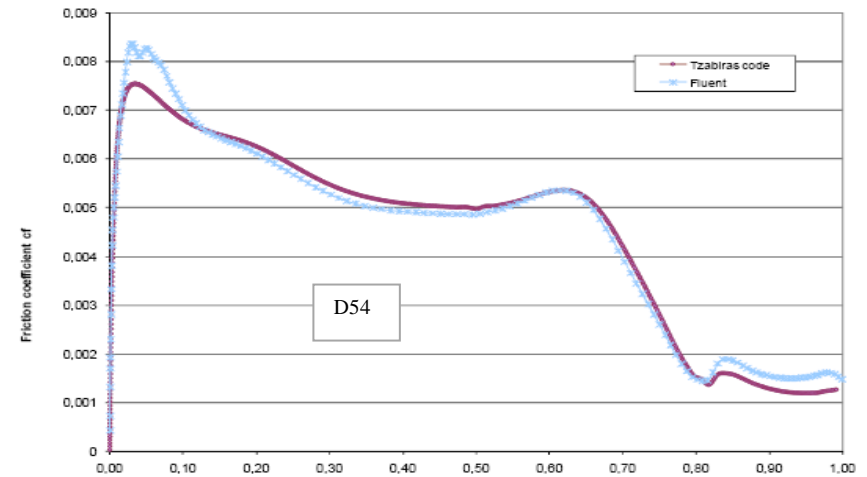
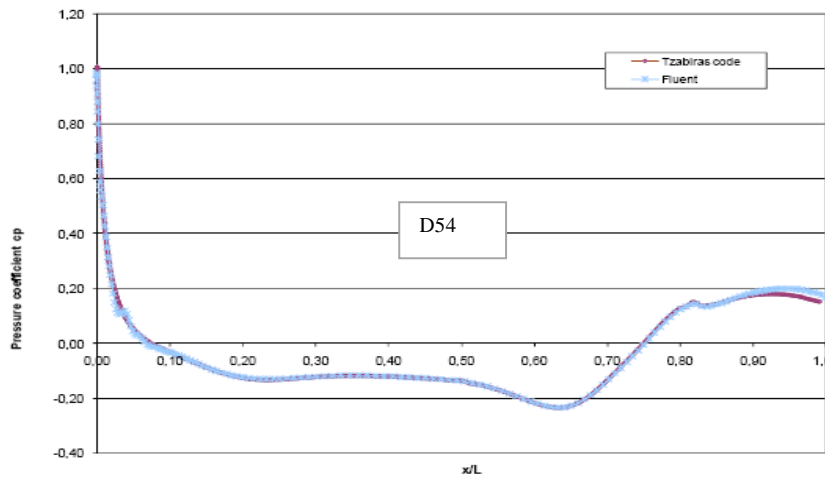
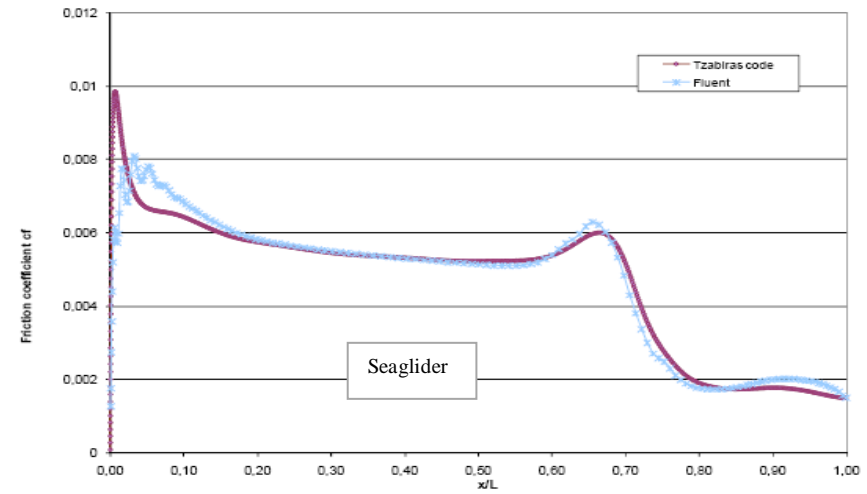
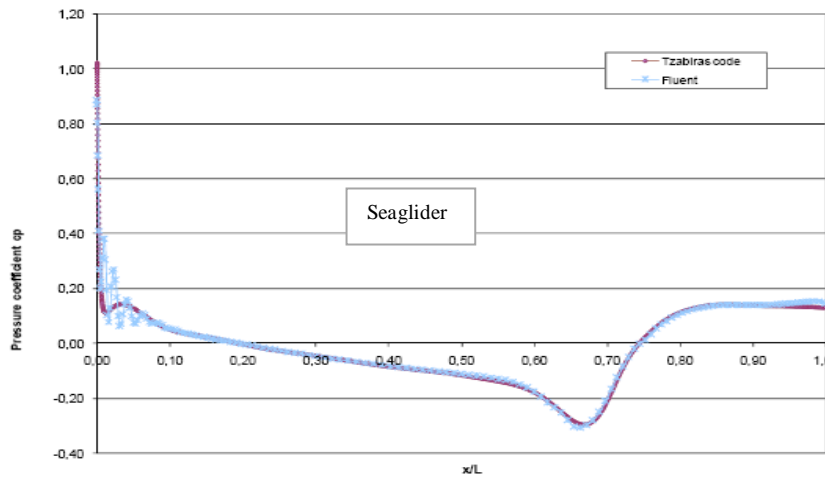
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Γεωμετρία	Αντίσταση R [Nt] Tzabiras	Αντίσταση R [Nt] Fluent	CR Tzabiras	CR Fluent	CF Tzabiras	CF Fluent	CP Tzabiras code	CP Fluent
H62	0.720	0.698	5.28E-3	5.78E-3	4.90E-3	5.28E-3	3.86E-4	4.98E-4
G35	0.608	0.566	5.22E-3	4.69E-3	4.86E-3	4.32E-3	3.54E-4	3.68E-4
Seaglider	0.771	0.742	5.45E-3	6.14E-3	4.92E-3	5.46E-3	5.25E-4	6.82E-4
D54	1.05	0.986	5.57E-3	8.16E-3	4.90E-3	7.15E-3	6.71E-4	1.01E-3

Χρησιμοποιώντας και τις δύο μεθόδους επίλυσης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η γεωμετρία του σώματος G35 παρουσιάζει τα καλύτερα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά, δηλαδή τη μικρότερη αντίσταση. Μειονεκτεί όμως στο γεγονός ότι το σχήμα του καταλήγει στον μικρότερο όγκο, κάτι που δεν ανταποκρίνεται στις χωροταξικές ανάγκες του υδροπτερού. Ο όγκος του οχήματος χρειάζεται να είναι τέτοιος ώστε να περιλαμβάνει όλα τα αναγκαία μετρητικά όργανα και εξαρτήματα για την κίνηση, συντήρηση του οχήματος καθώς και τη μετάδοση των αποτελεσμάτων. Επιλέγεται για το σχήμα του περιβλήματος η γεωμετρία του Seaglider. Στον πρωταρχικό σχεδιασμό χρησιμοποιείται το σχέδιο του Seaglider, ένα υδροδυναμικό περίγραμμα στο οποίο θα προστεθούν τα κατάλληλα πτερύγια. Οι απαιτήσεις των αποστολών που θα πραγματοποιεί το υδροπτερο, όπως το ωφέλιμο φορτίο, η ταχύτητα και η εμβέλεια θα ληφθούν υπόψη για τον υπολογισμό του απαιτούμενου όγκου του οχήματος.



Σχήμα 3.20: Συγκριτικά διαγράμματα των συντελεστών πίεσης και τριβής κατά μήκος του σώματος, με τις δύο μεθόδους επίλυσης της ροής, $Re = 9 \cdot 10^5$

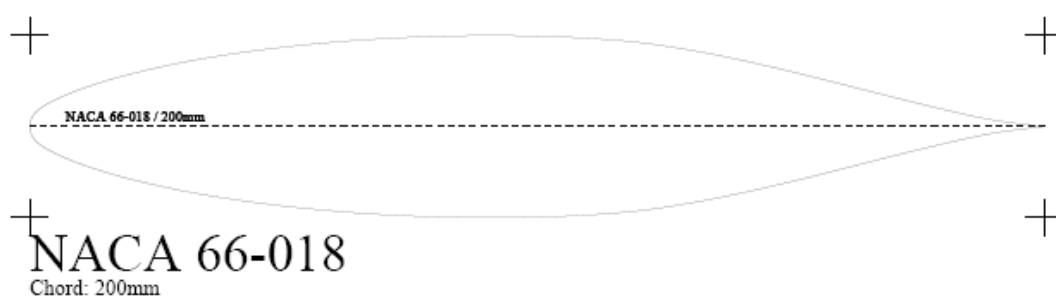


Σχήμα 3.21: Συγκριτικά διαγράμματα των συντελεστών πίεσης και τριβής κατά μήκος του σώματος, με τις δύο μεθόδους επίλυσης της ροής, $Re = 9 \cdot 10^5$

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ – ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΚΑΙ ΚΕΡΑΙΑΣ

Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός του υδροπτέρου στις τρεις διαστάσεις απαιτεί τον σχεδιασμό πτερυγίων και κεραίας και την προσθήκη αυτών στο εκ περιστροφής συμμετρικό σώμα του υποβρυχίου οχήματος. Η επιλογή κατάλληλης υδροτομής για την ανάπτυξη των πτερυγίων έγινε μετά από μελέτη της έρευνας των χαρακτηριστικών αντίστασης που αναπτύσσουν διάφορες υδροτομές [1], [44], [82], [4].

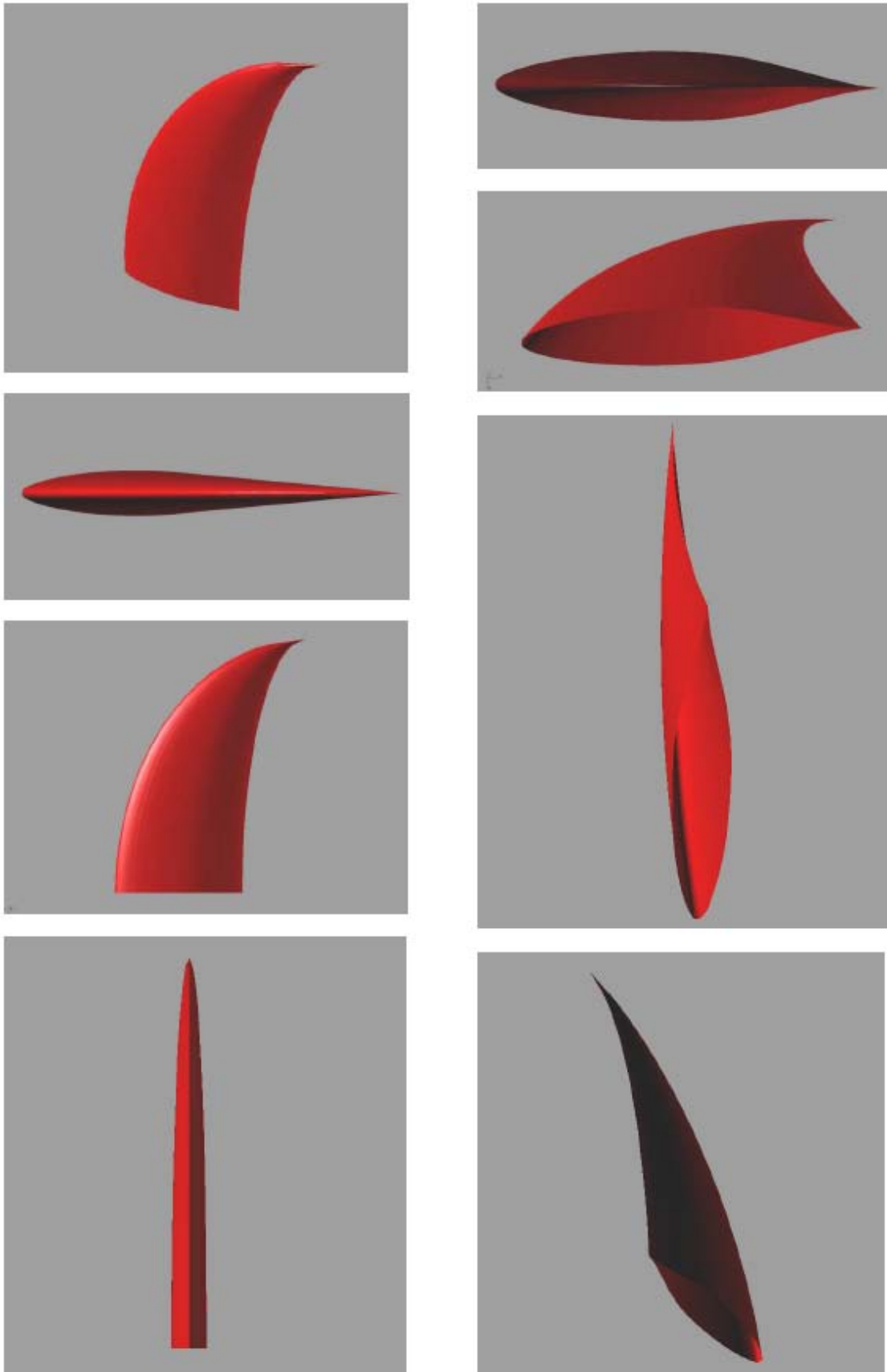
Στη συνέχεια υιοθετείται το χαμηλής αντίστασης αξονοσυμμετρικό σχήμα του Seaglider για το σχεδιασμό του περιβλήματος και προστίθενται τα πτερύγια και η κεραία. Επιλέγεται η κατατομή της υδροτομής NACA66-018 για το σχεδιασμό των πτερυγίων (σχήμα 3.22). Η κατατομή της υδροτομής αυτής επιτρέπει την εκτεταμένη στρωτή ροή που έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερη αντίσταση. Τα πτερύγια τοποθετούνται μετά την μέγιστη διάμετρο του οχήματος και προς την πρύμνη του. Το τελικό ολοκληρωμένο σχέδιο του περιβλήματος του υδροπτέρου συμπεριλαμβανομένης και της κεραίας σχηματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το τρισδιάστατο λογισμικό σχεδιασμού Rhinoceros.



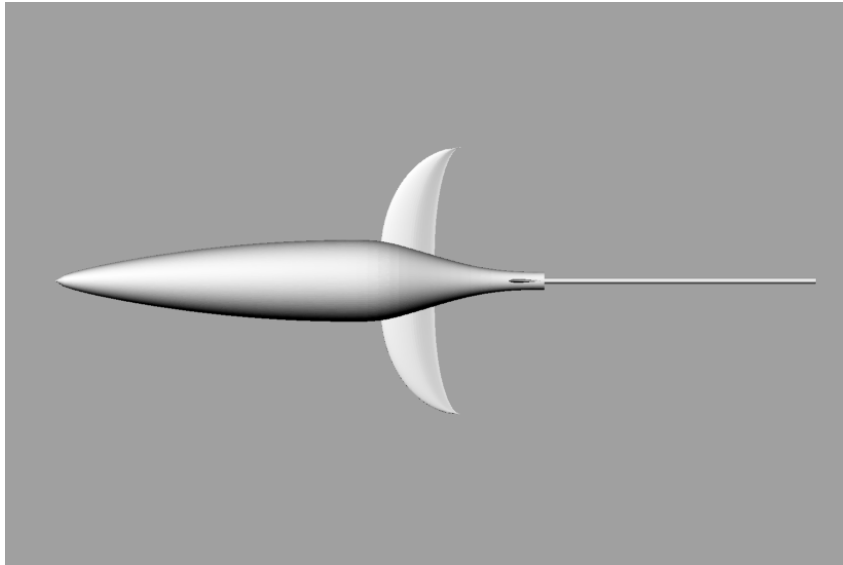
Σχήμα 3.22: Κατατομή της υδροτομής NACA 66-018

Με βάση την υδροτομή αναπτύσσεται το πτερύγιο στο σχεδιαστικό Rhino. Διάφορες απόψεις του φαίνονται σε επόμενο σχήμα. Τα μεγάλα πτερύγια πλάτους 0,2 m και μήκους 0,4 m τοποθετούνται κατά το επίπεδο x-y ακριβώς πίσω από τη μέγιστη διάμετρο του υδροπτέρου και δίνουν συνολικό άνοιγμα πτερυγίων 0,986 m. Τα μικρά πτερύγια πλάτους 0,08 m και μήκους 0,16 m τοποθετούνται στην ουρά του οχήματος και έχουν συνολικό άνοιγμα 0,386 m. Το εκ περιστροφής συμμετρικό σώμα του

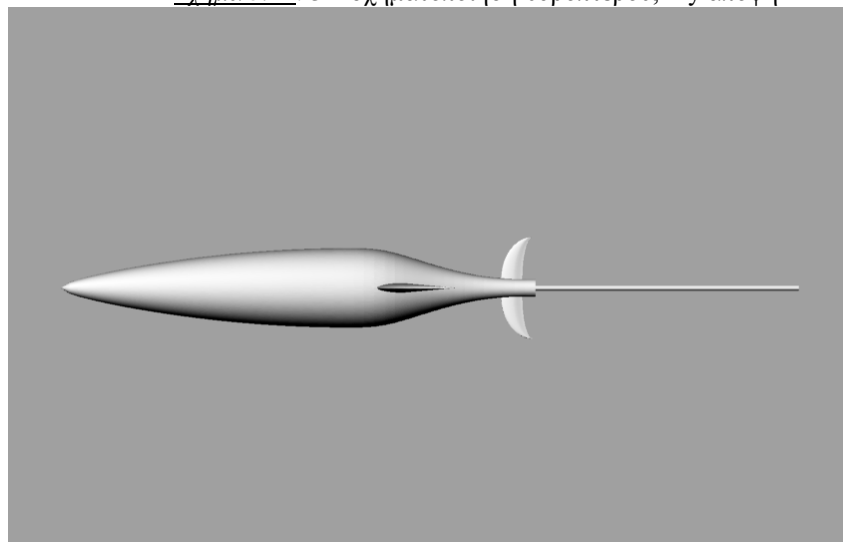
υδροπτέρου έχει μήκος 1,8 m και μέγιστη διάμετρο 0,3 m. Τέλος προστίθεται η κεραία μήκους 1 m και διαμέτρου 0,002 m.



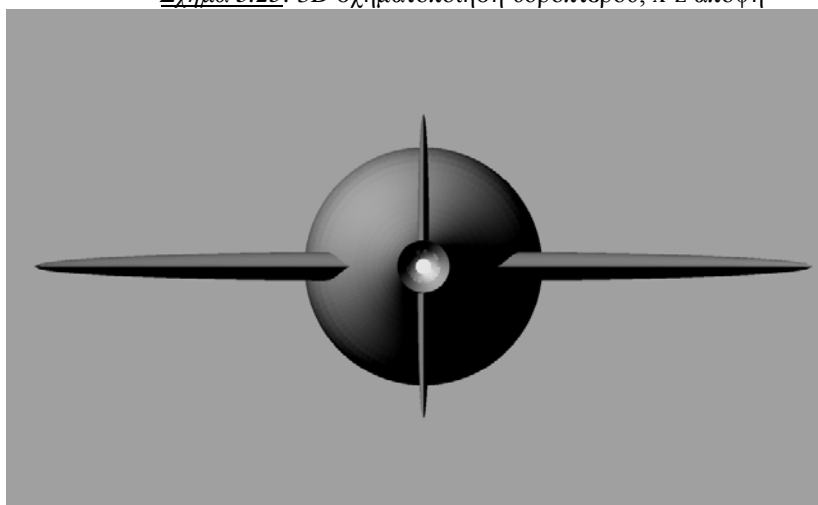
Σχήμα 3.23: Διάφορες 3D απόψεις του περυγίου



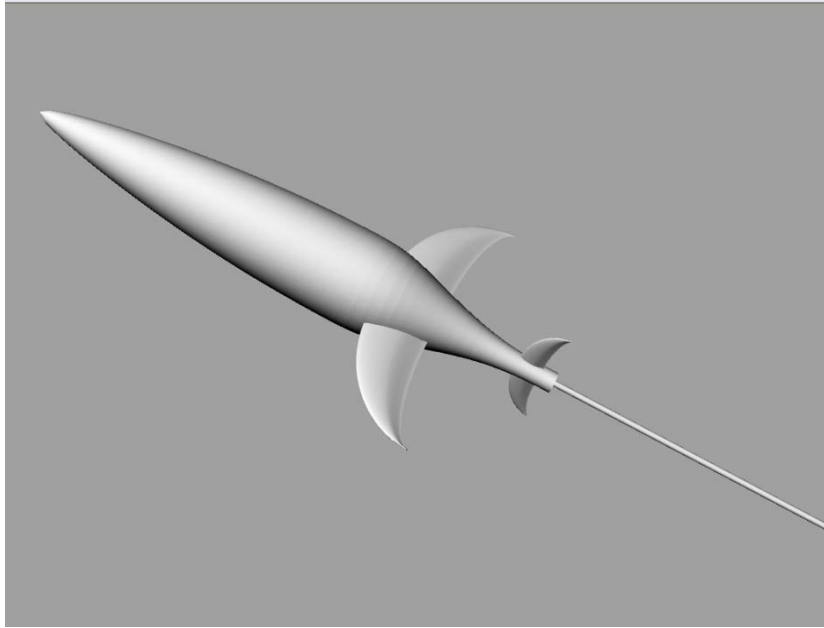
Σχήμα 3.24: 3D σχηματοποίηση υδροπτέρου, x-y άποψη



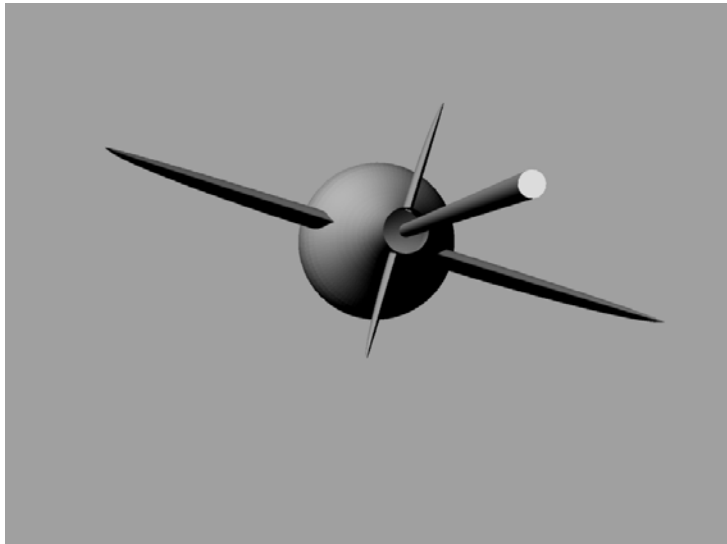
Σχήμα 3.25: 3D σχηματοποίηση υδροπτέρου, x-z άποψη



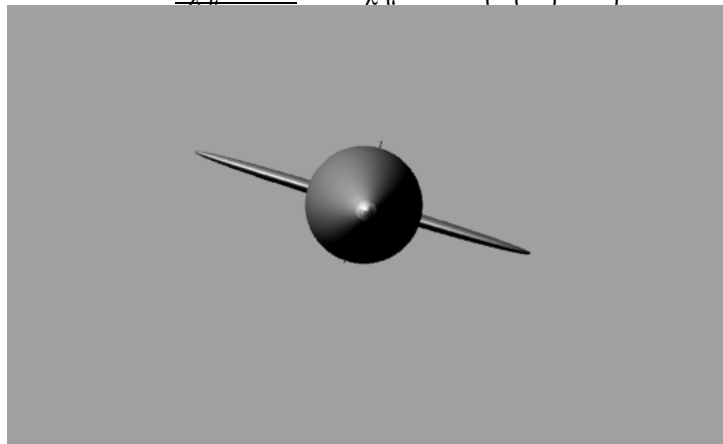
Σχήμα 3.26: 3D σχηματοποίηση υδροπτέρου, y-z άποψη



Σχήμα 3.27: 3D σχηματοποίηση υδροπτέρου



Σχήμα 3.28: 3D σχηματοποίηση υδροπτέρου



Σχήμα 3.29: 3D σχηματοποίηση υδροπτέρου

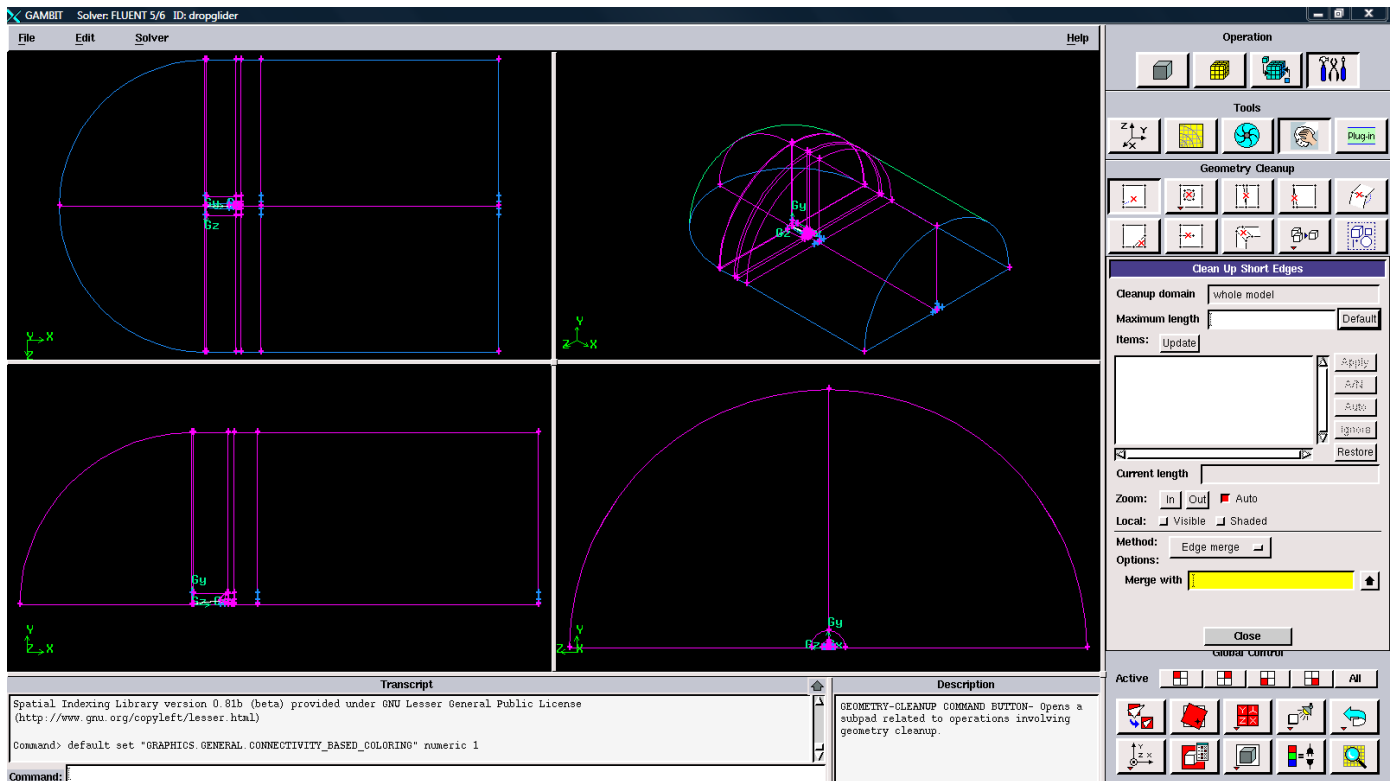
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟ FLUENT

Στην ενότητα αυτή επιλύεται το πεδίο ροής γύρω από το τρισδιάστατο μοντέλο, όπως αυτό ολοκληρώθηκε σχεδιαστικά στην προηγούμενη ενότητα. Σε πρώτη φάση η κατασκευή της γεωμετρίας της τρισδιάστατης ροής γύρω από το όχημα γίνεται στον προ - επεξεργαστή Gambit, καθώς και η παραγωγή του πλέγματος. Στη συνέχεια το πεδίο προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας τον λύτη Fluent για την περίπτωση μόνιμης ροής. Θεωρούνται δύο περιπτώσεις μοντέλων τύρβης το μοντέλο δύο εξισώσεων SST (Shear – Stress Transport) k- ω και το πιο περίπλοκο Reynolds Stress Model (RSM, 9 εξισώσεων για την τρισδιάστατη ροή) και τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους. Εξετάζονται οι περιπτώσεις όπου η ροή προσπίπτει παράλληλα πάνω στο όχημα αλλά και υπό γωνία 2 μοιρών (κάθοδος υποβρυχίου) και -2 μοιρών (άνοδος). Τέλος η ροή θεωρείται μη μόνιμη και το πρόβλημα επιλύεται συναρτήσει του χρόνου.

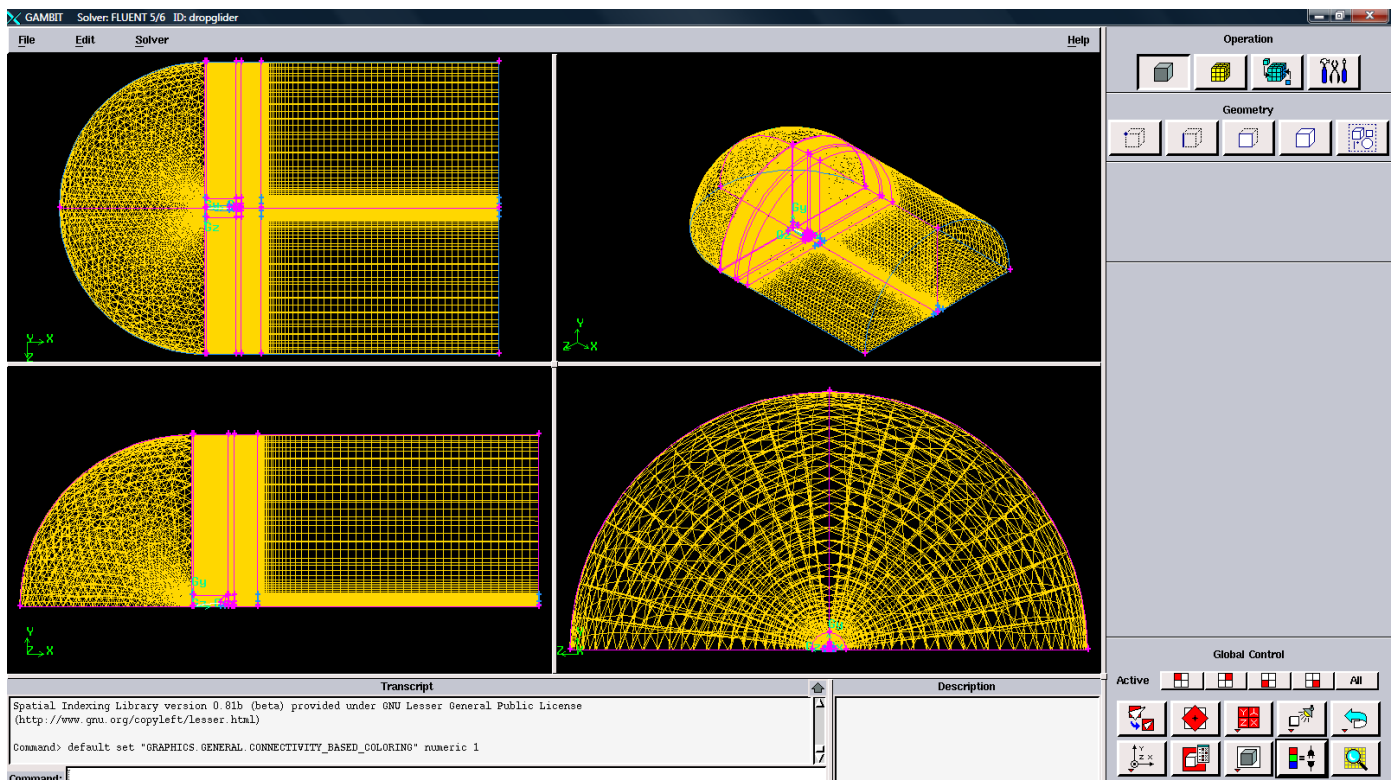
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΣΤΟ GAMBIT

Σε πρώτη φάση χρησιμοποιούμε τον προ - επεξεργαστή Gambit για την διακριτοποίηση του πεδίου ροής, ώστε να προχωρήσουμε στην CFD ανάλυση. Η ολοκληρωμένη γεωμετρία του υποβρυχίου οχήματος εισάγεται στον Gambit για την κατασκευή της γεωμετρίας γύρω από αυτό. Το πεδίο ορίζεται επαρκώς μεγάλο γύρω από το όχημα, ενώ εκμεταλλευόμαστε τη συμμετρία ως προς το x-z επίπεδο ώστε να κερδίσουμε σε υπολογιστικό χρόνο κατασκευάζοντας το μισό πεδίο. Στη φάση αυτή η θεώρηση αυτή είναι πολύ ικανοποιητική για τους υπολογισμούς που θα γίνουν, αφού θα οριστούν μόνο γωνίες κατά το pitch και καμία roll στροφή.

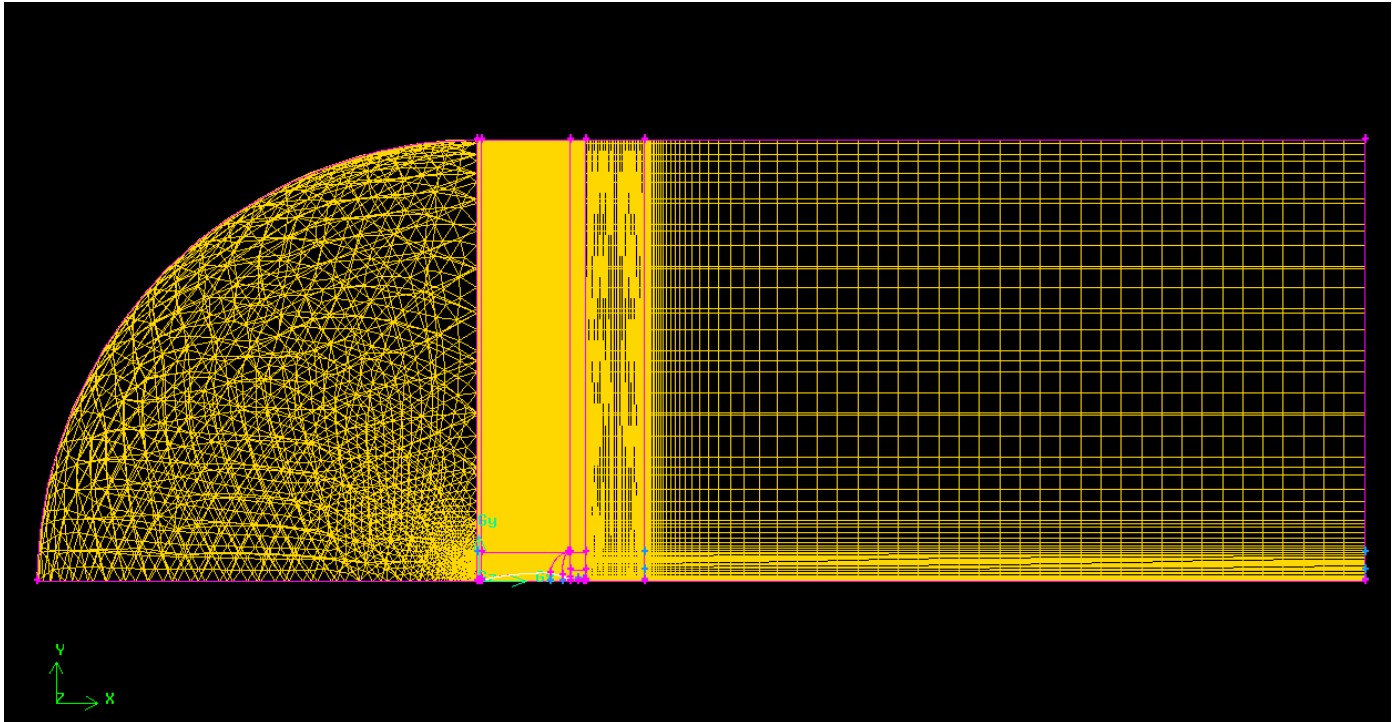
Αφού δημιουργηθεί η κατάλληλη γεωμετρία γίνεται η κατασκευή του πλέγματος. Χρησιμοποιούνται εξάεδρα και πρίσματα ώστε να αποδοθεί καλύτερα η ροή και το οριακό στρώμα που αναπτύσσεται, με συνολικό αριθμό στοιχείων 324268. Ο αριθμός αυτός δίνει πολύ καλή πυκνότητα πλέγματος για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Εξετάζεται η ποιότητά του και τέλος καθορίζονται οι οριακές επιφάνειες και η εισαγωγή των οριακών συνθηκών.



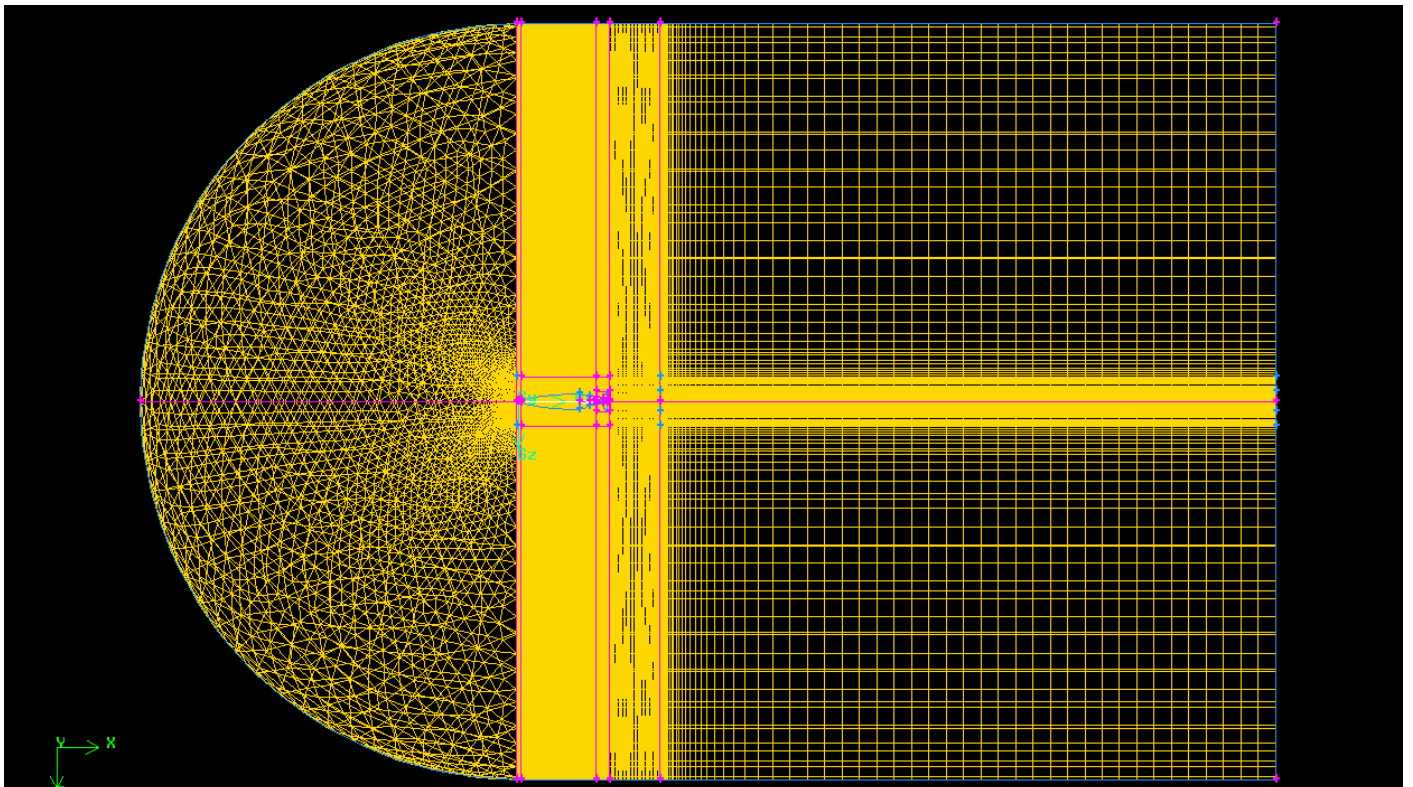
Σχήμα 3.30: Τριδιάστατη γεωμετρία του πεδίου ροής στο Gambit.



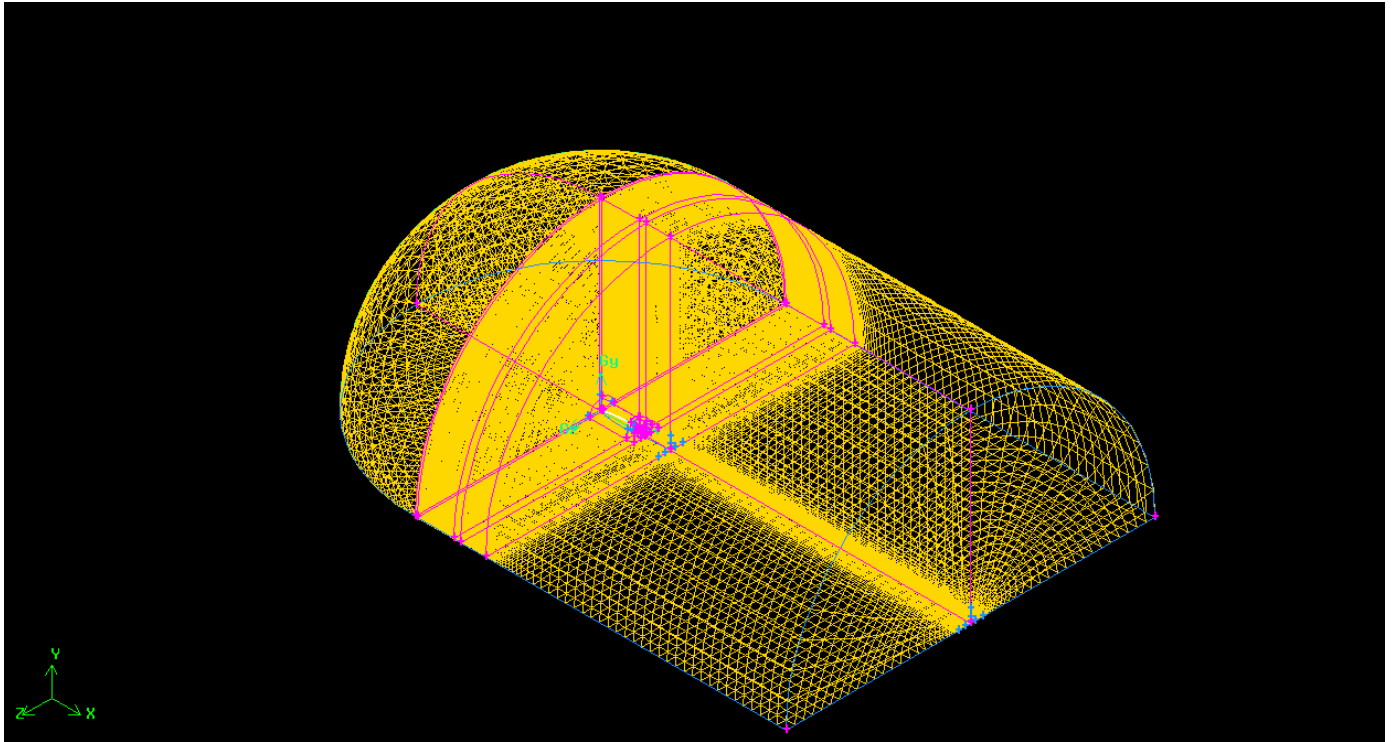
Σχήμα 3.31: Διακριτοποιημένο πεδίο ροής στο Gambit.



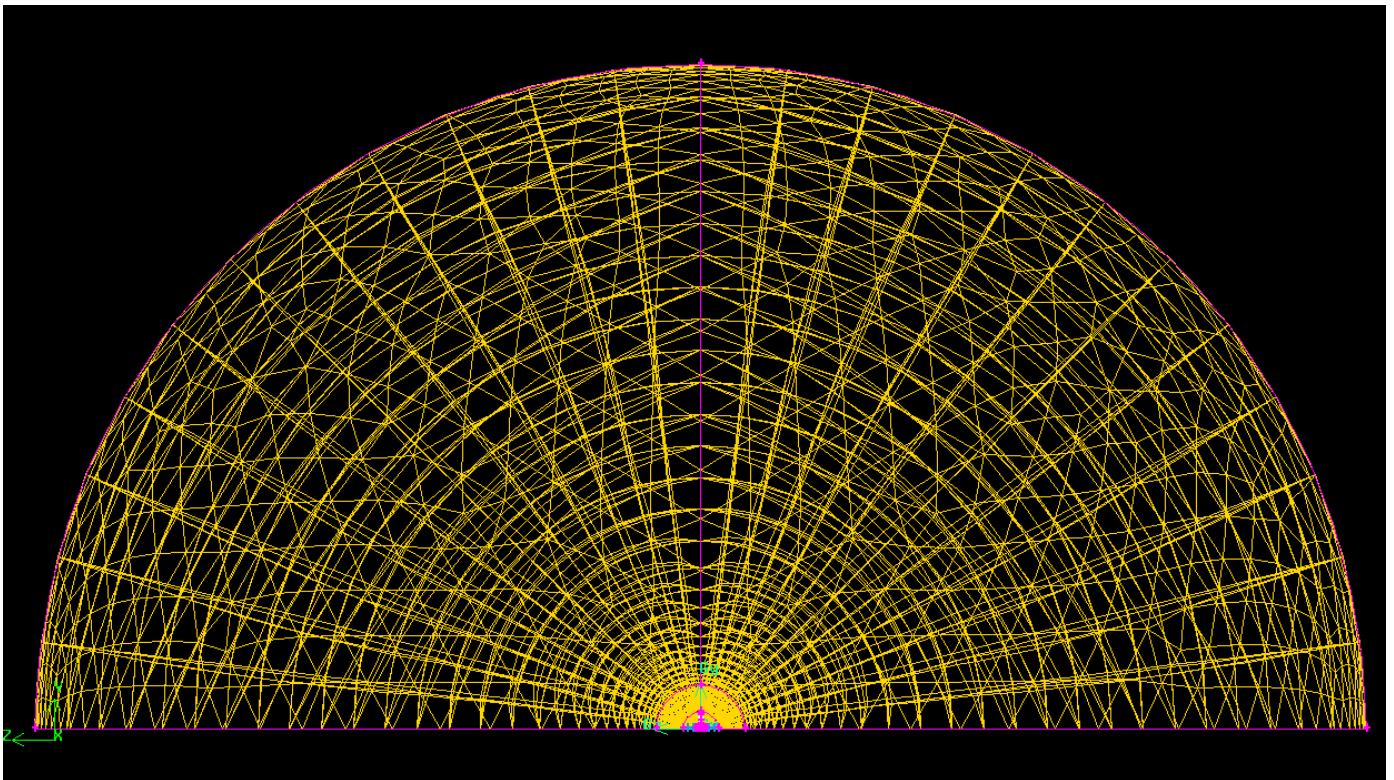
Σχήμα 3.32: Το τρισδιάστατο πλέγμα κατά το επίπεδο x-y.



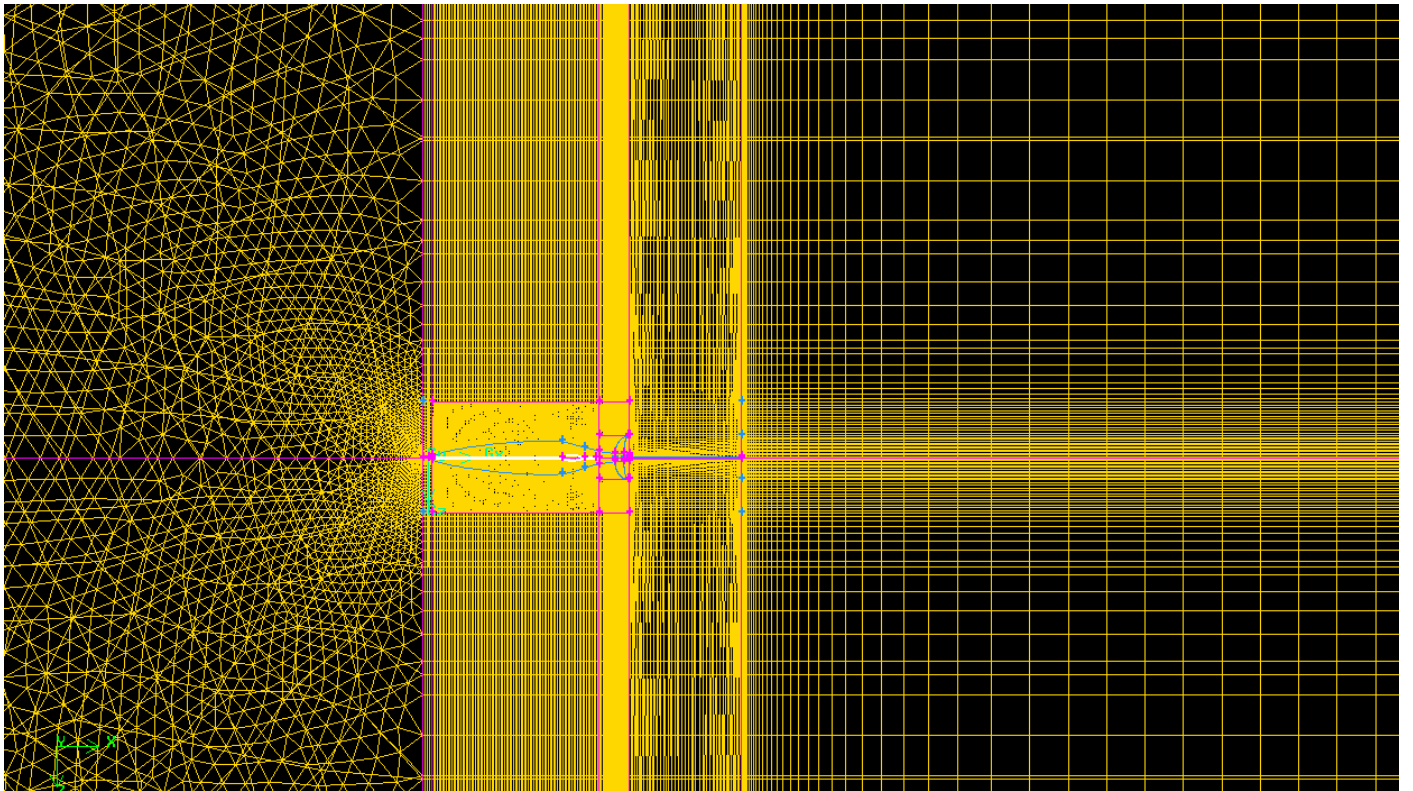
Σχήμα 3.33: Το τρισδιάστατο πλέγμα κατά το επίπεδο x-z.



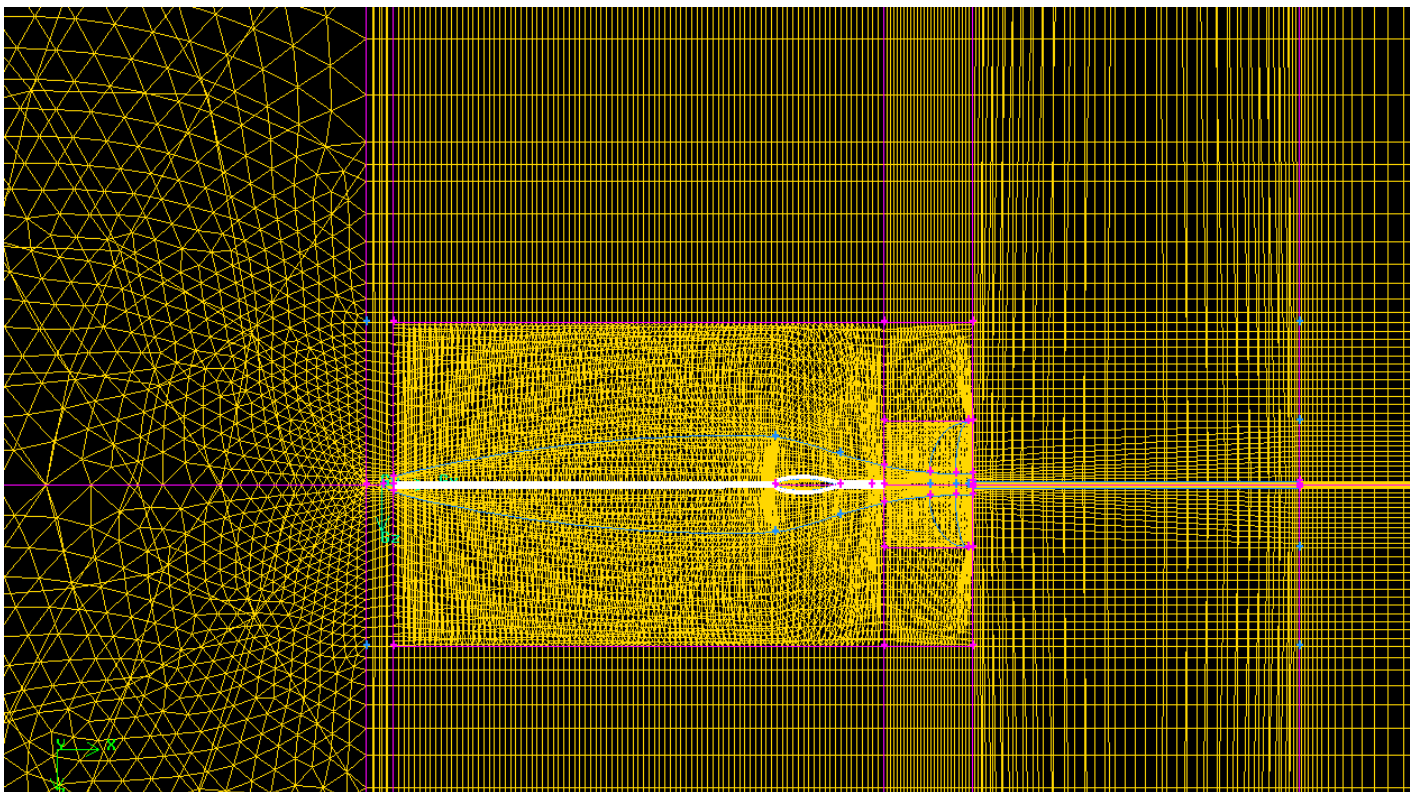
Σχήμα 3.34: Το τρισδιάστατο πλέγμα στο χώρο.



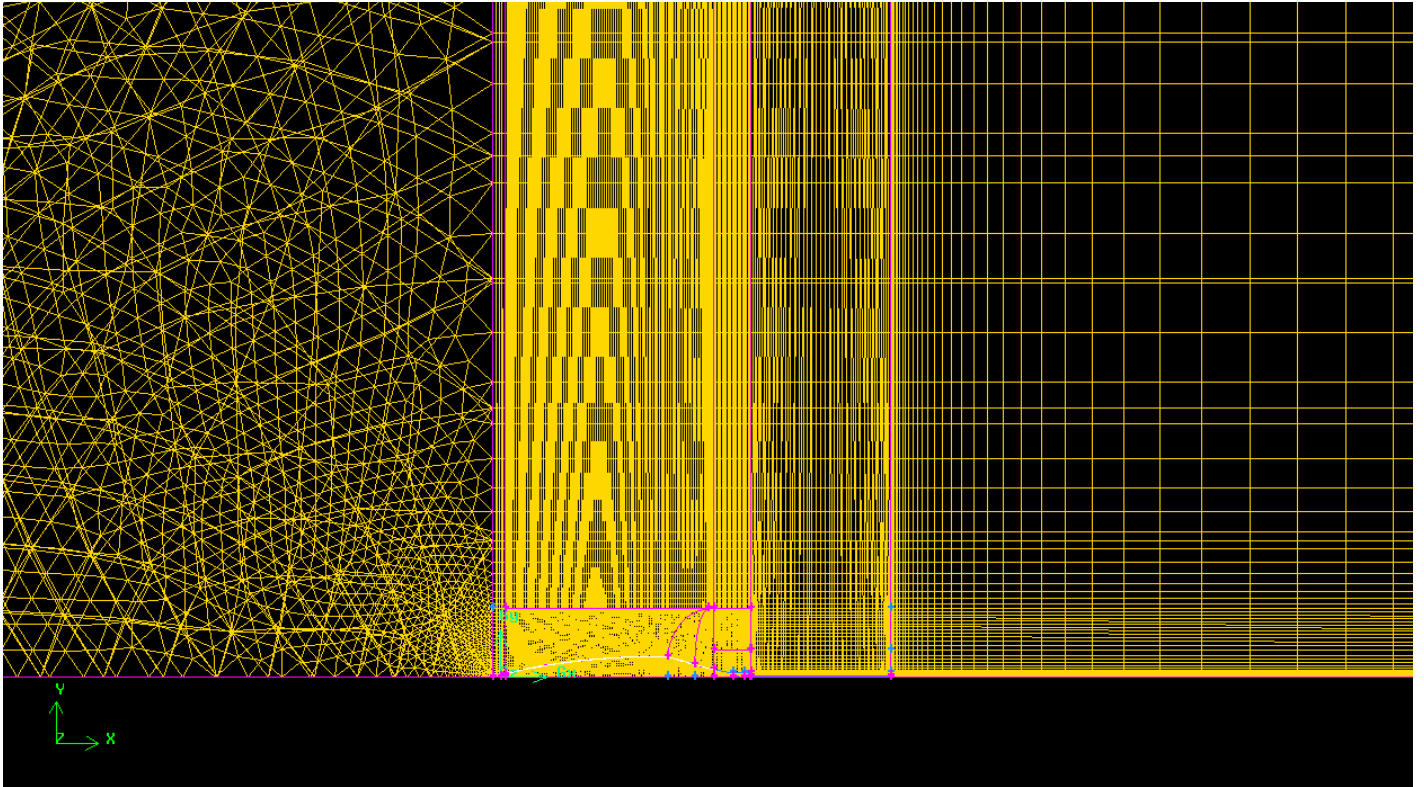
Σχήμα 3.35: Το τρισδιάστατο πλέγμα κατά το επίπεδο z-y.



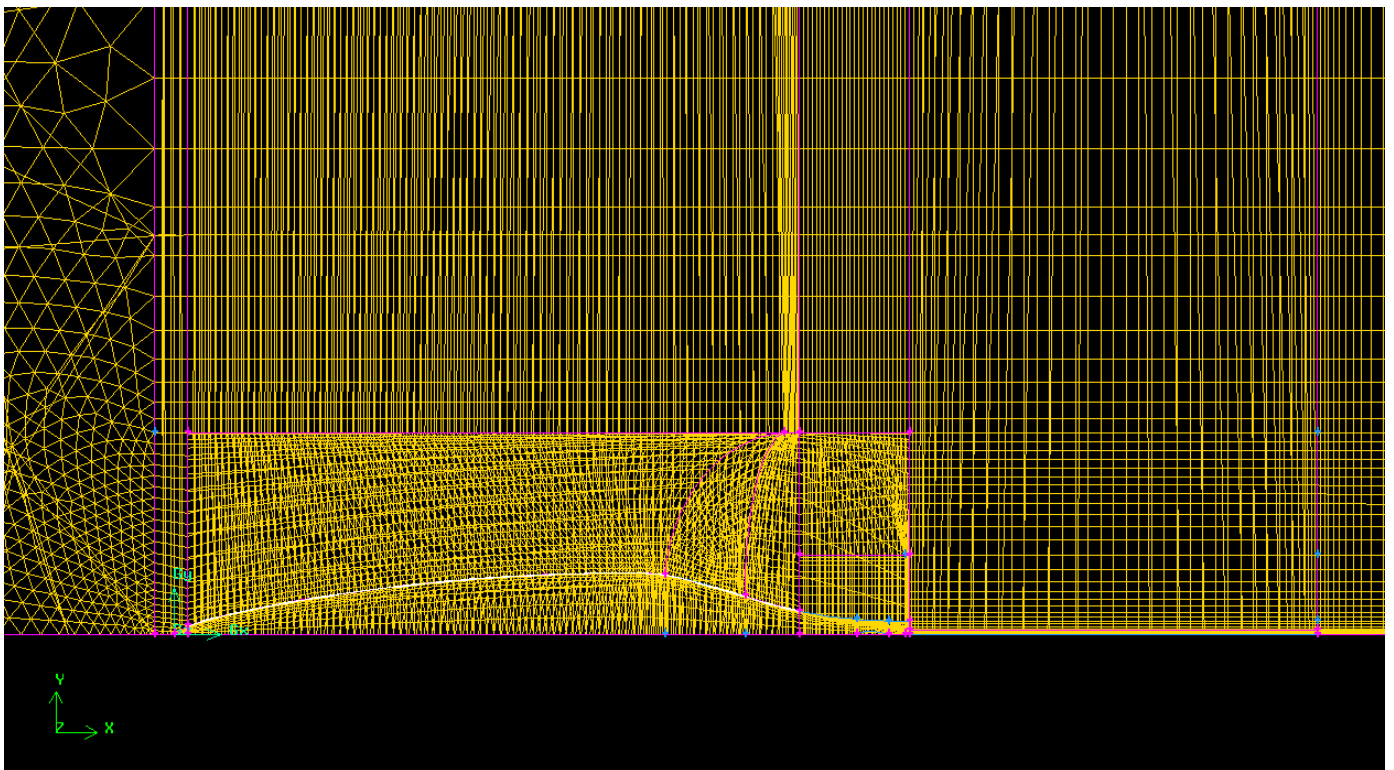
Σχήμα 3.36: Το διακριτοποιημένο πεδίο γύρω από το όχημα (επίπεδο x-z).



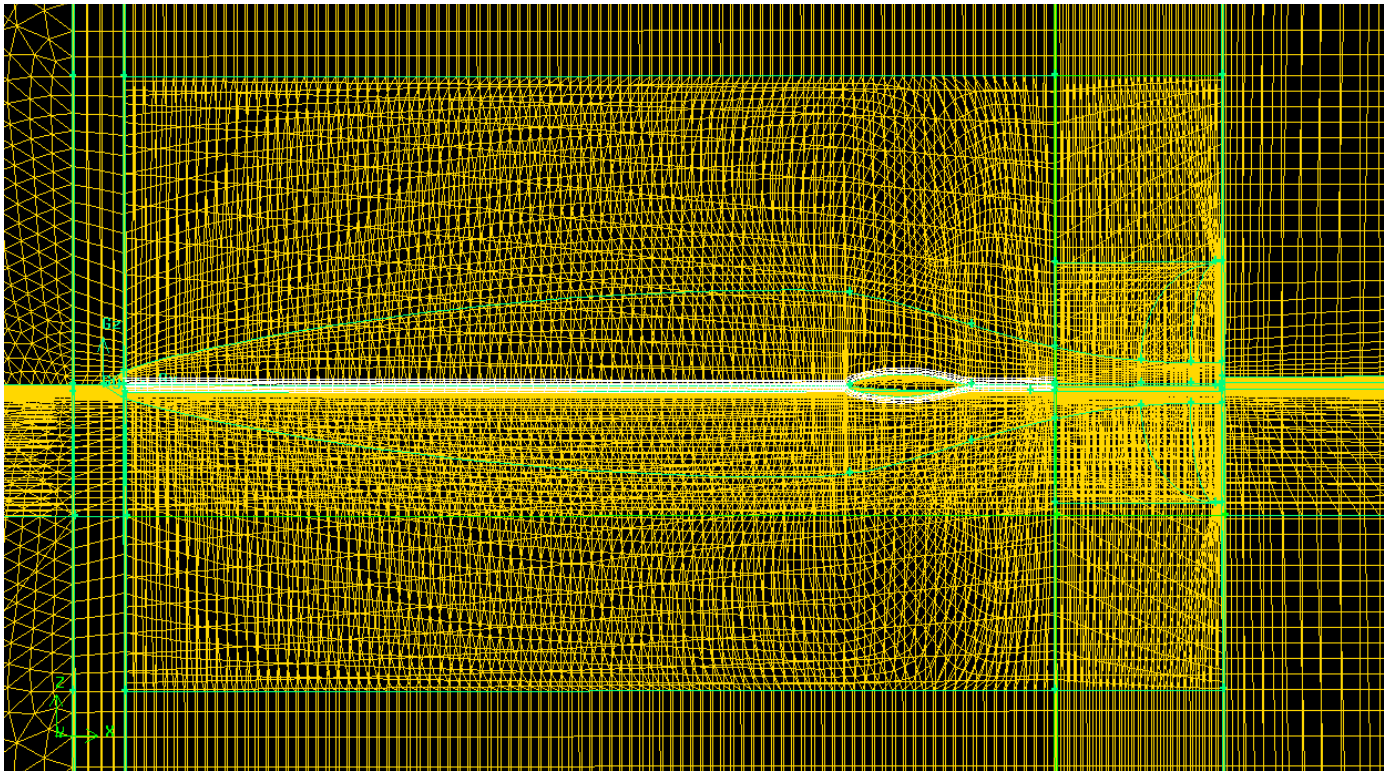
Σχήμα 3.37: Το διακριτοποιημένο πεδίο γύρω από το όχημα (επίπεδο x-z).



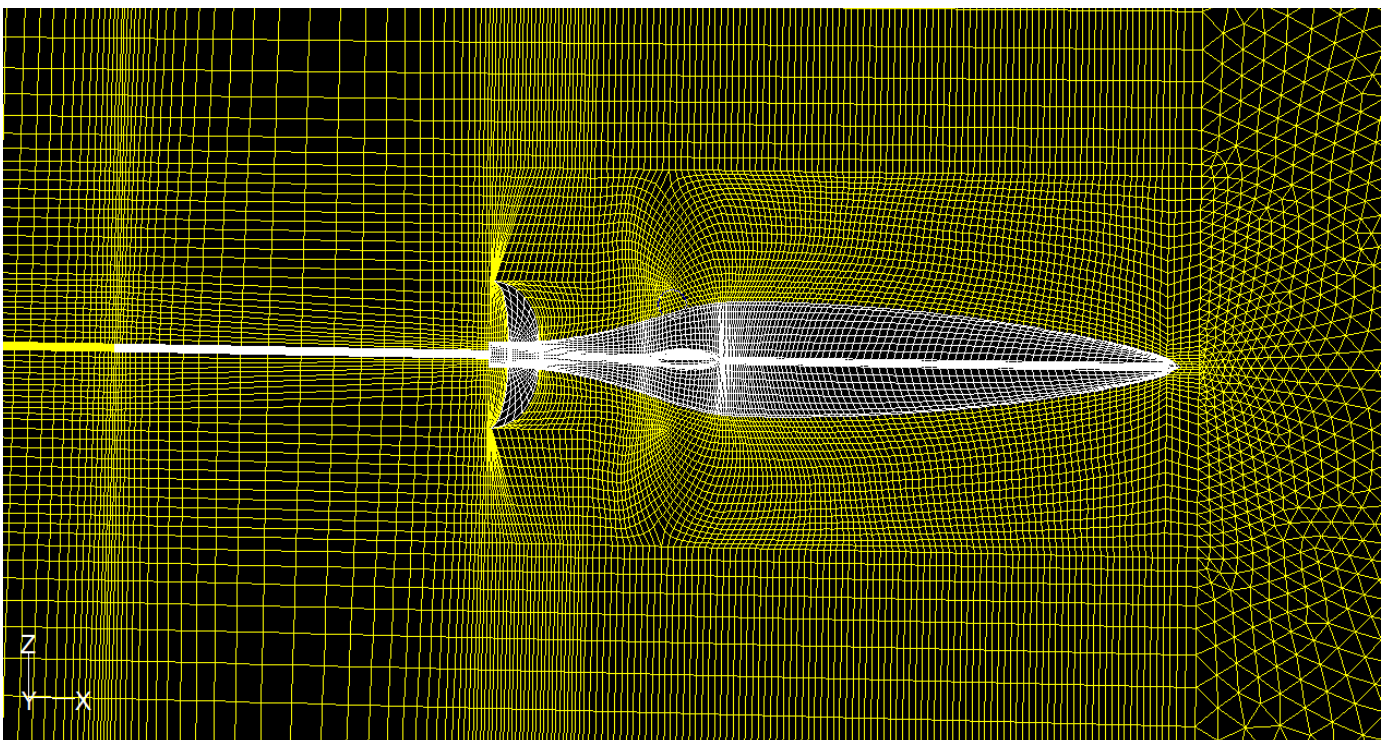
Σχήμα 3.38: Το διακριτοποιημένο πεδίο γύρω από το όχημα (επίπεδο x-y)



Σχήμα 3.39: Το διακριτοποιημένο πεδίο γύρω από το όχημα (επίπεδο x-y)



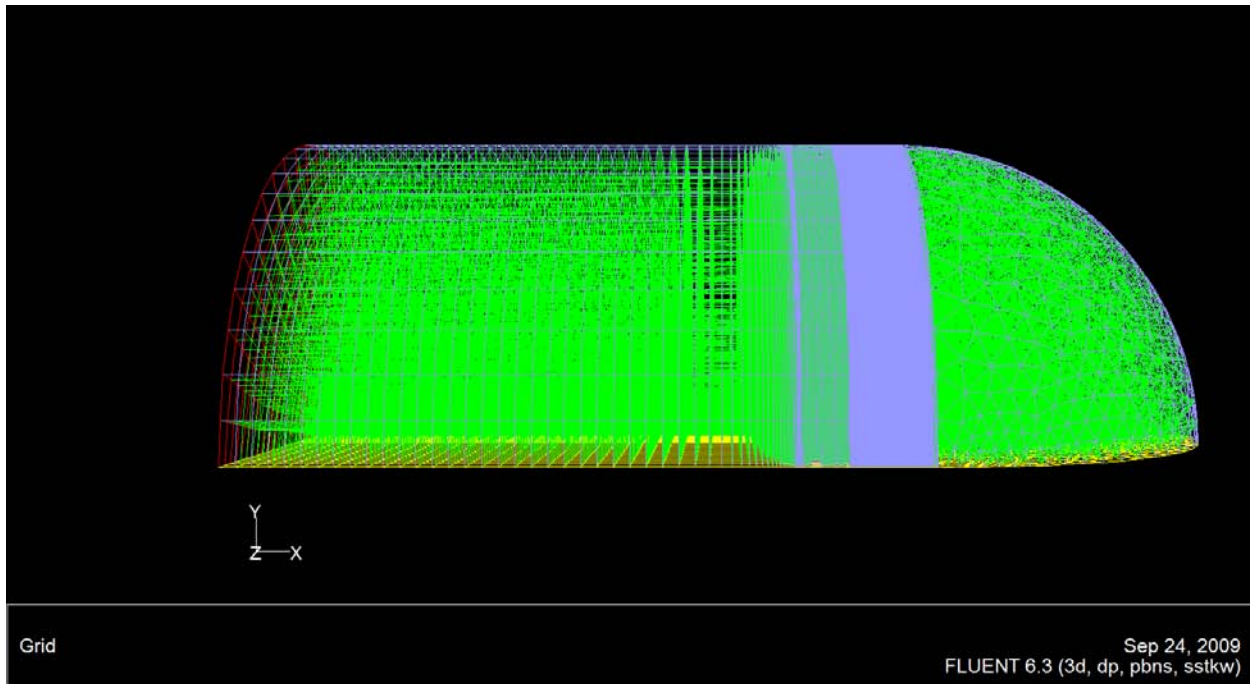
Σχήμα 3.40: Το διακριτοποιημένο πεδίο γύρω από το όχημα (επίπεδο x-z).



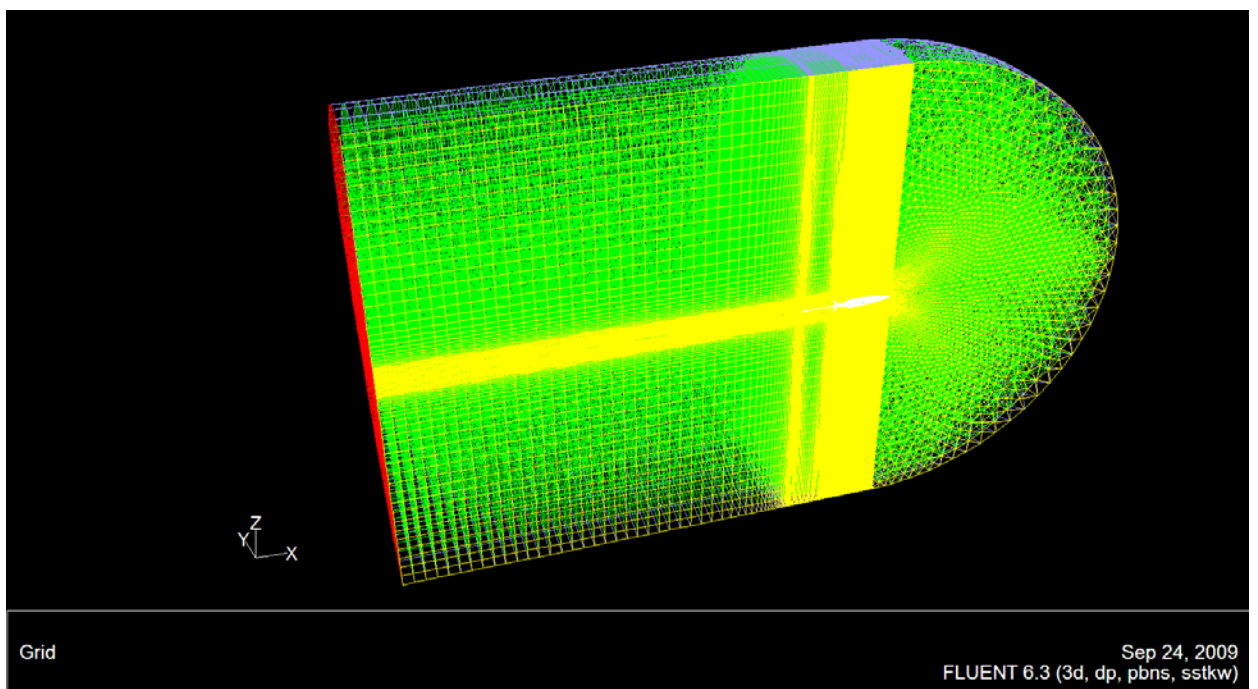
Σχήμα 3.41: Το διακριτοποιημένο πεδίο γύρω από το όχημα (επίπεδο x-z).

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΤΟ FLUENT – ΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Στη συνέχεια το διακριτοποιημένο πεδίο εισάγεται στο Fluent για να γίνει η επίλυση της ροής. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέγεται το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο τύρβης, ορίζονται οι ιδιότητες των υλικών και προδιαγράφονται οι οριακές συνθήκες σε όλα τα όρια.



Σχήμα 3.42: Το τρισδιάστατο πλέγμα όπως εισάχθηκε στο Fluent.



Σχήμα 3.43: Το τρισδιάστατο πλέγμα όπως εισάχθηκε στο Fluent.

Στη συνέχεια εξετάζονται περιπτώσεις από διάφορα στιγμιότυπα της κίνησης του οχήματος θεωρώντας αρχικά τη ροή μόνιμη και στη συνέχεια γίνεται η προσομοίωση της μη μόνιμης ροής κατά τη διάρκεια κάποιων κύκλων μιας πριονωτής διαδρομής. Τα στιγμιότυπα κίνησης που θα εξεταστούν είναι με ταχύτητα ροής παράλληλη στον κύριο άξονα του οχήματος, αλλά και υπό γωνία, κατά την κάθοδο και άνοδο του υποβρυχίου. Για την μελέτη αυτών των περιπτώσεων επιλέγεται ως καταλληλότερο το μαθηματικό μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων SST (Shear – Stress Transport) k- ω .

Οι συντελεστές υποχαλάρωσης που χρησιμοποιούνται για την ευστάθεια της επαναληπτικής λύσης είναι για την πίεση 0.5, για την ορμή 0.3, για το k 0.5, για το ω 0.5 και τέλος για το ιξώδες της τύρβης 0.7. Επιπλέον για τα τελικά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται σχήματα ελέγχου δευτέρου βαθμού ακριβείας.

Παρουσιάζονται αποτελέσματα για το συντελεστή πίεσης και επιφανειακής τριβής κατά μήκος του οχήματος καθώς και τις δυνάμεις άνωσης και αντίστασης.

Ο αδιάστατος συντελεστής πίεσης ορίζεται από την εξίσωση: $c_p = \frac{p - p_{ref}}{q_{ref}}$, όπου p είναι η στατική πίεση p_{ref} είναι η πίεση αναφοράς η οποία στην περίπτωσή μας είναι μηδενική και $q_{ref} = \frac{1}{2} \rho_{ref} v_{ref}^2$ είναι η δυναμική πίεση αναφοράς με $\rho_{ref} = 1025 \text{ kg / m}^3$ και v_{ref} την πυκνότητα και την εκάστοτε ταχύτητα της ροής αντίστοιχα.

Ο συντελεστής επιφανειακής τριβής είναι και αυτός μία αδιάστατη παράμετρος η οποία ορίζεται ως ο λόγος της διατμητικής τάσης προς τη δυναμική

πίεση αναφοράς. $c_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho_{ref} v_{ref}^2}$ όπου τ_w είναι η διατμητική τάση.

Το πρόγραμμα υπολογίζει τις διάφορες συνιστώσες της δύναμης που ασκούνται πάνω στο όχημα κατά τη διεύθυνση που θα ζητηθεί ορίζοντας ένα διάνυσμα κατεύθυνσης \vec{a} . Η συνολική δύναμη που ασκείται πάνω στο όχημα κατά τη διεύθυνση του καθορισμένου διανύσματος \vec{a} υπολογίζεται σαν το άθροισμα των

παρακάτω εσωτερικών γινομένων: $F_a = \bar{a} \cdot \bar{F}_p + \bar{a} \cdot \bar{F}_v$, όπου \bar{F}_p η δύναμη λόγω πίεσης και \bar{F}_v η δύναμη λόγω τριβής.

Αντίστοιχα με τις δυνάμεις λόγω πίεσης, τριβής και τη συνολική υπολογίζονται και οι ανάλογοι αδιάστατοι συντελεστές διαιρώντας την αντίστοιχη δύναμη με $\frac{1}{2} \rho v^2 A$ όπου ρ η πυκνότητα του νερού, v η ταχύτητα της ροής και A επιφάνεια της οποίας η τιμή ορίζεται σαφώς στο πρόγραμμα για την εξαγωγή των συντελεστών. Στις περιπτώσεις που θα εξετάσουμε $A = 1m^2$.

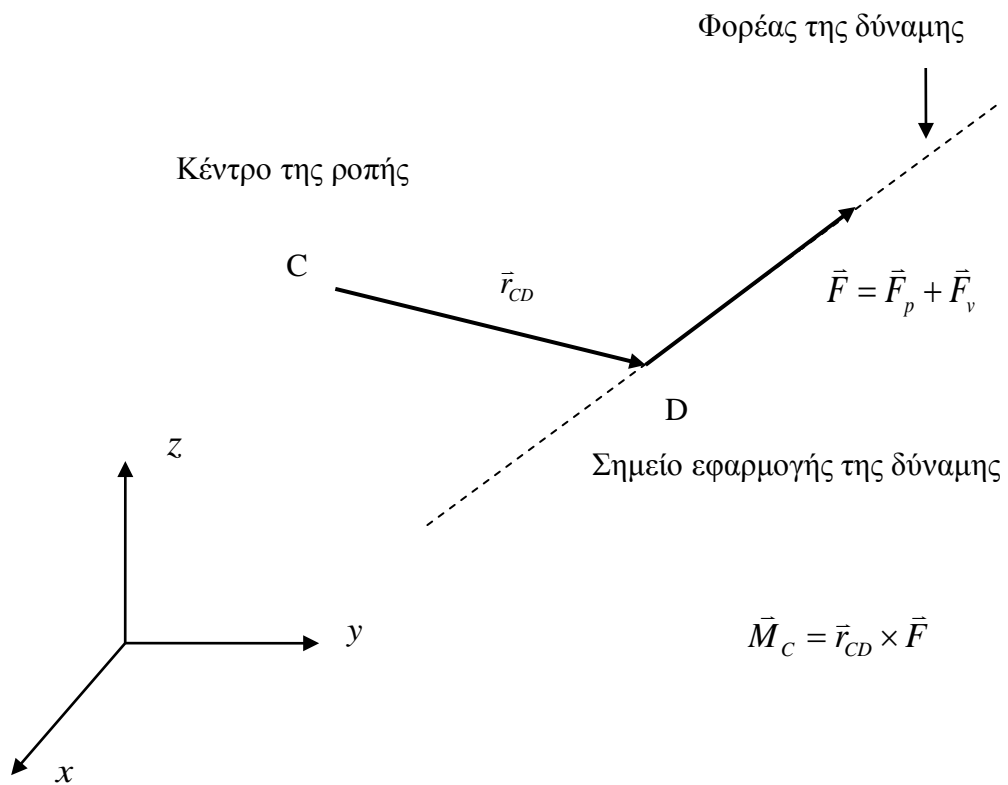
Το διάνυσμα της συνολικής ροπής ως προ κέντρο C υπολογίζεται αθροίζοντας τα εξωτερικά γινόμενα των διανυσμάτων των δυνάμεων λόγω πίεσης και τριβής για κάθε επιφάνεια με το αντίστοιχο διάνυσμα που έχει σαν αρχή του το σημείο ως προς το οποίο ορίζεται η ροπή και τέλος το σημείο εφαρμογής της δύναμης.

$$\bar{M}_C = \bar{r}_{CB} \times \bar{F}_p + \bar{r}_{CB} \times \bar{F}_v \quad (3.8)$$

Όπου: $\bar{r}_{CB} \times \bar{F}_p$: ροπή λόγω πίεσης

$\bar{r}_{CB} \times \bar{F}_v$: ροπή λόγω τριβής

Επιπροσθέτως υπολογίζονται οι αντίστοιχοι αδιάστατοι συντελεστές διαιρώντας τις συνιστώσες της ροπής λόγω πίεσης, τριβής και τη συνολική με το γινόμενο $\frac{1}{2} \rho v^2 AL$, όπου ρ η πυκνότητα του νερού, v η ταχύτητα της ροής και A η επιφάνεια και L το μήκος αναφοράς. Στις περιπτώσεις που θα εξετάσουμε $A = 1m^2$ και $L = 1.8m$.



Σχήμα 3.44: Ροπή ως προς σημείο C.

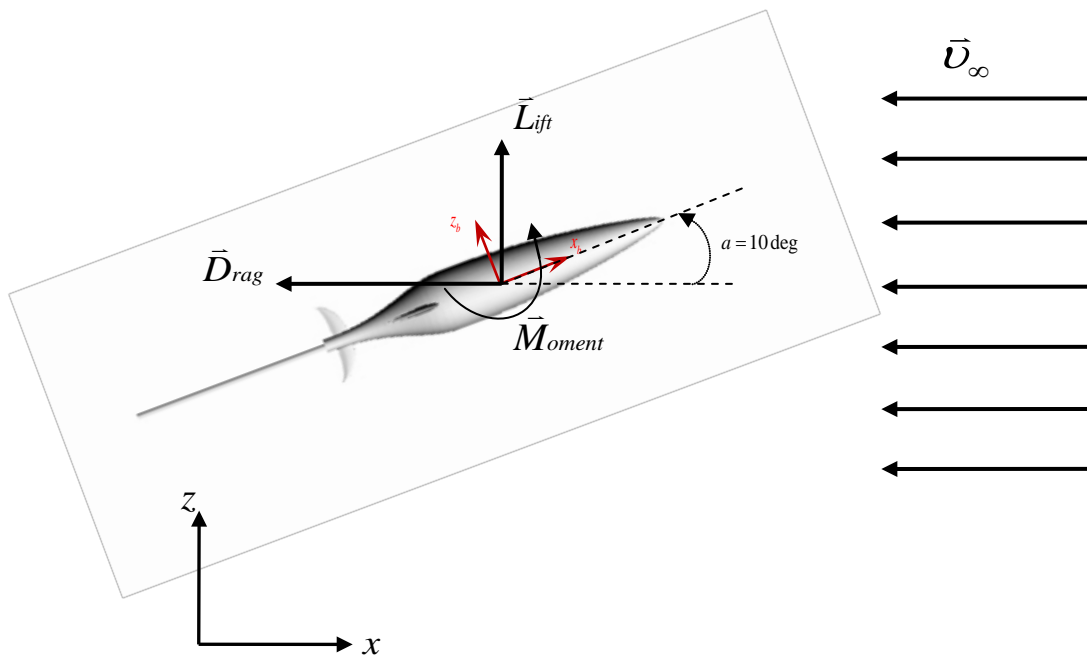
Υπολογισμός πεδίου ροής υπό γωνία 10 deg θεωρώντας SST $k-\omega$ μοντέλο τύρβης και Reynolds Stress Model – Συγκριτικά αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα θα επιλυθεί το πεδίο ροής γύρω από το όχημα υπό γωνία 10 μοιρών σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο τύρβης SST (Shear – Stress Transport) $k-\omega$ αλλά και με το Reynolds Stress Model και τα αποτελέσματα θα συγκριθούν ώστε να εκτιμηθεί η ακρίβεια και η καταλληλότητα της επιλογής του SST $k-\omega$ μοντέλου τύρβης για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Το SST (Shear – Stress Transport) $k-\omega$ είναι ένα μοντέλο δύο εξισώσεων που λύνει για τα k και ω τον ειδικό ρυθμό σκέδασης (ε/k) και παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά για ροές με τοιχώματα και χαμηλό αριθμό Reynolds. Είναι εξίσου αποτελεσματικό κοντά σε τοίχους αλλά και μακριά από αυτούς χρησιμοποιώντας μία συνάρτηση ανάμιξης. Επίσης περιορίζει το ιξώδες της τύρβης ώστε να εξασφαλισθεί ότι $\tau_i \sim k$ και διαθέτει επιλογές για τη μετάβαση και τη διάτμηση. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε από τον Menter [63]

Στο Reynolds Stress Model οι τάσεις Reynolds λύνονται άμεσα από εξισώσεις μεταφοράς αποφεύγοντας την υπόθεση του ισοτροπικού ιξώδους της τύρβης, ενώ η επιλογή του δευτέρου βαθμού όρου της πίεσης – τάσης βελτιώνει την επίδοση για πολλές βασικές διατμητικές ροές. Χρησιμοποιείται σε ροές με υψηλή συστροφή. Από φυσική άποψη είναι το καλύτερο RANS (Reynolds Averaged Navier – Stokes) μοντέλο, αλλά απαιτεί μεγαλύτερη μονάδα επεξεργασίας (CPU) και περισσότερη μνήμη, ενώ συγκλίνει δυσκολότερα εξαιτίας των πιο πεπλεγμένων εξισώσεων. Είναι κατάλληλο για τρισδιάστατες ροές με μεγάλη καμπυλότητα ροϊκών γραμμών και μεγάλη συστροφή. Αποτελεί το πιο πολύπλοκο αλλά και το υψηλότερου επιπέδου μοντέλο τύρβης ενώ οι αναλυτικές εξισώσεις του περιγράφονται στο [29].

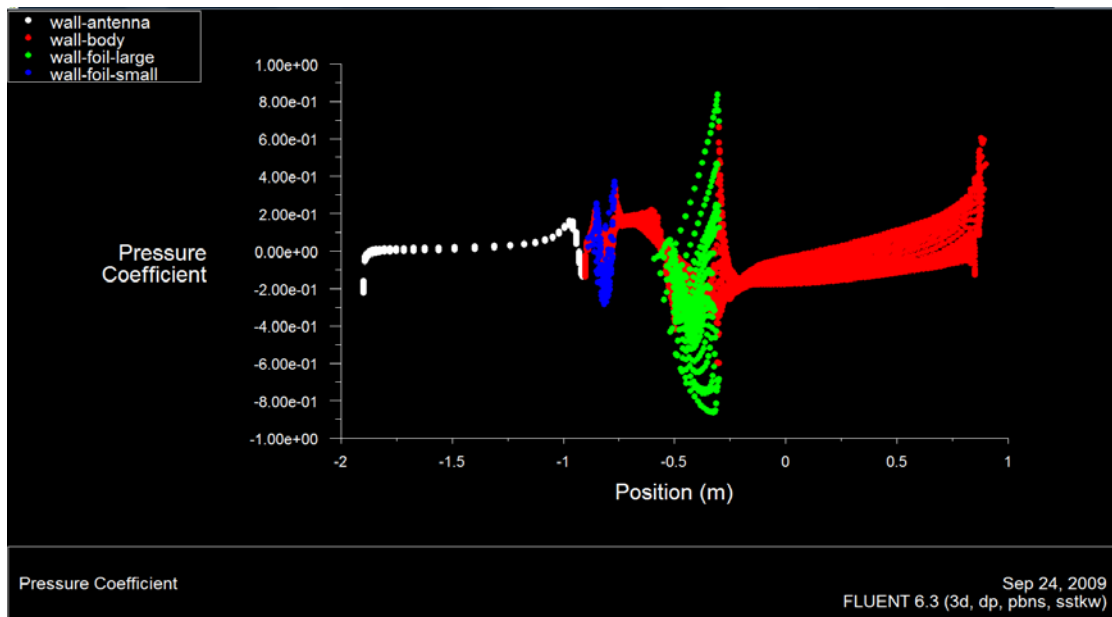
Η μοντελοποίηση του προβλήματος θεωρεί το υποβρύχιο όχημα ακίνητο και τη ροή γύρω από αυτό κινούμενη με ταχύτητα ίση και αντίθετη με την ταχύτητα του υποβρυχίου. Ο κύριος άξονας του υδροπτέρου σχηματίζει γωνία 10 μοιρών με το άνυσμα της ταχύτητας (γωνία πρόσπτωσης $\alpha = 10 \text{ deg}$) και η ταχύτητα $\bar{u}_\infty = -0,5 \text{ m/s}$. Το σύστημα αναφοράς ως προς το οποίο γίνονται οι υπολογισμοί και εξάγονται όλα τα αποτελέσματα είναι το σωματοπαγές σύστημα, όπως αυτό φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Η αρχή του τοποθετείται 0,9 m πίσω από τη μύτη του οχήματος.



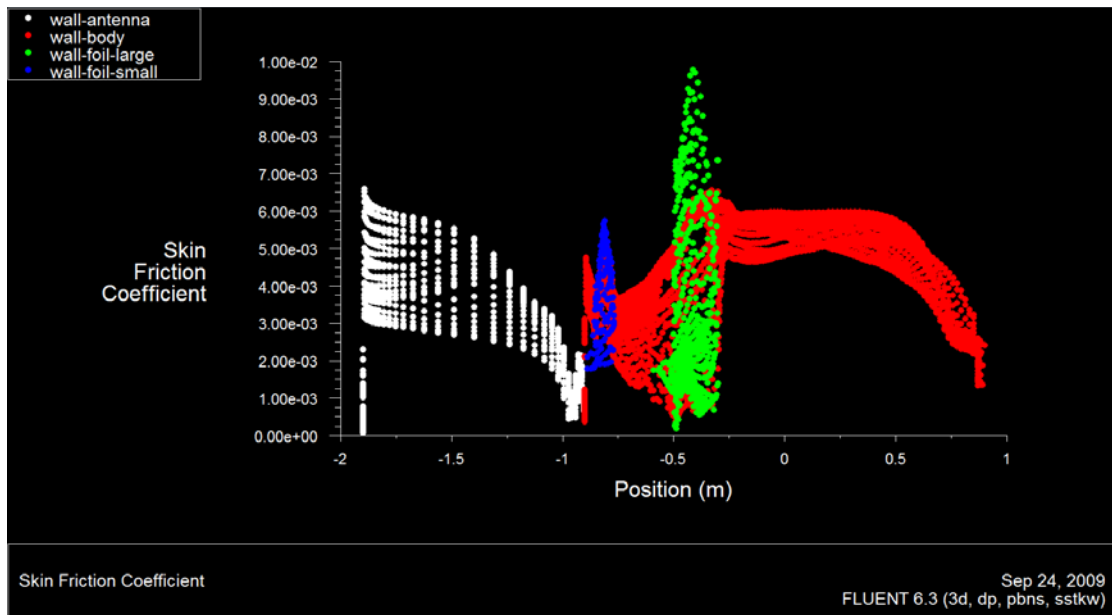
Σχήμα 3.45: Δυνάμεις και ροπές στο υδρόπτερο υπό γωνία πρόσπτωσης της ροής 10 deg.

Προσομοίωση του πεδίου ροής με το μαθηματικό μοντέλο τύρβης SST (Shear – Stress Transport) $k-\omega$

Παρατίθενται αποτελέσματα για τον επιφανειακό συντελεστή πίεσης και τριβής κατά μήκος του οχήματος καθώς και συνολικές δυνάμεις αντίστασης προς διάφορες κατευθύνσεις.



Σχήμα 3.46: Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης c_p κατά μήκος της επιφάνειας του υδρόπτερου.



Σχήμα 3.47: Ο ρυθμός μεταβολής της τριβής c_f κατά μήκος της επιφάνειας του υδροπτερού.

Στους επόμενους πίνακες παρουσιάζονται αποτελέσματα για τις δυνάμεις και ροπές που αναπτύσσονται πάνω στο υδρόπτερο λόγω πίεσης και λόγω τριβής. Στον πρώτο πίνακα παρουσιάζονται οι δυνάμεις λόγω πίεσης, λόγω τριβής και οι συνολικές, καθώς και οι αντίστοιχοι αδιάστατοι συντελεστές. Οι δυνάμεις παρουσιάζονται σε διάφορες διευθύνσεις και αναφέρονται πάντα στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Πίνακας 3.1: Δυνάμεις ως προς το σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Κατεύθυνση δύναμης (X Y Z)	Αντίσταση πίεσης P [Nt]	Αντίσταση τριβής F [Nt]	Ολική Αντίσταση R [Nt]	Συντελεστής πίεσης CP	Συντελεστής τριβής CF	Συντελεστής αντίστασης CR
(1 0 0)	-1,0121	-0,74412	-1,75622	-0,00838	-0,00616	-0,01454
(0 0 1)	7,702248	0,094244	7,79649	0,063768	0,00078	0,064548

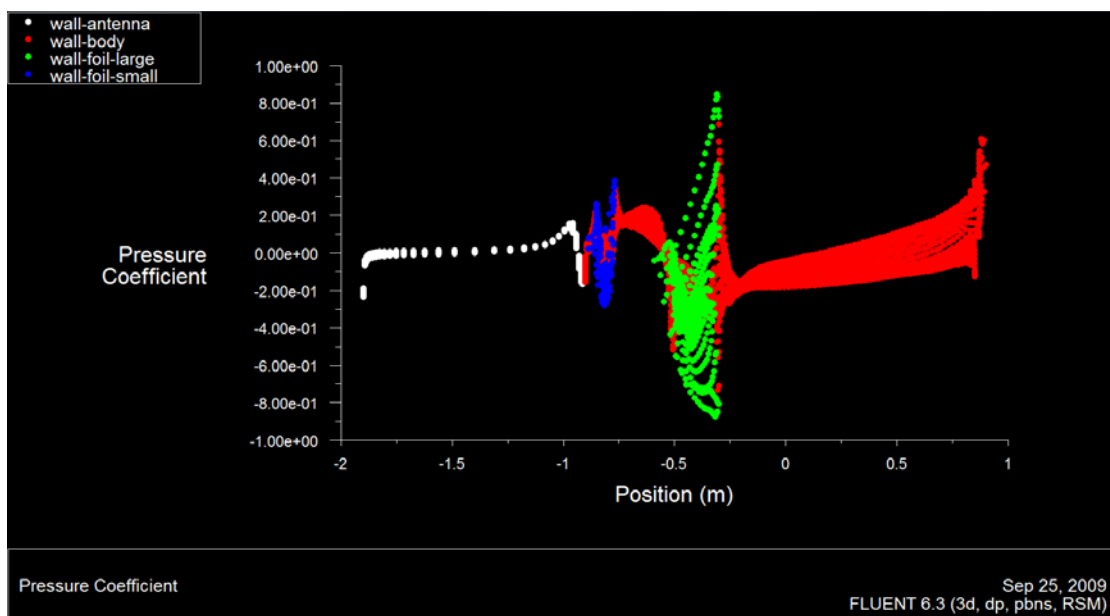
Πίνακας 3.2: Ροπή ως προς τον σωματοπαγή άξονα Y.

Άξονας	Ροπή λόγω πίεσης M_p [Ntm]	Ροπή λόγω τριβής M_f [Ntm]	Ολική Ροπή M [Ntm]	CM_p	CM_f	CM
Y (Pitch)	0,644048	-0,00072	0,643324	0,002962	-0,000004	0,002958

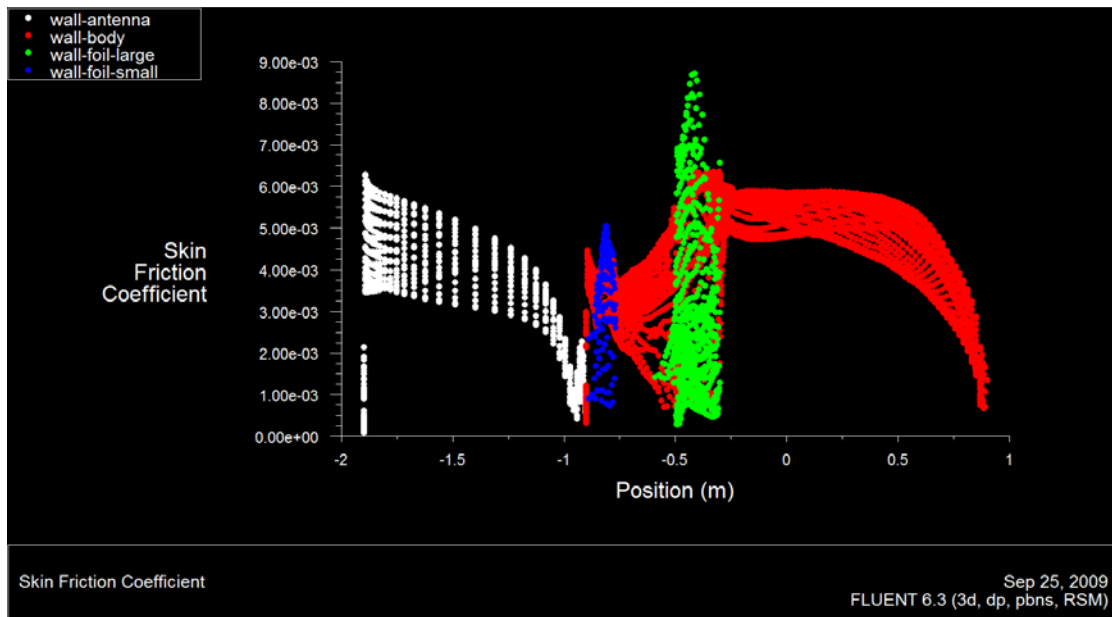
Προσομοίωση του πεδίου ροής με το μαθηματικό μοντέλο τύρβης Reynolds Stress Model (RSM)

Στην ενότητα αυτή θα προσομοιωθεί η ίδια περίπτωση με το αναλυτικότερο και ακριβέστερο μοντέλο τύρβης (RSM) Reynolds Stress Model, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά που δίνει το απλούστερο μοντέλο SST $k-\omega$, να ελεγχθεί η καταλληλότητά του και να εξακριβωθεί η ακρίβεια που προσφέρει στην περίπτωση του προβλήματός μας.

Ακολουθούν οι επιφανειακοί συντελεστές πίεσης και τριβής πάνω στο όχημα υπό γωνία 10 μοιρών, καθώς και τα ολοκληρωμένα αποτελέσματα για την αντίσταση πάνω στο όχημα.



Σχήμα 3.48 Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης c_p κατά μήκος της επιφάνειας του υδροπτέρου.



Σχήμα 3.49: Ο ρυθμός μεταβολής της τριβής c_f κατά μήκος της επιφάνειας του υδροπτερού.

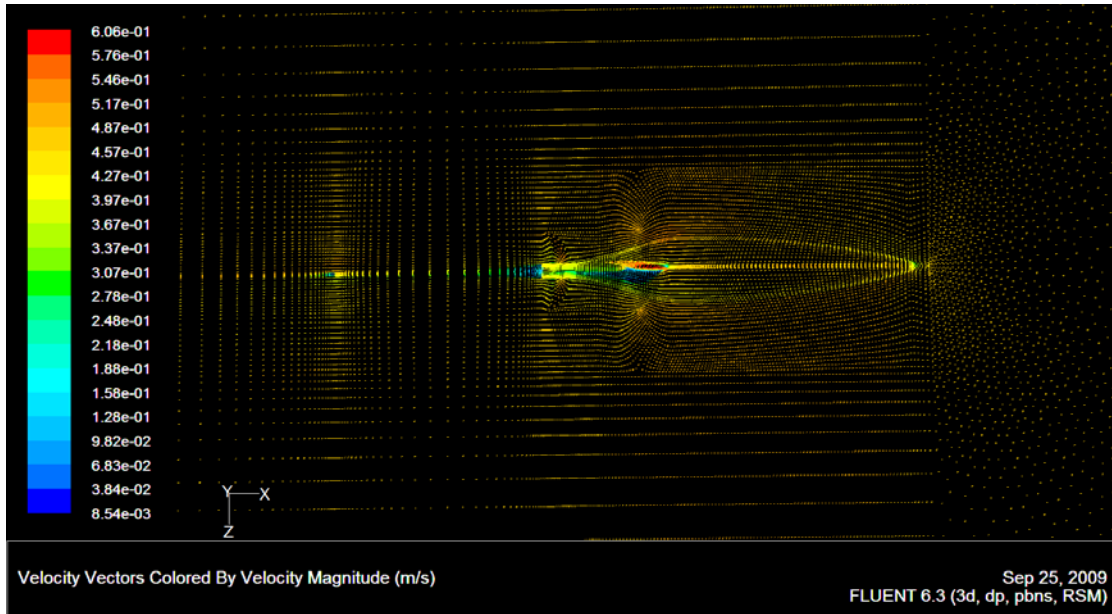
Πίνακας 3.3: Συνολικές δυνάμεις αντίστασης ως προς το σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Κατεύθυνση δύναμης (X Y Z)	Αντίσταση πίεσης P [Nt]	Αντίσταση τριβής F [Nt]	Ολική Αντίσταση R [Nt]	Συντελεστής πίεσης CP	Συντελεστής τριβής CF	Συντελεστής αντίστασης CR
(1 0 0)	-1,035438	-0,731113	-1,766568	-0,008572	-0,006054	-0,014626
(0 0 1)	7,590166	0,092322	7,682488	0,06284	0,000764	0,063604

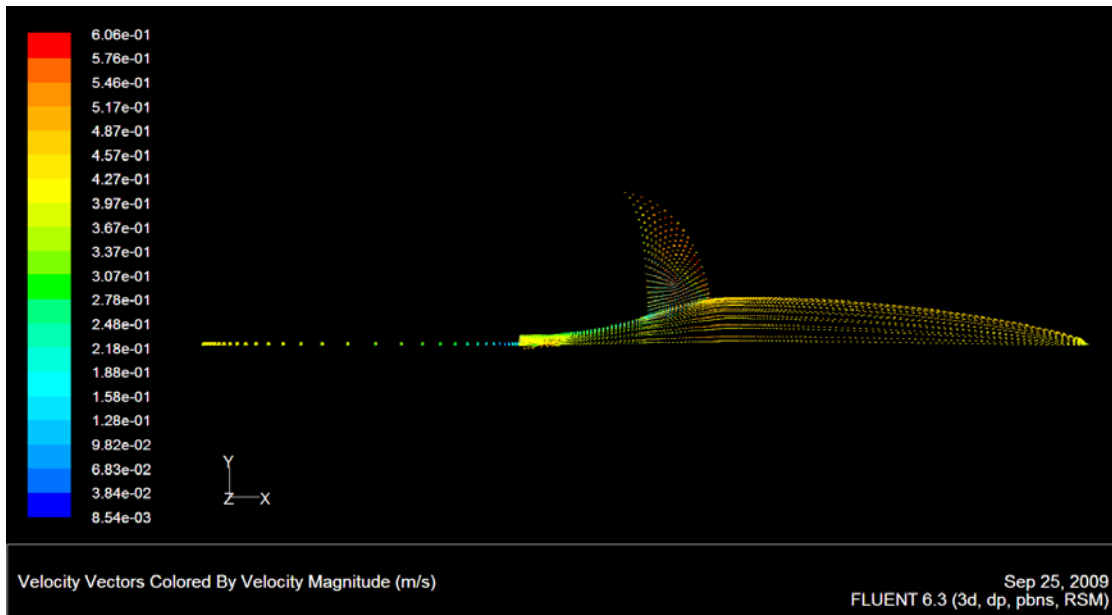
Πίνακας 3.4: Ροπή ως προς τον σωματοπαγή άξονα Y.

Άξονας	Ροπή λόγω πίεσης M_p [Ntm]	Ροπή λόγω τριβής M_f [Ntm]	Ολική Ροπή M [Ntm]	CM_p	CM_f	CM
Y (Pitch)	0,579806	-0,0019	0,577898	0,002666	-0,000008	0,002658

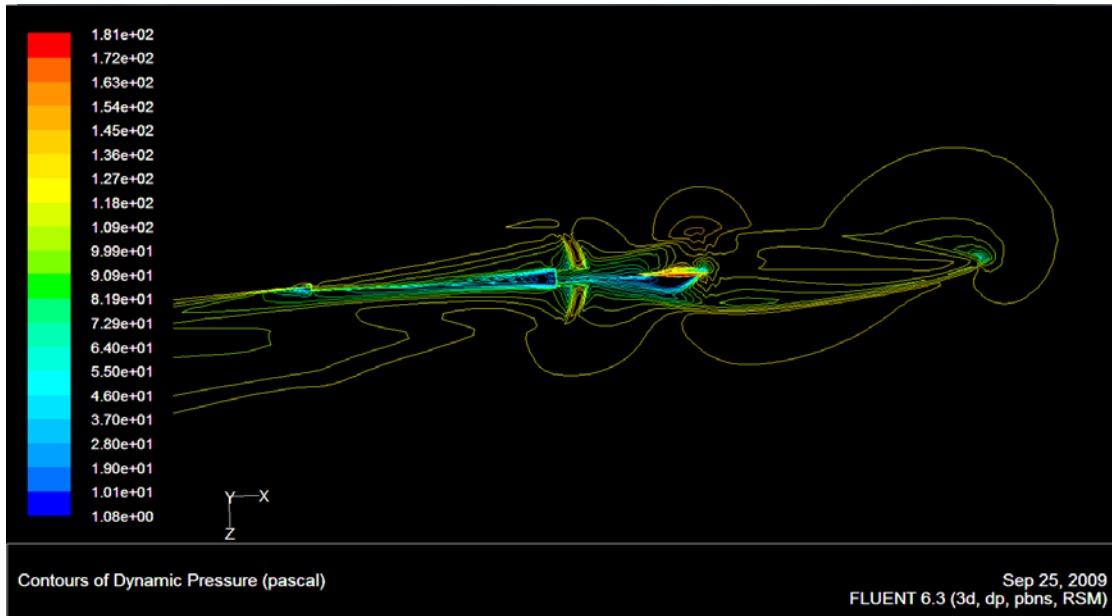
Επιπλέον στην περίπτωση επίλυσης της ροής με το μοντέλο RSM παρατίθενται και κάποια διαγράμματα για το πως διαμορφώνεται το πεδίο ροής γύρω από το σώμα ως προς την ταχύτητα, τη δυναμική πίεση, αλλά και την επιφανειακή τριβή.



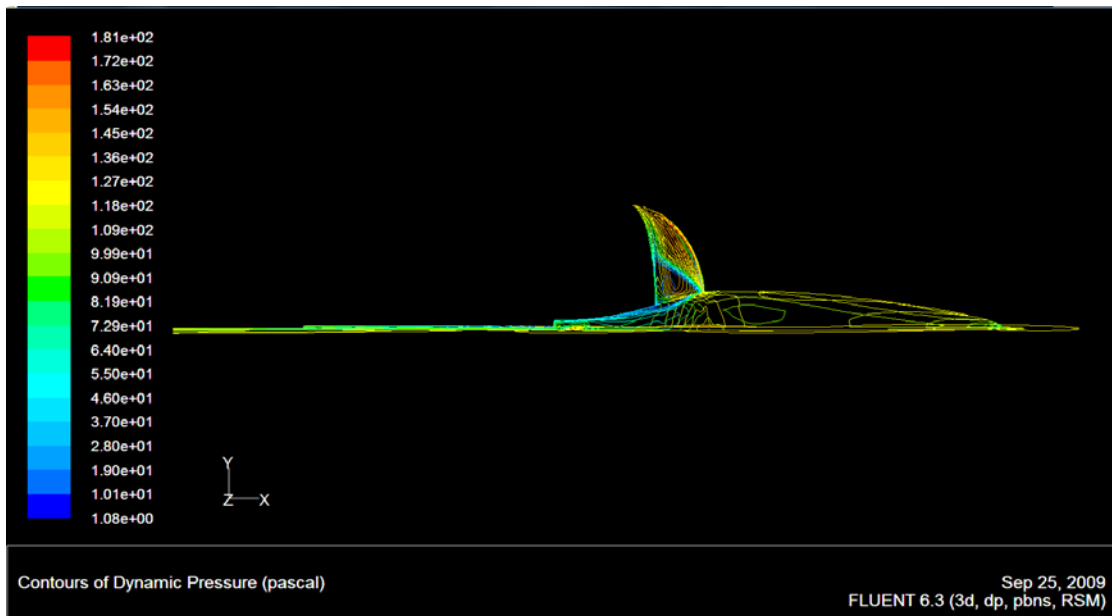
Σχήμα 3.50: Ανύσματα της ταχύτητας κατά το επίπεδο x-z



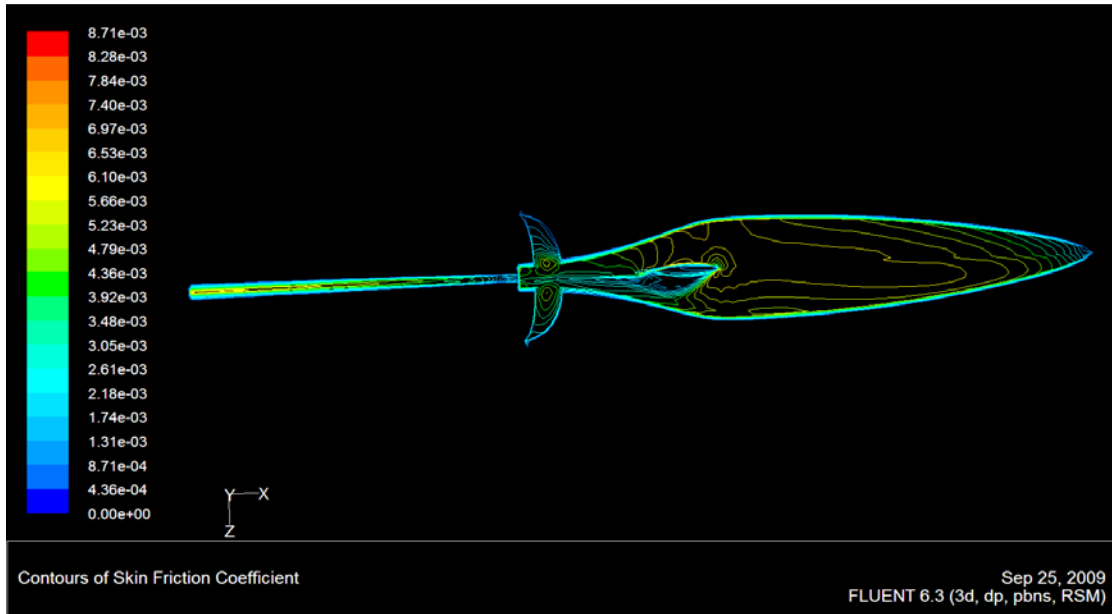
Σχήμα 3.51: Ανύσματα της ταχύτητας κατά το επίπεδο x-y.



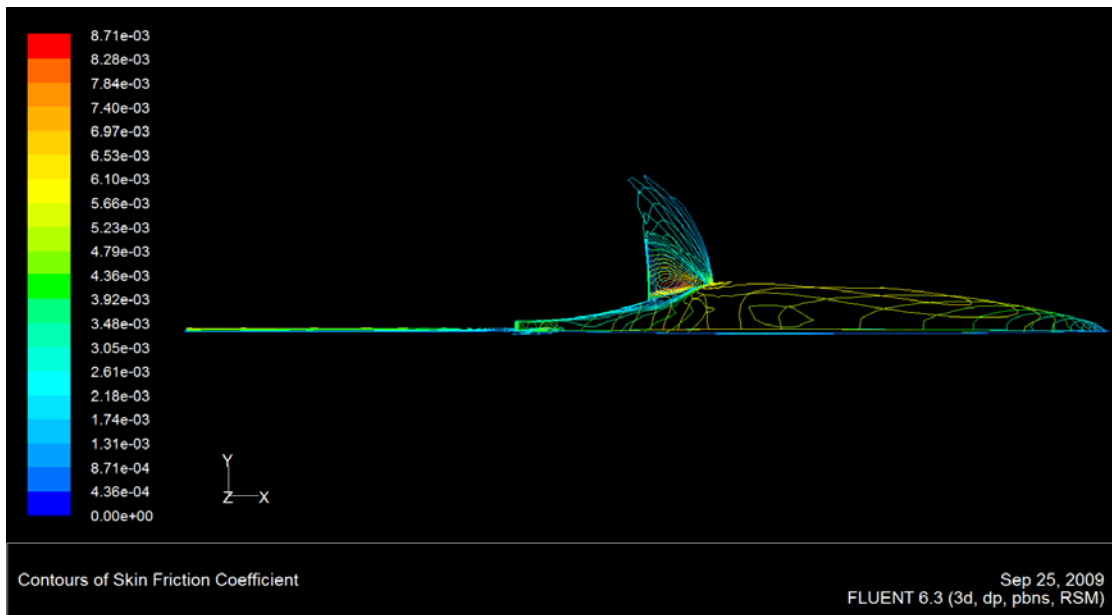
Σχήμα 3.52: Ισοϋνείς καμπύλες της δυναμικής πίεσης στην επιφάνεια του οχήματος και γύρω από αυτό κατά το x-z επίπεδο.



Σχήμα 3.53: Ισοϋνείς καμπύλες της δυναμικής πίεσης στην επιφάνεια του οχήματος και γύρω από αυτό κατά το x-y επίπεδο.



Σχήμα 3.54: Ισοϋψείς καμπύλες του συντελεστή τριβής πάνω στην επιφάνεια του οχήματος κατά το x-z επίπεδο.



Σχήμα 3.55: Ισοϋψείς καμπύλες του συντελεστή τριβής πάνω στην επιφάνεια του οχήματος κατά το x-z επίπεδο.

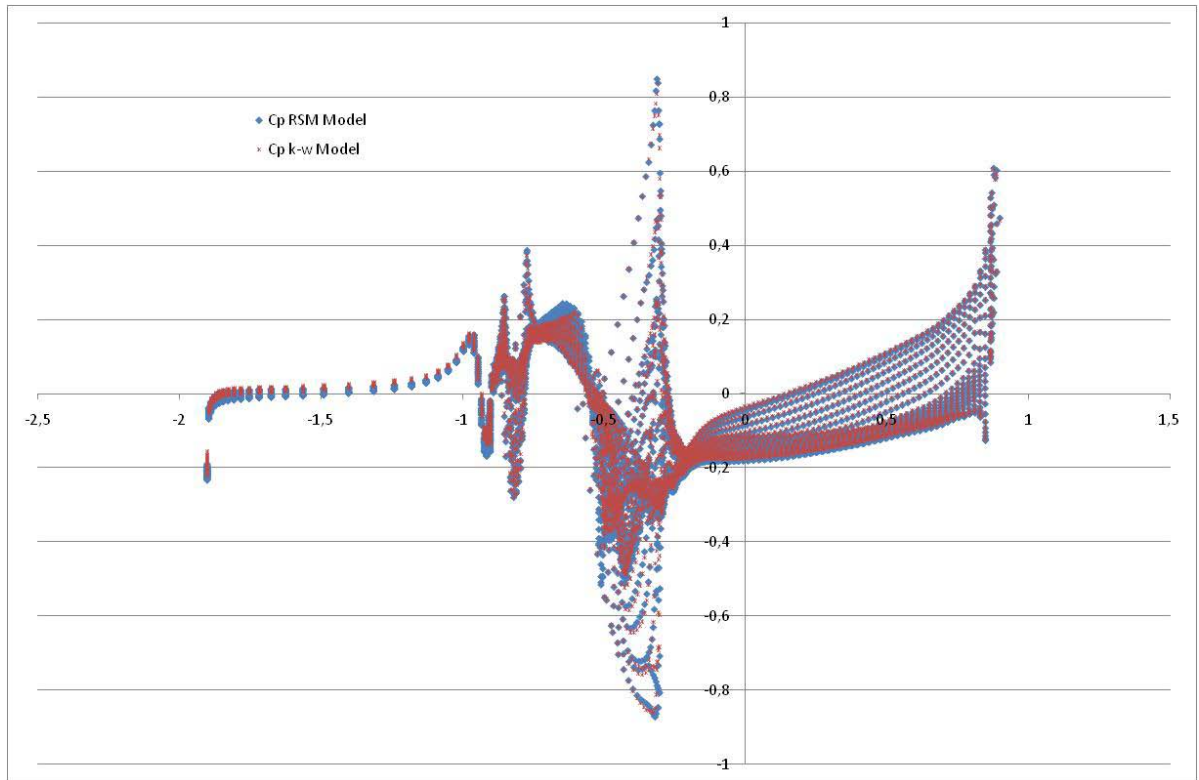
Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο μοντέλων τύρβης $k-\omega$ και RSM

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων που ακολουθεί μας οδηγεί στην επιλογή του απλούστερου, σε σχέση με το (RSM) Reynolds Stress Model, SST (Shear – Stress Transport) $k-\omega$ μοντέλο τύρβης για τη μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του οχήματος. Το μοντέλο SST $k-\omega$ αποδεικνύεται επαρκώς κατάλληλο για την περίπτωση που εξετάζεται, αφού δίνει αποτελέσματα πολύ κοντά σε αυτά του RSM μοντέλου και ταυτόχρονα έχει μικρότερες υπολογιστικές απαιτήσεις.

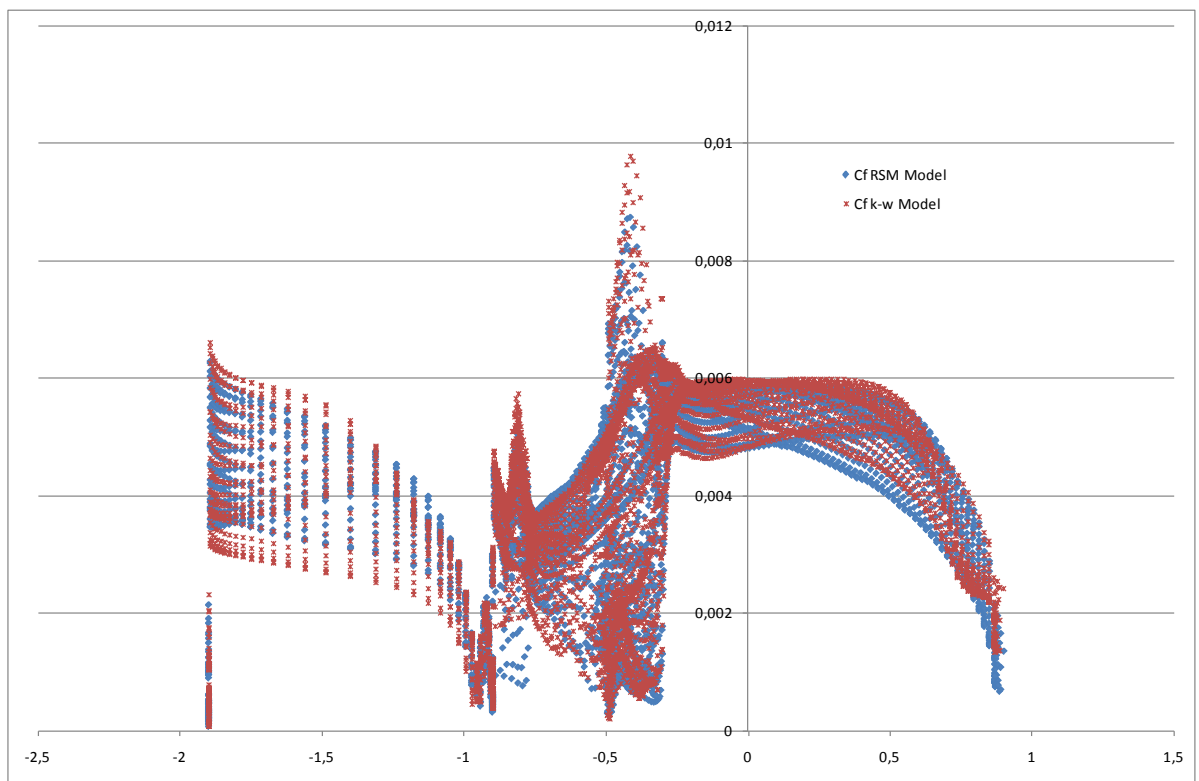
Τα διαγράμματα των επιφανειακών συντελεστών πίεσης και τριβής παρουσιάζονται και για τις δύο περιπτώσεις, όπου και φαίνεται το πόσο κοντά πέφτουν οι αντίστοιχες τιμές. Επιπλέον παρουσιάζονται οι αποκλίσεις των τιμών των δυνάμεων και ροπών και των αντίστοιχων συντελεστών θεωρώντας SST $k-\omega$ μοντέλο τύρβης από αυτές που προκύπτουν από το RSM σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_f = \frac{(f_{RSM} - f_{k-\omega})100}{f_{RSM}} \quad (3.9)$$

όπου f η εκάστοτε τιμή της δύναμης λόγω πίεσης, τριβής ή της συνολικής και των αντίστοιχων συντελεστών. Οι αποκλίσεις των τιμών που προκύπτουν με το SST $k-\omega$ μοντέλο για τις δυνάμεις δεν ξεπερνούν το 4,5% ενώ λίγο μεγαλύτερες παρουσιάζονται οι αποκλίσεις για τις ροπές.



Σχήμα 3.56: Συγκριτικά αποτελέσματα του συντελεστή πίεσης πάνω στην επιφάνεια του οχήματος θεωρώντας μοντέλο τύρβης SST $k-\omega$ και RSM.



Σχήμα 3.57: Συγκριτικά αποτελέσματα του συντελεστή πίεσης πάνω στην επιφάνεια του οχήματος θεωρώντας μοντέλο τύρβης SST $k-\omega$ και RSM.

Πίνακας 3.5: Αποκλίσεις στις τιμές των δυνάμεων αντίστασης όπως αυτές υπολογίζονται θεωρώντας SST $k-\omega$ και RSM μοντέλα τύρβης για γωνία προσβολής 10 deg.

Κατεύθυνση δύναμης (X Y Z)	Αντίσταση πίεσης P [%]	Αντίσταση τριβής F [%]	Ολική Αντίσταση R [%]	Συντελεστής πίεσης CP [%]	Συντελεστής τριβής CF [%]	Συντελεστής αντίστασης CR [%]
(1 0 0)	2,25392539	-1,77698	0,585542	2,239851	-1,75091	0,587994
(0 0 1)	-1,4766739	-2,08184	-1,48392	-1,47677	-2,09424	-1,48418

Πίνακας 3.6: Αποκλίσεις στις τιμές των ροπών όπως αυτές υπολογίζονται θεωρώντας SST $k-\omega$ και RSM μοντέλα τύρβης.

Άξονας	Ροπή λόγω πίεσης M_P [%]	Ροπή λόγω τριβής M_F [%]	Ολική Ροπή M [%]	CM_P [%]	CM_F [%]	CM [%]
Y (Pitch)	-11,0799129	62,10526	-11,3214	-11,1028	50	-11,2867

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρούνται μηδαμινές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων για τις δυνάμεις χρησιμοποιώντας τα δύο μοντέλα τύρβης, ενώ μεγαλύτερη είναι η απόκλιση στις τιμές των ροπών. Για την περίπτωση των 2 μοιρών οι αποκλίσεις είναι λίγο μεγαλύτερες στις δυνάμεις και ακόμα μικρότερες για τη ροπή. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το πρόβλημα είναι ανεξάρτητο της τύρβης οπότε και οι υπολογισμοί θα συνεχιστούν με την επίλυση του πεδίου θεωρώντας το SST (Shear – Stress Transport) $k-\omega$ μοντέλο τύρβης με το οποίο θα υπάρξει κέρδος σε υπολογιστικό χρόνο και ικανοποιητική ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Πίνακας 3.7: Αποκλίσεις στις τιμές των δυνάμεων αντίστασης όπως αυτές υπολογίζονται θεωρώντας SST $k-\omega$ και RSM μοντέλα τύρβης για γωνία προσβολής 2 deg.

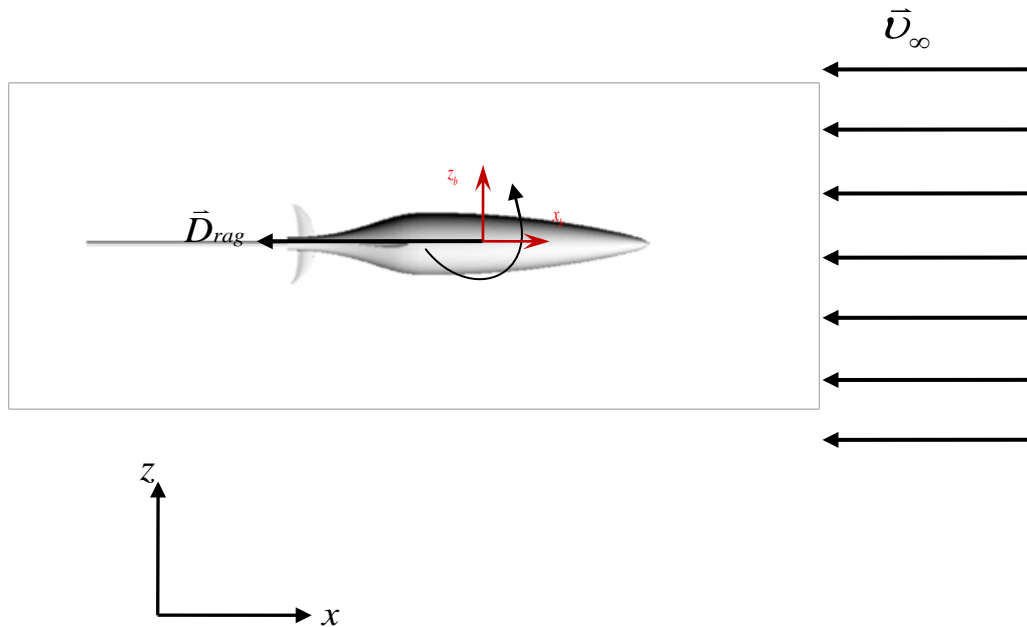
Κατεύθυνση δύναμης (X Y Z)	Αντίσταση πίεσης P [%]	Αντίσταση τριβής F [%]	Ολική Αντίσταση R [%]	Συντελεστής πίεσης CP [%]	Συντελεστής τριβής CF [%]	Συντελεστής αντίστασης CR [%]
(1 0 0)	-7,13463951	0,104785	-2,71988	-7,13464	0,104786	-2,71987
(0 0 1)	5,49900582	-10,7732	5,376275	5,499	-10,7732	5,37627

Πίνακας 3.8: Αποκλίσεις στις τιμές των ροπών όπως αυτές υπολογίζονται θεωρώντας SST $k-\omega$ και RSM μοντέλα τύρβης για γωνία προσβολής 2 deg.

Άξονας	Ροπή λόγω πίεσης M_P [%]	Ροπή λόγω τριβής M_F [%]	Ολική Ροπή M [%]	CM_P [%]	CM_F [%]	CM [%]
Y (Pitch)	8,41565004	47,4878	8,276223	8,434706	49,25785	8,289033

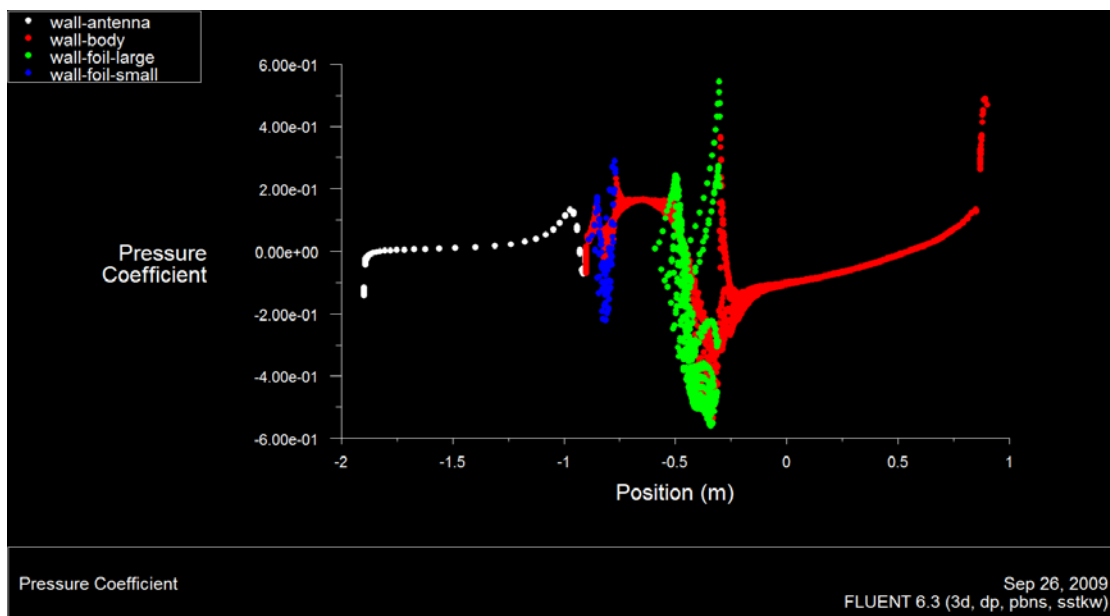
Υπολογισμός πεδίου ροής υπό οριζόντια ταχύτητα

Χρησιμοποιώντας το SST (Shear – Stress Transport) $k-\omega$ μοντέλο τύρβης, γίνεται ο υπολογισμός της ροής γύρω από το υποβρύχιο όχημα θεωρώντας τη ροή να προσπίπτει με οριζόντια ταχύτητα 0,5 m/s όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

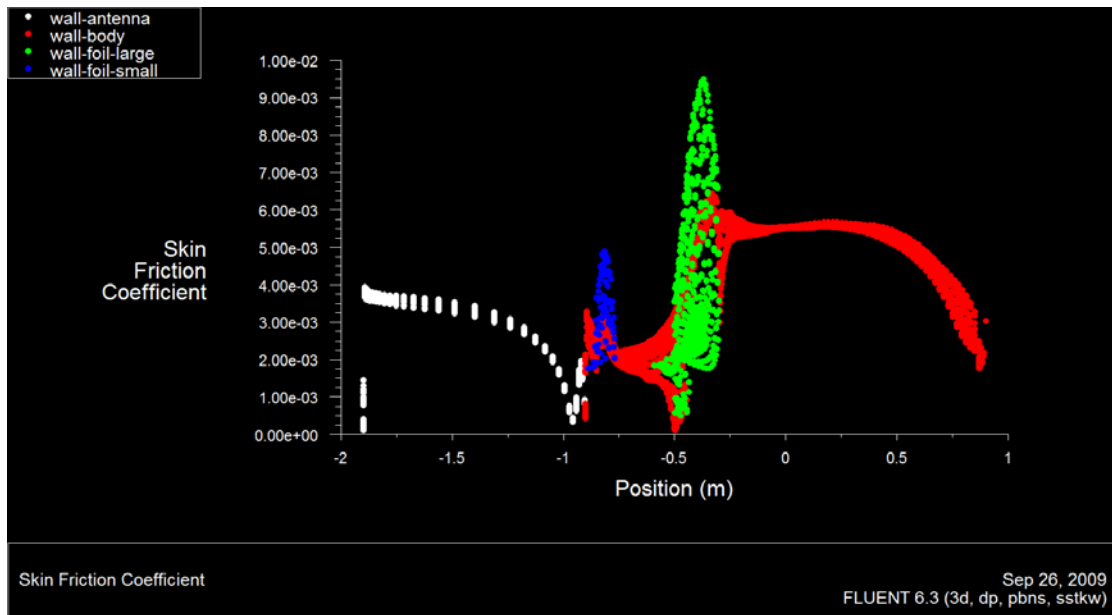


Σχήμα 3.58: Δυνάμεις και ροπές στο υδρόπτερο υπό οριζόντια επ' άπειρο ταχύτητα.

Παρατίθενται αποτελέσματα για τον επιφανειακό συντελεστή πίεσης και τριβής κατά μήκος του οχήματος καθώς και συνολικές δυνάμεις αντίστασης προς διάφορες κατευθύνσεις.



Σχήμα 3.59: Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης c_p κατά μήκος της επιφάνειας του υδρόπτερου.



Σχήμα 3.60: Ο ρυθμός μεταβολής της τριβής c_f κατά μήκος της επιφάνειας του υδροπτερού.

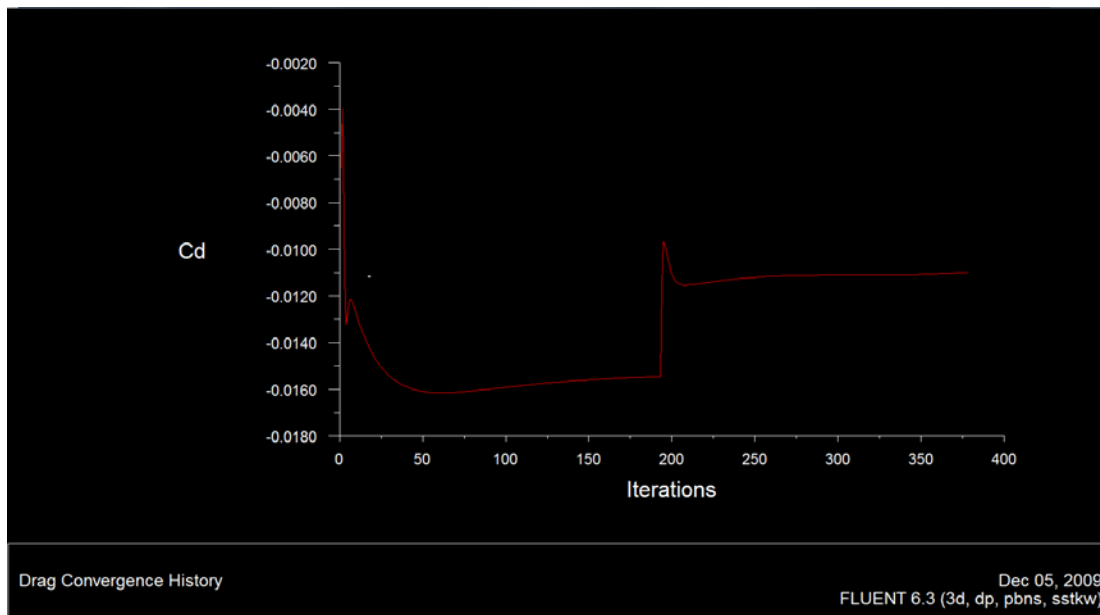
Πίνακας 3.9: Συνολικές δυνάμεις αντίστασης ως προς το σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Κατεύθυνση δύναμης (X Y Z)	Αντίσταση πίεσης P [Nt]	Αντίσταση τριβής F [Nt]	Ολική Αντίσταση R [Nt]	Συντελεστής πίεσης CP	Συντελεστής τριβής CF	Συντελεστής αντίστασης CR
(1 0 0)	-0,546246	-0,781902	-1,328146	-0,004522	-0,006474	-0,010996
(0 0 1)	-0,01639	0,000098	-0,016292	-0,000136	0	-0,000134

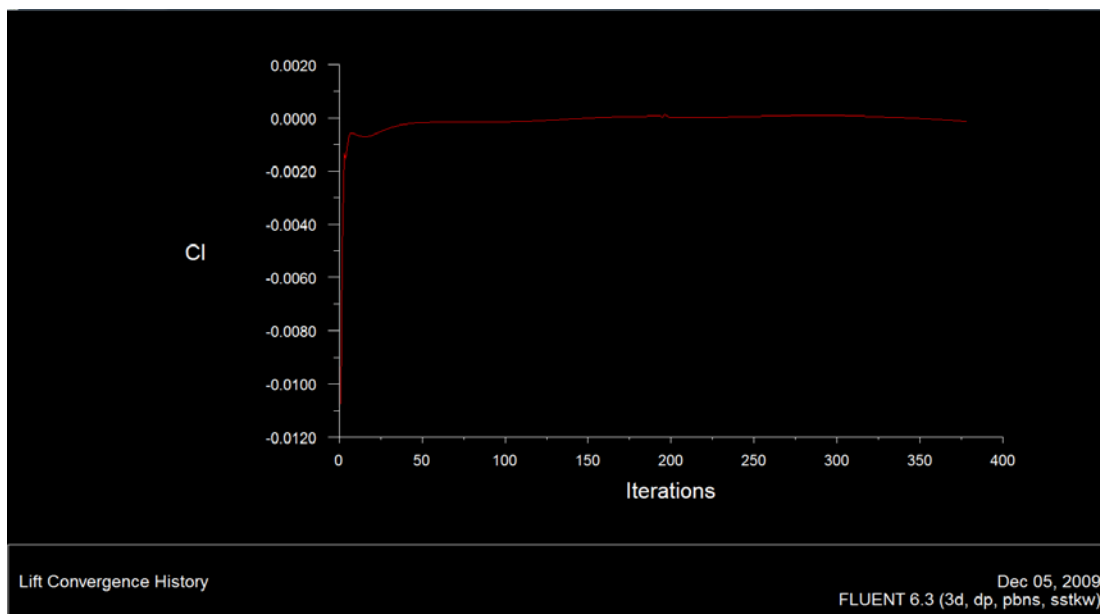
Πίνακας 3.10: Ροπή ως προς τον σωματοπαγή άξονα Y.

Άξονας	Ροπή λόγω πίεσης M_p [Ntm]	Ροπή λόγω τριβής M_f [Ntm]	Ολική Ροπή M [Ntm]	CM_p	CM_f	CM
Y (Pitch)	-0,008152	0,000046	-0,0081	-0,000038	0	-0,000038

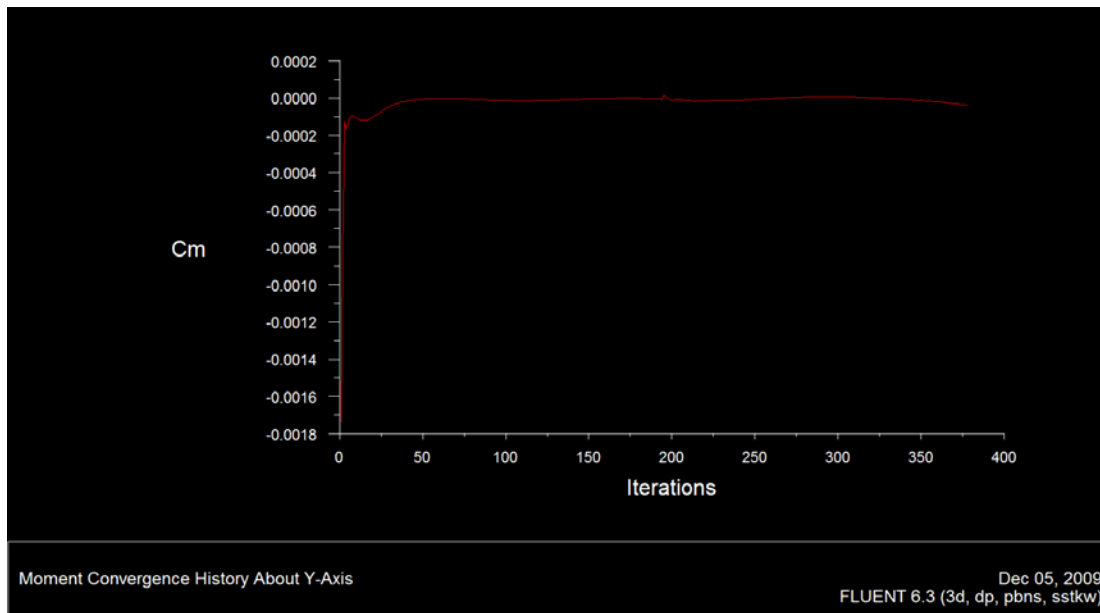
Επιπλέον παρουσιάζονται για την περίπτωση αυτή της οριζόντιας ροής οι ιστορίες σύγκλισης των συντελεστών αντίστασης, άνωσης και ροπής ως προς τον z άξονα. Στα διαγράμματα διακρίνεται η σύγκλιση με σχήματα 1^{ου} βαθμού διακριτοποίησης των εξισώσεων ενώ στη συνέχεια μεταβάλλονται σε δευτέρου βαθμού και επιλύεται το πεδίο ροής μέχρι η λύση να συγκλίνει και πάλι.



Σχήμα 3.61: Η σύγκλιση του συντελεστή αντίστασης C_d .



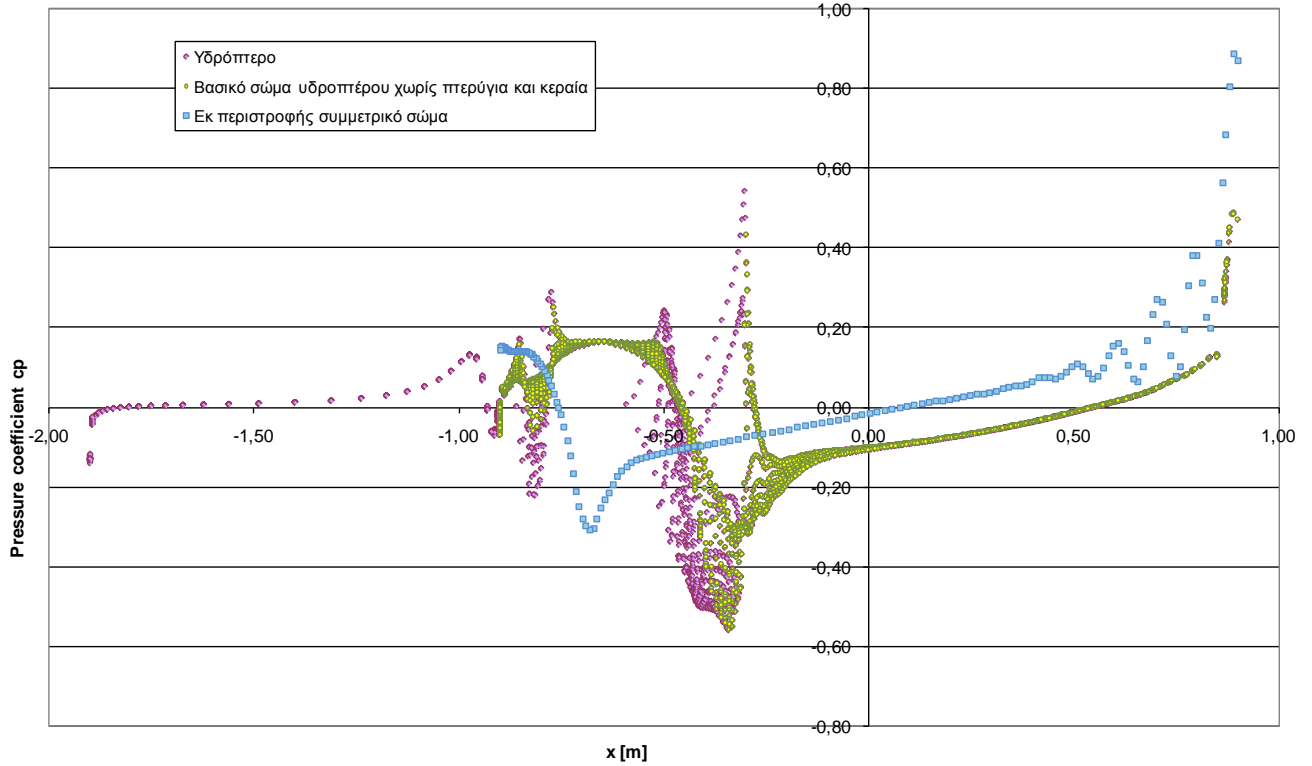
Σχήμα 3.62: Η σύγκλιση του συντελεστή άνωσης C_l .



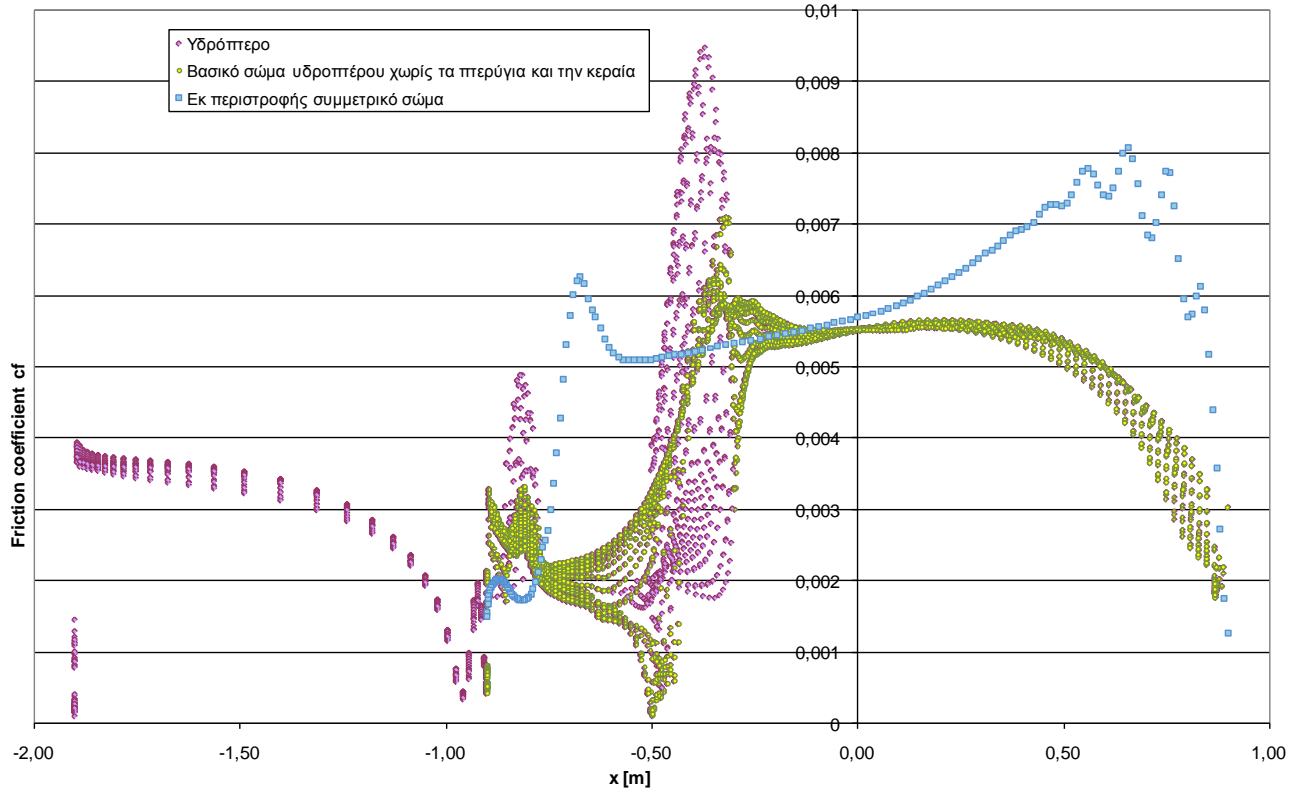
Σχήμα 3.63: Η σύγκλιση του συντελεστή ροπής C_m ως προς Y άξονα (pitching moment)

Μεταβολή των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του υποβρυχίου με την προσθήκη πτερυγίων και κεραίας

Παράλληλα με τον υπολογισμό της ροής γύρω από το σώμα και τον προσδιορισμό της αντίστασης που επάγεται μπορεί να επιβεβαιωθεί ότι η προσθήκη πτερυγίων στο χαμηλής αντίστασης όχημα δε θα επηρεάσει αρνητικά τα υδροδυναμικά του χαρακτηριστικά. Στην ενότητα αυτή παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα για τους συντελεστές πίεσης και τριβής πάνω στο σώμα στις περιπτώσεις του εκ περιστροφής συμμετρικού σώματος, του υδροπτέρου συνολικά με τα πτερύγια και την κεραία, καθώς και του βασικού σώματος του υδροπτέρου χωρίς τα πτερύγια και την κεραία, έχοντας όμως επιλύσει τη ροή θεωρώντας ολόκληρο το σώμα. Επιπλέον παρουσιάζονται οι επαγόμενες αντιστάσεις και ροπές συνολικά πάνω στο σώμα αλλά και αναλυτικά η συνεισφορά των πτερυγίων της κεραίας και του αξονοσυμμετρικού σώματος.



Σχήμα 3.64: Συγκριτικά αποτελέσματα για το ρυθμό μεταβολής της πίεσης c_p κατά μήκος της επιφάνειας του υδροπτέρου.



Σχήμα 3.65: Συγκριτικά αποτελέσματα για το ρυθμό μεταβολής της τριβής c_f κατά μήκος της επιφάνειας του υδροπτέρου.

Πίνακας 3.11: Δυνάμεις αντίστασης ως προς το σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Κατεύθυνση δύναμης (X Y Z)	Αντίσταση πάνω στα μικρά πτερύγια [Nt]	Αντίσταση πάνω στα μεγάλα πτερύγια [Nt]	Αντίσταση πάνω στην κεραία [Nt]	Αντίσταση πάνω στο σώμα του υποβρυχίου [Nt]	Ολική Αντίσταση στο υδρόπτερο [Nt]	Αντίσταση στο εκ περιστροφής συμμετρικό σώμα [Nt]
(1 0 0)	-0,08298	-0,237842	-0,026444	-0,98088	-1,328146	-0,741532
(0 0 1)	0,000094	-0,010788	0,000362	-0,005962	-0,016292	0

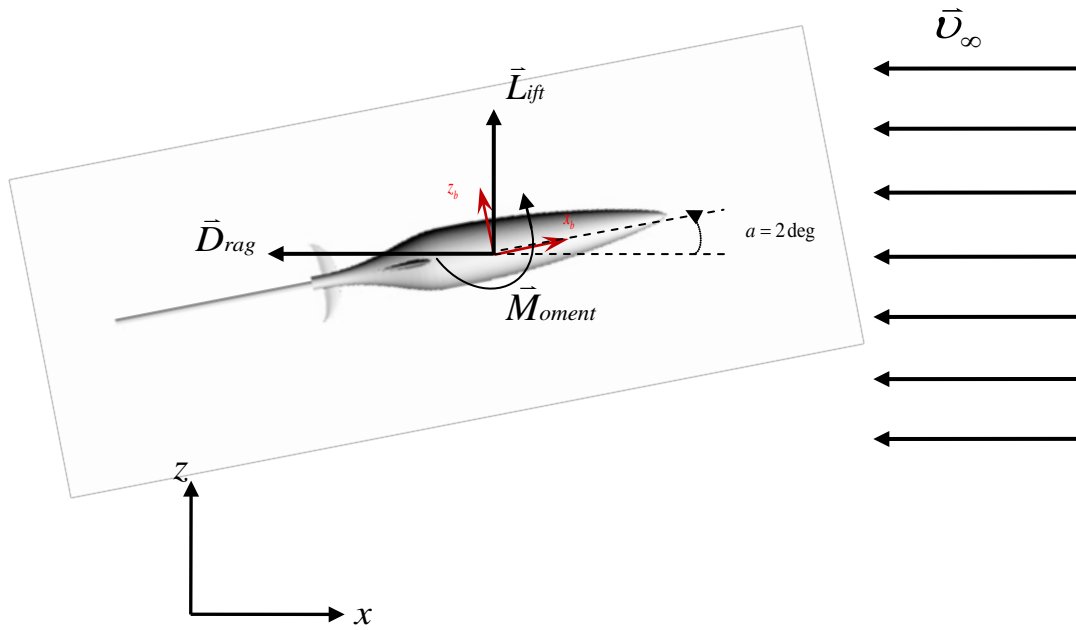
Πίνακας 3.12: : Ροπή ως προς τον σωματοπαγή άξονα Y.

Άξονας	Ροπή πάνω στα μικρά πτερύγια [Ntm]	Ροπή πάνω στα μεγάλα πτερύγια [Ntm]	Ροπή πάνω στην κεραία [Ntm]	Ροπή πάνω στο σώμα του υποβρυχίου [Ntm]	Ολική Ροπή στο υδρόπτερο [Ntm]	Ροπή στο εκ περιστροφής συμμετρικό σώμα [Ntm]
Y (Pitch)	0,00009	-0,005066	0,000342	-0,003474	-0,0081	0

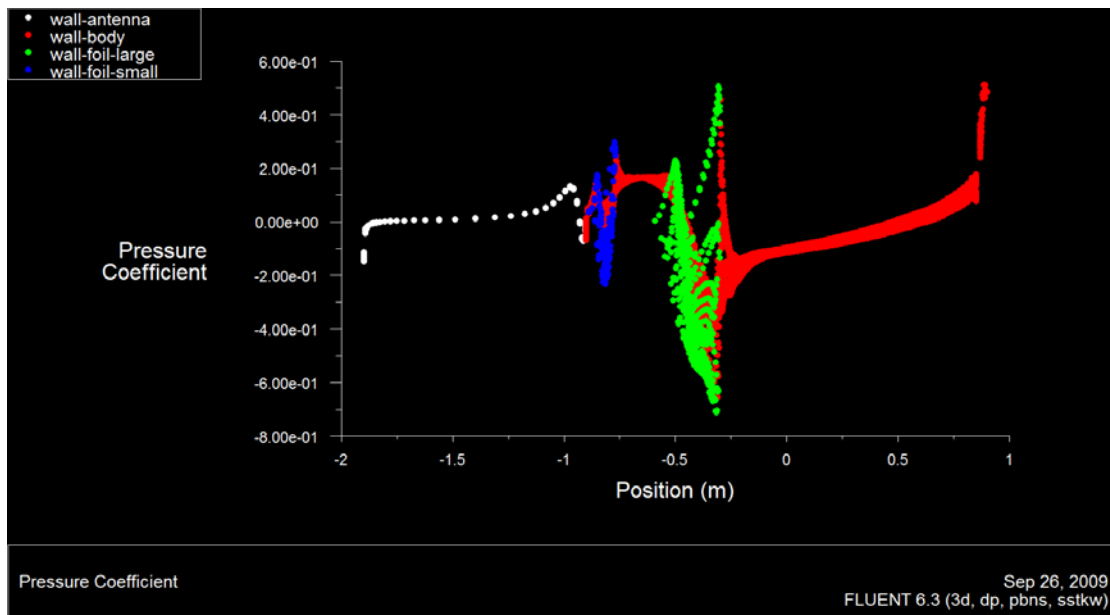
Ταχύτητα ροής υπό γωνία

Στην ενότητα αυτή μελετώνται περιπτώσεις όπου η ροή προσπίπτει υπό γωνία στο υποβρύχιο όχημα. Ακολουθούν δύο περιπτώσεις των 2 και -2 μοιρών γωνίας πρόσπτωσης και παρουσιάζονται αποτελέσματα για τον επιφανειακό συντελεστή πίεσης και τριβής κατά μήκος του οχήματος καθώς και συνολικές δυνάμεις αντίστασης προς διάφορες κατευθύνσεις. Ας σημειωθεί ότι οι γωνίες πρόσπτωσης με τις οποίες πραγματοποιούν τα υδρόπτερα αναδύσεις και καταδύσεις είναι μικρές, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα και η ισορροπία της διαδρομής. Αυτό προκύπτει από τη μαθηματική ανάλυση των διαδρομών σε ισορροπία καθώς και από τα υδροδυναμικά αποτελέσματα για τις δυνάμεις που αναπτύσσονται πάνω στο όχημα όσο μεγαλώνει η γωνία πρόσπτωσης για την ίδια ταχύτητα.

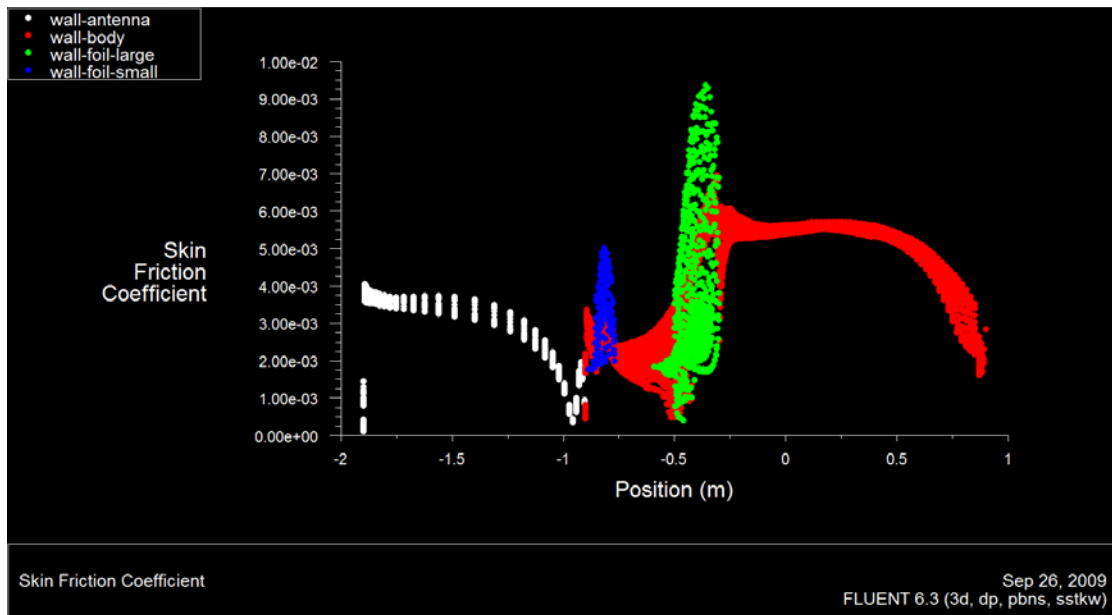
Πρόσπτωση υπό γωνία 2 deg



Σχήμα 3.66: Δυνάμεις και ροπές στο υδρόπτερο υπό γωνία πρόσπτωσης της ροής 2 deg.



Σχήμα 3.67: Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης c_p κατά μήκος της επιφάνειας του υδρόπτερου.



Σχήμα 3.68: Ο ρυθμός μεταβολής της τριβής c_f κατά μήκος της επιφάνειας του υδροπτέρου.

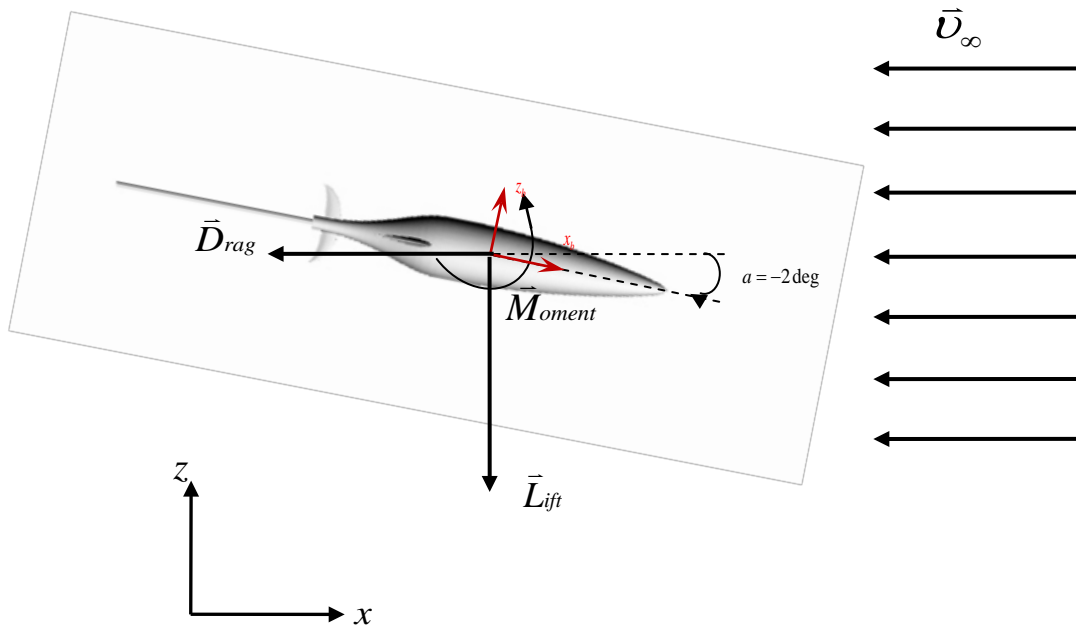
Πίνακας 3.13: Συνολικές δυνάμεις αντίστασης ως προς το σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Κατεύθυνση δύναμης (X Y Z)	Αντίσταση πίεσης P [Nt]	Αντίσταση τριβής F [Nt]	Ολική Αντίσταση R [Nt]	Συντελεστής πίεσης CP	Συντελεστής τριβής CF	Συντελεστής αντίστασης CR
(1 0 0)	-0,533946	-0,778132	-1,312078	-0,00442	-0,006442	-0,010862
(0 0 1)	2,459896	0,021914	2,48181	0,020366	0,000182	0,020548

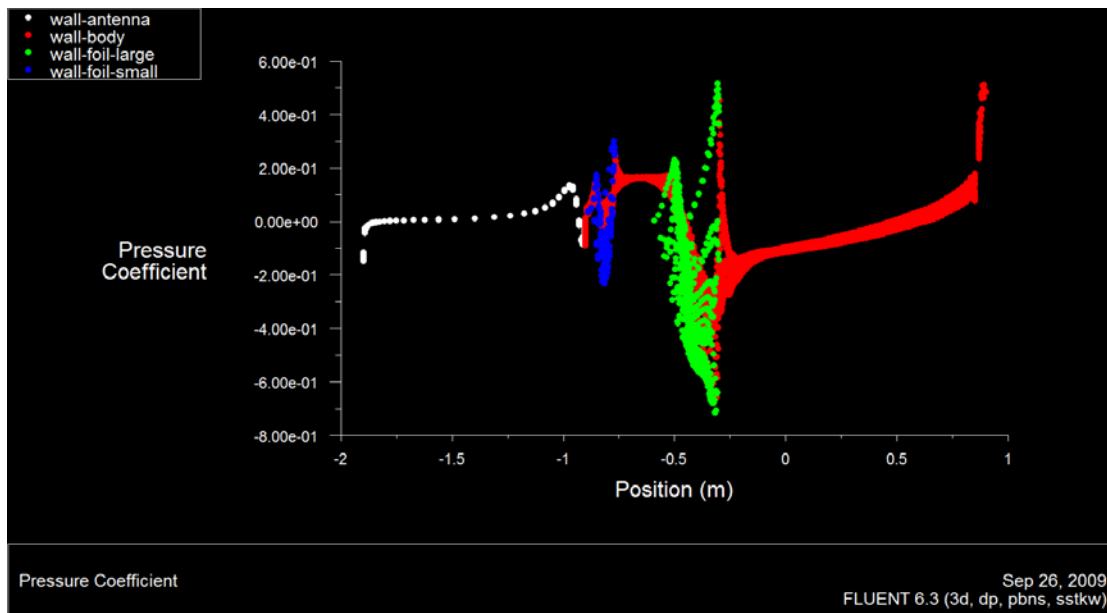
Πίνακας 3.14: Ροπή ως προς τον σωματοπαγή άξονα Y.

Άξονας	Ροπή λόγω πίεσης M_p [Ntm]	Ροπή λόγω τριβής M_f [Ntm]	Ολική Ροπή M [Ntm]	CM_p	CM_f	CM
Y (Pitch)	0,441446	-0,0009	0,440546	0,00203	-0,000004	0,002026

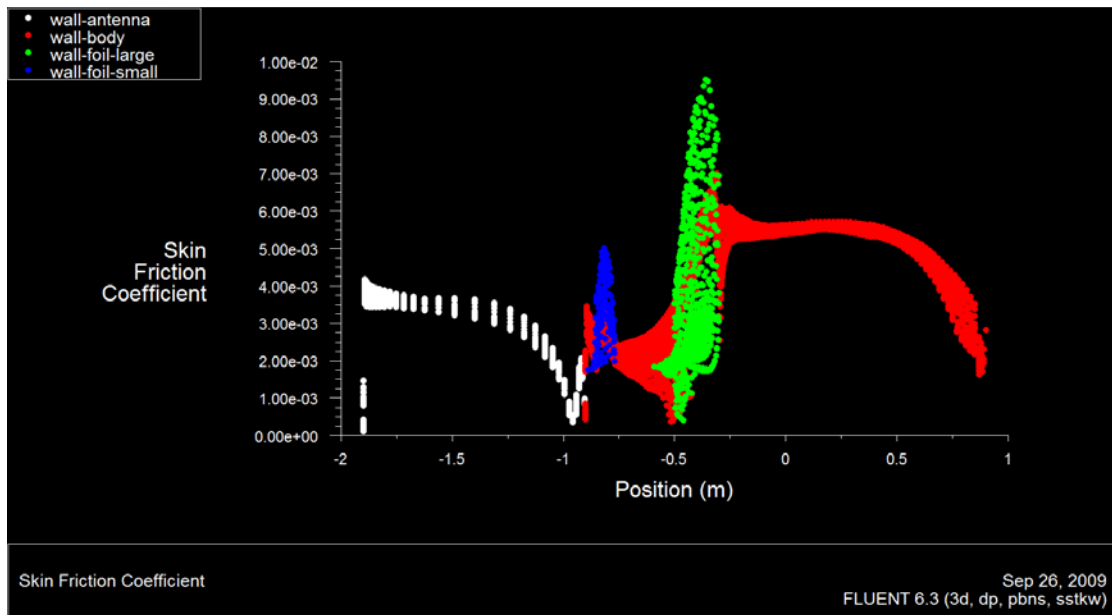
Πρόσπτωση υπό γωνία -2 deg



Σχήμα 3.69: Δυνάμεις και ροπές στο υδρόπτερο υπό γωνία πρόσπτωσης της ροής -2 deg.



Σχήμα 3.70: Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης C_p κατά μήκος της επιφάνειας του υδρόπτερου.



Σχήμα 3.71: Ο ρυθμός μεταβολής της τριβής c_f κατά μήκος της επιφάνειας του υδροπτέρου.

Πίνακας 3.15: Συνολικές δυνάμεις αντίστασης ως προς το σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

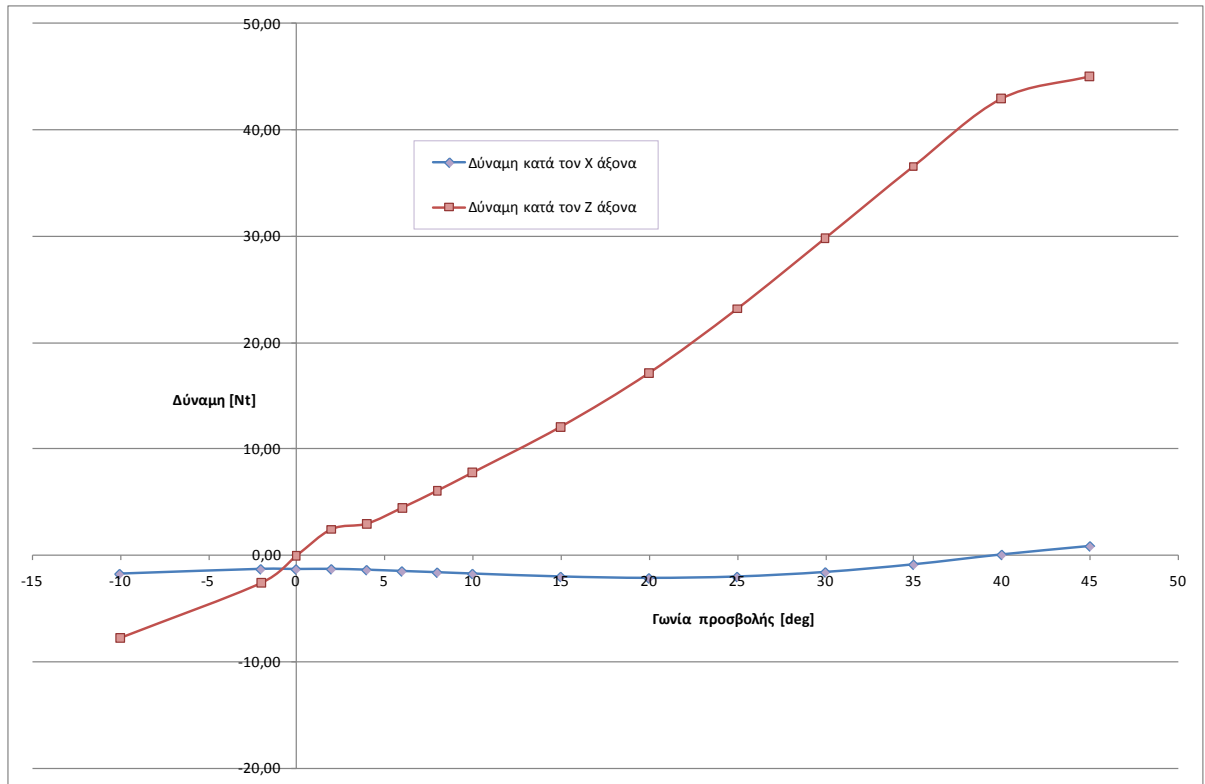
Κατεύθυνση δύναμης (X Y Z)	Αντίσταση πίεσης P [Nt]	Αντίσταση τριβής F [Nt]	Ολική Αντίσταση R [Nt]	Συντελεστής πίεσης CP	Συντελεστής τριβής CF	Συντελεστής αντίστασης CR
(1 0 0)	-0,53266	-0,77944	-1,312098	-0,00441	-0,006454	-0,010862
(0 0 1)	-2,55439	-0,021494	-2,575882	-0,021148	-0,000178	-0,021326

Πίνακας 3.16: Ροπή ως προς τον σωματοπαγή άξονα Y.

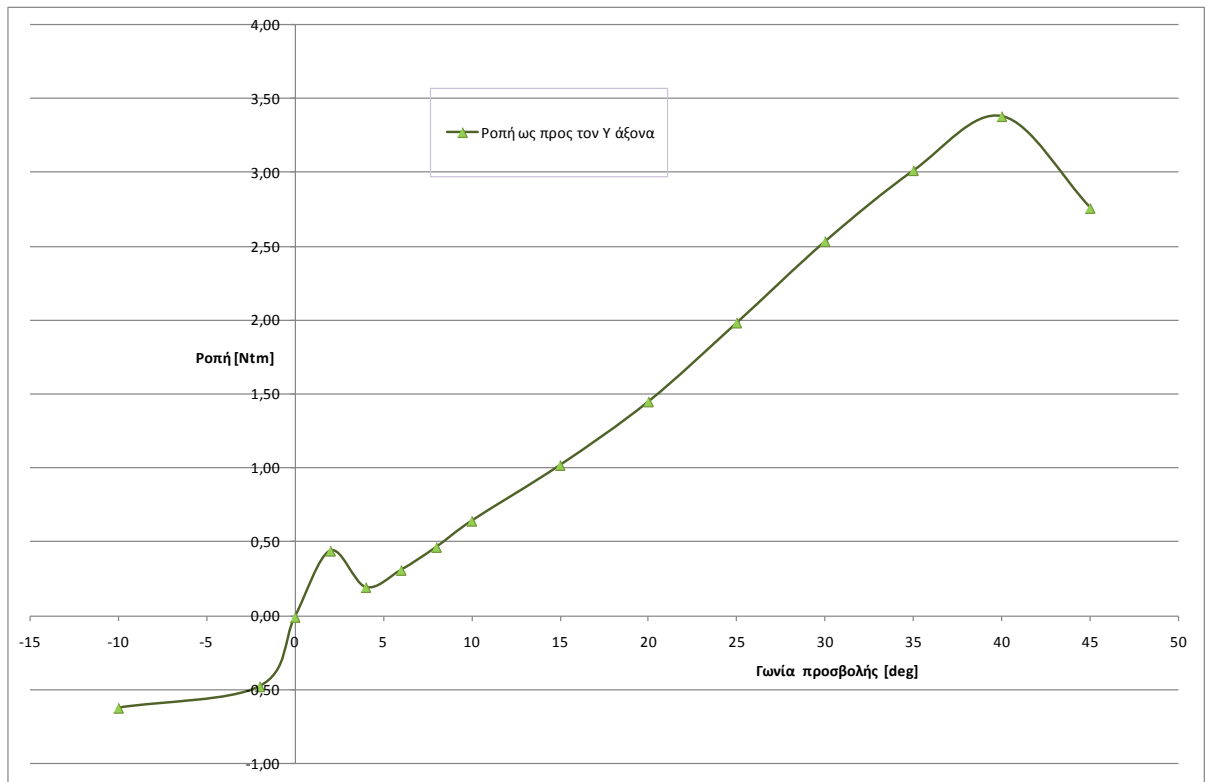
Άξονας	Ροπή λόγω πίεσης M_p [Ntm]	Ροπή λόγω τριβής M_f [Ntm]	Ολική Ροπή M [Ntm]	CM_p	CM_f	CM
Y (Pitch)	-0,478518	0,001084	-0,477434	-0,0022	0,000004	-0,002196

Μεταβολή αντίστασης με τη γωνία πρόσπτωσης

Διατηρώντας την ταχύτητα σταθερή, μεταβάλλεται η γωνία πρόσπτωσης μέχρι 45 μοίρες. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις δυνάμεις αντίστασης και τις ροπές συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. Οι δυνάμεις και ροπές παραμένουν αισθητά μικρές για τις μικρές γωνίες πρόσπτωσης που έχουν εφαρμογή στα υδρόπτερα, σε σχέση με αυτές που επιβάλλονται για μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης.



Σχήμα 3.72: Δυνάμεις κατά την X, Y, Z κατεύθυνση συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.



Σχήμα 3.73: Ροπές ως τους X, Y, Z άξονες συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.

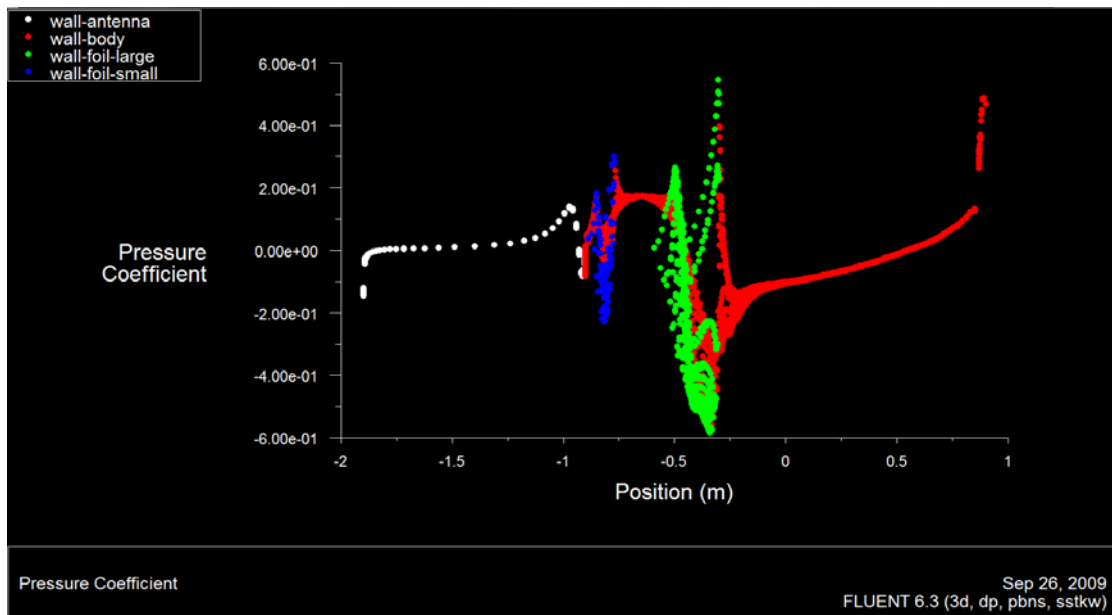
Πίνακας 3.17: Δυνάμεις αντίστασης και ροπές σαν συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης.

Γωνία Πρόσπτωσης [deg]	Δύναμη X [Nt]	Δύναμη Z [Nt]	Ροπή ως προς Y [Ntm]
-10	-1,76185	-7,73973	-0,62292
-2	-1,31210	-2,57588	-0,47743
0	-1,32815	-0,01629	-0,00811
2	-1,31208	2,48181	0,44055
4	-1,39225	2,99643	0,19446
6	-1,51451	4,49048	0,31034
8	-1,63140	6,09994	0,46586
10	-1,75622	7,79649	0,64332
15	-2,03497	12,10044	1,02070
20	-2,16755	17,13885	1,45098
25	-2,03816	23,16192	1,98506
30	-1,60697	29,79925	2,53639
35	-0,88453	36,54107	3,01659
40	0,05127	42,90735	3,38237
45	0,85358	45,00839	2,76081

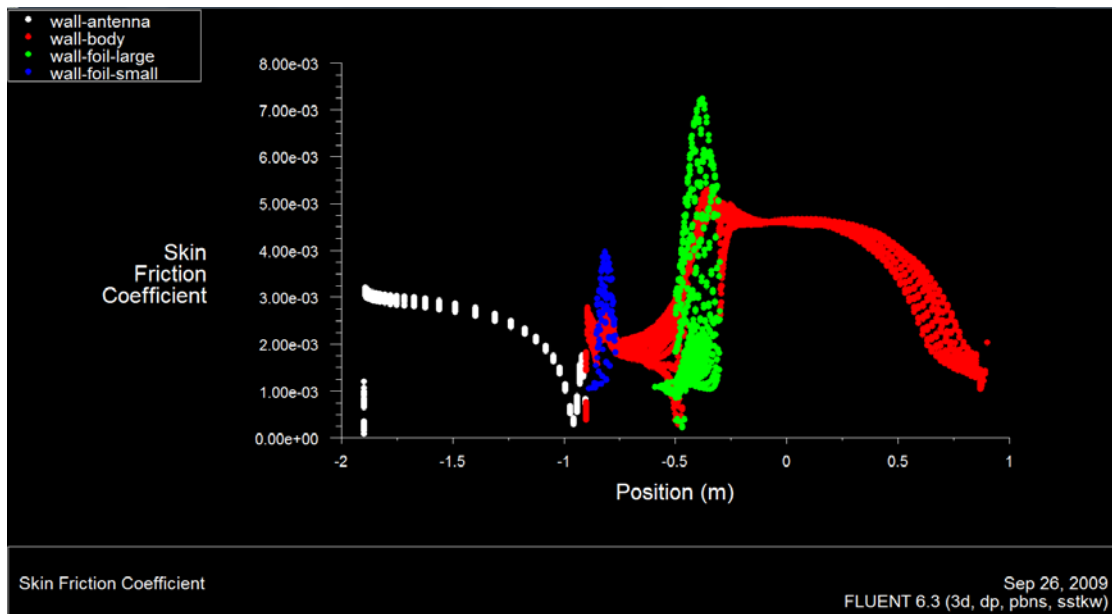
Συνυπολογισμός ρεύματος $V_{current}=0,7$ m/s

Συνυπολογίζεται ρεύμα ταχύτητας $-0,7$ m/s θεωρώντας ότι προσπίπτει μετωπικά κατά τη διεύθυνση x πάνω στο όχημα, οπότε επιλύεται η ροή θεωρώντας πάλι ταχύτητα του υποβρυχίου $0,5$ m/s και επιπροσθέτως μία ταχύτητα της ροής $-0,7$ m/s.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τον επιφανειακό συντελεστή πίεσης και τριβής κατά μήκος του οχήματος καθώς και συνολικές δυνάμεις αντίστασης προς διάφορες κατευθύνσεις.



Σχήμα 3.74: Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης c_p κατά μήκος της επιφάνειας του υδροπτέρου.



Σχήμα 3.75: Ο ρυθμός μεταβολής της τριβής c_f κατά μήκος της επιφάνειας του υδροπτέρου.

Πίνακας 3.18: Συνολικές δυνάμεις αντίστασης ως προς το σωματοπαγές σύστημα αναφοράς.

Κατεύθυνση δύναμης (X Y Z)	Αντίσταση πίεσης P [Nt]	Αντίσταση τριβής F [Nt]	Ολική Αντίσταση R [Nt]	Συντελεστής πίεσης CP	Συντελεστής τριβής CF	Συντελεστής αντίστασης CR
(1 0 0)	-3,17606	-3,79165	-6,96771	-0,004304	-0,005138	-0,009442
(0 0 1)	0,001904	0,000466	0,002372	0,000002	0	0,000004

Πίνακας 3.19: Ροπή ως προς τον σωματοπαγή άξονα Y.

Άξονας	Ροπή λόγω πίεσης M_p [Ntm]	Ροπή λόγω τριβής M_f [Ntm]	Ολική Ροπή M [Ntm]	CM_p	CM_f	CM
Y (Pitch)	-0,006498	-0,000192	-0,006306	-0,000004	0	-0,000004

ΜΗ ΜΟΝΙΜΗ ΡΟΗ – ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΗΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΗΣ ΑΠΟ ΔΙΑΔΟΧΙΚΕΣ ΚΑΤΑΔΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΝΑΔΥΣΕΙΣ

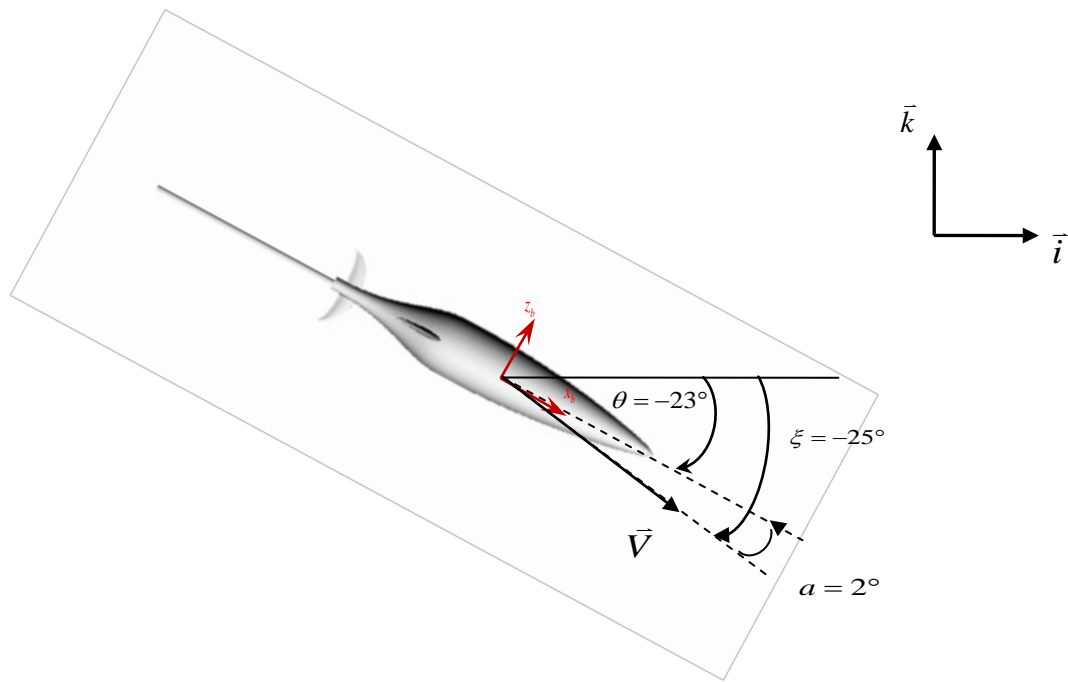
Στην ενότητα αυτή η ροή θεωρείται μη μόνιμη και το πρόβλημα επιλύεται συναρτήσει του χρόνου. Το τρισδιάστατο πεδίο ροής γύρω από το υδρόπτερο μοντελοποιείται και επιλύεται αριθμητικά με το Fluent θεωρώντας το πριονωτό μοντέλο μετακίνησης του οχήματος, δηλαδή τη σύνθεση της διαδρομής από μια ακολουθία διαδοχικών καταδύσεων και αναδύσεων.



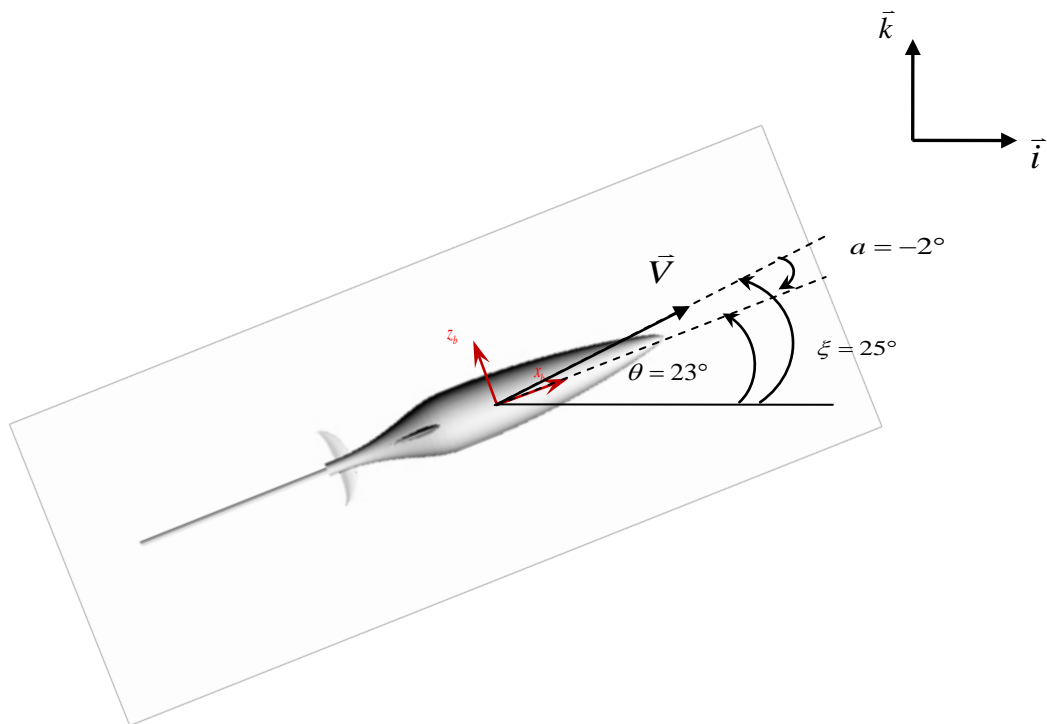
Σχήμα 3.76: Μετακίνηση του υδροπτέρου κατά το πριονωτό πρότυπο.

Κάθε κύκλος της ακολουθίας αποτελείται από πέντε στάδια: αρχικά το όχημα βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας και πραγματοποιεί στροφή προς τα κάτω μέχρι να αποκτήσει την επιθυμητή γωνία ώστε να καταδυθεί. στη συνέχεια καταδύεται μέχρι τα 80 m περίπου υπό αυτή τη γωνία και τότε αρχίζει να στρέφει πάλι ώστε η ταχύτητα και το όχημα να αποκτήσουν διεύθυνση προς τα πάνω, έπειτα αναδύεται μέχρι την επιφάνεια και τέλος στρέφει στην οριζόντια διεύθυνση. Σημειώνεται ότι σε κάθε τέτοιο κύκλο η οριζόντια μετατόπιση του οχήματος είναι 370 m.

Τα στιγμιότυπα της κατάδυσης και της ανάδυσης φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Οι γωνίες που περιγράφουν την κίνηση είναι οι εξής: α είναι η γωνία προσβολής δηλαδή αυτή που σχηματίζει το άνυσμα της ταχύτητας με τον κύριο άξονα του οχήματος, θ είναι η γωνία pitch και ορίζεται από τον κύριο άξονα του υποβρυχίου την οριζόντια διεύθυνση και ξ το άθροισμα των δύο προηγούμενων.



Σχήμα 3.77: Ορισμός των γωνιών κατά την κατάδυση του οχήματος



Σχήμα 3.78: Ορισμός των γωνιών κατά την ανάδυση του οχήματος

Αναλυτικότερα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου με περίοδο 810 sec τα διάφορα μεγέθη μεταβάλλονται ως εξής:

1. $t=0$ έως $t=50$ sec

Το υποβρύχιο βρίσκεται αρχικά στην επιφάνεια σε οριζόντια θέση τη στιγμή $t=0$. Αρχίζει να στρίβει προς τα κάτω ώστε να πραγματοποιήσει κατάδυση υπό γωνία $\alpha=2^\circ$ και $\theta=-23^\circ$ και σταθερή ταχύτητα $v=0,5$ m/sec.

Αρχική τιμή μεγέθους	Τελική τιμή
$t=0$ sec	$t=50$ sec
$\theta=0^\circ$	$\theta=-23^\circ$
$\alpha=0^\circ$	$\alpha=2^\circ$
$v=0,5$ m	$v=0,5$ m
$z=0$ m	$z=-6,9$ m

2. $t=51$ sec έως $t=380$ sec

Αρχίζει την κατάδυση υπό γωνία $\alpha=2^\circ$ και $\theta=-23^\circ$ και σταθερή ταχύτητα $v=0,5$ m/sec μέχρι τα 80 m.

Αρχική τιμή μεγέθους	Τελική τιμή
$t=51$ sec	$t=380$ sec
$\theta=-23^\circ$	$\theta=-23^\circ$
$\alpha=2^\circ$	$\alpha=2^\circ$
$v=0,5$ m	$v=0,5$ m
$z=-7,1$ m	$z=-76,6$ m

3. $t=381$ sec έως $t=430$ sec

Αρχίζει να στρέφει μέχρι να αποκτήσει γωνίες με αντίθετο πρόσημο ώστε να ξεκινήσει την ανάδυση.

Αρχική τιμή μεγέθους	Τελική τιμή
$t=381$ sec	$t=430$ sec
$\theta=-23^\circ$	$\theta=23^\circ$
$\alpha=2^\circ$	$\alpha=-2^\circ$
$v=0,5$ m	$v=0,5$ m
$z=-76,85$ m	$z=-76,4$ m

4. $t=431$ sec έως $t=760$ sec

Πραγματοποιεί την ανάδυση υπό γωνία $\alpha=-2^\circ$ και $\theta=23^\circ$ και σταθερή ταχύτητα $v=0.5$ m/sec.

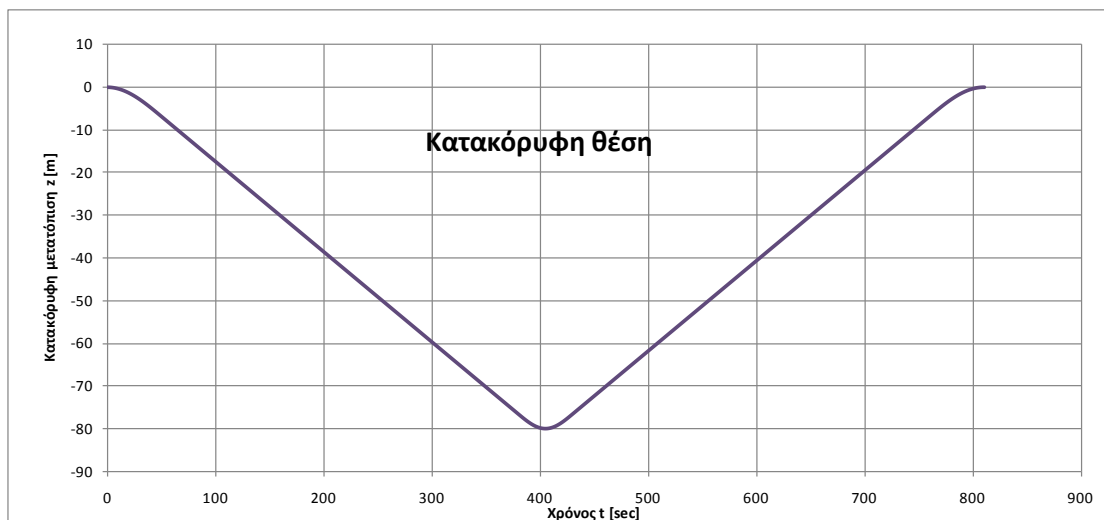
Αρχική τιμή μεγέθους	Τελική τιμή
$t=431$ sec	$t=760$ sec
$\theta=23^\circ$	$\theta=23^\circ$
$\alpha=-2^\circ$	$\alpha=-2^\circ$
$v=0,5$ m	$v=0,5$ m
$z=-76,2$ m	$z=-6,7$ m

5. $t=761 \text{ sec}$ έως $t=810 \text{ sec}$

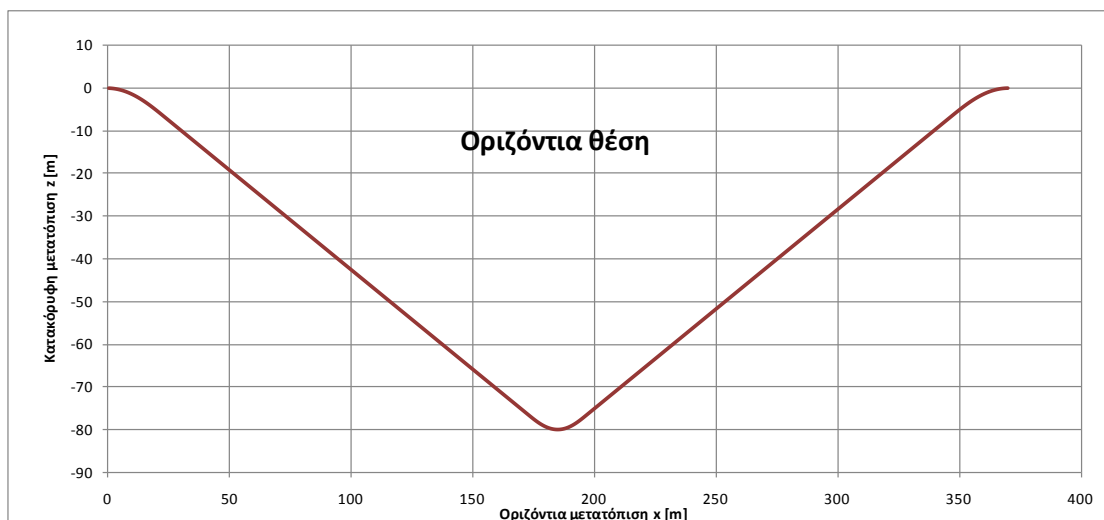
Επιστρέφει στην επιφάνεια σε οριζόντια θέση.

Αρχική τιμή μεγέθους	Τελική τιμή
$t=761 \text{ sec}$	$t=810 \text{ sec}$
$\theta=23^\circ$	$\theta=0^\circ$
$\alpha=-2^\circ$	$\alpha=0^\circ$
$v=0,5 \text{ m}$	$v=0,5 \text{ m}$
$z=-6,5 \text{ m}$	$z=0$

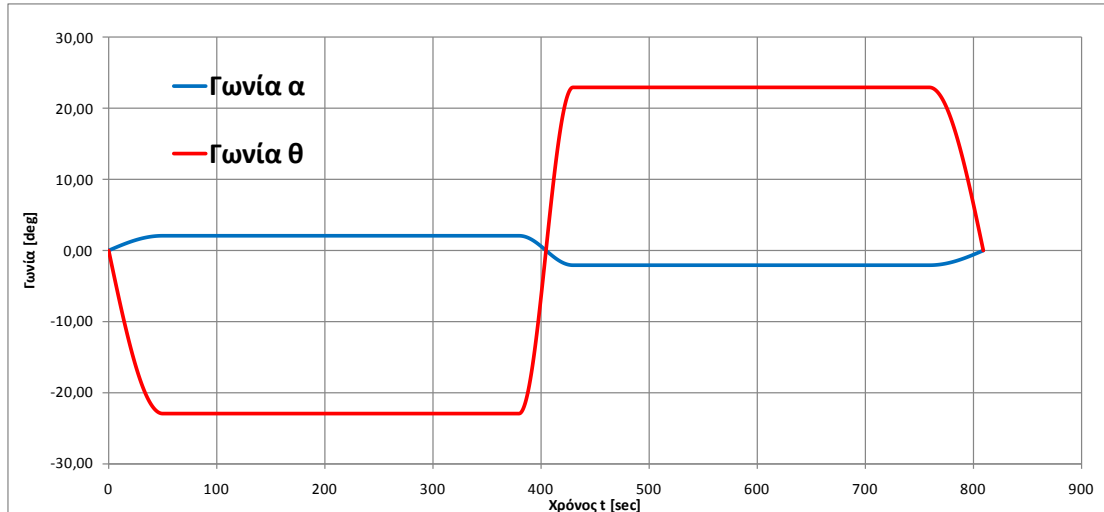
Στα επόμενα σχήματα φαίνεται πως μεταβάλλεται το βάθος και η οριζόντια απόσταση στο πέρασμα του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου καθώς και οι γωνίες α και θ .



Σχήμα 3.79: Κατακόρυφη θέση του οχήματος συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου



Σχήμα 3.80: Οριζόντια θέση του οχήματος συναρτήσει του βάθους κατά τη διάρκεια ενός κύκλου

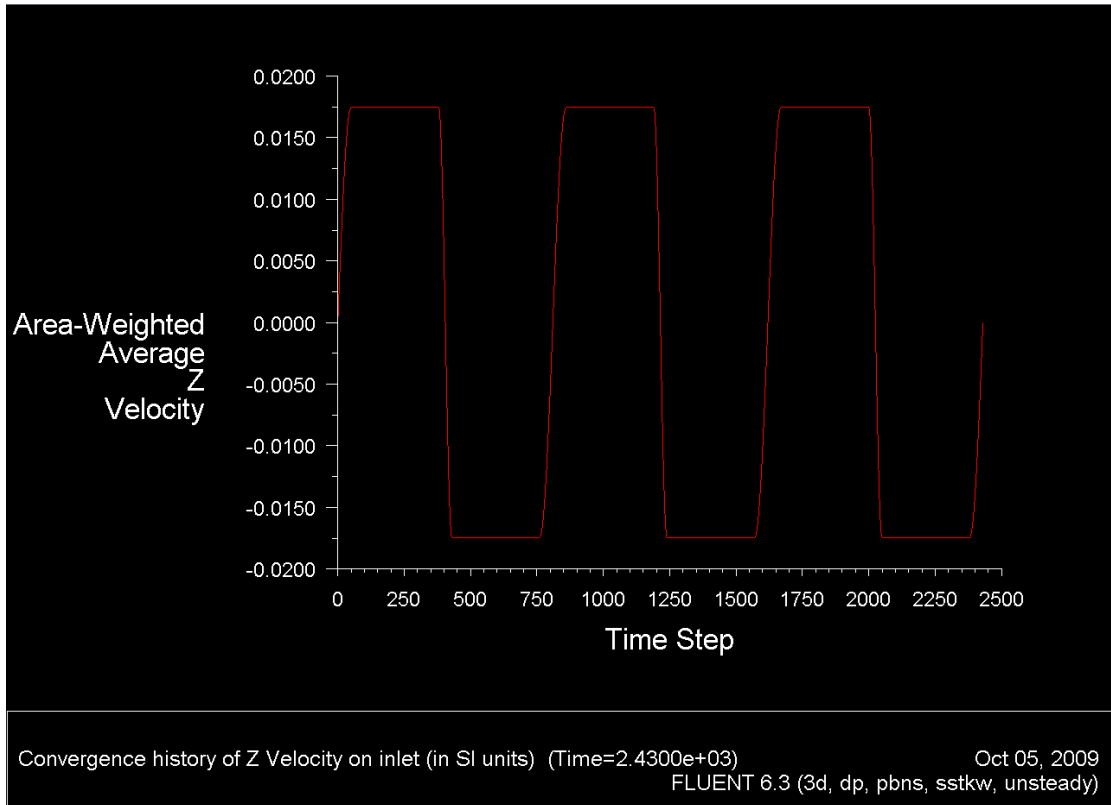


Σχήμα 3.81: Μεταβολή των γωνιών α και θ συναρτήσει του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός κύκλου

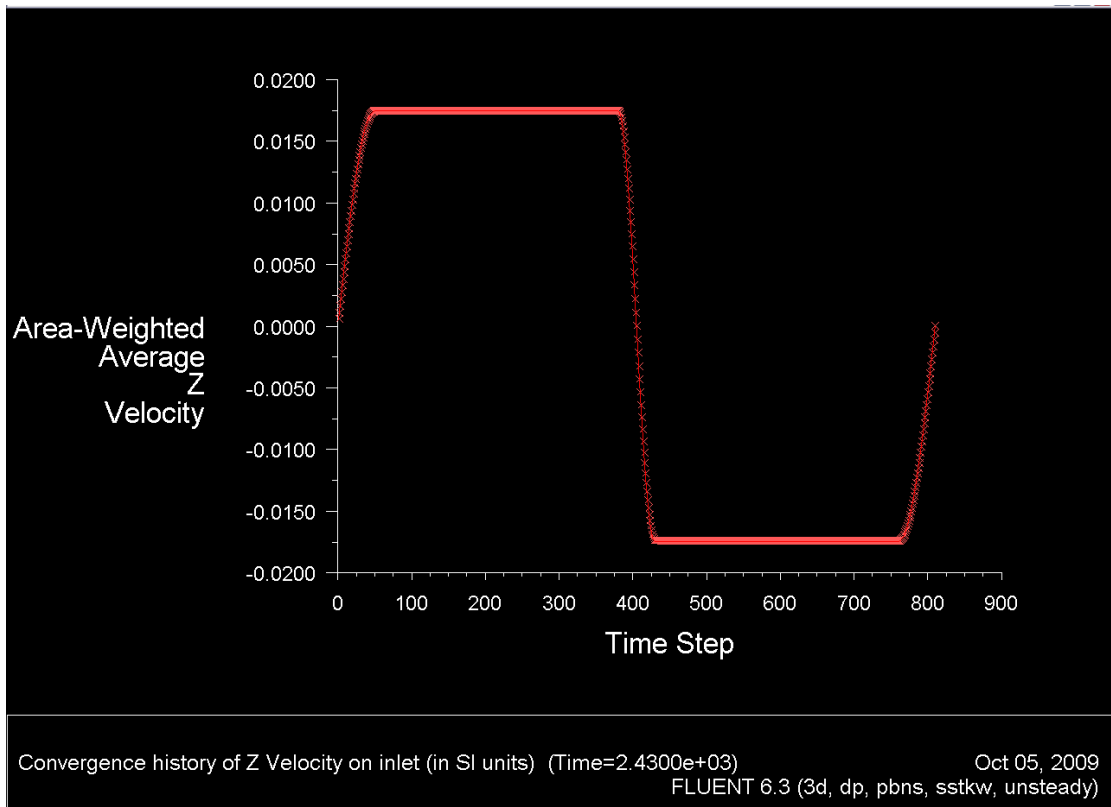
Το διακριτοποιημένο πεδίο ροής γύρω από το υδρόπτερο εισάγεται στο Fluent για να προσομοιωθεί αριθμητικά η μη μόνιμη ροή. Η αριθμητική επίλυση γίνεται θεωρώντας το υποβρύχιο όχημα ακίνητο ενώ οι συνοριακές συνθήκες ορίζονται ώστε να μεταβάλεται ανάλογα η επ'άπειρο ταχύτητα στα όρια του πεδίου. Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιείται είναι το SST (Shear – Stress Transport) κ - ω μοντέλο.

Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση περιλαμβάνει κάποια χρονικά διαστήματα όπου η κίνηση είναι περιστροφική κατά τη μετάβαση από κατάδυση σε ανάδυση και αντίστροφα. Σε αυτή την περίπτωση επειδή στην κίνηση υπεισέρχεται γωνιακή επιτάχυνση και το σύστημα είναι μη αδρανειακό θα πρέπει στις εξισώσεις της ορμής να προστεθούν επιπλέον όροι επιτάχυνσης (επιτάχυνση Coriolis). Λόγω όμως της πολύ μικρής τιμής της γωνιακής επιτάχυνσης κατά την περιστροφική κίνηση (0,0014 rad/sec και 0,0007 rad/sec) επιλέγουμε χάριν απλότητας να θεωρήσουμε ότι οι όροι αυτοί δεν συνεισφέρουν σημαντικά στα αποτελέσματα και στην ακρίβεια που απαιτεί το πρόβλημα, ώστε και να τους συμπεριλάβουμε στις εξισώσεις της ορμής.

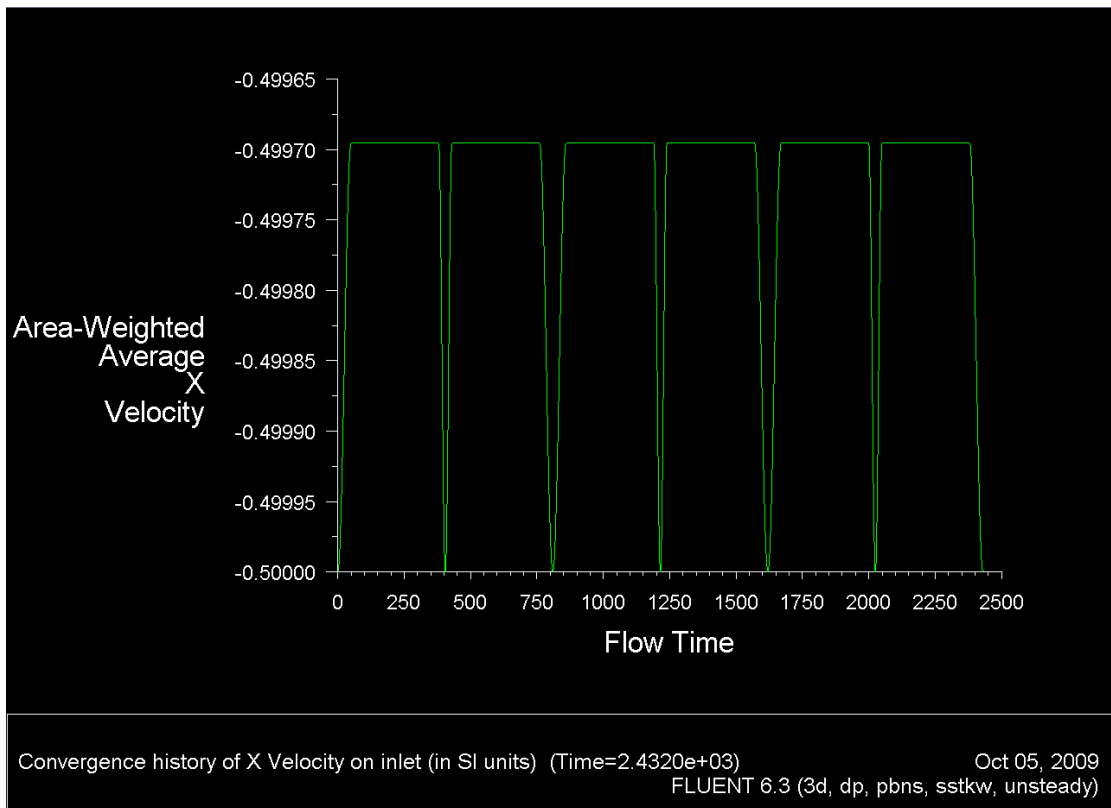
Παρατίθενται στη συνέχεια αποτελέσματα που προκύπτουν για την ταχύτητα, την κινητική ενέργεια τύρβης, τους συντελεστές αντίστασης, άνωσης και ροπής, καθώς και τους συντελεστές πίεσης και τριβής.



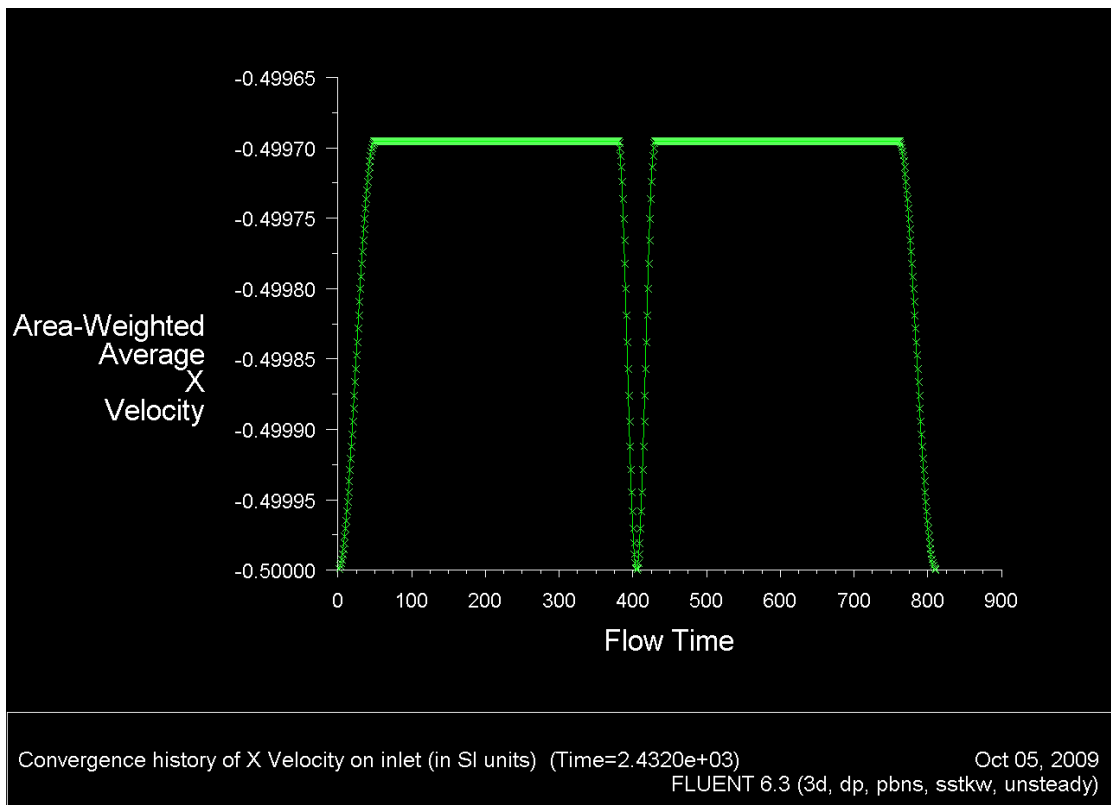
Σχήμα 3.82: Μεταβολή της κατακόρυφης ταχύτητας με το χρόνο κατά τη διάρκεια τριών κύκλων



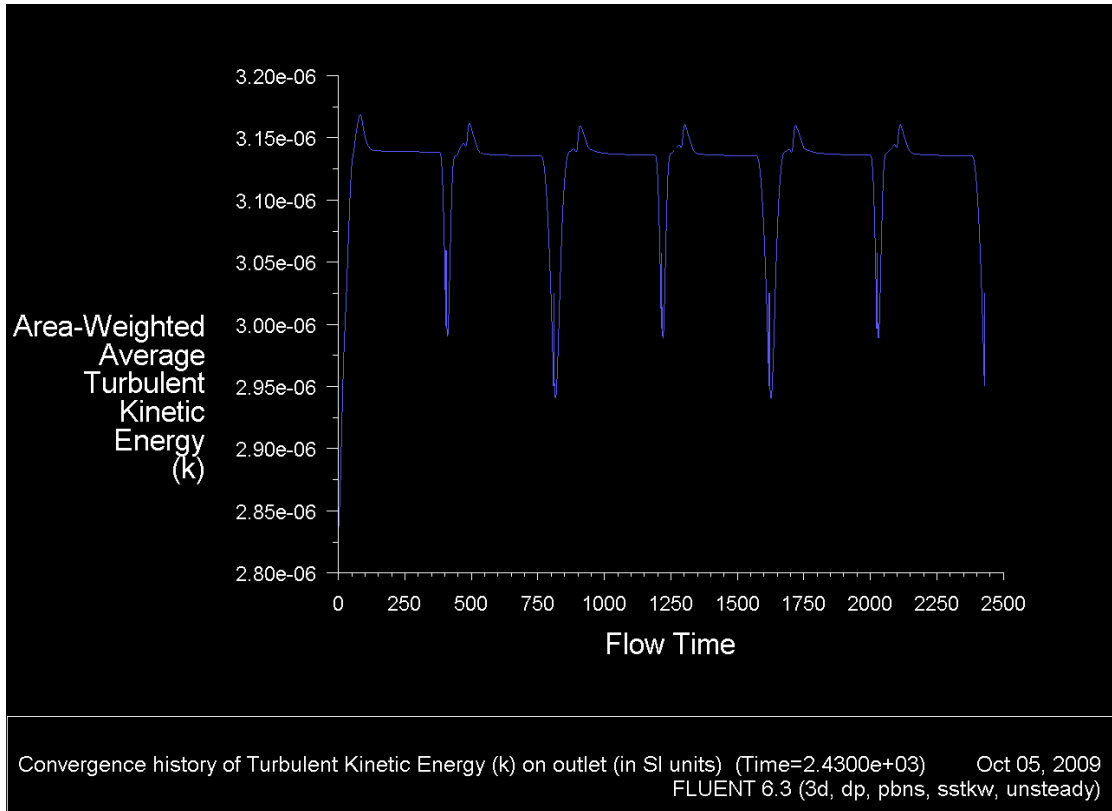
Σχήμα 3.83: Μεταβολή της κατακόρυφης ταχύτητας με το χρόνο κατά τη διάρκεια ενός κύκλου



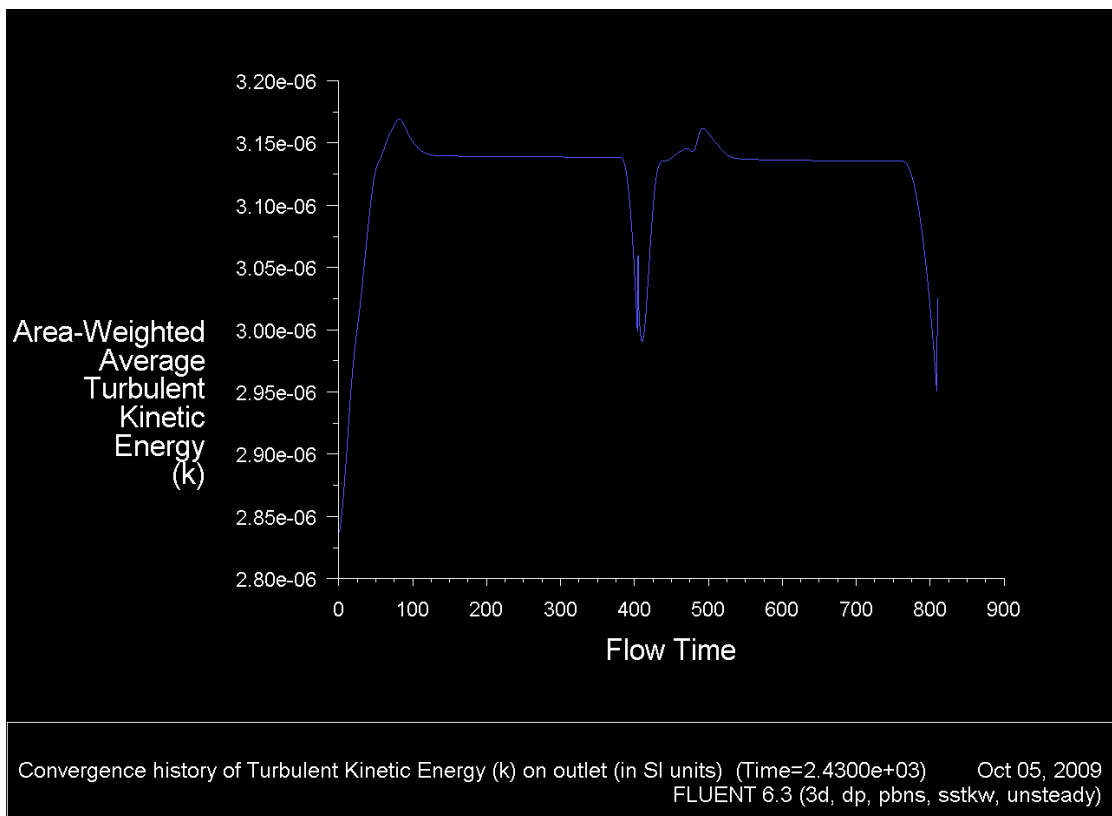
Σχήμα 3.84: Μεταβολή της οριζόντιας ταχύτητας με το χρόνο κατά τη διάρκεια τριών κύκλων



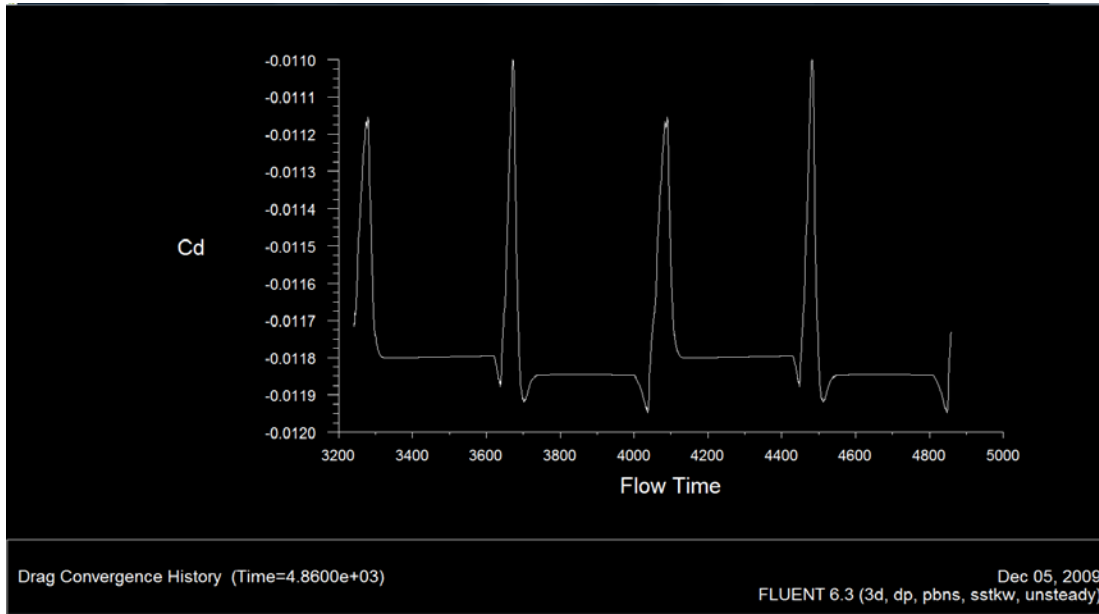
Σχήμα 3.85: Μεταβολή της οριζόντιας ταχύτητας με το χρόνο κατά τη διάρκεια ενός κύκλου



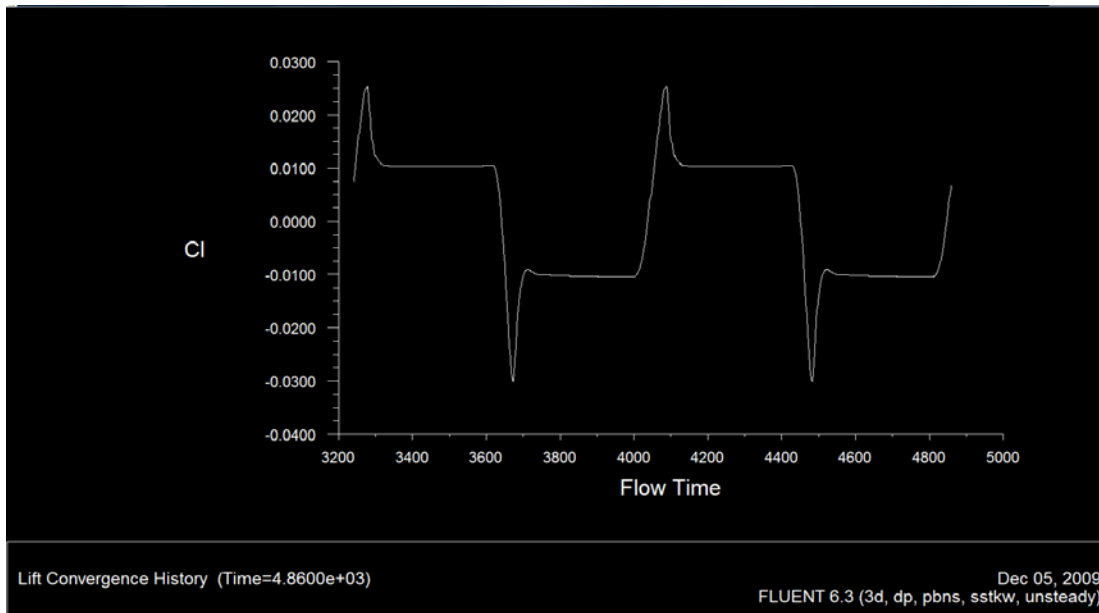
Σχήμα 3.86: Μεταβολή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας με το χρόνο κατά τη διάρκεια τριών κύκλων



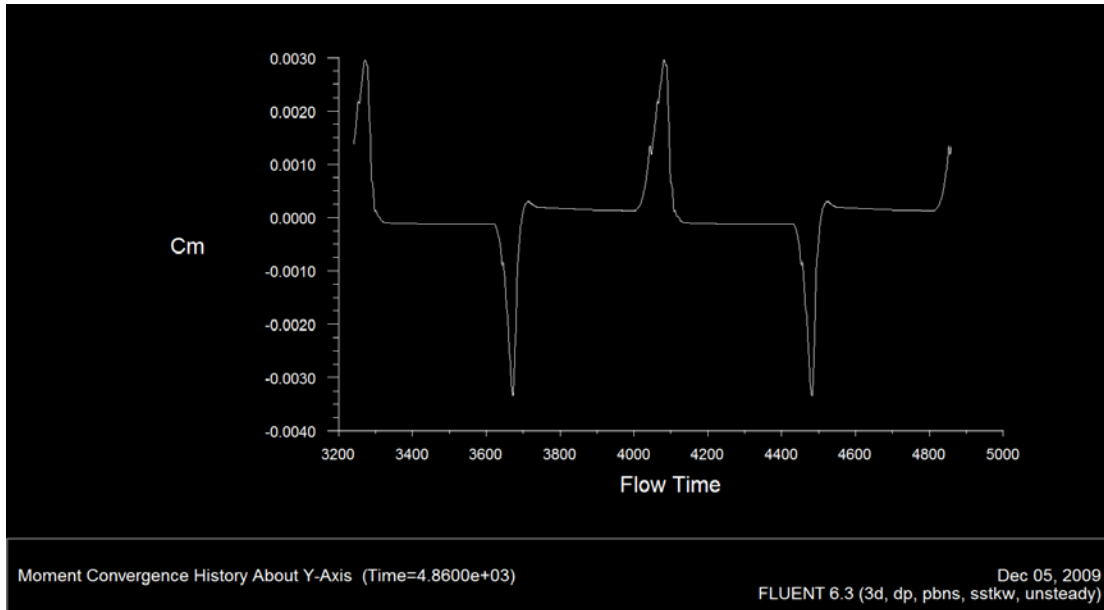
Σχήμα 3.87: Μεταβολή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας με το χρόνο κατά τη διάρκεια ενός κύκλου



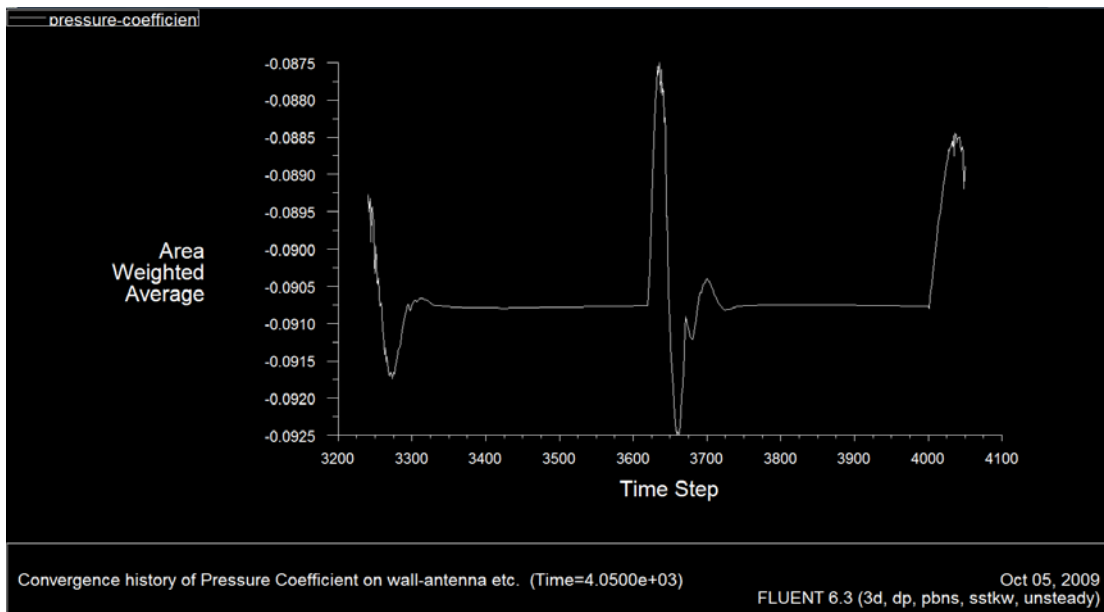
Σχήμα 3.88: Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης με το χρόνο κατά τη διάρκεια δύο κύκλων



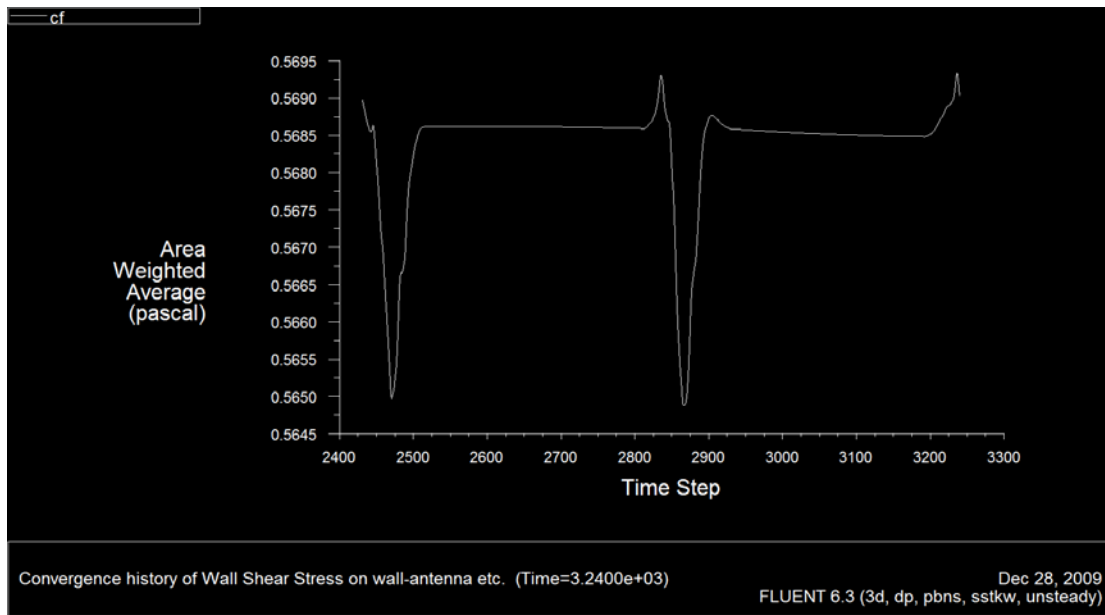
Σχήμα 3.89: Μεταβολή του συντελεστή άνωσης με το χρόνο κατά τη διάρκεια δύο κύκλων



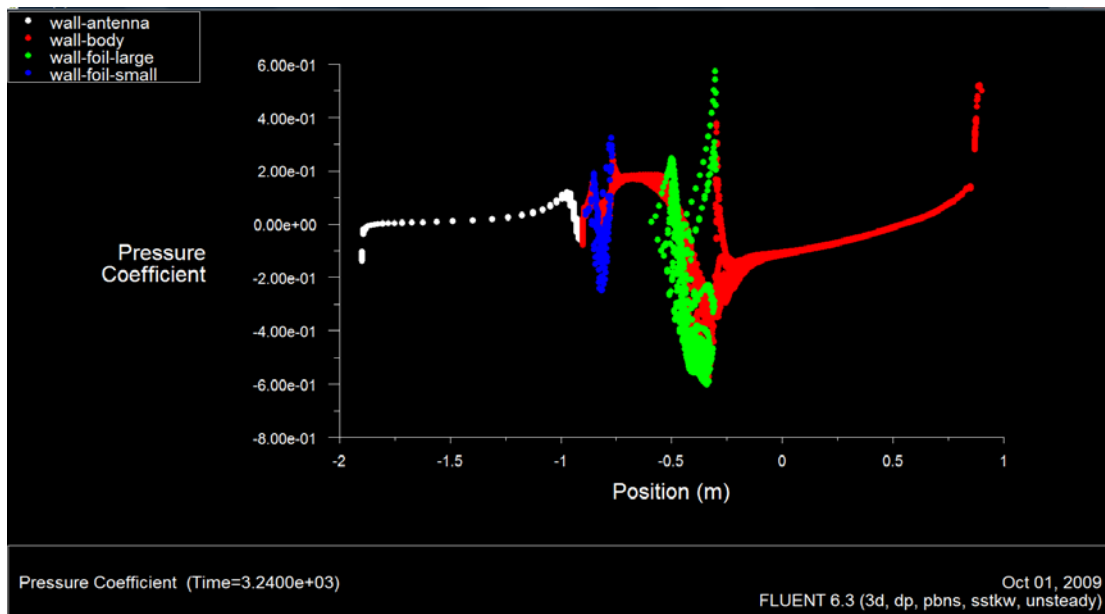
Σχήμα 3.90: Μεταβολή του συντελεστή ροπής ως προς τον y άξονα με το χρόνο κατά τη διάρκεια δύο κύκλων



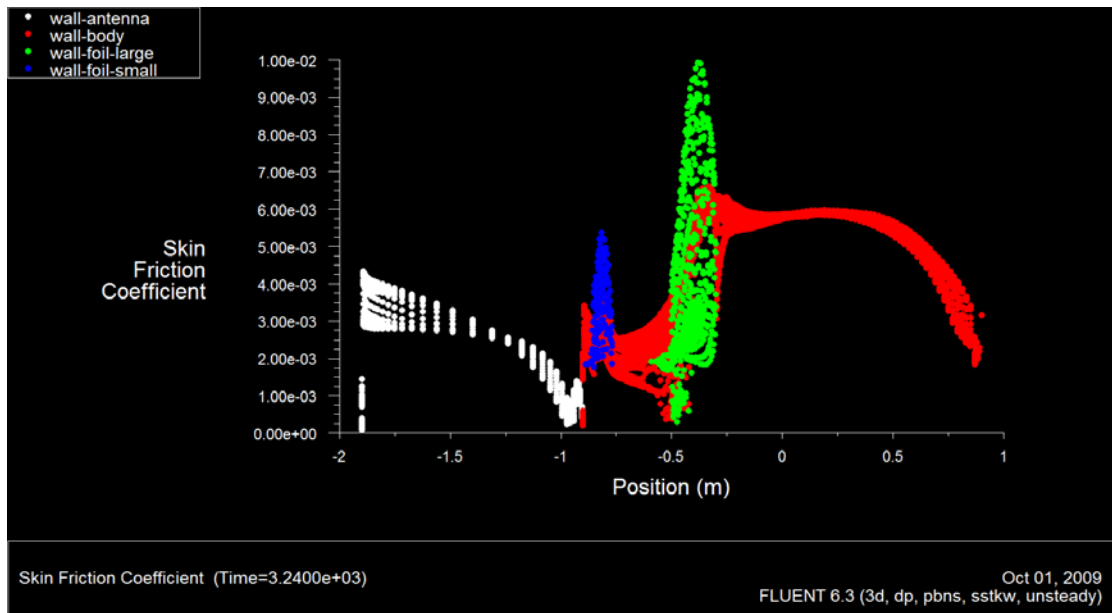
Σχήμα 3.91: Μεταβολή του συντελεστή πίεσης με το χρόνο κατά τη διάρκεια ενός κύκλου



Σχήμα 3.92: Μεταβολή του συντελεστή επιφανειακής τριβής με το χρόνο κατά τη διάρκεια ενός κύκλου



Σχήμα 3.93: Ο επιφανειακός συντελεστής πίεσης κατά μήκος του οχήματος

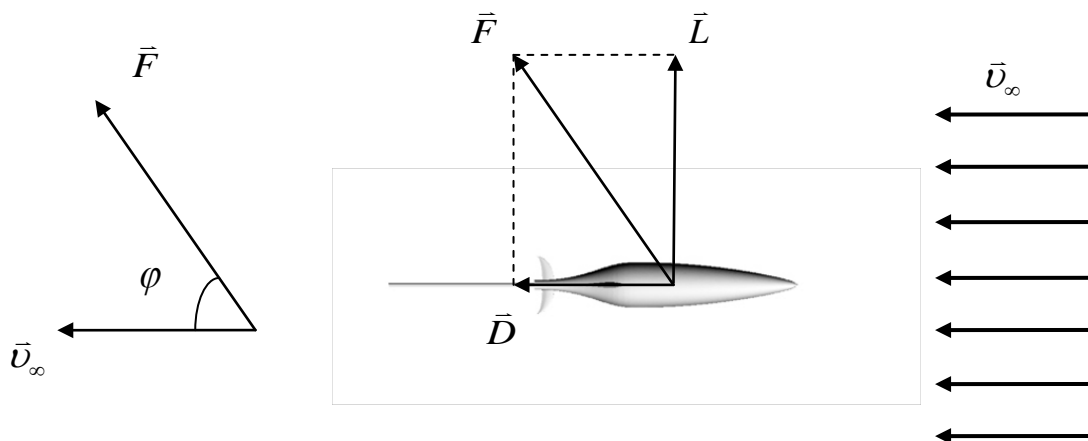


Σχήμα 3.94: Ο συντελεστής επιφανειακής τριβής κατά μήκος του οχήματος

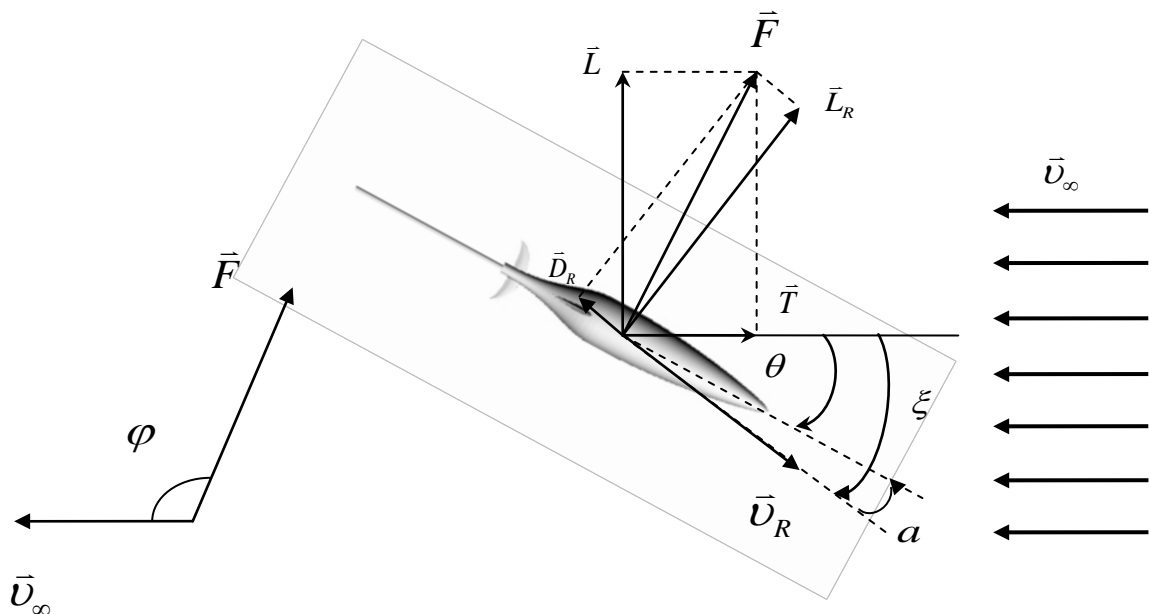
ΠΡΩΩΣΗ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΣΤΟ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΘΟΔΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΟΔΙΚΗ ΠΟΡΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟ ΡΕΥΣΤΟ

Η δημιουργία πρόωσης προϋποθέτει την εμφάνιση ώσης T (Thrust) στο υποβρύχιο, δηλαδή η επενεργούσα δύναμη από το ρευστό στο όχημα να εμφανίζεται παράλληλη με το πεδίο ροής συνιστώσα δύναμης, ίδιας φοράς με την πρόσω κίνηση του οχήματος. (ή όμοια, φορά αντίθετη της επ' άπειρο ταχύτητας) [2].

Προφανώς θα ήταν αδύνατη η εμφάνιση ώσης στο στατικό όχημα μέσα σε σταθερή επ' άπειρο ροή, διότι για οποιαδήποτε γωνία προσβολής θα εμφανίζεται πάντα συνιστώσα αντίστασης \vec{D} (Drag). Λόγω της συνεκτικότητας στην στατική περίπτωση, η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων της εμφανιζόμενης δύναμης από το ρευστό στο όχημα \vec{F} και του διανύσματος της ταχύτητας επ' άπειρου ροής \vec{U}_∞ , θα σχηματίζει πάντοτε οξεία γωνία με $\varphi < 90^\circ$ (σχήμα 3.95). Προκύπτει λοιπόν ότι σε κάθε περίπτωση η δημιουργία πρόωσης προϋποθέτει τη δυναμική μετακίνηση του οχήματος μέσα στο ρευστό κατά τρόπο τέτοιο, ώστε η επενεργούσα δύναμη \vec{F} να σχηματίζει γωνία $90^\circ < \varphi < 270^\circ$ με την επ' άπειρο ροή (σχήμα 3.95).



Σχήμα 3.95: Επενεργούσα δύναμη σε σχέση με την ταχύτητα, στατική περίπτωση



Σχήμα 3.96: Επενεργούσα δύναμη σε σχέση με την ταχύτητα, μη στατική περίπτωση

Η μετακίνηση του οχήματος μέσα στο ρευστό, δημιουργεί ένα πεδίο ροής γύρω του, όπου και διαμορφώνονται η γωνία προσβολής α , η γωνία θ και η γωνία ξ καθορίζοντας τη διαδρομή του οχήματος, με $\alpha = \theta - \xi$. Η γωνία προσβολής είναι αυτή που καθορίζει αν θα δημιουργηθεί συνιστώσα ώσης, κατευθύνοντας ουσιαστικά τη διεύθυνση της δύναμης \vec{F} . Συγκεκριμένα με την επιλογή της συγκεκριμένης γωνίας προσβολής αλλά και της γωνίας θ δηλαδή του προσανατολισμού του οχήματος σε σχέση με την επ' άπειρο ροή ουσιαστικά η επενεργούσα δύναμη από το ρευστό καθοδηγείται σε πρόσω κατεύθυνση (σχήμα 3.96).

Στη δεδομένη περίπτωση η αντίσταση \vec{D}_R είναι η παράλληλη στην ταχύτητα συνιστώσα της δύναμης \vec{F} ενώ η δημιουργούμενη άωση \vec{L}_R είναι η κάθετη στην ταχύτητα του οχήματος συνιστώσα. Η φαινόμενη για το σύστημα προωθητική δύναμη προέρχεται από την “πρόσω” συνιστώσα της άωσης \vec{L}_R μείον της παράλληλης στην επ’ άπειρον ταχύτητα συνιστώσα της αντίστασης \vec{D}_R . Αναλύοντας την δύναμη \vec{F} στην παράλληλη και στην κάθετη διεύθυνση της επ’ άπειρο ροής σε κάθε περίπτωση θα λαμβάνουμε την κάθετη συνιστώσα της άωσης \vec{L} καθώς και την παράλληλη συνιστώσα της δύναμης στην \vec{v}_∞ , άλλοτε ώσης \vec{T} (thrust) και άλλοτε αντίστασης \vec{D} (drag). Συνεπώς η προωθητική δύναμη που επενεργεί από το ρευστό στο όχημα αποτελείται από τη συνισταμένη των δυνάμεων πραγματικής άωσης και αντίστασης με θετική συνεισφορά της πρώτης για $\varphi > 90^\circ$ και αρνητική εισφορά πάντοτε της δεύτερης (σχήμα 3.96).

Στην περίπτωση του υποβρυχίου υδροπτέρου, όπως επεξηγήθηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι διαδρομές που πραγματοποιεί απαιτείται να πραγματοποιούνται σε κατάσταση ισορροπίας ώστε απαιτούμενη ενέργεια για την κίνηση να ελαχιστοποιείται. Αυτό μεταφράζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση όχι στη δημιουργία πρόωσης αλλά στην εμφάνιση της επενεργούσας δύναμης από το ρευστό στο όχημα πάνω στον κατακόρυφο άξονα, που μεταφράζεται σε μηδενική ώση ή αντίστοιχα μηδενική αντίσταση, $\vec{D} = \vec{T} = 0$. Η εμφάνιση κατ’ αποκλειστικότητα μόνο άωσης κατά τον κατακόρυφο άξονα, δίνει τη δυνατότητα στο όχημα να πραγματοποιήσει την άνοδο και την κάθοδο σε ισορροπία, ρυθμίζοντας κατάλληλα τη δεξαμενή έρματος του οχήματος, ώστε η συνισταμένη δύναμη να είναι μηδενική.

Αυτό σημαίνει ότι η γωνία που σχηματίζουν η επ’ άπειρο ταχύτητα με την επενεργούσα δύναμη \vec{F} από το ρευστό στο σώμα θα πρέπει να είναι $\varphi = 90^\circ$. Στη συνέχεια θα πάρουμε τα αποτελέσματα για κάποιες περιπτώσεις διαδρομών για τις οποίες το πεδίο ροής επιλύθηκε δυναμικά για κάποιο χρονικό διάστημα και θα υπολογίσουμε τη δύναμη \vec{F} που ασκείται από το ρευστό στο όχημα κατά την κάθοδο και κατά την άνοδο του υποβρυχίου, καθώς και τη γωνία φ που σχηματίζει με την επ’ άπειρον ροή. Στο επόμενο κεφάλαιο που θα γίνει η εφαρμογή του μαθηματικού δυναμικού μοντέλου στο υποβρύχιο υδρόπτερο που σχεδιάστηκε στο παρόν, θα

δούμε ότι η δύναμη \vec{F} έχει διεύθυνση κάθετη στην επ' άπειρο ροή για τις διαδρομές εκείνες που καθορίζονται από τις γωνίες ξ και α , οι οποίες προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων του δυναμικού μοντέλου σε κατάσταση ισορροπίας.

Επιπλέον για να πραγματοποιηθεί μία σταθερή διαδρομή θα πρέπει να συντρέχουν τα εξής: κατ' αρχήν το πρόσημο της γωνίας ξ καθορίζει το αν καταδύεται ή αναδύεται το όχημα. Κατά την κάθοδο του οχήματος η γωνία $\xi < 0$ (το άνυσμα της ταχύτητας του σώματος θα πρέπει να οριοθετείται από τον θετικό x αδρανειακό άξονα – οριζόντιο και τον αρνητικό z αδρανειακό άξονα – κατακόρυφο). Σε αυτή την περίπτωση της καθόδου η διαδρομή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε κατάσταση ισορροπίας (ή να επενεργεί πάνω του προωθητική δύναμη από το ρευστό) μόνο αν η γωνία $\alpha > 0$. Σε αντίθετη περίπτωση η γωνία φ όπως ορίστηκε παραπάνω θα είναι πάντοτε $\varphi < 90^\circ$. Όταν το όχημα αναδύεται τότε $\xi > 0$ (το άνυσμα της ταχύτητας \vec{V} θα πρέπει να οριοθετείται από τον θετικό x αδρανειακό άξονα – οριζόντιο και τον θετικό z αδρανειακό άξονα – κατακόρυφο). Τότε η γωνία $\alpha < 0$ ώστε να είναι δυνατό η επαγόμενη δύναμη από το ρευστό στο όχημα να προσφέρει ώση (ή μηδενική αντίσταση).

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα αποτελέσματα για κάποιες περιπτώσεις διαδρομών αποτελούμενων από καταδύσεις και αναδύσεις που πραγματοποιήθηκαν για κάποιες περιπτώσεις γωνιών προσβολής υπό ταχύτητα 0,5 m/s. Σε κάθε περίπτωση υπολογίζουμε τη γωνία φ όπως ορίστηκε προηγουμένως σαν η γωνία μεταξύ της επ' άπειρον ροής και της επαγόμενης δύναμης \vec{F} από το ρευστό στο όχημα. Η γωνία φ υπολογίστηκε για κάθε κατάδυση και ανάδυση με τις διαδρομές αυτές να γίνονται υπό γωνία $\theta = -23^\circ / \theta = 23^\circ$, $\theta = -30^\circ / \theta = 30^\circ$ και $\theta = -49^\circ / \theta = 49^\circ$.

Πίνακας 3.20: Γωνία μεταξύ της επ' άπειρον ροής και της επαγόμενης δύναμης από το ρευστό στο όχημα για γωνία $\theta = -23^\circ$ και $\theta = 23^\circ$ και διάφορες γωνίες προσβολής α ($\xi = \theta - \alpha$).

α [deg]	ξ [deg]	Cd	Cl	φ [deg]
2	-25 (κάθοδος)	-0,01178	0,01035	64
-2	25 (άνοδος)	-0,01184	-0,0104	-64
4	-27 (κάθοδος)	-0,01222	0,0262	88
-4	27 (άνοδος)	-0,01228	-0,02636	-88
6	-29 (κάθοδος)	-0,01322	0,0398	95
-6	29 (άνοδος)	-0,01326	-0,04	-95
8	-31 (κάθοδος)	-0,01428	0,0544	98
-8	31 (άνοδος)	-0,01426	-0,0544	-98

Πίνακας 3.21: Γωνία μεταξύ της επ' άπειρον ροής και της επαγόμενης δύναμης από το ρευστό στο όχημα για γωνία $\theta = -30^\circ$ και $\theta = 30^\circ$ και διάφορες γωνίες προσβολής α ($\xi = \theta - \alpha$).

α [deg]	ξ [deg]	Cd	Cl	φ [deg]
2	-32 (κάθοδος)	-0,01178	0,01035	71
-2	32 (άνοδος)	-0,01184	-0,0104	-71
4	-34 (κάθοδος)	-0,01222	0,0262	95
-4	34 (άνοδος)	-0,01228	-0,02636	-95
6	-36 (κάθοδος)	-0,01322	0,0398	102
-6	36 (άνοδος)	-0,01326	-0,04	-102
8	-38 (κάθοδος)	-0,01428	0,0544	105
-8	38 (άνοδος)	-0,01426	-0,0544	-105

Πίνακας 3.22: Γωνία μεταξύ της επ' άπειρον ροής και της επαγόμενης δύναμης από το ρευστό στο όχημα για γωνία $\theta = -49^\circ$ και $\theta = 49^\circ$ και διάφορες γωνίες προσβολής α ($\xi = \theta - \alpha$).

α [deg]	ξ [deg]	Cd	Cl	φ [deg]
2	-51 (κάθοδος)	-0,01178	0,01035	90
-2	51 (άνοδος)	-0,01184	-0,0104	-90
4	-53 (κάθοδος)	-0,01222	0,0262	114
-4	53 (άνοδος)	-0,01228	-0,02636	-114
6	-55 (κάθοδος)	-0,01322	0,0398	121
-6	55 (άνοδος)	-0,01326	-0,04	-121
8	-57 (κάθοδος)	-0,01428	0,0544	124
-8	57 (άνοδος)	-0,01426	-0,0544	-124

Παρατηρούμε ότι για την περίπτωση που η γωνία $\theta = -23^\circ, \theta = 23^\circ$ η διαδρομή πλησιάζει να γίνει υπό ισορροπία για γωνίες προσβολής $\alpha = 4^\circ, \alpha = -4^\circ$ περίπου, ενώ για $\alpha = 2^\circ, \alpha = -2^\circ$ η συνισταμένη των δυνάμεων δημιουργεί συνιστώσα αντίστασης από το ρευστό στο όχημα με γωνία $\varphi < 90^\circ$. Αντίθετα για γωνίες $\alpha = 6^\circ, \alpha = -6^\circ$ και $\alpha = 8^\circ, \alpha = -8^\circ$ η δύναμη που ασκείται από το ρευστό στο υποβρύχιο είναι προωθητική, δηλαδή ώση που προκαλείται από γωνία $\varphi > 90^\circ$.

Όταν η γωνία $\theta = -30^\circ, \theta = 30^\circ$ δημιουργείται συνιστώσα αντίστασης για γωνίες προσβολής $\alpha = 2^\circ, \alpha = -2^\circ$ και αντίθετα συνιστώσες ώσης για τις μεγαλύτερες γωνίες προσβολής. Στην περίπτωση των $\theta = -49^\circ, \theta = 49^\circ$ για την γωνία προσβολής $\alpha = 2^\circ, \alpha = -2^\circ$ οι διαδρομές γίνονται σε ισορροπία ενώ για μεγαλύτερες γωνίες δημιουργείται προωθητική συνιστώσα.

Τέλος παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα οι γωνίες που καθορίζουν την ευθεία διαδρομή του οχήματος και την κατεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας ώστε το όχημα να ισορροπεί και το αντίστοιχο διάγραμμα με την γωνία θ συναρτήσει της γωνίας προσβολής α που αντιστοιχούν σε καταστάσεις ισορροπίας.

Εδώ θα πρέπει να υπογραμμιστούν δύο σημεία που θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων και των συγκρίσεων που θα ακολουθήσουν στο επόμενο κεφάλαιο μεταξύ των καταστάσεων ισορροπίας που προκύπτουν χρησιμοποιώντας την αναλυτική μέθοδο και αυτών από την εκτίμηση των υδροδυναμικών συντελεστών με το πρόγραμμα Fluent. Τα αποτελέσματα που παίρνουμε για τις δυνάμεις μετά την επίλυση του πεδίου με το Fluent είναι στο σύστημα αναφοράς που κινείται μαζί με το σώμα, όπως φαίνονται και στο σχήμα 3.98

όπου και τις σημειώνουμε \bar{L}_b και \bar{D}_b . Σε αυτή την περίπτωση ισχύει $\theta = \tan^{-1} \frac{D_{eq}}{L_{eq}}$

όπου οι δυνάμεις αντίστασης και άνωσης εκφράζονται στο σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων. Αντίθετα στο κεφάλαιο 2 όπου έγινε η μαθηματική μοντελοποίηση, αλλά και στο επόμενο κεφάλαιο 4 όπου θα γίνει η εφαρμογή του δυναμικού μοντέλου στο υδροπτερό που σχεδιάστηκε, οι δυνάμεις εκφράζονται στο σύστημα αναφοράς που κινείται με το ρευστό μέσω του ημιστατικού υδροδυναμικού μοντέλου. Σε αυτήν

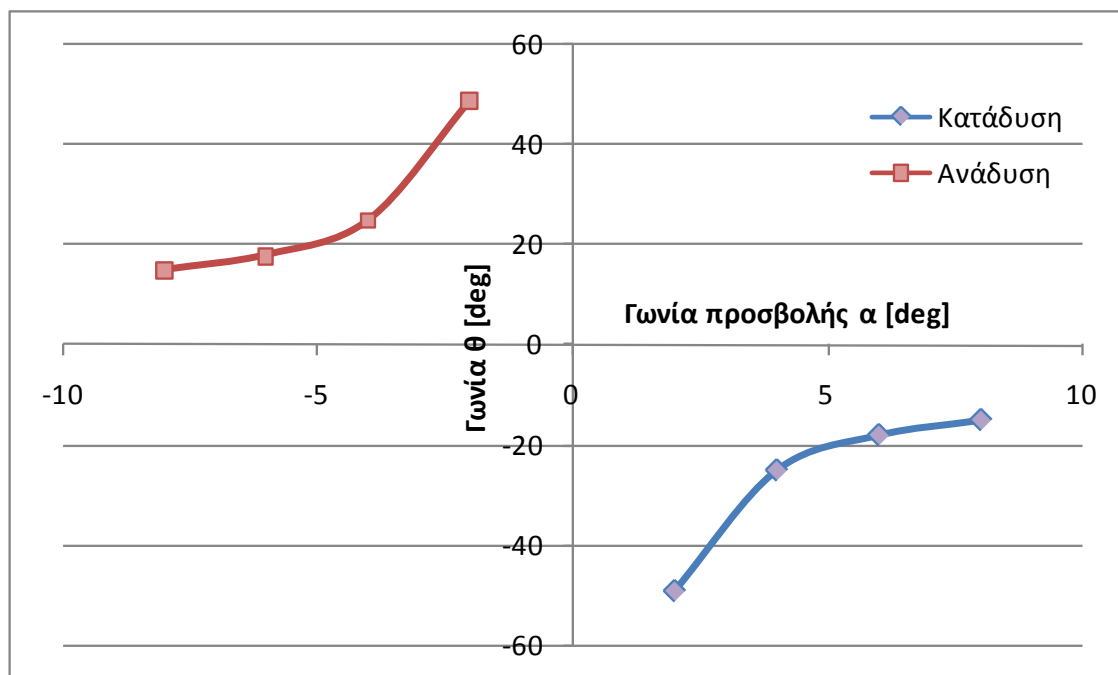
την περίπτωση προκύπτει από τις εξισώσεις κίνησης $\xi = -\tan^{-1} \frac{D_{eq}}{L_{eq}}$, όπου η δύναμη

αντίστασης είναι παράλληλη στην ταχύτητα του οχήματος ενώ η δύναμη άνωσης κάθετη σε αυτήν. Το δεύτερο σημείο που πρέπει να υπογραμμιστεί είναι ότι στο παρόν κεφάλαιο 3 της υδροδυναμικής ανάλυσης ο άξονας z θεωρείται με θετική φορά προς τα πάνω, ενώ στα κεφάλαια 2 και 4 της ανάλυσης των εξισώσεων κίνησης ο άξονας z έχει θετική φορά προς τα κάτω. Αυτό εξηγεί και τη διαφορά στα πρόσημα των προαναφερθέντων γωνιών.

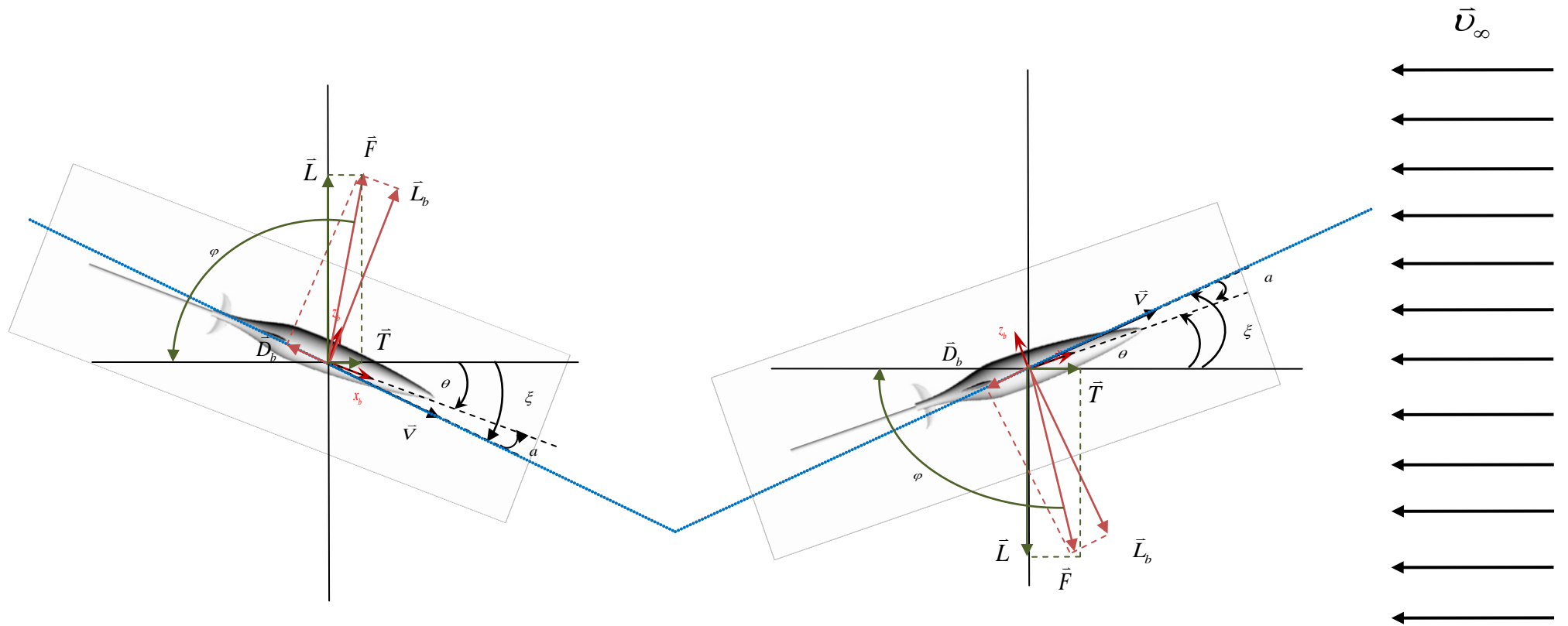
Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι των γωνιών που καθορίζουν μία ευθεία διαδρομή υπό κατάσταση ισορροπίας όπως αυτές προκύπτουν επιλύοντας δυναμικά με το Fluent το πεδίο ροής γύρω από το όχημα για διάφορες γωνίες προσβολής. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές παρουσιάζεται στη συνέχεια γραφικά η μεταβολή της γωνίας θ συναρτήσει της γωνίας προσβολής α . Όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο οι τιμές των γωνιών αυτών έχουν μεγάλη σύμπτωση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από την επίλυση των εξισώσεων κίνησης του υδροπτέρου σε ισορροπία.

Πίνακας 3.23: Γωνίες ίχνους ολίσθησης για τις οποίες η γωνία μεταξύ της επ' άπειρον ροής και της επαγόμενης δύναμης από το ρευστό στο όχημα είναι ορθή.

α [deg]	ξ [deg]	θ [deg]	φ [deg]
2	-51 (κάθοδος)	-49	90
-2	51 (άνοδος)	49	-90
4	-29 (κάθοδος)	-25	90
-4	29 (άνοδος)	25	-90
6	-24 (κάθοδος)	-18	90
-6	24 (άνοδος)	18	-90
8	-23 (κάθοδος)	-15	90
-8	23 (άνοδος)	15	-90



Σχήμα 3.97: Γωνία θ συναρτήσει της γωνίας προσβολής α για καταδύσεις και αναδύσεις σε ισορροπία.



Σχήμα 3.98: Διάγραμμα ταχυτήτων και επενεργουσών δυνάμεων κατά τη διάρκεια διαδρομής του υποβρυχίου αποτελούμενης από κατάδυση και διαδοχική ανάδυση.

4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ

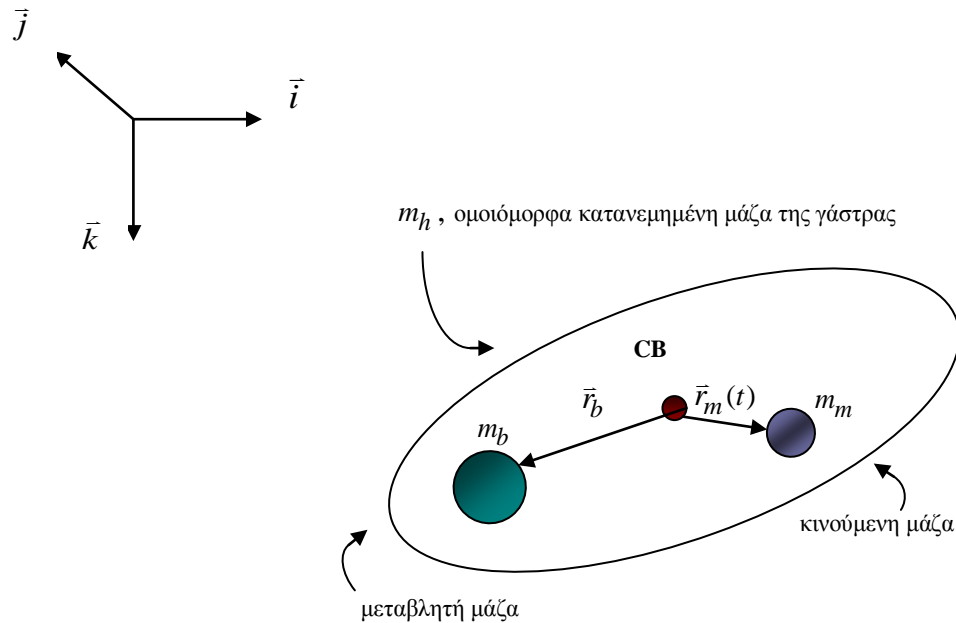
Σε αυτή την ενότητα γίνεται εφαρμογή του δυναμικού μοντέλου που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2 στο υδρόπτερο που σχεδιάστηκε και μελετήθηκε υδροδυναμικά στο κεφάλαιο 3. Στην εφαρμογή αυτή του μοντέλου πρέπει να γίνει προσαρμογή των παραμέτρων που αντιστοιχούν στις εσωτερικές μάζες και στη γεωμετρία του οχήματος.

Οι παράμετροι του μοντέλου προσαρμόζονται ώστε να ταιριάζουν στο σχήμα του σώματος και των πτερυγίων του υδροπτερού. Θεωρούμε ότι ο έλεγχος γίνεται σε δύο μάζες μέσα στο όχημα, την μεταβλητή μάζα (δεξαμενή έρματος) και την κινούμενη μπαταρία. Αυτό συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο ελέγχοντας τη μάζα ενός σημείου με σταθερή θέση μέσα στο όχημα το οποίο αντιπροσωπεύει τη δεξαμενή έρματος και δεύτερον ελέγχοντας τη θέση μιας μάζας με μεταβλητή θέση στο εσωτερικό του οχήματος η οποία αντιπροσωπεύει την κινούμενη μπαταρία. Το μοντέλο περιγράφει τη μη γραμμική εξάρτηση μεταξύ της κίνησης του οχήματος και των κινούμενων και μεταβλητών μαζών. Οι σημαντικότερες δυνάμεις που ασκούνται πάνω στο υδρόπτερο έχουν όλες ενσωματωθεί στο μοντέλο συμπεριλαμβανομένων της άντωσης, των ροπών και δυνάμεων που οφείλονται στην εσωτερική κινούμενη μάζα και οι υδροδυναμικές φορτίσεις. Σκοπός είναι να περιγραφεί η δυναμική συμπεριφορά του οχήματος με ικανοποιητική ακρίβεια διατηρώντας παράλληλα την απλότητά του.

ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Οι εσωτερικές μάζες που θεωρηθήκαν στην μοντελοποίηση είναι η μεταβλητή μάζα m_b και η κινούμενη m_m όπως φαίνονται στο σχήμα 4.1. Στο πραγματικό υδρόπτερο οι εσωτερικές μάζες θεωρούνται περιορισμένες στο x-z επίπεδο με τη μεταβλητή μάζα, δηλαδή τη διάταξη μεταβλητής πλευστότητας να τοποθετείται στην

πρύμνη του οχήματος ενώ η κινητή μπαταρία να μετακινείται κατά την x διεύθυνση μόνο, οπότε και το r_{mz} θα είναι σταθερό.



Σχήμα 4.1: Διάταξη μαζών στο εσωτερικό του υδροπτέρου

Περιορίζοντας το μοντέλο στο x-z επίπεδο, όπως έγινε στο κεφάλαιο 2, επιλύονται οι εξισώσεις κίνησης για σταθερές διαδρομές σε κατάσταση ισορροπίας. Οι εξισώσεις κίνησης στο επίπεδο x-z για τις καταστάσεις ισορροπίας του υδροπτέρου γίνονται:

$$\dot{x}_{eq} = u_{eq} \cos \theta_{eq} + w_{eq} \sin \theta_{eq} \quad (4.1)$$

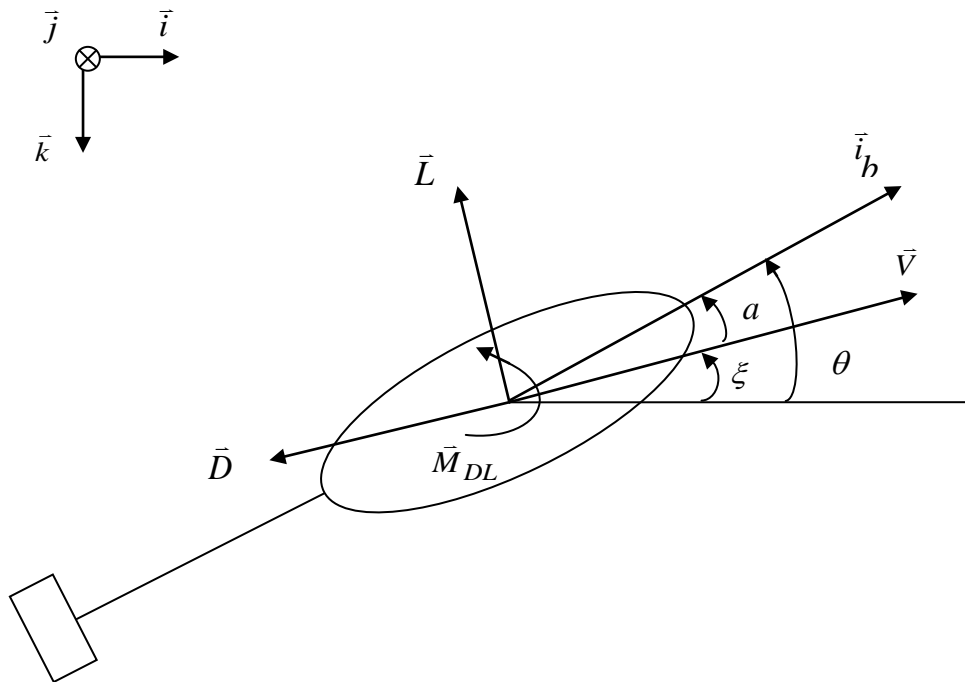
$$\dot{z}_{eq} = -u_{eq} \sin \theta_{eq} + w_{eq} \cos \theta_{eq} \quad (4.2)$$

$$(m_{a3} - m_{a1})u_{eq}w_{eq} - m_m g (r_{mx_{eq}} \cos \theta_{eq} + r_{mz_{eq}} \sin \theta_{eq}) - m_{b_{eq}} g (r_{bx} \cos \theta_{eq} + r_{bz} \sin \theta_{eq}) + M_{DL_{eq}} = 0 \quad (4.3)$$

$$-m_{0_{eq}} g \sin \theta_{eq} + L_{eq} \sin \alpha_{eq} - D_{eq} \cos \alpha_{eq} = 0 \quad (4.4)$$

$$m_{0_{eq}} g \cos \theta_{eq} - L_{eq} \cos \alpha_{eq} - D_{eq} \sin \alpha_{eq} = 0 \quad (4.5)$$

όπου με το σύμβολο eq δηλώνεται η τιμή της παραμέτρου κατά την κίνηση σε κατάσταση ισορροπίας, u και w είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας του υδροπτέρου στις κατευθύνσεις \bar{i}_b και \bar{k}_b (x και z σωματοπαγείς άξονες) αντίστοιχα. Η γωνία θ είναι η γωνία πρόνευσης (pitch angle) ενώ η α είναι η γωνία προσβολής, D είναι η αντίσταση (drag), L η άνωση (lift) και M η ροπή. Τέλος m_{a1} και m_{a3} είναι οι όροι πρόσθετης μάζας κατά τις διευθύνσεις \bar{i}_b και \bar{k}_b αντίστοιχα (σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2: Γωνίες και δυνάμεις πάνω στο υδρόπτερο κατά το επίπεδο x-z.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ορίζεται η γωνία ίχνους ολίσθησης $\xi = \theta - \alpha$ ενώ η ταχύτητα του οχήματος συμβολίζεται με \bar{V} όπου το μέτρο της θα είναι $V = \sqrt{(u^2 + w^2)}$. Επιπλέον αποδεικνύεται ότι στην ισορροπία $\xi_{eq} = -\tan^{-1}\left(\frac{D_{eq}}{L_{eq}}\right)$. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.2) και τον ορισμό των γωνιών τότε μπορούμε να γράψουμε επίσης το ρυθμό μεταβολής του βάθους ως εξής:

$$\dot{z} = -V \sin \xi = -V \sin(\theta - \alpha) \quad (4.6)$$

Όπως περιγράφηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 2, για την αναλυτική επίλυση των εξισώσεων κίνησης του υδρόπτερου, χρησιμοποιήθηκε ένα ημιστατικό

υδροδυναμικό μοντέλο, το οποίο εκτιμά τις δυνάμεις που ασκεί το ρευστό πάνω στο όχημα με ικανοποιητική ακρίβεια για τις ταχύτητες και τις γωνίες προσβολής υπό τις οποίες κινείται το όχημα. Οι εξισώσεις του υδροδυναμικού μοντέλου έχουν την παρακάτω μορφή:

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D(a) AV^2 \approx (K_{D_o} + K_D a^2)(u^2 + w^2) \quad (4.7)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L(a) AV^2 \approx (K_{L_o} + K_L a)(u^2 + w^2) \quad (4.8)$$

$$M_{DL} = \frac{1}{2} \rho C_M(a) AV^2 \approx (K_{M_o} + K_M a)(u^2 + w^2) \quad (4.9)$$

Το ημιστατικό υδροδυναμικό μοντέλο αναμένεται να είναι ακριβές μόνο στην περίπτωση κίνησης του οχήματος σε κατάσταση ισορροπίας. Είναι λιγότερο ακριβές όταν η κίνηση γίνεται σε κατάσταση μη ισορροπίας και όταν το υδρόπτερο υφίσταται μεγάλες επιταχύνσεις γραμμικές και γωνιακές. Τα χαρακτηριστικά της ροής γύρω από το σώμα είναι πολύ πιο πολύπλοκα κατά τη διάρκεια τέτοιων κινήσεων, και απαιτούν ένα πιο ολοκληρωμένο υδροδυναμικό μοντέλο. Στην περίπτωση όμως των υδροπτέρων ο μεγαλύτερος χρόνος λειτουργίας τους αντιστοιχεί σε σταθερές διαδρομές, ενώ οι μεταβάσεις μεταξύ σταθερών διαδρομών σε ισορροπία είναι σχετικά αργές. Έτσι το ημιστατικό υδροδυναμικό μοντέλο αποδεικνύεται ικανοποιητικό για τη συγκεκριμένη ανάλυση.

Μια 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 υποβρυχίου οχήματος ενώ η γωνία ξ μεταβάλλοντας το κέντρο βάρους του.

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

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 που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα FLUENT. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών παρουσιάζονται στους πίνακες 4.1 και 4.2. Οι υδροδυναμικοί συντελεστές θα χρησιμοποιηθούν ώστε να γίνει η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας όπως παρουσιάστηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου συγκρίνονται με αυτά του προγράμματος Fluent του τρίτου κεφαλαίου. Η σύγκριση επιβεβαιώνει την καταλληλότητα του ημιστατικού υδροδυναμικού μοντέλου που εισήχθηκε στις εξισώσεις κίνησης του μοντέλου. Ακολούθως μπορούν να καθοριστούν οι συνθήκες ισορροπίας για σταθερές διαδρομές του οχήματος υπολογίζοντας όλες τις παραμέτρους που τις καθορίζουν, όπως τη φαινόμενη μάζα και τη θέση της μεταβλητής μάζας.

Πίνακας 4.1: Τιμές διαφόρων παραμέτρων προσομοίωσης του υδροπτέρου.

Μήκος οχήματος [m]	1,8
Μέγιστη ακτίνα [m]	0,15
Εκτόπισμα m [kg]	52
Κινούμενη μάζα m_m [kg]	9
Μάζα γάστρας m_h [kg]	42
$m_{a1,3}$ [kg]	5, 70
$J_{1,3}$ [kg·m ²]	4.5, 10.48

Πίνακας 2: Τιμές των υδροδυναμικών παραμέτρων του υδροπτέρου.

K_{L_0} [kg/m]	0
K_L [kg/m]	-177.6525
K_{D_0} [kg/m]	-5.945
K_D [kg/m]	-264.80875
K_{M_0} [kg]	0
K_M [kg]	-6,2

Περαιτέρω παράμετροι που υπεισέρχονται στις εξισώσεις κίνησης είναι η αδράνεια του στερεού σώματος του υποβρυχίου J_h . Ο υπολογισμός της ροπής αδράνειας γίνεται με το σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros πάνω στο ολοκληρωμένο μοντέλο του υποβρυχίου. Το πρόγραμμα αντιμετωπίζει το όχημα σαν ένα ενιαίο όγκο και υπολογίζει το κεντροειδές του. Οι μονάδες από τους υπολογισμούς του προγράμματος είναι σε m^5 . Πολλαπλασιάζοντας τον πίνακα που προκύπτει με την πυκνότητα του ρευστού μέσα στο οποίο θα πλέει το όχημα προκύπτει η ροπή αδράνειας του στερεού σώματος.

$$J_h = \begin{pmatrix} 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 9.02 & 0 \\ 0 & 0 & 9.20 \end{pmatrix} \text{ ή } J_h = \text{diag}(0.75, 9.02, 9.20)$$

όπου οι μονάδες αδράνειας είναι $kg \cdot m^2$.

Ας σημειωθεί ότι η ροπή αδράνειας δεν υπεισέρχεται στις εξισώσεις κίνησης του οχήματος στην ισορροπία. Οι εξισώσεις αυτές εξαρτώνται από την πρόσθετη μάζα του οχήματος η οποία και θα ληφθεί $M_a = \text{diag}(m_{a1}, m_{a2}, m_{a3}) = \text{diag}(5, 60, 70)$. Μονάδες πρόσθετης μάζας είναι τα kg. Επιπλέον η πρόσθετη αδράνεια εκφράζεται από το μητρώο $J_a = \text{diag}(J_{a1}, J_{a2}, J_{a3}) = \text{diag}(3.75, 2.28, 1.28)$ και έχει μονάδες $kg \cdot m^2$. Συνεπώς η συνολική αδράνεια του οχήματος είναι:

$$J = \text{diag}(4.5, 11.3, 10.48).$$

Οι τιμές για τα πρόσθετα μεγέθη μάζας και αδράνειας πάρθηκαν από το [35], όπως αυτά υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα USAERO για το υδρόπτερο Slocum.

Το κέντρο πλευστότητας του οχήματος CB (που ταυτίζεται με το κεντροειδές του) βρίσκεται 924,118 mm πίσω από τη μύτη του οχήματος και υπολογίζεται με το σχεδιαστικό Rhinoceros. Η μεταβλητή μάζα καθορίζεται από μία διάταξη μεταβλητής πλευστότητας, όπως ονομάζεται (Variable Buoyancy Device, VBD), και η οποία παρέχει στο όχημα τη δυνατότητα να αλλάξει τον όγκο του το μέγιστο κατά 800 cm^3 . Στην πραγματικότητα πολλά υποβρύχια υδρόπτερα είναι σταθερής μάζας αλλά μεταβλητού όγκου οχήματα. Αλλάζουν την πλευστότητά τους μεταβάλλοντας το εκτοπιζόμενο όγκο τους και διατηρώντας τη συνολική τους μάζα σταθερή. Η κινούμενη μάζα αντιπροσωπεύεται από μία μπαταρία υψηλής τάσης 24V η οποία έχει μάζα 9 kg. Η μπαταρία μετακινείται μπρος και πίσω κατά τον x_b άξονα ώστε να

επιφέρει αλλαγές στην κλίση του οχήματος (pitch) ενώ είναι ασύμμετρη ως προς τον x_b άξονα ώστε να περιστρέφει το όχημα (roll) όταν περιστρέφεται και η ίδια.

Μοντελοποίηση διαφορετικών διατάξεων μεταβλητής πλευστότητας

Τα υδρόπτερα που υπάρχουν λειτουργούν μεταβάλλοντας την άντωση τους με δύο τρόπους. Ο ένας είναι μεταβάλλοντας τη μάζα του οχήματος (μέσω της μεταβλητής μάζας) και ο άλλος μεταβάλλοντας τον όγκο του. Προκύπτει λοιπόν το ερώτημα πώς θα μοντελοποιηθεί η δεύτερη περίπτωση.

Το υδρόπτερο Slocum έχει και την μεταβλητή και την κινούμενη μάζα του αρκετά μπροστά από το κέντρο άντωσης του οχήματος, ενώ τα Seaglider και Spray τις έχουν στην πρύμνη του οχήματος, πίσω από το κέντρο άντωσης. Στο υδρόπτερο Slocum το σύστημα μεταβολής άντωσης αποτελείται από μία δεξαμενή έρματος (τύπου σύριγγας) η οποία τραβάει μέσα νερό ώστε να αποκτά αρνητική πλευστότητα. Αντίστοιχα ρίχνει προς τα έξω νερό ώστε να αποκτήσει θετική πλευστότητα.

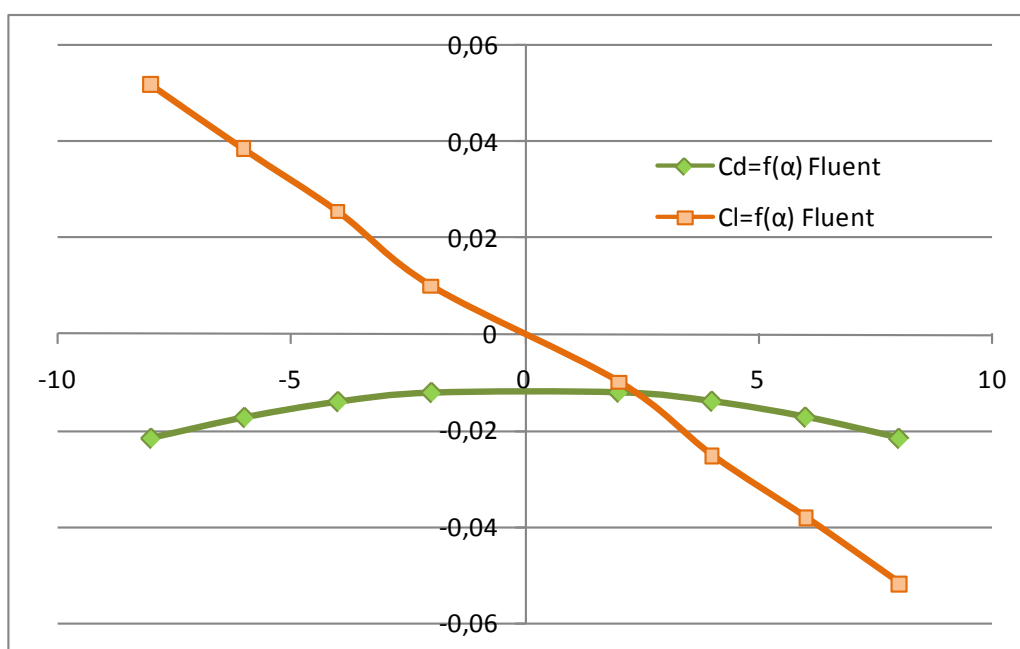
Στην περίπτωση όμως των Spray και Seaglider, αυτά ελέγχουν την πλευστότητά τους χρησιμοποιώντας μία εξωτερική κύστη λαδιού. Αυτή λειτουργεί σαν μπαλόνι το οποίο συνδέεται μέσω αντλίας με μία δεξαμενή λαδιού στο εσωτερικό της γάστρας. Διοχετεύοντας λάδι μέσα στην εξωτερική κύστη εκτοπίζεται νερό με λάδι, το οποίο είναι λιγότερο πυκνό, και έτσι αυξάνεται η άντωση, ενώ αντίστοιχα όταν διοχετεύεται νερό από την εξωτερική κύστη στην εσωτερική δεξαμενή η άντωση μειώνεται.

Αυτού του είδους τα συστήματα μεταβλητής άντωσης μπορούν να μοντελοποιηθούν ως εξής: Ο όγκος της πλήρους διογκωμένης κύστης μπορεί να θεωρηθεί σαν όγκος ελέγχου, ενώ η αντίστοιχη μάζα που περικλείεται στον όγκο αυτό μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν σημειακή μεταβλητή μάζα. Όταν η εξωτερική κύστη είναι διογκωμένη, η μεταβλητή μάζα είναι η μάζα της διογκωμένης κύστης και του λαδιού. Όταν η κύστη συρρικνώνεται, η μεταβλητή μάζα είναι ίση με τη μάζα του νερού μέσα στον όγκο ελέγχου. Η εσωτερική δεξαμενή λαδιού μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν ξεχωριστή μεταβλητή μάζα ή διαφορετικά η εξωτερική και εσωτερική δεξαμενή έρματος θα μπορούσαν να προσεγγιστούν από μία σημειακή μάζα τοποθετημένη σε μία μέση θέση. Η επιλογή του αν θα μοντελοποιηθεί αυτό το σύστημα με μία ή δύο μεταβλητές μάζες θα εξαρτηθεί από την απόσταση μεταξύ των δύο δεξαμενών, το σχετικό μέτρο των ροπών που ασκούν στο όχημα σε διαφορετικές

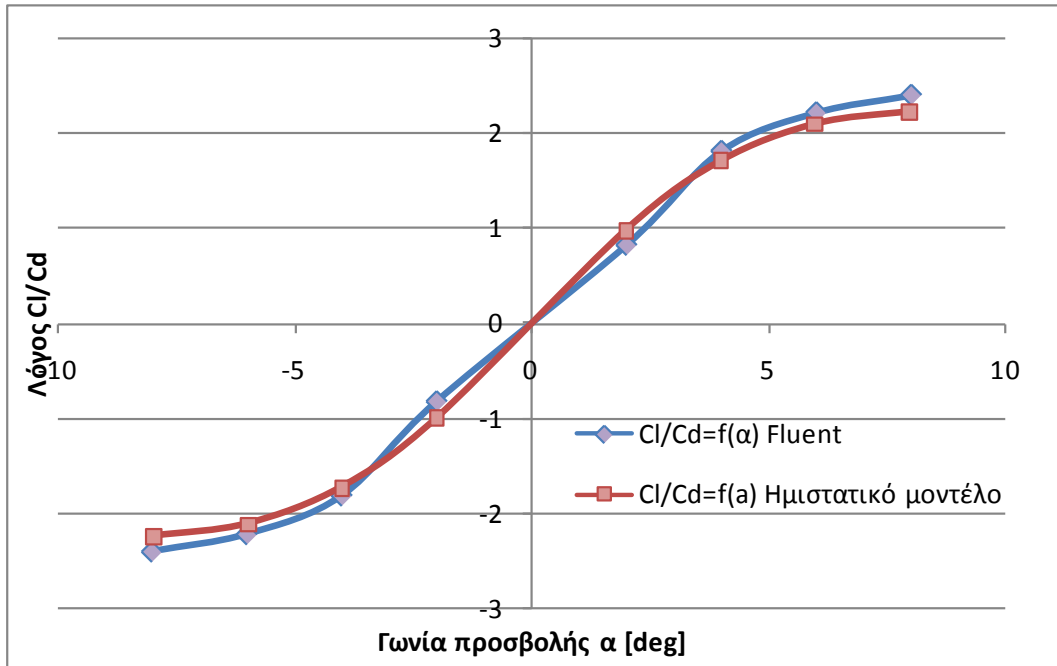
καταστάσεις πλευστότητας καθώς και το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας στο μοντέλο.

ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

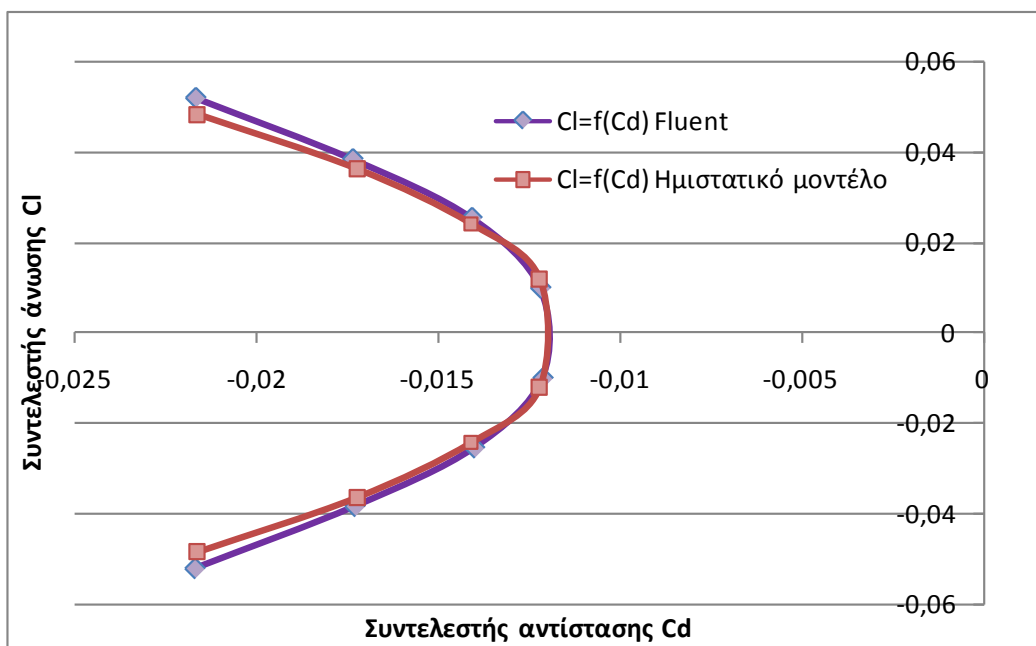
Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους υδροδυναμικούς συντελεστές αντίστασης και άνωσης από την επίλυση του πεδίου ροής γύρω από το υποβρύχιο με το υπολογιστικό πακέτο Fluent. Οι τιμές των μεγεθών αυτών είναι στο σύστημα αναφοράς που κινείται με το ρευστό, με θετική κατεύθυνση του άξονα z προς τα κάτω. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι υδροδυναμικοί συντελεστές με το ημιστατικό μοντέλο και γίνονται συγκρίσεις. Οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης παρουσιάζονται στο σχήμα 4.3 συναρτήσει της γωνίας προσβολής α . Στο σχήμα 4.4 ο λόγος άνωσης προς την αντίσταση συναρτήσει της γωνίας α αντιπαραβάλλεται για τις δύο μεθόδους υπολογισμού και αντιστοίχως στο σχήμα 4.5 ο συντελεστής άνωσης συναρτήσει του συντελεστή αντίστασης.



Σχήμα 4.3: Μεταβολή των συντελεστών άνωσης και αντίστασης με την γωνία προσβολής όπως υπολογίστηκαν με το υπολογιστικό πακέτο Fluent.



Σχήμα 4.4: Μεταβολή του λόγου των συντελεστών άνωσης και αντίστασης με την γωνία προσβολής όπως προκύπτει από το υπολογιστικό πακέτο Fluent και το ημιστατικό μοντέλο.



Σχήμα 4.5: Μεταβολή του συντελεστή άνωσης συναρτήσει του συντελεστή αντίστασης για διάφορες γωνίες προσβολής σύμφωνα με το Fluent και το ημιστατικό υδροδυναμικό μοντέλο.

Οι υδροδυναμικοί συντελεστές άνωσης και αντίστασης εκφράζονται στο σύστημα αναφοράς που κινείται με ρευστό με θετική κατεύθυνση του άξονα z προς τα κάτω συναρτήσει της γωνίας προσβολής α ως εξής:

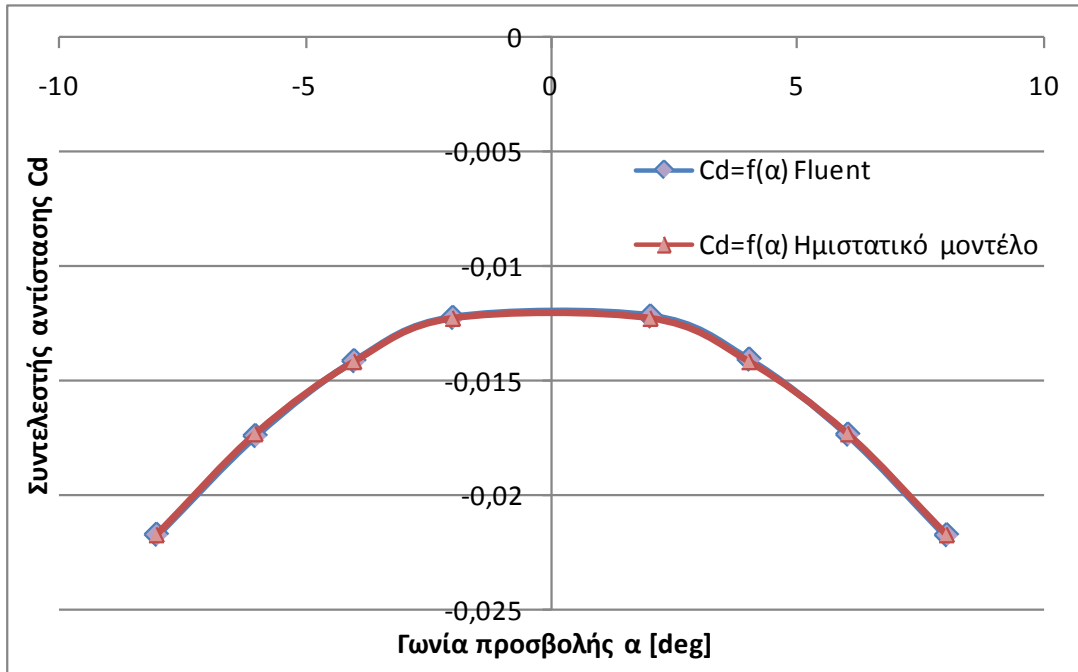
$$C_L(a) = -0,347a$$

$$C_D(a) = -0,0116 - 0,5167a^2$$

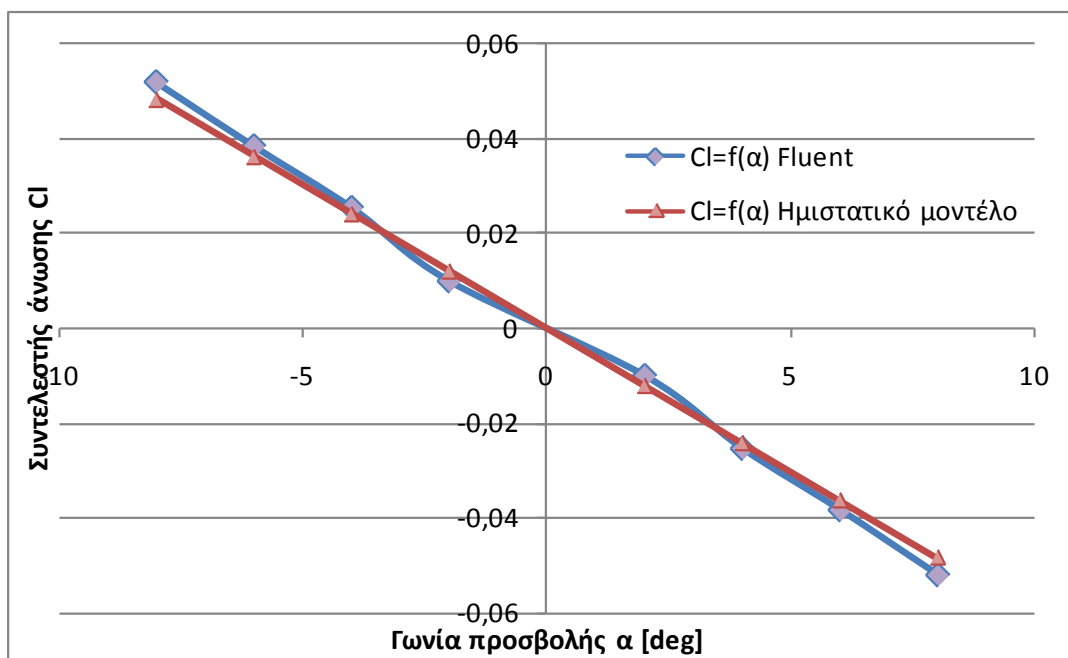
Για την αδιαστατικοποίηση των δυνάμεων χρησιμοποιείται επιφάνεια $A = 1m^2$ και $\rho = 1025kg/m^3$ ενώ η ταχύτητα $V = 0,48547m/s$. Λόγω συμμετρίας ως προς το $\bar{i}_b - \bar{j}_b$ επίπεδο θα ισχύει $K_{L_0} = 0$, $K_{M_0} = 0$ ενώ οι υπόλοιπες σταθερές K που διαμορφώνουν το ημιστατικό μοντέλο υπολογίζονται $K_L = -177,6525kg/m$, $K_{D_0} = -5,945kg/m$ και $K_D = -264,80875kg/m$.

Η εξάρτηση του συντελεστή άνωσης από τη γωνία α είναι γραμμική και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7. Τα αποτελέσματα της CFD μεθόδου του προηγούμενου κεφαλαίου συγκρίνονται με τα αυτά του ημιστατικού υδροδυναμικού μοντέλου που υιοθετήθηκε κατά την αναλυτική επίλυση των εξισώσεων κίνησης και πέφτουν πολύ κοντά. Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η αντίστοιχη συσχέτιση του συντελεστή αντίστασης με τη γωνία προσβολής σαν αποτέλεσμα και των δύο μεθόδων. Η καμπύλη είναι παραβολική και προκύπτει πολύ καλή ταύτιση των αποτελεσμάτων.

Ας σημειωθεί ότι τα υδροδυναμικά μεγέθη που υπολογίστηκαν με το Fluent και παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ήταν στο σωματοπαγές σύστημα αναφοράς με το z άξονα να έχει θετική κατεύθυνση προς τα πάνω. Στο παρόν κεφάλαιο έχουν μετατραπεί στο σύστημα αναφοράς που κινείται με το ρευστό ενώ ο z άξονας είναι θετικός προς τα κάτω. Σε αυτό το σύστημα αναφοράς εξάγονται οι δυνάμεις που προκύπτουν από το ημιστατικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην αναλυτική μέθοδο και έτσι πρέπει να εισαχθούν στις εξισώσεις κίνησης.



Σχήμα 4.6: Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης με την γωνία προσβολής σύμφωνα με το υπολογιστικό πακέτο Fluent και το ημιστατικό υδροδυναμικό μοντέλο.



Σχήμα 4.7: Μεταβολή του συντελεστή άνωσης με την γωνία προσβολής σύμφωνα με το υπολογιστικό πακέτο Fluent και το ημιστατικό υδροδυναμικό μοντέλο.

Εν συνεχεία υπολογίζονται 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. Όπως αποδείχτηκε στο δεύτερο κεφάλαιο οι παραδεκτές τιμές της γωνίας ξ_{eq} μεταξύ $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ θα πρέπει να επιλεγούν από την περιοχή:

$$\xi_{eq} \in \left[\tan^{-1} \left(2 \frac{K_D}{K_L} \left(\frac{K_{L_0}}{K_L} + \sqrt{\left(\frac{K_{L_0}}{K_L} \right)^2 + \frac{K_{D_0}}{K_D}} \right) \right), \frac{\pi}{2} \right] \quad (4.10)$$

ή

$$\xi_{eq} \in \left[-\frac{\pi}{2}, \tan^{-1} \left(2 \frac{K_D}{K_L} \left(\frac{K_{L_0}}{K_L} - \sqrt{\left(\frac{K_{L_0}}{K_L} \right)^2 + \frac{K_{D_0}}{K_D}} \right) \right) \right] \quad (4.11)$$

και επειδή στην προκειμένη περίπτωση $K_{L_0} = 0$ η γωνία ξ_{eq} θα παίρνει τιμές στην

$$\text{περιοχή } \xi_{eq} \in \left[\tan^{-1} \left(2 \frac{K_D}{K_L} \sqrt{\frac{K_{D_0}}{K_D}} \right), \frac{\pi}{2} \right] \text{ ή } \xi_{eq} \in \left[-\frac{\pi}{2}, \tan^{-1} \left(-2 \frac{K_D}{K_L} \sqrt{\frac{K_{D_0}}{K_D}} \right) \right],$$

δηλαδή $\xi_{eq} \in \left[\frac{\pi}{7.5}, \frac{\pi}{2} \right]$ ή $\xi_{eq} \in \left[-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{7.5} \right]$ και αντίστοιχα $\xi_{eq} \in [24^\circ, 90^\circ]$ ή $\xi_{eq} \in [-90^\circ, -24^\circ]$.

Οι συνθήκες αυτές παρέχουν ένα άνω όριο στην βέλτιστη απόδοση του οχήματος, παρόλα αυτά όμως επιχειρησιακοί λόγοι μπορεί να επιβάλουν πιο απότομες διαδρομές υπό μεγαλύτερες γωνίες ίχνους ολίσθησης.

Μέσα στα όρια που επιβάλλονται για τη γωνία ξ_{eq} υπολογίζεται και η γωνία προσβολής a_{eq} την οποία θα πρέπει να έχει το όχημα σε σχέση με το ρευστό για κάθε γωνία ίχνους ολίσθησης ξ_{eq} ή αντιστοίχως για κάθε γωνία πρόνευσης θ_{eq} ώστε η κίνησή του να γίνεται σε ισορροπία. Όπως αποδείχτηκε στο δεύτερο κεφάλαιο η γωνία προσβολής θα είναι συνάρτηση της γωνίας ξ_{eq} αλλά και των υδροδυναμικών του χαρακτηριστικών και θα υπολογίζεται ως εξής:

$$a_{eq} = \frac{1}{2} \frac{K_L}{K_D} \tan \xi_{eq} \left(\sqrt{1 - 4 \frac{K_D}{K_L^2} \cot \xi_{eq} (K_{D_0} \cot \xi_{eq} + K_{L_0})} - 1 \right) \quad (4.12)$$

Όταν η γωνία $\xi_{eq} = \pm \frac{\pi}{2}$, δηλαδή η πορεία του είναι κατακόρυφη, τότε $a_{eq} = -\frac{K_{L_0}}{K_L}$.

Στην περίπτωση που το όχημα είναι συμμετρικό ως προς το $\vec{i}_b - \vec{j}_b$ επίπεδο $K_{L_0} = 0$.

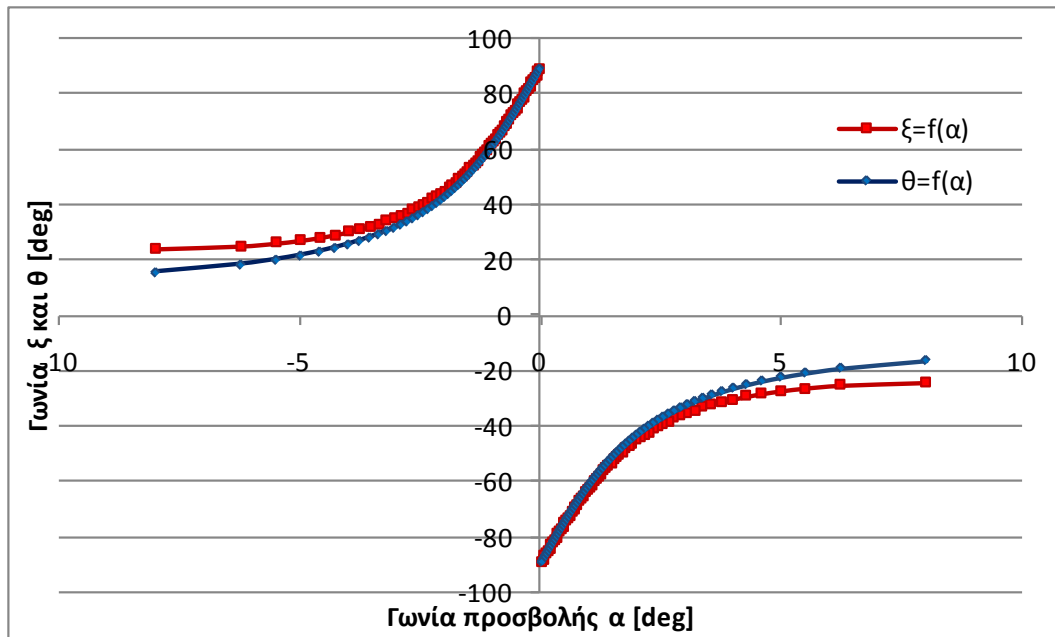
Σε αυτήν την περίπτωση για την κατάσταση ισορροπίας που αντιστοιχεί σε κατακόρυφη πορεία όπου $\xi_d = \pm \frac{\pi}{2}$, ευθεία προς τα πάνω ή προς τα κάτω, η επιθυμητή γωνία προσβολής θα είναι μηδενική.

Στην προκειμένη περίπτωση η γωνία προσβολής a_{eq} για διαδρομές σε κατάσταση ισορροπίας θα δίνεται συναρτήσει της γωνίας ξ_{eq} από τη σχέση:

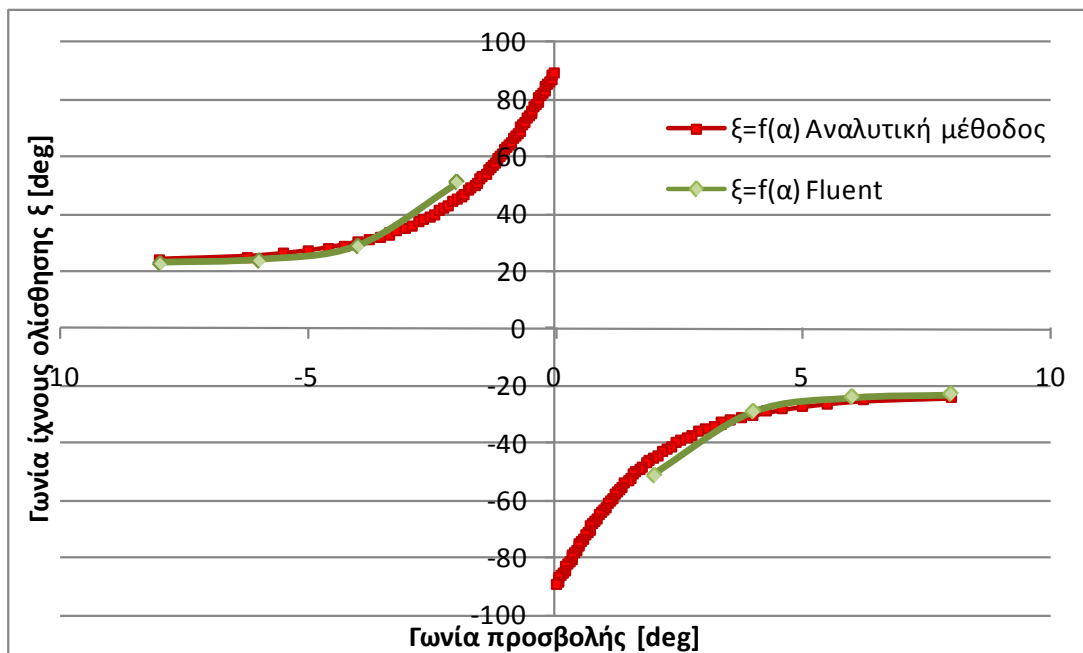
$$a_{eq} = \frac{1}{2} \frac{K_L}{K_D} \tan \xi_{eq} \left(-1 + \sqrt{1 - 4 \frac{K_{D_0} K_D}{K_L^2 \tan^2 \xi_{eq}}} \right) \quad (4.13)$$

Η παραπάνω σχέση αναπαριστάται στο διάγραμμα του σχήματος 4.8 όπου και φαίνεται η συνάρτηση της γωνίας ίχνους ολίσθησης ξ_{eq} με τη γωνία προσβολής a_{eq} αλλά και η αντίστοιχη σχέση της γωνίας πρόνευσης θ_{eq} κατά τη διάρκεια καταδύσεων (θετικές γωνίες προσβολής) και αναδύσεων (αρνητικές γωνίες προσβολής) σε κατάσταση ισορροπίας.

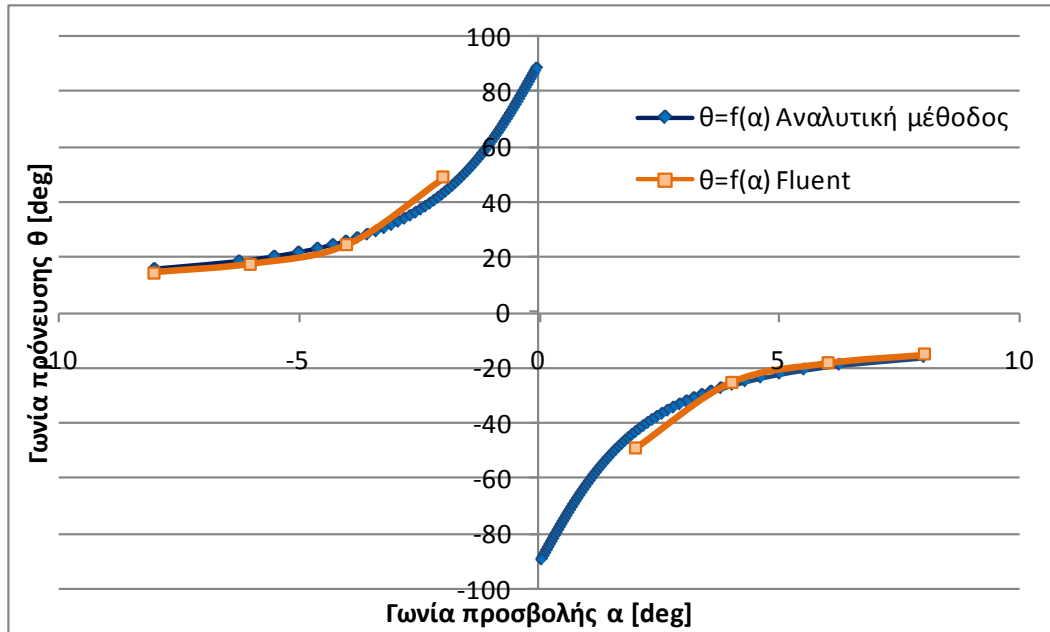
Το αναλυτικό μοντέλο μας δίνει σαν λύσεις τις τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση (4.13) για την γωνία a_{eq} συναρτήσει των ξ_{eq} και θ_{eq} . Οι γωνίες αυτές για την ισορροπία υπολογίστηκαν όπως είδαμε και στο τρίτο κεφάλαιο μέσω των υδροδυναμικών υπολογισμών που έγιναν με το πρόγραμμα Fluent. Στα σχήματα 4.9 και 4.10 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα αυτά όπου και παρατηρείται πολύ καλή σύμπτωση.



Σχήμα 4.8: Η γωνία προσβολής α συναρτίζει των γωνιών ίχνους ολίσθησης ξ και πρόνευσης θ για την πραγματοποίηση διαδρομών σε κατάσταση ισορροπίας.



Σχήμα 4.9: Η γωνία προσβολής α συναρτίζει της γωνίας ίχνους ολίσθησης ξ για σταθερές διαδρομές όπως αυτές προκύπτουν από το μαθηματικό δυναμικό μοντέλο αλλά και το πρόγραμμα Fluent.



Σχήμα 4.10: Η γωνία προσβολής α συναρτήσκει της γωνίας πρόνευσης θ για σταθερές διαδρομές όπως αυτές προκύπτουν από το μαθηματικό δυναμικό μοντέλο αλλά και το πρόγραμμα Fluent.

Ο σχεδιασμός της πορείας του οχήματος απαιτεί τον καθορισμό συγκεκριμένων παραμέτρων. Μέχρι στιγμής μπορούμε να ορίσουμε μία σταθερή διαδρομή του υδροπτέρου δίνοντάς του συγκεκριμένη ταχύτητα και κλίση μέσω των ξ και α . Επιπλέον χρειάζεται να προσδιοριστούν οι τιμές της μεταβλητής μάζας και η θέση της κινούμενης που θα προσδώσουν στο όχημα τις ζητούμενες γωνίες ξ και α ώστε το υδρόπτερο να διαγράψει την επιθυμητή πορεία. Στη συνέχεια υπολογίζονται αυτά τα μεγέθη για τις σταθερές διαδρομές του υποβρυχίου.

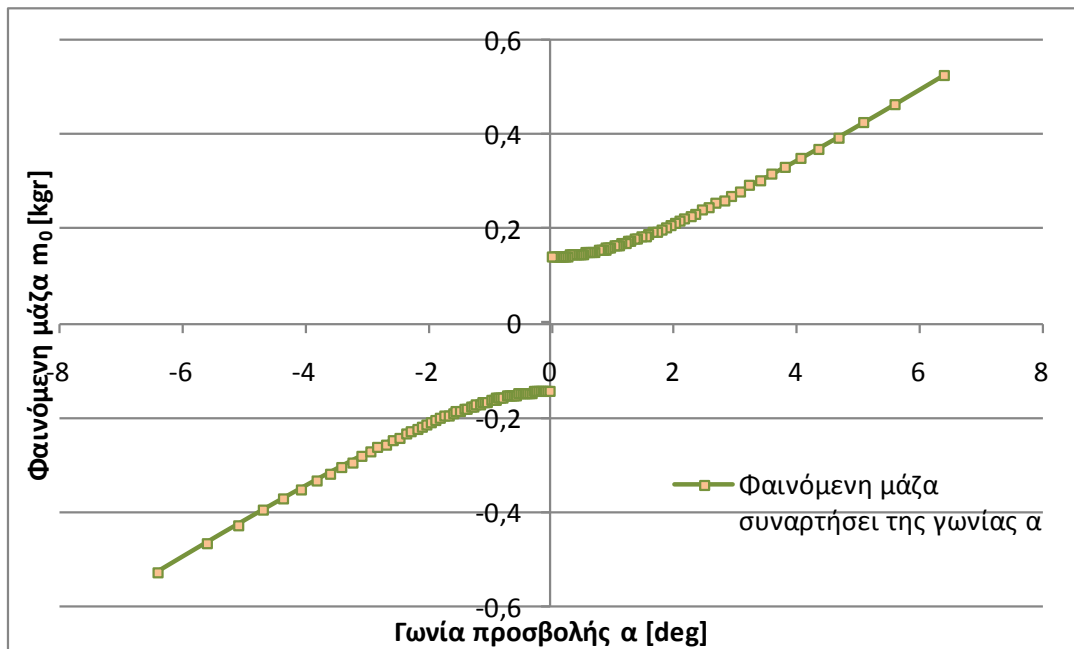
Έχοντας εξασφαλίσει τις τιμές για τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης συναρτήσκει της γωνίας προσβολής αλλά και τις γωνίες προσβολής και ίχνους ολίσθησης άρα και πρόνευσης, μπορούμε να υπολογίσουμε τη ζητούμενη καθαρή άντωση $m_0 g$ για μία δεδομένη ταχύτητα διαδρομής:

$$m_0 g = \left(-\sin \xi_d (K_{D_o} + K_D a_d^2) + \cos \xi_d (K_{L_o} + K_L a_d) \right) V_d^2 \quad (4.14)$$

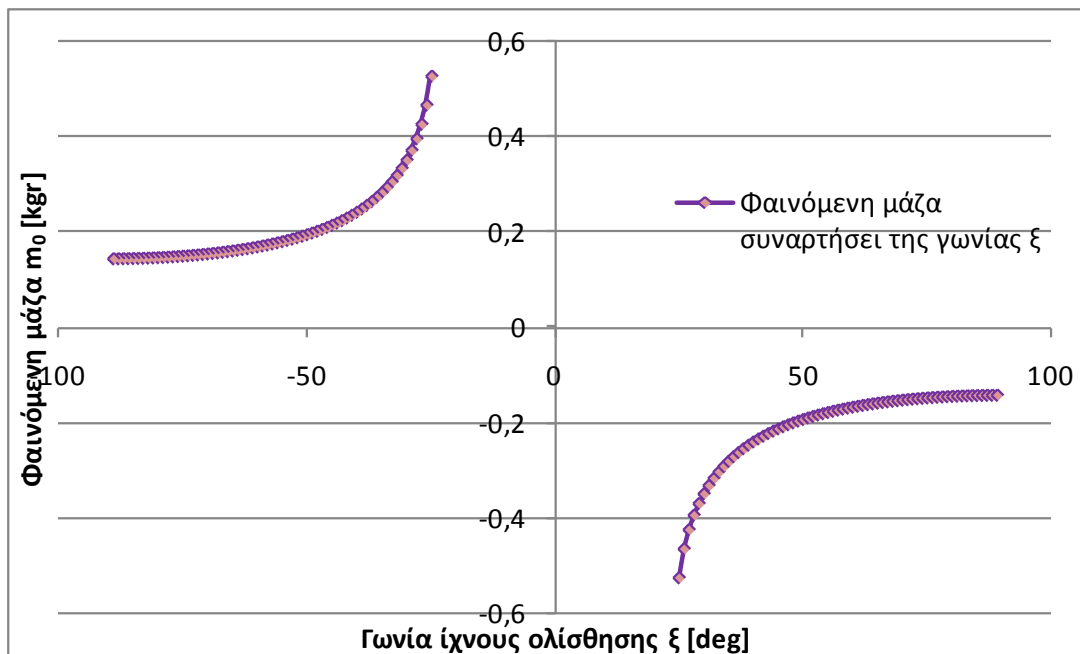
Στην προκειμένη περίπτωση λόγω συμμετρίας η φαινόμενη μάζα θα είναι:

$$m_0 = \frac{1}{g} \left(-\sin \xi_d (K_{D_o} + K_D a_d^2) + \cos \xi_d (K_L a_d) \right) V_d^2 \quad (4.15)$$

Στα επόμενα διαγράμματα των σχημάτων 4.11 και 4.12 παρουσιάζεται η παραπάνω συνάρτηση της φαινόμενης μάζας συναρτήσει των γωνιών προσβολής και ίχνους ολίσθησης για κάθε τιμή τους μέσα στα επιτρεπτά για το συγκεκριμένο όχημα όρια.



Σχήμα 4.11: Η φαινόμενη μάζα του υποβρυχίου συναρτήσει της γωνίας προσβολής α για σταθερές διαδρομές



Σχήμα 4.12: Η φαινόμενη μάζα του υποβρυχίου συναρτήσει της γωνίας ίχνους ολίσθησης ξ για σταθερές διαδρομές.

Συνεπώς μπορούμε να υπολογίσουμε και τη ζητούμενη τιμή της μεταβλητής μάζας για την σταθερή διαδρομή και για δεδομένη ταχύτητα:

$$m_{b_d} = (m - m_h - m_m) + \frac{1}{g} \left(-\sin \xi_d (K_{D_o} + K_D a_d^2) + \cos \xi_d (K_L a_d) \right) V_d^2 \quad (4.16)$$

Στη συνέχεια θα πρέπει να προσδιοριστούν και οι παράμετροι που περιγράφουν την κινούμενη μάζα m_m . Η θέση της κινούμενης μάζας ορίζεται από τις παραμέτρους $r_{m_{x_d}}, r_{m_{z_d}}$ που περιγράφουν της συντεταγμένες της στο σωματοπαγές σύστημα κατά τον x_b και z_b άξονα αντίστοιχα.

Όπως συμβαίνει σε πολλά υπαρκτά υδρόπτερα επιλέγεται το $r_{m_{z_d}}$ να είναι επιπλέον σταθερό, οπότε δεδομένης της τιμής της παραμέτρου $r_{m_{z_d}}$ και $\theta_d \neq \pm \frac{\pi}{2}$ η παράμετρος $r_{m_{x_d}}$ δίνεται από τη σχέση:

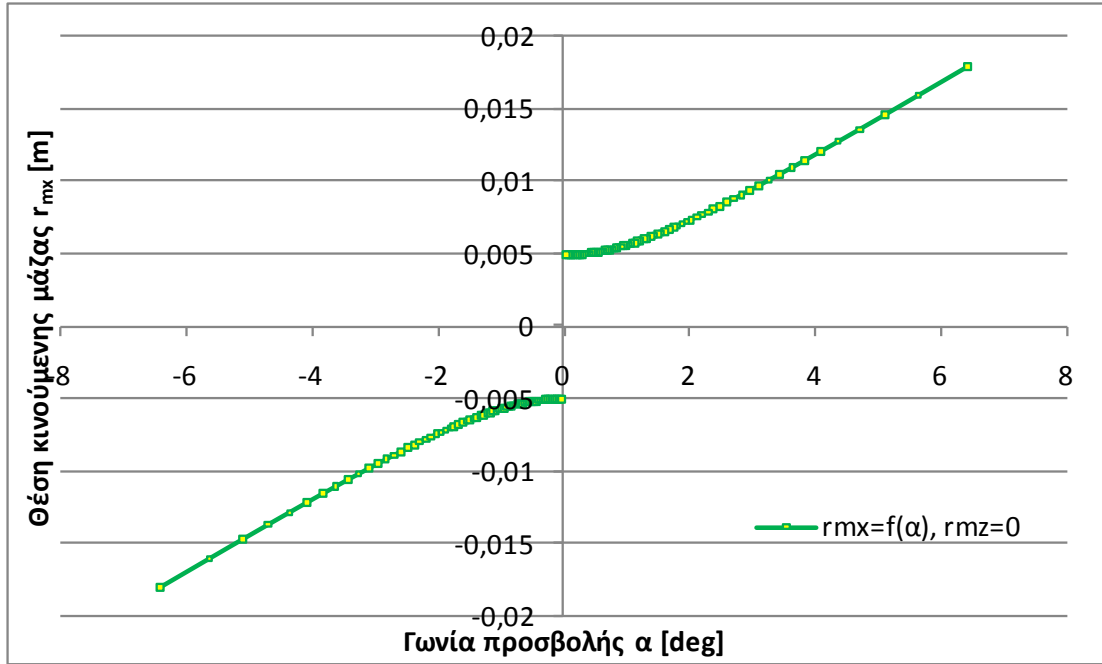
$$r_{m_{x_d}} = -r_{m_{z_d}} \tan \theta_d + \frac{1}{m_m g \cos \theta_d} \left((m_{a3} - m_{a1}) u_d w_d + (K_{M_o} + K_M a_d) V_d^2 \right) \quad (4.17)$$

Θεωρώντας ότι για τον έλεγχο της πρόνευσης (pitch) χρησιμοποιείται μπαταρία η οποία μετακινείται μόνο κατά τον x_b άξονα και θεωρήσουμε $r_{m_z} = 0$ τότε η κινούμενη μάζα θα πρέπει να μετακινείται πάνω στον σωματοπαγή άξονα x_b σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$r_{m_{x_d}} = \frac{1}{m_m g \cos \theta_d} \left((m_{a3} - m_{a1}) \cos a_d \sin a_d V_d^2 + K_M a_d V_d^2 \right) \quad (4.18)$$

όπου λάβαμε υπόψη ότι $u_d = V_d \cos a_d$ και $w_d = V_d \sin a_d$.

Στο σχήμα 4.13 αναπαριστάται γραφικά αυτή η σχέση της παραμέτρου r_{m_x} με τη γωνία προσβολής κατά την κίνηση του οχήματος σε ισορροπία. Η σχέση αυτή διαφοροποιείται στη συνέχεια όταν λαμβάνεται υπόψη ότι $r_{m_z} \neq 0$.



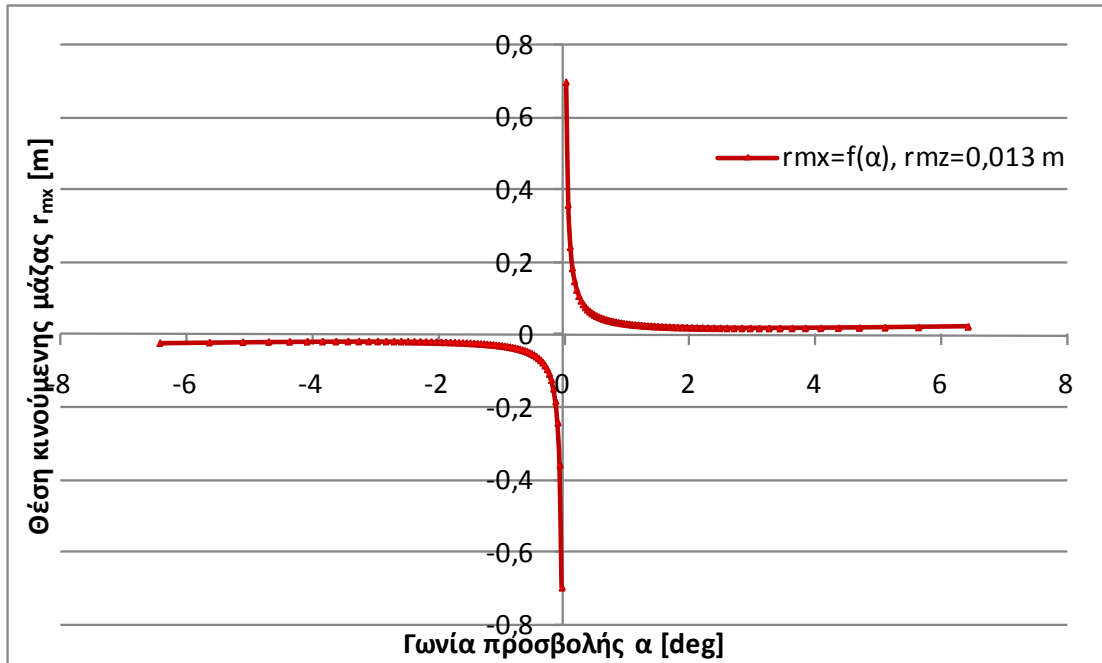
Σχήμα 4.13: Η θέση της κινούμενης μάζας r_{mx} κατά τον x_b άξονα συναρτήσει της γωνίας προσβολής α , όταν η θέση της κατά τον z_b είναι $r_{mz} = 0$ κατά τη διάρκεια διαδρομών σε ισορροπία.

Αυτό που συμβαίνει όμως στα υπαρκτά υδρόπτερα είναι να επιλέγεται $r_{mz} \neq 0$ ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της περιστροφής του οχήματος γύρω από τον x_b άξονα μέσω της ασυμμετρίας της μάζας ως προς τον εν λόγω άξονα.

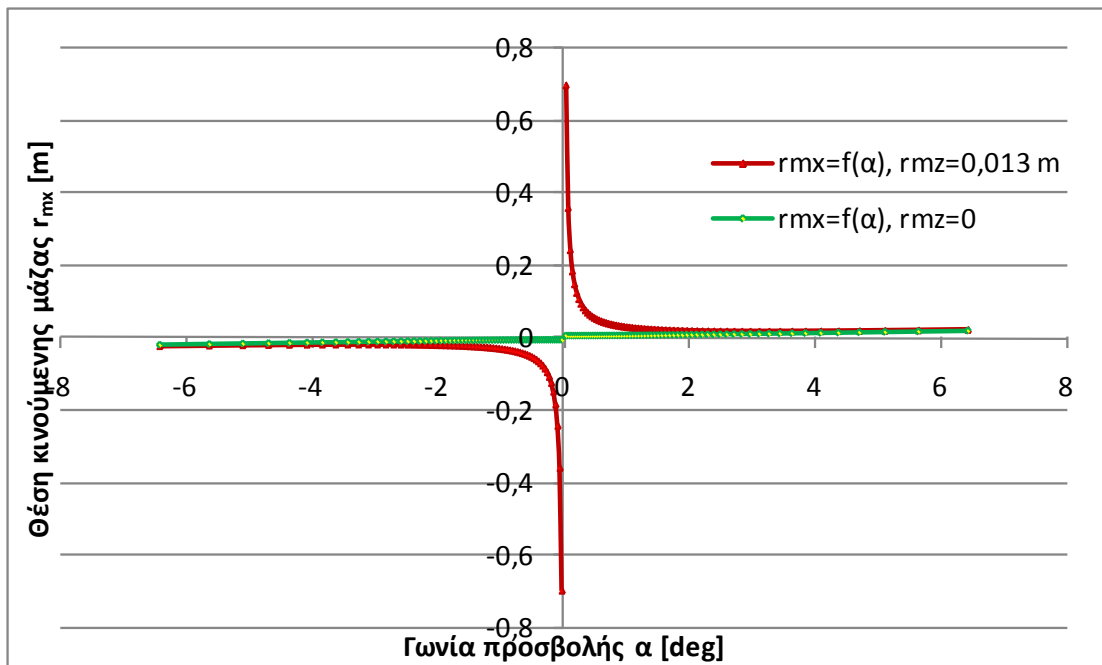
Η πρόνευση (pitch) ελέγχεται με την μετακίνηση της μπαταρίας μπροστά και πίσω κατά τον x_b σωματοπαγή άξονα ενώ ο διατοιχισμός (roll) με την περιστροφή της. Η μπαταρία είναι ασυμμετρική ως προς τον άξονα x_b ώστε με την περιστροφή της να ελέγχεται το όχημα κατά το διατοιχισμό. Έτσι η κινούμενη μάζα θεωρείται ότι έχει σταθερό $r_{mz} = 1,3\text{cm}$. Σε αυτή την περίπτωση η μετατόπιση της κινούμενης μάζας κατά τον x_b σωματοπαγή άξονα θα εξαρτάται και από την θ γωνία σύμφωνα με τη σχέση:

$$r_{mx_d} = -r_{mz_d} \tan \theta_d + \frac{1}{m_m g \cos \theta_d} \left((m_{a3} - m_{a1}) \cos a_d \sin a_d V_d^2 + K_M a_d V_d^2 \right) \quad (4.19)$$

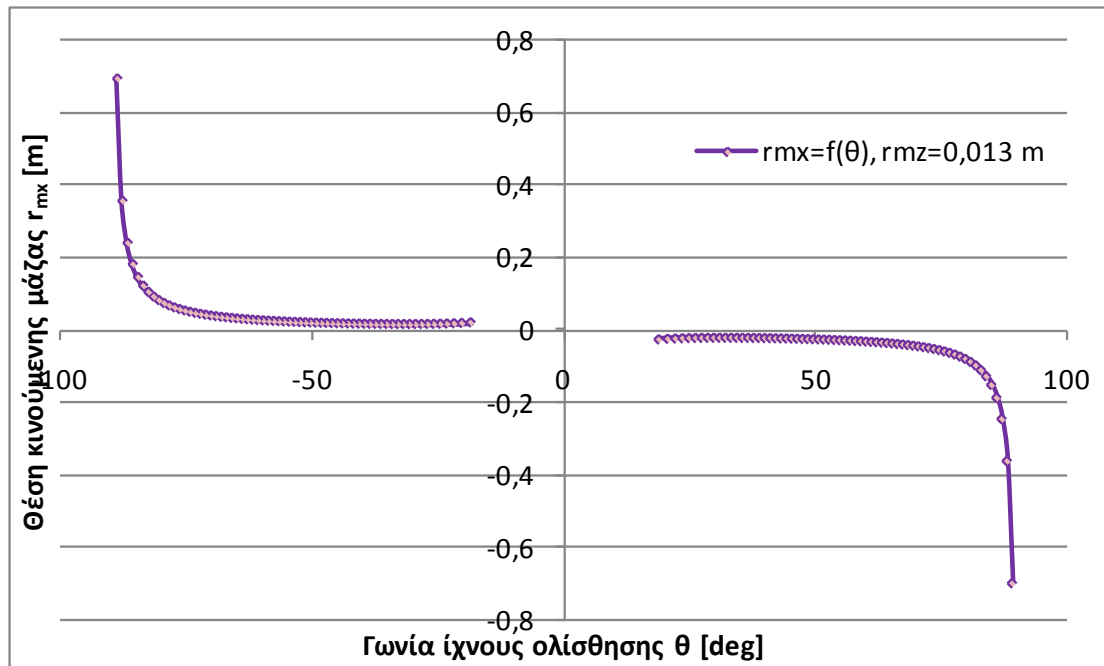
Η εξάρτηση από τις γωνίες προσβολής και πρόνευσης παρουσιάζονται στα σχήματα 4.14 και 4.16 αντίστοιχα, ενώ στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται η διαφοροποίηση της παραμέτρου r_{mx} όταν η r_{mz} από μηδενική γίνει $1,3\text{ cm}$.



Σχήμα 4.14: Η θέση της κινούμενης μάζας r_{mx} κατά τον x_b άξονα συναρτήσει της γωνίας προσβολής α , όταν η θέση της κατά τον z_b είναι $r_{mz} = 1,3cm$ κατά τη διάρκεια διαδρομών σε ισορροπία.



Σχήμα 4. 15: Η θέση της κινούμενης μάζας r_{mx} κατά τον x_b άξονα συναρτήσει της γωνίας προσβολής α , όταν η θέση της κατά τον z_b είναι $r_{mz} = 1,3cm$ και $r_{mz} = 0$.

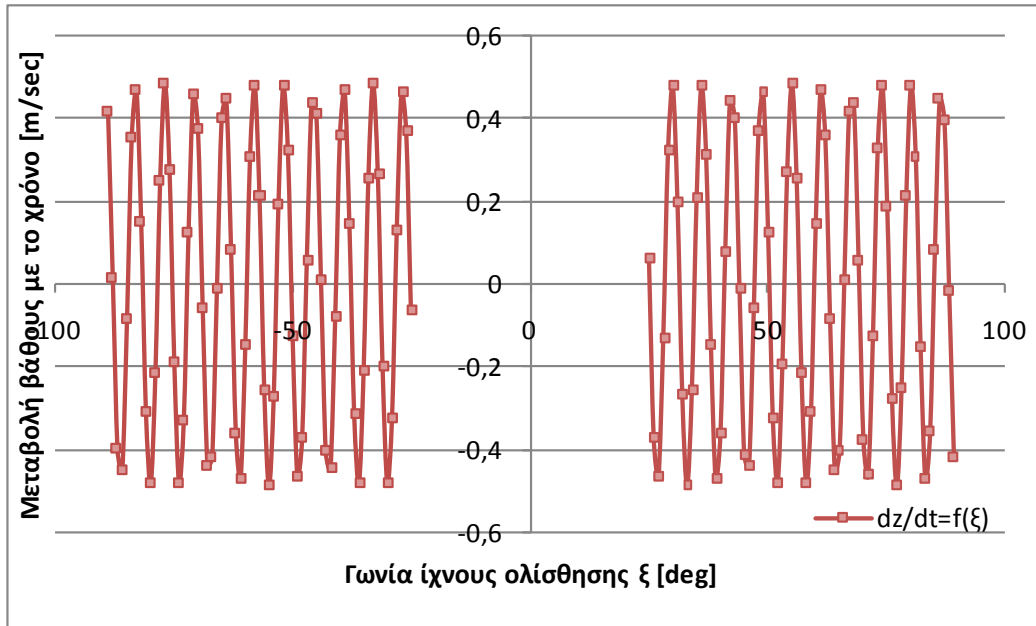


Σχήμα 4.16: Η θέση της κινούμενης μάζας r_{mx} κατά τον x_b άξονα συναρτήσει της γωνίας πρόνευσης θ , όταν η θέση της κατά τον z_b είναι $r_{mz} = 1,3cm$ κατά τη διάρκεια διαδρομών σε ισορροπία.

Έτσι μπορεί κάποιος ανεξάρτητα να προσδιορίσει την κλίση και τη θέση του οχήματος που αντιστοιχούν στην ισορροπία μεταβάλλοντας το κέντρο βάρους του σύμφωνα με τη σχέση (4.17) και την ταχύτητά του αλλάζοντας τη φαινόμενη μάζα (μέσω της μεταβλητής m_b) σύμφωνα με την σχέση (4.15) και (4.16). Αυτό συμβαίνει γιατί όπως έχει ήδη αναφερθεί μία σημαντική ιδιότητα των εξισώσεων κίνησης του οχήματος στην ισορροπία είναι ότι η γωνία ίχνους ολίσθησης είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα. Η γωνία ίχνους ολίσθησης εξαρτάται μόνον από την γωνία προσβολής κατά την ισορροπία. Όταν επιλεγεί κάποια διαδρομή σε ισορροπία είναι δυνατό να καθοριστεί η γωνία ξ_{eq} , στη συνέχεια η απαιτούμενη γωνία προσβολής a_{eq} και μετά κάποια ταχύτητα V . Η ταχύτητα εξαρτάται από την άντωση η οποία καθορίζεται ελέγχοντας τη μεταβλητή μάζα και από τις υδροδυναμικές παραμέτρους.

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

$$\dot{z} = -V \sin \xi = -V \sin(\theta - a) \quad (4.20)$$



Σχήμα 4.17: Μεταβολή του βάθους \dot{z} στο οποίο βρίσκεται κάθε στιγμή το όχημα συναρτήσει της γωνίας ίχνους ολίσθησης ξ .

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Επιλύοντας την προηγούμενη εξίσωση (4.20) ως προς V και αντικαθιστώντας στις δυο τελευταίες εξισώσεις κίνησης στην ισορροπία (4.4) και (4.5) μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε ώστε να προσδιορίσουμε μεγέθη όπως την γωνία προσβολής α από άλλα τα οποία είναι κατευθείαν μετρήσιμα με όργανα του υποβρυχίου.

$$\frac{1}{2} \rho C_L(a_{eq}) A \left(\frac{\dot{z}_{eq}}{\sin(\theta_{eq} - a_{eq})} \right)^2 \sin \alpha_{eq} - \frac{1}{2} \rho C_D(a_{eq}) A \left(\frac{\dot{z}_{eq}}{\sin(\theta_{eq} - a_{eq})} \right)^2 \cos \alpha_{eq} - m_{0_{eq}} g \sin \theta_{eq} = 0 \quad (4.21)$$

$$\frac{1}{2} \rho C_L(a_{eq}) A \left(\frac{\dot{z}_{eq}}{\sin(\theta_{eq} - a_{eq})} \right)^2 \cos \alpha_{eq} + \frac{1}{2} \rho C_D(a_{eq}) A \left(\frac{\dot{z}_{eq}}{\sin(\theta_{eq} - a_{eq})} \right)^2 \sin \alpha_{eq} - m_{0_{eq}} g \cos \theta_{eq} = 0 \quad (4.22)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις περιλαμβάνουν τα μετρήσιμα μεγέθη \dot{z} , θ και m_0 . Η γωνία προσβολής α είναι συνάρτηση των ταχυτήτων u και w και δεν ανιχνεύεται αυτομάτως. Οι υδροδυναμικοί συντελεστές $C_D(a)$ και $C_L(a)$ έχουν εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας το ημιστατικό μοντέλο, οπότε αντικαθιστώντας τις δυνάμεις

προκύπτουν δύο εξισώσεις με τέσσερις παραμέτρους K_{D_0} , K_D , K_{L_0} , K_L και άγνωστο τη γωνία α .

$$(K_{L_0} + K_L a_{eq}) \left(\frac{\dot{z}_{eq}}{\sin(\theta_{eq} - a_{eq})} \right)^2 \sin \alpha_{eq} - (K_{D_0} + K_D a_{eq}^2) \left(\frac{\dot{z}_{eq}}{\sin(\theta_{eq} - a_{eq})} \right)^2 \cos \alpha_{eq} - m_{0_{eq}} g \sin \theta_{eq} = 0 \quad (4.23)$$

$$(K_{L_0} + K_L a_{eq}) \left(\frac{\dot{z}_{eq}}{\sin(\theta_{eq} - a_{eq})} \right)^2 \cos \alpha_{eq} + (K_{D_0} + K_D a_{eq}^2) \left(\frac{\dot{z}_{eq}}{\sin(\theta_{eq} - a_{eq})} \right)^2 \sin \alpha_{eq} - m_{0_{eq}} g \cos \theta_{eq} = 0 \quad (4.24)$$

Τα υδρόπτερα που κατευθύνονται προς τα κάτω και προς τα πάνω με το ίδιο μέτρο γωνίας πρόνευσης θ θα πρέπει λόγω συμμετρίας να έχουν και το ίδιο μέτρο γωνίας ίχνους ολίσθησης ξ_{eq} και προσβολής a_{eq} . Επομένως δεδομένης της συμμετρίας της άνωσης και της αντίστασης καθώς και της προσέγγισης που εφαρμόζεται στο κατακόρυφο επίπεδο, διαφορές για παράδειγμα στην ταχύτητα μεταξύ δύο διαδρομών με ίδια γωνία θ δε θα έπρεπε να υπάρχουν. Στην περίπτωση που διαπιστώνονται τέτοιες διαφορές, όπως έχει παρατηρηθεί επανειλημμένως κατά τη διάρκεια δοκιμαστικών διαδρομών με τα υπάρχοντα υδρόπτερα, αυτό οφείλεται σε διαφοροποιήσεις της πλευστότητας που οδηγεί το όχημα. Δηλαδή η τιμή της μεταβλητής μάζας η οποία καθορίζει και την πλευστότητα του οχήματος αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή φαινόμενης μάζας (άρα και διαφορετική κατάσταση πλευστότητας) από αυτή που νομίζουμε. Συγκρίνοντας τα δεδομένα τέτοιων διαδρομών είναι δυνατόν να εκτιμηθεί το πόσο πρέπει να αντισταθμιστεί η πλευστότητα του οχήματος μέσω της μεταβλητής μάζας ώστε να έχει την επιθυμητή τιμή και το όχημα την επιθυμητή ταχύτητα.

Αρχικά αντικαθιστάται το μέγεθος $m_{0_{eq}} = m_{b_{eq}} + \Delta m_0$ στις εξισώσεις (4.21) και (4.22). Χρησιμοποιώντας πάντα δεδομένα σταθερών διαδρομών το αντισταθμιστικό μέγεθος πλευστότητας Δm_0 μπορεί να εκτιμηθεί απαιτώντας οι διαδρομές με την ίδια απόλυτη τιμή γωνίας $|\theta_{eq}|$ να έχουν και την ίδια $|a_{eq}|$. Αυτό περιλαμβάνει την επίλυση ως προς a_{eq} σαν συνάρτηση της Δm_0 για κάθε μία από τις συμμετρικές διαδρομές και στη συνέχεια τον προσδιορισμό της μάζας Δm_0 για τις ίσες $|a_{eq}|$. Αν για παράδειγμα εκτιμηθεί ότι υπάρχει ένα $\Delta m_0 = -100gr$ αυτό σημαίνει ότι για την

δεδομένη πυκνότητα νερού και το βάρος του οχήματος κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης διαδρομής το όχημα είναι 100 γραμμάρια ελαφρύτερο όταν η δεξαμενή έρματος είναι ρυθμισμένη να είναι μισογεμάτη προσδίνοντας στο όχημα μηδενική άντωση (ουδέτερη πλευστότητα). Σε αυτή την περίπτωση αν δεν ληφθεί υπόψη η διόρθωση που πρέπει να γίνει στη μεταβλητή μάζα, τότε θα φαίνεται ότι η αντίσταση είναι μεγαλύτερη κατά την κατάδυση και μικρότερη κατά την ανάδυση, κάτι που είναι λάθος.

Η μέθοδος αυτή προσδιορισμού του αντισταθμιστικού μεγέθους πλευστότητας του υδροπτέρου στην στατική του κατάσταση μπορεί να υιοθετηθεί για την εξισορρόπηση του οχήματος στην αρχή κάθε αποστολής αλλά και για τον εντοπισμό αλλαγών του συστήματος κατά τη διάρκεια αποστολών. Πιθανά σφάλματα που μπορούν να συμβούν κατά τη διάρκεια αποστολών μπορεί να περιλαμβάνουν (1) επίστρωση με φύκια, (2) εισροή υδάτων από μια μικρή τρύπα στη γάστρα του οχήματος και (3) πρόβλημα στη διάταξη μεταβλητής πλευστότητας. Αυτά τα σφάλματα μπορούν να εντοπιστούν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που περιγράφηκε και η οποία συνίσταται στην σύγκριση καταδύσεων και αναδύσεων με ίση κατ' απόλυτο τιμή γωνία πρόνευσης θ . Βέβαια υπάρχουν και άλλοι τρόποι να προσδιοριστούν τέτοιου είδους σφάλματα όπως για παράδειγμα η σύγκριση της απόδοσης του οχήματος με κάποια ονομαστική απόδοση κάνοντας πάλι χρήση του μοντέλου.

Η μέθοδος που περιγράφηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό την ενημέρωση διαφόρων παραμέτρων και τη διόρθωσή τους κατά τη διάρκεια μίας αποστολής ή σαν ένα εξ αποστάσεως διαγνωστικό εργαλείο και φανερώνει με τον καλύτερο τρόπο τα πλεονεκτήματα της ύπαρξης και χρήσης του αναλυτικού μοντέλου.

Όσον αφορά τη ροπή κατά τη διάρκεια μίας σταθερής διαδρομής αυτή μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.3). Οι ροπές λόγω των εσωτερικών μαζών, της κινούμενης και της μεταβλητής μπορούν να υπολογιστούν από δεδομένα παραμέτρων σε σταθερές διαδρομές. Ο όρος $(m_{a3} - m_{a1})u_{eq}w_{eq}$ αναπαριστά τη ροπή που οφείλεται στην πρόσθετη μάζα του οχήματος στην ισορροπία ενώ ο όρος $M_{DL_{eq}}$ εκφράζει την υδροδυναμική ροπή που υπολείπεται. Οι δύο αυτοί όροι μπορούν να εκφραστούν κατευθείαν από την έκφραση $M_{total}(a)$:

$$M_{total}(a) = (m_{a3} - m_{a1})u_{eq}w_{eq} + M_{DL_{eq}} \quad (4.25)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.3) θα πάρουμε:

$$M_{total}(a) = m_m g \left(r_{m_{x_{eq}}} \cos \theta_{eq} + r_{m_{z_{eq}}} \sin \theta_{eq} \right) + m_{b_{eq}} g \left(r_{b_x} \cos \theta_{eq} + r_{b_z} \sin \theta_{eq} \right) \quad (4.26)$$

Οπότε η ολική ροπή μπορεί να υπολογιστεί από δεδομένα για τις διάφορες σταθερές διαδρομές.

Πριν από κάθε αποστολή του οχήματος στον ωκεανό διάφορα όργανα είναι δυνατόν να εισαχθούν ή να μετακινηθούν στο εσωτερικό του οπότε τα διάφορα βάρη που το αντισταθμίζουν και το εξισορροπούν στην στατική του κατάσταση πρέπει να τοποθετηθούν κατάλληλα στο εσωτερικό της γάστρας ώστε να εξισορροπηθεί το υδρόπτερο. Στο αναλυτικό μοντέλο χρησιμοποιούνται η ομοιόμορφα κατανεμημένη μάζα της γάστρας m_i και η αντισταθμιστική μάζα m_t για να αναπαραστήσουν τις σταθερές συνιστώσες του οχήματος. Σε αυτό το σημείο κατανοείται καλύτερα και ο ρόλος της επιπλέον αντισταθμιστικής μάζας που χρησιμοποιήθηκε στην μοντελοποίηση του υδροπτέρου. Η θέση της θα προσδιορίζεται κάθε φορά κάνοντας χρήση στατικών μετρήσεων που γίνονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εξισορρόπησης του οχήματος πριν από την έναρξη της αποστολής. Το όχημα εξισορροπείται χειροκίνητα καθιστώντας την δεξαμενή έρματος μισογεμάτη ενώ οι μάζες κατανέμονται στο εσωτερικό της γάστρας ώστε το υδρόπτερο να έχει ουδέτερη πλευστότητα και να είναι σταθμισμένο. Η εξίσωση (4.3) στην περίπτωση που ληφθεί υπόψη και η μάζα αντιστάθμισης m_t γίνεται:

$$(m_{a3} - m_{a1})u_{eq}w_{eq} - m_m g \left(r_{m_{x_{eq}}} \cos \theta_{eq} + r_{m_{z_{eq}}} \sin \theta_{eq} \right) - m_{b_{eq}} g \left(r_{b_x} \cos \theta_{eq} + r_{b_z} \sin \theta_{eq} \right) - m_t g \left(r_{t_{x_{eq}}} \cos \theta_{eq} + r_{t_{z_{eq}}} \sin \theta_{eq} \right) + M_{DL} = 0 \quad (4.27)$$

Χρησιμοποιώντας δεδομένα από τη διαδικασία της στατικής εξισορρόπησης του οχήματος οι παράμετροι m_t και r_t μπορούν να προσδιοριστούν λύνοντας την παραπάνω εξίσωση θεωρώντας $u = 0$ και $w = 0$.

Όταν σε κάποιες περιπτώσεις δεν είναι δυνατή η ακριβής εξισορρόπηση του οχήματος πριν από την έναρξη της αποστολής του, μπορεί να προσδιοριστεί η αντισταθμιστική μάζα δεδομένων κάποιων παραμέτρων που αντιστοιχούν σε συμμετρικές σταθερές διαδρομές προς τα κάτω και προς τα πάνω. Έτσι και σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία συγκριτική μέθοδος, όπως αυτή που

περιγράφηκε νωρίτερα και εκμεταλλεύεται τη συμμετρία του οχήματος ώστε να συγκρίνει καταδύσεις και αναδύσεις υπό την ίδια γωνία πρόνευσης.

ΑΡΧΙΚΗ ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΣΤΑΤΙΚΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

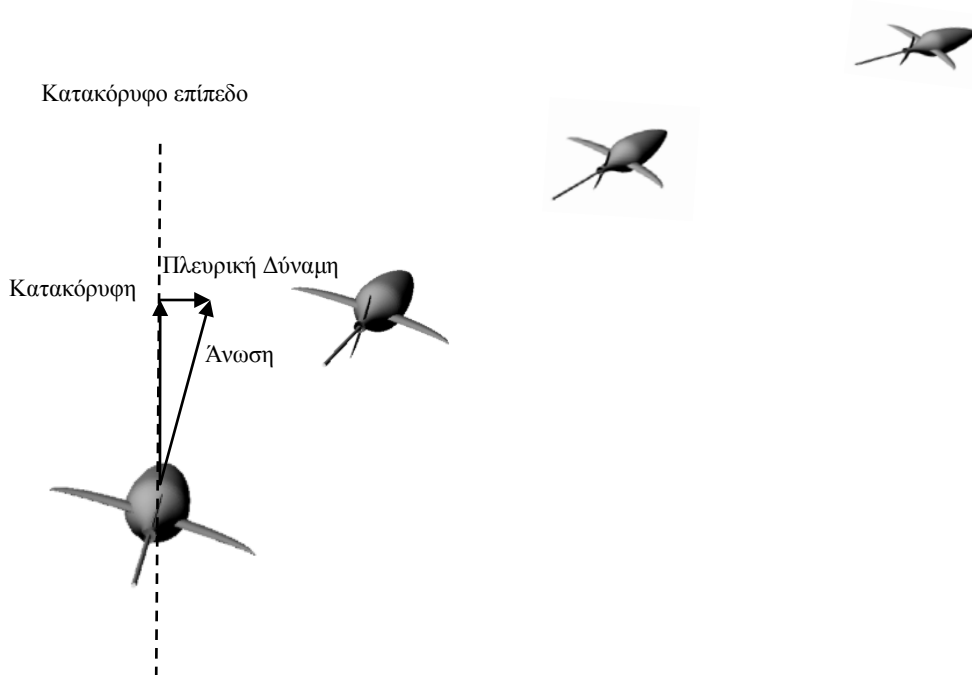
Κατά τη διαδικασία εξισορρόπησης του οχήματος πριν από την έναρξη κάθε αποστολής, είναι δυνατόν να γίνει κακή ευθυγράμμιση του κέντρου βάρους του. Αυτό μπορεί επίσης να είναι και αποτέλεσμα κάποιας βλάβης ή της επίστρωσης της εξωτερικής επιφάνειας με φύκια κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Ανάλογα με το σχεδιασμό κάθε οχήματος το γεγονός αυτό θα συνεπάγεται μία (στατική) γωνία διατοιχισμού (roll) και μία ροπή ως προς τον z_b σωματοπαγή άξονα (yaw). Στην περίπτωση υδροπτερών που η μετακίνηση των εσωτερικών μαζών μπορεί να γίνει προς όλες τις κατευθύνσεις, η κακή ευθυγράμμιση του κέντρου βάρους μπορεί να διορθωθεί ρυθμίζοντας κατάλληλα το διάνυσμα \vec{r}_m . Όταν όμως η εσωτερική μάζα περιορίζεται στη κίνησή της για παράδειγμα μόνο κατά τη κατεύθυνση \vec{i}_b τότε η διόρθωση αυτή δεν μπορεί να γίνει.

Τα υπάρχοντα υδρόπτερα χρησιμοποιούν σε ελάχιστες περιπτώσεις εξωτερικές κινούμενες επιφάνειες για να ελέγχουν την κλίση τους. Ο διατοιχισμός (roll) και η πρόνευση (pitch) μπορούν να ελεγχθούν αποκλειστικά με τη μετακίνηση εσωτερικών μαζών και έτσι είναι δυνατός ο σχεδιασμός ενός οχήματος χωρίς καθόλου εξωτερικές επιφάνειες ελέγχου, όπως είναι το υδρόπτερο Seaglider. Μία άλλη περίπτωση είναι ο συνδυασμός των δύο, όπως συμβαίνει στο Slocum, δηλαδή ο έλεγχος της γωνίας εκτροπής (yaw) γίνεται με τη χρήση πηδαλίου ενώ της πρόνευσης (pitch) με τη μετακίνηση εσωτερικής μάζας.

Ας θεωρήσουμε την περίπτωση όπου ένα υδρόπτερο Slocum τέθηκε σε λειτουργία έχοντας μη μηδενική γωνία διατοιχισμού (roll) στην στατική του κατάσταση, λόγω του ότι το κέντρο βάρους του βρίσκεται εκτός κυρίου άξονα. Η εσωτερική του μάζα δεν μπορεί να ενεργοποιηθεί κατά το διατοιχισμό (roll) και έτσι δεν μπορεί να γίνει η διόρθωση που χρειάζεται από τη στιγμή που το όχημα τέθηκε σε λειτουργία για την πραγματοποίηση της αποστολής του. Αυτή η γωνία κατά το διατοιχισμό (roll) προκαλεί μία ροπή ως προς τον z_b σωματοπαγή άξονα (yaw) πάνω στο υδρόπτερο λόγω της περιστροφής του διανύσματος της άνωσης έξω από το κατακόρυφο επίπεδο (ή αλλιώς δημιουργία πλευρικής συνιστώσας δύναμης). Για να

μπορέσει το όχημα να πορευθεί σε ευθεία διαδρομή, θα πρέπει η ροπή αυτή περί τον z_b σωματοπαγή άξονα (yaw) να εξουδετερωθεί από το πηδάλιο, κάτι που συνεπάγεται αύξηση της αντίστασης. Στην περίπτωση που η εσωτερική μάζα μπορεί να ενεργοποιηθεί και κατά τον διατοιχισμό (roll), όπως συμβαίνει με το υδρόπτερο Seaglider, η απαραίτητη διόρθωση μπορεί να γίνει με την περιστροφή της εσωτερικής μάζας κατά τον διατοιχισμό (roll).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί η εξάρτηση του ελέγχου της γωνίας εκτροπής (yaw) από το διατοιχισμό (roll) και τη μεταβολή του βάθους. Η ροπή περί τον z_b σωματοπαγή άξονα (yaw) που προκαλείται λόγω περιστροφής περί τον κύριο άξονα x_b (roll) αλλάζει κατεύθυνση μεταξύ καταδύσεων και αναδύσεων λόγω του ότι το διάνυσμα της άνωσης κατευθύνεται προς τα πάνω κατά την κατάδυση και προς τα κάτω κατά την ανάδυση. Αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον έλεγχο της γωνίας εκτροπής. Στην περίπτωση που αυτή ελέγχεται μεταβάλλοντας τον διατοιχισμό (roll) του οχήματος, για να παραμείνει σταθερή η γωνία εκτροπής (yaw) σε όλη τη διαδρομή, θα πρέπει κάθε φορά που το υδρόπτερο μεταβαίνει από κατάδυση σε ανάδυση και αντιστρόφως, να μεταβάλει ανάλογα και τη γωνία διατοιχισμού.

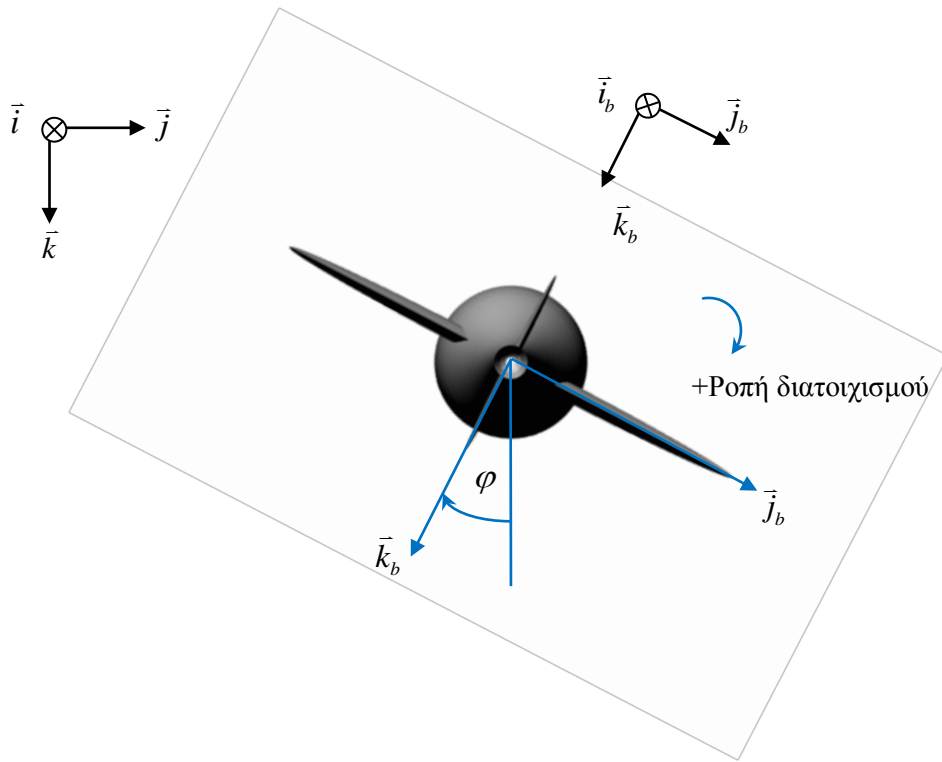


ΑΛΛΑΓΗ ΠΟΡΕΙΑΣ

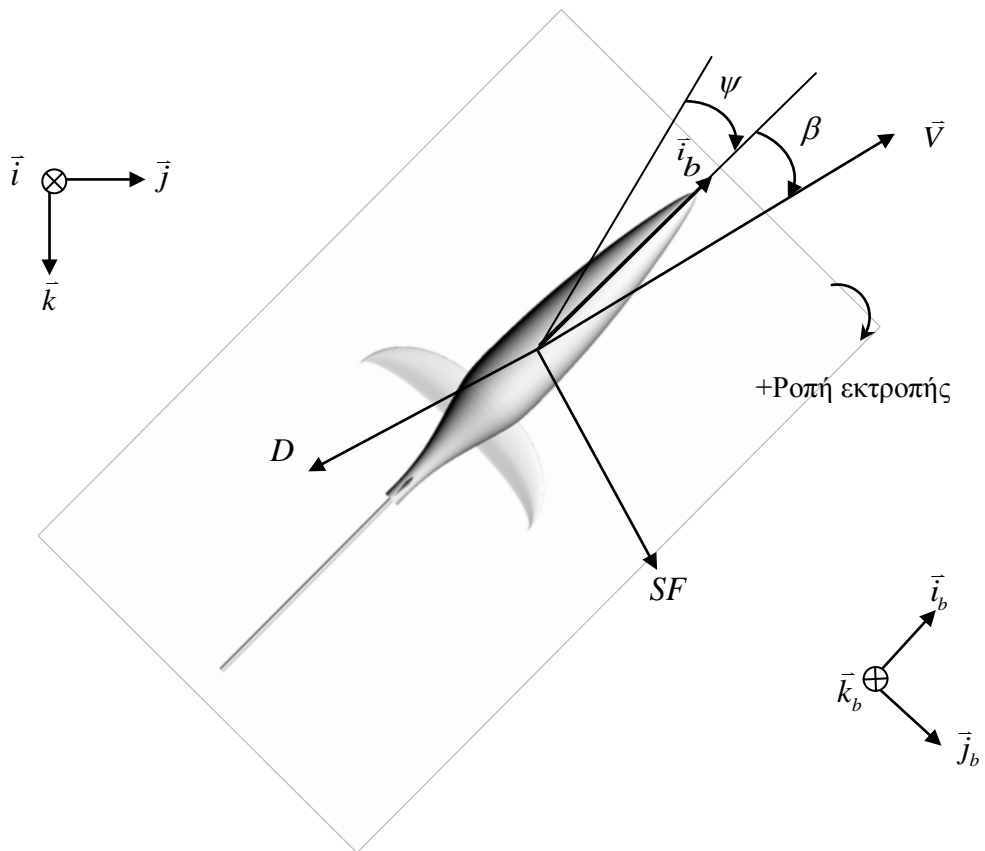
Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στον τρόπο με τον οποίο ένα υποβρύχιο υδρόπτερο κινείται στο οριζόντιο επίπεδο δηλαδή με ποιο τρόπο μπορούν να αλλάξουν την πορεία τους. Τα οχήματα αυτά μεταβάλουν τη γωνία εκτροπής/πορείας τους (heading/yaw) με δύο μεθόδους:

1. Περιστρεφόμενα ως προς τον κύριο άξονά τους (διατοιχισμός) ώστε να προκαλέσουν μια στροφή περί τον κατακόρυφο άξονα (yaw). Η κίνηση αυτή προκαλεί την περιστροφή του διανύσματος της άνωσης και της ροπής πρόνευσης πάνω στο όχημα με αποτέλεσμα με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία συνιστώσα έξω από το κατακόρυφο επίπεδο. Τα υδρόπτερα Seaglider και Spray χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο για να αλλάξουν πορεία. Οι εσωτερικές κινούμενες μάζες τους διαθέτουν ένα βαθμό ελευθερίας κίνησης κατά το διατοιχισμό (roll), και έτσι μεταβάλλουν αντίστοιχα και τη γωνία διατοιχισμού του οχήματος.
2. Χρησιμοποιώντας πηδάλιο ή και άλλες κινούμενες επιφάνειες. Αυτό προκαλεί μία ροπή στρέψης πάνω στο όχημα. Το υδρόπτερο Slocum χρησιμοποιεί ένα πηδάλιο για να στρέψει.

Κατά τον σχεδιασμό του ελέγχου της πορείας του οχήματος, δηλαδή της γωνίας εκτροπής (yaw) θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η συχνότητα των μεταβάσεων από ανάδυση σε κατάδυση (και αντιστρόφως) κατά την λειτουργία του υδροπτέρου. Αν χρησιμοποιείται ο διατοιχισμός (roll) για τον έλεγχο του ρυθμού μεταβολής της εκτροπής (yaw), τότε η γωνία διατοιχισμού θα πρέπει να αλλάζει σε διεύθυνση κάθε φορά που το όχημα στρέφει μεταβαίνοντας από ανάδυση σε κατάδυση. Σε αποστολές που λαμβάνουν χώρα σε ρηχά νερά και οι μεταβάσεις από ανάδυση σε κατάδυση (και αντιστρόφως) είναι συχνό φαινόμενο, αυτό μπορεί να είναι ανεπιθύμητο. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται πηδάλιο, η σχέση μεταξύ της γωνίας του πηδαλίου και του ρυθμού μεταβολής της εκτροπής (yaw) είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση της κίνησης (προς τα πάνω ή προς τα κάτω). Έτσι η χρήση του πηδαλίου είναι προτιμότερη για κάποιες αποστολές για παράδειγμα σε παράκτιες περιοχές. Αυτό υπήρξε και το κίνητρο για τη χρήση πηδαλίου στο ηλεκτρικό υδρόπτερο Slocum ώστε να ελέγχεται η εκτροπή (yaw), το οποίο είναι σχεδιασμένο για αποστολές σε ρηχά νερά και συχνές μεταβάσεις από αναδύσεις σε καταδύσεις και αντίστροφα.



Σχήμα 4.18: Το υδρόπτερο στο $y-z$ επίπεδο.



Σχήμα 4.19: Το υδρόπτερο στο $x-y$ επίπεδο.

Η σχέση μεταξύ διατοιχισμού (roll, σχήμα 4.18) και της γωνίας περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα (yaw, σχήμα 4.19) στην ισορροπία εξαρτάται από τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του κάθε οχήματος. Η ροπή λόγω άνωσης και αντίστασης πάνω στο υδρόπτερο είναι συνάρτηση της γεωμετρίας και της θέσης των πτερυγίων. Ένας σημαντικός παράγοντας της ροπής πρόνευσης (pitching moment) πάνω στο όχημα είναι ο σχεδιασμός των πτερυγίων και η θέση τους σχετικά με το κέντρο βάρους CG. Αυτό επηρεάζει τη θέση του υδροδυναμικού κέντρου πίεσης CP σε σχέση με το CG. Το CP είναι ουσιαστικά το σημείο δράσης των δυνάμεων άνωσης και αντίστασης. Το σημείο αυτό επηρεάζει με τη σειρά του τη ροπή λόγω αυτών των δυνάμεων. Ένα υδρόπτερο του οποίου το CP είναι μπροστά από το CG, θα έχει μία θετική υδροδυναμική ροπή πρόνευσης στην κατάσταση ισορροπίας. Γενικά η ροπή πρόνευσης είναι σταθεροποιητική για το όχημα όταν $\frac{\partial}{\partial a} M_{total}(a) < 0$. Η ροπή του σώματος από μόνη της είναι αποσταθεροποιητική ($\frac{\partial}{\partial a} M_{body}(a) > 0$), έτσι για να προκύψει τελικά συνολική ροπή σταθεροποιητική για το όχημα δηλαδή με αρνητική κλίση ($\frac{\partial}{\partial a} M_{total}(a) < 0$) θα πρέπει τα πτερύγια να τοποθετούνται αρκετά πίσω ώστε η υδροδυναμική ροπή να υπερκαλύψει τη δράση της ροπής του σώματος. Για παράδειγμα, ας θεωρηθεί ένα όχημα με το κέντρο πίεσής του CP μπροστά από το κέντρο βάρους CG και επιπλέον $\frac{\partial}{\partial a} M_{total}(a) > 0$, το οποίο κινείται σε μία ευθεία σταθερή διαδρομή προς τα κάτω. Μία μικρή θετική γωνία διατοιχισμού (roll) θα έχει σαν αποτέλεσμα θετικό ρυθμό μεταβολής στην εκτροπή (yaw). Η γωνία διατοιχισμού περιστρέφει το διάνυσμα της άνωσης και αντίστασης προς τα δεξιά, δηλαδή προς τη θετική κατεύθυνση. Επειδή ακριβώς τα διανύσματα αυτά δρουν στο κέντρο πίεσης CP μπροστά από το κέντρο βάρους CG, το όχημα στρέφει προς τα δεξιά (θετική διεύθυνση εκτροπής).

Τα υδρόπτερα σταθεροποιούνται ως προς την πρόνευση (pitch) κυρίως με τη βοήθεια των εσωτερικών μαζών και των ροπών λόγω μεταβολής της πλευστότητάς τους. Λόγω σχεδιασμού και χαμηλών ταχυτήτων η μέγιστη ροπή από τις εσωτερικές μάζες είναι γενικά πολύ μεγαλύτερη από τις υδροδυναμικές ροπές. Το γεγονός αυτό παρέχει μία ελευθερία στις επιλογές του σχεδιαστή ως προς τη θέση των πτερυγίων και την υδροδυναμική που θα προκύψει αλλά και το κέντρο πίεσης.

Υπάρχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στη σχέση μεταξύ διατοιχισμού (roll) και εκτροπής (yaw) στα υποβρύχια υδρόπτερα. Στην περίπτωση των αεροπλάνων υπάρχει μία σταθερή θετική σχέση μεταξύ διατοιχισμού και εκτροπής όπου μεταβολή της γωνίας διατοιχισμού προς τα δεξιά προκαλεί και εκτροπή (yaw) προς τα δεξιά όταν η πορεία είναι προς τα κάτω. Στα υποβρύχια υδρόπτερα η σχέση αυτή μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική. Στην περίπτωση του Seaglider τα πτερύγια και το κέντρο πίεσης βρίσκονται πίσω από το κέντρο βάρους του οχήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια αντίστροφη σχέση διατοιχισμού/εκτροπής από αυτή που συναντάται συνήθως. Όταν το Seaglider καταδύεται και περιστραφεί προς τα δεξιά, η θέση και κατεύθυνση του διανύσματος της άνωσης έχει σαν αποτέλεσμα την αλλαγή της πορείας προς τα αριστερά.

Ο ρυθμός μεταβολής της γωνίας εκτροπής (yaw) θα δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{\psi} = \frac{\sin \varphi}{\cos \theta} q + \frac{\cos \varphi}{\cos \theta} r \quad (4.28)$$

Αν θεωρηθεί μία ευθεία σταθερή διαδρομή με $\beta = 0$, $\varphi = 0$, $\bar{\omega} = 0$ τότε η απόκριση της εκτροπής σε μία πολύ μικρή γωνία διατοιχισμού θα μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$\left. \frac{\partial}{\partial \varphi} \ddot{\psi} \right|_{eq} = \left(\frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \dot{r} \right) \Big|_{eq} = \frac{1}{J_3 \cos \theta_{eq}} \left[\left((m_{a3} - m_{a1}) \sin a_{eq} \cos a_{eq} + K_{M_0} + K_M a_{eq} \right) V_{eq}^2 \right] \quad (4.29)$$

Η ποσότητα στην παρένθεση είναι η ολική υδροδυναμική ροπή πρόνευσης κατά την ισορροπία συμπεριλαμβανομένης και αυτής λόγω πρόσθετης μάζας. Στην ισορροπία αυτή η ροπή αντισταθμίζεται από τη ροπή των εσωτερικών μαζών.

Έτσι η σχέση αυτή μας επιτρέπει να γνωρίζουμε με ποιο τρόπο επηρεάζεται η εκτροπή από τη γωνία διατοιχισμού. Γνωρίζοντας το πρόσημο της υδροδυναμικής ροπής $\left((m_{a3} - m_{a1}) \sin a_{eq} \cos a_{eq} + K_{M_0} + K_M a_{eq} \right) V_{eq}^2$ είναι γνωστό και το πρόσημο της μεταβολής $\left. \frac{\partial}{\partial \varphi} \ddot{\psi} \right|_{eq}$. Αν $\left. \frac{\partial}{\partial \varphi} \ddot{\psi} \right|_{eq} > 0$ τότε κατά τη διάρκεια κατάδυσης ($a > 0$) μεταβολή της γωνίας διατοιχισμού προς τα δεξιά θα προκαλέσει θετική μεταβολή στη γωνία εκτροπής και άρα το όχημα θα αλλάξει πορεία προς τα δεξιά.

Η κίνηση των υποβρυχίων υδροπτέρων αποτελείται από καταδύσεις και αναδύσεις. Η κατεύθυνση του διανύσματος της άνωσης (lift) αλλά και η γωνία προσβολής α αντιστρέφουν το πρόσημό τους μεταξύ αυτών των κινήσεων με αποτέλεσμα να αντιστρέφεται και το πρόσημο της σχέσης διατοιχισμού/εκτροπής. Έτσι αν θεωρήσουμε ένα όχημα με θετική την παραπάνω σχέση, όταν αυτό καταδύεται μεταβολή στο διατοιχισμό (roll) με φορά προς τα δεξιά θα προκαλέσει θετική μεταβολή στη γωνία εκτροπής (yaw) και άρα το όχημα θα αλλάξει πορεία προς τα δεξιά. Στην ανάδυση όμως θα προκαλέσει αρνητική μεταβολή στην εκτροπή και θα στρίψει αριστερά.

ΑΝΤΙΠΑΡΑΒΟΛΗ: ΥΔΡΟΠΤΕΡΟ Ε.Μ.Π. vs ΥΔΡΟΠΤΕΡΟ SLOCUM

Εφαρμόζοντας το αναλυτικό μοντέλο στην περίπτωση δισδιάστατων σταθερών διαδρομών όπως ακριβώς έγινε και για το όχημα που σχεδιάστηκε στο Ε.Μ.Π σε προηγούμενη ενότητα, θα προσδιοριστούν οι διαδρομές σε κατάσταση ισορροπίας για το υδρόπτερο Slocum.

Οι αντίστοιχες υδροδυναμικές σταθερές για το υδρόπτερο Slocum είναι $K_{L_0} = 0$, $K_{M_0} = 0$ λόγω συμμετρίας ως προς το x-y επίπεδο, ενώ $K_L = 132,55 \text{ kg} / \text{m}$, $K_{D_0} = 2,15 \text{ kg} / \text{m}$ και $K_D = 24,95 \text{ kg} / \text{m}$.

Η επιτρεπτή περιοχή μέσα στην οποία μπορεί να παίρνει τιμές η γωνία ίχνους ολίσθησης ώστε η ευθεία διαδρομή που θα ακολουθήσει το όχημα κατά την

κατάδυση ή ανάδυση να είναι σε ισορροπία είναι: $\xi_{eq} \in \left[\tan^{-1} \left(2 \frac{K_D}{K_L} \sqrt{\frac{K_{D_0}}{K_D}} \right), \frac{\pi}{2} \right]$ ή

$$\xi_{eq} \in \left[-\frac{\pi}{2}, \tan^{-1} \left(-2 \frac{K_D}{K_L} \sqrt{\frac{K_{D_0}}{K_D}} \right) \right],$$

δηλαδή $\xi_{eq} \in \left[\frac{\pi}{30}, \frac{\pi}{2} \right]$ ή $\xi_{eq} \in \left[-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{30} \right]$ και αντίστοιχα $\xi_{eq} \in [6.3^\circ, 90^\circ]$ ή

$$\xi_{eq} \in [-90^\circ, -6.3^\circ].$$

Υπενθυμίζεται ότι για το όχημα που σχεδιάστηκε στα πλαίσια του έργου αυτού τα αντίστοιχα διαστήματα τιμών είναι $\xi_{eq} \in \left[\frac{\pi}{7.5}, \frac{\pi}{2} \right]$ ή $\xi_{eq} \in \left[-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{7.5} \right]$ και $\xi_{eq} \in [24^\circ, 90^\circ]$ ή $\xi_{eq} \in [-90^\circ, -24^\circ]$.

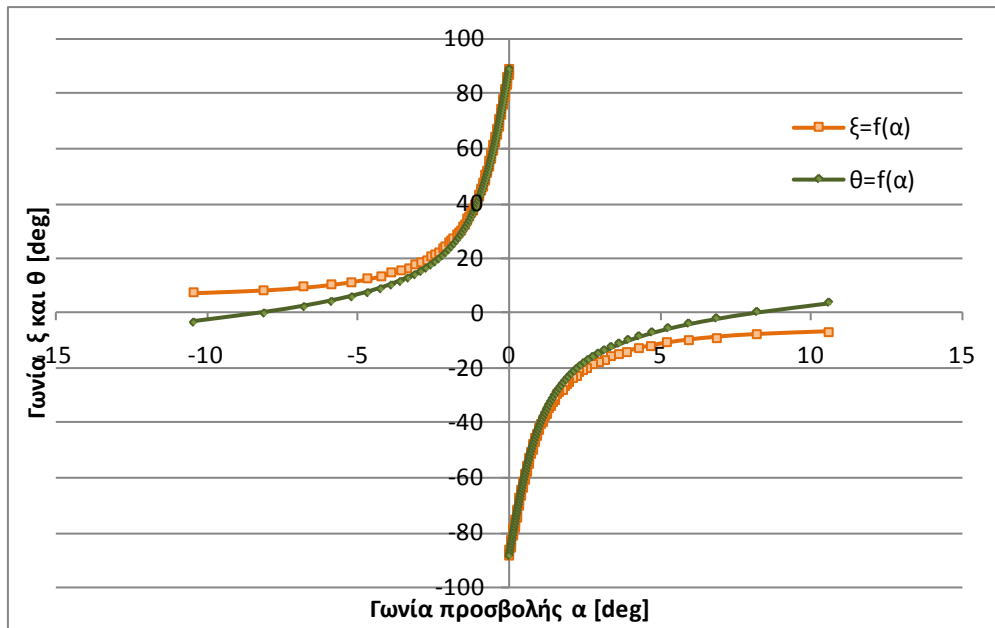
Παρατηρείται ότι το επιτρεπτό εύρος των αντίστοιχων διαστημάτων είναι μεγαλύτερο στην περίπτωση του υδροπτέρου Slocum γεγονός που του επιτρέπει την πραγματοποίηση διαδρομών υπό μικρότερη γωνία άρα και κάλυψη με την ίδια ταχύτητα μεγαλύτερης οριζόντιας απόστασης. Πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι τα δύο οχήματα έχουν διαφορές πχ διαφορετικά μεγέθη όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω, που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη σε μία σύγκριση.

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

Στην προκειμένη περίπτωση η γωνία προσβολής a_{eq} για διαδρομές σε κατάσταση ισορροπίας θα δίνεται συναρτήσει της γωνίας ξ_{eq} από τη σχέση:

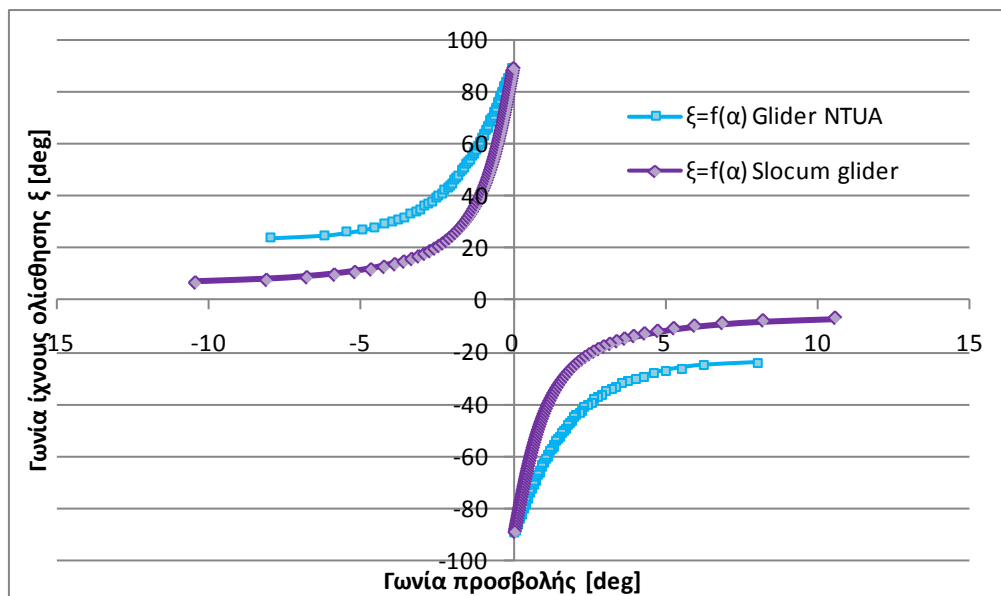
$$a_{eq} = \frac{1}{2} \frac{K_L}{K_D} \tan \xi_{eq} \left(-1 + \sqrt{1 - 4 \frac{K_{D_0} K_D}{K_L^2 \tan^2 \xi_{eq}}} \right) \quad (4.30)$$

Η παραπάνω σχέση αναπαριστάται για το υδρόπτερο Slocum στο διάγραμμα του σχήματος 4.20 όπου και φαίνεται η συνάρτηση της γωνίας ίχνους ολίσθησης ξ_{eq} με τη γωνία προσβολής a_{eq} αλλά και η αντίστοιχη σχέση της γωνίας πρόνευσης θ_{eq} κατά τη διάρκεια καταδύσεων (θετικές γωνίες προσβολής) και αναδύσεων (αρνητικές γωνίες προσβολής) σε κατάσταση ισορροπίας.

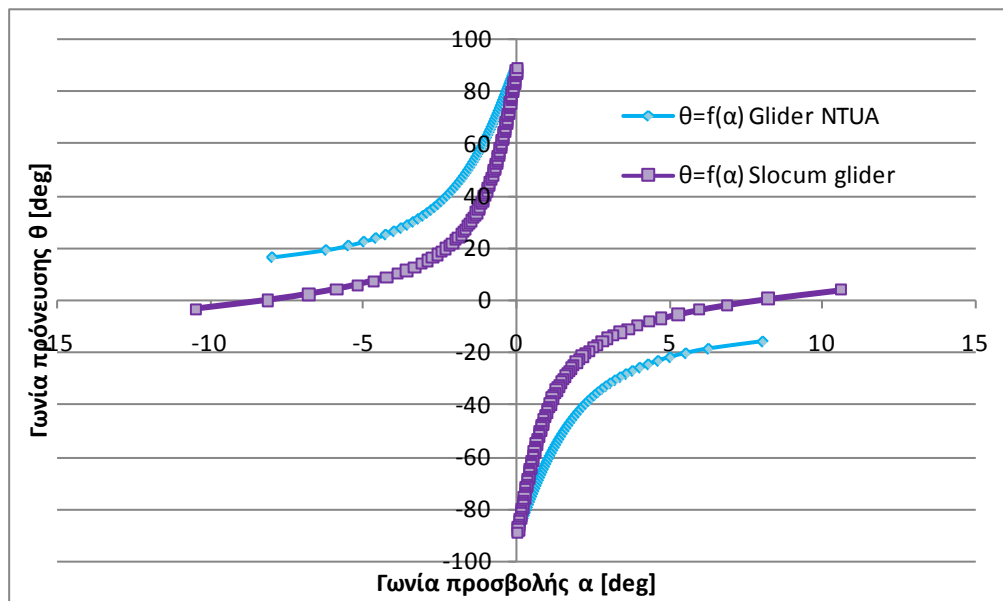


Σχήμα 4.20: Η γωνία προσβολής α συναρτήσει των γωνιών ίχνους ολίσθησης ξ και πρόνευσης θ για την πραγματοποίηση διαδρομών σε κατάσταση ισοροπίας για το υδρόπτερο Slocum.

Οι διαδρομές που υπολογίστηκαν για το Slocum συγκρίνονται στα διαγράμματα 4.21 και 4.22 με τα αντίστοιχα που εξήχθησαν σε προηγούμενη παράγραφο για το όχημα που σχεδιάστηκε στο Ε.Μ.Π.



Σχήμα 4.21: Η γωνία προσβολής α συναρτήσει της γωνίας ίχνους ολίσθησης ξ για σταθερές διαδρομές όπως προκύπτουν για το υδρόπτερο Slocum και αυτό που σχεδιάστηκε στο Ε.Μ.Π.



Σχήμα 4.22 Η γωνία προσβολής α συναρτήσεται της γωνίας πρόνευσης θ για σταθερές διαδρομές όπως προκύπτουν για το υδρόπτερο Slocum και αυτό που σχεδιάστηκε στο Ε.Μ.Π.

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται το μεγαλύτερο εύρος γωνιών υπό το οποίο μπορεί να κινηθεί το Slocum και πιο συγκεκριμένα η δυνατότητα που έχει να πραγματοποιεί σταθερές διαδρομές με μικρότερες γωνίες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μικρότερο μέγεθος που έχει το Slocum (1,5 m μήκος και διάμετρο 0,213 m) που έχει σαν αποτέλεσμα να ασκούνται πάνω του μικρότερες δυνάμεις άνωσης και αντίστασης, αλλά και στο γενικότερο σχεδιασμό του. Αυτό ήταν αναμενόμενο γιατί το ηλεκτρικό υδρόπτερο Slocum είναι σχεδιασμένο για αποστολές σε παράκτιες περιοχές και μικρά βάθη. Λόγω του περιορισμού στο βάθος που μπορεί να φτάσει το όχημα είναι αναγκαία η δυνατότητα κίνησης υπό μικρές γωνίες ώστε η οριζόντια μετατόπιση να είναι μεγαλύτερη. Αντίθετη κατάσταση θα καθιστούσε το όχημα δυσκίνητο για αποστολές σε ρηγά νερά. Ας σημειωθεί ότι οι υδροδυναμικές σταθερές K για το υδρόπτερο Slocum πάρθηκαν από το [37].

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΔΙΑΔΡΟΜΩΝ ΣΤΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Στην παράγραφο αυτή δίνονται τέσσερα παραδείγματα σταθερών διαδρομών του οχήματος, όπως αυτές προκύπτουν από το αναλυτικό μοντέλο. Παρουσιάζονται δύο καταδύσεις υπό γωνία $\xi_{eq} = -30^\circ$, $\xi_{eq} = -45^\circ$ και δύο αναδύσεις αντίστοιχα με $\xi_{eq} = 30^\circ$, $\xi_{eq} = 45^\circ$. Συνδυάζοντας τέτοιες κινήσεις προκύπτει ένας από τους πιο συνήθεις τρόπους μετακίνησης των υδροπτέρων, αυτός της πριονωτής πορείας

Η διαδρομή στις -30° προσδιορίζεται επιλέγοντας ταχύτητα $V = 0,486m/s$ και την κάθετη θέση της κινούμενης μάζας να δίνεται $r_{mz_{eq}} = 1,3cm$. Συνεπάγεται ότι η τιμή της μεταβλητής μάζας θα πρέπει να είναι $m_{b_{eq}} = 1,35kg$ ενώ $r_{mx_{eq}} = 1,843cm$. Η διαδρομή που ορίζεται υπό γωνία -45° και την ίδια ταχύτητα και $r_{mz_{eq}}$ θα πρέπει να έχει $m_{b_{eq}} = 1,213kg$, ενώ $r_{mx_{eq}} = 1,953cm$. Παρομοίως υπολογίζονται οι δύο σταθερές αναδύσεις υπό γωνία 30° και 45° . Η αναλυτική περιγραφή κάθε μιας από τις τέσσερις αυτές διαδρομές δίνεται στον πίνακα 4.3.

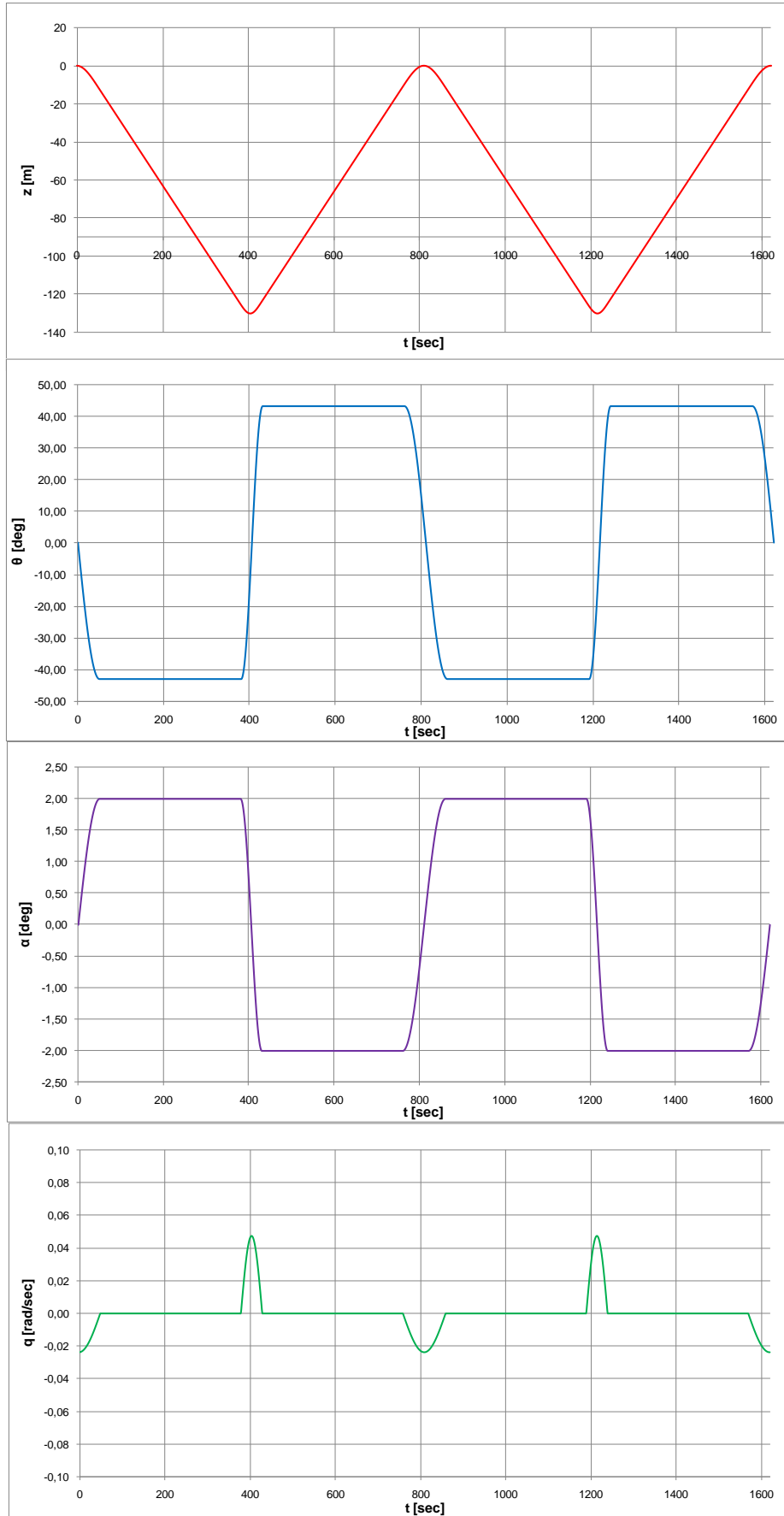
Πίνακας 4.3: Τέσσερις σταθερές ευθείες διαδρομές για το υδρόπτερο Ε.Μ.Π.

Μεταβλητή	Διαδρομή 1 [Κατάδυση]	Διαδρομή 2 [Ανάδυση]	Διαδρομή 3 [Κατάδυση]	Διαδρομή 4 [Ανάδυση]
ξ_{eq} [deg]	-30	30	-45	45
θ_{eq} [deg]	-26	26	-43	43
a_{eq} [deg]	4	-4	2	-2
$m_{0_{eq}}$ [kg]	0,35	-0,35	0,213	-0,213
$V_{0_{eq}}$ [ccm]	341,5	-341,5	208,115	-208,115
$m_{b_{eq}}$ [kg]	1,35	0,65	1,213	0,787
$r_{mx_{eq}}$ [cm]	1,843	-1,843	1,953	-1,953
$r_{mz_{eq}}$ [cm]	1,3	1,3	1,3	1,3
u_{eq} [m/s]	0,484	0,484	0,485	0,485
w_{eq} [m/s]	0,034	-0,034	0,017	-0,017
\dot{z}_{eq} [m/s]	-0,48	0,48	0,413	-0,413

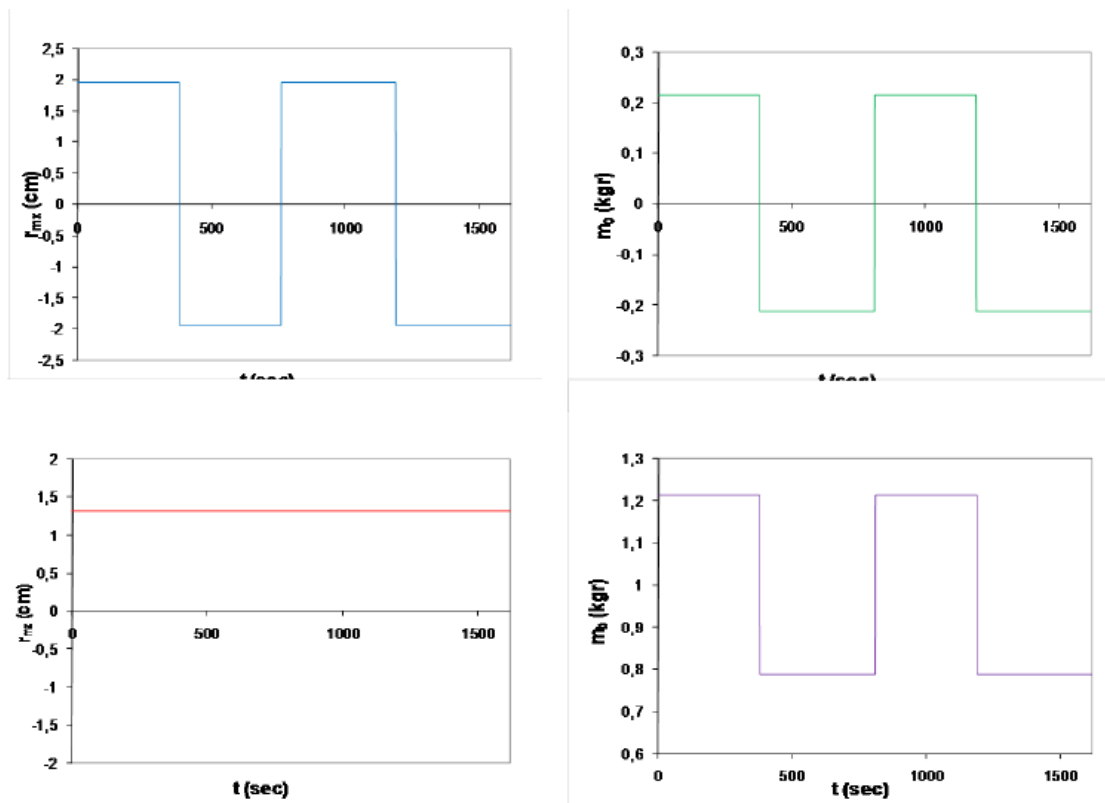
Όπως ήδη αναφέρθηκε αυτού του είδους τα οχήματα ακολουθούν κυρίως μία πορεία η οποία αποτελείται από ένα συνδυασμό καταδύσεων και αναδύσεων σε κατάσταση ισορροπίας. Έτσι προκύπτει ένας από τους πιο συνήθεις τρόπους μετακίνησης των υδροπτέρων, αυτός της πριονωτής πορείας με έλεγχο ανάδρασης στις δύο εσωτερικές μάζες.

Στη συνέχεια γίνεται προσομοίωση μίας πριονωτής διαδρομής όπου και περιγράφεται σε πρώτο επίπεδο η διαδικασία ελέγχου και μεταβολής των διαφόρων μεταβλητών για την πραγματοποίησή της.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχούν στις διαδρομές 3 και 4 του πίνακα 4.3.



Σχήμα 4.23: Μεταβολή παραμέτρων κατά τη διάρκεια πριονωτής διαδρομής.



Σχήμα 4.24: Μεταβλητές ελέγχου κατά τη διάρκεια πριονωτής διαδρομής.

Η προσομοίωση δείχνει τέσσερα σταθερά ευθεία κομμάτια και τρεις σταθερές μεταβάσεις μεταξύ αναδύσεων και καταδύσεων. Σε κάθε μετάβαση οι παράμετροι που καθορίζουν τη θέση των εσωτερικών μαζών και τη μεταβλητή μάζα αλλάζουν, ώστε να ανταποκρίνονται στην επόμενη ολίσθηση σε κατάσταση ισορροπίας. Στο σχήμα 4.23 παρουσιάζονται η μεταβολή του βάθους z , της πρόνευσης θ της γωνίας προσβολής α , και της γωνιακής ταχύτητας q καθ' όλη τη διάρκεια της διαδρομής.

Ο έλεγχος που μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση αυτή είναι η ανατροφοδότηση στην κατάσταση των εσωτερικών μαζών, αγνοώντας εξωτερικές διαταράξεις. Έτσι οι μεταβλητές που ελέγχονται είναι η r_{mx} και m_b ενώ η r_{mz} παραμένει σταθερή. Η κατάσταση των μεταβλητών ελέγχου σε μία τέτοια διαδρομή φαίνονται στο σχήμα 4.24. Η θέση της κινούμενης μάζας r_{mx} τίθεται αρχικά στα $1,953\text{ cm}$ ενώ η r_{mz} (η οποία θα παραμείνει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια) στα $1,3\text{ cm}$ ενώ η μεταβλητή μάζα m_b στα $1,213\text{ kg}$ (προσδίδει στο όχημα φαινόμενη μάζα $m_0 = 0,213\text{ kg}$). Το όχημα θα διανύσει ευθεία διαδρομή υπό γωνία $\xi = -45^\circ$ και στη

συνέχεια η r_{mx} θα πάρει την τιμή $-1,953 \text{ cm}$ για να πραγματοποιήσει την ανάδυση. Ταυτόχρονα η τιμή της μεταβλητής μάζας θα γίνει $0,787 \text{ kg}$ ενώ η φαινόμενη του οχήματος $m_0 = -0,213 \text{ kg}$. Αφού αναδυθεί θα επαναληφθεί ακόμα μία φορά η διαδικασία.

Βασική παράμετρος για τη σταθερότητα των μεταβάσεων από μία κατάσταση ισορροπίας σε μια άλλη είναι ο χρόνος στον οποίο διεξάγεται η αλλαγή των συνθηκών, δηλαδή ο χρόνος κατά τον οποίο γίνεται η μετακίνηση της κινούμενης μάζας και η άντληση – απάντληση της μεταβλητής μάζας. Σημαντικό για τη σταθερότητα του οχήματος είναι οι παράμετροι που αντιπροσωπεύουν τις εσωτερικές μάζες κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων να συγκλίνουν ομαλά στις τιμές της επόμενης κατάστασης ισορροπίας.

5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Τα υποβρύχια υδρόπτερα απαιτούν ένα ακριβές και αξιόπιστο σύστημα ελέγχου ώστε να μπορούν να αξιοποιούν όσο το δυνατόν καλύτερα τις δυνατότητες τους στις διάφορες ωκεανογραφικές εφαρμογές. Η ακριβής πλοήγησή τους είναι πολύ σημαντική και για την επίτευξη της διαδρομής που προγραμματίζονται να ακολουθήσουν αλλά και για τον ακριβή συσχετισμό των καταγεγραμμένων επιστημονικών δεδομένων με την τοποθεσία στην οποία ελήφθησαν. Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου ελαχιστοποιούν την αβεβαιότητα προσδιορισμού της θέσης του οχήματος και τα κάνουν πιο ανθεκτικά στις εξωτερικές διαταραχές.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφορες προτάσεις για το σχεδιασμό ελέγχου του υποβρυχίου υδροπτέρου. Αρχικά αναλύεται ο παραδοσιακός τρόπος ελέγχου και πλοήγησης των οχημάτων αυτών και δημιουργείται ο αλγόριθμος κατάδυσης ανάδυσης για το όχημα που σχεδιάστηκε. Το αναλυτικό μοντέλο έχει δύο βασικές εφαρμογές στα συστήματα ελέγχου των υδροπτέρων. Πρώτον μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση των κλασικών συστημάτων ελέγχου που χρησιμοποιούνται και δεύτερον να δημιουργηθούν εξ αρχής ελεγκτές και παρατηρητές κατάστασης βασισμένοι στο δυναμικό μοντέλο που περιγράφει το όχημα. Παρουσιάζονται προτάσεις και προς τις δύο αυτές κατευθύνσεις.

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΔΡΟΠΤΕΡΩΝ

Ο κυριότερος στόχος ενός συστήματος αυτομάτου ελέγχου σε ένα υποβρύχιο υδρόπτερο είναι η ακριβής πλοήγηση με την ταυτόχρονη κατανάλωση της ελάχιστης ενέργειας. Ένα τέτοιο σύστημα αυτομάτου ελέγχου θα πρέπει να κάνει χρήση με το καλύτερο όφελος των λιγοστών δυνατοτήτων που παρέχονται, λόγω της περιορισμένης δυνατότητας χρήσης αισθητηρίων οργάνων θέσης και ταχύτητας.

Ζωτικός στόχος η ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας ώστε να μεγιστοποιηθεί η εμβέλεια και η διάρκεια των αποστολών.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΚΤΡΟΠΗΣ

Τα υποβρύχια υδρόπτερα χρησιμοποιούν γραμμικούς ελεγκτές (linear controllers) για τον έλεγχο της γωνίας πρόνευσης (pitch) και εκτροπής (heading/yaw). Ξεχωριστοί βρόγχοι ελέγχου χρησιμοποιούν διαφορετικούς ενεργοποιητές (actuators) για να μετακινήσουν την εσωτερική μάζα κατά τον έλεγχο πρόνευσης και να την περιστρέψουν για να ελέγξουν την εκτροπή, όπως περιγράφεται στην παράγραφο για την αλλαγή πορείας του κεφαλαίου 4. Τέτοια συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούν αναλογικούς ελεγκτές, δύο και τριών όρων PD (Αναλογικός Διαφορικός) ή PID (Αναλογικός Ολοκληρωτικός Διαφορικός) βρόγχους. Πέρα από τις κλασσικές μεθόδους ελέγχου το αναλυτικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια παρέχει μία συστηματική μέθοδο για την ανάπτυξη ελεγκτών βασισμένων στο μοντέλο (model based controllers).

Κατά τον σχεδιασμό των ελεγκτικών μηχανισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν κάποια μη γραμμικά στοιχεία για να μειώσουν την καταναλισκόμενη ενέργεια από τους ενεργοποιητές ελέγχου των εσωτερικών μαζών. Τέτοια στοιχεία είναι νεκρές ζώνες (deadbands), μεταβλητά χρονικά διαστήματα ελέγχου και οριοθέτηση στη μετακίνηση των εσωτερικών μαζών. Ο ελεγκτής μπορεί να τερματίσει τη λειτουργία του ή να αδρανοποιηθεί για ορισμένα χρονικά διαστήματα ώστε να εξοικονομήσει ενέργεια.

Στην περίπτωση ελέγχου της γωνίας θ , αυτή ρυθμίζεται μέσω της μεταβλητής και της κινητής μάζας. Μεταβαίνοντας από ανάδυση σε κατάδυση και αντίστροφα το σύστημα εκτελεί έναν ανοιχτό βρόγχο, δηλαδή η μεταβλητή μάζα αλλάζει και η κινούμενη μετακινείται στην καινούργια θέση. Ο έλεγχος της πρόνευσης και η διόρθωσή της κατά τη διάρκεια μίας σταθερής κατάδυσης ή ανάδυσης πραγματοποιείται με ένα κλειστό βρόγχο. Ο γραμμικός ελεγκτής χρησιμοποιεί αναλογικό κέρδος για ανατροφοδότηση και ενεργοποιεί την κινούμενη μάζα (μόνο) ώστε να ρυθμίσει τη γωνία πρόνευσης. Η γωνία αυτή υπάρχει η δυνατότητα να μετράται άμεσα με ένα κλισιόμετρο.

Όπως αναφέρθηκε ένας τέτοιος ελεγκτής χρησιμοποιεί αρκετά μη γραμμικά στοιχεία συμπεριλαμβανομένης της νεκρής ζώνης (deadband), μεταβλητά χρονικά

διαστήματα ελέγχου και οριοθέτηση στη μετακίνηση των εσωτερικών μαζών. Η χρήση τέτοιων στοιχείων γίνεται με σκοπό την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας από τους ενεργοποιητές ελέγχου. Επιπλέον υπάρχει και ένα φυσικό όριο στην εμβέλεια των ενεργοποιητών, λόγω του περιορισμένου μήκους που μπορεί να μετακινηθεί η εσωτερική μάζα ανά κύκλο ελέγχου. Εκ των πραγμάτων είναι επιτρεπτή η κίνησή της μέσα σε συγκεκριμένα όρια.

Η νεκρή ζώνη επιβάλλει μηδενικό έλεγχο όταν το σφάλμα είναι κάτω από μία ορισμένη τιμή. Πάνω από αυτό το κατώφλι η νεκρή ζώνη δεν έχει καμία επίδραση πάνω στο σήμα εισόδου (που σημαίνει ότι το πολλαπλασιάζει με το ένα). Μία πιο τυπική διάταξη νεκρής ζώνης έχει μηδενικό σφάλμα μέσα στην περιοχή της και έξοδο $K(\theta_{\text{σφάλμα}} - \delta)$ πάνω από το κατώφλι νεκρής ζώνης δ .

Αυτό σημαίνει ότι αφού γίνει η μέτρηση και καθοριστεί το λάθος στην πρόνευση (pitch) κρίνεται αν αυτό βρίσκεται πάνω ή κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι ώστε να είναι αναγκαία η αλλαγή της γωνίας. Έτσι στη συνέχεια ένας αναλογικός μετατροπέας ενεργοποιείται και βγάζει σαν αποτέλεσμα το πόσο πρέπει να μετακινηθεί η μάζα ώστε να διορθώσει την πρόνευση μόνο αν το λάθος είναι μεγαλύτερο από μια τιμή κατωφλίου δ , $K(\theta_{\text{σφάλμα}} - \delta)$. Στην αντίθετη περίπτωση δε θα συμβεί καμία μετακίνηση μάζας και θα εξοικονομηθεί ενέργεια.

Επειδή σε τέτοιους ελεγκτές το σφάλμα υπολογίζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα συνεπώς και ο έλεγχος πραγματοποιείται κατά τον ίδιο τρόπο, στην πραγματικότητα πρόκειται για διακριτούς ελεγκτές. Αυτό το είδος ελεγκτή χρησιμοποιεί το υδρόπτερο Slocum. Τα χρονικά διαστήματα ανά τα οποία πραγματοποιείται ο έλεγχος είναι μεταβλητά και είναι συνάρτηση των σφαλμάτων που ήδη έχουν καταγραφεί, του κατά πόσο για παράδειγμα βρίσκονται μέσα στα όρια της νεκρής ζώνης. Το μέγιστο και το ελάχιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο ενημερώνεται ο ελεγκτής τίθενται σαν παράμετροι ελέγχου. Εάν τα χρονικά διαστήματα ανά τα οποία ενημερώνεται ο ελεγκτής (επαναλειτουργεί) ενεργοποιούν τη δράση του με πολύ πιο γρήγορους ρυθμούς από αυτούς που δρα το δυναμικό σύστημα του υδροπτέρου, ο ελεγκτής τότε μπορεί να θεωρηθεί συνεχής. Το όριο στην εμβέλεια των ενεργοποιητών, είναι η μέγιστη αλλαγή του μήκους Δr_{mx} που επιτρέπεται να πραγματοποιήσει η εσωτερική μάζα ανά κύκλο ελέγχου. Στην περίπτωση μεγάλων λαθών και διαστημάτων επαναλειτουργίας του ελεγκτή

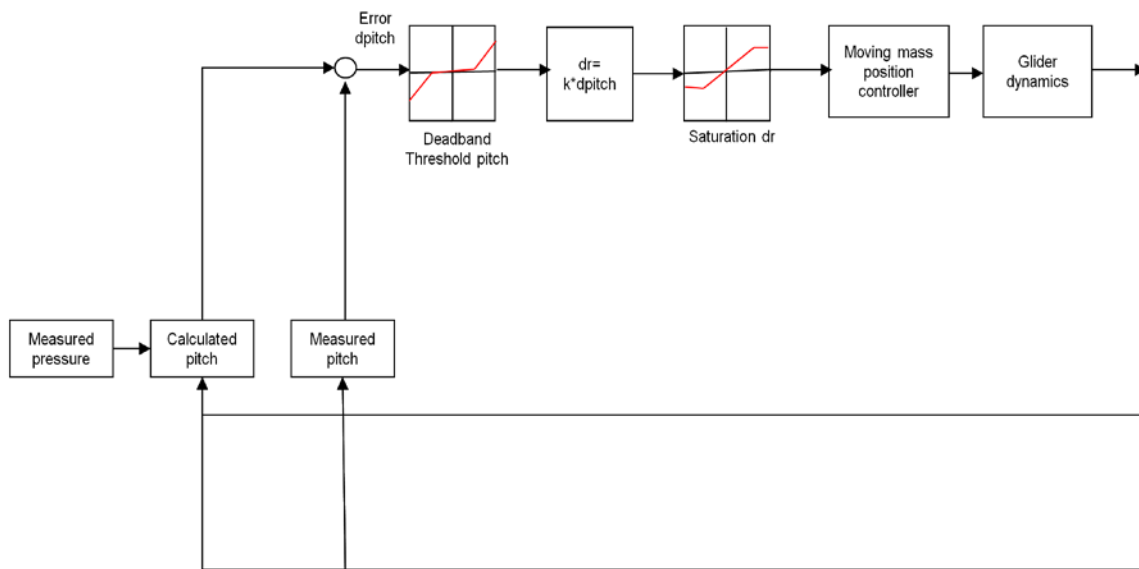
περιορίζεται σημαντικά η δράση του αναλογικού μετατροπέα (το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή) και άρα του ενεργοποιητή μετακίνησης των μαζών, με αποτέλεσμα να εξοικονομείται ενέργεια.

Στην περίπτωση ενός μη αναλογικού συστήματος ελέγχου το Δr_m θα υπολογιστεί από το $\Delta \theta$ μέσω των εξισώσεων κίνησης. Πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι δεν έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής τέτοια συστήματα ελέγχου.

Κάποιες τροποποιήσεις στη δομή του ελεγκτή, στη νεκρή ζώνη και το χρονισμό (μεταβλητά χρονικά διαστήματα ελέγχου) θα μπορούσαν να βελτιώσουν τις επιδόσεις του υδροπτέρου και να συμβάλουν στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Ένα πρώτο βήμα μπορεί να είναι η χρήση μιας συνεχούς νεκρής ζώνης η οποία συνδυαζόμενη με κάποιες αλλαγές στα χρονικά διαστήματα ανά τα οποία ενεργοποιείται ο βρόγχος ελέγχου θα μπορούσε να περιορίσει τις ανεπιθύμητες διακυμάνσεις (chattering) στην πρόνευση (pitch) και την εκτροπή (yaw). Γενικότερα είναι δυνατές διάφορες βελτιώσεις στη δομή των ελεγκτών που ήδη υπάρχουν. Για παράδειγμα η χρήση ενός ελεγκτή ανατροφοδότησης κατάστασης ή ενός αναλογικού – ολοκληρωτικού ελεγκτή στον έλεγχο της γωνίας εκτροπής θα μπορούσε να βελτιώσει την επίδοση του οχήματος εξαλείφοντας το σταθερό σφάλμα εκτροπής.

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ - ΑΝΑΔΥΣΗΣ

Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται σχηματικά ένας βρόγχος ελέγχου πρόνευσης. Παρόμοιο σχήμα μπορεί να αναπτυχθεί και για τη γωνία εκτροπής. Ας σημειωθεί ότι ο αντίστοιχος κώδικας παρουσιάζεται στο παράρτημα Β.



Σχήμα 5.1: Σχηματικό διάγραμμα ενός βρόγχου ελέγχου πρόνευσης.

Ο θεμελιώδης αλγόριθμος κίνησης του υδροπτέρου περιγράφεται με τον καλύτερο τρόπο θεωρώντας ένα τυπικό κύκλο που αποτελείται από μία κατάδυση και ανάδυση (πριονωτή πορεία). Στο σχηματικό διάγραμμα 5.1 παρουσιάζεται ο βρόγχος ελέγχου πρόνευσης. Αρχικά μία αρνητική γωνία πρόνευσης δίνεται στο όχημα ώστε να καταδυθεί. Η πίεση μετράται ανά διαστήματα ώστε όταν το βάθος γίνει μεγαλύτερο από μία κρίσιμη τιμή να μεταβληθεί η γωνία πρόνευσης στην επιθυμητή θετική τιμή ώστε να αναδυθεί. Συνεπώς μέσω του αλγορίθμου ελέγχου η κινούμενη μάζα μεταβαίνει στην νέα υπολογισμένη θέση, και η μεταβλητή λαμβάνει την νέα επιθυμητή τιμή για την ανάδυση.

Η γωνία πρόνευσης (pitch) υπάρχει η δυνατότητα και μετράται άμεσα με ένα κλισιόμετρο. Το σφάλμα πρόνευσης εκτιμάται συγκρίνοντας την τιμή που μετρήθηκε με την επιθυμητή. Ο έλεγχος είναι μηδενικός όταν το σφάλμα είναι κάτω από μία οριακή τιμή που καθορίζεται από το εύρος της νεκρής ζώνης. Αν το σφάλμα είναι πάνω από αυτή την οριακή τιμή κατωφλίου ο ενεργοποιητής μετακινεί τη μάζα κατά μία απόσταση η οποία θα προκύψει κατ' αναλογία του λάθους πρόνευσης (αναλογικό κέρδος). Επιπλέον η μετακίνηση της μάζας θα γίνει εφόσον η αλλαγή της θέσης που ορίζεται είναι μέσα στα φυσικά όρια που μπορεί να κινηθεί η μάζα μέσα στο όχημα.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΠΡΟΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΡΟΠΗΣ

Η ρύθμιση του ελεγκτή στα υπάρχοντα υδρόπτερα γίνεται με την προκαταρκτική εκτίμηση των παραμέτρων από δεδομένα δοκιμών. Η ρύθμιση των παραμέτρων θα μπορούσε να γίνει με ανάλυση των εξισώσεων ισορροπίας του οχήματος. Αυτό σημαίνει ότι αν οι διάφορες παράμετροι (υδροδυναμικές και αντισταθμιστικές) εκτιμώνται προκαταβολικά κάνοντας χρήση του αναλυτικού μοντέλου τότε ο σχεδιασμός και η ρύθμιση του ελεγκτή θα μπορεί να γίνεται κάνοντας τις ελάχιστες δοκιμές.

Γεγονός είναι ότι η γνώση της δυναμικής του οχήματος που προκύπτει από την ανάλυση του μοντέλου, όταν εφαρμοστεί ακόμα και μέσω μικρών βελτιώσεων στο σύστημα ελέγχου και στον προσδιορισμό των παραμέτρων του, επιφέρει αξιοσημείωτο κέρδος στη συνολική του επίδοση.

Για παράδειγμα στους κλασσικούς ελεγκτές των υδροπτέρων λαμβάνεται υπόψη μία γραμμική σχέση μεταξύ της πρόνευσης και της θέσης της μπαταρίας (κινούμενης μάζας) μέσα στο όχημα. Σύμφωνα όμως με το αναλυτικό μοντέλο στις δύο διαστάσεις και συγκεκριμένα με τη σχέση (4.3) στην ισορροπία φαίνεται ότι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η αλλαγή στη ροπή που υπάρχει λόγω μεταβολής της άνωσης μεταξύ αναδύσεων και καταδύσεων. Έτσι οι παράμετροι που ρυθμίζουν με ανοιχτό βρόγχο τη θέση της κινούμενης μάζας θα καθορίσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις νέες συνθήκες κίνησης (προς τα πάνω ή προς τα κάτω) χρησιμοποιώντας την εξίσωση ισορροπίας (4.3). Υπενθυμίζουμε ότι η σχέση (4.3) μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$m_m g(r_{m_{x_{eq}}} \cos \theta_{eq} + r_{m_{z_{eq}}} \sin \theta_{eq}) - m_{b_{eq}} g(r_{b_x} \cos \theta_{eq} + r_{b_z} \sin \theta_{eq}) = M_{total}(a)$$

Απαραίτητος είναι και ο έλεγχος της γωνίας εκτροπής (heading) για να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του οχήματος και κατά αυτή τη διεύθυνση. Οι ελεγκτές εκτροπής (heading controllers) στα υπάρχοντα ωκεανογραφικά υδρόπτερα κάνουν χρήση γραμμικών ελεγκτών όπως αυτοί έχουν ήδη περιγραφεί στην περίπτωση ελέγχου της πρόνευσης. Η αναβάθμιση αυτών των εργαλείων περιλαμβάνει τη χρήση διακοπτόμενων διαστημάτων ελέγχου, νεκρών ζωνών καθώς και τη σύζευξη των αποκλίσεων στην εκτροπή με τη δυναμική του οχήματος. Η μεταβολή στη γωνία εκτροπής μπορεί να γίνει είτε με την περιστροφή ως προς τον κύριο άξονα του

οχήματος (διατοιχισμός) ώστε να προκαλέσουν μια στροφή περί τον κατακόρυφο άξονα είτε χρησιμοποιώντας πηδάλιο ή και άλλες κινούμενες επιφάνειες ώστε να δημιουργηθεί μία ροπή στρέψης πάνω στο όχημα. Το υδρόπτερο Slocum χρησιμοποιεί τη μέθοδο με πηδάλιο για να στρέψει. Την πρώτη μέθοδο χρησιμοποιούν τα υδρόπτερα Seaglider και Spray για να αλλάξουν πορεία. Περιστρέφοντας την εσωτερική κινούμενη μάζα (μπαταρία) κατά το διατοιχισμό (roll) προκαλείται στο όχημα μεταβολή στη γωνία εκτροπής (yaw) η οποία μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση $\left. \frac{\partial}{\partial \varphi} \ddot{\psi} \right|_{eq} = \left(\frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \dot{r} \right) \Big|_{eq}$.

Η ακριβής πλοήγηση κατά την εκτροπή και ο έλεγχός της είναι πολύ βασική για την εξοικονόμηση ενέργειας, αφού μικρά σφάλματα στη γωνία εκτροπής μπορεί να οδηγήσουν κατά τη διάρκεια μεγάλων κινήσεων σε μεγάλα σφάλματα στη θέση. Η ενέργεια που θα σπαταληθεί για την αναγκαία αλλαγή στη μεταβλητή μάζα (μέσω άντλησης) ώστε να διορθωθεί το λάθος στη θέση, μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για τον έλεγχο της πορείας (heading).

ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Η ενσωμάτωση προσαρμόσιμων στοιχείων στα συστήματα ελέγχου των υδροπτέρων μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στη βελτίωση των επιδόσεων του οχήματος. Τα ωκεανογραφικά υδρόπτερα λειτουργούν συνεχόμενα για μεγάλες χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια των οποίων πραγματοποιούν παρόμοιες ή και πανομοιότυπες πριονωτές κινήσεις και στροφές οι οποίες μπορεί να επαναλαμβάνονται εκατοντάδες ή και χιλιάδες φορές. Η αντοχή και η διάρκεια είναι κυρίαρχος στόχος του σχεδιασμού τους. Ακόμα και ένα απλό σύστημα το οποίο θα ανιχνεύει αλλαγές στην λειτουργία και στις επιδόσεις του οχήματος στο πέρασμα του χρόνου και συνεπώς αλλαγές στις παραμέτρους του μοντέλου θα ήταν πολύ αποτελεσματικό.

Τα υδρόπτερα προωθούνται κατά την κίνησή τους από σχετικά μικρές αλλαγές στη άντωση (συγκριτικά πάντα με τη μάζα και τον όγκο τους) με αποτέλεσμα να είναι πολύ ευαίσθητα σε μικρές αλλαγές της άντωσής τους, της

στατικής τους ισορροπίας και των υδροδυναμικών φορτίσεων. Παράγοντες που επηρεάζουν και επιφέρουν αλλαγές στην υδροδυναμική κατάσταση του οχήματος αλλά και την στατική του ισορροπία (static trim) είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν για μεγάλες περιόδους. Για παράδειγμα η συσσώρευση διαφόρων μικροοργανισμών (πχ φυκιών) πάνω στην επιφάνεια του οχήματος (biofouling) είναι ένα πρόβλημα το οποίο παρατηρείται επανειλημμένως κατά το ταξίδι τέτοιων οχημάτων και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που θα πρέπει να αντιμετωπιστεί κατά τις αποστολές μεγάλης διάρκειας των υποβρυχίων υδροπτέρων. Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αλλαγές στην ταχύτητα του οχήματος που έχουν παρατηρηθεί όταν αναδύεται και όταν καταδύεται για πολλούς κύκλους, έχει αποδειχθεί ότι οφείλονται σε σταδιακή εισροή υδάτων μέσα στο σώμα του οχήματος μέσω ανοίγματος. Αλλαγές τέτοιου τύπου θα μπορούσαν να λαμβάνονται υπόψη χρησιμοποιώντας ένα απλό σύστημα προσαρμοστικού ελέγχου.

Ένα απλό σύστημα προσαρμοστικού ελεγκτή θα μπορούσε να κάνει τα εξής:

- Να πραγματοποιεί μία διαδρομή ελέγχου μετά από την έναρξη της αποστολής και περιοδικά στη συνέχεια, ώστε να προσδιορίζει την στατική και υδροδυναμική κατάσταση του οχήματος.
- Περιοδικά ή και συνεχόμενα να προσδιορίζει και να ενημερώνει για ενδεχόμενες αλλαγές στις διάφορες παραμέτρους του μοντέλου και στις μεταβλητές ελέγχου.
- Να προσαρμόζει το σύστημα σε αλλαγές της θαλάσσιας πυκνότητας. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να κάνει χρήση του δυναμικού μοντέλου και του αισθητήρα CTD ο οποίος προσδιορίζει την πυκνότητα.
- Να ρυθμίζει τις διάφορες παραμέτρους του ελεγκτή όπως τα μεταβλητά χρονικά διαστήματα ελέγχου και το εύρος νεκρής ζώνης. Για παράδειγμα οι επιδόσεις του οχήματος κατά την υποβρύχια διαδρομή του και οι μέσες τιμές των περιβαλλοντικών φορτίσεων σε περασμένες αποστολές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ρύθμιση των χρονικών διαστημάτων ενημέρωσης ελέγχου.
- Αναγνώριση τυχόν σταδιακών αλλαγών στην επίδοση η οποία μπορεί ακόμη και να οδηγήσει στην απώλεια του οχήματος (για παράδειγμα αλλαγές στην πλευστότητα του οχήματος που οφείλονται σε εισροή

ύδατος ή στη επίστρωση της βρεχόμενης επιφάνειας με φύκια και άλλους θαλάσσιους οργανισμούς.

Πολλά από αυτά τα προσαρμοσίμα στοιχεία σχετίζονται με την άμεση εφαρμογή του δυναμικού μοντέλου του υδροπτέρου, των εξισώσεων ισορροπίας και των μεθόδων προσδιορισμού των διαφόρων παραμέτρων όπως έχουν ήδη περιγραφεί. Περισσότερες προηγμένες μέθοδοι ασφαλώς και διατίθενται στη βιβλιογραφία σχετικά με τη θεωρία προσαρμοστικού ελέγχου.

ΔΙΑΚΟΠΤΟΜΕΝΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΝΕΚΡΕΣ ΖΩΝΕΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι ελεγκτές των υδροπτέρων χρησιμοποιούν νεκρές ζώνες και διακοπτόμενους βρόγχους έλεγχου με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας. Το πόσο αποτελεσματική θα είναι για το σκοπό αυτό συνολικά η χρήση τέτοιων στοιχείων από τους ελεγκτές, εξαρτάται από τη δυναμική του οχήματος και το πόσο έντονες είναι οι περιβαλλοντικές διαταράξεις. Σε κάποιες περιπτώσεις η συχνή ελεγχόμενη χρήση των ενεργοποιητών για τη μετακίνηση των εσωτερικών μαζών μπορεί να οδηγήσει στην κατανάλωση λιγότερης ενέργειας από αυτή που θα απαιτούνταν για τη διόρθωση λαθών στην κλίση και στη θέση του οχήματος μετά από μία εκτεταμένη περίοδο κίνησης χωρίς έλεγχο ανάδρασης, απλά με ένα σύστημα ανοιχτού βρόγχου.

Ας θεωρήσουμε δύο ακραίες περιπτώσεις. Στην πρώτη η κίνηση γίνεται σε εντελώς ήρεμο νερό. Έτσι, χωρίς εξωτερικές διαταράξεις και απόλυτη γνώση του συστήματος, το υδρόπτερο μπορεί να ταξιδεύει με ακρίβεια μόνο υπό τον έλεγχο ενός ανοιχτού βρόγχου. Οι ενεργοποιητές θα χρησιμοποιούνται μόνο στην περίπτωση μεταβάσεων μεταξύ σταθερών αναδύσεων και καταδύσεων συνεπώς θα καταναλώνεται ελάχιστη ενέργεια για τον έλεγχο. Η αντίθετη περίπτωση είναι η κίνηση σε ένα περιβάλλον το οποίο βάλλεται από συνεχείς και ποικίλες περιβαλλοντικές διαταράξεις. Σε αυτή την περίπτωση ο συχνός και συνεχής έλεγχος απαιτείται ώστε το όχημα να ταξιδέψει με ακρίβεια. Χωρίς αυτού του είδους τον έλεγχο η διόρθωση των λαθών στην πλοήγηση τα οποία έχουν συσσωρευτεί με το πέρασμα του χρόνου θα μπορούσε να απαιτήσει πολύ δουλειά από την αντλία για τη διόρθωση της θέσης του οχήματος. Ας σημειωθεί ότι η άντληση κοστίζει περίπου το 75% του αποθέματος ενέργειας του οχήματος. Συνεπώς γίνεται κατανοητό ότι τα σφάλματα στη θέση είναι δαπανηρά σε ενέργεια.

Επιπλέον έχει αποδειχτεί ότι ένα καλά σχεδιασμένο όχημα είναι περισσότερο ευσταθές ως προς την πρόνευση (pitch) (δεδομένου κάποιου σταθερού ελέγχου) αλλά όχι εντελώς ως προς την εκτροπή (heading). Επομένως ο ακριβής έλεγχος της εκτροπής πιθανώς να απαιτεί συχνότερη ενεργοποίηση συγκριτικά με τον έλεγχο της πρόνευσης. Το γεγονός αυτό διαπιστώθηκε σε πολλές πειραματικές αποστολές, όπου η πρόνευση καταγράφεται σταθερή ενώ υπάρχει σημαντικό συσσωρευμένο σφάλμα κατά την εκτροπή.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΑΔΡΑΣΗΣ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Η ανάπτυξη βρόγχων ελέγχου οι οποίοι βασίζονται στο αναλυτικό μοντέλο που παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο βελτιώνουν κατά πολύ την ήδη υπάρχουσα μεθοδολογία πάνω στον έλεγχο των υποβρυχίων υδροπτέρων. Τέτοιες διαδικασίες ελέγχου απαιτούν λιγότερες δοκιμές και ρυθμίσεις του οχήματος ενώ προσφέρουν αντοχή συγκριτικά με την αβεβαιότητα των ισχυουσών τεχνικών. Επιπλέον χρησιμοποιώντας το αναλυτικό μοντέλο είναι δυνατός ο σχεδιασμός ενός δυναμικού παρατηρητή για την εκτίμηση μεγεθών όπως η ταχύτητα του οχήματος. Οι παράμετροι αυτές που θα υπολογίζονται από τον παρατηρητή θα μπορούν να χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της οριζόντιας κίνησης του οχήματος αντί για τις ισχύουσες μεθόδους πλοήγησης οι οποίες βασίζονται σε υποθέσεις σταθερής γωνίας προσβολής. Το μοντέλο επίσης είναι χρήσιμο στον καθορισμό της βέλτιστης πορείας που θα ακολουθήσει το όχημα, όπως αναλυτικά είδαμε στο τέταρτο κεφάλαιο καθώς και στο σχεδιασμό του.

Οι στρατηγικές ελέγχου που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια βασίζονται στο αναλυτικό μοντέλο και περιλαμβάνουν την ελεγχσιμότητα και την παρατηρησιμότητα σταθερών διαδρομών στο κατακόρυφο επίπεδο. Στην περίπτωση που η ανάγκη εξοικονόμησης ενέργειας γίνεται επιτακτική, η ρουτίνα ελέγχου με ανατροφοδότηση καθώς και τα αισθητήρια όργανα μπορούν περιστασιακά ή προσωρινά να διακόπτουν τη λειτουργία τους για παράδειγμα σε περιόδους σχετικής ηρεμίας ή όταν δεν είναι απαραίτητος ο αυστηρός έλεγχος. Ο τρόπος αυτός εξοικονόμησης ενέργειας χρησιμοποιείται ήδη από αρκετά υδρόπτερα των οποίων τα συστήματα ελέγχου και οι βρόγχοι ανατροφοδότησης τίθενται σε λειτουργία ανά περιόδους.

Εξαιτίας των ενεργειακών περιορισμών, του περιορισμένου διαθέσιμου όγκου και διαφόρων δυσκολιών του υποβρύχιου εντοπισμού, τα υδρόπτερα δεν μπορούν να φέρουν όλα τα αισθητήρια όργανα τα απαραίτητα για τον καθορισμό της πλήρους δυναμικής κατάστασης του οχήματος. Συγκεκριμένα η θέση x και y του οχήματος καθώς και η ταχύτητά του είναι πολύ δαπανηρό να μετρηθούν άμεσα όταν είναι βυθισμένα. Παρομοίως και οι υδροδυναμικές γωνίες προσβολής α και πλαγιολίσθησης β δεν μετρώνται κατά τη διάρκεια υποβρυχίων διαδρομών του οχήματος.

Σε τέτοιες περιπτώσεις όπου κάποιες μεταβλητές κατάστασης δεν είναι δυνατόν να μετρηθούν άμεσα, όπως συμβαίνει με τα υποβρύχια υδρόπτερα, ο σχεδιασμός ενός παρατηρητή παρέχει τη δυνατότητα βελτίωσης των μεθόδων ελέγχου των υδροπτέρων που ήδη υπάρχουν. Ο σχεδιασμός ενός γραμμικού παρατηρητή παρέχει εκτιμήσεις των μεταβλητών κατάστασης του οχήματος από κάποιο περιορισμένο σύνολο μετρήσεων.

ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Όπως ήδη αναφέρθηκε η περίπτωση να μην μπορούν να μετρηθούν όλες οι μεταβλητές κατάστασης ώστε να χρησιμοποιηθούν στην ανατροφοδότηση είναι πολύ συχνή στην πράξη. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την ανακατασκευή των μη μετρούμενων μεταβλητών κατάστασης χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες εξόδους. Βέβαια, βασική προϋπόθεση για να μπορεί να γίνει η ανακατασκευή είναι οι μη μετρούμενες μεταβλητές κατάστασης να είναι παρατηρήσιμες από την έξοδο του συστήματος. Το σύστημα που ανακατασκευάζει το διάνυσμα κατάστασης x με βάση τα διαθέσιμα σήματα εισόδου u και εξόδου y ονομάζεται παρατηρητής κατάστασης. Η πιο σπουδαία χρήση των παρατηρητών είναι στην πραγματοποίηση ελεγκτών ανατροφοδότησης κατάστασης οι οποίοι σχεδιάζονται σε δύο μέρη:

- Σχεδίαση του ελεγκτή πλήρους ανατροφοδότησης κατάστασης με την υπόθεση ότι είναι μετρήσιμες (διαθέσιμες) όλες οι μεταβλητές κατάστασης
- Σχεδίαση ενός παρατηρητή για την εκτίμηση (ανακατασκευή) των μεταβλητών κατάστασης που δεν μπορούν να μετρηθούν.

Η έννοια αυτή του χωρισμού της σχεδίασης του ελεγκτή ανατροφοδότησης σε δύο ανεξάρτητα στάδια είναι γνωστή ως αρχή του διαχωρισμού, η οποία ισχύει αυστηρά σε γραμμικά συστήματα. Η αρχή αυτή προσφέρει ένα πρακτικό τρόπο

σχεδίασης ελεγκτών ανατροφοδότησης κατάστασης για συστήματα μερικώς παρατηρήσιμα ή συστήματα με σφάλματα μετρήσεων και άλλες αβεβαιότητες. Η έννοια του παρατηρητή κατάστασης περιλαμβάνει ως ειδική περίπτωση το φίλτρο Kalman. Στην πραγματικότητα το φίλτρο Kalman είναι ένας παρατηρητής κατάστασης βελτιστοποιημένος για την αντιμετώπιση του θορύβου (σφαλμάτων) μέτρησης και των διαταραχών στην είσοδο του συστήματος.

Το υδρόπτερο Seaglider προσεγγίζει και παραμένει κοντά στην καθορισμένη θέση του χρησιμοποιώντας μία ρουτίνα φίλτρου Kalman ώστε να αφομοιώσει τις διαφορές μεταξύ της πραγματικής του θέσης και αυτής που προκύπτει με τη μέθοδο της τυφλής εκτίμησης (dead reckoning) κατά τη διάρκεια ενός κύκλου κατάδυσης ανάδυσης. Σε περιοχές όπου τα ρεύματα είναι συγκρίσιμα σε ταχύτητα με την οριζόντια ταχύτητα του οχήματος, οι προβλέψεις του φίλτρου Kalman συμβάλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας. Το φίλτρο Kalman που τίθεται σε εφαρμογή στα υδρόπτερα Seaglider μοντελοποιεί τις μετατοπίσεις λόγω θαλασσιών ρευμάτων σαν άθροισμα μέσων, ημερησίων και ημήμερησίων συνιστωσών. Η ρουτίνα επιλέγει την ταχύτητα και την εκτροπή (που αποτελούν το διάνυσμα ελέγχου) για ένα κύκλο κατάδυσης – ανάδυσης με βάση το καταγεγραμμένο ρεύμα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου. Η θέση που δίνεται μέσω GPS στην αρχή κάθε κύκλου (κατάδυσης ανάδυσης) χρησιμοποιείται για την ενημέρωση της εκτιμημένης θέσης του οχήματος. Επιλέγεται το διάνυσμα ελέγχου εκείνο που συμβάλει περισσότερο στο να πλησιάσει το όχημα το στόχο που έχει τεθεί μέσα πάντα στα όρια μιας ελάχιστης και μέγιστης ταχύτητας που επιβάλλονται από τη μέγιστη τιμή της γωνίας ολίσθησης και τη μέγιστη άντωση που μπορεί να επιβληθεί. Στην περίπτωση που τα ρεύματα είναι πολύ ισχυρά για να φτάσει το υδρόπτερο το στόχο του, επιλέγεται ο δρόμος στον οποίο ελαχιστοποιείται η αύξηση της καθορισμένης διαδρομής από τους εξωτερικούς παράγοντες (ρεύμα).

Στις επόμενες παραγράφους εκτιμάται η γραμμική ελεξιμότητα και παρατηρησιμότητα του συστήματος του υποβρυχίου υδροπτέρου με χρήση γραμμικών μοντέλων κατά τη διάρκεια διαδρομών στο κατακόρυφο επίπεδο. Αυτό γίνεται αφού πρώτα γραμμικοποιηθεί το δισδιάστατο σύστημα εξισώσεων στην ισορροπία. Σε μία ελεγχόμενη διαδρομή στο κατακόρυφο επίπεδο η πορεία του οχήματος ορίζεται από μία επιθυμητή γωνία ίχνους ολίσθησης ξ_d και από και την επιθυμητή ταχύτητα V_d . Στην εξίσωση (2.61) ορίζονται αδρανειακές συντεταγμένες

(x_d, z_d) τέτοιες ώστε το x_d να συμπίπτει με την επιθυμητή πορεία ενώ το z_d μετράει την κάθετη απόσταση του οχήματος από το προκαθορισμένο μονοπάτι.

Ορίζονται δύο αντικειμενικοί στόχοι:

1. Επιδιώκεται να ελεγχθεί μόνον η κατεύθυνση και η ταχύτητα του οχήματος και σε αυτή την περίπτωση δε χρειάζεται να θεωρηθούν καθόλου τα x και z .
2. Αντικειμενικός στόχος είναι να ελεγχθεί το z_d κατά μήκος της προκαθορισμένης διαδρομής (αποκλείοντας το x_d από την ανάλυση) με σκοπό να επιτευχθεί $z_d = 0$.

Η μεταβολή της μεταβλητής z_d με το χρόνο περιγράφεται από την εξίσωση (2.62):

$$\dot{z}_d = \sin \xi_d (u \cos \theta + w \sin \theta) + \cos \xi_d (-u \sin \theta + w \cos \theta)$$

Υπενθυμίζεται ότι η σχέση (2.61) ορίζει τις επιθυμητές συντεταγμένες (x_d, z_d) μέσω της επιθυμητής γωνίας ίχνους ολίσθησης ξ_d :

$$\begin{pmatrix} x_d \\ z_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \xi_d & -\sin \xi_d \\ \sin \xi_d & \cos \xi_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix}$$

Στο αναλυτικό μοντέλο η κινούμενη μάζα μπορεί να ελεγχθεί σε όλες τις κατευθύνσεις που σημαίνει για τη δισδιάστατη περίπτωση δύο βαθμούς ελευθερίας. Σε κάποιες περιπτώσεις ο έλεγχος του κέντρου βάρους και της θέσης της κινούμενης μάζας μπορεί να περιορίζεται. Λόγου χάρι το τυπικό παράδειγμα της μπαταρίας που μετακινείται στο εσωτερικό του οχήματος μπορεί να κινείται μόνο κατά μία διεύθυνση. Στο αναλυτικό δισδιάστατο μοντέλο η προηγούμενη περίπτωση μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν μία κινούμενη σημειακή μάζα με ένα μόνο βαθμό ελευθερίας. Θεωρείται η περίπτωση στην οποία η θέση r_{mz} είναι σταθερή ενώ η r_{mx} ελεγχόμενη μεταβλητή. Οι περιορισμοί στην r_{mx} εξαρτώνται από το σχεδιασμό του οχήματος και τους ενεργοποιητές.

Γραμμικοποίηση

Για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος του συστήματος θα πρέπει να είναι γραμμικοποιημένο. Το σημείο γύρω από το οποίο θα γίνει η γραμμικοποίηση θα είναι ένα από τα σημεία ισορροπίας.

Το διάνυσμα κατάστασης για το δισδιάστατο μοντέλο είναι $x = (z_d, \theta, q, u, w, r_{mx}, r_{mz}, p_{mx}, p_{mz}, m_b)^T$ ενώ το διάνυσμα ελέγχου (ή εισόδου) είναι το $u = (h_{mx}, h_{mz}, b_{ballast_rate})^T = (\dot{p}_{mx}, \dot{p}_{mz}, \dot{m}_b)^T$. Οι μεταβλητές h_{mx}, h_{mz} είναι οι δυνάμεις ελέγχου πάνω στην κινούμενη μάζα ενώ η $b_{ballast_rate}$ είναι εκφράζει τη δύναμη ελέγχου πάνω στην μεταβλητή μάζα μέσω του ρυθμού άντλησης. Ορίζονται:

$$\delta x = x - x_d$$

$$\delta u = u - u_d, \text{ όπου } u_d = 0$$

Οπότε το γραμμικοποιημένο σύστημα γίνεται:

$$\delta \dot{x} = A \delta x - B \delta u \quad (5.1)$$

Όπου

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -V_d & 0 & -\sin a_d & \cos a_d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & -\frac{m_m g \cos \theta_d}{J_2} & -\frac{m_m g \sin \theta_d}{J_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{410} \\ 0 & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{510} \\ 0 & 0 & -r_{mz} & -1 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{mx} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{m_m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Και

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{r_{mz_d}}{J_2} & \frac{r_{mx_d}}{J_2} & 0 \\ \frac{1}{m_{b_d} + m_h + m_{a1}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_{b_d} + m_h + m_{a3}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Όπου

$$a_{32} = \frac{m_m g}{J_2} (r_{mx_d} \sin \theta_d - r_{mz_d} \cos \theta_d) = \frac{m_m g}{J_2} (-\gamma_d)$$

$$a_{33} = -m_m (r_{mx_d} u_d + r_{mz_d} w_d)$$

$$a_{34} = \frac{1}{J_2} \left((m_{a3} - m_{a1}) w_d + \frac{\partial M}{\partial u} \Big|_{eq} \right)$$

$$a_{35} = \frac{1}{J_2} \left((m_{a3} - m_{a1}) u_d + \frac{\partial M}{\partial w} \Big|_{eq} \right)$$

$$a_{42} = -\frac{m_{0_d}}{m_{1_d}} g \cos \theta_d$$

$$a_{43} = -\frac{m_{3_d} + m_m}{m_{1_d}} w_d$$

$$a_{44} = \frac{1}{m_{1_d}} \left(\frac{\partial L}{\partial u} \sin a_d + L \cos a_d \frac{\partial a}{\partial u} - \frac{\partial D}{\partial u} \cos a_d + D \sin a_d \frac{\partial a}{\partial u} \right) \Big|_{eq}$$

$$a_{45} = \frac{1}{m_{1_d}} \left(\frac{\partial L}{\partial w} \sin a_d + L \cos a_d \frac{\partial a}{\partial w} - \frac{\partial D}{\partial w} \cos a_d + D \sin a_d \frac{\partial a}{\partial w} \right) \Big|_{eq}$$

$$a_{410} = -\frac{g \sin \theta_d}{m_{1_d}} + \frac{m_{0_d} g \sin \theta_d}{(m_{1_d})^2} - \frac{1}{(m_{1_d})^2} (L \sin a_d - D \cos a_d) \Big|_{eq}$$

$$a_{52} = -\frac{m_{0_d}}{m_{3_d}} g \sin \theta_d$$

$$a_{53} = \frac{m_{1_d} + m_m}{m_{3_d}} u_d$$

$$a_{54} = \frac{1}{m_{3_d}} \left(-\frac{\partial L}{\partial u} \cos a_d + L \sin a_d \frac{\partial a}{\partial u} - \frac{\partial D}{\partial u} \sin a_d - D \cos a_d \frac{\partial a}{\partial u} \right) \Big|_{eq}$$

$$a_{55} = \frac{1}{m_{3_d}} \left(-\frac{\partial L}{\partial w} \cos a_d + L \sin a_d \frac{\partial a}{\partial w} - \frac{\partial D}{\partial w} \sin a_d - D \cos a_d \frac{\partial a}{\partial w} \right) \Big|_{eq}$$

$$a_{510} = \frac{g \cos \theta_d}{m_{3_d}} - \frac{m_{0_d} g \cos \theta_d}{(m_{3_d})^2} - \frac{1}{(m_{3_d})^2} (-L \cos a_d - D \sin a_d) \Big|_{eq}$$

Ο συμβολισμός $(\cdot) \Big|_{eq}$ δηλώνει ότι η ποσότητα πρέπει να υπολογιστεί στην ζητούμενη ισορροπία.

Επιπλέον:

$$\frac{\partial a}{\partial u} = -\frac{w_d}{V_d^2}$$

$$\frac{\partial a}{\partial w} = \frac{u_d}{V_d^2}$$

$$\frac{\partial D}{\partial u} = 2u_d (K_{D_0} + K_D a_d^2) - 2K_D a_d w_d$$

$$\frac{\partial D}{\partial w} = 2w_d (K_{D_0} + K_D a_d^2) + 2K_D a_d u_d$$

$$\frac{\partial L}{\partial u} = 2u_d (K_{L_0} + K_L a_d) - K_L w_d$$

$$\frac{\partial L}{\partial w} = 2w_d (K_{L_0} + K_L a_d) + K_L u_d$$

$$\frac{\partial M}{\partial u} = 2u_d (K_{M_0} + K_M a_d) - K_M w_d$$

$$\frac{\partial M}{\partial w} = 2w_d (K_{M_0} + K_M a_d) + K_M u_d$$

Η γραμμικοποίηση χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η ευστάθεια μιας επιθυμητής διαδρομής ενός δεδομένου οχήματος αλλά και η ελεγχσιμότητά της όταν δίνεται η επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού του οχήματος. Επιπλέον η γραμμικοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας του σχεδιασμού. Λόγου χάρη, ας θεωρηθεί η περίπτωση ενός οχήματος που έχει σχεδιαστεί πλήρως αλλά παραμένει να γίνει η επιλογή της θέσης της κινούμενης μάζας για κάποια δεδομένη διαδρομή. Εφαρμόζοντας το κριτήριο Routh (Παράρτημα C) στο χαρακτηριστικό πολυώνυμο του μητρώου A προκύπτουν οι συνθήκες ευστάθειας για τη διαδρομή. Οι συνθήκες αυτές μπορούν να γραφούν σαν συνάρτηση της ελεύθερης μεταβλητής r_{mz} . Η επιλογή της r_{mz} μπορεί να γίνει ώστε να υπάρξει η επιθυμητή ευστάθεια ενώ η r_{mx} να υπολογιστεί τότε σύμφωνα με τη σχέση (2.94).

Ελεγχσιμότητα

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται η ελεγχσιμότητα των σταθερών επίπεδων διαδρομών όπως αυτές περιγράφονται στο δεύτερο κεφάλαιο και αναλυτικότερα στο τέταρτο.

Το δισδιάστατο αναλυτικό μοντέλο του υδροπτέρου όπως παρουσιάζεται στο δεύτερο κεφάλαιο είναι τοπικά (γραμμικά) ελέγξιμο για τις τέσσερις διαδρομές του πίνακα 4.3 του τέταρτου κεφαλαίου. Δηλαδή οι πίνακες A και B που δίνονται από τις σχέσεις (5.2) και (5.3) όταν υπολογιστούν για κάθε μία από αυτές τις διαδρομές σε κατάσταση ισορροπίας ικανοποιούν το κριτήριο ελεγχσιμότητας τάξης (controllability rank condition) (Παράρτημα D). Η γραμμικοποίηση περιλαμβάνει και την μεταβλητή κατάστασης z_d αρά ο έλεγχος αφορά και αυτή τη μεταβλητή. Επομένως μπορεί να σχεδιαστεί γραμμικός ελεγκτής ο οποίος θα μπορεί τοπικά να επιτύχει και το στόχο 1 αλλά και το στόχο 2.

Η περίπτωση που εξετάζουμε είναι αυτή όπου η κινούμενη μάζα μπορεί να κινηθεί κατά μία μόνο κατεύθυνση (η r_{mz} είναι σταθερή) συνεπώς πρέπει να

εξεταστεί το κριτήριο ελεγχιμότητας θεωρώντας το αναλυτικό μοντέλο που εκφράζεται από τις εξισώσεις (2.64) – (2.72) του δεύτερου κεφαλαίου. Οι γραμμικοποιημένες εξισώσεις κίνησης για την περίπτωση της m_m με ένα βαθμό ελευθερίας κίνησης θα εκπροσωπούνται από τους πίνακες \mathbf{A} και \mathbf{B} οι οποίοι θα διαμορφωθούν ως εξής: Ο πίνακας \mathbf{B} θα παραμείνει ως έχει ενώ ο \mathbf{A} θα διαφοροποιηθεί μόνον στα παρακάτω, σε σχέση με αυτούς των σχέσεων (5.2) και (5.3):

$$a_{32} = \frac{m_m g}{J_2} (r_{m_x d} \sin \theta_d - r_{m_z d} \cos \theta_d)$$

$$a_{33} = 0$$

$$a_{34} = \frac{1}{J_2} \left((m_{a3} - m_{a1}) w_d + \left. \frac{\partial M}{\partial u} \right|_{eq} \right)$$

$$a_{35} = \frac{1}{J_2} \left((m_{a3} - m_{a1}) u_d + \left. \frac{\partial M}{\partial w} \right|_{eq} \right)$$

$$a_{42} = -\frac{m_{0_d}}{m_{1_d}} g \cos \theta_d$$

$$a_{43} = -\frac{m_{3_d} + m_m}{m_{1_d}} w_d$$

$$a_{44} = \frac{1}{m_{1_d}} \left(\frac{\partial L}{\partial u} \sin a_d + L \cos a_d \frac{\partial a}{\partial u} - \frac{\partial D}{\partial u} \cos a_d + D \sin a_d \frac{\partial a}{\partial u} \right) \Big|_{eq}$$

$$a_{45} = \frac{1}{m_{1_d}} \left(\frac{\partial L}{\partial w} \sin a_d + L \cos a_d \frac{\partial a}{\partial w} - \frac{\partial D}{\partial w} \cos a_d + D \sin a_d \frac{\partial a}{\partial w} \right) \Big|_{eq}$$

$$a_{410} = -\frac{g \sin \theta_d}{m_{1_d}}$$

$$a_{52} = -\frac{m_{0_d}}{m_{3_d}} g \sin \theta_d$$

$$a_{53} = \frac{m_{1_d} + m_m}{m_{3_d}} u_d$$

$$a_{54} = \frac{1}{m_{3_d}} \left(-\frac{\partial L}{\partial u} \cos a_d + L \sin a_d \frac{\partial a}{\partial u} - \frac{\partial D}{\partial u} \sin a_d - D \cos a_d \frac{\partial a}{\partial u} \right) \Big|_{eq}$$

$$a_{55} = \frac{1}{m_{3_d}} \left(-\frac{\partial L}{\partial w} \cos a_d + L \sin a_d \frac{\partial a}{\partial w} - \frac{\partial D}{\partial w} \sin a_d - D \cos a_d \frac{\partial a}{\partial w} \right) \Big|_{eq}$$

$$a_{510} = \frac{g \cos \theta_d}{m_{3_d}}$$

Όταν υπολογιστούν και οι νέοι πίνακες για τις τέσσερις σταθερές διαδρομές, ικανοποιούν το κριτήριο ελεγχιμότητας. Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα είναι ότι τουλάχιστον για τον γραμμικό έλεγχο δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες μεταβολές με τον περιορισμό των βαθμών ελευθερίας της κινούμενης μάζας από δύο σε έναν. Αρκετά από τα λειτουργικά υδρόπτερα χρησιμοποιούν μάζες που μετακινούνται μόνο κατά τον μεγάλο άξονα του οχήματος ενώ περιστρέφονται κατά το roll, αντιστοιχώντας σε σύστημα με ένα βαθμό ελευθερίας όταν εξετάζεται μόνο κατά το κατακόρυφο επίπεδο.

Απ' την άλλη μεριά στην περίπτωση μεγάλων κινήσεων όπως είναι η μετάβαση από ανάδυση σε κατάδυση, θα πρέπει να δοθεί προσοχή κατά τον περιορισμό των βαθμών ελευθερίας των κινούμενων μαζών. Για παράδειγμα, ενώ η περίπτωση περιορισμού της κίνησης της εσωτερικής μάζας στην r_{mx} κατεύθυνση είναι επαρκής για την προιονωτή κίνηση, ο αντίστοιχος περιορισμός στην r_{mz} κατεύθυνση πιθανώς δεν θα καθιστά δυνατές και τις δύο κινήσεις (αναδύσεις, καταδύσεις). Στο κλασικό σχήμα των υδροπτέρων όπου ο μεγάλος άξονας είναι ο x_b σωματοπαγής άξονας, ο περιορισμός της κίνησης της εσωτερικής μάζας στην r_{mz} κατεύθυνση επιτρέπει μικρότερο εύρος μετακίνησης συγκρινόμενος με αυτόν στην r_{mx} κατεύθυνση.

Η κινούμενη μάζα m_m του υδροπτέρου που σχεδιάστηκε αποτελεί περίπου το 1/6 του εκτοπίσματος του οχήματος m . Μία παρόμοια αναλογία ισχύει για την ολική και την κινούμενη μάζα και στα υδρόπτερα Slocum, Spray και Seaglider. Αποκλίσεις στην τιμή αυτή της μάζας και στη θέση της κατ' αρχήν δεν θα επηρεάσουν την τοπική ελεγχιμότητα μιας σταθερής διαδρομής.

Στην πράξη όμως γίνονται ανταλλαγές μεταξύ των δύο καταστάσεων δηλαδή της μετακίνησης μίας μεγάλης μάζας κατά ένα μικρό διάστημα και της μετακίνησης μιας μικρής μάζας κατά μεγάλη απόσταση. Για την επιλογή θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η ισχύς και η ενέργεια που απαιτούνται ώστε να μετακινηθεί η μάζα καθώς και η απαιτούμενη ακρίβεια του ενεργοποιητή. Μία μεγάλη κινούμενη μάζα απαιτεί μικρότερη μετακίνηση για να επιτευχθεί το ίδιο τελικό αποτέλεσμα. Μεταβολές στη μάζα και στη θέση της επίσης επηρεάζουν την εμβέλεια των εφικτών διαδρομών και την επίδοση κατά τη μετάβαση μεταξύ αυτών των διαδρομών.

Επιπλέον η μεταβλητή μάζα m_b είναι αυτή που ελέγχει την ταχύτητα του υποβρυχίου. Έτσι σχεδιάζοντας μικρότερη μεταβλητή μάζα μειώνεται η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει το όχημα.

Παρατηρησιμότητα

Σε αυτή την ενότητα θα διερευνηθεί επιπλέον η παρατηρησιμότητα του γραμμικοποιημένου μοντέλου ως προς τις τέσσερις διαδρομές του πίνακα 4.3 του τέταρτου κεφαλαίου. Αν στόχος είναι να ελεγχθεί μόνον η κατεύθυνση και η ταχύτητα κατά τη διαδρομή του οχήματος (στόχος 1) τότε δε χρειαζόμαστε μέτρηση του z_d . Το εννέα διαστάσεων δυναμικό μοντέλο (το οποίο δεν συμπεριλαμβάνει το z_d) είναι πλήρως παρατηρήσιμο με περιορισμένες μετρήσεις της θέσης της κινούμενης μάζας r_{mx} , r_{mz} και της μεταβλητή μάζα m_b . Σε αυτή την περίπτωση η γωνία πρόνευσης θ , ο ρυθμός μεταβολής της q , οι συνιστώσες της γραμμικής ταχύτητας u , w και η ορμή της κινούμενης μάζας p_{mx} και p_{mz} δε χρειάζεται να ανιχνευθούν. Η παρατηρησιμότητα συνίσταται στο ότι με τις μετρήσεις των r_{mx} , r_{mz} και m_b μπορεί να σχεδιαστεί ένας δυναμικός παρατηρητής ο οποίος θα δίνει εκτιμήσεις των μεγεθών που δεν μετρώνται άμεσα δηλαδή των θ , q , u , w , p_{mx} και p_{mz} . Φυσικά η γωνία θ στην πραγματικότητα ανιχνεύεται ενώ η q δεν είναι δύσκολο να μετρηθεί και αυτή, άρα το ουσιαστικό πλεονέκτημα που προσφέρει ο σχεδιασμός του παρατηρητή είναι στην εκτίμηση των u , w , p_{mx} και p_{mz} που είναι δύσκολο να μετρηθούν. Το δυναμικό μοντέλο είναι επίσης πλήρως παρατηρήσιμο με μετρήσεις που περιορίζονται στις θ , r_{mx} (ή r_{mz}) και m_b . Αντίστοιχα αυτό σημαίνει

ότι χρησιμοποιώντας αυτά τα τρία μετρήσιμα μεγέθη, μπορεί να σχεδιαστεί παρατηρητής για την εκτίμηση των υπολοίπων μεταβλητών κατάστασης.

Η χρήση ενός δυναμικού παρατηρητή για την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου προσφέρει τη δυνατότητα να βελτιωθεί η ακρίβεια του καθορισμού της οριζόντιας κίνησης σε σχέση με τις ήδη εφαρμοζόμενες μεθόδους, οι οποίες βασίζονται σε υποθέσεις, όπως για παράδειγμα στην υπόθεση της σταθερής γωνίας προσβολής κατά τη διάρκεια των διαδρομών. Συγκεκριμένα στο υδρόπτερο Slocum η οριζόντια ταχύτητα του οχήματος κατά τη διάρκεια της διαδρομής του εκτιμάται από το στίγμα του μέσω GPS όταν φτάσει στην επιφάνεια, τη μετρούμενη γωνία πρόνευσης θ , μία υποτεθείσα γωνία προσβολής και την κατακόρυφη ταχύτητα η οποία υπολογίζεται από μετρήσεις του βάθους. Στην περίπτωση του Spray η οριζόντια απόσταση που κάλυψε υπολογίζεται με παρόμοιο τρόπο που βασίζεται στην υπόθεση σταθερής πρόνευσης, εκτροπής και γωνίας προσβολής.

Αν ο στόχος είναι να ελέγξουμε το z_d κατά μήκος της προκαθορισμένης διαδρομής (στόχος 2), τότε χρειαζόμαστε μέτρηση του z_d . Σύμφωνα με τη σχέση 2.61) αυτό θα εξαρτάται και από το βάθος z , το οποίο μετράται εύκολα, και από την οριζόντια θέση x που δεν μετράται τόσο εύκολα. Οι μετρήσεις των r_{mx} , r_{mz} και m_b μαζί με τη μέτρηση του z (ή εναλλακτικά θ , r_{mx} , m_b και z) δεν καθιστούν το x παρατηρήσιμο. Αυτό σημαίνει ότι χωρίς μία αρχική συνθήκη μέτρησης $x(0)$ η τροχιά $x(t)$ δεν μπορεί να υπολογιστεί και έτσι το z_d δεν είναι παρατηρήσιμο. Είναι δηλαδή γεγονός ότι χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε συνδυασμό των υπολοίπων εννέα μεταβλητών κατάστασης δεν είναι δυνατό να σχεδιαστεί δυναμικός παρατηρητής για την εκτίμηση της z_d μεταβλητής κατάστασης. Εντούτοις μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία αρχική μέτρηση του x , που θα δίνεται από GPS όταν το glider βγαίνει στην επιφάνεια. Με τη βοήθεια του $x(0)$, η οριζόντια κίνηση του οχήματος μπορεί να προσδιοριστεί με τη μέθοδο της τυφλής εκτίμησης (dead reckoning) χρησιμοποιώντας την ταχύτητα που εκτιμάται κάθε φορά από τον παρατηρητή. Αυτή η μέθοδος εισάγει ένα λάθος $z_d - z_{d_dead_reckoned}$ στην εκτίμηση της μεταβλητής κατάστασης z_d . Χρησιμοποιώντας το συναγόμενο $z_{d_dead_reckoned}$ στον έλεγχο ανάδρασης το υδρόπτερο μπορεί να πραγματοποιεί το στόχο να ολισθαίνει πάνω στην επιθυμητή

διαδρομή ή σε μία παράλληλή της με κάποια απόκλιση στη z_d κατεύθυνση λόγω του λάθους που εισάγεται με τη μέθοδο της τυφλής εκτίμησης (dead reckoning).

Σύμφωνα με τη μέθοδο της τυφλής εκτίμησης (dead reckoning), γίνεται ο υπολογισμός της οριζόντιας ταχύτητας $\dot{x}_{dead_reckoned}$ και στη συνέχεια ολοκλήρωση ώστε να εκτιμηθεί το $x_{dead_reckoned}$. Ισχύει:

$$\dot{x}_{dead_reckoned} = u_{est} \cos \theta + w_{est} \sin \theta \quad (5.4)$$

Έτσι μπορεί να υπολογιστεί το $z_{d_dead_reckoned}$. Η γωνία pitch θ και το βάθος z μπορούν να μετρηθούν άμεσα. Οι εκτιμήσεις των ταχυτήτων u_{est} , w_{est} παρέχονται από τον παρατηρητή, ενώ η ξ_d καθορίζεται από την επιθυμητή διαδρομή. Έτσι η εξίσωση που μας δίνει το $z_{d_dead_reckoned}$ υπολογισμένο με τη μέθοδο της τυφλής εκτίμησης (dead reckoning) είναι (βλέπε σχέση (2.61)):

$$z_{d_dead_reckoned} = \sin \xi_d (x_{dead_reckoned}) + \cos \xi_d (z) \quad (5.5)$$

Στις εννιά παρατηρήσιμες μεταβλητές κατάστασης περιλαμβάνονται και οι u και w . Έτσι οι εκτιμημένες τιμές των u_{est} , w_{est} από τον παρατηρητή θα συγκλίνουν με τις πραγματικές τιμές των μεταβλητών κατάστασης όταν προσεγγίζεται η διαδρομή σε κατάσταση ισορροπίας έτσι ώστε η γραμμικοποίηση είναι έγκυρη. Όταν υπάρχει κάποιο λάθος στην εκτίμηση του παρατηρητή για τις ταχύτητες, ολοκληρώνοντας την (5.4) ώστε να προσδιοριστεί το $x_{d_dead_reckoned}$ και χρησιμοποιώντας την (5.5) θα προκύψει το σφάλμα $z_d - z_{d_dead_reckoned} \neq 0$. Αυτό το σφάλμα εξαρτάται από τον παρατηρητή και τις τιμές των μεταβλητών κατάστασης για τις οποίες έχει σχεδιαστεί, οι οποίες θα ποικίλουν για διαφορετικές τροχιές και ποικίλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Ένας παρατηρητής κατάστασης και ένας ελεγκτής έχουν σχεδιαστεί με τη στρατηγική που παρουσιάστηκε στο [57].

6. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται σημαντικά συμπεράσματα που εξάγονται από τη μελέτη και εφαρμογή του αναλυτικού μοντέλου στο σχεδιασμό ενός υποβρυχίου υδροπτέρου. Προκύπτει έτσι μία βασική δομή στη διαδικασία του σχεδιασμού και κάποιες θεμελιώδεις αρχές για την επιλογή των χαρακτηριστικών του οχήματος.

Τη σημαντικότερη πρόκληση στο σχεδιασμό και στη λειτουργία των υποβρυχίων υδροπτέρων αποτελεί η εξοικονόμηση ενέργειας και η διαχείρισή της. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε βήμα του σχεδιασμού του οχήματος και της λειτουργίας του. Επειδή οι αποστολές που πραγματοποιούνται απαιτούν μεγάλα διαστήματα λειτουργίας και μεγάλη εμβέλεια, τα περιορισμένα αποθέματα ενέργειας θα πρέπει να διαχειρίζονται προσεκτικά. Στην περίπτωση των ηλεκτρικά τροφοδοτούμενων οχημάτων, οι μπαταρίες πρέπει να παρέχουν όλη την ενέργεια και για την άντληση της μεταβλητής μάζας, την λειτουργία των ηλεκτρονικών οργάνων συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων, των υπολογιστών και των οργάνων επικοινωνίας. Η άντληση αποτελεί το 60% έως 85% του προϋπολογισμού ενέργειας στα υπάρχοντα υδρόπτερα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε αποστολής.

Η μελέτη των οχημάτων που ήδη υπάρχουν και των αποστολών τους προσφέρουν κάποια στοιχεία για τον καθορισμό παραμέτρων στον σχεδιασμό ενός τέτοιου οχήματος, συμπεριλαμβανομένων του μεγέθους, της εμβέλειας, της ταχύτητας, του βάθους και του ωφέλιμου φορτίου.

Αρχικά θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό ενός τέτοιου ωκεανογραφικού οχήματος κάποια πολύ βασικά χαρακτηριστικά τους:

1. Τα υδρόπτερα κινούνται με βάση το πριονωτό πρότυπο. Αναδύονται και καταδύονται με αρνητικές και θετικές γωνίες ίχνους ολίσθησης και

προσβολής. Εξαιτίας αυτής τους της κίνησης σχεδιάζονται να είναι συμμετρικά ως προς τον κύριο άξονά τους.

2. Τα κλασσικά υδρόπτερα λειτουργούν υπό απότομες γωνίες ίχνους ολίσθησης (γύρω στις 35°), οι οποίες είναι μεγαλύτερες από αυτές που λειτουργούν τα ανεμόπτερα (κάτω των 5°). Το γεγονός αυτό οδηγεί στην εκτίμηση του μεγέθους του σώματος και των πτερυγίων ώστε να προκύψει πολύ χαμηλός λόγος άνωσης/αντίστασης (σε αντίθεση με τα ανεμόπτερα και τα αεροπλάνα). Αν κάποιος ήθελε να σχεδιάσει υδρόπτερα που να ταξιδεύουν με λιγότερο απότομες γωνίες θα έπρεπε να απαιτήσει αντίστοιχα υψηλούς λόγους άνωσης/αντίστασης.
3. Τα υδρόπτερα ελέγχουν την πλευστότητα και την κλίση τους με εσωτερικά συστήματα μεταβολής της πλευστότητας και κινούμενες μάζες. Αυτό τους παρέχει την απαραίτητη προωθητική δύναμη και επιπλέον τη σταθερότητά τους ως προς την πρόνευση (pitch) και τον διατοιχισμό (roll). Αυτό είναι αποτέλεσμα του διαχωρισμού των κέντρων βαρύτητας και άνωσης του οχήματος. Τα υδρόπτερα θα μπορούσαν επιπλέον να κάνουν χρήση εξωτερικών κινούμενων επιφανειών.
4. Τα υδρόπτερα διαθέτουν περιορισμένη ενέργεια. Η εμβέλειά τους και η ταχύτητα περιορίζονται από τα αποθέματα ενέργειας που έχουν. Αυτό οδηγεί κατά τον σχεδιασμό σε ανταλλαγές μεταξύ των επιδόσεων στην εμβέλεια, στη διάρκεια και στην ταχύτητα. Τα ωκεανογραφικά οχήματα που υπάρχουν είναι σχεδιασμένα για μεγάλης εμβέλειας, μεγάλης διάρκειας και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας αποστολές.
5. Τα υπάρχοντα υδρόπτερα έχουν περιορισμό στην ταχύτητα. Είναι όμως δυνατό να σχεδιαστεί κάποιο όχημα το οποίο να είναι σημαντικά γρηγορότερο, αυξάνοντας το συνολικό μέγεθος ή αυξάνοντας το μέγεθος της μεταβλητής μάζας σε σχέση με το μέγεθος του υδροπτέρου. Ο σχεδιασμός ενός γρηγορότερου οχήματος προϋποθέτει μεγαλύτερο μέγεθος και κατανάλωση ενέργειας, αυτό όμως μπορεί να είναι επιθυμητό για κάποιες εφαρμογές.
6. Τα υδρόπτερα επηρεάζονται σημαντικά από τα ωκεάνια ρεύματα. Τα ρεύματα μπορεί να έχουν ταχύτητες της ίδιας τάξης ή και μεγαλύτερες από τις ταχύτητες του οχήματος. Οι ταχύτητες λειτουργίας είναι έτσι σχεδιασμένες ώστε υπερνικούν τα αναμενόμενα ρεύματα.

7. Σημαντικό τέλος για την εξοικονόμηση ενέργειας είναι το βάθος της κατάδυσης (οι αντλίες που θα καθορίσουν την απαιτούμενη άντωση καταναλώνουν μεγαλύτερη ενέργεια στην άντληση όταν ζητείται μεγαλύτερο βάθος). Το μέγιστο βάθος που μπορεί να φτάσει το όχημα περιορίζεται από την αντοχή της κατασκευής αλλά και από την ωκεάνια βαθυμετρία. Τα συστήματα άντλησης στα υδρόπτερα Spray και Seaglider για παράδειγμα είναι περισσότερο αποδοτικά σε μεγαλύτερα βάθη.

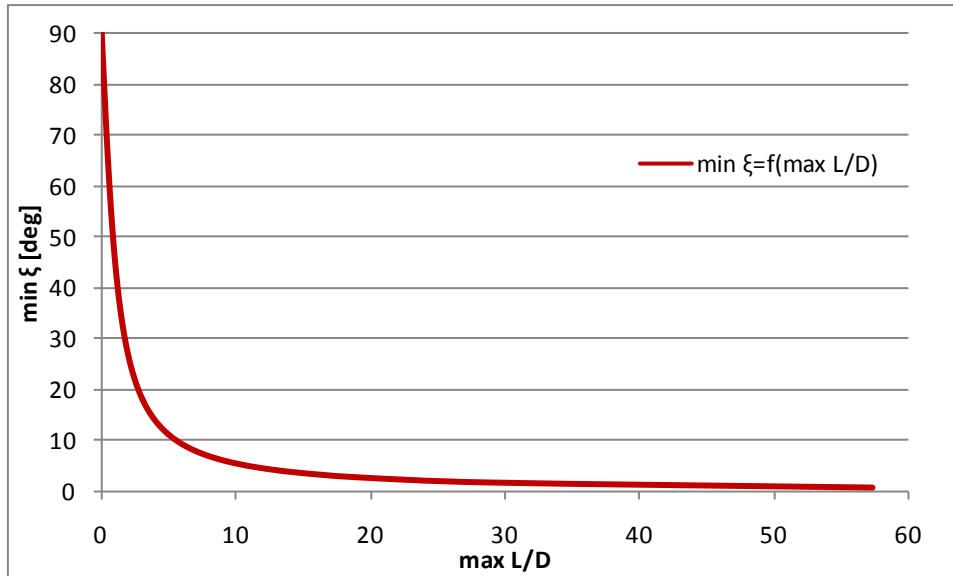
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΔΡΟΠΤΕΡΟΥ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ

Στο κεφάλαιο 4 είδαμε τον υπολογισμό των σταθερών διαδρομών σε κατάσταση ισορροπίας για ένα υποβρύχιο υδρόπτερο δεδομένων των υδροδυναμικών του παραμέτρων και των μαζών. Ο σχεδιασμός του οχήματος καθορίζει τη γεωμετρία του και αυτές τις παραμέτρους. Εφόσον η επιλογή αυτών των παραμέτρων στις εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να επιλεγούν κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού, τα υδρόπτερα μπορούν να σχεδιάζονται διαφορετικά με σκοπό την βέλτιστη επίδοση για διαφορετικές συνθήκες σταθερών διαδρομών. Για παράδειγμα η ταχύτητα λειτουργίας θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του σχεδιασμού δεδομένων των ρευμάτων που αναμένονται στην περιοχή λειτουργίας.

Στο σχήμα 6.1 φαίνεται 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 ισχύει

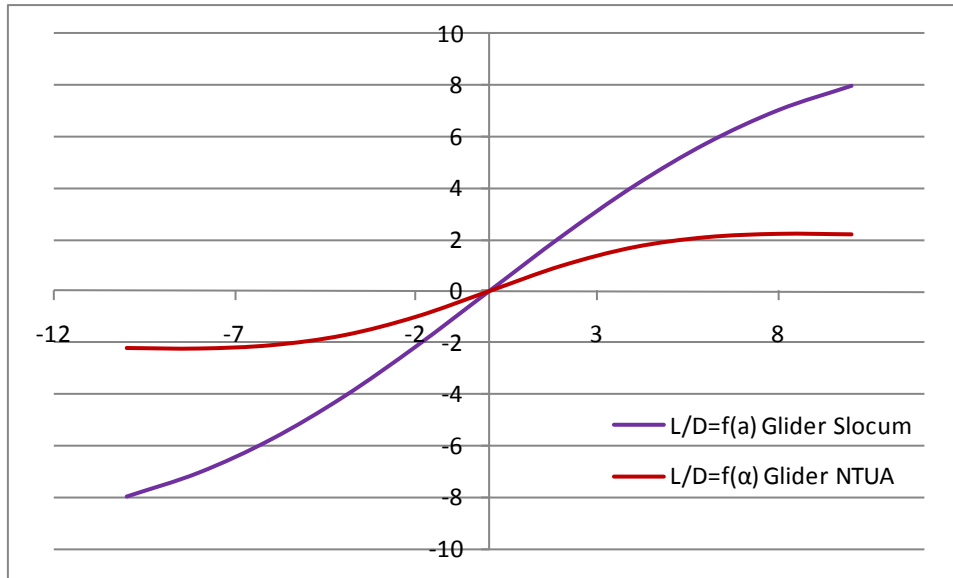
$$\xi_{eq} = -\arctan\left(\frac{D_{eq}}{L_{eq}}\right).$$
 Αυτό σημαίνει ότι κάθε γωνία ίχνους ολίσθησης αντιστοιχεί σε

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 .



Σχήμα 6.1: Ελάχιστη γωνία ίχνους ολίσθησης σε σχέση με το μέγιστο λόγο άνωσης προς την αντίσταση.

Στο σημείο αυτό μπορούμε να φέρουμε το παράδειγμα του υδροπτέρου Slocum electric, το οποίο έχει σχεδιαστεί για μικρές γωνίες ίχνους ολίσθησης $\xi_{eq} \in [6.3^\circ, 90^\circ]$ ή $\xi_{eq} \in [-90^\circ, -6.3^\circ]$ σαν συνέπεια του μικρού βάθους λειτουργίας του σε αντιπαράθεση με αυτό που σχεδιάστηκε στο Ε.Μ.Π. για γωνίες $\xi_{eq} \in [24^\circ, 90^\circ]$ ή $\xi_{eq} \in [-90^\circ, -24^\circ]$. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα συγκριτικά προφίλ του λόγου L/D για τα δύο οχήματα. Στην περίπτωση του Slocum electric όπου στόχος είναι ρηχές γωνίες ολίσθησης σχεδιάστηκε όχημα με υψηλό λόγο L/D ενώ αντίθετα στην περίπτωση του Ε.Μ.Π. οχήματος που στοχεύουμε σε πιο απότομες διαδρομές (και μεγαλύτερα βάθη) ο λόγος L/D είναι μικρότερος για τις διάφορες γωνίες προσβολής.



Σχήμα 6.2: Σύγκριση των λόγων άνωσης προς την αντίσταση για τα υδρόπτερα Slocum και αυτό που σχεδιάστηκε στο Ε.Μ.Π.

Ενδιαφέρουσες επίσης ιδιότητες προκύπτουν από την εφαρμογή του αναλυτικού μοντέλου στις καταστάσεις ισορροπίας. Αυτές οι ιδιότητες έχουν σημαντικές συνέπειες στο σχεδιασμό του οχήματος. Αρχικά, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η γωνία ίχνους ολίσθησης και η ταχύτητα της κίνησης μπορούν να επιλεγούν ανεξάρτητα. Το γεγονός αυτό είναι συνέπεια του ελέγχου της πρόνευσης και της πλευστότητας του υδροπτέρου. Το σύνολο των πιθανών γωνιών ίχνους ολίσθησης είναι συνάρτηση του λόγου L/D και της εμβέλειας των ενεργοποιητών ελέγχου της πρόνευσης. Η ελάχιστη (ρηχότερη) γωνία ίχνους ολίσθησης επιβάλλεται από το μέγιστο λόγο L/D όπως ειπώθηκε και προωτύτερα. Η πιο απότομη γωνία κίνησης που είναι πιθανό να πραγματοποιηθεί είναι κατακόρυφα προς τα κάτω (ή προς τα πάνω), δεδομένου όμως ότι οι ενεργοποιητές του οχήματος μπορούν να επιτύχουν αυτή τη γωνία πρόνευσης. Η μέγιστη ταχύτητα κίνησης καθορίζεται από την εξισορρόπηση της αντίστασης καθώς και τη μέγιστη καθαρή άντωση.

Επιπλέον, σύμφωνα με το αναλυτικό μοντέλο για τις καταστάσεις ισορροπίας, μία δεδομένη σταθερή διαδρομή αντιστοιχεί σε ένα εύρος πιθανών θέσεων της εσωτερικής κινούμενης μάζας. Η θέση της μάζας που αντιστοιχεί στην ισορροπία εξισορροπεί τις υδροδυναμικές ροπές πάνω στο όχημα. Ένα εύρος θέσεων κατά μήκος μιας κατακόρυφης γραμμής είναι δυνατές, μέσα στα όρια που επιβάλλει το κατά πόσο και πώς μπορεί να κινηθεί η εσωτερική μάζα. Η κατακόρυφη θέση της κινούμενης μάζας επηρεάζει το διαχωρισμό μεταξύ CB και CG του οχήματος, το

οποίο με τη σειρά του επηρεάζει τη σταθερότητα του οχήματος. Στα υπαρκτά υδρόπτερα η κινούμενη μάζα περιορίζει την κίνησή της μόνο κατά τον μεγάλο άξονα του οχήματος, με αποτέλεσμα μία μοναδική θέση της κινούμενης μάζας θα καταλήξει σε μία γωνία πρόνευσης. Σε εναλλακτικά υδρόπτερα θα μπορούσαν να προστεθούν βαθμοί ελευθερίας στον ενεργοποιητή της κινούμενης μάζας. Ένας δεύτερος βαθμός ελευθερίας (ή και παραπάνω) στη κίνηση της εσωτερικής μάζας συμβάλει στην καλύτερη και πιο γρήγορη σταθεροποίηση του οχήματος.

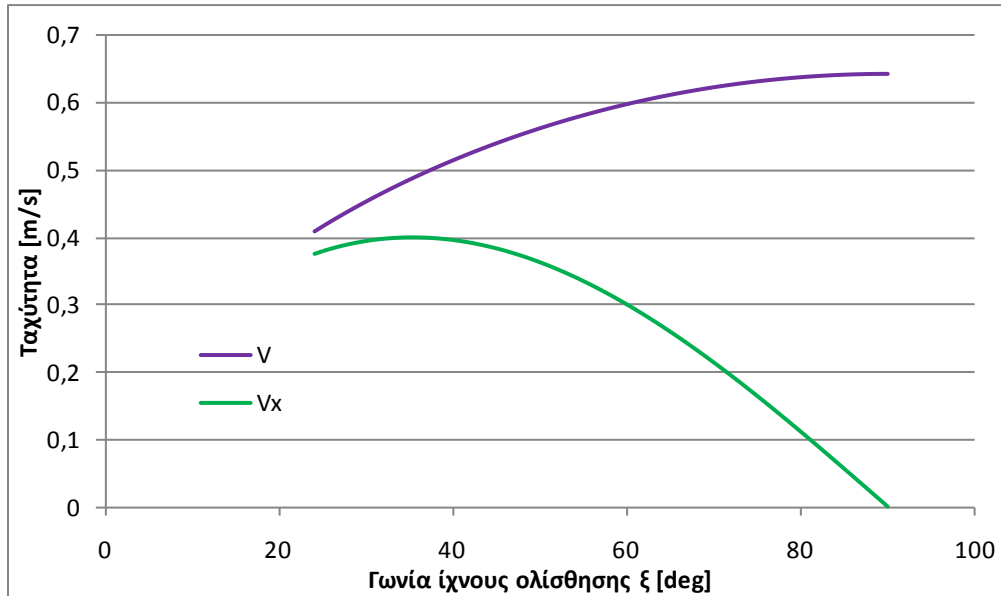
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ ΑΝΤΙΔΙΑΣΤΟΛΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΜΑΖΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Για μία δεδομένη γεωμετρία και κατανομή του λόγου L/D , κάθε γωνία ίχνους ολίσθησης αντιστοιχεί σε μία δεδομένη γωνία προσβολής. Η ταχύτητα κατά μήκος της διαδρομής θα είναι τότε συνάρτηση της αντίστασης πάνω στο σώμα και της συνιστώσας της δύναμης άντωσης κατά μήκος της διαδρομής. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις στην ισορροπία για το υδρόπτερο που σχεδιάστηκε (4.1) – (4.5) και αντικαθιστώντας στο ημιστατικό υδροδυναμικό μοντέλο θα προκύψει η ολική και η οριζόντια ταχύτητα:

$$V = \left(\frac{m_0 g \sin \xi}{K_{D_0} + K_D a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

$$V_x = \left(\frac{m_0 g \sin \xi}{K_{D_0} + K_D a^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cos \xi \quad (6.2)$$

Σε μία σταθερή διαδρομή σε κατάσταση ισορροπίας η άνωση L και η αντίσταση D εξισορροπούν την καθαρή άντωση $m_0 g$. Η γωνία ίχνους ολίσθησης είναι μία συνάρτηση του λόγου άνωσης/αντίστασης σε συνθήκες σταθερής κίνησης.



Σχήμα 6.3: Τυπική σχέση ταχύτητας και γωνίας ίχνους ολίσθησης.

Το σχήμα 6.3 δείχνει πως μεταβάλλεται η ταχύτητα του οχήματος αλλά και η οριζόντια σε σχέση με τη γωνία ίχνους ολίσθησης για το υδρόπτερο που σχεδιάστηκε στο Ε.Μ.Π. θεωρώντας φαινόμενη μάζα 250 gr και τις υδροδυναμικές παραμέτρους αυτές που καθορίστηκαν στο κεφάλαιο 4. Παρουσιάζεται η περίπτωση των αναδύσεων. Το όχημα όμως είναι συμμετρικό ως προς τον κύριο άξονά του και έτσι οι αντίστοιχες καταδύσεις θα έχουν το ίδιο μέτρο ταχυτήτων.

Δύο γωνίες ξ , η μικρότερη δυνατή και αυτή που δίνει τη μεγαλύτερη οριζόντια ταχύτητα έχουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, επειδή και στις δύο αυτές γωνίες οι επιδόσεις του οχήματος είναι ακραίες. Η μικρότερη γωνία ίχνους ολίσθησης δίνει τη μεγαλύτερη οριζόντια απόσταση για δεδομένη μεταβολή βάθους άρα χρειάζεται και τη λιγότερη άντληση. Η γωνία που δίνει τη μεγαλύτερη οριζόντια ταχύτητα εξαρτάται από την αντίσταση του σώματος. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι αυτή η γωνία είναι περίπου στις 35° . Η μικρότερη γωνία ίχνους ολίσθησης παρουσιάζει σχετικά πιο μικρή ταχύτητα.

Η γωνία που δίνει την πιο γρήγορη διαδρομή είναι πιο απότομη (μεγαλύτερη) και έτσι περισσότερη άντληση απαιτείται να καλυφθεί μία συγκεκριμένη διαδρομή. Η μέγιστη οριζόντια ταχύτητα απαιτεί την άντληση της μέγιστης (μεταβλητής) μάζας και την κίνηση του οχήματος υπό μεγάλη γωνία. Το να κινηθεί γρηγορότερα σε γενικές γραμμές θα απαιτήσει περισσότερη άντληση και επειδή πρέπει να επιτύχει μεγαλύτερο βάρος για να καταδυθεί βαθύτερα αλλά και επειδή περισσότερες

καταδύσεις – αναδύσεις απαιτούνται για να καλυφθεί η συγκεκριμένη απόσταση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για την άντληση.

Η επιλογή μιας σταθερής διαδρομής για να λειτουργήσει το υδρόπτερο απαιτεί ανάλογα με τις περιστάσεις ανταλλαγές μεταξύ γρήγορης κίνησης και αυξημένης άντλησης ανά μονάδα οριζόντιας διαδρομής. Ανάλογα λοιπόν με τις ανάγκες της αποστολής οι ανταλλαγές μεταξύ ταχύτητας και εξοικονόμησης ενέργειας θα καθορίσουν την κατάλληλη γωνία ίχνους ολίσθησης λειτουργίας.

TACHYTHTA KINHSHHS KAI GWNIA

Η ταχύτητα της κίνησης κατά τη διάρκεια της αποστολής είναι πολύ σημαντικό στοιχείο στις περισσότερες εφαρμογές. Ένα γρηγορότερο υδρόπτερο μπορεί να σχεδιαστεί προσαρμόζοντας το σχετικό μέγεθος του εσωτερικού συστήματος μεταβολής της άντωσης και χρησιμοποιώντας για το σχεδιασμό γεωμετρικές χαμηλής αντίστασης. Η μέγιστη ταχύτητα του οχήματος θα καθορίζει που έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει το όχημα και τι αποστολές μπορεί να εκτελέσει. Το αναμενόμενο ρεύμα σε κάποια περιοχή λειτουργίας θα μπορούσε να καθορίσει τις απαιτήσεις σχεδιασμού για τη μέγιστη ταχύτητα κίνησης. Μία βασική απαίτηση κατά το σχεδιασμό είναι το όχημα να μπορεί να κινείται κόντρα στο μέσο ή στο μέγιστο αναμενόμενο ρεύμα στην περιοχή λειτουργίας.

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. Τα υδρόπτερα αυτά ταξιδεύουν με σχετικά χαμηλές ταχύτητες, ειδικά συγκρινόμενα με τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (AUVs) τα οδηγούμενα με προπέλα και τα πλοία. Κατά τη διάρκεια κάποιων αποστολών τα υδρόπτερα αντιμετώπισαν δυσκολίες να κινηθούν κόντρα σε ρεύματα μεγάλης ταχύτητας. Κάποιες άλλες εφαρμογές μπορεί να απαιτούν γρηγορότερα οχήματα. Υψηλή ταχύτητα κίνησης θα μπορούσε να είναι σημαντική σε εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα σε περιοχές με ισχυρά ρεύματα όπως οι παράκτιες.

Σε μία σταθερή διαδρομή η αντίσταση εξισορροπεί τη συνιστώσα της καθαρής άντωσης που δρα πάνω στη διεύθυνση της κίνησης. Η γωνία ίχνους ολίσθησης καθορίζει τη συνιστώσα της δύναμης άντωσης που δρα κατά μήκος της

διαδρομής. Όταν το όχημα κινείται κατακόρυφα προς τα πάνω ή προς τα κάτω τότε ολόκληρη η δύναμη άντωσης δρα αντίθετα της αντίστασης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μέγιστη ταχύτητα κίνησης αλλά όμως μηδενική οριζόντια μετατόπιση. Σε διαδρομές πιο ρηχές (μικρότερης γωνίας ίχνους ολίσθησης), μια πιο μικρή συνιστώσα της καθαρής άντωσης θα δρα αντίθετα της αντίστασης, όμως μία μεγαλύτερη συνιστώσα της συνολικής ταχύτητας του οχήματος θα δρα στην οριζόντια κατεύθυνση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μία ανταλλαγή μεταξύ γωνίας ολίσθησης και οριζόντιας ταχύτητας του οχήματος.

Ο λόγος L/D άνωσης προς την αντίσταση στην ισορροπία καθορίζεται από τη γωνία ίχνους ολίσθησης. Λόγω της σχέσης μεταξύ ταχύτητας και γωνίας ίχνους ολίσθησης, ένα υδρόπτερο σχεδιασμένο να μεγιστοποιήσει την ταχύτητά του για δεδομένη μεταβλητή μάζα πρέπει να μην έχει μεγάλο λόγο L/D . Μία περισσότερο απότομη διαδρομή (μεγάλη γωνία ίχνους ολίσθησης) είναι απαραίτητη για μέγιστη οριζόντια ταχύτητα. Έτσι όταν σχεδιάζεται το όχημα για μεγιστοποίηση της ταχύτητας είναι σημαντικότερο να ελαχιστοποιείται η αντίσταση (drag) παρά να μεγιστοποιείται η άνωση (lift). Ο σχεδιασμός για ταχύτητα απαιτεί από το όχημα την ελάχιστη δυνατή αντίσταση και πτερύγια τόσο μεγάλα ώστε να παρέχουν τον απαιτούμενο λόγο L/D για μία δεδομένη διαδρομή. Η γρηγορότερη διαδρομή υπό γωνία περίπου 35° απαιτεί λόγο L/D μόνο 1,4. Αυτός είναι σημαντικά χαμηλότερος από τους αντίστοιχους λόγους για τα ανεμόπτερα ο οποίος είναι γύρω στο 20.

Το σώμα του οχήματος παράγει το μεγαλύτερο μέρος της αντίστασης D , ενώ τα πτερύγια συμβάλουν πολύ περισσότερο στην επαγόμενη άνωση L , ενώ λιγότερο στην αντίσταση. Ένα γρήγορο σχεδιασμένο όχημα θα πρέπει να ελαχιστοποιεί την αντίσταση χρησιμοποιώντας ένα χαμηλής αντίστασης σώμα. Αποδοτικά, υψηλού διατάματος (aspect ratio) πτερύγια θα πρέπει να σχεδιαστούν στο κατάλληλο μέγεθος ώστε να παρέχουν την απαραίτητη άνωση για τη γρηγορότερη (γύρω στις 35°) διαδρομή και να ελαχιστοποιούν την αντίσταση στην ίδια γωνία. Αυξάνοντας την επιφάνεια των πτερυγίων πάνω από το βέλτιστο σημείο αυξάνεται και η αντίσταση στον επιθυμητό (χαμηλό) λόγο L/D . Σχεδιάζοντας ένα όχημα για να έχει τη μέγιστη ταχύτητα (δεδομένης της μεταβλητής μάζας), προκύπτουν σχέδια όπως των υδροπτερών Slocum, Spray και Seaglider. Αυτά τα οχήματα έχουν υδροδυναμικό σχήμα με σχετικά μικρά πτερύγια και ταξιδεύουν με τη μέγιστη ταχύτητά τους σε γωνίες ίχνους ολίσθησης κοντά στις 35° .

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

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 περιοριστικός παράγοντας στις επιδόσεις του οχήματος γι' αυτό και ειδική προσοχή στο απόθεμα ενέργειας απαιτείται σε όλες τις φάσεις σχεδιασμού. Η ενέργεια είναι πάντα ένας κρίσιμος παράγοντας στο σχεδιασμό αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων (AUVs) και ακόμα περισσότερο στα υποβρύχια υδρόπτερα, δεδομένων των εκτεταμένων αποστολών τους.

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

- τη γάστρα,
- τα πτερύγια και την ούρα,
- 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 απόληψη 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.

Η σειρά με την οποία θα ιεραρχηθούν οι απαιτήσεις των αποστολών και θα επηρεάσουν τη διαδικασία σχεδιασμού επηρεάζει σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα η πρώτη απαίτηση για ένα υδρόπτερο μπορεί να είναι το μέγεθος και ο όγκος. Τα υδρόπτερα Slocum, Spray και Seaglider έχουν παρόμοιο μέγεθος και όγκο. Οι προδιαγραφές σχεδιασμού τους απαιτούν να έχουν τέτοιο μέγεθος το οποίο να μπορεί κανείς να χειριστεί από ένα μικρό σκάφος. Αρχικά πρέπει να γίνει ο καθορισμός του όγκου του σώματος και στη συνέχεια με βάση αυτό θα επιλεγεί το μέγεθος των πτερυγίων και της δεξαμενής έρματος. Τα τελευταία θα επιλεγούν αντίστοιχα με την επιθυμητή γωνία ίχνους ολίσθησης και την ταχύτητα, τα οποία με τη σειρά τους καθορίζονται από τις απαιτήσεις της αποστολής και τις αναμενόμενες συνθήκες λειτουργίας. Ο περιορισμός στον όγκο του οχήματος αποτελεί μεγάλης βαρύτητας παράμετρο στο σχεδιασμό του οχήματος η οποία περιορίζει τον εσωτερικό όγκο που διατίθεται για τις μπαταρίες, τους ενεργοποιητές, το ωφέλιμο φορτίο και άλλα όργανα.

Σε μια εναλλακτική διαδικασία σχεδιασμού, ο όγκος μπορεί να μην περιορίζεται. Θα μπορούσαν να καθοριστούν πρώτα η δεδομένη αποστολή, η ταχύτητα, η εμβέλεια και το ωφέλιμο φορτίο και στη συνέχεια να επιλεγεί ο όγκος ο οποίος είναι ο κατάλληλος για να ικανοποιούνται όλα τα προηγούμενα. Τα μεγαλύτερα υδρόπτερα θα μπορούσαν να χωρέσουν περισσότερες μπαταρίες, όμως το αυξημένο μέγεθος της μεταβλητής μάζας παράλληλα θα αυξήσει και την ανάγκη άντλησης. Γενικά, σύμφωνα με το αναλυτικό μοντέλο, αλλά και στη μελέτη των τριών κλασικών υδροπτερών (legacy gliders) που παρουσιάζεται στο [49] μεγαλύτερα υδρόπτερα με μεγαλύτερο όγκο διαθέσιμο για την μεταβλητή μάζα και τις μπαταρίες έχουν τη δυνατότητα να αναπτύξουν μεγαλύτερες ταχύτητες και να καλύψουν μεγαλύτερες αποστάσεις.

Τα μεγαλύτερα υδρόπτερα είναι πιθανό να είναι ακριβότερα και να απαιτούν μεγαλύτερο εξοπλισμό για την έναρξη της αποστολής αλλά και την ανάκτησή τους από τη θάλασσα, όμως η μεγαλύτερη εμβέλεια θα μπορούσε να μειώσει άλλα λειτουργικά έξοδα. Τα υπάρχοντα υδρόπτερα έχουν τέτοιο μέγεθος ώστε να μπορούν δυο άνθρωποι να τα ρίξουν στη θάλασσα από ένα μικρό σκάφος κατά την έναρξη της αποστολής και να τα περισυλλέξουν κατά τη λήξη. Το συνολικό κόστος λειτουργίας θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη και το κόστος τέτοιων λειτουργιών. Τα υδρόπτερα είναι σχετικά φθηνά στη λειτουργία τους από τη στιγμή που πέσουν

στο νερό, ενώ αξιοσημείωτο κομμάτι του συνολικού λειτουργικού κόστους μπορεί να αποτελέσει η συχνή ρίψη και συλλογή του οχήματος από πλοίο. Μεγαλύτερα υδρόπτερα με μεγαλύτερη εμβέλεια τα οποία θα απαιτούν και λιγότερες φορές την παρέμβαση του πλοίου μπορεί να έχουν κάποια πλεονεκτήματα κόστους.

Από τη στιγμή που θα γίνει μία αρχική εκτίμηση του σχήματος, των πτερυγίων και του μεγέθους της μεταβλητής μάζας, θα μπορούν να γίνουν μελέτες ανταλλαγών που θα συγκρίνουν μικρές μεταβολές στις παραμέτρους αυτές και στη γεωμετρία του υδροπτέρου. Ένα αρχικό σχέδιο μπορεί να χρησιμοποιήσει το σχήμα ενός από τα υπάρχοντα ωκεανογραφικά υδρόπτερα με κάποιες υδροδυναμικές βελτιώσεις στο σώμα και στα πτερύγια. Το σώμα μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να ελαχιστοποιεί την αντίσταση για ένα δεδομένο όγκο. Έτσι είναι δυνατό στη συνέχεια να καθοριστεί η ταχύτητα λειτουργίας και η διαδρομή καθώς και το μέγεθος του συστήματος μεταβολής της άντωσης ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του σχεδιασμού. Η επιλογή της διαδρομής θα καθορίσει το λόγο L/D λειτουργίας που απαιτείται στο σχεδιασμό και αυτό με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει στο σχεδιασμό των πτερυγίων.

7. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ

Ο αρχικός σχεδιασμός, όπως ήδη αναφέρθηκε, μπορεί να γίνει με βάση ένα από τα υπάρχοντα υδροπτερα. Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε, όπως έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, το γενικό σχήμα του Seaglider στο οποίο έγιναν υδροδυναμικές βελτιώσεις. Οι απαιτήσεις των αποστολών, όπως το ωφέλιμο φορτίο, η ταχύτητα και η εμβέλεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του όγκου που είναι απαραίτητος. Τα μεγαλύτερα εσωτερικά όργανα, όπως οι μπαταρίες, η διάταξη μεταβλητής πλευστότητας και ο χώρος για το ωφέλιμο φορτίο μπορούν να καθοριστούν από τις απαιτήσεις των αποστολών, προσφέροντας ταυτόχρονα μία πρώτη εκτίμηση για τον όγκο του οχήματος. Με την ίδια λογική η πρώτη εκτίμηση για τα επιστημονικά όργανα και αισθητήρες, την μπαταρία και τη διάταξη μεταβλητής πλευστότητας θα γίνει με τη βοήθεια της αντίστοιχης ανάλυσης του Seaglider [23]. Χρησιμοποιώντας αντίστροφη σχεδίαση (reversed engineering) αναλύεται η δομή και η λειτουργία του συστήματος του συγκεκριμένου υδροπτερου ώστε να αποκαλυφθούν οι τεχνολογικές του αρχές. Παρουσιάζεται το μηχανολογικό σχέδιο προσαρμοσμένο στο εξωτερικό περίβλημα του υδροπτερου που σχεδιάστηκε στο Ε.Μ.Π. αλλά και τα βασικά ηλεκτρονικά όργανα. Το πρωτογενές μηχανολογικό σχέδιο έγινε με βασική αρχή την προσαρμοστικότητα σε μελλοντικούς επιπλέον αισθητήρες και σε χωροταξικές ανακατατάξεις.

ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ

Ο σχεδιασμός του οχήματος το οποίο θα τροφοδοτείται ηλεκτρικά από μπαταρία γίνεται με βασικό γνώμονα την οικονομία στην ενεργεία ώστε να είναι δυνατές οι αποστολές μεγάλης διάρκειας (ενός χρόνου) και μεγάλης εμβέλειας. Το όχημα περικλείεται από ένα υδροδυναμικό κάλυμμα (fairing) το οποίο θα είναι κατασκευασμένο από ανθρακονήματα και πολυεστέρα και θα υποστηρίζει τα

περυγία και την ελκόμενη κεραία. Το κάλυμμα έχει υδροδυναμικό σχήμα χαμηλής αντίστασης, όπως έχει περιγραφεί αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο, με τη μέγιστη διάμετρό του στο 70% του συνολικού μήκους του σώματος από το ρύγχος ώστε να διατηρεί τη στρωτή ροή σε πολύ μεγάλο μέρος της επιφάνειάς του. Το υδροδυναμικό κάλυμμα περικλείει τη στεγανή γάστρα η οποία έχει συμπιεστότητα παρόμοια με εκείνη του νερού της θάλασσας οπότε η δύναμη άντωσης που οδηγεί το όχημα προς τα κάτω δεν παρουσιάζει απώλειες καθώς το όχημα αλλάζει βάθος. Συγκρινόμενη με μία τυπική άκαμπτη γάστρα, μία ουδέτερης συμπιεστότητας μπορεί να “γλυτώσει” άντληση πάνω από 100cm^3 κατά τη διάρκεια κατάδυσης 1000 m . Η γάστρα κατασκευάζεται από αλουμίνιο κατάλληλο να αντέχει σε πιέσεις μέχρι 1000 dbar . Η στεγανή γάστρα αποτελείται από αποκλίνοντα τοξωτά πλαίσια που υποστηρίζονται από άκαμπτους δακτυλίους. Έτσι δημιουργείται το συγκεκριμένο σχήμα γάστρας αλουμινίου, το οποίο μαζί με την αντοχή συνδυάζει και το πλεονέκτημα του μικρού βάρους (σχήμα 7.15). Τα κατασκευαστικά σχέδια που παρουσιάζονται στη συνέχεια, προέκυψαν από την ανάλυση του υδροπτέρου Seaglider [23].

Το υδροδυναμικό κάλυμμα θα κατασκευαστεί σε δύο κομμάτια (σχήμα 7.1 και 7.2). Το μπροστινό κομμάτι (σχήμα 7.1) και το πίσω (πράσινο στο σχήμα 7.2). Το μπροστινό έχει ενωμένα από την κατασκευή του δύο αλουμίνια δακτυλίδια ενώ το πίσω άλλα τρία (σχήματα 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 και 7.7). Τα δακτυλίδια αυτά χρησιμεύουν ως αποστάτες μεταξύ στεγανής γάστρας και καλύμματος, εκτός από αυτό που υπάρχει στο ρύγχος και αυτό στην ουρά όπου γίνεται η ένωση με τα πίσω περυγία και την κεραία, τα οποία χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερη αντοχή. Το υδροδυναμικό κάλυμμα ενώνεται με τη στεγανή γάστρα σε ένα μόνο σημείο, εκεί ακριβώς που ενώνεται το μπροστινό μέρος του καλύμματος με το πίσω (σχήματα 7.2 και 7.6). Τέλος μία μικρή οπή υπάρχει στο ρύγχος του καλύμματος που επιτρέπει την περιορισμένη εισροή νερού, ενώ ένα μεγαλύτερο άνοιγμα υπάρχει στην ουρά.

Η στεγανή γάστρα θα αποτελείται από επτά διαφορετικές περιοχές τις οποίες αποτελούν οι hull 1, hull 2, hull 3, hull 4, hull 5, hull 6 (σχήματα 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12, 7.13) και ένας εσωτερικός δακτύλιος (σχήμα 7.14) που μπαίνει ανάμεσα στις hull 4 και hull 5 για να ενισχύσει την αντοχή της γάστρας. Οι περιοχές αυτές θα ενώνονται μεταξύ τους με εσωτερικές βίδες, ενώ επιπλέον θα χρησιμοποιούνται και δακτύλιοι στεγανοποίησης (o – rings).

Ο έλεγχος της πλευστότητας θα μπορούσε να παρέχεται με ένα υδραυλικό σύστημα τύπου ALACE [22]. Στους πλωτήρες ALACE το υδραυλικό σύστημα μεταβλητής πλευστότητας είναι φτιαγμένο ώστε να μεταφέρει υγρό από μία εσωτερική δεξαμενή σε μια εξωτερική. Στο υδρόπτερο Seaglider το σύστημα μεταβλητής πλευστότητας είναι περισσότερο εξελιγμένο (VBD Variable Buoyancy Device) με αποτέλεσμα να είναι ελαφρύτερο και μικρότερο ώστε να επιτρέπει την οικονομία στο χώρο, όπου θα μπορούσαν να τοποθετηθούν και επιπλέον όργανα. Χαμηλού ιξώδους λάδι τροφοδοτείται μέσα σε μία ενισχυτική αντλία πριν σταλεί στην κύρια υψηλής πίεσης αξονική αντλία. Η χρήση της επιπλέον βοηθητικής αντλίας παρέχει την απαραίτητη πίεση που πρέπει να τροφοδοτηθεί η υψηλής πίεσης αντλία. Το λάδι επανεισάγεται στην εσωτερική δεξαμενή μέσω μιας διαδικασίας η οποία έχει υιοθετηθεί από τους πλωτήρες ALACE. Η ύπαρξη κενού στο εσωτερικό της γάστρας επιτρέπει στο λάδι να εξέρχεται από τον εξωτερικό αποταμιευτή υπό την επίδραση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Τέλος μία σωληνοειδής βαλβίδα χρησιμοποιείται για να ρυθμίζει την ποσότητα λαδιού που μεταφέρεται.

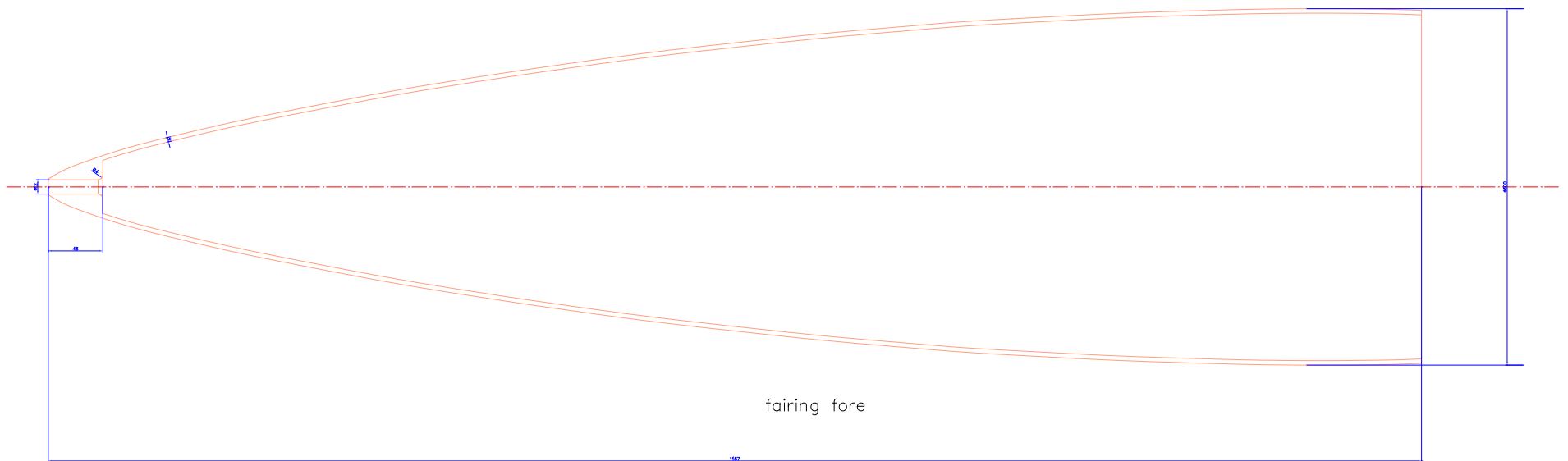
Ένας ακουστικός μετατροπέας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της θέσης του οχήματος και να τοποθετηθεί στην περιοχή hull 1. Ακριβώς μετά μπορεί να τοποθετηθεί ο αισθητήρας TCM5 3-axis compass module για τον προσδιορισμό των γωνιών διατοιχισμού, πρόνευσης, εκτροπής (roll, pitch, heading).

Τα ηλεκτρονικά όργανα θα μπορούσαν να τοποθετηθούν στην περιοχή hull 2. Αυτά περιλαμβάνουν τον μικροϋπολογιστή, το μόντεμ κινητής τηλεφωνίας, τον αισθητήρα δορυφορικού προσδιορισμού θέσης (GPS) καθώς και η στήλη μπαταρίας χαμηλής τάσης. Για την τροφοδοσία του οχήματος χρησιμοποιούνται δύο στήλες μπαταριών. Αυτή που αναφέρθηκε η οποία είναι 10 V και μία δεύτερη 24 V η οποία παίζει και το ρόλο την κινούμενης μάζας.

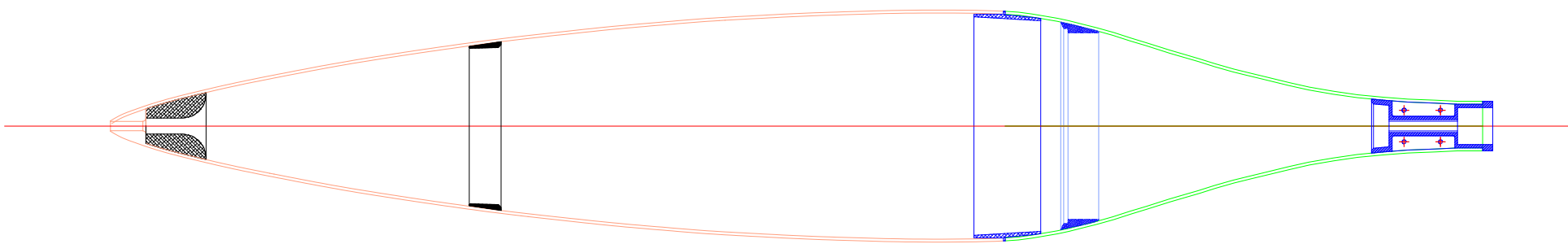
Η υψηλής τάσης μπαταρία, η οποία αποτελεί ταυτόχρονα και το μηχανισμό ελέγχου της κλίσης του οχήματος θα μπορούσε να τοποθετηθεί στην περιοχή hull 4. Επιπλέον εκεί μπορούν να μπουν και οι μηχανισμοί μετακίνησης της μπαταρίας προς τα μπρος και προς τα πίσω (ώστε να ελεγχθεί η πρόνευση) αλλά και μηχανισμός για να την περιστρέψει (ώστε να ελεγχθεί ο διατοιχισμός και η εκτροπή όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο).

Τέλος η συσκευή μεταβλητής πλευστότητας μπορεί να τοποθετηθεί στο πίσω μέρος της γάστρας. Μια τέτοια συσκευή συνήθως περιλαμβάνει μία εσωτερική

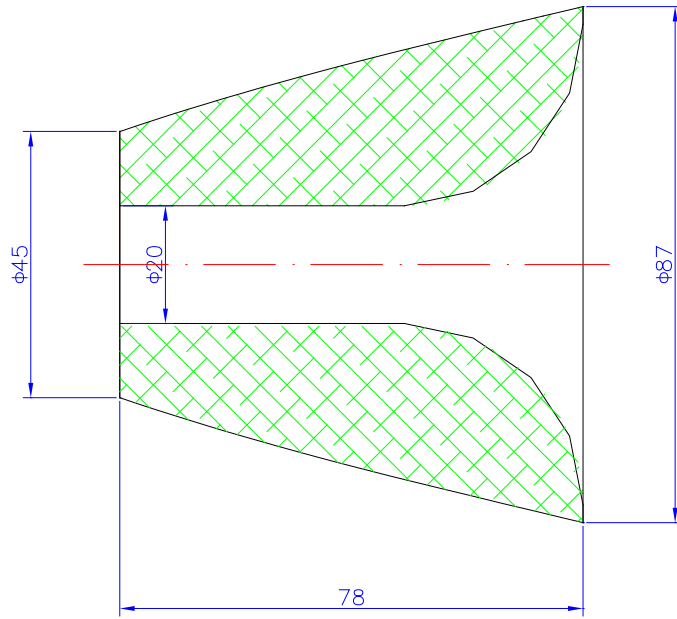
δεξαμενή με έμβολο, σύστημα άντλησης και έναν εξωτερικό υδραυλικό αποταμιευτή.
Η κεραία θα τοποθετηθεί στο στενό κομμάτι της πρύμνης του οχήματος.



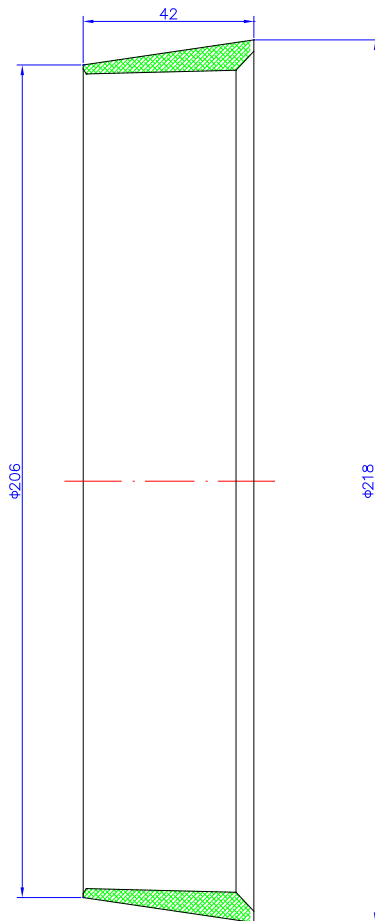
Σχήμα 7.1: Μπροστινή περιοχή του υδροδυναμικού καλύμματος του υδροπτέρου.



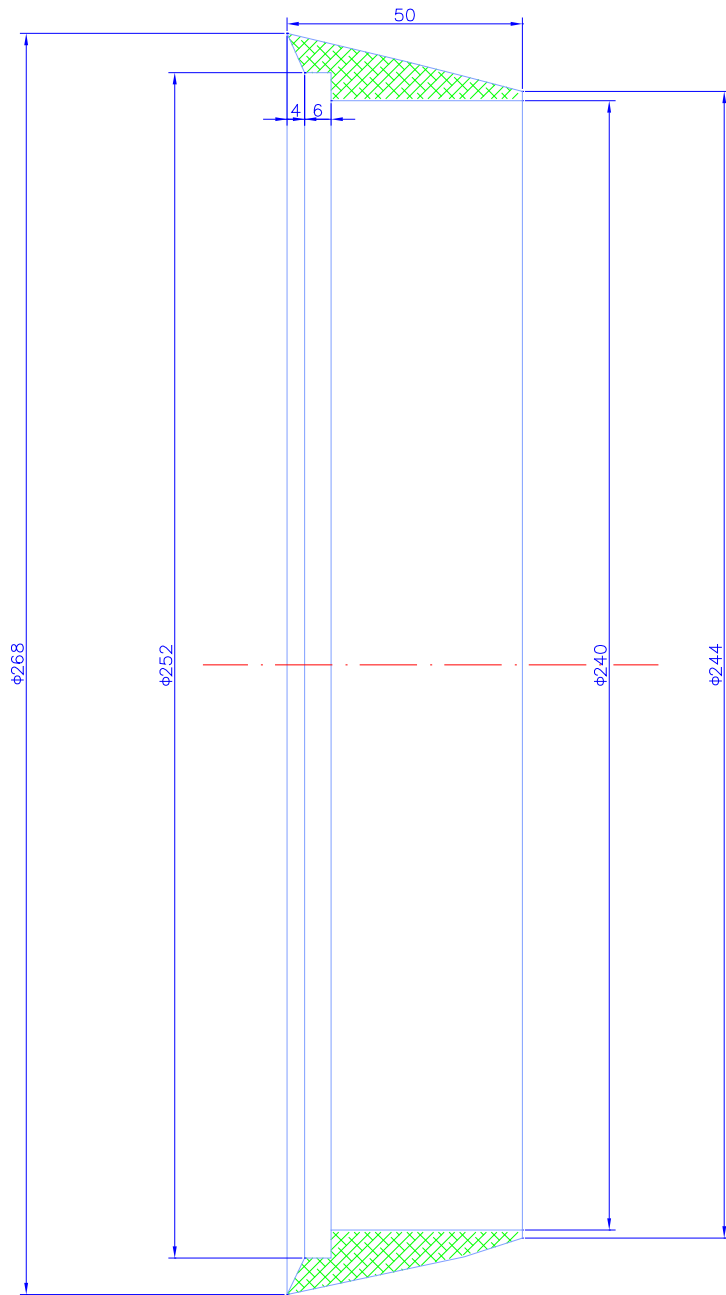
Σχήμα 7.2: Το υδροδυναμικό κάλυμμα.



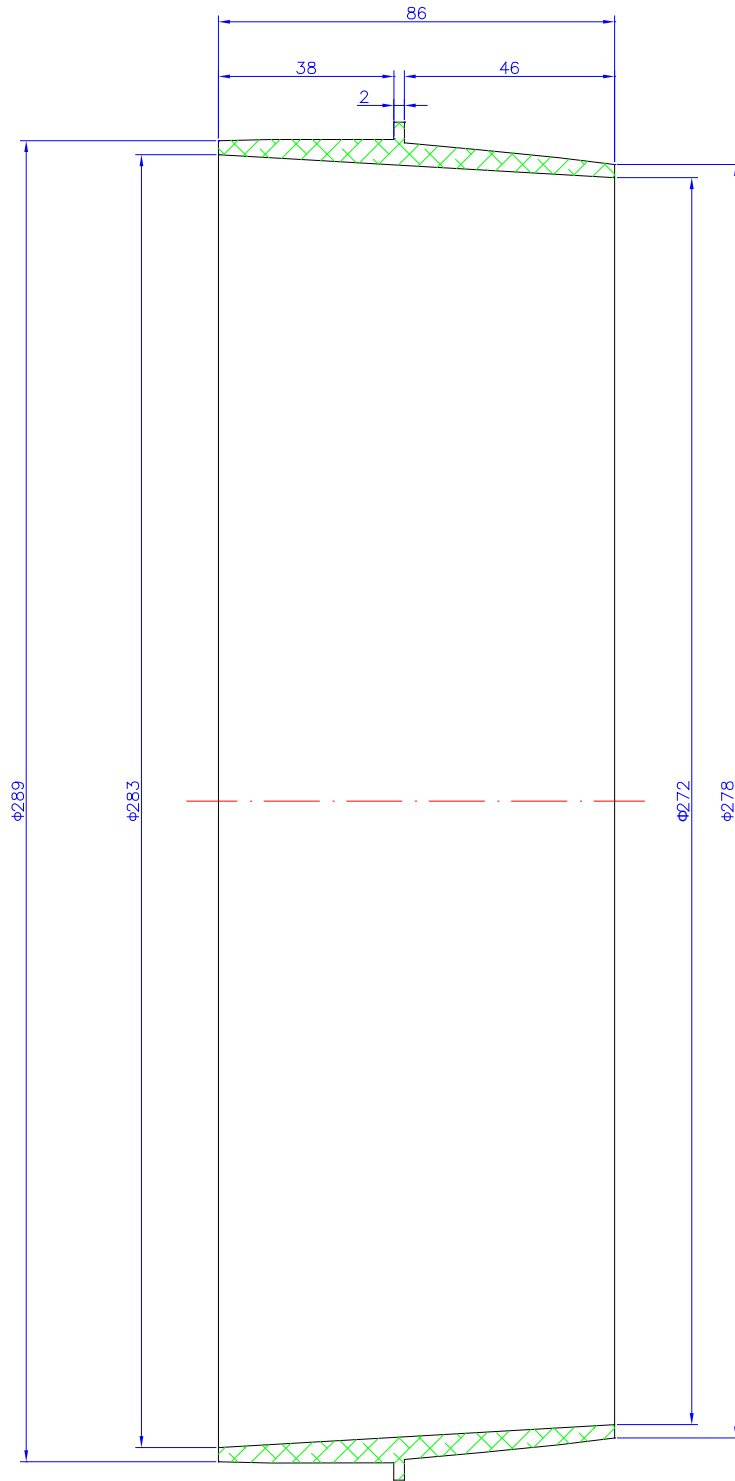
Σχήμα 7.3: Ο δακτύλιος από αλουμίνιο στο ρύγχος του καλύμματος.



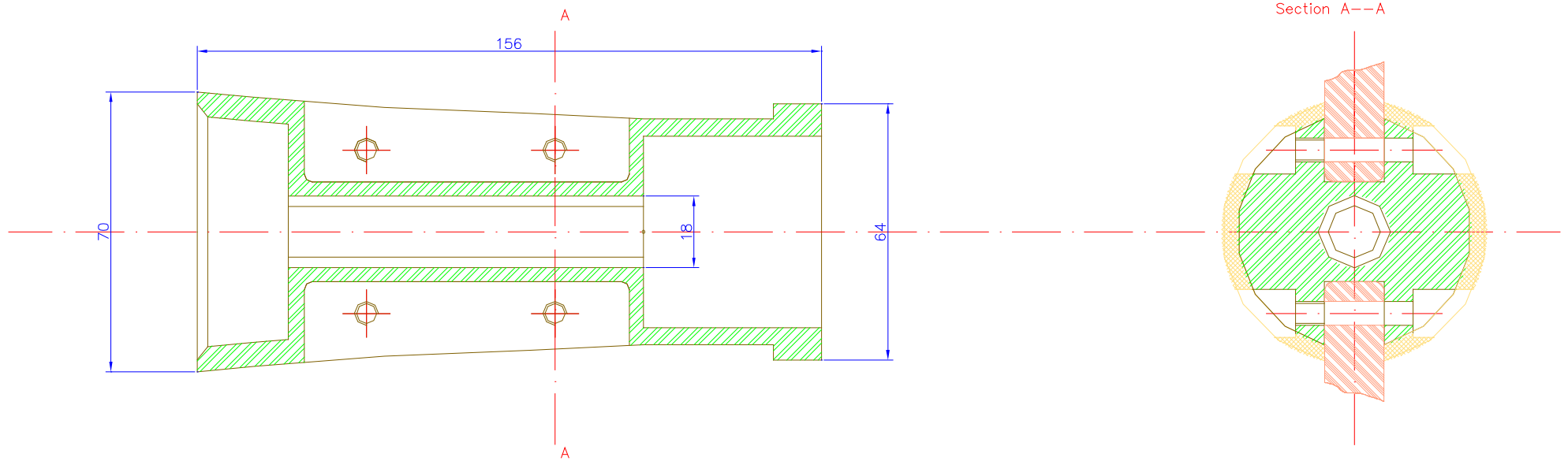
Σχήμα 7.4: Ο δεύτερος δακτύλιος από αλουμίνιο στο μπροστινό μέρος του καλύμματος.



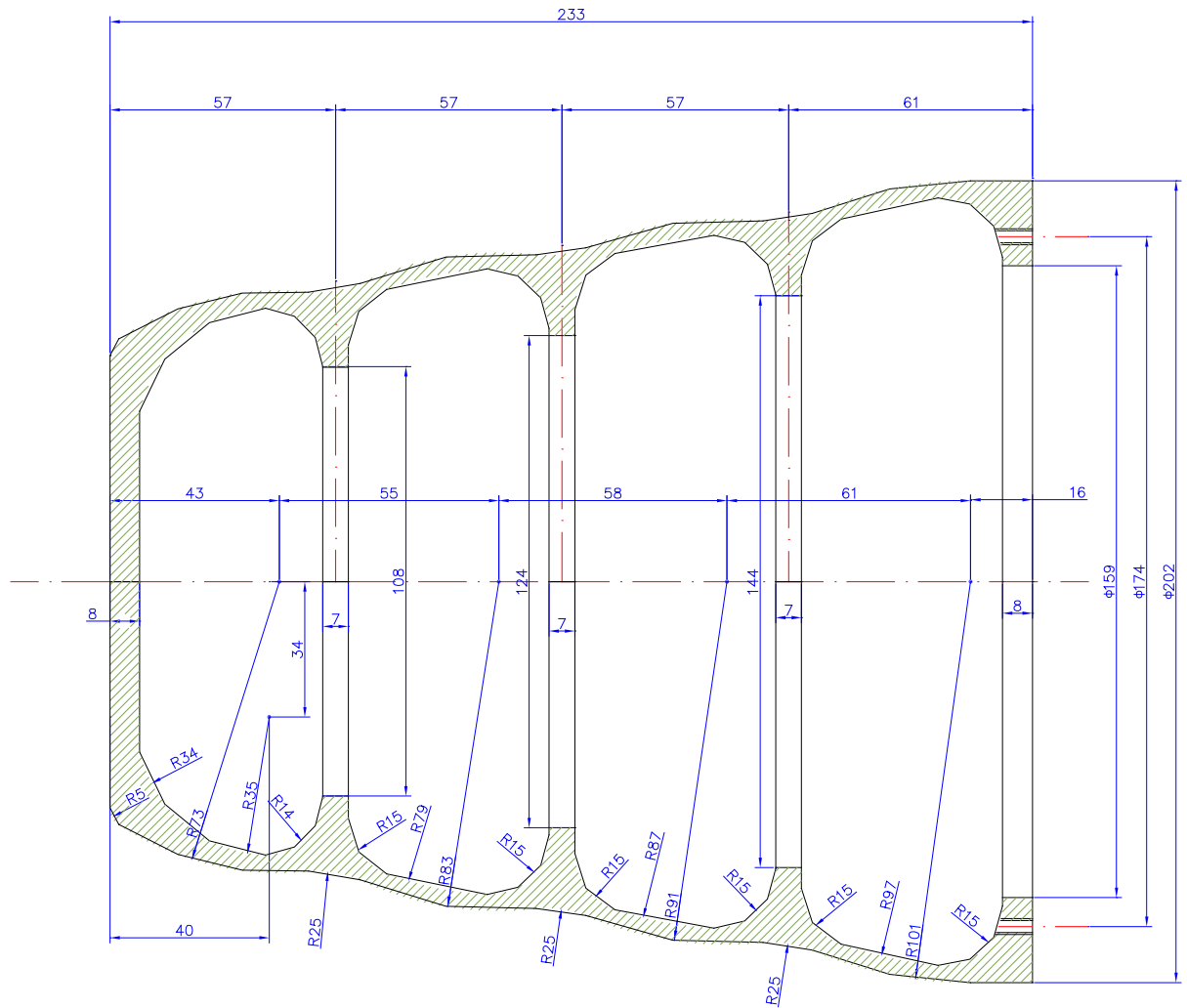
Σχήμα 7.5: Δακτύλιος από αλουμίνιο στο πίσω μέρος του καλύμματος..



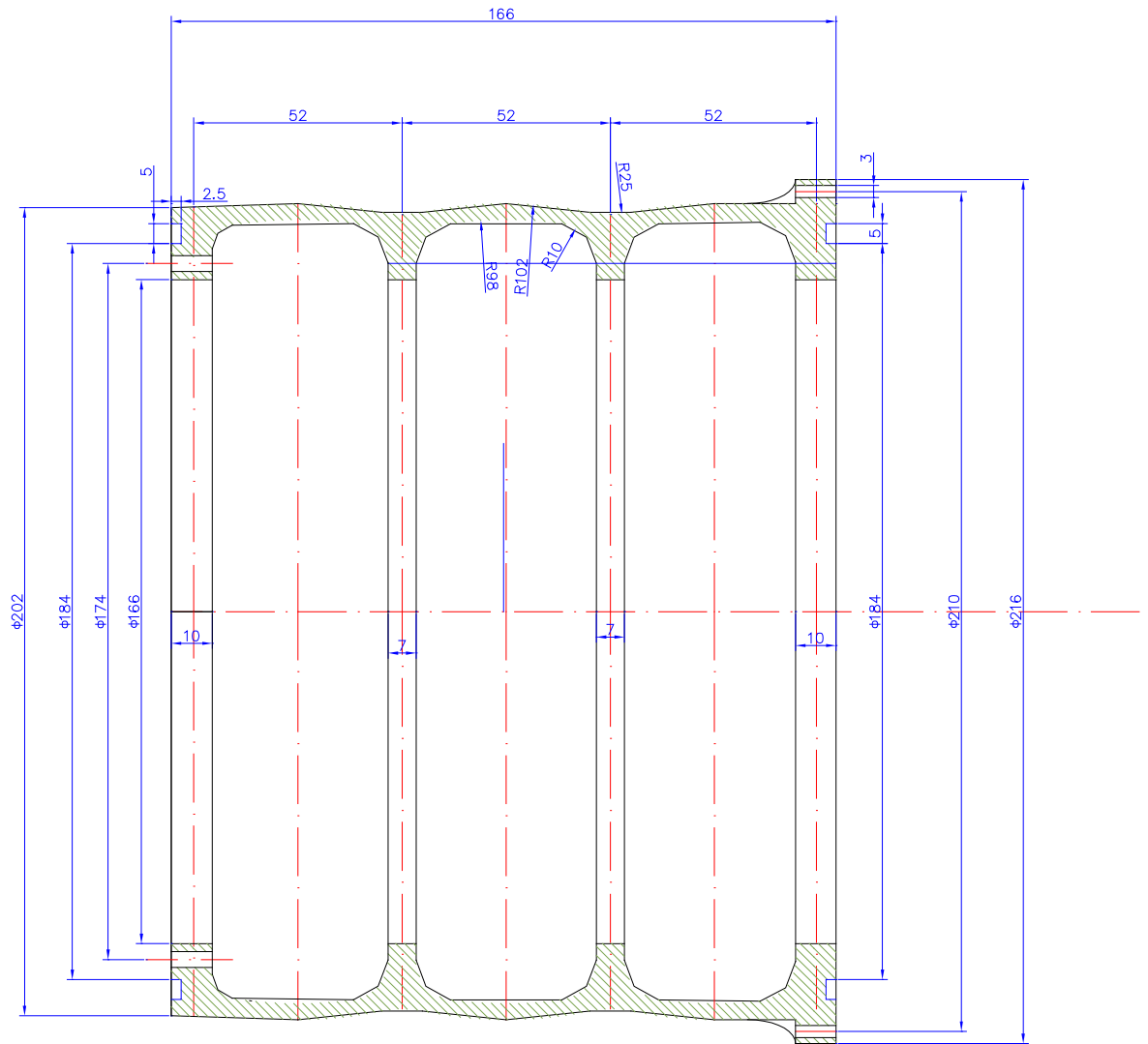
Σχήμα 7.6: Τμήμα όπου ενώνεται το υδροδυναμικό κάλυμμα με την εσωτερική στεγανή γάστρα.



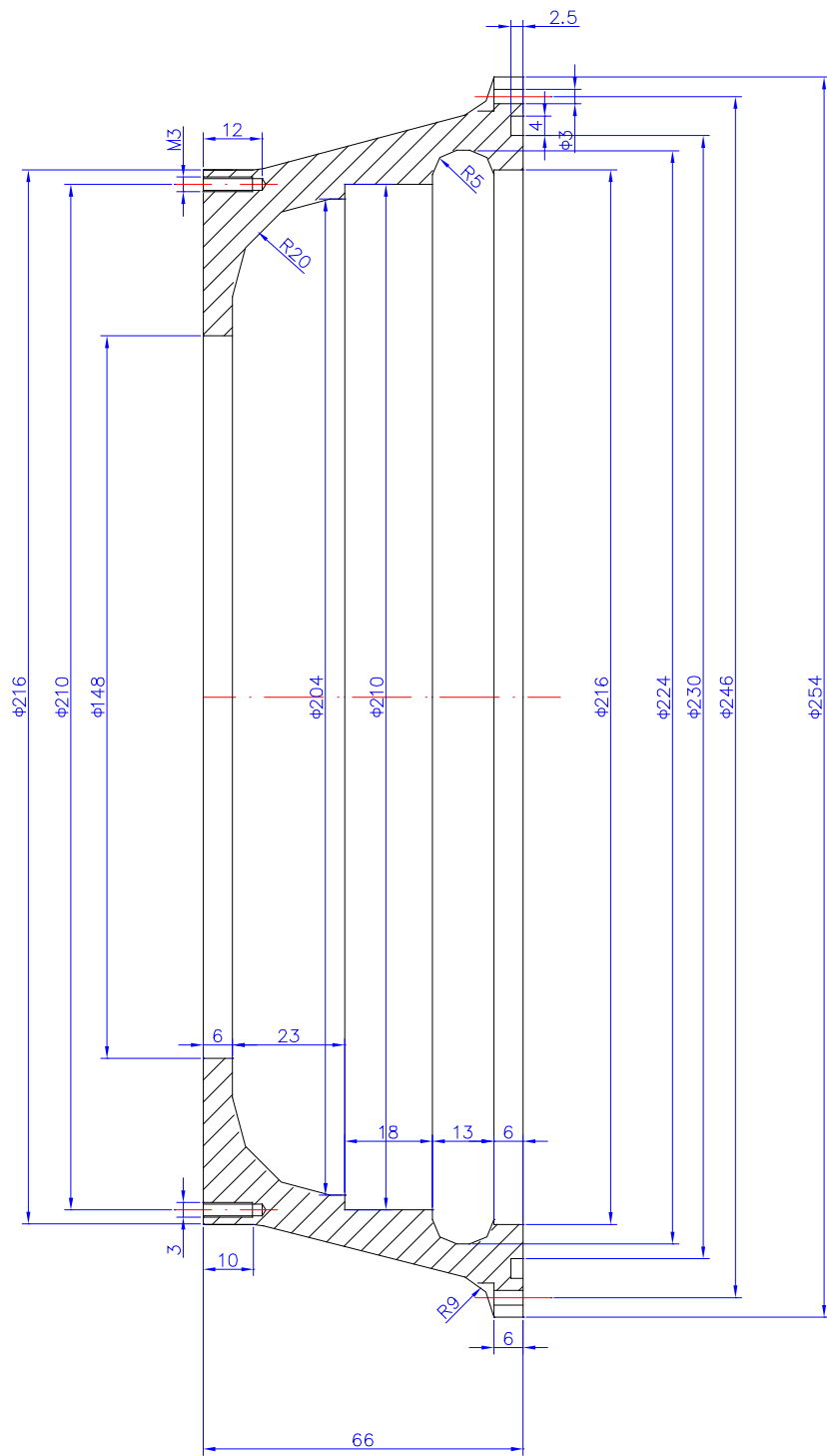
Σχήμα 7.7: Ο δακτύλιος αλουμινίου στην πρύμνη του καλύμματος όπου και ενώνονται τα μικρά πτερύγια και η κεραία.



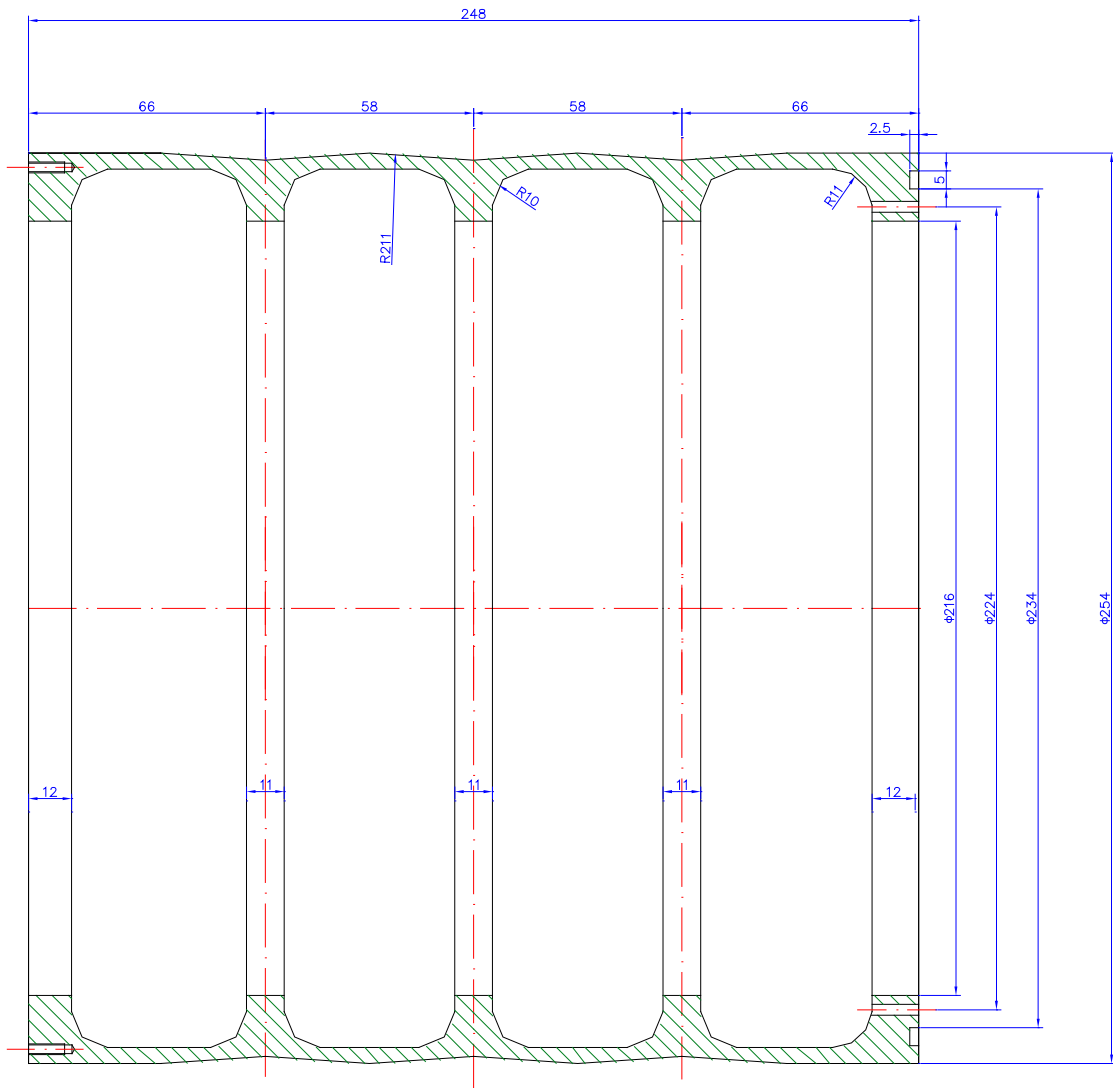
Σχήμα 7.8: Πρώτη περιοχή της στεγανής γάστρας, hull 1.



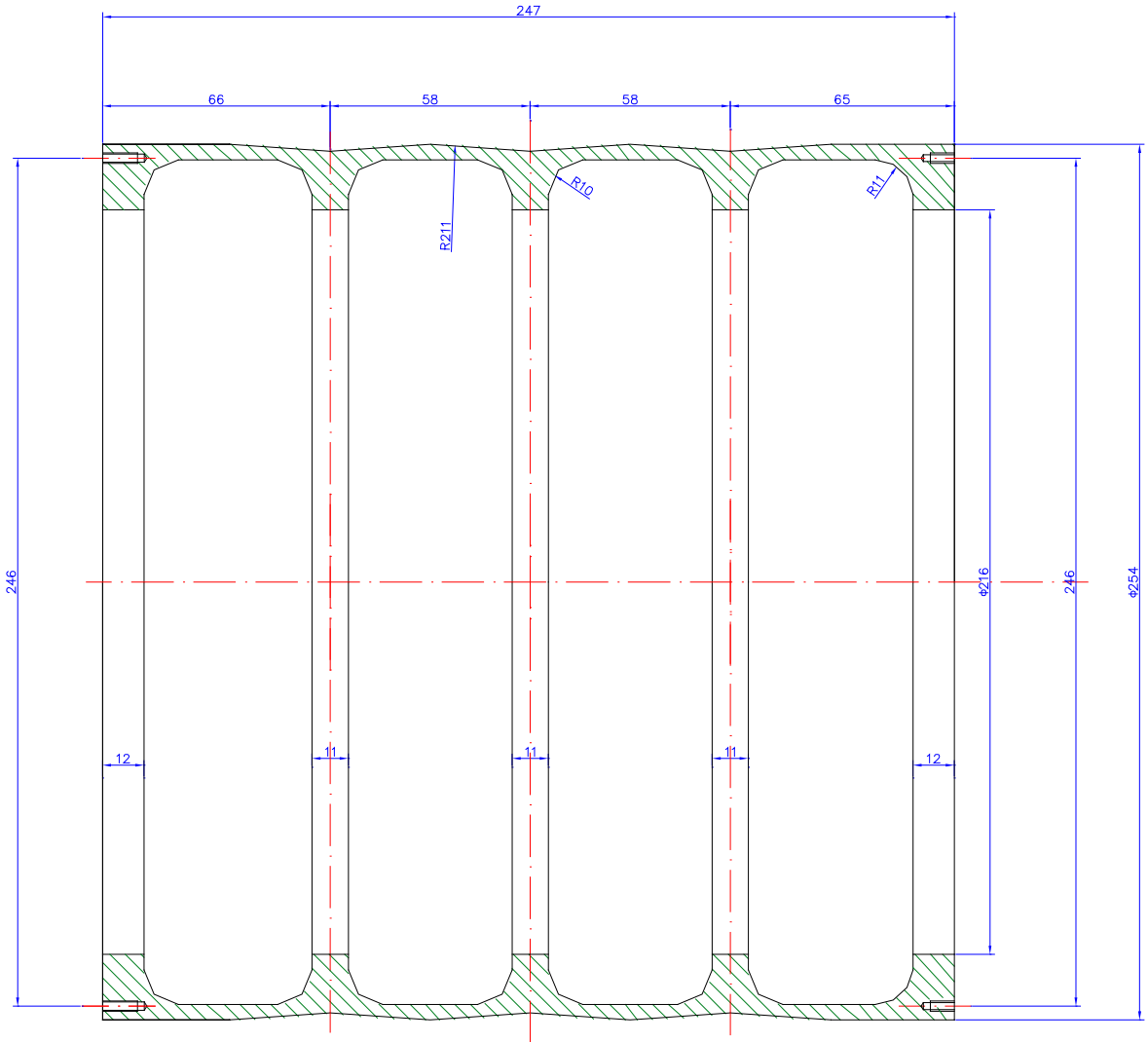
Σχήμα 7.9: Δεύτερη περιοχή της στεγανής γάστρας, hull 2.



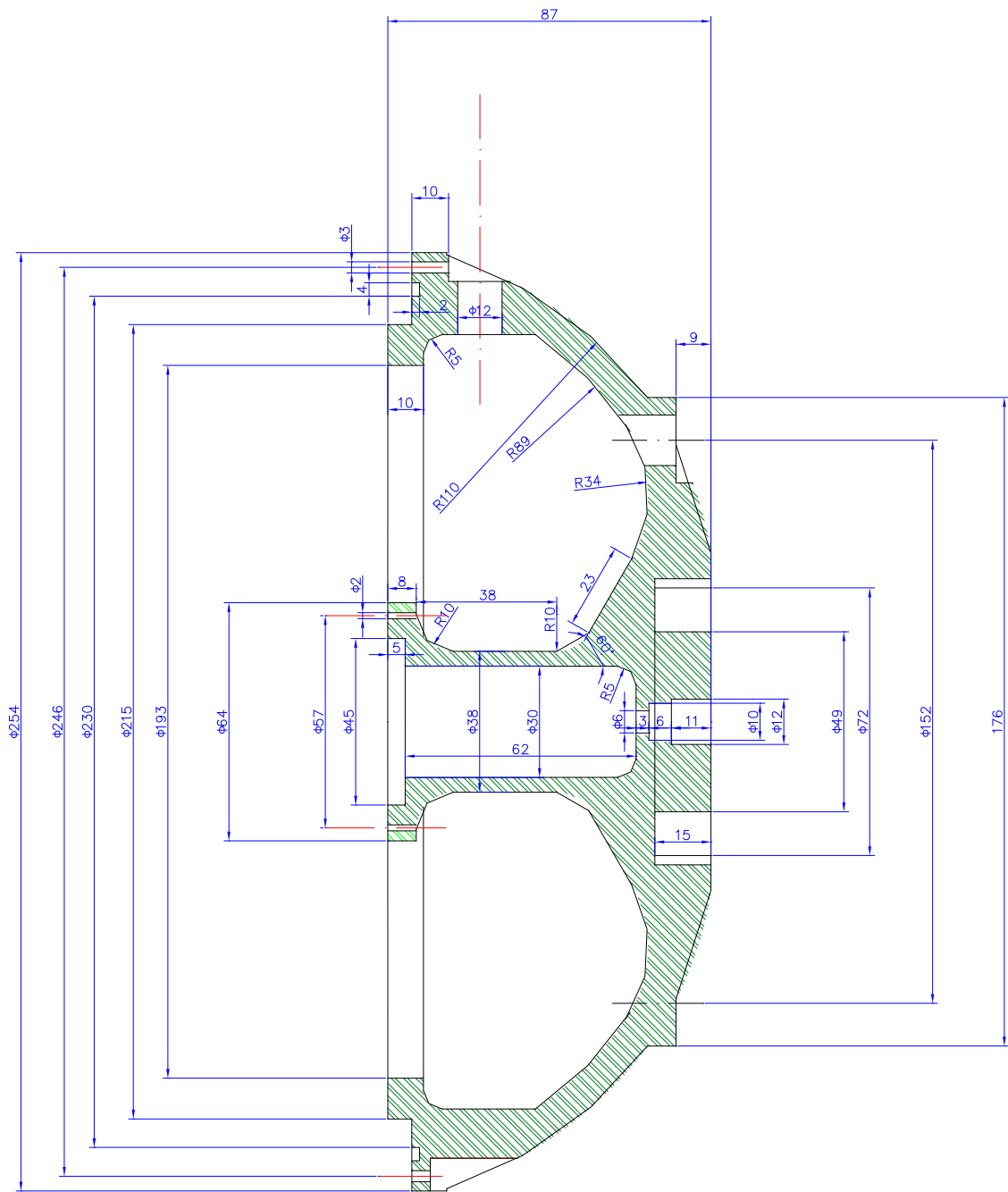
Σχήμα 7.10: Τρίτη περιοχή της στεγανής γάστρας, hull 3.



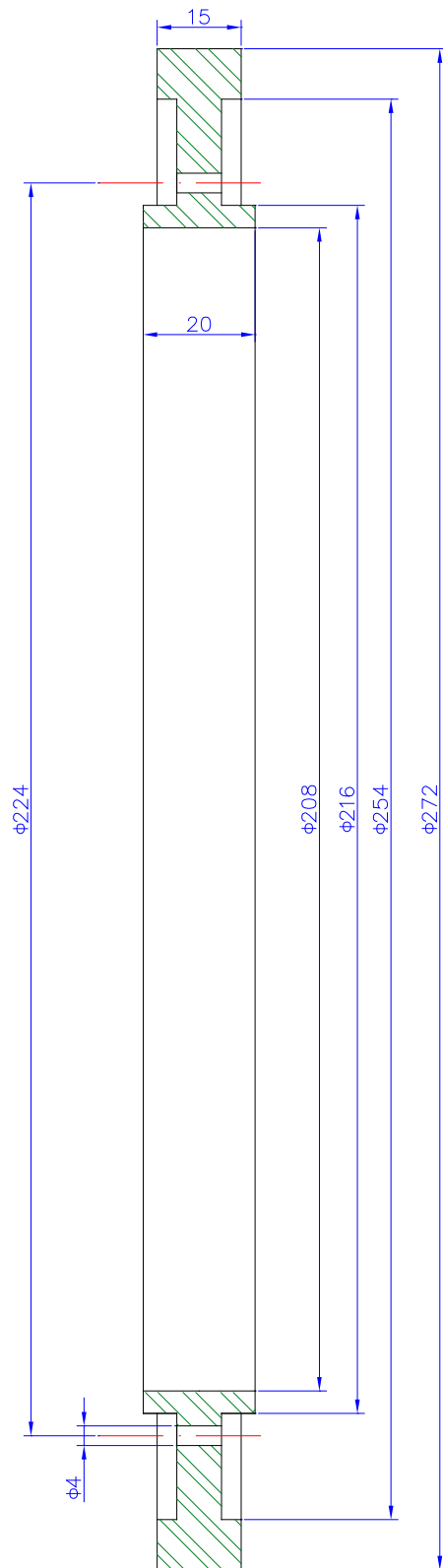
Σχήμα 7.11: Τέταρτη περιοχή της στεγανής γάστρας, hull 4.



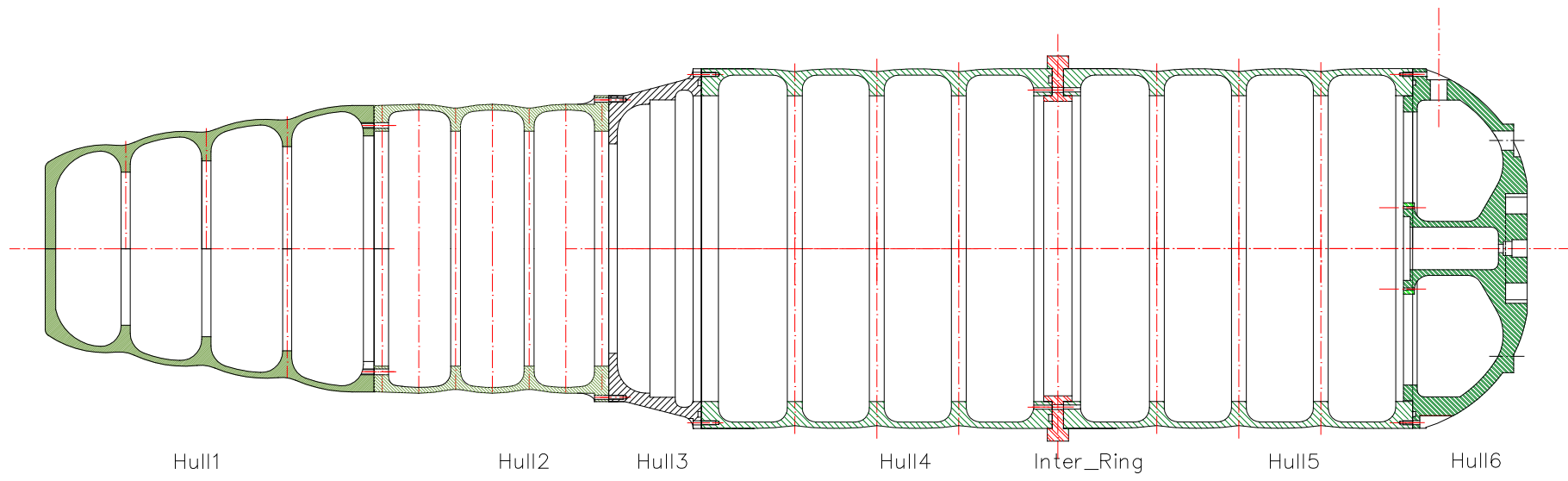
Σχήμα 7.12: Πέμπτη περιοχή της στεγανής γάστρας, hull 5.



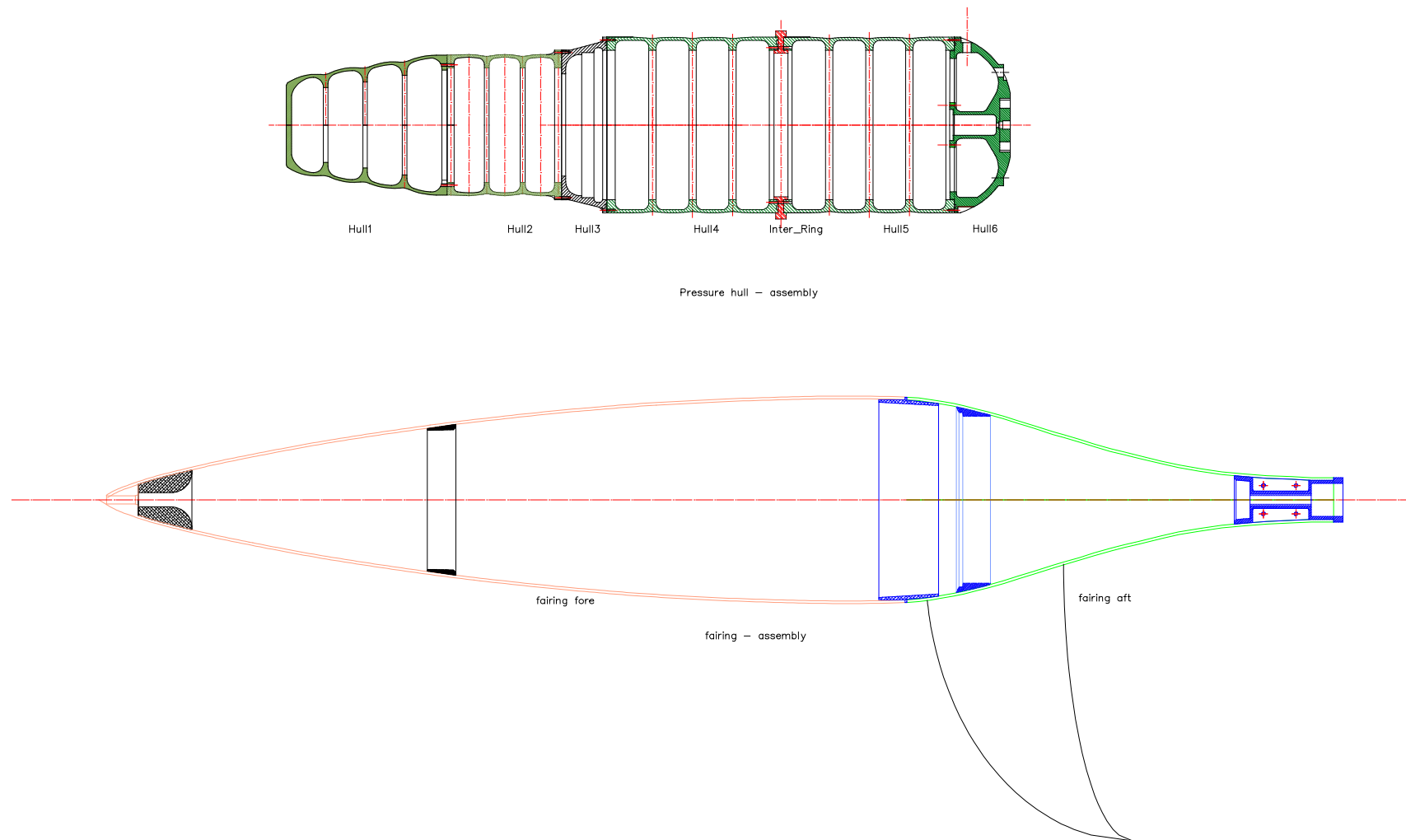
Σχήμα 7.13: Έκρη περιοχή της στεγανής γάστρας, hull 6.



Σχήμα 7.14: Έβδομη περιοχή της στεγανής γάστρας, εσωτερικός δακτύλιος.



Σχήμα 7.15: Η εσωτερική στεγανή γάστρα.



Σχήμα 7.16: Η στεγανή γάστρα και το υδροδυναμικό κάλυμμα μαζί με το μεγάλο πτερύγιο.

ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

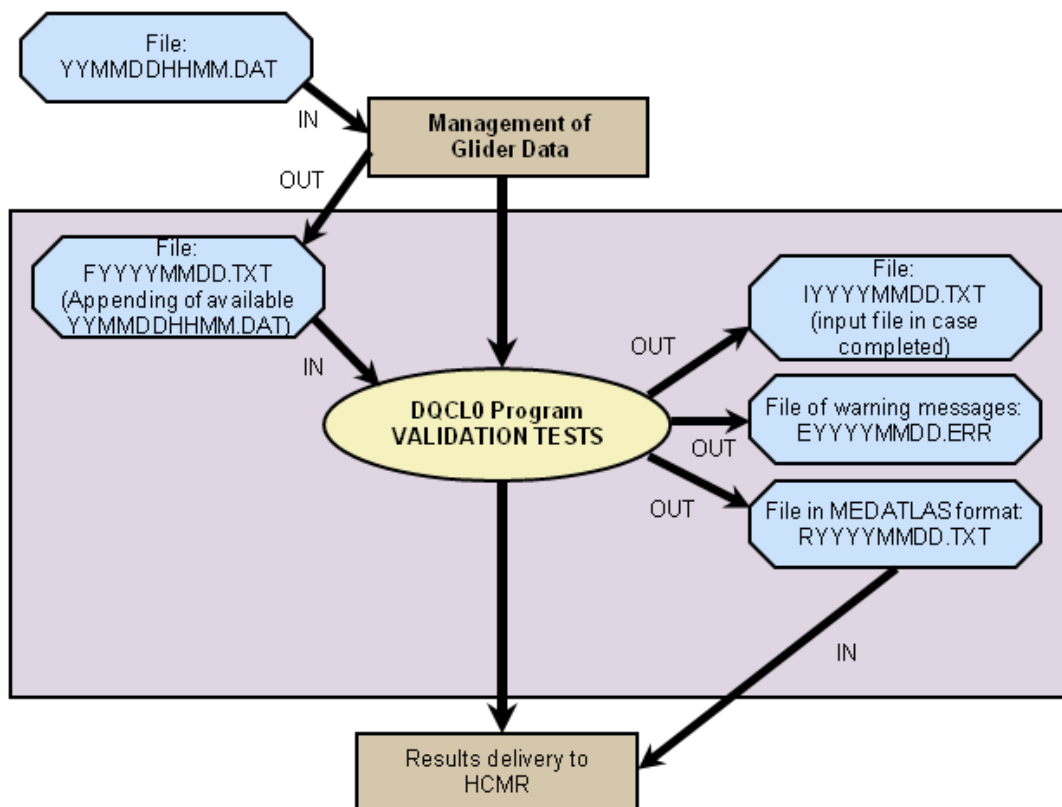
Η απαίτηση για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας συνεπάγεται την επιλογή ενός μικροεπεξεργαστή ο οποίος θα έχει δυνατότητα λειτουργίας “ύπνου” με ροή ρεύματος μικρότερο του mA καθώς και μεγάλο αριθμό διακοπών οι οποίοι θα ανοίγουν και θα κλείνουν τα διάφορα υποσυστήματα που χρειάζονται για να λειτουργήσει το υδρόπτερο. Επίσης απαιτείται και μεγάλος αριθμός σειριακών καναλιών επικοινωνίας, αναλογικών και ψηφιακών, για την ενοποίηση των αισθητήρων.

Η βασική μονάδα του μικροϋπολογιστή που θα χρησιμοποιεί το όχημα είναι ο Onset Corporation’s TT8 controller. Μία γενικότερη αναπαράσταση της λειτουργίας του χωρίς λεπτομέρειες στην περιγραφή φαίνεται στο σχήμα 7.18. Ο μικροεπεξεργαστής θα έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί σαν δεδομένα εισόδου μετρήσεις της θερμοκρασίας, της αγωγιμότητας, της πίεσης, των γωνιών διατοιχισμού, πρόνευσης και εκτροπής καθώς και τις συντεταγμένες της θέσης του οχήματος μέσω GPS. Θέτοντας σε εφαρμογή βρόγχους ελέγχου ανατροφοδότησης τα δεδομένα εξόδου θα χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της θέσης της κινούμενης μάζας και της πλευστότητας του οχήματος.

Όπως ήδη αναφέρθηκε το απόθεμα ενέργειας διατίθεται από δύο στήλες μπαταριών (10 V και 24 V) ώστε να παρέχεται ξεχωριστά η ενέργεια στους κινητήρες ενεργοποίησης και ξεχωριστά στους αναλογικούς και ψηφιακούς αισθητήρες. Οι μπαταρίες αυτές υπολογίζεται ότι φέρουν στους $0^{\circ}C$ 2161 και 7763 kJ ενέργεια αντίστοιχα.

Ο αισθητήρας κλίσης TCM5 3-axis compass module θα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των γωνιών διατοιχισμού, πρόνευσης, εκτροπής (roll, pitch, heading). Ο GPS δέκτης θα είναι ένας Trimble Marine (iQ) Interface Kit, SK – Lassen. Ένα δορυφορικό σύστημα μεταφοράς δεδομένων διπλής κατεύθυνσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τηλεμετρία των δεδομένων (επιστημονικών και πλοήγησης). Ένα τέτοιο σύστημα Iridium, Globalstar ή Thuraya θα χρησιμοποιείται από το υδρόπτερο ώστε να υπάρχει παγκόσμια κάλυψη. Τα δεδομένα θα μεταφέρονται σε υπολογιστή στην ξηρά μέσω αυτού του δικτύου και μιας διαδικασίας ποιοτικού ελέγχου [14]. Στο σχήμα 7.17 παρουσιάζεται ένα τέτοιο πρωτόκολλο ποιοτικού ελέγχου για τη μεταφορά των δεδομένων. Ένας πρώτος ποιοτικός έλεγχος (εύρος τιμών, συνέχεια, μέσες τιμές) θα γίνεται αρχικά στο ίδιο το

υδρόπτερο από τον επεξεργαστή του οχήματος. Στη συνέχεια τα δεδομένα θα συλλέγονται αρχικά από τον κατάλληλο σταθμό του κέντρου θαλασσιών ερευνών, όπου και θα γίνεται ένας δεύτερος ποιοτικός έλεγχος ώστε στη συνέχεια τα δεδομένα να προωθούνται στο κέντρο δεδομένων Coriolis της Ifremer [47], αφού πρώτα μετατραπούν σε medatlas format.

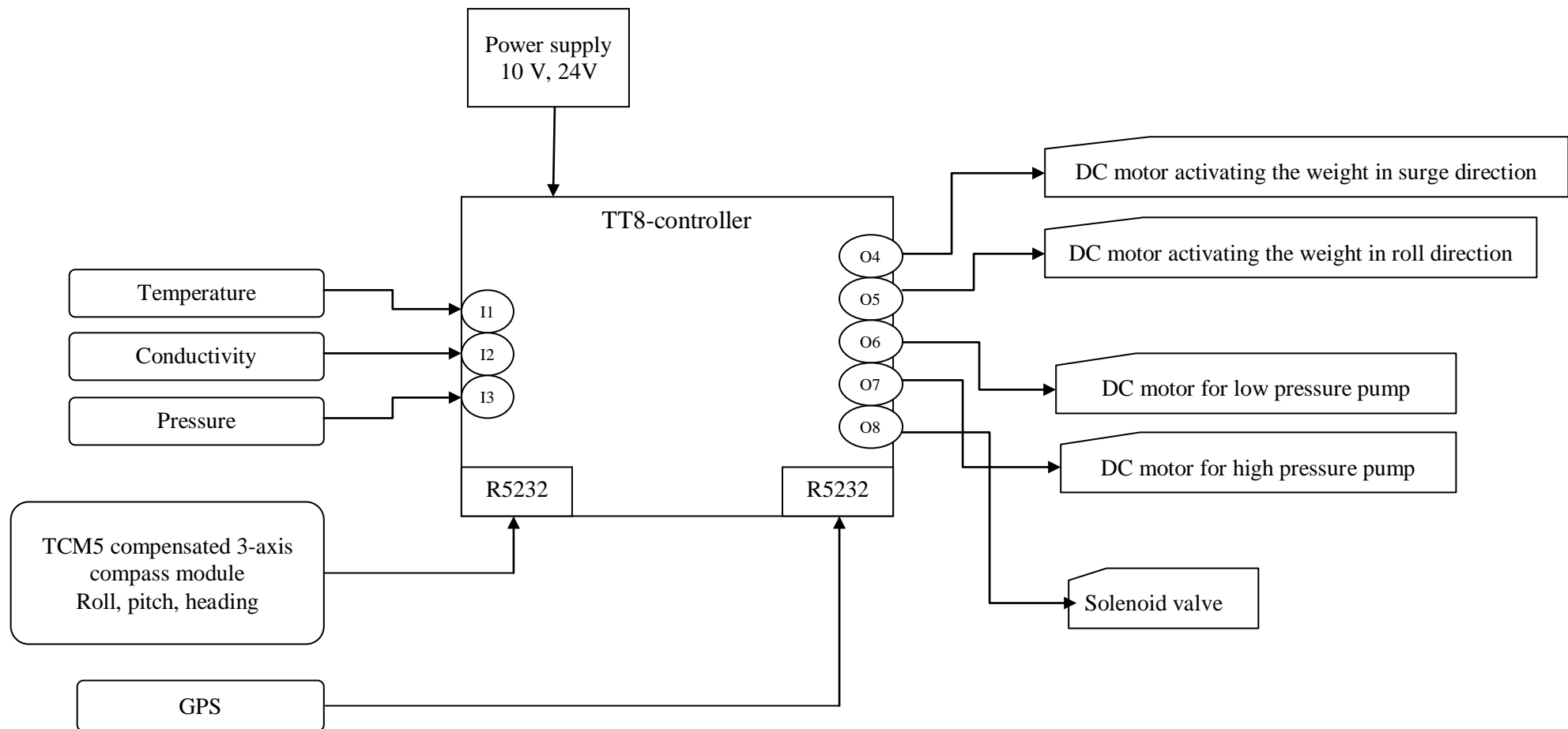


Σχήμα 7.17: Πρωτόκολλο ποιοτικού ελέγχου για τη μεταφορά των επιστημονικών δεδομένων.

Η κεραία GPS θα τοποθετηθεί στην άκρη του κονταριού της κεραίας που βρίσκεται στην πρύμνη του οχήματος. Τέλος τον βασικό επιστημονικό εξοπλισμό θα αποτελεί ένα CTD (Conductivity – Temperature – Depth) πακέτο για τη μέτρηση της αγωγιμότητας, θερμοκρασίας και πίεσης. Οι μετρήσεις του αισθητήρα πίεσης χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του οχήματος αλλά επιπλέον και για τον προσδιορισμό του βάθους στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις της θερμοκρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Επιπλέον θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες για τη μέτρηση διαλυμένου οξυγόνου, χλωροφύλλης – α και εξασθένισης φωτός.

Για τη μέτρηση της πίεσης επιλέχθηκε το αισθητήριο πίεσης SBE – 5 της Seabird Electronics, ενώ για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της ηλεκτρικής

αγωγιμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα της ίδιας εταιρίας SBE – 3 και SBE – 4 αντίστοιχα. Οι αισθητήρες αυτοί πρέπει να τοποθετηθούν εξωτερικά πάνω στο όχημα. Στην περίπτωση του Seaglider τοποθετούνται σε ένα μικρό περύγιο που βρίσκεται στην ράχη του οχήματος ανάμεσα στα δύο μεγάλα φτερά.



Σχήμα 7.18: Σχηματικό διάγραμμα δομής των ηλεκτρονικών του υποβρυχίου.

8. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στην εργασία αυτή έγινε ο σχεδιασμός ενός υποβρυχίου υδροπτέρου. Αρχικά παρουσιάστηκε το αναλυτικό μοντέλο όπου περιγράφονται οι δυναμικές εξισώσεις κίνησής του με βασικό τους στοιχείο τη σύζευξη της κίνησης του οχήματος με τις εσωτερικές μάζες. Το μοντέλο αυτό είναι γενικό και στη συνέχεια προσαρμόζεται στο όχημα που σχεδιάστηκε στο Ε.Μ.Π. Ο υδροδυναμικός σχεδιασμός του περιβλήματος έγινε με στόχο την βελτιστοποίηση του σχήματος ώστε να ελαχιστοποιείται η επαγόμενη αντίσταση. Μελετήθηκε η υδροδυναμική συμπεριφορά του οχήματος και τα χαρακτηριστικά του υιοθετήθηκαν από το αναλυτικό μοντέλο. Ο περιορισμός της κίνησης στο επίπεδο και η επίλυση των δυναμικών εξισώσεων οδήγησε στην εύρεση των βέλτιστων διαδρομών όπου ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ενέργειας. Σε συνδυασμό με ένα εύρωστο σύστημα ελέγχου το υδρόπτερο που σχεδιάστηκε είναι ικανό να πραγματοποιεί τις αποστολές του με ευελιξία και οικονομία στην κατανάλωση ενέργειας. Με αυτό το στόχο σχεδιάστηκαν οι αλγόριθμοι ανάδυσης, κατάδυσης και βρόγχοι ανατροφοδότησης για τη διόρθωση της πορείας ενώ προτείνονται για περαιτέρω εφαρμογή μέθοδοι βελτίωσης τέτοιων συστημάτων με τη βοήθεια του αναλυτικού μοντέλου.

Το αναλυτικό μοντέλο έχει εφαρμογή και στη σχεδίαση του οχήματος. Διερευνάται η σχέση μεταξύ διαφόρων παραμέτρων του συστήματος όπως ταχύτητα, μεταβλητή μάζα και μέγεθος του οχήματος. Έτσι προκύπτει μία βασική δομή στη διαδικασία του σχεδιασμού και κάποιες θεμελιώδεις αρχές για την επιλογή των χαρακτηριστικών του. Τέλος παρουσιάζονται οι τεχνολογικές του αρχές με το μηχανολογικό σχεδιασμό και μια προκαταρκτική περιγραφή των ηλεκτρονικών συνιστωσών.

Ένα επόμενο βήμα στην εργασία που έχει ήδη γίνει είναι η εφαρμογή στην πράξη με την κατασκευή του υποβρυχίου υδροπτέρου. Κάτι τέτοιο θα επιτρέψει σε πρώτη φάση τη διεξαγωγή πειραματικών αποστολών με σκοπό την επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου, αλλά και τη βελτίωσή του μέσω των συγκρίσεων πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων. Η συλλογή πειραματικών δεδομένων θα συμβάλει στην βελτίωση της υδροδυναμικής του συμπεριφοράς αλλά και της αποδοτικότητας κατά τη διάρκεια αποστολών.

Ευχαριστία

Το έργο αυτό υποστηρίχτηκε από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ) υπό τη σύμβαση 03ΕΔ 347 του προγράμματος ΠΕΝΕΔ 2003. Η συνδρομή αυτή εκτιμάται ιδιαίτερα.

Συγκεκριμένα υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης και συγχρηματοδοτήθηκε κατά:

- 80% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
- 20% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας

Δημοσιεύσεις

1. Bourma, P.D., Thanos, I.F., Mavrakos, S.A., (2009), Research and Development of an Autonomous Underwater Glider: Modelling, Design and Control, *International Symposium on Underwater Vehicles Technology*, 26 - 29 March, HCMR, Athens, Greece.
2. Bourma, P.D., Thanos, I.F., Mavrakos, S.A., (2008), Quality Control Protocol for an Autonomous Underwater Glider, *International Conference on Marine Data and Information Systems (IMDIS 2008)*, 31 Athens, Greece.
3. Bourma, P.D., Mavrakos, S.A., Hydrodynamic analysis and motions of an Underwater Glider, (submitted).
4. Bourma, P.D., Thanos, I.F., Chatjigeorgiou, I.K. and Mavrakos, S.A., (2007), Slowly varying motions of two interconnected floating structures considered as a two degree of freedom oscillator, *Proceedings of 8th HSTAM International Congress on Mechanics, Patras, 12 – 14 July, 2007*.
5. Chatjigeorgiou, I. K., Thanos, I.F., Bourma, P.D., Mazarakos T. P., and Mavrakos, S. A. (2006), Mooring System Dynamic Analysis for GIFT Floating Terminal in Survival Conditions, *25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2006)*, Hamburg, Germany.
6. Triantafyllou, M. S., Mavrakos, S. A., Bourma, P., Mazarakos Th., and Thanos, I. (2006), Model Scaling and Testing of a Floating LNG Terminal, MIT and NTU Athens, USA and Greece, *9th International Marine Design Conference (IMDC 2006)*, Ann Arbor, Michigan.

9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

A. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ EULER (QUATERNIONS)

Η περιγραφή του προσανατολισμού ενός στερεού σώματος μπορεί να γίνει εκτός από τις γωνίες Euler και με τις παραμέτρους Euler (quaternions). Αυτές οι παράμετροι προσφέρουν μία πιο κομψή και εύρωστη μέθοδο περιγραφής, είναι όμως πολύ περισσότερο αφηρημένη. Χρησιμοποιούν για την παραμετροποίηση του προσανατολισμού τέσσερις παραμέτρους και ένα περιορισμό. Με αυτή τη μέθοδο αποφεύγονται ιδιομορφίες που παρουσιάζονται με τη χρήση γωνιών Euler. Μπορεί να είναι καλύτερη επιλογή σε προσομοιώσεις όπου αναμένονται μεγάλες γωνιακές κινήσεις.

Σύμφωνα με το θεώρημα Euler για την περιστροφή στερεού σώματος, αυτή μπορεί να περιγραφεί καθορίζοντας έναν άξονα περιστροφής και τη γωνία περιστροφής ως προς αυτόν τον άξονα. Έστω $\bar{c} = (c_1, c_2, c_3)^T$ το μοναδιαίο διάνυσμα κατά μήκος του άξονα περιστροφής και δ η γωνία περιστροφής. Το αντίστοιχο μητρώο περιστροφής θα γραφεί χρησιμοποιώντας τον εκθετικό πίνακα $\mathbf{R} = e^{[\bar{c}^\times]\delta}$.

Το διάνυσμα quaternion ορίζεται ως εξής:

$$\bar{q} = \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\delta}{2} \\ c_1 \sin \frac{\delta}{2} \\ c_2 \sin \frac{\delta}{2} \\ c_3 \sin \frac{\delta}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\delta}{2} \\ \bar{c} \sin \frac{\delta}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Όπου το \bar{q} υπόκειται στον περιορισμό:

$$\bar{q}^T \bar{q} = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$$

Το αντίστοιχο μητρώο περιστροφής θα γραφτεί τότε με τη μορφή:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Τότε οι παράμετροι quaternions μπορούν να γραφούν συναρτήσει των γωνιών Euler ψ, θ, φ , ως εξής:

$$q_0 = \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \quad (\text{A.3})$$

$$q_1 = \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \quad (\text{A.4})$$

$$q_2 = \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} + \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \quad (\text{A.5})$$

$$q_3 = \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \quad (\text{A.6})$$

Οι γωνίες Euler βρίσκονται συναρτήσει των παραμέτρων quaternion ως εξής:

$$\tan \varphi = \frac{2(q_0 q_1 - q_2 q_3)}{(q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2)} \quad (\text{A.7})$$

$$\tan \theta = \frac{2(q_1 q_3 - q_0 q_2)}{2(q_0 q_1 + q_2 q_3) \sin \varphi + (q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \cos \varphi} \quad (\text{A.8})$$

$$\tan \psi = \frac{2(q_1 q_2 + q_0 q_3)}{(q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)} \quad (\text{A.9})$$

Οι ρυθμοί μεταβολής γι' αυτές τις παραμέτρους μπορούν να γραφούν συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας του σώματος $\bar{\omega} = (p, q, r)$ ως εξής:

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Η γωνιακή ταχύτητα τέλος δίνεται στο σωματοπαγές σύστημα συναρτήσει των ρυθμών μεταβολής των παραμέτρων quaternion ως εξής:

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} -q_1 & q_0 & q_3 & -q_2 \\ -q_2 & -q_3 & q_0 & q_1 \\ -q_3 & q_2 & -q_1 & q_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

*B. ΚΩΔΙΚΑΣ ΣΕ ΓΛΩΣΣΑ C ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ
ΠΡΟΝΕΥΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΝΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΚΥΚΛΟΥ
ΚΑΤΑΔΥΣΗΣ ΑΝΑΔΥΣΗΣ*

```
*****
**    pitch_control.c
*****

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <process.h>
#include <io.h>
#include <conio.h>

float th (float p);

void main (void)
{
    float threshold, saturation, t,p;
    float lower, upper, step,k, absdr;
    float pitch_measured, pitch_calculated,dpitch,dr;
    int signdr;
    k=10.;
    threshold=3.;
    saturation=100.;
    lower=0;
    upper=300;
    step=50;
    dr=0.;
    signdr=1;
    t=lower;

    do
    {
        t=t+step;
        printf("pitch_measured, p? \n");
        cscanf ("\n %f,%f",&pitch_measured,&p);

        pitch_calculated = th(p);

        dpitch=pitch_measured-pitch_calculated;
        dr=0;
        if (fabs(dpitch) >= threshold)
            dr=k*dpitch;
            absdr=fabs(dr);
            if(absdr != 0.)
                signdr= dr / fabs(dr);
            else
                signdr=1;
    }
```

```

        if (absdr >= saturation)
            dr=signdr*saturation;

        cprintf("\n dpitch = % 10.3f,dr = % 10.3f",dpitch,dr);
    }
    while (t<=upper);

}

float th(float p)
{
    int i;
    float p1;
    float theta0,thetatel,thetaact;
    int kat;
    theta0=30.;

/* clear the screen */
clrscr();

    kat=1;
    thetaact=-theta0;
// cprintf("\n Enter pressure \n");
//     cscanf("%f",&p);
    if(p <= -100.) exit(99);
    cprintf("\n % 10.3f % 10.3f,%d",thetaact,p,kat);

    if (p>=1.)
    {
        if(p>=50.)
        {
            kat=0;
            thetaact=theta0;
            cprintf("\n % 10.3f,% 10.3f,%d",thetaact,p,kat);
            while( !(p<=1.) )
            {
// cprintf("\n Enter pressure \n");
//     cscanf("%f",&p);
                if (p <= -100.) exit(98) ;
                cprintf("\n % 10.3f,% 10.3f,%d",thetaact,p,kat);
            }
        }
    }
    return thetaact;
}

```

C. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ROUTH

Ένα σύστημα είναι ασυμπτωτικά ευσταθές αν και μόνο αν όλες οι ρίζες $s_i, i=1,2,\dots,n$ του χαρακτηριστικού του πολυωνύμου $D(s)$ βρίσκονται εντός του ανοικτού αριστερού ημιεπιπέδου: $C^- := \{s \in C, \text{Re}(s) < 0\}$.

Άρα η ασυμπτωτική ευστάθεια ενός συστήματος με συνάρτηση μεταφοράς $H(s) = \frac{N(s)}{D(s)}$ μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εύρεσης των πόλων της $H(s)$ που είναι οι ρίζες της $D(s) = 0$.

Υπάρχουν όμως και τρόποι προσδιορισμού της ασυμπτωτικής ευστάθειας ενός συστήματος που δεν απαιτούν την εύρεση των ριζών της $D(s) = 0$. Ένας τέτοιος τρόπος είναι το κριτήριο ευστάθειας Routh το οποίο αποφαινεται για τη θέση των ριζών s_i ενός πολυωνύμου εντός του C^- αποφεύγοντας τον προσδιορισμό των s_i .

Έστω

$$a(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \in \mathbf{R}[s] \quad (\text{C.1})$$

Το πολυώνυμο $a(s)$ ονομάζεται ευσταθές αν όλες οι ρίζες

$$s_1, s_2, \dots, s_n \in C$$

της εξίσωσης

$$a(s_i) = 0$$

ικανοποιούν την

$$\text{Re}(s_i) < 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{C.2})$$

Μία αναγκαία αλλά όχι ικανή συνθήκη για την ικανοποίηση της (C.2) είναι η

$$a_i > 0, i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (\text{C.3})$$

Πίνακας Routh

Το κριτήριο Routh δίνει μία ικανή και αναγκαία συνθήκη. Ο πίνακας Routh είναι:

s^n	a_n	a_{n-2}	a_n	...
s^{n-1}	a_{n-1}	a_{n-3}	a_n	...
s^{n-2}	b_1	b_2	b_3	...
s^{n-3}	c_1	c_2	c_3	...
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	

$$b_1 = \frac{a_{n-1}a_{n-2} - a_n a_{n-3}}{a_{n-1}}, b_2 = \frac{a_{n-1}a_{n-4} - a_n a_{n-5}}{a_{n-1}}, \dots$$

$$c_1 = \frac{b_1 a_{n-3} - a_{n-1} b_2}{b_1}, c_2 = \frac{b_1 a_{n-5} - a_{n-1} b_3}{b_1}, \dots$$

Κριτήριο Routh

Ικανή και αναγκαία συνθήκη για να είναι το πολυώνυμο

$$a(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0$$

ευσταθές είναι

- $a_i > 0, i = 0, 1, 2, \dots$
- Τα στοιχεία της πρώτης στήλης του πίνακα Routh να είναι θετικά.

Πόρισμα

Αν $a_i > 0, i = 0, 1, 2, \dots$ τότε ο αριθμός των ριζών της $a(s) = 0$ που έχουν $\text{Re}(s_i) > 0$ ισούται με τον αριθμό αλλαγής πρόσημου των στοιχείων της πρώτης στήλης του πίνακα Routh.

D. ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΕΛΕΓΞΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΑΞΗΣ (CONTRLABILITY RANK CONDITION)

Αν χρειάζεται να διαπιστωθεί εάν ένα σύστημα είναι ελέγξιμο χωρίς να προσδιοριστούν ποιες συνιστώσες του διανύσματος κατάστασης είναι ελέγξιμες, τότε χρησιμοποιείται το κριτήριο ελεγχσιμότητας τάξης (controllability rank condition) το οποίο χρησιμοποιεί τις μήτρες A και B του συστήματος αυτές καθαυτές.

Το σύστημα:

$$\dot{x} = Ax - Bu, \quad u = [u_1, u_2, \dots, u_m]^T$$

είναι ελέγξιμο αν και μόνο αν η $n \times nm$ μήτρα:

$$P = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (D.1)$$

η οποία καλείται μήτρα ελεγχσιμότητας, έχει τάξη n (ίση με τη διάσταση του διανύσματος κατάστασης), δηλαδή τότε και μόνο τότε εάν:

$$\text{τάξη}P = n$$

Κριτήριο παρατηρησιμότητας τάξης:

Αντίστοιχο είναι και το κριτήριο παρατηρησιμότητας για τον έλεγχο της παρατηρησιμότητας ενός συστήματος.

Το σύστημα:

$$\dot{x} = Ax - Bu, \quad y = Cx + Du$$

Όπου $x \in \mathbb{R}^n$, $u \in \mathbb{R}^m$ και $y \in \mathbb{R}^q$ είναι ολικά παρατηρήσιμο τότε και μόνο τότε εάν η παρακάτω $qn \times n$ μήτρα S έχει τάξη n . Η μήτρα S ονομάζεται μήτρα παρατηρησιμότητας.

$$S = \begin{bmatrix} C \\ \dots \\ CA \\ \dots \\ \vdots \\ \dots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (D.2)$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

1. Abbott, I.H., Von Doenhoff, A.E., Stivers, L.S., (1945), Summary of Airfoil Data, NACA Rep. 824
2. Αντωνακάκης, Δ.Κ., (2002), *Αριθμητική προσομοίωση ροών σε ταλαντούμενες αεροτομές*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.
3. AOSN, (2008), *Autonomous Ocean Sampling Network*, <http://www.mbari.org/aosn>.
4. Arena, A.V., Mueller, T.J., (1980), On the laminar separation, transition and turbulent reattachment of low Reynolds number flows near the leading edge airfoils, *AIAA J.*, Vol. **18**, 747 – 753.
5. Bachmayer, R., Young, B., Williams, C., Bishop, C., Knapp, C., Foley, J., (2006), Development and Deployment of Ocean Gliders on the Newfoundland Shelf, *UVS Canada Conference*, Montebello, Quebec.
6. Bachmayer, R., Graver, J. G., and Leonard, N. E., (2003), Glider Control: A close look into the current glider controller structure and future developments, *Proceedings of OCEANS 2003*, Vol. **2**, 951 – 954.
7. Bachmayer, R., Leonard, N. E., Graver, J. G., Fiorelli, E., Bhatta, P. and Paley, B. (2004), Underwater Gliders: Recent Developments and Future Applications, *IEEE International Symposium on Underwater, UT '04*, 195-200.
8. Bender, A., Steinberg, D.M., Friedman, A.L., William, S.B., (2008), Analysis of an Autonomous Underwater Glider, *Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation ACRA2008*, Canberra, Australia.
9. Bhatta, P., (2006), *Nonlinear Stability and Control of Gliding Vehicles*, PhD Thesis, Princeton University, New Jersey.
10. Bhatta P., Fiorelli, E., Lekien, F., Leonard, N., E., Paley, D.A., Zhang, F., Bacmayer, R., Davis, R. E., Fratantoni, D. M., Sepulchre, R., (2005), Coordination of an Underwater Glider fleet for adaptive ocean sampling, *Proceedings of International Workshop on Underwater Robotics*, International Advanced Robotics Programmed (IARP), Genoa, Italy, 61 – 69.
11. Bhatta , P. and Leonard, N. E., (2002), Stabilization and Coordination of Underwater Gliders, *Proceedings of 41st IEEE Conference on Decision and Control*, Las Vegas, Nevada, USA, Vol.2, 2081 – 2086.
12. Bishop, J. K. B., Wood, T. T., Davis, R. E., Sherman, J. T., (2004), Robotic Observations of Enhanced Carbon Biomass and Export at 55°S During SOFeX, *SCIENCE*, **304**, 417-420.
13. Bluefin Glider SPRAY
14. Bourma, P.D., Thanos, I.F., Mavrakos, S.A., (2008), Quality Control Protocol for an Autonomous Underwater Glider, *International Conference on Marine Data and Information Systems (IMDIS 2008)*, Athens, Greece.
15. Chyba, M., Harberkorn, T., Smith, R.N., Choi, S.K., (2008), Design and Implementation of time efficient trajectories for autonomous underwater vehicles, *Ocean Engineering*, Vol.35, No1, 63 – 76.
16. Chyba, M., Leonard, N.E., Sontag, E.D., (2001), Optimality for underwater vehicles, *Proceedings of 41st IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, Florida USA, 4204-4209.

17. Correia, M., Dias, P., Fraga, S., Gomes, R., Goncalves, R., Madureira, L., Pereira, F. L., Picas, R., Pinto, J., Santos, A., Sousa, A., Bor, (2005), Operations and control of unmanned underwater vehicles, *robotica2005*.
18. Craven, P.J., Sutton, R. and Burns R.S., (1998), Control strategies for unmanned underwater vehicles, *Journal of Navigation*, Vol. **51**, No. **1**, 79-105.
19. Curtin, Th. B., Crimmins, D. M., Curcio, J., Benjamin, M. and Roper, Ch., (2005), Autonomous Underwater Vehicles: Trends and Transformations, *Marine Technology Society Journal*, Vol. **39**, No. **3**, 65-75.
20. Davis, R. E. and Sherman, J. T., (2005), Deep Autonomous Gliders for the "Autonomous Ocean Sampling Network II" Experiment, *Scripps Institution Oceanography, La Jolla CA*.
21. Davis, R.E., Eriksen, C.C. and Jones, C.P., (2003), Autonomous Buoyancy-driven Underwater Gliders, *The Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*, G. Griffiths, ed., Taylor and Francis, London, 37-58.
22. Davis, R.E., Webb, D.C., Regier, L.A., and Dufour, J., (1991), The Autonomous Lagrangian Circulation Explorer (ALACE), *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. **9**, 264-285.
23. Eriksen C.C., Osse, T.J., Light, R.D., Wen, T., Lehman, T.W., Sabin, P.L., Ballard, J.W. and Chiodi, A.M., (2001), Seaglider: A Long-Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. **26**, No. **4**, 424-436.
24. Eriksen, C.C., (2003), Autonomous Underwater Gliders, Technical report, *Prepared for the Autonomous and Lagrangian Platforms and Sensors (ALPS) Workshop, Sea Lodge, La Jolla CA*
25. Eriksen, C.C., Perry, M.J., (2009), The Nurturing of Seagliders, *Oceanography*, Vol. **22**, No. **2**, 146 – 157.
26. Etkin, B., Reid, L.D., (1996), *Dynamics of Flight Stability and Control*, John Wiley & Sons, Inc.
27. Etkin, T., (1959), *Dynamics of flight*, John Wiley and Sons, New York and London.
28. Feldman, J., (1979), Revised Standard Submarine Equations of Motion, Technical report, David W. Taylor Naval Ship Research and Development Centre.
29. Fluent, (2006), *Fluent 6.3 User 's Guide*, <http://www.fluent.com/>.
30. Fossen, T.I., Blanke, M., (2000), Nonlinear Output Feedback Control of Underwater Vehicle Propellers Using Feedback Form Estimated Axial Flow Velocity, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. **25**, No. **2**, 241 – 254.
31. Fossen, T.I., (1995), *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley and Sons, New York.
32. Fossen, T.I., (1991), *Nonlinear Modelling and Control of Underwater Vehicles*, PhD thesis, Norwegian Institute of Technology (NTH).
33. Fossen, T.I., (2000), Nonlinear Feedback Control of Underwater Vehicle Propellers Using Feedback Form Estimated Axial Flow Velocity, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. **25**, No. **2**, 241-255.
34. Galea, A.M., (1999), *Optimal Path Planning and High Level Control of an Autonomous Gliding Underwater Vehicle*. Master' s thesis, Massachusetts Institute of Technology.
35. Geisbert, J.S., (2007) *Hydrodynamic Modeling for Autonomous Underwater Vehicles Usinng Computational and Semi – Empirical Methods*, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

36. Graver, J.G., (2005) *Underwater gliders: dynamics control and design*, PhD Thesis, Princeton University, New Jersey.
37. Graver, J.G., Bachmayer, R., and Leonard, N. E., (2003) Underwater Glider Model Parameter Identification, *Proceedings of 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST)*, Durham NH.
38. Graver, J.G. and Leonard, N. E., (2001) Underwater Glider Dynamics and Control, *Proceedings of 12th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST)*, Durham NH.
39. Graver, J.G., Liu, J., Woosley, G., Leonard, N.E., (1998), Design and Analysis of an Underwater Vehicle for Controlled Gliding, *Conference of Information Science and Systems, Princeton*.
40. Griffiths, G., Jones, C.P., Ferguson, J., Bose, N., (2007), Undersea Gliders, *Journal of Ocean Technology*.
41. Griffiths, G., Glider and Autonomous Underwater Vehicle Observing Systems, Southampton Oceanography Centre, Southampton, UK.
42. Griffiths, G., Edwards, I., (2003), AUVs: designing and operating next generation vehicles, *Building the European capacity in operational oceanography. Proceedings of the Third International Conference on EuroGOOS, 3-6 December 2002, Athens, Greece*. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Oceanography Series **69**, 229-236.
43. Hansen, R.J., Hoyt, J.G., (1984), Laminar – to – Turbulent Transition on a Body of Revolution with an Extended Favorable Pressure Gradient Forebody, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. **106**, 202-210.
44. Hazra, S.B., Jameson, A., (2007), Aerodynamic Shape Optimization of Airfoils in Ultra – Low Reynolds Number Flow using Simultaneous Pseudo – Time Stepping, Aerospace Computing Lab (ACL) Report.
45. Hess, J.L., et al (1975), On the Problem of Shaping an Axisymmetric Body to Obtain Low Drag at Large Reynolds Numbers, Technical report, Office of Naval Research.
46. Hines, S., West, P., and Headlee, D., (2009), Seaglider monitors waters from Arctic during record – breaking journey under ice, <http://uwnews.washington.edu/ni/article.asp?articleID=49154>.
47. Ifremer's Coriolis data centre, <http://www.ifremer.fr/coriolis/>.
48. iRobot Corporation Website, (2009), iRobot Seaglider, <http://www.irobot.com/sp.cfm?pageid=393>.
49. Jenkins, S.A., Humphreys, D.E., Sherman, J., Osse, J., Jones, C., Leonard, N.E., Bachmayer, R., Graver, J., Clem, T., Carroll, P., Davis, P., Berry, J., Worley, P. and Wasyl, J., (2003), Underwater Glider System Study, Technical report, Office of Naval Research.
50. Kim, H., Woolsey, C.A., (2004), Directional Control of a Streamlined Underwater Vehicle by Feedback Passivation, *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Boston, Massachusetts 2998 – 3003.
51. Lamb, H., *Hydrodynamics*, Dover, New York, 6th edition, 1932.
52. Larsen, M.B., (2000), High Performance Doppler – Inertial Navigation – Experimental Results, *Proceedings of Oceans 2000 MTS/ IEEE conference*, Providence, Vol.2, 1449 – 1456.
53. Larsen, M. B., (2006), The Autonomous Redundant Navigation System of an AUV for Mine Counter Measures, *Proc. Of Undersea Defence Technology Conference and Exhibition UDT Europe 2006*.

54. Leonard, N.E., (1996), Stabilization of Steady Motions of an Underwater Vehicle, *35st IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan.
55. Leonard, N.E., (1997), Stability of a bottom – heavy underwater vehicle, *Automatica* Vol. **33**, No. **3**, 331 – 346.
56. Leonard, N.E. and Fiorelli, L., (2001) Virtual Leaders, Artificial Potentials and Coordinated Control of Groups, *Proceedings of 40th IEEE conference Decision and Control*, 2968 – 2973.
57. Leonard, N.E. and Graver, J.G., (2001), Model-Based Feedback Control of Autonomous Underwater Gliders, *IEEE Jurnal of Oceanic Engineering*, Vol. **26**, No. **4**, 633-645.
58. Lutz, Th., Wagner, S., (1998), Numerical Shape Optimization of Natural Laminar Flow Bodies, *21st ICAS Congress*, Melbourne.
59. Lutz, Th., Wagner, S., (1998), Drag Reduction and Shape Optimization of Airship Bodies, *AIAA Lighter-Than-Air Systems Technology Conference No 12*, San Fransisco Vol. **35**, No. **3**, 345-351.
60. Mahmoudian, N., (2009), *Efficient Mottion Planning and Control for Underwater Gliders*, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
61. Mahmoudian, N., Geisbert, J. and Woolsey, C.A., (2007), Dynamics and Control of Underwater Gliders 1: Steady Motions, Technical Report VaCAS – 2007 – 01, Virginia Center of Autonomous Systems, Virginia Tech, Blacksburg, VA.
62. Meirovitch, L., (1970), *Methods of Analytical Dynamics*, McGraw – Hill Book Company.
63. Menter, F.R., (1994) Two – equation Eddy – Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA Jurnal*, Vol. **32**, 1598 – 1605.
64. Neumann, B.J., (1983), Optimum Forebody Shaping for Axisymmetric Submersibles with Turbulent Boundary Layers and BLC Afterbodies, Technical report, David W. Taylor Naval Ship Research and Development Centre.
65. Paley, D. A., Zhang, F., and Leonard, N. E.,(2006), Cooperative Control for Ocean Sampling: The Glider Coordinated Control System, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, draft.
66. Parsons, J.S., Goodson, R.E., Goldschmied, F.R., (1974), Shaping of Axisymmetric Bodies for Minimum Drag in Incompressible Flow, *Jurnal of Hydronautics*, Vol. **8**, No. **3**, 100-107
67. Parsons, J.S., (1972), *The Optimum Shaping of Axisymmetric Bodies for Minimum Drag in Incompressible Flow*, Ph.D. thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue Univ., Lafayette, Ind.
68. Reddy, J.N., Rasmussen, M.L., (1982), *Advanced Engineering Analysis*, John Wiley and Sons.
69. Rudnick, D. L., Davis, R. E, Eriksen, C. C, Fratantoni, D. M. and Perry, M. J., (2004), Underwater Gliders for Ocean Research, *Marine Technology Society Jurnal*, Vol. **38**, No **1**, 48-59.
70. Roemmich, D., Riser, S., Davis, R. and Desaubies, Y., (2004), Autonomous Profiling Floats: Workhorse for Broad-scale Ocean Observations, *Marine Technology Society Jurnal*, Vol. **38**, No **1**, 31-39.
71. Sherman, J., Davis, R. E., Owens, W. B., Valdres, J., (2001), The Autonomous Underwater Glider “Spray”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. **26**, No. **4**, 437-446.

72. Showalter, S., (2004), The Legal Status of Autonomous Underwater Vehicles, *Marine Technology Society Journal*, Vol. **38**, No 1, 80-83
73. Simonetti, P., (1992), *Slocum Glider: Design and 1991 Field Trials*, <http://www.webbresearch.com/slocumglider.aspx>.
74. Smith, T., R., Hanssmann, H., Leonard, N., E., (2001), Orientation Control of Multiple Underwater Vehicles with Symmetry – Breaking Potentials, *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, 4598 – 4603.
75. Society of Naval Architects and Marine Engineers, (1952), Nomenclature for treating the motion of a submerged body through fluid, SNAME Technical and Research Bulletin No.1 – 5.
76. Stommel H., (1989). *The Slocum Mission*. *Oceanography* 2:22-25.
77. Synge, J.L., Griffith, B.A., (1970), *Principles of Mechanics*, McGraw – Hill Kogakusha.
78. Tomoda Y., Kawaguchi, K., Ura, T., and Kobayashi, H.,(1993), Development and sea trials of a shuttle type AUV Albac, *Proceedings of 8th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, NH, 7 – 13.
79. Triantafyllou, M.S., Hover, F.S., (2003), *Maneuvering and Control of Marine Vehicles*, Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, USA.
80. Τσαγγάρης, Σ., (1995), *Μηχανική των Πευστών*, Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα.
81. Tzabiras, G.D., (1992) A numerical investigation of the Reynolds scale effect on the resistance of body revolution, *Ship Technology Research*, Vol. **39**, 28-44.
82. Wadlin, K.L., Shuford, Ch.L., McGehee, J.R., (1955), A Theoretical and experimental investigation of the lift and drag characteristics of hydrofoils at subcritical and supercritical speed, NACA Rep. 1232.
83. Webb, D.C., Simonetti, P.J. and Jones, C.P., (2001), SLOCUM: An Underwater Glider Propelled by Environmental Energy, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. **26**, No. **4**, 447-452.
84. Woolsey, C., A., Leonard, N., E., (2002), Stabilizing underwater vehicle motion using internal rotors, *Automatica*, Vol. **38**, 2053 – 2062.
85. Woolsey, C., A., Leonard, N., E., (2002), Moving Mass Control for Underwater Vehicles, *Proceedings of the American Control Conference*, Anchorage, 2824 – 2829.