



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ & ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση και Ανάπτυξη Διατάξεων  
Πτερυγίου Κυματοειδούς Κίνησης

Γκλίβα Ρόζα

Επιβλέπων: Δρ. Σφακιωτάκης Μιχάλης

Ηράκλειο Κρήτης, Απρίλιος 2016





ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ & ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Σχεδίαση και Ανάπτυξη Διατάξεων Πτερυγίου Κυματοειδούς Κίνησης

Γκλίβα Ρόζα

Επιβλέπων: Δρ. Σφακιωτάκης Μιχάλης

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ..... /04/2016

Δρ. Σφακιωτάκης Μιχαήλ, Επίκουρος Καθηγητής .....  
(Υπογραφή)

Δρ. Φασουλός Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής .....  
(Υπογραφή)

Δρ. Πετούσης Μάρκος, Επιστημονικός Συνεργάτης .....  
(Υπογραφή)

Ηράκλειο Κρήτης, Απρίλιος 2016



## Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο ΤΕΙ Κρήτης, στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών "Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής", από τον Μάρτιο του 2014 μέχρι τον Μάρτιο του 2016, και αποτελεί μέρος του Υποέργου 27 του προγράμματος Αρχιμήδης ΙΙΙ του ΤΕΙ Κρήτης.

Κατ αρχήν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας αυτής, Δρ. Σφακιωτάκη Μιχάλη, για την ευκαιρία που μου παρείχε να ασχοληθώ με το αντικείμενο αυτό, και για την καθοδήγηση, τη συμπαράσταση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αλλά και τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια της εργασίας και των σπουδών μου στο ΤΕΙ Κρήτης.

Για την πολύτιμη βοήθεια και συμπαράσταση που παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές Δεδούση Κώστα, Βεϊσάκη Ελένη, Αράπη Μανώλη και Καλαντζή Σπύρο αλλά και το φοιτητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του ΤΕΙ Κρήτης Καλλούδη Μανώλη.

Για τη βοήθεια που παρείχαν κατά τη διαδικασία κατασκευής των μηχανολογικών εξαρτημάτων των διατάξεων στις εργαλειομηχανές CNC του ΤΕΙ Κρήτης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φοιτητές του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΤΕΙ Κρήτης, Μουντάκη Νίκο και Κόντε Γιώργο.

Επίσης, για τη συνεισφορά τους κατά το πειραματικό στάδιο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φοιτητές του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του ΤΕΙ Κρήτης, Μουντουφάρη Μηνά, Σεβαστάκη Πασχάλη και Σπυρόπουλο Παναγιώτη.

Για τη βοήθεια, τις συμβουλές τους και τις εποικοδομητικές συζητήσεις μας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και προπτυχιακούς συμφοιτητές Μιχάλη Γιώργο και Παπαδόπουλο Αλέξανδρο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους γονείς μου που με παρότρυναν να συνεχίσω τις σπουδές μου και δε σταμάτησαν ποτέ να με στηρίζουν.

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον για εφαρμογές που αφορούν στην επιστημονική μελέτη, στην προστασία και στη βιώσιμη εκμετάλλευση των θαλάσσιων φυσικών πόρων. Η ανάγκη για απομακρυσμένη πρόσβαση στο βυθό οδήγησε στην ανάπτυξη μη-επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων (Unmanned Underwater Vehicles, UUVs), χαρακτηριστικά παραδείγματα των οποίων αποτελούν τα τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα (Remotely Operated Vehicles, ROVs) και τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (Autonomous Underwater Vehicles, AUVs).

Αρκετές εκ των εφαρμογών αυτών (π.χ. έλεγχος και συντήρηση υποθαλάσσιων κατασκευών) παρουσιάζουν αυξημένες απαιτήσεις εκτέλεσης ελιγμών ακριβείας από το υποβρύχιο όχημα, στις οποίες τα συμβατικά μέσα πρόωσης αδυνατούν να ανταποκριθούν πλήρως. Η ανάπτυξη βιομιμητικών μηχανισμών πρόωσης, αντλώντας έμπνευση από την κίνηση θαλάσσιων οργανισμών μπορεί να προσδώσει στα υποβρύχια ρομπότ μεγαλύτερη ικανότητα εκτέλεσης ελιγμών, αυξημένο βαθμό ενεργειακής απόδοσης και μειωμένο ακουστικό ίχνος. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερου ενδιαφέροντος είναι οι μηχανισμοί κίνησης που απαντώνται στα μαχαιρόψαρα, τις σουπιές, τα καλαμάρια και τα σαλάχια, είδη που μετακινούνται στο νερό με καταπληκτική ευελιξία μέσω κυματοειδών κινήσεων των εύκαμπτων πλευρικών, ραχιαίων ή εδρικών πτερυγίων που φέρουν στο σώμα τους.

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η ανάπτυξη πειραματικών διατάξεων με μηχανισμούς πτερυγίου και η μελέτη ενσωμάτωσής τους σε υποβρύχια οχήματα για την παραγωγή πρόωσης. Σε πρώτο στάδιο κατασκευάστηκαν δύο πειραματικές διατάξεις με μηχανισμούς πτερυγίου που αποτελούνται από πλήθος αυτόνομα οδηγούμενων ακτίνων, οι οποίες είναι διασυνδεδεμένες μέσω τμήματος ελαστικής μεμβράνης. Οι μηχανισμοί αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για την πειραματική αποτίμηση και μελέτη τόσο των κινηματικών αλλά και των δυναμικών χαρακτηριστικών της κίνησής τους, με βασικά κριτήρια αξιολόγησης την πιστή αναπαραγωγή των επιθυμητών προφίλ κίνησης και κατά συνέπεια την παραγωγή προωστικών δυνάμεων. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση των μηχανισμών αυτών οδήγησαν στην ανάπτυξη, τον έλεγχο και την πειραματική αποτίμηση ενός υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος, η πρόωση του οποίου βασίζεται σε ένα ζεύγος πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης. Για την παραγωγή των μοτίβων κίνησης των δύο πτερυγίων χρησιμοποιείται γεννήτρια κεντρικού πρότυπου ρυθμού (Central Pattern Generator, CPG), ενώ οι στρατηγικές ελέγχου που υλοποιήθηκαν αποσκοπούν στον έλεγχο του προσανατολισμού του ρομποτικού οχήματος, με χρήση ενός συστήματος προσδιορισμού προσανατολισμού (AHRS).

Σε γενικές γραμμές, οι διατάξεις που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής, καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των μηχανισμών πτερυγίου όσον αφορά στην παραγωγή πρόωσης. Επίσης, προκύπτουν κάποια ιδιαίτερα ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των κινηματικών παραμέτρων των πτερυγίων, τόσο στην παραγωγή ώσης, αλλά και γενικότερα στην ποιότητα κίνησης του ρομποτικού οχήματος.

## Summary

In recent years, the research and scientific community has shown considerable interest in the study, the protection, and the sustainable exploitation of the oceans' natural resources. This need for remote underwater access, has led to the development of Unmanned Underwater Vehicles (UUVs), characteristic examples of which are the Remotely Operated Vehicles (ROVs) and the Autonomous Underwater Vehicles (AUVs).

There is an increasing demand for UUVs in applications that include maneuvering, stable station keeping and orientation control in the presence of water currents. However, the traditional propulsion methods exhibit diminished performance in these areas. To address this issue, research has turned to the development of novel, bio-inspired propulsion mechanisms which are based on the morphology and functionality of the undulating fins of marine species such as electric eels, triggerfish, rays and cuttlefish.

In this context, the primary aim of this thesis is the development and study of experimental undulatory fin mechanisms with the possibility of integrating them in UUVs.

Initially, two experimental setups were developed, involving undulatory fin mechanisms that are comprised of individually actuated fin-rays, interconnected by an elastic membrane. These prototypes were used in the experimental evaluation and study of the kinematics and dynamic characteristics of undulatory fin propulsion. The main assessment criteria were the faithful reproduction of the desired motion profiles and, consequently, the propulsive force generation. The findings from these studies, led to the development, control and experimental evaluation of an underwater robotic vehicle that employs for propulsion a pair of laterally mounted undulatory fins. The two fins' desired motion patterns are produced via two Central Pattern Generator networks, and the robot's orientation on the x-y plane is achieved through closed loop control schemes using an AHRS unit.

Overall, the experimental setups that were developed as part of this thesis, demonstrate the efficacy of undulatory fins for propulsion generation and highlight the effect of the various kinematic parameters on the generated thrust.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>4</b>
1.1	Ερευνητικό πλαίσιο . . . . .	4
1.2	Βιβλιογραφική ανασκόπηση . . . . .	7
1.2.1	Παραγωγή κύματος . . . . .	7
1.2.2	Πειραματικές διατάξεις μηχανισμών πτερυγίου . . . . .	11
1.2.3	Έλεγχος κίνησης . . . . .	13
1.3	Βιορομποτικά πρωτότυπα του ΤΕΙ Κρήτης . . . . .	15
1.4	Συμβολή της παρούσας εργασίας . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Πρωτότυπο Ρομποτικού Πτερυγίου Κυματοειδούς Κίνησης</b>	<b>18</b>
2.1	Γενική περιγραφή . . . . .	19
2.2	Μηχανολογική σχεδίαση και κατασκευή πρωτοτύπου . . . . .	20
2.3	Σερβοκινητήρες οδήγησης ακτίνων . . . . .	21
2.3.1	Προστασία σερβοκινητήρων . . . . .	24
2.4	Αρχιτεκτονική ελέγχου και ηλεκτρονικά υποσυστήματα . . . . .	25
2.4.1	Μονάδα ελέγχου χαμηλού επιπέδου . . . . .	26
2.4.2	Αισθητήρας ρεύματος . . . . .	27
2.4.3	Αισθητήρας απόστασης . . . . .	28
2.4.4	Αισθητήρας δύναμης . . . . .	28
2.4.5	Κάρτα πρόσληψης δεδομένων (DAQ) . . . . .	29
2.4.6	Μονάδες τροφοδοσίας . . . . .	29
2.4.7	Κυτίο διασύνδεσης και συλλογής σημάτων . . . . .	29
2.5	Μοντελοποίηση και έλεγχος του πτερυγίου . . . . .	30
2.5.1	Δυναμικό μοντέλο του πτερυγίου . . . . .	31
2.5.2	Ελεγκτής κίνησης των ακτίνων του πτερυγίου . . . . .	34
2.5.3	Ταυτοποίηση των παραμέτρων της μονάδας κίνησης ακτίνας . . . . .	34
2.6	Στρατηγικές παραγωγής κίνησης . . . . .	36
2.6.1	Απευθείας παραγωγή του οδεύοντος κύματος . . . . .	36
2.6.2	Παραγωγή του κύματος μέσω CPG . . . . .	37
2.7	Υλοποίηση ελέγχου κίνησης . . . . .	39
2.7.1	Λειτουργία κατανεμημένου ελέγχου θέσης ακτίνων . . . . .	40
2.7.2	Λειτουργία κεντρικού ελέγχου θέσης ακτίνων . . . . .	44
2.8	Πειραματική αποτίμηση του ρομποτικού πτερυγίου . . . . .	45
2.9	Πειραματική διάταξη ελάσσονος μηχανισμού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης . . . . .	50



2.9.1	Μηχανολογικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα . . . . .	50
2.9.2	Έλεγχος κίνησης . . . . .	51
2.9.3	Πειραματική μεθοδολογία και αποτίμηση . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Το Υποβρύχιο Ρομποτικό Όχημα SQUIDBOT-mini</b>	<b>60</b>
3.1	Γενική περιγραφή . . . . .	61
3.2	Μηχανολογική σχεδίαση-κατασκευή . . . . .	61
3.2.1	Περιγραφή εξαρτημάτων . . . . .	63
3.2.2	Στεγάνωση . . . . .	65
3.2.3	Κατασκευή - κατεργασίες . . . . .	68
3.3	Ηλεκτρονικά υποσυστήματα . . . . .	69
3.3.1	Αρχιτεκτονική ελέγχου . . . . .	70
3.3.2	Μονάδα ελέγχου . . . . .	70
3.3.3	Αδρανειακό σύστημα προσδιορισμού προσανατολισμού - AHRS . . . . .	71
3.3.4	Ανιχνευτής εισροής υδάτων . . . . .	73
3.3.5	Μονάδα ασύρματης επικοινωνίας . . . . .	73
3.3.6	Τροφοδοσία . . . . .	73
3.3.7	Βοηθητικές πλακέτες επέκτασης . . . . .	74
3.3.8	Βαθμονόμηση σερβοκινητήρων . . . . .	75
3.4	Λογισμικό ελέγχου . . . . .	76
3.4.1	Καταστάσεις ρύθμισης παραμέτρων . . . . .	77
3.4.2	Καταστάσεις λειτουργίας πρόωσης ανοιχτού βρόχου . . . . .	78
3.4.3	Καταστάσεις λειτουργίας πρόωσης με έλεγχο κλειστού βρόχου . . . . .	79
<b>4</b>	<b>Έλεγχος Κίνησης του Υποβρύχιου Ρομπότ SQUIDBOT-mini</b>	<b>81</b>
4.1	Παραγωγή του οδεύοντος κύματος . . . . .	81
4.2	Πειραματική μεθοδολογία . . . . .	83
4.3	Σχεδίαση και αποτίμηση στρατηγικών ελέγχου κίνησης . . . . .	85
4.3.1	Πρόωση σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου . . . . .	86
4.3.2	Πρόωση με έλεγχο κλειστού βρόχου της πορείας κίνησης . . . . .	88
4.3.2.1	Διερεύνηση της επίδρασης της συχνότητας κυμάτωσης . . . . .	90
4.3.2.2	Διερεύνηση της επίδρασης της σχετικής φάσης κυμάτωσης . . . . .	92
4.3.2.3	Πρόωση με αλλαγή του αρχικού προσανατολισμού του οχήματος . . . . .	93
4.3.3	Επιτόπια περιστροφή με έλεγχο κλειστού βρόχου του προσανατολισμού . . . . .	95
4.3.4	Δοκιμές σε θαλάσσιο περιβάλλον . . . . .	98
<b>5</b>	<b>Σχεδίαση του Υποβρύχιου Ρομποτικού Οχήματος SQUIDBOT</b>	<b>100</b>
5.1	Περιγραφή μηχανικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων . . . . .	101
5.1.1	Σχεδίαση-Α: Ρομποτικά πτερύγια με σερβοκινητήρες Savox . . . . .	105
5.1.2	Σχεδίαση-Β: Ρομποτικά πτερύγια με σερβοκινητήρες Herkulex . . . . .	106
5.1.3	Συμβατότητα μεταξύ των δύο υλοποιήσεων - Όδευση αγωγών . . . . .	108

<b>6</b>	<b>Σχόλια, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εξέλιξη</b>	<b>110</b>
6.1	Σχόλια και συμπεράσματα . . . . .	110
6.2	Μελλοντική εξέλιξη . . . . .	112
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>114</b>
	<b>Παράρτημα</b>	<b>118</b>
A	Τεχνικά στοιχεία του πρωτότυπου ρομποτικού περυγίου κυματοειδούς κίνησης	119
A.1	Μηχανολογικά σχέδια ρομποτικού περυγίου . . . . .	119
A.2	Μηχανολογικά σχέδια ελάσσονος περυγίου . . . . .	128
A.3	Ηλεκτρονικά κυκλώματα . . . . .	131
B	Τεχνικά στοιχεία του SQUIDBOT-mini . . . . .	132
B.1	Μηχανολογικά σχέδια . . . . .	132
B.2	Ηλεκτρονικά κυκλώματα . . . . .	143
B.3	Διαγράμματα βαθμονόμησης σερβοκινητήρων . . . . .	145
C	Πειραματική αποτίμηση του ρομποτικού πρωτότυπου SQUIDBOT-mini . . . . .	146
C.1	Πρόωση με έλεγχο κλειστού βρόχου της πορείας κίνησης . . . . .	146
C.1.1	Πειράματα διερεύνησης της επίδρασης της συχνότητας κυμά- τωσης . . . . .	146
C.1.2	Πειράματα διερεύνησης της επίδρασης της σχετικής φάσης κυ- μάτωσης . . . . .	150
C.1.3	Πειράματα αλλαγής του αρχικού προσανατολισμού . . . . .	157
C.2	Επιτόπια περιστροφή με έλεγχο κλειστού βρόχου του προσανατολισμού . . . . .	159
C.2.1	Πειράματα βηματικής μεταβολής του επιθυμητού προσανατο- λισμού . . . . .	159
C.2.2	Πειράματα απόρριψης εξωτερικών διαταραχών . . . . .	159
C.2.3	Πειράματα διαδοχικών μεταβολών του επιθυμητού προσανα- τολισμού . . . . .	160
C.2.4	Πειράματα σε θαλάσσιο περιβάλλον . . . . .	162

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Ερευνητικό πλαίσιο

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων (Unmanned Underwater Vehicles, UUVs) έχει τύχει ιδιαίτερης προσοχής από την επιστημονική κοινότητα, οδηγούμενη από το συνεχώς αυξανόμενο πλήθος εφαρμογών που σχετίζονται με τη μελέτη, την προστασία και τη βιώσιμη εκμετάλλευση των θαλάσσιων φυσικών πόρων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα (Remotely Operated Vehicles, ROVs), τα οποία παραδοσιακά χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία πετρελαίου για επόπτευση ή και παρεμβατικές εργασίες σε μεγάλα βάθη. Μία δεύτερη, ραγδαία αναπτυσσόμενη κατηγορία μη επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων, είναι αυτή των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων (Autonomous Underwater Vehicles, AUVs). Αυτά τα οχήματα χρησιμοποιούν τεχνολογίες που επιτρέπουν την αυτόνομη λειτουργία χωρίς την παρουσία σκάφους υποστήριξης. Η ενεργειακή και επιχειρησιακή αυτονομία των AUVs καθιστά δυνατή, τόσο τεχνολογικά όσο και οικονομικά, την εκτέλεση αποστολών που καλύπτουν μεγάλες θαλάσσιες εκτάσεις, όπως την αποτύπωση του βυθού ή την επιτήρηση των θαλάσσιων συνόρων.



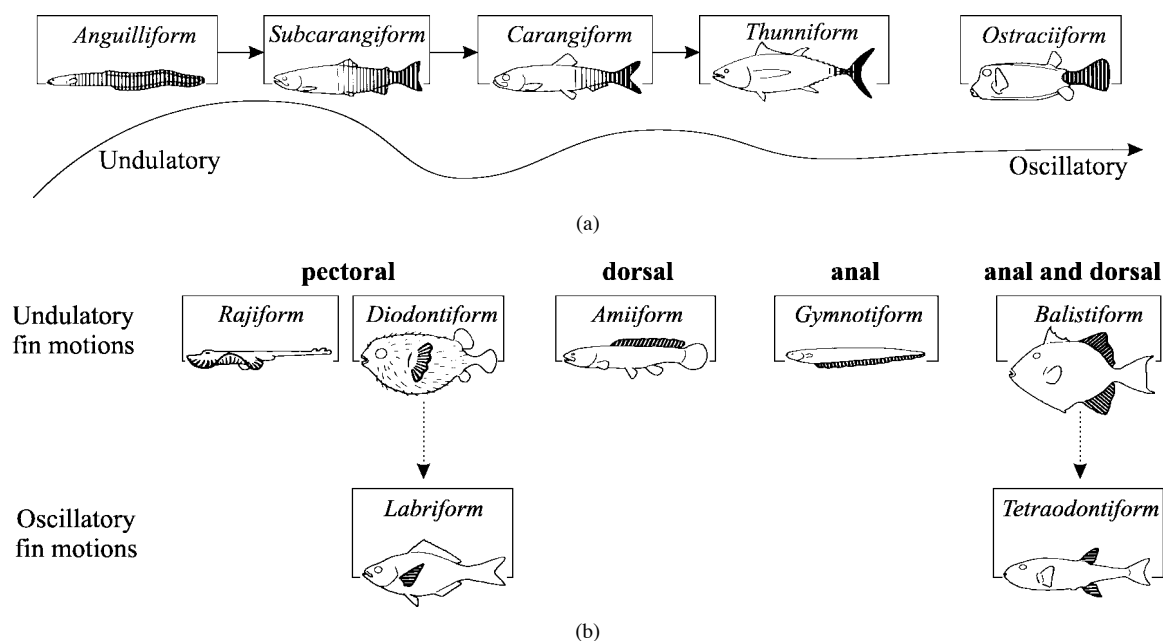
(a) ROV



(b) AUV

Σχήμα 1.1: Χαρακτηριστικά παραδείγματα μη-επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων (UUVs).

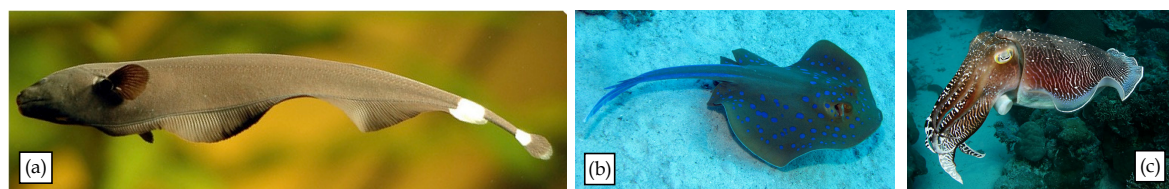
Τα σύγχρονα υποβρύχια σκάφη, επιτυγχάνουν τον έλεγχο του προσανατολισμού τους βασιζόμενα σε επιφάνειες υδροδυναμικής άνωσης ή σε συνδυασμό πολλών προωστών. Η απόδοση των δύο αυτών εναλλακτικών υλοποιήσεων μειώνεται αισθητά όπου απαιτούνται ελιγμοί με μικρή ταχύτητα ή διατήρηση θέσης και προσανατολισμού στο χώρο, παρουσία ρευμάτων. Τέτοιου είδους εργασίες, καθώς και η λειτουργία σε παράλιες ζώνες ή η πλοήγηση μέσα σε μη-δομημένα περιβάλλοντα, αποκτούν ιδιαίτερη σημασία στα πλαίσια πραγματοποίησης



Σχήμα 1.2: Ταξινόμηση μηχανισμών κίνησης που σχετίζονται με (a) πρόωση BCF και (b) πρόωση MPF. [2]

αποστολών για πχ, εξερεύνηση ναυαγίων πλοίου, επιθεώρηση υποθαλάσσιων αγωγών και συντήρηση εξεδρών άντλησης πετρελαίου. Προκειμένου να αντιμετωπίσει αυτές τις πτυχές ανάλογων απαιτητικών εφαρμογών, η έρευνα στρέφεται στη μελέτη κάποιων αξιοσημειωτών μηχανισμών πρόωσης που συναντώνται σε ψάρια και θαλάσσια θηλαστικά, οι οποίοι επιτρέπουν υψηλές ταχύτητες κολύμβησης αλλά και μεγάλη ευελιξία στο θαλάσσιο περιβάλλον [1]. Αφού οι δυνατότητές τους αυτές ξεπερνούν κατά πολύ αυτές των συμβατικών τεχνητών μηχανισμών πρόωσης, είναι επόμενο το ότι η μελέτη της υποβρύχιας κίνησης μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη μιας νέας γενιάς βιομημητικών υποβρύχιων ρομποτικών οχημάτων με υψηλές επιδόσεις και μεγάλη ενεργειακή απόδοση. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, συχνά υιοθετούνται διεπιστημονικές προσεγγίσεις, έτσι ώστε να αντιμετωπιστεί το μεγάλο εύρος ερευνητικών απαιτήσεων, οι οποίες μπορεί να περιλαμβάνουν τη συλλογή και ανάλυση βιολογικών δεδομένων, την αναλυτική/υπολογιστική μοντελοποίηση των σχετικών υδροδυναμικών φαινομένων, το μηχαντρονικό σχεδιασμό των ρομποτικών πρωτοτύπων και την ανάπτυξη και εφαρμογή των κατάλληλων τεχνικών ελέγχου.

Τα πιο πολλά ψάρια παράγουν ώση λυγίζοντας το σώμα τους, σχηματίζοντας έτσι ένα προωθητικό κύμα το οποίο έχει κατεύθυνση προς τα πίσω και εκτείνεται ως το ουραίο πτερύγιο. Αυτός ο μηχανισμός κίνησης συχνά αναφέρεται ως κίνηση Σώματος-Ουραίου Πτερυγίου (Body-Caudal Fin (BCF) locomotion (Σχήμα 1.2a)). Άλλα ψάρια έχουν αναπτύξει εναλλακτικούς μηχανισμούς κολύμβησης, οι οποίοι κάνουν χρήση των πλευρικών και μέσων πτερυγίων και αναφέρονται ως κίνηση μέσου και/ή ζυγού πτερυγίου (Median-Paired Fin (MPF) locomotion (Σχήμα 1.2b)). Εκτιμάται ότι ενώ το 15% των οικογενειών ψαριών χρησιμοποιούν τους παραπάνω μηχανισμούς, ένα μεγαλύτερο ποσοστό ενώ βασίζονται στην κίνηση BCF για παραγωγή πρόωσης, χρησιμοποιούν μηχανισμούς MPF για εκτέλεση ελιγμών και σταθεροποίησης.



Σχήμα 1.3: Παραδείγματα θαλάσσιων ειδών που χρησιμοποιούν πτερύγια κυματοειδούς κίνησης (a) *Apteronotus albifrons* (μαχαιρόψαρο), (b) *Taeniura lymna* (σαλάχι) και (c) *Sepia officinalis* (σουπιά).

Και για τους δύο παραπάνω μηχανισμούς κίνησης (BCF και MPF) μπορεί να γίνει μια περαιτέρω κατηγοριοποίηση με βάση τα χαρακτηριστικά κίνησης, την κυματοειδή κίνηση, η οποία εμπεριέχει τη μετάδοση ενός κύματος κατά μήκος της δομής που παράγει την ώση, και την ταλαντωτική κίνηση, κατά την οποία ο μηχανισμός που παράγει την ώση ταλαντώνεται γύρω από τη βάση του χωρίς να παρατηρείται δημιουργία κύματος. Και οι δύο τύποι κίνησης είναι αποτέλεσμα συνδυασμού ταλαντώσεων μικρότερων εξαρτημάτων τα οποία απαρτίζουν τον προωθητήρα και θεωρούνται ως μια οντότητα [2].

Ο σχεδιασμός βιομιμητικών ρομποτικών υποβρύχιων οχημάτων έχει ακολουθήσει δύο κύριες κατευθύνσεις, οι οποίες βασίζονται και στην παραπάνω κατηγοριοποίηση (BCF/MPF). Η πρώτη προσέγγιση περιλαμβάνει συστήματα τα οποία προσομοιώνουν τη συνεχή καμπτική κίνηση των σωμάτων των ψαριών για αυξημένη απόδοση πρόωσης (π.χ. [3–6]), ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει βιολογικά εμπνευσμένα ενεργά εξαρτήματα τα οποία έχουν αναπτυχθεί κυρίως για τη βελτίωση της απόδοσης σε ελιγμούς των AUVs και ROVs [7], ενώ επίσης προσβλέπει και σε δυνατότητες πρόωσης αλλά και ελιγμών [8]. Τα περισσότερα από τα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί στη δεύτερη κατηγορία διαθέτουν άκαμπτα μηχανικά ανάλογα των πλευρικών πτερυγίων, τα οποία πραγματοποιούν ταλαντωτική κίνηση πάνω-κάτω (heave) ή/και γύρω από τον εγκάρσιο οριζόντιο άξονα (pitch) (βλέπε Εργασίες [7, 9–14]).

Ειδικότερα, στους οργανισμούς που ανήκουν στην κατηγορία MPF μπορεί να γίνει και περαιτέρω διάκριση σε δύο υποκατηγορίες, σε αυτούς που χρησιμοποιούν ραχιαίο ή κοιλιακό πτερύγιο, και σε αυτούς που διαθέτουν πλευρικά πτερύγια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της πρώτης κατηγορίας είναι το μαχαιρόψαρο (Σχήμα 1.3a) το οποίο διαθέτει ένα κοιλιακό πτερύγιο κατά μήκος του λεπτού επιμήκους σώματός του. Τα ψάρια αυτής της κατηγορίας μπορούν να κινούνται τόσο προς τα εμπρός, αλλά και προς τα πίσω, αλλάζοντας την κατεύθυνση μετάδοσης της κυμάτωσης του πτερυγίου τους. Το σαλάχι (Σχήμα 1.3b) και η σουπιά (Σχήμα 1.3c) ανήκουν στη δεύτερη κατηγορία και παράγουν πρόωση μέσω πλευρικών πτερυγίων. Η ύπαρξη δύο κύριων μέσων παραγωγής πρόωσης, επιτρέπει σε αυτά τα είδη την εκτέλεση ελιγμών και γενικότερα πιο πολύπλοκων τύπων κίνησης.

Για την αντιμετώπιση της συνεχώς αυξανόμενης πολυπλοκότητας που συνεπάγεται η κατασκευή και ο έλεγχος ενεργά ταλαντευόμενων εξαρτημάτων, σχετικές ερευνητικές προσπάθειες προτείνουν σχέδια εμπνευσμένα από την κυματοειδή κίνηση των πτερυγίων οργανισμών όπως τα ηλεκτρικά χέλια, τα σαλάχια και οι σουπιές [15–22]. Η προοπτική ανάπτυξης τεχνητών αντιγράφων για ενσωμάτωση σε κατάλληλα σχεδιασμένα υποβρύχια οχήματα εμφανίζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού αυτού του είδους τα πτερύγια κυματοειδούς κίνησης, τα οποία παρέχουν διανυσματικό έλεγχο της παραγόμενης ώσης, απαντώνται κυρίως σε ψάρια τα οποία διατηρούν άκαμπτο το σώμα τους κατά την κολύμβηση [23]. Άλλα πλεονεκτήματα αυτών των

μηχανισμών είναι η ενεργειακή απόδοση, η ελαττωμένη ανάδευση των ιζημάτων του βυθού, και το μειωμένο ακουστικό ίχνος.

## 1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

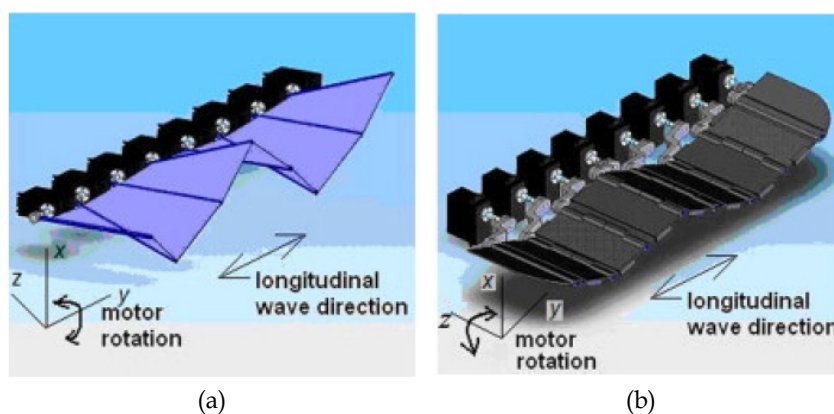
Σε αυτή την ενότητα παρέχεται μια επισκόπηση των ρομποτικών πρωτοτύπων που απαντώνται στη βιβλιογραφία, τα οποία αναπτύχθηκαν για τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών πρόωσης των πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης και των δυνατοτήτων εφαρμογής τους σε μη επανδρωμένα υποβρύχια σκάφη.

### 1.2.1 Παραγωγή κύματος

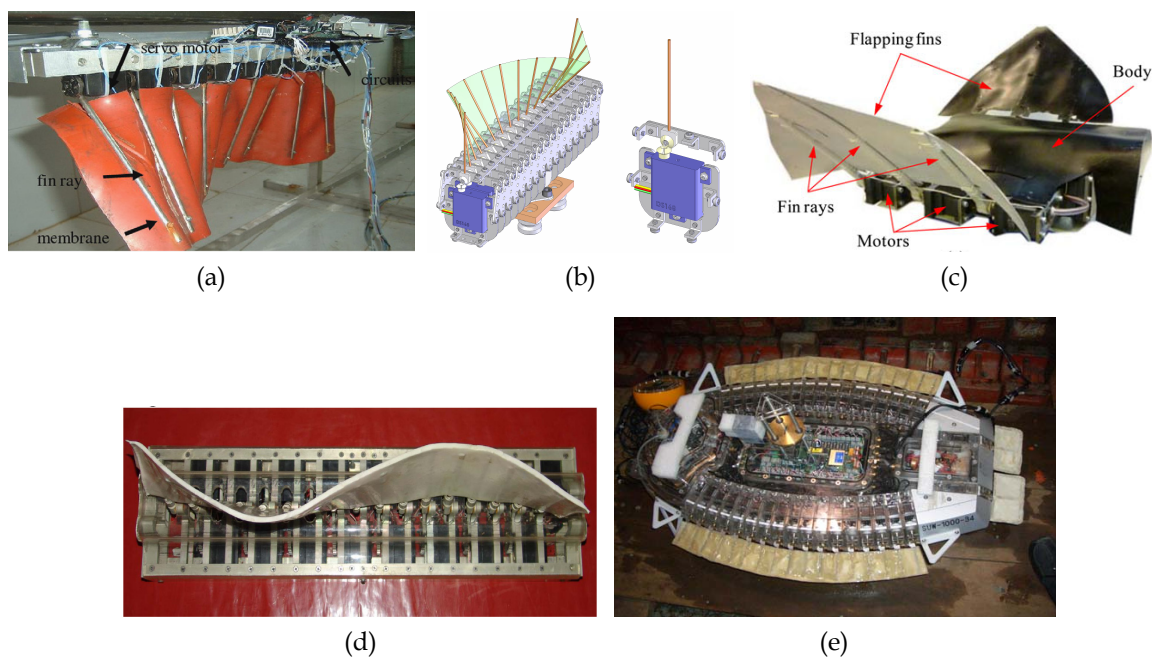
Στην πλειοψηφία τους, τα προτεινόμενα σχέδια για πτερόγυια κυματοειδούς κίνησης, έχουν υιοθετήσει τη μορφολογία των βιολογικών αναλόγων τους, όσον αφορά στη σταθερή βάση που χρησιμοποιούν και στο κύμα που σχηματίζεται από την περιστροφή των ακτίνων του πτερυγίου γύρω από αυτή τη σταθερή βάση (Σχήμα 1.4a). Αυτό απαιτεί την ύπαρξη μιας εύκαμπτης επιφάνειας διασύνδεσης των ακτίνων του πτερυγίου, η οποία συνήθως επιτυγχάνεται με τη χρήση υλικών όπως σιλικόνη, καουτσούκ [18,19], λεπτό λάστιχο ή ακόμα και ύφασμα [22].

Μια διαφορετική προσέγγιση για την κατασκευή του πτερυγίου (Σχήμα 1.4) προτάθηκε από το Nanyang Technological University (Singapore), η οποία κάνει χρήση μηχανισμών στροφάλου - ολισθητήρων (crank-slider) για να επιτύχει μια ελεύθερα κινούμενη βάση (Σχήμα 1.4b), έτσι ώστε η παραγωγή του κύματος να γίνεται ομοιόμορφα κατά όλο το μήκος του πτερυγίου [24–26]. Αυτός ο μηχανισμός «κυματιστών πλακών» αντικαθιστά το εύκαμπτο υλικό για τα τμήματα ανάμεσα στις ακτίνες, με λεπτές άκαμπτες πλάκες διατεταγμένες σε κατάλληλη αρθρωτή διαμόρφωση. Ωστόσο, αφού οι ακτίνες περιστρέφονται γύρω από μη-συνεχόμενη βάση, το πτερόγιο δεν μπορεί να συνδεθεί με συνεχή τρόπο στο σώμα, με αποτέλεσμα την ασυνέχεια της ροής ανάμεσα στο πτερόγιο και το σώμα, η οποία μπορεί να αποδειχτεί επιζήμια για την απόδοση πρόωσης. Ένα παρόμοιο σχέδιο με «κυματίζουσες» πλάκες υιοθετήθηκε για το πρωτότυπο πτερόγιο που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Coruna (Ισπανία) [27].

Το κύμα το οποίο μεταδίδεται κατά μήκος του πτερυγίου, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αποτέλεσμα της ταλάντωσης των ακτίνων του μηχανισμού. Για την κίνηση των ακτίνων μπορεί να χρησιμοποιείται ξεχωριστός επενεργητής για την καθεμία ή ένας κεντρικός επενεργ-



Σχήμα 1.4: Παραλλαγές πρωτοτύπων πτερυγίου: (a) Βιο-εμπνευσμένος σχεδιασμός που χαρακτηρίζεται από άκαμπτη βάση και εύκαμπτες επιφάνειες πτερυγίου. (b) Σχέδιο με κυματοειδείς πλάκες με ελεύθερη βάση και πτερόγιο που αποτελείται από άκαμπτες επιφάνειες. [24]



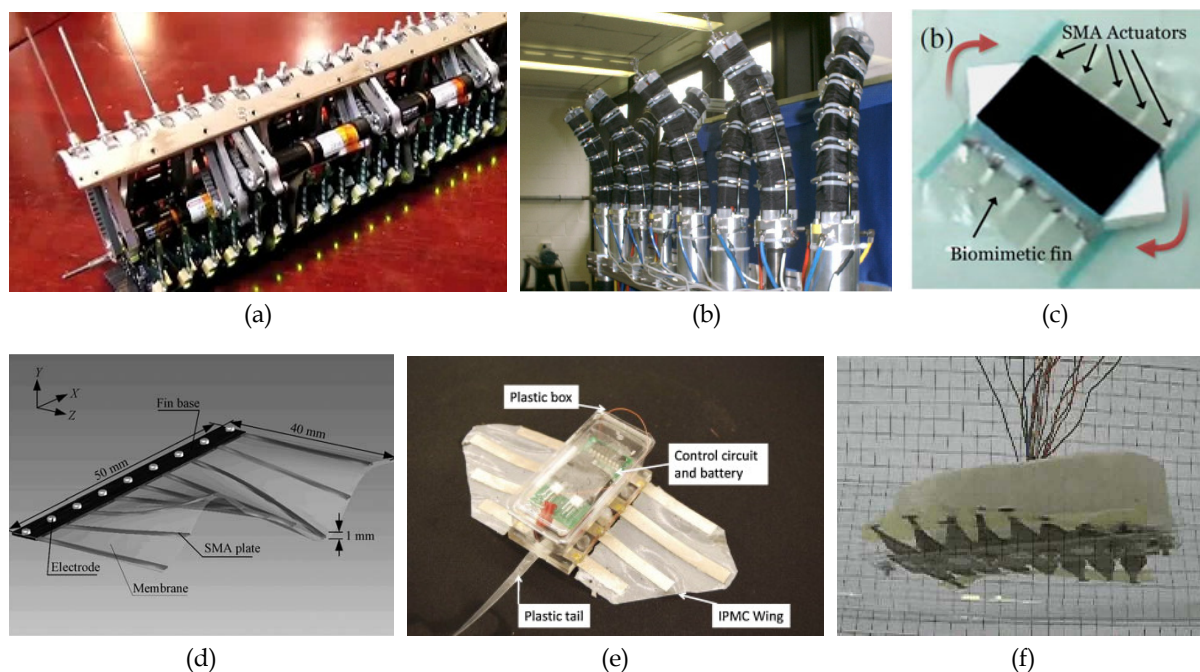
Σχήμα 1.5: Παραδείγματα συστημάτων πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης με έναν R/C σερβοκινητήρα ανά ακτίνα: (a) Το πρωτότυπο RoboGnilos του National University of Defense Technology (NUDT) στην Κίνα, με 9 οδηγούμενες ακτίνες [21]. (b) CAD Σχέδια του πρωτοτύπου του πανεπιστημίου Northwestern (U.S.A.), το οποίο αποτελείται από 16 ακτίνες [18]. (c) Το εμπνευσμένο από βατοειδή πρωτότυπο RoManII του NanYang Technological University (Σιγκαπούρη), με 3 ανεξάρτητα οδηγούμενες ακτίνες ανά πτερύγιο [29]. (d) Ένα πρωτότυπο με 17 ακτίνες που αναπτύχθηκε στο NUDT (Κίνα) [30]. (e) Το υλοβρόχιο ρομπότ του πανεπιστημίου της Osaka (Ιαπωνία), το οποίο διαθέτει ζεύγος πλάγιων πτερυγίων με συνολικά  $2 \times 17 = 34$  ακτίνες [31].

γητής που οδηγεί την κίνηση όλων των ακτίνων του πτερυγίου. Παρά την αυξημένη πολυπλοκότητα της πρώτης προσέγγισης, αυτή επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό της κίνησης του πτερυγίου, επειδή είναι δυνατή η μεταβολή του πλάτους, της κατεύθυνσης κίνησης, της ταχύτητας και του μήκους του οδεύοντος κύματος. Επίσης, επιτρέπει τη μελέτη πιο πολύπλοκων μοτίβων κίνησης, συμπεριλαμβανομένων τοπικών μεταβολών της σχετικής διαφοράς φάσης μεταξύ των ακτίνων του, της συχνότητας ταλάντωσής τους ή ακόμα και της μετάδοσης αντίθετα κινούμενων κυμάτων κατά μήκος του πτερυγίου [28].

Στα Σχήματα 1.5-1.6 παρουσιάζονται παραδείγματα πρωτότυπων πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης με οδήγηση των ακτίνων από πολλαπλούς επενεργητές. Τα πρωτότυπα μηχανισμού πτερυγίου με μεγαλύτερο μήκος διαθέτουν από 8 έως 32 επενεργητές, ενώ στις εμπνευσμένες από βατοειδή (π.χ. σαλάχια) υλοποιήσεις χρησιμοποιούνται λιγότεροι επενεργητές, συνήθως 3 έως 5 ανά πτερύγιο. Στην πλειοψηφία των πρωτότυπων, οι ακτίνες κινούνται μόνο πλευρικά, περιορισμένες σε επίπεδο κάθετο στην επιφάνεια του πτερυγίου.

Όσον αφορά στον τύπο του επενεργητή που χρησιμοποιείται για την οδήγηση των ακτίνων, συνήθως χρησιμοποιούνται R/C σερβοκινητήρες (Σχήμα 1.5), οι οποίοι διαθέτουν ηλεκτρονικά ελέγχου της θέσης του άξονά τους. Ένα από τα προβλήματα αυτής της προσέγγισης είναι η απουσία ανάδρασης θέσης εξωτερικά της μονάδας του σερβοκινητήρα. Αυτό παρεμποδίζει ιδιαίτερα την εκτίμηση του εύρους των κινηματικών παραμέτρων του κύματος για τις οποίες αναπαράγονται πιστά οι επιθυμητές τροχιές των ακτίνων.

Παραδείγματα συστημάτων με έλεγχο των ακτίνων με πολλαπλούς επενεργητές, διαφορε-

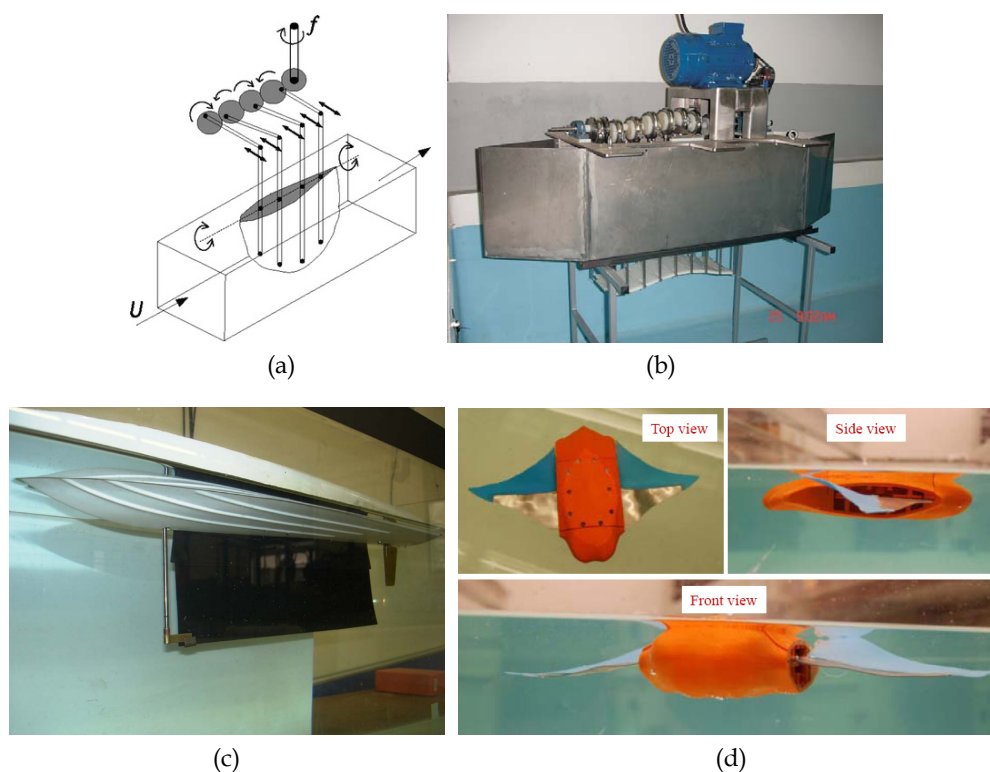


Σχήμα 1.6: Παραδείγματα συστημάτων πτερυγίου κοματοειδούς κίνησης με μεμονωμένο έλεγχο ακτίνων, τα οποία διαθέτουν διαφορετικούς τρόπους οδήγησης των ακτίνων από R/C σεβκοκινητήρες: (a) Λεπτομέρεια του πρωτότυπου Ghostbot (χωρίς τη μεμβράνη του πτερυγίου), το οποίο αναπτύχθηκε στο Northwestern University (Η.Π.Α.), και περιλαμβάνει 32 κινητήρες Σ.Ρ. για οδήγηση των ακτίνων [28]. (b) Το πτερόγιο κοματοειδούς κίνησης (χωρίς τη μεμβράνη) που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Heriot-Watt (Μ.Βρετανία), αποτελούμενο από 8 πνευματικά οδηγούμενες ακτίνες με δυνατότητα κίνησης σε τρεις διαστάσεις [32]. (c) Το εμπνευσμένο από βατοειδή πρωτότυπο του Harbin Institute of Technology (Κίνα), όπου κάθε πτερόγιο έχει ενσωματωμένους 5 επενεργητές από shape memory alloy [33]. (d) Ένα πρωτότυπο πτερυγίου οδηγούμενο από SMA, που αναπτύχθηκε στο Nanyang Technological University (Σιγκαπούρη) [34]. (e) Πρωτότυπο του πανεπιστημίου της Virginia (Η.Π.Α.), το οποίο χρησιμοποιεί 4 επενεργητές από IPMC ανά πλευρικό πτερόγιο [35]. (f) Ένα υποβρύχιο ρομπότ εμπνευσμένο από σαλάχια με 8 ακτίνες ανά πτερόγιο, οδηγούμενες από IPMC, από το Tartu University (Εσθονία) [20].

τικούς από R/C σεβκοκινητήρες, φαίνονται στο Σχήμα 1.6. Στο πρωτότυπο Ghostbot του πανεπιστημίου Northwestern [28], χρησιμοποιούνται μικροί κινητήρες συνεχούς ρεύματος (10mm Maxon RE10) με μαγνητικούς κωδικοποιητές θέσης και εξατομικευμένα κυκλώματα ηλεκτρονικών ελέγχου για την οδήγηση των ακτίνων (Σχήμα 1.6a). Για το εμπνευσμένο από τα σαλάχια πρωτότυπο Roman-II του Nanyang Technological University [36] χρησιμοποιήθηκαν κινητήρες τύπου brushless.

Στο πρωτότυπο που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Herriot-Watt [32], κάθε ακτίνα αποτελείται από τρεις πνευματικούς επενεργητές (Σχήμα 1.6b) και η κίνηση του πτερυγίου παράγεται με κατάλληλες μετατροπές της πίεσης των επενεργητών, ενώ παρέχεται και ανάδραση θέσης μέσω αισθητήρων μέτρησης της γωνίας (ηλεκτρογωνιόμετρα) οι οποίοι είναι ενσωματωμένοι σε κάθε ακτίνα. Παρότι αυτό το σύστημα παρέχει τη δυνατότητα τρισδιάστατης κίνησης των ακτίνων (κινούνται και μπρος-πίσω εκτός από πλευρικά), έχει αυξημένη πολυπλοκότητα και μέγεθος. Ένα παρόμοιο σχέδιο, βασισμένο στην οδήγηση των ακτίνων με πνευματικό σύστημα, χρησιμοποιείται για τον μηχανισμό εύκαμπτου πλάγιου πτερυγίου που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο της Osaka [37]. Επίσης, εξετάζεται η χρήση «έξυπνων» υλικών, όπως κράματα μνήμης σχήματος (SMA) και σύνθετα υλικά ιοντικού πολυμερούς-μετάλλου (Ionic Polymer Metal

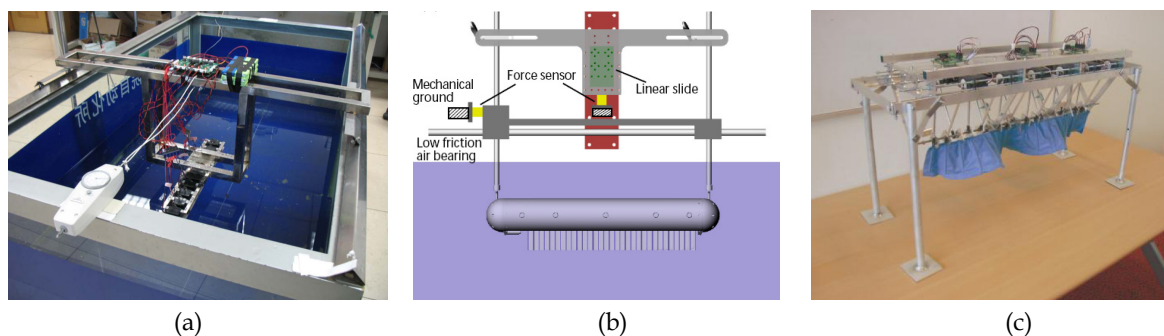




Σχήμα 1.7: Παραδείγματα μηχανισμών πτερυγίου με κεντρική οδήγηση από έναν και μόνο επενεργητή: (a) Σύστημα βασισμένο σε οδοντωτούς τροχούς, από το πανεπιστήμιο Princeton (Η.Π.Α.) [39]. (b) Το πτερόγιο που χρησιμοποιείται από το πρωτότυπο του πανεπιστημίου La Coruna (Ισπανία), το οποίο οδηγείται από έναν κινητήρα E.P. μέσω εκκεντροφόρου άξονα [27]. (c) Σύστημα το οποίο βασίζεται στη μετάδοση καμπτικού κύματος κατά μήκος του πτερυγίου, του πανεπιστημίου Loughborough (Μ.Βρετανία) [40, 41]. (d) Το πρωτότυπο του πανεπιστημίου της Virginia (Η.Π.Α.), το οποίο εφαρμόζει μια τεχνική ενεργής πρώτης ακτίνας/παθητικής τελευταίας ακτίνας για παραγωγή κύματος [42].

Composite - IPMC), ως επενεργητές σε τεχνητούς μηχανισμούς πτερυγίου [20, 34, 35, 38] (Σχήματα 1.6c-f).

Αναφορικά με τη χρήση ενός κεντρικού επενεργητή, στα περισσότερα πρωτότυπα, οι ακτίνες ταλαντώνονται με τη χρήση συστήματος μετάδοσης κίνησης με οδοντωτούς τροχούς, έκκεντρα, ή στρόφαλο, το οποίο οδηγείται από ηλεκτροκινητήρα (Σχήμα 1.7). Μια διαφορετική προσέγγιση της οδήγησης του πτερυγίου από έναν και μόνο επενεργητή, η οποία δε διαθέτει κάποιο από τα παραπάνω εξαρτήματα μετάδοσης ροπής, είναι αυτή που παρουσιάζεται στην Εργασία [40], όπου το πτερόγιο αποτελείται από ένα κομμάτι ελαστικού υλικού και δε διαθέτει ενδιάμεσες ακτίνες για υποστήριξη. Σε αυτή την περίπτωση, η εμπρόσθια ακμή της μεμβράνης ταλαντώνεται ενεργά με τη βοήθεια ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, έτσι ώστε η κυματοειδής κίνηση η οποία προκύπτει από την ταλάντωση αυτή και τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού, να έχει κατεύθυνση προς το πίσω μέρος του πτερυγίου (ένα παρόμοιο σύστημα παρουσιάζεται και στην Εργασία [43]). Αυτή η προσέγγιση υιοθετείται και στο πρωτότυπο που παρουσιάζεται στην Εργασία [42] και εμπνέεται από το σαλάχι. Διαθέτει ένα ζεύγος πλευρικών πτερυγίων, το καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα ενεργό IPMC που λειτουργεί σαν τεχνητός μυς, και μια παθητική μεμβράνη PDMS (πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο) στο πίσω μέρος του πτερυγίου. Άλλο ένα ιδιαίτερο σχέδιο με έναν επενεργητή είναι αυτό που προτείνεται για το υδραυλικά οδηγούμενο πρωτότυπο πτερυγίου που παρουσιάζεται στην Εργασία [44], το οποίο χρησιμοποιεί



(a) Chinese Academy of Science [45]. (b) Northwestern University (H.P.A.) [28]. (c) Delft University (Ολλανδία) [22].

Σχήμα 1.8: Παραδείγματα πειραματικών διατάξεων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εργαστηριακή μελέτη των χαρακτηριστικών πρόωσης για πρωτότυπα πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης.

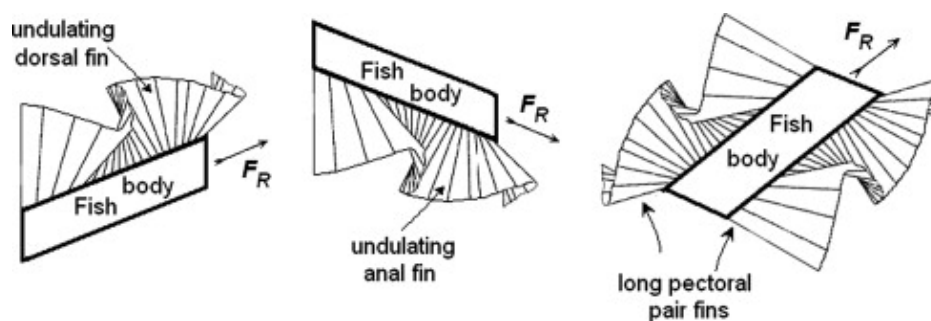
μια περιστροφική υδραυλική βαλβίδα η οποία διανέμει πίεση στις ακτίνες του πτερυγίου.

Σε όλα τα πρωτότυπα με έναν επενεργητή, η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος μεταβάλλεται μέσω της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, ενώ ρύθμιση των άλλων παραμέτρων δεν είναι εφικτή χωρίς μηχανική παρέμβαση στο μηχανισμό του πτερυγίου.

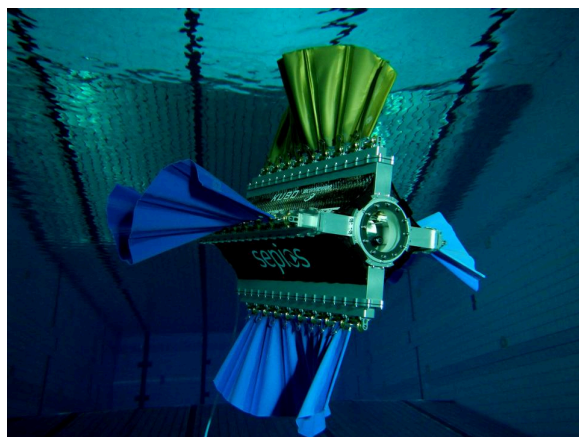
### 1.2.2 Πειραματικές διατάξεις μηχανισμών πτερυγίου

Πολλές ερευνητικές προσπάθειες για ανάπτυξη συστημάτων πρόωσης με μηχανισμό πτερυγίου εξετάζουν αρχικά τους μηχανισμούς πτερυγίου μεμονωμένα. Οι μελέτες αυτές συνήθως περιλαμβάνουν μετρήσεις πρόωσης και ταχύτητας μέσα σε δεξαμενή πειραμάτων, η οποία διαθέτει σύστημα οδηγού γραμμικής κίνησης για τον περιορισμό της κίνησης του μηχανισμού κατά τη διεύθυνση του μήκους του πτερυγίου (παράλληλα με την κατεύθυνση μετάδοσης του κύματος). Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη διεξαγωγή σειράς πειραμάτων για τη συστηματική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών παραγωγής ώσης συναρτήσει των κινηματικών παραμέτρων του κύματος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων διατάξεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.8.

Τα περισσότερα από τα ρομποτικά πρωτότυπα που διαθέτουν μηχανισμούς κυματοειδούς πτερυγίου, είναι υποβρύχια οχήματα, αν και στη βιβλιογραφία απαντώνται και οχήματα επιφανείας. Η μορφολογία και ο σχεδιασμός του πτερυγίου των υποβρυχίων πρωτοτύπων, ακολουθεί το σύστημα πρόωσης των μαχαιρόψαρων (μεσαία εικόνα στο Σχήμα 1.9) και των σαλαχιών (δεξιά εικόνα στο Σχήμα 1.9). Στην πρώτη περίπτωση το ρομπότ έχει συνήθως επίμηκες κυλινδρικό σχήμα και διαθέτει ένα και μοναδικό πτερύγιο τοποθετημένο κατά μήκος του κάτω



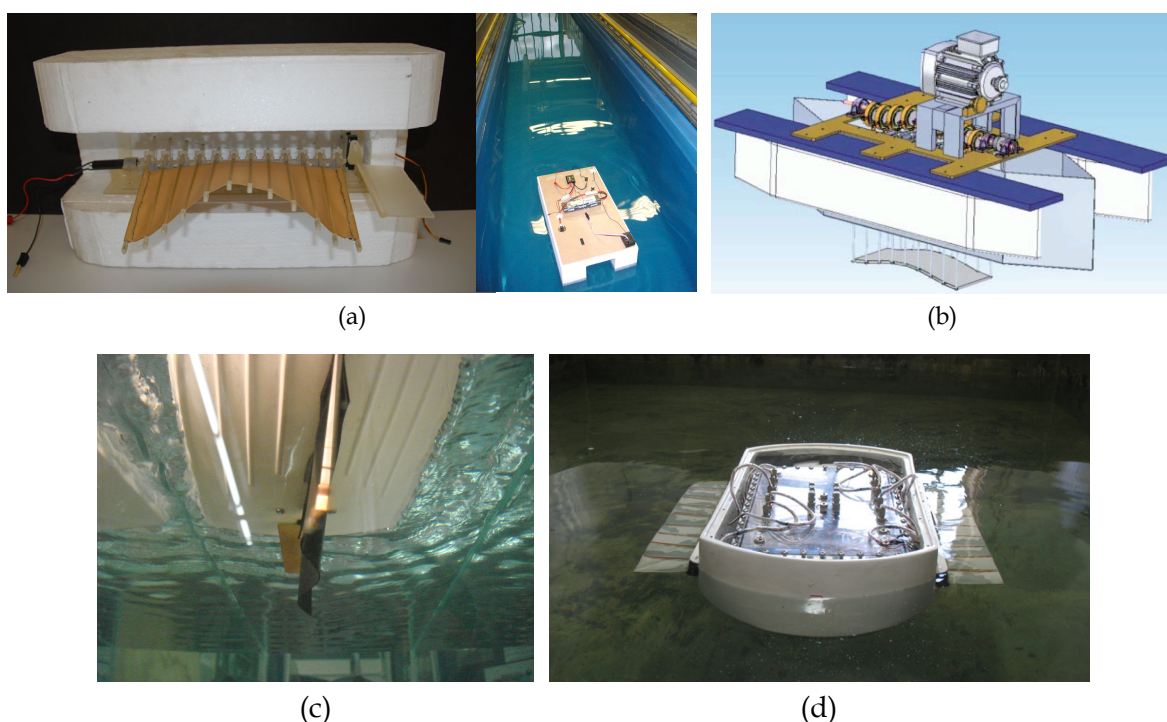
Σχήμα 1.9: Οι τρεις βασικές μορφολογίες των πρωτότυπων υποβρυχίων ρομπότ που χρησιμοποιούν μηχανισμούς πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης, μιμούμενα την κίνηση ψαριών με ραχιαίο, κοιλιακό και δύο πλάγια πτερύγια. [24]



Σχήμα 1.10: Ρομποτικό πρωτότυπο σκάφος Serpis του πανεπιστημίου ETH Zürich (Ελβετία).

μέρους του σκάφους. Στη δεύτερη περίπτωση, το σκάφος είναι συνήθως πεπλατυσμένου σχήματος και φέρει δύο πλευρικά τοποθετημένα πτερύγια.

Μια υλοποίηση υποβρύχιου ρομποτικού πρωτότυπου που συνδυάζει και τις τρεις βασικές μορφολογίες του Σχήματος 1.9 είναι το Serpis του πανεπιστημίου ETH Zürich (Σχήμα 1.10), το οποίο διαθέτει τέσσερα πτερύγια τοποθετημένα ανά  $90^\circ$  περιμετρικά του κυλινδρικού σώματός του. Οι ακτίνες (εννέα ανά πτερύγιο) οδηγούνται από σερβοκινητήρες οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι σε στεγανά διαμερίσματα. Η μετάδοση της κίνησης από τους επενεργητές στις ακτίνες γίνεται μέσω κωνικών οδοντωτών τροχών.



Σχήμα 1.11: Παραδείγματα πρωτοτύπων σκαφών επιφανείας με πρόωση πτερυγίων κοματοειδούς κίνησης: (a) Απλό πρωτότυπο που αναπτύχθηκε στο ETH Zurich (Ελβετία) [46]. (b) Ένα σκάφος τύπου καταμαράν από το Πανεπιστήμιο της Coruna (Ισπανία) [27]. (c) Υποβρύχια λήψη του πρωτοτύπου του Πανεπιστημίου Loughborough (Μ.Βρετανία) [40]. (d) Πρωτότυπο που αναπτύχθηκε στην Κινέζικη Ακαδημία Επιστημών, το οποίο φέρει ζεύγος πλευρικών πτερυγίων [47].

Τα πρωτότυπα σκάφη επιφανείας με περυγία κυματοειδούς κίνησης έχουν συνήθως σχήμα καταμαράν, με ένα περυγίο τοποθετημένο ανάμεσα από τις δύο καρίνες του σκάφους. Έχουν μελετηθεί διάφορες παραλλαγές αυτού του σχεδίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11.

### 1.2.3 Έλεγχος κίνησης

Η ταλαντωτική κίνηση των ακτίνων οδηγεί στην μετάδοση ενός κύματος κατά μήκος του περυγίου. Δεδομένου ότι η βάση του είναι μια σταθερή ευθεία γραμμή, και ότι όλες οι ακτίνες του περυγίου είναι άκαμπτες και μπορούν να ταλαντώνονται μόνο γύρω από ένα σημείο το οποίο βρίσκεται σε επίπεδο που περνάει εγκάρσια από τη βάση και είναι παράλληλο σε αυτή, το κύμα δημιουργείται εφαρμόζοντας περιοδικές μεταβολές της γωνιακής θέσης των ακτίνων. Αυτές οι μεταβολές είναι συνήθως ημιτονοειδείς ταλαντώσεις που παράγονται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\theta_i(t) = A_i \sin(2\pi f_i t + \phi_i) + \psi_i, \quad i = 1 \dots n, \quad (1.1)$$

όπου  $f_i$ ,  $A_i$ ,  $\phi_i$ , και  $\psi_i$  είναι η συχνότητα, το πλάτος, η διαφορά φάσης και η γωνιακή απόκλιση της ταλαντωτικής κίνησης της  $i$ -στής ακτίνας, ενώ  $n$  είναι το πλήθος των ακτίνων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η κίνηση παράγεται με τέτοιο τρόπο ώστε όλες οι ακτίνες να ταλαντώνονται με κοινή συχνότητα γύρω από την κάθετη θέση (δηλαδή θέτοντας  $f_i = f$  και  $\psi_i = 0$  για κάθε ακτίνα), και με σταθερή διαφορά φάσης  $\phi_{lag}$  μεταξύ διαδοχικών ακτίνων η οποία προκύπτει θέτοντας  $\phi_i = (i - 1)\phi_{lag}$ . Επιπλέον, αν το πλάτος ταλάντωσης είναι κοινό για όλες τις ακτίνες (δηλαδή  $A_i = A$ ), προκύπτει η παρακάτω απλοποιημένη περιγραφή του προφίλ κίνησης των ακτίνων:

$$\theta_i(t) = A \sin(2\pi f t + (i - 1)\phi_{lag}), \quad i = 1 \dots n. \quad (1.2)$$

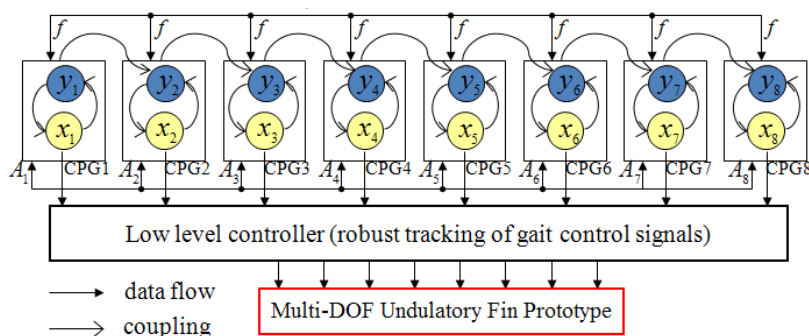
Με αυτή την σχέση παραγωγής κυματώσεων, το πλήθος των κυμάτων κατά μήκος του περυγίου (ειδικό μήκος κύματος) υπολογίζεται ως:

$$w = \frac{(n - 1) |\phi_{lag}|}{2\pi},$$

με μήκος κύματος  $\lambda = L/w$ , όπου  $L$  είναι το συνολικό μήκος του περυγίου (απόσταση από την πρώτη ως την τελευταία ακτίνα). Η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος κατά μήκος του περυγίου είναι  $V = \text{sgn}(\phi_{lag})\lambda f$ , όπου ο όρος  $\text{sgn}(\phi_{lag})$  δείχνει ότι η φορά μετάδοσης του κύματος μπορεί να αναστραφεί μέσω της αλλαγής του προσήμου της διαφοράς φάσης μεταξύ ακτίνων  $\phi_{lag}$ .

Σε υλοποιήσεις με πολλαπλούς επενεργητές, οι ταλαντώσεις των ακτίνων παράγονται συνήθως εφαρμόζοντας τις τροχιές στις περιστροφικές αρθρώσεις απευθείας όπως προκύπτουν από τις παραπάνω σχέσεις. Αυτή η προσέγγιση είναι επαρκής, ειδικά για υλοποιήσεις όπου οι ακτίνες οδηγούνται από σερβοκινητήρες R/C, οι οποίοι διαθέτουν ηλεκτρονικά έλεγχο θέσης. Παρόλα αυτά, ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής έγκειται στο γεγονός ότι, η μεταβολή μίας ή παραπάνω παραμέτρων της κίνησης των ακτίνων θα οδηγήσει σε απότομες και μη-συντονισμένες μεταβολές στις τροχιές των αρθρώσεων. Τέτοιου είδους μη συνεχείς μεταβολές του κύματος πρόωσης εμποδίζουν την ομαλή μετάβαση μεταξύ διαφορετικών προφίλ κίνησης, προκαλώντας, παράλληλα, αυξημένη καταπόνηση στους επενεργητές. Για να αντιμε-

τωπιστούν αυτά τα ζητήματα, έχει προταθεί η χρήση τεχνητών Γεννητριών Πρότυπου Ρυθμού (Central Pattern Generators - CPGs) για παραγωγή των συντονισμένων προτύπων κίνησης που απαιτούνται για την παραγωγή της κυμάτωσης [21,48–51]. Τέτοια τεχνητά CPGs απαρτίζονται από συνδεδεμένους γραμμικούς ή μη γραμμικούς ταλαντωτές (πχ. ταλαντωτές Hopf), οι οποίοι επιτρέπουν ομαλές μεταβάσεις κατά την αλλαγή των κινηματικών παραμέτρων του κύματος. Η ευελιξία που παρέχουν αυτοί οι εμπνευσμένοι από βιολογικά CPG μηχανισμοί, επιβαρύνει το σύστημα όσον αφορά στην υπολογιστική ισχύ που απαιτείται, αφού οι δυναμικές εξισώσεις των ταλαντωτών πρέπει να επιλύονται σε πραγματικό χρόνο κατά τη λειτουργία του πτερυγίου.

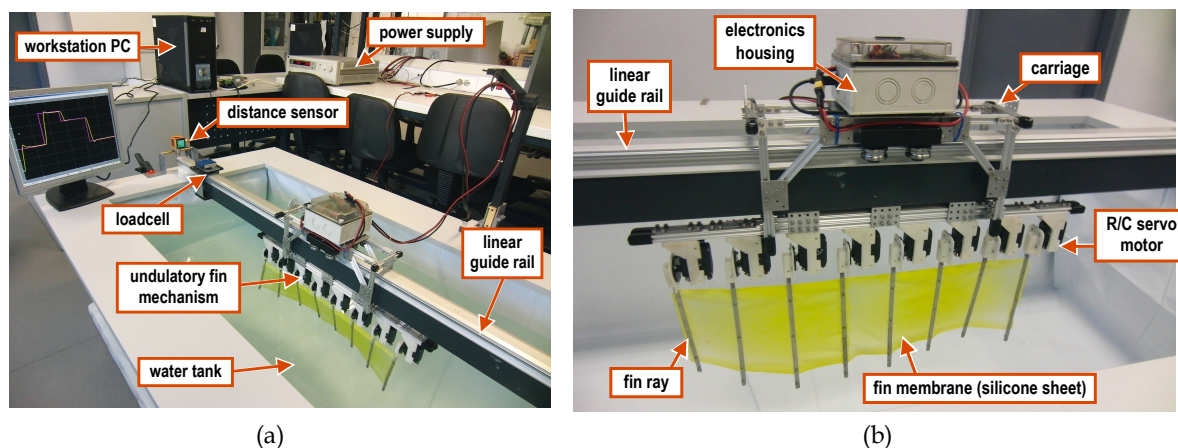


Σχήμα 1.12: Παραγωγή οδεύοντος κύματος μέσω τεχνητού CPG που αποτελείται από σειριακά διασυνδεδεμένους μη γραμμικούς ταλαντωτές. [48]

Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες που αναφέρονται σε παραγωγή πρόωσης μέσω πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης εστιάζουν στην αναγνώριση της επίδρασης των κινηματικών παραμέτρων του οδεύοντος κύματος στην παραγωγή δύναμης ή / και στα χαρακτηριστικά εμπρόσθιας ταχύτητας των συστημάτων με ένα πτερόγιο, ενώ η βιβλιογραφία σχετικά με τις στρατηγικές ενσωμάτωσής τους σε υποβρύχια οχήματα για πλοήγηση και έλεγχο κίνησης με πρόωση από πτερόγιο κυματοειδούς κίνησης είναι σχετικά περιορισμένη. Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες αφορούν οχήματα με ζεύγος πλευρικών πτερυγίων (πχ. μιμούμενα τα σαλάχια), αφού αυτή η διαρρύθμιση επιτρέπει την απευθείας παραγωγή διαφορετικών τύπων κίνησης.

Πιο συγκεκριμένα, στην Εργασία [52], παρουσιάζονται απλές στρατηγικές ανοιχτού βρόχου, για την παραγωγή κίνησης προς τα εμπρός και με επιτόπου περιστροφή, αλλά και συνδυασμούς αυτών των δύο, μοτίβα κίνησης στο επίπεδο, με ένα πρωτότυπο που διαθέτει δύο πλευρικά πτερόγια. Για κίνηση προς τα εμπρός, τα δύο πτερόγια εκτελούν την ίδια κίνηση, ενώ η συνολική ταχύτητα πρόωσης μεταβάλλεται αλλάζοντας μια από τις παραμέτρους κίνησης του κύματος, τη συχνότητα  $f$  ταλάντωσης των ακτίνων. Η επιβολή διαφορετικών τιμών για τις συχνότητες των κυμάτων των πτερυγίων έχει ως αποτέλεσμα την κίνηση του ρομπότ σε μη-ευθύγραμμη πορεία. Για επιτόπιες περιστροφές, τα κύματα των δύο πτερυγίων μεταδίδονται προς αντίθετες κατευθύνσεις, με τις υπόλοιπες κινηματικές παραμέτρους να μένουν ίδιες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ροπές που παράγονται από τα δύο πτερόγια να προστίθενται, ενώ οι αντίθετες δυνάμεις αλληλοακυρώνονται. Παραλλαγές αυτής της προσέγγισης παρουσιάζονται επίσης και στις εργασίες [22,36].

Μια κλειστού βρόχου προέκταση της παραπάνω στρατηγικής παρουσιάζεται στην Εργασία [53], η οποία περιλαμβάνει μια μέθοδο ελέγχου μέσω ασαφούς PID ελεγκτή για ρύθμιση



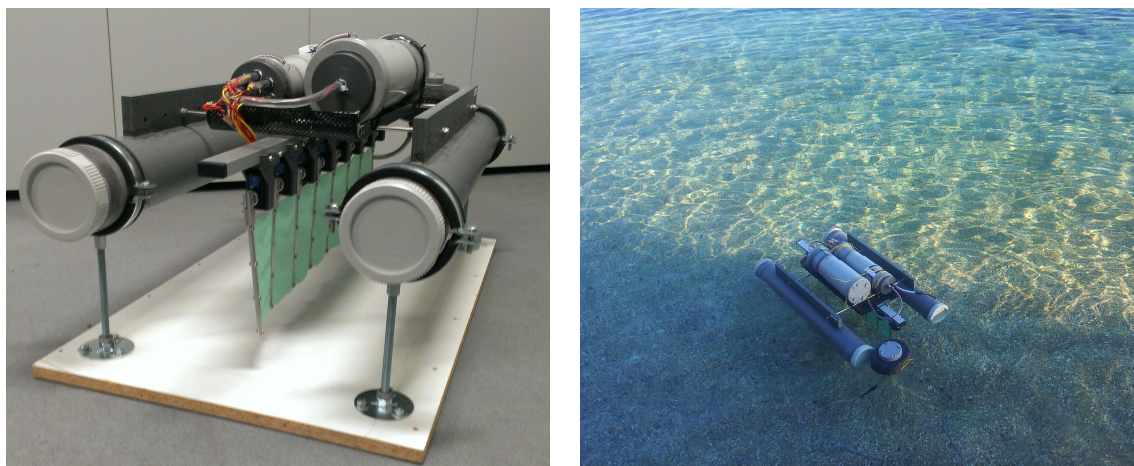
Σχήμα 1.13: Η πειραματική διάταξη του αρχικού πρωτοτύπου πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης: (α) Η δεξαμενή δοκιμών και οι περιφερειακές συσκευές, (β) Ο μηχανισμός πτερυγίου.

της ταχύτητας πρόωσης και της γωνίας προσανατολισμού του ρομποτικού πρωτοτύπου (Σχήμα 1.11d) το οποίο διαθέτει ζεύγος πλευρικών πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης και είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες μέτρησης αδρανειακών μεγεθών.

### 1.3 Βιορομποτικά πρωτότυπα του ΤΕΙ Κρήτης

Στο Εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης έχει ήδη αναπτυχθεί μια πειραματική διάταξη [54] για τη μελέτη πρόωσης μέσω μηχανισμού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης. Ο κυρίως μηχανισμός αυτού του αρχικού πρωτοτύπου διαθέτει οκτώ ανεξάρτητα οδηγούμενες ακτίνες, διασυνδεδεμένες μεταξύ τους με φύλλο ελαστικής μεμβράνης από σιλικόνη. Κάθε μια από τις ακτίνες αποτελείται από ζεύγος ελασμάτων ανοξείδωτου χάλυβα τα οποία συγκρατούν μεταξύ τους την ελαστική μεμβράνη και οδηγούνται από σερβοκινητήρες τύπου R/C. Για την παραγωγή της κυματοειδούς κίνησης του πτερυγίου χρησιμοποιείται σύστημα CPG από το οποίο προκύπτουν οι επιθυμητές τροχιές των ακτίνων.

Το πρωτότυπο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση μιας σειράς παραμετρικών μελετών με μεταβαλλόμενες τις παραμέτρους κίνησης του πτερυγίου. Για την εκτέλεση των πειραμάτων, ο μηχανισμός προσαρμόστηκε σε φορείο που κινείται κατά μήκος οδηγού ευθύγραμμης κίνησης, ο οποίος είναι τοποθετημένος επάνω από δεξαμενή δοκιμών. Επάνω στο φορείο τοποθετείται ένα κυτίο το οποίο περιέχει τα ηλεκτρονικά ελέγχου της διάταξης. Στο ένα άκρο της δεξαμενής έχει τοποθετηθεί αισθητήρας απόστασης για μέτρηση της μετατόπισης του φορείου. Επίσης, επάνω στον οδηγό ευθύγραμμης κίνησης έχει τοποθετηθεί αισθητήρας δύναμης (δυναμοκυψέλη) για μέτρηση της παραγόμενης ώσης στην οριζόντια κατεύθυνση. Μέσω επεξεργασίας των αποτελεσμάτων των πειραμάτων αυτών έγινε εμφανής η επίδραση της μεταβολής των κινηματικών παραμέτρων του πτερυγίου στην ταχύτητα και την αποδοτικότητά του [54]. Με βάση αυτά τα ευρήματα, πραγματοποιήθηκαν δύο στρατηγικές ελέγχου της πρόωσης του πτερυγίου. Η ταχύτητα του πτερυγίου μεταβάλλεται στην πρώτη προσέγγιση μέσω μεταβολής του πλάτους κυμάτωσης του πτερυγίου, ενώ στη δεύτερη μέσω ταυτόχρονης μεταβολής της συχνότητας κυμάτωσης και της διαφοράς φάσης μεταξύ των ακτίνων. Αυτές οι δύο προσεγγίσεις αξιολογήθηκαν για ανοιχτού βρόχου έλεγχο ταχύτητας του πτερυγίου αλλά και κλειστού βρόχου έλεγχο θέσης του.



Σχήμα 1.14: Το πρωτότυπο του σκάφους επιφανείας με πρόωση πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης.

Στο Εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης έχει αναπτυχθεί επίσης ένα σκάφος επιφανείας (Σχήμα 1.14) με μορφολογία καταμαράν, το οποίο χρησιμοποιεί πτερύγιο κυματοειδούς κίνησης για παραγωγή πρόωσης. Όμοια με το αρχικό πρωτότυπο, ο μηχανισμός πτερυγίου διαθέτει οκτώ ακτίνες οδηγούμενες σε αυτή την περίπτωση από αδιάβροχους σερβοκινητήρες τύπου R/C. Για την παραγωγή του κύματος χρησιμοποιείται το ίδιο σύστημα CPG που χρησιμοποιεί και το αρχικό πρωτότυπο. Το πτερύγιο είναι τοποθετημένο στο κάτω μέρος του σκάφους και προσανατολισμένο έτσι ώστε οι ακτίνες να εκτείνονται προς τα κάτω. Το σκάφος είναι ενεργειακά αυτόνομο, ενώ η κεντρική μονάδα ελέγχου μπορεί να δεχτεί δεδομένα για μεταβολή των κινηματικών παραμέτρων του κύματος, μέσω ασύρματης ζεύξης bluetooth. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής του εν λόγω οχήματος μελετήθηκαν διάφορες τεχνικές στεγάνωσης των διαμερισμάτων που εμπεριέχουν τη μπαταρία και τα ηλεκτρονικά ελέγχου του σκάφους.

## 1.4 Συμβολή της παρούσας εργασίας

Οι μηχανισμοί και τα πρωτότυπα που αναφέρονται στην προηγούμενη υποενότητα αναπτύχθηκαν στα πλαίσια ερευνητικής δραστηριότητας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, για τη μελέτη και ανάπτυξη καινοτόμων μηχανισμών πρόωσης υποβρύχιων οχημάτων. Σε συνέχεια της δραστηριότητας αυτής, αρχικός σκοπός της παρούσας πτυχιακής ήταν η ανάπτυξη και πειραματική αποτίμηση μιας αναβαθμισμένης εκδοχής μηχανισμού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης. Η αναβάθμιση σε σχέση με το αρχικό πρωτότυπο αφορά κυρίως στη χρήση "έξυπνων" σερβοκινητήρων για την οδήγηση των ακτίνων, αλλά και ανάπτυξη κατάλληλων ηλεκτρονικών και λογισμικού για συντονισμένο έλεγχο της λειτουργίας του πτερυγίου. Αυτή η αναβαθμισμένη εκδοχή του μηχανισμού χρησιμοποιείται σε μια σειρά από πειραματικές μελέτες για την αποτίμηση των χαρακτηριστικών αυτοπρόωσης του συστήματος. Σε δεύτερο στάδιο, τα αποτελέσματα και συμπεράσματα της πρώτης φάσης αξιοποιήθηκαν κατά το σχεδιασμό, την κατασκευή και τον έλεγχο ενός υποβρύχιου ρομποτικού συστήματος, η πρόωση του οποίου βασίζεται σε ένα ζεύγος πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της παρούσας εργασίας.

Μετά τη βιβλιογραφική ανασκόπηση του παρόντος κεφαλαίου, στο δεύτερο κεφάλαιο πα-

ρουσιάζεται το τελικό πρωτότυπο ρομποτικού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας πτυχιακής. Περιγράφεται η κατασκευή των μηχανολογικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων της διάταξης, και η αρχιτεκτονική και οι στρατηγικές ελέγχου που υλοποιήθηκαν για τον έλεγχο της κίνησης των ακτίνων του. Τέλος, αναλύονται τα δεδομένα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία αποτίμησης των χαρακτηριστικών πρόωσης. Επίσης, στην ίδια ενότητα παρουσιάζεται και η ανάπτυξη και πειραματική αποτίμηση ενός δευτερεύοντος μηχανισμού μικρότερων διαστάσεων.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη του υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος με ονομασία SQUIDBOT-mini. Περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής των μηχανικών εξαρτημάτων του, με έμφαση στη στεγάνωσή τους, καθώς επίσης και η αρχιτεκτονική ελέγχου που υλοποιήθηκε και τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται. Τέλος, παρουσιάζονται οι διαθέσιμες λειτουργίες που έχουν υλοποιηθεί στο λογισμικό ελέγχου του ρομποτικού οχήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των στρατηγικών ελέγχου κίνησης του σκάφους και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής αποτίμησής του. Ειδικότερα, περιγράφεται αφενός η μέθοδος παραγωγής των επιθυμητών προφίλ κίνησης των ακτίνων, αφετέρου οι διάφορες στρατηγικές ελέγχου του προσανατολισμού του σκάφους, με εκτενή ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από σειρά πειραμάτων.

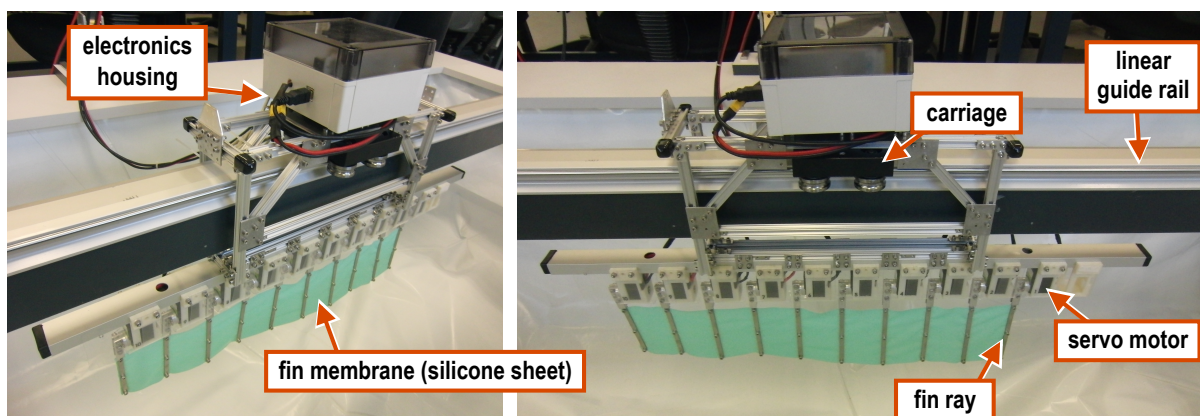
Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το υποβρύχιο ρομποτικό όχημα με ονομασία SQUIDBOT, το οποίο αποτελεί εξέλιξη του SQUIDBOT-mini και βρίσκεται στο στάδιο της κατασκευής-συναρμολόγησης.



## Κεφάλαιο 2

# Πρωτότυπο Ρομποτικού Πτερυγίου Κυματοειδούς Κίνησης

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η ανάπτυξη ενός ρομποτικού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης, ο σχεδιασμός και η κατασκευή του οποίου βασίστηκε στην αποτίμηση της λειτουργίας και απόδοσης του προϋπάρχοντος αρχικού πρωτοτύπου [54] που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 1.3. Η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει τον κυρίως μηχανισμό του πτερυγίου, ο οποίος διαθέτει 10 αυτόνομα οδηγούμενες ακτίνες, διασυνδεδεμένες μεταξύ τους με τμήμα λεπτής ελαστικής μεμβράνης (Σχήμα 2.1). Ο μηχανισμός είναι προσαρμοσμένος σε φορείο που κινείται πάνω σε οδηγό γραμμικής κίνησης ο οποίος είναι τοποθετημένος στο πάνω μέρος δεξαμενής δοκιμών. Μέσω κατάλληλων προφίλ κίνησης των ακτίνων παράγεται προωστική δύναμη η οποία κινεί το φορείο κατά μήκος του οδηγού.



Σχήμα 2.1: Το πρωτότυπο του ρομποτικού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης.

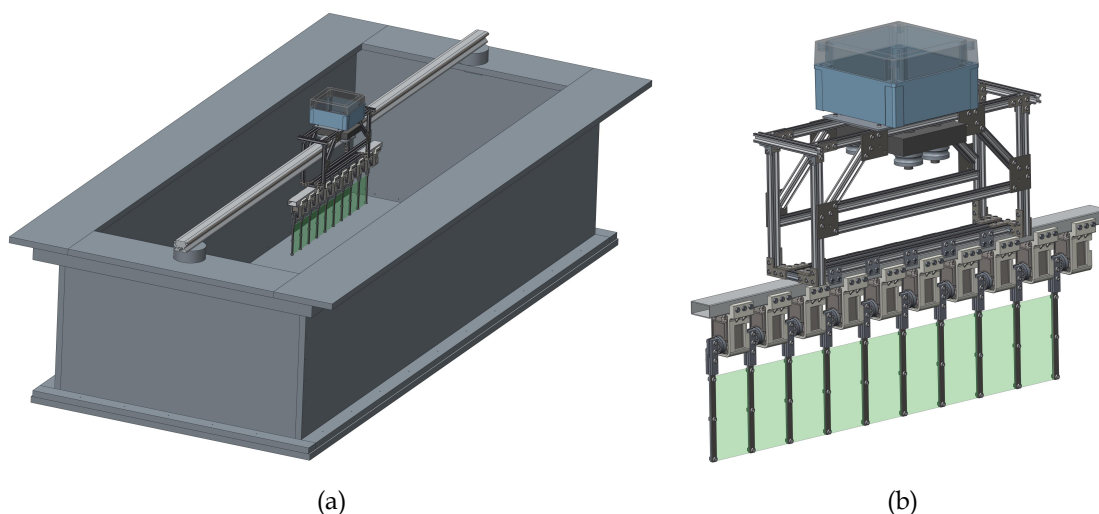
Μια βασική διαφορά του ρομποτικού αυτού πτερυγίου σε σύγκριση με το αρχικό πρωτότυπο, είναι ο τύπος των επενεργητών που χρησιμοποιήθηκαν για την οδήγηση των ακτίνων. Οι προηγμένες δυνατότητες των επενεργητών που επιλέχθηκαν για το τελικό πρωτότυπο οδήγησαν σε μια σειρά από βελτιώσεις, οι οποίες απορρέουν κυρίως από τη μεγαλύτερη ταχύτητα και αποδιδόμενη ροπή των σερβοκινητήρων, που επιτρέπουν την πιστότερη υλοποίηση της προδιαγραφόμενης κυμάτωσης του πτερυγίου για μεγαλύτερο εύρος των κινηματικών παραμέτρων αυτής. Επίσης, οι συγκεκριμένοι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούν προηγμένο σύστημα αμφίδρομης επικοινωνίας μέσω σειριακού διαύλου, το οποίο υποστηρίζει δυνατότητες όπως η

ανάδραση της πραγματικής γωνιακής θέσης του άξονα, της εφαρμοζόμενης τάσης, της θερμοκρασίας, καθώς και πληροφορίες σχετικά με τα κέρδη του εσωτερικού ελεγκτή.

Ένα μειονέκτημα χρήσης των σερβοκινητήρων που επιλέχθηκαν είναι το γεγονός ότι δεν είναι αδιάβροχοι. Αν και δεν προβλέπεται η απευθείας βύθισή τους στο νερό, είναι απαραίτητη η προστασία τους από αυτό, γιατί κατά τη διάρκεια των πειραμάτων διαβρέχονται από τους κυματισμούς και την τύρβη που αναπτύσσεται από την κίνηση του πτερυγίου.

## 2.1 Γενική περιγραφή

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η πειραματική διάταξη που περιλαμβάνει το τελικό πρωτότυπο του ρομποτικού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης. Αυτή μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικά υποσυστήματα, τα κινητά μέρη της διάταξης, δηλαδή τον μηχανισμό πτερυγίου (Σχήμα 2.2b), και τα ακίνητα μέρη της διάταξης. Ο μηχανισμός πτερυγίου περιλαμβάνει το ίδιο το πτερόγιο, τη βάση στήριξής του στο μηχανισμό γραμμικής κίνησης και ένα κουτί που περιέχει τα ηλεκτρονικά ελέγχου. Το δεύτερο υποσύστημα περιλαμβάνει μια δεξαμενή δοκιμών στην οποία διεξάγονται τα πειράματα, έναν οδηγό γραμμικής κίνησης πάνω στον οποίο κινείται το ρομποτικό πτερόγιο, περιφερειακούς αισθητήρες (ρεύματος, δύναμης και απόστασης), ένα τροφοδοτικό και έναν Η/Υ.



Σχήμα 2.2: Μοντέλο CAD της πειραματικής διάταξης: (a) Πειραματική διάταξη και δεξαμενή. (b) Ο μηχανισμός πτερυγίου προσαρμοσμένος στο φορείο με το κουτί των ηλεκτρονικών ελέγχου του.

Το ρομποτικό πτερόγιο διαθέτει δέκα ακτίνες, οδηγούμενες από έξοπνους σερβοκινητήρες οι οποίοι, μέσω κατάλληλων εξαρτημάτων συγκρατούν μεταξύ τους τμήμα λεπτής ελαστικής μεμβράνης. Το πτερόγιο τοποθετείται σε φορείο, το οποίο διαθέτει έδρανα κύλισης που επιτρέπουν στο μηχανισμό πτερυγίου έναν βαθμό ελευθερίας, την κύλισή του κατά μήκος ενός, βιομηχανικού τύπου, οδηγού ευθύγραμμης κίνησης στο επάνω μέρος της δεξαμενής, εντός της οποίας λαμβάνουν χώρα οι πειραματικές δοκιμές (Σχήμα 2.2a). Στο ένα άκρο της δεξαμενής έχει τοποθετηθεί ένας οπτικός αισθητήρας απόστασης, για τη μέτρηση της μετατόπισης του φορείου καθώς αυτό μετακινείται επί του οδηγού ευθύγραμμης κίνησης υπό την επίδραση των προωστικών δυνάμεων που παράγει το πτερόγιο. Στο ίδιο άκρο του οδηγού ευθύγραμμης κίνησης έχει τοποθετηθεί ένας αισθητήρας δύναμης, τύπου load cell (δυναμοκυψέλη), που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ώσης που παράγεται από το πτερόγιο στην οριζόντια κατεύθυνση,

για διαφορετικές τιμές των κινηματικών παραμέτρων της κυμάτωσης.

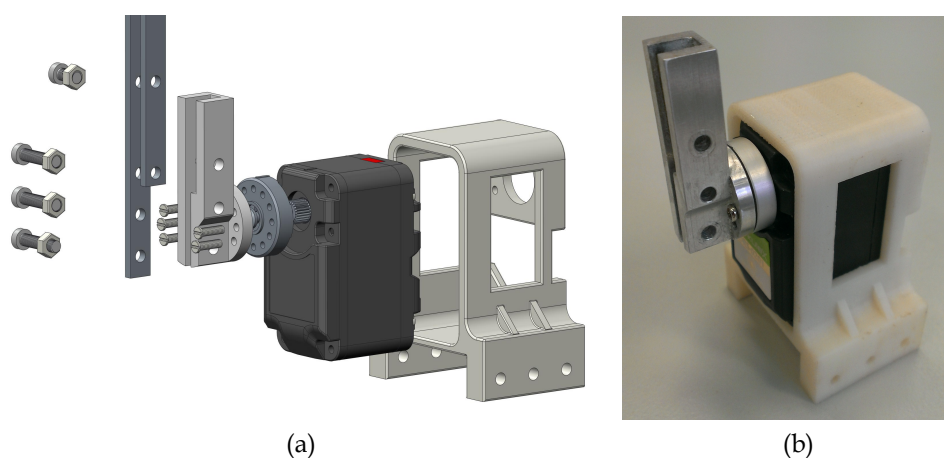
## 2.2 Μηχανολογική σχεδίαση και κατασκευή πρωτοτύπου

Το ρομποτικό πτερύγιο διαθέτει δέκα ακτίνες, οδηγούμενες από "έξυπνους" σερβοκινητήρες τύπου Herkulex DRS-201 της Dongbu, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στην Ενότητα 2.3. Οι ακτίνες είναι προσανατολισμένες με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε όταν η δεξαμενή είναι γεμάτη, οι ακτίνες να βυθίζονται ενώ οι σερβοκινητήρες παραμένουν επάνω από την επιφάνεια του νερού.

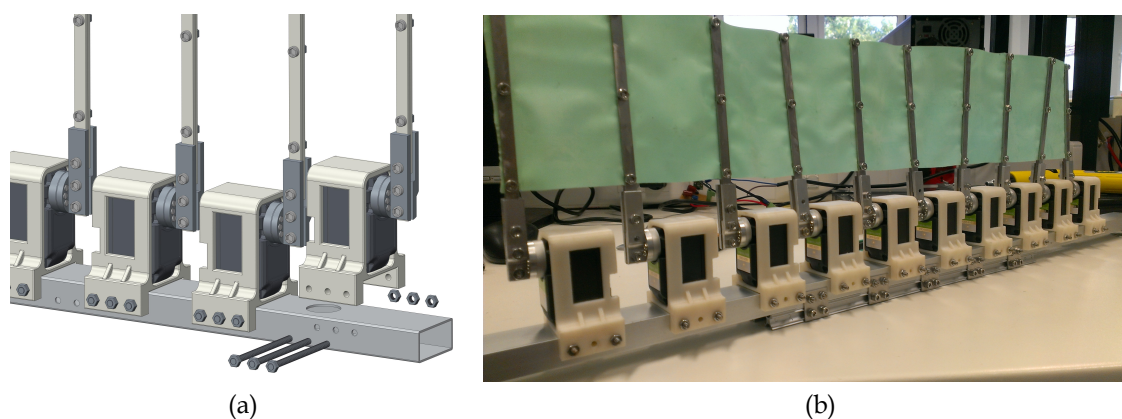
Οι σερβοκινητήρες που οδηγούν τις ακτίνες είναι τοποθετημένοι σε ατομικές βάσεις στήριξης, κατασκευασμένες από θερμοπλαστικό τύπου ABSPlus. Οι βάσεις διαθέτουν ειδική διαμόρφωση για εύκολη συναρμολόγηση και στερέωση των κινητήρων μέσα σε αυτές (Σχήμα 2.3), και φέρουν ανοίγματα στο πίσω μέρος για τη σύνδεση της καλωδίωσης των σερβοκινητήρων αλλά και για επόπτευση μιας ενδεικτικής λυχνίας που διαθέτουν. Στο κάτω μέρος των βάσεων έχει γίνει ειδική διαμόρφωση για συναρμολόγησή τους σε προφίλ αλουμινίου, καθώς και οπές για στερέωση της βάσης στο προφίλ με ατέρμονα κοχλία και περικόχλια.

Η μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε στο πτερύγιο προέρχεται από ενιαίο φύλλο σιλικονούχου καουτσούκ (silicone rubber) πάχους 0.275 mm, με συνολικό μήκος 51.4 cm και ύψος 9.6 cm. Η μεμβράνη συγκρατείται κατά μήκος του πτερυγίου με τη βοήθεια ελασμάτων από ανοξείδωτο χάλυβα που αποτελούν τις ακτίνες των πτερυγίων, δύο ανά κινητήρα. Τα ελάσματα αυτά έχουν κατασκευαστεί από φύλλο ανοξείδωτου χάλυβα πάχους 2 mm με διαστάσεις 6 mm × 11.5 cm το ένα και 6 mm × 14 cm το δεύτερο και πιέζουν τη μεμβράνη ανάμεσά τους όντας ενωμένα μεταξύ τους με τρεις βίδες και περικόχλια. Οι ακτίνες προσαρμόζονται στον άξονα του κινητήρα μέσω ενός συνδετικού τεμαχίου κατασκευασμένου από αλουμίνιο. Αυτό διαθέτει οπές σε κυκλική διάταξη, οι οποίες αντιστοιχούν στις οπές που διαθέτει το horn του κινητήρα, καθώς και κατάλληλη εσοχή στην οποία προσαρμόζονται οι ακτίνες, πάλι με βίδες και περικόχλια. Στο Σχήμα 2.3α απεικονίζεται ο τρόπος συναρμολόγησης των επιμέρους εξαρτημάτων που απαρτίζουν τη μονάδα οδήγησης της κάθε ακτίνας.

Η συναρμολόγηση των μονάδων κίνησης ακτίνας στο σασί του πτερυγίου εικονίζεται στο Σχήμα 2.4. Για τη στήριξη των σερβοκινητήρων σε εν σειρά διάταξη, χρησιμοποιήθηκε προφίλ



Σχήμα 2.3: Μονάδα κίνησης ακτίνας: (α) Σχέδιο CAD σε αποσυναρμολογημένη όψη, (β) Πραγματικό πρωτότυπο



Σχήμα 2.4: Μηχανισμός πτερυγίου: (a) Μοντέλο CAD του τρόπου συναρμολόγησης της μονάδας κίνησης ακτίνας στο σασί του πτερυγίου, (b) Πραγματικό πρωτότυπο μηχανισμού πτερυγίου.

αλουμινίου ορθογωνικής διατομής, με διαστάσεις  $30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ . Για τη στήριξη του κάθε σερβοκινητήρα έγιναν τρεις τρύπες  $3 \text{ mm}$  στη στενή πλευρά του προφίλ, από όπου διέρχεται ανοξείδωτος ατέρμονας κοχλίας, ο οποίος στηρίζεται με περικόχλια ασφαλείας. Στην επάνω φαρδιά πλευρά του προφίλ έγιναν επιπρόσθετες οπές διαμέτρου  $16 \text{ mm}$  μέσα από τις οποίες γίνεται όδευση των καλωδίων των σερβοκινητήρων. Επίσης, το προφίλ διαθέτει οπές για τη στερέωσή του στον κλωβό του μηχανισμού γραμμικής κίνησης.

Ο κλωβός του μηχανισμού γραμμικής κίνησης αποτελείται από προφίλ αλουμινίου τύπου MicroRAX διαστάσεων  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  και ένα φορείο με έδρανα τύπου U (ράουλα), συναρμολογημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η κίνηση του μηχανισμού κατά μήκος της ράγας.

Οι βάσεις στήριξης των σερβοκινητήρων σχεδιάστηκαν στο λογισμικό PTC Creo 2.0 και κατασκευάστηκαν από θερμοπλαστικό υλικό τύπου ABSplus με τη βοήθεια συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης Dimension Elite της Stratasys Inc. Τα ελάσματα που χρησιμοποιούνται στις ακτίνες και το τεμάχιο που συνδέει τις ακτίνες με τον άξονα του σερβοκινητήρα σχεδιάστηκαν επίσης στο PTC Creo 2.0 και κατασκευάστηκαν σε κέντρο κατεργασίας κάθετου τύπου (CNC) Haas Vf-2. Τα αναλυτικά μηχανολογικά σχέδια των εξαρτημάτων του μηχανισμού του πτερυγίου παρατίθενται στο Παράρτημα A.1.

## 2.3 Σερβοκινητήρες οδήγησης ακτίνων

Οι σερβοκινητήρες που επιλέχθηκαν για την οδήγηση των ακτίνων είναι οι Herkulex DRS-201 της εταιρίας Dongbu, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οποίων συνοψίζονται στο Σχήμα 2.5. Αυτοί χρησιμοποιούν ασύγχρονο σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας multi drop TTL full duplex και είναι δυνατός ο έλεγχος έως και 254 από αυτούς σε ένα δίκτυο.

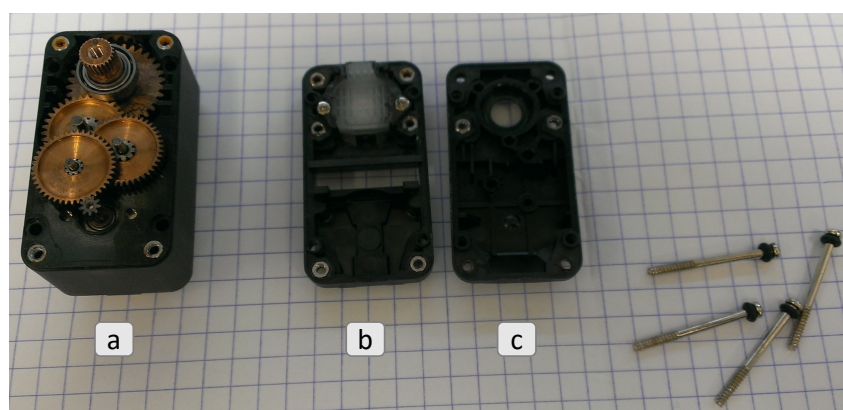
Η μετάδοση της κίνησης γίνεται μέσω μεταλλικών οδοντωτών τροχών (Σχήμα 2.6), με σχέση μείωσης  $1 : 266$ . Η χρήση μεταλλικών εξαρτημάτων για τη μετάδοση της κίνησης αυξάνει την ανθεκτικότητα του μηχανικού μέρους του σερβοκινητήρα σε μεγαλύτερες τιμές αποδιδόμενης ροπής σε βάθος χρόνου. Σύμφωνα με τις πληροφορίες που δίνει ο κατασκευαστής τους, η αποδιδόμενη ροπή ανέρχεται στα  $24 \text{ kg cm}$  για τροφοδοσία  $7.4 \text{ V}$ . Επίσης, είναι δυνατή η συνεχόμενη περιστροφική κίνηση του άξονα, με ελεγχόμενο εύρος  $320^\circ$ . Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται το εσωτερικό του μπροστά μέρους του σερβοκινητήρα και τα δύο καπάκια του. Παρατηρείται



**Input Voltage:** 7-12V DC  
**Operating Speed (7.4V):** 0.147sec/60 degrees at no load  
**Stall Torque (7.4V):** 24.0kg-cm  
**Operating Temperature Range:** 0 to 85 Degree C  
**Operating Angle:** 320°  
**Resolution:** 0.325°  
**Motor Type:** Coreless Motor  
**Potentiometer Drive:** Indirect Drive  
**Bearing Type:** Dual Ball Bearings  
**Gear Type:** Metal  
**Feedback:** position, speed, temperature, load, voltage  
**Control Algorithm:** PID, feedforward, trapezoidal velocity profile, velocity override, torque saturator and offset  
**Dimensions:** 44 x 24 x 32 mm  
**Weight:** 60g

Σχήμα 2.5: Ο σερβοκινητήρας DRS-201 της εταιρίας Dongbu, που χρησιμοποιείται για την οδήγηση των ακτίνων του μηχανισμού στο τελικό πρωτότυπο.

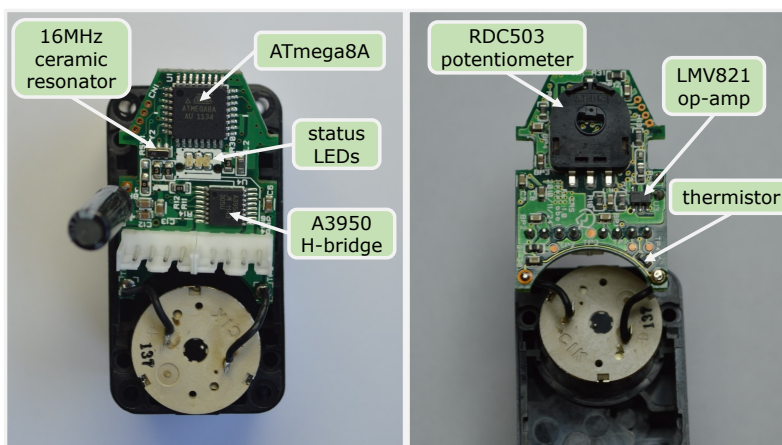
το σύστημα μείωσης αλλά και το ένα από τα δύο ρουλεμάν που χρησιμοποιούνται στον οδοντωτό τροχό του άξονα. Το οπίσθιο καπάκι (b στο Σχήμα 2.6) διαθέτει διάφανο ένθετο μέσω του οποίου είναι ορατό το φως των ενδεικτικών λυχνιών. Φαίνεται επίσης η ορθογωνικής διατομής οπή από την οποία προεξέχουν οι κονέκτορες της καλωδίωσης. Στο εμπρόσθιο καπάκι υπάρχει η οπή από την οποία εξέρχεται ο άξονας του τελευταίου οδοντωτού τροχού, μέσω περιστροφικού εδράνου κύλισης.



Σχήμα 2.6: Η εμπρόσθια όψη του σερβοκινητήρα με τα δύο καπάκια του.

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται το εσωτερικό του πίσω μέρους του σερβοκινητήρα. Ειδικότερα, φαίνεται ο ίδιος ο κινητήρας και το τυπωμένο κύκλωμα (PCB) με τα ηλεκτρονικά ελέγχου. Στην έξω πλευρά του PCB (Σχήμα 2.7a) βρίσκεται ο μικροελεγκτής ATmega8A της εταιρίας Atmel, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο χαμηλού επιπέδου της λειτουργίας του σερβοκινητήρα. Η λειτουργία του μικροελεγκτή χρονίζεται στα 16 MHz μέσω κεραμικού ταλαντωτή ο οποίος φέρει τον κωδικό CSTCE16M0V53A-R0. Στην ίδια πλευρά της πλακέτας φαίνεται η Η-γέφυρα A3950 της εταιρίας Allegro MicroSystems LLC, η οποία είναι υπεύθυνη για την τροφοδοσία και οδήγηση μέσω PWM του κινητήρα. Επίσης, υπάρχουν και τρεις ενδεικτικές φωτοдиодι LED, το φως των οποίων είναι ορατό έξω από το σασί του σερβοκινητήρα μέσω του διάφανου ένθετου που αναφέρθηκε προηγουμένως.

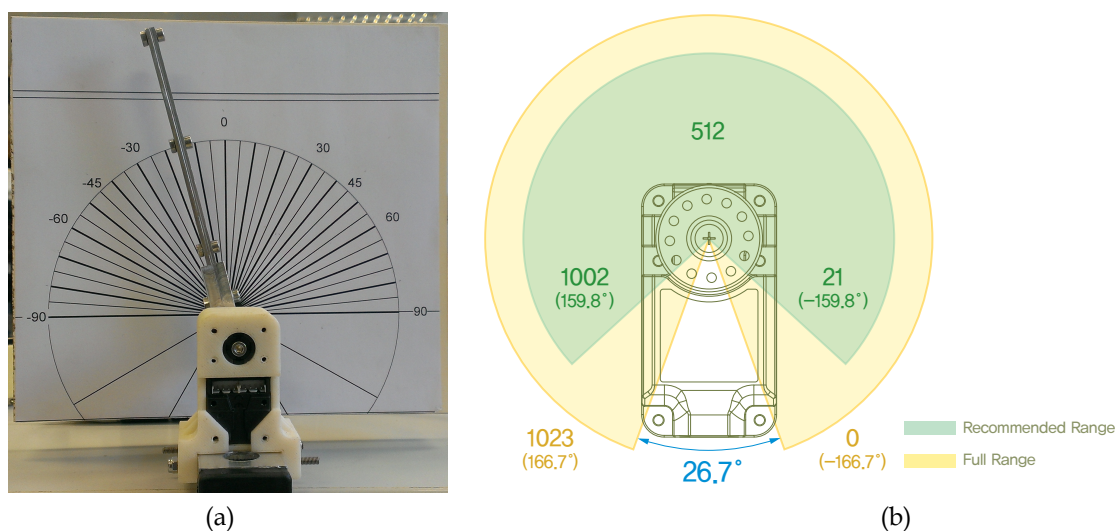
Στην άλλη πλευρά της πλακέτας (Σχήμα 2.7b) υπάρχει περιστροφικό ποτενσιόμετρο τύπου RDC503 της εταιρίας ALPS το οποίο προσαρμόζεται στον άξονα του σερβοκινητήρα, για τη μέτρηση της γωνιακής του θέσης. Το σήμα του ποτενσιόμετρου, το οποίο λαμβάνει ο μικροελεγκτής του σερβοκινητήρα μέσω ADC, χρησιμοποιείται για τον έλεγχο PID κλειστού βρόχου



Σχήμα 2.7: Η πλακέτα του σερβοκινητήρα. Επισημαίνονται τα κυρίως εξαρτήματά της.

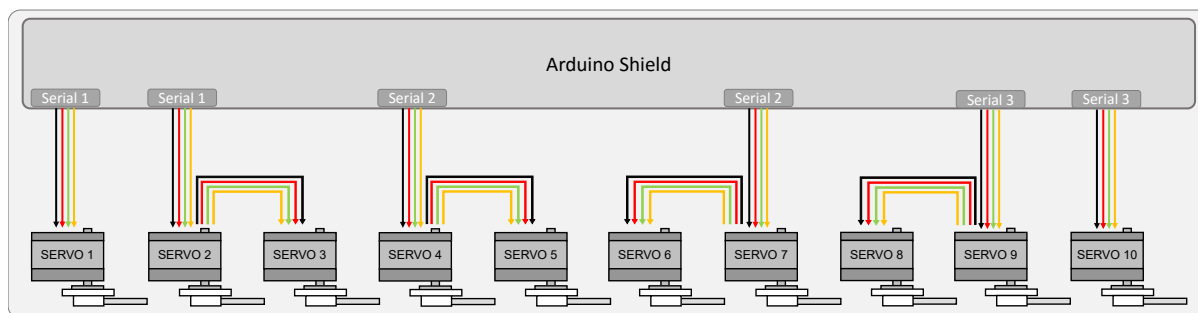
της γωνιακής θέσης του άξονα. Τέλος, επισημαίνεται ένα thermistor το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας μέσω ADC του μικροελεγκτή ATmega8A.

Για ποιοτέρη αναπαραγωγή του επιθυμητού κυματοειδούς πρότυπου κίνησης, πριν την προσαρμογή τους στο προφίλ αλουμινίου, για κάθε σερβοκινητήρα έχει προηγηθεί διαδικασία βαθμονόμησης. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την τοποθέτηση του σερβοκινητήρα σε ειδική διάταξη (Σχήμα 2.8a). Μέσω μοντέλου Simulink αποστέλλονται εντολές για μετακίνηση της ακτίνας στην κατακόρυφη θέση. Η τιμή που προσεγγίζει καλύτερα τη θέση αυτή αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται στη συνέχεια στο λογισμικό του μικροελεγκτή ως γωνιακή θέση αναφοράς.



Σχήμα 2.8: Βαθμονόμηση σερβοκινητήρων: (a) Η διάταξη βαθμονόμησης, (b) Εύρος ποτενσιόμετρου σερβοκινητήρα.

Η εταιρία κατασκευής των σερβοκινητήρων παρέχει πληροφορίες σχετικά με το εύρος μέτρησης του ποτενσιόμετρου, συνολικά 320° που είναι προσαρμοσμένο στον άξονα του σερβοκινητήρα (Σχήμα 2.8b). Κατά τη συναρμολόγηση του συνδετικού τεμαχίου που συγκρατεί την ακτίνα γίνεται προσπάθεια όταν η ακτίνα είναι στην κατακόρυφη θέση να συμπίπτει με το μέσο της μέτρησης του ποτενσιόμετρου (στάθμη 512), έτσι ώστε κατά τη λειτουργία του σερβοκινητήρα να αποφεύγεται η "τυφλή" περιοχή του ποτενσιόμετρου.

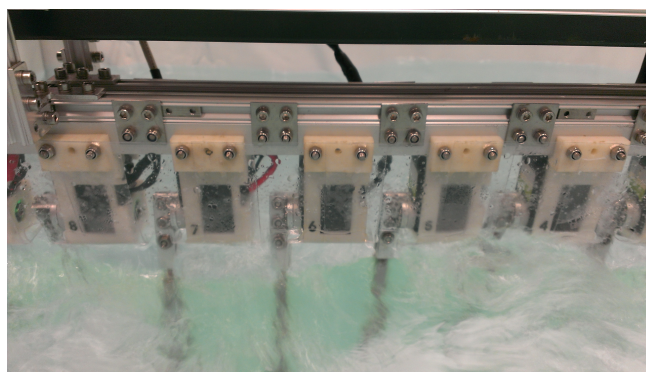


Σχήμα 2.9: Καλωδίωση σερβοκινητήρων

Για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των σερβοκινητήρων και του μικροελεγκτή χρησιμοποιούνται καλώδια 4 αγωγών με ηλεκτρομαγνητική θωράκιση τα οποία έχουν τροποποιηθεί έτσι ώστε το ένα άκρο τους να συνδέεται στην πλακέτα επέκτασης του μικροελεγκτή (βλ. Ενότητα 2.4.1) και το άλλο άκρο στον κονέκτορα του σερβοκινητήρα. Επίσης, γίνεται χρήση της δυνατότητας διασύνδεσης εν σειρά που παρέχουν οι σερβοκινητήρες. Συνολικά συνδέονται απευθείας μέσω καλωδίων στον μικροελεγκτή έξι σερβοκινητήρες, ενώ οι τέσσερις από αυτούς μεταβιβάζουν δεδομένα και σε γειτονικούς τους σερβοκινητήρες, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9.

### 2.3.1 Προστασία σερβοκινητήρων

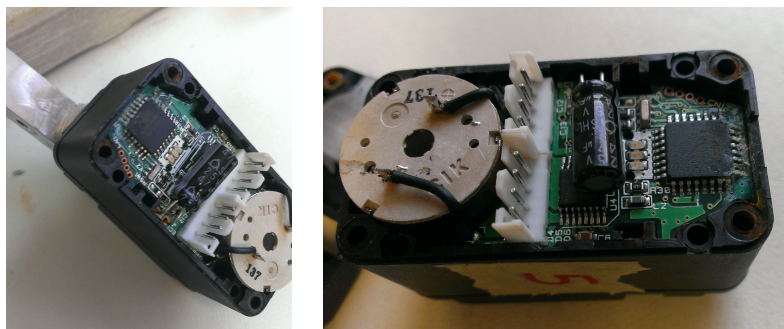
Δεδομένου ότι οι σερβοκινητήρες οδήγησης των ακτίνων δεν είναι αδιάβροχοι, κρίθηκε σκόπιμη η προστασία τους από το νερό που τους διαβρέχει (Σχήμα 2.10). Αρχικά, περιμετρικά της διάταξης εφαρμόστηκε προστατευτική ζελατίνα, από την οποία προεξέχουν οι ακτίνες. Επιπλέον, έγινε επέμβαση στο σασί αλλά και στα ηλεκτρονικά στο εσωτερικό τους, για περαιτέρω προστασία τους.



Σχήμα 2.10: Πειραματική διάταξη κατά τη διάρκεια πειράματος

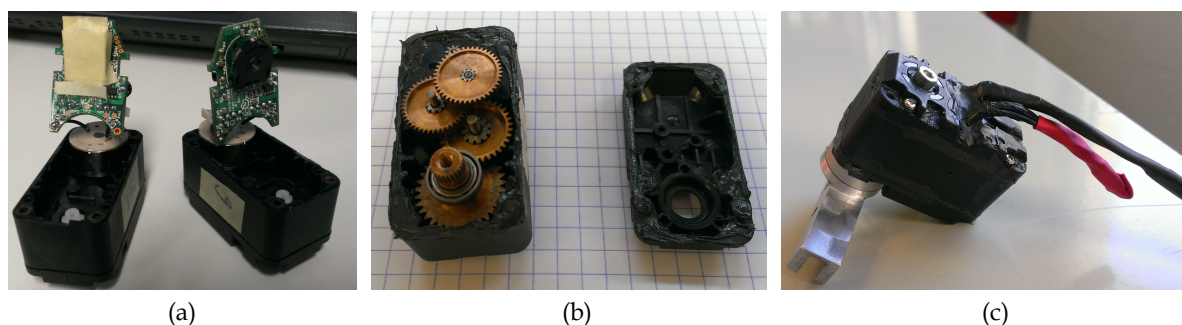
Για το σκοπό αυτό ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Αποσυναρμολόγηση του μηχανισμού και αφαίρεση της πλακέτας από το πλαστικό κέλυφος.
- Ψεκασμός της πλακέτας με αντιοξειδωτικό σπρέι επαφών (χρησιμοποιήθηκε το σχετικό προϊόν Kontakt 60 της εταιρίας KONTAKT CHEMIE) για αφαίρεση της οξείδωσης.
- Μασκάρισμα ή αφαίρεση του ποτενσιόμετρου (Σχήμα 2.12a) και άλλων εξαρτημάτων για προστασία τους από το βερνίκι.



Σχήμα 2.11: Οξείδωση στην πλακέτα ελέγχου του σερβοκινητήρα λόγω εισροής νερού στο εσωτερικό του

- Ψεκάσμος της πλακέτας με ειδικό προστατευτικό βερνίκι (χρησιμοποιήθηκε το προϊόν t7 της εταιρίας Teslanol) για μελλοντική προστασία της από την υγρασία.
- Επαναφορά του ποτενσιόμετρου στη θέση του και τοποθέτηση της πλακέτας στη θέση της μέσα στο κέλυφος του σερβοκινητήρα.
- Εφαρμογή και στις τέσσερις επιφάνειες των δύο καπακιών που έρχονται σε επαφή μεταξύ τους φλαντζόκολλας (χρησιμοποιήθηκε το προϊόν Reinzosil της εταιρίας Victor Reinz) για μόνωση της ένωσης (Σχήμα 2.12b), πριν κλείσουν τα καπάκια.
- Τοποθέτηση των καλωδίων στους ακροδέκτες στο πίσω μέρος του σερβοκινητήρα και εφαρμογή υλικού υγρής μόνωσης (χρησιμοποιήθηκε το προϊόν Reinzosil 557 anthracite της εταιρίας Victor Reinz) στην περιοχή για σφράγιση των οπών (Σχήμα 2.12c).



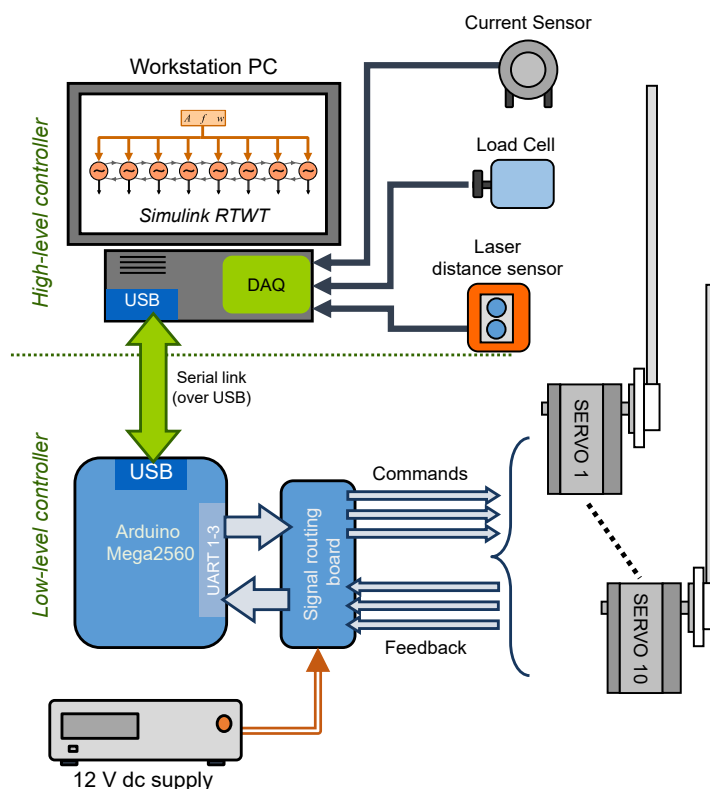
Σχήμα 2.12: Επισκευή σερβοκινητήρα: (a) Μασκάρισμα ποτενσιόμετρου για ψεκάσμο με προστατευτικό βερνίκι, (b) Επιστροφή φλαντζόκολλας στα ανοίγματα του κελυφους, (c) Κάλυψη των ακροδεκτών με υγρό μονωτικό υλικό.

Για χρήση των σερβοκινητήρων εκτός νερού με αρκετή όμως επαφή με αυτό λόγω της κίνησης του περυγίου, η προστασία που παρέχει η παραπάνω μέθοδος φαίνεται επαρκής. Για βύθιση του μηχανισμού στο νερό θα πρέπει να μελετηθούν άλλες μέθοδοι στεγάνωσης και προστασίας από την έκθεση στο νερό.

## 2.4 Αρχιτεκτονική ελέγχου και ηλεκτρονικά υποσυστήματα

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η αρχιτεκτονική ελέγχου και τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα της πειραματικής διάταξης, τα οποία περιλαμβάνουν τον ίδιο το μηχανισμό περυγίου και τη μονάδα ελέγχου του, αλλά και τους αισθητήρες, μια κάρτα DAQ και έναν Η/Υ που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων.





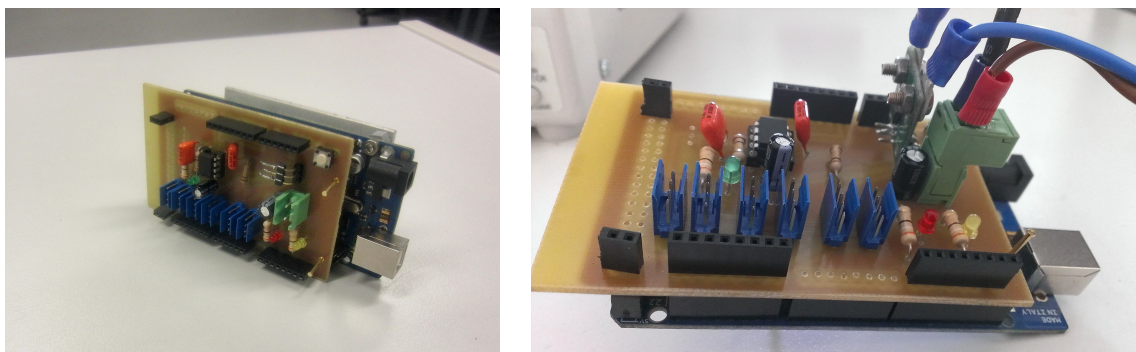
Σχήμα 2.13: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής ελέγχου της πειραματικής διάταξης.

Στο Σχήμα 2.13 εικονίζεται η συνολική αρχιτεκτονική ελέγχου του περυγίου και των λοιπών περιφερειακών της πειραματικής διάταξης. Η αρχιτεκτονική μπορεί να χωριστεί σε δύο ιεραρχημένα επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο υλοποιείται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή σε περιβάλλον Simulink του Matlab. Μέσω της επέκτασης Real Time Windows Target (RTWT), υπολογίζονται οι επιθυμητές γωνίες των σερβοκινητήρων για κάθε κύκλο ελέγχου, μέσω ενός συστήματος CPG το οποίο περιγράφεται στην Ενότητα 2.6.2. Επίσης, στον Η/Υ τροφοδοτούνται μέσω κάρτας Data Acquisition (NI-6221 της National Instruments) πληροφορίες από τα αισθητήρια απόστασης, δύναμης και ρεύματος της διάταξης. Το δεύτερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής ελέγχου περιλαμβάνει τη μονάδα του μικροελεγκτή που βρίσκεται στον μηχανισμό του περυγίου, ο οποίος αναλαμβάνει την υλοποίηση των τροχιών και τη μεταβίβαση των δεδομένων μεταξύ του Η/Υ στο ανώτερο επίπεδο και των σερβοκινητήρων. Ο μικροελεγκτής δέχεται σειριακά τις επιθυμητές θέσεις από το Simulink και συντάσσει τα πακέτα εντολών που στη συνέχεια αποστέλλονται μέσω τριπλού σειριακού διαύλου στους σερβοκινητήρες. Επίσης, συλλέγει πληροφορίες για την τρέχουσα πραγματική γωνιακή θέση των ακτίνων του περυγίου, τις οποίες προωθεί στον Η/Υ ελέγχου. Η αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των δύο επιπέδων υλοποιείται μέσω σειριακού πρωτοκόλλου, από τη θύρα USB.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επιμέρους ηλεκτρονικά εξαρτήματα της πειραματικής διάταξης.

#### 2.4.1 Μονάδα ελέγχου χαμηλού επιπέδου

Για τον έλεγχο χαμηλού επιπέδου των μονάδων οδήγησης των ακτίνων στο τελικό πρωτότυπο του περυγίου χρησιμοποιείται η αναπτυξιακή πλατφόρμα Arduino Mega 2560, με τα



Σχήμα 2.14: Η πλακέτα επέκτασης προσαρμοσμένη στο αναπτυξιακό Arduino Mega 2560.

ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά:

- Μικροελεγκτής ATmega2560, με 8-bit αρχιτεκτονική RISC
- Συχνότητα χρονισμού λειτουργίας 16MHz
- 248k μνήμη FLASH για τον κώδικα της εφαρμογής
- 8k μνήμη SRAM, 4k μνήμη EEPROM
- 4 χρονιστές 16-bit, 2 χρονιστές 8-bit
- 14 έξοδοι hardware PWM
- 2 μονάδες 10-bit ADC, 16 αναλογικές εισοδοι
- 4 μονάδες σειριακής διασύνδεσης USART
- Υποστήριξη πρωτοκόλλων SPI, I2C
- Τάση λειτουργίας 5V, εύρος τροφοδοσίας 7-12V
- Προγραμματισμός μέσω USB/bootloader

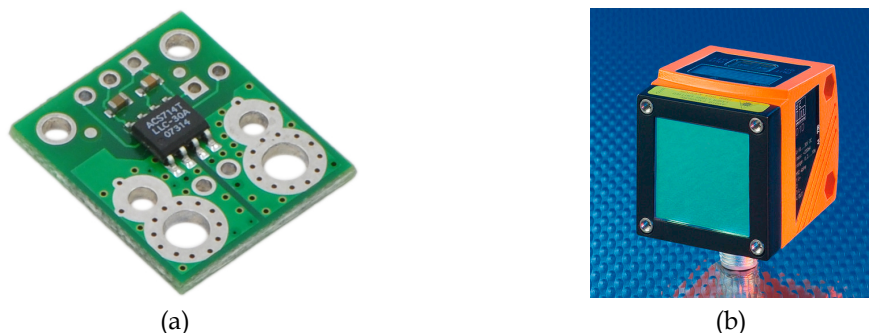
Ένα από τα κύρια κριτήρια επιλογής της πλατφόρμας Arduino Mega 2560 αποτέλεσε η ύπαρξη τεσσάρων ανεξάρτητων μονάδων σειριακής επικοινωνίας (UART), οι οποίες αξιοποιούνται για την υλοποίηση πολλαπλών σειριακών διαύλων επικοινωνίας του συστήματος με τους σερβοκινητήρες οδήγησης των ακτίνων. Επιπλέον πλεονεκτήματα αποτελούν το μεγάλο μέγεθος διαθέσιμης μνήμης προγράμματος, καθώς και η ευκολία ανάπτυξης εφαρμογών με την εν λόγω πλατφόρμα, χάρη στο εύχρηστο, ανοιχτού κώδικα, περιβάλλον προγραμματισμού Arduino Software IDE.

Για τη διευκόλυνση της διασύνδεσης των σημάτων εισόδων/εξόδων του μικροελεγκτή, αλλά και για την τροφοδοσία των σερβοκινητήρων, κατασκευάστηκε κατάλληλη πλακέτα επέκτασης για το μικροελεγκτή, η οποία εφαρμόζει στο επάνω μέρος του αναπτυξιακού του Arduino Mega2560, μέσω ακιδοσειρών (Σχήμα 2.14).

#### 2.4.2 Αισθητήρας ρεύματος

Για τη μέτρηση και καταγραφή του συνολικού ρεύματος της διάταξης χρησιμοποιείται αισθητήρας ρεύματος ACS714 της Allegro (Σχήμα 2.15a), η λειτουργία του οποίου βασίζεται στο φαινόμενο Hall. Η μέτρηση αυτή γίνεται με σκοπό τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ισχύος συναρτήσει των χαρακτηριστικών της εκτελούμενης κυματοειδούς κίνησης του περυσίου. Η συγκεκριμένη υλοποίηση του αισθητηρίου παρέχει δυνατότητα μέτρησης έντασης ρεύματος σε εύρος από  $-30\text{ A}$  έως  $+30\text{ A}$ , με αντίστοιχη τάση εξόδου εύρους  $0\text{ V}$  έως  $+5\text{ V}$  (για τιμή ρεύματος  $0\text{ A}$  αντιστοιχεί τιμή τάσης εξόδου  $2.5\text{ V}$ ). Η ευαισθησία του είναι της τάξης των

185 mV / A, με τυπικό σφάλμα  $\pm 1.5\%$ . Επιπρόσθετα, ο αισθητήρας προσφέρει ηλεκτρική απομόνωση μέχρι 2.1 kVRMS. Η διάταξη του αισθητήρα βρίσκεται τοποθετημένη στο εξωτερικό κωβό διασύνδεσης και τροφοδοσίας του ρομποτικού περυγίου (βλ. Ενότητα 2.4.7), για την μέτρηση του καταναλισκόμενου ρεύματος απευθείας από το τροφοδοτικό.



Σχήμα 2.15: Αισθητήρες διάταξης: (a) Αισθητήρας ρεύματος, (b) Αισθητήρας απόστασης.

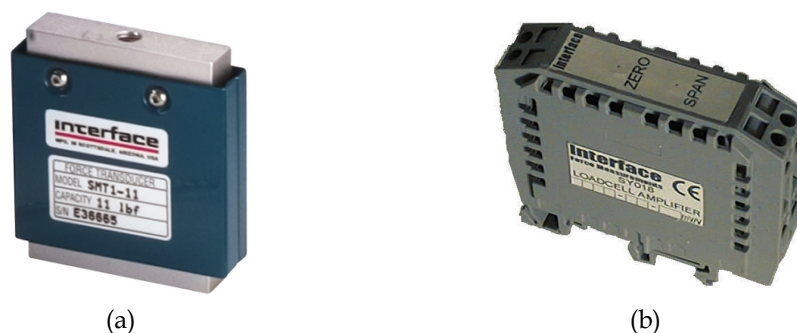
### 2.4.3 Αισθητήρας απόστασης

Στο ένα άκρο της δεξαμενής δοκιμών τοποθετήθηκε αισθητήρας απόστασης Efector 200-Od100 της εταιρίας Ifm (Σχήμα 2.15a), ο οποίος χρησιμοποιείται για την καταγραφή της κίνησης του ρομποτικού περυγίου επί του οδηγού γραμμικής κίνησης. Ο αισθητήρας χρησιμοποιεί ορατή ακτίνα λέιζερ και έχει δυνατότητα μέτρησης απόστασης από 20 cm ως 1000 cm. Εκτός του αναλογικού σήματος εξόδου που τροφοδοτείται στον Η/Υ, παρέχει και αριθμητική ένδειξη τριών δεκαδικών της απόστασης σε ενσωματωμένη οθόνη.

### 2.4.4 Αισθητήρας δύναμης

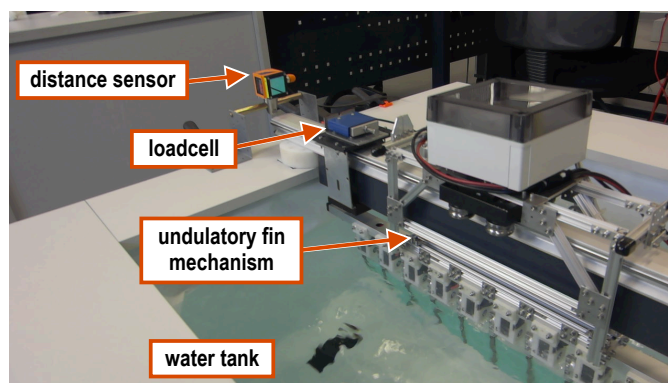
Στα ηλεκτρονικά ελέγχου του τελικού πρωτοτύπου περιλαμβάνεται και μια δυναμοκυψέλη SMT1-50N της εταιρίας Interface (Σχήμα 2.16a), η οποία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της παραγόμενης ώσης του περυγίου. Έχει δυνατότητα μέτρησης μέχρι 50 N, και αντοχή σε εφαρμογή δύναμης μέχρι 500 N, με τάση εξόδου 2 mV ανά Volt της τάσης διέγερσής του.

Ο αισθητήρας οδηγείται από τον ενισχυτή SY038 της εταιρίας Interface (Σχήμα 2.16b), ο οποίος παρέχει την σταθεροποιημένη τάση διέγερσης (10 V) της δυναμοκυψέλης από την τάση τροφοδοσίας του (24 V). Επίσης, ενισχύει τη χαμηλή τάσης εξόδου του αισθητήρα ( $\pm 2$  V) σε σήμα εύρους  $\pm 10$  V για τη βέλτιστη προσαρμογή στην κάρτα πρόσληψης δεδομένων.



Σχήμα 2.16: Αισθητήρες διάταξης: (a) Αισθητήρας δύναμης, (b) Ενισχυτής.

Για πιο ακριβή μέτρηση της απόστασης, της δύναμης και του ρεύματος, πριν τη χρήση των αισθητήρων έχει προηγηθεί βαθμονόμησή τους, από την οποία προκύπτει ότι παρουσιάζουν



Σχήμα 2.17: Η πειραματική διάταξη στη δεξαμενή δοκιμών.

γραμμική συμπεριφορά. Στο Σχήμα 2.17 εικονίζεται ο μηχανισμός πτερυγίου μέσα στη δεξαμενή δοκιμών. Επισημαίνεται η θέση των αισθητήρων δύναμης και απόστασης.

#### 2.4.5 Κάρτα πρόσληψης δεδομένων (DAQ)

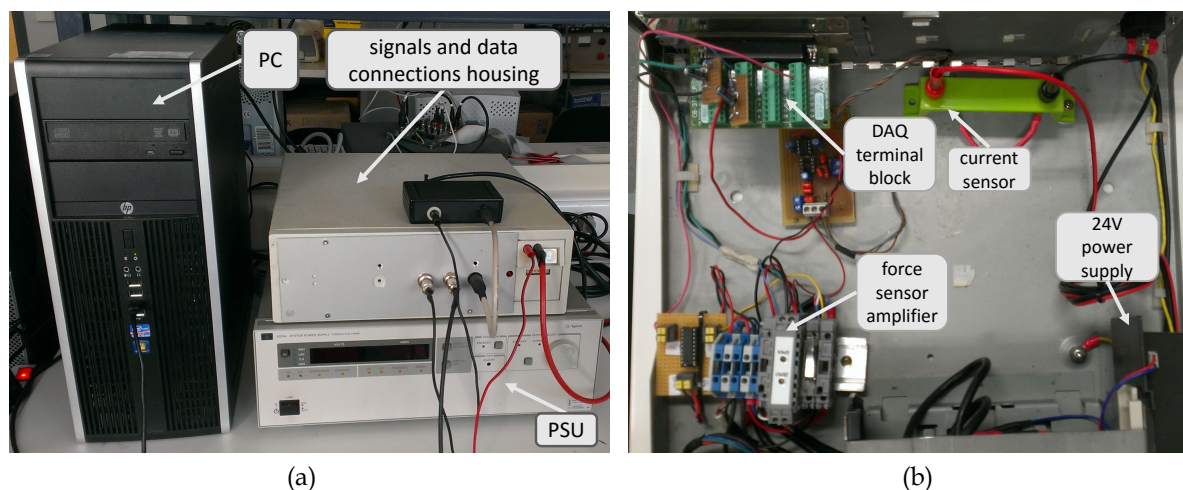
Για τη συλλογή και ψηφιοποίηση των μετρήσεων από τα αισθητήρια της διάταξης στον Η/Υ χρησιμοποιείται κάρτα Data Acquisition (DAQ), μοντέλο PCI-6221 (37-Pin) της εταιρίας National Instruments. Η εν λόγω κάρτα παρέχει 16 κανάλια μέτρησης (8 διαφορικά ή 16 single ended) και 16-bit ανάλυση ψηφιοποίησης των αναλογικών σημάτων. Ειδικότερα, για τους αισθητήρες δύναμης και ρεύματος έχουν υλοποιηθεί αναλογικά RC χαμηλοπερατά φίλτρα (anti-aliasing) πρώτης τάξης με συχνότητα αποκοπής τα 50 Hz, και γίνεται μέτρηση τόσο του αφιλτράριστου (κανάλια AI0 και AI6 αντίστοιχα) όσο και του φιλτραρισμένου (κανάλια AI8 και AI5) σήματος. Η μέτρηση των σημάτων απόστασης (κανάλι AI7) και δύναμης γίνεται σε εύρος  $\pm 10$  V, ενώ η μέτρηση του καταναλισκόμενου ρεύματος γίνεται σε εύρος  $\pm 5$  V. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε single ended συνδεσμολογία.

#### 2.4.6 Μονάδες τροφοδοσίας

Οι σερβοκινητήρες που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση των ακτίνων έχουν εύρος τάσης λειτουργίας 7 – 12 V. Επιλέχθηκε η λειτουργία τους στα 12 V για μέγιστη απόδοση ροπής, έτσι ώστε να γίνεται όσο το δυνατόν πιστότερη αναπαραγωγή του επιθυμητού προφίλ κίνησης. Σε αυτό το επίπεδο τάσης, απαιτείται ικανότητα παροχής ρεύματος έντασης μέχρι και 1.5 A ανά σερβοκινητήρα. Για την τροφοδοσία τους χρησιμοποιήθηκε τροφοδοτικό 6030A System power supply της Agilent με εύρος τάσης 0 – 200 V, μέγιστο ρεύμα 17 A και ισχύ 1000 W. Επίσης, χρησιμοποιείται τροφοδοτικό 24 V για την τροφοδοσία των αισθητήρων απόστασης και δύναμης, ενώ ο αισθητήρας ρεύματος τροφοδοτείται από την ίδια γραμμή μέσω ολοκληρωμένου κυκλώματος MAX6350 της Maxim Integrated το οποίο του παρέχει σταθεροποιημένη τάση 5 V.

#### 2.4.7 Κουτί διασύνδεσης και συλλογής σημάτων

Για τη διευκόλυνση συλλογής των σημάτων και προώθησής τους στην κάρτα DAQ που βρίσκεται μέσα στον Η/Υ, κάποια από τα περιφερειακά εξαρτήματα της διάταξης τοποθετήθηκαν μέσα σε κουτί παλιού Η/Υ. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.18b μέσα στο κουτί οδεύονται τα σήματα των αισθητήρων δύναμης και απόστασης, ενώ και ο αισθητήρας ρεύματος είναι τοποθετημένος σε πλαστική βάση. Επίσης, στο δεξιό μέρος του σχήματος φαίνεται το τροφοδοτικό 24 V ενώ κάτω αριστερά βρίσκεται ο ενισχυτής του αισθητήρα δύναμης. Τέλος, στο πάνω αριστερό



Σχήμα 2.18: Περιφερειακά ηλεκτρονικά εξαρτήματα διάταξης: (α) Ο εξωτερικός Η/Υ, το τροφοδοτικό και το κούτι διασύνδεσης και συλλογής σημάτων, (β) Το εσωτερικό του κούτιου διασύνδεσης και συλλογής σημάτων.

μέρος του σχήματος φαίνεται το terminal block CB-37F-LP της εταιρίας National Instruments, στο οποίο συνδέονται τα σήματα που καταλήγουν στην κάρτα DAQ. Στο Σχήμα 2.18α φαίνεται η συνολική διάταξη με τον εξωτερικός Η/Υ, το τροφοδοτικό του συστήματος και το κούτι συλλογής σημάτων.

## 2.5 Μοντελοποίηση και έλεγχος του περυγίου

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η μοντελοποίηση του περυγίου. Όπως αναλύεται στην Ενότητα 2.7, οι σερβοκινητήρες παρέχουν δυνατότητα λειτουργίας τους, αφενός με κατανεμημένο έλεγχο της γωνιακής θέσης τους, όπου ο έλεγχος θέσης των ακτίνων γίνεται από τους μικροελεγκτές τους, αφετέρου με κεντρικό έλεγχο θέσης των ακτίνων, όπου ο έλεγχος γίνεται εξωτερικά σε Η/Υ με χρήση της ανάδρασης θέσης από τα ποτενσιόμετρα των σερβοκινητήρων.

Βασικό πλεονέκτημα της πρώτης προσέγγισης είναι η αυτονομία που μπορεί να προσφέρει στο σύστημα όσον αφορά στον έλεγχο, αφού δεν απαιτείται εξωτερικός ελεγκτής για την κίνηση των ακτίνων. Επίσης, επειδή ο ελεγκτής είναι ενσωματωμένος στον επενεργητή, η απόκριση στη διόρθωση του σφάλματος μπορεί να είναι αμεσότερη, αφού δε μεσολαβούν άλλες συσκευές. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το γεγονός ότι ο ενσωματωμένος ελεγκτής δεν μπορεί να αντεπεξέλθει με επάρκεια σε όλες τις διαταραχές. Για το λόγο αυτό γίνεται προσπάθεια μελέτης του συστήματος για την ανάπτυξη ελεγκτών οι οποίοι, μέσω κεντρικού ελέγχου θέσης ακτίνας, θα έχουν καλύτερη απόκριση και συμπεριφορά από τον ενσωματωμένο PID ελεγκτή που διαθέτουν οι σερβοκινητήρες, με αποτέλεσμα την πιο πιστή αναπαραγωγή του κυματοειδούς προφίλ κίνησης.

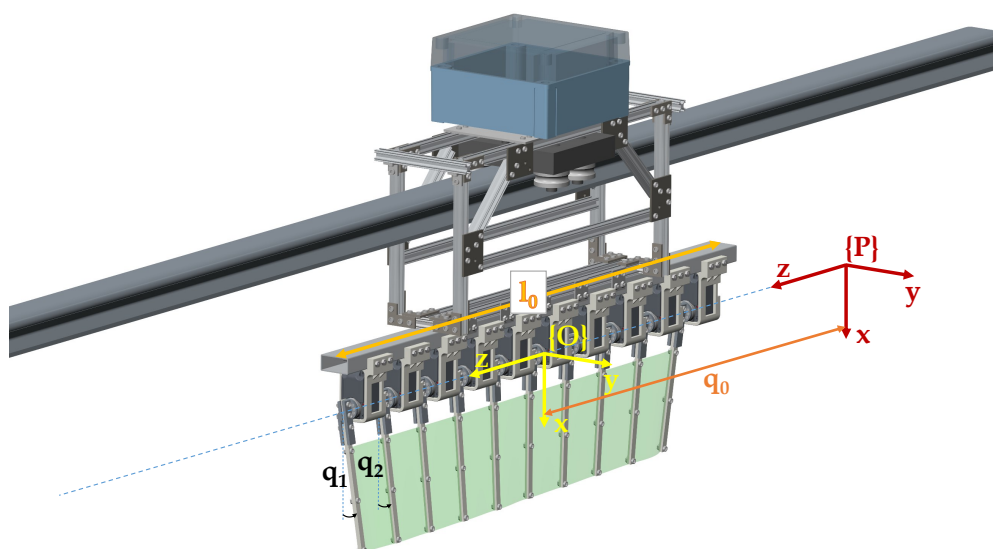
Πρώτο βήμα αυτής της προσπάθειας ήταν η ταυτοποίηση των παραμέτρων της μονάδας κίνησης ακτίνας, συμπεριλαμβανομένης και της ίδιας της ακτίνας στην οποία προσαρμόζεται η ελαστική μεμβράνη. Για να επιτευχθεί αυτό, πραγματοποιήθηκαν αρχικά μια σειρά από πειράματα, σκοπός των οποίων ήταν η καταγραφή δεδομένων από τα οποία εξαγονται αριθμητικές τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος. Ακολούθως, το θεωρητικό μοντέλο που προέκυψε από τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ροπής που απαιτείται για

την αντιστάθμιση των παραμέτρων τις οποίες περιλαμβάνει αυτό. Τέλος, εκτελέστηκε δεύτερη σειρά πειραμάτων, από την οποία προέκυψαν τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του σχήματος ελέγχου που υλοποιήθηκε κατά την πρώτη φάση της διαδικασίας. Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε αρχικά σε μια μεμονωμένη μονάδα κίνησης ακτίνας και στη συνέχεια σε όλες τις μονάδες της διάταξης.

### 2.5.1 Δυναμικό μοντέλο του πτερυγίου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του μηχανισμού του πτερυγίου, και η σχεδίαση ενός model-based ελεγκτή ο οποίος αναπτύχθηκε για την βελτίωση της ικανότητας παρακολούθησης της επιθυμητής κίνησης από τις μονάδες οδήγησης των ακτίνων.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.19, το ρομποτικό πτερύγιο προσαρμόζεται στο φορείο έτσι ώστε η κάθε ακτίνα να είναι βυθισμένη σε όλο το μήκος που συγκρατεί τη μεμβράνη, χωρίς να βυθίζεται το βοηθητικό εξάρτημα που συγκρατεί τις ακτίνες. Τόσο οι περιστροφικές όσο και η πρισματική άρθρωση βρίσκονται έξω από το νερό. Το διάνυσμα της βαρύτητας είναι παράλληλο με τον άξονα  $x$  του πλαισίου  $\{P\}$  και η κίνηση του μηχανισμού εκτελείται κατά μήκος του άξονα  $z$ .



Σχήμα 2.19: Μοντέλο CAD της πειραματικής διάταξης. Επισημαίνονται το αδρανειακό πλαίσιο συντεταγμένων  $\{P\}$  και ένα σωματοπλαγές πλαίσιο συντεταγμένων  $\{O\}$  προσαρτημένο στο μηχανισμό.

Συμβολίζοντας με  $q_0$  τη μετατόπιση του μηχανισμού κατά μήκος του οδηγού ευθύγραμμης κίνησης και  $q_1 \cdots q_{10}$  τη γωνιακή θέση των περιστροφικών αρθρώσεων στους άξονες των σερβοκινητήρων, ορίζεται το διάνυσμα  $\mathbf{q} = [q_0 \ q_1 \ \cdots \ q_{10}]^T$  με τις μεταβλητές θέσης των αρθρώσεων του μηχανισμού. Η δυναμική του συστήματος περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_c \text{sgn}(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{\Gamma}(\mathbf{q}) + \mathbf{\Phi}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.1)$$

όπου, ο πίνακας αδράνειας του συστήματος έχει τη μορφή  $\mathbf{M} = \text{diag}(M_0, M_1 \cdots M_{10})$ , με  $M_i = m_i (\frac{l_i}{2})^2 + I_{zi}$  για  $i = 1 \dots 10$  και συνολική μάζα του μηχανισμού  $M_0 = m_0 + \sum_{i=1}^{10} m_i$ ,

ενώ  $m_i, l_i$  και  $I_{zi}$  είναι η μάζα, το μήκος και η αδράνεια της  $i$ -στής ακτίνας για  $i = 1 \cdots 10$  και  $m_0$  είναι η μάζα του συνδέσμου με μήκος  $l_0$ . Ο όρος  $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{11 \times 1}$  περιγράφει την επίδραση της βαρύτητας στη ροπή που εφαρμόζεται στους άξονες των σερβοκινητήρων και έχει τη δομή  $\mathbf{G}(\mathbf{q}) = [ 0 \quad g_1 \sin q_1 \quad \cdots \quad g_{10} \sin q_{10} ]^T$ , όπου  $g_i = \frac{l_i}{2} m_i g$  και  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Οι όροι  $\mathbf{B} = \text{diag}(b_0, b_1 \cdots b_{10})$  και  $\mathbf{K}_c = \text{diag}(k_{c0}, k_{c1} \cdots k_{c10})$  είναι θετικά ορισμένοι πίνακες, όπου τα  $b_i$  και  $k_{ci}$  είναι οι συντελεστές ιξώδους τριβής και τριβής Coulomb της  $i$ -στής ακτίνας αντίστοιχα.

Ο όρος  $\mathbf{\Gamma}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{11 \times 1}$  στη Σχέση 2.1, έχει τη μορφή  $\mathbf{\Gamma}(\mathbf{q}) = [ 0 \quad \tau_{\Gamma,1} \quad \cdots \quad \tau_{\Gamma,10} ]$ , και αφορά στη ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα των σερβοκινητήρων από την επίδραση της ελαστικής μεμβράνης, όπως περιγράφεται στην Εργασία [55].

Ο όρος  $\mathbf{\Phi}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{11 \times 1}$  αφορά στη ροπή που εφαρμόζεται στους άξονες των σερβοκινητήρων από την επίδραση των υδροδυναμικών φαινομένων που παρατηρούνται κατά την κίνηση της μεμβράνης μέσα στο νερό αλλά και την προωστική δύναμη  $F_z$  που εμφανίζεται στον άξονα  $z$ . Ο πίνακας έχει τη μορφή  $\mathbf{\Phi}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = [ -F_z \quad \tau_{\Phi,1} \quad \cdots \quad \tau_{\Phi,10} ]$  και ο υπολογισμός των επιμέρους όρων του περιγράφεται στην Εργασία [56].

Σημειώνεται ότι η συμβολή της ελαστικής μεμβράνης στην εφαρμοζόμενη ροπή των περιστροφικών αρθρώσεων εξαρτάται από τη γωνιακή θέση των ακτίνων και πιο συγκεκριμένα τη γωνιακή απόκλιση μεταξύ δύο διαδοχικών ακτίνων, ενώ η συνεισφορά των υδροδυναμικών φαινομένων εξαρτάται από τη γωνιακή θέση και ταχύτητα των ακτίνων αλλά και την ταχύτητα του μηχανισμού κατά μήκος του άξονα  $z$ .

Τέλος, το διάνυσμα  $\boldsymbol{\tau} = [ 0 \quad \tau_1 \quad \cdots \quad \tau_{10} ]^T \in \mathbb{R}^{11 \times 1}$  εκφράζει τη ροπή η οποία εφαρμόζεται στους άξονες περιστροφής των ακτίνων από τους επενεργητές του συστήματος.

Η Σχέση 2.1 μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη με βάση τις ενεργές και παθητικές αρθρώσεις του μηχανισμού ως εξής:

$$M_0 \ddot{q}_0 + b_0 \dot{q}_0 + k_{c0} \text{sgn}(\dot{q}_0) - F_z(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r, \dot{q}_0) = 0 \quad (2.2)$$

και

$$\mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{B}_r \dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{K}_{cr} \text{sgn}(\dot{\mathbf{q}}_r) + \mathbf{G}_r(\mathbf{q}_r) + \mathbf{\Gamma}_r(\mathbf{q}_r) + \mathbf{\Phi}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r, \dot{q}_0) = \boldsymbol{\tau}_r, \quad (2.3)$$

όπου το διάνυσμα  $\mathbf{q}_r = [ q_1 \quad \cdots \quad q_{10} ]$  περιλαμβάνει τις γωνιακές θέσεις των ακτίνων του μηχανισμού. Η Σχέση 2.2 αφορά στη μετατόπιση  $q_0$  ολόκληρου του μηχανισμού κατά μήκος του οδηγού ευθύγραμμης κίνησης μέσω της παθητικής πρισματικής άρθρωσης, ενώ η Σχέση 2.3 αφορά στη δυναμική των μονάδων κίνησης των ακτίνων. Στη δεύτερη σχέση, τα  $\mathbf{M}_r, \mathbf{B}_r$  και  $\mathbf{K}_{cr}$  αναφέρονται στους κάτω δεξιά  $10 \times 10$  υποπίνακες των  $\mathbf{M}, \mathbf{B}$  και  $\mathbf{K}_c$  και αποτελούνται από τα στοιχεία των πινάκων που σχετίζονται με τις περιστροφικές αρθρώσεις των ακτίνων. Όμοια, τα  $\mathbf{G}_r, \mathbf{\Gamma}_r$  και  $\mathbf{\Phi}_r$  είναι οι κάτω  $10 \times 1$  υποπίνακες των  $\mathbf{G}, \mathbf{\Gamma}$  και  $\mathbf{\Phi}$ , ενώ στο διάνυσμα  $\boldsymbol{\tau}_r = [ \tau_1 \quad \cdots \quad \tau_{10} ]$  περιέχονται οι παραγόμενες ροπές από τους επενεργητές. Παρατηρείται ότι οι δύο σχέσεις συνδέονται μέσω των μη-γραμμικών υδροδυναμικών όρων  $F_z$  και  $\mathbf{\Phi}_r$  οι οποίοι εξαρτώνται από τη γωνιακή θέση και ταχύτητα των ακτίνων αλλά και τη γραμμική ταχύτητα του μηχανισμού.

Στη Σχέση 2.3 μπορούν να ενσωματωθούν οι παράμετροι δυναμικής των επενεργητών. Συ-

γκεκριμένα, η δυναμική εξίσωση της  $i$ -στής ακτίνας δίνεται ως:

$$\tau_i = M_i \ddot{q}_i + b_i \dot{q}_i + k_{ci} \operatorname{sgn}(\dot{q}_i) + g_i \sin(q_i) + \tau_{\Gamma,i} + \tau_{\Phi,i} \quad (2.4)$$

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ροπής του κινητήρα οδήγησης της  $i$ -στής ακτίνας χρησιμοποιείται ο νόμος τάσεων του Kirchhoff:

$$v_m = R_{m,i} \dot{i}_{m,i} + L_{m,i} \ddot{i}_{m,i} + v_b, \quad (2.5)$$

όπου  $v_m$  είναι η εφαρμοζόμενη τάση στον κινητήρα,  $R_{m,i}$ ,  $L_{m,i}$  και  $i_{m,i}$  είναι η αντίσταση και η αυτεπαγωγή στα τυλίγματα του κινητήρα και το ρεύμα που τα διαρρέει αντίστοιχα, και  $v_b$  είναι η αντι-ηλεκτρεγερτική τάση που εμφανίζεται στους ακροδέκτες του.

Η ροπή που παράγεται από την περιστροφή του δρομέα δίνεται από τη σχέση  $\tau_{m,i} = K_t i_{m,i}$ , όπου  $K_t$  είναι η σταθερά ροπής του κινητήρα. Η ροπή μετά τον μειωτήρα δίνεται ως  $\tau_i = \frac{\tau_{m,i}}{n_g}$ , με λόγο μείωσης  $n_g < 1$ . Η αντι-ηλεκτρεγερτική τάση μπορεί να γραφεί ως  $v_b = K_b \dot{q}_{m,i}$ , όπου  $K_b$  είναι η αντι-ηλεκτρεγερτική σταθερά και  $\dot{q}_{m,i}$  είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, με  $\dot{q} = \dot{q}_{m,i} n_g$ , όπου  $\dot{q}$  είναι η γωνιακή ταχύτητα εξόδου του μειωτήρα. Με αντικατάσταση των  $i_{m,i}$  και  $v_b$  της Σχέσης 2.5, και θεωρώντας  $L_{m,i} \approx 0$ , η ροπή εξόδου του  $i$ -στού επενεργητή προκύπτει από τη σχέση:

$$\tau_i = \frac{K_t}{R_{m,i} n_g} v_i - \frac{K_t K_b}{R_{m,i} n_g^2} \dot{q}_i \quad (2.6)$$

Αν  $V_s = 12 \text{ V}$  είναι η τάση τροφοδοσίας του σερβοκινητήρα και  $-1 \leq u_i \leq 1$  είναι ο κανονικοποιημένος λόγος κατάμησης (duty cycle) του σήματος ελέγχου, η τάση που εφαρμόζεται στον κινητήρα, μέσω της Η-γέφυρας που χρησιμοποιείται για την οδήγησή του, δίνεται ως  $v_i = u_i V_s$ . Η Σχέση 2.6 ξαναγράφεται, τότε, ως εξής:

$$\tau_i = \frac{V_s K_t}{R_{m,i} n_g} u_i - \frac{K_t K_b}{R_{m,i} n_g^2} \dot{q}_i \quad (2.7)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την αδράνεια και τις τριβές του κινητήρα και ενσωματώνοντας τη δυναμική του επενεργητή στη Σχέση 2.4, προκύπτει η σχέση:

$$\frac{V_s K_t}{R_m n_g} u_i = \left( M_i + \frac{J_{m,i}}{n^2 g} \right) \ddot{q}_i + \left( b_i + \frac{b_{m,i}}{n^2 g} + \frac{K_t K_b}{R_m n_g^2} \right) \dot{q}_i + \left( k_{ci} + \frac{k_{cm,i}}{n^2 g} \right) \operatorname{sgn}(\dot{q}_i) + g_i \sin(q_i) + \tau_{\Gamma,i} + \tau_{\Phi,i}, \quad (2.8)$$

όπου οι όροι  $J_{m,i}$ ,  $b_{m,i}$  και  $k_{cm,i}$  αναφέρονται στην αδράνεια, την ιζώδη τριβή και την τριβή Coulomb του δρομέα του  $i$ -στού κινητήρα.

Βάσει των παραπάνω, η Σχέση 2.3 ξαναγράφεται για να συμπεριληφθεί η δυναμική των επενεργητών ως εξής:

$$\mathbf{L}_r^a(\ddot{\mathbf{q}}_r, \dot{\mathbf{q}}_r, \mathbf{q}_r) + \mathbf{\Gamma}_r(\mathbf{q}_r) + \mathbf{\Phi}_r(\mathbf{q}_r, \dot{\mathbf{q}}_r, \dot{q}_0) = \mathbf{C}_r^a \mathbf{u}_r, \quad (2.9)$$

όπου το διάνυσμα  $\mathbf{u}_r = [ u_1 \ \dots \ u_{10} ]$  περιέχει τα σήματα ελέγχου των επενεργητών, ενώ:

$$\mathbf{L}_r^a = \mathbf{M}_r^a \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{B}_r^a \dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{K}_{cr}^a \operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{q}}_r) + \mathbf{G}_r(\mathbf{q}_r) \quad (2.10)$$



Οι πίνακες που αφορούν στη δυναμική των μονάδων κίνησης ακτίνας στις Σχέσεις 2.9 και 2.10 ορίζονται ως:

$$\begin{aligned}
M_r^a &= \text{diag}(M_1^a \ \dots \ M_{10}^a), & M_i^a &= M_i + \frac{J_{m,i}}{n_g^2} \\
B_r^a &= \text{diag}(b_1^a \ \dots \ b_{10}^a), & b_i^a &= b_i + \frac{b_{m,i}}{n_g^2} + \frac{K_t K_b}{R_m n_g^2} \\
K_{cr}^a &= \text{diag}(k_{c1}^a \ \dots \ k_{c10}^a), & k_{ci}^a &= k_{ci} + \frac{k_{cm,i}}{n_g^2} \\
C_r^a &= \text{diag}(c_1^a \ \dots \ c_{10}^a), & c_i^a &= \frac{V_s K_t}{R_m n_g} \\
\text{και } G_r &= \text{diag}(g_1 \ \dots \ g_{10}), & g_i &= \frac{l_i}{2} m_i g
\end{aligned} \tag{2.11}$$

## 2.5.2 Ελεγκτής κίνησης των ακτίνων του περυγίου

Βάσει του παραπάνω μοντέλου υλοποιήθηκε σύστημα πρόσω-τροφοδότησης το οποίο χρησιμοποιείται παράλληλα με ελεγκτή ανάδρασης P-D. Ειδικότερα, τα σήματα ελέγχου των επεργητών προκύπτουν ως:

$$\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_{ff} + \mathbf{u}_{fb}, \tag{2.12}$$

όπου  $\mathbf{u}_{ff}$  είναι η συνεισφορά του όρου πρόσω-τροφοδότησης για αντιστάθμιση της επίδρασης της δυναμικής του συστήματος και προκύπτει από τη Σχέση 2.9 ως:

$$\mathbf{u}_{ff} = (\mathbf{C}_r^a)^{-1} \left( \mathbf{L}_r^a(\ddot{\mathbf{q}}_r^d, \dot{\mathbf{q}}_r^d, \mathbf{q}_r^d) + \mathbf{\Gamma}r(\mathbf{q}_r^d) + \mathbf{\Phi}_r(\mathbf{q}_r^d, \dot{\mathbf{q}}_r^d, \dot{q}_0) \right), \tag{2.13}$$

όπου τα  $\ddot{\mathbf{q}}_r^d, \dot{\mathbf{q}}_r^d, \mathbf{q}_r^d$  περιγράφουν το επιθυμητό προφίλ κίνησης των ακτίνων. Αντίστοιχα, ο όρος  $\mathbf{u}_{fb}$  στη Σχέση 2.12 εκφράζει τη συνεισφορά του ελεγκτή ανάδρασης, το σήμα του οποίου προκύπτει ως:

$$\mathbf{u}_{fb} = \mathbf{K}_p(\mathbf{q}_r^d - \mathbf{q}_r) - \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{q}}_r, \tag{2.14}$$

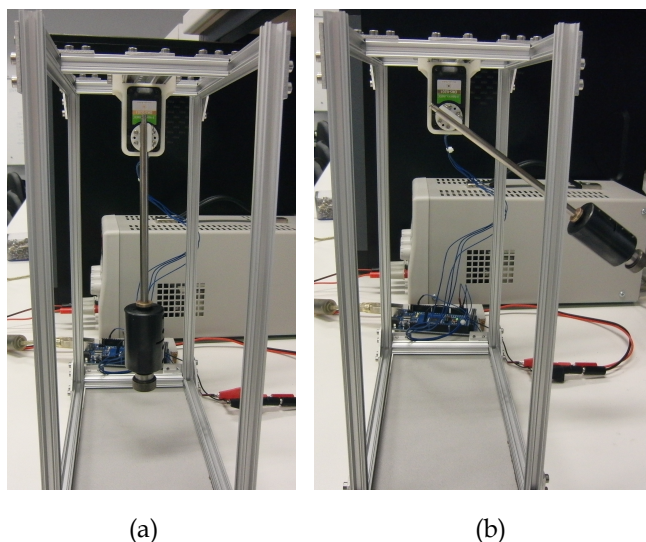
όπου  $\mathbf{K}_p = \text{diag}(K_{p1} \ \dots \ K_{p10})$  και  $\mathbf{K}_d = \text{diag}(K_{d1} \ \dots \ K_{d10})$  είναι θετικά ορισμένοι πίνακες που περιέχουν τα κέρδη του αναλογικού και του διαφορικού όρου του ελεγκτή αντίστοιχα.

## 2.5.3 Ταυτοποίηση των παραμέτρων της μονάδας κίνησης ακτίνας

Εδώ περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη συλλογή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ταυτοποίηση των αριθμητικών τιμών των παραμέτρων του μοντέλου που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.5.1.

Ο σερβοκινητήρας που χρησιμοποιείται για την οδήγηση των ακτίνων έχει τη δυνατότητα να δέχεται εντολές τάσης σε στάθμες PWM με εύρος  $\pm 1023$ . Αυτό, σε συνδυασμό με την ανάδραση θέσης από το ποτενσιόμετρο που ενσωματώνει στον άξονά του επιτρέπει τον υπολογισμό της τάσης που απαιτείται για αντιστάθμιση της ροπής που εμφανίζεται στον άξονα του σερβοκινητήρα εξαιτίας βαρυτικών, αδρανειακών και άλλων δυνάμεων που έχουν να κάνουν με τη δυναμική του κινητήρα.

Για τη διαδικασία της ταυτοποίησης, ο σερβοκινητήρας συναρμολογήθηκε σε θέση όμοια με αυτή που περιγράφεται στην Ενότητα 2.2 έτσι ώστε η μεγάλη διάσταση της ακτίνας να είναι



Σχήμα 2.20: Πειραματική διάταξη ταυτοποίησης παραμέτρων: (a) Η ακτίνα στην κατακόρυφη θέση  $\theta_0$ , (b) Η ακτίνα στη θέση  $\theta_1$ .

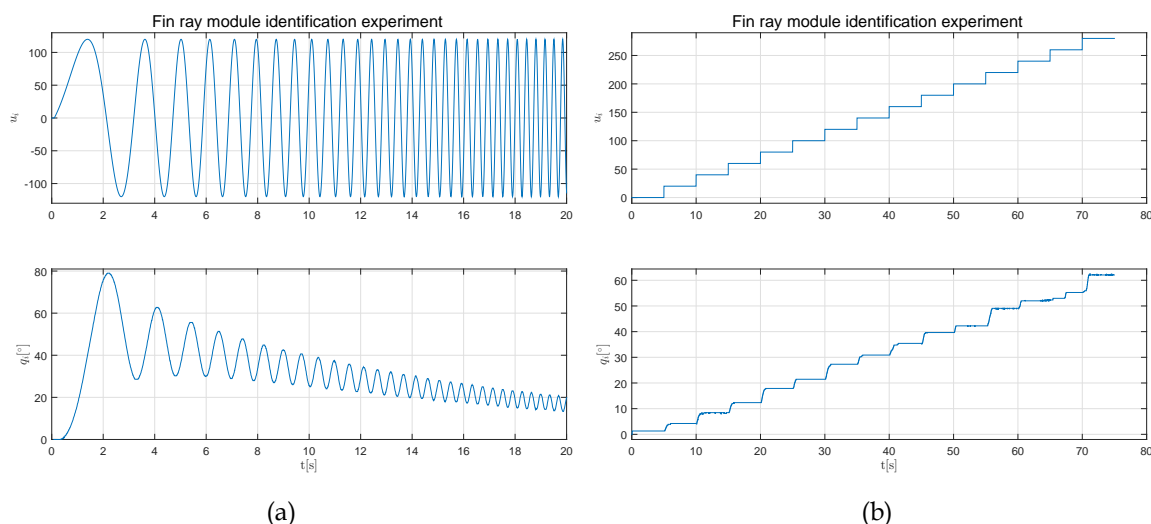
παράλληλη με το διάνυσμα της βαρύτητας, όταν στον άξονα του κινητήρα δεν εφαρμόζεται τάση. Τα πειράματα εκτελέστηκαν εκτός νερού και χωρίς την ελαστική μεμβράνη. Μέσω της διαδικασίας που περιγράφεται σε αυτή την ενότητα, για κάθε μονάδα κίνησης ακτίνας προκύπτουν αριθμητικές τιμές για την αδράνεια, τις τριβές, τη βαρύτητα, καθώς και τις παραμέτρους δυναμικής των επενεργητών. Η δυναμική του προς ταυτοποίηση συστήματος δίνεται ως:

$$c_i^a u_i = M_i^a \ddot{q}_i + b_i^a \dot{q}_i + k_{ci}^a \text{sgn}(\dot{q}_i) + g_i \sin(q_i), \quad (2.15)$$

όπου οι όροι  $c_i^a$ ,  $M_i^a$ ,  $b_i^a$ ,  $k_{ci}^a$  και  $g_i$  δίνονται στις Σχέσεις 2.11.

Το πρώτο πείραμα περιλαμβάνει εντολή τάσης βηματικής μορφής (σε στάθμες PWM) ικανής να εκτρέψει τον άξονα από τη θέση ισορροπίας, αλλά όχι να τον φέρει σε πλήρη περιστροφή. Για να αποφευχθεί η περιστροφή αυτή, προσαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα φορτίο μεγαλύτερης μάζας. Εξαιτίας της εφαρμοζόμενης τάσης, η ακτίνα εκτρέπεται από την κάθετη θέση ισορροπίας  $\theta_0$  (Σχήμα 2.20a) και φτάνει σε μια θέση  $\theta_1$  (Σχήμα 2.20b) όπου ισορροπεί. Η ροπή που παράγεται από τον κινητήρα όταν ο άξονας έλθει σε ισορροπία, αντισταθμίζει τη βαρυτική ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα λόγω του φορτίου. Στο σημείο αυτό και εφόσον ο άξονας δεν κινείται, δεν εμφανίζεται αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF). Αφού έλθει ο άξονας στο σημείο ισορροπίας, μηδενίζεται η εντολή τάσης του κινητήρα και το φορτίο επιστρέφει με αποσβενύμενες ταλαντώσεις στην αρχική κάθετη θέση ισορροπίας. Όταν αρχίζει η κίνηση επιστροφής της ακτίνας στην κάθετη θέση εμφανίζεται στους ακροδέκτες του κινητήρα back EMF η οποία μαζί με τις γραμμικές τριβές στα μηχανικά μέρη του συμβάλει στην απόσβεση των ταλαντώσεων, μέσω του όρου  $b_i^a \dot{q}_i$  στη Σχέση 2.15. Τα πειράματα εκτελέστηκαν με διάφορες εντολές θετικής και αρνητικής τάσης για κίνηση του φορτίου και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Ένα δεύτερο σετ πειραμάτων εκτελέστηκε με τον σερβοκινητήρα στην ίδια θέση, με μικρότερο όμως φορτίο. Η εντολή τάσης σε αυτή την περίπτωση δεν ήταν βηματική, αλλά ημιτονοειδής με γραμμικά αυξανόμενη τη συχνότητα ταλάντωσης της ακτίνας (chirp). Εκτελέστηκε ένα σύνολο πειραμάτων για διάφορες τιμές πλάτους ταλάντωσης της τάσης εισόδου και για δια-



Σχήμα 2.21: Ενδεικτικά διαγράμματα της πειραματικής φάσης για την ταυτοποίηση των παραμέτρων των μονάδων κίνησης ακτίνας: (a) Πείραμα με είσοδο τύπου *chirp*, (b) Πείραμα με είσοδο τύπου *stair*.

φορητικό εύρος συχνοτήτων. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων με διαδοχικές αυξήσεις της εντολής τάσης εισόδου (*stair*).

Σε όλα τα πειράματα αυτά, υπήρχε καταγραφή της εντολής τάσης εισόδου  $u_i$  και της πραγματικής γωνιακής θέσης  $q_i$  του άξονα του κινητήρα με συχνότητα δειγματοληψίας στα 100 Hz.

Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.21 παρουσιάζονται δύο τέτοια πειράματα για τον σερβοκινητήρα με ID #10. Αριστερά φαίνεται ένα πείραμα τύπου *chirp*, σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου, όπου το φορτίο του σερβοκινητήρα αποτελείται μόνο από την ακτίνα. Δεξιά, στο Σχήμα 2.21b παρουσιάζεται ένα πείραμα τύπου *stair*, όπου στον άξονα του σερβοκινητήρα έχει τοποθετηθεί μεγαλύτερο φορτίο. Στα πάνω γραφήματα του σχήματος φαίνεται το σήμα ελέγχου που αποστέλλεται στον σερβοκινητήρα, ενώ στα κάτω παρουσιάζεται η πραγματική γωνιακή θέση του άξονά του.

Τα δεδομένα αυτά τροφοδοτήθηκαν στο Parameter Estimation Toolbox του Matlab, μέσω του οποίου, με τη μέθοδο των μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων, προέκυψαν αριθμητικές για τις άγνωστες παραμέτρους  $c_i^a$ ,  $M_i^a$ ,  $b_i^a$ ,  $k_{ci}^a$  της Σχέσης 2.15.

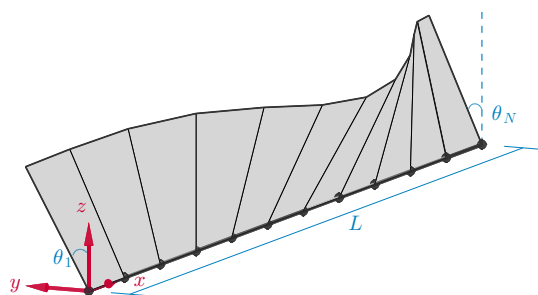
## 2.6 Στρατηγικές παραγωγής κίνησης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι στρατηγικές που αναπτύχθηκαν για την παραγωγή των επιθυμητών τροχιών κίνησης των ακτίνων. Αρχικά παρουσιάζεται η μέθοδος της απευθείας παραγωγής ενός οδεύοντος κύματος κατά μήκος του περυγίου, ενώ στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος που τελικά χρησιμοποιήθηκε, μέσω γεννήτριας κεντρικού πρότυπου ρυθμού (Central Pattern Generator, CPG).

### 2.6.1 Απευθείας παραγωγή του οδεύοντος κύματος

Στο Σχήμα 2.22 φαίνεται ένα απλό διάγραμμα ενός περυγίου κυματοειδούς κίνησης. Οι ακτίνες του είναι διατεταγμένες κατά μήκος άξονα ( $x$ ) γύρω από τον οποίο μπορούν να ταλαντώνονται μέσω περιστροφικών αρθρώσεων ενός βαθμού ελευθερίας, και διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω ελαστικής μεμβράνης.

Η συντονισμένη κίνηση των ακτίνων του περυγίου έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ενός



Σχήμα 2.22: Διάγραμμα πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης.

οδεύοντος κύματος κατά μήκος του. Αυτό το κύμα μπορεί να υλοποιηθεί εφαρμόζοντας για κάθε ακτίνα τη Σχέση 2.16, όπου  $q_i^d$  είναι η επιθυμητή θέση της ακτίνας  $i$  σε σχέση με την κλίση  $X$  για κάθε  $t$ ,  $A$  και  $f$  είναι το πλάτος και η συχνότητα ταλάντωσης της ακτίνας αντίστοιχα, ενώ  $\phi_0$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών ακτίνων.

$$q_i^d(t) = A \sin(2\pi ft - (i - 1)\phi_0) + X \quad , \quad i = 1..10 \quad , \quad (2.16)$$

## 2.6.2 Παραγωγή του κύματος μέσω CPG

Η Σχέση 2.16 θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για απευθείας παραγωγή του κύματος, καθώς αποτελεί έναν απλό και υπολογιστικά οικονομικό τρόπο υπολογισμού των επιθυμητών τροχιών των ακτίνων. Παρόλα αυτά, ένα βασικό μειονέκτημα αυτής έγκειται στο ότι η μεταβολή μιας ή περισσότερων από τις κινηματικές παραμέτρους του κύματος μπορεί να οδηγήσει σε απότομες και ασυντόνιστες μεταβολές των τροχιών των ακτίνων. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα μη ομαλές μεταβάσεις μεταξύ διαφορετικών πρότυπων κίνησης αλλά και καταπόνηση/φθορά των επενεργητών που οδηγούν τις ακτίνες.

Για να αντιμετωπιστεί το παραπάνω ζήτημα, για την παραγωγή των προφίλ κίνησης των ακτίνων στο ρομποτικό πτερύγιο, χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια κεντρικού πρότυπου ρυθμού (Central Pattern Generator, CPG). Το σύστημα αυτό βασίζεται σε αντίστοιχα CPGs που απαντώνται σε διάφορους έμβιους οργανισμούς και παρουσιάζει ευσταθή οριακή κυκλική συμπεριφορά (stable limit cycle). Έτσι επιτυγχάνει το συντονισμό μεταξύ διαφορετικών βαθμών ελευθερίας, εξασφαλίζοντας ομαλές τροχιές κίνησης ακόμα και για απότομες αλλαγές των παραμέτρων ελέγχου.

Η δομή του συστήματος CPG που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία βασίστηκε στην Εργασία [57]. Το σύστημα CPG αποτελείται από ένα πλήθος 10 διασυνδεδεμένων γραμμικών ταλαντωτών, έναν για κάθε μία από τις 10 αρθρώσεις του πτερυγίου. Στην προκειμένη περίπτωση, το κύμα υλοποιείται υπολογίζοντας την επιθυμητή γωνιακή θέση της κάθε ακτίνας από τον ακόλουθο τύπο:

$$q_i^d = a_i \sin(\xi_i) + \chi_i \quad , \quad i = 1..10 \quad , \quad (2.17)$$

Στη Σχέση 2.17, οι μεταβλητές κατάστασης για το πλάτος  $a_i$  της εκτελούμενης ταλάντωσης, την κλίση ως προς την κατακόρυφη θέση  $\chi_i$ , και τη φάση  $\xi_i$  του  $i$ -στού ταλαντωτή προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\ddot{a}_i = k_a^2 (A - a_i) - 2k_a \dot{a}_i \quad , \quad (2.18)$$

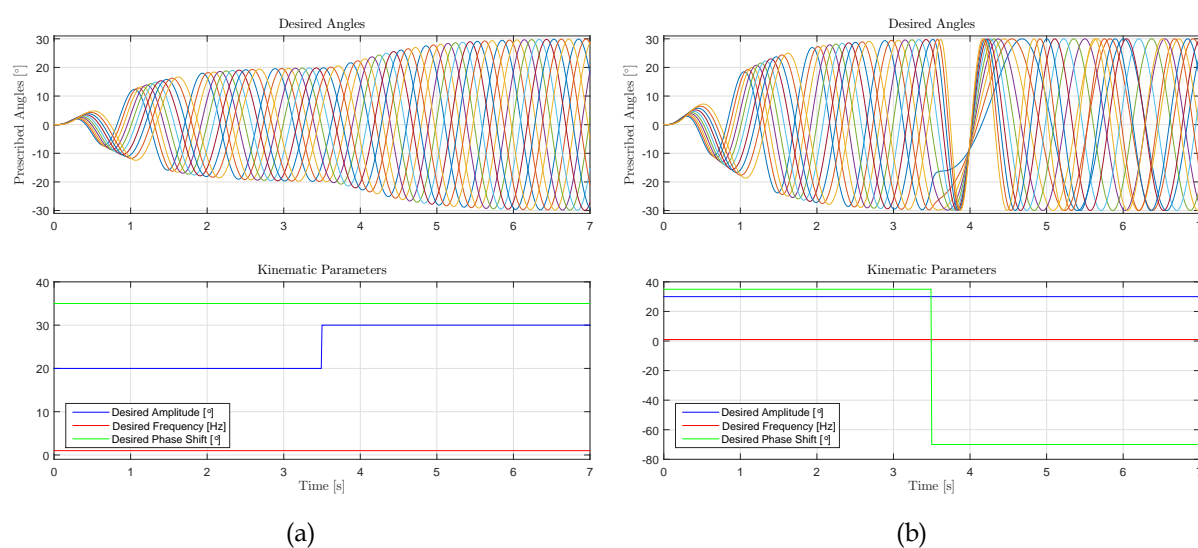
$$\ddot{\chi}_i = k_\chi^2 (X - \chi_i) - 2k_\chi \dot{\chi}_i, \quad (2.19)$$

$$\ddot{\xi}_i = 2c(N-1)(2\pi f - \dot{\xi}_i) - c^2 \sum_{j=1, j \neq i}^N (\xi_i - \xi_j - (j-i)\phi_0), \quad (2.20)$$

όπου οι τιμές των  $A$ ,  $X$  και  $f$  αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα το τελικό πλάτος, την τελική κλίση και την τελική συχνότητα ταλάντωσης των ακτίνων. Οι παράμετροι  $k_a$  και  $k_\chi$  καθορίζουν το ρυθμό σύγκλισης των  $a_i$  και  $\xi_i$  στις επιθυμητές τιμές ( $A$  και  $X$  αντίστοιχα).

Το άθροισμα στο δεξιό μέρος της Σχέσης 2.20 περιγράφει τον τρόπο διασύνδεσης μεταξύ των ταλαντωτών του CPG, όπου  $(j-i)\phi$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ της εξόδου δύο γειτονικών ταλαντωτών στη μόνιμη κατάσταση και  $c$  ο ρυθμός σύγκλισης στην τελική διαφορά φάσης. Επομένως, η φάση  $\xi_i$  δεν εξαρτάται από την κατάσταση του ταλαντωτή  $i$  μόνο, αλλά σχετίζεται και με την κατάσταση των υπόλοιπων ταλαντωτών. Σύμφωνα με την εργασία [57], η φάση συγκλίνει ασυμπτωτικά στην τελική τιμή της για κάθε  $c > 0$ . Η Σχέση (2.17) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των  $q_i$  για την παραγωγή του πρότυπου κίνησης το οποίο εξαρτάται αποκλειστικά από τις τιμές των  $a_i$ ,  $\chi_i$  και  $\xi_i$ . Εφόσον οι τιμές αυτές συγκλίνουν ασυμπτωτικά στις τελικές τους τιμές με οποιοδήποτε αρχικές συνθήκες, η έξοδος  $q_i$  του κάθε ταλαντωτή θα μεταβάλλεται ομαλά. Οι συντελεστές σύγκλισης για το πλάτος, την κλίση και τη φάση έχουν καθοριστεί μετά από πειραματικές δοκιμές και η τιμή που χρησιμοποιείται στο CPG εξαρτάται από τη συχνότητα ταλάντωσης. Σημειώνεται ότι για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, η μεταβλητή  $X$  που εκφράζει την κλίση του άξονα συμμετρίας της ταλάντωσης έχει τεθεί ίση με 0, οπότε οι ακτίνες ταλαντώνονται γύρω από το κάθετο επίπεδο.

Η αλλαγή των κινηματικών παραμέτρων του κόματος ( $A$ ,  $X$  και  $f$ ) γίνεται συνήθως σαν σήμα εισόδου βηματικής μορφής στο σύστημα CPG. Στο παράδειγμα που εικονίζεται στο Σχήμα 2.23a, η παραγωγή του οδεύοντος κόματος ξεκινά με μηδενικές αρχικές τιμές και συγκλίνει ομαλά στο πρότυπο κίνησης για  $A = 30^\circ$ ,  $\phi = 35^\circ$  και  $f = 1$  Hz, ενώ στη χρονική στιγμή 3.5 s η



Σχήμα 2.23: Παράδειγμα χρήσης του συστήματος CPG για μεταβολή των κινηματικών παραμέτρων του κόματος.

τιμή του τελικού πλάτους ταλάντωσης του κύματος μεταβάλλεται σε  $A = 20^\circ$ , με τη συχνότητα  $f$  και τη φάση  $\phi_0$  να παραμένουν σταθερές.

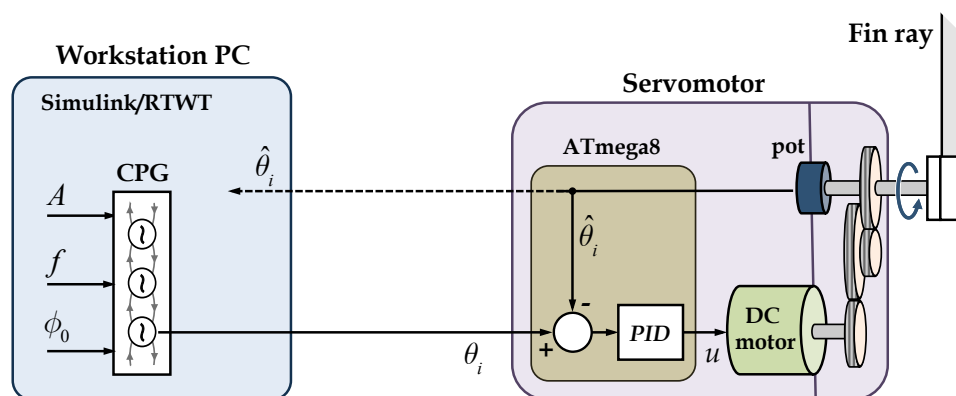
Στο Σχήμα 2.23b, η παραγωγή του οδεύοντος κύματος ξεκινά με μηδενικές αρχικές τιμές και συγκλίνει ομαλά στο πρότυπο κίνησης για  $A = 30^\circ$ ,  $\phi = 35^\circ$  και  $f = 1$  Hz, ενώ στη χρονική στιγμή 3.5 s οι τιμή της διαφοράς φάσης μεταβάλλεται σε  $\phi = -70^\circ$ , με τη συχνότητα  $f$  και το πλάτος  $A$  να παραμένουν ίδια. Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται η ομαλή μετάβαση από τις αρχικές μηδενικές συνθήκες στο πρώτο σετ κινηματικών παραμέτρων και στη συνέχεια στο δεύτερο, συμπεριλαμβανομένης και της αλλαγής κατεύθυνσης του οδεύοντος κύματος για τη δεύτερη περίπτωση. Η δομή του CPG υλοποιείται σε μοντέλο Simulink του MATLAB, όπως περιγράφεται σε επόμενη ενότητα.

## 2.7 Υλοποίηση ελέγχου κίνησης

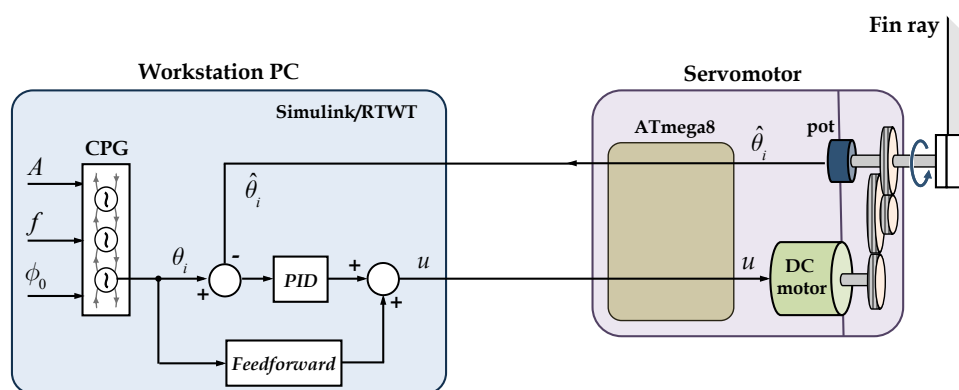
Οι προηγμένες λειτουργίες που παρέχονται από τους σερβοκινητήρες που οδηγούν τις ακτίνες του πτερυγίου, αξιοποιήθηκαν με την υλοποίηση δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων για τον έλεγχο κίνησης του ρομποτικού πτερυγίου. Οι δύο αυτές προσεγγίσεις υιοθετούν την ίδια ιεραρχημένη αρχιτεκτονική, όπως αυτή περιγράφεται στην Ενότητα 2.4. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους αφορά στην υλοποίηση του ελέγχου θέσης των ακτίνων του μηχανισμού.

Στην πρώτη προσέγγιση (Σχήμα 2.24), ο έλεγχος της κίνησης των ακτίνων γίνεται από τα ενσωματωμένα ηλεκτρονικά ελέγχου των σερβοκινητήρων. Σε αυτή την περίπτωση οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται σε λειτουργία position control mode και ο Η/Υ αναλαμβάνει τον υπολογισμό των επιθυμητών γωνιών μέσω του CPG, ενώ η πληροφορία ανάδρασης θέσης που λαμβάνεται από τους σερβοκινητήρες χρησιμοποιείται μόνο για την καταγραφή της τροχιάς τους.

Στη δεύτερη προσέγγιση (Σχήμα 2.25), ο Η/Υ αναλαμβάνει, εκτός από την παραγωγή των επιθυμητών γωνιών μέσω του CPG, και την υλοποίηση του ελέγχου θέσης των ακτίνων, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα ανάδρασης θέσης από τους κινητήρες. Σε αυτή την περίπτωση οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται σε λειτουργία voltage control mode. Κύριο πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η αυξημένη ευελιξία που τη χαρακτηρίζει, όσον αφορά στην υλοποίηση πιο σύνθετων στρατηγικών ελέγχου για αποτελεσματικότερο έλεγχο θέσης των ακτίνων. Ένα παράδειγμα αυτής της ευελιξίας είναι η προσθήκη όρων πρόσω-τροφοδότησης για την απευθείας αντιστάθμιση της ροπής επαναφοράς της ελαστικής μεμβράνης που διασυνδέει



Σχήμα 2.24: Διάγραμμα λειτουργίας κατακεντρωμένου ελέγχου των ακτίνων.



Σχήμα 2.25: Διάγραμμα λειτουργίας κατανεμημένου ελέγχου των ακτίνων.

τις ακτίνες, αλλά και των ροπών από την υδροδυναμική αντίσταση (βλ. Ενότητα 2.5.1).

Στην επικοινωνία μεταξύ του Η/Υ και των σερβοκινητήρων, όπως αναφέρεται στην Ενότητα 2.4 (βλ. Σχήμα 2.13), για την αποστολή εντολών και την επιστροφή δεδομένων ανάδρασης, μεσολαβεί η αναπτυσσόμενη πλατφόρμα Arduino Mega2560. Οι μικροελεγκτές των σερβοκινητήρων διαθέτουν κατάλληλο firmware ώστε να δέχονται και να αποστέλλουν πακέτα δεδομένων συγκεκριμένης δομής. Για την εύκολη κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση των πακέτων χρησιμοποιήθηκαν αρχεία βιβλιοθήκης για τον Arduino, μέσω των οποίων παρέχεται η δυνατότητα χρήσης εντολών υψηλού επιπέδου, ενώ οι λειτουργίες χαμηλού επιπέδου εκτελούνται από τον μικροελεγκτή. Πιο συγκεκριμένα, μέσω αυτής της βιβλιοθήκης αφενός συντάσσονται τα πακέτα εντολών έτσι ώστε να λαμβάνουν τις εντολές οι σερβοκινητήρες, αφετέρου αποκωδικοποιούνται κατάλληλα τα πακέτα που αυτοί επιστρέφουν.

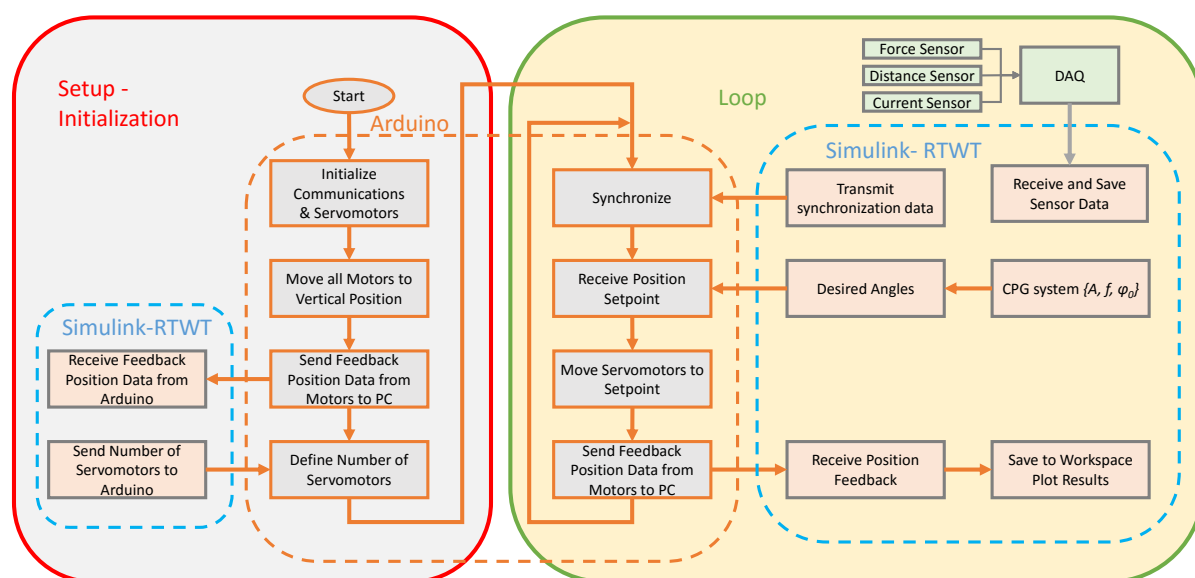
Σαν υπόδειγμα χρησιμοποιήθηκαν αρχεία βιβλιοθήκης που διατίθεται στο διαδίκτυο [58]. Σε αυτά τα αρχεία γίνεται χρήση μιας σειριακής θύρας του Arduino για επικοινωνία με τον Η/Υ και άλλης μίας για επικοινωνία με έναν διάυλο σερβοκινητήρων. Οι ρουτίνες αυτές τροποποιήθηκαν και επεκτάθηκαν κατάλληλα έτσι ώστε να γίνεται χρήση τριών σειριακών θυρών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9, για την ταχύτερη και αποτελεσματικότερη επικοινωνία με μεγαλύτερο αριθμό σερβοκινητήρων. Επιλέχθηκε ο διαμοιρασμός των σερβοκινητήρων σε τρεις διαύλους, κάτι το οποίο μειώνει το χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά του συνόλου των δεδομένων. Με μικρότερο απαιτούμενο χρόνο για τη μεταφορά των δεδομένων, μειώνεται και ο χρόνος του κύκλου λειτουργίας του προγράμματος από τον μικροεπεξεργαστή.

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικότερα η επικοινωνία και υλοποίηση του βρόχου ελέγχου στα δύο επίπεδα για τις δύο εναλλακτικές υλοποιήσεις.

### 2.7.1 Λειτουργία κατανεμημένου ελέγχου θέσης ακτίνων

Σε αυτή την υποενότητα περιγράφεται η πρώτη από τις δύο υλοποιήσεις που αναφέρονται παραπάνω, η λειτουργία του μηχανισμού με κατανεμημένο έλεγχο της θέσης των ακτίνων (Σχήμα 2.24). Στο Σχήμα 2.26 εικονίζεται ένα διάγραμμα ροής της λειτουργίας αυτής. Στο αριστερό μέρος του διαγράμματος φαίνονται μια σειρά από αρχικοποιήσεις και άλλες ρυθμίσεις που εκτελούνται πριν ξεκινήσει το κυρίως μέρος του προγράμματος που εκτελείται εντός του ατέρμονα βρόχου (loop) του κώδικα. Αρχικά, γίνεται ενεργοποίηση των σειριακών θυρών Serial, και Serial1 έως Serial3. Ο πρώτος σειριακός διάυλος χρησιμοποιείται για επικοινωνία με

τον εξωτερικό Η/Υ με baud rate 115200 bps ενώ οι άλλοι τρεις χρησιμοποιούνται για μετάδοση δεδομένων από και προς τους σερβοκινητήρες, με baud rate 500000 bps. Εξ αυτών, ο πρώτος διαύλος (Rx1, Tx1) απευθύνεται στους σερβοκινητήρες 1 – 3, ο δεύτερος (Rx2, Tx2) στους 4 – 7 και ο τρίτος (Rx3, Tx3) στους σερβοκινητήρες 8 – 10 (αναλυτικά φαίνεται η συνδεσμολογία τους στο Σχήμα 2.9). Οι πρώτες εντολές που αποστέλλονται σειριακά από τους τρεις διαύλους στους σερβοκινητήρες είναι οι εντολές επανεκκίνησης και αρχικοποίησης κάποιων παραμέτρων της λειτουργίας τους.



Σχήμα 2.26: Διάγραμμα ροής λειτουργίας καταμεμημένου ελέγχου των ακτίνων.

Στη συνέχεια αποστέλλεται από τον μικροελεγκτή μια ομάδα εντολών για κίνηση όλων των ακτίνων σε κατακόρυφη θέση. Το πρώτο τμήμα της ομάδας αυτής περιλαμβάνει την πληροφορία επιθυμητής γωνιακής θέσης των σερβοκινητήρων. Στο δεύτερο μέρος της ομάδας συντάσσεται ειδικό πακέτο δεδομένων για κάθε σερβοκινητήρα, το οποίο περιλαμβάνει την εντολή επιθυμητής θέσης αλλά και τον αναγνωριστικό αριθμό του. Αφού ετοιμαστούν κατάλληλα τα πακέτα δεδομένων δίνεται η εντολή εκτέλεσης της κίνησης στην επιθυμητή θέση, όπως αυτή ορίστηκε από την προηγούμενη εντολή για κάθε σερβοκινητήρα. Αυτή αποστέλλεται μέσω των τριών διαύλων αλλά είναι κοινή για όλους τους σερβοκινητήρες. Η χρονική διάρκεια της κίνησης είναι κοινή για όλους τους σερβοκινητήρες, ανεξάρτητα από τη γωνιακή μετατόπιση που πρέπει να καλυφθεί από τον καθένα.

Ακολούθως, αποστέλλεται, πάλι μέσω τριπλού σειριακού διαύλου, εντολή στους σερβοκινητήρες για επιστροφή δεδομένων στον μικροελεγκτή τα οποία περιλαμβάνουν την πραγματική γωνιακή θέση του άξονά τους αλλά και το σήμα ελέγχου τους. Ο μικροελεγκτής επεξεργάζεται τις πληροφορίες αυτές ώστε να έχουν κατάλληλη μορφή για αποστολή στον Η/Υ.

Οι επόμενες εντολές που μεταδίδονται κάνουν διαγραφή τυχόν σφαλμάτων από τη μνήμη RAM των σερβοκινητήρων και διακοπή της τάσης στους ακροδέκτες τους. Στη συνέχεια, ο μικροελεγκτής εγκλωβίζεται σε έναν βρόχο επανάληψης, μέσα στον οποίο γίνεται καθορισμός του πλήθους των σερβοκινητήρων που είναι συνδεδεμένοι στα τρία δίκτυα που χρησιμοποιούνται. Η πληροφορία αυτή αποστέλλεται από το Matlab στον μικροελεγκτή κάθε 10 ms και αποτελεί τμήμα των δεδομένων συγχρονισμού, όπως αυτός περιγράφεται παρακάτω. Για να απε-



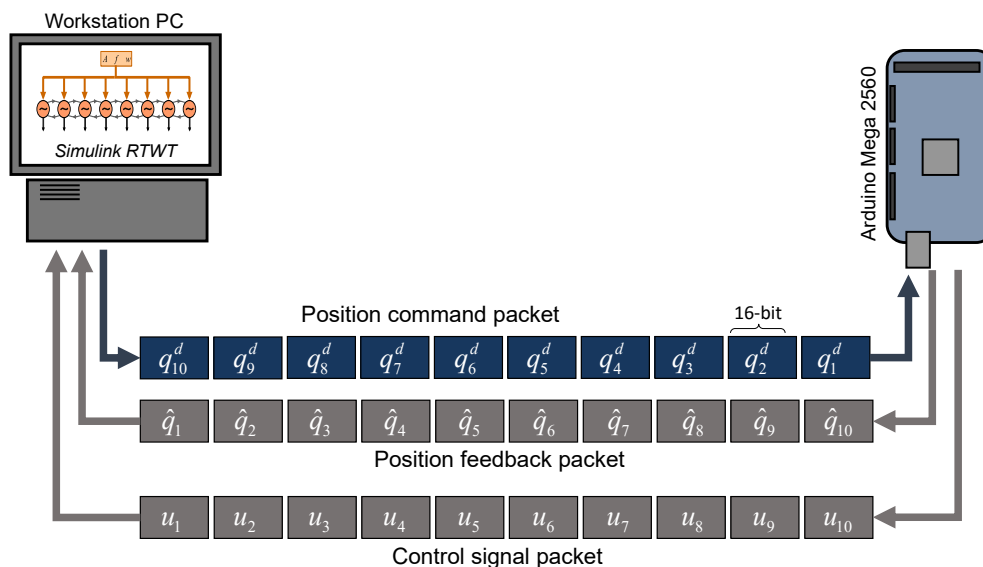
γκλωβιστεί ο μικροελεγκτής από το βρόχο αυτό, θα πρέπει σε δύο διαδοχικές επαναλήψεις να διαβάσει την ίδια τιμή πλήθους επενεργητών. Αυτή η τιμή αποθηκεύεται και χρησιμοποιείται στη συνέχεια του προγράμματος.

Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή των σερβοκινητήρων που θα χρησιμοποιηθούν σαν επενεργητές και αυτών που θα έχουν ρόλο παθητικής άρθρωσης στη διάταξη. Αυτοί που θα συμμετέχουν ενεργητικά λαμβάνουν εντολή για παροχή τάσης στους ακροδέκτες τους, ενώ οι υπόλοιποι απομονώνονται από την παροχή τάσης.

Στο τέλος της ρουτίνας ρυθμίσεων του μικροελεγκτή γίνεται αρχικοποίηση των χρονιστών που χρησιμοποιούνται και ενεργοποίηση του μηχανισμού διακοπών. Στη συνέχεια, ο μικροελεγκτής μεταβαίνει στον ατέρμονα βρόχο του προγράμματος (Loop) και εγκλωβίζεται σε βρόχο επανάληψης μέσα στον οποίο γίνεται συγχρονισμός του ανώτερου με το κατώτερο επίπεδο ελέγχου της διάταξης, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Σε αυτό το σημείο, στο ανώτερο επίπεδο, σε περιβάλλον RTWT στο Simulink του Matlab, αποστέλλονται προς τον μικροελεγκτή οι εντολές για τις επιθυμητές γωνίες των ακτίνων του περυγίου. Ο υπολογισμός των γωνιών γίνεται μέσω του συστήματος CPG, που περιγράφεται στην Ενότητα 2.6.2. Για τον υπολογισμό αυτό, δίνονται σαν είσοδοι οι επιθυμητές τιμές πλάτους  $A$ , συχνότητας  $f$ , φάσης  $\phi$  και κλίσης  $X$  ταλάντωσης των ακτίνων, ενώ από την έξοδο του CPG προκύπτουν οι επιθυμητές γωνίες των ακτίνων σε μοίρες με εύρος  $\pm A$ . Για να τροφοδοτηθούν οι τιμές αυτές στους σερβοκινητήρες είναι απαραίτητη η μετατροπή τους σε στάθμες μέτρησης (0 – 1023) τάσης του ποτενσιόμετρου από τον 10-bit ADC του μικροελεγκτή των σερβοκινητήρων. Για τη μετάδοση αυτής της πληροφορίας απαιτείται η αποστολή δύο bytes ανά σερβοκινητήρα. Επίσης, σε κάθε κύκλο λειτουργίας του προγράμματος, πριν την αποστολή του σει των επιθυμητών γωνιών γίνεται αποστολή ενός ακόμα σει μεγέθους δύο bytes ( $(N \times 256) + 255$ ), τα οποία χρησιμοποιούνται από τον μικροελεγκτή για το συγχρονισμό της λειτουργίας των δύο επιπέδων ελέγχου, ο οποίος περιγράφεται παρακάτω. Για την αποστολή των δεδομένων από το Matlab μέσω σειριακού διαύλου USB στον μικροελεγκτή, χρησιμοποιείται το block Packet Output της βιβλιοθήκης του RTWT. Η αποστολή γίνεται με ρυθμό 100 Hz στα 115200 bps και το μέγεθος του πακέτου που αποστέλλεται σε κάθε κύκλο ελέγχου είναι  $2 + (N \times 2)$  bytes (όπου  $N$ : πλήθος ακτίνων) με κωδικοποίηση little endian ανά ζεύγος bytes (Σχήμα 2.27).

Στη συνέχεια, τα δεδομένα που λαμβάνει ο μικροελεγκτής αποθηκεύονται σε προσωρινή του μνήμη (buffer), η οποία έχει χωρητικότητα 64 bytes, και είναι διαθέσιμα για χρήση ανά πάσα στιγμή. Στην αρχή του ατέρμονα βρόχου του μικροελεγκτή πραγματοποιείται συγχρονισμός των δύο επιπέδων ελέγχου μέσω των δύο bytes συγχρονισμού που αναφέρονται παραπάνω. Προϋπόθεση για να ξεκινήσει αυτός ο έλεγχος είναι να υπάρχουν τουλάχιστον δύο bytes αποθηκευμένα στην προσωρινή μνήμη του μικροελεγκτή. Εάν δεν υπήρχε αυτή η ρήτρα και επιτρεπόταν η συλλογή δεδομένων από την προσωρινή μνήμη χωρίς να είναι γνωστό εάν αυτή περιέχει χρήσιμα δεδομένα ή όχι, θα ήταν πιθανή η εμφάνιση προβλημάτων κατά τη λειτουργία του προγράμματος, γιατί στην περίπτωση που η μνήμη είναι άδεια, επιστρέφεται η τιμή  $-1$ . Μέσα σε βρόχο επανάληψης γίνεται έλεγχος αν το πρώτο byte στην προσωρινή μνήμη είναι 255 και το δεύτερο είναι ίσο με το πλήθος των ακτίνων. Για κάθε αποτυχημένη επανάληψη, σβήνεται το πρώτο byte από την προσωρινή μνήμη και ο έλεγχος επαναλαμβάνεται. Το πρόγραμμα εγκλωβίζεται στο βρόχο επανάληψης μέχρι να διαβάσει δύο συνεχόμενα bytes τα οποία πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις.



Σχήμα 2.27: Σχηματική απεικόνιση των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ του μικροελεγκτή και του εξωτερικού Η/Υ κατά τη λειτουργία κατανεμημένου ελέγχου θέσης των ακτίνων.

Στη συνέχεια, αφού έχουν αναγνωρισθεί επιτυχώς τα δύο bytes συγχρονισμού, συλλέγονται από την προσωρινή μνήμη οι επόμενες  $N \times 2$  θέσεις και γίνεται ανασύσταση των τιμών ανά ζεύγος bytes με κωδικοποίηση little endian, και αποθήκευσή τους σε πίνακα ακεραίων. Οι τιμές αυτές αποστέλλονται στους σερβοκινητήρες σαν εντολή μετάβασης σε συγκεκριμένη θέση με δεδομένο χρόνο εκτέλεσης της κίνησης. Για κάθε σερβοκινητήρα συντάσσεται πακέτο δεδομένων το οποίο περιέχει την πληροφορία της επιθυμητής γωνίας, τον ατομικό αναγνωριστικό αριθμό του κάθε σερβοκινητήρα (ID), τη χρονική διάρκεια εκτέλεσης της κίνησης, και κάποιες άλλες παραμέτρους. Επίσης, η εντολή περιέχει και πληροφορία για το επιθυμητό χρώμα της ενδεικτικής λυχνίας που διαθέτουν οι σερβοκινητήρες. Δίνεται έτσι η δυνατότητα για ομαδοποίηση των σερβοκινητήρων ενός διαύλου και οπτικής διαφοροποίησής τους από τους σερβοκινητήρες των άλλων διαύλων.

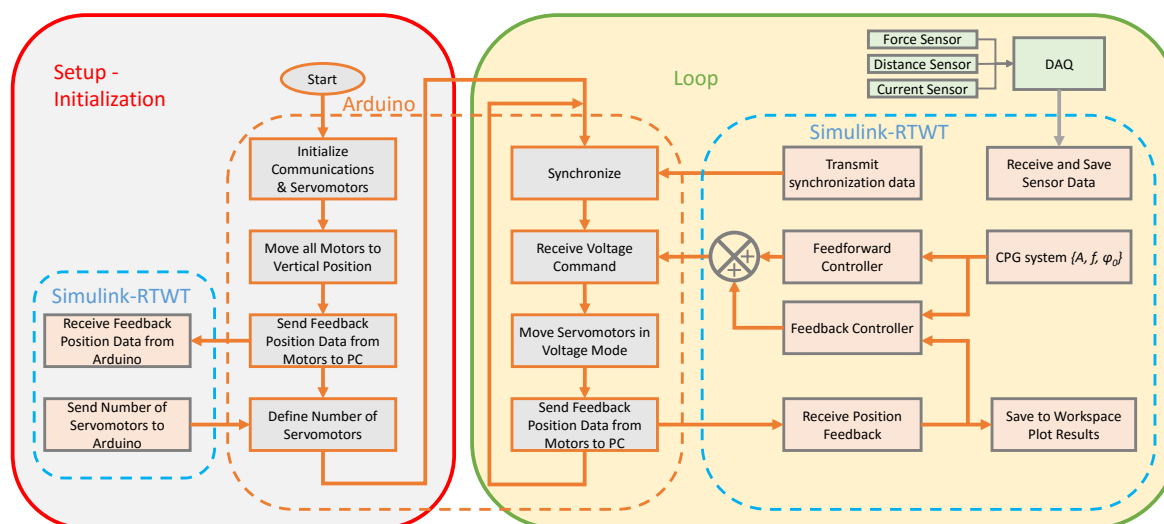
Η εντολή εκτέλεσης της κίνησης γίνεται μεν μέσω τριπλού σειριακού διαύλου, δεν περιέχει όμως τον ατομικό αναγνωριστικό αριθμό των σερβοκινητήρων, αλλά γίνεται αναμετάδοση της εντολής σε όλους. Σε αυτή την περίπτωση οι τρεις δίαυλοι εξυπηρετούνται πρακτικά ταυτόχρονα, αφού για την αποστολή των πακέτων χρησιμοποιείται ο μηχανισμός interrupt του μικροελεγκτή.

Μετά την εντολή μετάβασης σε επιθυμητή θέση, δίνεται εντολή για επιστροφή της πραγματικής θέσης και του σήματος ελέγχου από τους σερβοκινητήρες στον μικροελεγκτή, ο οποίος, μετά από επεξεργασία των δεδομένων, τα προωθεί στον Η/Υ. Σε αυτό το σημείο αρχίζει η επόμενη επανάληψη του βρόχου ελέγχου.

Τα δεδομένα που φτάνουν στο Simulink, αποθηκεύονται έτσι ώστε μετά από κατάλληλη επεξεργασία τους να γίνεται αξιολόγηση των παραμέτρων κίνησης αλλά και σύγκριση με τα δεδομένα που προέρχονται από πειράματα με τη δεύτερη εναλλακτική υλοποίηση ελέγχου η οποία παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα.

## 2.7.2 Λειτουργία κεντρικού ελέγχου θέσης ακτίνων

Σε αυτή την υποενότητα περιγράφεται η λειτουργία του μηχανισμού με κεντρικό έλεγχο της θέσης των ακτίνων (Σχήμα 2.25), της οποίας το διάγραμμα ροής εικονίζεται στο Σχήμα 2.28. Στο αριστερό μέρος του διαγράμματος φαίνονται μια σειρά από αρχικοποιήσεις και άλλες ρυθμίσεις οι οποίες εκτελούνται πριν ξεκινήσει το κυρίως μέρος του προγράμματος που βρίσκεται στον ατέρμονα βρόχο του μικροελεγκτή, το οποίο εικονίζεται στο δεξί τμήμα του διαγράμματος. Οι ενέργειες που εκτελούνται στη ρουτίνα ρυθμίσεων είναι ακριβώς ίδιες με αυτές της πρώτης υλοποίησης.

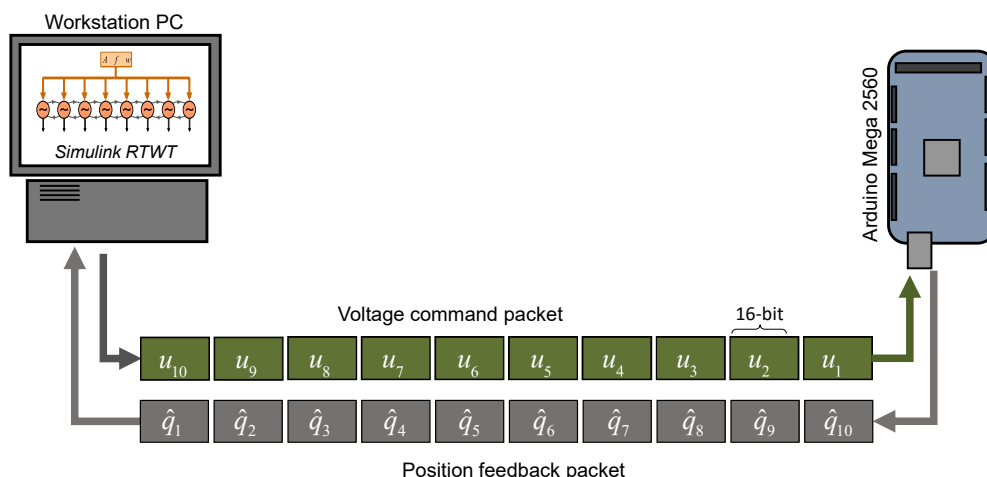


Σχήμα 2.28: Διάγραμμα ροής λειτουργίας κεντρικού ελέγχου των ακτίνων

Και σε αυτή την δεύτερη υλοποίηση χρησιμοποιούνται και οι τέσσερις σειριακές θύρες του μικροελεγκτή για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των σερβοκινητήρων και του εξωτερικού Η/Υ. Κατά την αρχικοποίηση του μηχανισμού, οι ακτίνες οδηγούνται στην κατακόρυφη θέση με εντολή επιθυμητής θέσης, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα. Στη συνέχεια γίνεται λήψη των δεδομένων πραγματικής θέσης από τους σερβοκινητήρες, αλλά και του σήματος ελέγχου και μετάδοσή τους στον Η/Υ. Τέλος, καθορίζεται το πλήθος των σερβοκινητήρων και εφαρμόζεται τάση στους ακροδέκτες αυτών που θα συμμετάσχουν ενεργά στην κίνηση του περυγίου.

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο υλοποιήσεων έγκειται στην υλοποίηση του βρόχου ελέγχου θέσης των ακτίνων του μηχανισμού, ο οποίος πραγματοποιείται στον ατέρμονα βρόχο του προγράμματος και φαίνεται στο δεξί τμήμα του διαγράμματος ροής. Όμοια με την πρώτη υλοποίηση, αρχικά, γίνεται κι εδώ συγχρονισμός της λειτουργίας του ανώτερου επιπέδου με το κατώτερο.

Στη συνέχεια αποστέλλεται εντολή καθορισμού του duty cycle του PWM (με 11-bit κωδικοποίηση, από  $-1023$  έως  $1023$ ) στους σερβοκινητήρες από τον μικροελεγκτή. Η τιμή αυτή υπολογίζεται στο Simulink από δεδομένα ανάδρασης της πραγματικής γωνιακής θέσης των ακτίνων αλλά και από σύστημα πρόσω-τροφοδότησης τάσης που προκύπτει από μαθηματικό μοντέλο του συστήματος (Ενότητα 2.5.1). Ο ελεγκτής ανάδρασης αλλά και ο ελεγκτής πρόσω-τροφοδότησης δέχονται σαν δεδομένα εισόδου τους την έξοδο του συστήματος CPG, το οποίο παράγει



Σχήμα 2.29: Σχηματική απεικόνιση των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ του μικροελεγκτή και του εξωτερικού Η/Υ κατά τη λειτουργία κεντρικού ελέγχου θέσης των ακτίνων.

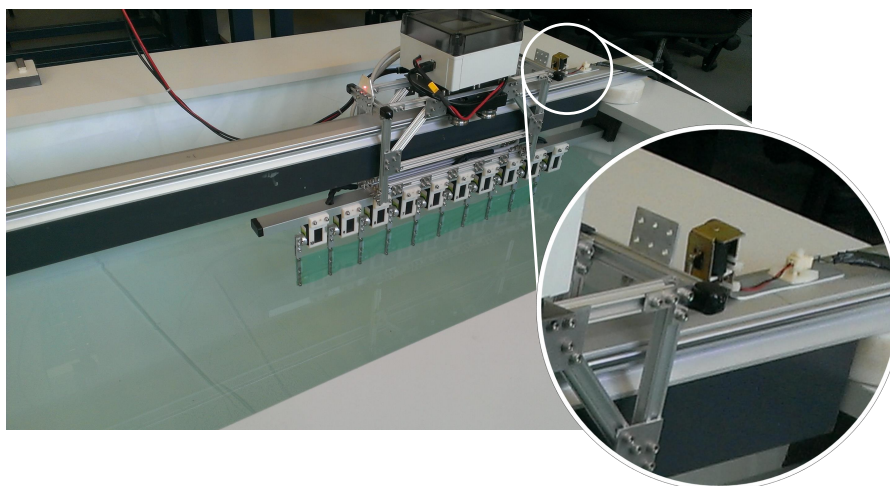
το προφίλ κίνησης  $q_i^d$ ,  $\dot{q}_i^d$ ,  $\ddot{q}_i^d$  της κάθε ακτίνας. Το συνολικό σήμα ελέγχου προκύπτει από πρόσθεση των σημάτων των δύο επιμέρους ελεγκτών. Το πακέτο δεδομένων που συντάσσεται για την αποστολή της εντολής τάσης στους κινητήρες είναι ανάλογο του πακέτου που περιέχει την πληροφορία επιθυμητής θέσης, όπως αυτό περιγράφεται στην Ενότητα 2.7.1.

Στη συνέχεια αποστέλλονται κατάλληλες εντολές για επιστροφή από τους σερβοκινητήρες δεδομένων που περιλαμβάνουν τη γωνιακή θέση του άξονά τους. Αυτά αποκωδικοποιούνται από τον μικροελεγκτή και τροφοδοτούνται στο Simulink. Τα δεδομένα γωνιακής θέσης χρησιμοποιούνται σαν είσοδος στον ελεγκτή ανάδρασης. Η χρήση των δεδομένων αυτών για βελτίωση της απόκρισης του συστήματος μέσω εξωτερικού ελεγκτή είναι και η βασική διαφορά των δύο υλοποιήσεων. Επίσης, τα δεδομένα των μετρήσεων αποτυπώνονται σε γραφήματα για οπτικοποίησή τους και αποθηκεύονται για περαιτέρω επεξεργασία.

## 2.8 Πειραματική αποτίμηση του ρομποτικού πτερυγίου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της πειραματικής αποτίμησης του πρωτότυπου ρομποτικού πτερυγίου σε λειτουργία κεντρικού ελέγχου θέσης των ακτίνων (Ενότητα 2.7.2). Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης της μεταβολής των κινηματικών παραμέτρων του πτερυγίου στην κίνησή του όσον αφορά στην παραγωγή προωστικών δυνάμεων. Σημειώνεται ότι κατά την εκτέλεση των πειραμάτων στην παρούσα φάση, από τον ελεγκτή που συνθέτει τα σήματα ελέγχου των σερβοκινητήρων, απουσιάζει ο όρος πρόσω-τροφοδότησης για αντιστάθμιση της ροπής που εφαρμόζεται στους άξονες των σερβοκινητήρων από την επίδραση των υδροδυναμικών φαινομένων (Ενότητα 2.5).

Συνοπτικά, το σύστημα λειτουργεί ως εξής: τα σήματα ελέγχου των ακτίνων προκύπτουν μέσω του συστήματος ελεγκτή ανάδρασης/πρόσω-τροφοδότησης (Ενότητα 2.7.2) που έχει υλοποιηθεί σε μοντέλο Simulink του Matlab στον εξωτερικό Η/Υ. Ο ελεγκτής αυτός δέχεται σαν δεδομένα εισόδου του τα προφίλ κίνησης που προκύπτουν από τη δομή CPG (Ενότητα 2.6.2) και τα δεδομένα ανάδρασης θέσης που επιστρέφουν από τους σερβοκινητήρες. Τα δεδομένα εξόδου του ελεγκτή τροφοδοτούνται σε μικροελεγκτή ο οποίος τα αναμεταδίδει στους σερβο-



Σχήμα 2.30: Ο μηχανισμός πτερυγίου στην αρχική του θέση πριν την έναρξη του κάθε πειράματος. Επισημαίνεται ο μηχανισμός συγκράτησης.

κινητήρες οδήγησης των ακτίνων ως εντολές κίνησης. Τέλος, στον Η/Υ καταλήγουν και τα σήματα των αισθητήρων της πειραματικής διάταξης.

Πριν την έναρξη του κάθε πειράματος, το φορείο πάνω στο οποίο είναι προσαρμοσμένο το πτερόγιο τοποθετείται στην άκρη της δεξαμενής απέναντι από τον αισθητήρα απόστασης, με τις ακτίνες στην κατακόρυφη θέση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.30. Το φορείο συγκρατείται στη θέση αυτή από ειδικό μηχανισμό με σωληνοειδές πηνίο, από τον οποίο απεμπλέκεται μέσω εντολής από το Matlab. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, οι κυματώσεις του πτερυγίου μετακινούν το φορείο κατά μήκος του οδηγού ευθύγραμμης κίνησης. Το πείραμα τερματίζεται μετά την άφιξη του φορείου στον αισθητήρα δύναμης. Μεταξύ διαδοχικών πειραμάτων επιβάλλεται η πάροδος ικανού χρόνου, ώστε το νερό στη δεξαμενή δοκιμών να επανέλθει σε ισορροπία.

Για την αυτοματοποίηση της πειραματικής διαδικασίας, αυτή εκτελείται υπό κατάλληλο script του Matlab, μέσω του οποίου μεταβάλλονται οι προς μελέτη παράμετροι, εκκινείται το μοντέλο Simulink, απεικονίζονται προσωρινά τα αποτελέσματα του τρέχοντος πειράματος και στο τέλος του αποθηκεύονται τα δεδομένα για περαιτέρω επεξεργασία τους.

Μετά τη λήξη των πειραμάτων, γίνεται επεξεργασία των δεδομένων, από όπου προκύπτουν οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της απόδοσης του ρομποτικού πτερυγίου. Κατ' αρχήν, μέσω διαφορίσης της μέτρησης της που λαμβάνεται από τον αισθητήρα απόστασης, υπολογίζεται η ταχύτητα κίνησης του φορείου κατά μήκος της δεξαμενής, ενώ από ένα σύνολο 'χρήσιμων' περιόδων ταλάντωσης των ακτίνων, κοντά στο τέλος του πειράματος (ταχύτητα steady state) υπολογίζεται και η μέση τιμή της  $U$ . Για το ίδιο εύρος περιόδων υπολογίζεται και η μέση τιμή του καταναλισκόμενου ρεύματος  $I_{mean}$ . Η καταναλισκόμενη ισχύς υπολογίζεται ως:

$$P_{in} = I_{mean} V_s, \quad (2.21)$$

όπου  $V_s = 12\text{ V}$  είναι η τάση τροφοδοσίας του πτερυγίου. Επίσης, υπολογίζεται ο αδιάστατος βαθμός απόδοσης παραγωγής ώσης  $\eta$ , ως:

$$\eta = \left| \frac{mgU}{P_{in}} \right|, \quad (2.22)$$

όπου  $m = 3.56 \text{ kg}$  είναι η συνολική μάζα του μηχανισμού πτερυγίου (συμπεριλαμβανομένου και του φορείου) και  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Τέλος, υπολογίζεται ο αδιάστατος συντελεστής κυματικής απόδοσης  $\gamma$  ως:

$$\gamma = \frac{U}{\bar{V}}, \quad (2.23)$$

όπου  $V$  είναι η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος κατά μήκος του πτερυγίου και δίνεται από τη σχέση:

$$V = f\lambda, \quad (2.24)$$

στην οποία, το μήκος κύματος  $\lambda$  ορίζεται ως

$$\lambda = \frac{L}{w}, \quad (2.25)$$

όπου  $L$  είναι το μήκος του πτερυγίου και  $w$  ο αριθμός των κυμάτων που σχηματίζονται κατά μήκος του, ο οποίος προκύπτει ως:

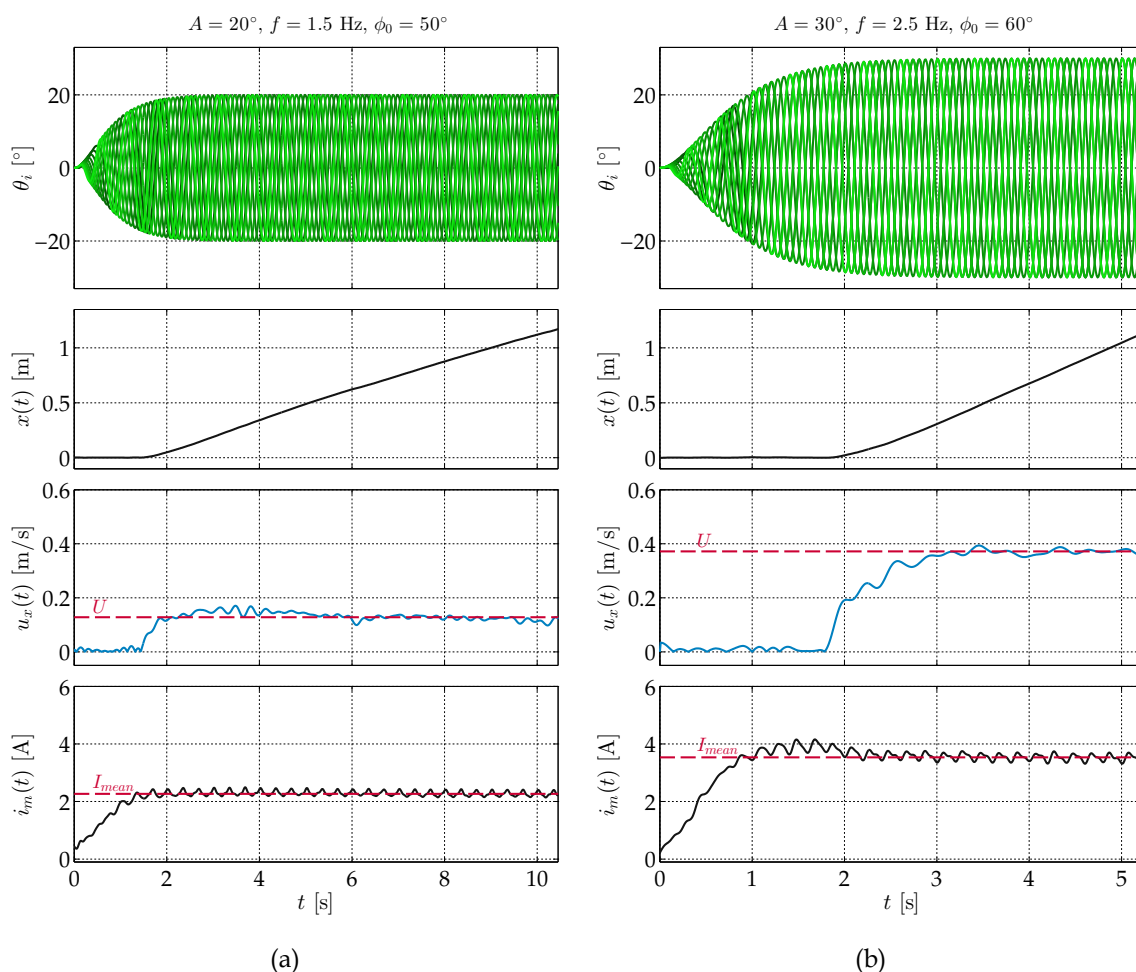
$$w = \phi_0 \frac{(N - 1)}{2\pi} \quad (2.26)$$

Στη Σχέση 2.23, η μέγιστη τιμή του  $V$  αποτελεί και άνω όριο για τη μέση ταχύτητα  $U$ .

Ο συντελεστής  $\gamma$  παρέχει έναν έμμεσο τρόπο υπολογισμού της απόδοσης παραγωγής ώσης, και εξαρτάται από τα κινηματικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου. Για  $\gamma = 0$ , δεν υπάρχει κίνηση του μηχανισμού πτερυγίου κατά μήκος του διαμήκους άξονά του. Αντίθετα, στη βέλτιστη περίπτωση, όπου  $\gamma = 1$  ο μηχανισμός θα κινείται προς τα εμπρός με την ταχύτητα μετάδοσης του οδεύοντος κύματος.

Στο Σχήμα 2.31 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα δύο πειραματικών μετρήσεων. Ειδικότερα, το πείραμα του Σχήματος 2.31a είχε πλάτος ταλάντωσης των ακτίνων  $A = 20^\circ$ , συχνότητα  $f = 1.5 \text{ Hz}$  και διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών ακτίνων  $\phi_0 = 50^\circ$ . Στο πρώτο γράφημα του σχήματος, όπου φαίνονται τα επιθυμητά προφίλ κίνησης των 10 ακτίνων του πτερυγίου, όπως προκύπτουν από το CPG, παρατηρείται η ομαλή μετάβαση στις ονομαστικές κινηματικές παραμέτρους. Στο δεύτερο γράφημα φαίνεται η μετατόπιση του φορείου κατά μήκος του οδηγού ευθύγραμμης κίνησης. Παρατηρείται μια καθυστέρηση στην εκκίνηση της κίνησης του φορείου, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι ο μηχανισμός συγκράτησης απενεργοποιείται περίπου 1.5 s μετά την έναρξη του πειράματος. Στο τρίτο γράφημα του σχήματος απεικονίζεται η ταχύτητα κίνησης του φορείου, η οποία προκύπτει από διαφοροποίηση της μέτρησης της απόστασης από τον αισθητήρα laser, ενώ η μέση τιμή της ανέρχεται στα  $12 \text{ cm/s}$  και επισημαίνεται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή. Τέλος, στο τέταρτο γράφημα φαίνεται η συνολική στιγμιαία κατανάλωση ρεύματος κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η μέτρηση αυτή εμφανίζει κορυφές με συχνότητα διπλάσια αυτής της ταλάντωσης των ακτίνων και μέση τιμή  $2.2 \text{ A}$  η οποία επισημαίνεται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή.

Στο Σχήμα 2.31b παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός δεύτερου πειράματος, με πλάτος ταλάντωσης των ακτίνων  $A = 30^\circ$ , συχνότητα  $f = 2.5 \text{ Hz}$  και διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών ακτίνων  $\phi_0 = 60^\circ$ . Στο δεύτερο γράφημα του σχήματος παρατηρείται η αρχική καθυστέρηση στην κίνηση που εμφανίστηκε και στο προηγούμενο πείραμα. Σε αυτή την περίπτωση η

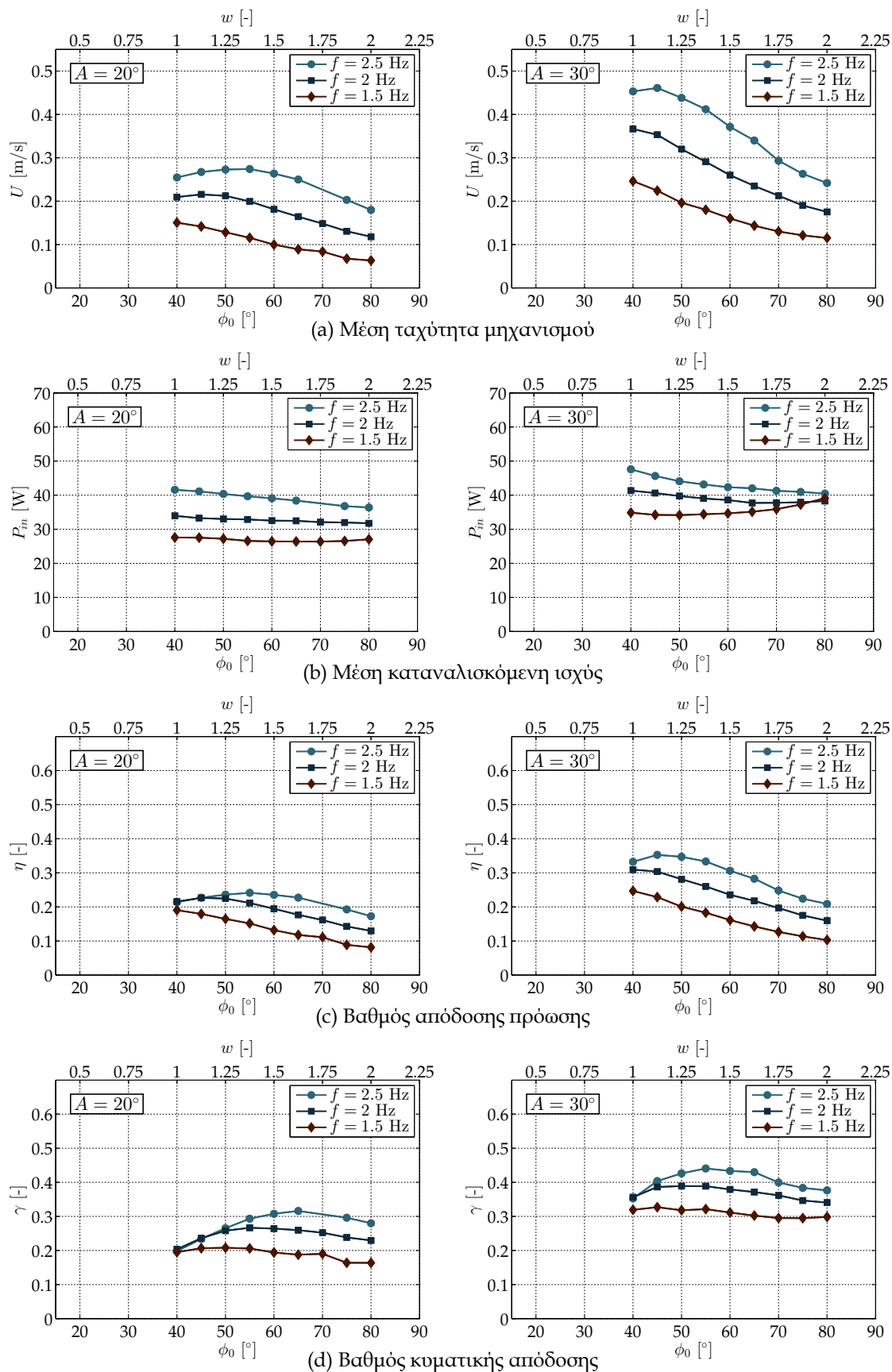


Σχήμα 2.31: Ενδεικτικά αποτελέσματα της πειραματικής αποτίμησης του πρωτότυπου ρομποτικού πτερυγίου κοματοειδούς κίνησης.

κλίση του γραφήματος μετατόπισης είναι πιο έντονη, κάτι που συνεπάγεται μεγαλύτερη ταχύτητα, η μέση τιμή της οποίας, όπως φαίνεται στο τρίτο γράφημα, ανέρχεται στα 38 cm / s. Τέλος, στο τέταρτο γράφημα παρατηρείται ότι η κατανάλωση του ρεύματος έχει την ίδια περιοδική μορφή με το πείραμα του Σχήματος 2.31a, ενώ η μέση τιμή της είναι μεγαλύτερη και ανέρχεται στα 3.6 A.

Στο Σχήμα 2.32 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα ενός σετ πειραματικών μετρήσεων σε λειτουργία κεντρικού ελέγχου θέσης ακτίνων. Αυτές οι μετρήσεις περιλαμβάνουν πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για δύο τιμές πλάτους ταλάντωσης,  $A = 20^\circ$  και  $A = 30^\circ$ , για διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών ακτίνων  $40^\circ \leq \phi_0 \leq 80^\circ$  και για εύρος συχνοτήτων  $1.5 \text{ Hz} \leq f \leq 2.5 \text{ Hz}$  ανά 0.5 Hz. Στον πάνω  $x$  άξονα των γραφημάτων δίνεται η αντιστοιχία του  $\phi_0$  σε πλήθος των σχηματιζόμενων κυμάτων κατά μήκος του πτερυγίου  $w$  (βλ. Σχέση 2.26).

Ειδικότερα, στα γραφήματα (a) του Σχήματος 2.32 παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα του μηχανισμού  $U$  κατά μήκος του οδηγού ευθύγραμμης κίνησης, συναρτήσει της συχνότητας ταλάντωσης των ακτίνων  $f$  και της διαφοράς φάσης  $\phi_0$ , για δύο τιμές πλάτους ταλάντωσης  $A$ . Παρατηρείται ότι η αύξηση των παραμέτρων  $A$  ή  $f$  συνεπάγεται αύξηση της  $U$ , γεγονός που επιβεβαιώνεται και από προηγούμενες εργασίες [54,59]. Επίσης, φαίνεται ότι για σταθερές τιμές των  $A$  και  $f$ , αύξηση του  $\phi_0$  οδηγεί σε αύξηση της μέσης ταχύτητας μέχρι μια μέγιστη τιμή και



Σχήμα 2.32: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενός σετ πειραματικών μετρήσεων του πρωτότυπου ρομποτικού περυγίου κοματοειδούς κίνησης.



στη συνέχεια μείωσή της. Επίσης, αύξηση της παραμέτρου  $f$  προκαλεί μετατόπιση της μέγιστης μέσης ταχύτητας προς μεγαλύτερες τιμές διαφοράς φάσης. Στο συγκεκριμένο σετ πειραμάτων η μέγιστη τιμή μέσης ταχύτητας ανέρχεται στα  $0.46 \text{ m/s}$  για  $A = 30^\circ$ ,  $f = 2.5 \text{ Hz}$  και  $\phi_0 = 45^\circ$ .

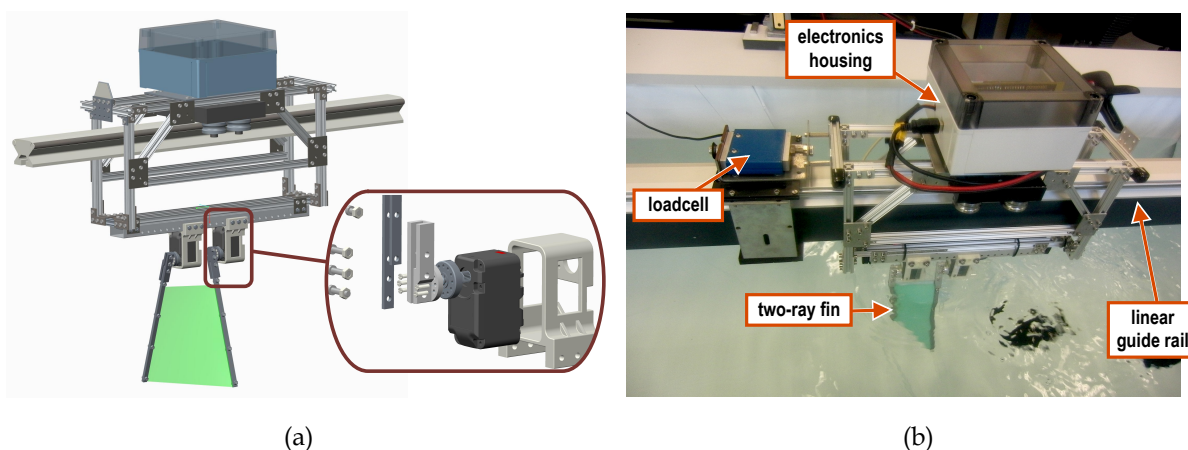
Τα γραφήματα (b) του ίδιου σχήματος δείχνουν ότι η καταναλισκόμενη ισχύς αυξάνεται με τη συχνότητα και το πλάτος ταλάντωσης, ενώ αύξηση της διαφοράς φάσης προκαλεί μείωσή της. Αυτή η τάση εξηγείται από το γεγονός ότι για μικρότερες τιμές της παραμέτρου  $\phi_0$ , το πτερύγιο εκτοπίζει το νερό πλευρικά, κάθετα προς την κίνησή του μηχανισμού. Η κίνηση με τέτοιους συνδυασμούς παραμέτρων προκαλεί μεγαλύτερη υδροδυναμική φόρτιση στους επενεργητές λόγω της μεγαλύτερης αντίστασης που δέχεται η μεμβράνη κατά την κίνησή της μέσα στο νερό. Επομένως, για να επιτευχθεί καλή απόκριση στον έλεγχο θέσης των ακτίνων, σε αυτή την περίπτωση απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση ισχύος. Η μέγιστη μέση καταναλισκόμενη ισχύς  $P_{in}$  για το συγκεκριμένο σετ πειραμάτων ανέρχεται στα  $47.6 \text{ W}$  για συνδυασμό συχνότητας ταλάντωσης  $f = 2.5 \text{ Hz}$ , πλάτους ταλάντωσης  $A = 30^\circ$  και διαφοράς φάσης  $\phi_0 = 40^\circ$ . Ενδιαφέρον προκαλεί το ότι για μικρές τιμές της  $\phi_0$ , η μεταβολή της συχνότητας ταλάντωσης έχει μεγαλύτερη επίδραση στην καταναλισκόμενη ισχύ, ενώ η επίδραση αυτή είναι πιο μικρή σε μεγαλύτερες τιμές  $\phi_0$ .

Τέλος, στα γραφήματα (c) και (d) παρουσιάζεται ο βαθμός απόδοσης πρόωσης  $\eta$  και ο βαθμός κυματικής απόδοσης  $\gamma$  αντίστοιχα, για ίδιο σετ παραμέτρων με τα παραπάνω. Παρατηρείται ότι τα διαγράμματα έχουν παρόμοια μορφή με αυτή της μέσης ταχύτητας, και δείχνουν αύξηση του βαθμού απόδοσης με τη διαφορά φάσης μέχρι μια μέγιστη τιμή ( $\eta = 0.3526$  για  $\phi_0 = 45^\circ$  και  $\gamma = 0.4407$  για  $\phi_0 = 55^\circ$  με  $A = 30^\circ$  και  $f = 2.5 \text{ Hz}$  και στις δύο περιπτώσεις), ακολουθούμενη από πτώση. Η διαφορά εδώ είναι ότι και στις δύο περιπτώσεις, αλλά περισσότερο στην περίπτωση του  $\gamma$  οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται σε μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου  $\phi_0$ .

## 2.9 Πειραματική διάταξη ελάσσονος μηχανισμού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η πειραματική διάταξη που περιλαμβάνει το πρωτότυπο ελάσσονος μηχανισμού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης. Βασική σκοπιμότητα κατασκευής αυτού του μηχανισμού ήταν η απλοποίηση της διαδικασίας αξιολόγησης των σχημάτων ελέγχου, όσον αφορά στην παραγωγή προωστικών δυνάμεων. Αυτή η απλοποίηση είναι αποτέλεσμα του μικρότερου πλήθους επενεργητών στο σύστημα, το οποίο συνεπάγεται και λιγότερα τμήματα ελαστικής μεμβράνης (όπως φαίνεται από το διάγραμμα που δίνει τον όρο  $\Gamma(\mathbf{q})$  στην Ενότητα 2.5.1)

Στο Σχήμα 2.33a απεικονίζεται ένα μοντέλο CAD του μηχανισμού ενώ στο Σχήμα 2.33b φαίνεται ο μηχανισμός μέσα στη δεξαμενή δοκιμών κατά τη διεξαγωγή ενός πειράματος. Το πτερύγιο αποτελείται από δύο ανεξάρτητα οδηγούμενες ακτίνες οι οποίες συγκρατούν μεταξύ τους τμήμα λεπτής ελαστικής μεμβράνης και είναι προσαρμοσμένο σε φορείο που επιτρέπει την κίνησή του κατά μήκος οδηγού ευθύγραμμης κίνησης, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 2.1.



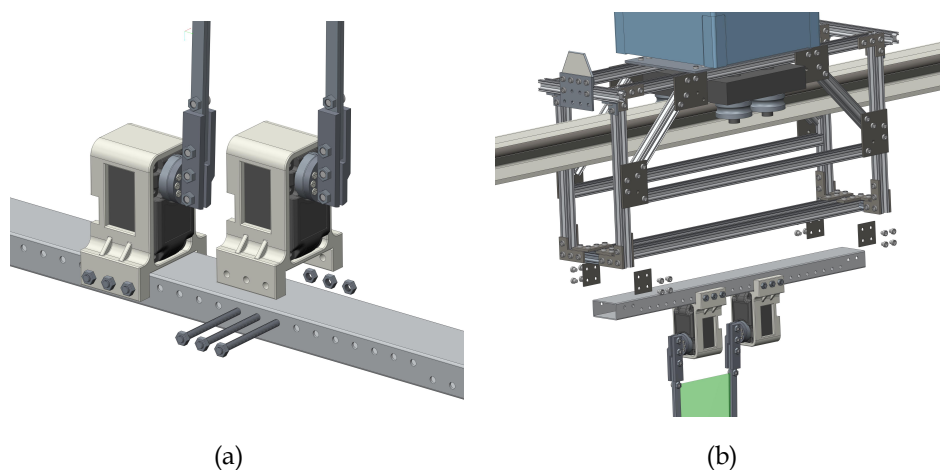
Σχήμα 2.33: Πειραματική διάταξη ελάσσονος μηχανισμού πτερυγίου: (a) Μοντέλο CAD, (b) Πραγματική διάταξη.

### 2.9.1 Μηχανολογικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Ο ελάσσοντας μηχανισμός πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης διαθέτει δύο ακτίνες, ανεξάρτητα οδηγούμενες από “έξυπνους” σερβοκινητήρες (Herkulex DRS-201 της εταιρίας Dongbu), τα χαρακτηριστικά των οποίων αναλύονται στην Ενότητα 2.3. Οι ακτίνες είναι διασυνδεδεμένες μέσω τμήματος λεπτής ελαστικής μεμβράνης. Τα εξαρτήματα που απαρτίζουν τις μονάδες κίνησης ακτίνας είναι όμοια με αυτά του τελικού πρωτότυπου. Μόνη εξαίρεση στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μονάδων είναι το μήκος των ακτίνων, το οποίο ανέρχεται στα 16.5 cm και 18.5 cm για το ζεύγος των ελασμάτων. Αντίστοιχα αυξάνεται και το ύψος της μεμβράνης στα 14.5 mm.

Το προφίλ αλουμινίου που χρησιμοποιείται για τη συναρμολόγηση των ακτίνων σε διάταξη εν σειρά διαθέτει μια συστοιχία οπών εγκάρσια στη στενή πλευρά του. Αυτές οι οπές χρησιμοποιούνται για τη στήριξη των σερβοκινητήρων στο προφίλ και δημιουργήθηκαν για να εξυπηρετήσουν τη συναρμολόγηση των βάσεων σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της ράγας στήριξης. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η μεταβολή της απόστασης μεταξύ των δύο ακτίνων, γεγονός το οποίο εξυπηρετεί στην εκτέλεση πειραμάτων με διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των ακτίνων. Ο τρόπος συναρμολόγησης της μονάδας κίνησης ακτίνας στη ράγα στήριξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.34a. Η ράγα στήριξης προσαρμόζεται (Σχήμα 2.34b) σε κλωβό που αποτελείται από προφίλ αλουμινίου MicroRax, μέσω κατάλληλα κατασκευασμένων τετράγωνων συνδετικών τεμαχίων που συγκρατούνται με ατέρμονες κοχλίες και περικόχλια. Ο κλωβός είναι συναρμολογημένος σε φορείο το οποίο κινείται πάνω σε οδηγό ευθύγραμμης κίνησης μέσω εδράνων τύπου U. Το φορείο έχει έναν βαθμό ελευθερίας, κατά μήκος του οδηγού.

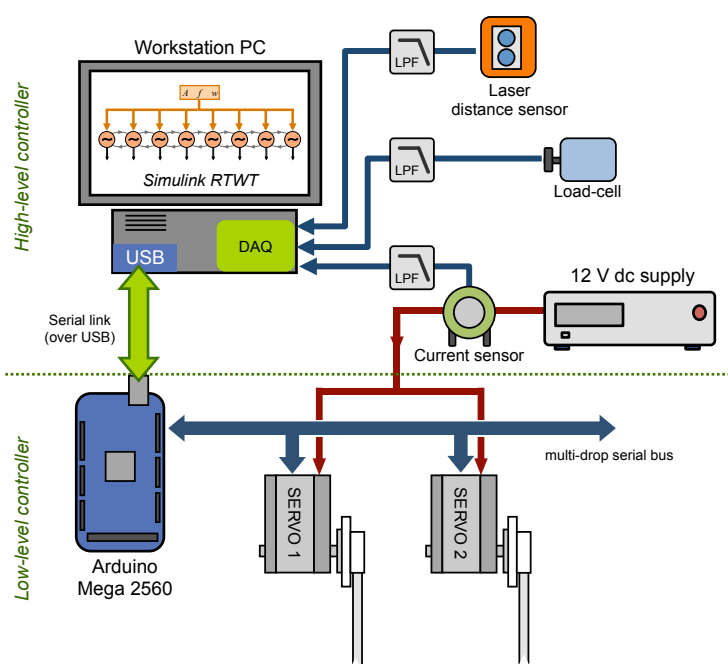
Για τον έλεγχο, την τροφοδοσία και τη συλλογή δεδομένων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με αυτή τη διάταξη χρησιμοποιήθηκαν τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα που περιγράφονται στην Ενότητα 2.4. Συνοπτικά αναφέρεται ότι χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρια για τη μέτρηση της απόστασης του μηχανισμού από τη μια πλευρά της δεξαμενής, της προωστικής δύναμης που παράγεται και του ρεύματος που καταναλώνεται. Για τον έλεγχο χαμηλού επιπέδου αλλά και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των σερβοκινητήρων και του εξωτερικού Η/Υ χρησιμοποιείται η μικροϋπολογιστική πλατφόρμα Arduino Mega2560 με την προσθήκη μιας ειδικά κατασκευασμένης πλακέτας επέκτασης για τη διευκόλυνση της όδευσης των σημάτων.



Σχήμα 2.34: Πειραματική διάταξη ελάσσονος μηχανισμού πτερυγίου: (α) Συναρμολόγηση μονάδας κίνησης ακτίνας στη ράγα στήριξης, (β) Συναρμολόγηση μηχανισμού πτερυγίου στο φορείο.

## 2.9.2 Έλεγχος κίνησης

Στο Σχήμα 2.35 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ελέγχου κίνησης των ακτίνων του πτερυγίου, καθώς και κάποια περιφερειακά εξαρτήματα της διάταξης. Το σύστημα ελέγχου δε διαφέρει ουσιαστικά από το σύστημα του ρομποτικού πτερυγίου που περιγράφεται στην Ενότητα 2.4. Η διάταξη μπορεί να χωριστεί σε δύο ιεραρχημένα επίπεδα. Το πρώτο υλοποιείται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή σε περιβάλλον Simulink του Matlab. Εκεί, μέσω Real Time Windows Target, υπολογίζονται οι επιθυμητές γωνίες των σερβοκινητήρων για κάθε κύκλο ελέγχου, μέσω ενός συστήματος CPG, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 2.6.2. Επίσης, στον Η/Υ τροφοδοτούνται μέσω κάρτας Data Acquisition (NI-6221 της National Instruments) πληροφορίες από τα αισθητήρια απόστασης, δύναμης και ρεύματος.



Σχήμα 2.35: Διάγραμμα αρχιτεκτονικής ελέγχου πειραματικής διάταξης ελάσσονος πτερυγίου.

Το δεύτερο επίπεδο υλοποιείται στον μικροελεγκτή (Ενότητα 2.4.1), ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη αναμετάδοση πληροφοριών μεταξύ των σερβοκινητήρων οδήγησης των ακτίνων και του Η/Υ. Ειδικότερα, λειτουργώντας σε συγχρονισμό με το Simulink του Η/Υ, δέχεται από εκεί τις επιθυμητές θέσεις των ακτίνων, συντάσσει κατάλληλα τα πακέτα δεδομένων που τις περιλαμβάνουν, τα οποία στη συνέχεια στέλνει στους σερβοκινητήρες. Από αυτούς δέχεται πακέτα δεδομένων που περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων και τις τιμές πραγματικής γωνιακής θέσης των ακτίνων, τις οποίες, μετά από κατάλληλη αποκωδικοποίηση, αποστέλλει στον Η/Υ. Αυτή η διαδικασία περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 2.7.

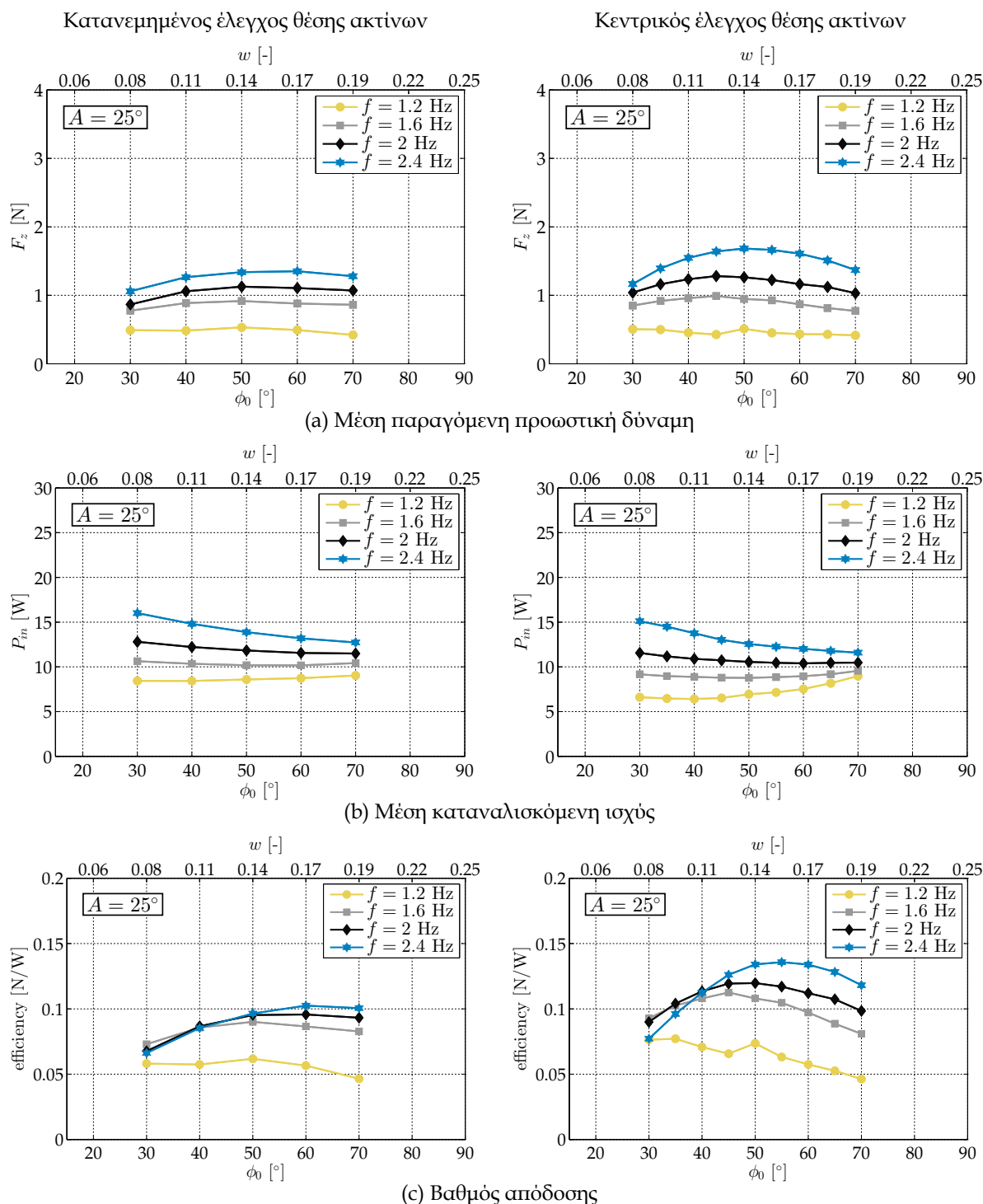
### 2.9.3 Πειραματική μεθοδολογία και αποτίμηση

Σκοπός σε αυτό το στάδιο ήταν η διεξαγωγή πειραμάτων για τη σύγκριση της απόδοσης του ελεγκτή που περιγράφεται στην Ενότητα 2.5.2 με αυτή του ενσωματωμένου ελεγκτή PID των σερβοκινητήρων της διάταξης. Στο πλαίσιο αυτό, εκτελέστηκαν πειράματα σε λειτουργία κατανεμημένου ελέγχου θέσης των ακτίνων (βλ. Ενότητα 2.7.1) και σε λειτουργία κεντρικού ελέγχου θέσης των ακτίνων (βλ. Ενότητα 2.7.2) με μεταβλητές τις κινηματικές παραμέτρους του πτερυγίου. Επίσης, τα πειράματα εκτελέστηκαν με το φορείο να έχει έναν βαθμό ελευθερίας και να κινείται ελεύθερα κατά μήκος του οδηγού, αλλά και με το φορείο προσαρτημένο στον αισθητήρα δύναμης. Στην πρώτη περίπτωση, καταγράφεται η μετακίνηση του φορείου κατά μήκος του αγωγού, από την οποία προκύπτει η ταχύτητά του, αλλά και η προωστική δύναμη που παράγεται μετά την κρούση του μηχανισμού στον αισθητήρα δύναμης. Στη δεύτερη περίπτωση καταγράφεται η παραγόμενη προωστική δύναμη καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Τέλος, μια ακόμα παράμετρος που διερευνήθηκε κατά τη διαδικασία αυτή, ήταν η απόσταση μεταξύ των ακτίνων, για 7,9 και 11 cm. Η διαδικασία της εκτέλεσης των πειραμάτων αλλά και της μετέπειτα ανάλυσης των δεδομένων είναι ίδια με αυτή που περιγράφεται στην Ενότητα 2.8.

Στο Σχήμα 2.36 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα μιας ομάδας πειραμάτων που εκτελέστηκαν με το φορείο προσαρτημένο στον αισθητήρα δύναμης (άρα με  $q_0 = \dot{q}_0 = \ddot{q}_0 = 0$ ). Η ομάδα αυτή περιλαμβάνει μετρήσεις με εύρος συχνότητας ταλάντωσης  $1.2 \text{ Hz} \leq f \leq 2.4 \text{ Hz}$  ανά  $0.4 \text{ Hz}$ , διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ακτίνων  $30^\circ \leq \phi_0 \leq 70^\circ$  και πλάτος ταλάντωσης  $A = 25^\circ$  με απόσταση μεταξύ των δύο ακτίνων στα 7 cm.

Τα διαγράμματα στην αριστερή πλευρά του σχήματος αφορούν στα πειράματα που εκτελέστηκαν σε λειτουργία κατανεμημένου ελέγχου θέσης των ακτίνων, όπου ο έλεγχος γίνεται από τους ενσωματωμένους ελεγκτές των σερβοκινητήρων, ενώ στη δεξιά πλευρά παρουσιάζονται τα πειράματα σε λειτουργία κεντρικού ελέγχου θέσης των ακτίνων, όπου ο ελεγκτής που χρησιμοποιείται έχει βασιστεί στο μοντέλο που περιγράφεται στην Ενότητα 2.5.

Στα δύο πρώτα διαγράμματα (Σχήμα 2.36a), όπου παρουσιάζεται η μέση παραγόμενη προωστική δύναμη συναρτήσει της επιθυμητής διαφοράς φάσης μεταξύ των ακτίνων, παρατηρείται ομοιότητα με τα διαγράμματα του Σχήματος 2.32a της Ενότητας 2.8, όπου παρουσιάζεται η ταχύτητα κίνησης του μηχανισμού πτερυγίου συναρτήσει της διαφοράς φάσης. Γενικά φαίνεται ότι η μέση παραγόμενη δύναμη αυξάνεται με την επιθυμητή συχνότητα ταλάντωσης  $f$  των ακτίνων, με τη μέγιστη τιμή της  $F_h = 1.6837 \text{ N}$  να εμφανίζεται για  $f = 2.4 \text{ Hz}$ ,  $\phi_0 = 50^\circ$  για κεντρικό έλεγχο θέσης των ακτίνων. Στην περίπτωση του κατανεμημένου ελέγχου θέσης, η μέγιστη τιμή της παραγόμενης προωστικής δύναμης ανέρχεται στα  $F_h = 1.3515 \text{ N}$  και εμφανίζεται για  $f = 2.4 \text{ Hz}$ ,  $\phi_0 = 60^\circ$ . Ειδικότερα, παρατηρείται ότι, με σταθερή την επιθυμητή



Σχήμα 2.36: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δύο σετ πειραματικών μετρήσεων του πρωτότυπου ρομποτικού πτερυγίου κοματοειδούς κίνησης.

συχνότητα ταλάντωσης, η προωστική δύναμη αυξάνεται με τη διαφορά φάσης, μέχρι μια μέγιστη τιμή, μετά την οποία η δύναμη αρχίζει να φθίνει. Επίσης, παρατηρείται ότι, όσο αυξάνεται η επιθυμητή συχνότητα ταλάντωσης, η μέγιστη τιμή παραγόμενης δύναμης εμφανίζεται σε μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου  $\phi_0$ .

Αντιπαραθέτοντας τα δύο πρώτα διαγράμματα (Σχήμα 2.36a), παρατηρείται ότι, για μικρότερες τιμές της παραμέτρου  $f$ , οι δύο ελεγκτές οδηγούν στην παραγωγή περίπου ίσων ποσών

προωστικής δύναμης. Όσο αυξάνεται η επιθυμητή συχνότητα ταλάντωσης, κατά τη λειτουργία με κατανεμημένο έλεγχο θέσης των ακτίνων παρατηρείται μικρότερη παραγόμενη δύναμη. Ένας πιθανός λόγος για αυτή τη διαφοροποίηση είναι η αδυναμία του ενσωματωμένου ελεγκτή να αποκριθεί στις αυξημένες απαιτήσεις για έλεγχο, παρουσία της μεμβράνης και της υδροδυναμικής αντίστασης, σε μεγάλες συχνότητες ταλάντωσης.

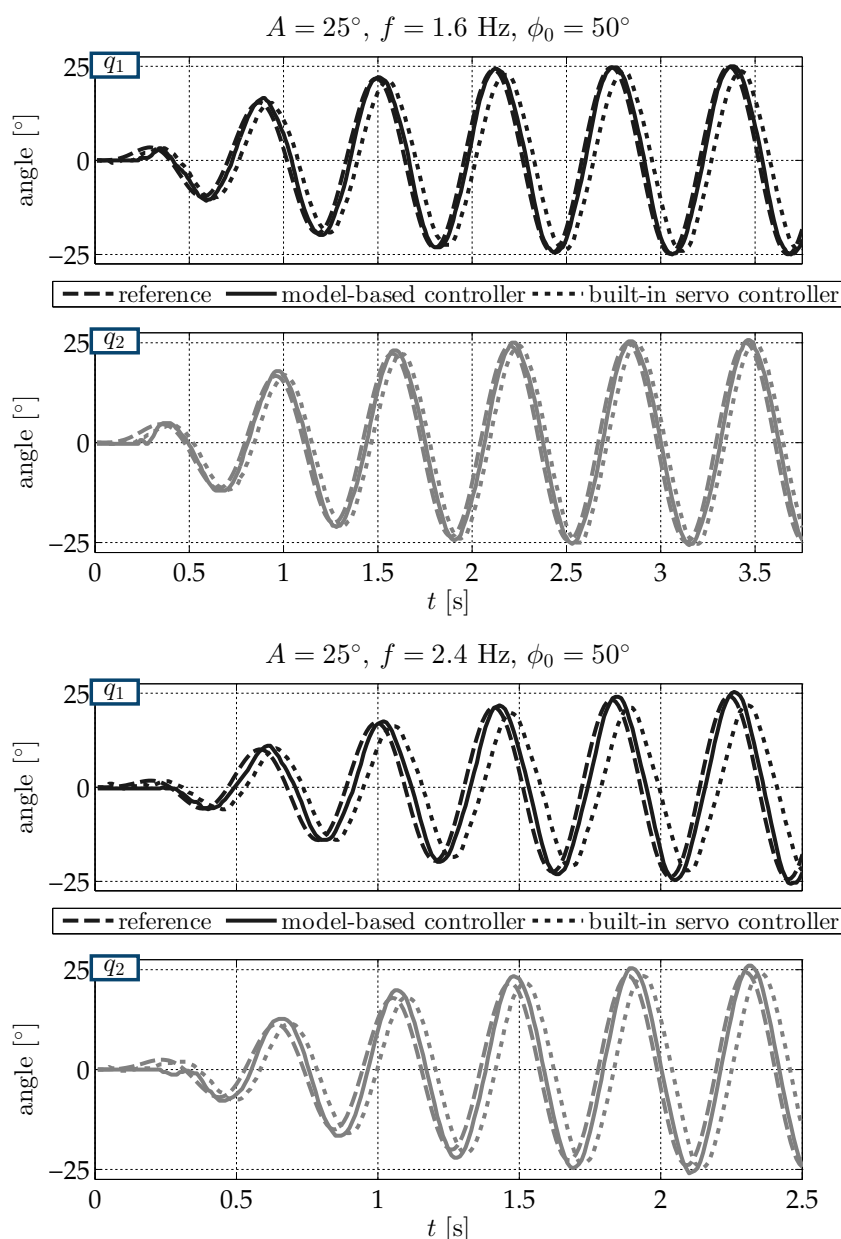
Στο Σχήμα 2.36b παρουσιάζεται η μέση καταναλισκόμενη ισχύς συναρτήσει της επιθυμητής διαφοράς φάσης. Και σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων παρουσιάζουν αντιστοιχίες με αυτά του Σχήματος 2.32b της Ενότητας 2.8. Παρατηρείται αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος με τη συχνότητα ταλάντωσης, ενώ η διαφοροποίηση αυτή είναι πιο έντονη για μικρότερες τιμές της παραμέτρου  $\phi_0$ . Η μέγιστη τιμή της μέσης καταναλισκόμενης ισχύος, για το συγκεκριμένο εύρος κινηματικών παραμέτρων, ανέρχεται στα  $P_{in} = 16.0137 \text{ W}$  για  $f = 2.4 \text{ Hz}$ ,  $\phi_0 = 30^\circ$  για κεντρικό έλεγχο θέσης των ακτίνων, ενώ για κατανεμημένο έλεγχο η μέγιστη τιμή ανέρχεται στα  $P_{in} = 15.1029 \text{ W}$  για τον ίδιο συνδυασμό κινηματικών παραμέτρων.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα a,b του παραπάνω σχήματος, εντοπίζονται δύο σημεία που προκαλούν ενδιαφέρον. Στις μικρότερες τιμές της συχνότητας ταλάντωσης, ενώ παράγονται ίσα ποσά προωστικής δύναμης από τα δύο σχήματα ελέγχου, στην περίπτωση του κεντρικού ελέγχου θέσης παρατηρείται μικρότερη κατανάλωση ισχύος, με πιο έντονη τη διαφορά στις μικρές τιμές διαφοράς φάσης. Αντίθετα, στις μεγαλύτερες τιμές επιθυμητής συχνότητας ταλάντωσης, ενώ παρατηρείται ίση περίπου κατανάλωση ισχύος, η παραγόμενη προωστική δύναμη είναι αρκετά μεγαλύτερη κατά τη λειτουργία κεντρικού ελέγχου θέσης.

Στο Σχήμα 2.36c παρουσιάζεται ο λόγος της μέσης παραγόμενης προωστικής δύναμης προς τη μέση καταναλισκόμενη ισχύ. Αυτά τα διαγράμματα παρέχουν έναν δείκτη σύγκρισης της απόδοσης μεταξύ των διάφορων συνδυασμών κινηματικών παραμέτρων. Σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι, ειδικά στις μεγαλύτερες τιμές συχνότητας ταλάντωσης, ο κεντρικός έλεγχος θέσης των ακτίνων έχει καλύτερη απόδοση, ενώ στη χαμηλότερη τιμή επιθυμητής συχνότητας η απόδοση των δύο ελεγκτών είναι περίπου ίση. Και στις δύο περιπτώσεις, αυξάνοντας την παράμετρο  $f$ , η μέγιστη τιμή του δείκτη απόδοσης μεταφέρεται σε μεγαλύτερες τιμές της διαφοράς φάσης. Η μέγιστη τιμή αυτού του δείκτη προκύπτει κατά τον κεντρικό έλεγχο θέσης των ακτίνων και ανέρχεται στα  $0.1357 \text{ N / W}$  για  $f = 2.4 \text{ Hz}$  και  $\phi_0 = 55^\circ$ , ενώ κατά τον κατανεμημένο έλεγχο θέσης, η μέγιστη τιμή είναι ίση με  $0.1025 \text{ N / W}$  για  $f = 2.4 \text{ Hz}$  και  $\phi_0 = 60^\circ$

Στα Σχήματα 2.37, 2.38 και 2.39 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα για δύο πειραματικές μετρήσεις από την ομάδα μετρήσεων που παρουσιάζεται παραπάνω, για επιθυμητή συχνότητα ταλάντωσης  $f = 1.6 \text{ Hz}$  και  $f = 2.4 \text{ Hz}$ , με διαφορά φάσης  $\phi_0 = 50^\circ$  και στις δύο περιπτώσεις. Η επιλογή αυτών των δύο μετρήσεων έγινε με σκοπό την παρουσίαση δύο περιπτώσεων, στην πρώτη από τις οποίες, οι δύο ελεγκτές παράγουν περίπου ίση προωστική δύναμη, ενώ στη δεύτερη ο ένας εκ των δύο αποδίδει καλύτερα.

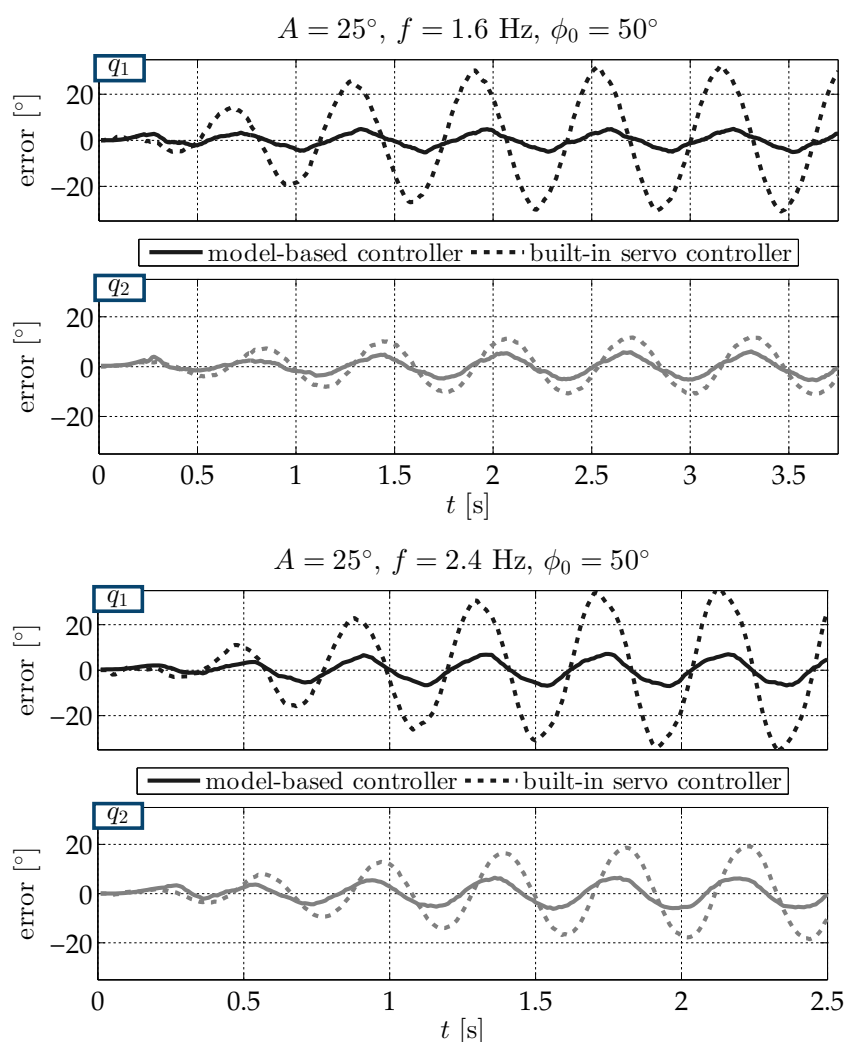
Στο Σχήμα 2.37 παρουσιάζονται τα δεδομένα γωνιακής θέσης των ακτίνων κατά τον κεντρικό έλεγχο με συνεχόμενη γραμμή και και κατά τον κατανεμημένο έλεγχο με διάστικτη, ενώ φαίνονται και τα επιθυμητά προφίλ κίνησης των ακτίνων με διακεκομμένη γραμμή. Στο πάνω ζεύγος γραφημάτων παρουσιάζονται τα πειράματα με συχνότητα ταλάντωσης  $f = 1.6 \text{ Hz}$ , ενώ στο κάτω ζεύγος γραφημάτων τα πειράματα με  $f = 2.4 \text{ Hz}$ . Παρατηρείται ότι ο κεντρικός ελεγκτής (model-based controller) επιτυγχάνει καλύτερη απόκριση και για τις δύο συχνότητες



Σχήμα 2.37: Ενδεικτικά αποτελέσματα δύο πειραματικών μετρήσεων του πρωτότυπου ρομποτικού πτερυγίου κοματοειδούς κίνησης: γωνιακή θέση των ακτίνων.

ταλάντωσης, ενώ κατά τον καταναεμημένο έλεγχο (built-in servo controller), οι ενσωματωμένοι ελεγκτές των σερβοκινητήρων υστερούν αισθητά σε απόδοση. Ειδικότερα, φαίνεται ότι ο κεντρικός έλεγχος θέσης των ακτίνων επιτυγχάνει μικρότερη χρονική καθυστέρηση και στις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, στην περίπτωση της μεγαλύτερης συχνότητας ταλάντωσης, παρατηρείται η αδυναμία του ενσωματωμένου ελεγκτή (και ειδικότερα του ελεγκτή της πρώτης ακτίνας) να επιτύχει το επιθυμητό πλάτος ταλάντωσης.

Αυτή η αδυναμία επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα του Σχήματος 2.38, όπου παρουσιάζεται το σφάλμα παρακολούθησης για τις δύο ακτίνες. Το σφάλμα αυτό εμπεριέχει τόσο την απόκλιση του πλάτους ταλάντωσης, αλλά και τη χρονική καθυστέρηση. Σε όλες τις περιπτώσεις ο κεντρικός ελεγκτής έχει μικρότερο σφάλμα παρακολούθησης, με τις μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των δύο ελεγκτών να εμφανίζονται στην απόκριση του σερβοκινητήρα που οδηγεί την

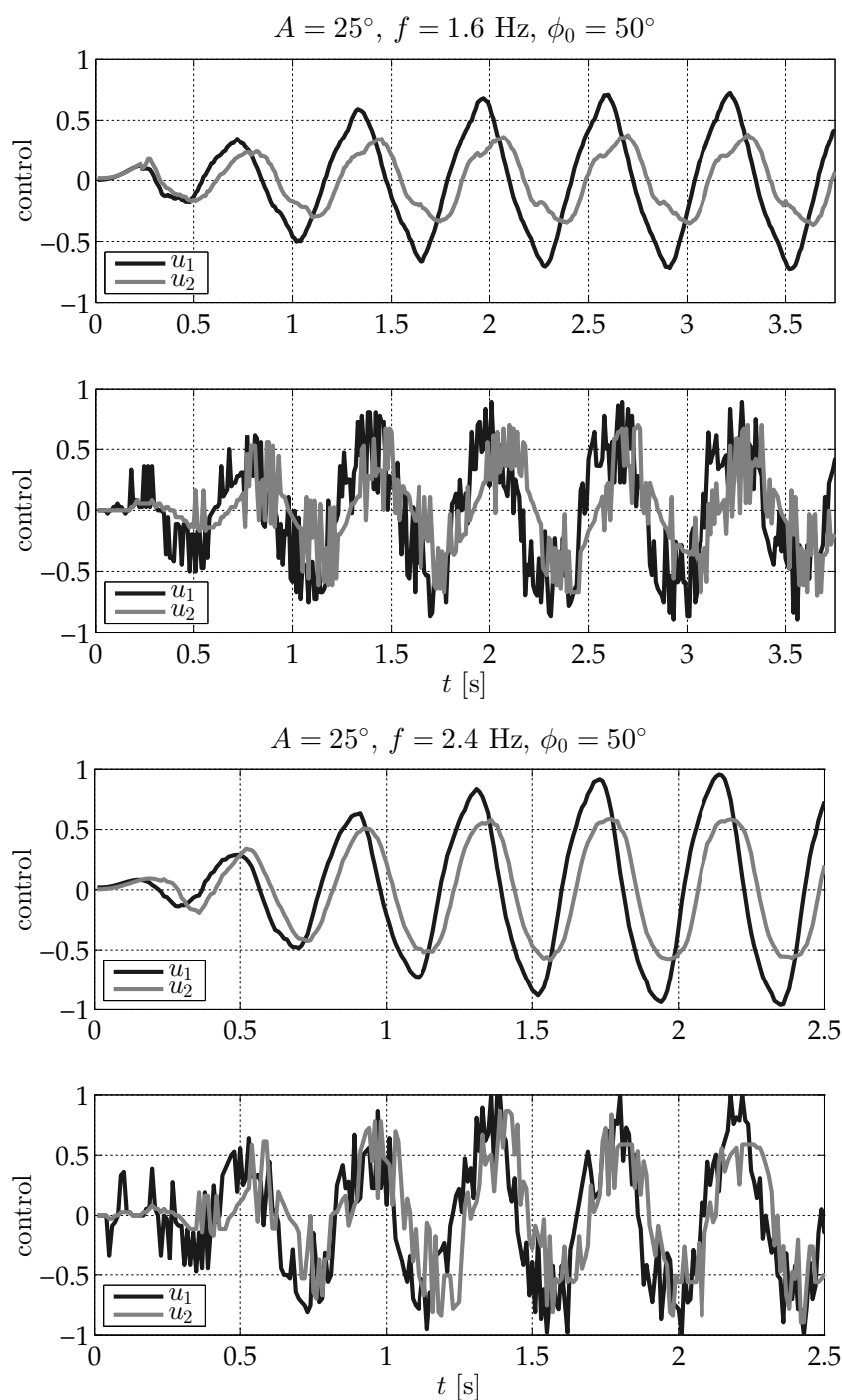


Σχήμα 2.38: Ενδεικτικά αποτελέσματα δύο πειραματικών μετρήσεων του πρωτότυπου ρομποτικού πτερυγίου κοματοειδούς κίνησης: σφάλμα παρακολούθησης γωνιακής θέσης των ακτινών

πρώτη ακτίνα.

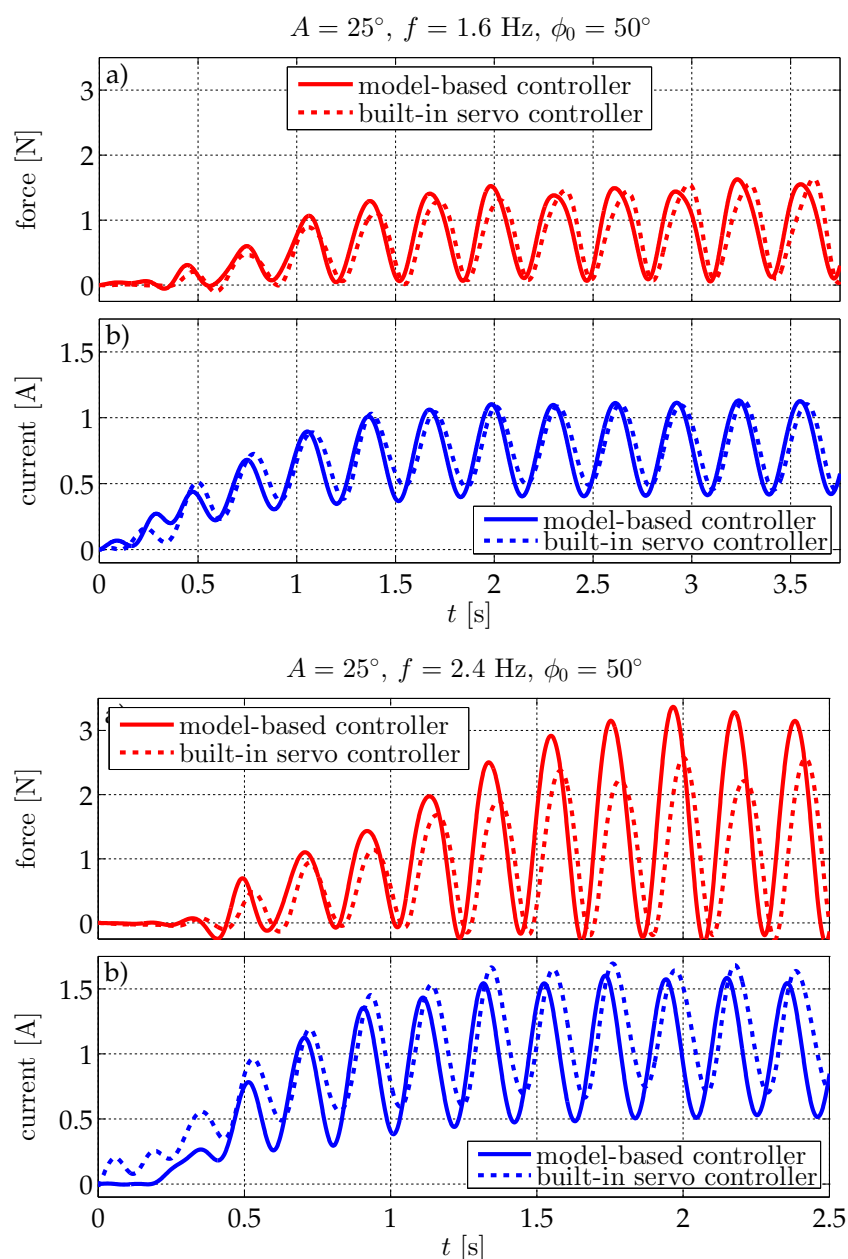
Για περαιτέρω ανάλυση της απόκρισης των δύο ελεγκτών, παρατίθεται στο Σχήμα 2.39 το σήμα ελέγχου που παράγεται για τους δύο σερβοκινητήρες του μηχανισμού. Στα πάνω διαγράμματα του σχήματος παρουσιάζεται το σήμα ελέγχου του κεντρικού ελεγκτή, όπως υπολογίζεται στο Simulink. Το σήμα αυτό προκύπτει από πρόσθεση των επιμέρους όρων πρόσω-τροφοδότησης και ανάδρασης, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 2.5.2. Στα κάτω διαγράμματα παρουσιάζεται το σήμα ελέγχου που προκύπτει από τους ενσωματωμένους ελεγκτές των σερβοκινητήρων κατά τη λειτουργία με καταναμημένο έλεγχο θέσης των ακτινών. Παρατηρείται ότι ο κεντρικός ελεγκτής παράγει αισθητά μεγαλύτερες τιμές σήματος ελέγχου για τον σερβοκινητήρα της πρώτης ακτίνας, για αντιστάθμιση της επίδρασης της ελαστικής μεμβράνης. Το γεγονός ότι οι ενσωματωμένοι ελεγκτές παράγουν περίπου ίσα σήματα ελέγχου, εξηγεί το σημαντικό σφάλμα παρακολούθησης του σερβοκινητήρα της πρώτης ακτίνας. Σημειώνεται ότι, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων παρατηρήθηκε ότι η πιο ομαλή μορφή του σήματος ελέγχου που προκύπτει από τον κεντρικό ελεγκτή, οδηγεί σε λειτουργία του μηχανισμού με μικρότερο ακουστικό ίχνο.





Σχήμα 2.39: Ενδεικτικά αποτελέσματα δύο πειραματικών μετρήσεων του πρωτότυπου ρομποτικού πτερυγίου κοματοειδούς κίνησης - Σήματα έλεγχου.

Τέλος, στο Σχήμα 2.40 παρουσιάζονται η στιγμιαία παραγόμενη προωστική δύναμη και το συνολικό καταναλισκόμενο ρεύμα. Και οι δύο αυτές μετρήσεις παρουσιάζουν ταλαντωτική μορφή με συχνότητα διπλάσια της συχνότητας ταλάντωσης των ακτίνων  $f$ . Παρατηρείται ότι στην περίπτωση της χαμηλής συχνότητας ταλάντωσης, οι δύο ελεγκτές παράγουν σχεδόν ίσα ποσά δύναμης, με παρόμοια κατανάλωση ρεύματος. Αντίθετα, στην περίπτωση της μεγαλύτερης συχνότητας ταλάντωσης, ενώ το σύστημα καταναλώνει οριακά περισσότερο ρεύμα κατά τη λειτουργία με καταναμημένο έλεγχο θέσης των ακτίνων, η παραγωγή δύναμης είναι αισθητά



Σχήμα 2.40: Ενδεικτικά αποτελέσματα δύο πειραματικών μετρήσεων του πρωτότυπου ρομποτικού πτερυγίου κοματοειδούς κίνησης: (a) Στιγμιαία παραγόμενη προωστική δύναμη, (b) Συνολικό καταναλισκόμενο ρεύμα.

μεγαλύτερη κατά τη λειτουργία με κεντρικό έλεγχο.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της πειραματικής αυτής μελέτης αναδεικνύουν την βελτίωση στην απόδοση του ρομποτικού πτερυγίου που επιτεύχθηκε μέσω της σχεδίασης και της αρχιτεκτονικής ελέγχου που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

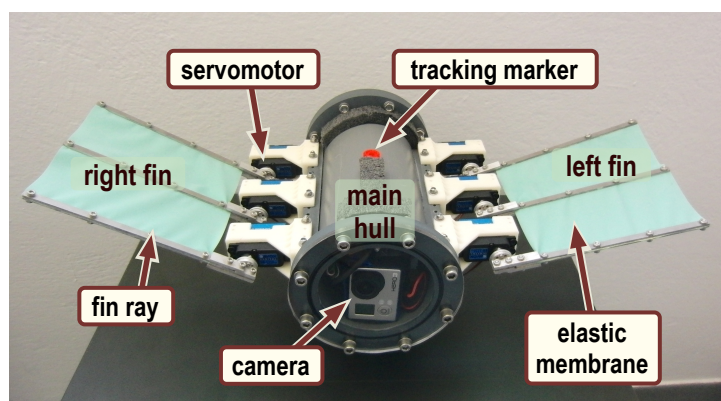
## Κεφάλαιο 3

# Το Υποβρύχιο Ρομποτικό Όχημα SQUIDBOT-mini

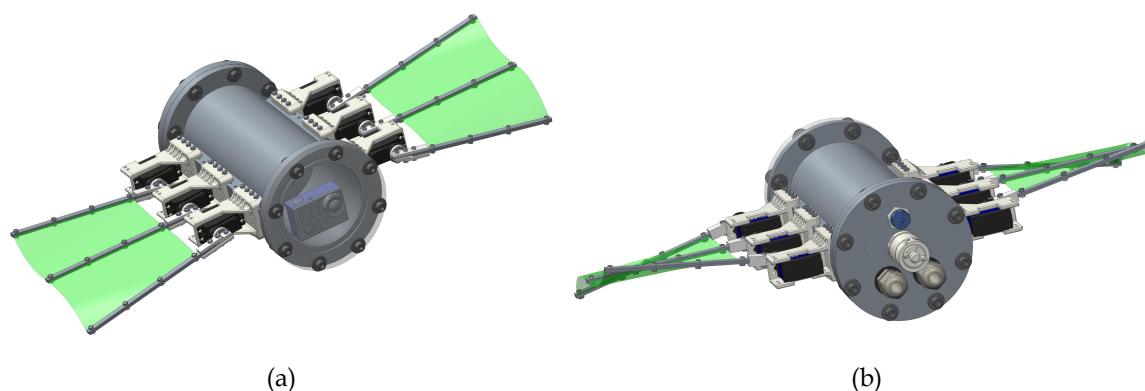
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάπτυξη ενός μικρού υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος, με την ονομασία SQUIDBOT-mini, το οποίο χρησιμοποιεί σύστημα πρόωσης πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης. Η σχεδίαση του οχήματος αυτού απορρέει από τα συμπεράσματα για τη λειτουργία και απόδοση των μεμονωμένων μηχανισμών πτερυγίων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.

Σκοπός σε αυτό το στάδιο ήταν ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός αρχικού πρωτοτύπου, κυρίως για την απόκτηση εμπειρίας στο κατασκευαστικό κομμάτι της διαδικασίας, και ειδικότερα αναφορικά με τις τεχνικές και τις μεθόδους στεγάνωσης και αδιαβροχοποίησης των διαφόρων εξαρτημάτων του ρομπότ. Η δεύτερη βασική σκοπιμότητα ανάπτυξης ενός μικρότερου μεγέθους πρωτοτύπου αφορά στη δυνατότητα πειραματικής διερεύνησης των χαρακτηριστικών πρόωσης και των στρατηγικών ελέγχου κίνησης στην υπάρχουσα, περιορισμένων διαστάσεων, δεξαμενή δοκιμών.

Αρχικά περιγράφεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή των μηχανολογικών εξαρτημάτων, με ιδιαίτερη αναφορά να γίνεται στις διαδικασίες στεγάνωσης και συναρμολόγησης των επιμέρους εξαρτημάτων. Στη συνέχεια περιγράφεται η αρχιτεκτονική ελέγχου και τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα του ρομποτικού οχήματος. Τέλος, παρουσιάζεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τη λειτουργία του πρωτοτύπου.



Σχήμα 3.1: Το υποβρύχιο ρομποτικό όχημα SQUIDBOT-mini.



Σχήμα 3.2: Μοντέλο CAD του υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος: (a) Μπροστά πλάγια όψη. (b) Πίσω πλάγια όψη.

### 3.1 Γενική περιγραφή

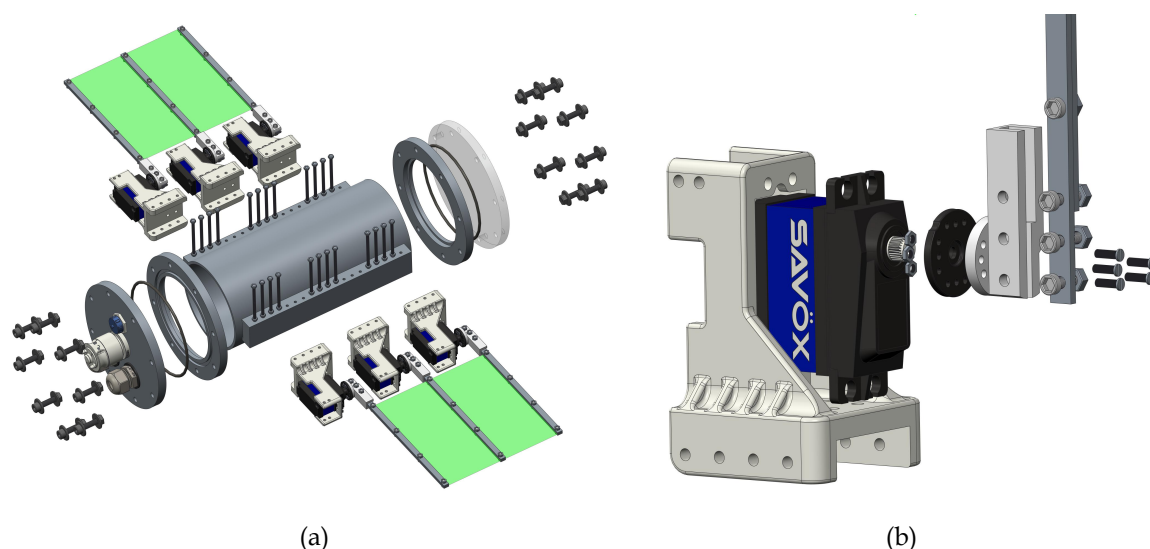
Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται το ρομποτικό υποβρύχιο όχημα, ενώ στο Σχήμα 3.2 φαίνεται το μοντέλο CAD του. Το ρομπότ αποτελείται από τρία βασικά τμήματα, το κύτος και δύο πλευρικά τοποθετημένα πτερύγια κυματοειδούς κίνησης. Κάθε πτερύγιο διαθέτει τρεις ακτίνες, οι οποίες οδηγούνται από αδιάβροχους σερβοκινητήρες τύπου R/C, και συνδέονται μεταξύ τους μέσω τμήματος ελαστικής μεμβράνης. Το κύτος σφραγίζει υδατοστεγώς και στο εσωτερικό του εμπεριέχει τα ηλεκτρονικά ελέγχου, μια μπαταρία πολυμερών λιθίου, μια μονάδα bluetooth για ασύρματη επικοινωνία και έναν αδρανειακό αισθητήρα προσανατολισμού (IMU/AHRS). Η κεντρική μονάδα ελέγχου του οχήματος είναι ένας 8-bit μικροελεγκτής, ο οποίος αναλαμβάνει τον υπολογισμό των προφίλ κίνησης των ακτίνων. Η συνδυασμένη κίνηση των ακτίνων σχηματίζει ένα οδεύον κύμα κατά μήκος του πτερυγίου, η διάδοση του οποίου έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή δυνάμεων πρόωσης που κινούν το σκάφος. Για την αρχική μελέτη των κινήσεων του σκάφους έχουν αναπτυχθεί δύο βασικά σχήματα λειτουργίας, αυτόνομη λειτουργία μέσω του μικροελεγκτή που διαθέτει η διάταξη και εξωτερικά ελεγχόμενη λειτουργία από Η/Υ ή κάποια άλλη συσκευή. Και στις δύο περιπτώσεις, υπάρχει δυνατότητα επικοινωνίας μέσω θύρας USB αλλά και ασύρματα μέσω bluetooth.

Κατά την κατασκευή και συναρμολόγηση του σκάφους λήφθηκε ιδιαίτερη μέριμνα όσον αφορά στη στεγάνωση του κύτους του, ενώ για την περαιτέρω προστασία του έχει τοποθετηθεί στο εσωτερικό του και ανιχνευτής εισροής υδάτων.

### 3.2 Μηχανολογική σχεδίαση-κατασκευή

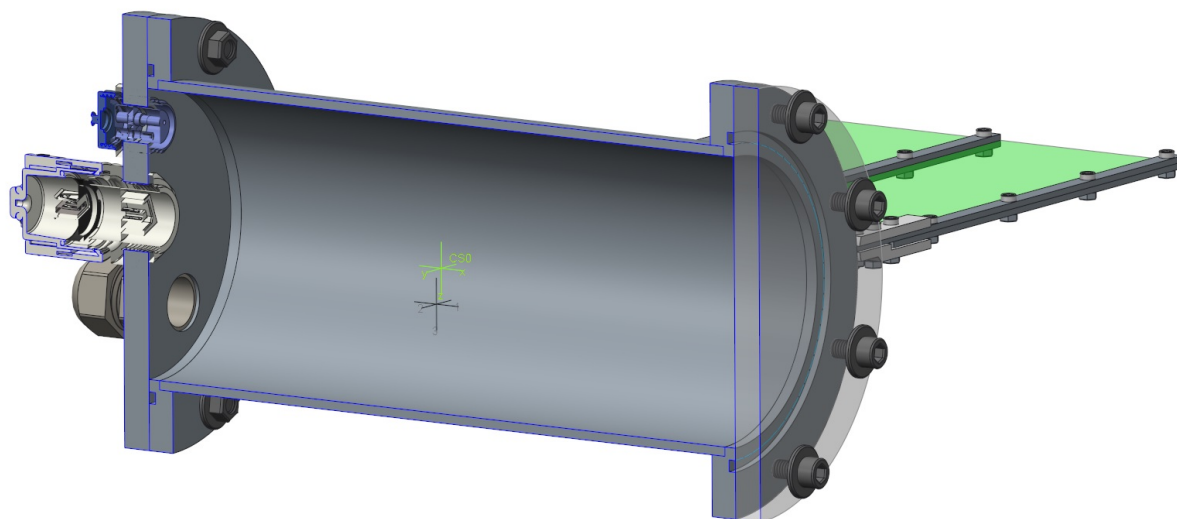
Στο Σχήμα 3.3α φαίνονται τα βασικά εξαρτήματα του οχήματος σε αποσυναρμολογημένη όψη. Όπως διακρίνεται σε αυτό, το ρομπότ διαθέτει δύο μηχανισμούς πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι πλευρικά του κυρίως σώματος του σκάφους.

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού του κύτους, αλλά και κατά τη διαδικασία επιλογής και συναρμολόγησης των εξαρτημάτων που τοποθετούνται στο εσωτερικό του, μελετήθηκε η επιρροή που θα έχει η τοποθέτηση των εξαρτημάτων στην πλευστότητα και στην ισορροπία του σκάφους, όταν αυτό βρίσκεται σε ηρεμία αλλά και κατά τη λειτουργία του. Στο Σχήμα 3.4 φαίνεται ένα τρισδιάστατο σχέδιο του πρωτότυπου σε τομή. Με πράσινο χρώμα, όνομα CS0 και ονόματα αξόνων  $x$ ,  $y$  και  $z$  απεικονίζεται ένα πλαίσιο συντεταγμένων ανηγμένο στο γεωμετρικό



Σχήμα 3.3: Μοντέλο CAD του ρομποτικού υποβρύχιου σκάφους: (α) Μοντέλο CAD του ρομπότ (β) Μοντέλο CAD της μονάδας κίνησης της ακτίνας.

κέντρο της κατασκευής, ενώ με μαύρο χρώμα και ονόματα αξόνων 1, 2 και 3 απεικονίζεται ένα πλαίσιο τοποθετημένο κατά προσέγγιση στο κέντρο μάζας του ρομποτικού πρωτότυπου. Αποφασίστηκε να μετακινηθεί το κέντρο μάζας της κατασκευής προς το κάτω μέρος της με σκοπό τη βελτίωση της παθητικής ευστάθειας του ρομποτικού πρωτότυπου γύρω από τον άξονα  $x$  του σωματοπαγούς πλαισίου αναφοράς (roll). Επίσης, για τον ίδιο λόγο, είναι σημαντικό το κέντρο μάζας να είναι πάνω στο επίπεδο που διχοτομεί κάθετα την κατασκευή. Τέλος, έγινε προσπάθεια για μετακίνηση του κέντρου μάζας κατά μήκος του άξονα  $x$  και προς το κέντρο της κατασκευής, για να μειωθεί η ροπή λόγω τυχόν απόκλισης προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η ροπή αυτή μπορεί να προκαλεί ακούσια περιστροφή γύρω από τον άξονα  $y$  του σωματοπαγούς πλαισίου, ή και διαταραχή κατά τον έλεγχο της σχετικής γωνίας πρόνευσης (pitch angle).



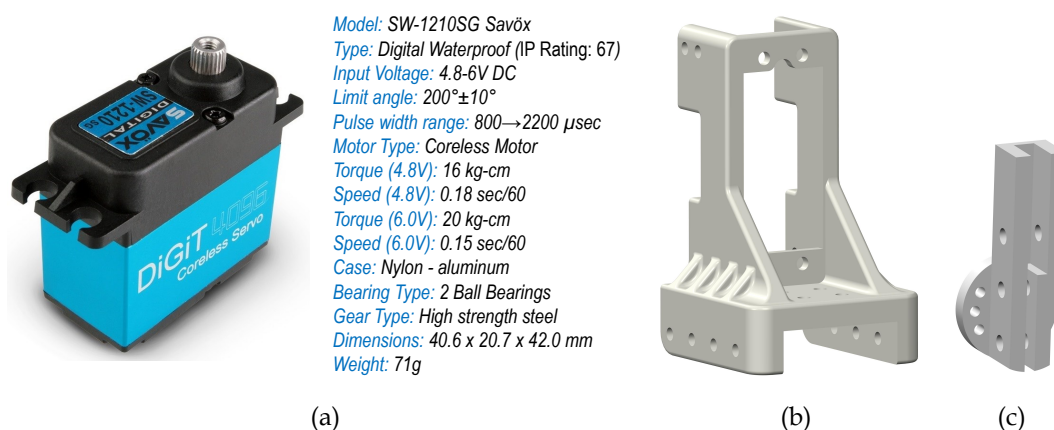
Σχήμα 3.4: Συστήματα συντεταγμένων στο γεωμετρικό κέντρο της κατασκευής και στο κέντρο μάζας.

Άλλος ένας τομέας ο οποίος μελετήθηκε αφορά στην πλευστότητα του σκάφους. Στην αρχική έκδοση του πρωτότυπου δεν προβλέπεται ενεργητικός έλεγχος της πλευστότητας, προ-

κειμένου να απλοποιηθεί η κατασκευή του. Η ρύθμιση της πλευστότητας του σκάφους γίνεται παθητικά, μέσω ρύθμισης της μάζας του προσθέτοντας κατάλληλα έρμα ή πλωτήρες από αφρολέξ. Ο συνολικός όγκος της κατασκευής υπολογίστηκε προσεγγιστικά από το μοντέλο CAD και ανέρχεται στα 2.85L. Για να επιτευχθεί ουδέτερη πλευστότητα θα πρέπει η μάζα του νερού που εκτοπίζεται από το βυθισμένο όχημα να ισούται με τη μάζα του ίδιου του σκάφους. Η ρύθμιση που περιγράφεται εδώ έγινε για καθαρό νερό το οποίο έχει πυκνότητα 1 kg /L, άρα η μάζα που πρέπει να επιτευχθεί από τη διαδικασία αυτή είναι τα 2.85 kg.

### 3.2.1 Περιγραφή εξαρτημάτων

Ο κάθε μηχανισμός πτερυγίου χρησιμοποιεί τρεις αυτόνομα κινούμενες ακτίνες. Κάθε μια από αυτές οδηγείται από αδιάβροχο σερβοκινητήρα τύπου R/C (Savox SW-1210SG), τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5a. Οι σερβοκινητήρες είναι τοποθετημένοι σε ατομικές βάσεις (Σχήμα 3.5b) εκτοπωμένες από ABSplus οι οποίες διαθέτουν κατάλληλη διαμόρφωση για εύκολη τοποθέτηση των κινητήρων μέσα σε αυτές (Σχήμα 3.3b), και οπές για τη συναρμολόγησή τους στη ράγα στήριξης του πτερυγίου.

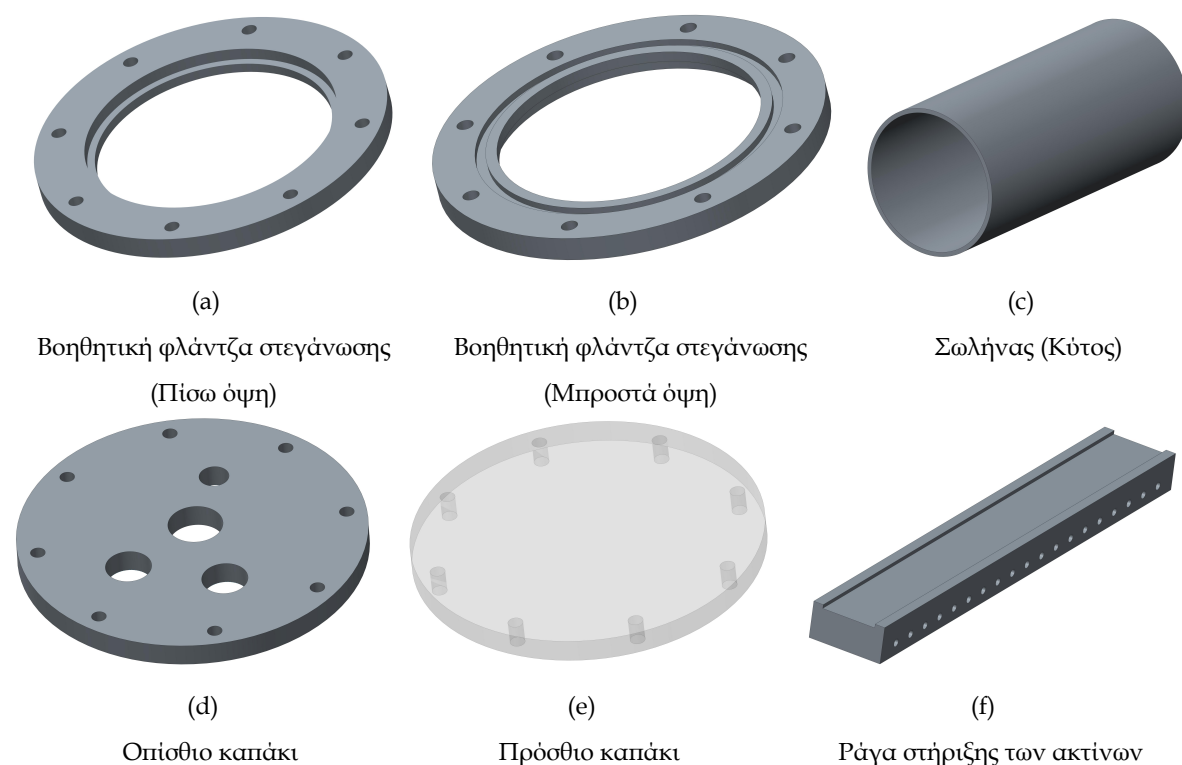


Σχήμα 3.5: Σερβοκινητήρας και εξαρτήματα μονάδας κίνησης ακτίνας: (a) Ο σερβοκινητήρας SW-1210SG της εταιρίας Savox, (b) Βάση σερβοκινητήρα, (c) Ενδιάμεσο εξάρτημα σύνδεσης ακτίνας με σερβοκινητήρα.

Η κάθε ακτίνα απαρτίζεται από δύο ελάσματα αλουμινίου αεροπορικού τύπου (7075) διαστάσεων 6 × 165 mm και 6 × 185 mm από φύλλο πάχους 2 mm, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με βίδες και παξιμάδια. Μεταξύ των δύο ελασμάτων συγκρατείται τμήμα ελαστικής μεμβράνης. Οι ακτίνες συναρμολογούνται στον άξονα του σερβοκινητήρα μέσω δύο συνδετικών εξαρτημάτων, ενός προσαρμογέα (horn) από αλουμίνιο, το οποίο εφαρμόζεται απευθείας στο τελικό γρανάτζι του άξονα του σερβοκινητήρα, και ενός ειδικά διαμορφωμένου συνδετικού εξαρτήματος που κατασκευάστηκε από αλουμίνιο (Σχήμα 3.5c). Αυτό το εξάρτημα διαθέτει κυλινδρική βάση με οπές που αντιστοιχούν σε οπές που διαθέτει και το horn του σερβοκινητήρα, για συναρμολόγησή του με βίδες και παξιμάδια. Επίσης, διαθέτει ορθογώνια εσοχή, εντός της οποίας τοποθετούνται τα ελάσματα των ακτίνων.

Δύο ράγες στήριξης, κατασκευασμένες από PVC, έχουν κολληθεί στα πλάγια του σκάφους και παίζουν το ρόλο της "ραχοκοκαλιάς", για την προσαρμογή των μονάδων κίνησης των ακτίνων των πτερυγίων. Αυτά τα εξαρτήματα έχουν ορθογώνιου σχήματος διατομή διαστάσεων 14.5 × 30 mm και μήκος 20 cm με εγκάρσιες οπές (Σχήμα 3.6f). Στη μία πλευρά τους έχει γίνει κατάλληλη διαμόρφωση (αυλάκι ορθογώνιας διατομής με βάθος 1.5 mm) για καλύτερη

εφαρμογή της κόλλας στο σημείο όπου γίνεται η ένωση με το κυρίως σώμα του σκάφους.



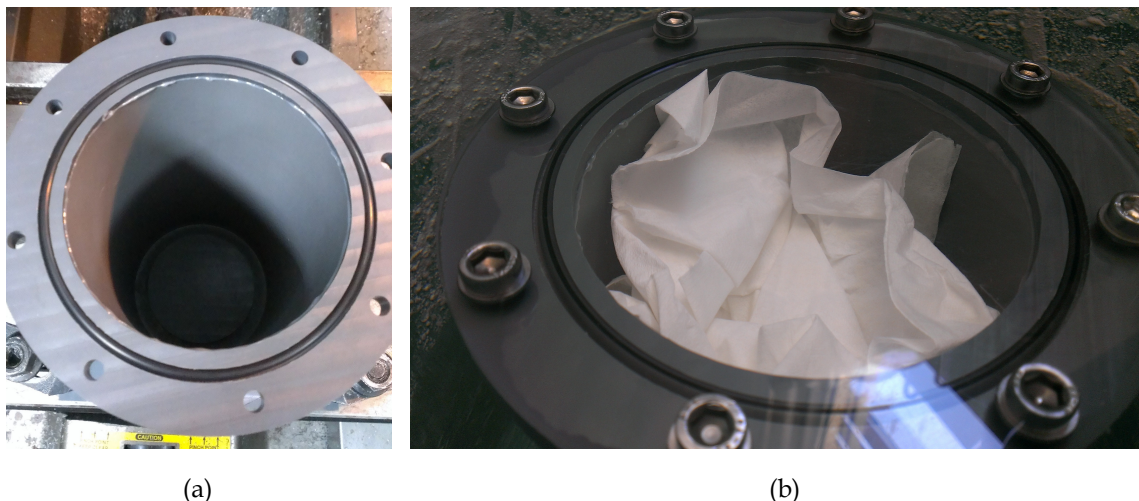
Σχήμα 3.6: Εξαρτήματα του μικρού ρομποτικού πρωτοτύπου.

Το κυρίως σώμα του ρομπότ έχει κυλινδρικό σχήμα και κατασκευάστηκε από σωλήνα PVC διαμέτρου  $\varnothing 100$  mm και μήκους 24 cm (Σχήμα 3.6c). Για τη διευκόλυνση της αδιαβροχοποίησης του κύτους κατασκευάστηκαν δύο βοηθητικοί δακτύλιοι (φλάντζες) εσωτερικής διαμέτρου  $\varnothing 94$  mm, εξωτερικής διαμέτρου  $\varnothing 140$  mm και πάχους 9 mm οι οποίοι κολλήθηκαν στις δύο ανοιχτές πλευρές του κυλίνδρου. Αυτά τα εξαρτήματα έχουν στη μία επίπεδη πλευρά τους κατάλληλη διαμόρφωση για εφαρμογή στον κύλινδρο (Σχήμα 3.6a), ενώ στην εξωτερική επίπεδη πλευρά τους έχει γίνει κατεργασία για διαμόρφωση εσοχής μέσα στην οποία τοποθετείται ο-ring για τη στεγάνωση του κυλίνδρου (Σχήμα 3.6b).

Τέλος, κατασκευάστηκαν δύο καπάκια σχήματος δίσκου. Το εμπρόσθιο καπάκι (Σχήμα 3.6e), διαμέτρου  $\varnothing 140$  mm και πάχους 5 mm, είναι από διάφανο plexi-glass και επιτρέπει εύκολη επόπτευση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων που βρίσκονται μέσα στο κύτος. Επιτρέπει επίσης την τοποθέτηση στο εσωτερικό του κύτους βιντεοκάμερας για τη λήψη υποβρύχιων πλάνων. Το οπίσθιο καπάκι (Σχήμα 3.6d), διαμέτρου  $\varnothing 140$  mm κατασκευάστηκε από φύλλο PVC πάχους 10 mm και διαθέτει οπές με σπείρωμα για τους στυποθλίπτες από τους οποίους περνούν τα καλώδια των σερβοκινητήρων, καθώς επίσης και οπές με σπείρωμα, όπου βιδώνουν οι κονέκτορες για φόρτιση της μπαταρίας και για επικοινωνία με τον μικροελεγκτή. Τα δύο καπάκια, αλλά και οι βοηθητικοί δακτύλιοι που ενσωματώνουν τα ο-rings διαθέτουν οπές  $\varnothing 6$  mm σε κυκλική διάταξη για συναρμολόγηση μεταξύ τους. Τα αναλυτικά μηχανολογικά σχέδια όλων των εξαρτημάτων παρατίθενται στο Παράρτημα Β.1.

### 3.2.2 Στεγάνωση

Όπως αναφέρεται παραπάνω, δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη στεγάνωση του σκάφους, τόσο του κύτους, όσο και των περιφερειακών εξαρτημάτων του. Η διαστασιολόγηση του πάχους όλων των βασικών εξαρτημάτων, και η επιλογή των μεθόδων συγκόλλησης και ένωσης τους έγινε με γνώμονα την εξασφάλιση της στεγανότητας του οχήματος μέχρι 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Ειδικότερα, η στεγανοποίηση του κύτους επιτυγχάνεται μέσω δύο o-rings τα οποία μονώνουν την ένωση μεταξύ των βοηθητικών δακτυλίων και των καπακιών (Σχήμα 3.7b).

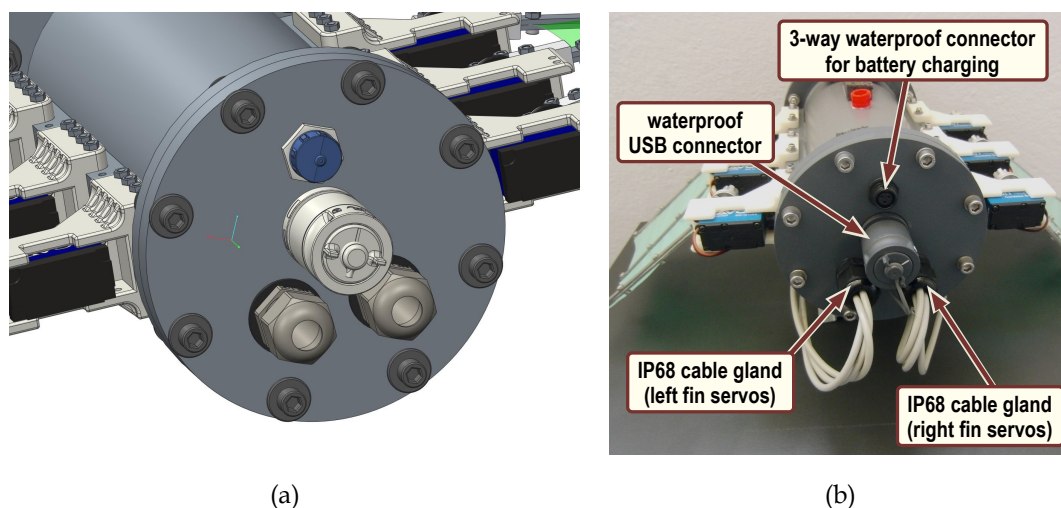


Σχήμα 3.7: Το o-ring στεγάνωσης του κύτους: (a) Τοποθετημένο στην εσοχή της φλάντζας, (b) Κατά τον έλεγχο στεγάνωσης του κύτους.

Τα o-ring που επιλέχθηκαν έχουν εσωτερική διάμετρο  $\varnothing 100$  mm και διάμετρο διατομής  $\varnothing 3$  mm. Εφόσον προορίζονται για μόνωση σε στατική εφαρμογή, η εσοχή στους βοηθητικούς δακτύλιους όπου και τοποθετούνται, διαμορφώθηκε έτσι ώστε να επιτευχθεί τάνυση του ελαστικού o-ring κατά 2% του μήκους του (με μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό τάνυσης 5%), με εσωτερική διάμετρό της ίση με  $\varnothing 102$  mm και βάθος ίσο με 2.45 mm. Η διατομή της εσοχής έχει επιφάνεια ίση με  $9.31 \text{ mm}^2$  ( $2.45 \times 3.8 \text{ mm}$ ), ενώ η διατομή του o-ring είναι ίση με  $7.065 \text{ mm}^2$ . Το ποσοστό συμπίεσης του o-ring ανέρχεται στο 16.9%, το οποίο είναι αποδεκτό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (για στατική μόνωση απαιτείται 10–40%) [60,61]. Επίσης, μέσω της παραπάνω διαστασιολόγησης επιτυγχάνεται ποσοστό πλήρωσης της εσοχής 73.3%, εντός, δηλαδή, των επιτρεπτών ορίων (65% – 85%).

Άλλο ένα εξάρτημα το οποίο χρειάστηκε ιδιαίτερη προσοχή κατά την κατασκευή και συναρμολόγησή του είναι το οπίσθιο καπάκι, όπου γίνεται η στεγάνωση της διέλευσης των καλωδίων στο εσωτερικό του σκάφους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8b, στο οπίσθιο καπάκι έχουν προσαρμοστεί δύο στυποθλίπτες ( $M20 \times 1.5$ ) της εταιρίας Skintop με βαθμό προστασίας IP69, ο καθένας από τους οποίους διαθέτει ειδικό ελαστικό ένθετο εξάρτημα σταγάνωσης, το οποίο επιτρέπει τη διέλευση τριών καλωδίων. Το συγκεκριμένο ένθετο επιλέχθηκε, έτσι ώστε κάθε ένας από τους στυποθλίπτες να εξυπηρετεί όλους τους σερβοκινητήρες ενός πτερυγίου. Η συναρμολόγηση των στυποθλιπτών έγινε μέσω διαμόρφωσης σπειρώματος στο καπάκι, ενώ η στεγάνωση των σπειρών γίνεται με φλαντζόκολλα (Reinzosil 557 anthracite της εταιρίας Victor Reinz), η οποία εκτός από προστασία από την εισροή νερού, παρέχει και ενίσχυση της ένωσης



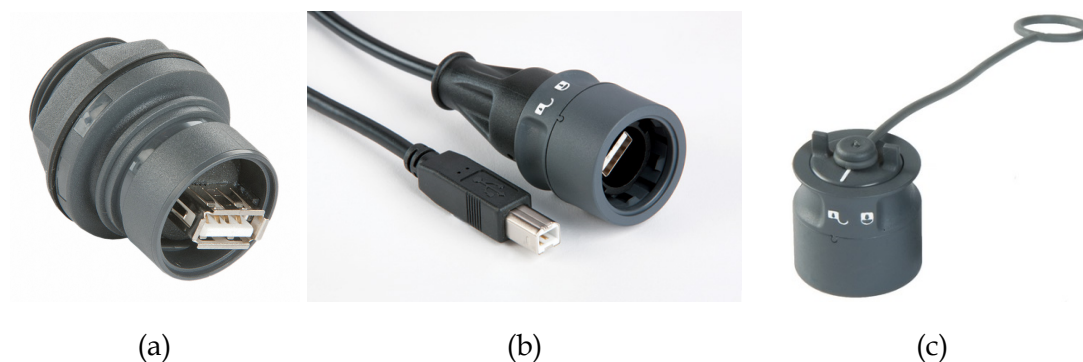


Σχήμα 3.8: Το οπίσθιο καπάκι στεγάνωσης του κυρίων κόντους, με κονέκτορες και στυπιοθλίπτες: (a) Μοντέλο CAD, (b) Πραγματική διάταξη.

μεταξύ των εξαρτημάτων.

Στο οπίσθιο καπάκι έχει επίσης τοποθετηθεί αδιάβροχο βύσμα σασί USB (Σχήμα 3.9a) της εταιρίας Bulgin (σειρά Buccaneer 6000). Η στεγάνωση της οπής που το φιλοξενεί γίνεται μέσω ειδικής τοιμούχας που διαθέτει το βύσμα. Το βύσμα σασί συνοδεύεται από καλώδιο με ειδικό αδιάβροχοποιημένο βύσμα (Σχήμα 3.9b). Η μεταξύ τους στεγάνωση επιτυγχάνεται μέσω ο-ring που διαθέτει το βύσμα του καλωδίου, το οποίο συμπιέζεται όταν το βύσμα του καλωδίου περιστραφεί στη θέση κλειδώματος. Κατά την αυτόνομη λειτουργία του σκάφους, χρησιμοποιείται καπάκι στεγάνωσης του βύσματος σασί (Σχήμα 3.9c). Η στεγάνωση επιτυγχάνεται και σε αυτή την περίπτωση μέσω ο-ring που διαθέτει το καπάκι. Το βύσμα σασί, το καλώδιο και το καπάκι στεγάνωσης εξασφαλίζουν βαθμό προστασίας IP68.

Επιπρόσθετα, στο οπίσθιο καπάκι προσαρμόστηκε αδιάβροχο βύσμα σασί τριών ακροδεκτών SP1312/s3 της εταιρίας Weipu, το οποίο συνοδεύεται από το αντίστοιχο αδιάβροχο βύσμα καλωδίου SP1310/r3 (Σχήμα 3.10). Το βύσμα καλωδίου χρησιμοποιείται για φόρτιση της μπαταρίας εντός του κόντους αλλά και για απευθείας τροφοδοσία του οχήματος από εξωτερικό τροφοδοτικό. Κατά την ασύρματη λειτουργία του σκάφους, χρησιμοποιείται ειδικά διαμορφωμένο βιδωτό τερματικό στεγάνωσης. Αυτό υλοποιήθηκε από ένα τροποποιημένο βύσμα καλωδίου τριών ακροδεκτών, η οπή του οποίου έχει στεγανωθεί. Από τους τρεις ακροδέκτες του,



Σχήμα 3.9: Το σύστημα αδιάβροχων ηλεκτρικών συνδέσεων usb της εταιρίας Bulgin (σειρά Buccaneer 6000) που χρησιμοποιείται στο πρωτότυπο: (a) Βύσμα σασί, (b) Καλώδιο με βύσμα, (c) Καπάκι στεγάνωσης.

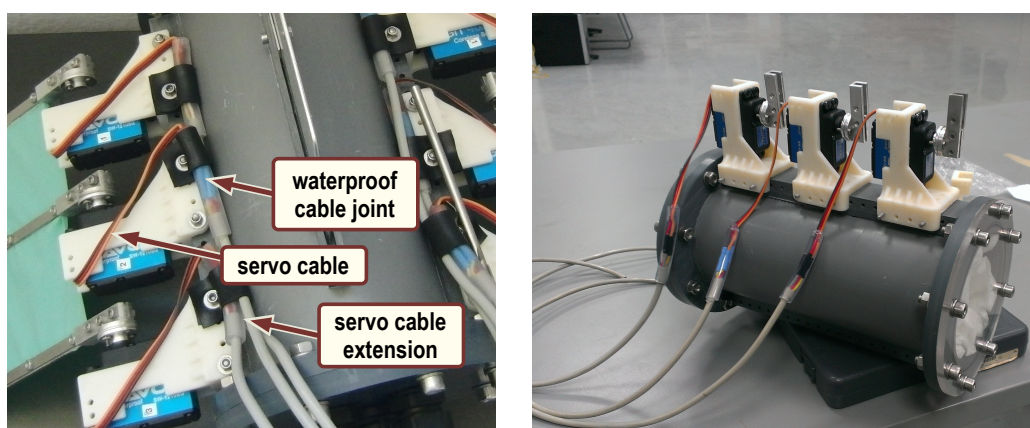


Σχήμα 3.10: (a) Το σύστημα αδιάβροχης ηλεκτρικής σύνδεσης τριών ακροδεκτών της εταιρίας Weipu (σειρά SP13) που χρησιμοποιείται για την εξωτερική τροφοδοσία και τη φόρτιση της μπαταρίας στο ρομποτικό πρωτότυπο. (b) Το τροποποιημένο βύσμα καλωδίου, το οποίο χρησιμοποιείται ως τερματικό στεγάνωσης και διακόπτης on/off του οχήματος.

έχουν βραχυκυκλωθεί οι δύο που αντιστοιχούν στην απευθείας τροφοδοσία και στο συσσωρευτή. Έτσι, αυτό το τροποποιημένο βύσμα λειτουργεί ταυτόχρονα ως τερματικό στεγάνωσης και διακόπτης ON/OFF του ρομπότ.

Το βύσμα σασί στερεώνεται στο οπίσθιο καπάκι μέσω σπειρώματος που έχει διαμορφωθεί σε αυτό, ενώ για τη στεγάνωση των σπειρών χρησιμοποιείται φλαντζόκολλα (Reinzosil 557 anthracite), η οποία ενισχύει την ένωση προκειμένου να αποφεύγεται η ακούσια περιστροφή τους κατά το βίδωμα/ξεβίδωμα των βυσμάτων. Το βύσμα σασί, το βύσμα καλωδίου και το καπάκι στεγάνωσης έχουν βαθμό προστασίας IP68.

Τέλος, ήταν απαραίτητη η αδιαβροχοποιημένη προέκταση των καλωδίων των σερβοκινητήρων, καθώς το αρχικό μήκος τους δεν ήταν αρκετά μακρύ για να γίνει όδευσή τους στο εσωτερικό του σκάφους. Αφού αφαιρέθηκε ο κονέκτορας των καλωδίων, έγινε κασιτεροκόλληση της προέκτασης και μόνωση της περιοχής μέσω τοποθέτησης πάνω στην κόλληση διάφανου πλαστικού σωλήνα και πλήρωσής του με ειδική κόλλα στεγάνωσης Turbo-Fix 4 (MS προπολυμερίου). Το αποτέλεσμα εικονίζεται στο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Η αδιαβροχοποιημένη προέκταση των καλωδίων των σερβοκινητήρων.

### 3.2.3 Κατασκευή - κατεργασίες

Όλες οι κατεργασίες των μηχανολογικών εξαρτημάτων του ρομποτικού πρωτοτύπου έγιναν σε CNC κάθετο κέντρο κατεργασίας τεσσάρων αξόνων Haas Vf-2, σε CNC κάθετο κέντρο κατεργασίας τριών αξόνων Haas TM-1P, και σε συμβατικό τόρνο που παρέχονται στα εργαστήρια του ΤΕΙ Κρήτης. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται συνοπτικά τα κοπτικά εργαλεία και οι συνθήκες κοπής που χρησιμοποιήθηκαν για τις κατεργασίες, με πιο αναλυτική αναφορά στις παραμέτρους και τη διαδικασία κοπής συγκεκριμένων εξαρτημάτων, των οποίων η κατασκευή παρουσίασε αυξημένο βαθμό πολυπλοκότητας.



(a)

(b)

Σχήμα 3.12: CNC κοπή ελασμάτων για τις ακτίνες

Ειδικότερα, τα ελάσματα για τις ακτίνες κατασκευάστηκαν στο κάθετο κέντρο κατεργασίας Haas TM-1P (Σχήμα 3.12). Το φύλλο αλουμινίου βιδώθηκε πάνω σε βοηθητικό τεμάχιο ξύλου, για να διευκολυνθεί το δέσιμο του ακατέργαστου τεμαχίου στην τράπεζα του κέντρου κατεργασίας, αλλά και για να αποφευχθεί επαφή του κοπτικού εργαλείου με αυτήν. Για τη στερέωση του ξύλου στην τράπεζα χρησιμοποιήθηκε ειδικό clamping kit που διαθέτει το κέντρο κατεργασίας. Για τις κατεργασίες που εκτελέστηκαν χρησιμοποιήθηκαν: τρυπάνι R100 ( $\varnothing 3$  mm) της Dormer με πρόωση 200 mm/min και ταχύτητα περιστροφής του spindle 5000 rpm, και κονδύλι S814HA ( $\varnothing 5$  mm) της Dormer με πρόωση 420 mm/min και ταχύτητα περιστροφής 5000 rpm με βήμα 1 mm ανά πέρασμα.

Οι δακτύλιοι πάνω στους οποίους συναρμολογούνται τα καπάκια κατασκευάστηκαν από φύλλο PVC στο κάθετο κέντρο κατεργασίας Haas TM-1P. Όμοια με το φύλλο αλουμινίου, χρη-



(a)

(b)

Σχήμα 3.13: Κατασκευή βοηθητικού δακτυλίου στεγάνωσης: (a) Εξωτερική πλευρά βοηθητικού δακτυλίου σε CNC κέντρο κατεργασίας, (b) Αποκοπή του εξωτερικού προφίλ σε συμβατικό τόρνο

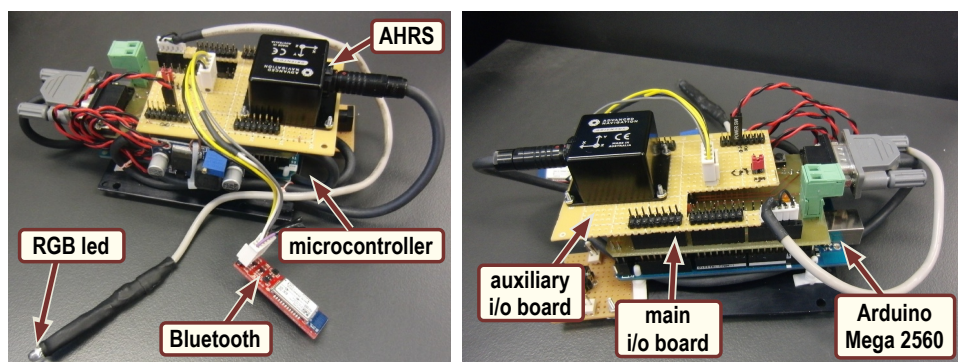
σιμοποιήθηκε φύλλο PVC ως προστατευτικό υπόστρωμα. Αρχικά (Σχήμα 3.13a) έγινε κατεργασία αφαίρεσης υλικού (face milling) για εξάλειψη των ατελειών που είχε η επιφάνεια του υλικού, χρησιμοποιώντας το κονδύλι S902 ( $\varnothing 10$  mm) της εταιρίας Dormer, με ταχύτητα πρόωσης ίση με 252 mm/min και ταχύτητα περιστροφής του κοπτικού ίση με 3788 rpm. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν οι οπές σε κυκλική διάταξη, χρησιμοποιώντας το τρυπάνι A100 ( $\varnothing 6$  mm) με ταχύτητα πρόωσης 314 mm/min, ταχύτητα περιστροφής 1600 rpm και βάθος ραμφίσματος (peck depth) ίσο με 1 mm. Τέλος, έγινε κατεργασία αφαίρεσης υλικού για τη διαμόρφωση της εσοχής όπου το εξάρτημα συναρμολογείται στον κύλινδρο. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το S902 ( $\varnothing 10$  mm) της Dormer με συνθήκες κοπής ίδιες με της πρώτης κατεργασίας (face milling). Στη συνέχεια, το εξάρτημα αφαιρέθηκε από το CNC κέντρο κατεργασίας και μεταφέρθηκε σε συμβατικό τόρνο (Σχήμα 3.13b). Χρησιμοποιήθηκε η εσοχή που διαμορφώθηκε στο προηγούμενο βήμα για να ασφαλιστεί το εξάρτημα στο τσοκ. Σε αυτό το στάδιο έγινε λείανση της εξωτερικής επίπεδης επιφάνειας του δακτυλίου, με ταχύτητα περιστροφής 450 rpm και πρόωση 0.12 mm/rev. Στη συνέχεια, έγινε κατεργασία αφαίρεσης υλικού για διαμόρφωση υποδοχής για το o-ring με ταχύτητα περιστροφής του δακτυλίου ίση με 245 rpm και πρόωση 0.045 mm/rev. Τέλος, έγινε διαμόρφωση της εξωτερικής διαμέτρου του δακτυλίου με συνθήκες κοπής ίδιες με της πρώτης κατεργασίας.

Όσον αφορά στο καπάκι από plexi-glass, οι οπές έγιναν με τρυπάνι A100 ( $\varnothing 6$  mm) της Dormer με πρόωση 500 mm/min και ταχύτητα περιστροφής 3000 rpm και το εξωτερικό προφίλ του κόπηκε με κονδύλι ZE504040 ( $\varnothing 4$  mm) της WIDIN με πρόωση 218 mm/min και ταχύτητα περιστροφής 3279 rpm.

Για τα υπόλοιπα εξαρτήματα από PVC χρησιμοποιήθηκαν τα εξής κοπτικά εργαλεία: τρυπάνι 1090300 της Somta ( $\varnothing 3$  mm), τρυπάνι R100 ( $\varnothing 3$  mm) της Dormer, τρυπάνι A100 ( $\varnothing 6$  mm) της Dormer, κονδύλι S902 ( $\varnothing 6$  mm) της Dormer και κονδύλι S814HA ( $\varnothing 4$  mm) της Dormer.

### 3.3 Ηλεκτρονικά υποσυστήματα

Το πρωτότυπο είναι ενεργειακά αυτόνομο και τροφοδοτείται από μπαταρία πολυμερών λιθίου 7.4 V. Ο έλεγχος της κίνησης τόσο των ακτίνων του περυγίου, αλλά και του οχήματος γενικά, γίνεται από αναπτυξιακή πλατφόρμα με 8-bit μικροελεγκτή (Arduino Mega 2560), στον οποίο εκτελείται ειδικό πρόγραμμα το οποίο υλοποιεί δύο CPG συστήματα για τον υπολογισμό των προφίλ για τις επιθυμητές γωνιακές θέσεις των ακτίνων των δύο περυγίων. Αυτές χρησιμοποιούνται για την δημιουργία κατάλληλων σημάτων ελέγχου PWM τα οποία παρά-

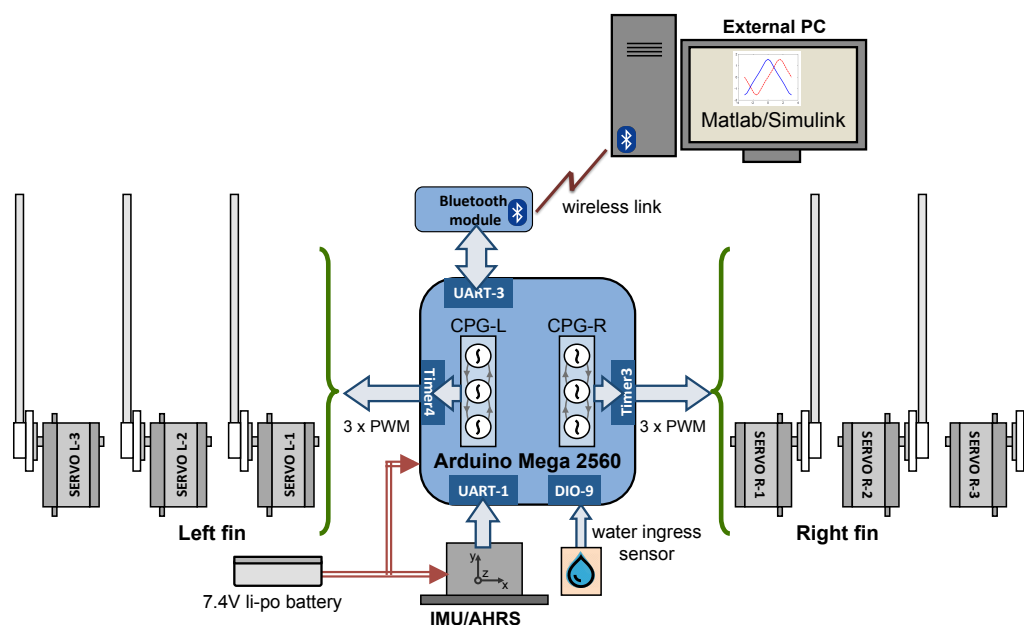


Σχήμα 3.14: Τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα του ρομποτικού οχήματος.

γονται από τις μονάδες χρονιστών του μικροελεγκτή και προωθούνται στους σερβοκινητήρες. Ο μικροελεγκτής δέχεται επίσης δεδομένα σχετικά με τον προσανατολισμό του οχήματος στο χώρο (γωνίες roll, pitch και yaw) από μια μονάδα αδρανειακού συστήματος προσδιορισμού προσανατολισμού (Attitude Heading Reference System, AHRS). Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται κατά την πλοήγηση του σκάφους, ενώ μια μονάδα Bluetooth επιτρέπει την ασύρματη μετάδοση των δεδομένων σε εξωτερικό Η/Υ με συχνότητα 100Hz.

### 3.3.1 Αρχιτεκτονική ελέγχου

Στο Σχήμα 3.15 απεικονίζεται ένα διάγραμμα της αρχιτεκτονικής ελέγχου του υποβρύχιου οχήματος με τα βασικά ηλεκτρονικά υποσυστήματα του οχήματος. Διαφαίνεται η κεντρική μονάδα ελέγχου, η οποία είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό και την αποστολή στους επενεργητές των κατάλληλων σημάτων ελέγχου, ενώ μπορεί να δέχεται πληροφορίες από τη μονάδα AHRS, από έναν ανιχνευτή εισροής υδάτων, αλλά και από εξωτερικές συσκευές μέσω ασύρματης ζεύξης bluetooth. Το όλο σύστημα τροφοδοτείται από μπαταρία ιόντων λιθίου-πολυμερούς. Τα επιμέρους αυτά στοιχεία παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη συνέχεια.

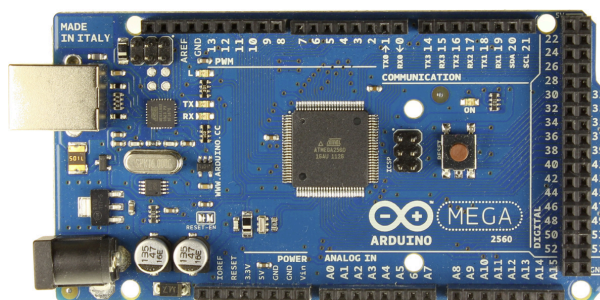


Σχήμα 3.15: Σχηματικό διάγραμμα της διασύνδεσης των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων και της αρχιτεκτονικής ελέγχου του ρομποτικού πρωτότυπου.

### 3.3.2 Μονάδα ελέγχου

Η κεντρική μονάδα ελέγχου του συστήματος βασίζεται στην αναπτυξιακή πλατφόρμα Arduino Mega2560, τα βασικά χαρακτηριστικά της οποίας παρέχονται στην Ενότητα 2.4.1.

Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής διαθέτει τέσσερις θύρες ασύγχρονης σειριακής διασύνδεσης. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, η θύρα USART-0, η οποία διαθέτει κύκλωμα μετατροπής serial<>USB, χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του μικροελεγκτή, αλλά και για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του μικροελεγκτή και ενός εξωτερικού Η/Υ κατά την ενόρματη λειτουργία του πρωτότυπου. Η θύρα USART-1 χρησιμοποιείται για την διασύνδεση με τη μονάδα IMU/AHRS, από την οποία ο μικροελεγκτής λαμβάνει δεδομένα σχετικά με τον προσανατολισμό του οχήματος στο χώρο. Τέλος, στη θύρα USART-3 έχει προσαρμοστεί μο-



Σχήμα 3.16: Η μικροϋπολογιστική πλατφόρμα Arduino Mega 2560

νάδα bluetooth για την ασύρματη επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές, προκειμένου για την αποστολή δεδομένων τηλεμετρίας και τη λήψη εντολών.

Μια από τις βασικές λειτουργίες του μικροελεγκτή είναι η παραγωγή των σημάτων ελέγχου PWM που προωθούνται στους σερβοκινητήρες που οδηγούν τις ακτίνες των πτερυγίων. Η παραγωγή των σημάτων ελέγχου αυτών γίνεται μέσω δύο 16-bit χρονιστών, timer 3 και timer 4, του μικροελεγκτή, καθένας από τους οποίους παράγει τρία σήματα κοινής συχνότητας και ανεξάρτητης ρύθμισης πλάτους (duty cycle) του PWM. Η ρύθμιση αυτή επιτυγχάνεται επιλέγοντας κατάλληλα τις τιμές των καταχωρητών σύγκρισης (βλ. Πίνακα 3.1).

αα σερβοκινητήρα	χρονιστής	καταχωρητής ρύθμισης duty cycle
L1	timer 4	OCR4C
L2	timer 4	OCR4B
L3	timer 4	OCR4A
R1	timer 3	OCR3A
R2	timer 3	OCR3C
R3	timer 3	OCR3B

Πίνακας 3.1: Παραγωγή σημάτων ελέγχου για τους επενεργητές των ακτίνων των δύο πτερυγίων.

Στον μικροελεγκτή τρέχει ειδικό firmware, το οποίο συνδυάζει τα δεδομένα ανάδρασης προσανατολισμού που δέχεται από τον AHRS και δύο συστήματα CPG, για τον έλεγχο κίνησης του οχήματος. Η ρουτίνα ελέγχου εκτελείται με συχνότητα 100 Hz, ο αυστηρός χρονισμός της οποίας εξασφαλίζεται μέσω interrupt του Timer 5.

### 3.3.3 Αδρανειακό σύστημα προσδιορισμού προσανατολισμού - AHRS

Το ρομποτικό πρωτότυπο όχημα είναι εξοπλισμένο με το αδρανειακό σύστημα προσδιορισμού προσανατολισμού (Attitude and Heading Reference System - AHRS) Orientus της εταιρίας Advanced Navigation (Σχήμα 3.17α). Το σύστημα αυτό διαθέτει μικροηλεκτρομηχανικά (MEMS) αισθητήρια (γυροσκόπια, επιταχυνσιόμετρα και μαγνητόμετρα) τριών αξόνων, και αισθητήριο θερμοκρασίας. Επίσης διαθέτει υπολογιστική μονάδα με κατάλληλο μαθηματικό αλγόριθμο για επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται από τους αισθητήρες και μετάφρασή τους σε δεδομένα προσανατολισμού του οχήματος (γωνίες roll, pitch και yaw) .

Για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού, τα μαγνητόμετρα του AHRS χρησιμοποιούν

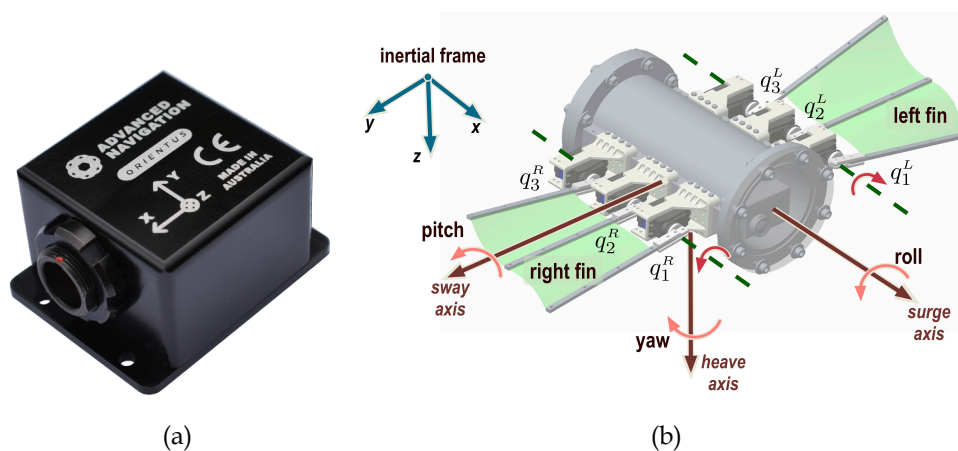
το μαγνητικό πεδίο της γης. Αυτό σημαίνει ότι αν κοντά στον αισθητήρα τοποθετηθούν εξαρτήματα από χάλυβα ή κάποιο άλλο μαγνητικό υλικό, το μαγνητικό πεδίο των εξαρτημάτων αυτών θα δημιουργήσει μόνιμη διαταραχή στη μέτρηση των μαγνητόμετρων. Η επίδραση αυτού του μόνιμου σφάλματος μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω λειτουργίας βαθμονόμησης (calibration) που παρέχεται στο λογισμικό του AHRS.

Η μονάδα διαθέτει επίσης μια σειρά από εσωτερικά φίλτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται τόσο για εξομάλυνση του θορύβου από ταλαντώσεις στα σήματα των γυροσκοπίων και των επιταχυνσιόμετρων, όσο για ελαχιστοποίηση της επίδρασης των μαγνητικών πεδίων στα σήματα των μαγνητόμετρων, αλλά και για την ελαχιστοποίηση του θορύβου που είναι πιθανόν να εισέρχεται στο σύστημα από τις γραμμές τροφοδοσίας του.

Η επικοινωνία της μονάδας AHRS με τον μικροελεγκτή γίνεται μέσω σειριακού πρωτοκόλλου RS-232 και όπως αναφέρεται και παραπάνω, συνδέεται στη θύρα USART-1 του. Από μια πληθώρα διαθέσιμων πακέτων δεδομένων που μπορεί να αποστέλλει η μονάδα, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκαν τα εξής:

- Euler orientation packet με packet ID 39
- Acceleration packet με packet ID 37
- Status packet με packet ID 23

τα οποία αποστέλλονται με ρυθμό 100 Hz. Στη δομή του κάθε πακέτου συμπεριλαμβάνονται, εκτός από τα καθεαυτά δεδομένα και κάποια δεδομένα που αφορούν στο ίδιο το πακέτο, όπως το αναγνωριστικό του (Packet ID), το μέγεθος του πακέτου κ.α.

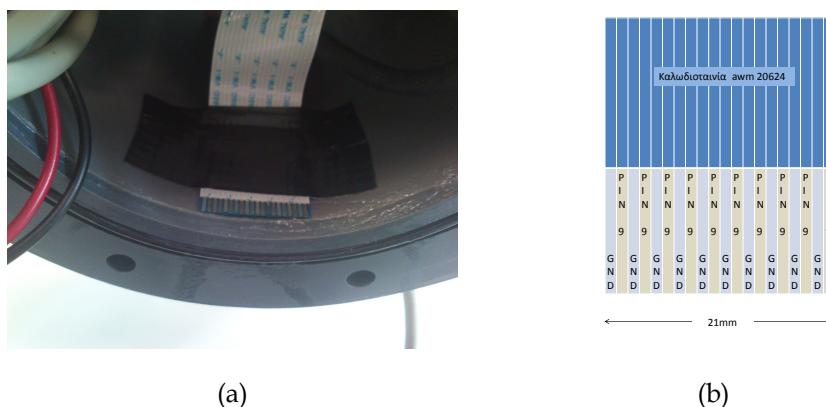


Σχήμα 3.17: (a) Η μονάδα AHRS Orientus της εταιρίας Advanced Navigation, (b) Το αδρανειακό πλαίσιο συντεταγμένων και το σωματοπαγές ως προς το οποίο ορίζονται οι γωνίες roll, pitch και yaw.

Στο Σχήμα 3.17b απεικονίζεται ένα σχέδιο του ρομποτικού οχήματος με το σωματοπαγές πλαίσιο αναφοράς του προσαρτημένο πάνω του και το αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς (inertial frame) το οποίο χρησιμοποιείται κατά τον έλεγχο του προσανατολισμού του. Κατά την εγκατάσταση του αισθητήρα μέσα στο κύτος του σκάφους δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην τοποθέτησή του όσο το δυνατόν εγγύτερα στο κέντρο της κατασκευής, έτσι ώστε να συμπίπτει ο άξονας  $x$  του αισθητήρα με τον άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου, και ο άξονας  $z$  να είναι κάθετος ως προς το επίπεδο που διχοτομεί οριζόντια την κατασκευή και με κατεύθυνση προς τα κάτω. Αυτός ο τρόπος εγκατάστασης του AHRS ελαχιστοποιεί τις γωνιακές αποκλίσεις των αισθητήρων, τόσο των γυροσκοπίων όσο και των μαγνητόμετρων.

### 3.3.4 Ανιχνευτής εισροής υδάτων

Μια βασική απειλή για τα ηλεκτρονικά που βρίσκονται στο εσωτερικό του σκάφους είναι η εισροή υδάτων κατά την υποβρύχια λειτουργία του σκάφους. Αν και έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην αποτελεσματικότητα της στεγάνωσης του κύτους και των εξαρτημάτων του ρομποτικού πρωτότυπου, για περαιτέρω προστασία τους κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε στο κάτω μέρος του κύτους ανιχνευτής εισροής υδάτων (Σχήμα 3.18a). Αποτελείται από καλωδιοταινία, οι ακροδέκτες της οποίας είναι βραχυκυκλωμένοι εναλλάξ (Σχήμα 3.18b). Οι μισοί ακροδέκτες οδηγούνται σε ακροδέκτη ground ενώ οι άλλοι μισοί οδηγούνται σε ψηφιακή είσοδο του μικροελεγκτή.



Σχήμα 3.18: Ανιχνευτής εισροής υδάτων: (a) Θέση εγκατάστασης ανιχνευτή στο σκάφος (b) Συνδεσμολογία ανιχνευτή.

### 3.3.5 Μονάδα ασύρματης επικοινωνίας

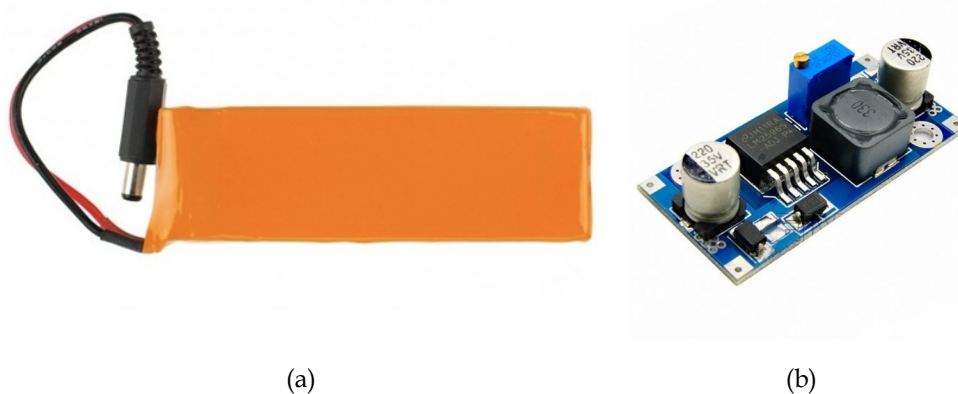
Το ρομποτικό πρωτότυπο έχει δυνατότητα όχι μόνο ενσύρματης αλλά και ασύρματης επικοινωνίας με εξωτερικές συσκευές. Κατά τη λειτουργία του σκάφους εντός του νερού, το καλώδιο το οποίο χρησιμοποιείται για την ενσύρματη σύνδεσή του με τον εξωτερικό Η/Υ μπορεί να προκαλέσει δυνάμεις οι οποίες εφαρμόζονται στο σκάφος και αποτελούν σημαντική διαταραχή που εμποδίζει την ομαλή κίνησή του και τον αποδοτικό έλεγχο του προσανατολισμού του. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη χρήση ασύρματης ζεύξης για τη μετάδοση πληροφοριών από και προς το σκάφος.

Για το σκοπό αυτό, στη θύρα USART-3 του μικροελεγκτή έχει συνδεθεί η μονάδα BlueSMiRF Silver της εταιρίας SparkFun. Η εν λόγω μονάδα επιτρέπει την ασύρματη επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές που διαθέτουν bluetooth, όπως εξωτερικό Η/Υ ή φορητές συσκευές. Η ταχύτητα μετάδοσης των σημάτων έχει οριστεί στα 115200 bps με 1 stop bit και χωρίς parity bit.

### 3.3.6 Τροφοδοσία

Το ρομποτικό όχημα είναι ενεργειακά αυτόνομο και τροφοδοτείται από συσσωρευτή ιόντων λιθίου-πολυμερούς (LiPo) ονομαστικής τάσης 7.4 V και χωρητικότητας 2200 mAh. Ο συγκεκριμένος συσσωρευτής (μοντέλο FIT0137 της εταιρίας DFRobot) (Σχήμα 3.19a), διαθέτει κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα που επιτρέπουν τη φόρτισή του από οποιοδήποτε τροφοδοτικό με τάση φόρτισης τα 9 V και ένταση όχι μεγαλύτερη του 1 A.





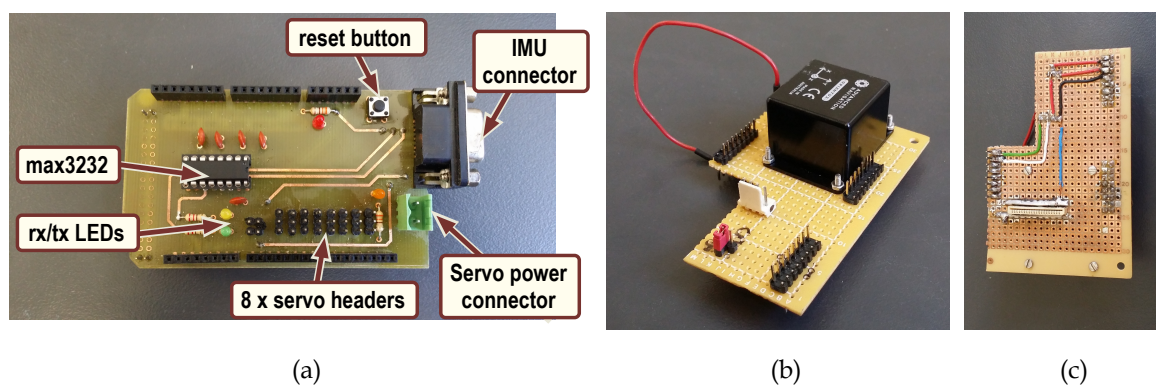
Σχήμα 3.19: Τα εξαρτήματα τροφοδοσίας του ρομποτικού πρωτότυπου: (a) Η μπαταρία ιόντων λιθίου-πολυμερούς, (b) Ο μετατροπέας DC-DC stepdown.

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των περυγίων σε ακραίες τιμές συχνότητας και πλάτους ταλάντωσης των ακτίνων, παρατηρήθηκε πτώση τάσης του συσσωρευτή εξαιτίας της μεγάλης κατανάλωσης ρεύματος από τους επενεργητές. Αυτή η πτώση τάσης προκαλεί επανεκκινήσεις (reset) του μικροελεγκτή ή και δυσλειτουργία του αισθητήρα AHRS, ο οποίος τροφοδοτείται από τη γραμμή των 5 V του μικροελεγκτή. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιήθηκε ο μετατροπέας DC-DC που φαίνεται στο Σχήμα 3.19b, ο οποίος παρέχει σταθεροποιημένη τάση 6.8 V στον μικροελεγκτή, ενώ οι σερβοκινητήρες τροφοδοτούνται απευθείας από το συσσωρευτή.

### 3.3.7 Βοηθητικές πλακέτες επέκτασης

Για τη διευκόλυνση της διασύνδεσης των σημάτων, της τροφοδοσίας των σερβοκινητήρων και της επικοινωνίας με τη μονάδα AHRS την IMU, κατασκευάστηκε ειδική πλακέτα επέκτασης (Σχήμα 3.20a), η οποία συνδέεται στους ακροδέκτες του Arduino Mega2560 μέσω ακιδοσειρών. Μια δεύτερη πλακέτα επέκτασης (Σχήμα 3.20b,c), η οποία προσαρμόζεται πάνω στην πρώτη, φιλοξενεί κονέκτορες για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή από τη μπαταρία, τη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας και τον αισθητήρα εισροής υδάτων, και μεταβιβάζει τα σήματα στον μικροελεγκτή μέσω ακιδοσειρών.

Κατά την τοποθέτηση του AHRS είναι σημαντικό να συμπίπτουν τα πλαίσια συντεταγμένων του με ένα πλαίσιο συντεταγμένων ανηγμένο στο κέντρο της κατασκευής, του οποίου οι

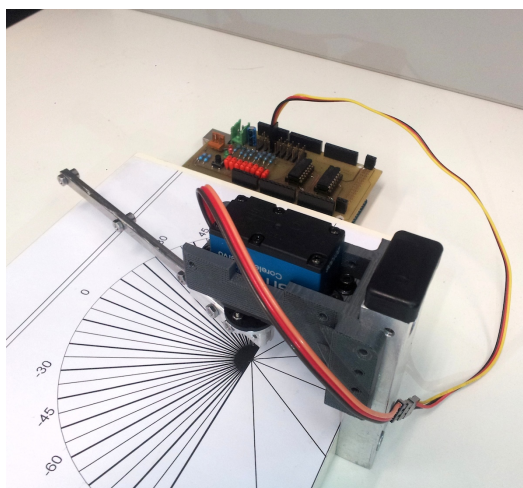


Σχήμα 3.20: Βοηθητικές πλακέτες επέκτασης. (a) Κόρια πλακέτα επέκτασης, (b) Δευτερεύουσα πλακέτα επέκτασης, άνω όψη, (c) Δευτερεύουσα πλακέτα επέκτασης, κάτω όψη.

άξονες φαίνονται στο Σχήμα 3.17b. Η δεύτερη βοηθητική πλακέτα επέκτασης εξυπηρετεί και ως βάση τοποθέτησης του AHRS και παρέχει σταθερότητα στη συναρμολόγηση και μείωση πιθανών ταλαντώσεων που θα μεταδίδονταν στους αισθητήρες του.

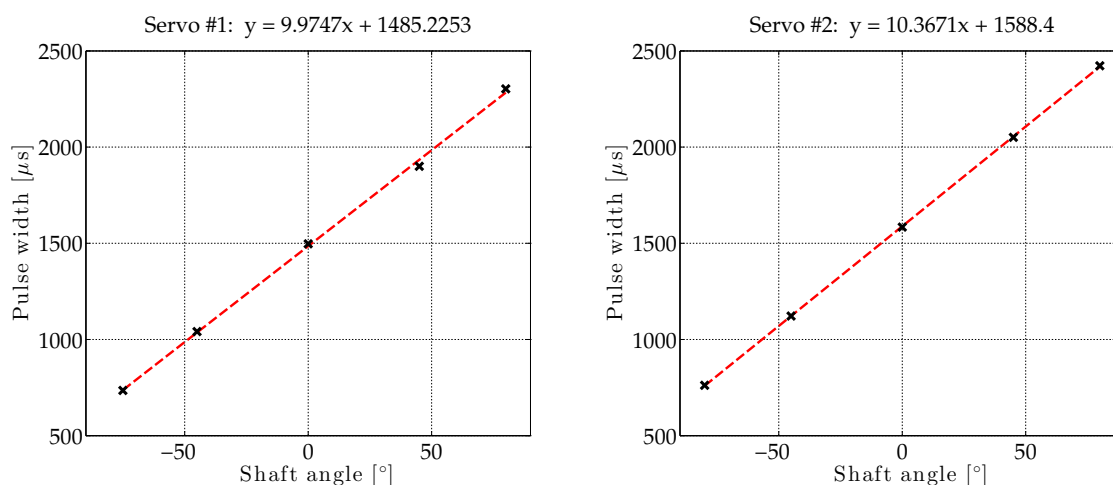
### 3.3.8 Βαθμονόμηση σερβοκινητήρων

Η διαδικασία βαθμονόμησης των σερβοκινητήρων αποσκοπεί στην αντιστάθμιση τυχόν κατασκευαστικών διαφορών μεταξύ τους ή ακόμα και διαφορών που προκύπτουν κατά τη συναρμολόγησή τους. Οι διαφορές αυτές είναι πιθανό να οδηγήσουν σε μη κανονικό σχηματισμό του επιθυμητού κυματοειδούς πρότυπου κίνησης από τις ακτίνες. Η αντιστάθμιση των αποκλίσεων αυτών γίνεται μέσω διαδικασίας βαθμονόμησης, από την οποία προκύπτει για κάθε σερβοκινητήρα μια γραμμική σχέση για το σήμα ελέγχου  $y = \alpha x + \beta$  όπου  $\alpha$  είναι ο συντελεστής μετατροπής από μοίρες σε στάθμες PWM και  $\beta$  είναι γωνιακή απόκλιση του κέντρου συμμετρίας της ταλάντωσης.



Σχήμα 3.21: Η διάταξη βαθμονόμησης των σερβοκινητήρων.

Η διαδικασία βαθμονόμησης περιλαμβάνει την τοποθέτηση του σερβοκινητήρα σε ειδική διάταξη (Σχήμα 3.21), ενώ μέσω κατάλληλου firmware στον μικροελεγκτή και μοντέλου Simulink του Matlab, γίνεται κίνηση της ακτίνας σε συγκεκριμένες θέσεις και καταγραφή της τιμής PWM

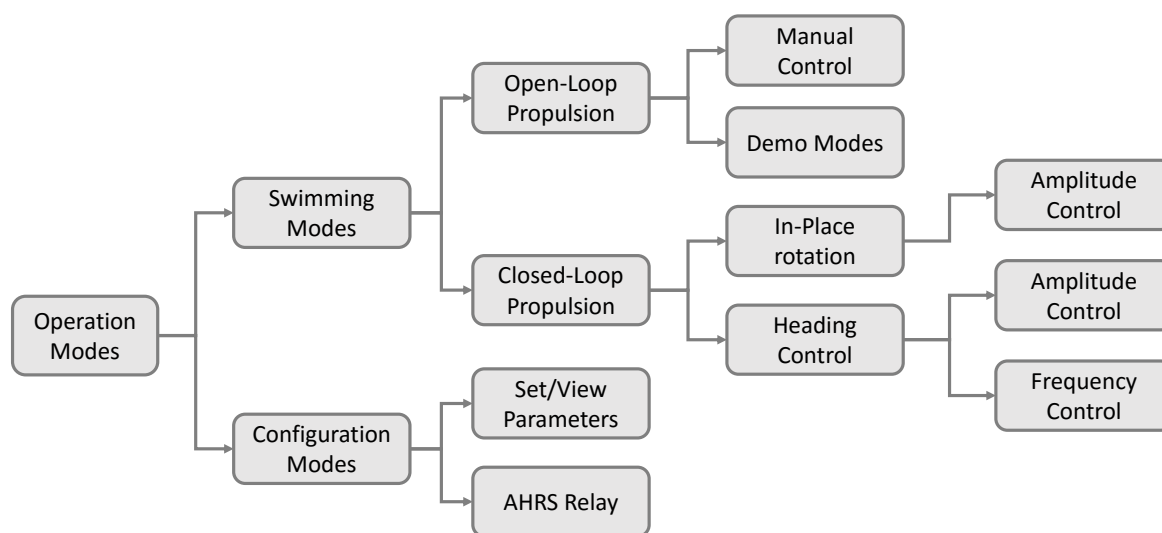


Σχήμα 3.22: Ενδεικτικά αποτελέσματα της βαθμονόμησης των κινητήρων #1 και #2.

που αντιστοιχεί στην κάθε θέση. Μετά τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων από όλους τους σερβοκινητήρες, προκύπτουν οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  όλων (κατά προσέγγιση περίπου 10 σταθμες PWM/° και γωνιακή απόκλιση του κέντρου ταλάντωσης κατά 1500 – 1550 στάθμες). Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα της διαδικασίας βαθμονόμησης για δύο σερβοκινητήρες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.22, ενώ παρατίθενται αναλυτικά για όλους τους σερβοκινητήρες στο Παράρτημα Β.3.

### 3.4 Λογισμικό ελέγχου

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο της λειτουργίας και την υλοποίηση των στρατηγικών κίνησης του ρομποτικού πρωτότυπου. Η ανάπτυξη του κώδικα έγινε στο ανοιχτού κώδικα περιβάλλον προγραμματισμού Arduino IDE. Για βελτιστοποίηση της ταχύτητας εκτέλεσης του προγράμματος στον μικροελεγκτή έγινε εκτενής χρήση του μηχανισμού διακοπών (interrupts), επιτυγχάνοντας χρόνο εκτέλεσης του βρόχου ελέγχου στα 10 ms. Μέσω του λογισμικού του μικροελεγκτή γίνεται ενσωμάτωση και των περιφερειακών συστημάτων του σκάφους, όπως αισθητήρια και μονάδες επικοινωνίας, με απώτερο σκοπό την αυτόνομη λειτουργία του ρομποτικού πρωτότυπου.



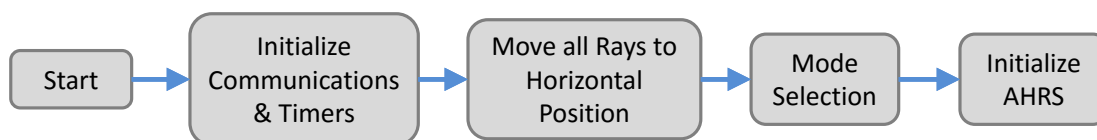
Σχήμα 3.23: Διάγραμμα επιλογής τύπου λειτουργίας.

Το λογισμικό που υλοποιήθηκε παρέχει τη δυνατότητα μιας σειράς από λειτουργίες, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικότερα σε επόμενες υποενότητες. Ειδικότερα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.23, οι δύο βασικές κατηγορίες καταστάσεων λειτουργίας περιλαμβάνουν τις καταστάσεις κίνησης του σκάφους (swimming modes) και τις καταστάσεις ρύθμισης παραμέτρων (configuration modes). Στην πρώτη περίπτωση γίνεται περαιτέρω διαχωρισμός των διαθέσιμων καταστάσεων λειτουργίας του ρομποτικού πρωτότυπου με βάση το σχήμα ελέγχου του, ενώ στη δεύτερη περίπτωση παρέχονται δύο υποκατηγορίες αφενός για ρύθμιση παραμέτρων του ελεγκτή αφετέρου για την μονάδα AHRS. Όλες αυτές οι λειτουργίες είναι διαθέσιμες στο λογισμικό που τρέχει στον μικροελεγκτή και παρέχονται ως υπορουτίνες ενός ενιαίου κώδικα.

Κατά την έναρξη του προγράμματος του μικροελεγκτή εκτελείται ένα σύνολο εντολών για την αρχικοποίηση κάποιων παραμέτρων λειτουργίας του μικροελεγκτή, των σερβοκινητήρων

και των αισθητήρων του οχήματος (Σχήμα 3.24). Πιο συγκεκριμένα, αρχικοποιούνται οι χρονιστές 3 και 4 που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των σημάτων ελέγχου και ο χρονιστής 5 που χρησιμοποιείται για το χρονισμό λειτουργίας του προγράμματος. Στη συνέχεια δίνεται κατάλληλη εντολή στους σερβοκινητήρες για κίνηση των ακτίνων σε οριζόντια θέση.

Επίσης, γίνεται έναρξη σειριακής επικοινωνίας για ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του μικροελεγκτή και της μονάδας AHRS αλλά και μεταξύ του μικροελεγκτή και των εξωτερικών συσκευών που συνδέονται μέσω bluetooth ή USB.



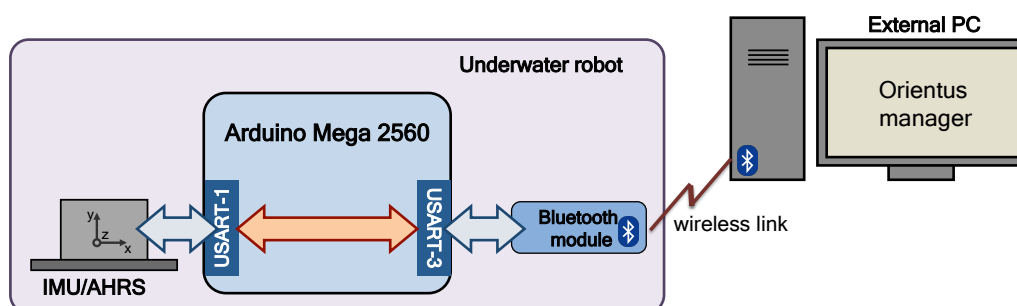
Σχήμα 3.24: Διάγραμμα ρουτίνας ρυθμίσεων Arduino.

Επιπρόσθετα, δηλώνονται όλες οι θύρες που χρησιμοποιούνται σαν έξοδοι για αποστολή σημάτων προς τους σερβοκινητήρες και τα ενδεικτικά LED και είσοδοι για λήψη πληροφορίας από τον ανιχνευτή εισροής υδάτων. Μετά την αρχικοποίηση των παραμέτρων, ο μικροελεγκτής εγκλωβίζεται σε ατέρμονα βρόχο, όπου αναμένει την επιλογή του mode λειτουργίας του.

Τέλος, στην περίπτωση επιλογής κάποιου από τα modes κίνησης του σκάφους, πραγματοποιείται αρχικοποίηση της μονάδας AHRS όσον αφορά στον προσανατολισμό του σκάφους στο επίπεδο  $xy$ . Κατά τη διαδικασία αυτή, ο μικροελεγκτής λαμβάνει μετρήσεις από τη μονάδα AHRS για 5 s και υπολογίζει τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση μεταξύ τους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η τυπική απόκλιση να πέσει κάτω από το προεπιλεγμένο όριο των  $1.6^\circ$ . Αυτή η διαδικασία αποσκοπεί στην επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας στη μέτρηση του προσανατολισμού, μέσω της μείωσης τυχόν σφαλμάτων που προκαλούνται από ολίσθηση της μέτρησης (drift).

### 3.4.1 Καταστάσεις ρύθμισης παραμέτρων

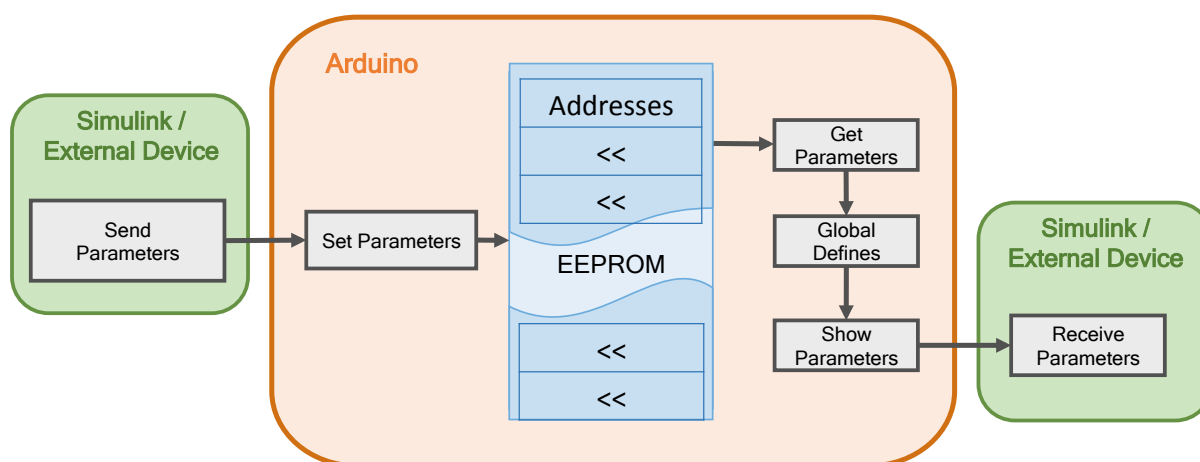
Η μονάδα AHRS συνοδεύεται από εφαρμογή με την ονομασία Orientus Manager, η οποία τρέχει σε Η/Υ και παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισής της μέσω σειριακής επικοινωνίας. Στη λειτουργία "AHRS Relay" (Σχήμα 3.23), χρησιμοποιείται η δυνατότητα αυτή για τη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας της μονάδας αλλά και για την απεικόνιση των μετρήσεων που λαμβάνονται μέσω του γραφικού περιβάλλοντος της εφαρμογής (Σχήμα 3.25). Επίσης, ανά



Σχήμα 3.25: Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας αναμετάδοσης δεδομένων της μονάδας AHRS.

τακτά χρονικά διαστήματα είναι απαραίτητο να εκτελείται διαδικασία βαθμονόμησης για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων μέτρησης των μαγνητόμετρων που διαθέτει η μονάδα. Για τη διευκόλυνση εκτέλεσης της διαδικασίας αυτής, η επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και του εξωτερικού Η/Υ που τρέχει την εφαρμογή γίνεται ασύρματα μέσω ζεύξης bluetooth.

Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης πειραμάτων προέκυψε η ανάγκη για εύκολη μεταβολή κάποιων παραμέτρων λειτουργίας του ρομποτικού πρωτότυπου, χωρίς να είναι απαραίτητη η ενούρματη σύνδεσή του στον εξωτερικό Η/Υ και αλλαγή του firmware του μικροελεγκτή του. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα, δίνεται μέσω της επιλογής κατάλληλου mode λειτουργίας ("Set/View Parameters" στο Σχήμα 3.23), η δυνατότητα εγγραφής αυτών των παραμέτρων στη μνήμη EEPROM του μικροελεγκτή (Σχήμα 3.26). Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα για αποστολή των παραμέτρων που είναι αποθηκευμένες στη μνήμη EEPROM σειριακά από τον μικροελεγκτή στον εξωτερικό Η/Υ, για έλεγχο των αριθμητικών τιμών τους.



Σχήμα 3.26: Σχηματικό διάγραμμα των λειτουργιών ρύθμισης-μεταβολής παραμέτρων.

### 3.4.2 Καταστάσεις λειτουργίας πρόωσης ανοιχτού βρόχου

Η πιο απλή από τις καταστάσεις λειτουργίας που υλοποιήθηκαν για κίνηση του σκάφους περιλαμβάνει την παραγωγή των σημάτων ελέγχου μέσω ελεγκτή ανοιχτού βρόχου, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 4.3.1. Στο λογισμικό του μικροελεγκτή είναι διαθέσιμες διάφορες επιλογές για τη λειτουργία αυτή, με τις κυριότερες να περιλαμβάνουν ρύθμιση των κινηματικών παραμέτρων των πτερυγίων μέσω εντολών που μπορεί να δεχτεί ο μικροελεγκτής από κάποια εξωτερική συσκευή, ή εσωτερικά από προεπιλεγμένες τιμές που έχουν οριστεί μέσα στο πρόγραμμα.

Στην πρώτη περίπτωση ("Manual Control" στο Σχήμα 3.23), για την παραγωγή του προφίλ κίνησης των πτερυγίων χρησιμοποιούνται σεντ προεπιλεγμένων κινηματικών παραμέτρων οι οποίες μπορούν να μεταβληθούν από το χρήστη με την αποστολή κατάλληλων εντολών μέσω ασύρματης ζεύξης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται ο τηλεχειρισμός του σκάφους από εξωτερικές συσκευές που διαθέτουν μονάδα επικοινωνίας bluetooth.

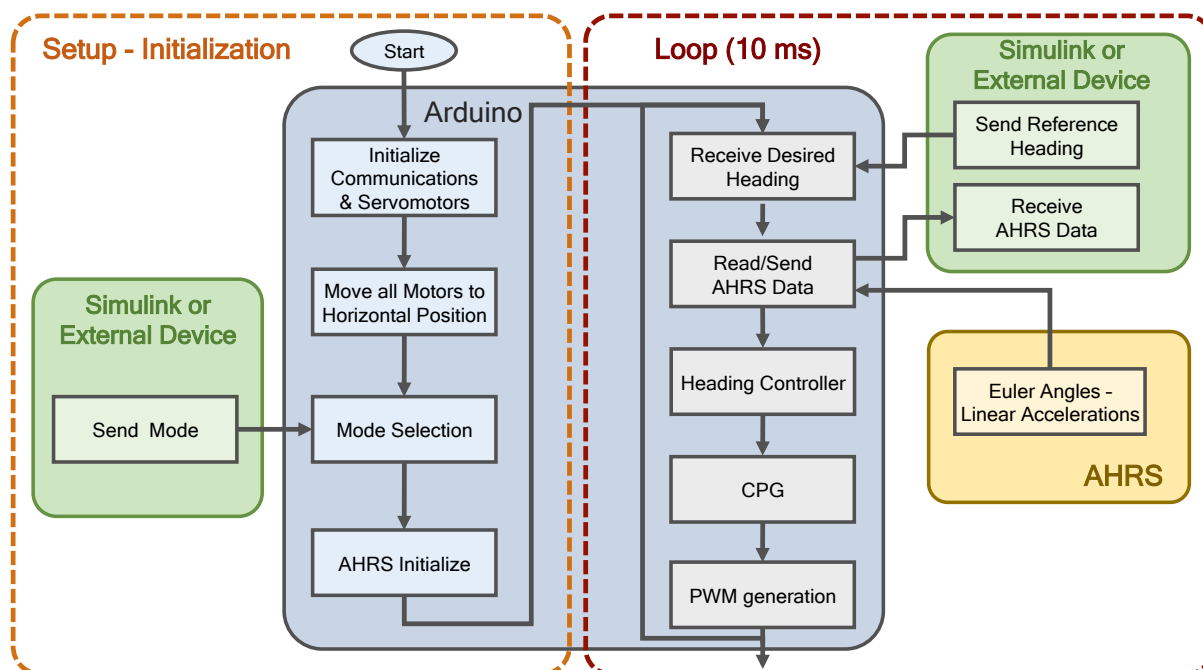
Στη δεύτερη περίπτωση ("Demo Modes" στο Σχήμα 3.23) ο χειριστής δεν έχει πρόσβαση για αλλαγή των κινηματικών παραμέτρων των πτερυγίων, οι οποίες μεταβάλλονται με βάση το χρόνο και με χρήση προεπιλεγμένων τιμών που έχουν οριστεί στο πρόγραμμα του μικροελεγκτή. Αυτή η δεύτερη υλοποίηση εξυπηρετεί στην εκτέλεση πειραμάτων κυρίως για σύγκριση της

κίνησης του σκάφους με αυτή που προκύπτει από τις καταστάσεις με έλεγχο κλειστού βρόχου. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για επίδειξη (demo) της επίδρασης της μεταβολής των παραμέτρων στην παραγωγή του οδεύοντος κύματος.

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης όλων των παραπάνω λειτουργιών, μέσω του μικροελεγκτή αποστέλλονται ασύρματα τα δεδομένα τηλεμετρίας του σκάφους που λαμβάνονται από τη μονάδα AHRS. Ο εξωτερικός Η/Υ λαμβάνει μέσω της ασύρματης ζεύξης αυτά τα δεδομένα, τα οποία, μέσω κατάλληλου μοντέλου Simulink, χρησιμοποιούνται για οπτικοποίηση των χαρακτηριστικών κίνησης του σκάφους αλλά και για αξιολόγηση της επίδρασης της μεταβολής των κινηματικών παραμέτρων. Επίσης, η καταγραφή δεδομένων από πειράματα με έλεγχο ανοιχτού βρόχου επιτρέπει τη σύγκριση της ποιότητας κίνησης του σκάφους με αυτή που προκύπτει από τις υλοποιήσεις με έλεγχο κλειστού βρόχου.

### 3.4.3 Καταστάσεις λειτουργίας πρόωσης με έλεγχο κλειστού βρόχου

Έχουν υλοποιηθεί δύο βασικές μέθοδοι κίνησης με έλεγχο κλειστού βρόχου, εκ των οποίων η πρώτη περιλαμβάνει κίνηση του σκάφους με έλεγχο του προσανατολισμού του, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει επιτόπου περιστροφή του σκάφους για έλεγχο του προσανατολισμού του. Και στις δύο περιπτώσεις ο έλεγχος αφορά στον προσανατολισμό του σκάφους στο επίπεδο  $x - y$ . Η πρώτη μέθοδος μπορεί να χωριστεί σε δύο υποπεριπτώσεις, όπου στην πρώτη γίνεται δυναμική μεταβολή του πλάτους ταλάντωσης των ακτίνων ("Heading Control > Amplitude Control" στο Σχήμα 3.23), ενώ στη δεύτερη γίνεται δυναμική μεταβολή της συχνότητας ταλάντωσης των ακτίνων ("Heading Control > Frequency Control" στο Σχήμα 3.23). Στην δεύτερη μέθοδο γίνεται δυναμική μεταβολή του πλάτους ταλάντωσης των ακτίνων των δύο περυγίων ανάλογα με τη γωνιακή απόκλιση της τρέχουσας γωνιακής θέσης του σκάφους ως προς μια τελική θέση ("In-Place rotation > Amplitude Control" στο Σχήμα 3.23).



Σχήμα 3.27: Διάγραμμα ροής υλοποίησης στο λογισμικό έλεγχου του μικροελεγκτή των λειτουργιών πρόωσης με έλεγχο κλειστού βρόχου.

Στο Σχήμα 3.27 φαίνεται ένα διάγραμμα ροής που περιγράφει τις διαδικασίες που εκτελούνται στον μικροελεγκτή κατά τη διάρκεια λειτουργίας του με έλεγχο κλειστού βρόχου.

Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας του ρομποτικού πρωτότυπου, τα δεδομένα που αποστέλλει η μονάδα AHRS χρησιμοποιούνται από τον μικροελεγκτή σαν ανάδραση στον ελεγκτή. Από το πλήθος δεδομένων που αποστέλλει η μονάδα AHRS, για τον έλεγχο προσανατολισμού του σκάφους στο επίπεδο χρησιμοποιείται μόνο η μέτρηση της γωνίας 'yaw', ενώ γίνεται ασύρματη αναμετάδοση όλων των δεδομένων μέσω της μονάδας bluetooth για περαιτέρω καταγραφή και επεξεργασία τους από τον εξωτερικό Η/Υ.

Η υλοποίηση των παραπάνω στρατηγικών αλλά και η πειραματική αποτίμηση του ρομποτικού πρωτότυπου παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

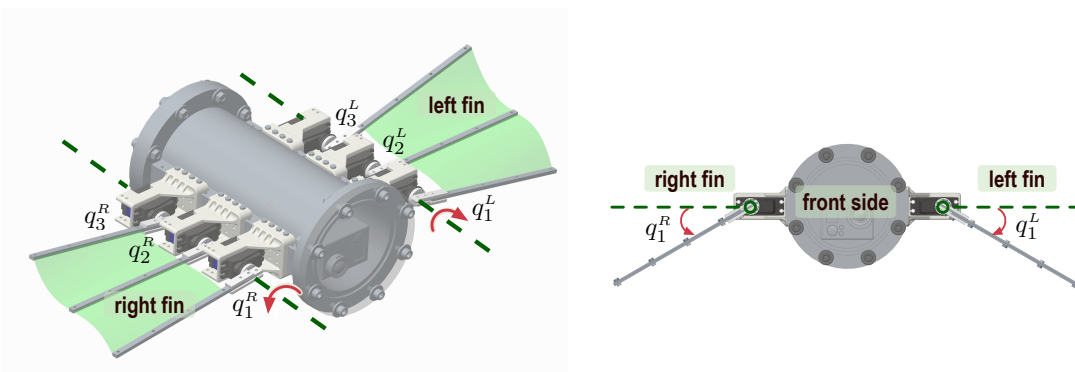
## Κεφάλαιο 4

# Έλεγχος Κίνησης του Υποβρύχιου Ρομπότ SQUIDBOT-mini

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο έλεγχος κίνησης του υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος SQUIDBOT-mini. Όσον αφορά στον έλεγχο χαμηλού επιπέδου, παρουσιάζεται η μέθοδος παραγωγής του οδεύοντος κύματος για τα δύο πτερύγια, ενώ για τον έλεγχο υψηλότερου επιπέδου, παρουσιάζονται οι στρατηγικές ελέγχου κίνησης του ρομποτικού πρωτότυπου στο επίπεδο και η πειραματική αποτίμηση αυτών. Ειδικότερα, για την παραγωγή των κυματώσεων των πτερυγίων χρησιμοποιούνται δομές CPG, ενώ για τον έλεγχο του προσανατολισμού του σκάφους στο επίπεδο έγινε χρήση της δυνατότητας διανυσματικού ελέγχου της παραγόμενης ώσης.

### 4.1 Παραγωγή του οδεύοντος κύματος

Όμοια με τα πτερύγια που περιγράφονται στο δεύτερο κεφάλαιο, για την παραγωγή του κυματοειδούς προφίλ κίνησης των ακτίνων του ρομποτικού πρωτότυπου χρησιμοποιείται δομή CPG. Επειδή για τον έλεγχο του προσανατολισμού του σκάφους είναι απαραίτητη η ανεξάρτητη ρύθμιση των κινηματικών παραμέτρων των δύο πτερυγίων, υλοποιήθηκαν δύο τέτοιες δομές, οι οποίες επιτρέπουν την παραγωγή από τα πτερύγια δύο διανυσμάτων ώσης με ανεξάρτητη ρύθμιση της κατεύθυνσης και μέτρου τους.



Σχήμα 4.1: Ορισμός των μεταβλητών θέσης των ακτίνων των δύο πτερυγίων του ρομποτικού πρωτότυπου.

Η συγκεκριμένη δομή του CPG που υλοποιήθηκε για τον έλεγχο κίνησης του κάθε πτερυ-



γίου βασίζεται σε απλοποιημένη έκδοση της δομής που περιγράφεται στην εργασία [57] και απαρτίζεται από 3 γειτονικά διασυνδεδεμένους γραμμικούς ταλαντωτές, καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε μία από τις ακτίνες του περυγίου. Ειδικότερα, η επιθυμητή τροχιά της  $i$ -στής άρθρωσης του δεξιού περυγίου,  $q_i^R$  (βλ. Σχήμα 4.1), παρέχεται από την έξοδο του αντίστοιχου ταλαντωτή, ως:

$$q_i^R = a_i^R \sin(\xi_i^R) + \chi_i^R, \quad i = 1..3, \quad (4.1)$$

όπου οι μεταβλητές κατάστασης για το πλάτος  $a_i^R$ , την κλίση  $\chi_i^R$ , και τη φάση  $\xi_i^R$  του  $i$ -στού ταλαντωτή προκύπτουν από τις παρακάτω δυναμικές εξισώσεις:

$$\ddot{a}_i^R = k_a^2 (A_R - a_i^R) - 2k_a \dot{a}_i^R \quad (4.2)$$

$$\ddot{\chi}_i^R = k_\chi^2 (X_R - \chi_i^R) - 2k_\chi \dot{\chi}_i^R, \quad (4.3)$$

$$\ddot{\xi}_i^R = 4c(2\pi f_R - \dot{\xi}_i^R) - c^2 \sum_{j=1, j \neq i}^3 (\xi_i^R - \xi_j^R - (j-i)\phi_R) \quad (4.4)$$

Στις Σχέσεις (4.2), (4.3) και (4.4), οι τιμές των  $A_R$ ,  $X_R$ , και  $f_R$  αντιπροσωπεύουν το τελικό πλάτος, την τελική κλίση, και την τελική συχνότητα για την έξοδο όλων των ταλαντωτών του δεξιού περυγίου. Οι παράμετροι  $k_a$  και  $k_\chi$  καθορίζουν το ρυθμό της ασυμπτωτικής σύγκλισης των μεταβλητών  $a_i^R$  και  $\chi_i^R$  στις τελικές τους τιμές  $A_R$  και  $X_R$ , αντίστοιχα. Ο όρος με το άθροισμα, στο δεξί μέρος της Σχέσης (4.4), περιγράφει το σχήμα της εσωτερικής διασύνδεσης του CPG, όπου η παράμετρος  $\phi_R$  αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης μεταξύ της εξόδου δύο διαδοχικών ταλαντωτών, στη μόνιμη κατάσταση, ενώ το κέρδος  $c$  καθορίζει την ταχύτητα σύγκλισης σε αυτή. Για  $\phi_R > 0$  η φορά μετάδοσης του οδεύοντος κύματος είναι από την πρώτη ( $i = 1$ ) προς την τελευταία ( $i = 3$ ) ακτίνα του περυγίου, δηλαδή προς το οπίσθιο μέρος του ρομπότ (Σχήμα 4.1), οπότε και η παραγόμενη ώση κατά μήκος του διαμήκη άξονα είναι προς την εμπρόσθια κατεύθυνση. Το αντίστροφο ισχύει όταν  $\phi_R < 0$ . Σημειώνεται επίσης ότι για  $\phi_R = 0$  οι κυματώσεις δεν παράγουν ώση κατά τον διαμήκη άξονα του οχήματος [56].

Κατ' αντίστοιχο τρόπο, η δυναμική των μεταβλητών κατάστασης για το CPG του αριστερού περυγίου περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$\ddot{a}_i^L = k_a^2 (A_L - a_i^L) - 2k_a \dot{a}_i^L \quad (4.5)$$

$$\ddot{\chi}_i^L = k_\chi^2 (X_L - \chi_i^L) - 2k_\chi \dot{\chi}_i^L, \quad (4.6)$$

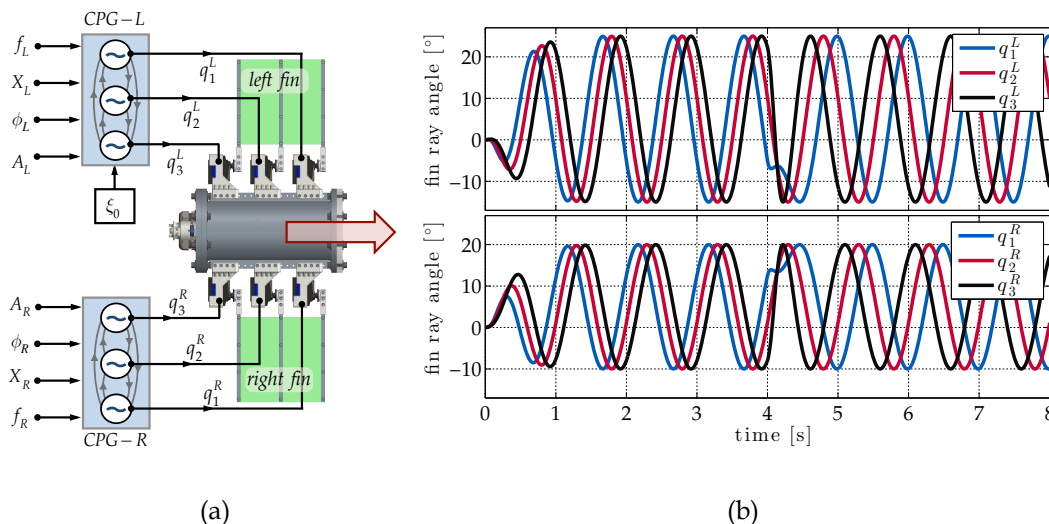
$$\ddot{\xi}_i^L = 4c(2\pi f_L - \dot{\xi}_i^L) - c^2 \sum_{j=1, j \neq i}^3 (\xi_i^L - \xi_j^L - (j-i)\phi_L), \quad (4.7)$$

ενώ οι γωνιακές τροχιές  $q_i^L$  των ακτίνων του αριστερού περυγίου (βλ. Σχήμα 4.1) υπολογίζο-

νται, στην περίπτωση αυτή, ως:

$$q_i^L = a_i^L \sin(\xi_i^L + \xi_0) + \chi_i^L, \quad i = 1..3, \quad (4.8)$$

Σημειώνεται ότι η παράμετρος  $\xi_0$  που εμφανίζεται στη Σχέση (4.8) αντιστοιχεί στη σχετική φάση κυμάτωσης των δύο πτερυγίων. Επίσης, για τη διατήρηση της συμμετρίας στην κίνηση των πτερυγίων, στο λογισμικό ελέγχου έχει ενσωματωθεί αντιστροφή του πρόσημου της επιθυμητής θέσης του δεξιού πτερυγίου. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι η θετική φορά περιστροφής των ακτίνων και των δύο πτερυγίων θα είναι προς τα κάτω, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1a.



Σχήμα 4.2: (a) Σχηματική απεικόνιση της χρήσης των CPG για τη δημιουργία της κυμάτωσης των δύο πτερυγίων του οχήματος. (b) Ενδεικτικά αποτελέσματα της εξόδου των δύο CPGs.

Στο Σχήμα 4.2a απεικονίζεται διαγραμματικά η δημιουργία των κυματώσεων για τα δύο πτερύγια του ρομπότ, μέσω των CPG. Τα αποτελέσματα από μια ενδεικτική προσομοίωση των δύο CPG παρατίθενται στο Σχήμα 4.2b. Όπως φαίνεται σε αυτό, οι επιθυμητές τροχιές για τις αρθρώσεις των ακτίνων των πτερυγίων, ξεκινώντας από μηδενική τιμή (δηλ. όλες οι ακτίνες στην οριζόντια θέση), συγκλίνουν ομαλά στην πρότυπη κίνηση του οδεύοντος κύματος, με παραμέτρους  $\{A_R = 15^\circ, X_R = 5^\circ, f_R = 1 \text{ Hz}, \phi_R = 45^\circ\}$  για το δεξιό πτερύγιο, και  $\{A_L = 20^\circ, X_L = 5^\circ, f_L = 1 \text{ Hz}, \phi_L = 45^\circ\}$  για το αριστερό πτερύγιο. Η σχετική φάση της κυμάτωσης των δύο πτερυγίων έχει καθοριστεί ως  $\xi_0 = 180^\circ$ , ενώ οι λοιπές παράμετροι ως  $k_a = k_\chi = 5^\circ/s$  και  $c = 6$ . Στα γραφήματα αυτά αναδεικνύεται και η ομαλή μετάβαση της εξόδου του CPG όταν παρουσιάζονται μεταβολές στις επιθυμητές παραμέτρους της υλοποιούμενης κυμάτωσης. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αυτό φαίνεται όταν, τη χρονική στιγμή  $t = 4 \text{ s}$ , η επιθυμητή τιμή της διαφοράς φάσης στην κίνηση των ακτίνων και των δύο πτερυγίων αλλάζει σε  $\phi_R = \phi_L = -70^\circ$ .

## 4.2 Πειραματική μεθοδολογία

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε αλλά και κάποια επιμέρους περιφερειακά εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής αποτίμησης της κίνησης του ρομποτικού πρωτότυπου. Επίσης παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι, αφενός η κατα-

νόηση της επίδρασης της μεταβολής των κινηματικών παραμέτρων στην ποιότητα κίνησης του σκάφους, αφετέρου η αξιολόγηση των διάφορων στρατηγικών ελέγχου που υλοποιήθηκαν.

Η πειραματική διερεύνηση του ρομποτικού πρωτότυπου πραγματοποιήθηκε, στο μεγαλύτερο μέρος της, σε ειδική δεξαμενή δοκιμών, διαστάσεων  $210 \times 90 \times 80$  cm (Παράρτημα ??) που παρέχεται στο χώρο του εργαστηρίου Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης. Για την καταγραφή των δεδομένων τηλεμετρίας που αναμεταδίδει ο μικροελεγκτής του σκάφους χρησιμοποιήθηκε Η/Υ εξοπλισμένος με μονάδα RS232 to bluetooth WCS-232 της εταιρίας SystemBase. Στον υπολογιστή τρέχει κατάλληλο μοντέλο Simulink του Matlab σε περιβάλλον Real Time Windows Target μέσω του οποίου γίνεται η συλλογή, γραφική αναπαράσταση και αποθήκευση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Για την παραμετροποίηση της πειραματικής διαδικασίας και τη συστηματική καταγραφή και αξιολόγηση των πειραματικών δεδομένων εκτελούνται ειδικά script σε περιβάλλον Matlab.

Ένα πρόβλημα που ανέκυψε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, ήταν οι ακούσιες διακοπές της ασύρματης ζεύξης που παρατηρούνται σε περίπτωση βύθισης του σκάφους κάτω από ένα βάθος. Αυτές συμβαίνουν εξαιτίας της υψηλής συχνότητας μετάδοσης των δεδομένων μέσω bluetooth (2.4 GHz) η οποία μειώνει δραματικά τη διεισδυτικότητα του σήματος στο νερό. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο το σκάφος έπρεπε να λειτουργεί ισορροπώντας περίπου στα 15 cm από την επιφάνεια του νερού. Επίσης, για την αποδοτικότερη παραγωγή προωστικών δυνάμεων θα πρέπει η κίνηση των ακτίνων να γίνεται εξ ολοκλήρου μέσα στο νερό. Δεδομένου ότι η κλίση ταλάντωσης των ακτίνων στις περισσότερες περιπτώσεις έχει προκαθοριστεί στις  $15 - 30^\circ$ , κρίνεται ότι η βύθιση του σκάφους στα 15 cm είναι επαρκής για να υπάρχει πλήρης κάλυψη των ακτίνων καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης. Για την ισορροπία του σκάφους σε συγκεκριμένο βάθος έγινε ρύθμιση της πλευστότητάς του, μέσω μεταβολής της μάζας του, με την προσθήκη μαζών εσωτερικά και εξωτερικά του κύτους αλλά και πλωτήρων από φελιζόλ στην επάνω πλευρά του.

Για τη διευκόλυνση της μεταβολής των προς διερεύνηση παραμέτρων έγιναν κατάλληλες τροποποιήσεις στο λογισμικό που τρέχει στον μικροελεγκτή, έτσι ώστε να μπορεί να δέχεται τις εντολές μεταβολής εξωτερικά από τον Η/Υ μέσω της ασύρματης ζεύξης.

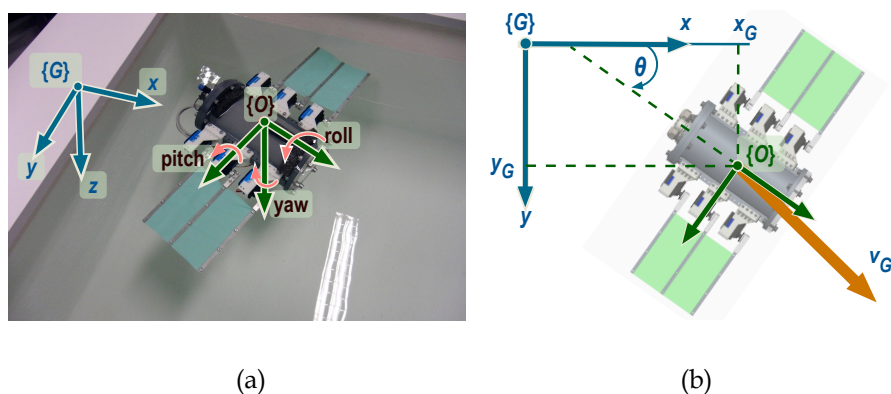
Τέλος, επάνω από τη δεξαμενή δοκιμών έχει τοποθετηθεί ψηφιακή βιντεοκάμερα, με κατάλληλο προσανατολισμό και απόσταση από τη δεξαμενή έτσι ώστε στο πλάνο να είναι ορατή όλη η δεξαμενή, με τη μικρότερη δυνατή παραμόρφωση της εικόνας. Η βιντεοκάμερα καταγράφει βίντεο  $1280 \times 720$  pixels στα 30 fps. Μετά το πέρας του πειράματος, γίνεται επεξεργασία του βίντεο και περαιτέρω ανάλυση της κίνησης του σκάφους. Για τη διευκόλυνση του εντοπισμού της θέσης του σκάφους στο επίπεδο τοποθετήθηκε στο πάνω μέρος του ένας κόκκινος marker.

Για κάθε πείραμα, το σκάφος σταθεροποιείται στην αρχική του θέση, όπου γίνεται η επιλογή της κατάστασης λειτουργίας όπως αυτή περιγράφεται στην Ενότητα 3.4. Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας, η επιλογή της κατάστασης λειτουργίας γίνεται από προκαθορισμένη ρύθμιση μέσω του μοντέλου Simulink. Ταυτόχρονα εκκινείται και η εγγραφή του βίντεο από την εξωτερική κάμερα.

Στη συνέχεια, μετά την επιτυχημένη αρχικοποίηση της μονάδας AHRS, γίνεται εκκίνηση του πειράματος, η διάρκεια του οποίου εξαρτάται από το χρόνο τερματισμού της λειτουργίας του μοντέλου Simulink, οπότε και αποστέλλεται εντολή που προκαλεί reset στον μικροελεγκτή. Στην περίπτωση των πειραμάτων που εκτελούνται με βάση το χρόνο, η λειτουργία του

ρομποτικού πρωτότυπου τερματίζεται από τον μικροελεγκτή αυτόματα. Μεταξύ διαδοχικών πειραμάτων πραγματοποιείται παύση έως ότου να επανέλθει το νερό της δεξαμενής σε ηρεμία. Από κάθε πείραμα προκύπτουν δύο αρχεία, ένα .mat αρχείο που περιλαμβάνει τα δεδομένα από το Simulink και ένα .avi που περιέχει το βίντεο του πειράματος.

Από το πρώτο εξ αυτών, χρησιμοποιείται το σετ δεδομένων που αφορά στον προσανατολισμό του σκάφους στο χώρο (γωνίες Euler). Όσον αφορά στη γωνία εκτροπής (yaw), ενώ για τον έλεγχο του προσανατολισμού του σκάφους χρησιμοποιείται η αρχικοποιημένη τιμή της γωνίας, η οποία προκύπτει από τη διαδικασία που περιγράφεται στην τελευταία παράγραφο της Ενότητας 3.4, η τιμή που επιστρέφεται στον Η/Υ είναι αυτούσια η τιμή που αποστέλλει η μονάδα AHRS χωρίς να έχει υποστεί επεξεργασία. Κατά την ανάλυση των δεδομένων γίνεται αναγωγή της γωνίας yaw του πλαισίου συντεταγμένων της μονάδας AHRS (πλαίσιο  $\{O\}$  στο Σχήμα 4.3) σε αδρανειακό πλαίσιο συντεταγμένων (πλαίσιο  $\{G\}$  στο Σχήμα 4.3) οι άξονες του οποίου είναι παράλληλοι με τις πλευρές της δεξαμενής δοκιμών και η θέση του είναι στο μέσο της αριστερής πλευράς της.



Σχήμα 4.3: (a) Ορισμός του πλαισίου αναφοράς για τις πειραματικές μετρήσεις. (b) Ορισμός του διανύσματος της ταχύτητας  $v_G$  και της κατεύθυνσης  $\theta$  για κίνηση του υποβρύχιου οχήματος στο  $x - y$  επίπεδο.

Από το αρχείο του βίντεο, μέσω κατάλληλου αλγόριθμου σε script του Matlab, σε κάθε καρέ του βίντεο εντοπίζεται ο κόκκινος marker και υπολογίζονται οι συντεταγμένες της θέσης του  $\{x_G, y_G\}$  στο επίπεδο. Ακολούθως, το μέτρο της ταχύτητας κίνησης του οχήματος  $v_G$  (Σχήμα 4.3b) υπολογίζεται από τη σχέση:

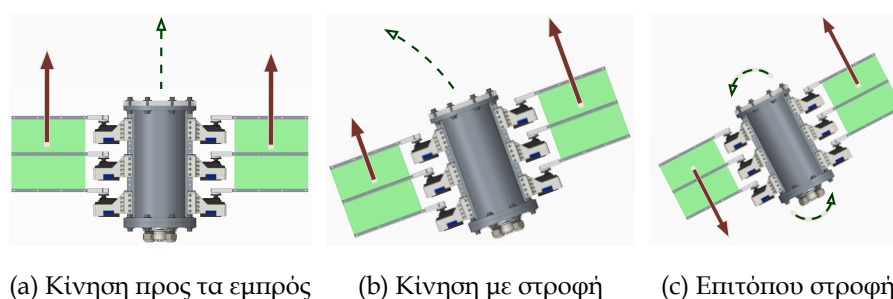
$$v_G = \sqrt{\dot{x}_G^2 + \dot{y}_G^2}, \quad (4.9)$$

όπου οι ταχύτητες  $\dot{x}_G, \dot{y}_G$  προκύπτουν μέσω αριθμητικής διαφοράρισης των αντίστοιχων χρονοσειρών της τροχιάς του οχήματος στο επίπεδο. Διευκρινίζεται ότι η προσέγγιση αυτή ενέχει κάποιο σφάλμα, καθώς η κίνηση του ρομπότ δεν περιορίζεται αυστηρώς στο  $x - y$  επίπεδο, όπως φαίνεται και από τις μετρήσεις του συστήματος AHRS που λαμβάνονταν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Η τελική ταχύτητα του οχήματος για κάθε πείραμα εκτιμάται λαμβάνοντας το μέσο όρο της  $v_G(t)$  για το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στις 4 τελευταίες περιόδους κυμάτωσης των πτερυγίων.

### 4.3 Σχεδίαση και αποτίμηση στρατηγικών ελέγχου κίνησης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι στρατηγικές ελέγχου κίνησης που υλοποιήθηκαν για τον έλεγχο κίνησης του σκάφους στο επίπεδο  $x - y$ . Επίσης, παρουσιάζονται τα κύρια απο-

τελέσματα από την πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στην Ενότητα 4.2. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η απόκριση του συστήματος σε λειτουργία πρόωσης με έλεγχο ανοιχτού βρόχου, αλλά και οι στρατηγικές πρόωσης και επιτόπιας περιστροφής με έλεγχο κλειστού βρόχου του προσανατολισμού του οχήματος στο επίπεδο κίνησης, ενώ διερευνάται και η επίδραση της μεμονωμένης μεταβολής των κινηματικών παραμέτρων στην κίνηση του σκάφους.



(a) Κίνηση προς τα εμπρός (b) Κίνηση με στροφή (c) Επιτόπου στροφή

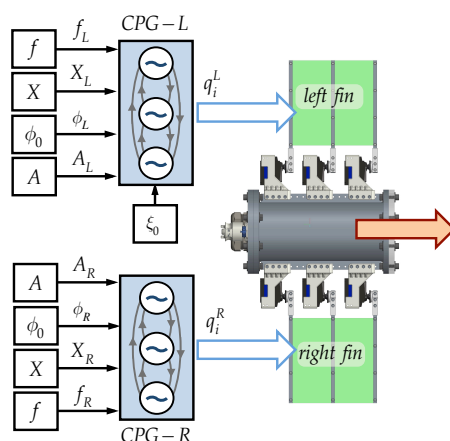
Σχήμα 4.4: Αρχές διαφορικής κίνησης του πρωτοτύπου. Τα κόκκινα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση της ώσης που παράγεται από κάθε πτερύγιο.

Όπως περιγράφεται σε προηγούμενες ενότητες, τα κυματοειδή πρότυπα κίνησης των πτερυγίων επιτυγχάνονται μέσω συντονισμένης κίνησης των ακτίνων που τα αποτελούν, με χρήση δύο αυτόνομων συστημάτων CPG. Η κομμάτωση του κάθε πτερυγίου, και κατά συνέπεια η κίνηση του σκάφους, επηρεάζεται από τις μεταβολές στις κινηματικές παραμέτρους των δύο CPG, οι οποίες περιλαμβάνουν ένα σετ επιθυμητού πλάτους, συχνότητας, διαφοράς φάσης και κλίσης ταλάντωσης για το δεξιό πτερύγιο  $\{A_R, f_R, \phi_R, X_R\}$ , ένα αντίστοιχο σετ για το αριστερό  $\{A_L, f_L, \phi_L, X_L\}$ , αλλά και τη διαφορά φάσης  $\xi_0$  μεταξύ των δύο πτερυγίων.

Όμοια με τα οχήματα εδάφους διαφορικής κίνησης, όταν τα δύο πτερύγια παράγουν ίσες ποσότητες ώσης, το ρομπότ θα κινηθεί σε ευθεία γραμμή, με κατεύθυνση αντίθετη από αυτή του παραγόμενου κύματος (Σχήμα 4.4a). Οποιαδήποτε ασυμμετρία στις ταλαντώσεις των πτερυγίων θα συνεπάγεται πρόωση με στροφή του ρομπότ (Σχήμα 4.4b), ενώ η παραγωγή δύναμης πρόωσης από τα δύο πτερύγια ίσου μέτρου αλλά σε αντίθετη κατεύθυνση θα προκαλεί επιτόπια στροφή του ρομπότ (Σχήμα 4.4c). Σε αυτές τις βασικές αρχές κίνησης του σκάφους βασίζονται οι στρατηγικές ελέγχου ανοιχτού και κλειστού βρόχου που υλοποιήθηκαν για τον έλεγχο κίνησης του ρομποτικού πρωτοτύπου στο επίπεδο. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται κάποιες από αυτές.

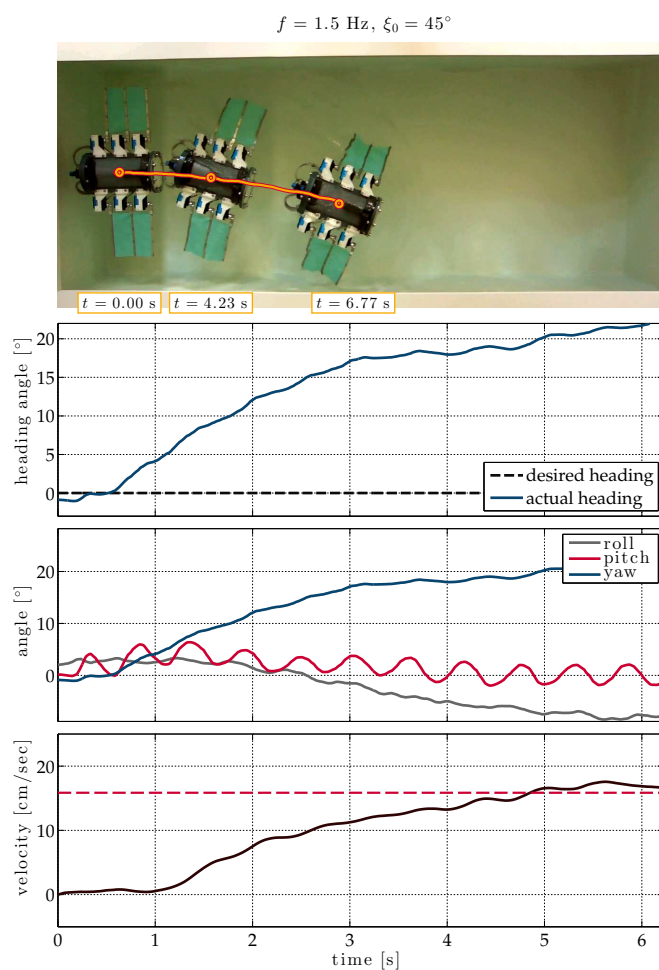
### 4.3.1 Πρόωση σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου

Τα παραπάνω βασικά προφίλ κίνησης μπορούν να επιτευχθούν μέσω απλού σχήματος ελέγχου ανοιχτού βρόχου για τις κινηματικές παραμέτρους της ταλάντωσης των πτερυγίων. Για παράδειγμα, η κίνηση σε ευθεία πορεία κατά μήκος του διαμήκους άξονα του οχήματος, επιτυγχάνεται αν τα διανύσματα της προωστικής δύναμης που παράγονται από τα δύο πτερύγια έχουν ίδιο μέτρο και κατεύθυνση. Αυτό θα ισχύει θεωρητικά εάν τα δύο πτερύγια εκτελούν κίνηση με πανομοιότυπες κινηματικές παραμέτρους, δηλαδή  $f_L = f_R = f$ ,  $X_L = X_R = X$ ,  $\phi_L = \phi_R = \phi_0$ , και  $A_L = A_R = A$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Η ταχύτητα πρόωσης μπορεί να αυξηθεί ή μειωθεί αυξάνοντας ή μειώνοντας το πλάτος ή τη συχνότητα της ταλάντωσης και των δύο πτερυγίων. Με αντίστοιχο τρόπο, μεταβάλλοντας το πλάτος ταλάντωσης του ενός πτερυγίου επιτυγχάνεται μεταβολή του προσανατολισμού του σκάφους.



Σχήμα 4.5: Σχηματικό διάγραμμα του σχήματος πρόωσης του ρομπότ σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου.

Στην πράξη, η προσέγγιση αυτή ενδέχεται να μην είναι αποτελεσματική λόγω της επίδρασης εξωτερικών διαταραχών (όπως θαλάσσια ρεύματα) ή/και των εγγενών διαφορών μεταξύ των επενεργητών που οδηγούν τις ακτίνες ή του διαφορετικού βαθμού τάνυσης της ελαστικής μεμβράνης. Και οι δύο αυτοί παράγοντες είναι πιθανόν να προκαλέσουν απόκλιση από την επιθυμητή πορεία. Ενδεικτικά, στο πείραμα του Σχήματος 4.6, αν και έχουν καθο-



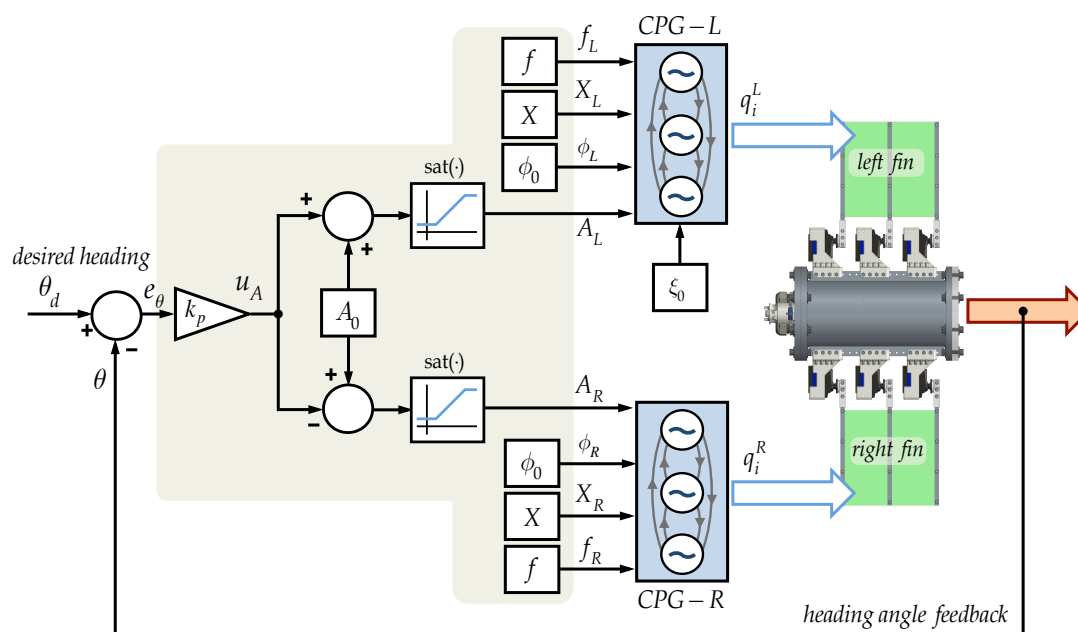
Σχήμα 4.6: Ενδεικτικά αποτελέσματα από τα πειράματα για πρόωση του οχήματος σε λειτουργία ανοιχτού βρόχου.

ριστεί κοινές παράμετροι κυμάτωσης για τα δύο πτερύγια (συγκεκριμένα,  $f_L = f_R = 1.5 \text{ Hz}$ ,  $X_L = X_R = 30^\circ$ ,  $\phi_L = \phi_R = 60^\circ$ , και  $A_L = A_R = 15^\circ$ ), το όχημα δεν ακολουθεί ευθύγραμμη πορεία κατά μήκος της δεξαμενής (με βάση τον αρχικό προσανατολισμό του για  $t = 0 \text{ s}$ ), αλλά εκτελεί καμπύλη τροχιά.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ενδεχόμενο απόκλισης, αλλά και για την εκτέλεση πιο πολύπλοκων στρατηγικών πλοήγησης, αναπτύχθηκαν σχήματα ελέγχου κλειστού βρόχου τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### 4.3.2 Πρόωση με έλεγχο κλειστού βρόχου της πορείας κίνησης

Λόγω της αδυναμίας του ελεγκτή ανοιχτού βρόχου να αντιμετωπίσει τις διαταραχές που προκαλούν απόκλιση του προσανατολισμού, κρίθηκε απαραίτητη η υλοποίηση ελεγκτή κλειστού βρόχου μέσω του οποίου να ρυθμίζονται σε πραγματικό χρόνο οι κινηματικές παράμετροι του κύματος, προκειμένου για τον ακριβή έλεγχο του προσανατολισμού του οχήματος.



Σχήμα 4.7: Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας πρόωσης του οχήματος με έλεγχο κλειστού βρόχου της πορείας κίνησης στο επίπεδο.

Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε στρατηγική ελέγχου κλειστού βρόχου του προσανατολισμού του οχήματος στο επίπεδο σύμφωνα με τα δεδομένα που λαμβάνει ο μικροελεγκτής από την ενσωματωμένη μονάδα AHRS (Σχήμα 4.7). Σε αυτήν γίνεται διαφορική ρύθμιση του πλάτους κυμάτωσης των πτερυγίων, μέσω μεταβολής των παραμέτρων  $A_R$  και  $A_L$ , βάσει της απόκλισης  $e_\theta = \theta_d - \theta$  της τρέχουσας γωνίας προσανατολισμού  $\theta$  του οχήματος σε σχέση με το αδρανειακό πλαίσιο αναφοράς (βλ. Σχήμα 3.17b) από την επιθυμητή της τιμή  $\theta_d$ . Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε απλός αναλογικός ελεγκτής, του οποίου η έξοδος δίνεται από τη σχέση:

$$u_A = k_p e_\theta \quad (4.10)$$

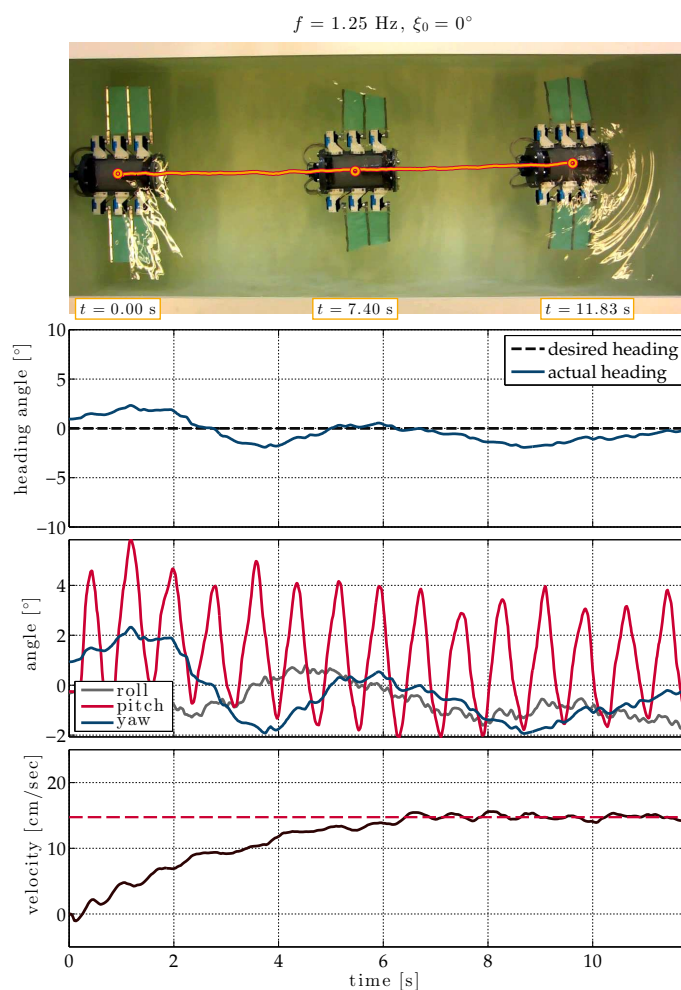
όπου  $k_p$  είναι το κέρδος του, ενώ οι τιμές του επιθυμητού πλάτους των ταλαντώσεων των ακτί-

νων του δεξιού και του αριστερού πτερυγίου υπολογίζονται ως:

$$\text{Αριστερό πτερύγιο: } A_L = \begin{cases} A_{\min} & \text{για } A_0 + u_A \leq A_{\min} \\ A_0 + u_A & \text{για } A_{\min} < A_0 + u_A \leq A_{\max} \\ A_{\max} & \text{για } A_0 + u_A > A_{\max} \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\text{Δεξιό πτερύγιο: } A_R = \begin{cases} A_{\min} & \text{για } A_0 - u_A \leq A_{\min} \\ A_0 - u_A & \text{για } A_{\min} < A_0 - u_A \leq A_{\max} \\ A_{\max} & \text{για } A_0 - u_A > A_{\max} \end{cases} \quad (4.12)$$

όπου  $A_0$  είναι το πλάτος ταλάντωσης των ακτίνων όταν το σφάλμα της γωνίας πορείας του οχήματος είναι  $e_\theta = 0$ , ενώ τα  $A_{\min} \geq 0$  και  $A_{\max} > A_{\min}$  είναι τα κάτω και άνω, αντίστοιχα, όρια τιμών για τα  $A_L$  και  $A_R$ . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7, οι υπόλοιπες κινηματικές παράμετροι λαμβάνουν τις ίδιες τιμές για τα δύο πτερύγια (ισχύει δηλαδή  $f_L = f_R$ ,  $X_L = X_R$  και  $\phi_L = \phi_R$ ).



Σχήμα 4.8: Ενδεικτικά αποτελέσματα από τα πειράματα για πρόωση με έλεγχο κλειστού βρόχου της κατεύθυνσης κίνησης του ρομποτικού πρωτότυπου.

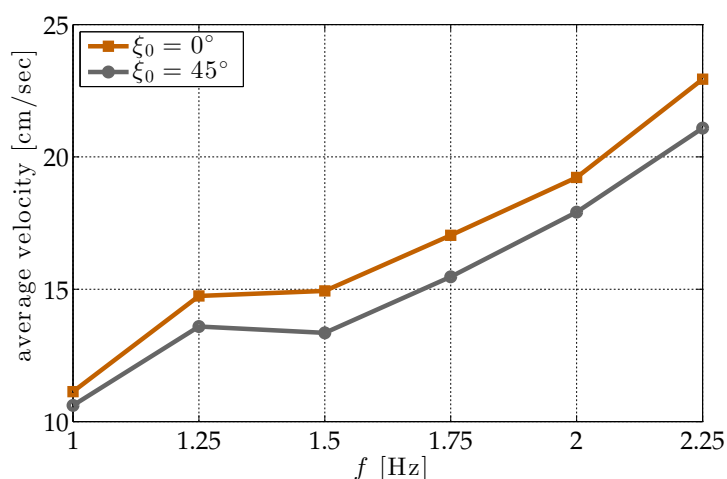


Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από την πειραματική εφαρμογή του εν λόγω σχήματος ελέγχου. Όπως φαίνεται από τα γραφήματα, το όχημα, ξεκινώντας από στάση, διασχίζει κατά μήκος τη δεξαμενή διατηρώντας τον προσανατολισμό του (heading angle) σε ένα εύρος  $\pm 3^\circ$  από την επιθυμητή γωνία πορείας, σε αντίθεση με τη λειτουργία ανοιχτού βρόχου (βλ. Σχήμα 4.5b). Ο ελεγκτής κλειστού βρόχου αντισταθμίζει επιτυχώς την επίδραση των διαταραχών, οι οποίες τείνουν να εκτρέψουν το όχημα από την επιθυμητή πορεία. Σημειώνεται επίσης ότι κατά τη διάρκεια της κίνησης, η γωνία pitch του οχήματος εμφανίζει περιοδικές διακυμάνσεις συχνότητας ίσης με αυτής των κυμάτων των περυγίων. Επίσης, αν και η απόκριση του ελεγκτή όσον αφορά στον προσανατολισμό είναι επαρκής, παρατηρείται εκτός από την αναμενόμενη μετατόπιση του σκάφους κατά το διαμήκη  $x$  άξονα, και μετατόπιση κατά τον εγκάρσιο  $y$ . Αυτό συμβαίνει λόγω των διαταραχών από κύματα σε συνδυασμό με την επίδραση του ελεγκτή στην κίνηση των περυγίων, και έχει ως αποτέλεσμα η τροχιά του σκάφους στο επίπεδο να μην είναι ευθύγραμμη. Δεδομένου ότι δε γίνεται έλεγχος θέσης του σκάφους, αν και αυτή η μετακίνηση είναι ανεπιθύμητη, το φαινόμενο δεν εξετάζεται σε αυτή τη φάση.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων για διερεύνηση της επίδρασης των μεταβολών των κινηματικών παραμέτρων παραγωγής του οδού-οντος κύματος στην κίνηση του σκάφους.

#### 4.3.2.1 Διερεύνηση της επίδρασης της συχνότητας κυμάτωσης

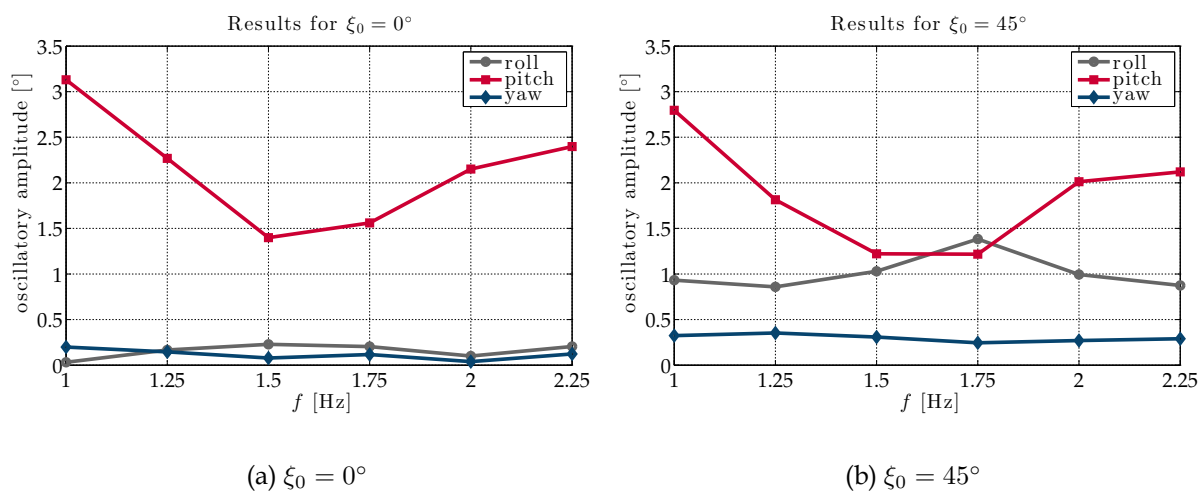
Για τη διερεύνηση της επίδρασης της συχνότητας κυμάτωσης των περυγίων, εκτελέστηκε σειρά πειραμάτων σε λειτουργία πρόωσης με έλεγχο κλειστού βρόχου της γωνίας κίνησής του για εύρος  $1 \text{ Hz} \leq f \leq 2.25 \text{ Hz}$  και ανά  $0.25 \text{ Hz}$ . Πραγματοποιήθηκαν δύο σετ μετρήσεων με διαφορετικές τιμές της σχετικής φάσης κυμάτωσης των περυγίων,  $\xi_0 = 0^\circ$  και  $\xi_0 = 45^\circ$ , ενώ η τιμή της κλίσης ταλάντωσης ήταν σταθερή στις  $X = 15^\circ$ . Η κινηματική παράμετρος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του σήματος ελέγχου είναι το πλάτος ταλάντωσης, με εύρος  $10^\circ \leq A \leq 45^\circ$  και για τα δύο περυγία.



Σχήμα 4.9: Η ταχύτητα πρόωσης του υποβρύχιου ρομπότ συναρτήσει της συχνότητας κυμάτωσης.

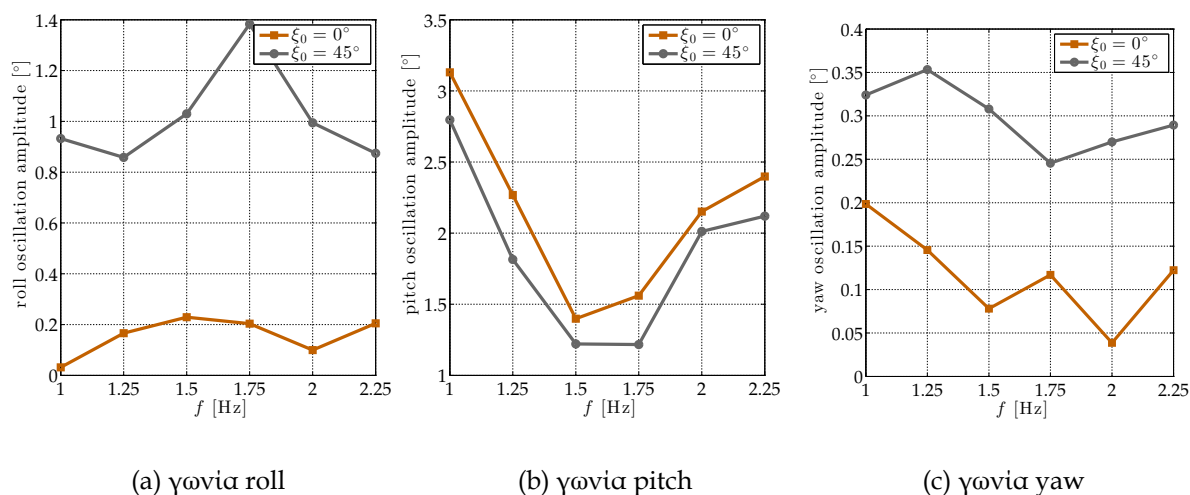
Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής. Παρατηρείται ότι η ταχύτητα πρόωσης αυξάνεται με τη συχνότητα, με τη μέγιστη τιμή της να

ανέρχεται στα 23 cm / s για  $f = 2.25$  Hz. Παρατηρείται επίσης ότι οι ταχύτητες που επιτυγχάνονται με συμφασική κίνηση των πτερυγίων (δηλ. για  $\xi_0 = 0^\circ$ ) είναι μεγαλύτερες σε σχέση με την περίπτωση που  $\xi_0 = 45^\circ$ .



Σχήμα 4.10: Συγκεντρωτικά γραφήματα για το πλάτος των διακυμάνσεων των γωνιών pitch, roll, και yaw του οχήματος, συναρτήσει της συχνότητας κυμάτωσης των πτερυγίων, για τις δύο διαφορετικές τιμές της σχετικής φάσης  $\xi_0$ .

Στα Σχήματα 4.10 και 4.11 φαίνεται το μέσο πλάτος ταλάντωσης του σκάφους γύρω από τους βασικούς του άξονες (γωνίες roll, pitch και yaw) συναρτήσει της συχνότητας κυμάτωσης των πτερυγίων. Και στις δυο περιπτώσεις σχετικής φάσης (Σχήμα 4.10), η γωνία pitch παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση από τις άλλες δύο, ενώ όταν η διαφορά φάσης μεταξύ των πτερυγίων είναι  $45^\circ$  παρατηρείται διακύμανση και στη γωνία roll.



Σχήμα 4.11: Συγκεντρωτικά γραφήματα για το πλάτος των διακυμάνσεων των γωνιών pitch, roll, και yaw του οχήματος, συναρτήσει της συχνότητας κυμάτωσης των πτερυγίων, για τις δύο διαφορετικές τιμές της σχετικής φάσης  $\xi_0$  (εναλλακτική απεικόνιση των δεδομένων του Σχήματος 4.10).

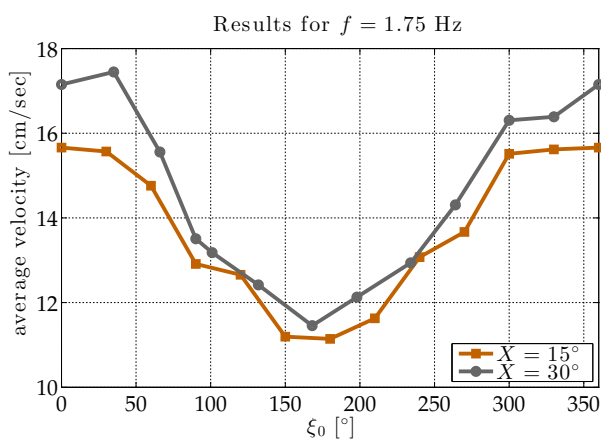
Πιο αναλυτικά, στο Σχήμα 4.10α παρατηρείται ότι, όταν τα πτερύγια κινούνται συμφασικά, το πλάτος των διακυμάνσεων της γωνίας pitch είναι από  $1.5^\circ$  έως  $3.0^\circ$  περίπου, ενώ το πλάτος των διακυμάνσεων των γωνιών yaw και roll δεν υπερβαίνει τις  $0.3^\circ$ . Όταν η σχετική φάση

κυμάτωσης γίνεται  $\xi_0 = 45^\circ$ , παρατηρείται μείωση του πλάτους διακύμανσης της γωνίας pitch, και αύξηση του πλάτους διακύμανσης των γωνιών roll και yaw (Σχήμα 4.10b).

Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται μια εναλλακτική απεικόνιση των δεδομένων, με σύγκριση μεταξύ των δύο σετ μετρήσεων ανά γωνία ταλάντωσης. Αναλυτικά γραφήματα των αποτελεσμάτων για όλες τις πειραματικές δοκιμές της διερεύνησης παρατίθενται στο Παράρτημα C.1.1.

#### 4.3.2.2 Διερεύνηση της επίδρασης της σχετικής φάσης κυμάτωσης

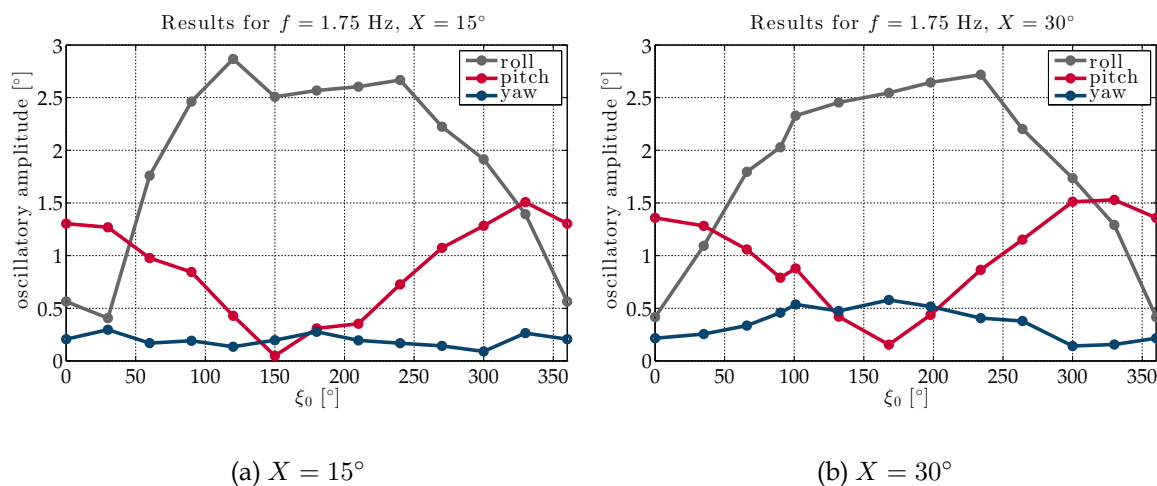
Για τη μελέτη της επίδρασης της σχετικής φάσης  $\xi_0$  των κυμάτων των δύο πτερυγίων πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων σε λειτουργία πρόωσης με έλεγχο κλειστού βρόχου της γωνίας κίνησης του ρομποτικού πρωτότυπου. Μελετήθηκε το εύρος σχετικής φάσης  $0^\circ \leq \xi_0 < 360^\circ$  για δύο διαφορετικές τιμές της κλίσης ταλάντωσης των πτερυγίων,  $X = 15^\circ$  και  $X = 30^\circ$ . Και στις δύο περιπτώσεις η συχνότητα ταλάντωσης ήταν κοινή για τα δύο πτερύγια στα  $f = 1.75 \text{ Hz}$ , ενώ η κινηματική παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του σήματος ελέγχου είναι το πλάτος ταλάντωσης, με εύρος  $10^\circ \leq A \leq 45^\circ$  και για τα δύο πτερύγια.



Σχήμα 4.12: Η ταχύτητα πρόωσης του ρομπότ συναρτίζεται της σχετικής φάσης των κυμάτων των δύο πτερυγίων.

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα της διερεύνησης. Παρατηρείται ότι η μέση τελική ταχύτητα μεγιστοποιείται όταν τα δύο πτερύγια εκτελούν συμφασικά τις κυμάτωσεις, ενώ όταν  $\xi_0 = 180^\circ$  η ταχύτητα του οχήματος λαμβάνει την μικρότερη τιμή της. Επίσης, η μεταβολή της κλίσης ταλάντωσης των πτερυγίων από  $X = 15^\circ$  σε  $X = 30^\circ$  έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης τελικής ταχύτητας σε όλο το εύρος της σχετικής φάσης κυμάτωσης.

Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά γραφήματα του πλάτους διακύμανσης των γωνιών προσανατολισμού του οχήματος στο χώρο, συναρτίζεται της σχετικής φάσης κυμάτωσης μεταξύ των πτερυγίων, για κλίση ταλάντωσης των πτερυγίων στις  $X = 15^\circ$  και  $X = 30^\circ$ . Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται αύξηση του πλάτους διακύμανσης της γωνίας roll για σχετική φάση κυμάτωσης  $\approx 180^\circ$ , το οποίο ελαχιστοποιείται όταν τα πτερύγια κινούνται συμφασικά. Αντίθετα, το πλάτος διακύμανσης της γωνίας pitch ελαχιστοποιείται για σχετική φάση κυμάτωσης  $\approx 180^\circ$  και αυξάνεται όταν τα πτερύγια κινούνται συμφασικά. Αναλυτικά γραφήματα παρουσίασης των αποτελεσμάτων για όλες τις πειραματικές δοκιμές παρατίθενται στο Παράρτημα C.1.2.



Σχήμα 4.13: Συγκεντρωτικά γραφήματα για το πλάτος διακύμανσης των γωνιών *pitch*, *roll*, και *yaw* του οχήματος, συναρτήσει της σχετικής φάσης των κυματώσεων των δύο πτερυγίων.

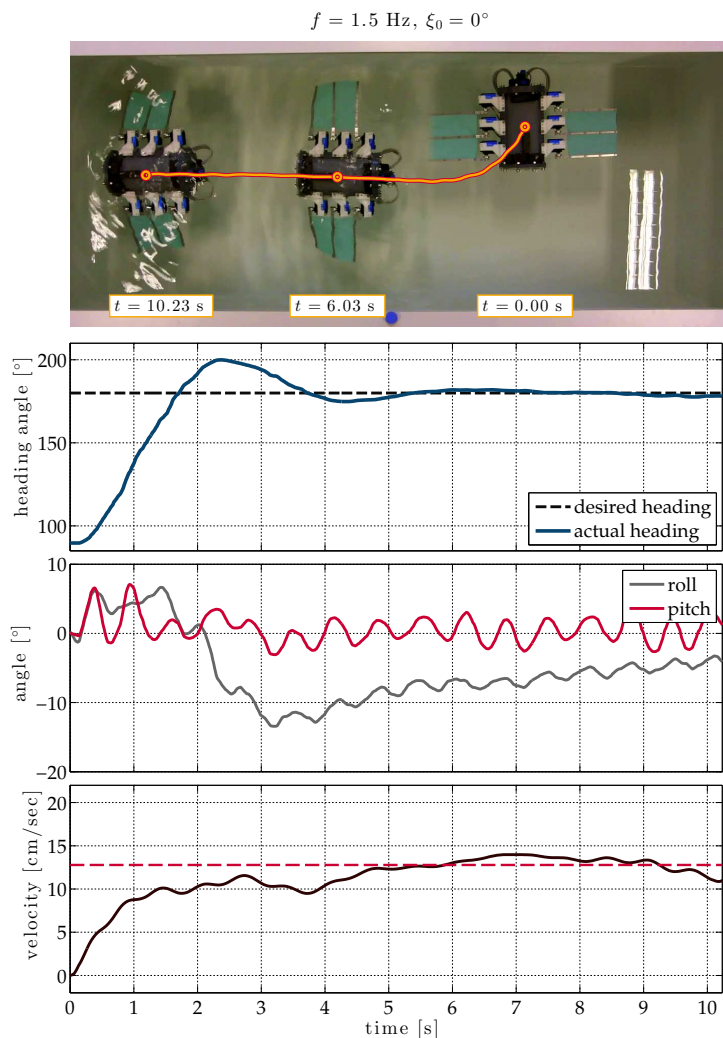
#### 4.3.2.3 Πρόωση με αλλαγή του αρχικού προσανατολισμού του οχήματος

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας σειράς πειραμάτων που εκτελέστηκαν σε λειτουργία πρόωσης με έλεγχο κλειστού βρόχου της γωνίας κίνησης του σκάφους, με μεταβολή του αρχικού προσανατολισμού του. Εξαιτίας του περιορισμένου μεγέθους της δεξαμενής δοκιμών, επιλέχθηκε σαν αρχικός προσανατολισμός του σκάφους ο κάθετος στον διαμήκη άξονα της δεξαμενής ( $\theta_0 = 90^\circ$ ), ενώ η επιθυμητή κατεύθυνση κίνησης ορίστηκε ως  $\theta_d = 180^\circ$ . Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τρεις διαφορετικές συχνότητες κυμάτωσης (συγκεκριμένα για 1 Hz, 1.5 Hz και 2 Hz) και για δύο τιμές της σχετικής φάσης κυμάτωσης ( $\xi_0 = 0^\circ$  και  $\xi_0 = 180^\circ$ ), με σταθερή κάθε φορά κλίση πτερυγίων  $X = 30^\circ$ .

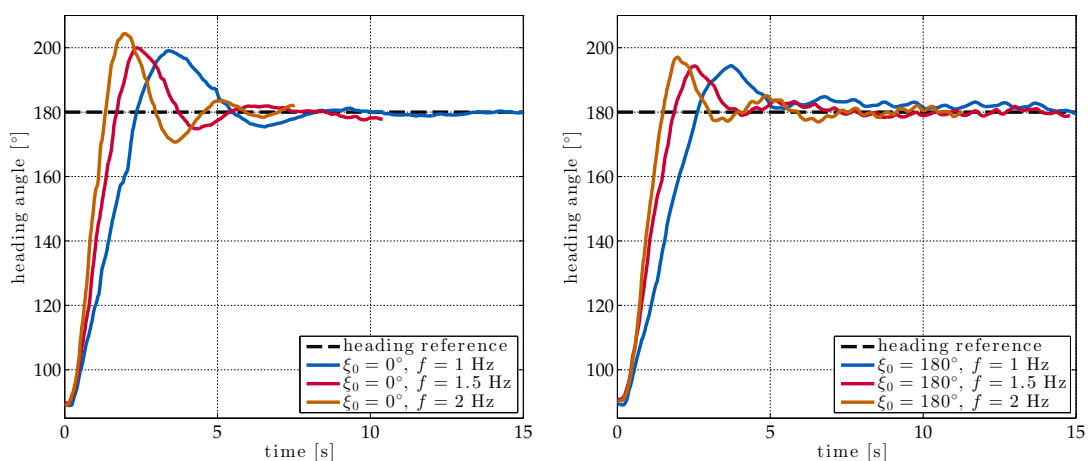
Στο Σχήμα 4.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας από τις μετρήσεις σε σύνθετη εικόνα όπου φαίνονται η τροχιά που διανύθηκε στο επίπεδο  $x - y$ , η μεταβολή της γωνίας *yaw*, οι γωνίες *pitch* και *roll*, και η ταχύτητα μετακίνησης του σκάφους, συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρείται ότι ο ελεγκτής διορθώνει επιτυχώς το σφάλμα προσανατολισμού και μειώνει τη γωνιακή απόκλιση έτσι ώστε το σκάφος να κινείται στην επιθυμητή κατεύθυνση. Στην απόκριση αυτή παρατηρείται μικρή υπερύψωση και χρόνος αποκατάστασης γύρω στα 7 s. Επίσης, φαίνεται μια κλίση του σκάφους ως προς το διαμήκη άξονά του αρχικά προς θετικές τιμές της γωνίας *roll* (δηλαδή προς το εσωτερικό της στροφής) και στη συνέχεια προς αρνητικές τιμές του *roll*.

Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά γραφήματα της γωνίας  $\theta(t)$  του οχήματος συναρτήσει του χρόνου. Παρατηρείται ότι και στα δύο σετ μετρήσεων η απόκριση είναι ταχύτερη όσο αυξάνεται η συχνότητα ταλάντωσης των ακτίνων, ενώ εμφανίζονται και μεγαλύτερα ποσοστά μεταβατικής υπερύψωσης, με υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται όταν τα πτερύγια κινούνται συμφασικά. Επίσης, στην περίπτωση των πειραμάτων με σχετική φάση κυμάτωσης  $\xi_0 = 180^\circ$  παρατηρείται μεγαλύτερη διακύμανση της γωνίας κίνησης γύρω από την τελική τιμή της.

Αναλυτικά γραφήματα παρουσίασης των αποτελεσμάτων για όλες τις πειραματικές δοκιμές παρατίθενται στο Παράρτημα C.1.3.



Σχήμα 4.14: Ενδεικτικά αποτελέσματα από τα πειράματα για πρόωση με έλεγχο κλειστού βρόχου της πορείας κίνησης του ρομποτικού πρωτότυπου, με αλλαγή του αρχικού προσανατολισμού.



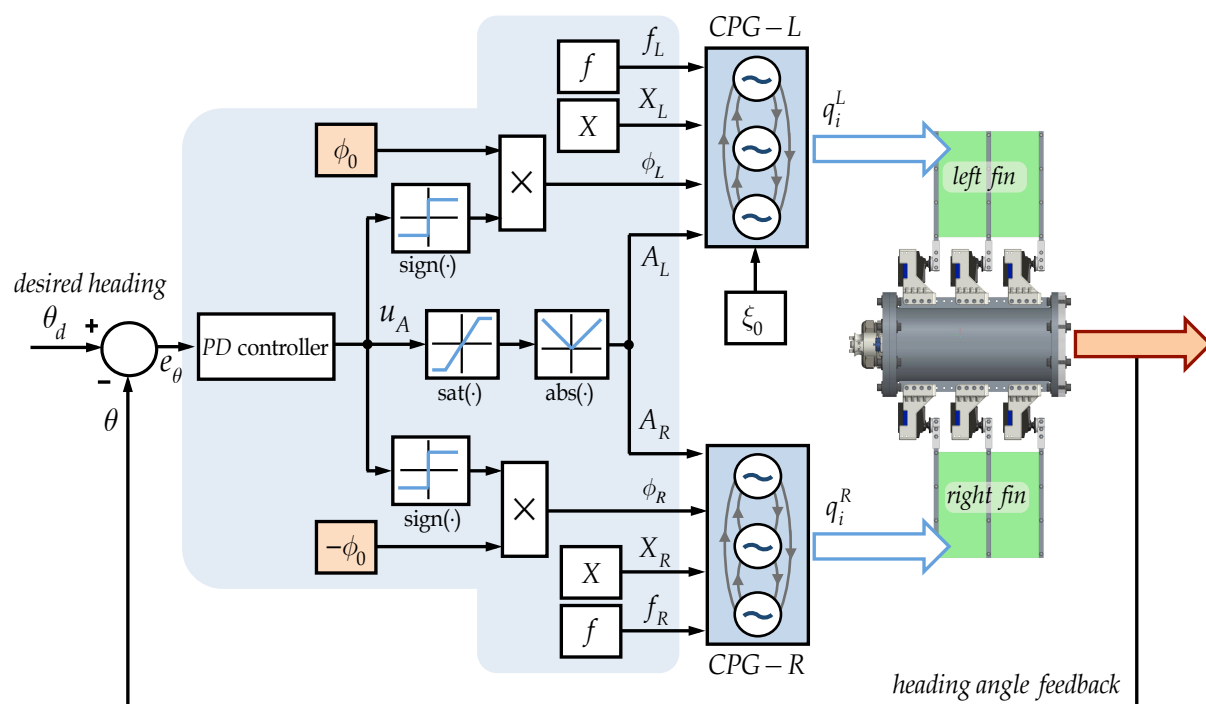
(a) Σχετική φάση κυμάτωσης  $\xi_0 = 0^\circ$

(b) Σχετική φάση κυμάτωσης  $\xi_0 = 180^\circ$

Σχήμα 4.15: Συγκεντρωτικά γραφήματα με την απόκριση του συστήματος για τα πειράματα εμπρόσθιας κίνησης με αλλαγή του αρχικού προσανατολισμού.

### 4.3.3 Επιτόπια περιστροφή με έλεγχο κλειστού βρόχου του προσανατολισμού

Μια από τις βασικές προϋποθέσεις για εκτέλεση ελιγμών ακριβείας είναι η ικανότητα για επιτόπια περιστροφή του ρομποτικού πρωτότυπου γύρω από τον εαυτό του. Για την επίτευξη αυτού του είδους της κίνησης υλοποιήθηκε η στρατηγική που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.16, μέσω της οποίας πραγματοποιείται έλεγχος κλειστού βρόχου του προσανατολισμού του ρομπότ στο επίπεδο. Η παραγωγή αυτού του τύπου κίνησης βασίζεται στην αρχή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4c, ότι δηλαδή η παραγωγή προωστικής δύναμης ίσου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης από τα δύο πτερύγια, θα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ροπής που τείνει να περιστρέψει το σκάφος χωρίς ταυτόχρονη μετακίνησή του στο επίπεδο.



Σχήμα 4.16: Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας επιτόπιας περιστροφής του ρομπότ με έλεγχο κλειστού βρόχου του προσανατολισμού στο επίπεδο.

Στο σχήμα που υλοποιήθηκε, ο προσανατολισμός του οχήματος ρυθμίζεται μέσω ελεγκτή κλειστού βρόχου, όπου το σφάλμα  $e_\theta = \theta_d - \theta$  προσδιορίζει το πλάτος και τη φορά μετάδοσης της εκτελούμενης κυμάτωσης των δύο πτερυγίων. Ειδικότερα, το σήμα στην έξοδο του PD-ελεγκτή στο Σχήμα 4.16 υπολογίζεται ως:

$$u_A = e_\theta k_p + \dot{e}_\theta k_d \quad (4.13)$$

όπου  $k_p$  και  $k_d$  τα κέρδη του αναλογικού και του διαφορικού, αντίστοιχα, όρου. Βάσει αυτού του σήματος ελέγχου, καθορίζονται το πλάτος και η διαφορά φάσης για την ταλάντωση των ακτίνων των δύο πτερυγίων, σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\text{Αριστερό πτερύγιο: } A_L = \begin{cases} |u_A| & \text{για } |u_A| \leq A_{\max} \\ A_{\max} & \text{για } |u_A| > A_{\max} \end{cases} \quad \text{και } \phi_L = \phi_0 \text{sgn}(u_A) \quad (4.14)$$

$$\text{Δεξιό περύγιο: } A_R = \begin{cases} |u_A| & \text{για } |u_A| \leq A_{\max} \\ A_{\max} & \text{για } |u_A| > A_{\max} \end{cases} \quad \text{και } \phi_R = -\phi_0 \text{sgn}(u_A), \quad (4.15)$$

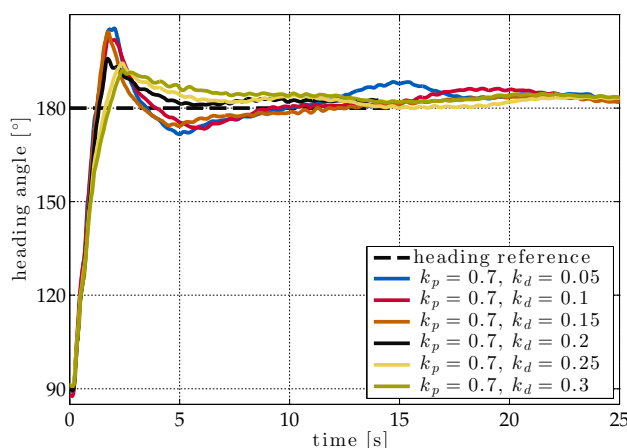
όπου  $\text{sgn}()$  η συνάρτηση πρόσημου, ενώ  $A_{\max}$  η ανώτατη επιτρεπτή τιμή για το πλάτος της ταλάντωσης των ακτίνων των περυγίων. Όπως προκύπτει από τις Σχέσεις (4.14)-(4.15), τα δύο περύγια κυματώνονται με το ίδιο πλάτος ( $A_L = A_R$ ) αλλά με αντίθετη φορά μετάδοσης του οδεύοντος κύματος ( $\phi_L = -\phi_R$ ). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.16, οι λοιπές παράμετροι κυμάτωσης είναι κοινές και για τα δύο περύγια ( $f_L = f_R = f$  και  $X_L = X_R = X$ ).

Προκειμένου για την ψηφιακή υλοποίηση του παραπάνω ελεγκτή από την κεντρική μονάδα ελέγχου του πρωτότυπου, η Σχέση (4.13) διακριτοποιείται, με βάση τη μέθοδο της προ-τα-πίσω διαφοράς (backward difference), ως εξής:

$$u_A[nT] = e_\theta[nT]k_p + \frac{e_\theta[nT] - e_\theta[(n-1)T]}{T}k_d \quad (4.16)$$

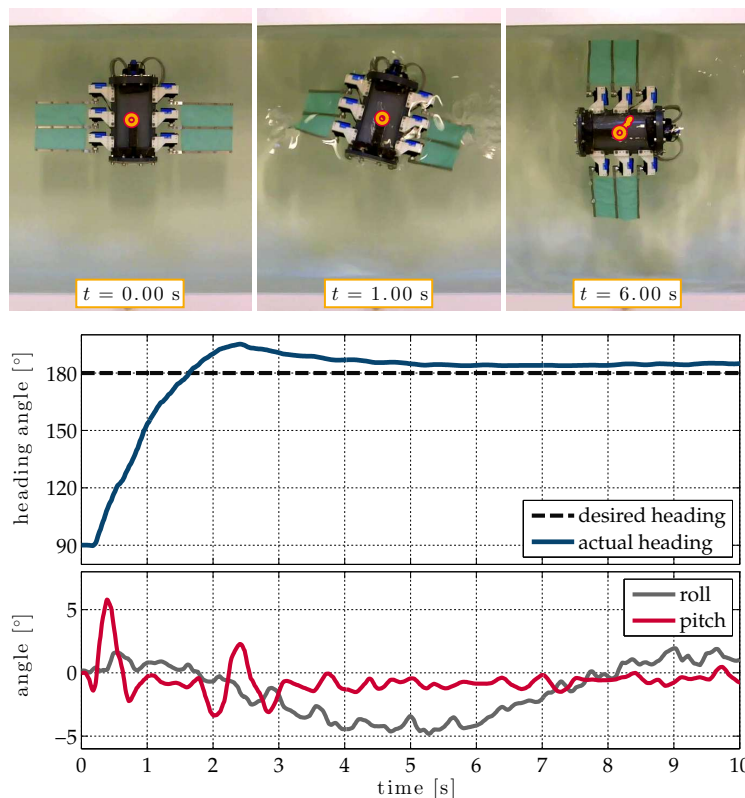
όπου  $n$  ο δείκτης του τρέχοντος χρονικού δείγματος, και  $T = 0.01$  s η περίοδος δειγματοληψίας και εκτέλεσης του βρόχου ελέγχου.

Στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα από μια σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν για τη ρύθμιση του διαφορικού κέρδους του ελεγκτή (Σχέσεις (4.13) και (4.16)) για τον έλεγχο προσανατολισμού του σκάφους. Τα πειράματα ξεκινούν με αρχικό προσανατολισμό του ρομπότ στις  $90^\circ$  και επιθυμητή γωνία  $\theta_d = 180^\circ$ . Παρατηρείται ότι η αύξηση της τιμής του  $k_d$  μειώνει την υπερύψωση και το πλάτος των ταλαντώσεων, ενώ κάνει την απόκριση του συστήματος πιο αργή. Η τιμή που επιλέχθηκε τελικά για το διαφορικό κέρδος είναι η  $k_d = 0.25$ .



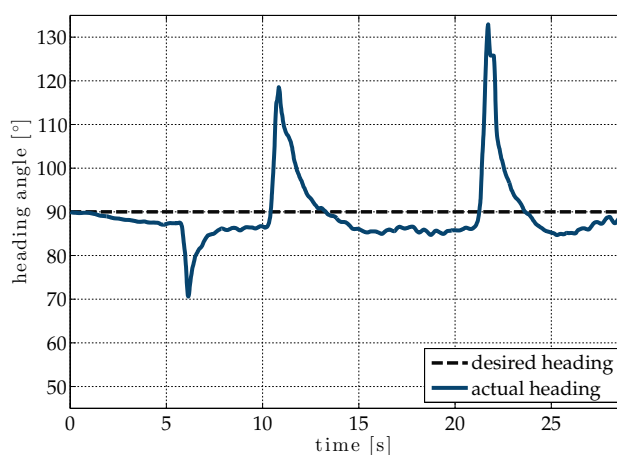
Σχήμα 4.17: Τα αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης για τη ρύθμιση του διαφορικού κέρδους για τον ελεγκτή προσανατολισμού του οχήματος.

Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της απόκρισης του ελεγκτή σε βηματική είσοδο μεταβολής της επιθυμητής γωνίας προσανατολισμού μέσω επιτόπιας περιστροφής του ρομποτικού πρωτότυπου. Το πείραμα ξεκινά με το σκάφος τοποθετημένο στη μέση της δεξαμενής και προσανατολισμένο στις  $90^\circ$ , με επιθυμητή γωνία προσανατολισμού  $\theta_d = 180^\circ$ . Παρατηρείται ότι ο ελεγκτής ολοκληρώνει επιτυχώς την αλλαγή προσανατολισμού



Σχήμα 4.18: Ενδεικτικά αποτελέσματα για τον έλεγχο κλειστού βρόχου του προσανατολισμού του οχήματος μέσω επιτόπιας περιστροφής.

με μια μικρή μεταβατική υπερύψωση και χρόνο αποκατάστασης περίπου 5 s. Αναλυτικά γραφήματα παρουσίασης των αποτελεσμάτων για όλες τις πειραματικές δοκιμές παρατίθενται στο Παράρτημα C.2.1.

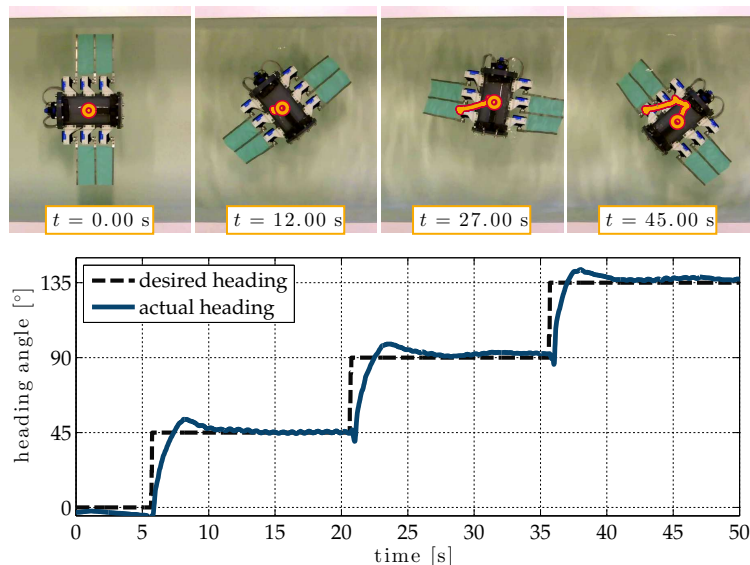


Σχήμα 4.19: Ενδεικτικά αποτελέσματα από πειράματα αποτίμησης της ικανότητας απόρριψης διαταραχών από τον ελεγκτή κλειστού βρόχου.

Στο Σχήμα 4.19 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα πειράματος που εκτελέστηκε για αποτίμηση του ελεγκτή κλειστού βρόχου όσον αφορά στην απόρριψη εξωτερικών διαταραχών. Το πείραμα ξεκινά με το ρομποτικό πρωτότυπο τοποθετημένο στη μέση της δεξαμενής δοκιμών και προσανατολισμένο στις  $90^\circ$  η οποία είναι και η επιθυμητή γωνία προσανατολισμού του.



Κατά τη διάρκεια του πειράματος, συγκεκριμένα στις χρονικές στιγμές  $t \approx 6$  s,  $t \approx 10.5$  s και  $t \approx 11$  s γίνεται εκτροπή του ρομπότ από την αρχική του θέση εξωτερικά με το χέρι. Παρατηρείται ότι ο ελεγκτής επιτυγχάνει να επαναφέρει το σκάφος στον επιθυμητό προσανατολισμό του  $\theta_d = 90^\circ$  με ικανοποιητική ακρίβεια. Αναλυτικά τα αποτελέσματα για όλες τις πειραματικές δοκιμές αυτού του τύπου παρατίθενται στο Παράρτημα C.2.2.



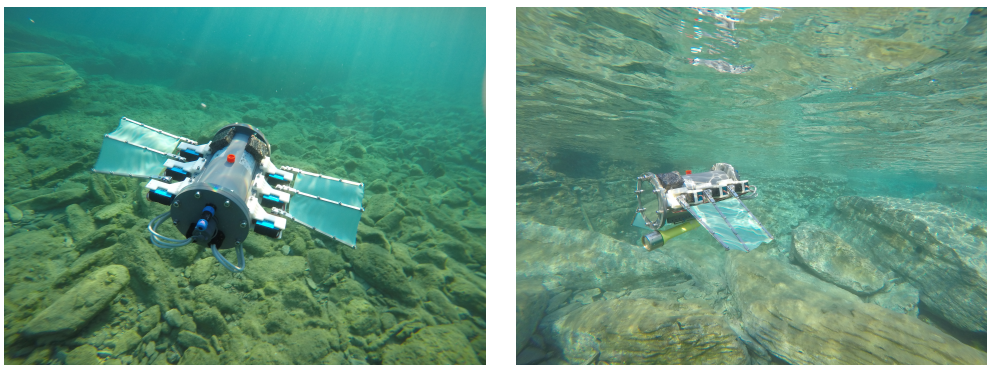
Σχήμα 4.20: Ενδεικτικά αποτελέσματα από πειράματα στα οποία η επιθυμητή γωνία προσανατολισμού του οχήματος μεταβάλλεται βηματικά ανά  $45^\circ$  έως τις  $135^\circ$ .

Στο Σχήμα 4.20 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της απόκρισης του ελεγκτή κλειστού βρόχου σε διαδοχικές μεταβολές της επιθυμητής γωνίας προσανατολισμού. Το πείραμα ξεκινά με το ρομπोटικό πρωτότυπο τοποθετημένο στη μέση της δεξαμενής δοκιμών και προσανατολισμένο στις  $0^\circ$ , ενώ γίνονται διαδοχικές μεταβολές της επιθυμητής γωνίας προσανατολισμού βηματικά ανά  $45^\circ$  έως τις  $135^\circ$ . Παρατηρείται ότι ο ελεγκτής επιτυγχάνει τη μεταβολή του προσανατολισμού με ταχύτητα, ικανοποιητική ακρίβεια, και σημαντική επαναληψιμότητα, ενώ παρατηρείται πολύ μικρή μετατόπιση του ρομπότ στο επίπεδο  $x - y$ . Αναλυτικά γραφήματα παρουσίασης των αποτελεσμάτων για όλες τις πειραματικές δοκιμές παρατίθενται στο Παράρτημα C.2.3.

#### 4.3.4 Δοκιμές σε θαλάσσιο περιβάλλον

Εκτός από τα πειράματα που διενεργήθηκαν στη δεξαμενή δοκιμών του εργαστηρίου, πραγματοποιήθηκε και μια σειρά πειραμάτων σε θαλάσσιο περιβάλλον. Σκοπός σε αυτή τη φάση ήταν η οπτική παρατήρηση των χαρακτηριστικών κίνησης του σκάφους και η εν δυνάμει σύγκριση με αντίστοιχα πειράματα που έγιναν στη δεξαμενή δοκιμών. Εξ αρχής παρατηρήθηκε ότι εξαιτίας της αυξημένης άνωσης που ασκείται στο σκάφος λόγω του θαλασσινού νερού, για την επίτευξη ουδέτερης πλευστότητας ήταν απαραίτητη η προσάρτηση επιπλέον μάζας εσωτερικά και εξωτερικά του κύτους. Για την ακριβέστερη ρύθμιση της πλευστότητας χρησιμοποιήθηκαν κομμάτια φελιζόλ τα οποία κολλήθηκαν στο πάνω μέρος του σκάφους. Αυτά δρουν σαν πλωτήρες, αυξάνοντας τον όγκο της κατασκευής χωρίς να έχουν σημαντική επίδραση στη μάζα της.

Για την εκτέλεση των δοκιμών σε θαλάσσιο περιβάλλον, έγιναν κατάλληλες τροποποιήσεις



Σχήμα 4.21: Φωτογραφικά στιγμιότυπα από τις δοκιμές του υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος σε θαλάσσιο περιβάλλον.

στο πρόγραμμα του μικροελεγκτή, έτσι ώστε να είναι εύκολη η μεταβολή των προς μελέτη παραμέτρων μέσω κινητού τηλεφώνου που διαθέτει bluetooth και εφαρμογή για σειριακή αποστολή δεδομένων.

Η πλειοψηφία των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε με ελεγκτές ανοιχτού βρόχου, κυρίως για την παρατήρηση και μελέτη της επίδρασης της μεταβολής των κινηματικών παραμέτρων στην ποιότητα κίνησης του σκάφους. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν συμπίπτουν με αυτά από τις μετρήσεις που εκτελέστηκαν στη δεξαμενή δοκιμών του εργαστηρίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι έγιναν δοκιμές με μεταβολή του πλάτους και της συχνότητας ταλάντωσης και των δύο περυγίων ταυτόχρονα για μελέτη της αυξομείωσης της ταχύτητας του σκάφους, αλλά και μεμονωμένα, όπου παρατηρήθηκε κίνηση σε στροφή. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με έλεγχο κλειστού βρόχου της γωνίας προσανατολισμού, όπου παρατηρήθηκε σχετικά καλή απόκριση του ελεγκτή.

Αν και δεν ήταν δυνατή η μετάδοση δεδομένων τηλεμετρίας και κατά συνέπεια η περαιτέρω επεξεργασία τους για αποτίμηση της κίνησης του σκάφους, σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα των δοκιμών είναι ενθαρρυντικά και κρίνεται σημαντικό σε μελλοντικές δοκιμές να γίνει προσπάθεια για καταγραφή των δεδομένων αυτών. Εφόσον η ασύρματη μετάδοση των δεδομένων για καταγραφή τους από εξωτερική συσκευή, όπως γίνεται στην περίπτωση των πειραμάτων που εκτελούνται στη δεξαμενή δοκιμών του εργαστηρίου είναι πρακτικά αδύνατη, ίσως φανεί χρήσιμη η αποθήκευσή τους τοπικά σε κάποια μονάδα αποθήκευσης δεδομένων στο εσωτερικό του σκάφους (π.χ. SD-card).

Επίσης, ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τις δοκιμές αυτές έχει να κάνει με την επίδραση των θαλάσσιων ρευμάτων στην κίνηση του σκάφους. Δεδομένου ότι δε γίνεται έλεγχος θέσης και ότι γίνεται έλεγχος προσανατολισμού στον άξονα  $z$  μόνο, είναι πολύ δύσκολη η αξιολόγηση της κίνησης του σκάφους στο σύνολό της. Κατά τις δοκιμές στο θαλάσσιο περιβάλλον παρατηρήθηκε ακούσια μετακίνηση του σκάφους κατά τον εγκάρσιο άξονα  $y$ , η οποία σε μικρότερο βαθμό παρατηρήθηκε και στη δεξαμενή δοκιμών του εργαστηρίου. Κατά πάσα πιθανότητα αυτή η μετατόπιση είναι αποτέλεσμα του ίδιου φαινομένου και οφείλεται στα θαλάσσια ρεύματα στην περίπτωση των θαλάσσιων δοκιμών και στα κύματα νερού που αντανakλώνται στα τοιχώματα της δεξαμενής δοκιμών.

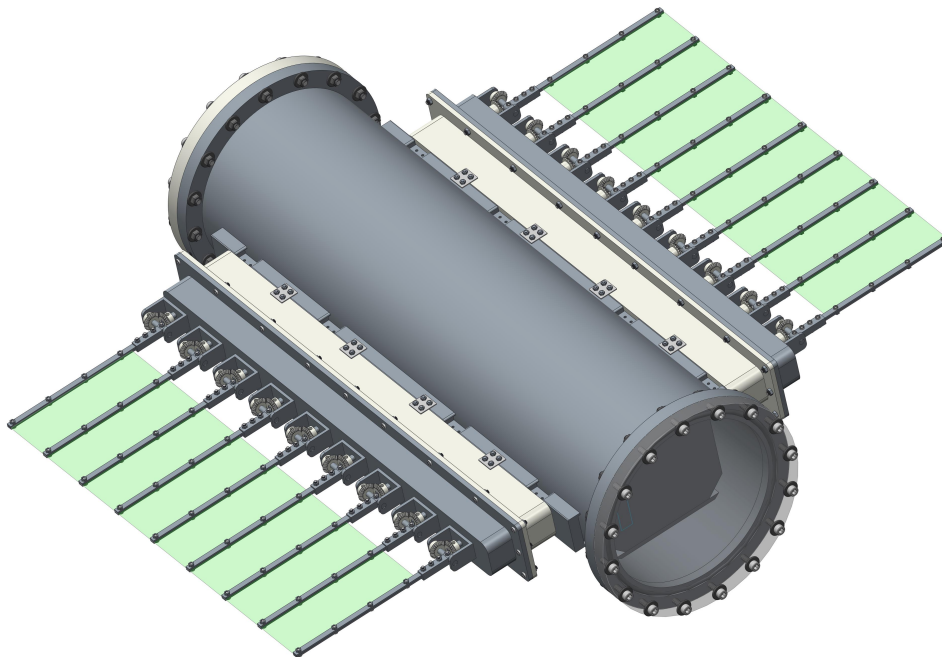
Φωτογραφικά στιγμιότυπα από τις δοκιμές σε θαλάσσιο περιβάλλον παρατίθενται στο Παράρτημα C.2.4.

## Κεφάλαιο 5

# Σχεδίαση του Υποβρύχιου Ρομποτικού Οχήματος SQUIDBOT

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και τα αρχικά στάδια κατασκευής ενός υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος με την ονομασία SQUIDBOT, το οποίο φέρει δύο πλευρικά πτερύγια κυματοειδούς κίνησης ως μονάδες πρόωσης.

Η βασική σκοπιμότητα κατασκευής αυτού του ρομποτικού οχήματος είναι η διερεύνηση, σε μεγαλύτερη κλίμακα, των χαρακτηριστικών πρόωσης που μελετήθηκαν αρχικά μέσω του οχήματος SQUIDBOT-mini. Για το σκοπό αυτό, ο αριθμός των ακτίνων αυξήθηκε από 3 σε 9 ακτίνες ανά πτερύγιο, όλες ενεργά οδηγούμενες από αντίστοιχο αριθμό σερβοκινητήρων. Αυτή η τροποποίηση αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της παραγόμενης δύναμης πρόωσης, με αποτέλεσμα μεγαλύτερες ταχύτητες κίνησης και καλύτερο έλεγχο του προσανατολισμού του οχήματος. Το αυξημένο πλήθος των ακτίνων παρέχει επιπλέον τη δυνατότητα υλοποίησης



Σχήμα 5.1: Το σχέδιο CAD του υποβρύχιου σκάφους SQUIDBOT.

μεγαλύτερου αριθμού κυμάτων κατά μήκος των πτερυγίων, με αναμενόμενο αποτέλεσμα τη μικρότερη διακύμανση της παραγόμενης δύναμης και, κατά συνέπεια, της ταχύτητας κίνησης του οχήματος. Είναι προφανές ότι η αύξηση του πλήθους των επενεργητών συνεπάγεται και αύξηση των βασικών διαστάσεων του σκάφους, τόσο του μήκους του, το οποίο επηρεάζεται άμεσα από το μήκος των πτερυγίων, αλλά και του κύτους, το οποίο θα φιλοξενεί διαφορετικού τύπου και μεγαλύτερου όγκου και μάζας ηλεκτρονικά ελέγχου και τροφοδοσίας. Επίσης, με ένα όχημα μεγαλύτερων διαστάσεων μπορεί να μελετηθεί και η ικανότητα μεταφοράς φορτίου ή/και επιπλέον περιφερειακών εξαρτημάτων. Σε αυτά περιλαμβάνεται και μία διάταξη νυκτικής κύστης, η οποία προβλέπεται από τη σχεδίαση του οχήματος για τη ρύθμιση της πλευστότητάς του, χαρακτηριστικό που απουσίαζε από το πρωτότυπο SQUIDBOT-mini. Μια άλλη σημαντική διαφορά σε σχέση με το SQUIDBOT-mini είναι ότι ο σχεδιασμός του πρωτοτύπου αυτού παρέχει τη δυνατότητα επιλογής, μετά την κατασκευή, μεταξύ δύο διαφορετικού τύπου σερβοκινητήρες για την οδήγηση των ακτίνων. Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται τόσο η κατασκευή των δύο εναλλακτικών υλοποιήσεων πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης, αλλά και ο τρόπος συναρμολόγησής τους στο κύτος.

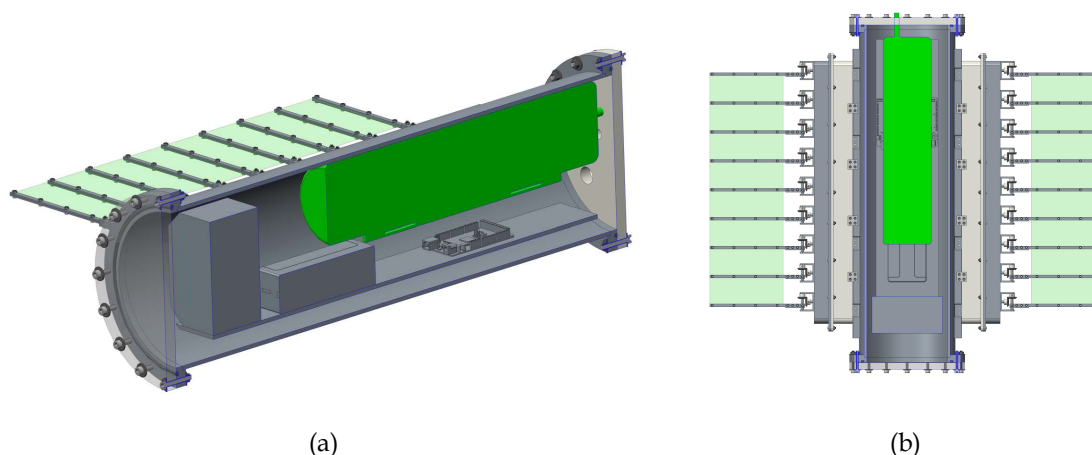
Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται το σχέδιο CAD της μιας εκ των δύο υλοποιήσεων που μελετήθηκαν. Στο σχέδιο αυτό φαίνεται ότι, όπως και στο πρωτότυπο SQUIDBOT-mini, το όχημα απαρτίζεται από τρία βασικά υποσυστήματα, το κυρίως σώμα του (κύτος) μέσα στο οποίο θα τοποθετούνται τα ηλεκτρονικά εξαρτήματά του, και δύο πλευρικά τοποθετημένα πτερύγια με εννέα ανεξάρτητα οδηγούμενες ακτίνες έκαστο. Η νυκτική κύστη για τη ρύθμιση της πλευστότητας υλοποιείται με την τοποθέτηση στο εσωτερικό του κύτους ενός υδατοστεγούς θαλάμου, ο οποίος θα γεμίζει ή θα αδειάζει με νερό μέσω περισταλτικής αντλίας.

Νωρίς στη διαδικασία σχεδιασμού έγιναν εμφανή τα πλεονεκτήματα του να υπάρχουν ξεχωριστά υδατοστεγή διαμερίσματα για κάποια εξαρτήματα του ρομπότ. Αφενός, σε περίπτωση αστοχίας και εισροής νερού σε κάποιο διαμέρισμα, τα υπόλοιπα παραμένουν άθικτα. Αφετέρου, ο σχεδιασμός περιλαμβάνει την πρόβλεψη για χρησιμοποίηση δύο διαφορετικών τύπων σερβοκινητήρων. Σε γενικές γραμμές, η ύπαρξη αυτών των διαμερισμάτων φαίνεται να απλοποιεί επίσης και τις διαδικασίες κατασκευής και συναρμολόγησης του πρωτοτύπου. Στο εσωτερικό του κύτους εμπεριέχονται τα ηλεκτρονικά ελέγχου, ένας συσσωρευτής πολυμερών λιθίου και ένα αδρανειακό σύστημα προσδιορισμού προσανατολισμού (IMU/AHRS).

## 5.1 Περιγραφή μηχανικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή των βασικών εξαρτημάτων του ρομποτικού οχήματος, καθώς και η μέθοδος συναρμολόγησης και στεγάνωσής τους. Επίσης, περιγράφονται και κάποια από τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα που θα χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο και την τροφοδοσία του ρομποτικού οχήματος. Σημειώνεται ότι κατά τη συγγραφή του παρόντος δεν έχει περατωθεί η διαδικασία κατασκευής και τελικής συναρμολόγησης του οχήματος, συνεπώς η τεκμηρίωση αντικατοπτρίζει το στάδιο στο οποίο βρίσκεται αυτή.

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται δύο όψεις του σχεδίου CAD του οχήματος σε τομή, όπου έχει γίνει συναρμολόγηση και κάποιων από τα βασικά μηχανικά και ηλεκτρονικά υποσυστήματα που θα φιλοξενούνται στο εσωτερικό του κύτους. Η νυκτική κύστη (επισημαίνεται με πράσινο χρώμα) απαρτίζεται από σωλήνα PVC διαμέτρου  $\varnothing 100$  mm και μήκους 430 mm. Στο εσωτερικό



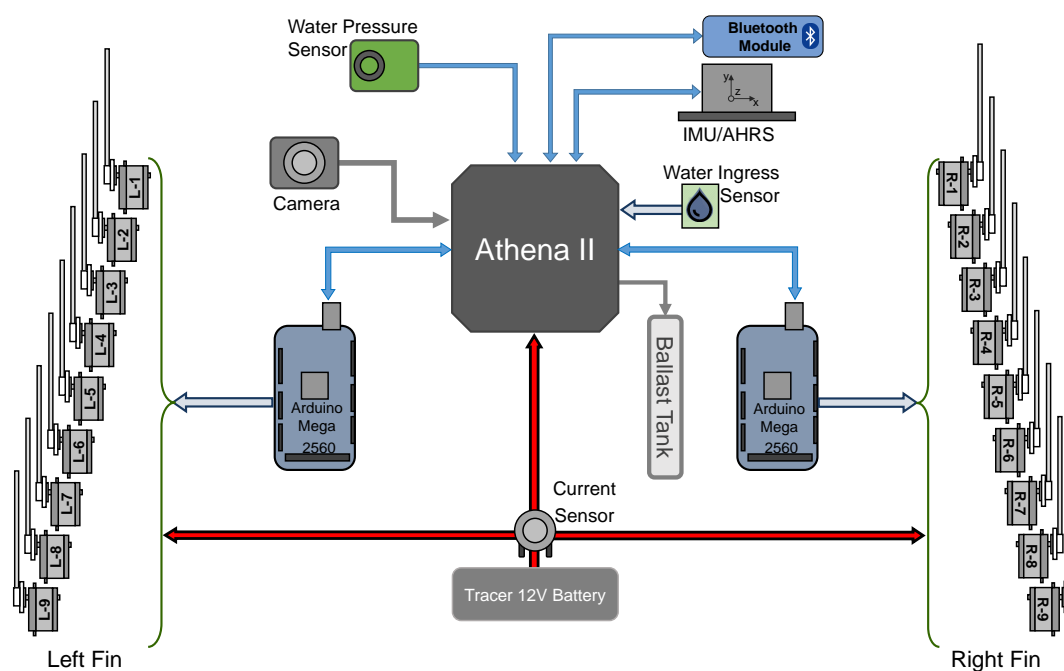
Σχήμα 5.2: Σχέδιο CAD του ρομποτικού οχήματος σε τομή: (a) Τομή του συναρμολογημένου σχεδίου κατά κάθετο επίπεδο που το διχοτομεί. (b) Τομή κατά οριζόντιο επίπεδο που διχοτομεί τη νυκτική κύστη.

της διαθέτει μια περιστατική αντλία η οποία μπορεί να μεταφέρει νερό από το εξωτερικό της κατασκευής σε μια ελαστική κύστη η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό του σωλήνα. Πριν από τη λειτουργία της αντλίας, η ελαστική κύστη είναι άδεια και ο σωλήνας είναι γεμάτος αέρα. Κατά τη λειτουργία της αντλίας, η ελαστική κύστη γεμίζει νερό και διαστέλλεται, συμπιέζοντας τον αέρα που υπάρχει στο εσωτερικό του σωλήνα. Κατά την αντίστροφη λειτουργία της αντλίας, το νερό εξέρχεται από την κύστη, η οποία αδειάζοντας συστέλλεται και επανέρχεται στις αρχικές της διαστάσεις, ενώ ο αέρας στο εσωτερικό του σωλήνα αποσυμπιέζεται. Η χρήση αυτού του συστήματος επιτρέπει τη δυναμική ρύθμιση του συνολικού ειδικού βάρους του ρομποτικού οχήματος, αφού γίνεται ρύθμιση της συνολικής μάζας του, χωρίς μεταβολή του όγκου που καταλαμβάνει, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα για δυναμική ρύθμιση της πλευστότητας του οχήματος.

Στο Σχήμα 5.2a φαίνεται τομή κατά κάθετο επίπεδο που διχοτομεί το όχημα κατά μήκος της μεγάλης διάστασής του, ενώ στο Σχήμα 5.2b φαίνεται τομή του σχεδίου κατά οριζόντιο επίπεδο που διχοτομεί τη νυκτική κύστη.

Στο εμπρόσθιο μέρος του κύτους διακρίνεται ένα πρόχειρο σχέδιο του Η/Υ (Athena II PC/104 της εταιρίας Diamond Systems), ο οποίος θα είναι επιφορτισμένος με τον έλεγχο υψηλού επιπέδου του ρομποτικού οχήματος και τον υπολογισμό των επιθυμητών προφίλ κίνησης των ακτίνων των δύο πτερυγίων μέσω δύο δικτύων CPG. Ο Η/Υ αυτός διαθέτει ενσωματωμένη κάρτα συλλογής δεδομένων μέσω της οποίας θα δέχεται πληροφορίες από τους αισθητήρες και την κάμερα του οχήματος. Πίσω από τον Η/Υ φαίνεται το σύστημα τροφοδοσίας πολυμερών λιθίου 12V 10Ah της εταιρίας Tracer. Στο πίσω μέρος του κύτους και κάτω από τη νυκτική κύστη φαίνονται δύο αναπτυσσόμενες πλακέτες Arduino Mega2560, καθεμία από τις οποίες θα αναλαμβάνει τον έλεγχο χαμηλού επιπέδου κίνησης των ακτίνων ενός πτερυγίου. Εκτός από τα παραπάνω, προβλέπεται να τοποθετηθούν στο εσωτερικό του κύτους ένα αδρανειακό σύστημα προσδιορισμού προσανατολισμού (IMU/AHRS), αισθητήριο πίεσης για τη μέτρηση του βάθους, αισθητήριο για τη μέτρηση της κατανάλωσης ρεύματος, καθώς και ανιχνευτές εισροής υδάτων. Η διασύνδεση των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων του οχήματος παρουσιάζεται στο σχηματικό διάγραμμα του Σχήματος 5.3.

Στο Σχήμα 5.4 φαίνονται τα επιμέρους εξαρτήματα που απαρτίζουν το κύτος του ρομποτι-



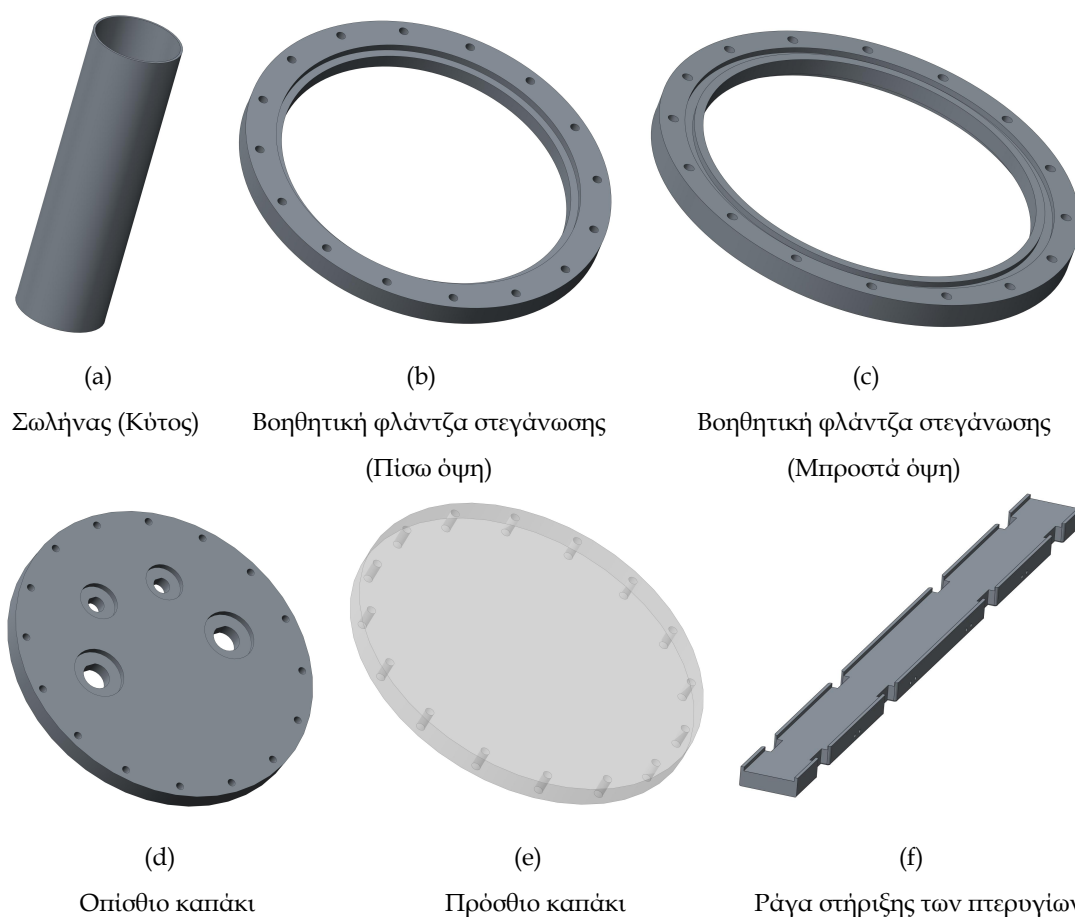
Σχήμα 5.3: Σχηματικό διάγραμμα της διασύνδεσης των ηλεκτρονικών υποσυστημάτων και της αρχιτεκτονικής ελέγχου του ρομποτικού οχήματος SQUIDBOT.

κού πρωτότυπου. Όμοια με το ρομποτικό πρωτότυπο SQUIDBOT-mini, το κυρίως σώμα αυτού του οχήματος έχει κυλινδρικό σχήμα, κατασκευασμένο από σωλήνα PVC διαμέτρου  $\varnothing 200$  mm και συνολικού μήκους 68 cm (Σχήμα 5.4a).

Το κυλινδρικό σχήμα επιλέχθηκε έναντι του παραλληλεπίπεδου λόγω της ευκολίας που παρέχει στη στεγανοποίηση. Επίσης, ο κύλινδρος είναι εύκολο να βρεθεί σε τυποποιημένες διαστάσεις στην αγορά και δεν είναι απαραίτητη η κατασκευή του εξ ολοκλήρου σε CNC. Από το τρισδιάστατο μοντέλο υπολογίστηκε ότι ο κύλινδρος θα έχει σχεδόν τη μισή μάζα από το αντίστοιχο παραλληλεπίπεδο, δεδομένου ότι και στα δύο διαμερίσματα θα πρέπει να μπορούν να τοποθετηθούν τα ίδια εξαρτήματα. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζεται με τη χρήση κυλινδρικού κύτους είναι η ανάγκη κατασκευής ειδικών υποδοχών και εξαρτημάτων για συναρμολόγηση και στήριξη των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στο εσωτερικό του.

Ακολουθώντας την προσέγγιση που υιοθετήθηκε στο SQUIDBOT-mini, για τη διευκόλυνση της στεγάνωσης του κύτους κατασκευάστηκαν από φύλλο PVC δύο βοηθητικοί δακτύλιοι εσωτερικής διαμέτρου  $\varnothing 190$  mm, εξωτερικής διαμέτρου  $\varnothing 240$  mm και πάχους 15 mm οι οποίοι θα κολληθούν στις δύο ανοιχτές πλευρές του κυλίνδρου. Οι φλάντζες φέρουν στη μία επίπεδη πλευρά τους κατάλληλη διαμόρφωση για εφαρμογή στον κύλινδρο (Σχήμα 5.4b), ενώ στην εξωτερική επίπεδη πλευρά τους έχει γίνει κατεργασία για διαμόρφωση εσοχής μέσα στην οποία τοποθετείται ο-ring για στεγάνωση του κυλίνδρου (Σχήμα 5.4c).

Για την τελική σφράγιση του κυλινδρικού κύτους θα χρησιμοποιηθούν δύο καπάκια σχήματος δίσκου. Το εμπρόσθιο καπάκι (Σχήμα 5.4e), διαμέτρου  $\varnothing 240$  mm και πάχους 10 mm, είναι από διάφανο plexi-glass και επιτρέπει εύκολη επίπτευση των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων τα οποία βρίσκονται μέσα στο κύτος. Επιτρέπει επίσης την τοποθέτηση στο εσωτερικό του κύτους



Σχήμα 5.4: Επιμέρους εξαρτήματα του κύτους του υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος SQUIDBOT.

βιντεοκάμερας για τη λήψη υποβρύχιων πλάνων. Το οπίσθιο καπάκι (Σχήμα 5.4d), διαμέτρου  $\varnothing 240$  mm κατασκευάστηκε από φύλο PVC πάχους 15 mm και διαθέτει οπές με σπειρώματα, όπου βιδώνουν οι κονέκτορες για μετάδοση πληροφοριών από και προς τους σερβοκινητήρες που οδηγούν τις ακτίνες, για φόρτιση της μπαταρίας, για ενσύρματη επικοινωνία με τον μικροελεγκτή κ.α. Τα δύο καπάκια, αλλά και οι βοηθητικοί δακτύλιοι που ενσωματώνουν τα o-rings διαθέτουν οπές  $\varnothing 6$  mm σε κυκλική διάταξη για συναρμολόγηση μεταξύ τους.

Τα o-ring που επιλέχθηκαν έχουν εσωτερική διάμετρο  $\varnothing 200$  mm και διάμετρο διατομής  $\varnothing 4$  mm. Η εσοχή στους βοηθητικούς δακτύλιους όπου και τοποθετούνται τα o-rings, έχει βάθος ίσο με 3.46 mm και πλάτος 5.4 mm με την επιφάνεια της διατομής να ανέρχεται στα  $18.684 \text{ mm}^2$ , ενώ η διατομή του o-ring είναι ίση με  $12.56 \text{ mm}^2$ . Το ποσοστό συμπίεσης του o-ring ανέρχεται στο 13.5%, το οποίο είναι αποδεκτό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή (για στατική μόνωση απαιτείται 10 – 40%) [60,61]. Επίσης, επιτυγχάνεται ποσοστό πλήρωσης της εσοχής 67.3%, κάτι που είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια (65% – 85%).

Τέλος, πλευρικά του κύτους θα κολληθούν δύο βοηθητικά εξαρτήματα (Σχήμα 5.4f, 5.5b) τα οποία θα εξυπηρετούν στην προσαρμογή των πτερυγίων στο όχημα. Αυτά τα εξαρτήματα έχουν σχεδιαστεί και κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να συναρμολογηθούν πάνω τους οι δύο διαφορετικές διατάξεις πτερυγίου που δύναται να φέρει το όχημα. Οι δύο εναλλακτικές υλοποιήσεις που προκύπτουν από την παραπάνω δυνατότητα αναλύονται στα επόμενα κεφάλαια.



(a)



(b)

Σχήμα 5.5: Εξαρτήματα του κότους του ρομποτικού οχήματος: (a) Εμπρόσθιο καπάκι στεγάνωσης. (b) Πλευρικά βοηθητικά εξαρτήματα στήριξης.

### 5.1.1 Σχεδίαση-A: Ρομποτικά πτερύγια με σερβοκινητήρες Savox

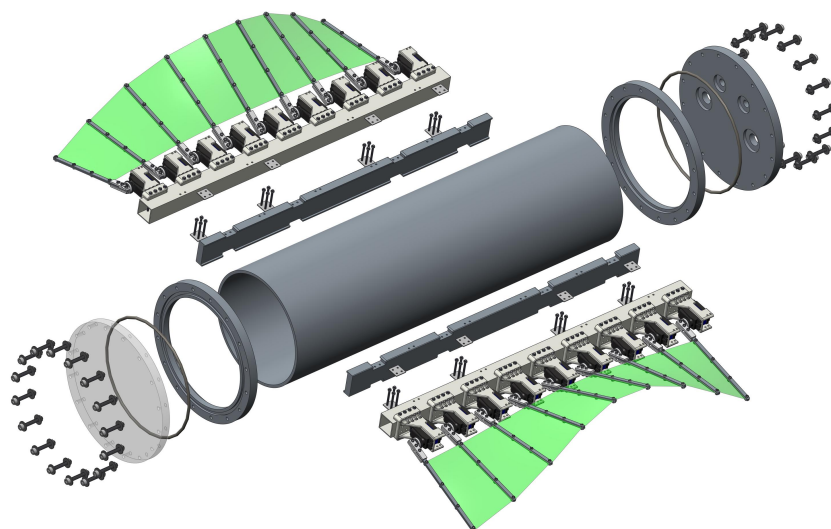
Στην πρώτη από τις δύο υλοποιήσεις του ρομποτικού πρωτότυπου, οι ακτίνες των πτερυγίων οδηγούνται από τους ίδιους R/C σερβοκινητήρες (μοντέλο SW-1210SG της εταιρίας Savox) που χρησιμοποιήθηκαν στο πρωτότυπο SQUIDBOT-mini. Βασικό πλεονέκτημα αυτής της υλοποίησης είναι το γεγονός ότι εφόσον οι σερβοκινητήρες είναι αδιάβροχοι, η σχεδίαση και κατασκευή του μηχανισμού πτερυγίου είναι σχετικά απλή.

Στο Σχήμα 5.6 απεικονίζεται το σχέδιο CAD του ρομποτικού πρωτότυπου σε αποσυναρμολογημένη όψη, όπου φαίνονται τα επιμέρους εξαρτήματα που απαρτίζουν την κατασκευή και ο τρόπος συναρμολόγησής τους. Πιο συγκεκριμένα, επικεντρώνοντας στους μηχανισμούς των πτερυγίων, για τη συναρμολόγηση της μονάδας κίνησης ακτίνας στη ράγα στήριξης χρησιμοποιούνται ατέρμονες κοχλίες σε συνδυασμό με περικόχλια, οι οποίοι συγκρατούν τις βάσεις των επενεργητών όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7a, για συναρμολόγηση των μονάδων κίνησης ακτίνας σε διάταξη εν σειρά. Επίσης, στο Σχήμα 5.7b φαίνεται ο τρόπος στήριξης του μηχανισμού πτερυγίου στο πλευρικό βοηθητικό εξάρτημα του κότους. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται και κάποια κατάλληλα κατασκευασμένα συνδεδετικά τεμάχια τετράγωνου σχήματος, σε συνδυασμό με ατέρμονες κοχλίες και περικόχλια.

Για την όδευση των καλωδίων των σερβοκινητήρων στο εσωτερικό του κότους είναι απαραίτητη η αδιαβροχοποιημένη προέκτασή τους, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 3.2.2. Η ίδια η μέθοδος όδευσης αναλύεται σε επόμενη ενότητα.

Από το συγκεκριμένο σχέδιο που εμφανίζεται στο Σχήμα 5.6, για λόγους απλοποίησης της απεικόνισης, απουσιάζει η νυκτική κύστη και τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα από το εσωτερικό του σκάφους.



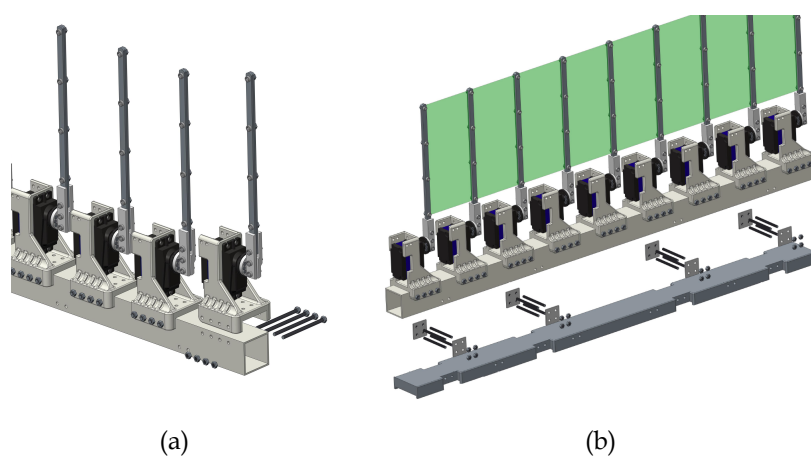


Σχήμα 5.6: Το σχέδιο CAD του ρομποτικού οχήματος SQUIDBOT σε αποσυναρμολογημένη όψη.

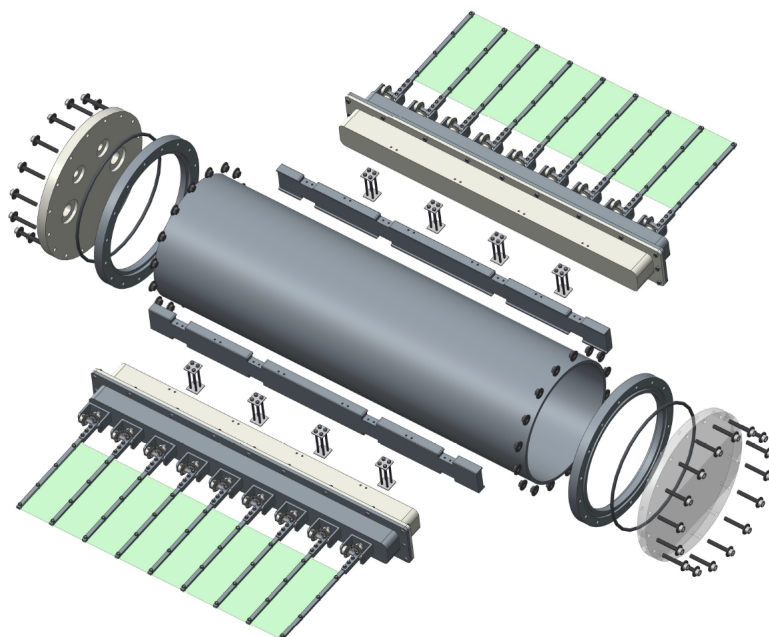
### 5.1.2 Σχεδίαση-B: Ρομποτικά πτερύγια με σερβοκινητήρες Herkulex

Στη δεύτερη εναλλακτική υλοποίηση του ρομποτικού πρωτότυπου SQUIDBOT, οι ακτίνες των πτερυγίων οδηγούνται από τους "έξυπνους" σερβοκινητήρες (μοντέλο Herkulex DRS-201 της εταιρίας Dongbu) που χρησιμοποιήθηκαν στο μεμονωμένο ρομποτικό πτερύγιο του Κεφαλαίου 2 (τα βασικά χαρακτηριστικά των σερβοκινητήρων αυτών παρουσιάζονται στην Ενότητα 2.3). Το γεγονός ότι αυτοί οι σερβοκινητήρες δεν είναι αδιάβροχοι, κάνει απαραίτητη την εύρεση εναλλακτικών προσεγγίσεων για προστασία τους από το νερό. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν υδατοστεγή διαμερίσματα, το καθένα από τα οποία θα φιλοξενεί όλους τους σερβοκινητήρες ενός πτερυγίου. Η αρθρωτή (modular) σχεδίαση του οχήματος επιτρέπει το σχεδιασμό και την κατασκευή του πτερυγίου ως αυτόνομου μηχανισμού, με μόνη προϋπόθεση να μπορεί να συναρμολογηθεί στη ράγα στήριξης που διαθέτει το κύτος πλευρικά.

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται το σχέδιο CAD του ρομποτικού οχήματος σε αποσυναρμολο-



Σχήμα 5.7: Μοντέλο CAD του ρομποτικού πτερυγίου: (a) Συναρμολόγηση μονάδας κίνησης ακτίνας στη ράγα στήριξης, (b) Συναρμολόγηση πτερυγίου στην πλευρική ράγα στήριξης του κύτους.



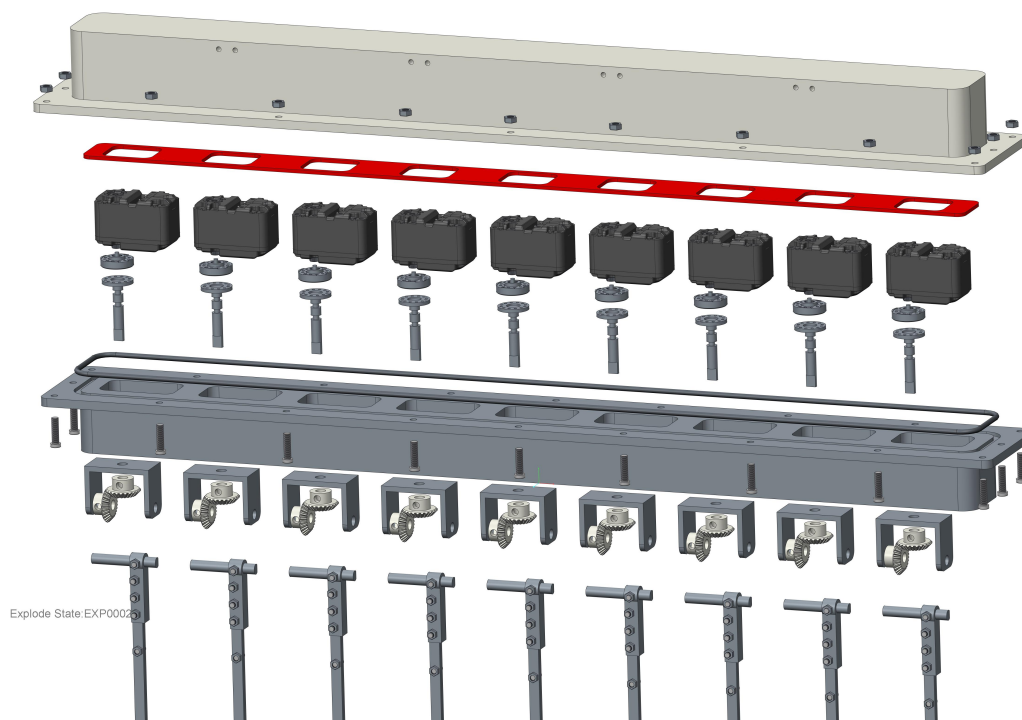
Σχήμα 5.8: Το σχέδιο CAD του ρομποτικού οχήματος SQUIDBOT σε αποσυναρμολογημένη όψη.

γημένη όψη. Όπως και στην Ενότητα 5.1.1, η στερέωση των μηχανισμών πτερυγίου στις πλευρικές ράγες στήριξης γίνεται μέσω ειδικά κατασκευασμένων συνδετικών εξαρτημάτων σε συνδυασμό με ατέρμονες κοχλίες και περικόχλια.

Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζεται το σχέδιο CAD του ρομποτικού πτερυγίου, για τη Σχεδίαση-B, σε αποσυναρμολογημένη όψη. Το διαμέρισμα που φιλοξενεί τους σερβοκινητήρες απαρτίζεται από δύο κύρια μέρη, τα οποία συγκρατούνται μεταξύ τους με ανοξείδωτα μπουλόνια και περικόχλια, ενώ στο ένα εκ των δύο προβλέπεται η διαμόρφωση κατάλληλης εσοχής για o-ring που θα στεγανώνει τη σύνδεση. Ο κάθε σερβοκινητήρας θα τοποθετείται σε ειδικά διαμορφωμένη εσοχή, στο κάτω μέρος της οποίας υπάρχει οπή για την έξοδο του άξονά του.

Πριν τη συναρμολόγηση των σερβοκινητήρων στο σασί, προηγείται η συναρμολόγηση ενός εξαρτήματος προέκτασης στον άξονα του κινητήρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10a. Στο Σχήμα 5.10b φαίνεται η μονάδα κίνησης της ακτίνας, συναρμολογημένη στο σασί του υδατοστεγούς διαμερίσματος. Το εξάρτημα προέκτασης διαθέτει κατάλληλες εσοχές για δύο o-ring στεγάνωσης. Τέλος, για τη μετάδοση της κίνησης στις ακτίνες και την επίτευξη της κατάλληλης διάταξης αυτών, χρησιμοποιείται ζεύγος κωνικών οδοντωτών τροχών με σχέση μετάδοσης 1 : 1. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης της κίνησης αλλά και η συγκεκριμένη διάταξη των σερβοκινητήρων μέσα στο υδατοστεγές διαμέρισμα, επιλέχθηκαν λόγω της ευκολίας και αποτελεσματικότητας που παρέχουν όσον αφορά στη στεγάνωση των κινούμενων εξαρτημάτων του μηχανισμού.

Μετά τη συναρμολόγηση όλων των σερβοκινητήρων στο εμπρόσθιο μέρος του σασί, συναρμολογείται στην πίσω πλευρά τους ένα βοηθητικό εξάρτημα συγκράτησης (εικονίζεται με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 5.9), το οποίο διαθέτει οπές για τα καλώδια των σερβοκινητήρων. Όταν τα δύο μέρη του υδατοστεγούς διαμερίσματος είναι συνδεδεμένα, το βοηθητικό εξάρτημα έρχεται σε επαφή τόσο με την πίσω πλευρά των σερβοκινητήρων, αλλά και με ειδικά διαμορφωμένη προεξοχή στο εσωτερικό του δεύτερου μέρους του σασί (Σχήμα 5.10b).

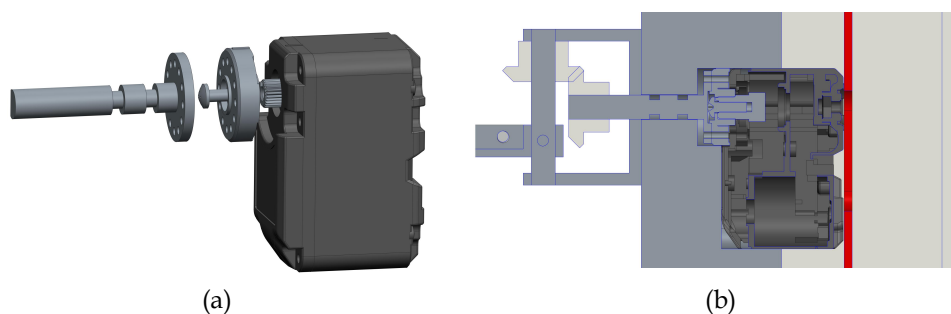


Σχήμα 5.9: Το σχέδιο CAD του ρομποτικού πτερυγίου σε αποσυναρμολογημένη όψη.

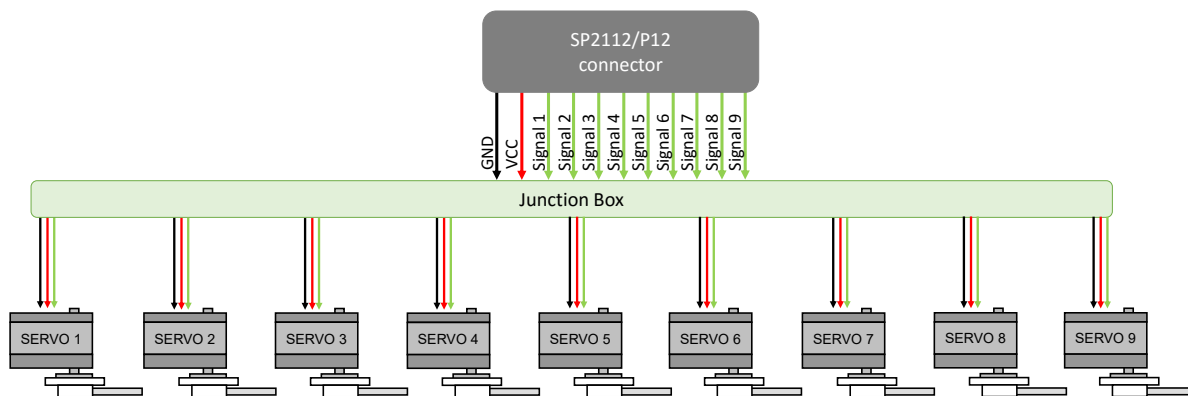
### 5.1.3 Συμβατότητα μεταξύ των δύο υλοποιήσεων - Όδεση αγωγών

Ένα ζήτημα που προκύπτει από την απαίτηση συμβατότητας του κύτους με δύο διαφορετικούς τύπους μηχανισμού πτερυγίου, είναι η όδεση των καλωδίων των επενεργητών στο εσωτερικό του. Αυτή πραγματοποιείται μέσω κατάλληλου βύσματος σασί SP2112/S12 και κονέκτορα SP2111/P12 της εταιρίας Weipu.

Στην περίπτωση της Σχεδίασης-A, οι χρησιμοποιούμενοι R/C σερβοκινητήρες διαθέτουν τρεις αγωγούς έκαστος, δύο για την τροφοδοσία τους και έναν για το σήμα ελέγχου, με το σύνολο για κάθε πτερόγιο να ανέρχεται στους 27 αγωγούς. Η καλωδίωση μπορεί να απλοποιηθεί αν μεταξύ των σερβοκινητήρων και του κονέκτορα μεσολαβεί κυτίο κόμβων διασύνδεσης (junction box), όπου θα διακλαδώνονται οι αγωγοί τροφοδοσίας. Με αυτό τον τρόπο, ο κονέκτορας θα πρέπει να εξυπηρετεί συνολικά 11 αντί για 27 αγωγούς, 9 για τη μεταφορά των



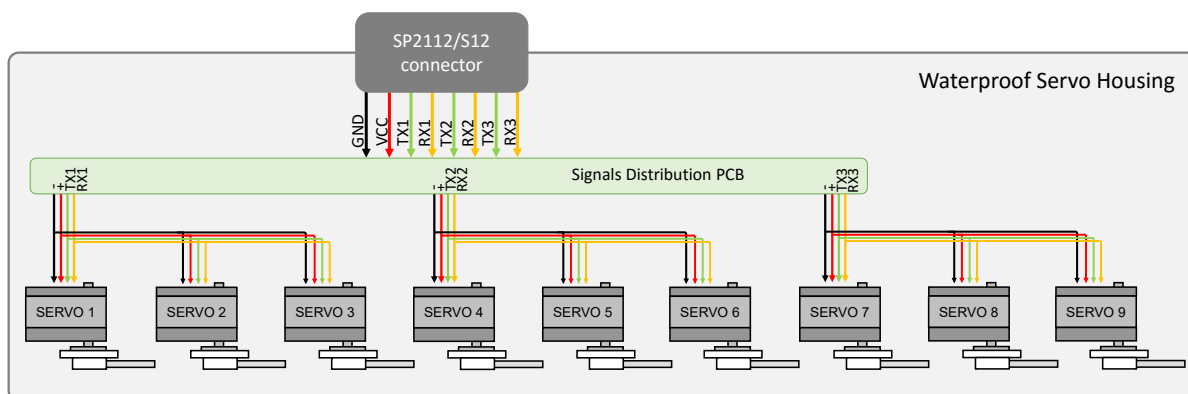
Σχήμα 5.10: Μοντέλο CAD της μονάδας κίνησης ακτίνας: (a) Συναρμολόγηση μονάδας κίνησης ακτίνας, (b) Η μονάδα κίνησης ακτίνας συναρμολογημένη στο υδατοστεγές διαμέρισμα (όψη σε τομή).



Σχήμα 5.11: Σχεδιάγραμμα καλωδίωσης σερβοκινητήρων ενός πτερυγίου για τη Σχεδίαση Α.

σημάτων ελέγχου και 2 για την τροφοδοσία.

Για τη Σχεδίαση-B, όπου οι ακτίνες οδηγούνται από τους σερβοκινητήρες Herkulux, αυτό το σημείο διαμοιρασμού των αγωγών μπορεί να βρίσκεται εντός του διαμερίσματος όπου θα τοποθετηθούν και οι ίδιοι οι σερβοκινητήρες. Σε αυτή την περίπτωση, ο κάθε σερβοκινητήρας διαθέτει τέσσερις αγωγούς, δύο για τη μεταφορά πληροφοριών και δύο για τροφοδοσία. Αν χρησιμοποιηθεί η ίδια συνδεσμολογία με αυτή του πτερυγίου της Ενότητας 2 (Σχήμα 2.9), με χρήση τριών σειριακών διαύλων ανά πτερόνιο, ο συνολικός αριθμός των αγωγών που θα πρέπει να συνδεθούν στον κονέκτορα θα είναι 8, δύο για την τροφοδοσία όλων των σερβοκινητήρων, και δύο ανά δίαυλο για τη μεταφορά δεδομένων.



Σχήμα 5.12: Σχεδιάγραμμα καλωδίωσης σερβοκινητήρων ενός πτερυγίου για τη Σχεδίαση Β.

## Κεφάλαιο 6

# Σχόλια, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εξέλιξη

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη μιας σειράς από διατάξεις και πρωτότυπα για τη μελέτη των χαρακτηριστικών πρόωσης των πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης, και τη διερεύνηση των προοπτικών εφαρμογής των μηχανισμών αυτών σε υποβρύχια οχήματα. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μελέτες αυτές, καθώς επίσης και μια σειρά από προτάσεις για περαιτέρω βελτιώσεις και αναβαθμίσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν στις πειραματικές διατάξεις.

### 6.1 Σχόλια και συμπεράσματα

Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει από την πειραματική αποτίμηση των διατάξεων και των ρομποτικών πρωτοτύπων που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αφορά στην επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας των μηχανικών πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης για την παραγωγή προωστικών δυνάμεων.

Ειδικότερα, κατά το πρώτο στάδιο εκπόνησης της παρούσας εργασίας, αναπτύχθηκαν δύο πρωτότυπα μεμονωμένων μηχανισμών πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης (Ενότητα 2), οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μια σειρά σημαντικών βελτιώσεων σε σχέση με τα προηγούμενα πρωτότυπα που είχαν αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής του ΤΕΙ Κρήτης. Οι βελτιώσεις αυτές απορρέουν πρωτίστως από την χρησιμοποίηση σερβοκινητήρων με αυξημένα αποθέματα διαθέσιμης ροπής για την οδήγηση των ακτίνων, αλλά και από την ανάπτυξη μιας προηγμένης αρχιτεκτονικής για τον έλεγχο κίνησης του μηχανισμού, η οποία παρέχει τη δυνατότητα σχεδίασης και υλοποίησης ελεγκτών που αξιοποιούν μοντέλα του συστήματος (model-based design). Εκτιμάται ότι τα εν λόγω χαρακτηριστικά κατατάσσουν τα πρωτότυπα που αναπτύχθηκαν ανάμεσα στις πλέον εξελιγμένες, διεθνώς, πλατφόρμες μελέτης και βελτιστοποίησης των μηχανισμών πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης.

Οι μεμονωμένοι μηχανισμοί πτερυγίου χρησιμοποιήθηκαν σε μια σειρά από αρχικές πειραματικές μελέτες για την επίδραση των διαφόρων κινηματικών παραμέτρων της κυμάτωσης του πτερυγίου στην παραγωγή πρόωσης (Ενότητα 2.8) αλλά και για την αποτελεσματικότητα των model-based ελεγκτών (Ενότητα 2.9). Από την πειραματική διαδικασία συμπεραίνεται ότι η μεταβολή των κινηματικών παραμέτρων σχετίζεται άμεσα με την παραγωγή προωστικών δυνάμεων αλλά και την ενεργειακή κατανάλωση του μηχανισμού. Ειδικότερα, η ανάλυση των

σχετικών δεδομένων αποκαλύπτει ότι η παραγόμενη ώση αυξάνεται με τη συχνότητα και το πλάτος της εκτελούμενης ταλάντωσης των ακτίνων του πτερυγίου, ενώ παρουσιάζει μια πιο σύνθετη εξάρτηση σε σχέση με το μήκος κύματος. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν προηγούμενες μελέτες [54, 62], αναδεικνύοντας όμως, επιπρόσθετα, την επέκταση του εύρους των κινηματικών παραμέτρων ορθής υλοποίησης της κυμάτωσης, ένεκα των βελτιώσεων του πρωτοτύπου, που αναφέρονται παραπάνω.

Ένα επιπλέον συμπέρασμα που προκύπτει από αυτό το πρώτο στάδιο της εργασίας σχετίζεται με τη μέθοδο υπολογισμού των επιθυμητών προφίλ κίνησης των ακτίνων του πτερυγίου. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, αλλά και κατά τη μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων, έγινε εμφανής η χρησιμότητα του συστήματος CPG που χρησιμοποιήθηκε (Ενότητα 2.6.2), βασικό πλεονέκτημα του οποίου είναι οι ομαλές μεταβάσεις μεταξύ διαφορετικών μοτίβων κυμάτωσης του πτερυγίου.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την αποτίμηση των μηχανισμών πτερυγίου, παρείχαν τις βασικές κατευθυντήριες για την ανάπτυξη του υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος SQUIDBOT-mini, το οποίο ενσωματώνει ένα ζεύγος, πλευρικά τοποθετημένων, πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης. Κάθε πτερύγιο απαρτίζεται από τρεις συνολικά ακτίνες, οδηγούμενες από ισάριθμους αδιάβροχους σερβοκινητήρες. Η διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής του εν λόγω πρωτοτύπου, ανέδειξε μια σειρά από χρήσιμες τεχνικές και μεθοδολογίες για την εξασφάλιση της στεγάνωσης του κύτους και των διαφόρων περιφερειακών εξαρτημάτων (Ενότητα 3.2.2).

Βασικό χαρακτηριστικό του πρωτοτύπου SQUIDBOT-mini είναι η ικανότητα αυτόνομης λειτουργίας, η οποία έχει επιτευχθεί μέσω της σχεδίασης του λογισμικού, σε συνδυασμό με τη χρήση ενός αισθητηρίου προσανατολισμού του οχήματος στο χώρο (μονάδα IMU/AHRS), μιας μονάδας ασύρματης διασύνδεσης και επαναφορτιζόμενου συσσωρευτή για την τροφοδοσία των ηλεκτρονικών. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκαν επίσης μια σειρά από ελεγκτές κλειστού βρόχου, οι οποίοι, αξιοποιώντας τα δεδομένα της μονάδας AHRS, παρέχουν ακριβή έλεγχο της κατεύθυνσης του οχήματος για κίνηση στο επίπεδο και επιτόπιες περιστροφές. Οι ελεγκτές αυτοί λειτουργούν συνδυαστικά με ένα σύστημα ζεύγους διασυνδεδεμένων CPGs, μετεξέλιξη αυτού που χρησιμοποιείται στα μεμονωμένα πτερύγια, μέσω του οποίου παράγονται τα προφίλ κυμάτωσης των δύο πτερυγίων του οχήματος.

Η πειραματική αποτίμηση του οχήματος (Ενότητα 4.3), ανέδειξε την επίδραση των κινηματικών παραμέτρων των πτερυγίων στην κίνησή του, τόσο όσον αφορά στην παραγωγή πρόωσης, αλλά και στον έλεγχο προσανατολισμού του οχήματος. Ειδικότερα, σημειώνεται ότι η μέγιστη ταχύτητα πρόωσης που επιτεύχθηκε με το όχημα ανέρχεται σε περίπου 0.24 m / s. Επίσης, από τη διερεύνηση των στρατηγικών ελέγχου που μελετήθηκαν, συμπεραίνεται η αδυναμία των ελεγκτών ανοικτού βρόχου (Ενότητα 4.3.1) να εξασφαλίσουν ακριβή κίνηση και έλεγχο του προσανατολισμού, σε αντίθεση με την πολύ καλή απόκριση που προσδίδουν στο σύστημα οι ελεγκτές κλειστού βρόχου (Ενότητες 4.3.2, 4.3.3).

Τα ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα από την πειραματική αποτίμηση του πρωτοτύπου SQUIDBOT-mini, οδήγησαν στο σχεδιασμό ενός δεύτερου, μεγαλύτερων διαστάσεων, ρομποτικού οχήματος (Ενότητα 5). Ένα βασικό χαρακτηριστικό του οχήματος αυτού είναι η συμβατότητα του κεντρικού κύτους με δύο μηχανισμούς πτερυγίου που χρησιμοποιούν διαφορετικού τύπου σερβοκινητήρες. Επιπλέον, στο σχεδιασμό του οχήματος έχει συμπεριληφθεί

η ύπαρξη μηχανισμού για δυναμική ρύθμιση της πλευστότητας (νυκτική κόστη).

## 6.2 Μελλοντική εξέλιξη

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται μια σειρά από βελτιώσεις/αναβαθμίσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν στις πειραματικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, αλλά και προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη της έρευνας που διενεργήθηκε με αυτές.

Αναφορικά με τους μεμονωμένους μηχανισμούς πτερυγίου, προτείνεται η περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης στην παραγόμενη ώση, κάποιων κατασκευαστικών παραμέτρων της διάταξης, όπως το μήκος των ακτίνων, η μεταξύ τους απόσταση, καθώς επίσης και το ύψος της μεμβράνης. Επιπρόσθετα, μπορεί να διερευνηθεί η παραγωγή πρόωσης με άλλους τύπους ακτίνων, όπως αρθρωτές ή εύκαμπτες. Οι μελέτες αυτές, οι οποίες αναμένεται να παρέχουν ιδιαίτερα χρήσιμες πληροφορίες, είναι σχετικά εύκολο να πραγματοποιηθούν με την υφιστάμενη σχεδίαση. Επιπρόσθετα, η αρχιτεκτονική ελέγχου που έχει αναπτυχθεί μπορεί να υποστηρίξει μεταβλητό αριθμό ακτίνων, έως και 12 συνολικά, για την ανάλυση της επίδρασης και αυτής της παραμέτρου.

Μια βελτίωση που προτείνεται για τα πρωτότυπα αυτά, είναι η εξασφάλιση της προστασίας των επενεργητών Herkulex DRS-201 από το νερό, ενδεχομένως μέσω της ενσωμάτωσής τους σε υδατοστεγές περίβλημα, αντίστοιχο με αυτό που έχει σχεδιαστεί για χρήση των εν λόγω σερβοκινητήρων στο υποβρύχιο όχημα SQUIDBOT. Το μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης έγκειται στην αδυναμία μεταβολής της απόστασης μεταξύ των ακτίνων.

Σχετικά με το υποβρύχιο ρομποτικό όχημα SQUIDBOT-mini, και όσον αφορά στο λογισμικό και τις στρατηγικές ελέγχου, προτείνεται αρχικά, για την σχεδίαση καλύτερων/ διαφορετικών ελεγκτών, η μοντελοποίηση του συστήματος με σκοπό τη προσομοιωμένη διερεύνηση των χαρακτηριστικών του, χωρίς να είναι απαραίτητη η πειραματική διερεύνηση. Με τον τρόπο αυτό θα υπάρχει η δυνατότητα για προσομοίωση λειτουργιών/καταστάσεων που δεν είναι δυνατόν να εκτελεστούν στην, περιορισμένων διαστάσεων, δεξαμενή που παρέχεται στο Εργαστήριο Συστημάτων Ελέγχου και Ρομποτικής, με απώτερο σκοπό τη βελτιστοποίηση των προϋπαρχόντων ελεγκτών, αλλά και την ανάπτυξη νέων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής προωστικών δυνάμεων από τα πτερόγια στην κάθετη κατεύθυνση, προκειμένου να επιτυγχάνεται μεταβολή του επιχειρησιακού βάθους του οχήματος.

Για το εν λόγω όχημα προτείνονται επίσης μια σειρά από κατασκευαστικές βελτιώσεις, η πιο σημαντική από τις οποίες αφορά στη σχεδίαση του κύτους. Από την πειραματική διαδικασία που περιγράφεται στην Ενότητα 4, φαίνεται ότι το κυλινδρικό σχήμα του οχήματος δεν είναι το βέλτιστο υδροδυναμικά. Προτείνεται έτσι η αντικατάσταση του εμπρόσθιου επίπεδου καπακιού με καπάκι σχήματος θόλου, μια τροποποίηση που αναμένεται να μειώσει την υδροδυναμική αντίσταση που δέχεται κατά την κίνησή του προς τα εμπρός. Εναλλακτικά θα μπορούσε να διερευνηθεί η δυνατότητα σχεδίασης και κατασκευής ενός νέου κύτους για το όχημα αυτό, με λεπτό πεπλατυσμένο σχήμα, για ακόμα καλύτερα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, όσον αφορά στην παθητική ρύθμιση της ευστάθειας του οχήματος μπορεί να γίνει επαναφορά του κέντρου μάζας στο γεωμετρικό κέντρο της κατασκευής (Ενότητα 3.2), με αποτέλεσμα τη διευκόλυνση του δυναμικού ελέγχου του προσανατολισμού του οχήματος στο

χώρο.

Ένας βασικός περιορισμός που ανέδειξαν οι πειραματικές δοκιμές με το όχημα αυτό αφορά στην περιορισμένη εμβέλεια που παρέχει η ασύρματη ζεύξη bluetooth, λόγω της σημαντικής εξασθένησης που υφίστανται τα σήματα συχνότητας 2.4GHz εντός του νερού. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνεται η αντικατάσταση της μονάδας του bluetooth με άλλη μονάδα ασύρματης RF ζεύξης, χαμηλότερης συχνότητας λειτουργίας (για παράδειγμα, στα 433 MHz). Επιπρόσθετα, το πρωτότυπο θα μπορούσε να εξοπλιστεί με αισθητήρα πίεσης για την καταγραφή και ρύθμιση του βάθους πλεύσης, καθώς επίσης και με σύστημα μηχανικής όρασης (βασισμένο, για παράδειγμα, στον αισθητήρα CMUcam5 [63]) το οποίο θα υποστηρίζει εγγενώς τον εντοπισμό αντικειμένων για την πλοήγηση του σκάφους.

Η βασικότερη, όμως, πρόταση αφορά στην περάτωση της κατασκευής της αναβαθμισμένης και μεγαλύτερου μεγέθους εκδοχής του ρομποτικού οχήματος, του πρωτοτύπου SQUIDBOT που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5, το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτη των χαρακτηριστικών πρόωσης σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Όλες οι πειραματικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για τη συνέχιση της πειραματικής διερεύνησης των μηχανισμών πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης, αλλά και σαν εκπαιδευτικά εργαλεία. Ειδικότερα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν εκπαιδευτική πλατφόρμα σε μαθήματα αυτομάτου ελέγχου και ρομποτικής, προπτυχιακού και μεταπτυχιακού επιπέδου, αλλά και για την εκπόνηση πτυχιακών και διπλωματικών εργασιών.



# Βιβλιογραφία

- [1] P. Webb, "Maneuverability - general issues," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 547-555, 2004.
- [2] M. Sfakiotakis, D. Lane, and J. Davies, "Review of fish swimming modes for aquatic locomotion," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 24, no. 2, pp. 237-252, 1999.
- [3] D. S. Barrett, M. S. Triantafyllou, D. K. P. Yue, M. A. Grosenbaugh, and M. J. Wolfgang, "Drag reduction in fish-like locomotion," *J. Fluid Mech.*, vol. 392, pp. 183-212, 1999.
- [4] J. Anderson and N. Chhabra, "Maneuvering and stability performance of a robotic tuna," *Int. Compar. Biol.*, vol. 42, no. 1, pp. 118-126, 2002.
- [5] J. Liu, I. Dukes, and H. Hu, "Novel mechatronics design for a robotic fish," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, (Edmonton, Canada), pp. 807-812, 2005.
- [6] J. M. Kumph, M. S. Triantafyllou, D. Nugent, and M. Santos, "Fast-starting and maneuvering vehicles: Robopike and Robomuskie," in *Proc. 11th Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Tech.*, (Durham, USA), pp. 439-445, 1999.
- [7] P. Bandyopadhyay, "Trends in biorobotic autonomous undersea vehicles," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 30, no. 1, pp. 109-139, 2005.
- [8] F. E. Fish, G. V. Lauder, R. Mittal, A. H. Techet, and M. S. Triantafyllou, "Conceptual design for the construction of a biorobotic AUV based on biological hydrodynamics," in *Proc. 13th Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Tech.*, (Durham, USA), 2003. Aug. 24-27.
- [9] N. Kato, "Median and paired fin controllers for biomimetic marine vehicles," *Applied Mechanics Reviews*, vol. 58, no. 1-6, pp. 238-252, 2005.
- [10] N. Kato, "Control performance in the horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 121-129, 2000.
- [11] M. Narasimhan and S. Singh, "Adaptive optimal control of an autonomous underwater vehicle in the dive plane using dorsal fins," *Ocean Engineering*, vol. 33, no. 3-4, pp. 404-416, 2006.
- [12] S. Hsu, C. Mailey, E. Eade, and J. Janet, "Autonomous control of a horizontally configured undulatory flap propelled vehicle," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2, (Taipei, Taiwan), pp. 2194-2199, 2003.
- [13] B. Hobson, M. Murray, and C. A. Pell, "Pilotfish: Maximizing agility in an unmanned-underwater vehicle," in *Proc. 11th Int. Symp. Unmanned Untethered Submersible Tech.*, (Durham, USA), pp. 41-51, 1999.
- [14] M. S. Triantafyllou, A. H. Techet, and F. S. Hover, "Review of experimental work in biomimetic foils," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 585-594, 2004.
- [15] M. Sfakiotakis, D. M. Lane, and B. J. Davies, "An experimental undulating-fin device using the Parallel Bellows Actuator," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, (Seoul, Korea), pp. 2356-2362, 2001.

- [16] A. Willy and K. Low, "Initial experimental investigation of undulating fin," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, (Edmonton, Canada), pp. 1600–1605, 2005.
- [17] M. A. MacIver, E. Fontaine, and J. W. Burdick, "Designing future underwater vehicles: principles and mechanisms of the weakly electric fish," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 29, no. 3, pp. 651–659, 2004.
- [18] M. Epstein, J. E. Colgate, and M. A. MacIver, "A biologically inspired robotic ribbon fin," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, (Edmonton, Canada), 2005.
- [19] M. Epstein, J. E. Colgate, and M. A. MacIver, "Generating thrust with a biologically-inspired robotic ribbon fin," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, pp. 2412–2417, 2006.
- [20] A. Punning, M. Anton, M. Kruusmaa, and A. Aabloo, "A biologically inspired ray-like underwater robot with electroactive polymer pectoral fins," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Robotics (MechRob'04)*, vol. 2, pp. 241–245, 2004.
- [21] D. Zhang, D. Hu, L. Shen, and H. Xie, "Design of an artificial bionic neural network to control fish-robot's locomotion," *Neurocomput.*, vol. 71, no. 4-6, pp. 648–654, 2008.
- [22] D. Simons, M. M. C. Bergers, S. Henrion, J. I. J. Hulzenga, R. W. Jutte, W. M. G. Pas, M. Van Schravendijk, T. G. A. Vercruyssen, and A. P. Wilken, "A highly versatile autonomous underwater vehicle with biomechanical propulsion," in *Proc. OCEANS'09*, pp. 1–6, 2009.
- [23] M. J. Lighthill and R. W. Blake, "Biofluidynamics of balistiform and gymnotiform locomotion. 1. Biological background, and analysis by elongated-body theory," *J. Fluid Mech.*, vol. 212, pp. 183–207, 1990.
- [24] K. Low, "Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots," *Mech. Mach. Theory*, vol. 44, no. 3, pp. 615–632, 2009.
- [25] K. H. Low, C. Zhou, and Y. Zhong, "Gait planning for steady swimming control of biomimetic fish robots," *Adv. Robotics*, vol. 23, no. 7-8, pp. 805–829, 2009.
- [26] K. Low and A. Willy, "Biomimetic motion planning of an undulating robotic fish fin," *J. Vibr. Contr.*, vol. 12, no. 12, pp. 1337–1359, 2006.
- [27] M. Lamas, J. Rodriguez, C. Rodriguez, and P. Gonzalez, "Three-dimensional CFD analysis to study the thrust and efficiency of a biologically-inspired marine propulsor," *Polish Maritime Research*, vol. 18, no. 1, pp. 10–16, 2011.
- [28] O. Curet, N. Patankar, G. Lauder, and M. MacIver, "Mechanical properties of a bio-inspired robotic knifefish with an undulatory propulsor," *Bioinsp. & Biomim.*, vol. 6, no. 2, p. 026004, 2011.
- [29] C. Zhou and K. Low, "Design and locomotion control of a biomimetic underwater vehicle with fin propulsion," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 17, no. 1, pp. 25–35, 2012.
- [30] H. Xie and L. Shen, "Dynamic analysis on the bionic propulsor imitating undulating fin of aquatic animals," in *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Biomim.*, pp. 268–273, 2008.
- [31] M. Rahman, Y. Toda, and H. Miki, "Computational study on a squid-like underwater robot with two undulating side fins," *J. Bion. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 25–32, 2011.
- [32] M. Sfakiotakis, D. M. Lane, and B. J. Davies, "An experimental undulating-fin device using the parallel bellows actuator," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 2356–2362, 2001.
- [33] Z. Wang, G. Hang, Y. Wang, J. Li, and W. Du, "Embedded SMA wire actuated biomimetic fin: a module for biomimetic underwater propulsion," *Smart Materials and Structures*, vol. 17, no. 2, p. 025039, 2008.

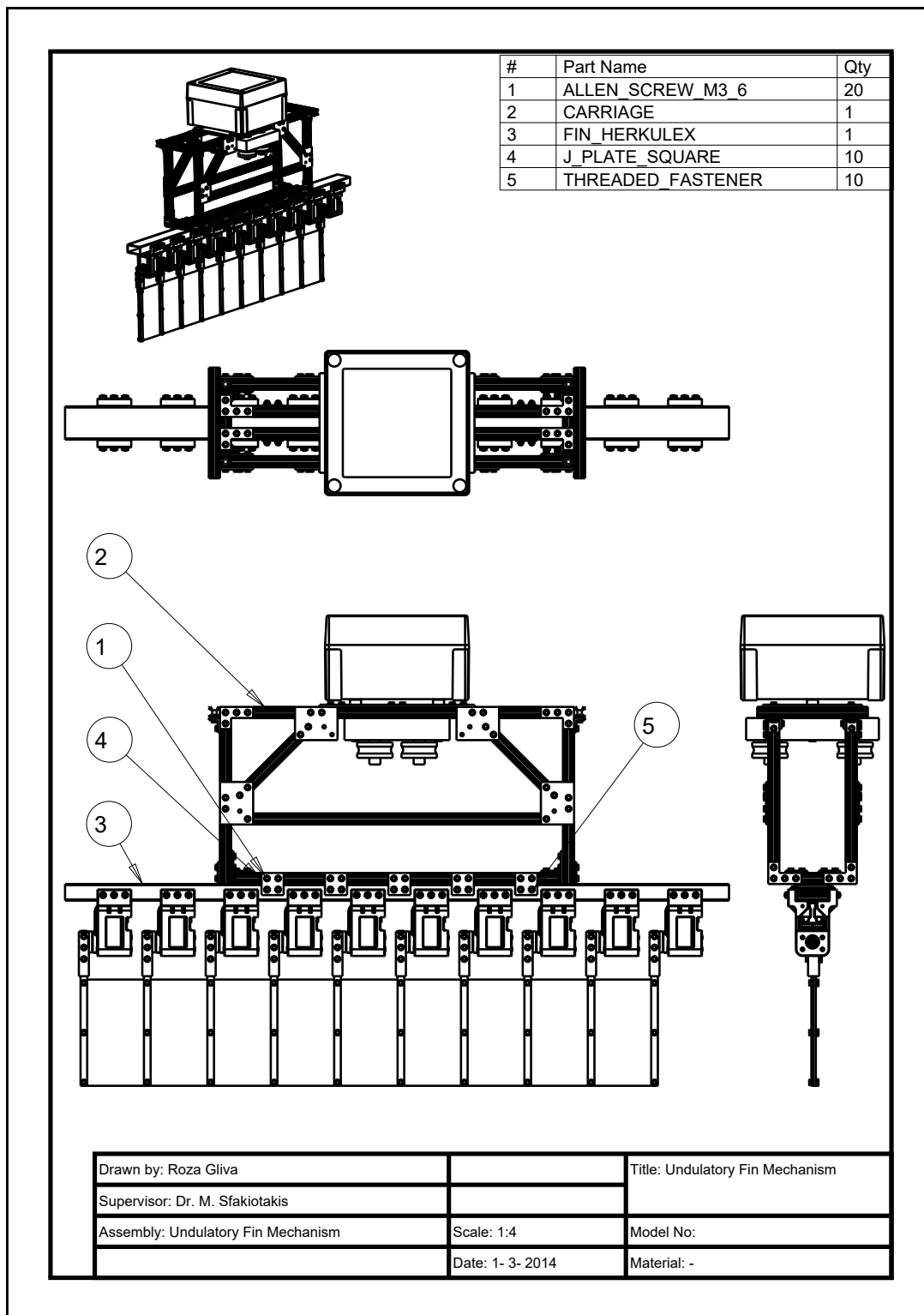
- [34] Y.-H. Zhang, J.-H. He, J. Yang, S.-W. Zhang, and K. Low, "A computational fluid dynamics (CFD) analysis of an undulatory mechanical fin driven by shape memory alloy," *Int. J. Autom. Comput.*, vol. 3, pp. 374–381, 2006.
- [35] Z. Chen, T. I. Um, and H. Bart-Smith, "A novel fabrication of ionic polymer-metal composite membrane actuator capable of 3-dimensional kinematic motions," *Sensor Actuat. A-Phys.*, vol. 168, no. 1, pp. 131–139, 2011.
- [36] C. Zhou and K.-H. Low, "Better endurance and load capacity: An improved design of manta ray robot (RoMan-II)," *J. Bion. Eng.*, vol. 7, Supplement, no. 0, pp. S137–S144, 2010.
- [37] N. Kato, Y. Ando, A. Tomokazu, H. Suzuki, K. Suzumori, T. Kanda, and S. Endo, "Elastic pectoral fin actuators for biomimetic underwater vehicles," in *Bio-mechanisms of Swimming and Flying* (N. Kato and S. Kamimura, eds.), pp. 271–282, Springer Japan, 2008.
- [38] K. Takagi, M. Yamamura, Z.-W. Luo, M. Onishi, S. Hirano, K. Asaka, and Y. Hayakawa, "Development of a rajiform swimming robot using ionic polymer artificial muscles," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, pp. 1861–1866, oct. 2006.
- [39] J. Buchholz, R. Clark, and A. Smits, "Thrust performance of unsteady propulsors using a novel measurement system, and corresponding wake patterns," *Experiments in Fluids*, vol. 45, no. 3, pp. 461–472, 2008.
- [40] V. Krylov and E. Porteous, "Wave-like aquatic propulsion of mono-hull marine vessels," *Ocean Engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 378–386, 2010.
- [41] V. Krylov and G. Pritchard, "Experimental investigation of the aquatic propulsion caused by localised flexural wave propagation in immersed wedges and plates," *Appl. Acoust.*, vol. 68, pp. 97–113, 2007.
- [42] Z. Chen, T. I. Um, J. Zhu, and H. Bart-Smith, "Bio-inspired robotic cownose ray propelled by electroactive polymer pectoral fin," *ASME Conference Proceedings*, vol. 2011, no. 54884, pp. 817–824, 2011.
- [43] L. Fang-Fang, Y. Can-Jun, X. Yan-Qing, and Y. Yin, "Initial development and experiments on a robotic fish with a novel undulating fin," pp. 1075–1078, 2008. cited By (since 1996) 0.
- [44] H. Xu, L. Lin, D. Zhang, and H. Xie, "Experimental study on the bionic undulate thruster driven by a hydraulic system," in *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Biomim.*, pp. 441–444, 2009.
- [45] S. Wang, X. Dong, and L.-J. Shang, "Thrust analysis of the undulating ribbon-fin for biomimetic underwater robots," in *Proc. 2nd Int. Conf. Intel. Control Inform.*, no. part 1, pp. 335–340, 2011.
- [46] B. Peter, R. Ratnaweera, W. Fischer, C. Pradalier, and R. Siegwart, "Design and evaluation of a fin-based underwater propulsion system," in *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pp. 3751–3756, may 2010.
- [47] L. Shang, S. Wang, M. Tan, and X. Dong, "Motion control for an underwater robotic fish with two undulating long-fins," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Decision and Control (CDC'09)*, pp. 6478–6483, 2009.
- [48] C. Zhou and K. H. Low, "Kinematic modeling framework for biomimetic undulatory fin motion based on coupled nonlinear oscillators," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, (Taipei, Taiwan), pp. 934–939, 2010. Oct. 18-22.
- [49] X. Dong, S. Wang, Z. Cao, and M. Tan, "CPG based motion control for an underwater thruster with undulating long-fin," in *Proc. 17th IFAC World Congress*, (Seoul, Korea), pp. 5433–5438, 2010. Jul. 6-11.

- [50] A. Sproewitz, R. Moeckel, J. Maye, and A. J. Ijspeert, "Learning to move in modular robots using central pattern generators and online optimization," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 27, no. 3-4, pp. 423-443, 2008.
- [51] D. Bing Zhang, D. W. Hu, L. C. Shen, and H. B. Xie, "A bionic neural network for fish-robot locomotion," *J. Bion. Eng.*, vol. 3, no. 4, pp. 187 - 194, 2006.
- [52] H. Zhou, T. Hu, H. Xie, D. Zhang, and L. Shen, "Computational and experimental study on dynamic behavior of underwater robots propelled by bionic undulating fins," *Science China Technological Sciences*, vol. 53, pp. 2966-2971, 2010.
- [53] L. Shang, S. Wang, and M. Tan, "Fuzzy logic PID based control design for a biomimetic underwater vehicle with two undulating long-fins," pp. 922-927, 2010. cited By (since 1996) 0.
- [54] M. Sfakiotakis, J. Fasoulas, M. M. Kavoussanos, and M. Arapis, "Experimental investigation and propulsion control for a bio-inspired robotic undulatory fin," *Robotica*, vol. 33, no. 5, pp. 1062-1084, 2015.
- [55] M. Sfakiotakis and J. Fasoulas, "Development and experimental validation of a model for the membrane restoring torques in undulatory fin mechanisms," in *Proc. IEEE Medit. Conf. on Control and Automation (MED'14)*, (Palermo, Italy), pp. 1540-1546, 2014.
- [56] M. Sfakiotakis, J. Fasoulas, and R. Gliva, "Dynamic modeling and experimental analysis of a two-ray undulatory fin robot," in *IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. (IROS'15)*, pp. 339-346, 2015.
- [57] C. Wang, G. Xie, L. Wang, and M. Cao, "CPG-based locomotion control of a robotic fish: Using linear oscillators and reducing control parameters via PSO," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 7, no. 7 B, pp. 4237-4249, 2011.
- [58] "Robottini: Little robots with arduino (dongbu herkulex arduino library)." <http://robottini.altervista.org/category/dongbu-herkulex>. Accessed: 2013.
- [59] M. Arapis, "Development of experimental setup corrugated fin motion," undergraduate thesis, Technological Educational Institute of Crete, 2013.
- [60] "Metric o-ring gland dimensions." [http://www.allorings.com/gland\\_metric.htm](http://www.allorings.com/gland_metric.htm). Accessed: 2015-12-01.
- [61] *Anderson Seal O-Ring Guide*. New Berlin, WI.: The Anderson Group, 2008-2009. Available online at: <http://www.andersonseal.com/wp-content/uploads/2008/09/o-ring-guide.pdf>.
- [62] M. Sfakiotakis, M. Arapis, N. Spyridakis, and J. Fasoulas, "Development and experimental evaluation of an undulatory fin prototype," in *Proc. RAAD'13*, (Portoroz, Slovenia), pp. 280-287, 2013.
- [63] "Cmucam5 pixy." <http://cmucam.org/projects/cmucam5/wiki>. Accessed: 2016.

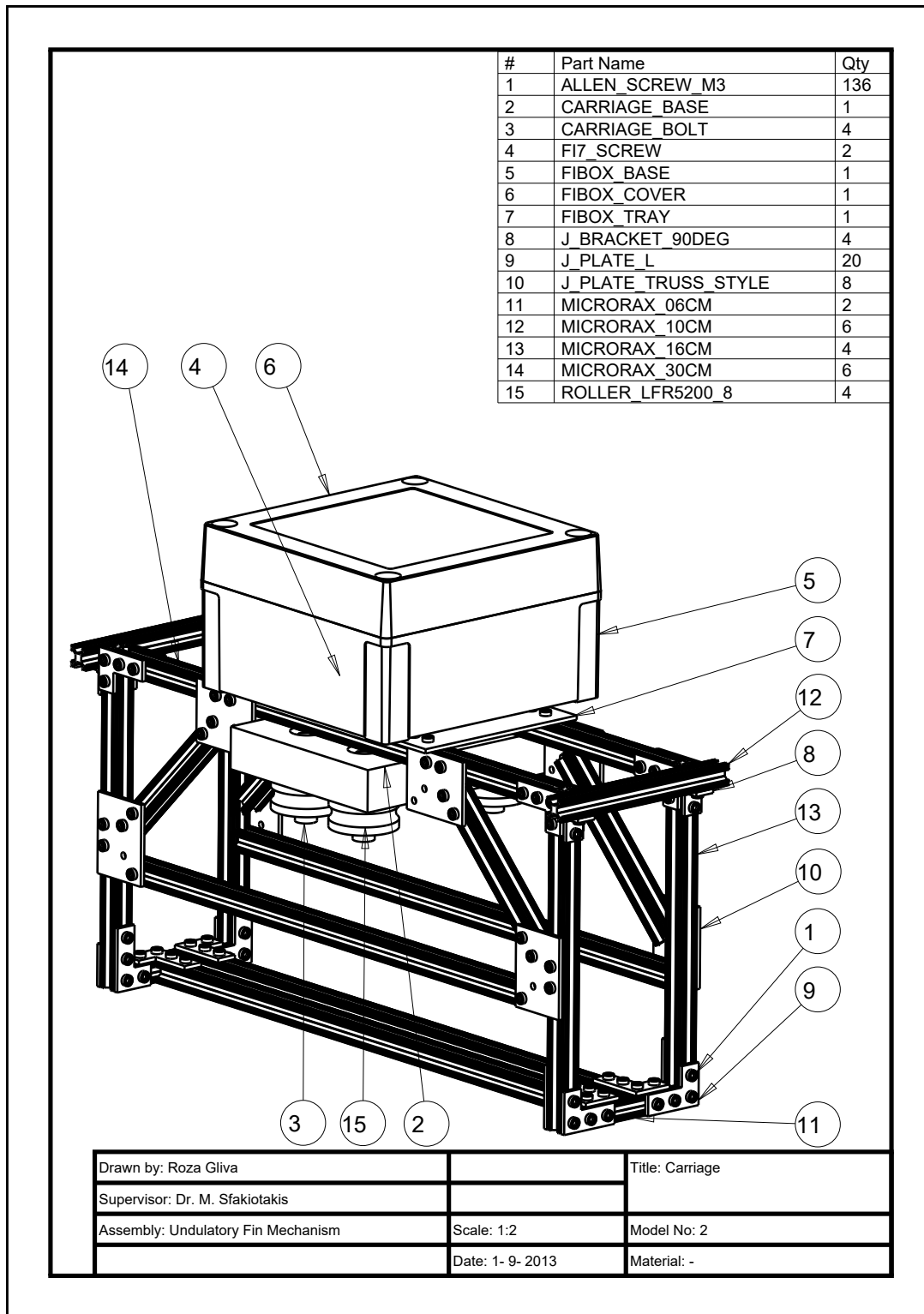
# Παράρτημα

## A Τεχνικά στοιχεία του πρωτότυπου ρομποτικού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης

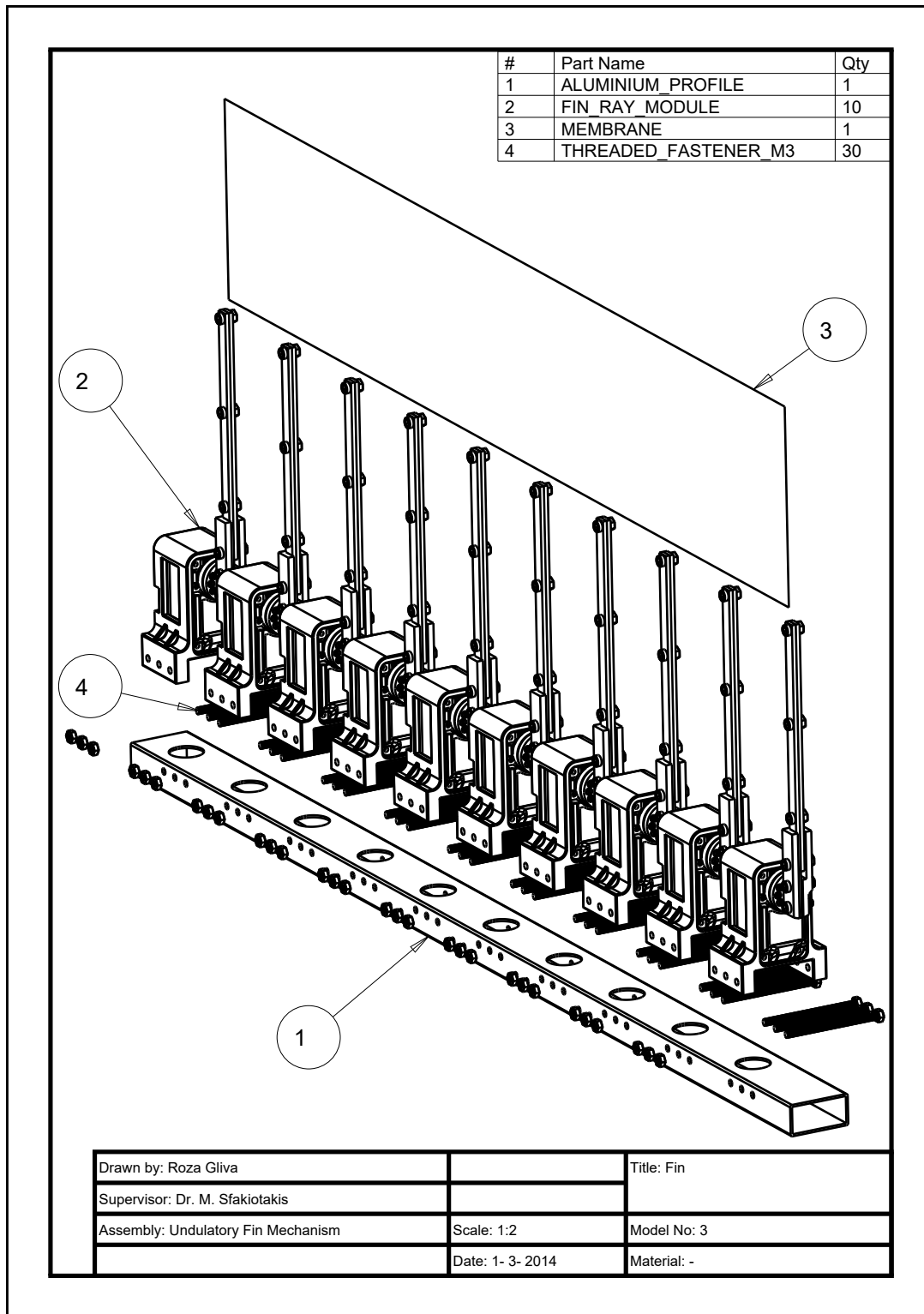
### A.1 Μηχανολογικά σχέδια ρομποτικού πτερυγίου



Σχήμα 1: Το μηχανολογικό σχέδιο του ρομποτικού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης.

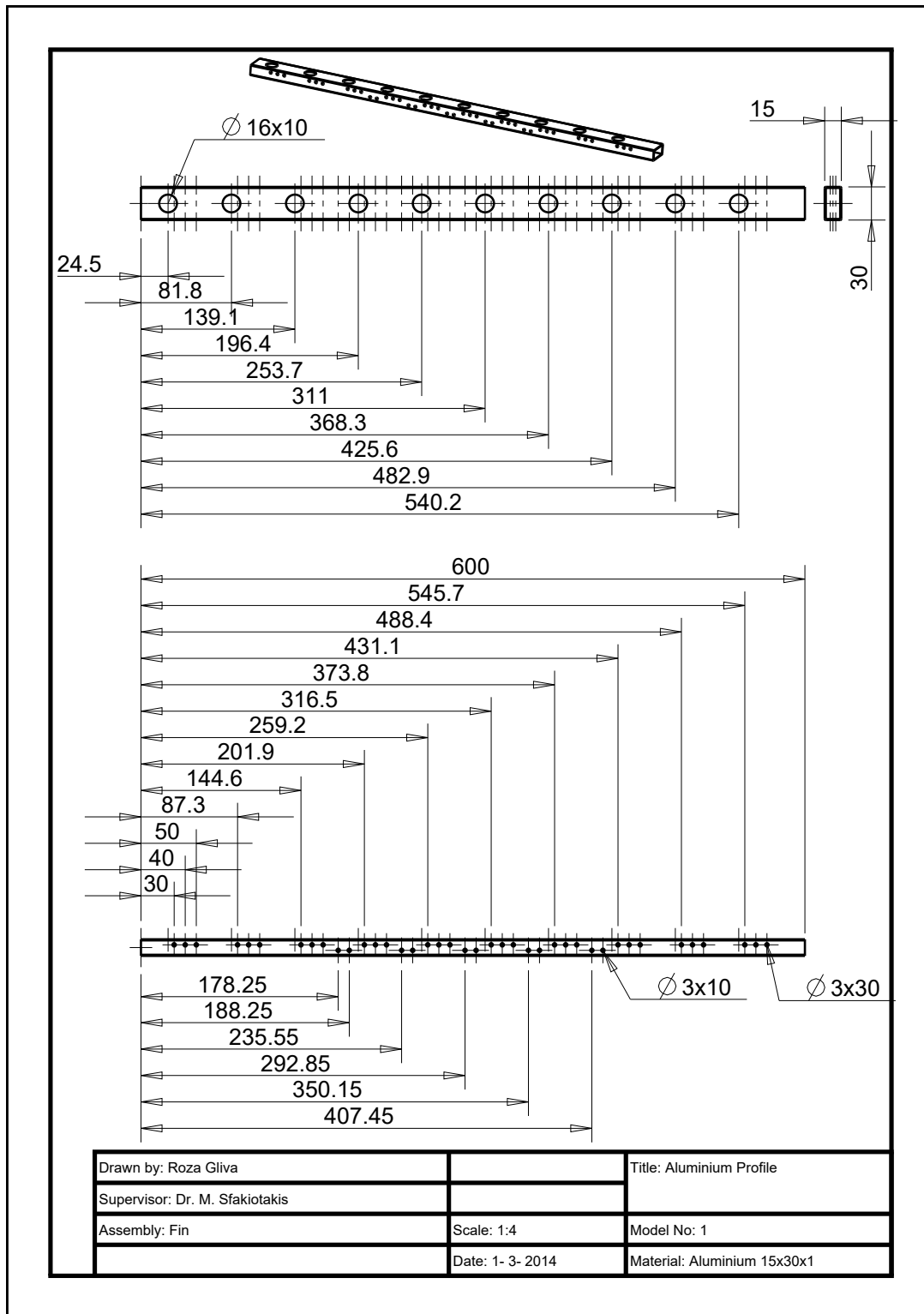


Σχήμα 2: Το μηχανολογικό σχέδιο του ολοκληρωμένου φορείου που χρησιμοποιείται για την ανάρτηση του μηχανισμού του πτερυγίου.

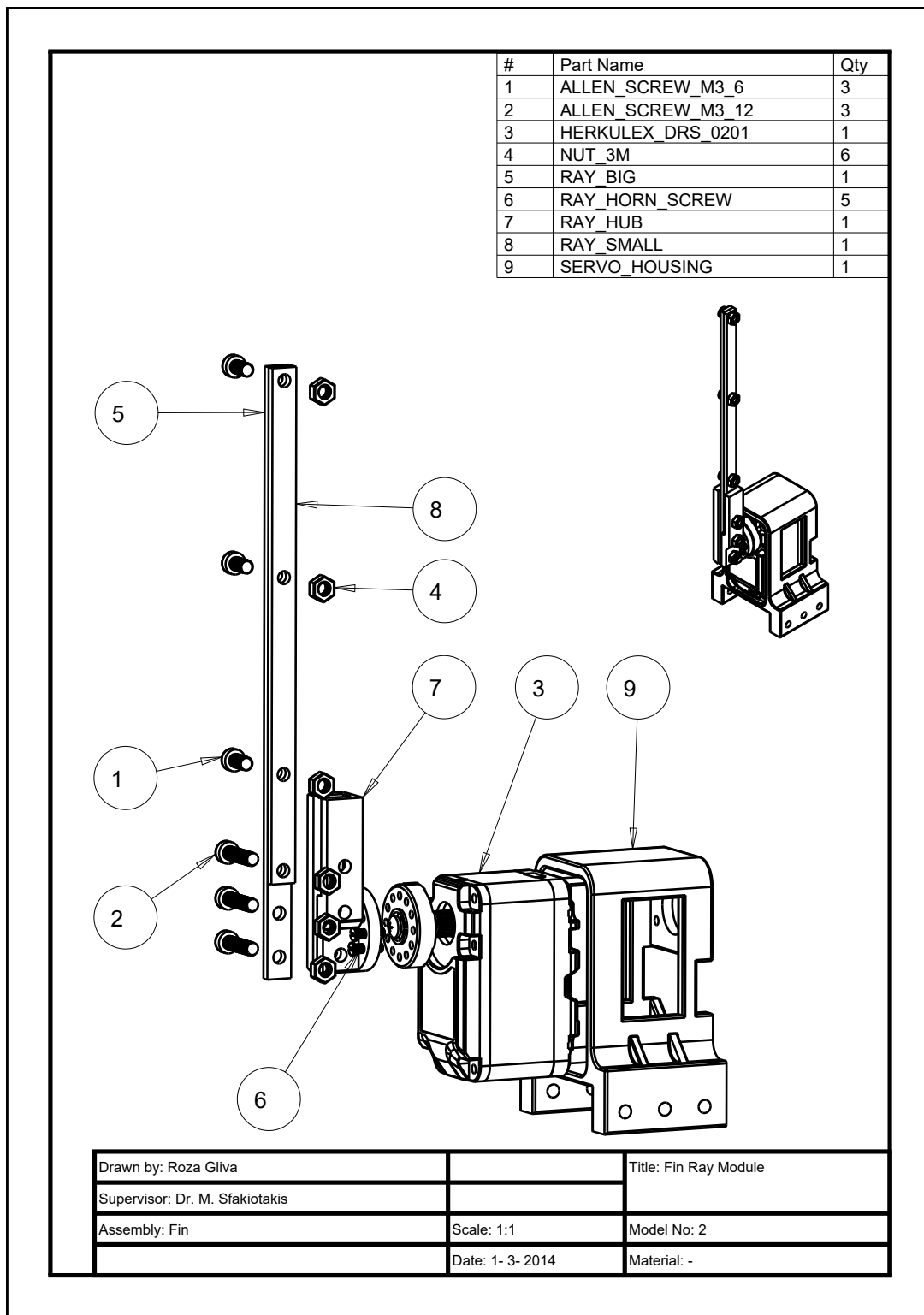


Σχήμα 3: Το μηχανολογικό σχέδιο του ολοκληρωμένου φορείου που χρησιμοποιείται για την ανάρτηση του μηχανισμού του πτερυγίου.

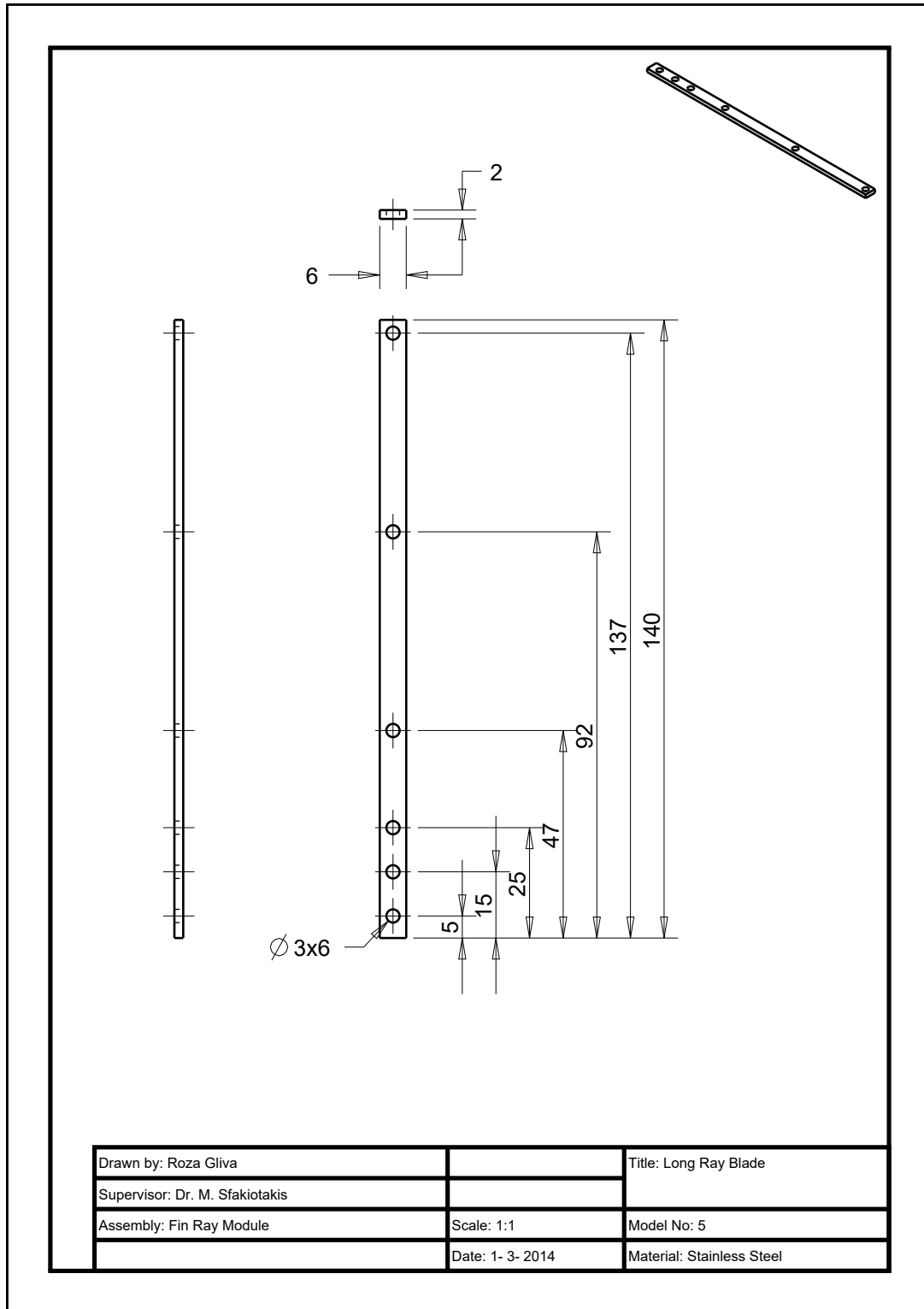




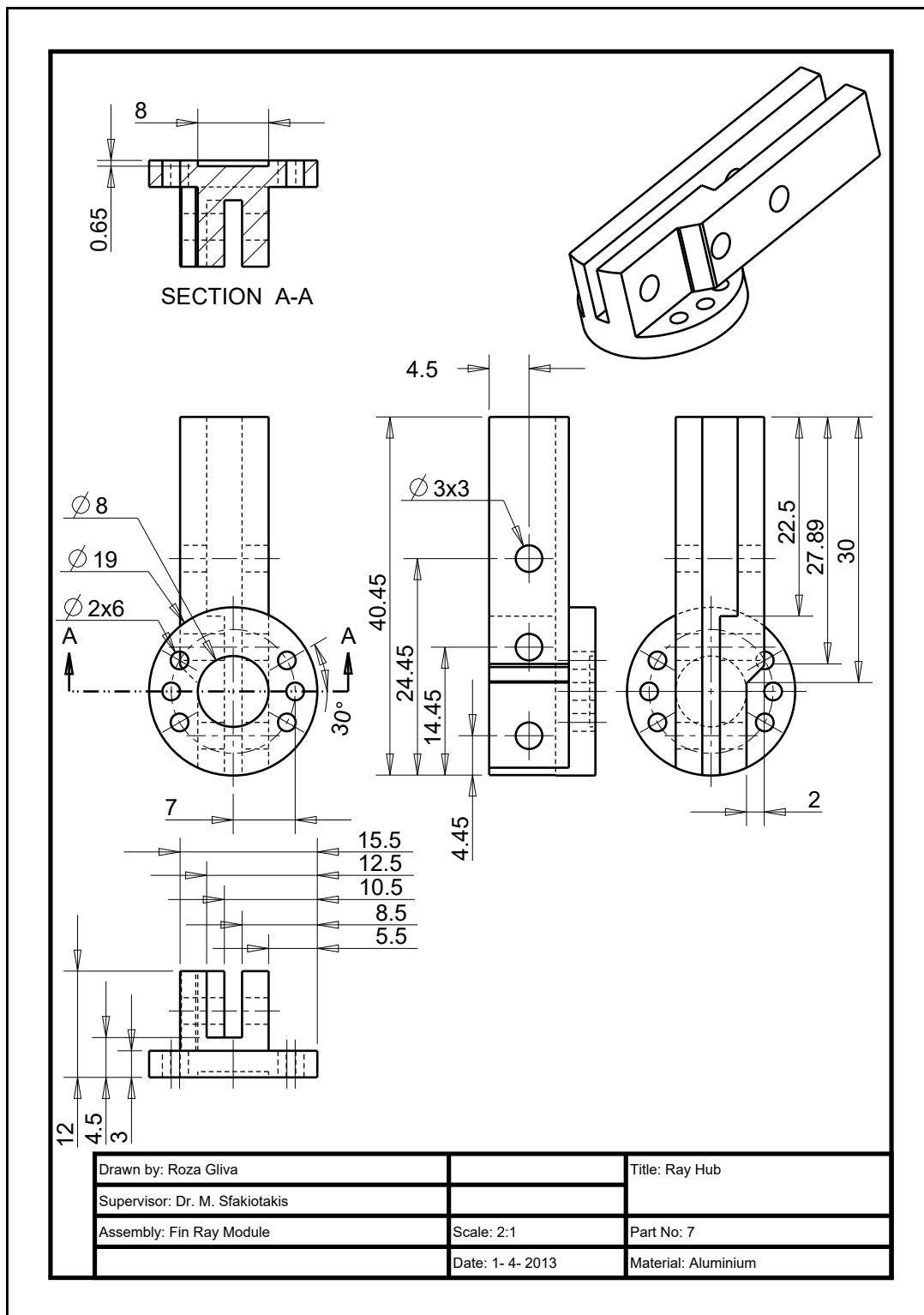
Σχήμα 4: Το μηχανολογικό σχέδιο του διαμορφωμένου προφίλ αλουμινίου πάνω στο οποίο στηρίζονται οι μονάδες οδήγησης των ακτίνων του πτερυγίου.



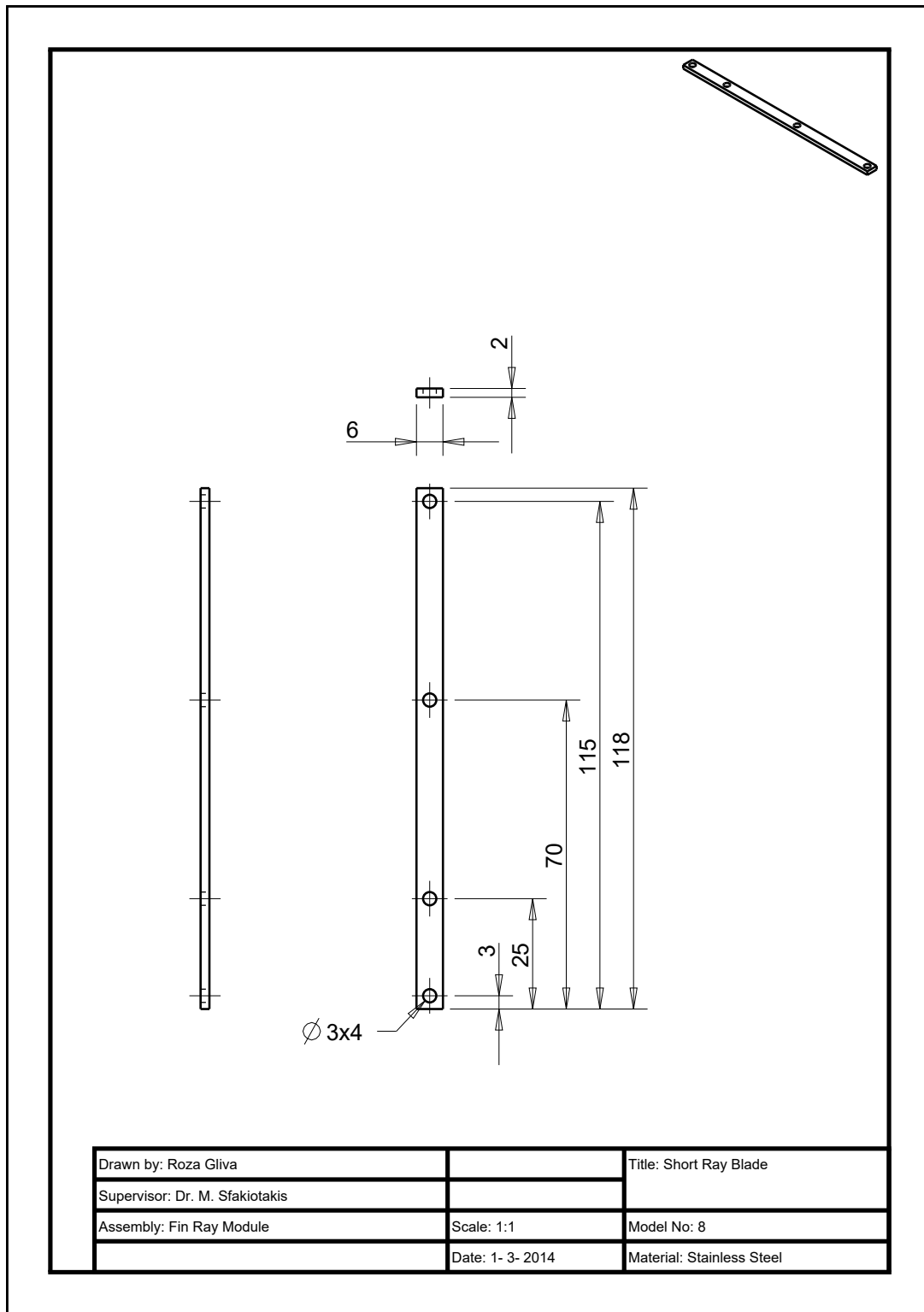
Σχήμα 5: Το μηχανολογικό σχέδιο της ολοκληρωμένης μονάδας οδήγησης της ακτίνας.



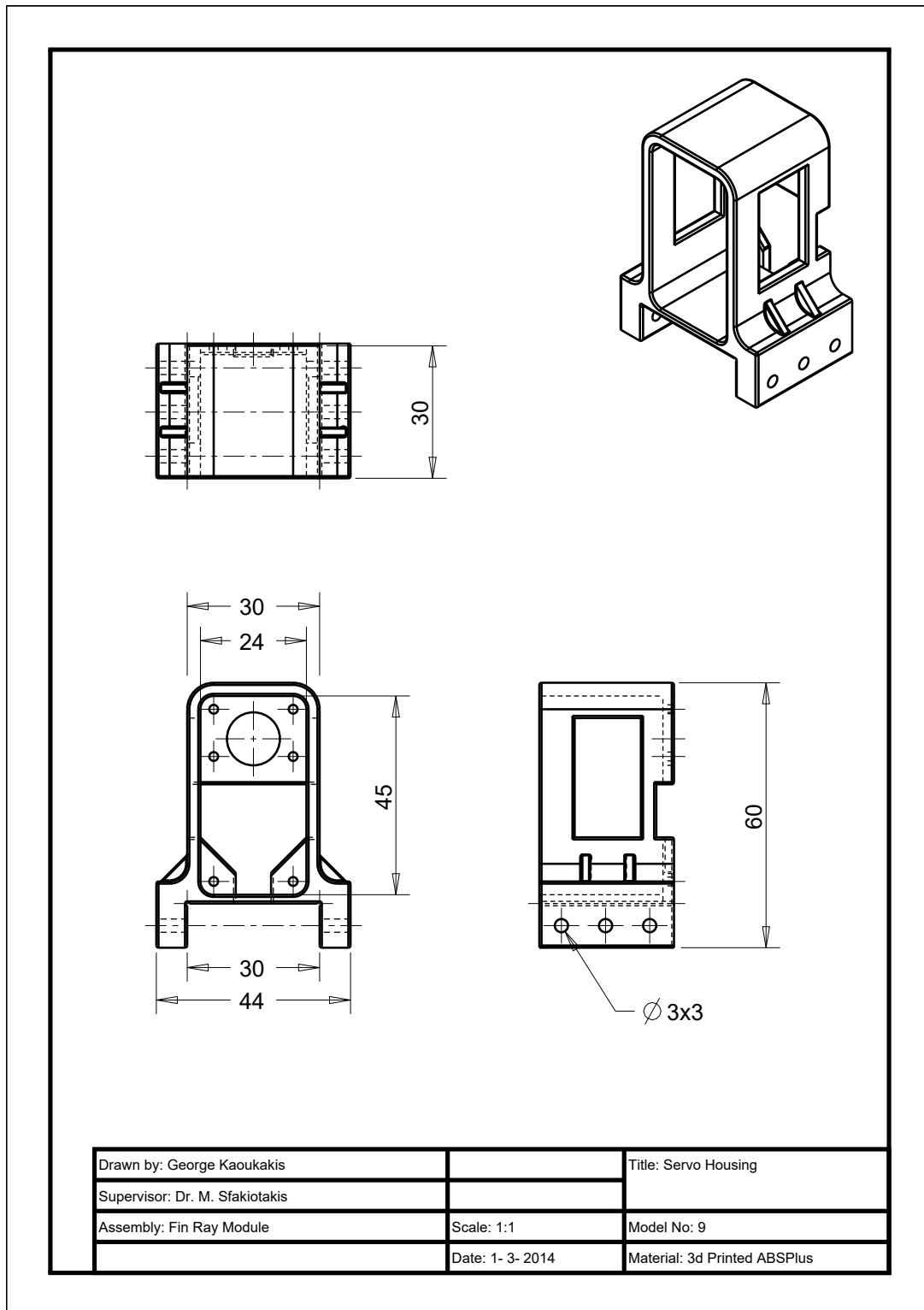
Σχήμα 6: Το μηχανολογικό σχέδιο του ενός από τα ελάσματα που απαρτίζουν τις ακτίνες του μηχανισμού.



Σχήμα 7: Το μηχανολογικό σχέδιο του εξαρτήματος που συνδέει τον άξονα του κινητήρα και τις ακτίνες.

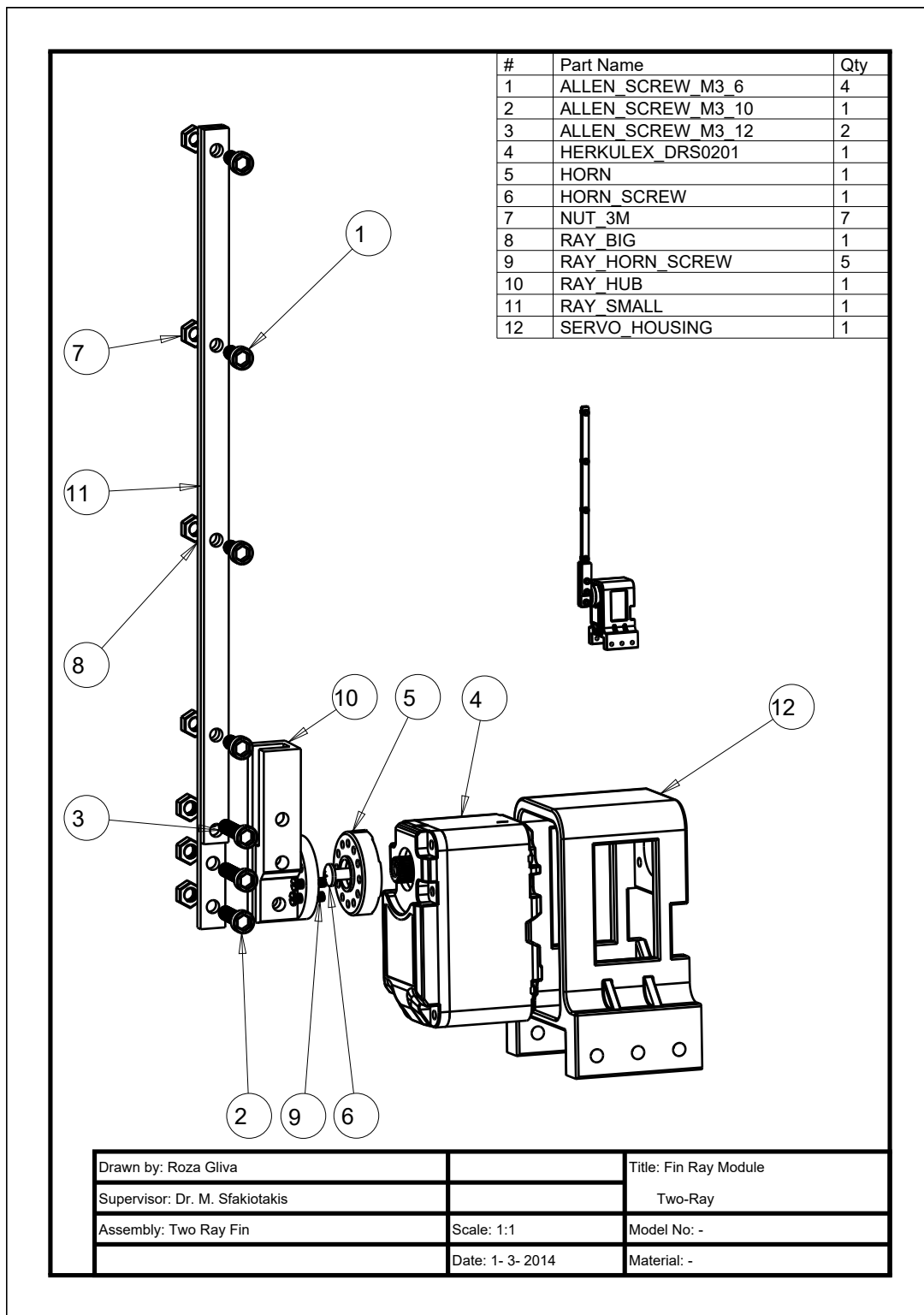


Σχήμα 8: Το μηχανολογικό σχέδιο του δεύτερου από τα ελάσματα που απαρτίζουν τις ακτίνες του μηχανισμού.

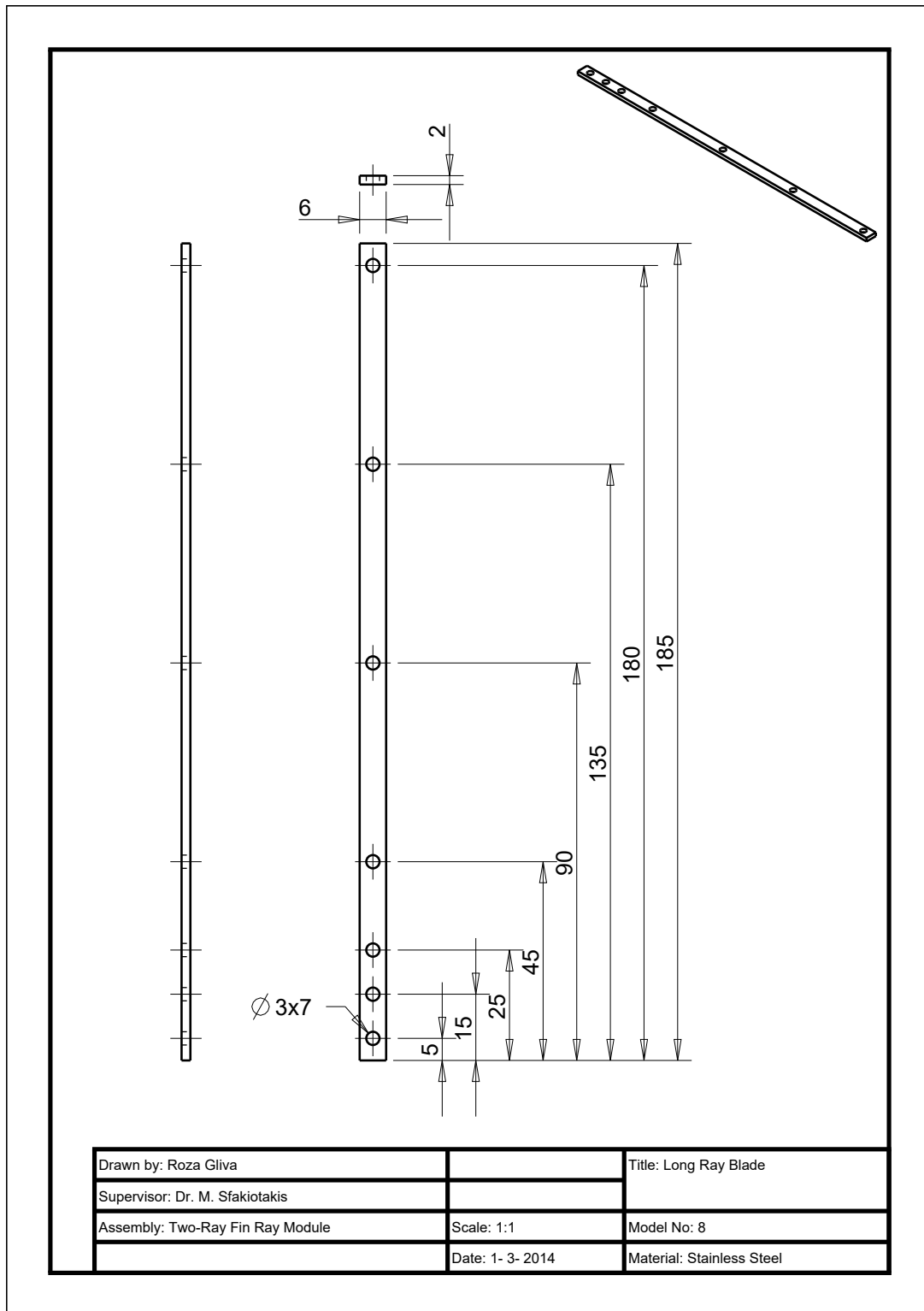


Σχήμα 9: Το μηχανολογικό σχέδιο της βάσης στήριξης των σερβοκινητήρων.

A.2 Μηχανολογικά σχέδια ελάσσονος πτερυγίου

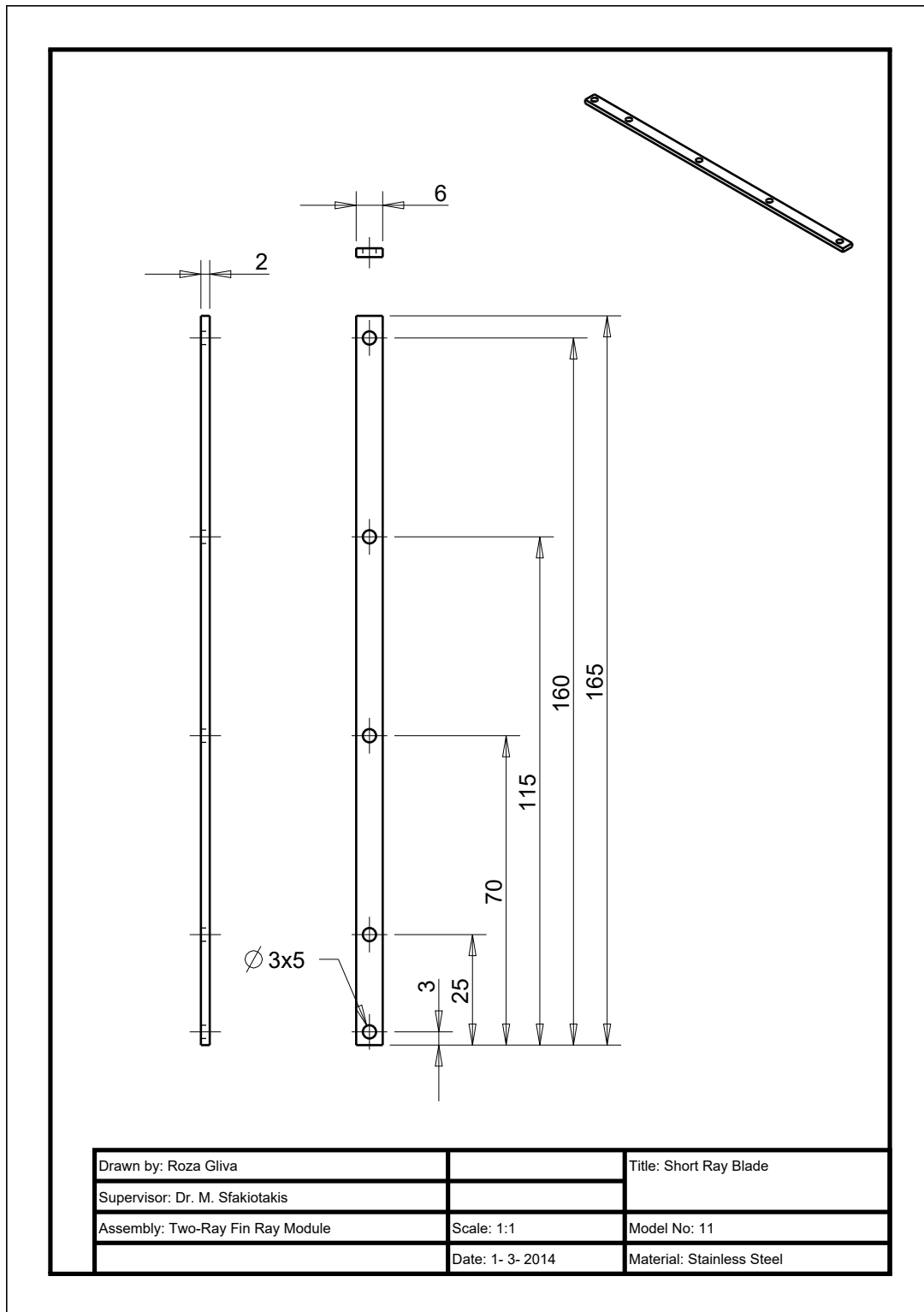


Σχήμα 10: Το μηχανολογικό σχέδιο της ολοκληρωμένης μονάδας οδήγησης της ακτίνας.



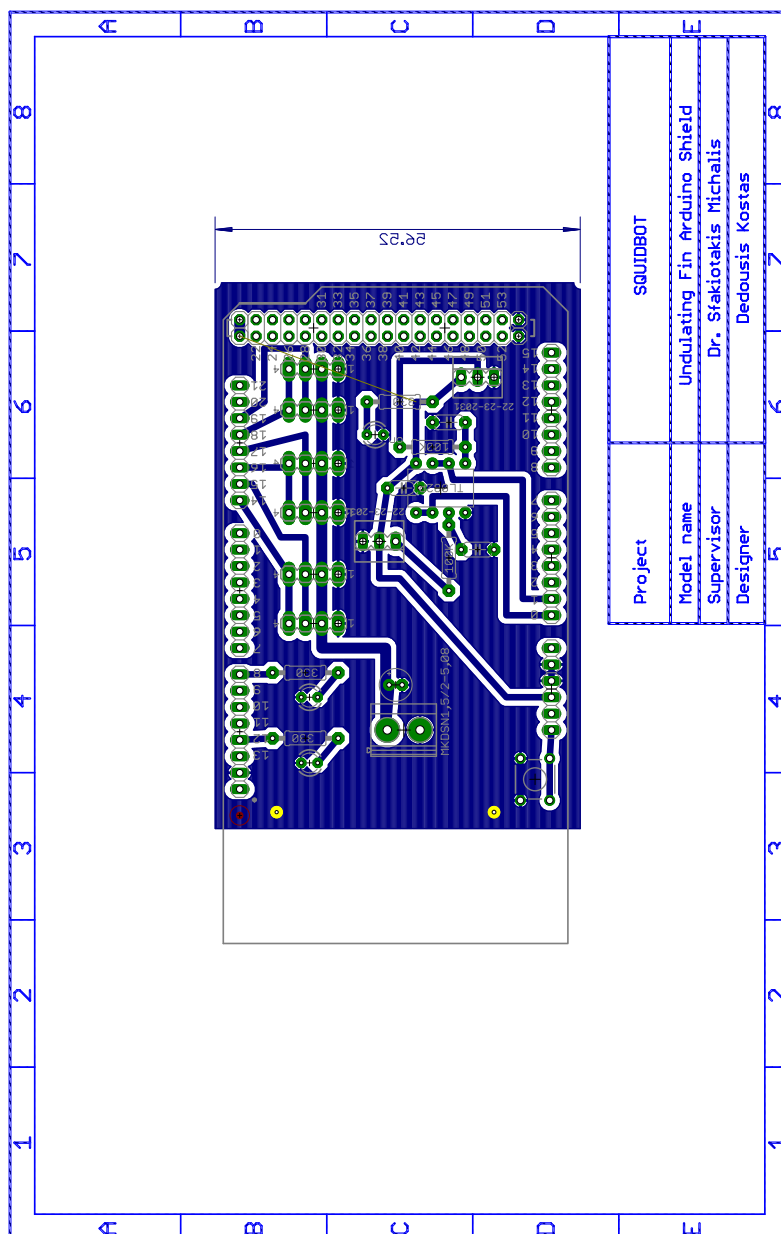
Σχήμα 11: Το μηχανολογικό σχέδιο του ενός από τα ελάσματα που απαρτίζουν τις ακτίνες του μηχανισμού.





Σχήμα 12: Το μηχανολογικό σχέδιο του δεύτερου από τα ελάσματα που απαρτίζουν τις ακτίνες του μηχανισμού.

### A.3 Ηλεκτρονικά κυκλώματα



Σχήμα 13: Το σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας επέκτασης.

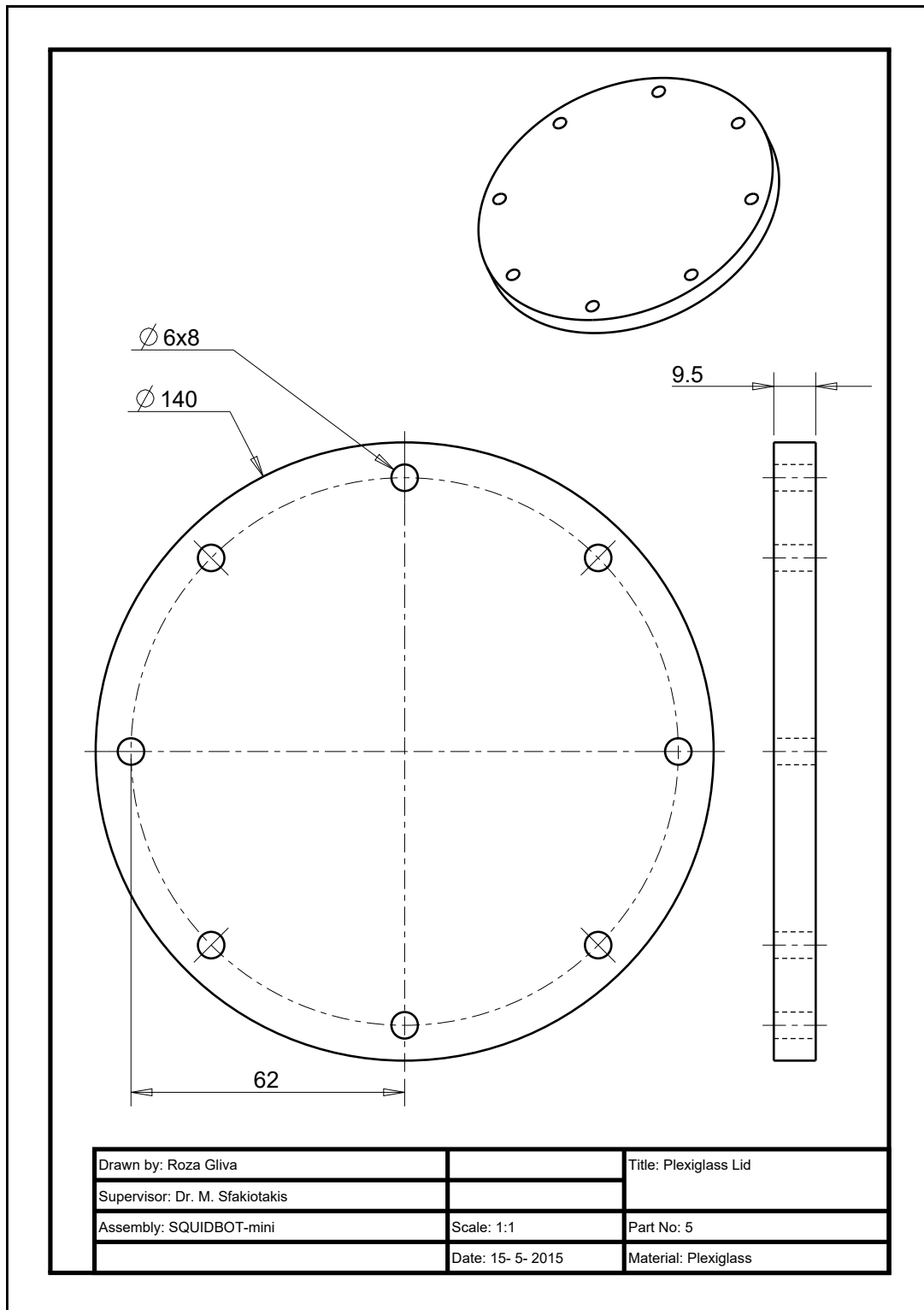
## B Τεχνικά στοιχεία του υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος SQUIDBOT-mini

### B.1 Μηχανολογικά σχέδια

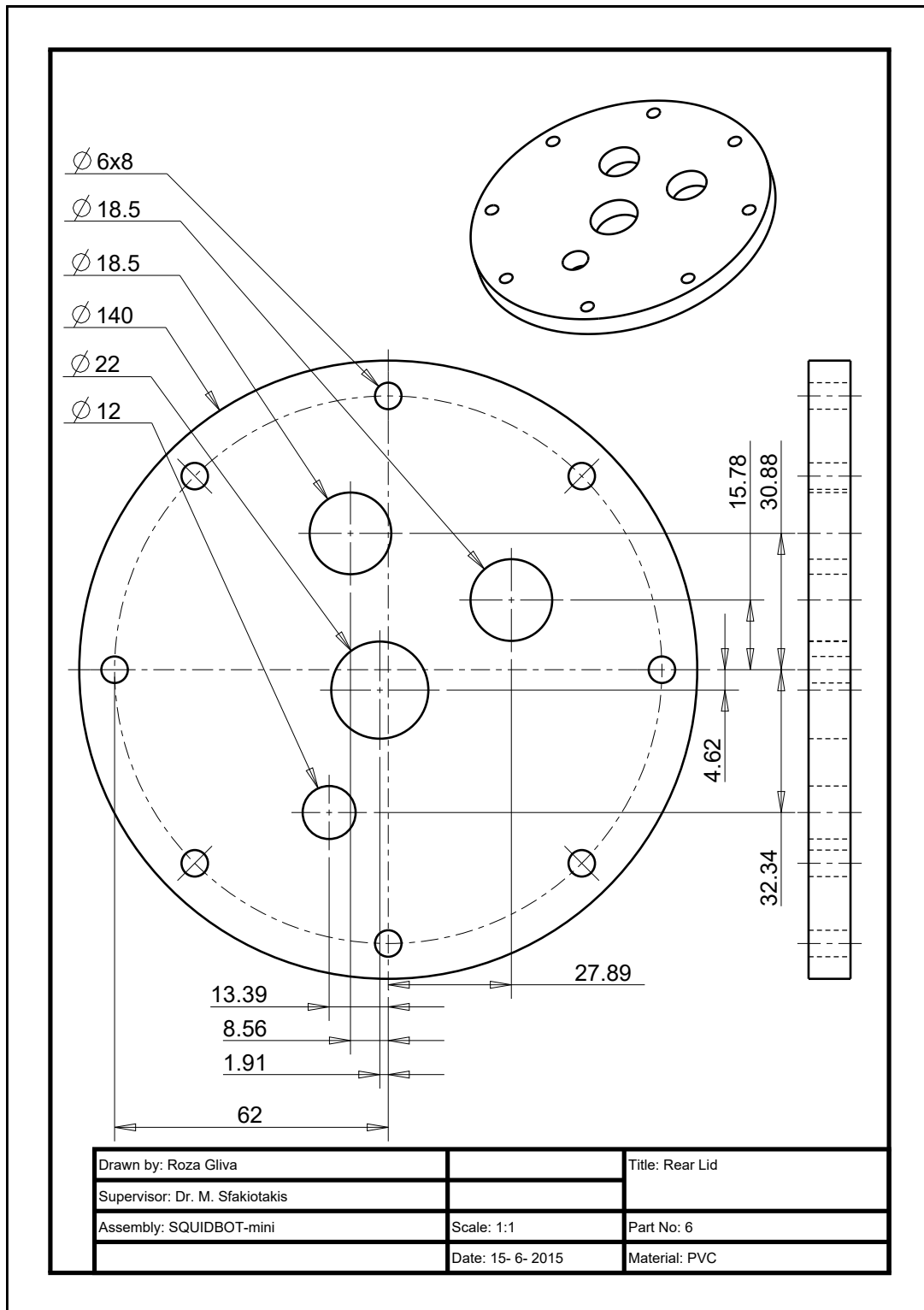
#	Part Name	Qty
1	ABS_PVC_FASTENER	24
2	ALLEN_SCREW_M6	16
3	BULGIN_USB_A_SOCKET	1
4	BULGIN_USB_CAP	1
5	LID_PLEXIGLASS	1
6	LID_PVC	1
7	MEMBRANE_L1	1
8	MEMBRANE_R1	1
9	NUT_M6	16
10	ORING	2
11	RING_PVC	2
12	SAVOX_W_HOUSING	6
13	SIDE_PART	2
14	SKINTOP_CABLE_GLAND	2
15	TUBE_PVC	1
16	WASHER_M6	32
17	WEIPU_CONNECTOR_CAP	1
18	WEIPU_SP1311_S3	1

Drawn by: Roza Gliva		Title: SQUIDBOT-mini
Supervisor: Dr. M. Sfakiotakis		
Assembly: SQUIDBOT-mini	Scale: 1:4	Model No: -
	Date: 15-5-2015	Material: -

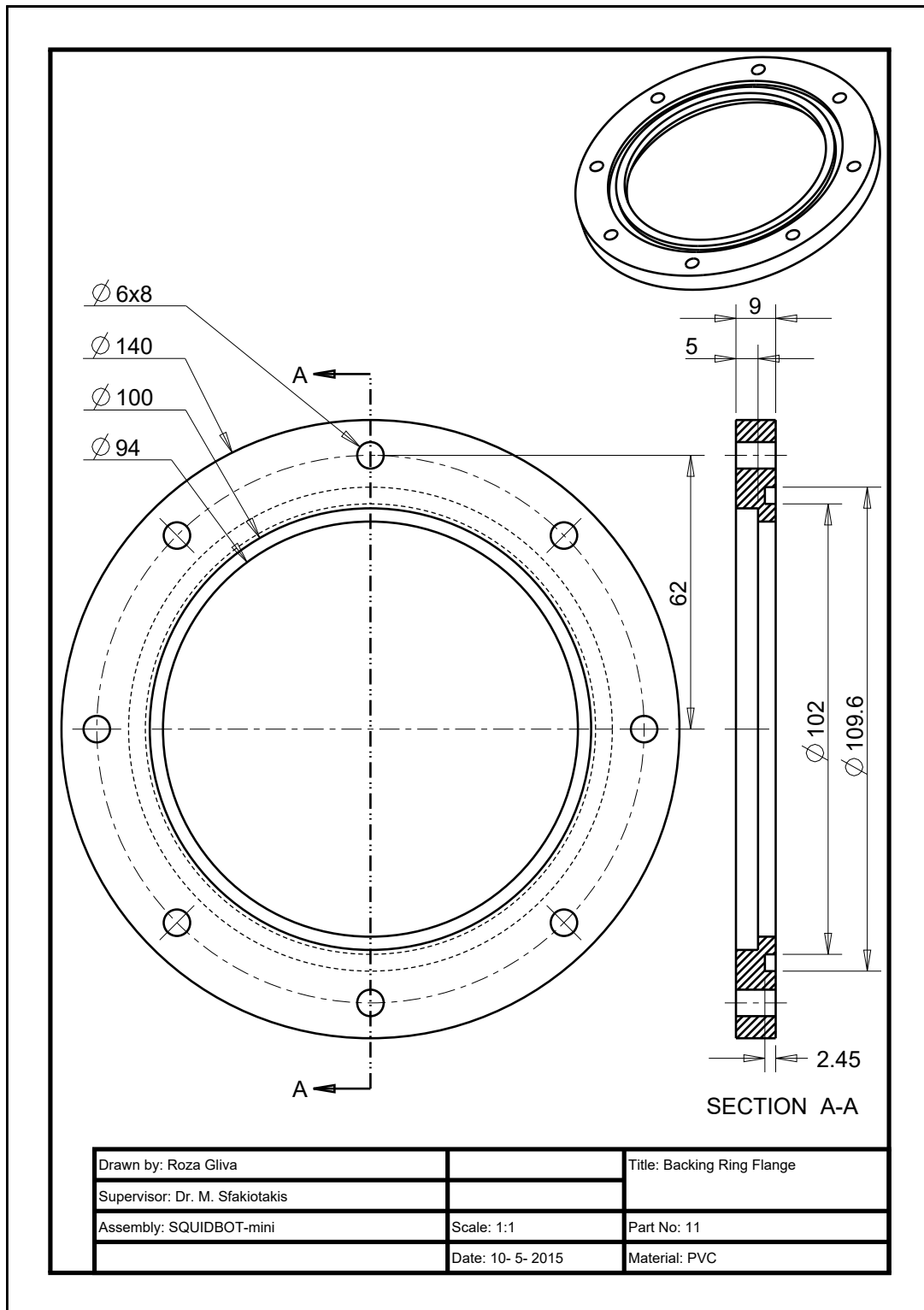
Σχήμα 14: Μπροστά πλάγια όψη του ρομπότ.



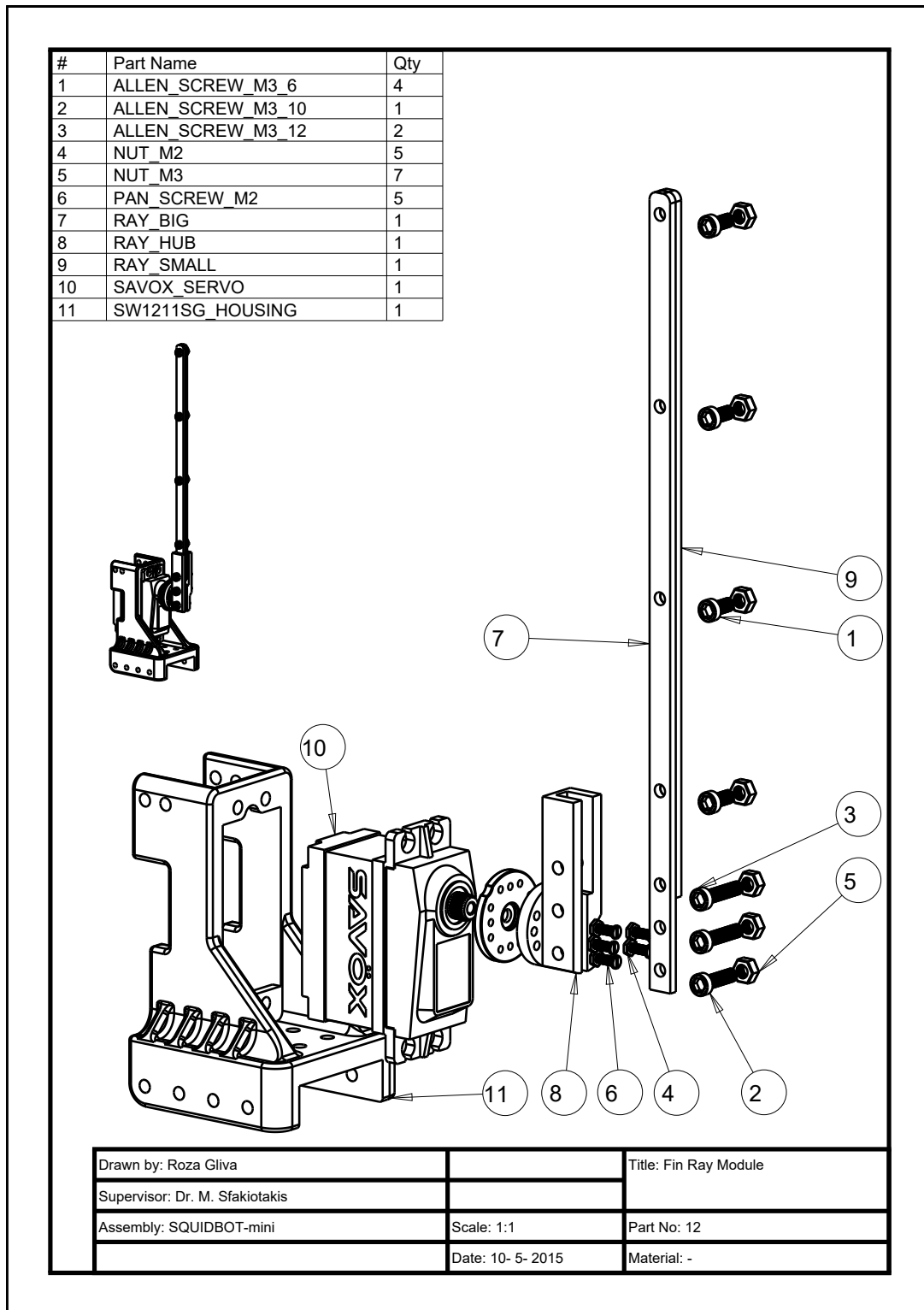
Σχήμα 15: Το μηχανολογικό σχέδιο του εμπρόσθιου καλακιού.



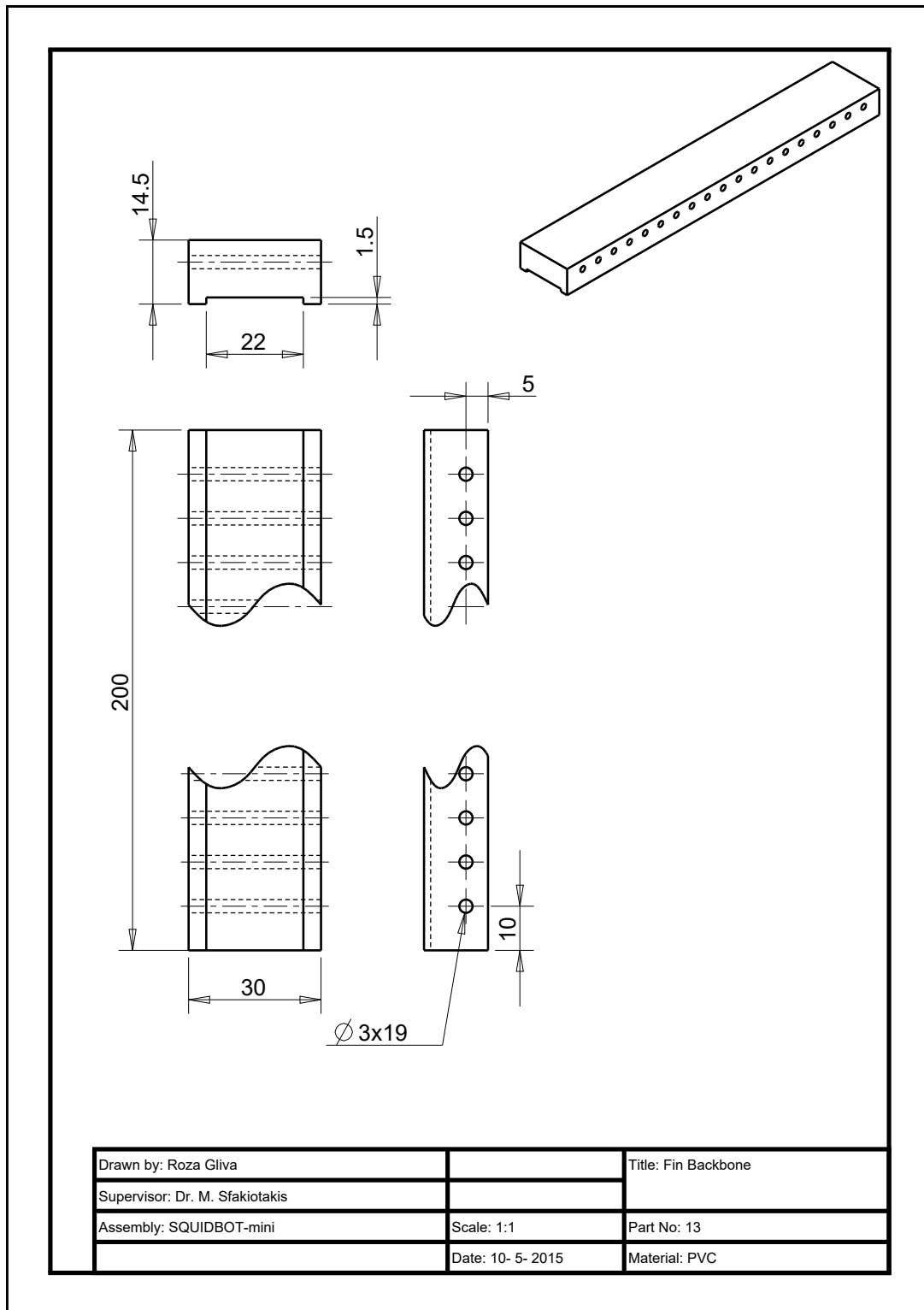
Σχήμα 16: Το μηχανολογικό σχέδιο του οπίσθιου καλακιού.



Σχήμα 17: Το μηχανολογικό σχέδιο της φλάντζας στεγάνωσης.

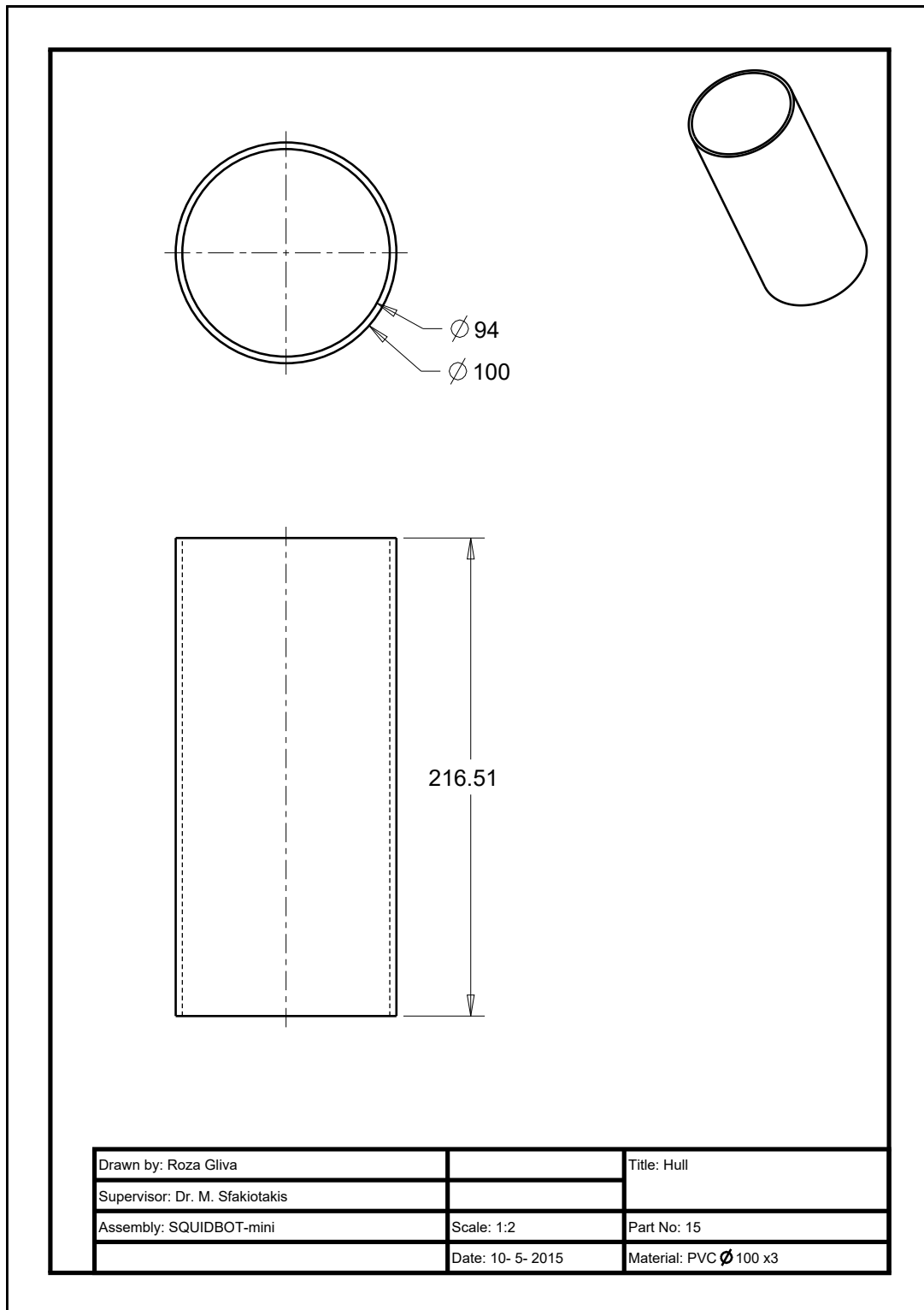


Σχήμα 18: Μονάδα κίνησης ακτίνας.

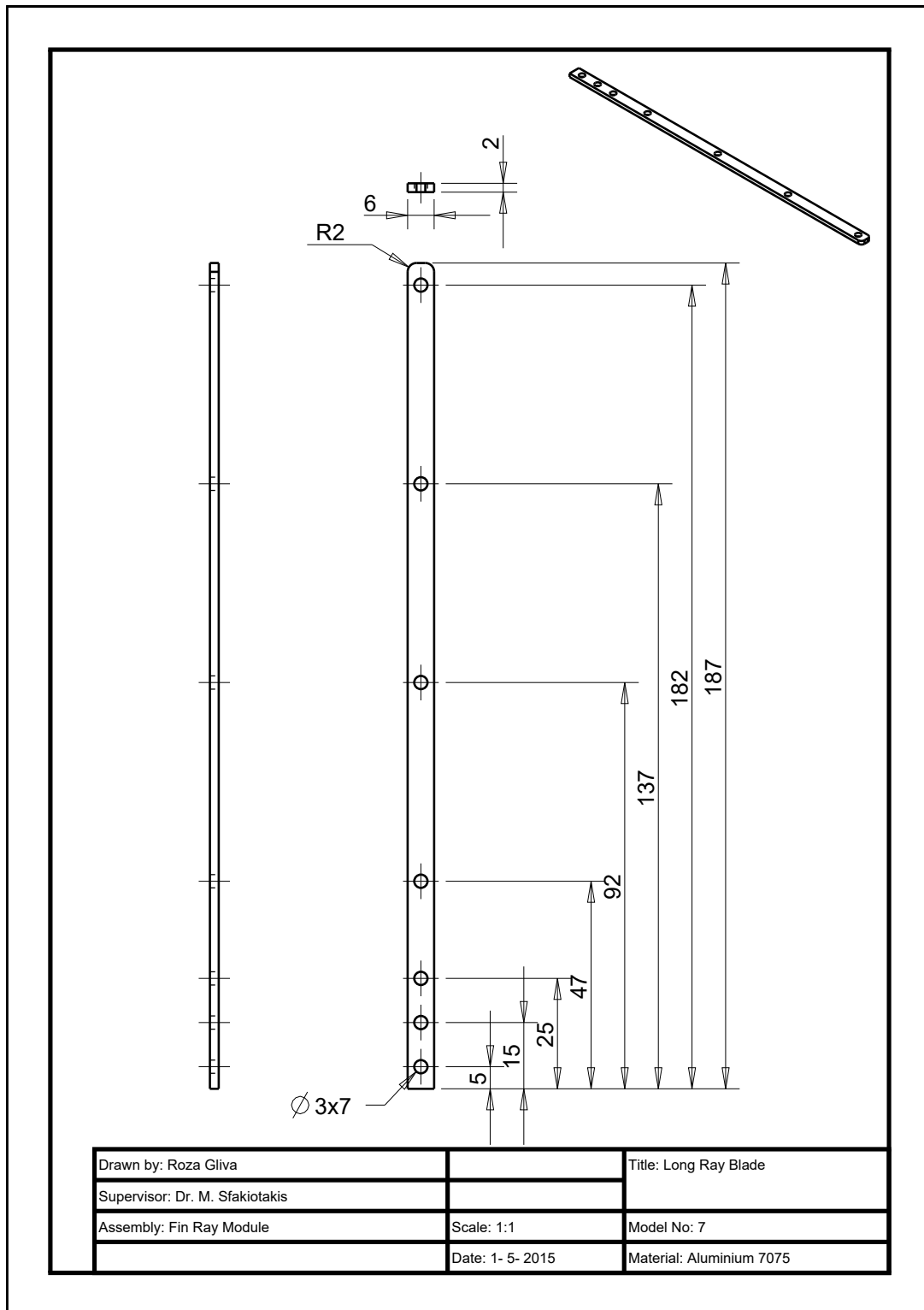


Σχήμα 19: Το μηχανολογικό σχέδιο του πλαϊνού συνδετικού τεμαχίου.

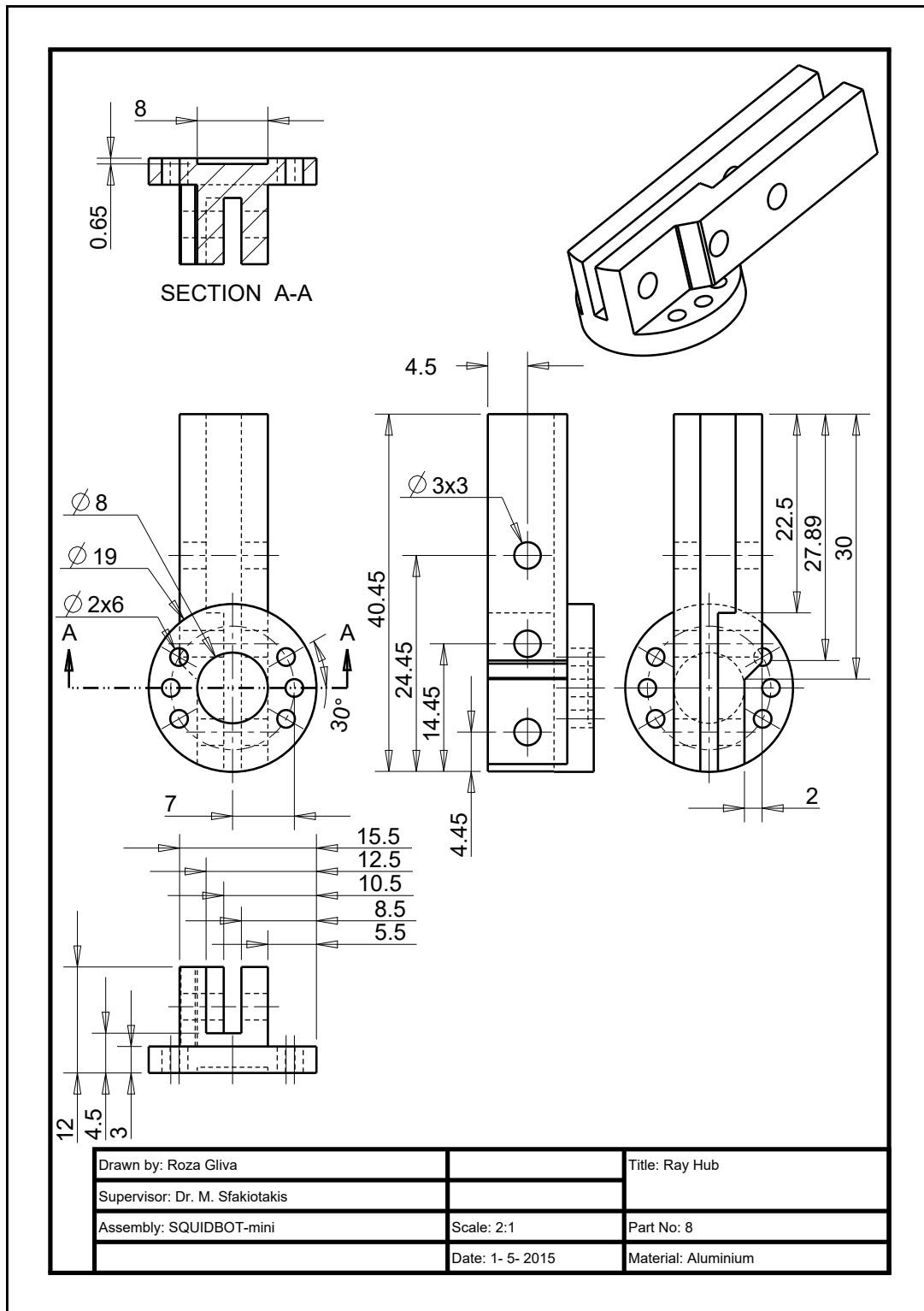




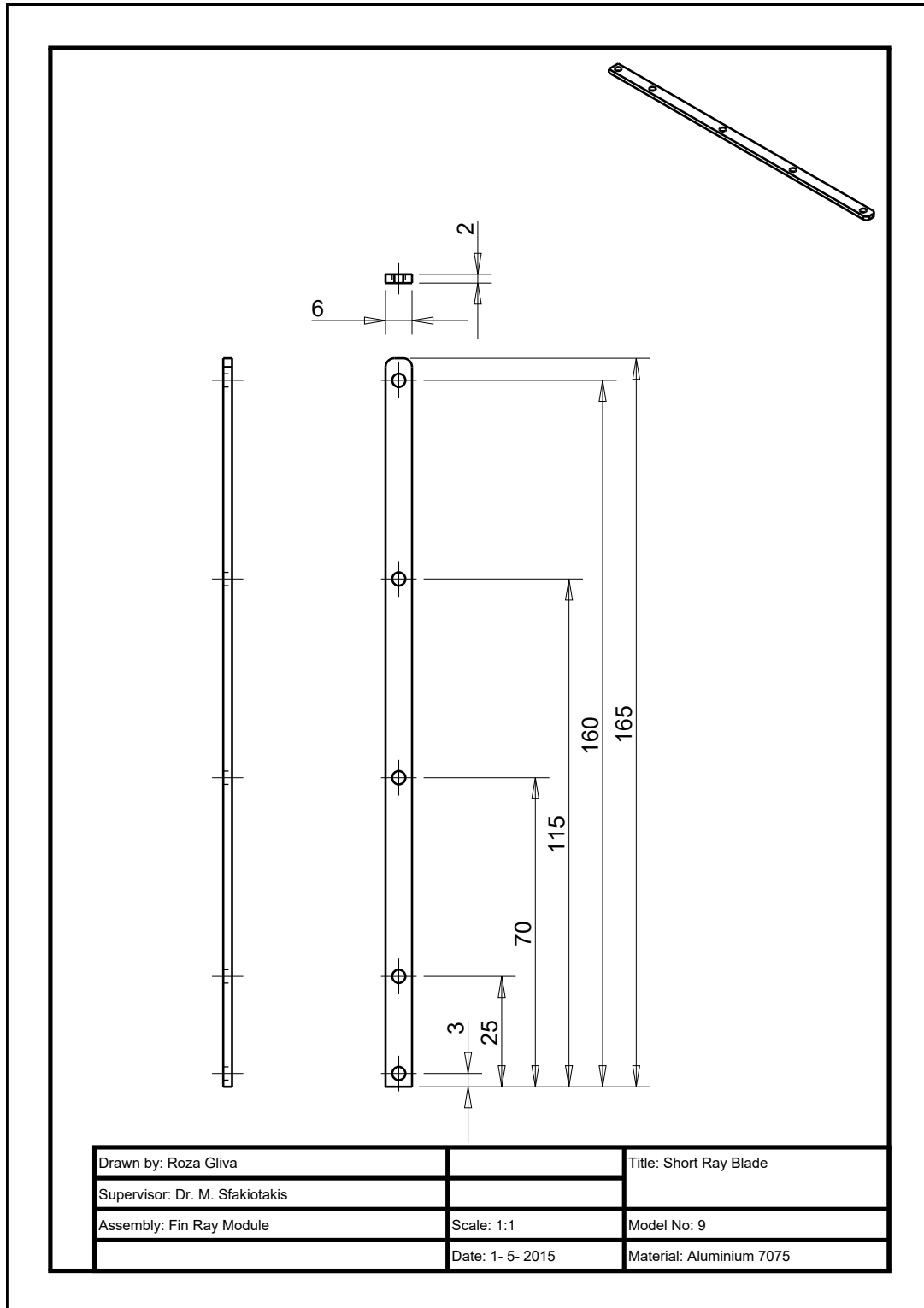
Σχήμα 20: Το μηχανολογικό σχέδιο του κυλίνδρου.



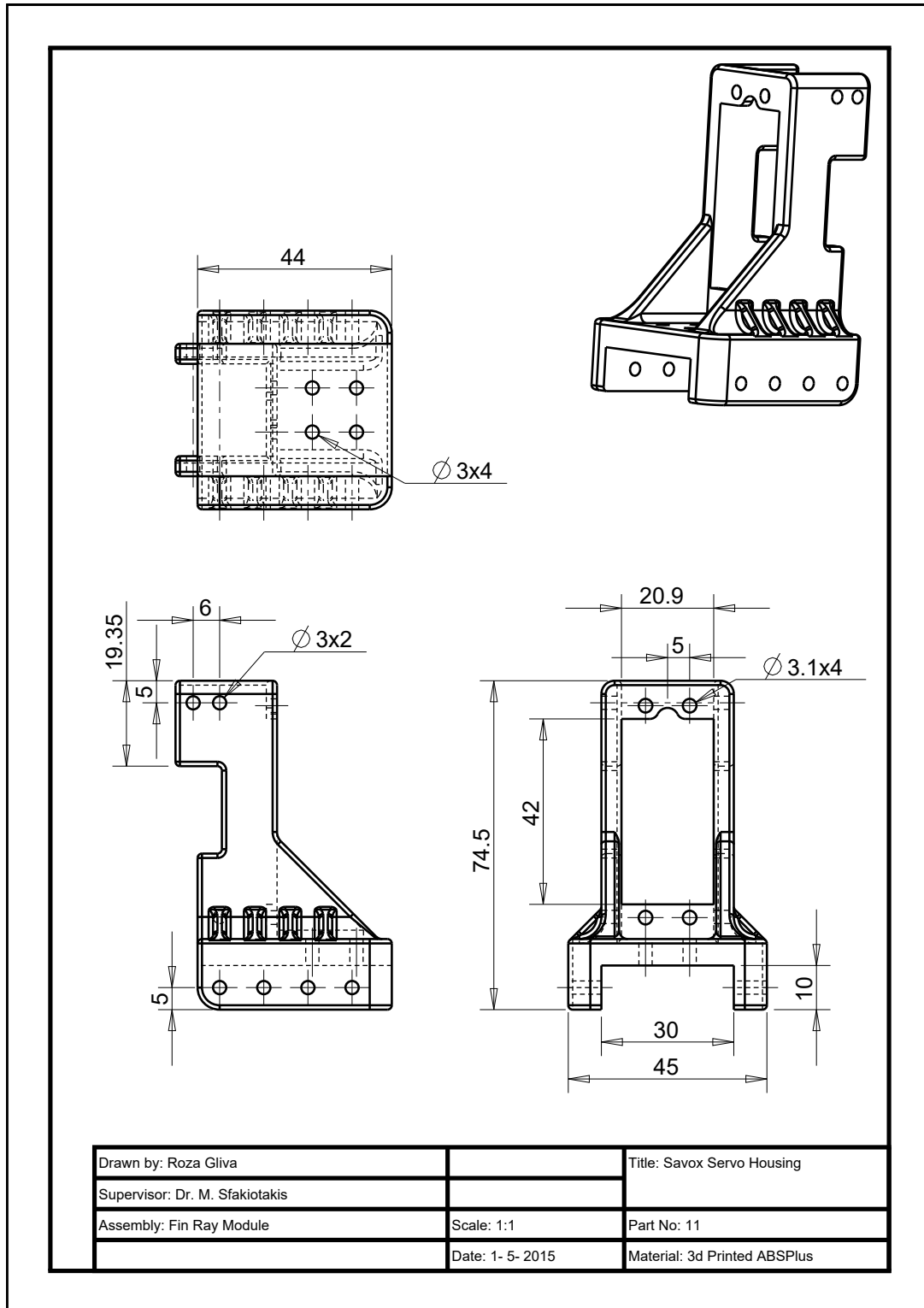
Σχήμα 21: Το μηχανολογικό σχέδιο του πρώτου ελάσματος της ακτίνας.



Σχήμα 22: Το μηχανολογικό σχέδιο του εξαρτήματος που συνδέει τον άξονα του κινητήρα και τις ακτίνες.

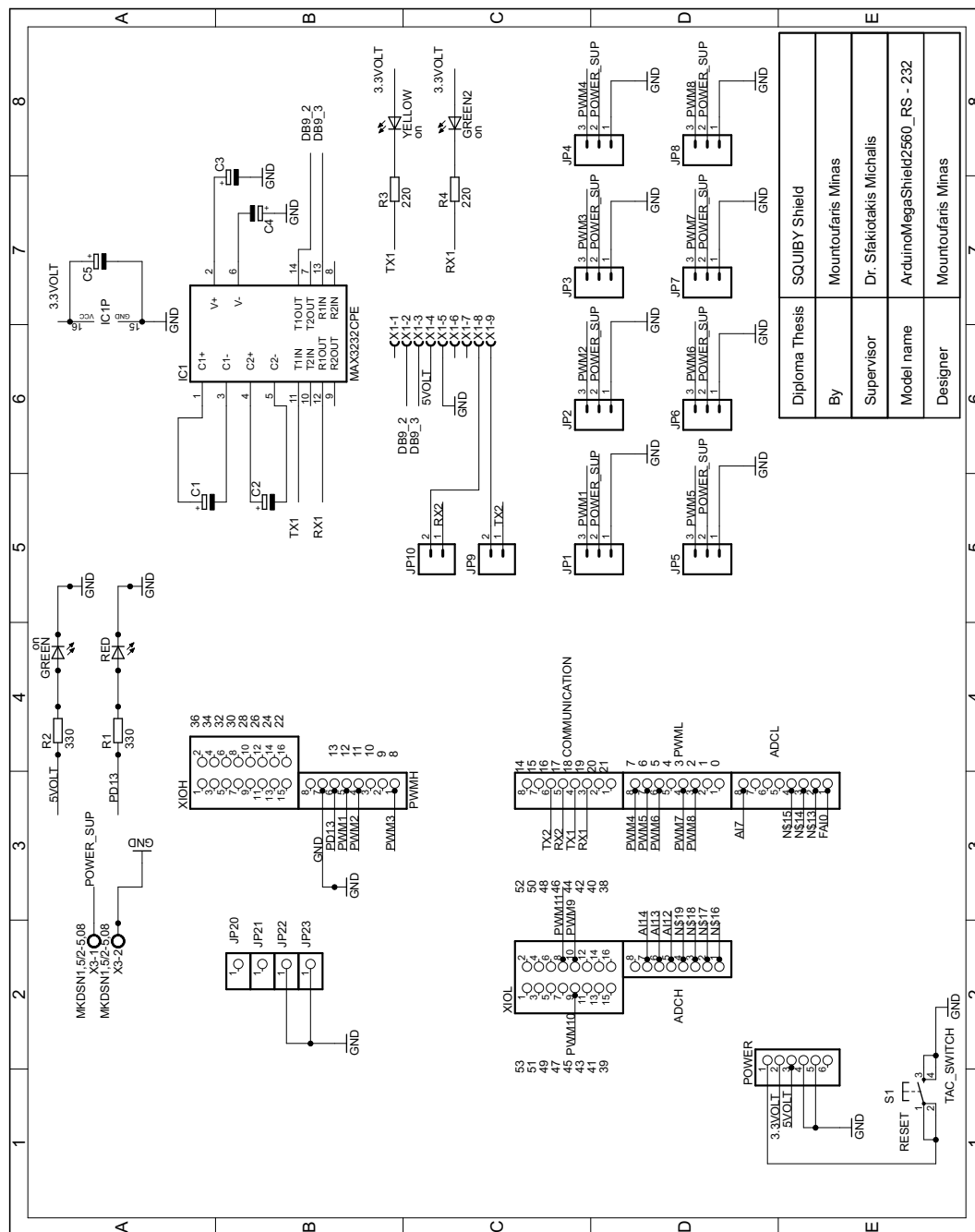


Σχήμα 23: Το μηχανολογικό σχέδιο του δεύτερου ελάσματος της ακτίνας.



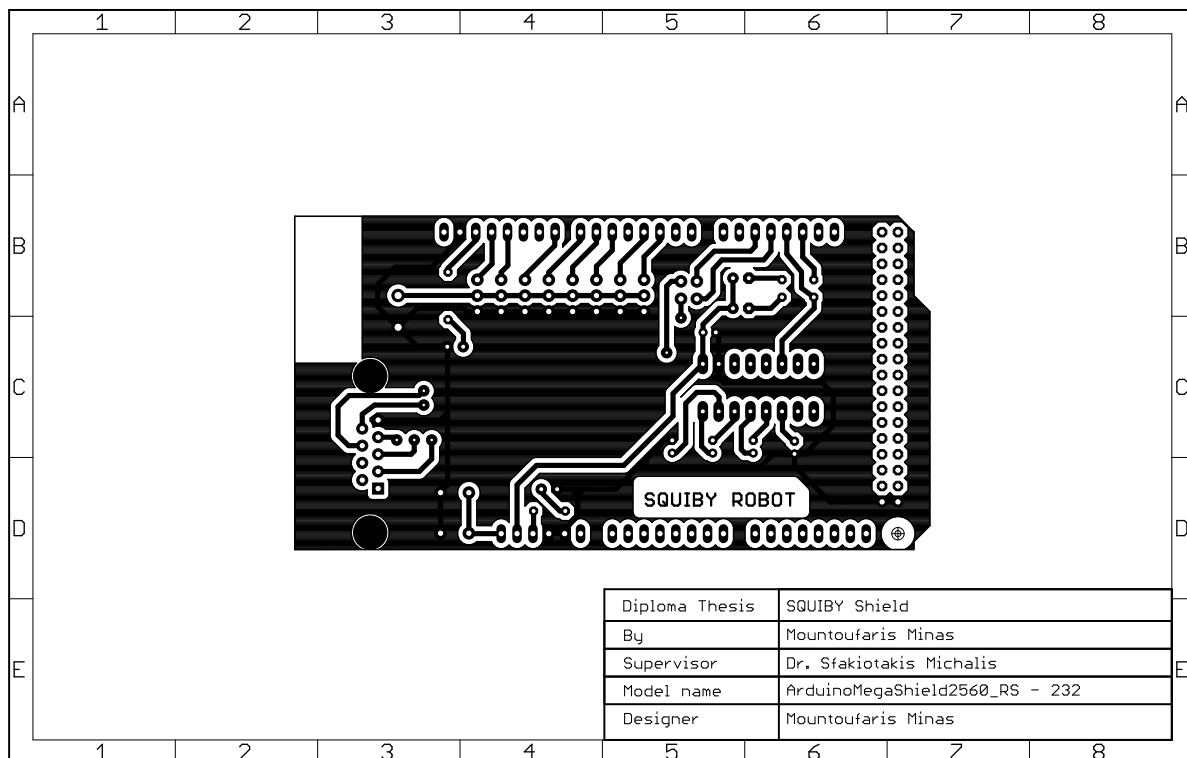
Σχήμα 24: Το μηχανολογικό σχέδιο της βάσης του σερβοκινητήρα.

B.2 Ηλεκτρονικά κυκλώματα

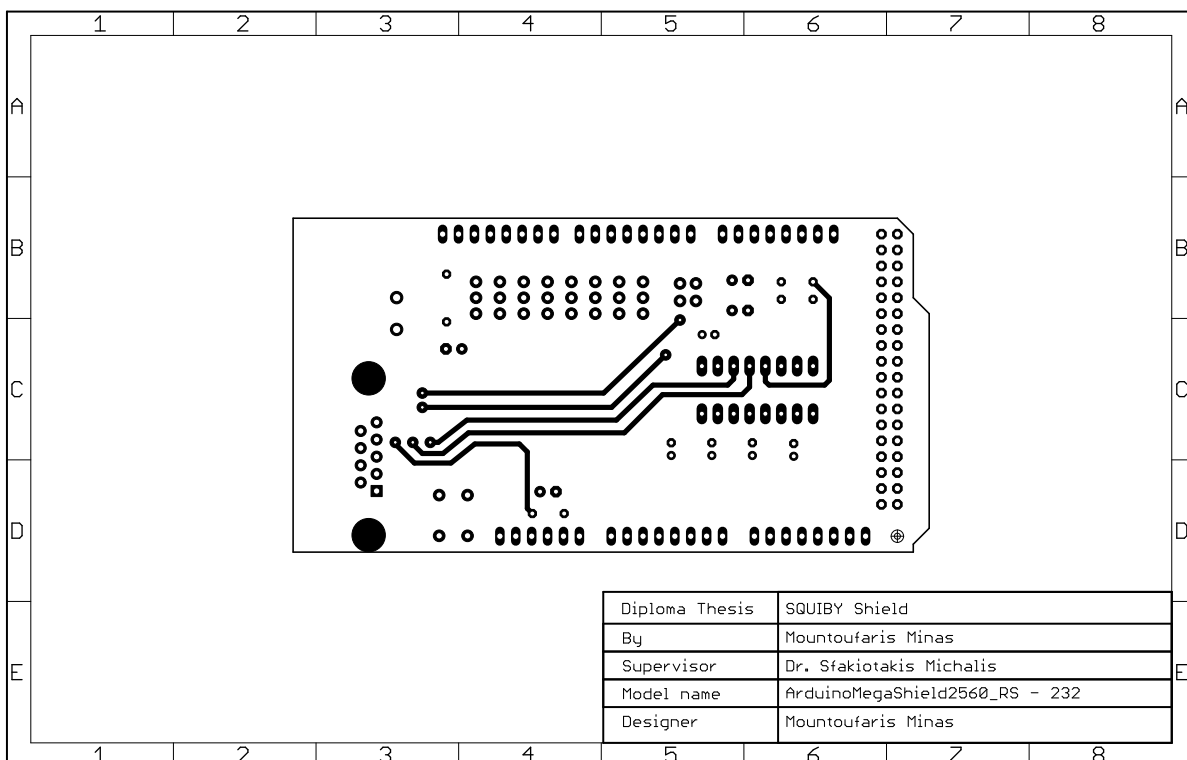


Σχήμα 25: Πλακέτα επέκτασης.

Diploma Thesis	SQUIBLY Shield
By	Mountoufaris Minas
Supervisor	Dr. Sfakiotakis Michalis
Model name	ArduinoMegaShield2560_RS - 232
Designer	Mountoufaris Minas

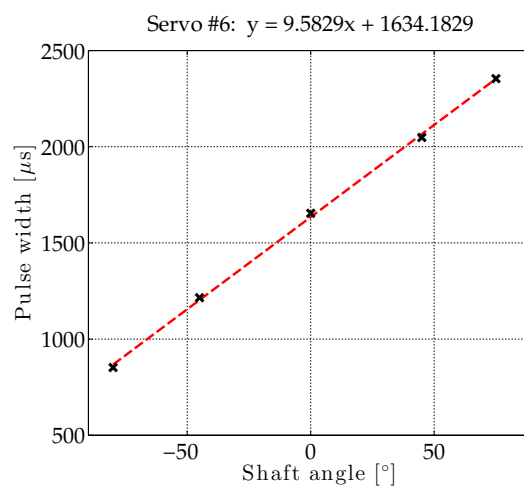
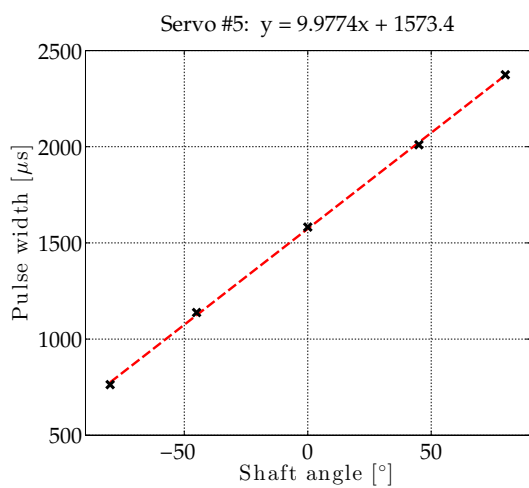
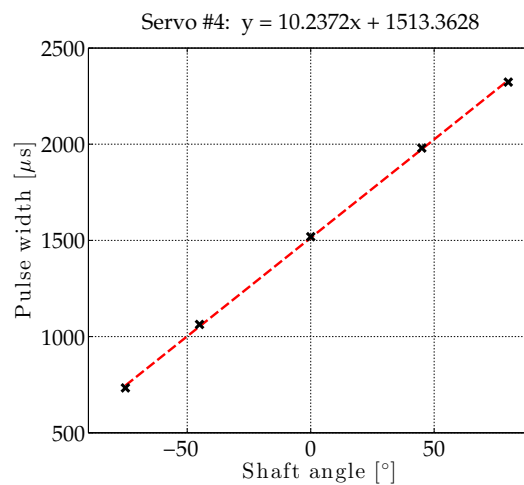
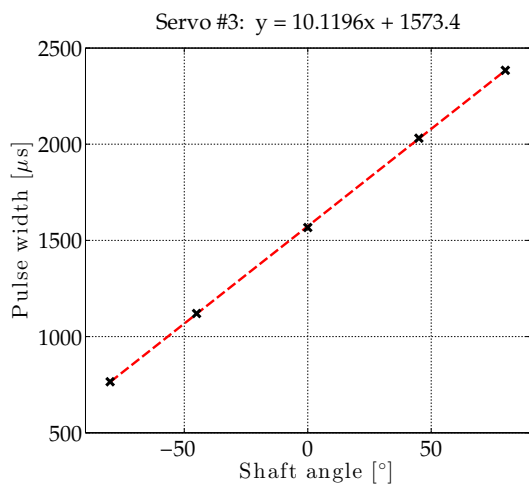
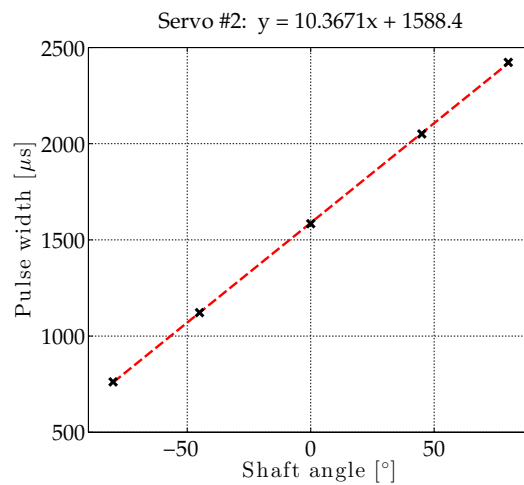
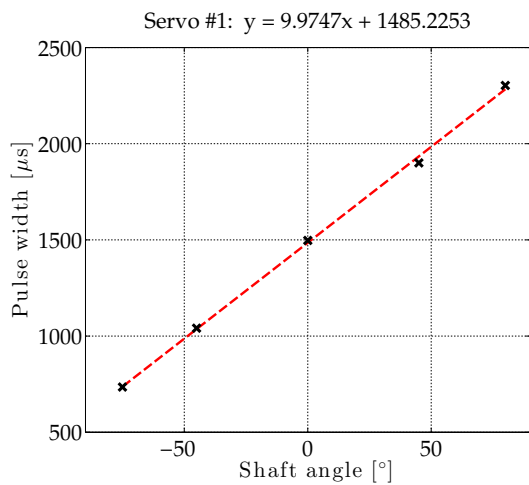


Σχήμα 26: Πλακέτα επέκτασης.



Σχήμα 27: Πλακέτα επέκτασης.

### B.3 Διαγράμματα βαθμονόμησης σερβοκινητήρων





## C Πειραματική αποτίμηση του ρομποτικού πρωτότυπου SQUIDBOT-mini

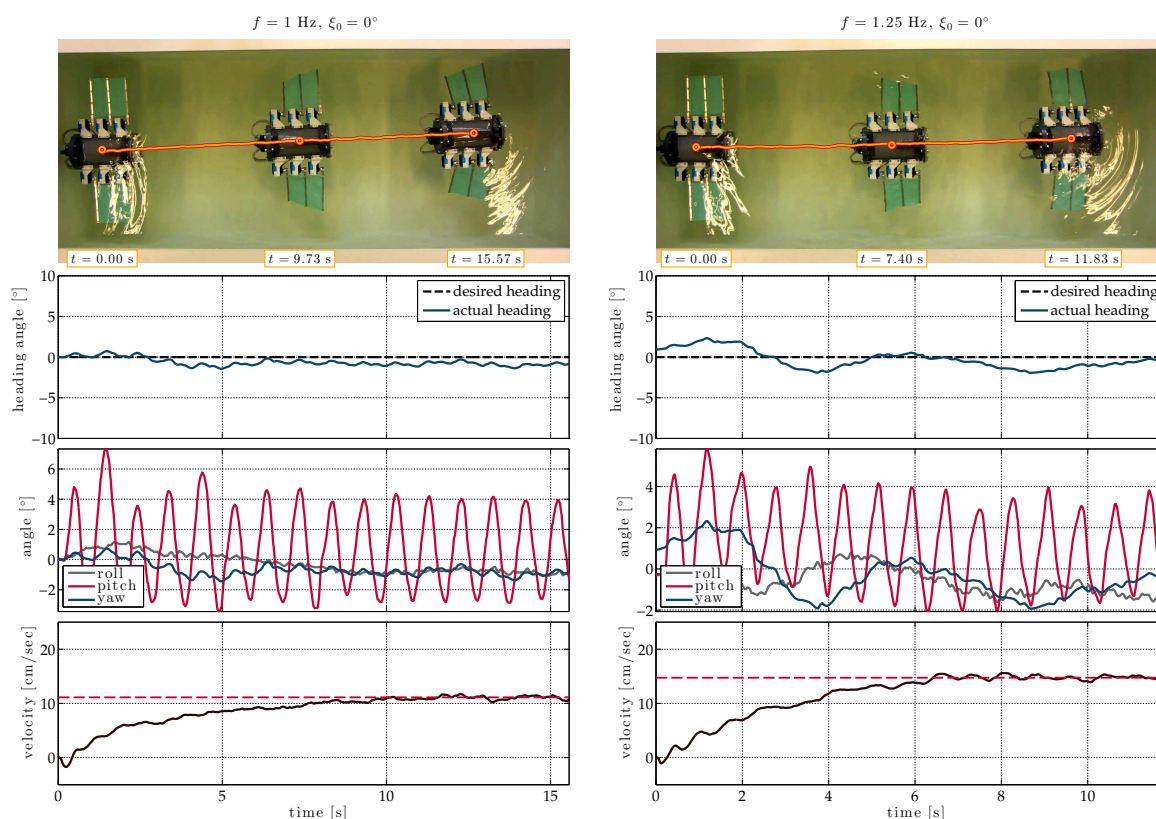
### C.1 Πρόωση με έλεγχο κλειστού βρόχου της πορείας κίνησης

#### C.1.1 Πειράματα διερεύνησης της επίδρασης της συχνότητας κυμάτωσης

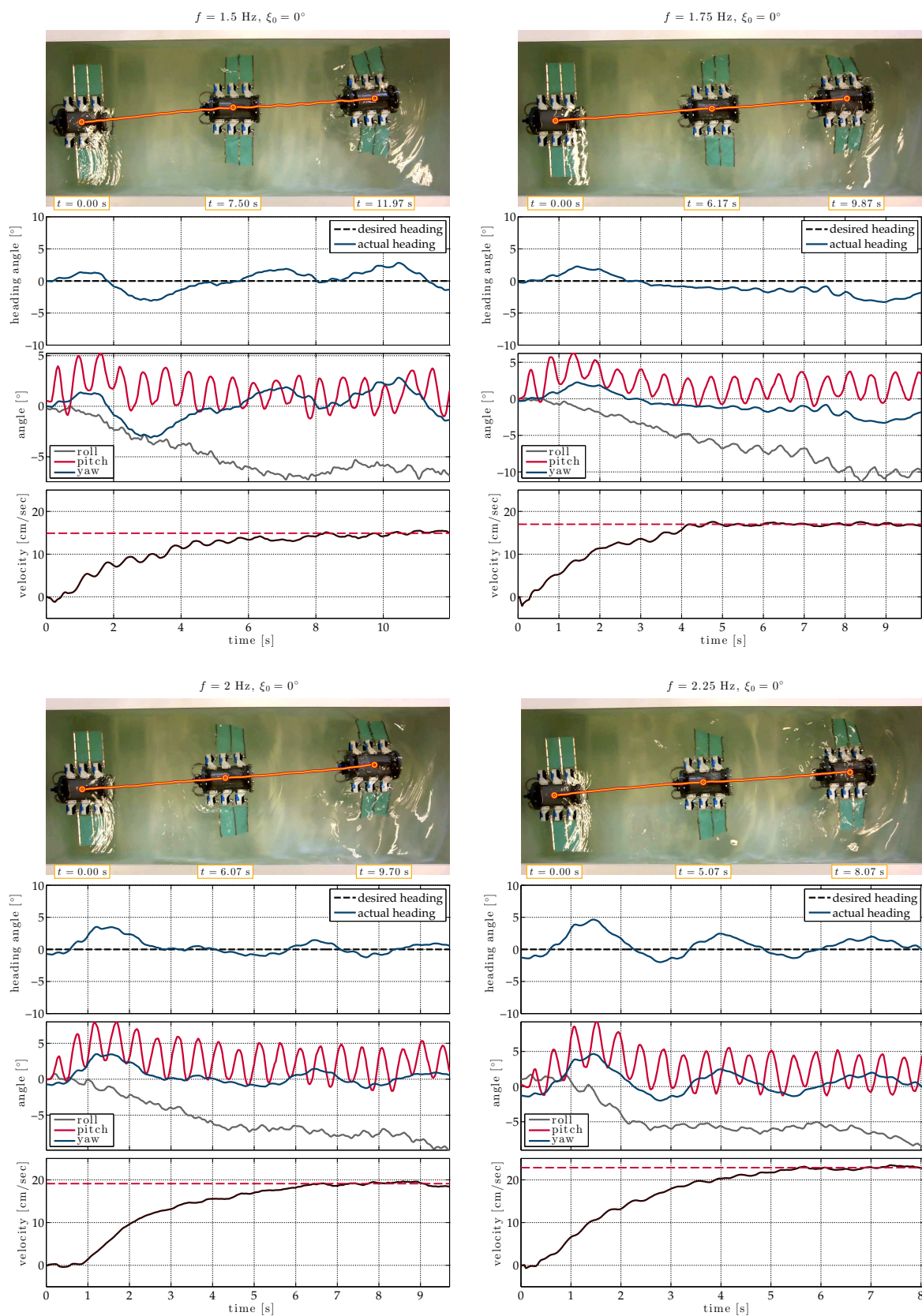
Στο εδώ Παράρτημα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν για πρόωση με έλεγχο κλειστού βρόχου της γωνίας πορείας του ρομποτικού πρωτότυπου (Ενότητα 4.3.2), για διαφορετικές τιμές της συχνότητας κυμάτωσης των πτερυγίων, σε εύρος από 1 Hz έως 2.25 Hz. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές τιμές της σχετικής φάσης κυμάτωσης των δύο πτερυγίων ειδικότερα για  $\xi_0 = 0^\circ$  και  $\xi_0 = 45^\circ$ .

Στα γραφήματα που συνοψίζουν τα αποτελέσματα κάθε πειράματος εικονίζονται διαδοχικά (από πάνω προς τα κάτω), (i) η τροχιά του οχήματος εντός της δεξαμενής δοκιμών (από επεξεργασία του σχετικού βίντεο), (ii) η απόκριση της γωνίας πορείας (heading angle) του ρομπότ, (iii) η χρονική εξέλιξη των τριών γωνιών προσανατολισμού του οχήματος στο χώρο (γωνίες roll, pitch, και yaw), και (iv) η χρονική εξέλιξη της ταχύτητας του οχήματος εντός της δεξαμενής (από την επεξεργασία του σχετικού βίντεο).

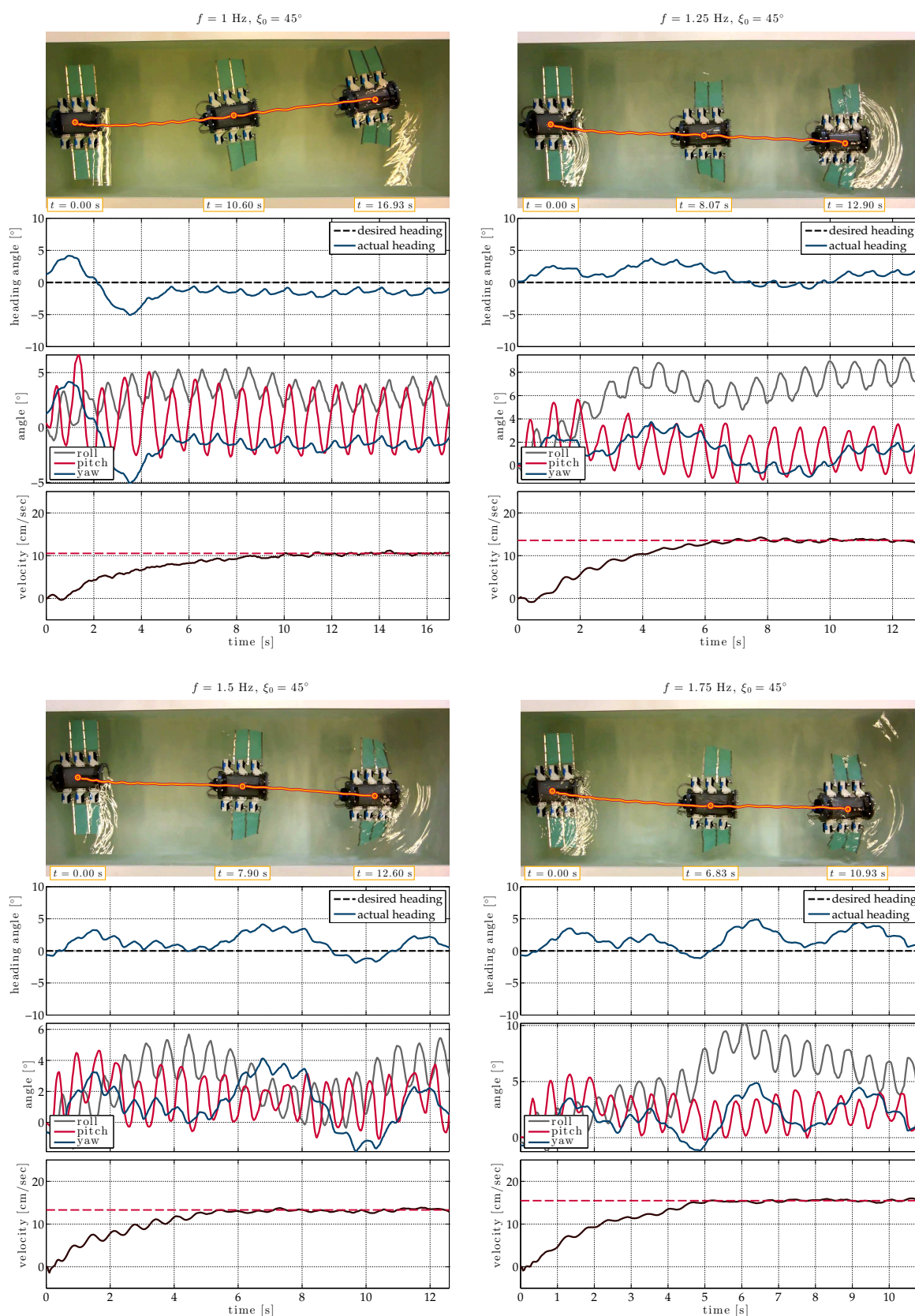
#### Πειραματικές δοκιμές με $\xi_0 = 0^\circ$



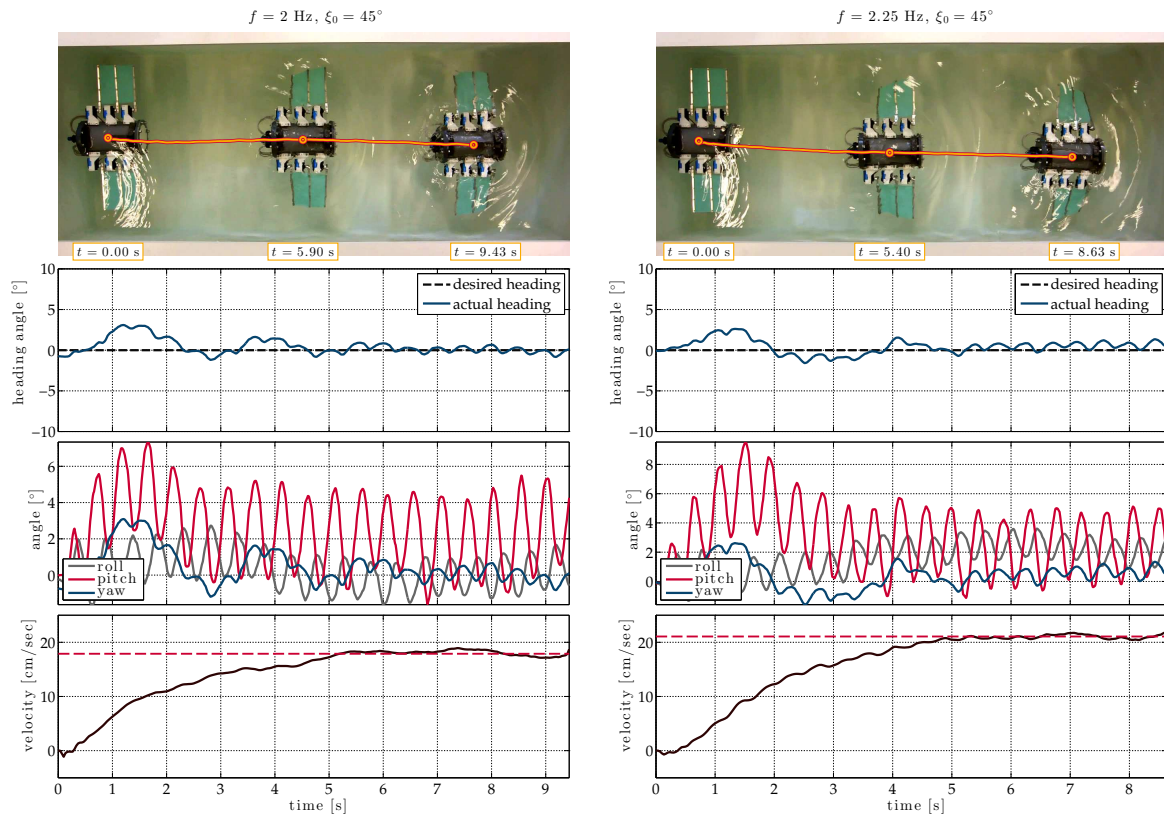
Σχήμα 28: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της συχνότητας κυμάτωσης, για σχετική φάση κυμάτωσης των δύο πτερυγίων  $\xi_0 = 0^\circ$ .



Σχήμα 29: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για την μελέτη της επίδρασης της συχνότητας κυμάτων, για σχετική φάση κυμάτων των δύο πτερυγίων  $\xi_0 = 0^\circ$ .

Πειραματικές δοκιμές με  $\xi_0 = 45^\circ$ 

Σχήμα 30: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για την μελέτη της επίδρασης της συχνότητας κυμάτωσης, για σχετική φάση κυμάτωσης των δύο πτερυγίων  $\xi_0 = 45^\circ$ .



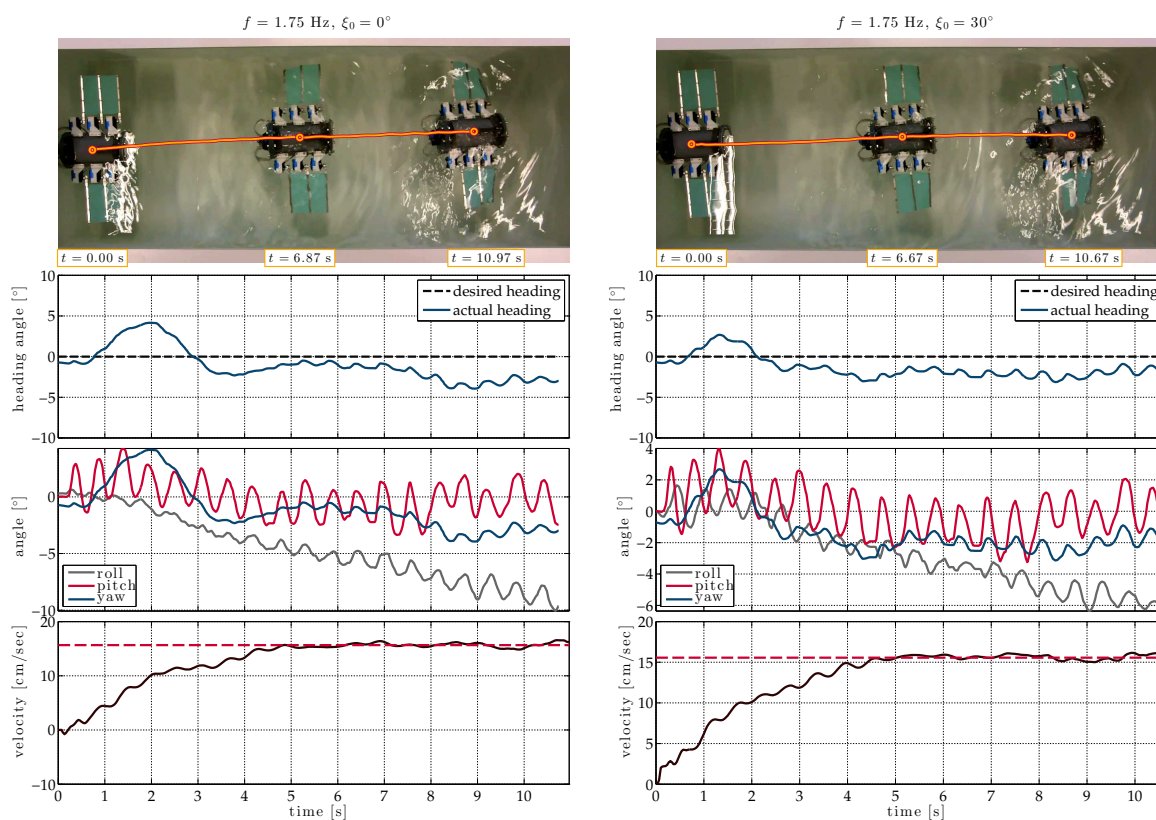
Σχήμα 31: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της συχνότητας κυμάτωσης, για σχετική φάση κυμάτωσης των δύο πτερυγίων  $\xi_0 = 45^\circ$ .

### C.1.2 Πειράματα διερεύνησης της επίδρασης της σχετικής φάσης κυμάτωσης

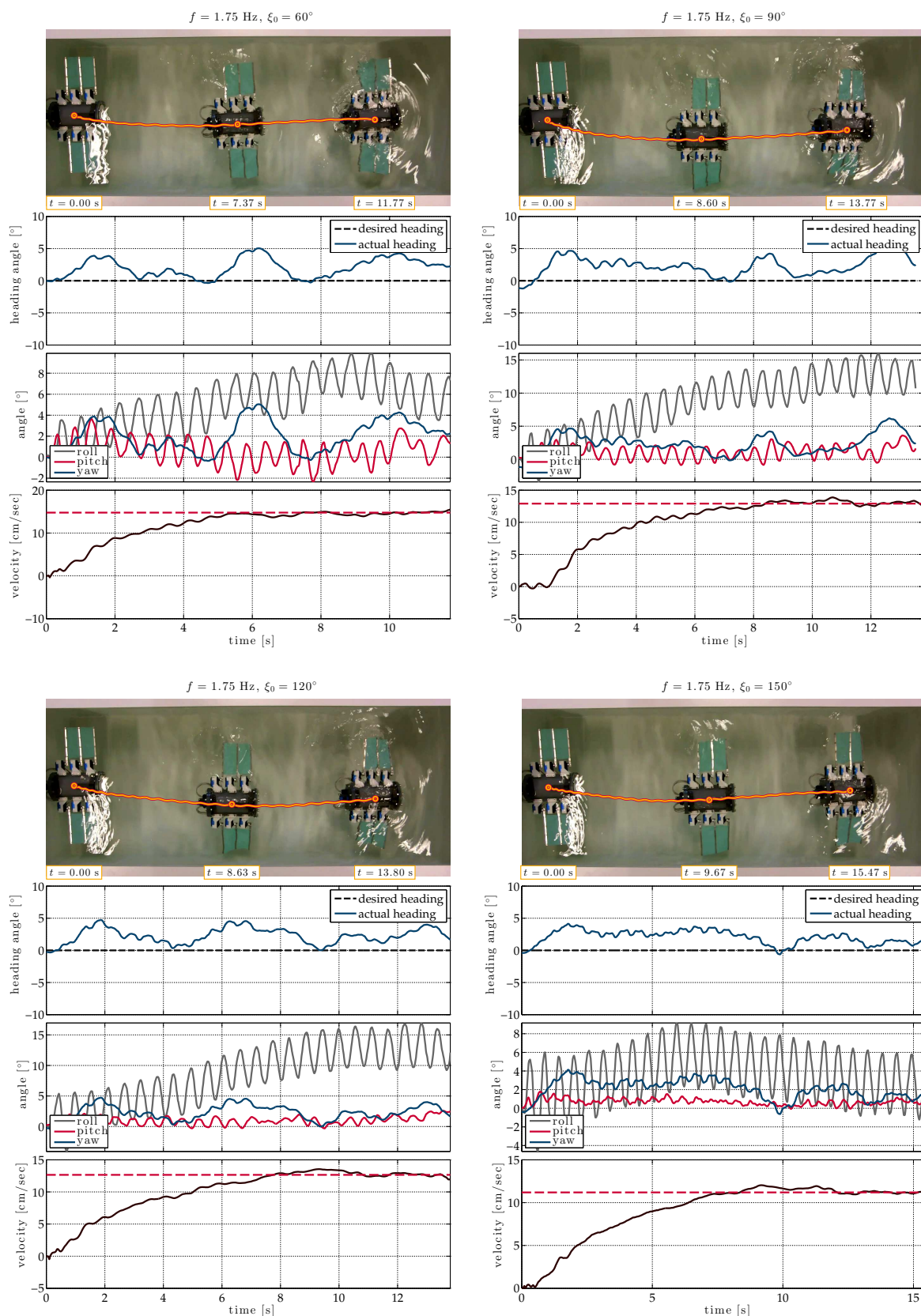
Στο Παράρτημα αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν για πρόωση με έλεγχο κλειστού βρόχου της γωνίας πορείας του ρομποτικού πρωτότυπου (Ενότητα 4.3.2), για διαφορετικές τιμές της σχετικής φάσης κυμάτωσης μεταξύ των δύο πτερυγίων, σε εύρος από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ . Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν για δύο διαφορετικές τιμές της γωνίας κλίσης των πτερυγίων, ειδικότερα για  $X = 15^\circ$  και  $X = 30^\circ$ .

Στα γραφήματα που συνοψίζουν τα αποτελέσματα κάθε πειράματος εικονίζονται διαδοχικά (από πάνω προς τα κάτω), (i) η τροχιά του οχήματος εντός της δεξαμενής δοκιμών (από επεξεργασία του σχετικού βίντεο), (ii) η απόκριση της γωνίας πορείας (heading angle) του ρομπότ, (iii) η χρονική εξέλιξη των τριών γωνιών προσανατολισμού του οχήματος στο χώρο (γωνίες roll, pitch, και yaw), και (iv) η χρονική εξέλιξη της ταχύτητας του οχήματος εντός της δεξαμενής (από την επεξεργασία του σχετικού βίντεο).

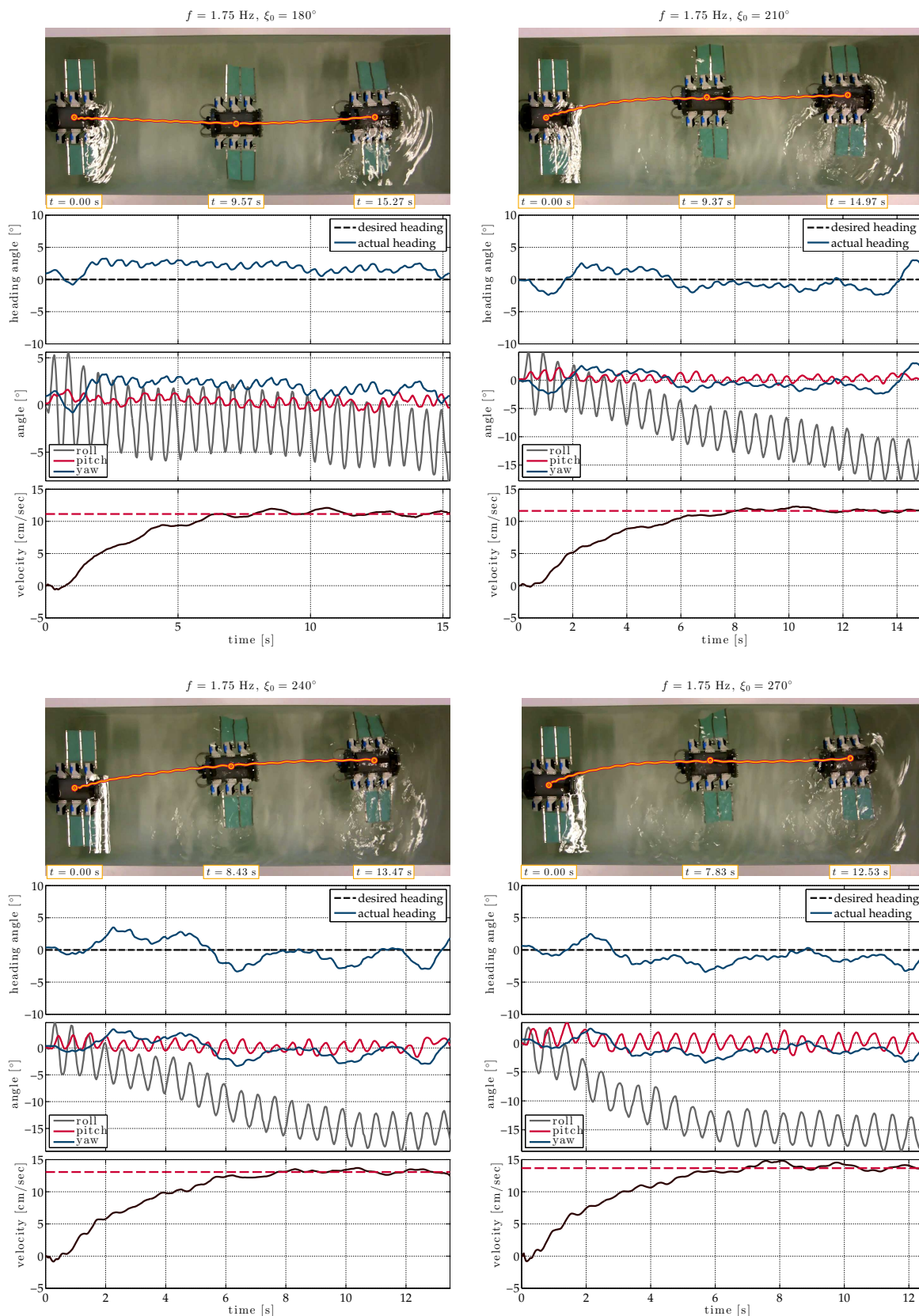
#### Πειραματικές δοκιμές με $X = 15^\circ$



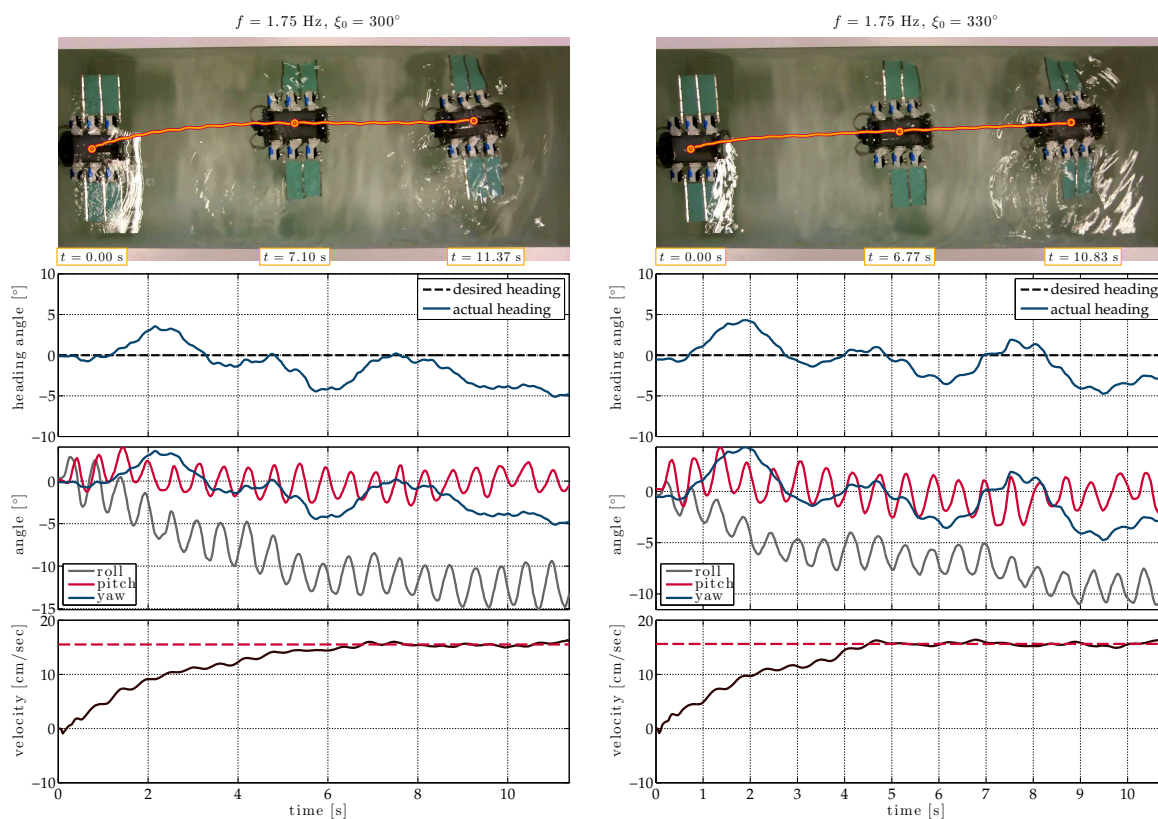
Σχήμα 32: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της σχετικής φάσης κυμάτωσης, για γωνία κλίσης των πτερυγίων  $X = 15^\circ$ .



Σχήμα 33: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της σχετικής φάσης κυμάτωσης, για γωνία κλίσης των πτερυγίων  $X = 15^\circ$ .



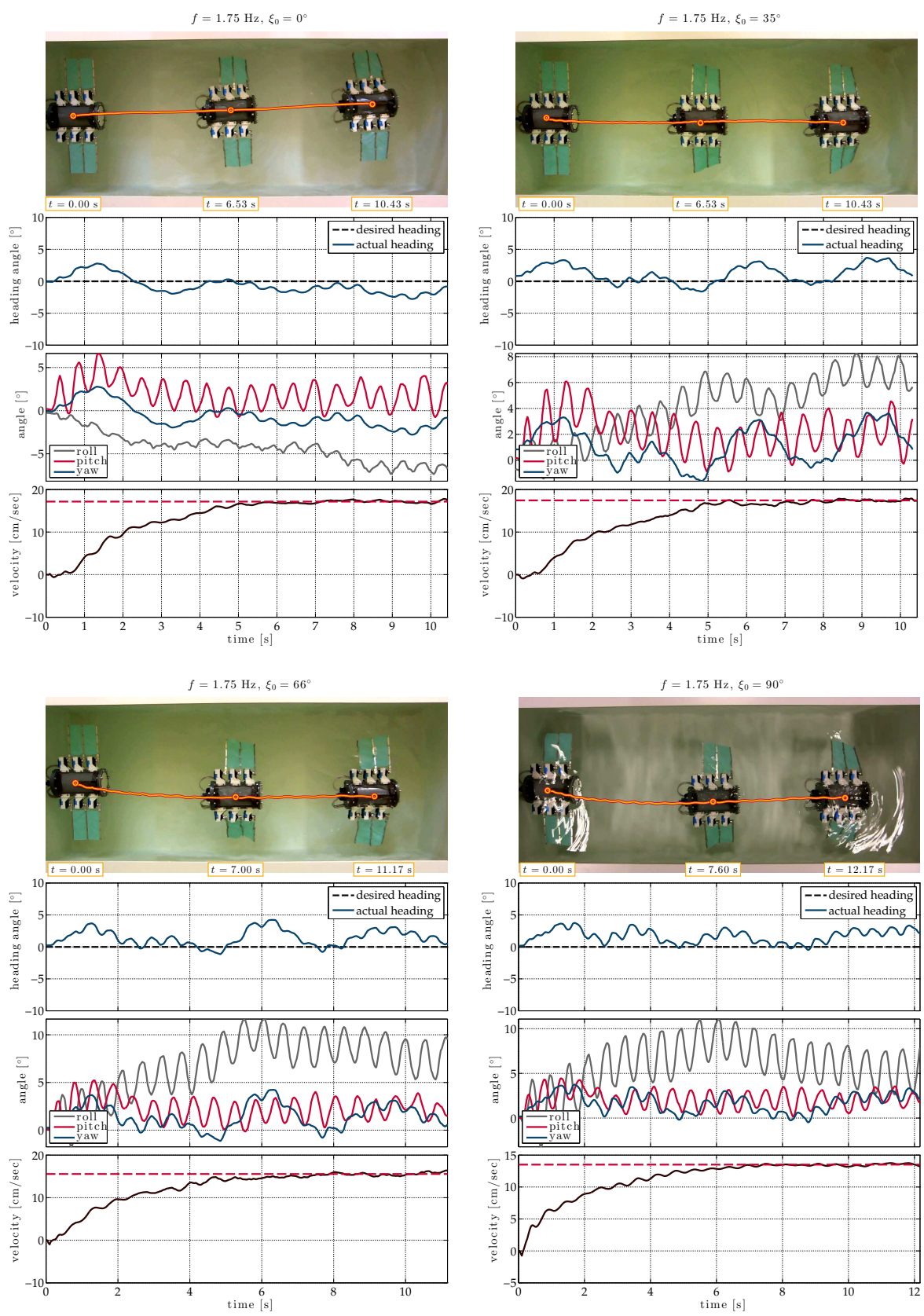
Σχήμα 34: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της σχετικής φάσης κυμάτωσης, για γωνία κλίσης των πτερυγίων  $X = 15^\circ$ .



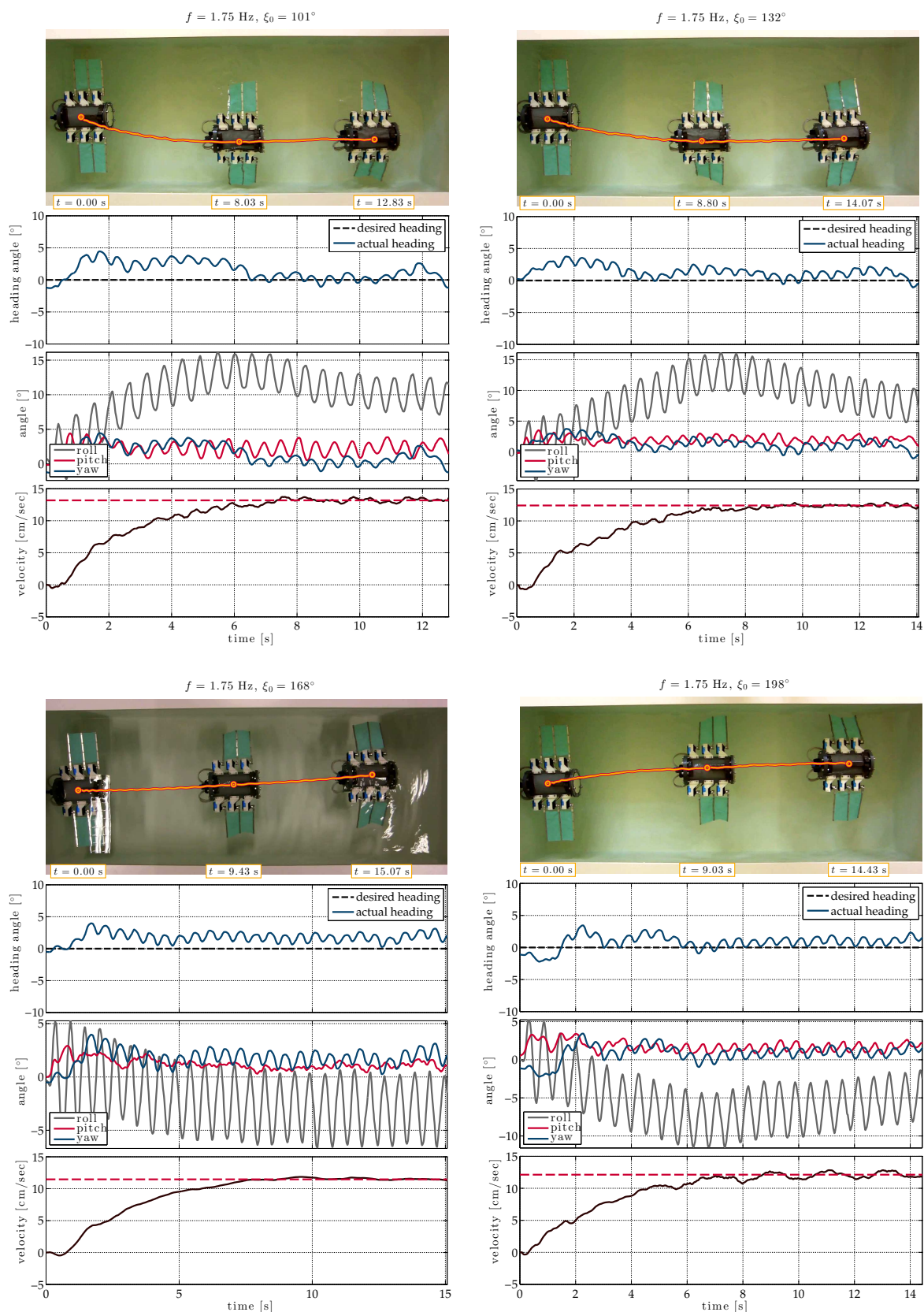
Σχήμα 35: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της σχετικής φάσης κυμάτων, για γωνία κλίσης των πτερυγών  $X = 15^\circ$ .



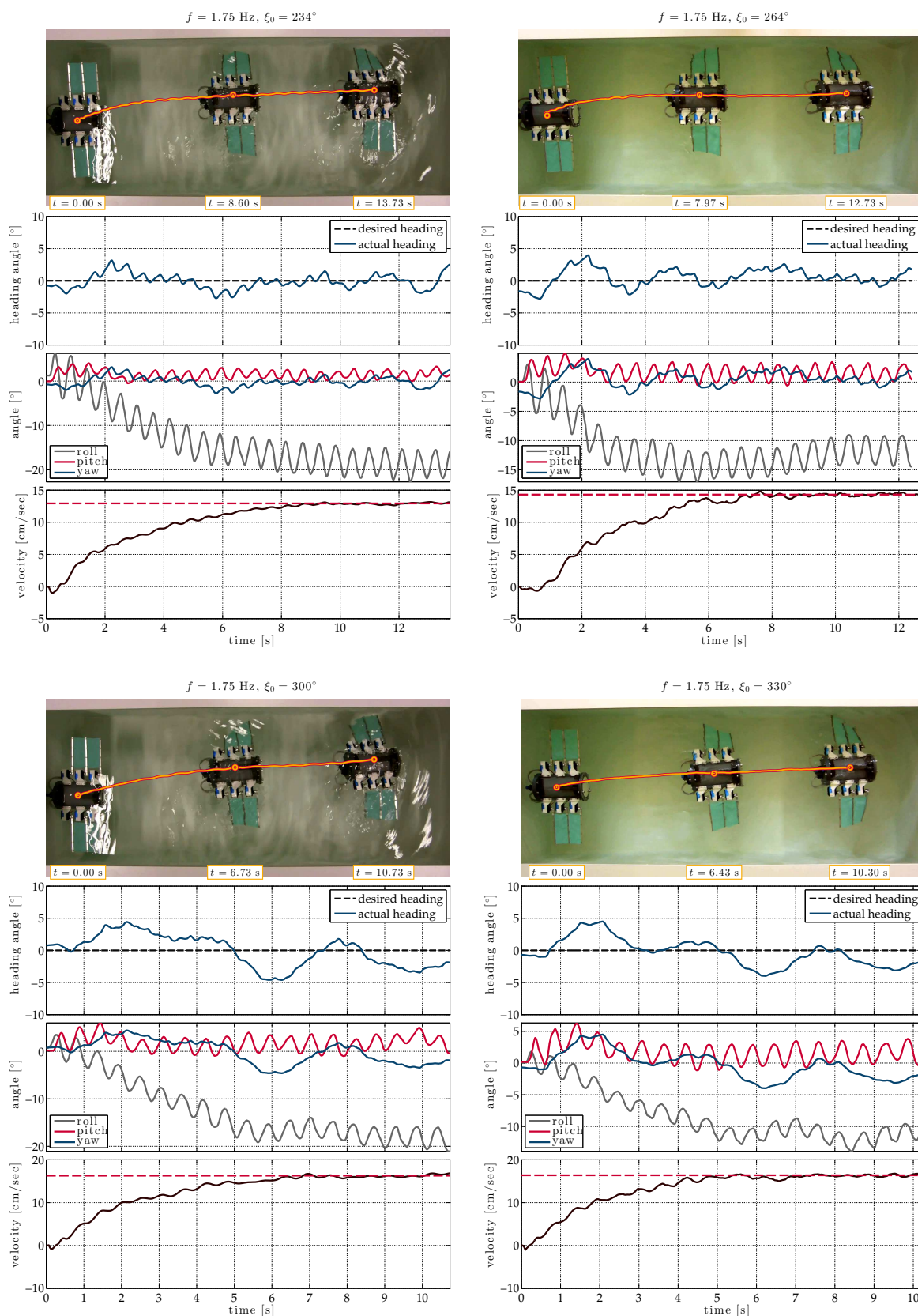
Πειραματικές δοκιμές με  $X = 30^\circ$



Σχήμα 36: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της σχετικής φάσης κυμάτωσης, για γωνία κλίσης των πτερυγίων  $X = 30^\circ$ .



Σχήμα 37: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της σχετικής φάσης κνμάτωσης, για γωνία κλίσης των πτερυγίων  $X = 30^\circ$ .

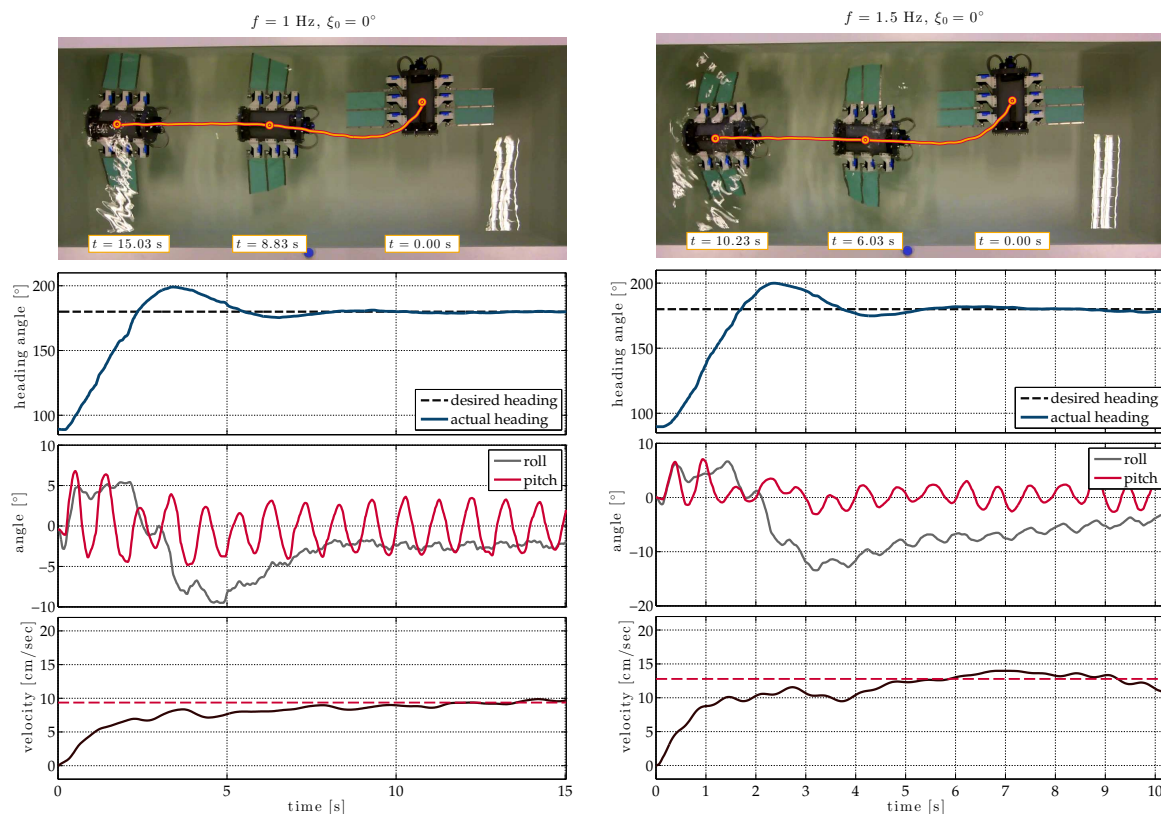


Σχήμα 38: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για τη μελέτη της επίδρασης της σχετικής φάσης κνιάτωσης, για γωνία κλίσης των πτερυγίων  $X = 30^\circ$ .

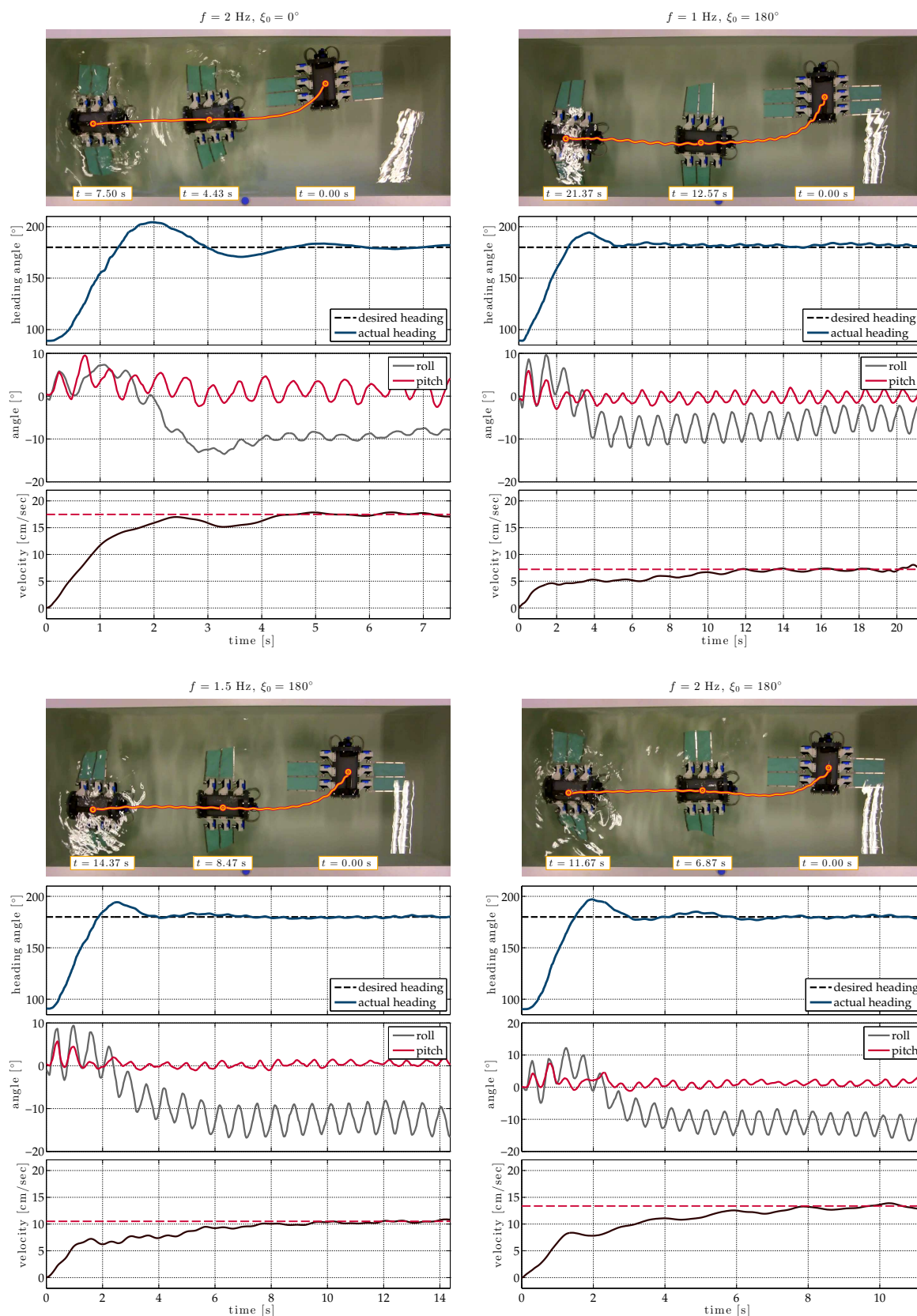
### C.1.3 Πειράματα αλλαγής του αρχικού προσανατολισμού

Εδώ παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν για πρόωση του ρομποτικού πρωτότυπου με έλεγχο πορείας κλειστού βρόχου (Ενότητα 4.3.2), όπου η επιθυμητή κατεύθυνση της κίνησης διαφέρει από τον αρχικό προσανατολισμό του οχήματος (Ενότητα 4.3.2.3). Δεδομένων των περιορισμών που επέβαλαν το σχήμα και οι διαστάσεις της δεξαμενής δοκιμών, τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν με το ρομπότ αρχικά τοποθετημένο κάθετα στη δεξαμενή (αρχικός προσανατολισμός  $\theta_0 = 90^\circ$ ) και για επιθυμητή γωνία πορείας κίνησης  $\theta_d = 180^\circ$ . Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τρεις διαφορετικές συχνότητες κυμάτωσης (συγκεκριμένα για 1 Hz, 1.5 Hz και 2 Hz) και για δύο τιμές της σχετικής φάσης κυμάτωσης ( $\xi_0 = 0^\circ$  και  $\xi_0 = 180^\circ$ ), με σταθερή κάθε φορά κλίση πτερυγίων  $X = 30^\circ$ .

Στα γραφήματα που συνοψίζουν τα αποτελέσματα κάθε πειράματος εικονίζονται διαδοχικά (από πάνω προς τα κάτω), (i) η τροχιά του οχήματος εντός της δεξαμενής δοκιμών (από επεξεργασία του σχετικού βίντεο), (ii) η απόκριση της γωνίας πορείας (heading angle) του ρομπότ, (iii) η χρονική εξέλιξη των γωνιών roll και pitch του ρομπότ, και (iv) η χρονική εξέλιξη της ταχύτητας του οχήματος εντός της δεξαμενής (από την επεξεργασία του σχετικού βίντεο).



Σχήμα 39: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για πρόωση με έλεγχο κλειστού βρόχου της κατεύθυνσης κίνησης του ρομποτικού πρωτότυπου, με αλλαγή του αρχικού προσανατολισμού.



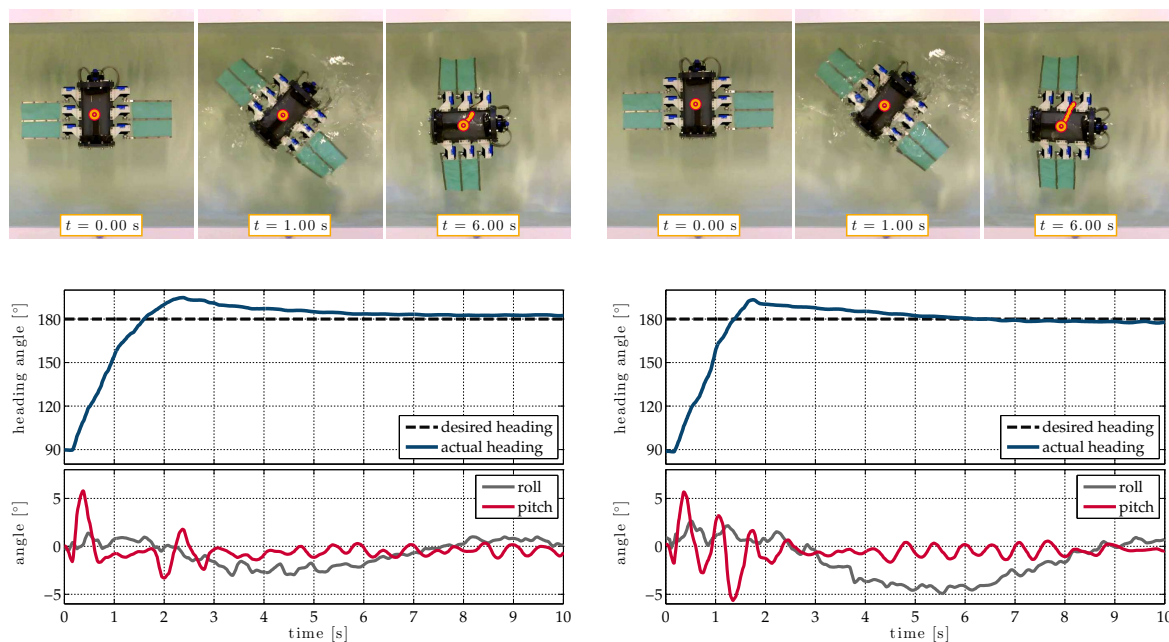
Σχήμα 40: Συγκεντρωτικά γραφήματα από τα πειράματα για πρόωση με έλεγχο κλειστού βρόχου της κατεύθυνσης κίνησης του ρομπωτικού πρωτότυπου, με αλλαγή του αρχικού προσανατολισμού.

## C.2 Επιτόπια περιστροφή με έλεγχο κλειστού βρόχου του προσανατολισμού

Στο παρόν Παράρτημα αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν για έλεγχο κλειστού βρόχου του προσανατολισμού του ρομποτικού πρωτότυπου μέσω επιτόπιας περιστροφής (Ενότητα 4.3.3). Για όλα τα αποτελέσματα που παρατίθενται εδώ, οι παράμετροι της κυμάτωσης των περυγίων καθορίστηκαν ως  $f = 1.5 \text{ Hz}$ ,  $X = 30^\circ$ ,  $\phi_0 = 60^\circ$ , ενώ οι παράμετροι του ελεγκτή για τη ρύθμιση του πλάτους κυμάτωσης βάσει του σφάλματος στη γωνία προσανατολισμού στις Σχέσεις (4.13)-(4.16) ως  $k_p = 0.7$ ,  $k_d = 0.25$  και  $A_{\max} = 45^\circ$ .

### C.2.1 Πειράματα βηματικής μεταβολής του επιθυμητού προσανατολισμού

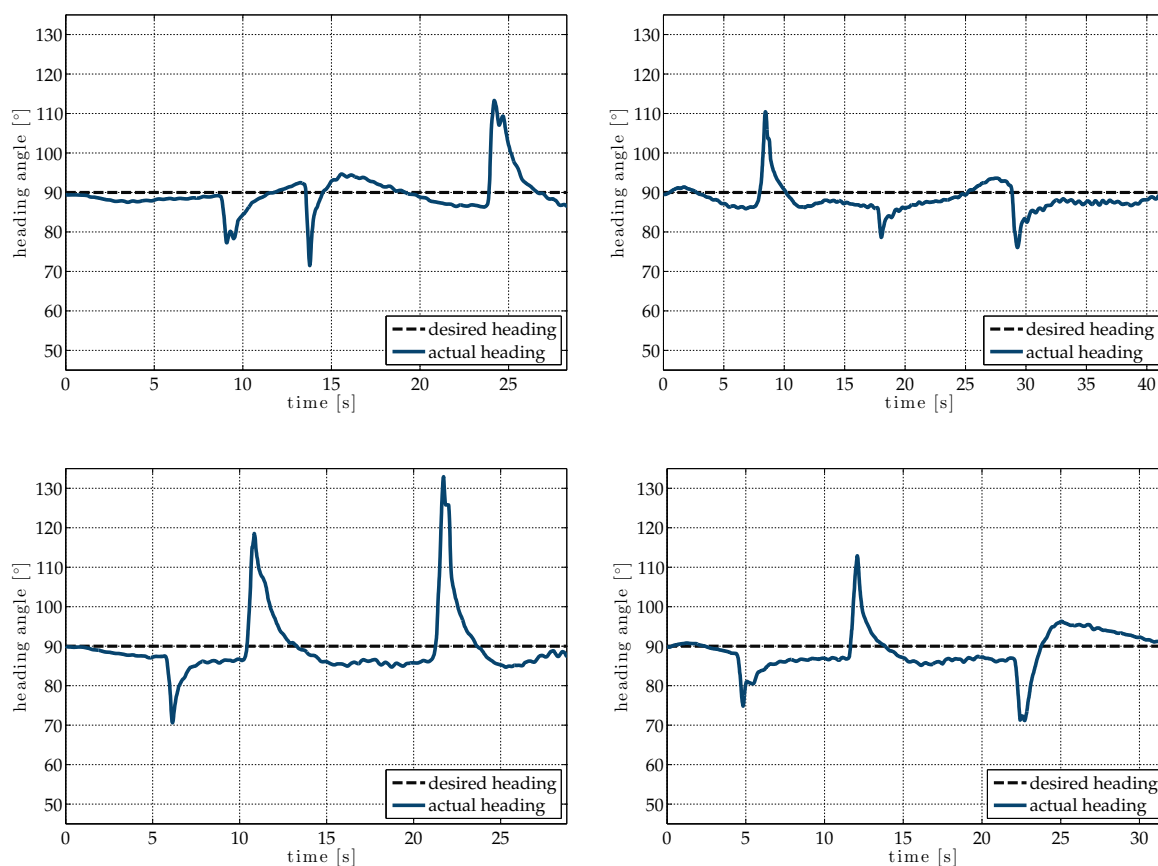
Στα πειράματα αυτά, το ρομπότ είναι τοποθετημένο στη μέση της δεξαμενής δοκιμών με αρχικό προσανατολισμό στις  $90^\circ$ , όταν, τη χρονική στιγμή  $t = 0$  η επιθυμητή γωνία προσανατολισμού λαμβάνει την τιμή  $\theta_d = 180^\circ$ . Στα γραφήματα που συνοψίζουν τα αποτελέσματα κάθε πειράματος εικονίζονται διαδοχικά (από πάνω προς τα κάτω), (i) η πορεία του οχήματος εντός της δεξαμενής δοκιμών (από επεξεργασία του σχετικού βίντεο), (ii) η απόκριση της γωνίας προσανατολισμού του ρομπότ, και (iii) η χρονική εξέλιξη των γωνιών roll και pitch.



Σχήμα 41: Αποτελέσματα από πειράματα στα οποία η επιθυμητή γωνία προσανατολισμού του οχήματος μεταβάλλεται βηματικά από τις  $90^\circ$  στις  $180^\circ$ .

### C.2.2 Πειράματα απόρριψης εξωτερικών διαταραχών

Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών για την αποτίμηση της απόδοσης του ελεγκτή κλειστού βρόχου αναφορικά με την ικανότητα απόρριψης εξωτερικών διαταραχών, οι οποίες εισάγονται εκτρέποντας με το χέρι το όχημα. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα πειράματα ξεκινούν με το όχημα προσανατολισμένο στην επιθυμητή γωνία  $\theta_d = 90^\circ$ .

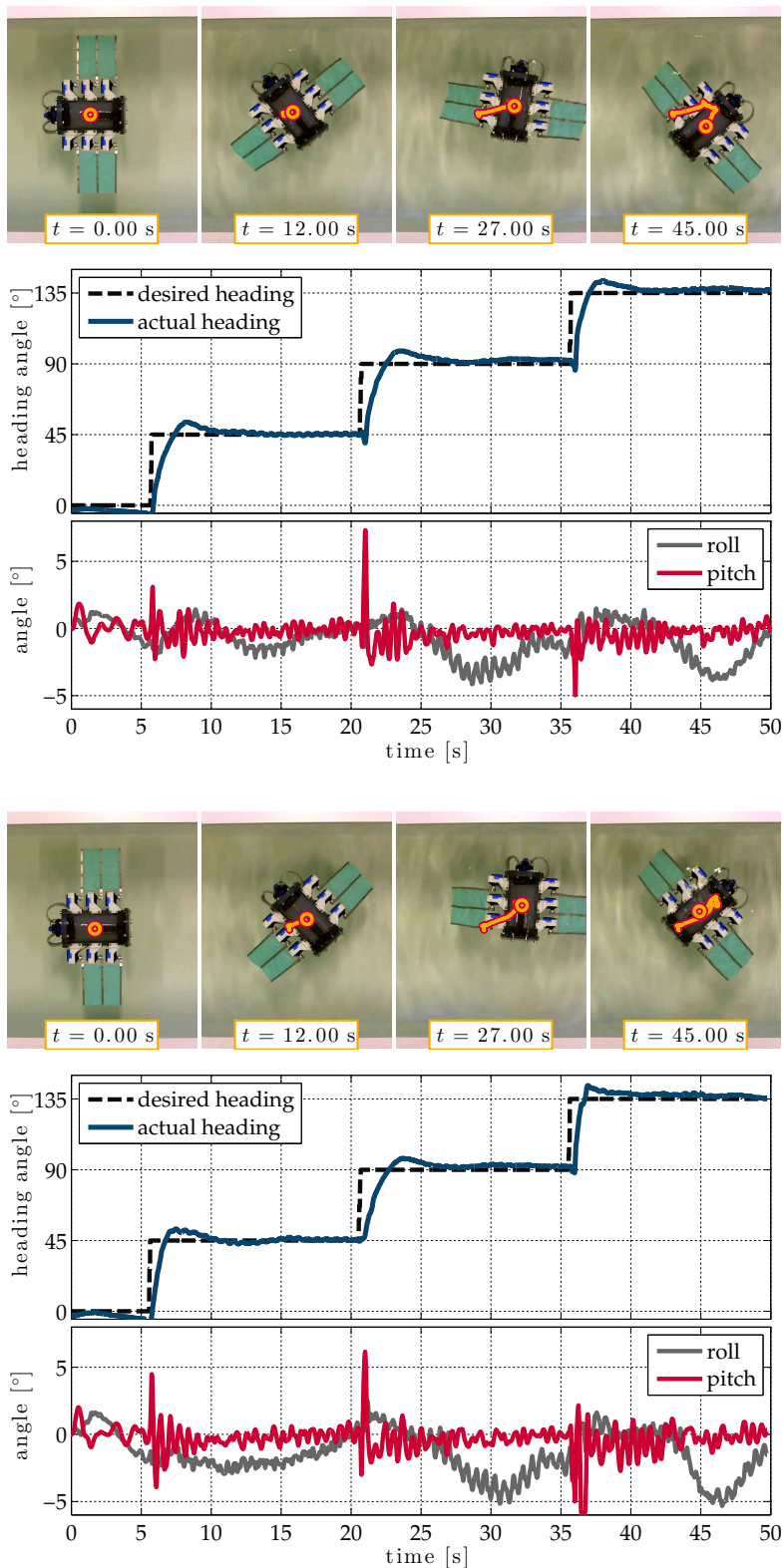


Σχήμα 42: Αποτελέσματα από τα πειράματα αποτίμησης της ικανότητας απόρριψης διαταραχών από τον ελεγκτή κλειστού βρόχου.

### C.2.3 Πειράματα διαδοχικών μεταβολών του επιθυμητού προσανατολισμού

Στα πειράματα αυτά, το ρομπότ είναι τοποθετημένο στη μέση της δεξαμενής δοκιμών με αρχικό προσανατολισμό στις  $0^\circ$ , ενώ η επιθυμητή γωνία προσανατολισμού του οχήματος μεταβάλλεται βηματικά ανά  $45^\circ$  έως τις  $135^\circ$ .

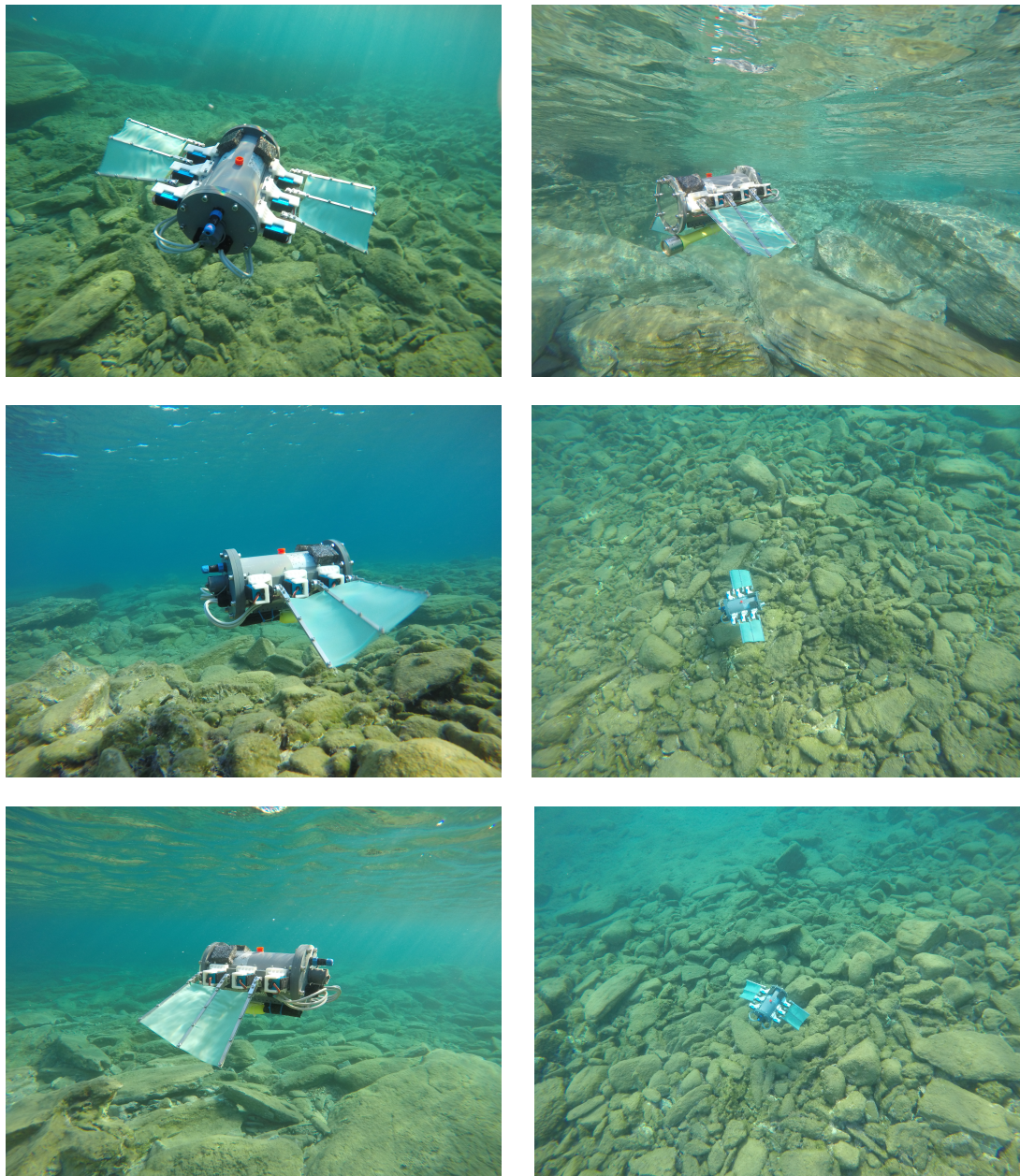
Στα γραφήματα που συνοψίζουν τα αποτελέσματα κάθε πειράματος εικονίζονται διαδοχικά (από πάνω προς τα κάτω), (i) η τροχιά του οχήματος εντός της δεξαμενής δοκιμών (από επεξεργασία του σχετικού βίντεο), (ii) η απόκριση της γωνίας προσανατολισμού του ρομπότ, και (iii) η χρονική εξέλιξη των γωνιών roll και pitch.



Σχήμα 43: Αποτελέσματα από πειράματα στα οποία η επιθυμητή γωνία προσανατολισμού του οχήματος μεταβάλλεται βηματικά ανά  $45^\circ$  έως τις  $135^\circ$ .



### Σ.2.4 Πειράματα σε θαλάσσιο περιβάλλον



Σχήμα 44: Φωτογραφικά στιγμιότυπα από τις δοκιμές του υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος σε θαλάσσιο περιβάλλον.