



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη πειραματικής διάταξης  
περυγίου κυματοειδούς κίνησης

ΑΡΑΠΗΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ - ΤΣΑΜΠΙΚΟΣ

Α.Μ.: 3988

*Επιβλέπων*

Σφακιωτάκης Μιχάλης  
Επίκουρος Καθηγητής

ΗΡΑΚΛΕΙΟ

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2013

---

© Εργαστήριο Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε.  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών • ΤΕΙ Κρήτης

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή ολόκληρου ή τμήματος του κειμένου χωρίς την έγγραφη άδεια του Εργαστηρίου.

---

---

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) - Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙΙ - Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου

---



**Ευρωπαϊκή Ένωση**  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Ευχαριστίες

Η υλοποίηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τη συμβολή συγκεκριμένων ανθρώπων που έπαιξαν καταλυτικό ρόλο με τις ιδέες, γνώσεις και εμπειρίες τους. Η κεντρική διαμόρφωση του αντικειμένου της παρούσης μελέτης ανήκει στον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Σφακιωτάκη Μιχάλη, ο οποίος επίσης συντέλεσε καθοριστικά στην ανάπτυξη του πρωτοτύπου, και με την αδιάλειπτη καθοδήγησή του ήρθαν οι εργασίες εις πέρας. Ακόμη, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για όλες τις γνώσεις και εμπειρίες που μου προσέφερε, στο πεδίο των Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου, των μικροελεγκτών, αλλά και της εφαρμοσμένης έρευνας. Τον ευχαριστώ επίσης για την ευκαιρία που μου παρείχε να πραγματοποιήσω την πρακτική μου άσκηση στο εργαστήριο Σ.Α.Ε. του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, του οποίου είναι υπεύθυνος. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Μηναδάκη, υπεύθυνο του Εργαστηρίου Μικροϋπολογιστών και Ηλεκτρονικών Κατασκευών, για τη βοήθειά του πάνω στη σχεδίαση και κατασκευή των ηλεκτρονικών πλακετών του πρωτοτύπου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής. Ευχαριστώ επίσης ιδιαίτερα τον κ. Αλέξανδρο Παπαδόπουλο, φοιτητή του Τμήματος Μηχανολογίας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, για την πολύτιμη βοήθεια, αλλά και για τις πολλές και παραγωγικές συζητήσεις που είχαμε, κυρίως σε ότι αφορά τη μηχανολογική σχεδίαση του πρωτοτύπου και την κατασκευή των εξαρτημάτων με τη βοήθεια των μηχανημάτων τρισδιάστατης εκτύπωσης, καθώς επίσης και τον Δρ. Πετούση Μάρκο, Επιστημονικό Συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας, για τις διευκολύνσεις που παρείχε για τη χρήση των εν λόγω μηχανημάτων. Ιδιαίτερα σημαντική ήταν και η βοήθεια που παρείχε στα τελικά στάδια ολοκλήρωσης του πρωτοτύπου και ο κος Σπυριδάκης Νεκτάριος, Επιστημονικός Συνεργάτης του Τμήματος Ηλεκτρολογίας, τον οποίο και ευχαριστώ, καθώς επίσης και τον Δρ. Ιωάννη Φασουλά από το Τμήμα Μηχανολογίας, για τις ιδέες και τις συμβουλές του.

Ευχαριστώ θερμά τους παραπάνω ανθρώπους για τον χρόνο που αφιέρωσαν και την εμπιστοσύνη που έδειξαν στο πρόσωπό μου, και ευελπιστώ η παρούσα μελέτη να αποτελέσει μια χρήσιμη συμβολή για την περαιτέρω αξιοποίηση των πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης ως συστήματα πρόωσης σε υποβρύχιες ρομποτικές εφαρμογές.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

---



# Περίληψη

Ο πλανήτης μας στην επιφάνεια του καλύπτεται κατά τα τρία τέταρτα από νερό, καθιστώντας εξαιρετικά δύσκολη την εξερεύνηση του. Το σημαντικό ενδιαφέρον που παρουσιάζει το θαλάσσιο περιβάλλον από βιολογικής άποψης (μελέτη και προστασία των σπάνιων οικοσυστημάτων του) αλλά και από ενεργειακής άποψης (αξιοποίηση των φυσικών πόρων του), έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη μη-επανδρωμένων Αυτόνομων Υποβρύχιων Οχημάτων (Autonomous Underwater Vehicles, AUV). Οι επιχειρησιακές τους όμως ανάγκες απαιτούν συστήματα πρόωσης μεγάλης αποδοτικότητας αλλά και με τη δυνατότητα υποστήριξης ελιγμών μεγάλης ακρίβειας μέσα στο υδάτινο περιβάλλον. Προς την κατεύθυνση αυτή, η βιομιμητική επιστημονική προσέγγιση προτάσσει την ανάπτυξη μηχανισμών πρόωσης, η σχεδίαση των οποίων βασίζεται ('μιμείται') τους τρόπους παραγωγής πρόωσης διαφόρων υδρόβιων οργανισμών. Οι βιο-εμπνευσμένοι αυτοί προωστήρες παρουσιάζουν αυξημένη αποδοτικότητα, ακρίβεια ελιγμών, αθόρυβη λειτουργία κολύμβησης και μερικοί από αυτούς κατορθώνουν πολύ μεγάλες ταχύτητες. Ένας τύπος βιομιμητικού προωστήρα είναι ο ρομποτικός μηχανισμός περυγίου κυματοειδούς κίνησης, εμπνευσμένος από την κίνηση ορισμένων ειδών σουπιάς και ηλεκτροφόρων χελιών.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η πειραματική αξιολόγηση ενός τέτοιου πρωτότυπου περυγίου κυματοειδούς κίνησης, η σχεδίαση του οποίου έχει βασιστεί στη μορφολογία και τα χαρακτηριστικά κίνησης που εμφανίζουν τα επιμήκη περύγια που απαντώνται σε ορισμένα είδη ηλεκτροφόρων χελιών. Το πρωτότυπο απαρτίζεται από οκτώ ενεργά-ελεγχόμενες ακτίνες, οι οποίες διασυνδέονται μεταξύ τους με μια εύκαμπτη μεμβράνη. Για την παραγωγή των μοτίβων κίνησης των ακτίνων, ώστε να δημιουργούνται οι κυματώσεις του περυγίου, υλοποιήθηκε μια αρχιτεκτονική ελέγχου που βασίζεται σε τεχνητές γεννήτριες κεντρικού πρότυπου ρυθμού (Central Pattern Generators, CPGs). Η αποτίμηση της ικανότητας παραγωγής αυτό-πρόωσης του εν λόγω μηχανισμού διερευνήθηκε πειραματικά μέσω μιας σειράς παραμετρικών μελετών. Τα αποτελέσματα από την μελέτη αυτή κατέδειξαν τη δυνατότητα του πρωτότυπου να επιτύχει ταχύτητες έως και 1.45 μήκη περυγίου ανά δευτερόλεπτο, αναδεικνύοντας την επίδραση που έχουν οι διάφορες κινηματικές παράμετροι σχετικά με την επίτευξη ταχύτητας και αποδοτικότητας του κυματισμού.

Στο Κεφάλαιο 1 της πτυχιακής γίνεται μια σύντομη αναφορά στο ευρύτερο ερευνητικό πλαίσιο της ανάπτυξης βιομιμητικών υποβρύχιων ρομποτικών συστημάτων, στο οποίο και εντάσσεται η παρούσα εργασία. Παρουσιάζονται επίσης οι κυριότερες ερευνητικές προσπάθειες που έχουν αναφερθεί στη διεθνή

---

βιβλιογραφία σχετικά με την ανάπτυξη πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης για χρήση σε υποβρύχια ρομποτικά συστήματα. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του ρομποτικού μηχανισμού, παρουσιάζοντας αναλυτικά τα μηχανολογικά και ηλεκτρονικά τμήματα από τα οποία απαρτίζεται. Το Κεφάλαιο 3 πραγματεύεται την επιλογή και μοντελοποίηση της στρατηγικής που αναπτύχθηκε για την υλοποίηση της κυματοειδούς κίνησης του πτερυγίου, η οποία βασίζεται σε μια δομή διασυνδεδεμένων μη-γραμμικών ταλαντωτών, οι οποίοι ονομάζονται CPGs. Παρουσιάζονται επίσης οι δύο αρχιτεκτονικές που αναπτύχθηκαν για την υλοποίηση της παραπάνω στρατηγικής ελέγχου της κυματοειδούς κίνησης για την πειραματική διάταξη του πτερυγίου. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται η οργάνωση και τα αποτελέσματα των πειραματικών μελετών που πραγματοποιήθηκαν για την αποτίμηση της απόδοσης του μηχανισμού του πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης. Τέλος, μια σειρά σχόλιων, συμπερασμάτων και προτάσεων για μελλοντική εξέλιξη, με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

---

# Summary

In recent years, the development of unmanned undersea vehicles (UUV) has received considerable attention by the research community, driven by an ever-increasing number of applications related to the scientific study, the protection and the sustainable exploitation of the oceans' natural resources. In order to address various aspects of these demanding applications, research has turned to the study of the remarkable propulsion mechanisms of fish and sea mammals, which enable them to attain high swimming speeds, as well as to maneuver with great agility in the water environment. Since these capabilities far exceed those of conventional man-made propulsive mechanisms, it is expected that the study of the biomechanics of underwater locomotion will lend itself to the development of a new generation of high-performance and energy-efficient biomimetic underwater robotic vehicles.

Undulatory fin propulsion, inspired by the locomotion of cuttlefish and of certain electric eel species, is one such approach currently under investigation. Within this framework, this final year project involved the design and experimental valuation of an undulatory fin prototype, comprised of eight actively-controlled fin rays, which are interconnected by a flexible membrane. A control architecture, based on an artificial Central Pattern Generator (CPG), is used to produce the rays' motion pattern associated with the undulatory movement of the fin. Experimental results from a parametric study indicate that the prototype can achieve speeds up to 1.45 fin lengths per second, and highlight the effect of the various kinematic parameters on the attained velocity and wave efficiency.

---

# Περιεχόμενα

<b>1. Εισαγωγικά Στοιχεία</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 Ερευνητικό πλαίσιο</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 Συστήματα πτερυγίων κοματοειδούς κίνησης</b> .....	<b>13</b>
<b>2. Σχεδιασμός και Ανάπτυξη της Πειραματικής Διάταξης</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2 Μηχανολογική σχεδίαση</b> .....	<b>21</b>
2.2.1 Σχεδίαση του κυρίως μηχανισμού του πτερυγίου .....	22
2.2.2 Σχεδίαση του μηχανισμού ολίσθησης .....	23
2.2.3 Η δεξαμενή δοκιμών.....	24
<b>2.3 Ηλεκτρονικά ελέγχου</b> .....	<b>26</b>
2.3.1 Η μονάδα του μικροελεγκτή .....	26
2.3.2 Σχεδιασμός πλακέτας επέκτασης μικροελεγκτή.....	28
2.3.3 Αισθητήριο ρεύματος .....	30
2.3.4 Βαθμονόμηση αισθητηρίου ρεύματος .....	31
2.3.5 Τροποποίηση servo.....	32
2.3.6 Βαθμονόμηση servo.....	33
2.3.7 Βαθμονόμηση οπτικού αισθητήρα απόστασης .....	38
2.3.8 Κυκλώματα τροφοδοσίας.....	39
<b>2.4 Διαδικασίες επιλογής μεμβράνης</b> .....	<b>40</b>
<b>3. Στρατηγικές Ελέγχου Κίνησης του Πτερυγίου</b> .....	<b>45</b>
<b>3.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>45</b>
<b>3.2 Στρατηγικές παραγωγής της κοματοειδούς κίνησης</b> .....	<b>45</b>
3.2.1 Απευθείας παραγωγή του οδοντοτός κύματος .....	46
3.2.2 Παραγωγή του οδοντοτός κύματος μέσω CPG.....	48
<b>3.3 Η υλοποίηση του CPG σε Simulink μοντέλο</b> .....	<b>51</b>
<b>3.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων</b> .....	<b>52</b>
<b>3.5 Αρχιτεκτονική ελέγχου της κίνησης του πτερυγίου</b> .....	<b>55</b>
3.5.1 Αρχιτεκτονική ελέγχου κίνησης μέσω Simulink.....	55
3.5.2 Αρχιτεκτονική ελέγχου κίνησης αυτόνομης διάταξης.....	57
<b>4. Πειραματική Μελέτη του Πτερυγίου Κοματοειδούς Κίνησης</b> .....	<b>59</b>
<b>4.1 Εισαγωγή</b> .....	<b>59</b>
<b>4.2 Μετρήσεις με το πτερόγιο στον αέρα</b> .....	<b>59</b>
4.2.1 Πειραματικές διαδικασίες.....	59
4.2.2 Πειραματικά αποτελέσματα .....	60
<b>4.3 Μετρήσεις με το πτερόγιο στο νερό</b> .....	<b>64</b>
4.3.1 Πειραματικές διαδικασίες.....	64
4.3.2 Πειραματικά αποτελέσματα .....	66
<b>5. Σχόλια, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εξέλιξη</b> .....	<b>71</b>
<b>5.1 Σχόλια &amp; συμπεράσματα</b> .....	<b>71</b>
<b>5.2 Μελλοντική εξέλιξη</b> .....	<b>72</b>
<b>Βιβλιογραφικές Πηγές</b> .....	<b>75</b>
<b>Παραρτήματα</b> .....	<b>77</b>
<b>Παράρτημα-Α: Σχέδια CAD</b> .....	<b>77</b>
<b>Παράρτημα-Β: Σχηματικά Διαγράμματα</b> .....	<b>82</b>
<b>Παράρτημα-Γ: Datasheets</b> .....	<b>87</b>

---



## **Εισαγωγικά Στοιχεία**

### **1.1 Ερευνητικό πλαίσιο**

Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη μη-επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων (Unmanned Undersea Vehicles, UUV), για χρήση σε μια σειρά από εφαρμογές που αφορούν στην επιστημονική μελέτη, την οικονομική εκμετάλλευση και την προστασία των φυσικών πόρων του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα Τηλεχειριζόμενα Υποβρύχια Οχήματα (Remotely Operated Vehicles, ROV, βλ. Σχήμα 1(α)), που έχουν γίνει γνωστά στο ευρύτερο κοινό κυρίως από τη χρήση τους για τον εντοπισμό και την εξερεύνηση ναυαγίων. Βασικό πεδίο εφαρμογών των ROV είναι η εκτέλεση, σε μεγάλα συνήθως βάθη, εργασιών επιθεώρησης, συντήρησης και επισκευής υποθαλάσσιων εγκαταστάσεων, αγωγών πετρελαίου ή ποντισμένων καλωδίων. Μια δεύτερη, ταχέως αναπτυσσόμενη, κατηγορία των UUV, είναι τα Αυτόνομα Υποβρύχια Οχήματα (Autonomous Underwater Vehicles, AUV, βλ. Σχήμα 1(β)). Όπως υποδηλώνει το όνομά τους, τα AUV ενσωματώνουν τεχνολογίες που επιτρέπουν, εν αντιθέσει με τα ROV, την ενεργειακή και επιχειρησιακή τους ανεξαρτησία από πλοίο υποστήριξης, καθιστώντας εφικτές (τόσο τεχνικά, όσο και οικονομικά) αποστολές κάλυψης εκτεταμένων θαλάσσιων περιοχών, στα πλαίσια εφαρμογών όπως η συλλογή ωκεανογραφικών δεδομένων, η αποτύπωση του βυθού, η επιτήρηση/διασφάλιση των θαλάσσιων συνόρων, κ.ο.κ.



(α) ROV

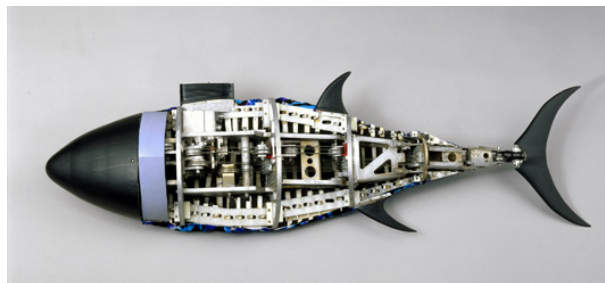


(β) AUV

*Σχήμα 1. Χαρακτηριστικά παραδείγματα των δύο βασικότερων κατηγοριών μη-επανδρωμένων υποβρύχιων οχημάτων.*

Η διεύρυνση του πεδίου εφαρμογών και οι διαρκώς αυξανόμενες επιχειρησιακές απαιτήσεις από τα ROV και τα AUV, έχουν στρέψει το ερευνητικό ενδιαφέρον στη μελέτη των εκπληκτικής αποτελεσματικότητας μηχανισμών πρόωσης των ψαριών και των θαλάσσιων θηλαστικών, οι οποίοι επιτρέπουν στους οργανισμούς αυτούς να αναπτύσσουν υψηλές ταχύτητες, αλλά και να πραγματοποιούν ελιγμούς ακριβείας μέσα στο υδάτινο περιβάλλον. Καθώς οι δυνατότητες αυτές, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί εξελικτικά στη φύση, υπερβαίνουν κατά πολύ τις δυνατότητες των υπάρχοντων υποβρύχιων οχημάτων, προσδοκάται ότι η κατανόηση της εμβιομηχανικής της κίνησης των υδρόβιων οργανισμών, θα οδηγήσει στην ανάπτυξη μιας νέας γενιάς βιομιμητικής σχεδίασης υποβρύχιων ρομποτικών συστημάτων, αυξημένης αποτελεσματικότητας και υψηλότερης απόδοσης. Για την προώθηση τέτοιων εγχειρημάτων υιοθετούνται συνήθως διεπιστημονικές προσεγγίσεις, καθώς το φάσμα των απαιτούμενων ερευνητικών δραστηριοτήτων είναι ιδιαίτερα εκτεταμένο. Ενδεικτικά αναφέρονται δραστηριότητες όπως η συλλογή και ανάλυση βιολογικών δεδομένων για την κινηματική των έμβιων συστημάτων, οι πειραματικές μετρήσεις χαρακτηρισμού του σχετικού πεδίου ροής, η ανάπτυξη συναφών υδροδυναμικών μοντέλων (αναλυτικού ή/και υπολογιστικού χαρακτήρα), η επιλογή και ολοκλήρωση των κατάλληλων μηχανικών τεχνολογιών και συστημάτων ελέγχου για την υλοποίηση των βιομιμητικών ρομποτικών συστημάτων, κ.ο.κ.

Ένα σημαντικό ποσοστό αυτών των προσπαθειών, αντλώντας έμπνευση από τη μορφολογία και τον τρόπο κίνησης πελαγίσσιων ψαριών όπως ο τόνος, είναι στην κατεύθυνση της ανάπτυξης υποβρύχιων οχημάτων με εύκαμπτο, αρθρωτό σώμα και ταλαντευόμενο ουραίο περύγιο. Το ρομποτικό σύστημα RoboTuna, που αναπτύχθηκε από το MIT στα μέσα της δεκαετίας του '90, αποτελεί το πρώτο και πλέον γνωστό παράδειγμα αυτής της σχεδιαστικής προσέγγισης, η οποία εστιάζει στην επίτευξη υψηλής ταχύτητας κίνησης με αυξημένο βαθμό ενεργειακής απόδοσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για εφαρμογές υποβρύχιων οχημάτων που απαιτούν την κάλυψη εκτεταμένων θαλάσσιων περιοχών, όπως η συλλογή ωκεανογραφικών ή/και περιβαλλοντικών δεδομένων από AUV.



Σχήμα 2. Το ρομποτικό σύστημα RoboTuna, που αναπτύχθηκε στο M.I.T.

Από την άλλη, για πολλές υποβρύχιες εφαρμογές, όπως η ενάλια αρχαιολογία, η εξερεύνηση του εσωτερικού ναυαγίων, και η επιθεώρηση/συντήρηση/επισκευή ποντισμένων αγωγών, είναι ιδιαίτερα σημαντική η ικανότητα εκτέλεσης ελιγμών ακριβείας σε χαμηλές, ως επί το πλείστον, ταχύτητες, και μάλιστα χωρίς να

διαταράσσεται ο πυθμένας του βυθού. Στις απαιτήσεις αυτές δεν μπορούν να ανταποκριθούν ικανοποιητικά ούτε τα συστήματα προωστήρων με έλικες (που χρησιμοποιούνται στα τρέχουσας τεχνολογίας ROV και AUV), αλλά ούτε και τα βιομημητικά οχήματα που υιοθετούν τη σχεδίαση που περιγράφηκε παραπάνω. Για το λόγο αυτό, αρκετές ερευνητικές προσπάθειες αφορούν στη μελέτη της συνεισφοράς που έχουν στην εκτέλεση ελιγμών, στη δυναμική ευστάθεια και στην πρόωση τα περιφερειακά πτερύγια (πλευρικά, ραχιαία, εδρικά) των θαλάσσιων οργανισμών.

Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη υποβρυχίων ρομποτικών συστημάτων, το σύστημα πρόωσης των οποίων θα έχει ως βάση τους μηχανισμούς κίνησης οργανισμών όπως οι σουπιές, τα σαλάχια, τα μαχαιρόψαρα, και οι ιππόκαμποι (Σχήμα 3). Τα είδη αυτά φέρουν εύκαμπτα επιμήκη πτερύγια, κατά μήκος των οποίων δημιουργούνται και μεταδίδονται κυματοειδείς μεταβολές του σχήματός τους, οι οποίες παράγουν προωστικές δυνάμεις. Το μέγεθος και η κατεύθυνση των δυνάμεων αυτών εξαρτάται από τις παραμέτρους των εκτελούμενων κυματώσεων των πτερυγίων, οι οποίες χαρίζουν αυξημένες ικανότητες εκτέλεσης ελιγμών (συμπεριλαμβανόμενης και της δυνατότητας οπίσθιας κίνησης) στα είδη αυτά, χωρίς μάλιστα να απαιτείται η παράλληλη χρήση κυματώσεων του σώματος, το οποίο, σε χαμηλές τουλάχιστον ταχύτητες, παραμένει άκαμπτο. Επιπλέον, πρόσφατες μελέτες υποδεικνύουν ότι η στρατηγική αυτή κίνησης στο νερό χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό ενεργειακής απόδοσης.



(α) *Sepia officinalis*  
(σουπιά)



(α) *Neotrygon kuhlii*  
(σαλάχι)



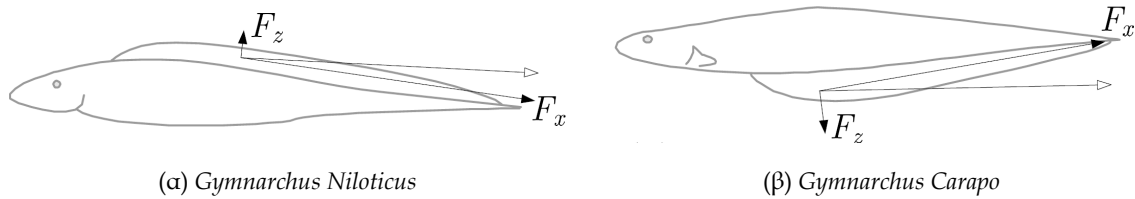
(γ) *Apteronotus albifrons*  
(μαχαιρόψαρο)

Σχήμα 3. Παραδείγματα οργανισμών που κινούνται στο νερό χρησιμοποιώντας κυματώσεις των (α),(β) πλευρικών τους πτερυγίων, ή (γ) του εδρικού τους πτερυγίου.

Ειδικότερα σε σχέση με την δυνατότητα μεταβολής της διανυσματικής κατεύθυνσης της παραγόμενης δύναμης, που παρέχουν τα πτερύγια κυματοειδούς κίνησης, αυτή έχει αναλυθεί ποιοτικά από τις αρχές της δεκαετίας του 1940. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την εργασία των Breder and Edgerton [A1], η παραγόμενη δύναμη από τις κυματώσεις αναλύεται σε μία συνιστώσα  $F_Z$  κάθετη στη βάση του πτερυγίου (προερχόμενη από την απλή ταλάντωση των ακτινών του πτερυγίου) και σε μία συνιστώσα  $F_X$  παράλληλη με την βάση του πτερυγίου (ως αποτέλεσμα της διέλευσης του οδεύοντος κύματος κατά μήκος του πτερυγίου). Μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της κυμάτωσης του πτερυγίου, είναι εφικτή η μεταβολή του σχετικού πλάτους των συνιστωσών αυτών, και, κατά συνέπεια, της κατεύθυνσης της συνολικής συνισταμένης. Σημειώνεται επίσης ότι, εάν η



βάση του περυγίου είναι παράλληλη με τον κυρίως άξονα του σώματος, η συνιστώσα  $F_z$  δεν μπορεί να έχει συνεισφορά στην παραγωγή πρόωσης στην οριζόντια κατεύθυνση. Από την παρατήρηση των περισσότερων ειδών ηλεκτροφόρου χελιού, διαπιστώνεται ότι η βάση των περυγίων τους βρίσκεται υπό κλίση, με αποτέλεσμα η συνισταμένη των δύο δυνάμεων  $F_x$  και  $F_z$  να μπορεί να προκύψει παράλληλη με τον κυρίως άξονα του σώματος. Με τον τρόπο αυτό, εικάζεται ότι εξασφαλίζεται η μεγιστοποίηση της προωστικής δύναμης για κίνηση του ψαριού στην οριζόντια κατεύθυνση, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα.

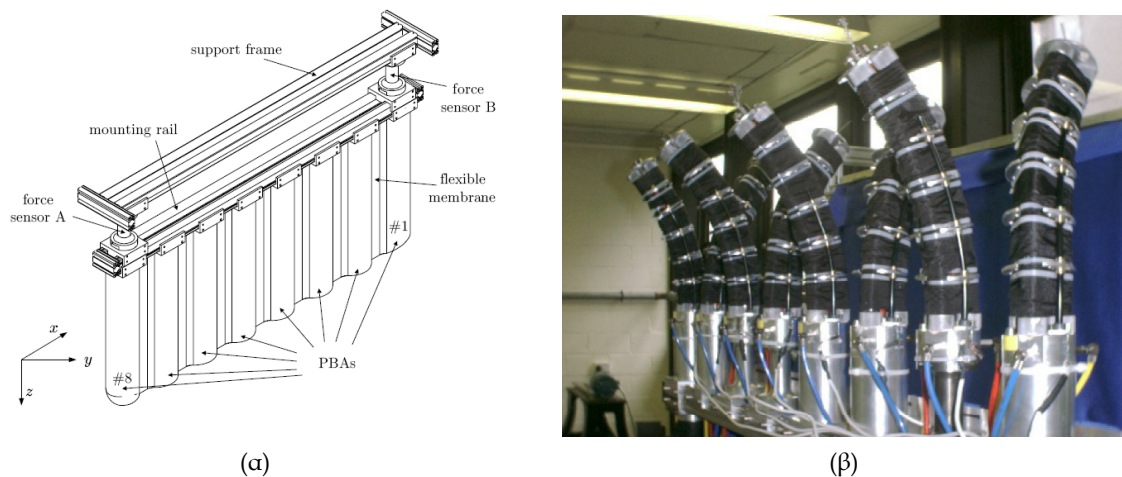


Σχήμα 4. Απεικόνιση της συσχέτισης της μορφολογίας του σώματος με τις δύο συνιστώσες της παραγόμενης δύναμης, για δύο είδη ηλεκτροφόρων χελιών με επιμήκη πτερύγια κυματοειδούς κίνησης.

## 1.2 Συστήματα περυγίων κυματοειδούς κίνησης

Στην παρούσα Ενότητα παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες ερευνητικές προσπάθειες, όπως αυτές καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία, που αφορούν στην ανάπτυξη περυγίων κυματοειδούς κίνησης για την πρόωση υποβρύχιων ρομποτικών οχημάτων.

Η πρώτη σχετική ερευνητική εργασία που καταγράφεται στη βιβλιογραφία είναι ο μεμονωμένος μηχανισμός περυγίου κυματοειδούς κίνησης που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Heriot-Watt [A2].

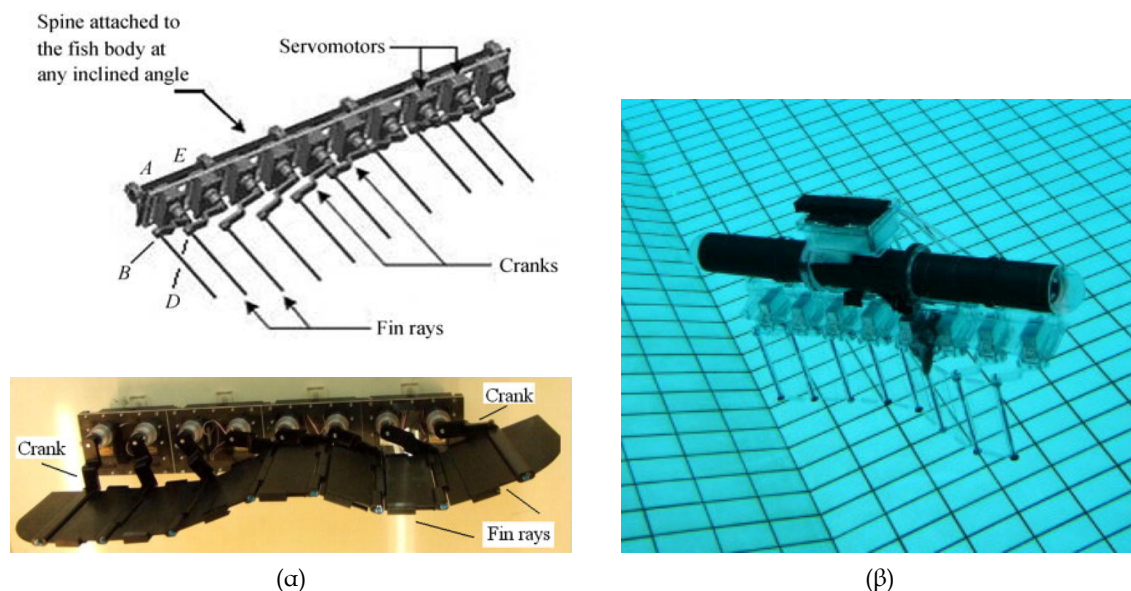


Σχήμα 5. Ο μηχανισμός του πνευματικά οδηγούμενου περυγίου κυματοειδούς κίνησης από το Πανεπιστήμιο Heriot-Watt.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5, ο μηχανισμός απαρτιζόταν από 8 ακτίνες, οι οποίες ενεργοποιούνταν μέσω πνευματικού συστήματος, προκειμένου για την παραγωγή των

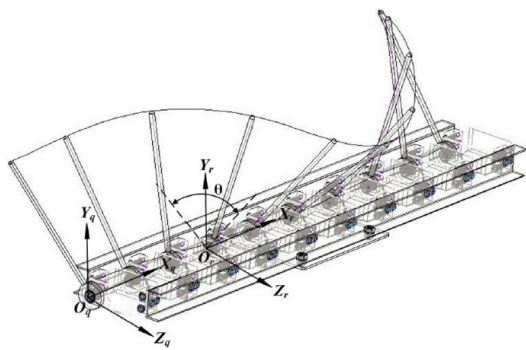
κυματώσεων. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την μεμβράνη ήταν ένα ελαστικό ύφασμα Lycra. Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε σύστημα αισθητήρων δύναμης (strain gauges) για την μέτρηση και των τριών συνιστωσών των παραγόμενων δυνάμεων από τις κυματώσεις του περυγίου, δεν παρείχε όμως τη δυνατότητα μελέτης της ικανότητας αυτοπρόωσης του μηχανισμού, δεδομένου ότι αυτός ήταν σταθερά στερεωμένος στο πλαίσιο της δεξαμενής νερού στην οποία είχε τοποθετηθεί.

Μια από τις πρώτες υλοποιήσεις υποβρύχιου ρομπότ με σύστημα πρόωσης περυγίου κυματοειδούς κίνησης παρουσιάστηκε από το Πανεπιστήμιο Nanyang Technological University, Singapore [A3]. Το περύγιο απαρτιζόταν από 8 ανεξάρτητα κινούμενες ακτίνες (Σχήμα 6), κάθε μία από τις οποίες οδηγούνταν από ένα R/C-Servo. Για τη μεμβράνη χρησιμοποιήθηκε ένα άκαμπτο ακριλικό υλικό. Το ρομπότ ενσωμάτωνε μια σωληνοειδή κατασκευή (buoyancy tank), η οποία ανάλογα με την χρήση των δύο εσωτερικών εμβόλων της, επέτρεπε τη μεταβολή της πλευστότητας για τη ρύθμιση του βάθους. Η μελέτη της κίνησης του πρωτοτύπου πραγματοποιήθηκε μέσω επεξεργασίας μιας σειράς από video που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραματικών μελετών.

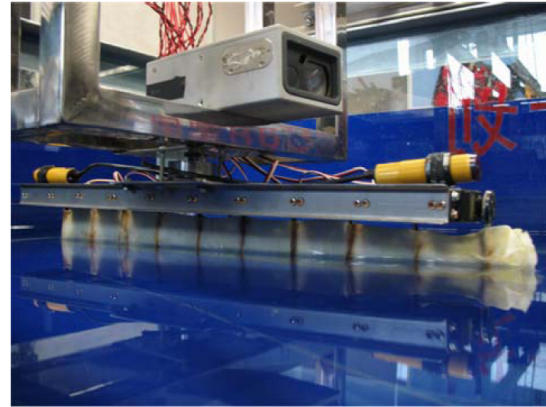


Σχήμα 6. Ο μηχανισμός αυτόνομου υποβρύχιου με περύγιο κυματοειδούς κίνησης από το Πανεπιστήμιο Nanyang.

Στο ερευνητικό Ίδρυμα Chinese Academy of Sciences, αναπτύχθηκε ο μεμονωμένος μηχανισμός περυγίου κυματοειδούς κίνησης [A4] που φαίνεται στο Σχήμα 7. Αποτελείται από 10 ακτίνες (κυκλικής διατομής) κατασκευασμένες από χαλκό, προσαρτημένη η κάθε μία σε αντίστοιχο R/C servo. Επάνω στον πειραματικό μηχανισμό βρίσκεται προσαρτημένος ένας οπτικός αισθητήρας απόστασης για τη μέτρηση της ταχύτητας, καθώς και δύο αισθητήρες υπερύθρων για τις τερματικές θέσεις τις κίνησης. Το περύγιο μπορούσε να κινηθεί μόνο σε ευθεία (μπρός - πίσω), λόγω του ότι ήταν προσαρτημένο σε έναν μηχανισμό ευθύγραμμης κίνησης, ο οποίος είχε τοποθετηθεί στην δεξαμενή δοκιμών.



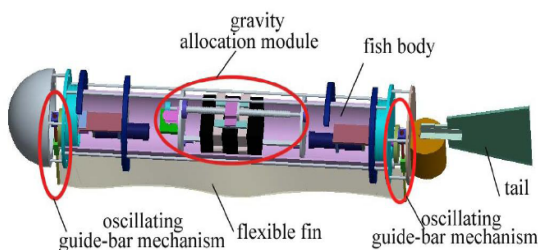
(α)



(β)

Σχήμα 7. Ο μηχανισμός πειραματικής διάταξης πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης από το ερευνητικό Ίδρυμα Chinese Academy of Sciences.

Το 2008, το πανεπιστήμιο Zhejiang παρουσίασε ένα ρομποτικό σύστημα με μηχανισμό πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης (Σχήμα 8) σε συνδυασμό με ένα πτερύγιο ουράς (για να επιτυγχάνεται στροφή δεξιά/αριστερά), το οποίο κατεύθυνε ένα R/C-Servo [A5]. Στο μηχανισμό του πτερυγίου δημιουργούνταν κυματώσεις μέσω δύο DC κινητήρων, ένας στο εμπρόσθιο τμήμα για κίνηση προς τα μπροστά και ένα στο πίσω τμήμα για κίνηση προς τα πίσω. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την μεμβράνη ήταν ένα φύλλο PVC πάχους 0,2mm. Η μελέτη της ταχύτητας του μηχανισμού έγινε με επεξεργασία των video που πάρθηκαν κατά τις πειραματικές δοκιμές του.



(α)



(β)

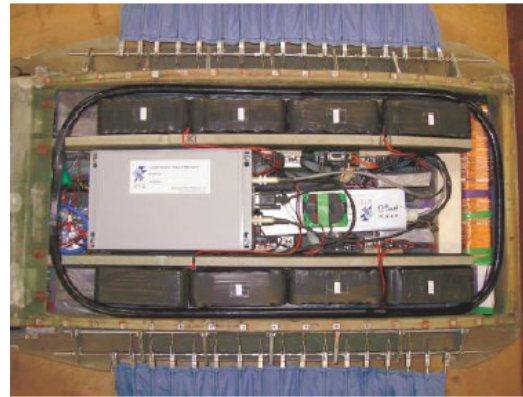
Σχήμα 8. Ο μηχανισμός πειραματικής διάταξης πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης από το Πανεπιστήμιο Zhejiang.

Από το πανεπιστήμιο Delft στην Ολλανδία αναπτύχθηκε το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα Galatea [A6], το οποίο διαθέτει δύο πλευρικά πτερύγια κυματοειδούς κίνησης (Σχήμα 9). Ο μηχανισμός του κάθε πτερυγίου απαρτιζόταν από 17 ακτίνες αλουμινίου, όπου η κάθε ακτίνα κατευθυνόταν από ένα R/C-Servo. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κάθε μεμβράνη ήταν βαμβακερό ύφασμα το οποίο είχε εμποτιστεί με ένα υδρόφοβο (water-repellent) υλικό. Λόγω πρακτικών περιορισμών, η ερευνά για τη μέτρηση της στατικής ώθησης ήταν περιορισμένη. Η προωθητική δύναμη που παρήγαγε, μετρήθηκε μέσω ενός συστήματος από αισθητήρια τύπου strain-gauge.





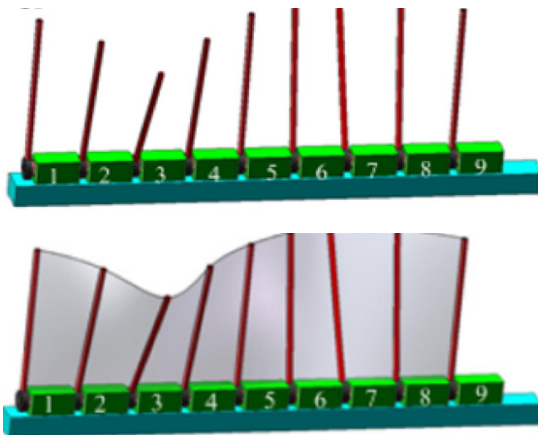
(α)



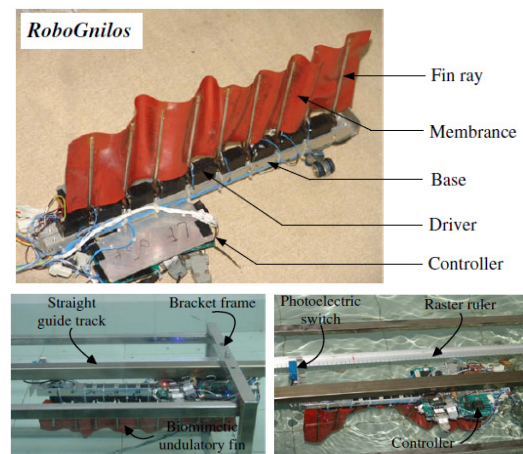
(β)

Σχήμα 9. Το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα με δύο πτερύγια κυματοειδούς κίνησης από το Πανεπιστήμιο Delft.

Στο Σχήμα 10 απεικονίζεται ο μεμονωμένος μηχανισμός πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης που έχει αναπτυχθεί στο Πανεπιστήμιο National University of Defense Technology της Κίνας, όπου το πτερύγιο αποτελείται από 9 ατσάλινες ακτίνες, προσαρτημένη η κάθε μία σε αντίστοιχο R/C servo, με μεμβράνη από φύλλο καουτσούκ [A7]. Μέσω της πειραματικής διάταξης, όπου το πτερύγιο είχε προσαρτηθεί στη δεξαμενή με ένα μηχανισμό ευθύγραμμης κίνησης, μετρήθηκε η ικανότητα αυτοπρόωσης του μηχανισμού συναρτήσει της συχνότητας και του εύρους της κυμάτωσης.



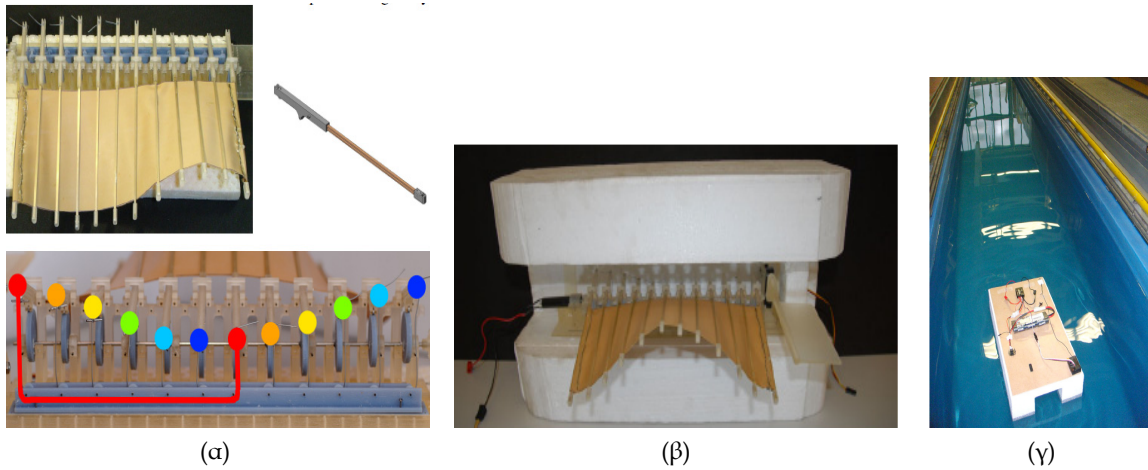
(α)



(β)

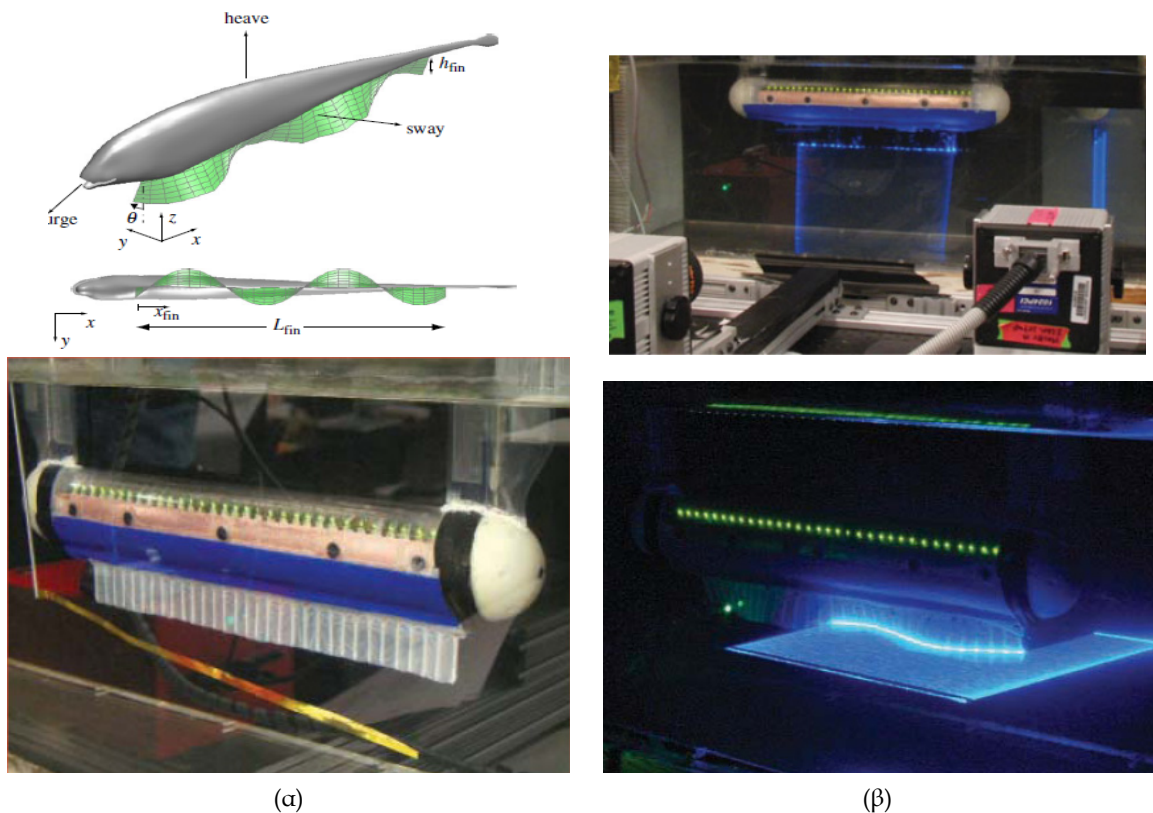
Σχήμα 10. Ο μεμονωμένος μηχανισμός πειραματικής διάταξης πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης από το Πανεπιστήμιο National University of Defense Technology, China.

Το πανεπιστήμιο ETH Zürich παρουσίασε μια κατασκευή αυτόνομου οχήματος τύπου καταμαράν (catamaran), το οποίο διέθετε ένα πτερύγιο κυματοειδούς κίνησης ως σύστημα προώθησης (Σχήμα 11). Ο μηχανισμός του πτερυγίου απαρτιζόταν από 12 ακτίνες, τις οποίες κατεύθυνε ένας κεντροφόρος άξονας με τη βοήθεια ενός κινητήρα [A8]. Το σώμα του οχήματος κατασκευάστηκε από πολυστυρένιο (polystyrene), σε σχήμα τύπου καταμαράν, και η μεμβράνη ήταν από καουτσούκ.



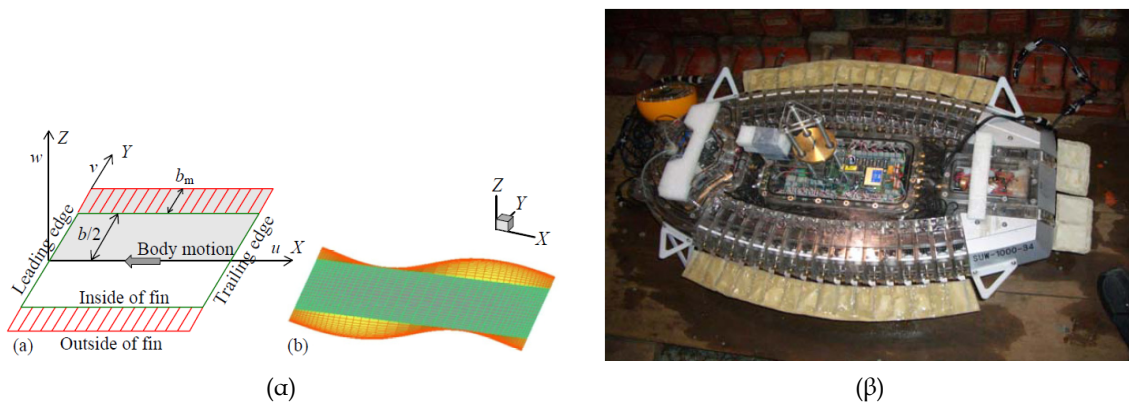
Σχήμα 11. Το αυτόνομο όχημα με πτερύγιο κυματοειδούς κίνησης από το ETH Zürich.

Μια από τις πιο προηγμένες υλοποιήσεις υποβρύχιας ρομποτικής διάταξης με μηχανισμό πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης είναι αυτή που έχει αναπτυχθεί στο πανεπιστήμιο Northwestern University στις Η.Π.Α. [A9]. Το πτερύγιο (μήκους 32.6 cm και ύψους 3.4 cm) διαθέτει 32 ακτίνες, η κίνηση των οποίων ελέγχεται από ισάριθμους DC κινητήρες (10mm RE10 Maxon motor), με σύστημα γραναζιών για τη μετάδοση της κίνησης (Σχήμα 12). Η μεμβράνη είναι από ελαστικό ύφασμα Lycra, με μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity) ίσο με περίπου 0.2 MPa. Το συνολικό μήκος του ρομπότ ανέρχεται σε 40 cm, ενώ η διάμετρός του είναι 12.0 cm



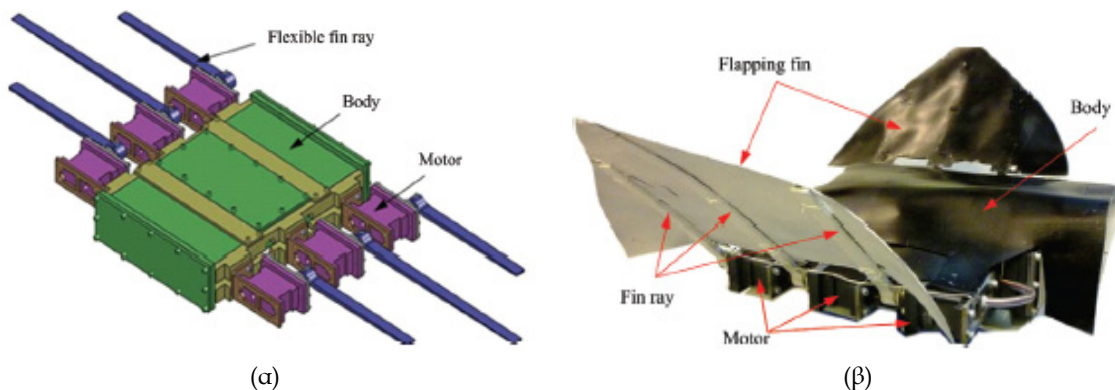
Σχήμα 12. Το ρομποτικό σύστημα Ghostbot από το Πανεπιστήμιο Northwestern University.

Το υποβρύχιο ρομποτικό σύστημα που παρουσιάστηκε από το Πανεπιστήμιο Osaka University στην Ιαπωνία [A10], προωθείται μέσα στο νερό χρησιμοποιώντας δύο, τοποθετημένα πλευρικά, πτερύγια κυματοειδούς κίνησης (Σχήμα 13). Το κάθε πτερύγιο απαρτίζεται από 17 ανεξάρτητα ακτίνες, η κίνηση των οποίων ελέγχεται ανεξάρτητα, μέσω R/C-Servo. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μελετήθηκε η ικανότητα αυτοπρόωσης του αυτόνομου υποβρυχίου για διάφορες συχνότητες της κυματοειδούς κίνησης.



Σχήμα 13. Ο μηχανισμός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος με δύο πτερύγια κυματοειδούς κίνησης από το Πανεπιστήμιο Osaka.

Το Πανεπιστήμιο Nanyang Technological University της Σιγκαπούρης έχει αναπτύξει το αυτόνομο υποβρύχιο με δύο πλευρικά πτερύγια που εικονίζεται στο Σχήμα 14, η σχεδίαση του οποίου έχει εμπνευστεί από τη μορφολογία και το μηχανισμό κίνησης των σαλαχιών [A11]. Ο μηχανισμός του κάθε πτερυγίου απαρτίζεται από 3 ακτίνες, οδηγούμενες από R/C-Servo, ενώ η μεμβράνη έχει κατασκευαστεί από πολυπροπυλένιο. Το συνολικό βάρος του υποβρυχίου ανέρχεται σε 4 kg, έχοντας διαστάσεις 50x96 cm. Για την κάλυψη των αναγκών τροφοδοσίας, το υποβρύχιο διαθέτει ενσωματωμένη μπαταρία 6 κελιών με χωρητικότητα 3300 mAh, η οποία εξασφαλίζει περίπου 6 ώρες αυτονομίας.

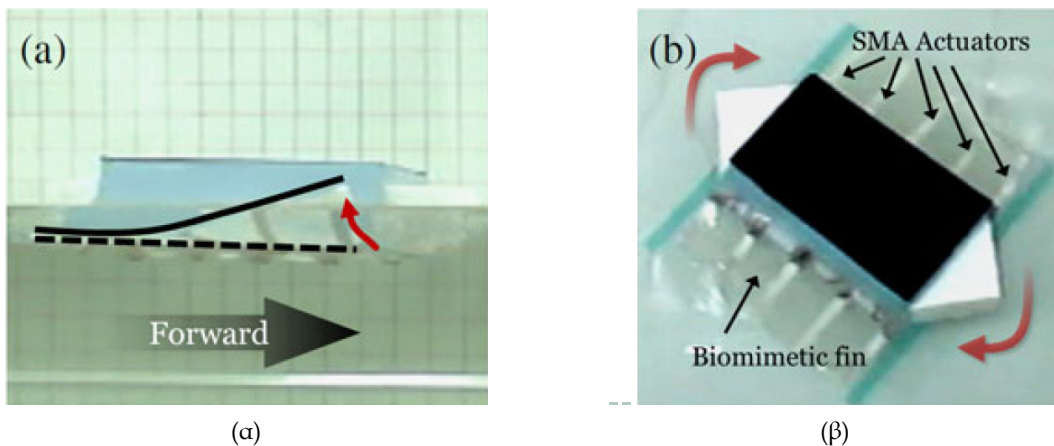


Σχήμα 14. Ο μηχανισμός του αυτόνομου υποβρυχίου με δύο πλευρικά πτερύγια κυματοειδούς κίνησης από το Πανεπιστήμιο Nanyang Technological University.

Το Ινστιτούτο Harbin Institute of Technology στην Κίνα, έχει κατασκευάσει ένα αυτόνομο ρομποτικό όχημα με δύο πλευρικά πτερύγια κυματοειδούς κίνησης [A12]

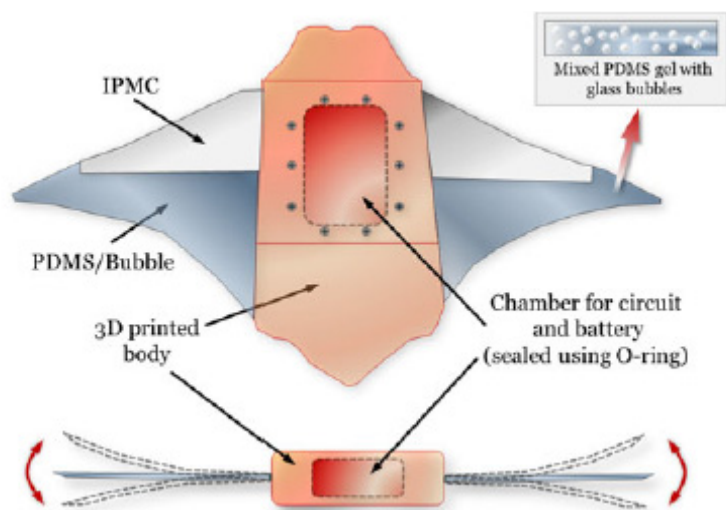


(Σχήμα 15). Το αξιοσημείωτο της προσπάθειας αυτής, είναι ότι για την παραγωγή των κυματώσεων χρησιμοποιήθηκαν 'έξυπνα υλικά' τύπου SMA (Shape Memory Alloy, Κράματα με Μνήμη Σχήματος). Το ρομποτικό όχημα, συνολικά διαθέτει 10 ακτίνες (5 σε κάθε πλευρόγιο), οι οποίες κατασκευαστικά ήταν από πολυμερές υλικό, στη βάση του οποίου ενσωματώνεται ο επενεργητής SMA. Το μήκος του οχήματος είναι 24,2 cm, το πλάτος 22,5 cm και το ύψος 5,2 cm. Η μέγιστη ταχύτητα που επιτεύχθηκε ήταν τα 40 mm/s, για συχνότητα κυματώσεως τα 3,125 Hz.



Σχήμα 15. Το αυτόνομο ρομποτικό όχημα με δύο πλευρικά πτερύγια κυματοειδούς κίνησης, με επενεργητές SMA, από το Ινστιτούτο Harbin Institute of Technology.

Όσο αναφορά τα 'έξυπνα υλικά', το Πανεπιστήμιο University of Virginia στις Η.Π.Α., υλοποίησε ένα αυτόνομο υποβρύχιο όχημα με δύο πλευρικά πτερύγια κυματοειδούς [A13] (Σχήμα 16). Το εμπρόσθιο τμήμα του κάθε πτερύγιο είναι από υλικό IPMC (Ionic Polymer Metal Composite), η ενεργοποίηση του οποίου θέτει σε κυματισμό το οπίσθιο τμήμα του πτερυγίου, το οποίο έχει κατασκευαστεί από το υλικό PDMS (Polydimethylsiloxane, Πολυδιμεθυλοσιλοξάνιο). Οι διαστάσεις του πρωτοτύπου είναι 21x33x50 cm, ενώ η μέγιστη ταχύτητα κίνησής του είναι 7 mm/s, και επιτυγχάνεται για κυμάτωση των πτερυγίων με συχνότητα 0,157 Hz.



Σχήμα 16. Ο μηχανισμός του αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος με δύο πλευρικά πτερύγια κυματοειδούς κίνησης, με πτερύγια από σύνθεση των υλικών IPMC και PDMS, από το Πανεπιστήμιο University of Virginia.

## **Σχεδιασμός και Ανάπτυξη της Πειραματικής Διάταξης**

### **2.1 Εισαγωγή**

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και ανάπτυξη της πειραματικής διάταξης του περυγίου κυματοειδούς κίνησης, η σχεδίαση του οποίου βασίστηκε στη μορφολογία και τη λειτουργικότητα των ραχιαίων περυγίων κυματοειδούς κίνησης, που απαντώνται σε συγκεκριμένα είδη ηλεκτροφόρων χελιών. Τα περύγια στους οργανισμούς αυτούς αποτελούνται από παράλληλες ακτίνες (fin rays), κατά μήκος του σώματος, διασυνδεδεμένες μεταξύ τους από μια ελαστική μεμβράνη κολλαγόνου. Η μεμβράνη παρακινείται από τις ακτίνες έτσι ώστε να παράγει κυματισμό κατά μήκος της ο οποίος παράγει προωστικές δυνάμεις που, εφαρμοζόμενες στο σώμα, καθιστούν εφικτή την ανάπτυξη ταχύτητας. Με αυτό το πλαίσιο σχεδιάστηκε ο ρομποτικός μηχανισμός, ο οποίος απαρτίζεται από 8 ασάλινες ακτίνες διατεταγμένες σειριακά πάνω σε μία ράγα στήριξης από αλουμίνιο, οι οποίες διασυνδέονται μεταξύ τους με σιλικονούχα μεμβράνη. Οι ακτίνες οδηγούνται από 8 μονάδες σερβοκινητήρων (R/C servos).

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ικανότητα αυτοπρόωσης αλλά και η διεξαγωγή της παραμετρικής μελέτης για τον ρομποτικό μηχανισμό του περυγίου κυματοειδούς κίνησης, αναπτύχθηκε πειραματική διάταξη αποτελούμενη από μία δεξαμενή, στην οποία προσαρμόστηκαν δύο οδηγοί ευθύγραμμης κίνησης. Πάνω στους οδηγούς αυτούς, μέσω μιας σειράς από έδρανα κύλισης που επιτρέπουν την ολίσθηση, τοποθετήθηκε το φορείο (τύπου βαγονέτο) στο οποίο είχε προσαρμοστεί ο μηχανισμός του περυγίου, ώστε να επιτυγχάνεται η ελεύθερη κίνηση του κατά μήκος της δεξαμενής. Πάνω στο φορείο είναι επίσης τοποθετημένος ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιείται για την οδήγηση των servos αλλά και για την μέτρηση της πραγματικής γωνιακής θέσης των ακτινών και του συνολικού ρεύματος κατανάλωσης των servos από κατάλληλο αισθητήριο ρεύματος.

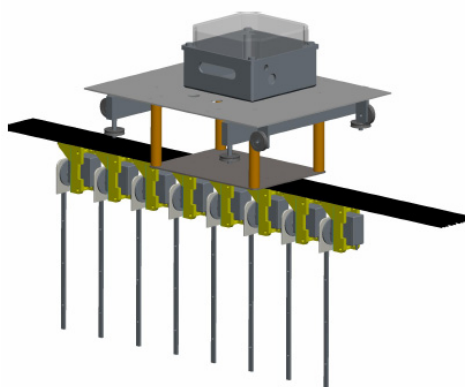


Στις επόμενες ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου, περιγράφονται αναλυτικά τα παραπάνω καθώς και οι σχετικές πληροφορίες για τις βαθμονομήσεις των αισθητηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στην διάταξη.

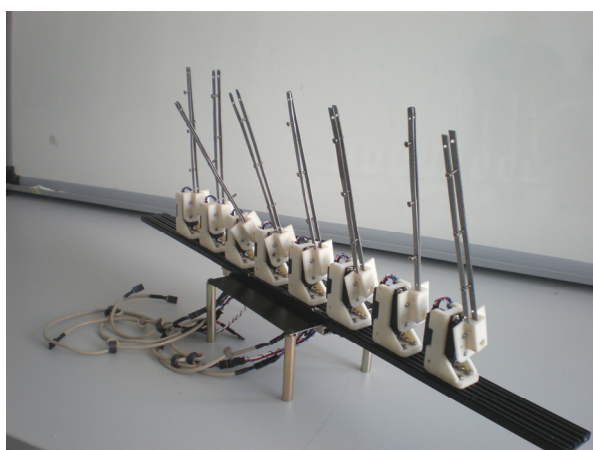
## 2.2 Μηχανολογική σχεδίαση

Η σχεδίαση του ρομποτικού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης βασίστηκε στη μορφολογία και τη λειτουργικότητα των ραχιαίων πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης που απαντάται σε ορισμένα ήδη ηλεκτροφόρων χελιών, όπως για παράδειγμα στο είδος *Gymnarchus niloticus*.

Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των πτερυγίων αυτών, η διάταξη του τεχνητού πτερυγίου που κατασκευάστηκε έχει επίμηκες σχήμα, και απαρτίζεται από 8 συνολικά ακτίνες, που οδηγούνται από αντίστοιχο αριθμό R/C σερβοκινητήρων. Οι ακτίνες διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω μιας ελαστικής μεμβράνης από σιλκόνη, που αποτελεί την καθαυτή επιφάνεια του πτερυγίου (βλ. Ενότητα 2.4), με ονομαστικό μήκος 46.2 cm και ύψος 13.8 cm. Οι 8 μονάδες παραγωγής κίνησης των ακτίνων είναι διατεταγμένες σειριακά πάνω σε μία ράγα στήριξης από αλουμίνιο, η οποία έχει αναρτηθεί στο κάτω μέρος ενός φορείου κίνησης (βαγονέτο). Το φορείο αυτό διαθέτει μια σειρά από έδρανα κύλισης που επιτρέπουν την ολίσθηση του μηχανισμού πάνω σε δύο οδηγούς ευθύγραμμης κίνησης, οι οποίοι έχουν προσαρμοστεί στο μέσο της δεξαμενής που πραγματοποιούνται οι πειραματικές δοκιμές. Η κατασκευή, η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα, έχει συνολικό μήκος 75 cm και ύψος 26 cm.



(α)



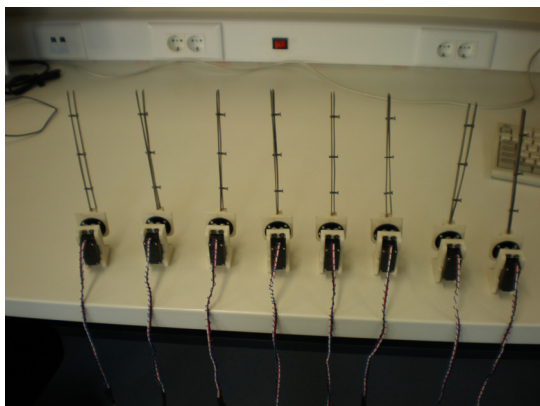
(β)

Σχήμα 17. Η τελική μορφή του ρομποτικού πτερυγίου, χωρίς τη μεμβράνη, (α) σε σχέδιο 3D CAD και (β) η φωτογραφία του.

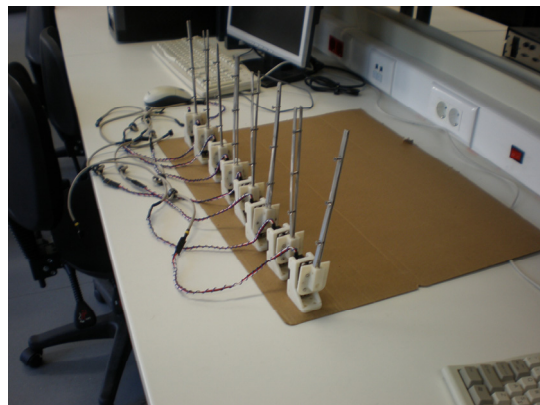
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικότερα η σχεδίαση και κατασκευή των επιμέρους τμημάτων της διάταξης του πτερυγίου.

## 2.2.1 Σχεδίαση του κυρίως μηχανισμού του πτερυγίου

Κάθε μία από τις 8 μονάδες κίνησης των ακτίνων διαθέτει έναν σερβομηχανισμό (R/C servo), ο οποίος προσαρμόζεται στη ράγα στήριξης του πτερυγίου μέσω μίας βάσης. Η ακτίνα απαρτίζεται από δύο λεπτά παραλληλόγραμμα τμήματα από ανοξείδωτο ατσάλι, που ενώνονται μεταξύ τους με τέσσερις συνολικά βίδες, συγκρατώντας στο ενδιάμεσο τη μεμβράνη του πτερυγίου. Το συνολικό μήκος της ακτίνας ανέρχεται σε 20 cm. Ένας κατάλληλος προσαρμογέας αναλαμβάνει την σύνδεση της ακτίνας με τον άξονα κίνησης του R/C servo.



(α)



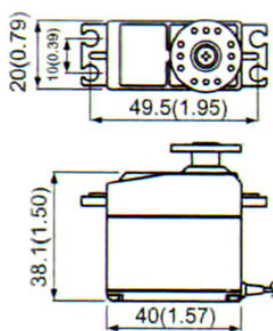
(β)

Σχήμα 18. Οι οκτώ μονάδες κίνησης του ρομποτικού πτερυγίου.

Ο σερβοκινητήρας που χρησιμοποιείται για την κίνηση της ακτίνας (μοντέλο S3051HV της εταιρίας Futaba), μαζί με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά εικονίζεται παρακάτω:



(α)



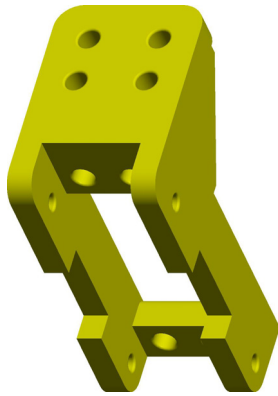
(β)

Σχήμα 19. Ο σερβοκινητήρας που χρησιμοποιείται στις μονάδες κίνησης του πτερυγίου, και τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

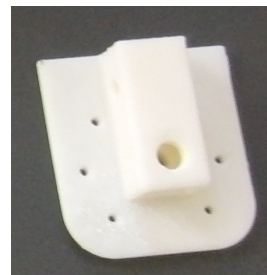
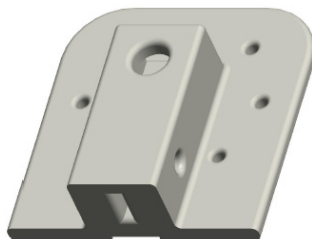
**Control System:** +Pulse Width Control  
**Required Pulse:** 3-5 Volt Peak to Peak Square Wave  
**Operating Voltage:** 6.0-7.4V  
**Operating Temperature Range:** -20 to +60 Degree C  
**Operating Speed (6.0V):** 0.21sec/60 degrees at no load  
**Operating Speed (7.4V):** 0.17sec/60 degrees at no load  
**Stall Torque (6.0V):** 9.5kg-cm  
**Stall Torque (7.4V):** 10.5kg-cm  
**Motor Type:** Coreless Motor  
**Potentiometer Drive:** Indirect Drive  
**Bearing Type:** Dual Ball Bearings  
**Gear Type:** Metal  
**Connector Wire Length:** 12"  
**Dimensions:** 1.57" x 0.79" x 1.5" (40 x 20 x 38.1mm)  
**Weight:** 1.73 oz (49g)

Τέλος, η μεμβράνη που χρησιμοποιήθηκε στο πτερόγιο έχει συνολικό μήκος 46.2 cm και ύψος 13.8 cm. Απαρτίζεται από δύο φύλλα λεπτής σιλικόνης (πάχους 0.25 mm) σε σειρά, εκ των οποίων το πρώτο έχει μήκος 23 cm και είναι προσαρμοσμένο στις ακτίνες #1 έως #5 του πτερυγίου, ενώ το δεύτερο έχει μήκος 23.2 cm και είναι προσαρμοσμένο στις ακτίνες #5 έως #8.

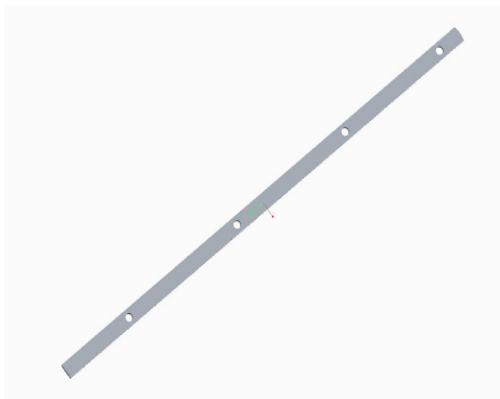
Η βάση στήριξης, ο προσαρμογέας της ακτίνας και η ακτίνα εικονίζονται παρακάτω, ενώ τα αναλυτικά κατασκευαστικά σχέδια αυτών παρατίθενται στο Παράρτημα-Α του κειμένου. Σημειώνεται ότι η βάση στήριξης και ο προσαρμογέας σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα CAD Pro/Engineer, και στη συνέχεια κατασκευάστηκαν από θερμοπλαστικό υλικό τύπου ABS plus με τη βοήθεια συστήματος τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printer), μοντέλο Dimension Elite της εταιρίας Stratasys Inc..



(α) Βάση στήριξης του R/C servo



(β) Προσαρμογέας της ακτίνας



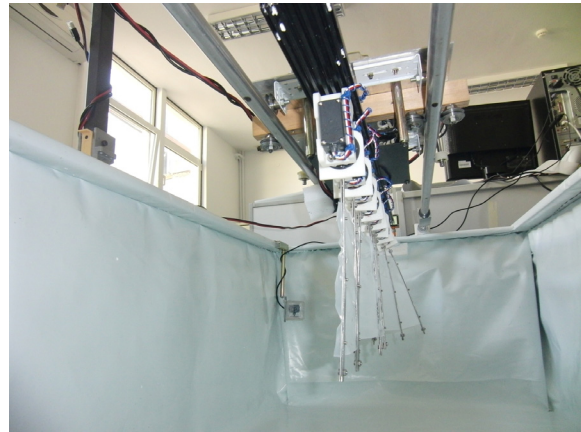
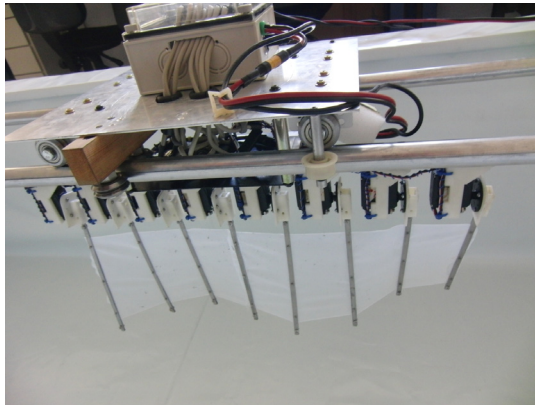
(γ) Ένα εκ των δύο όμοιων τμημάτων που απαρτίζουν την κάθε ακτίνα

Σχήμα 20. Τα επιμέρους περιφερειακά τμήματα των μονάδων κίνησης (αριστερά εμφανίζεται το CAD σχέδιο και δεξιά φωτογραφία του κάθε εξαρτήματος)

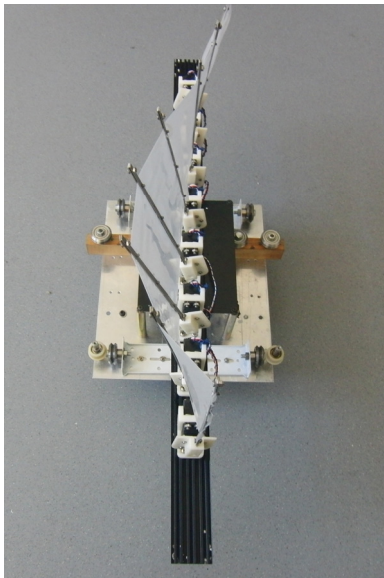
## 2.2.2 Σχεδίαση του μηχανισμού ολίσθησης

Ο μηχανισμός ολίσθησης σχεδιάστηκε ώστε να επιτρέπει τη μελέτη της αυτοπρόωσης του φορείου σε ευθύγραμμη κίνηση μέσω των κυματοειδών κινήσεων του περυγίου. Το περύγιο, μαζί με τα ηλεκτρονικά ελέγχου, έχει προσαρμοστεί σε ένα φορείο, το οποίο, με

τη βοήθεια 8 συνολικά εδράνων κύλισης κινείται πάνω σε δύο οδηγούς ευθύγραμμης κίνησης (Σχήμα 21). Οι οδηγοί αυτοί είναι άξονες αλουμινίου διατομής 20 mm, και συνολικού μήκους 2 m, οι οποίοι έχουν στερεωθεί στα άκρα της δεξαμενής με τη βοήθεια κατάλληλων προσαρμογών (Σχήμα 22β). Όπως αποδείχτηκε στην πράξη, η κίνηση του φορείου επί των οδηγών με τα έδρανα κύλισης ήταν ιδιαίτερα ομαλή και χαρακτηριζόταν από χαμηλή τριβή, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για την αποτίμηση της απόδοσης του μηχανισμού του πτερυγίου.



Σχήμα 21. Η προσαρμογή του φορείου στους οδηγούς ευθύγραμμης κίνησης.



(α)



(β)

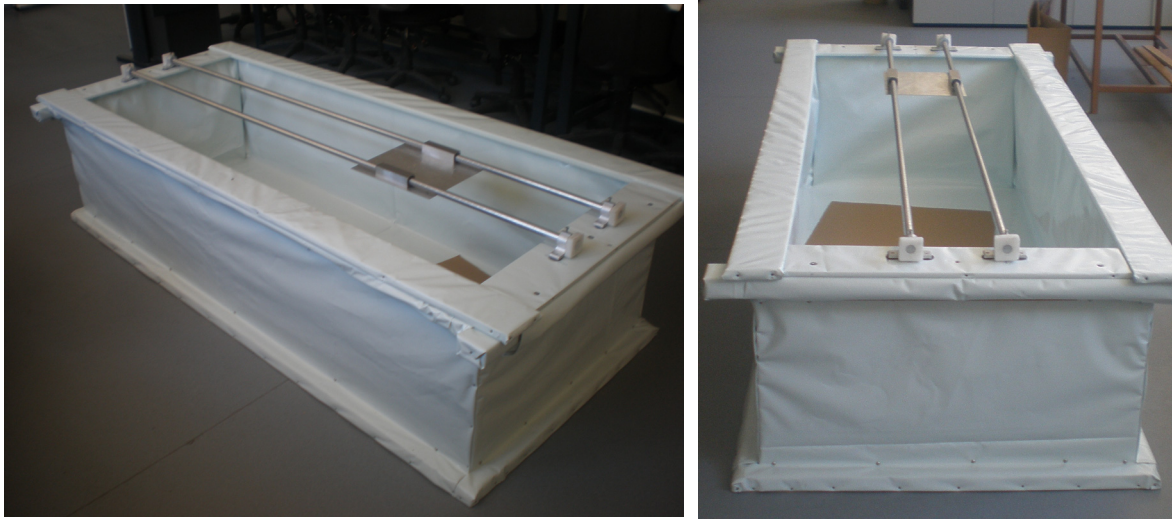
Σχήμα 22. (α) Όψη από την κάτω πλευρά του φορείου με το μηχανισμό του πτερυγίου.  
(β) Η προσαρμογή των οδηγών κίνησης στη δεξαμενή.

### 2.2.3 Η δεξαμενή δοκιμών

Η δεξαμενή δοκιμών σχεδιάστηκε ώστε να επιτρέπει την κίνηση του πτερυγίου σε μια ικανοποιητική απόσταση, προκειμένου να διαπιστωθεί αλλά και να μελετηθεί η αυτοπρόωση του μέσα στο νερό. Η δεξαμενή, της οποίας οι διαστάσεις ανέρχονται σε



210x90x50 mm, κατασκευάστηκε από ένα ξύλινο πλαίσιο προσαρμοσμένο σε ξύλινο υπόθεμα, με κατάλληλα πλευρικά υποστηρίγματα ώστε να μπορεί να συγκρατεί τον απαιτούμενο όγκο νερού καθώς και τις δυνάμεις που θα ασκούνται κατά την λειτουργία του πτερυγίου. Η δεξαμενή είναι επενδυμένη με άνθυγρο εύκαμπτο φύλλο πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας (LDPE), πάχους 150μm [11], ώστε να επιτυγχάνεται η στεγάνωση και προστασία της από το νερό.



Σχήμα 23. Η δεξαμενή δοκιμών με προσαρμοσμένο τον μηχανισμό ολίσθησης.

Ο όγκος του νερού που απαιτείται για την πλήρωση της δεξαμενής ανέρχεται σε 0,64m<sup>3</sup> .

Επιπρόσθετα, για τις ανάγκες της πρώιμης μελέτης του πτερυγίου, κατασκευάστηκε μια μικρότερων διαστάσεων (120x40x30mm) δεξαμενή από ξύλο, Σχήμα 24, στην οποία χρησιμοποιήθηκε το ίδιο υλικό από φύλλο πολυαιθυλενίου για τη στεγανοποίησή της.



Σχήμα 24. Η μικρή δεξαμενή δοκιμών με εσωτερική επένδυση από φύλλο πολυαιθυλενίου και με προσαρτημένο το πρώιμο πτερόγιο

## 2.3 Ηλεκτρονικά ελέγχου

Η κύρια λειτουργία που επιτελούν τα ηλεκτρονικά ελέγχου της διάταξης αφορά στην οδήγηση των 8 servo, προκειμένου να παράγονται οι επιθυμητές κυματώσεις του πτερυγίου. Η λειτουργία αυτή υλοποιείται μέσω κατάλληλου προγράμματος που εκτελείται σε έναν μικροελεγκτή 8-bit αρχιτεκτονικής (Atmel ATmega2560), ο οποίος βρίσκεται τοποθετημένος στο πάνω μέρος του φορείου του πτερυγίου. Προκειμένου να λαμβάνεται πληροφορία για την πραγματική γωνιακή θέση των ακτίνων του πτερυγίου, τα servo που χρησιμοποιούνται στη διάταξη έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να παρέχεται πρόσβαση στο σήμα από το εσωτερικό ποτενσιόμετρο που χρησιμοποιείται από το ενσωματωμένο σε αυτά σύστημα ελέγχου θέσης. Τα σήματα αυτά οδηγούνται στις αναλογικές εισόδους του μικροελεγκτή και διαβάζονται με τη βοήθεια των μονάδων ADC (Analog to Digital Converter) που διαθέτει ο ATmega2560. Επιπρόσθετα, ο μικροελεγκτής αναλαμβάνει τη μέτρηση του συνολικού ρεύματος που καταναλώνουν τα servo, με χρήση ενός εξωτερικού αισθητηρίου ρεύματος. Για τη διευκόλυνση της διασύνδεσης όλων των παραπάνω σημάτων εισόδων/εξόδων, κατασκευάστηκε κατάλληλη πλακέτα επέκτασης για τον μικροελεγκτή. Τέλος, ο μικροελεγκτής επικοινωνεί μέσω σειριακού πρωτοκόλλου με κεντρικό Η/Υ, από τον οποίο λαμβάνει τις επιθυμητές γωνίες κίνησης των servo, και στον οποίο προωθεί τα δεδομένα για την πραγματική θέση των servo και την κατανάλωση ρεύματος κατά τη διάρκεια λειτουργίας του πτερυγίου.

Τα παραπάνω περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου, μαζί με πληροφορίες σχετικά με τη βαθμονόμηση των servo, και την βαθμονόμηση και διασύνδεση ενός αισθητηρίου απόστασης το οποίο χρησιμοποιείται στη διάταξη για την καταγραφή της κίνησης του μηχανισμού.

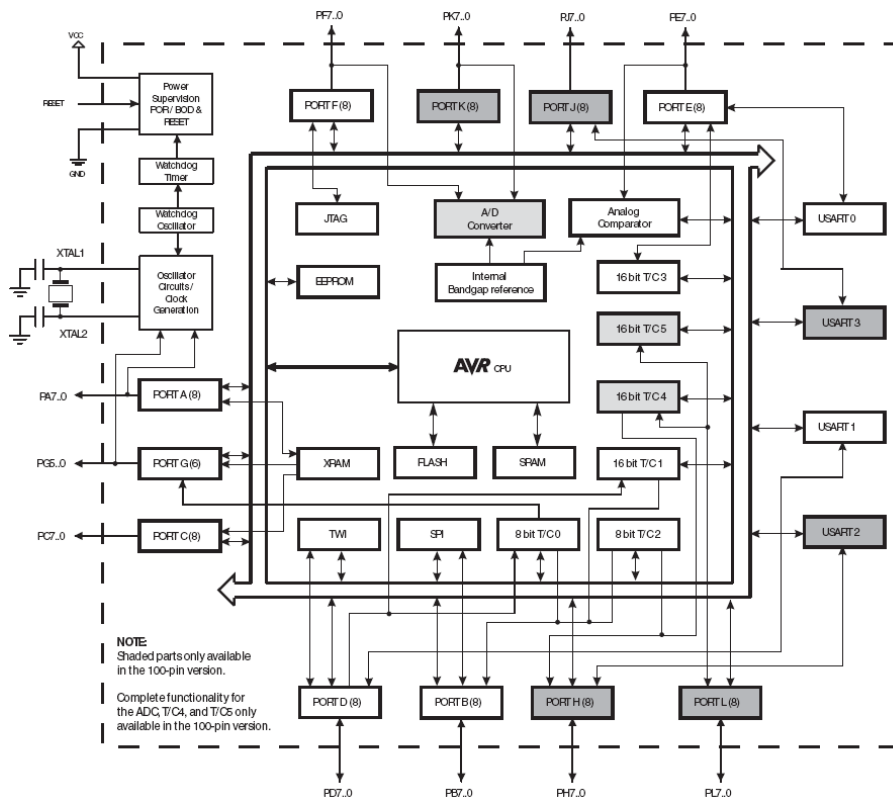
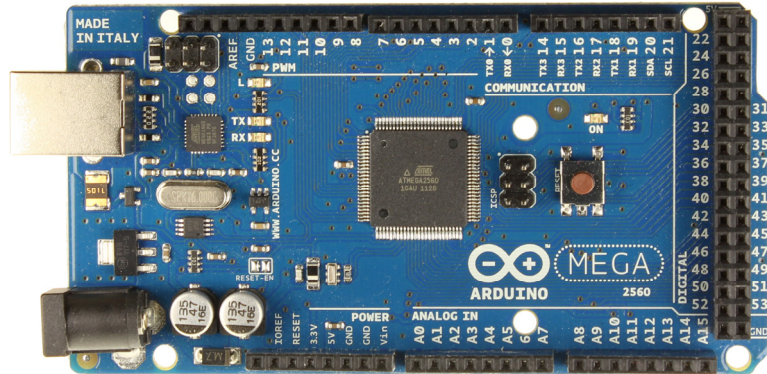
### 2.3.1 Η μονάδα του μικροελεγκτή

Η μικροϋπολογιστική πλατφόρμα που επιλέχθηκε για την υλοποίηση του ελέγχου χαμηλού επιπέδου του πτερυγίου είναι το αναπτυξιακό σύστημα Arduino Mega2560, το οποίο χρησιμοποιεί τον 8-bit μικροελεγκτή ATmega2560 της εταιρίας Atmel (Σχήμα 25).

Τα κύρια χαρακτηριστικά του αναπτυξιακού αυτού είναι:

- 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



Σχήμα 25. Το αναπτυξιακό Arduino Mega 2560, και το λειτουργικό διάγραμμα του μικροελεγκτή Atmel ATmega2560.

Βασικά κριτήρια για την επιλογή της εν λόγω πλατφόρμας ήταν η δυνατότητα ανεξάρτητης παραγωγής μεγάλου αριθμού σημάτων PWM (μέχρι 14) και λήψης μέχρι 16 αναλογικών σημάτων, προκειμένου για τη διασύνδεση των 8 servo του μηχανισμού του περυγίου. Επιπλέον πλεονέκτημα αποτελεί η ευκολία ανάπτυξης εφαρμογών με την εν λόγω πλατφόρμα, χάρη στο ισχυρό και εύχρηστο περιβάλλον προγραμματισμού που παρέχεται για το σκοπό αυτό.

Ειδικότερα, η παραγωγή των 8 σημάτων PWM οδήγησης των servo επιτυγχάνεται μέσω των 16-bit χρονιστών Timer-1, Timer-3, και Timer-4 του μικροελεγκτή, καθένας εκ των οποίων μπορεί να παράγει τρία σήματα PWM, με κοινή συχνότητα και ανεξάρτητη ρύθμιση του duty cycle, η οποία επιτυγχάνεται καθορίζοντας κατάλληλα την τιμή των καταχωρητών σύγκρισης (οι καταχωρητές αυτοί είναι, π.χ. για τον Timer-3 οι OCR3A, OCR3B, και OCR3C). Επίσης, η λήψη της μέτρησης της γωνιακής θέσης από το ποτενσιόμετρο του κάθε servo επιτυγχάνεται μέσω 8 συνολικά αναλογικών εισόδων, η ψηφιοποίηση των οποίων γίνεται από τις 2 μονάδες ADC του μικροελεγκτή. Η αντιστοίχιση των παραπάνω παρέχεται στον πίνακα που ακολουθεί:

Servo	Χρονιστής	Καταχωρητής ρύθμισης duty cycle	Μετατροπέας ADC	Κανάλι μέτρησης
1	Timer1	OCR1B	ADC1	0
2	Timer1	OCR1A	ADC1	1
3	Timer4	OCR4C	ADC1	2
4	Timer4	OCR4B	ADC1	3
5	Timer4	OCR4A	ADC2	8
6	Timer3	OCR3A	ADC2	9
7	Timer3	OCR3C	ADC2	10
8	Timer3	OCR3B	ADC2	11

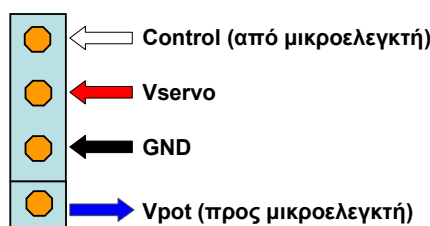
Πίνακας 1. Η αντιστοίχιση που χρησιμοποιήθηκε για τη διασύνδεση των 8 servo του μηχανισμού με τα ενσωματωμένα περιφερειακά του μικροελεγκτή στο αναπτυξιακό Arduino Mega2560.

Επίσης, μία επιπλέον αναλογική είσοδος (συγκεκριμένα, το κανάλι μέτρησης 7 του ADC1) χρησιμοποιείται για την ψηφιοποίηση του σήματος από το αισθητήριο ρεύματος.

### 2.3.2 Σχεδιασμός πλακέτας επέκτασης μικροελεγκτή

Η πλακέτα επέκτασης που αναπτύχθηκε παρέχει τη δυνατότητα προσαρμογής και διασύνδεσης στον μικροελεγκτή των σημάτων εισόδου/εξόδου που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του περυγίου. Τα σήματα αυτά αφορούν στον έλεγχο των 8 servo και στο αισθητήριο που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της κατανάλωσης ρεύματος. Αναλυτικότερα:

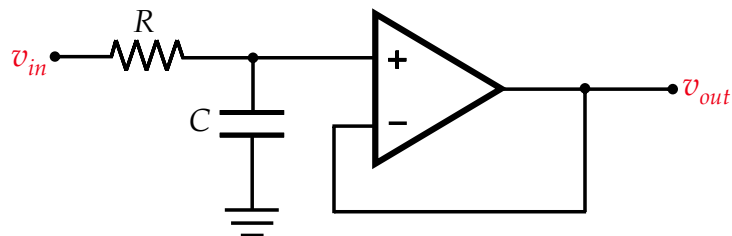
Η διασύνδεση με τον μικροελεγκτή με καθένα από τα 8 servo του μηχανισμού υλοποιείται μέσω των 4 σημάτων που φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα, και τα οποία παρέχονται στην πλακέτα επέκτασης μέσω headers τεσσάρων ακίδων.



Σχήμα 26. Η διάταξη των 4 σημάτων που ακολουθήθηκε, για τη διασύνδεση των servo με τον μικροελεγκτή.

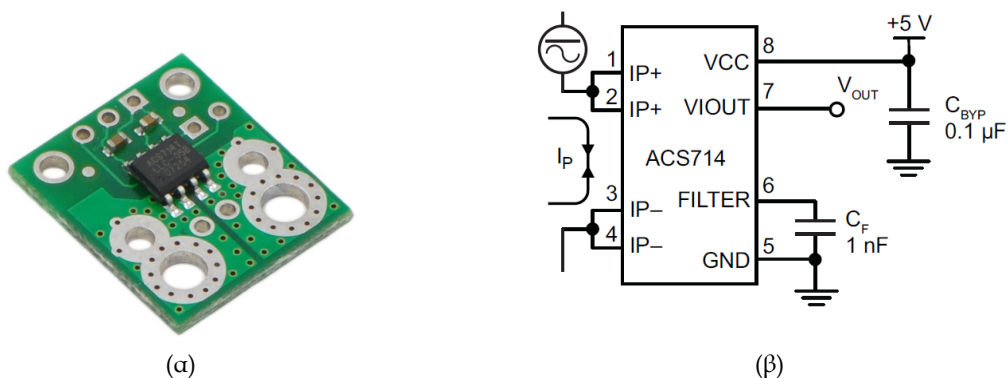


Τα  $V_{servo}$  και GND παρέχουν την τροφοδοσία των 7.4 Volt, ενώ το Control είναι το PWM σήμα ελέγχου που δημιουργείται από τον μικροελεγκτή για τον καθορισμό της γωνιακής θέσης του servo. Επιπρόσθετα, το  $V_{pot}$  είναι το σήμα από το ποτενσιόμετρο του servo για την μέτρηση της πραγματικής γωνίας της αντίστοιχης ακτίνας. Το σήμα αυτό οδηγείται στο αντίστοιχο κανάλι των μονάδων ADC του μικροελεγκτή, αφού πρώτα διέλθει από μια μονάδα χαμηλοπερατού RC φίλτρου 1ης τάξης, υλοποιημένο σύμφωνα με το παρακάτω Σχήμα, όπου η χρήση του τελεστικού ενισχυτή σε διάταξη ακόλουθου τάσης εξασφαλίζει και την απομόνωση του φιλτραρισμένου σήματος. Η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου ορίστηκε ως  $f_c = 15.9 \text{ Hz}$ , επιλέγοντας τις τιμές των στοιχείων του ως  $R = 100 \text{ k}\Omega$  και  $C = 100 \text{ nF}$ . Για την υλοποίηση στην πλακέτα επέκτασης των 8 συνολικά φίλτρων χρησιμοποιήθηκαν δύο ολοκληρωμένα TLC274CD, καθένα από τα οποία διαθέτει τέσσερις τελεστικούς ενισχυτές, με τροφοδοσία 5 Volt, την οποία λαμβάνουν απευθείας από το αναπτυξιακό.



Σχήμα 27. Η συνδεσμολογία του χαμηλοπερατού φίλτρου που χρησιμοποιήθηκε για τα σήματα από τα ποτενσιόμετρα των servo.

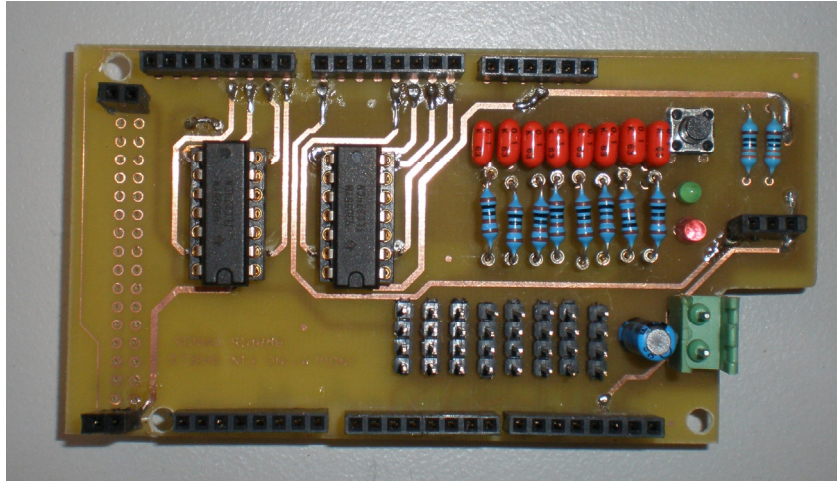
Προκειμένου για τη μέτρηση του ρεύματος που καταναλώνουν τα servo κατά τη λειτουργία του πτερυγίου, στην πλακέτα επέκτασης ενσωματώθηκε και ένα κύκλωμα με το αισθητήριο ACS714 (Σχήμα 28). Περισσότερες πληροφορίες για τη βαθμονόμηση και διασύνδεση του εν λόγω αισθητηρίου με τον μικροελεγκτή παρέχονται στην Ενότητα 2.3.3.



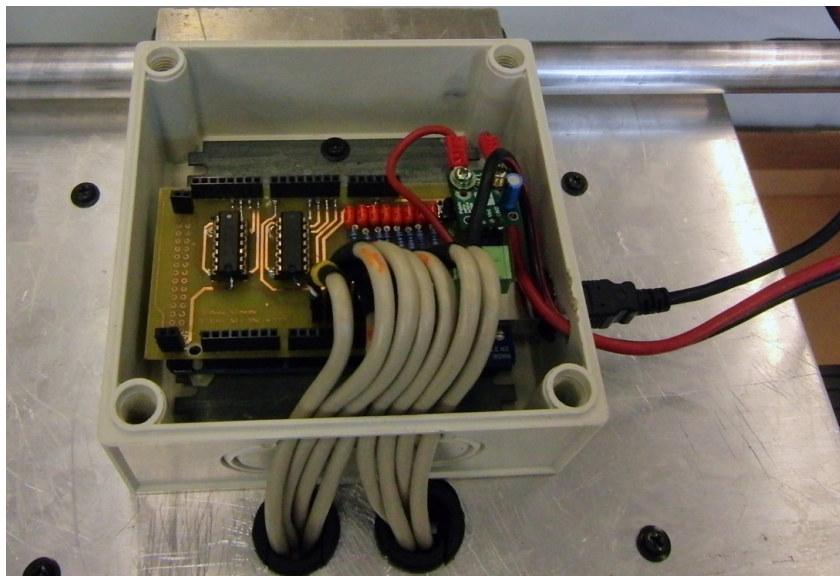
Σχήμα 28. Το αισθητήριο ρεύματος ACS714 και η συνδεσμολογία του.

Στην πλακέτα επέκτασης έχουν επίσης ενσωματωθεί ένας διπλός ακροδέκτης για τη διασύνδεση της εξωτερικής τροφοδοσίας των 7.4 Volt για τα servo, δύο ενδεικτικά led, καθώς επίσης και ένα μπουτόν για την επανεκκίνηση (reset) του μικροελεγκτή.

Η πλακέτα επέκτασης εφαρμόζει στο επάνω μέρος του αναπτυξιακού του Arduino Mega2560, μέσω ακιδοσειρών (headers). Η τελική της μορφή σε τυπωμένο κύκλωμα φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία, ενώ τα αντίστοιχα σχηματικά διαγράμματα παρατίθενται στο Παράρτημα-B του κειμένου.



Σχήμα 29. Το τυπωμένο κύκλωμα της πλακέτας επέκτασης του μικροελεγκτή.

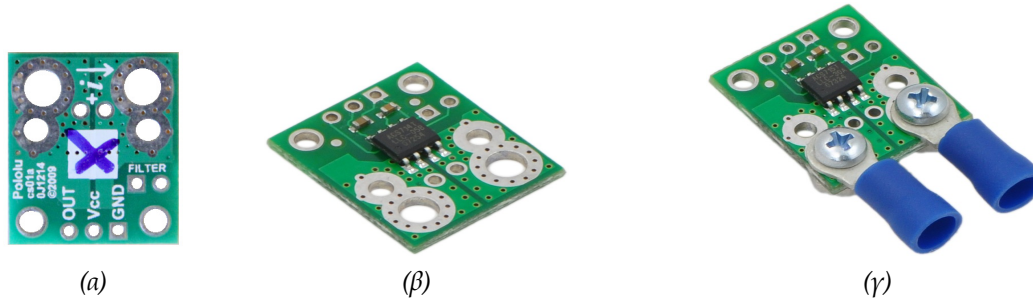


Σχήμα 30. Η διασύνδεση των σημάτων στην πλακέτα επέκτασης.

### 2.3.3 Αισθητήριο ρεύματος

Τα ηλεκτρονικά ελέγχου του περυγίου περιλαμβάνουν και ένα αισθητήριο ρεύματος, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση και καταγραφή του συνολικού ρεύματος της διάταξης, προκειμένου για τον υπολογισμό της καταναλισκόμενης ισχύος σε συνάρτηση με τα χαρακτηριστικά της υλοποιούμενης κομαιοειδούς κίνησης από το περύγιο.

Η διάταξη που επιλέχθηκε για το σκοπό αυτό προέρχεται από την εταιρία Pololu, και αποτελεί κατ'ουσία μια πλακέτα εφαρμογής για τον αισθητήρα ρεύματος ACS714 της εταιρίας Allegro, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στο φαινόμενο Hall.



Σχήμα 31. Παρουσίαση του αισθητηρίου ρεύματος: (α) Κάτω όψη του αισθητηρίου, (β) άνω όψη του αισθητηρίου και (γ) άνω όψη με προσαρμοσμένους τους κονέκτορες τύπου ring στις εισόδους του αισθητηρίου.

Στην εν λόγω υλοποίησή του, το αισθητήριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση έντασης ρεύματος σε εύρος από  $-10\text{ A}$  έως  $+10\text{ A}$ , με αντιστοιχη 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  $185\text{ mV/A}$ , με τυπικό σφάλμα  $\pm 1.5\%$ . Επιπρόσθετα, ο αισθητήρας προσφέρει ηλεκτρική απομόνωση μέχρι  $2.1\text{ kV RMS}$ .

Το αισθητήριο προσαρμόστηκε στην πλακέτα επέκτασης του μικροελεγκτή, όπου, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή, τοποθετήθηκε εν σειρά στη γραμμή τροφοδοσίας των  $7.4\text{ Volt}$  για τα servo, χρησιμοποιώντας τερματικούς κονέκτορες (τύπου ring), οι οποίοι, στερεώθηκαν με βίδες στους υποδοχείς εισόδου του αισθητηρίου (βλ. φωτογραφίες στο παραπάνω Σχήμα).

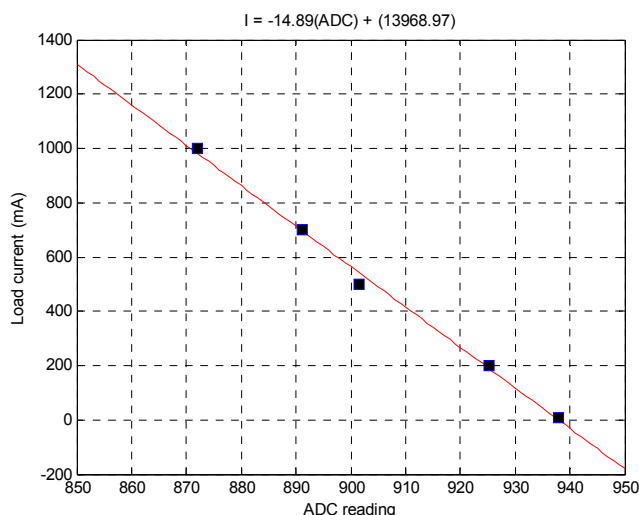
### 2.3.4 Βαθμονόμηση αισθητηρίου ρεύματος

Για τη βαθμονόμηση του αισθητηρίου ρεύματος χρησιμοποιήθηκε ένα τροφοδοτικό, ως πηγή σταθερού ρεύματος, συνδεδεμένο σε σειρά με το αισθητήριο και με μια βαττική αντίσταση. Η έξοδος της μέτρησης του αισθητηρίου οδηγήθηκε στον μετατροπέα ADC (Analog to Digital Converter), εύρους 10-bit, του αναπτυξιακού Arduino Mega2560. Επειδή η τάση αναφοράς του μετατροπέα ADC είχε ορισθεί ως  $V_{REF} = 2.56\text{ V}$ , και δεδομένων των χαρακτηριστικών του αισθητηρίου το οποίο για εύρος τιμών  $-10$  έως  $10\text{ A}$  δίνει τάση εξόδου από  $0$  έως  $5\text{ Volt}$ , επιλέχτηκε το αισθητήριο να συνδεθεί με ανάστροφη πολικότητα, ώστε η έξοδός του να εμπίπτει στο εύρος μέτρησης του μετατροπέα ADC ( $0-2.56\text{ Volt}$ ). Ακολούθως, τα δεδομένα επεξεργάστηκαν στο Matlab, με χρήση της εντολής polyfit, προκειμένου για την προσέγγιση των μετρήσεων μέσω ενός πολυωνύμου πρώτου βαθμού, καταλήγοντας στη σχέση:

$$y = -14.89x + 13968.97, \quad (1)$$

όπου το  $x$  αντιπροσωπεύει την έξοδο του ADC ( $0-1023$ ), και το  $y$  την ένταση του ρεύματος σε mA. Η διακριτική ικανότητα που επιτυγχάνεται στη μέτρηση του ρεύματος με τις παραπάνω ρυθμίσεις του συστήματος ανέρχεται σε  $14.877\text{ mA}$ .

Το γράφημα με τα πειραματικά δεδομένα και το αποτέλεσμα της γραμμικής παρεμβολής αυτών παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα.



Σχήμα 32. Πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα της βαθμονόμησης του αισθητηρίου ρεύματος.

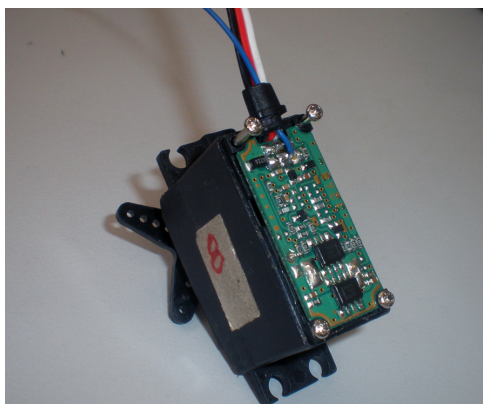
### 2.3.5 Τροποποίηση servo

Η τροποποίηση που περιγράφεται εδώ αποσκοπεί στην λήψη της εξόδου του ενσωματωμένου ποτενσιόμετρου των servo, ώστε να γίνεται εφικτή η παρακολούθηση του βαθμού ακριβείας με τον οποίο εκπληρώνονται οι επιθυμητές τροχιές κίνησης κατά την λειτουργία του περυγίου. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο, καθώς η κίνηση των servo δυσχεραίνεται σημαντικά από την παρουσία του νερού, κυρίως όταν το πλάτος ή/και η συχνότητα του υλοποιούμενου οδεύοντος κύματος λαμβάνουν μεγάλες τιμές. Αντίστοιχα, η κίνηση των servo δυσχεραίνεται και από τη δύναμη επαναφοράς που ασκείται στις ακτίνες από την ελαστική μεμβράνη, πρόβλημα το οποίο εμφανίζεται όταν είναι μεγάλη η διαφορά φάσης στην ημιτονοειδή κίνηση δύο διαδοχικών servo (ισοδύναμα, καθώς μειώνεται το μήκος κύματος του υλοποιούμενου οδεύοντος κύματος). Αποτέλεσμα αυτών είναι ότι ενδέχεται, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της επιθυμητής κίνησης, οι τροχιές των ακτίνων του περυγίου να μην υλοποιούνται με επαρκή ακρίβεια, διαφοροποιώντας έτσι τα χαρακτηριστικά της πραγματικής κίνησης του περυγίου από την επιθυμητή κυμάτωση. Αυτό, όπως γίνεται αντιληπτό, θα δημιουργούσε προβλήματα σε ότι αφορά την αξιόπιστη ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων, τα οποία όμως, μπορούν να αντιμετωπιστούν εάν λαμβάνεται μέτρηση της γωνιακής θέσης του servo κατά τη λειτουργία του. Προφανώς βέβαια, η μέτρηση αυτή, καθώς πρόκειται ουσιαστικά για απλή καταγραφή των κινήσεων, δεν δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εν γένει βελτίωση της απόδοσης των servo.

Το σήμα του εσωτερικού ποτενσιόμετρου χρησιμοποιείται στα κυκλώματα του servo για τον εσωτερικό έλεγχο θέσης του άξονα του servo, αλλά δεν παρέχεται κανονικά σαν έξοδος. Για αυτό το λόγο, έπρεπε να αφαιρεθεί το πίσω κάλυμμα το οποίο είναι στερεωμένο με βίδες στο υπόλοιπο κέλυφος του servo, οπότε, με τον τρόπο αυτό, παρέχεται άμεση πρόσβαση στην εσωτερική πλακέτα έλεγχου. Στη συνέχεια, αφού εντοπιστεί η πίστα που αντιστοιχεί στη μεσαία λήψη του ποτενσιόμετρου, συγκολλείται εκεί ένα καλώδιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 33. Στην άλλη άκρη του καλωδίου



συγκολλήθηκε η μία από τις τέσσερις ακίδες ενός κονέκτορα (τύπου αρσενικού header), ενώ οι υπόλοιπες προσαρμόστηκαν στον κονέκτορα (τύπου θηλυκού header) που φέρει το servo.

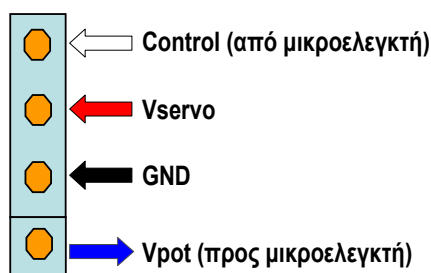


Σχήμα 33. Φωτογραφία του τροποποιημένου servo (χωρίς το οπίσθιο πλαστικό καπάκι). Το μπλε καλώδιο είναι η έξοδος του ποτενσιόμετρου.

Για την επέκταση καθώς και την ευκολία χρήσης των καλωδίων, κατασκευάστηκαν προεκτάσεις, το μήκος των οποίων καθορίστηκε με βάση τη θέση του κάθε servo στην τελική διάταξη του περυγίου. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 34(α), η κάθε προέκταση είναι καλώδιο τεσσάρων πολύκλωνων αγωγών (λήψη εξόδου ποτενσιόμετρου, είσοδος παλμού ελέγχου PWM, τάση τροφοδοσίας +5 Volt και γείωσης GRD), όπου, στις άκρες των προεκτάσεων προσαρμόστηκαν κονέκτορες (τύπου θηλυκών headers). Επιπρόσθετα, στο καλώδιο της προέκτασης τοποθετήθηκαν τοροειδείς φερίτες, για προστασία των σημάτων από τον εξωτερικό θόρυβο.



(α)



(β)

Σχήμα 34. (α) Η προέκταση του καλωδίου των servo. (β) Η διασύνδεση των σημάτων στον ακροδέκτη εξόδου του τροποποιημένου servo

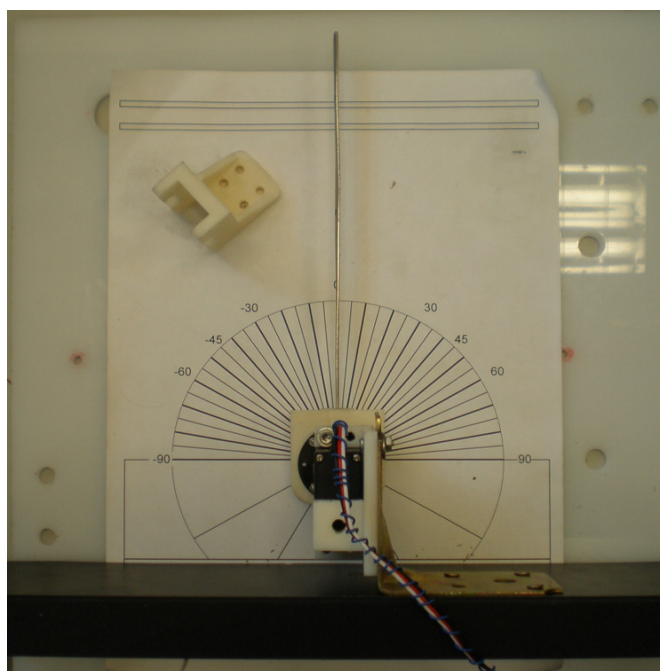
### 2.3.6 Βαθμονόμηση servo

Δύο είναι οι βασικοί στόχοι στους οποίους αποσκοπεί η διαδικασία βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκε για τα οκτώ servo του μηχανισμού: αφενός μεν ο προσδιορισμός του

απαιτούμενου σήματος ελέγχου προκειμένου ο άξονας του servo (και κατ' επέκταση η ακτίνα του περυγίου) να οδηγείται με ακρίβεια σε συγκεκριμένη γωνία, αφετέρου δε η συσχέτιση της εξόδου του ενσωματωμένου ποτενσιόμετρου του servo με τη γωνιακή του θέση, προκειμένου να είναι εφικτή η αποτίμηση του βαθμού της ακρίβειας με την οποία υλοποιούνται οι επιθυμητές τροχιές κίνησής του κατά τη λειτουργία του περυγίου.

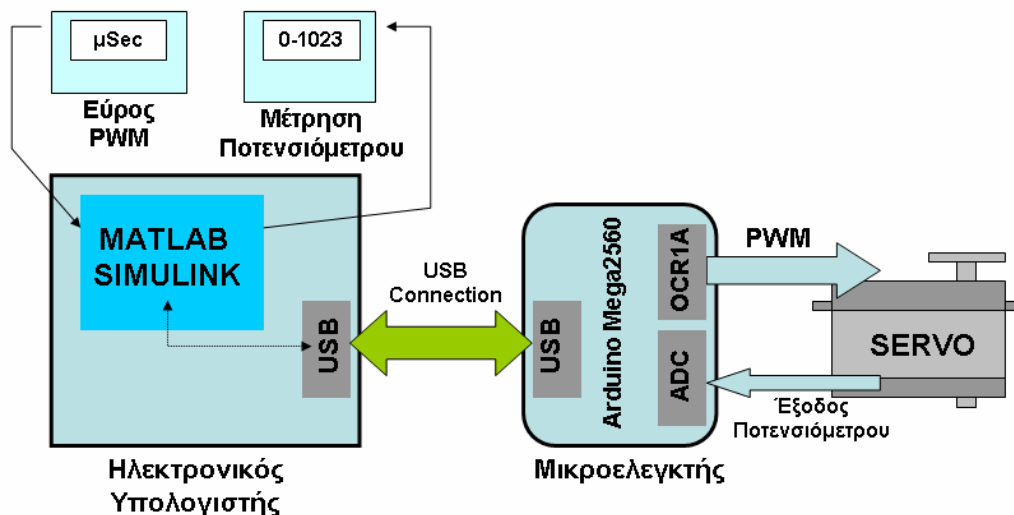
Προκειμένου για τη συστηματοποίηση, αλλά και τη διευκόλυνση, της διαδικασίας, κατασκευάστηκε η διάταξη που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα, η οποία επιτρέπει τη σταθερή στήριξη του servo πάνω από μια επίπεδη επιφάνεια στην οποία είχε κολληθεί μια σελίδα χαρτιού με εκτυπωμένο ένα βαθμονομημένο πολικό διάγραμμα.

Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκε στο Simulink ένα κατάλληλο μοντέλο, το οποίο υλοποιεί αμφίδρομη επικοινωνία (μέσω σειριακού πρωτοκόλλου) με τον μικροελεγκτή του αναπτυξιακού Arduino Mega2560. Παρέχεται έτσι η δυνατότητα αποστολής στον μικροελεγκτή της επιθυμητής τιμής του εύρους του PWM παλμού (σε  $\mu\text{sec}$ , ακέραιος αριθμός) που δίνεται ως εντολή κίνησης του servo, και ταυτόχρονα ο μικροελεγκτής επιστρέφει την τρέχουσα τιμή της εξόδου που λαμβάνεται από το ποτενσιόμετρο θέσης του servo, μέσω του ADC. Η μέτρηση αυτή αποστέλλεται στο Simulink ως ένας ακέραιος 0-1023 (αντιστοιχεί σε τάση 0-5V από τη μεσαία λήψη του ποτενσιόμετρου).



Σχήμα 35. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση των servo.

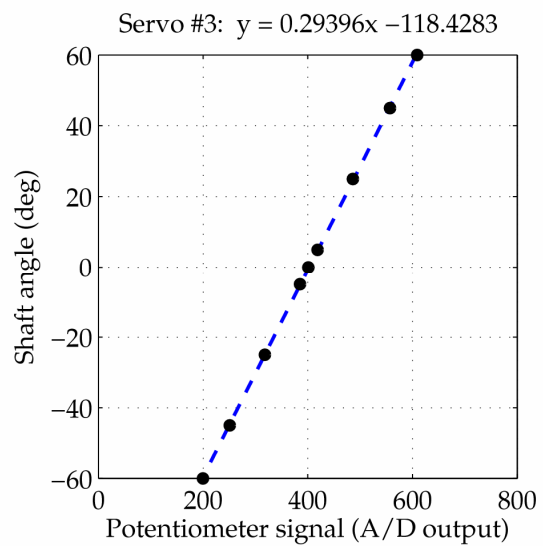
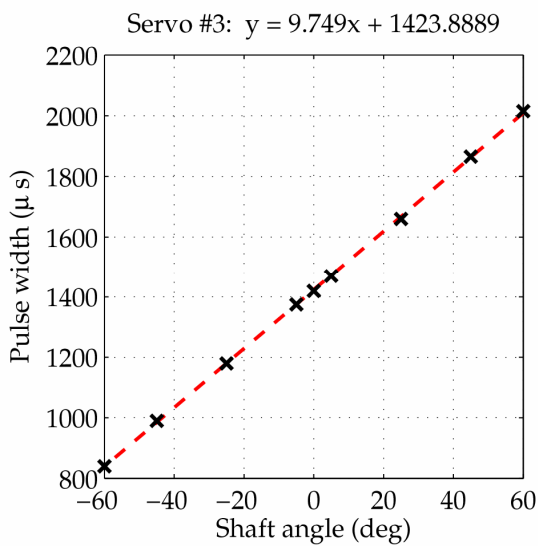
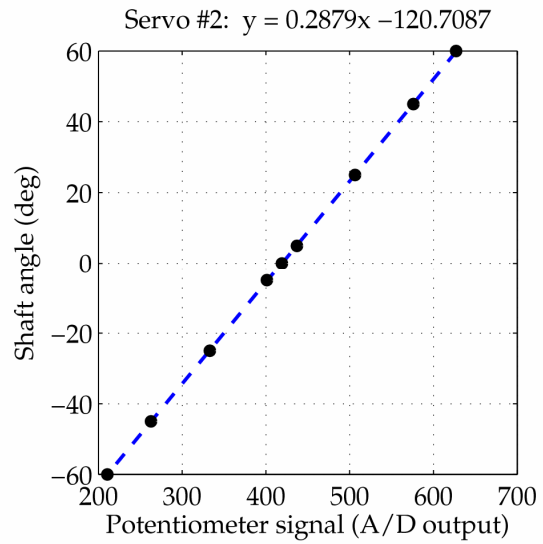
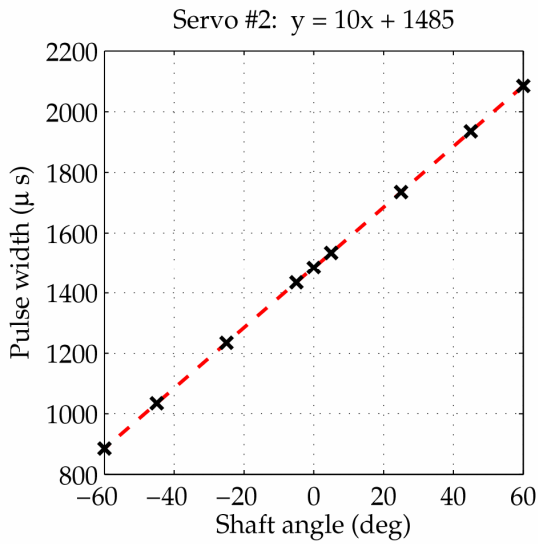
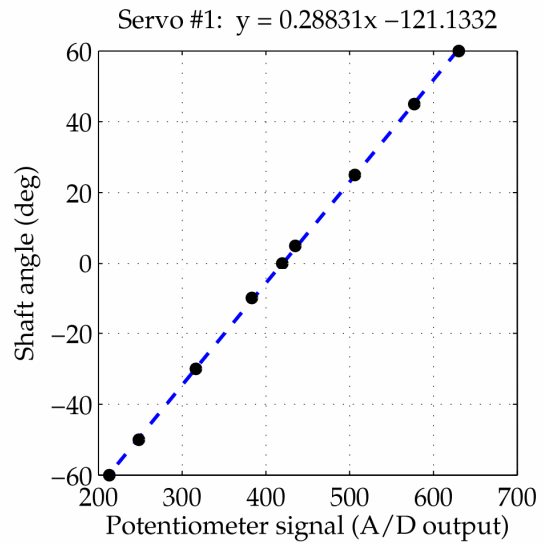
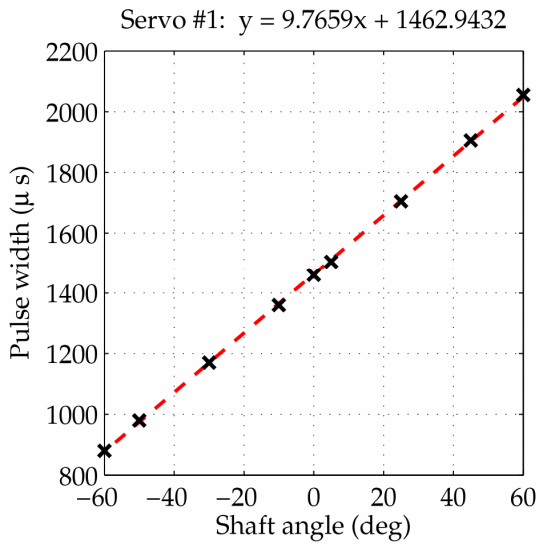
Η διασύνδεση των επιμέρους μερών της πειραματικής διάταξης απεικονίζεται στο Σχήμα 36. Σημειώνεται ότι η μετατροπή USB  $\leftrightarrow$  RS-232 επιτυγχάνεται αυτόματα, αφενός μεν από τους σχετικούς drivers που βρίσκονται εγκατεστημένοι στο PC, αφετέρου δε από τα εξειδικευμένα ολοκληρωμένα που παρέχονται για το σκοπό αυτό στο αναπτυξιακό του Arduino Mega2560.



Σχήμα 36. Λειτουργικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

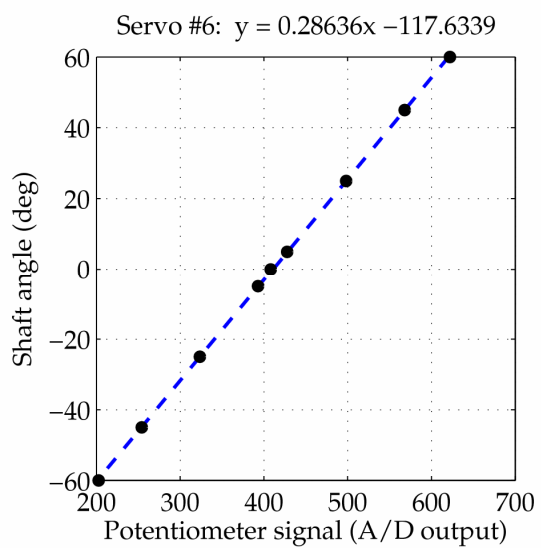
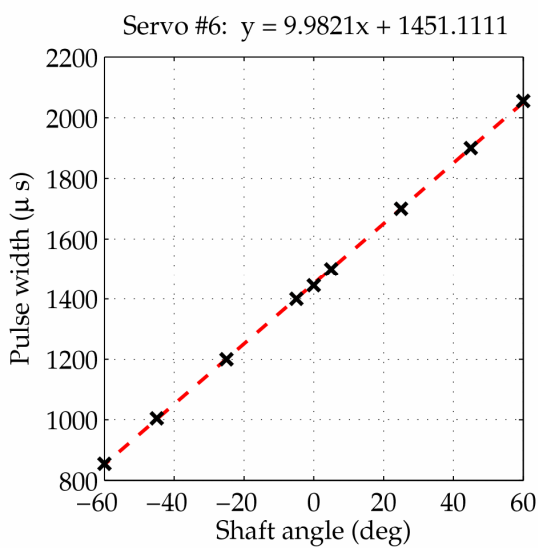
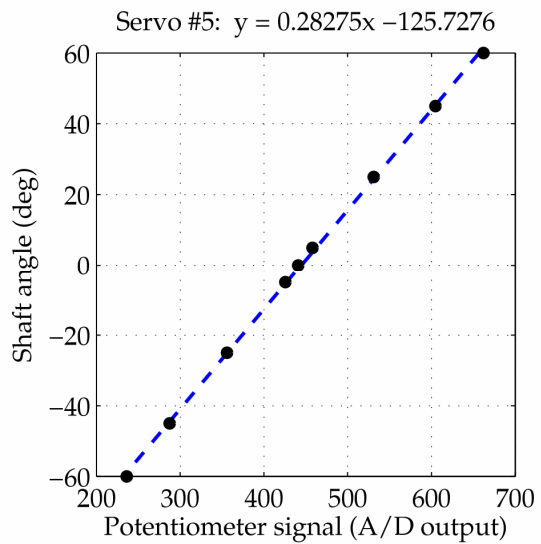
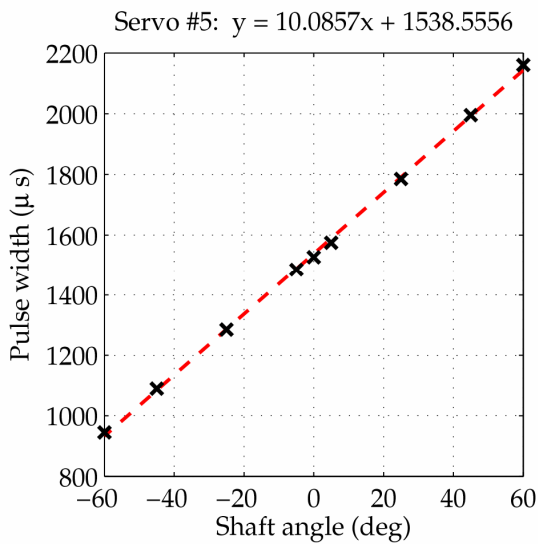
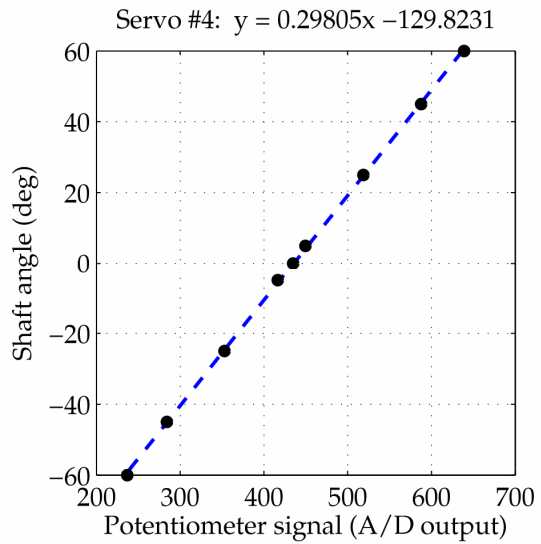
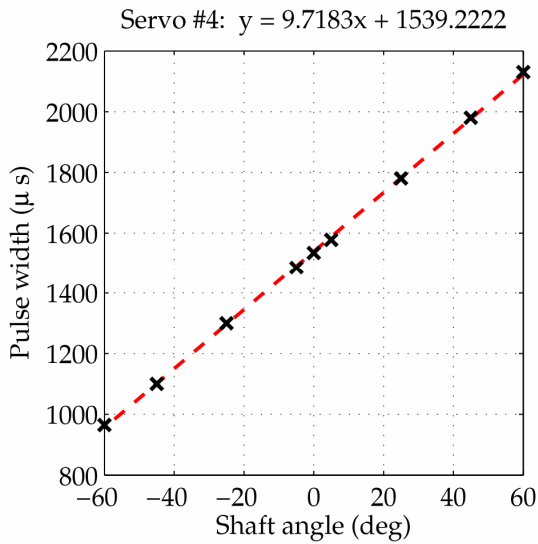
Κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης, μέσω διαδοχικών δοκιμών προσεγγίζονταν πειραματικά το κατάλληλο εύρος του PWM παλμού ελέγχου του servo, προκειμένου να επιτευχθεί συγκεκριμένη γωνιακή θέση. Εφόσον επιβεβαιώνονταν (οπτικά) η ακριβής προσέγγιση της γωνίας του servo στην επιθυμητή της τιμή, καταγράφονταν σε ένα πίνακα τα σχετικά δεδομένα (το εύρος του PWM παλμού ελέγχου των servo και η αντίστοιχη μέτρηση από το ποτενσιόμετρο θέσης, όπως αυτή λαμβάνονταν μέσω του ADC του μικροελεγκτή). Η παραπάνω διαδικασία, για καθένα από τα οκτώ servo, πραγματοποιήθηκε για 9 διαφορετικές γωνίες, σε εύρος από  $-60^\circ$  έως  $60^\circ$ .

Στη συνέχεια τα δεδομένα που ελήφθησαν με τον τρόπο αυτό εισήχθησαν στο Matlab, όπου επεξεργάστηκαν μέσω της εντολής polyfit. Η επεξεργασία αυτή υπολόγισε δύο εξισώσεις πρώτου βαθμού για κάθε servo. Η πρώτη εξίσωση περιγράφει τη θέση του άξονα του servo συναρτήσει του εύρους του PWM σήματος ελέγχου, ενώ η δεύτερη εξίσωση περιγράφει τη θέση του άξονα συναρτήσει της μέτρησης του ποτενσιόμετρου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά, και για το οκτώ servo, στα γραφήματα που ακολουθούν. Αξίζει να σημειωθεί η πολύ καλή γραμμικότητα που παρουσιάζουν τα πειραματικά δεδομένα (τόσο για το σήμα ελέγχου, όσο και για την έξοδο του ποτενσιόμετρου), γεγονός που εξασφαλίζει ότι οι εξισώσεις που προέκυψαν από την γραμμική παρεμβολή περιγράφουν με ακρίβεια τις αντίστοιχες συσχετίσεις.

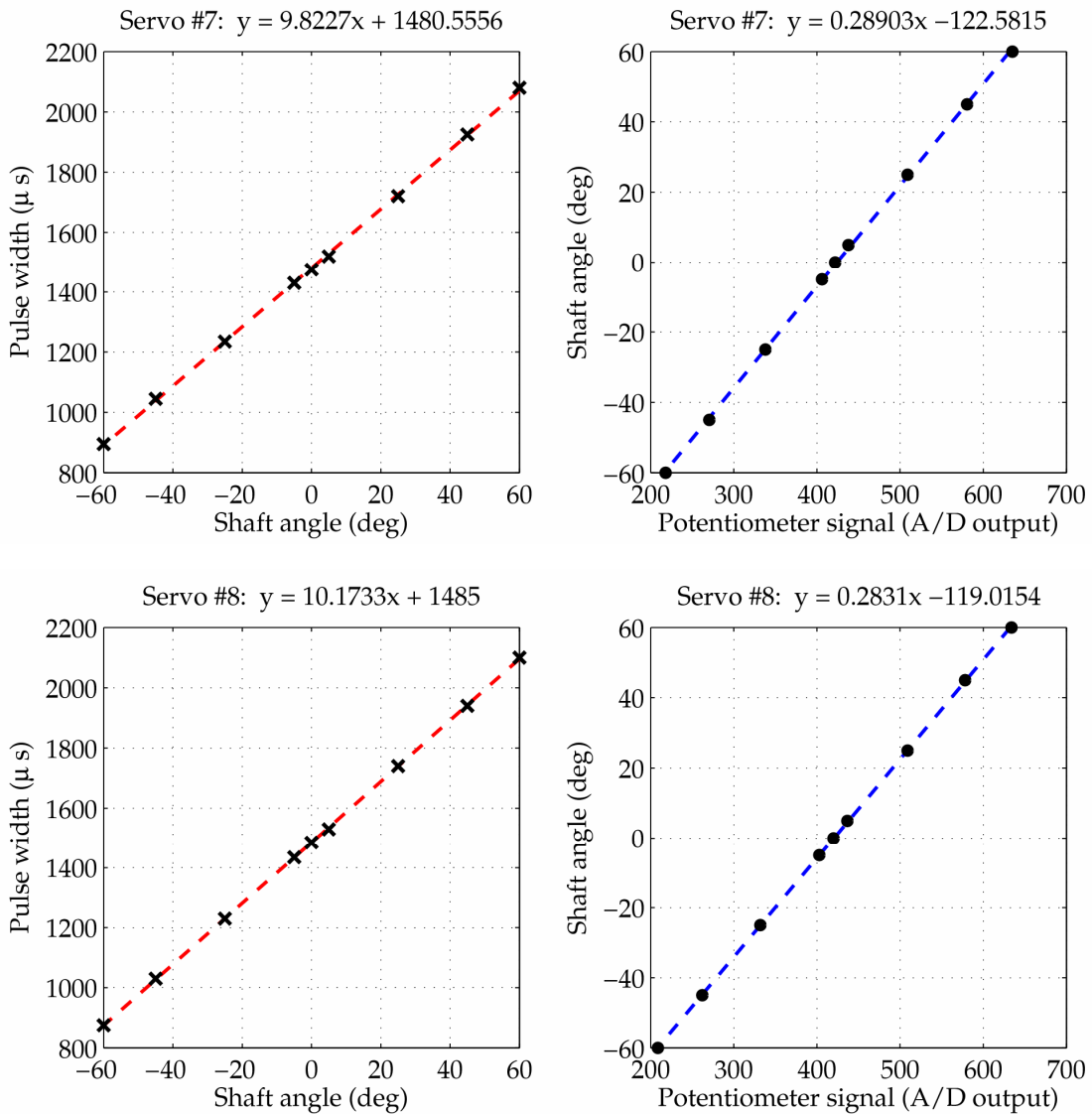


Σχήμα 37. Τα πειραματικά δεδομένα και η περιγραφή τους μέσω γραμμικών εξισώσεων, για τα servo #1 - #3.





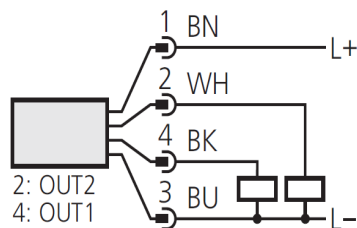
Σχήμα 38. Τα πειραματικά δεδομένα και η περιγραφή τους μέσω γραμμικών εξισώσεων, για τα servo #4 - #6.



Σχήμα 39. Τα πειραματικά δεδομένα και η περιγραφή τους μέσω γραμμικών εξισώσεων, για τα servo #7 και #8.

### 2.3.7 Βαθμονόμηση οπτικού αισθητήρα απόστασης

Η βαθμονόμηση του οπτικού αισθητήρα απόστασης πραγματοποιήθηκε με καταγραφή των τιμών της ένδειξης του αισθητηρίου και της τάσης εξόδου του, για γνωστές αποστάσεις. Για το σκοπό αυτό, υλοποιήθηκε η παρακάτω συνδεσμολογία, με βάση τις υποδείξεις του εγχειρίδιου λειτουργίας του αισθητηρίου, με τάση τροφοδοσίας 24V.



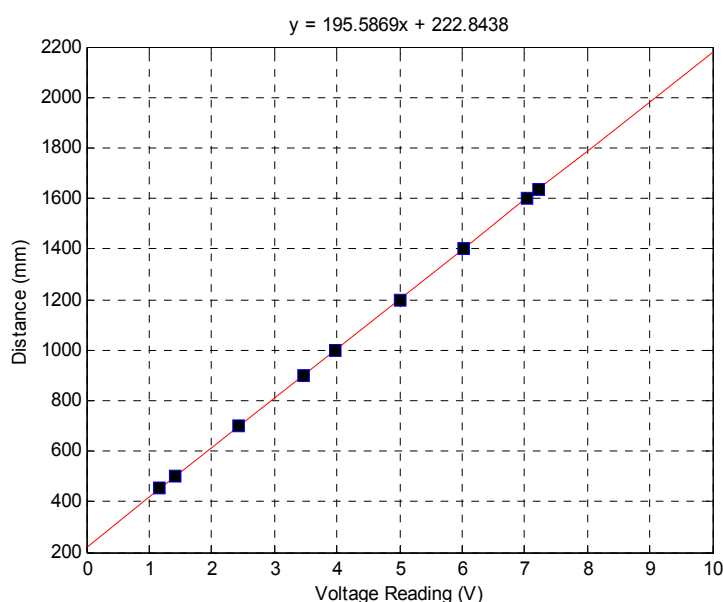
Σχήμα 40. Συνδεσμολογία οπτικού αισθητήρα.

Για την ψηφιοποίηση και καταγραφή της εξόδου του αισθητήρα (ένα αναλογικό σήμα τάσης σε εύρος 0..10 V) χρησιμοποιήθηκε η κάρτα PCI-1200 της εταιρίας National Instruments, η οποία είχε εγκατασταθεί στο διαύλο PCI ενός Η/Υ. Η κάρτα αυτή παρέχει διακριτική ικανότητα 12-bit για τις μετρήσεις αναλογικής τάσης, η οποία είναι επαρκής για τις ανάγκες της παρούσας εφαρμογής.

Τα δεδομένα που ελήφθησαν με την παραπάνω διαδικασία, εισήχθησαν στο πρόγραμμα Matlab, όπου, με χρήση της συνάρτησης polyfit, υπολογίστηκε η γραμμική παρεμβολή τους. Η σχέση που προέκυψε έχει την μορφή

$$y = 195.5869x + 222.8438 , \quad (2)$$

όπου το  $x$  αντιστοιχεί στην τάση εξόδου του αισθητηρίου και το  $y$  στην μετρούμενη απόσταση. Όπως φαίνεται και από το γράφημα του Σχήματος που ακολουθεί, η σχέση μεταξύ των δύο εμφανίζει πολύ καλή γραμμικότητα.



Σχήμα 41.. Τα πειραματικά δεδομένα της βαθμονόμησης του αισθητήρα απόστασης.

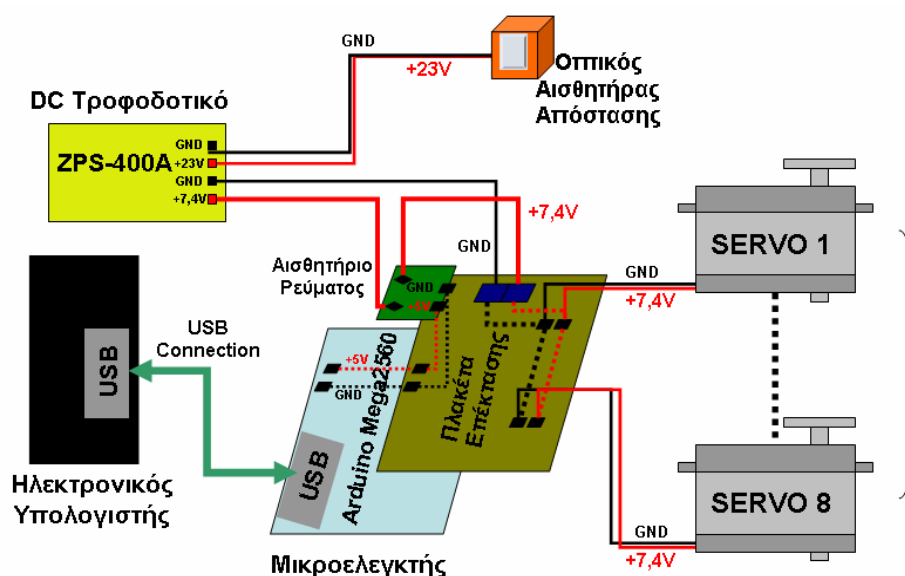
### 2.3.8 Κυκλώματα τροφοδοσίας

Η βασική απαίτηση για το κύκλωμα τροφοδοσίας είναι η παροχή επαρκούς ισχύος για την μέγιστη απόδοση των servo, και κατ' επέκταση της συνολικής διάταξης του περυγίου. Αυτό γιατί κατά την λειτουργία του περυγίου μέσα στο νερό τα servo θα πρέπει να λειτουργούν με την μέγιστη ροπή που μπορούν να αποδώσουν. Τα χρησιμοποιούμενα servo (Futaba S-3051HV), σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, έχουν εύρος τάσης λειτουργίας από 5 έως 7.4 Volt και αποδίδουν την μέγιστη ροπή τους για τροφοδοσία 7.4 Volt. Κατά τη διάρκεια των αρχικών δοκιμών του περυγίου, διαπιστώθηκε ότι το συνολικό ρεύμα που απαιτούνταν για την κίνηση του περυγίου μέσα στο νερό (και κυρίως όταν το γωνιακό εύρος, η συχνότητα ή η διαφορά φάσης μεταξύ των διαδοχικών servo λάμβαναν τιμές κοντά στα άνω όριά τους) συχνά

ξεπερνούσε τα 5 A. Καθώς τα διαθέσιμα εργαστηριακά τροφοδοτικά δεν μπορούσαν να καλύψουν τις απαιτήσεις αυτές, στην τελική διάταξη χρησιμοποιείται ένα τροφοδοτικό βαρέως τύπου (Zenith ZPS-400A), το οποίο παρέχει τέσσερις, ανεξάρτητα ρυθμιζόμενες, εξόδους συνεχούς τάσης, με μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ 400 W. Έτσι, η έξοδος #4 του εν λόγω τροφοδοτικού ρυθμίστηκε στα 7.4 Volt, με ικανότητα συνεχούς παροχής 6 A ρεύματος (9 A μέγιστη στιγμιαία). Η γραμμή αυτή τροφοδοσίας οδηγείται στην πλακέτα επέκτασης του μικροελεγκτή, απ' όπου και διαμοιράζεται στα 8 servo του πτερυγίου, ενώ διέρχεται επίσης και από τον αισθητήρα ρεύματος, για την παρακολούθηση και καταγραφή της στιγμιαίας συνολικής κατανάλωσης ισχύος από το πτερόγιο. Επιπλέον, η έξοδος #2 του τροφοδοτικού ρυθμίστηκε στα 24 Volt, και χρησιμοποιήθηκε για την τροφοδοσία του οπτικού αισθητηρίου απόστασης της διάταξης.

Σημειώνεται επίσης ότι το αναπτυξιακό Arduino Mega2560 τροφοδοτείται μέσω της θύρας USB, από τον Η/Υ ελέγχου της διάταξης. Στο αναπτυξιακό παρέχεται επίσης σταθεροποιημένη έξοδος 5 Volt, που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του αισθητηρίου ρεύματος και των λοιπών ολοκληρωμένων της πλακέτας επέκτασης.

Στο Σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται συνοπτικά η υλοποίηση των κυκλωμάτων τροφοδοσίας που χρησιμοποιείται στην πειραματική διάταξη του πτερυγίου.



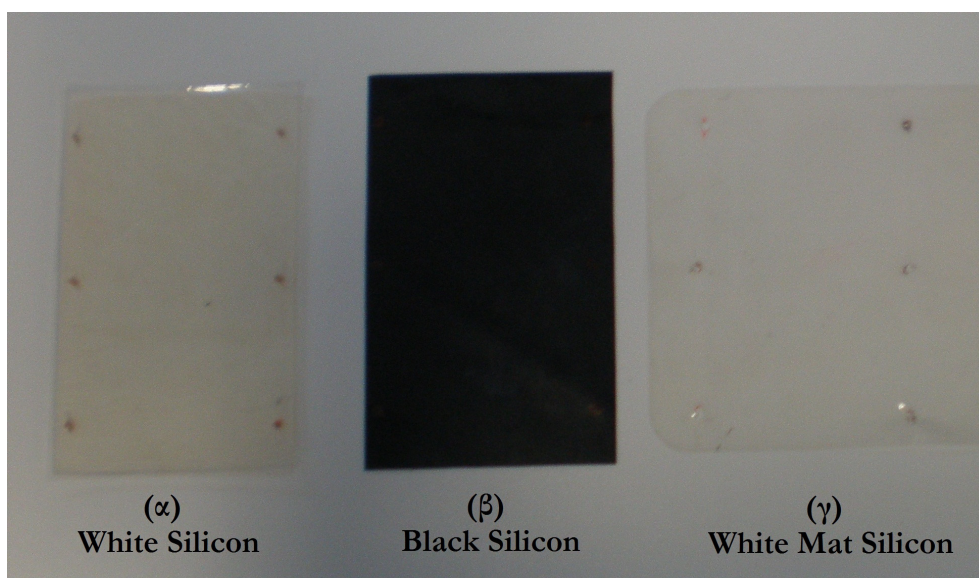
Σχήμα 42. Συνδεσμολογία κυκλώματος τροφοδοσίας της συνολικής πειραματικής διάταξης.

## 2.4 Διαδικασίες επιλογής μεμβράνης

Η μεμβράνη αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του μηχανισμού του πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης. Ουσιαστικά, οι κυματώσεις που παράγει η μεμβράνη, ακολουθώντας την κίνηση των ακτίνων που οδηγούνται από τα servo, ευθύνονται για την δημιουργία πρόωσης, όταν το πτερόγιο τεθεί σε λειτουργία μέσα στο νερό. Η μεμβράνη θα πρέπει να παρουσιάζει ικανό βαθμό αντοχής, ώστε να μην υποχωρεί υπό το βάρος νερού που μετακινεί, προκειμένου να βελτιστοποιείται η παραγωγή

προωστικών δυνάμεων. Από την άλλη, η μεμβράνη θα πρέπει να διαθέτει αρκετή ελαστικότητα, ώστε να είναι εφικτή η παραγωγή των κυματώσεων αυτών, χωρίς να καταπονούνται υπέρμετρα τα *servo* και να περιορίζεται το εύρος της κίνησης των ακτίνων. Όπως γίνεται και διαισθητικά αντιληπτό, η απαίτηση αυτή αναδεικνύεται εντονότερα καθώς αυξάνεται η διαφορά φάσης ανάμεσα στις ημιτονοειδείς τροχιές κίνησης μεταξύ διαδοχικών ακτίνων (ισοδύναμα, καθώς μειώνεται το μήκος κύματος της εκτελούμενης κυματώσεως του περυγίου). Ο βαθμός ελαστικότητας της μεμβράνης εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο υλικό αλλά και από το πάχος του υλικού αυτού.

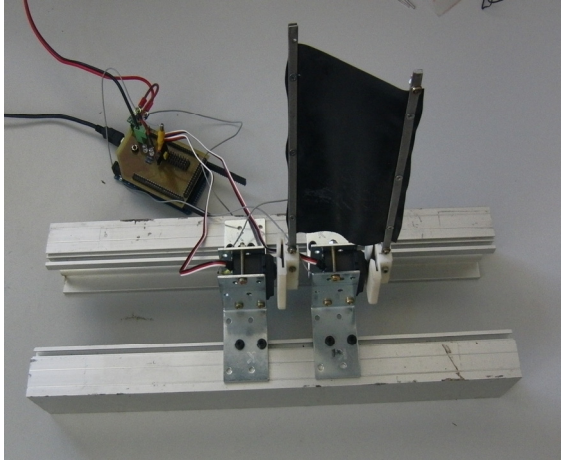
Με βάση τα παραπάνω, επιλέχθηκαν να δοκιμαστούν μια σειρά από σιλικονούχες μεμβράνες, διαφορετικής σύστασης και πάχους, οι ονομασίες των οποίων κωδικοποιήθηκαν ως *White Silicon*, *Black Silicon*, *White Mat Silicon* και *double White Mat Silicon* (Σχήμα 43). Προκειμένου να επιλεγεί τελικά η καταλληλότερη εξ' αυτών πραγματοποιήθηκαν για κάθε μία πειραματικές μετρήσεις τόσο εκτός όσο και εντός του νερού. Οι πειραματικές μετρήσεις εκτός νερού είχαν ως σκοπό τη διαπίστωση και οπτική επιβεβαίωση, ότι η κάθε δοκιμαζόμενη μεμβράνη δεν δημιουργούσε προβλήματα στην κίνηση του μηχανισμού (αν για μία μεμβράνη διαπιστωνόταν ότι παρεμπόδιζε την κίνηση ή καταπονούσε τα *servo*, κρίνονταν ακατάλληλη). Ακολουθούσαν δοκιμές μέσα στο νερό για να διαπιστωθεί, μέσω των μετρήσεων, το κατά πόσο οι πραγματικές τροχιές κίνησης των ακτίνων του μηχανισμού ακολουθούσαν τις επιθυμητές.



Σχήμα 43. Οι σιλικονούχες μεμβράνες που δοκιμάστηκαν: (α) *White Silicon*, (β) *Black Silicon*, (γ) *White Mat Silicon*. Η μεμβράνη *double White Mat Silicon* αντιστοιχεί στη διπλή προσαρμογή της μεμβράνης (γ).

Για την διευκόλυνση και συστηματοποίηση των δοκιμών αυτών, κατασκευάστηκε η απλή διάταξη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 44 (α), η οποία επιτρέπει τη σταθερή στήριξη των *servo* πάνω σε δύο αλουμινένιες βάσεις. Η διάταξη αυτή μπορούσε να προσαρμοστεί εύκολα στη μικρή δεξαμενή δοκιμών (βλ. Ενότητα 2.2.3) που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων στο υδάτινο περιβάλλον για τους διαφορετικούς τύπους μεμβρανών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 44 (β).





(α)



(β)

Σχήμα 44. Η διάταξη που κατασκευάστηκε με δύο servo (α) και η μικρή δεξαμενή δοκιμών με προσαρμοσμένη την διάταξη δύο servo (β).

Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκε στο Simulink ένα κατάλληλο μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιούσε δύο ταλαντωτές CPG (βλ. Ενότητα 3.2), για την παραγωγή των επιθυμητών γωνιών κίνησης των δύο ακτίνων. Όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα 3.2, με το σύστημα αυτό των ταλαντωτών, οι επιθυμητές τροχιές κίνησης για τις δύο ακτίνες, λαμβάνουν, στη μόνιμη κατάσταση, την ακόλουθη μορφή:

$$\theta_1(t) = R \cdot \sin(2\pi ft) \text{ και } \theta_2(t) = R \cdot \sin(2\pi ft + \chi)$$

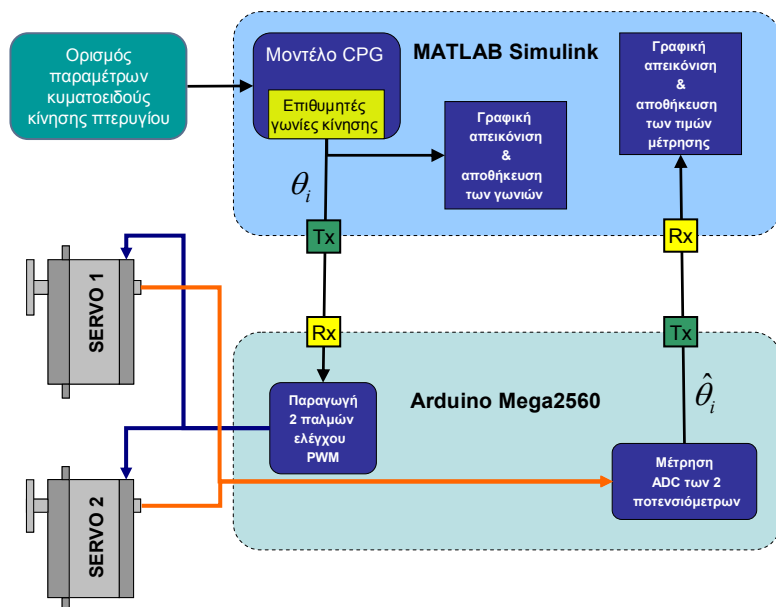
Στις παραπάνω σχέσεις, οι παράμετροι  $R$  και  $f$  προσδιορίζουν το μέγιστο πλάτος και τη συχνότητα, αντίστοιχα, της ημιτονοειδούς κίνησης των ακτίνων, ενώ το  $\chi$  αντιπροσωπεύει τη διαφορά φάσης της κίνησης της ακτίνας #2 σε σχέση με την ακτίνα #1.

Οι επιθυμητές γωνιακές θέσεις των ακτίνων αποστέλλονταν στο μικροελεγκτή ATmega2560, και στη συνέχεια λαμβάνονταν οι τιμές από τη μέτρηση των ποτενσιόμετρων των δύο servo, με υλοποίηση αμφίδρομης επικοινωνίας μέσω σειριακού πρωτοκόλλου. Το λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου που υλοποιήθηκε για τις πειραματικές αυτές δοκιμές παρουσιάζεται στο Σχήμα 45.

Κατά την διάρκεια των δοκιμών επιλογής μεμβράνης, πάρθηκαν πειραματικές μετρήσεις μεταβάλλοντας τις τιμές των τριών παραμέτρων ελέγχου  $R$ ,  $f$  και  $\chi$  του μοντέλου Simulink. Έτσι, για κάθε μεμβράνη που δοκιμαζόταν, λήφθηκαν μετρήσεις για εύρος τιμών γωνιακού εύρους  $R$  από  $10^\circ$  έως  $50^\circ$  με βήμα  $5^\circ$ , για τιμές συχνότητας  $f$  από 1.0 Hz έως 2.0 Hz ανά 0.2 Hz και εύρος τιμών διαφοράς φάσης  $\chi$  από  $0^\circ$  έως  $60^\circ$  ανά  $10^\circ$ .

Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας των μετρήσεων αυτών, αναπτύχθηκε κατάλληλος κώδικας στο Matlab που διαχειριζόταν το μοντέλο Simulink. Κατά την εκτέλεσή του, ο κώδικας αρχικά ενεργοποιούσε το μοντέλο Simulink, ορίζοντας τις αρχικές τιμές των παραμέτρων ελέγχου. Στη συνέχεια, ρύθμιζε τη λειτουργία του μοντέλου, ώστε αυτό να εκτελείται για χρόνο ίσο με 10 περιόδους της εκάστοτε

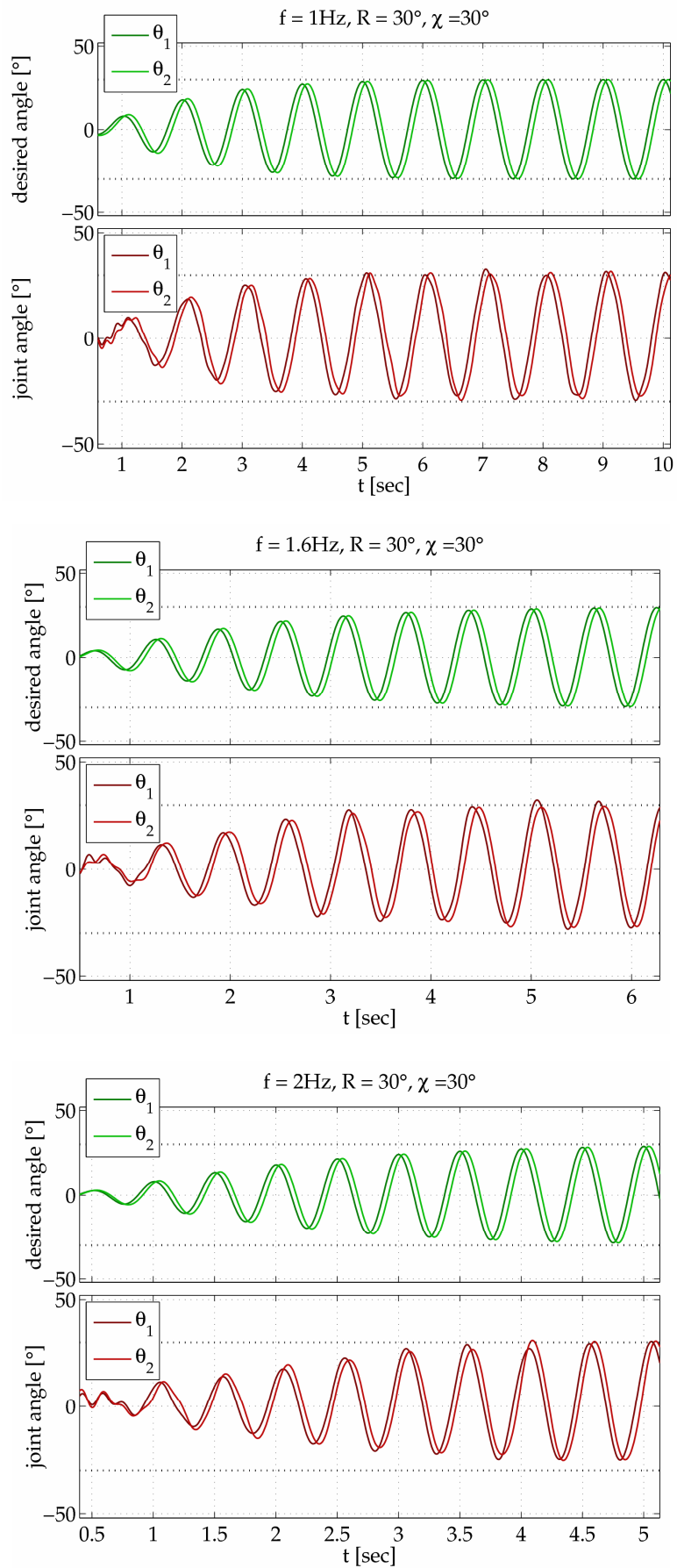
εκτελούμενης κυμάτωσης, μετά το πέρας του οποίου, τα δεδομένα από τις μετρήσεις αποθηκεύονται (σε μορφή αρχείου .mat) για περαιτέρω επεξεργασία. Ο κώδικας επαναλάμβανε την διαδικασία αυτή, έως ότου ολοκληρωθούν οι μετρήσεις, για όλες τις τιμές παραμέτρων ελέγχου που ορίστηκαν, μεταβάλλοντας μία τιμή τη φορά.



Σχήμα 45. Λειτουργικό διάγραμμα του συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές διαδικασίες επιλογής μεμβράνης.

Μετά το πέρας των πειραματικών μετρήσεων, ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων στο matlab μέσω της εντολής findpeaks, προκειμένου να υπολογιστεί σε κάθε μέτρηση η πραγματική διαφορά φάσης μεταξύ της κίνησης των δύο ακτινών, για σύγκρισή της με την τιμή της επιθυμητής διαφορά φάσης  $\chi$ , καθώς επίσης και το πραγματικό πλάτος των εκτελούμενων ταλαντώσεων σε σχέση με την επιθυμητή τιμή του  $R$ .

Τελικά, με βάση την επεξεργασία των αποτελεσμάτων αυτών, από τις μεμβράνες που δοκιμάστηκαν, επιλέχθηκε η μεμβράνη White Mat Silicon (πάχους 0.25 mm), η οποία παρουσίαζε τη καλύτερη παρακολούθηση και τη μικρότερη απόκλιση των επιθυμητών τροχιών κίνησης, κατά τη λειτουργία του μηχανισμού. Στα γραφήματα του Σχήματος 46 παρατίθενται ενδεικτικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις με την μεμβράνη αυτή. Ειδικότερα, το πάνω γράφημα δείχνει τις επιθυμητές γωνιακές τροχιές για τις 2 ακτίνες του μηχανισμού, ενώ στο κάτω γράφημα παρουσιάζονται οι πραγματικές τροχιές που τελικά υλοποιήθηκαν, όπως αυτές μετρήθηκαν με τη βοήθεια των ποτενσιόμετρων στα 2 servo.



Σχήμα 46. Ενδεικτικά αποτελέσματα από τις μετρήσεις με την μεμβράνη White Matt Silicon στον αέρα.



# **Στρατηγικές Ελέγχου Κίνησης του Πτερυγίου**

## **3.1 Εισαγωγή**

Στο Κεφάλαιο αυτό αρχικά αναλύεται η στρατηγική που υλοποιήθηκε για τον έλεγχο κίνησης του πτερυγίου, η οποία βασίζεται σε μια δομή διασυνδεδεμένων μη-γραμμικών ταλαντωτών, με αρχιτεκτονική ανάλογη με τις γεννήτριες κεντρικού πρότυπου ρυθμού (Central Pattern Generators, CPGs) που απαντώνται σε βιολογικά συστήματα. Το βασικό πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής έγκειται στο ότι επιτρέπει την ομαλή μετάβαση των τροχιών κίνησης για τις ακτίνες του μηχανισμού όταν μεταβάλλονται οι παράμετροι του οδεύοντος κύματος στο πτερόγιο.

Παρουσιάζονται επίσης οι δύο αρχιτεκτονικές για την υλοποίηση της παραπάνω στρατηγικής ελέγχου της κυματοειδούς κίνησης του πτερυγίου. Η πρώτη εξ' αυτών βασίζεται σε μια ιεραρχική δομή, όπου οι επιθυμητές τροχιές των ακτίνων του μηχανισμού δημιουργούνται, μέσω της δομής του CPG, στο περιβάλλον του Simulink που «τρέχει» σε πραγματικό χρόνο σε έναν Η/Υ, και ο μικροελεγκτής αναλαμβάνει τον έλεγχο χαμηλού επιπέδου, που αφορά στην οδήγηση των servos. Στη δεύτερη αρχιτεκτονική που αναπτύχθηκε, ο μικροελεγκτής αναλαμβάνει εξ' ολοκλήρου τον έλεγχο της διάταξης του πτερυγίου, επιτρέποντας έτσι τη λειτουργία του με μεγαλύτερο βαθμό αυτονομίας.

## **3.2 Στρατηγικές παραγωγής της κυματοειδούς κίνησης**

Στην Ενότητα αυτή παρουσιάζονται αρχικά οι βασικές σχέσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενός οδεύοντος κύματος κατά μήκος του πτερυγίου, από τις οποίες και υπογραμμίζεται η συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων της κίνησης των ακτίνων με τα χαρακτηριστικά της κυμάτωσης του πτερυγίου. Στη συνέχεια, περιγράφεται μια εναλλακτική στρατηγική για την παραγωγή των κυμάτων, βασισμένη σε δομές CPG, η οποία και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, λόγω των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει, όπως αυτά αναλύονται στο σχετικό κείμενο.

### 3.2.1 Απευθείας παραγωγή του οδεύοντος κύματος

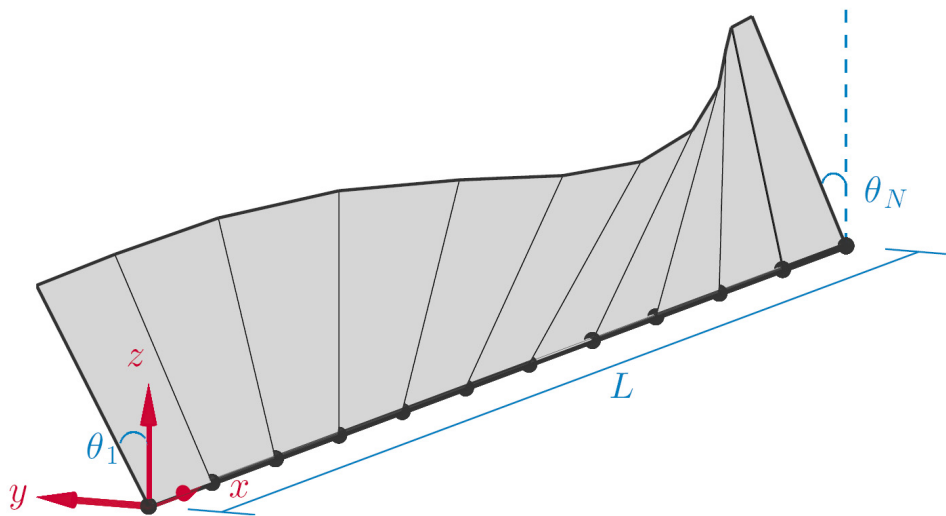
Ο κυματισμός του πτερυγίου επιτυγχάνεται από τις γωνιακές μεταβολές των ακτίνων που απαρτίζουν το μηχανισμό. Το οδεύον αυτό κύμα μπορεί να υλοποιηθεί προδιαγράφοντας την επιθυμητή γωνιακή τροχιά για κάθε μία από τις  $N=8$  ακτίνες του μηχανισμού να αντιστοιχεί σε μια ημιτονοειδή συνάρτηση, ως:

$$\theta_i(t) = R_i \cdot \sin(\omega t + (i-1)\chi) + X_i, \quad i=1, \dots, N \quad (3)$$

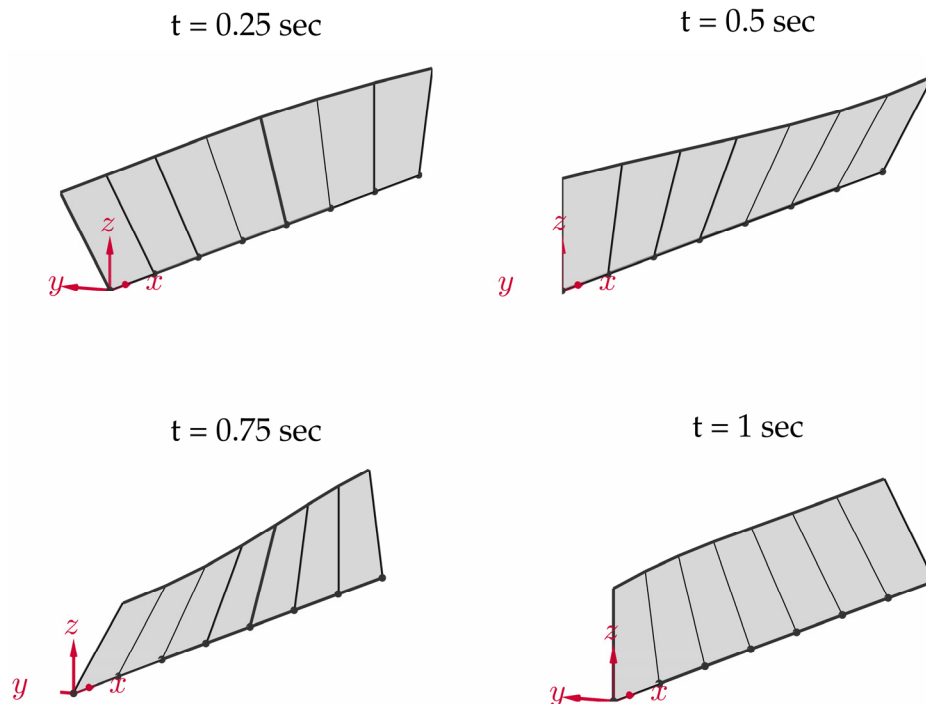
Στην παραπάνω σχέση, ο όρος  $\theta_i(t)$  αντιστοιχεί στη χρονική μεταβολή της γωνίας της ακτίνας- $i$  από την κατακόρυφη θέση (βλ. Σχήμα 47), ενώ  $2R_i$  είναι το συνολικό γωνιακό εύρος και  $X_i$  το γωνιακό offset της κίνησής της. Η παράμετρος  $\omega$  αντιστοιχεί στην κυκλική συχνότητα της κίνησης (κοινή για όλες τις ακτίνες), ενώ η παράμετρος  $\chi$  αντιπροσωπεύει τη (σταθερή) διαφορά φάσης μεταξύ των ημιτονοειδών μεταβολών της γωνίας γειτνιαζόντων ακτίνων. Σημειώνεται ότι το πρόσημο της παραμέτρου  $\chi$  καθορίζει τη φορά μετάδοσης του οδεύοντος κύματος, ενώ στην ειδική περίπτωση για την οποία  $\chi = 0$ , δεν έχουμε παραγωγή οδεύοντος κύματος, καθώς όλες οι ακτίνες κινούνται συμφασικά. Η διαφοροποίηση που επιτυγχάνεται στο μήκος του οδεύοντος κύματος, μέσω της τιμής που επιλέγεται για τη διαφορά φάσης  $\chi$ , αναδεικνύεται στα παραδείγματα που περιλαμβάνονται στο Σχήμα 48. Τέλος, η ταχύτητα  $V$  με την οποία μεταδίδεται το οδεύον κύμα της σχέσης (3) μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$V = \text{sgn}(\chi) f \frac{360^\circ L}{\chi(N-1)} \quad (4)$$

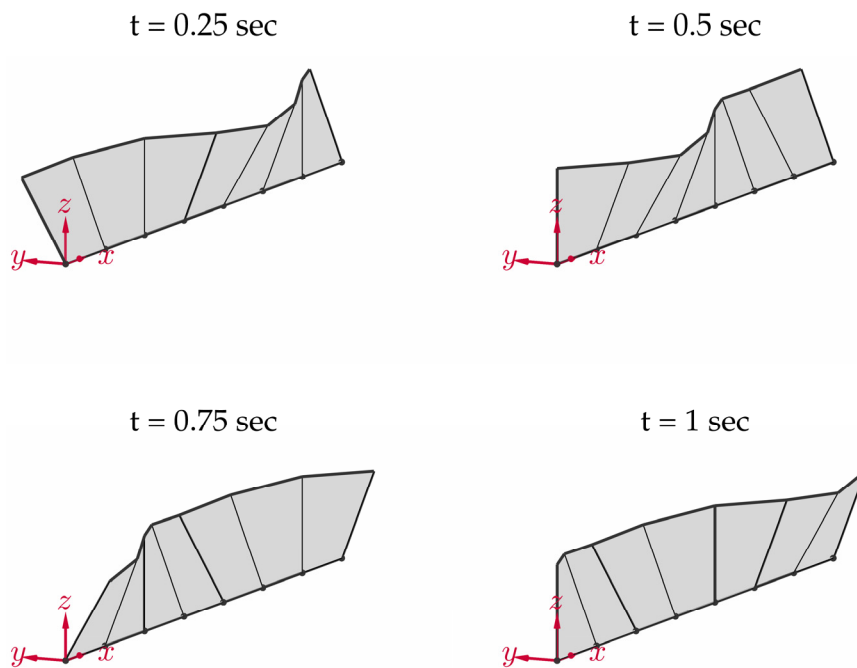
όπου  $f = \omega/2\pi$  η συχνότητα της εκτελούμενης ημιτονοειδούς κίνησης των ακτίνων και  $L$  το συνολικό μήκος του πτερυγίου (Σχήμα 47), ενώ η διαφορά φάσης  $\chi$  εκφράζεται σε μοίρες.



Σχήμα 47. Αναπαράσταση της δομής του πτερυγίου με  $N=8$  ακτίνες.



(α) Η μορφή της κυμάτωσης για  $\chi = 15^\circ$



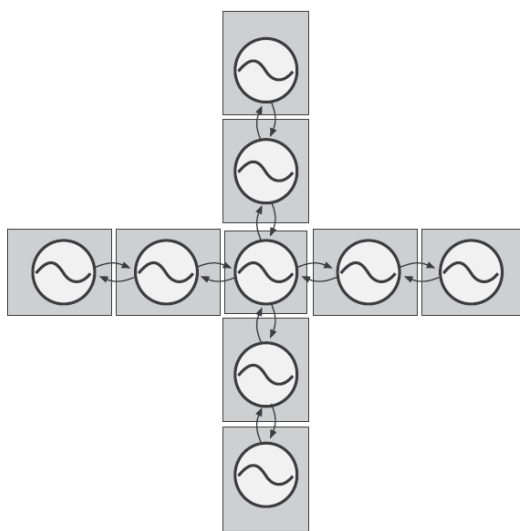
(β) Η μορφή της κυμάτωσης για  $\chi = 45^\circ$

Σχήμα 48. Απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης του οδεύοντος κύματος για δύο διαφορετικές τιμές της διαφοράς φάσης  $\chi$ , με κοινές τις υπόλοιπες παραμέτρους της σχέσης (3):  $R_i = 30^\circ$ ,  $\omega = 2\pi$ ,  $X_i = 0^\circ$  ( $i = 1 \dots N$ )

### 3.2.2 Παραγωγή του οδεύοντος κύματος μέσω CPG

Η σχέση (3) μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την υλοποίηση του ελέγχου κίνησης του περυγίου, παρέχοντας τις επιθυμητές τροχιές κίνησης των 8 servo που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση των ακτίνων. Παρότι η προσέγγιση αυτή παρέχει το πλεονέκτημα της σχετικά απλής υλοποίησης, το βασικό μειονέκτημά της έγκειται στο ότι δεν παρέχει την επιθυμητή ομαλότητα στη περίπτωση στιγμιαίων μεταβολών των παραμέτρων του οδεύοντος κύματος (εύρος, συχνότητα, διαφορά φάσης) παρουσιάζοντας σημαντικές και ανεπιθύμητες διαταραχές. Οι διαταραχές αυτές ενδέχεται μάλιστα να δημιουργούν σημαντική καταπόνηση των servos. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία επιστρατεύτηκε μια άλλη στρατηγική για την υλοποίηση της κυματοειδούς κίνησης του περυγίου, που βασίζεται στη χρήση CPGs (Central Pattern Generators, γεννήτριες κεντρικού πρότυπου ρυθμού) για την παραγωγή των επιθυμητών τροχιών κίνησης των αρθρώσεων του μηχανισμού.

Μέσω καταλλήλου σχεδιασμού τους, τα CPGs παρουσιάζουν ευσταθή οριακή κυκλική συμπεριφορά (stable limit cycle), επιτυγχάνοντας το συντονισμό μεταξύ διαφορετικών βαθμών ελευθερίας, και εξασφαλίζουν ομαλές τροχιές κίνησης ακόμα και για απότομες αλλαγές των παραμέτρων ελέγχου. Για τους λόγους αυτούς βρίσκουν συχνά εφαρμογή στον έλεγχο κίνησης ρομποτικών συστημάτων με πολύ-αρθρωτή δομή. Η δομή ενός CPG μπορεί να υλοποιηθεί ως ένα σύστημα συνδεδεμένων μη-γραμμικών ταλαντωτών (nonlinear oscillators), με μία ενδεικτική διασύνδεση μιας δομής CPG να παρουσιάζεται στο Σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 49. Παράδειγμα δομής CPG από διασυνδεδεμένους μη-γραμμικούς ταλαντωτές.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορες υλοποιήσεις και αρχιτεκτονικές για CPG [A14, A15, A16, A17]. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η υλοποίηση του CPG που αναπτύχθηκε για την παραγωγή και τον έλεγχο της κυματοειδούς κίνησης του περυγίου, βασίστηκε στις αντίστοιχες δομές CPG που προτείνονται στην εργασία [A16], τα βασικά σημεία των οποίων περιγράφονται στη συνέχεια.

Το μοντέλο CPG εφαρμόζεται ως ένα σύστημα από  $N$  συνδυασμένων εύρους - ελεγχόμενης φάσης ταλαντωτών, έναν για κάθε μονάδα. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική του  $i$ -στου ταλαντωτή (όπου  $i = 1, 2, \dots, N$ ) είναι:

$$\dot{\phi}_i = \omega_i + \sum_j w_{ij} r_j \sin(\phi_j - \phi_i - \phi_{ij}) \quad (5)$$

$$\ddot{r}_i = a_r \left( \frac{a_r}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right) \quad (6)$$

$$\ddot{x}_i = a_x \left( \frac{a_x}{4} (X_i - x_i) - \dot{x}_i \right) \quad (7)$$

$$\theta_i = x_i + r_i \cos(\phi_i) \quad (8)$$

Η σχέση (8) περιγράφει τη γωνία  $\theta_i$  που προκύπτει ως έξοδος του ταλαντωτή  $i$ , η οποία και αντιπροσωπεύει το σήμα για την επιθυμητή γωνία κίνησης της  $i$ -ακτίνας. Οι εσωτερικές μεταβλητές κατάστασης  $\phi_i$ ,  $r_i$  και  $x_i$ , που εμφανίζονται στις παραπάνω εξισώσεις αντιστοιχούνται στη φάση, στο πλάτος και στη μέση τιμή (γωνιακό offset) των ταλαντώσεων, αντίστοιχα. Η σχέση (5) καθορίζει τη χρονική εξέλιξη της φάσης των ταλαντωτών, με βασική παράμετρο ελέγχου τη  $\phi_{ij}$ , που ορίζει την διαφορά φάσης μεταξύ των ταλαντωτών  $i$  και  $j$ . Η παράμετρος  $w_{ij}$  ορίζει το σθένος της σύζευξης μεταξύ των ταλαντωτών. Οι δύο αυτές παράμετροι, ουσιαστικά καθορίζουν το βαθμό στον οποίο ο ταλαντωτής  $j$  επηρεάζει τον ταλαντωτή  $i$ . Οι μεταβλητές  $\phi_j$  και  $r_j$ , δηλώνουν στον ταλαντωτή  $i$ , τις τιμές κατάστασης του γειτονικού ταλαντωτή  $j$ .

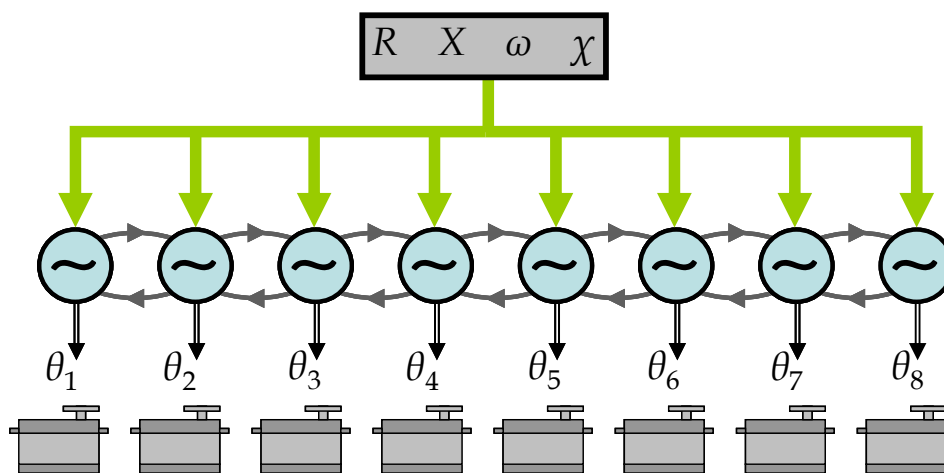
Στις παραπάνω σχέσεις ενσωματώνονται ακόμα τρεις παράμετροι που καθορίζουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της εξόδου για κάθε έναν από τους  $N$  ταλαντωτές του συστήματος. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι  $\omega_i$  και  $R_i$  αντιπροσωπεύουν τις επιθυμητές τιμές για τη συχνότητα και το πλάτος, αντίστοιχα, της ταλάντωσης, ενώ η παράμετρος  $X_i$  καθορίζει την επιθυμητή τιμή για του γωνιακού offset γύρω από το οποίο εκτελείται η ταλάντωση. Τέλος, οι παράμετροι  $a_r$  και  $a_x$ , που εμφανίζονται στις σχέσεις (6) και (7), αντίστοιχα, είναι σταθερές θετικού κέρδους (με ενδεικτικές τιμές  $a_r = a_x = 5 \text{ rad s}^{-1}$ ), οι οποίες καθορίζουν την ταχύτητα σύγκλισης των  $r_i$  και  $x_i$  στις επιθυμητές τους τιμές (τα  $R_i$  και  $X_i$ , αντίστοιχα).

Οι παραπάνω σχέσεις της δυναμικής του συστήματος των διασυνδεδεμένων ταλαντωτών έχουν οριστεί ώστε να εξασφαλίζεται ότι οι έξοδοι  $\theta_i$  οδηγούνται σε τροχιές οριακού κύκλου (limit cycle), παράγοντας ταλαντώσεις που εμφανίζουν ευσταθή συμπεριφορά. Κατά τη λειτουργία του συστήματος, για την περίπτωση που  $\omega_i = \omega$  και  $\phi_{ij} = -\phi_{ji}$  (για



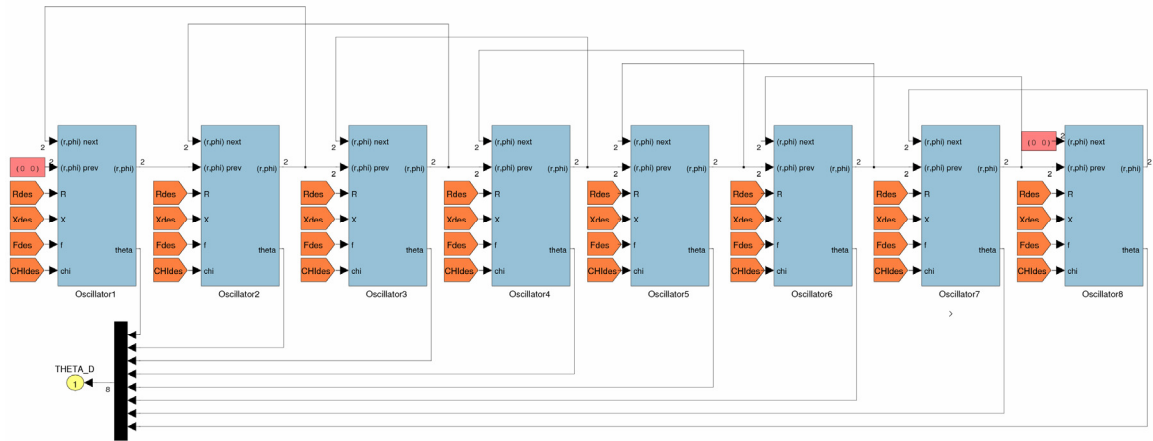
κάθε  $i = 1, 2, \dots, N$ ), οι φάσεις  $\phi_i$  συγκλίνουν σε σύστημα στο οποίο αυξάνονται γραμμικά με ρυθμό που καθορίζεται από το  $\omega$ , και με την διαφορά φάσης μεταξύ των ταλαντωτών που καθορίζεται από την τιμή του  $\phi_j$ . Οι σχέσεις (6) και (7) αποτελούν δευτεροβάθμιες γραμμικές διαφορικές εξισώσεις με κρίσιμη απόσβεση, με σημεία ισορροπίας τις τιμές των παραμέτρων  $R_i$  και  $X_i$ , αντίστοιχα. Έτσι, οι μεταβλητές  $r_i$  και  $x_i$  θα συγκλίνουν ασυμπτωτικά και μονοτονικά στις δεδομένες τιμές των  $R_i$  και  $X_i$ . Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει την ομαλή ρύθμιση του γωνιακού εύρους και του offset της εξόδου των ταλαντωτών, για οποιοδήποτε αρχικές συνθήκες.

Οι παραπάνω ιδιότητες καθιστούν την εν λόγω δομή CPG κατάλληλη για την υλοποίηση του συστήματος ελέγχου κίνησης του περυγίου, καθώς επιτρέπει την παραγωγή των περιοδικών τροχιών κίνησης των επιμέρους ακτίνων με σημαντικό βαθμό ευελιξίας για τον καθορισμό των παραμέτρων τους, εξασφαλίζοντας σε κάθε περίπτωση τις ομαλές μεταβάσεις σε περίπτωση μεταβολής των επιθυμητών χαρακτηριστικών της κίνησης αυτής. Για λόγους απλότητας, στην παρούσα εργασία έχουμε θεωρήσει την περίπτωση όπου οι επιθυμητές τροχιές κίνησης του περυγίου απαιτούν ανά παράμετρο ελέγχου οι τιμές να είναι κοινές για όλους τους  $N$  ταλαντωτές του CPG. Επομένως, για τις παραμέτρους  $\omega_i$ ,  $R_i$  και  $X_i$  λαμβάνεται  $\omega_i = \omega$ ,  $R_i = R$  και  $X_i = X$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ). Επιπρόσθετα, θεωρούμε διασύνδεση μόνο των ταλαντωτών άμεσης γειτνίασης (nearest neighbor), οπότε  $w_{ij} = 0$  για  $j > i + 1$  και  $j < i - 1$ , ενώ, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ορίζουμε  $\phi_{ij} = -\phi_{ji} = \chi$ , όπου  $\chi$  η επιθυμητή διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών ταλαντωτών. Με βάση τις επιλογές αυτές, η διασύνδεση των 8 ταλαντωτών που απαρτίζουν το σύστημα ελέγχου κίνησης του περυγίου θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα.



Σχήμα 50. Η αρχιτεκτονική της δομής του CPG για τον έλεγχο κίνησης του περυγίου.





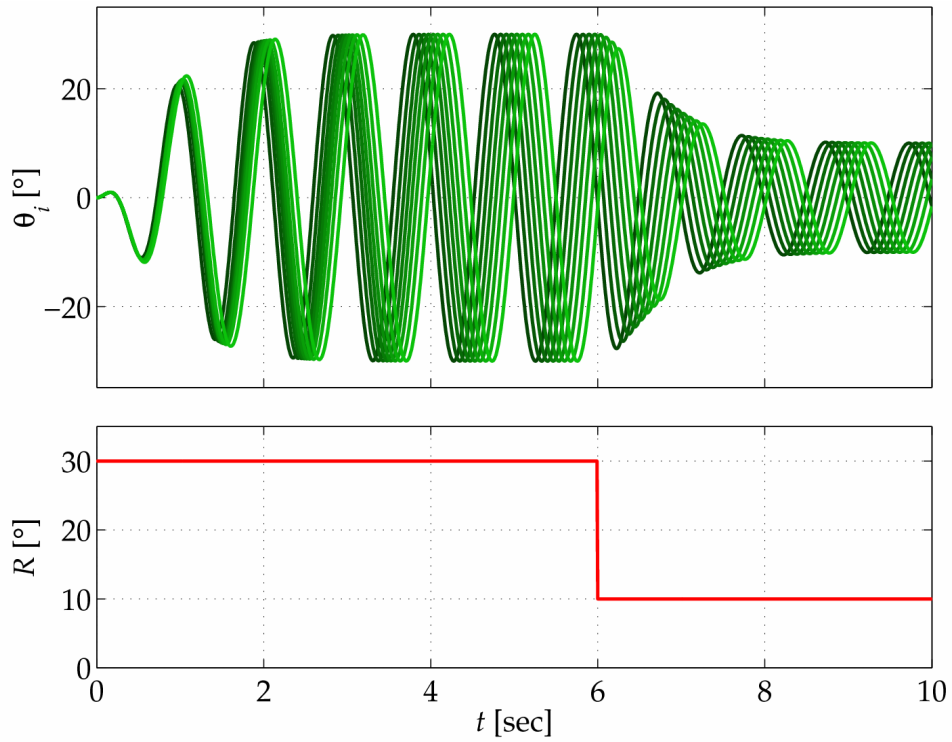
Σχήμα 52. Η διασυνδεδεμένη δομή CPG των 8 μη-γραμμικών ταλαντωτών, υλοποιημένη στο Simulink.

Οι εξόδοι του υποσυστήματος του ταλαντωτή ( $i$ ) είναι η γωνία  $\theta_i$  (η οποία αποστέλλεται σαν εντολή κίνησης του αντίστοιχου servo), και το ζεύγος  $\{r_i, \phi_i\}$  με την πληροφορία για την κατάσταση του, η οποία προωθείται στα υποσυστήματα των ταλαντωτών ( $i-1$ ) και ( $i+1$ ), προκειμένου για την υλοποίηση της αμφίδρομης μεταβίβασης διασύνδεσης, σύμφωνα με τα παραπάνω. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δομή CPG που ορίζεται από τις σχέσεις (5)-(8) δεν εξασφαλίζει εγγενώς ομαλές μεταβάσεις των σημάτων εξόδου για την περίπτωση απότομης μεταβολής της επιθυμητής τιμής της συχνότητας  $\omega$  (κάτι που ισχύει για απότομες μεταβολές των  $R$ ,  $X$  και  $\chi$ ). Ένας απλός τρόπος αντιμετώπισης του ζητήματος αυτού είναι το χαμηλοπερατό φίλτράρισμα του σήματος  $\omega(t)$  της επιθυμητής συχνότητας, προσέγγιση η οποία και επιλέχθηκε στην παρούσα υλοποίηση του CPG.

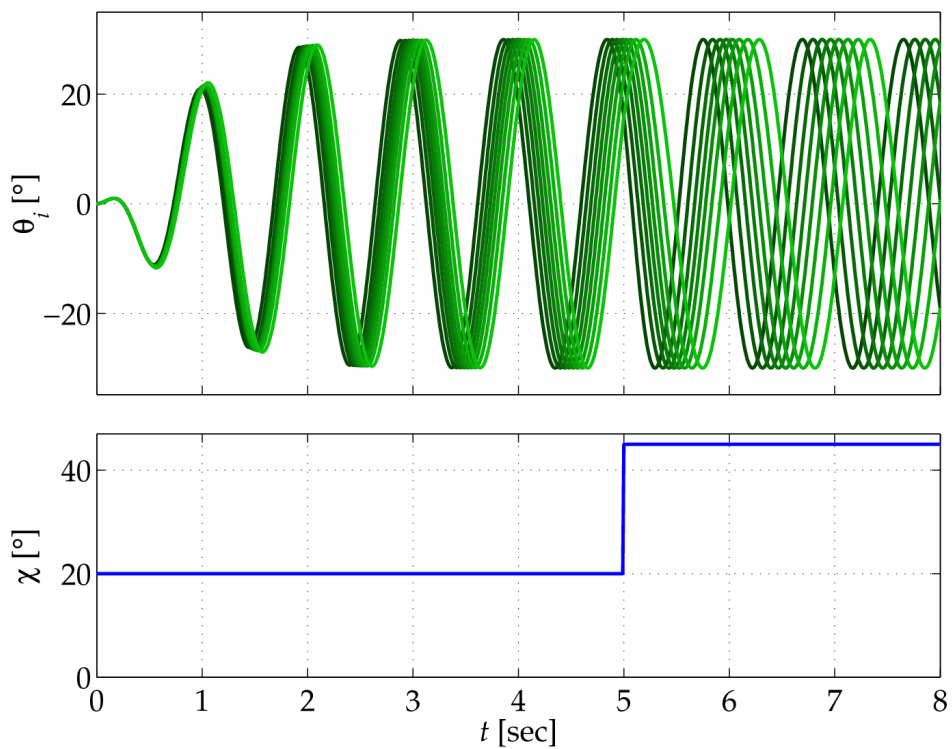
Τέλος, αν και στη παρούσα μελέτη περιοριστήκαμε στην περίπτωση για την οποία τα χαρακτηριστικά της εξόδου ( $R_i, X_i, f_i$ , και  $\chi_i$ ) ορίζονται ως κοινά για όλους τους ταλαντωτές, η υλοποίηση που έγινε στο Simulink επιτρέπει τη διαφοροποίησή τους ανά υποσύστημα ταλαντωτή, προκειμένου να μελετηθούν και πιο σύνθετες υλοποιήσεις της κυμάτωσης του περυγίου.

### 3.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

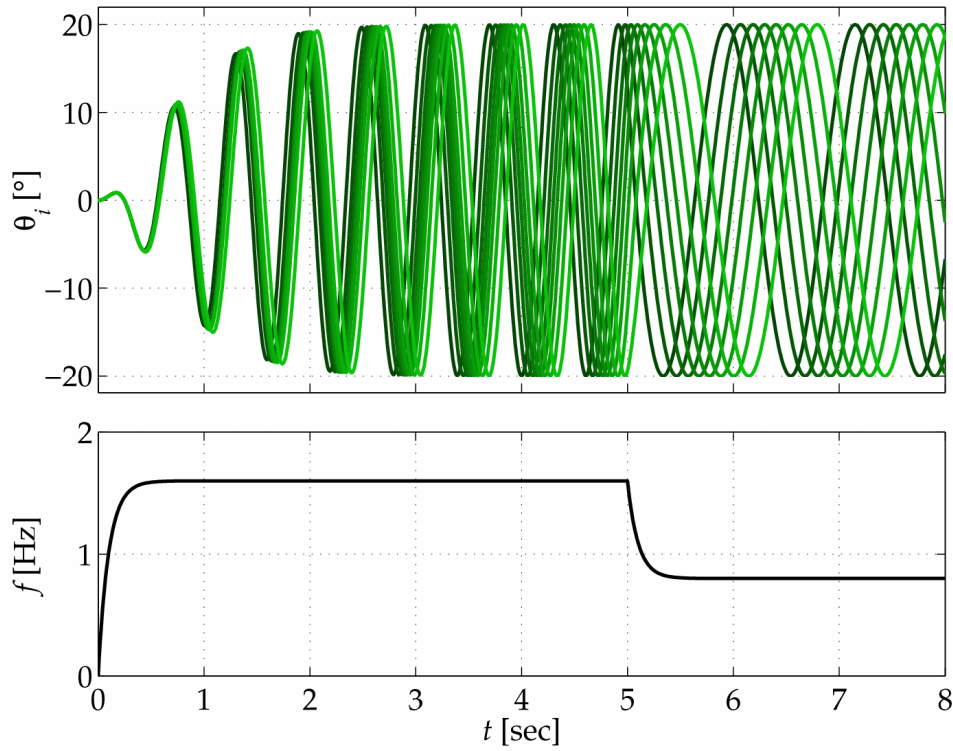
Στη συνέχεια, παραθέτουμε μια σειρά γραφημάτων με αποτελέσματα από προσομοιώσεις του παραπάνω Simulink μοντέλου, με τα οποία γίνεται καλύτερα αντιληπτή η ομαλή συμπεριφορά που παρουσιάζει η δομή του CPG, κατά τις μεταβολές των επιθυμητών χαρακτηριστικών της παραγόμενης κυμάτωσης. Όλες οι προσομοιώσεις αυτές έγιναν με  $a_r = a_x = 5$  και  $w_{ij} = 5$  (για  $j = i+1$  και  $j = i-1$ ).



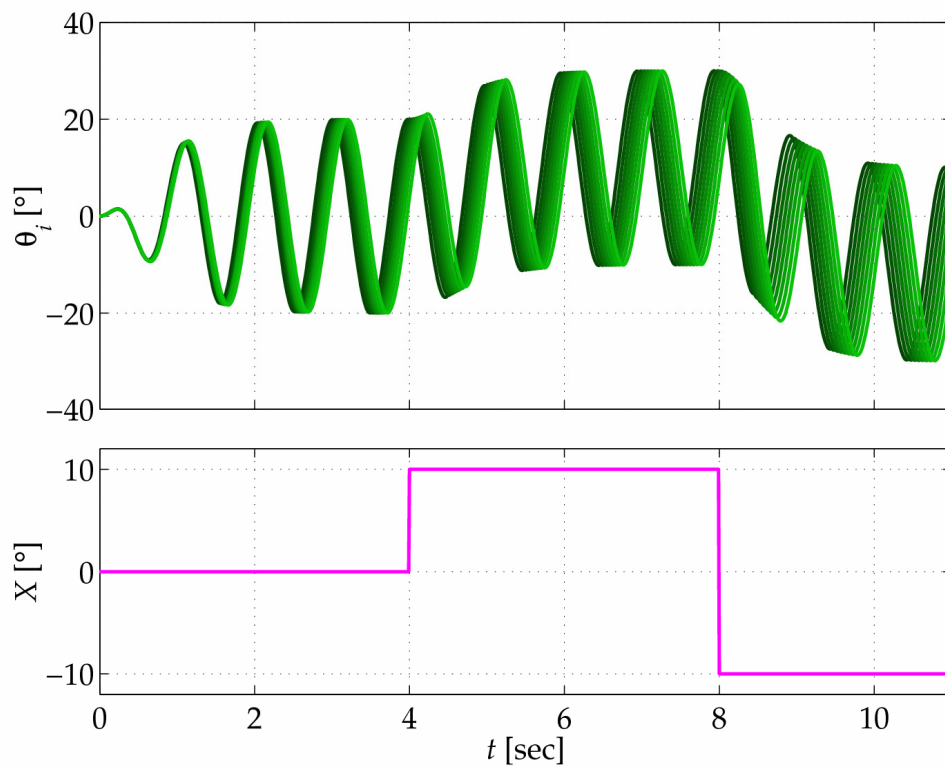
Σχήμα 53. Η χρονική εξέλιξη των 8 εξόδων της δομής CPG, για βηματικής μορφής μεταβολές της επιθυμητής τιμής  $R$  του γωνιακού εύρους των ταλαντώσεων. Λοιπές παράμετροι:  $f = 1$  Hz,  $\chi = 30^\circ$ ,  $X = 0^\circ$ .



Σχήμα 54. Η χρονική εξέλιξη των 8 εξόδων της δομής CPG, για βηματικής μορφής μεταβολές της επιθυμητής διαφοράς φάσης  $\chi$  μεταξύ γειτονικών ταλαντωτών. Λοιπές παράμετροι:  $f = 1$  Hz,  $R = 30^\circ$ ,  $X = 0^\circ$ .



Σχήμα 55. Η χρονική εξέλιξη των 8 εξόδων της δομής CPG, για μεταβολές στην τιμή της επιθυμητής συχνότητας των ταλαντώσεων. Λοιπές παράμετροι:  $R = 20^\circ$ ,  $\chi = 45^\circ$ ,  $X = 0^\circ$ .



Σχήμα 56. Η χρονική εξέλιξη των 8 εξόδων της δομής CPG, για βηματικής μορφής μεταβολές του επιθυμητού γωνιακού offset  $X$ . Λοιπές παράμετροι:  $f = 1 \text{ Hz}$ ,  $R = 30^\circ$ ,  $\chi = 20^\circ$ .

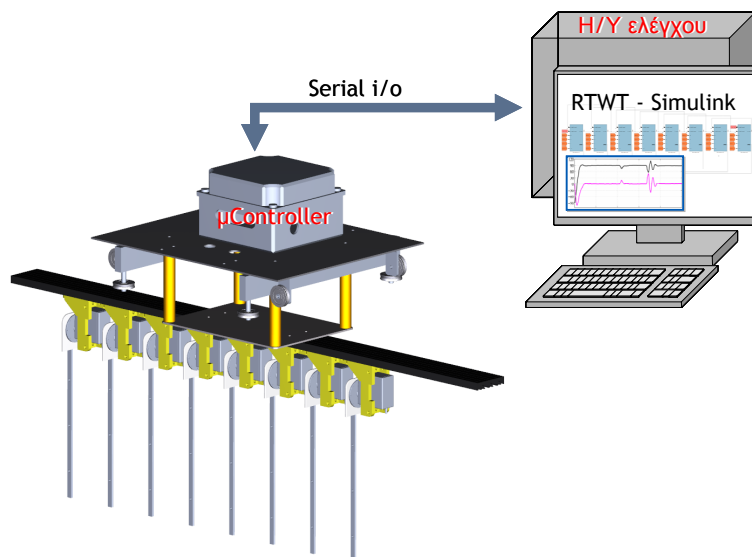


### 3.5 Αρχιτεκτονική ελέγχου της κίνησης του πτερυγίου

Στα πλαίσια υλοποίησης του παραπάνω σχήματος παραγωγής των επιθυμητών τροχιών για τις ακτίνες του μηχανισμού μέσω CPG, αναπτύχθηκαν δύο αρχιτεκτονικές για τον έλεγχο κίνησης του πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης. Στην πρώτη εξ' αυτών, η παραγωγή των επιθυμητών τροχιών κίνησης γίνεται, σε πραγματικό χρόνο, από έναν Η/Υ μέσω του Simulink, ενώ την υλοποίησή τους αναλαμβάνει η μονάδα του μικροελεγκτή. Στη δεύτερη αρχιτεκτονική, ο έλεγχος κίνησης υλοποιείται εξ' ολοκλήρου μέσω του μικροελεγκτή. Οι δύο αυτές αρχιτεκτονικές, κάθε μία από τις οποίες εμφανίζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, παρουσιάζονται λεπτομερώς στη συνέχεια. Αναλυτικότερα:

#### 3.5.1 Αρχιτεκτονική ελέγχου κίνησης μέσω Simulink

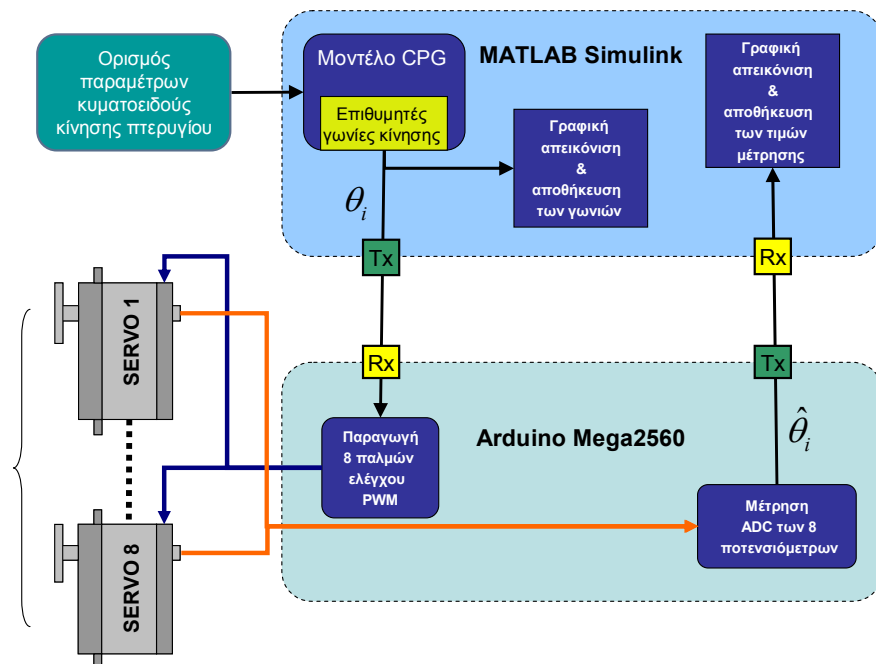
Η συνολική αρχιτεκτονική που αναπτύχθηκε για την υλοποίηση της βασισμένης στο CPG στρατηγικής ελέγχου κίνησης του πτερυγίου απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα. Απαρτίζεται από δύο ιεραρχημένα επίπεδα, το ανώτερο εκ των οποίων υλοποιείται σε έναν Η/Υ στον οποίο τρέχει, σε περιβάλλον Real Time Windows Target, ένα κεντρικό Simulink μοντέλο που δημιουργεί τις τροχιές κίνησης των ακτίνων σε πραγματικό χρόνο από τη δομή του CPG. Το κατώτερο επίπεδο αφορά στη μονάδα του μικροελεγκτή που βρίσκεται πάνω στο πτερόγιο, ο οποίος αναλαμβάνει την υλοποίηση των τροχιών αυτών ελέγχοντας απευθείας τα servo του πτερυγίου. Επιπρόσθετα, ο μικροελεγκτής συλλέγει πληροφορίες για την τρέχουσα πραγματική θέση των ακτίνων του πτερυγίου, καθώς επίσης και για τη στιγμιαία κατανάλωση ρεύματος, τις οποίες και αποστέλλει στον Η/Υ ελέγχου. Η αμφίδρομη αυτή επικοινωνία μεταξύ των δύο επιπέδων έχει υλοποιηθεί μέσω σειριακού πρωτοκόλλου σε USB.



Σχήμα 57. Η βασική αρχιτεκτονική ελέγχου κίνησης του πτερυγίου.

Αναλυτικότερα, οι λειτουργίες που υλοποιούνται από την αρχιτεκτονική ελέγχου κίνησης του πτερυγίου, όπως αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 57, έχουν ως εξής: Αρχικά,

ορίζονται οι τιμές των παραμέτρων της κυμάτωσης (το γωνιακό εύρος  $R$ , η γωνιακή απόκλιση  $X$ , η συχνότητα  $f$  και η διαφορά φάσης  $\chi$ ). Οι παράμετροι αυτοί εισάγονται στο Simulink υποσύστημα που υλοποιεί το CPG (βλ. Σχήμα 52), το οποίο υπολογίζει, για κάθε χρονική στιγμή, τις επιθυμητές γωνίες  $\theta_i$  για τις 8 ακτίνες του μηχανισμού. Στη συνέχεια, οι γωνίες αυτές αντιστοιχίζονται στο κατάλληλο σήμα ελέγχου (συγκεκριμένα, στη χρονική διάρκεια του PWM παλμού ελέγχου), για κάθε ένα από τα servo του περυγίου, στη βάση των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησής τους (βλ. Ενότητα 2.3.6). Οι τιμές αυτές (σε  $\mu\text{Sec}$ ) αποστέλλονται στον μικροελεγκτή του περυγίου, μέσω σειριακού πρωτοκόλλου. Ο μικροελεγκτής αναλαμβάνει στη συνέχεια να υλοποιήσει τον κατάλληλο εύρους παλμό PWM, έναν για κάθε μία από τις 8 γωνίες  $\theta_i$  που έλαβε για την δεδομένη χρονική στιγμή. Η παραγωγή και διαμόρφωση των 8 παλμών PWM επιτυγχάνεται, απευθείας σε hardware επίπεδο, μέσω των 16-bit χρονιστών timer1, timer3 και timer4 του ATmega2560, σε λειτουργία Phase Correct. Η περίοδος  $T_{\text{PWM}}$  των παραγόμενων σημάτων PWM έχει ορισθεί, μέσω των καταχωρητών ICR1, ICR3, ICR4, σε 2500  $\mu\text{sec}$ , ενώ η χρονική διάρκεια  $T_{\text{on}}$  των παλμών (που αντιστοιχίζεται από το servo στην επιθυμητή γωνία κίνησης) ρυθμίζεται μέσω των καταχωρητών OCR1B, OCR1A, OCR4C, OCR4B, OCR4A, OCR3A, OCR3C, και OCR3B των timer1, timer4, timer3, αντίστοιχα (βλέπε Πίνακα 1).

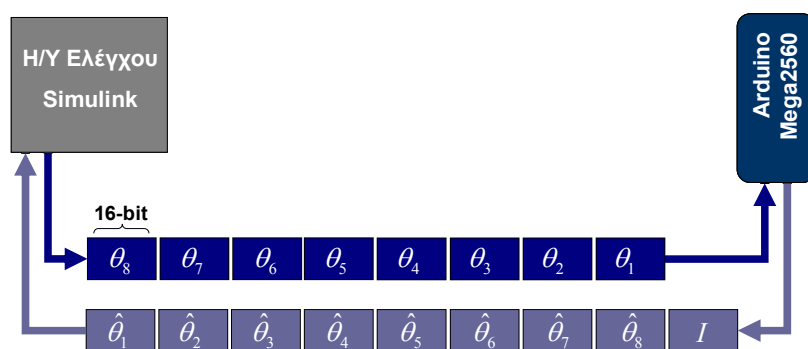


Σχήμα 58. Λειτουργικό διάγραμμα της αρχιτεκτονικής που υλοποιήθηκε για τον έλεγχο κίνησης του περυγίου.

Στην τελική φάση του κύκλου ελέγχου, ο μικροελεγκτής ψηφιοποιεί, μέσω του ADC μετατροπέα, τα σήματα από τα 8 ποτενσιόμετρα των servo, που αντιστοιχούν στη γωνιακή θέση των ακτίνων. Οι μετρήσεις αυτές αποστέλλονται σειριακά στο μοντέλο του Simulink, σαν ένα πακέτο 8 ακεραίων (έκαστος εύρους 16-bit, με τη μέτρηση του ADC να καταλαμβάνει τα λιγότερο σημαντικά 10 bit). Τα δεδομένα αυτά μετατρέπονται στη

συνέχεια από το Simulink μοντέλο στη πραγματική γωνιακή θέση για κάθε μια ακτίνα, βάσει των αποτελεσμάτων της σχετικής βαθμονόμησης (βλ. Ενότητα 2.3.6).

Επίσης, μέσω του ADC, ο μικροελεγκτής συλλέγει και τη μέτρηση του αισθητηρίου ρεύματος, η οποία αντιστοιχεί στο συνολικό ρεύμα που καταναλώνουν τα 8 servo κατά τη λειτουργία τους. Η μέτρηση αυτή αποτελεί και τον 9<sup>ο</sup> ακέραιο, εύρους 16-bit, του πακέτου δεδομένων που αποστέλλεται στο Simulink μοντέλο, όπου και γίνεται η μετατροπή της στην πραγματική τιμή του ρεύματος, βάσει της χαρακτηριστικής του αισθητηρίου (βλ. Ενότητα 2.3.4). Το σήμα της μέτρησης του ρεύματος, πριν τη γραφική απεικόνιση και αποθήκευσή του, διέρχεται από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο 1<sup>ης</sup> τάξης, για την απομάκρυνση του θορύβου.



Σχήμα 59. Διάγραμμα με τα πακέτα δεδομένων που αποστέλλονται, μέσω σειριακής επικοινωνίας, μεταξύ του μικροελεγκτή και Η/Υ.

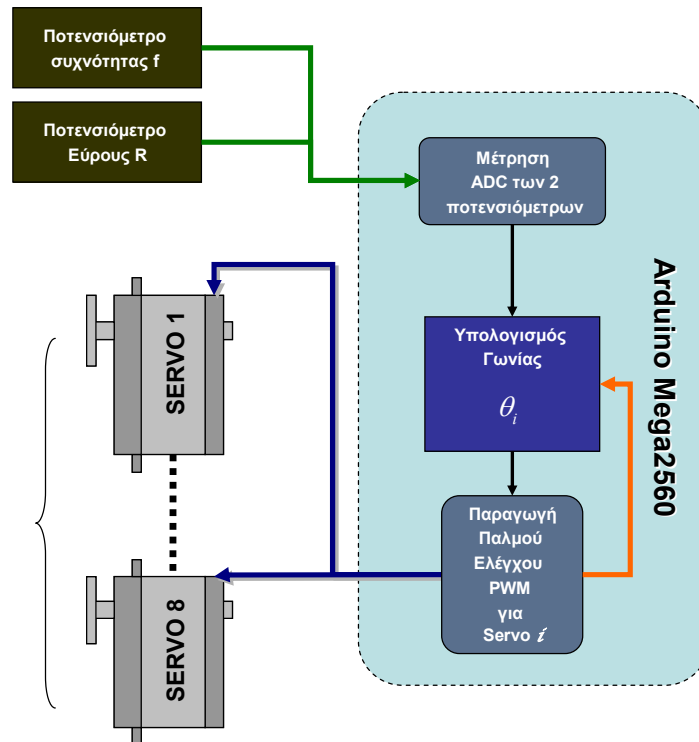
Ο παραπάνω κύκλος ελέγχου της κίνησης του περυγίου υλοποιείται με συχνότητα 100 Hz, η σταθερότητα της οποίας εξασφαλίζεται από την επέκταση Real Time Windows Target, κάτω από την οποία τρέχει το Simulink μοντέλο. Σε αυτό έχουν επίσης ενσωματωθεί κατάλληλα μπλοκ (To Workspace), μέσω των οποίων αποθηκεύονται τα δεδομένα για τις επιθυμητές (όπως παράγονται από το CPG) και τις πραγματικές (όπως μετρούνται από τον ADC μετατροπέα) γωνίες των servo κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, καθώς επίσης και τα δεδομένα από το αισθητήριο ρεύματος.

### 3.5.2 Αρχιτεκτονική ελέγχου κίνησης αυτόνομης διάταξης

Εκτός από την υλοποίηση της στρατηγικής ελέγχου κίνησης του περυγίου μέσω του μοντέλου Simulink, αναπτύχθηκε και κώδικας του μικροελεγκτή που επιτρέπει την αυτόνομη λειτουργία του περυγίου κυματοειδούς κίνησης, χωρίς να απαιτείται ο εξωτερικός Η/Υ. Η υλοποίηση του εν λόγω κώδικα σχεδιάστηκε με βάση τη στρατηγική ελέγχου κίνησης του μοντέλου CPG. Όπως προαναφέρθηκε, η μονάδα του μικροελεγκτή είναι τοποθετημένη πάνω στην διάταξη του περυγίου και ουσιαστικά, σε αυτή την υλοποίηση, ο μικροελεγκτής παράγει και επιτυγχάνει (με απευθείας έλεγχο των servo της διάταξης) τις τροχιές κίνησης των ακτίνων σε πραγματικό χρόνο από τη δομή των ταλαντωτών CPG.

Αναλυτικότερα, η λειτουργία υλοποιείται όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα. Αρχικά, ο μικροελεγκτής προσδιορίζει τις τιμές των παραμέτρων ελέγχου της κίνησης,

εύρος  $R$  και συχνότητας  $f$ , οι οποίες λαμβάνονται μέσω του μετατροπέα ADC, από τις μεσαίες λήψεις δύο γραμμικών ποτενσιόμετρων (ένα για κάθε παράμετρο).



Σχήμα 60. Η αρχιτεκτονική που υλοποιήθηκε για τον αυτόνομο έλεγχο κίνησης πτερυγίου από τον μικροελεγκτή.

Οι υπόλοιπες παράμετροι ελέγχου (γωνιακή απόκλιση  $X$  και διαφορά φάσης  $\chi$ ), έχουν οριστεί ως σταθερές τιμές στον κώδικα. Στην συνέχεια, ο μικροελεγκτής υπολογίζει την επιθυμητή γωνία  $\theta_i$  ( $i = 1, \dots, 8$ ), βάση της επίλυσης των σχέσεων που περιγράφουν τον ταλαντωτή CPG (βλ. Ενότητα 3.2). Μετά το πέρας του υπολογισμού της γωνίας  $\theta_i$ , ο μικροελεγκτής τη μετατρέπει σε τιμή χρονικής διάρκειας και βάση αυτής υλοποιεί, απευθείας, τον κατάλληλο εύρους παλμό PWM, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ο έλεγχος του αντιστοιχού servo. Η διαδικασία υπολογισμού γωνίας και παραγωγής του παλμού ελέγχου, επαναλαμβάνεται και για τα 8 servo της διάταξης. Η παραγωγή των παλμών PWM επιτυγχάνεται, σε hardware επίπεδο, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Ο παραπάνω κύκλος συλλογής δεδομένων και ελέγχου πραγματοποιείται με συχνότητα 100 Hz, η υλοποίηση της οποίας επιτυγχάνεται μέσω του χρονιστή Timer-2 του μικροελεγκτή.

# **Πειραματική Μελέτη του Πτερυγίου Κυματοειδούς Κίνησης**

## **4.1 Εισαγωγή**

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφονται η οργάνωση και τα αποτελέσματα των πειραματικών μελετών που πραγματοποιήθηκαν για την αποτίμηση της απόδοσης του μηχανισμού του πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας σειράς πειραματικών μετρήσεων του μηχανισμού έξω από το νερό, βασικός στόχος των οποίων ήταν η μελέτη της επίδρασης της μεμβράνης αναφορικά με την πιστότητα υλοποίησης της προδιαγραφείσας κυματοειδούς κίνησης και την κατανάλωση ισχύος.

Στη συνέχεια, παρατίθενται τα κυρίως πειραματικά αποτελέσματα, που αφορούν σε παραμετρικές μελέτες για την διακρίβωση της ικανότητας παραγωγής αυτοπρόωσης από το μηχανισμό, συναρτήσει των κινηματικών παραμέτρων της εκτελούμενης κυμάτωσης.

## **4.2 Μετρήσεις με το πτερύγιο στον αέρα**

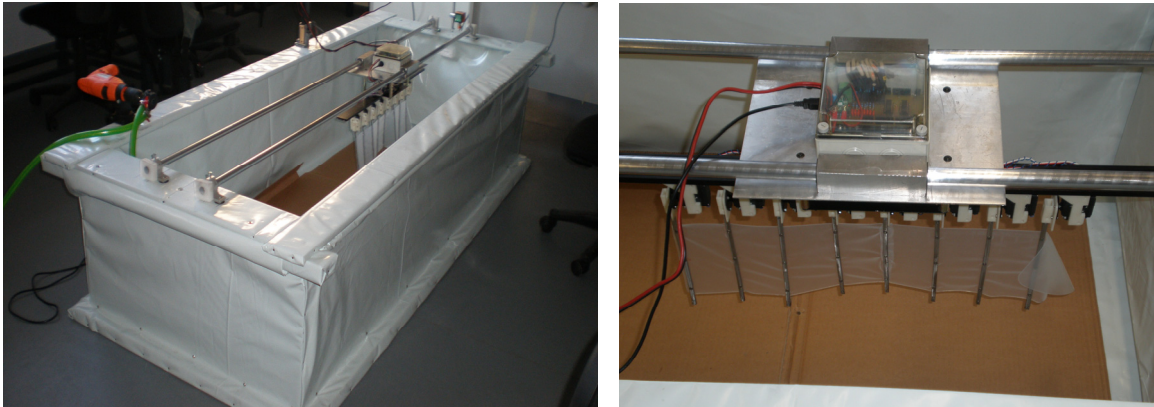
Η πρώτη σειρά μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το μηχανισμό τοποθετημένο στον οδηγό ευθύγραμμης κίνησης της άδειας από νερό δεξαμενής δοκιμών. Όπως και αναμένονταν, στην περίπτωση αυτή, οι εκτελούμενες στον αέρα κυματώσεις δεν ήταν ικανές για την επίτευξη αυτοπρόωσης του μηχανισμού. Μολαταύτα, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων αυτών παρείχαν χρήσιμες πληροφορίες για την επίδραση της μεμβράνης στα χαρακτηριστικά υλοποίησης της εκτελούμενης κυματοειδούς κίνησης.

### **4.2.1 Πειραματικές διαδικασίες**

Οι πειραματικές μετρήσεις για την παραγωγή κυματώσεων έξω από το νερό πραγματοποιήθηκαν με το πτερύγιο προσαρμοσμένο στην άδεια δεξαμενή δοκιμών, όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα. Τα δεδομένα που καταγράφονταν κατά τη διάρκεια των δοκιμών για τη παραμετρική μελέτη, περιλάμβαναν τις μετρήσεις της πραγματικής γωνιακής τροχιάς των ακτίνων του μηχανισμού (τα σήματα που



λαμβάνονταν από τα 8 ποτενσιόμετρα θέσης των servo), καθώς επίσης και η μέτρηση του αισθητηρίου ρεύματος.



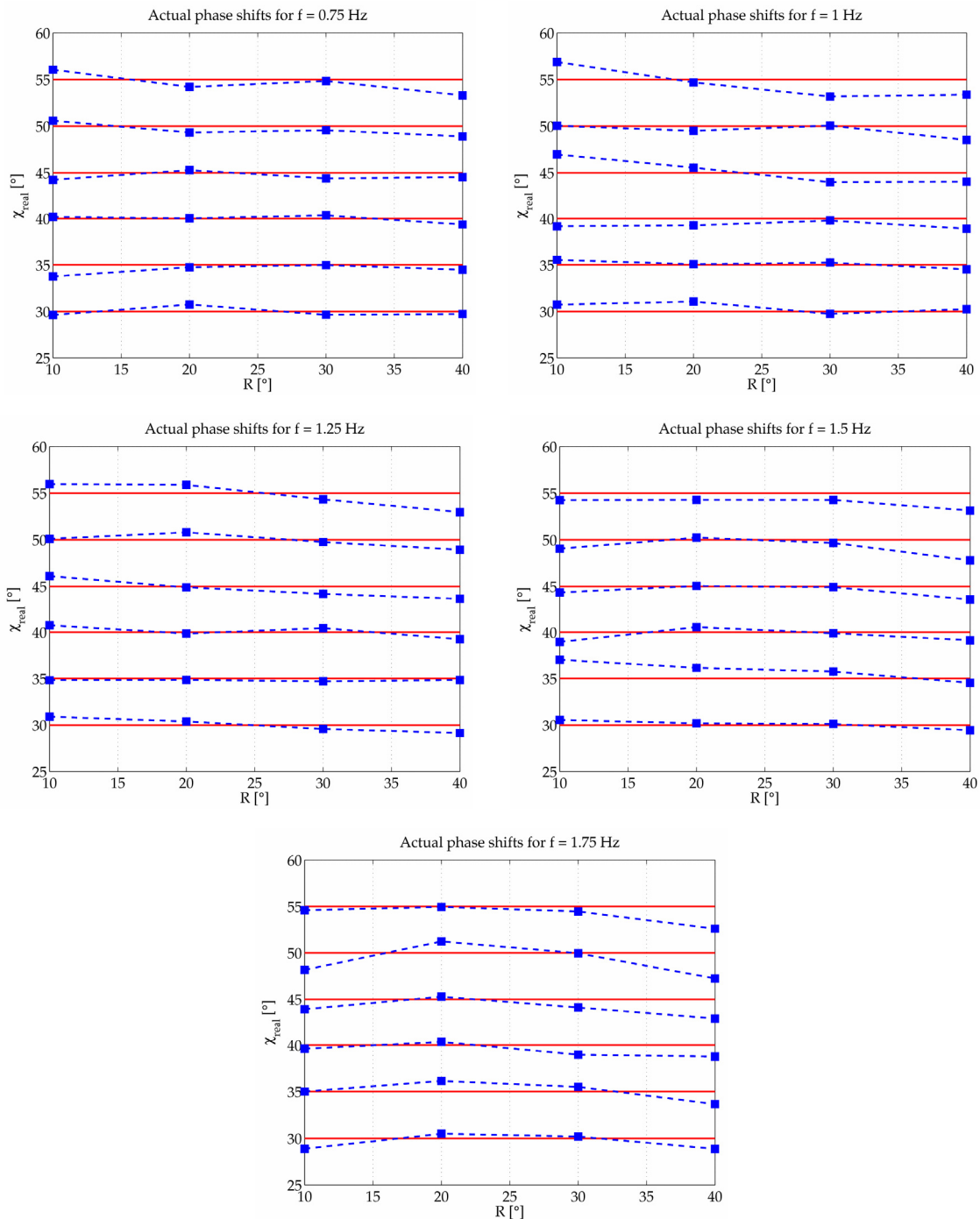
Σχήμα 61. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις με το περύγιο εκτός του νερού.

Για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας των μετρήσεων, αναπτύχθηκε κατάλληλος κώδικας στο Matlab, ο οποίος διαχειριζόταν το μοντέλο Simulink ελέγχου λειτουργίας του περυσίου (βλ. Ενότητα 3.5.1), μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων της παραγόμενης κυμάτωσης. Μέσω του σχετικού Matlab script, αρχικά καθορίζονταν οι εναρκτήριοι τιμές των παραμέτρων της κυμάτωσης για το Simulink μοντέλο. Στη συνέχεια, ο κώδικας επόπτευε το χρόνο λειτουργίας του μοντέλου, ώστε το περύγιο να λειτουργεί κάθε φορά για χρονική διάρκεια ίση με 8 περιόδους της κυμάτωσης. Με την παρέλευση του χρόνου αυτού, ο κώδικας διέκοπτε τη λειτουργία του μοντέλου και αποθήκευε τα δεδομένα από το συγκεκριμένο πείραμα, με σκοπό τη μετέπειτα επεξεργασία τους. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβανόταν με μεταβολή μιας τιμής τη φορά, έως ότου ολοκληρωθούν οι μετρήσεις, για όλες τις τιμές παραμέτρων ελέγχου που ορίστηκαν.

#### 4.2.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Στη διάρκεια των δοκιμών με το περύγιο στον αέρα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 144 μετρήσεις, με διαφορετικό, κάθε φορά, σύνολο παραμέτρων για την επιθυμητή κυμάτωση, συγκεκριμένα για  $10^\circ \leq R \leq 40^\circ$ ,  $30^\circ \leq \chi \leq 55^\circ$ , και  $0.5 \leq f \leq 1.75$  Hz. Στη συνέχεια, για κάθε πείραμα, υπήρξε επεξεργασία των δεδομένων για την πραγματική κίνηση των 8 ακτίνων του μηχανισμού, με βάση τις μετρήσεις από τα ποτενσιόμετρα των servo. Ειδικότερα, υπολογίστηκε η μέση τιμή  $R_{real}$  για το πραγματικό πλάτος των εκτελούμενων ταλαντώσεων των servo, καθώς επίσης και η μέση τιμή για την πραγματική διαφορά φάσης  $\chi_{real}$  μεταξύ των εκτελούμενων ταλαντώσεων των servo.

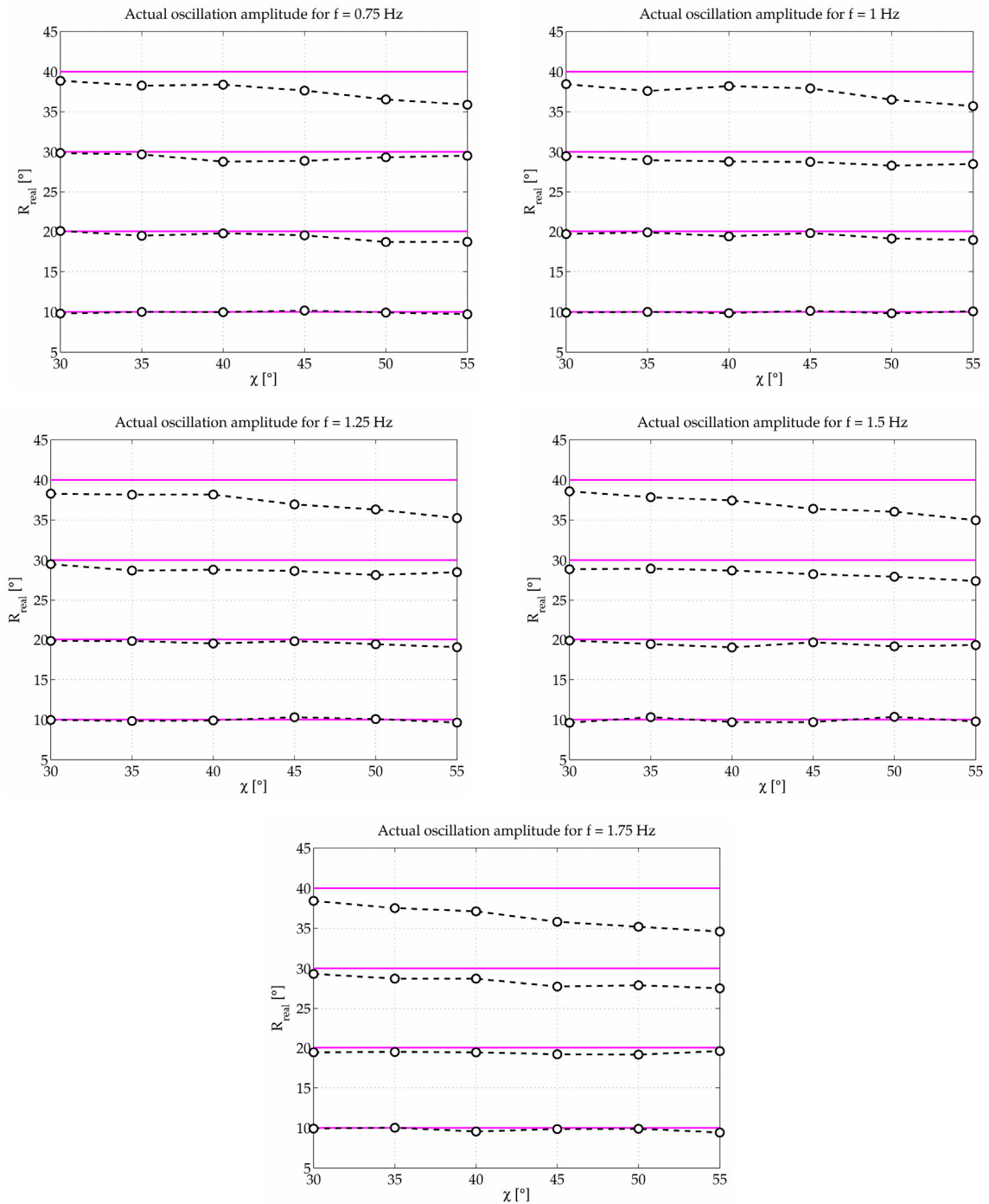
Τα αποτελέσματα, αναφορικά με τα  $\chi_{real}$  και  $R_{real}$  σε σχέση με τις επιθυμητές, κάθε φορά, τιμές τους, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στα Σχήματα 62 και 63, αντίστοιχα.



Σχήμα 62. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την ακρίβεια υλοποίησης της επιθυμητής κυμάτωσης από τον μηχανισμό, αναφορικά με τη διαφορά φάσης της εκτελούμενης ημιτονοειδούς κίνησης μεταξύ γειτονικών ακτίνων. Οι συνεχόμενες και οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στην επιθυμητή και την πραγματική τιμή της διαφοράς φάσης.

Τα παρατιθέμενα γραφήματα καταδεικνύουν ότι η ακρίβεια υλοποίησης της επιθυμητής κυμάτωσης μειώνεται καθώς αυξάνονται οι τρεις μελετώμενοι παράμετροι. Έτσι, η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται για την περίπτωση που η επιθυμητή συχνότητα  $f$ , η επιθυμητή διαφορά φάσης  $\chi$ , και το επιθυμητό πλάτος  $R$  λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, στις περιπτώσεις αυτές αυξάνεται σημαντικά η

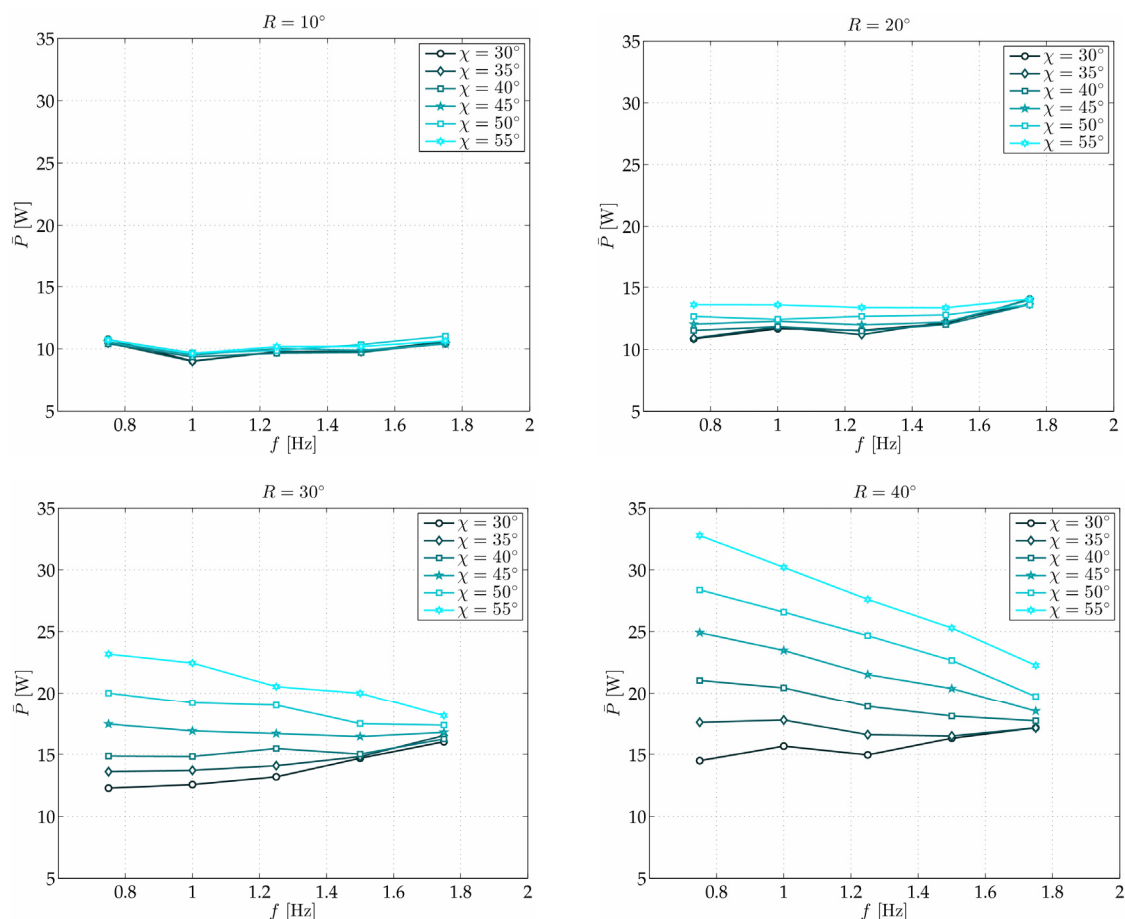
επιμήκης παραμόρφωση της μεμβράνης, και επομένως η φόρτιση των σερβομηχανισμών οδήγησης των ακτίνων.



Σχήμα 63. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την ακρίβεια υλοποίησης της επιθυμητής κυμάτωσης από τον μηχανισμό, αναφορικά με το πλάτος της εκτελούμενης ημιτονοειδούς κίνησης των ακτίνων. Οι συνεχόμενες γραμμές αντιστοιχούν στο επιθυμητό πλάτος, ενώ οι διακεκομμένες στο πραγματικό πλάτος.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, το εύρος για το οποίο ο μηχανισμός μπορεί, κατ' εκτίμηση, να υλοποιήσει με ικανοποιητική ακρίβεια τις επιθυμητές κυμάτωσης, για κίνηση στον αέρα, αντιστοιχεί σε  $R < 40^\circ$ ,  $\chi \leq 45^\circ$ , και  $f \leq 1.5$  Hz.

Επιπρόσθετα, στα πλαίσια της ανάλυσης των δεδομένων που συλλέχθηκαν στις παραμετρικές δοκιμές στον αέρα, υπολογίστηκε, για κάθε συνδυασμό παραμέτρων, η μέση ηλεκτρική ισχύς  $\bar{P}_{in} = \bar{I}V_{in}$  κατανάλωσης, όπου  $V_{in} = 7.4$  Volt η τάση τροφοδοσίας των servo και  $\bar{I}$  η μέση τιμή του ρεύματος, όπως αυτή προέκυψε από την επεξεργασία της εξόδου του αισθητήριου του ρεύματος. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 64 και υποδεικνύουν ότι, για  $R \leq 20^\circ$ , η καταναλισκόμενη ισχύς παρουσιάζει σχετικά μικρή εξάρτηση από τη συχνότητα  $f$  και τη διαφορά φάσης  $\chi$ , όπου γενικά η  $\bar{P}_{in}$  αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι δύο αυτές παράμετροι. Για  $R \geq 30^\circ$ , υπάρχει μια σημαντική ποιοτική διαφοροποίηση των καμπύλων της καταναλισκόμενης ισχύος, με κυρίαρχο χαρακτηριστικό την αύξηση της  $\bar{P}_{in}$  καθώς αυξάνεται η διαφορά φάσης  $\chi$ . Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το γεγονός, ότι, για μεγάλες τιμές του  $\chi$ , η  $\bar{P}_{in}$  είναι μεγαλύτερη στις χαμηλές συχνότητες, κάτι που, ενδεχομένως, ερμηνεύεται από το γεγονός ότι στην περίπτωση αυτή η μεμβράνη παραμένει σε επιμήκυνση για περισσότερο χρόνο.



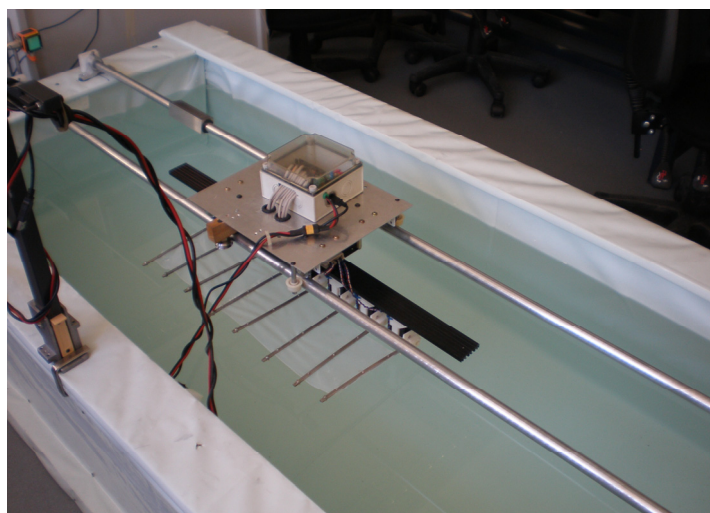
Σχήμα 64. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα με τη μέση τιμή της καταναλισκόμενης ισχύος, συναρτήσει των διαφόρων παραμέτρων της κυματοειδούς κίνησης, όταν το περὺγιο βρίσκεται στον αέρα.

### 4.3 Μετρήσεις με το πτερύγιο στο νερό

Τα πειράματα με το πτερύγιο στη γεμάτη με νερό δεξαμενή δοκιμών παρείχαν τα βασικά δεδομένα για την αποτίμηση της αποτελεσματικότητας του πτερυγίου για την παραγωγή προωθητικών δυνάμεων σε υδάτινο περιβάλλον, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

#### 4.3.1 Πειραματικές διαδικασίες

Για τις μετρήσεις αυτές, η δεξαμενή δοκιμών γεμίστηκε με νερό ώστε να καλυφθεί πλήρως η μεμβράνη, αφήνοντας τα servo και την υπόλοιπη διάταξη πάνω από την επιφάνεια του νερού, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα.



Σχήμα 65. Η πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για την παραμετρική μελέτη της αυτοπρόωσης του πτερυγίου μέσα στο νερό.

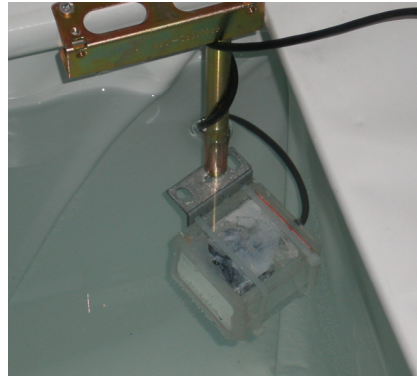
Ο οπτικός αισθητήρας απόστασης (βλ. Ενότητα 2.3.7), προσαρμοσμένος στη μία άκρη της δεξαμενής (Σχήμα 66(α)), χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για την καταγραφή της μετατόπισης του μηχανισμού, κατά την αυτοπρόωσή του επί των οδηγών κίνησης, μέσω των κυματώσεων του πτερυγίου. Από την πληροφορία αυτή ήταν εφικτός ο ακριβής υπολογισμός της ταχύτητας που επιτυγχάνονταν από τον μηχανισμό για τις συγκεκριμένες, κάθε φορά, τιμές των παραμέτρων της κυμάτωσης. Η διασύνδεση του αισθητηρίου με τον Η/Υ ελέγχου κίνησης του πτερυγίου επιτεύχθηκε αξιοποιώντας μια εκ των εισόδων αναλογικού σήματος της κάρτας πρόσληψης δεδομένων (data acquisition card), τύπου National Instruments PCI-1200, που είχε εγκατασταθεί, μέσω του εσωτερικού διαύλου PCI, στον Η/Υ. Επιπρόσθετα, προκειμένου να είναι εφικτή η υποβρύχια βιντεοσκόπηση του μηχανισμού, εντός της δεξαμενής είχε προσαρμοστεί μια κάμερα τύπου webcam, η οποία είχε τοποθετηθεί μέσα σε μια κατάλληλα στεγανοποιημένη θήκη από πλεξιγκλάς (Σχήμα 66(β)).

Τα δεδομένα που καταγράφονταν κατά τη διάρκεια της παραμετρικής μελέτης της κίνησης του συστήματος στο νερό περιλάμβαναν τις μετρήσεις της πραγματικής γωνιακής τροχιάς των ακτίνων του μηχανισμού (από τα 8 ποτενσιόμετρα θέσης των servo), τη μέτρηση του αισθητηρίου ρεύματος, και τη μέτρηση από τον αισθητήρα απόστασης.





(α)

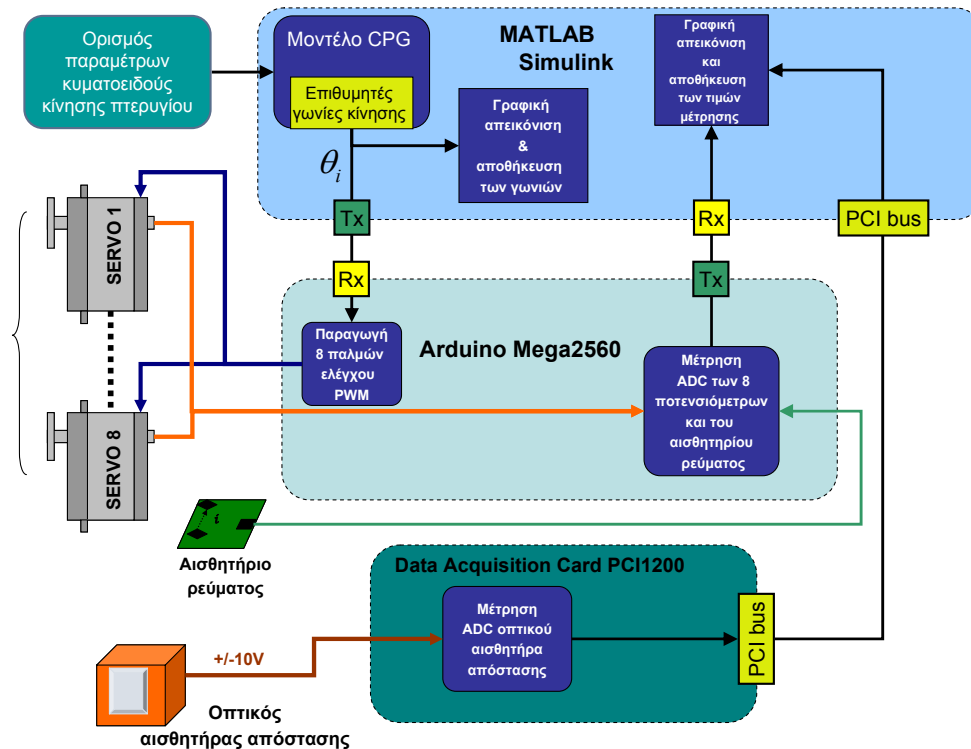


(β)

Σχήμα 66. (α) Η προσαρμογή του οπτικού αισθητήρα απόστασης στην δεξαμενή, για τη μέτρηση της μετατόπισης του μηχανισμού του περυγίου. (β) Η διάταξη με την στεγανοποιημένη webcam, που χρησιμοποιήθηκε για την υποβρύχια βιντεοσκόπηση της κίνησης του μηχανισμού.

Η παραμετρική μελέτη της επίδρασης των διαφόρων χαρακτηριστικών της κυμάτωσης πραγματοποιήθηκε υπό την εποπτεία ενός script του Matlab, αντίστοιχου με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του μηχανισμού έξω από το νερό. Η κύρια διαφοροποίηση έγκειτο στο ότι η συνθήκη ολοκλήρωσης της κάθε μέτρησης ήταν η ολοκλήρωση από το μηχανισμό διαδρομής συνολικού μήκους 1.6 m, κατά μήκος του οδηγού ευθύγραμμης κίνησης.

Το διάγραμμα του συνολικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές του περυγίου μέσα σε νερό, παρουσιάζεται στο Σχήμα που ακολουθεί.

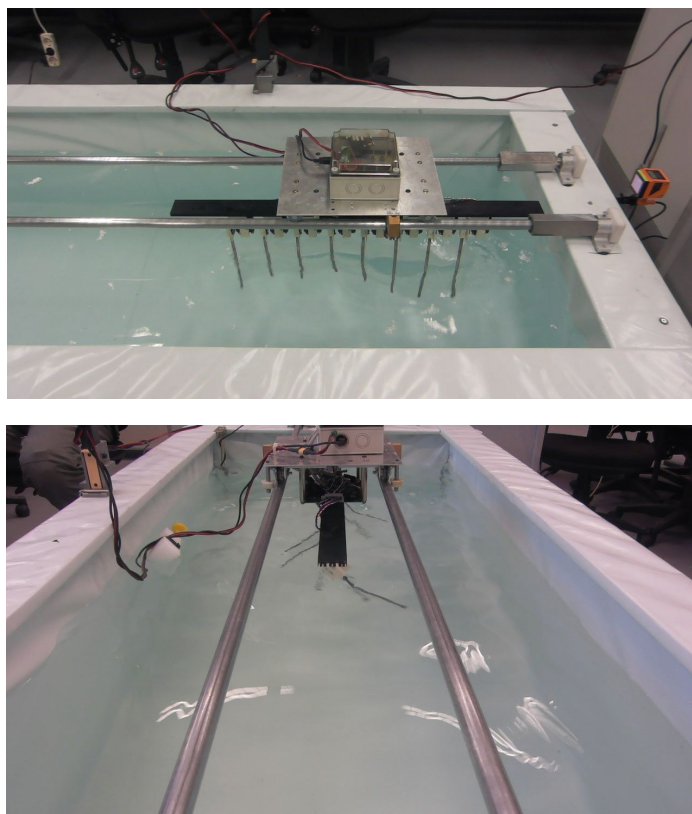


Σχήμα 67. Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές δοκιμές του περυγίου σε υδάτινο περιβάλλον.



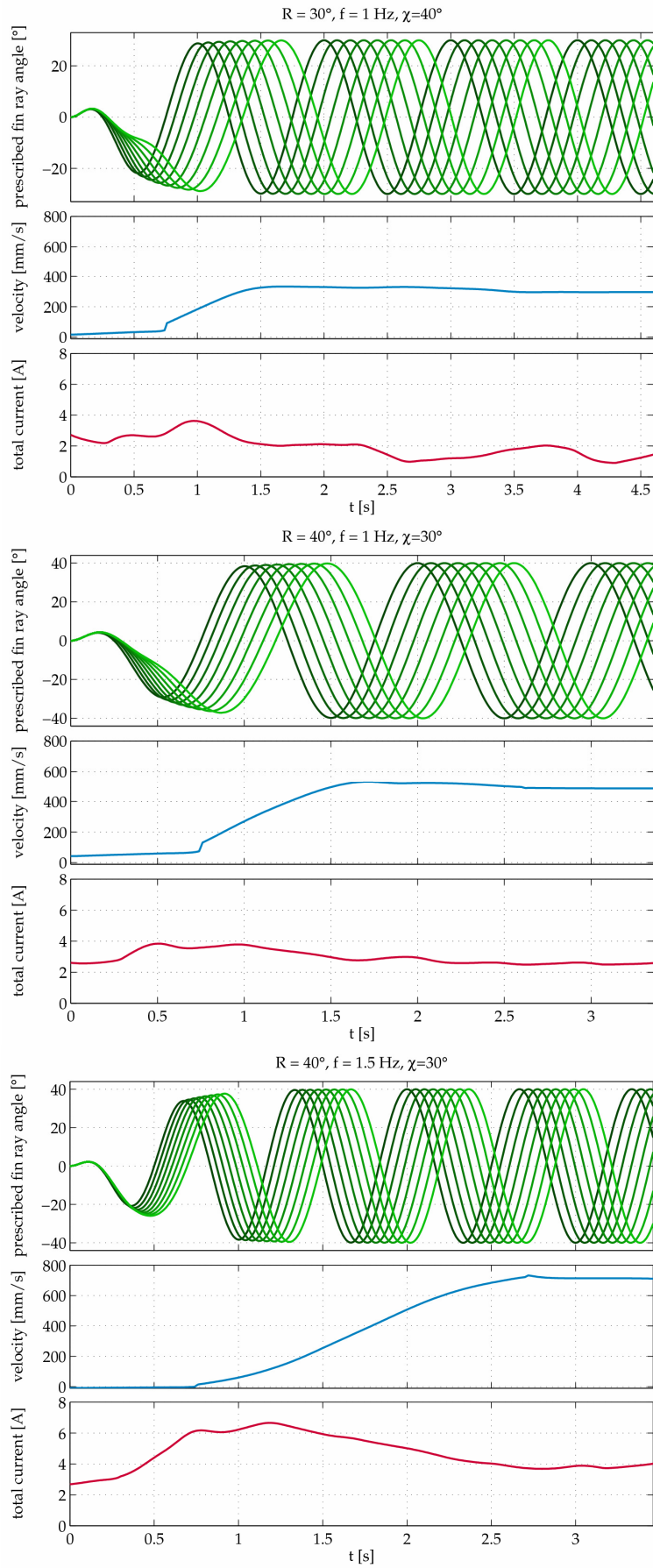
### 4.3.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Η σειρά των πειραμάτων με το πτερύγιο στο νερό περιλάμβανε μετρήσεις για 96 συνολικά διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων της κυματοειδούς κίνησης του πτερυγίου, συγκεκριμένα για  $10^\circ \leq R \leq 40^\circ$ ,  $30^\circ \leq \chi \leq 55^\circ$ , και  $0.5 \leq f \leq 1.5$  Hz.



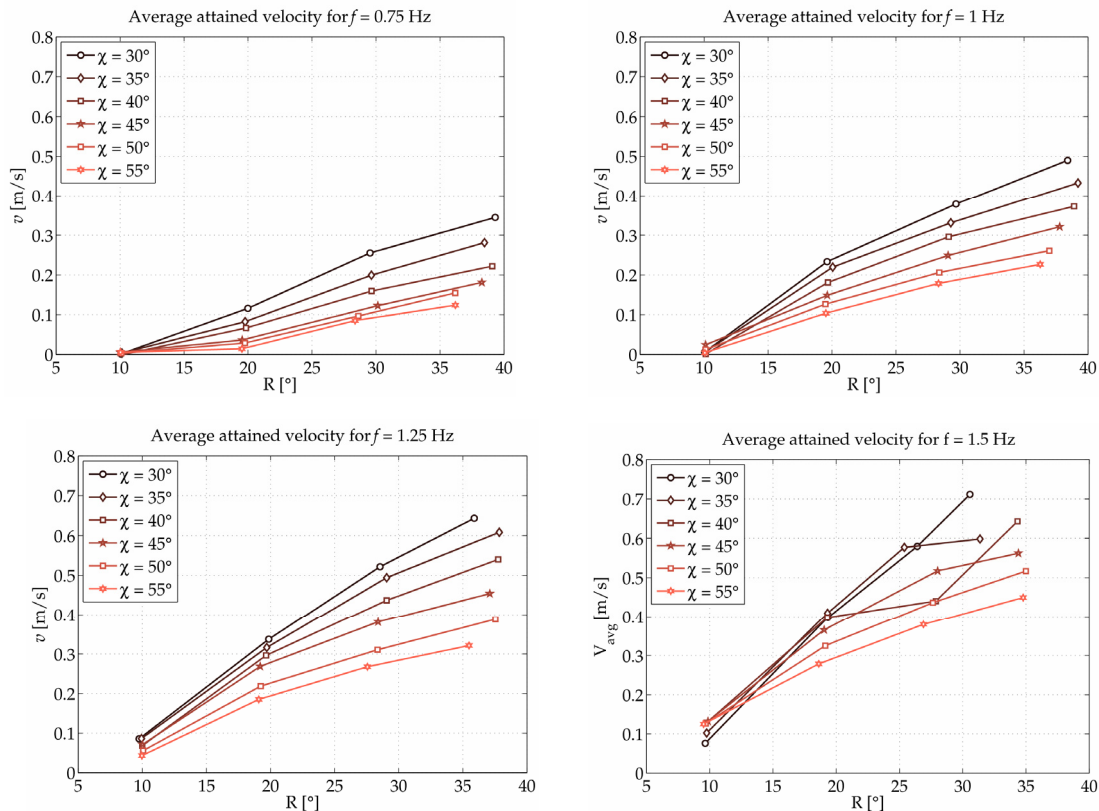
Σχήμα 68. Το πτερύγιο κατά την διάρκεια των πειραμάτων στη γεμάτη με νερό δεξαμενή δοκιμών.

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από τα δεδομένα που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αυτών, για διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων της υλοποιούμενης κυματοειδούς κίνησης. Σε καθένα από τα σύνθετα αυτά σχήματα, το πάνω γράφημα παρουσιάζει την εντολή κίνησης για τα 8 servo, ενώ στο δεύτερο γράφημα απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη της ταχύτητας ευθύγραμμης κίνησης του μηχανισμού  $v(t)$ , όπως αυτή προέκυψε μέσω αριθμητικής παραγωγής του σήματος από το αισθητήριο απόστασης της πειραματικής διάταξης. Τέλος, στο τρίτο γράφημα φαίνεται η χρονική εξέλιξη του συνολικού καταναλισκόμενου ρεύματος  $I(t)$  κατά τη διάρκεια του πειράματος, όπως αυτό προέκυψε από το σήμα του αισθητηρίου ρεύματος, κατόπιν επεξεργασίας του με χαμηλοπερατό φίλτρο εξομάλυνσης. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα γραφήματα αυτά αφορούν σε πειραματικές δοκιμές κατά τις οποίες ο μηχανισμός διανύει, με αυτοπρόωση μέσω των κυματοειδών κινήσεων του πτερυγίου, το συνολικό «ωφέλιμο» μήκος της δεξαμενής, το οποίο ανέρχεται σε 1.2 μέτρα, περίπου.



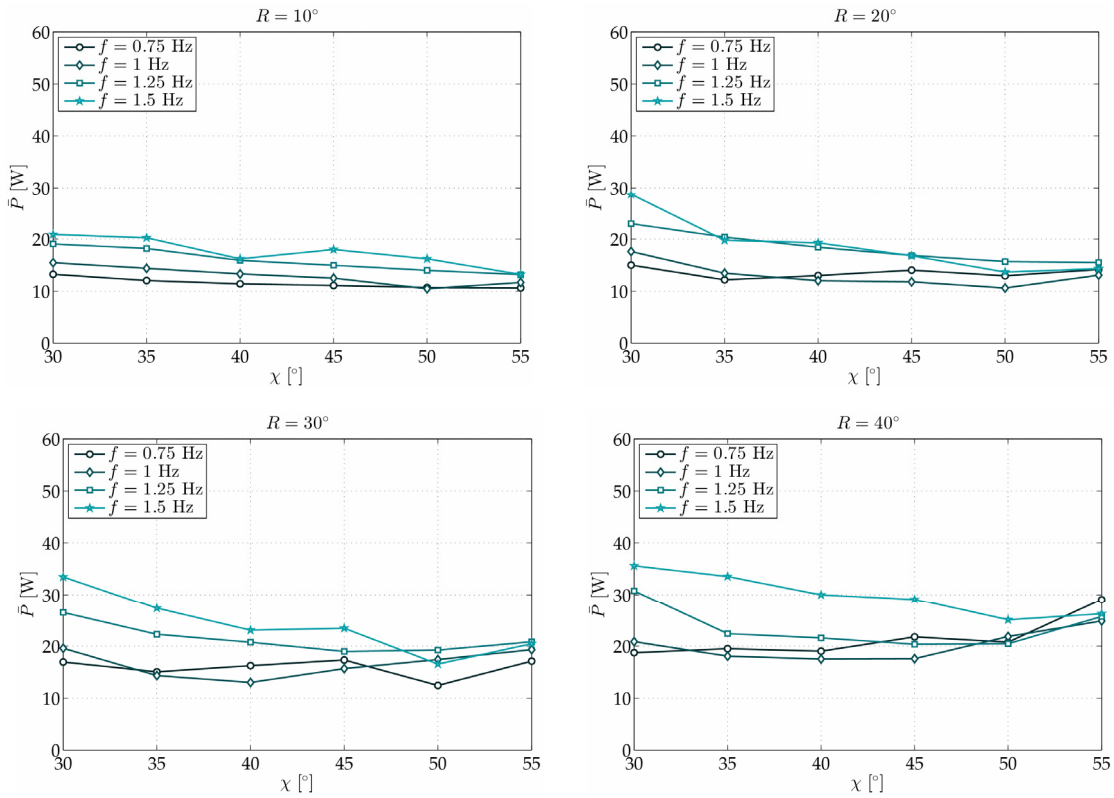
Σχήμα 69. Ενδεικτικά αποτελέσματα από τα πειράματα με το μηχανισμό στη δεξαμενή δοκιμών.

Στο Σχήμα 70 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας κίνησης του μηχανισμού στο νερό. Όπως φαίνεται, η μέγιστη ταχύτητα που επιτεύχθηκε από το μηχανισμό ανέρχεται σε περίπου 0.7 m/sec, γεγονός που καταδεικνύει ότι το περύγιο κυματοειδούς κίνησης αποτελεί μια, εν δυνάμει, λίαν αποτελεσματική μέθοδο για πρόωση στο υδάτινο περιβάλλον. Από τα γραφήματα αυτά προκύπτει επίσης ότι η ταχύτητα γενικά αυξάνεται με τη συχνότητα και το πλάτος των εκτελούμενων κυματώσεων, με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται για την περίπτωση που η διαφορά φάσης είναι κοντά στις 30° (ισοδύναμα, για όταν το μήκος κύματος της κυματοειδούς κίνησης είναι ίσο με τα 2/3, περίπου, του μήκους του περυγίου).

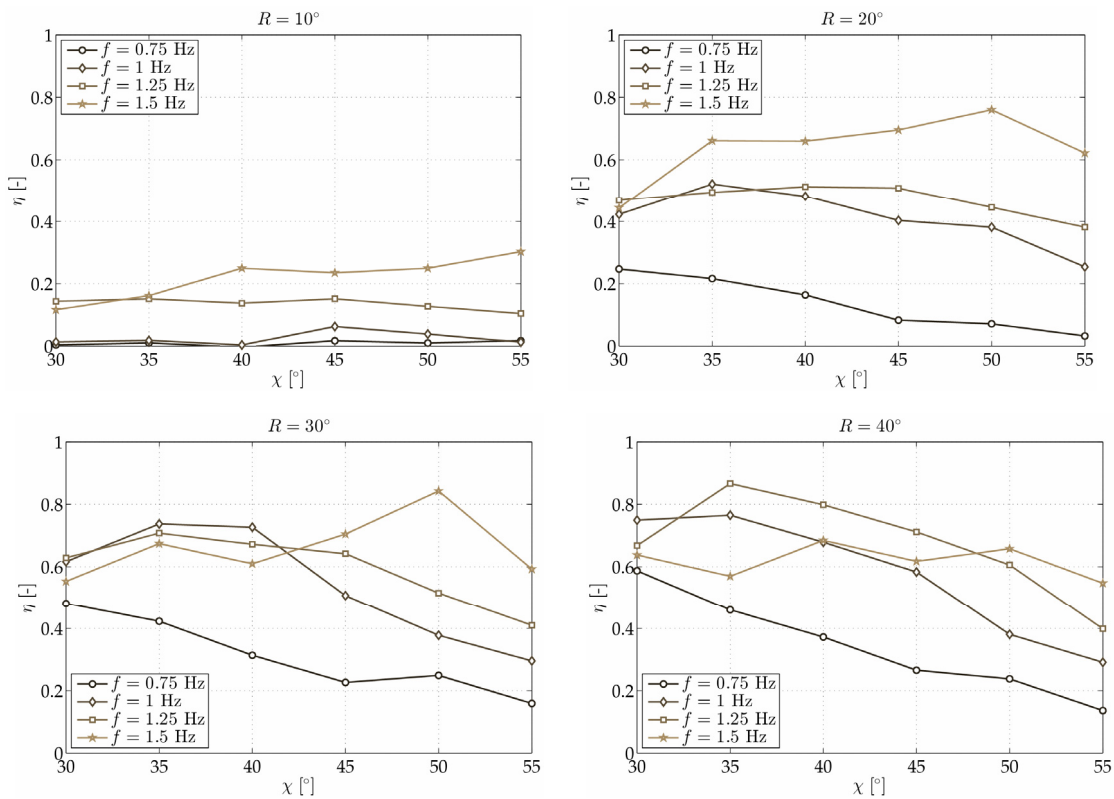


Σχήμα 70. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη μέση τιμή της ταχύτητας κίνησης του μηχανισμού στο νερό.

Αντίστοιχα με την μελέτη του συστήματος εκτός του νερού, στα πλαίσια της ανάλυσης των δεδομένων που συλλέχθηκαν στις παραμετρικές δοκιμές μέσα στο νερό, υπολογίστηκε, για κάθε συνδυασμό παραμέτρων, η μέση καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς  $\bar{P}_{in} = \bar{I}V_{in}$ , όπου  $V_{in} = 7.4$  Volt η τάση τροφοδοσίας των servo και  $\bar{I}$  η μέση τιμή του ρεύματος, όπως αυτή προέκυψε από την επεξεργασία της εξόδου του αισθητηρίου του ρεύματος. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την μέση ισχύ  $\bar{P}_{in}$  παρουσιάζονται στο Σχήμα 71. Όπως προκύπτει από αυτά, η καταναλισκόμενη ισχύς αυξάνεται με τη συχνότητα  $f$ , και το πλάτος  $R$  των εκτελούμενων κυματώσεων, ενώ παρουσιάζει μια ελαφρά μείωση καθώς αυξάνεται η διαφορά φάσης  $\chi$ .



Σχήμα 71. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη μέση τιμή της καταναλισκόμενης ισχύος, συνάρτησε των διαφόρων παραμέτρων των κυματώσεων του περυγίου, για κίνηση μέσα στο νερό.



Σχήμα 72. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το συντελεστή ενεργειακής απόδοσης, συνάρτησε των διαφόρων παραμέτρων των κυματώσεων του περυγίου, για κίνηση μέσα στο νερό.

Στη συνέχεια, προκειμένου να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά ενεργειακής απόδοσης του μηχανισμού, υπολογίστηκε ο παρακάτω (αδιάστατος) συντελεστής:

$$\eta = \frac{mg \cdot \bar{v}}{\bar{P}_{in}} , \quad (9)$$

όπου  $m = 3.25$  Kg η συνολική μάζα του μηχανισμού του περυγίου,  $\bar{v}$  η τελική ταχύτητα κίνησης (βλ. Σχήμα 70), και  $\bar{P}_{in}$  η μέση ηλεκτρική ισχύς κατανάλωσης από το μηχανισμό (βλ. Σχήμα 71), για κάθε συνδυασμό παραμέτρων. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 72 και υποδεικνύουν ότι ο συντελεστής ενεργειακής απόδοσης του συστήματος, για κατάλληλο συνδυασμό των κινηματικών παραμέτρων, λαμβάνει αρκετά υψηλές τιμές. Ειδικότερα, προκύπτει ότι ο συντελεστής  $\eta$  γενικά αυξάνεται με την συχνότητα  $f$ , και μειώνεται με τη διαφορά φάσης  $\chi$ .

## **Σχόλια, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Μελλοντική Εξέλιξη**

### **5.1 Σχόλια & συμπεράσματα**

Συνολικά, η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής, κατέδειξε την αποτελεσματικότητα του, βιομημητικής σχεδίασης, μηχανισμού πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης για την παραγωγή προωστικών δυνάμεων μέσα στο νερό. Επιπρόσθετα, επιβεβαιώθηκε ότι ο έλεγχος κίνησης του πτερυγίου μέσω της δομής του CPG, που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό, παρέχει μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα, κυρίως αναφορικά με το γεγονός ότι επιτρέπει την ομαλή μετάβαση μεταξύ διαφορετικών μοτίβων κυμάτωσης του πτερυγίου.

Βάσει της μελέτης των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τα πειράματα αυτοπρόωσης του μηχανισμού στο νερό (βλ. Ενότητα 4.3), προέκυψε ότι η ταχύτητα γενικά αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας και του πλάτους της κίνησης και με τις μέγιστες τιμές ταχύτητας να εμφανίζονται στην περίπτωση που η διαφοράς φάσης προσεγγίζει τις 30° (βλ. Σχήμα 70). Η μέγιστη ταχύτητα που επιτεύχθηκε ανέρχεται σε περίπου 0.7 m/sec, γεγονός που υποδεικνύει την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού του πτερυγίου κυματοειδούς κίνησης για πρόωση στο υδάτινο περιβάλλον.

Η παραγωγή αυτοπρόωσης, και κατ' επέκταση η ταχύτητα που αναπτύσσει ο μηχανισμός κατά την λειτουργία του στο νερό, προέκυψε ότι εξαρτάται άμεσα από την επιλογή κατάλληλων συνδυασμών για τις τρεις βασικές κινηματικές παραμέτρους του οδεύοντος κύματος. Οι περιορισμοί του εύρους τιμών για τις παραμέτρους αυτές, προκύπτουν, αφενός μεν από την επίδραση της μεμβράνης, αφετέρου δε από την επίδραση του περιβάλλοντος στο οποίο κινείται, αυξάνοντας τη φόρτιση των σερβομηχανισμών οδήγησης των ακτίνων, δυσχεραίνοντας την ακριβή παρακολούθηση των επιθυμητών τροχιών κίνησης σε μεγάλες τιμές των παραμέτρων ελέγχου. Συνολικά, από την μελέτη των αποτελεσμάτων τα οποία συλλέχθηκαν από τις σχετικές δοκιμές, κατ' εκτίμηση οδηγηθήκαμε στη οριοθέτηση των μέγιστων τιμών των τριών παραμέτρων ελέγχου



κίνησης (το πλάτος  $R$ , η διαφορά φάσης  $\chi$  και η συχνότητα  $f$ ), ως  $R < 40^\circ$ ,  $\chi \leq 45^\circ$ , και  $f \leq 1.5$  Hz.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα βασικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα πτυχιακή, συμπεριελήφθησαν στην ερευνητική εργασία [A18], η οποία παρουσιάστηκε στη διεθνή συνάντηση 22<sup>nd</sup> International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD2013). Η συγκεκριμένη εργασία απέσπασε και το βραβείο Best Application Paper Award.

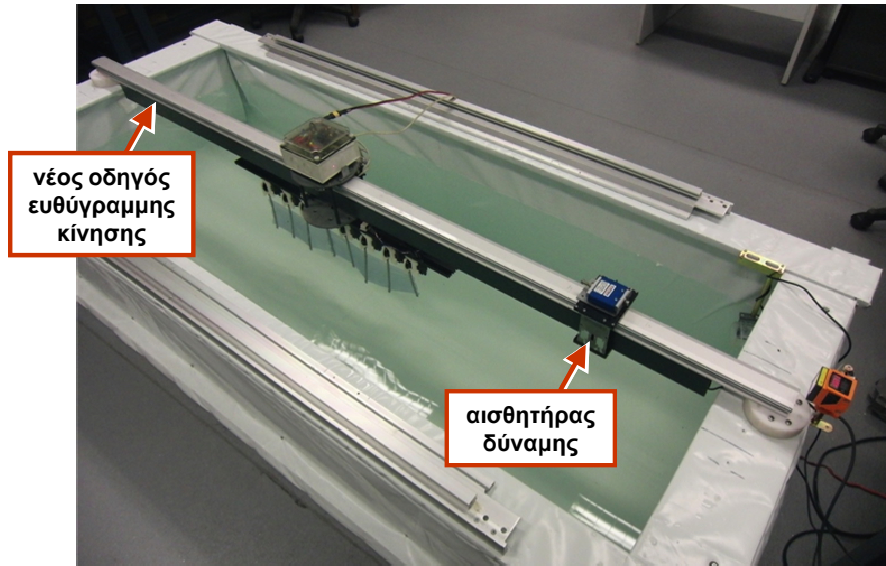
## 5.2 Μελλοντική εξέλιξη

Μια σειρά από βελτιώσεις έχουν προγραμματιστεί για την εξέλιξη του μηχανισμού του περυγίου κυματοειδούς κίνησης, με βάση την εμπειρία που αποκομίστηκε, αλλά και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ελήφθησαν με την πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Μάλιστα, ορισμένες από τις βελτιώσεις αυτές υλοποιήθηκαν κατά τα τελικά στάδια εκπόνησης της εργασίας, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Μια πρώτη βελτίωση αφορά στην αναβάθμιση του οδηγού ευθύγραμμης κίνησης, καθώς, όπως αποδείχτηκε από τις δοκιμές, η λύση με τις δύο ράβδους αλουμινίου, παρότι ήταν συνολικά αρκετά ικανοποιητική, εμφάνιζε δύο μειονεκτήματα. Συγκεκριμένα, λόγω του αρκετά μεγάλου μήκους τους, και του γεγονότος ότι εδράζονταν μόνο σε δύο σημεία (στις άκρες της δεξαμενής), οι οδηγοί τελικά εμφάνιζαν ένα μη αμελητέο βέλος κάμψης, η παρουσία του οποίου επηρέαζε, σε κάποιο βαθμό, τις μετρήσεις για την χρονική εξέλιξη της ταχύτητας αυτοπρώωσης του μηχανισμού. Το άλλο μειονέκτημα αφορούσε στο ότι η προσαρμογή του φορείου στους οδηγούς με τη χρήση εδράνων κύλισης, αν και εξασφάλιζε μειωμένη τριβή κίνησης, αδυνατούσε να συγκρατήσει το φορείο πάνω στους οδηγούς όταν ο μηχανισμός παρήγαγε μεγάλη ώση.

Για τους παραπάνω λόγους, στην καινούργια εκδοχή της πειραματικής διάταξης έχει χρησιμοποιηθεί ένας βιομηχανικού τύπου οδηγός ευθύγραμμης κίνησης, ο οποίος εξασφαλίζει στιβαρότητα και χαμηλή τριβή κύλισης του φορείου, το οποίο επανασχεδιάστηκε κατάλληλα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 73 (β).

Επιπλέον, στην πειραματική διάταξη ενσωματώθηκε ένα αισθητήριο δύναμης, τύπου load cell (δυναμοκυψέλη), με τη βοήθεια του οποίου θα είναι εφικτή η μέτρηση της ώσης που παράγεται από το περύγιο στην οριζόντια κατεύθυνση, για διαφορετικές τιμές των κινηματικών παραμέτρων της κυμάτωσης (Σχήμα 74). Αντίστοιχα, προγραμματίζεται η ενσωμάτωση στην πειραματική διάταξη και ενός δεύτερου αισθητήρα, για την μέτρηση της κάθετης παραγόμενης δύναμης από το περύγιο.

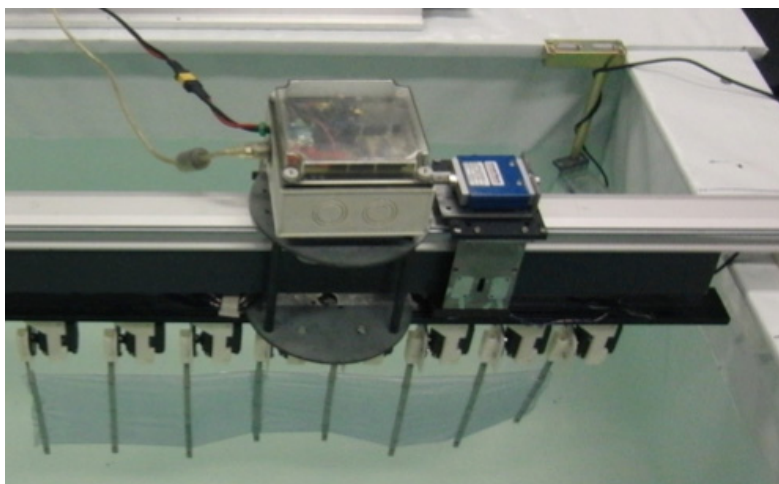


(α)



(β)

Σχήμα 73. (α) Η βελτιωμένη εκδοχή της πειραματικής διάταξης.  
(β) Ο μηχανισμός του πτερυγίου, προσαρμοσμένος στο επανασχεδιασμένο φορείο.



Σχήμα 74. Μέτρηση της παραγόμενης ώσης από το πτερόγιο στην οριζόντια κατεύθυνση.

Η τρίτη βελτίωση για την εξέλιξη του πτερυγίου αφορά στην αντικατάσταση των χρησιμοποιούμενων σερβομηχανισμών οδήγησης των ακτίνων με άλλους υψηλότερης ονομαστικής ροπής και ταχύτητας, ώστε να διευρυνθεί περαιτέρω το γωνιακό εύρος κίνησης και η συχνότητα κίνησης των ακτίνων. Κάτι τέτοιο αναμένεται ότι θα επιτρέψει την παραγωγή ακόμα μεγαλύτερων προωστικών δυνάμεων, και κατ' επέκταση μεγαλύτερη ταχύτητα κίνησης του μηχανισμού, με βάση και τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία.

Για τη μελλοντική εξέλιξη του μηχανισμού θα μπορούσε, επιπρόσθετα, να μελετηθεί η ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου στο οποίο η οδήγηση των ακτίνων θα πραγματοποιείται μέσω 'έξυπνων υλικών' τύπου SMA (Shape Memory Alloy, Κράματα με Μνήμη Σχήματος), ή μέσω υδραυλικού συστήματος.

Επιπλέον, σε σχέση με το σύστημα ελέγχου κίνησης του μηχανισμού, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη για τυχόν περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης του πτερυγίου από την υλοποίηση κυματώσεων στις οποίες υπάρχει διαφοροποίηση του γωνιακού εύρους ή/και της διαφοράς φάσης στην ημιτονοειδή κίνηση των ακτίνων κατά μήκος του πτερυγίου. Η μελέτη αυτή εκτιμάται ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί σχετικά εύκολα, δεδομένου ότι η δομή του CPG παρέχει τη δυνατότητα ανεξάρτητου καθορισμού των σχετικών παραμέτρων τοπικά για κάθε ταλαντωτή, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 3.2.3.

Τέλος, ως αποκορύφωμα της όλης εξελικτικής πορείας του μηχανισμού, το ερευνητικό πρόγραμμα SQUIDBOT που υλοποιείται από το Εργαστήριο Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, στο οποίο και εντάσσεται η παρούσα πτυχιακή εργασία, αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου Αυτόνομου Υποβρυχίου Οχήματος (Autonomous Underwater Vehicle, AUV), με σύστημα πρόωσης πτερυγίων κυματοειδούς κίνησης.

# Βιβλιογραφικές Πηγές

## Άρθρα

- [A1] Breder, C. M. and Edgerton, H. E., "An analysis of the locomotion of the seahorse, *Hippocampus hudsonius*, by means of high speed cinematography". *Annals of the New York Academy of Sciences*, 43:145-172, 1942.
- [A2] M. Sfakiotakis, D. M. Lane, and B. J. Davies, "An experimental undulating-fin device using the Parallel Bellows Actuator," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'01)*, (Seoul, Korea), pp. 2356-2362, 2001.
- [A3] K. Low and A. Willy, "Biomimetic motion planning of an undulating robotic fish fin," *Journal of Vibration and Control*, vol. 12, no. 12, pp. 1337-1359, 2006.
- [A4] 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, 2008.
- [A5] 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," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics Automation and Mechatronics (RAM'08)*, (Chengdu, China), pp. 1075-1078, 2008.
- [A6] D. Simons, M. Bergers, S. Henrion, J. Hulzenga, R. Jutte, W. Pas, M. Van Schravendijk, T. Vercruyssen, and A. Wilken, "A highly versatile autonomous underwater vehicle with biomechanical propulsion," 2009.
- [A7] T. Hu, L. Shen, L. Lin, and H. Xu, "Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 44, no. 3, pp. 633 - 645, 2009.
- [A8] B. Peter, R. Ratnaweera, W. Fischer, C. Pradalier, and R. Siegwart, "Design and evaluation of a fin-based underwater propulsion system," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'10)*, pp. 3751 -3756, 2010.
- [A9] O. Curet, N. Patankar, G. Lauder, and M. MacIver, "Aquatic manoeuvring with counter-propagating waves: A novel locomotive strategy," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 8, no. 60, pp. 1041-1050, 2011.
- [A10] M. Rahman, Y. Toda, and H. Miki, "Computational study on a squid-like underwater robot with two undulating side fins," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 25-32, 2011.
- [A11] C. Zhou and K. Low, "Better endurance and load capacity: An improved design of manta ray robot (RoMan-II)," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 7, Supplement no. 0, pp. S137-S144, 2010.
- [A12] 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.

- [A13] 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," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 168, no. 1, pp. 131–139, 2011.
- [A14] 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, 2008.
- [A15] D. Zhang, D. Hu, L. Shen, and H. Xie, "Design of an artificial bionic neural network to control fish-robot's locomotion," *Neurocomputing*, vol. 71, no. 4-6, pp. 648–654, 2008.
- [A16] A. Sproewitz, R. Moeckel, J. Maye, and A. J. Ijspeert, "Learning to move in modular robots using central pattern generators and online optimization," *International Journal of Robotics Research*, vol. 27, no. 3-4, pp. 423–443, 2008.
- [A17] 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. on Intelligent Robots and Systems (IROS'10)*, (Taipei, Taiwan), pp. 934–939, 2010. Oct. 18-22.
- [A18] M. Sfakiotakis, M. Arapis, N. Spyridakis, and J. Fasoulas, "Development and experimental evaluation of an undulatory fin prototype," in *Proc. 22nd Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD'13)*, (Portoroz, Slovenia), pp. 280-287, 2013.

## Βιβλία και διδακτικά συγγράματα

- [B1] Μ. Σφακιωτάκης, «Μικροελεγκτές», Διδακτικές σημειώσεις, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Τ.Ε.Ι. Κρήτης.
- [B2] Μ. Σφακιωτάκης, «Μικροελεγκτές», Εργαστηριακές ασκήσεις, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Τ.Ε.Ι. Κρήτης.
- [B3] Ι. Μηναδάκης, «Ηλεκτρονικές Κατασκευές», Εργαστηριακές ασκήσεις, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Τ.Ε.Ι. Κρήτης.

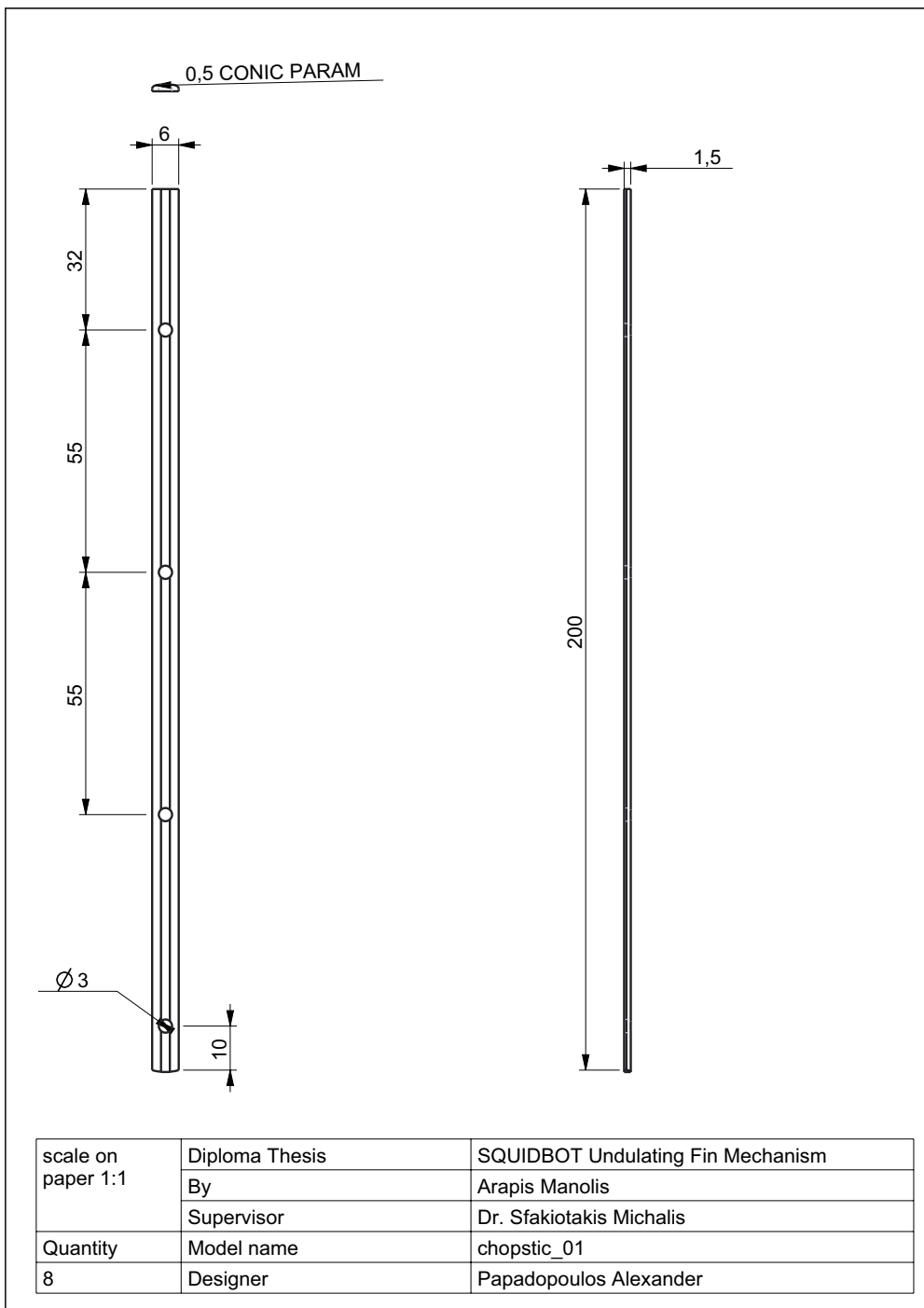
## Ιστοσελίδες

- [I1] [http://www.leontaki.gr/product\\_detail.jsp?prdId=012&extLang=](http://www.leontaki.gr/product_detail.jsp?prdId=012&extLang=)
- [I2] <http://arduino.cc/en/>

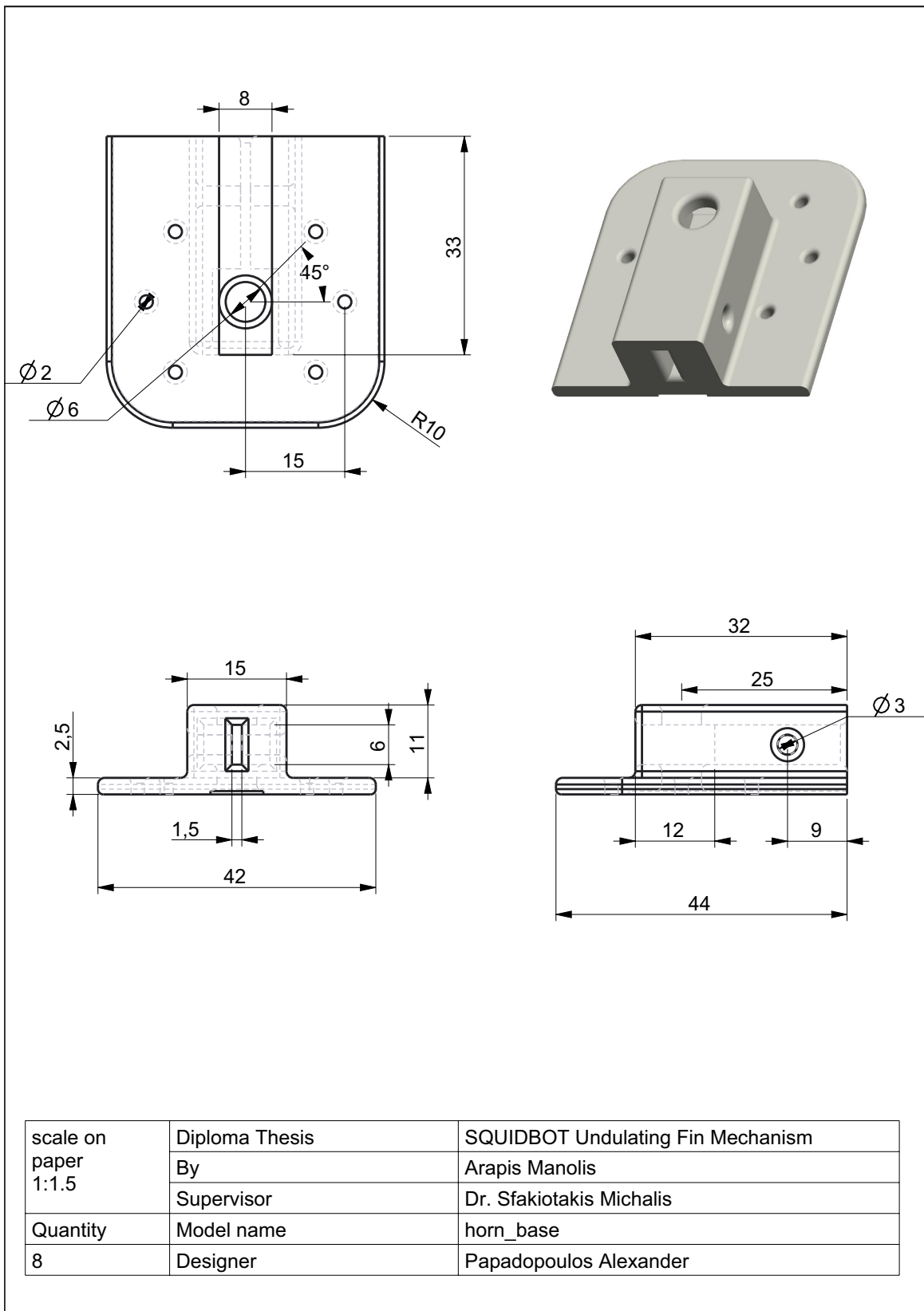
# Παραρτήματα

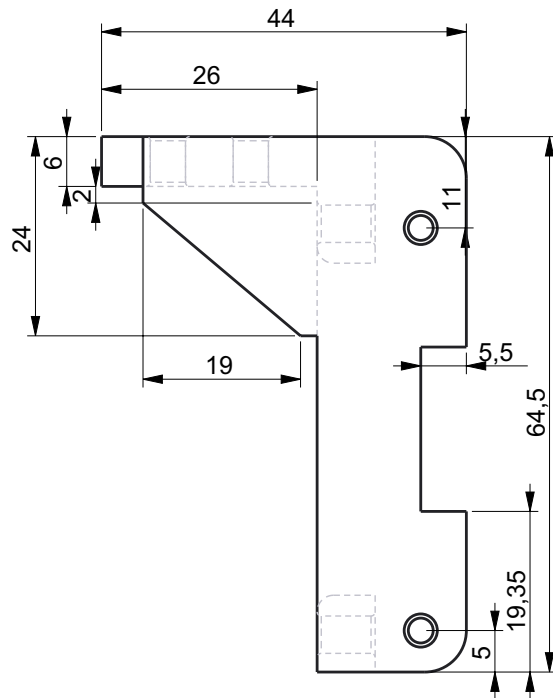
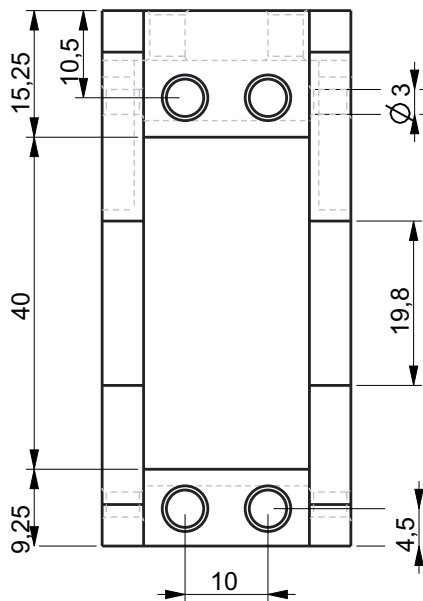
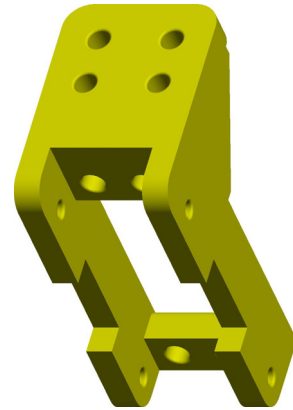
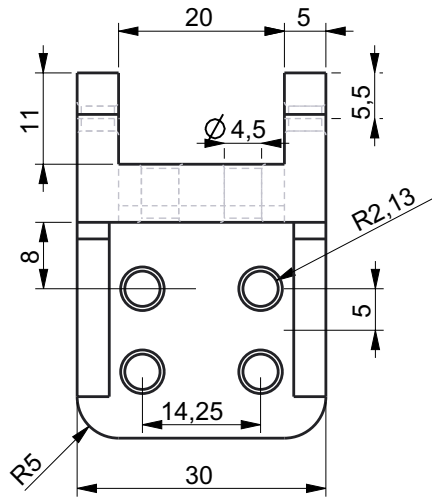
## Παράρτημα-Α: Σχέδια CAD

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζονται τα μηχανολογικά σχέδια CAD των επιμέρους εξαρτημάτων και της συνολικής πειραματικής διάταξης. Τα σχέδια αυτά έγιναν από τον Αλέξανδρο Παπαδόπουλο, φοιτητή του Τμήματος Μηχανολογίας του Τ.Ε.Ι. Κρήτης.

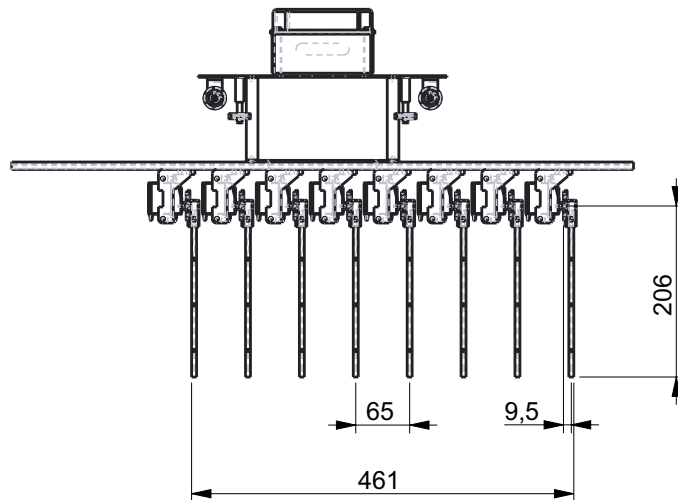
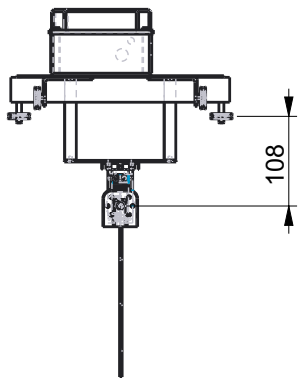
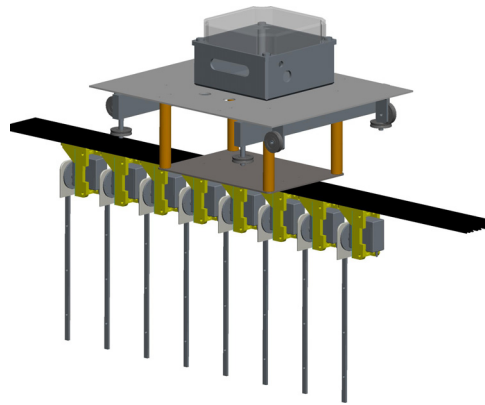
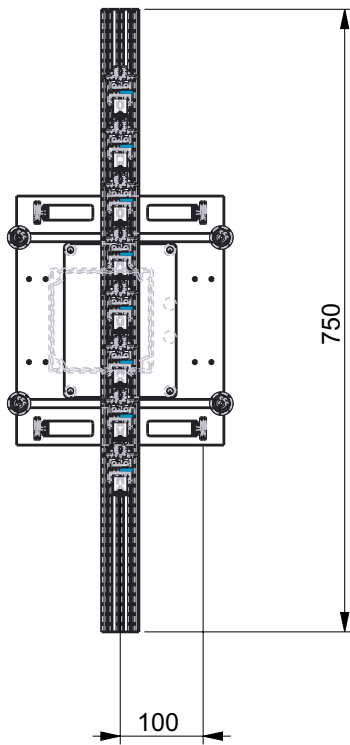




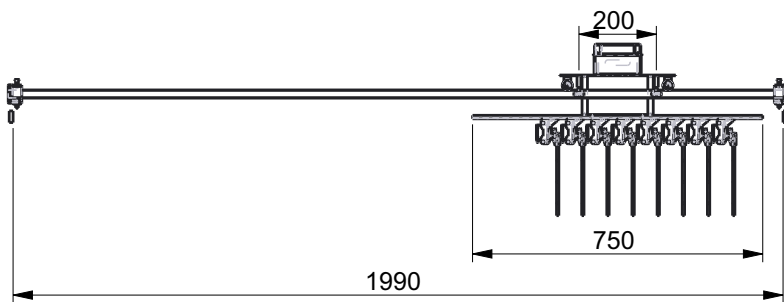
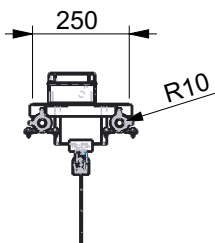
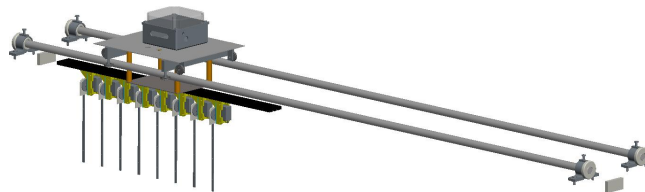
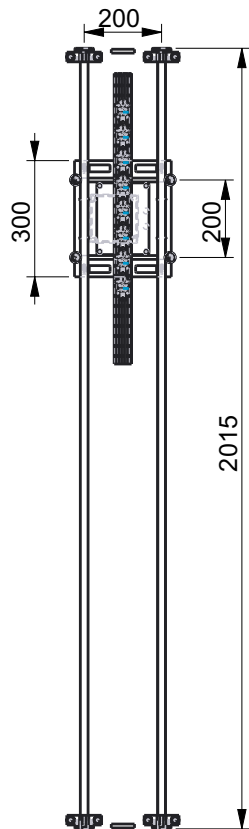




scale on paper 1:1.5	Diploma Thesis	SQUIDBOT Undulating Fin Mechanism
	By	Arapis Manolis
	Supervisor	Dr. Sfakiotakis Michalis
Quantity	Model name	SERVO_BASE_01
8	Designer	Papadopoulos Alexander

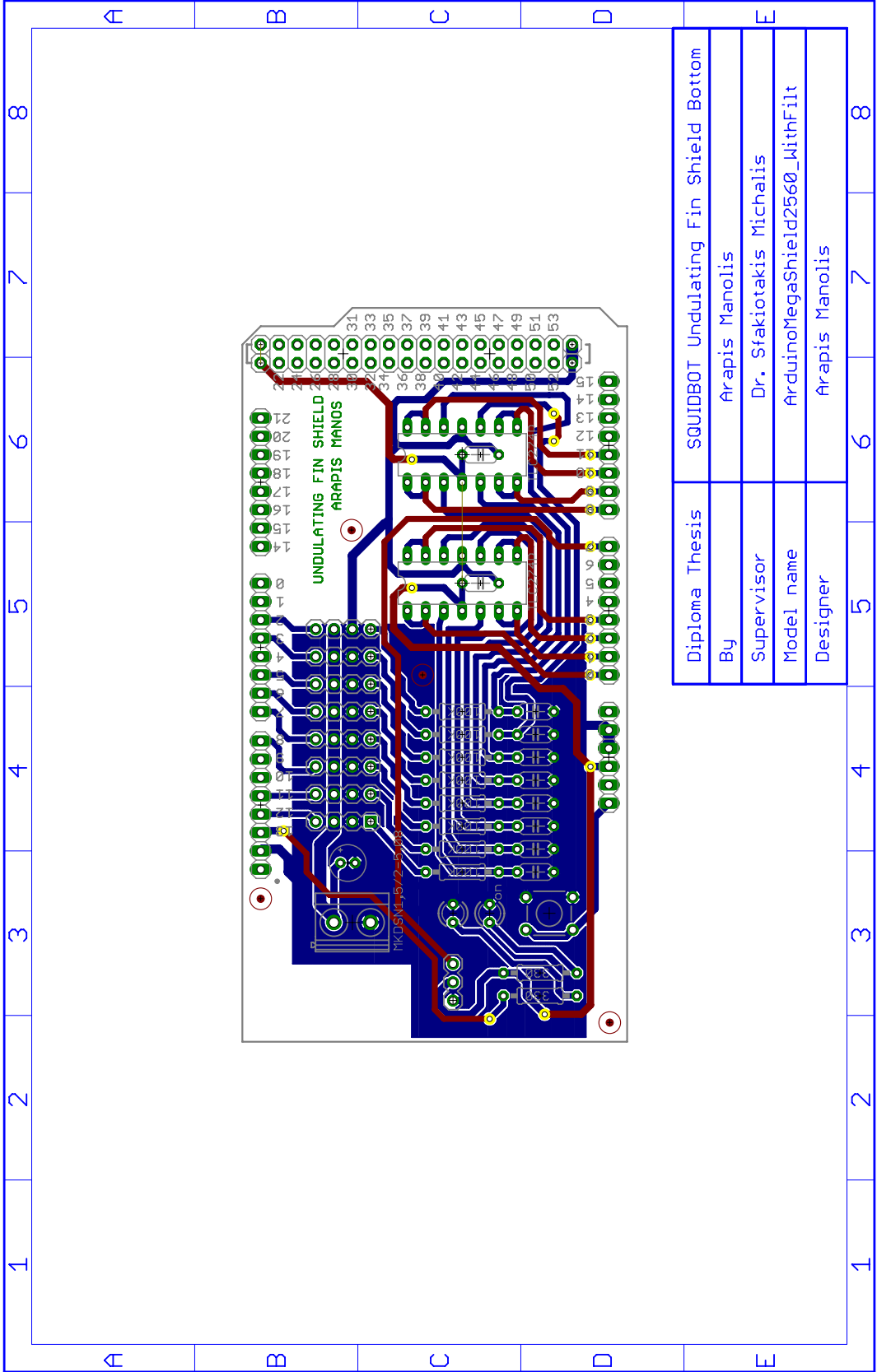


scale on paper 1:0.1	Diploma Thesis	SQUIDBOT Undulating Fin Mechanism
	By	Arapis Manolis
	Supervisor	Dr. Sfakiotakis Michalis
Quantity	Model name	assembly_002
1	Designer	Papadopoulos Alexander

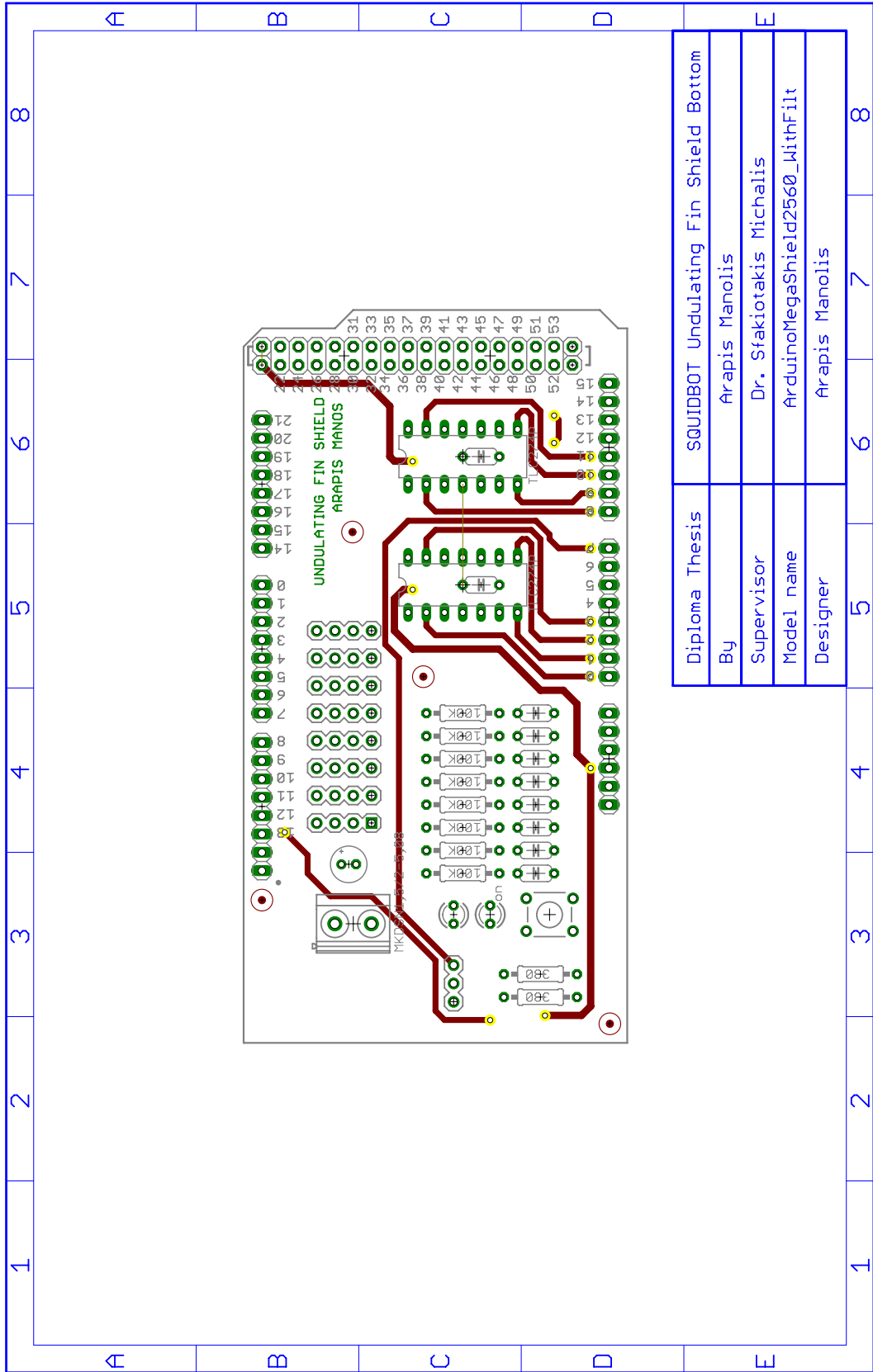


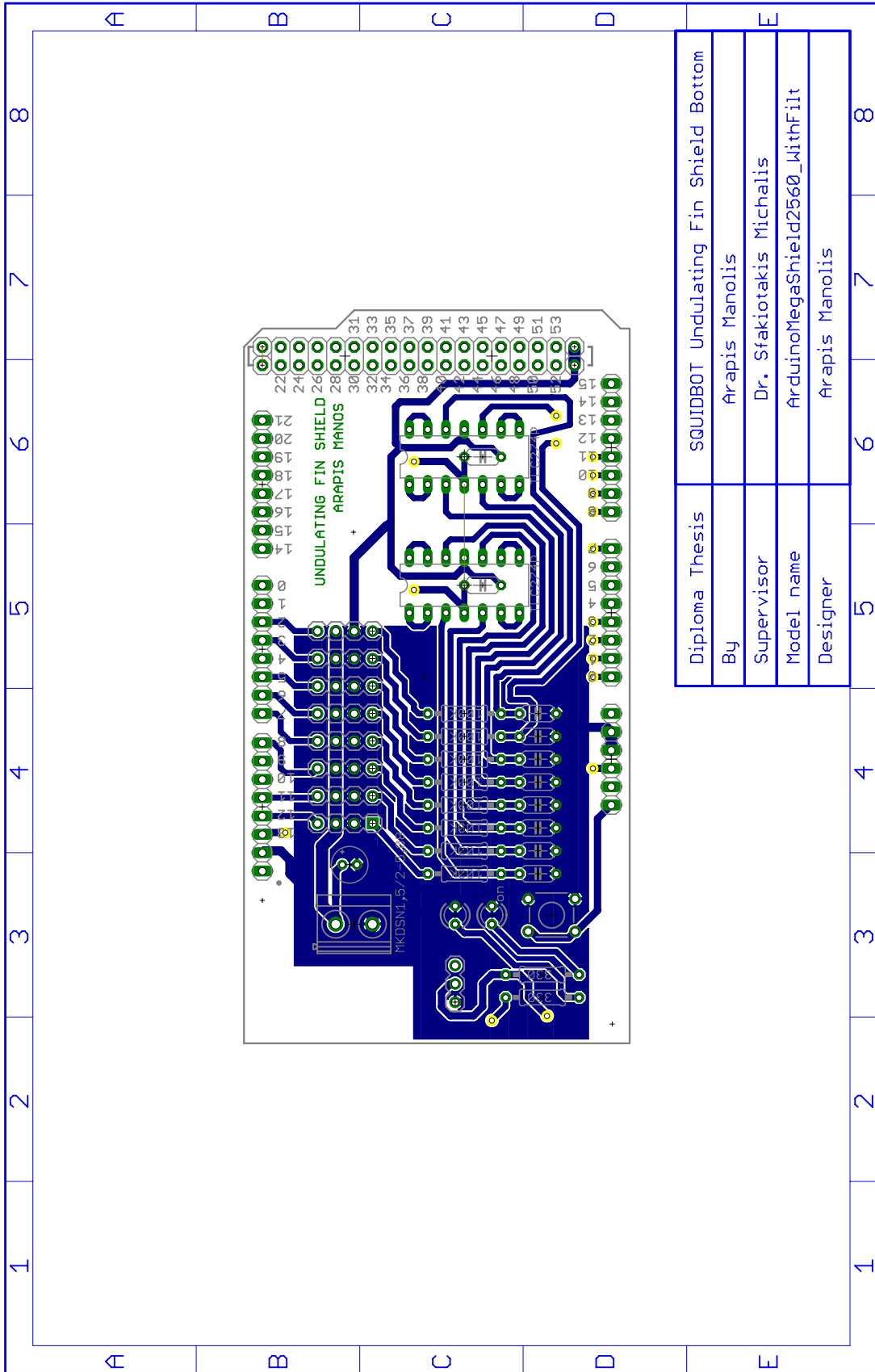
scale on paper 1:0.07	Diploma Thesis	SQUIDBOT Undulating Fin Mechanism
	By	Arapis Manolis
	Supervisor	Dr. Sfakiotakis Michalis
Quantity	Model name	assembly_001
1	Designer	Papadopoulos Alexander



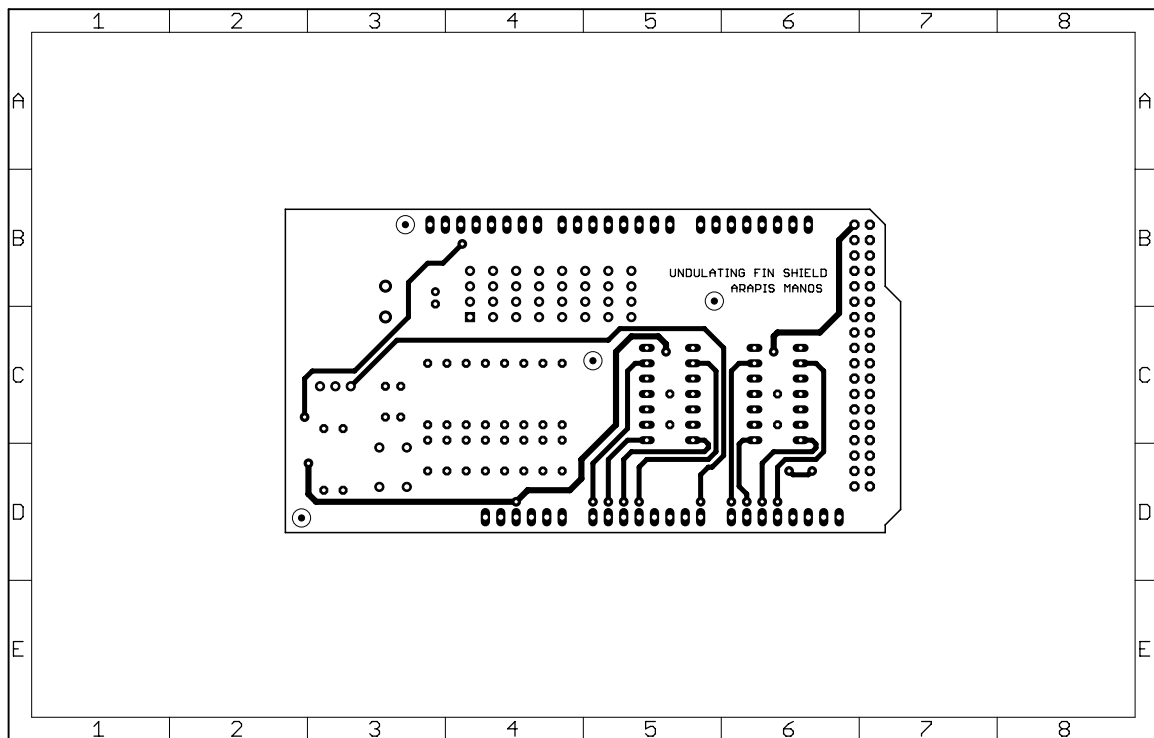




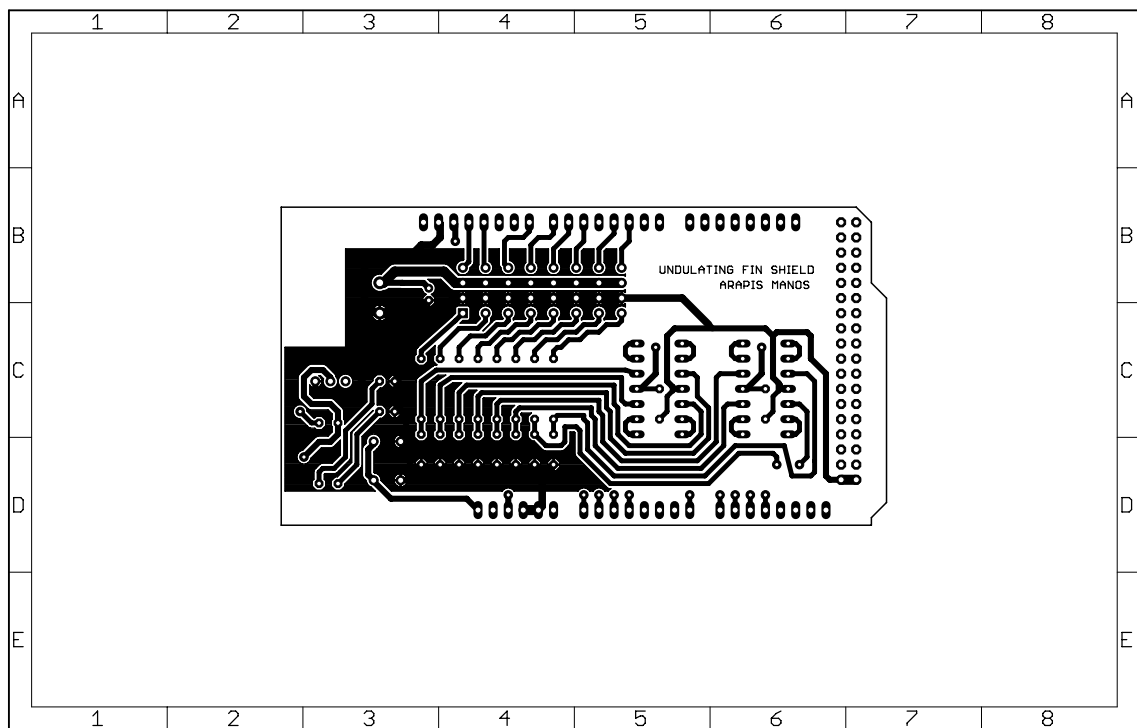




### Άνω όψη PCB



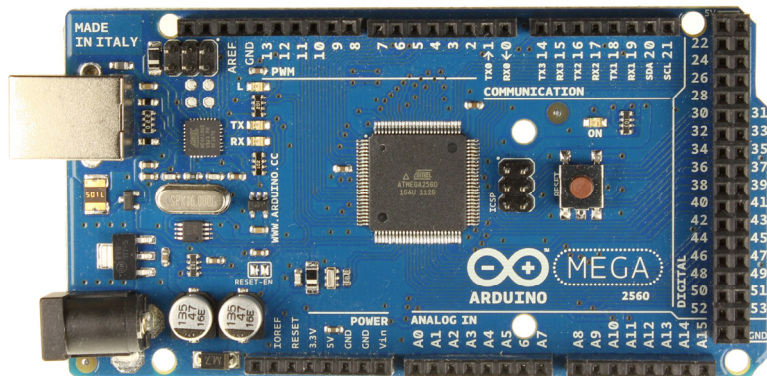
### Κάτω Όψη PCB



## Παράρτημα-Γ: Datasheets

Σε αυτό το παράρτημα παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά για συγκεκριμένα επιμέρους στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην πειραματική διάταξη.

### Arduino Mega 2560



### Overview

The Arduino Mega 2560 is a microcontroller board based on the ATmega2560 ([datasheet](#)). It has 54 digital input/output pins (of which 15 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.

The Mega 2560 is an update to the [Arduino Mega](#), which it replaces.

The Mega2560 differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the ATmega16U2 (ATmega8U2 in the revision 1 and revision 2 boards) programmed as a USB-to-serial converter. Revision 2 of the Mega2560 board has a resistor pulling the 8U2 HWB line to ground, making it easier to put into [DFU mode](#).

Revision 3 of the board has the following new features:

1.0 pinout: added SDA and SCL pins that are near to the AREF pin and two other new pins placed near to the RESET pin, the IOREF that allow the shields to adapt to the voltage provided from the board. In future, shields will be compatible both with the board that use the AVR, which operate with 5V and with the Arduino Due that operate with 3.3V. The second one is a not connected pin, that is reserved for future purposes.

Stronger RESET circuit.

Atmega 16U2 replace the 8U2.

### Schematic, Reference Design & Pin Mapping

EAGLE files: [arduino-mega2560\\_R3-reference-design.zip](#)

Schematic: [arduino-mega2560\\_R3-schematic.pdf](#)

Pin Mapping: [PinMap2560 page](#)

## Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

## Power

The Arduino Mega can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The power pins are as follows:

**VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.

**5V.** This pin outputs a regulated 5V from the regulator on the board. The board can be supplied with power either from the DC power jack (7 - 12V), the USB connector (5V), or the VIN pin of the board (7-12V). Supplying voltage via the 5V or 3.3V pins bypasses the regulator, and can damage your board. We don't advise it.

**3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.

**GND.** Ground pins.

**IOREF.** This pin on the Arduino board provides the voltage reference with which the microcontroller operates. A properly configured shield can read the IOREF pin voltage and select the appropriate power source or enable voltage translators on the outputs for working with the 5V or 3.3V.

## Memory

The ATmega2560 has 256 KB of flash memory for storing code (of which 8 KB is used for the bootloader), 8 KB of SRAM and 4 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

## Input and Output

Each of the 54 digital pins on the Mega can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

**Serial: 0 (RX) and 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. Pins 0 and 1 are also connected to the corresponding pins of the ATmega16U2 USB-to-TTL Serial chip.

**External Interrupts: 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), 20 (interrupt 3), and 21 (interrupt 2).** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.

**PWM: 2 to 13 and 44 to 46.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.

**SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS).** These pins support SPI communication using the [SPI library](#). The SPI pins are also broken out on the ICSP header, which is physically compatible with the Uno, Duemilanove and Diecimila.

**LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

**TWI: 20 (SDA) and 21 (SCL).** Support TWI communication using the [Wire library](#). Note that these pins are not in the same location as the TWI pins on the Duemilanove or Diecimila.

The Mega2560 has 16 analog inputs, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the AREF pin and [analogReference\(\)](#) function.

There are a couple of other pins on the board:

**AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with [analogReference\(\)](#).



**Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

## Communication

The Arduino Mega2560 has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega2560 provides four hardware UARTs for TTL (5V) serial communication. An ATmega16U2 (ATmega 8U2 on the revision 1 and revision 2 boards) on the board channels one of these over USB and provides a virtual com port to software on the computer (Windows machines will need a .inf file, but OSX and Linux machines will recognize the board as a COM port automatically). The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the ATmega8U2/ATmega16U2 chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Mega2560's digital pins.

The ATmega2560 also supports TWI and SPI communication. The Arduino software includes a Wire library to simplify use of the TWI bus; see the [documentation](#) for details. For SPI communication, use the [SPI library](#).

## Programming

The Arduino Mega can be programmed with the Arduino software ([download](#)). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega2560 on the Arduino Mega comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)).

You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

The ATmega16U2 (or 8U2 in the rev1 and rev2 boards) firmware source code is available [in the Arduino repository](#). The ATmega16U2/8U2 is loaded with a DFU bootloader, which can be activated by:

On Rev1 boards: connecting the solder jumper on the back of the board (near the map of Italy) and then resetting the 8U2.

On Rev2 or later boards: there is a resistor that pulling the 8U2/16U2 HWB line to ground, making it easier to put into DFU mode. You can then use [Atmel's FLIP software](#) (Windows) or the [DFU programmer](#) (Mac OS X and Linux) to load a new firmware. Or you can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader). See [this user-contributed tutorial](#) for more information.

## Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Mega2560 is designed in a way that allows it to be reset by software running on a

connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2 is connected to the reset line of the ATmega2560 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload.

This setup has other implications. When the Mega2560 is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Mega2560. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data.

The Mega2560 contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see [this forum thread](#) for details.

### **USB Overcurrent Protection**

The Arduino Mega2560 has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

### **Physical Characteristics and Shield Compatibility**

The maximum length and width of the Mega2560 PCB are 4 and 2.1 inches respectively, with the USB connector and power jack extending beyond the former dimension. Three screw holes allow the board to be attached to a surface or case. Note that the distance between digital pins 7 and 8 is 160 mil (0.16"), not an even multiple of the 100 mil spacing of the other pins.

The Mega2560 is designed to be compatible with most shields designed for the Uno, Diecimila or Duemilanove. Digital pins 0 to 13 (and the adjacent AREF and GND pins), analog inputs 0 to 5, the power header, and ICSP header are all in equivalent locations. Further the main UART (serial port) is located on the same pins (0 and 1), as are external interrupts 0 and 1 (pins 2 and 3 respectively). SPI is available through the ICSP header on both the Mega2560 and Duemilanove / Diecimila. Please note that I<sup>2</sup>C is not located on the same pins on the Mega (20 and 21) as the Duemilanove / Diecimila (analog inputs 4 and 5).

# Αισθητήρας Ρεύματος ACS714



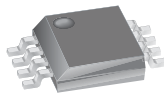
## ACS714

### *Automotive Grade, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*

#### Features and Benefits

- Low-noise analog signal path
- Device bandwidth is set via the FILTER pin
- 5  $\mu$ s output rise time in response to step input current
- 80 kHz bandwidth
- Total output error 1.5% typical, at  $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small footprint, low-profile SOIC8 package
- 1.2 m $\Omega$  internal conductor resistance
- 2.1 kVRMS minimum isolation voltage from pins 1-4 to pins 5-8
- 5.0 V, single supply operation
- 66 to 185 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis
- Ratiometric output from supply voltage
- Operating temperature range,  $-40^\circ\text{C}$  to  $150^\circ\text{C}$

#### Package: 8 pin SOIC (suffix LC)



Approximate Scale 1:1 

#### Description

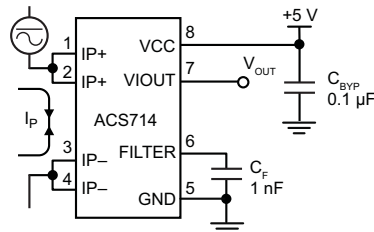
The Allegro<sup>®</sup> ACS714 provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in automotive systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, switched-mode power supplies, and overcurrent fault protection.

The device consists of a precise, low-offset, linear Hall sensor circuit with a copper conduction path located near the surface of the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which is sensed by the integrated Hall IC and converted into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy after packaging.

The output of the device has a positive slope ( $>V_{IOUT(Q)}$ ) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from pins 1 and 2, to pins 3 and 4), which is the path used for current sensing. The internal resistance of this conductive path is 1.2 m $\Omega$  typical, providing low power loss. The thickness of the copper conductor allows survival

*Continued on the next page...*

#### Typical Application



Application 1. The ACS714 outputs an analog signal,  $V_{OUT}$ , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sensed current,  $I_P$ , within the range specified.  $C_F$  is recommended for noise management, with values that depend on the application.

## Αισθητήρας Ρεύματος ACS714 (συνέχεια)

### ACS714

*Automotive Grade, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*

#### Description (continued)

of the device at up to 5× overcurrent conditions. The terminals of the conductive path are electrically isolated from the sensor leads (pins 5 through 8). This allows the ACS714 current sensor to be used in applications requiring electrical isolation without the use of opto-isolators or other costly isolation techniques.

The ACS714 is provided in a small, surface mount SOIC8 package. The leadframe is plated with 100% matte tin, which is compatible with standard lead (Pb) free printed circuit board assembly processes. Internally, the device is Pb-free, except for flip-chip high-temperature Pb-based solder balls, currently exempt from RoHS. The device is fully calibrated prior to shipment from the factory.

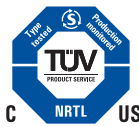
#### Selection Guide

Part Number	Optimized Range, $I_p$ (A)	Sensitivity, Sens (Typ) (mV/A)	$T_A$ (°C)	Packing*
ACS714ELCTR-05B-T	±5	185	-40 to 85	Tape and reel, 3000 pieces/reel
ACS714ELCTR-20A-T	±20	100		
ACS714ELCTR-30A-T	±30	66		
ACS714LLCTR-05B-T	±5	185	-40 to 150	
ACS714LLCTR-20A-T	±20	100		
ACS714LLCTR-30A-T	±30	66		

\*Contact Allegro for additional packing options.

#### Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Supply Voltage	$V_{CC}$		8	V
Reverse Supply Voltage	$V_{RCC}$		-0.1	V
Output Voltage	$V_{IOUT}$		8	V
Reverse Output Voltage	$V_{RIOUT}$		-0.1	V
Reinforced Isolation Voltage	$V_{ISO}$	Pins 1-4 and 5-8; 60 Hz, 1 minute, $T_A=25^\circ\text{C}$	2100	V
Rated Input Voltage	$V_{working}$	Voltage applied to leadframe ( $I_p$ + pins)	184	VAC Max
Output Current Source	$I_{IOUT(SOURCE)}$		3	mA
Output Current Sink	$I_{IOUT(SINK)}$		10	mA
Overcurrent Transient Tolerance	$I_p$	1 pulse, 100 ms	100	A
Nominal Operating Ambient Temperature	$T_A$	Range E	-40 to 85	°C
		Range L	-40 to 150	°C
Maximum Junction Temperature	$T_J(max)$		165	°C
Storage Temperature	$T_{stg}$		-65 to 170	°C



TÜV America  
Certificate Number:  
U8V 06 05 54214 010

Parameter	Specification
Fire and Electric Shock	CAN/CSA-C22.2 No. 60950-1-03 UL 60950-1:2003 EN 60950-1:2001



Allegro MicroSystems, Inc.  
115 Northeast Cutoff, Box 15036  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-6000  
www.allegromicro.com

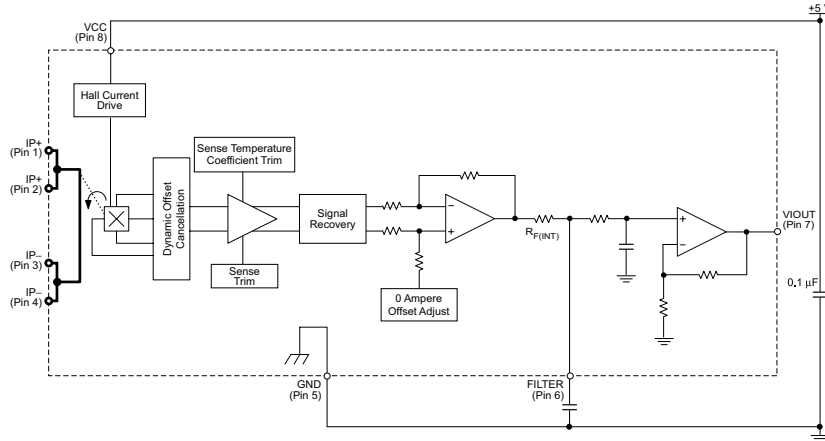
2

## Αισθητήρας Ρεύματος ACS714 (συνέχεια)

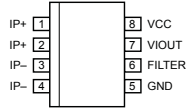
### ACS714

*Automotive Grade, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*

Functional Block Diagram



Pin-out Diagram



Terminal List Table

Number	Name	Description
1 and 2	IP+	Terminals for current being sensed; fused internally
3 and 4	IP-	Terminals for current being sensed; fused internally
5	GND	Signal ground terminal
6	FILTER	Terminal for external capacitor that sets bandwidth
7	VIOUT	Analog output signal
8	VCC	Device power supply terminal



Allegro MicroSystems, Inc.  
115 Northeast Cutoff, Box 15036  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 (508) 853-5000  
www.allegromicro.com

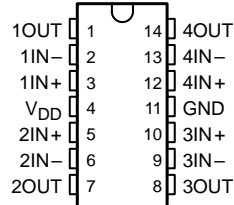
## Τετραπλός Τελεστικός Ενισχυτής TLC274CD

### TLC274, TLC274A, TLC274B, TLC274Y, TLC279 LinCMOS™ PRECISION QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

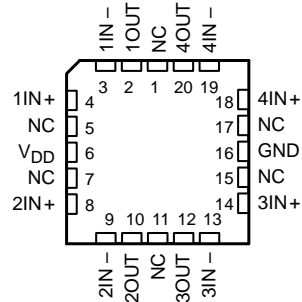
SLOS092B – SEPTEMBER 1987 – REVISED AUGUST 1994

- **Trimmed Offset Voltage:**  
TLC279 . . . 900  $\mu\text{V}$  Max at 25°C,  $V_{\text{DD}} = 5\text{ V}$
- **Input Offset Voltage Drift . . . Typically**  
0.1  $\mu\text{V}/\text{Month}$ , Including the First 30 Days
- **Wide Range of Supply Voltages Over Specified Temperature Range:**  
0°C to 70°C . . . 3 V to 16 V  
–40°C to 85°C . . . 4 V to 16 V  
–55°C to 125°C . . . 4 V to 16 V
- **Single-Supply Operation**
- **Common-Mode Input Voltage Range**  
Extends Below the Negative Rail (C-Suffix and I-Suffix Versions)
- **Low Noise . . . Typically 25 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$**   
at  $f = 1\text{ kHz}$
- **Output Voltage Range Includes Negative Rail**
- **High Input Impedance . . .  $10^{12}\ \Omega$  Typ**
- **ESD-Protection Circuitry**
- **Small-Outline Package Option Also Available in Tape and Reel**
- **Designed-In Latch-Up Immunity**

D, J, N, OR PW PACKAGE  
(TOP VIEW)



FK PACKAGE  
(TOP VIEW)



NC – No internal connection

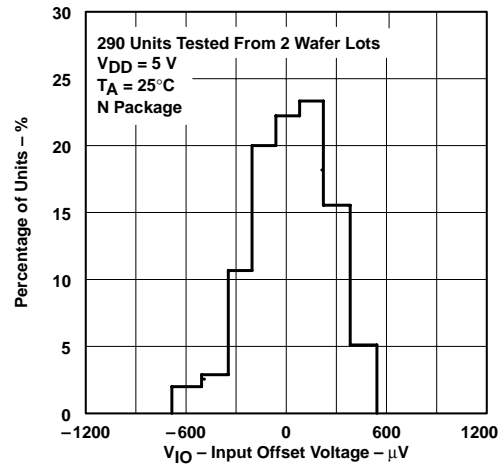
#### description

The TLC274 and TLC279 quad operational amplifiers combine a wide range of input offset voltage grades with low offset voltage drift, high input impedance, low noise, and speeds approaching that of general-purpose BiFET devices.

These devices use Texas Instruments silicon-gate LinCMOS™ technology, which provides offset voltage stability far exceeding the stability available with conventional metal-gate processes.

The extremely high input impedance, low bias currents, and high slew rates make these cost-effective devices ideal for applications which have previously been reserved for BiFET and NFET products. Four offset voltage grades are available (C-suffix and I-suffix types), ranging from the low-cost TLC274 (10  $\mu\text{V}$ ) to the high-precision TLC279 (900  $\mu\text{V}$ ). These advantages, in combination with good common-mode rejection and supply voltage rejection, make these devices a good choice for new state-of-the-art designs as well as for upgrading existing designs.

DISTRIBUTION OF TLC279  
INPUT OFFSET VOLTAGE



LinCMOS is a trademark of Texas Instruments Incorporated.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265  
POST OFFICE BOX 1443 • HOUSTON, TEXAS 77251-1443

Copyright © 1994, Texas Instruments Incorporated

2-1



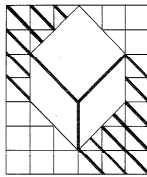
# Τροφοδοτικό Ισχύος ZPS\_400A

\$5.00

## ZENITH ELECTRONICS CORPORATION

### STANDARD SWITCHING POWER SUPPLIES USER'S MANUAL

Models: ZPS-250A  
ZPS-300A  
ZPS-400A



### LIMITED WARRANTY

Power Supplies  
ZPS-250A, ZPS-300A, ZPS-400A

#### Limited Warranty

Zenith warrants that for a period of two (2) years from date of manufacture, the Power Supplies shall be free from defects in material and workmanship.

The above warranty does not extend to any Power Supplies which have been subjected to misuse, abuse, neglect, accident, improper installation or application, faulty incorporation into other products, or negligence in use, storage, transportation, handling or abnormal conditions of operation.

If Buyer or any other person performs any alteration upon Zenith's Power Supplies including, but not limited to, cosmetic, electrical, mechanical, burn-in or accelerated testing without the express written authorization of Zenith, then Zenith's warranty upon such Power Supplies shall be void. For any Power Supplies sold which are used in a medical or life support application or a nuclear facility, Zenith makes no warranties or representations whatsoever and such Power Supplies are sold "AS IS" and "WITH ALL FAULTS."

#### Limitation of Liability

THE ABOVE WARRANTY IS IN LIEU OF ALL OTHER WARRANTIES, WHETHER EXPRESS, IMPLIED, OR STATUTORY INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. ALL OTHER WARRANTIES ARE HEREBY EXPRESSLY EXCLUDED AND NEGATED.

ZENITH'S SOLE LIABILITY AND BUYER'S SOLE REMEDY FOR ANY CLAIM, WHETHER IN TORT, CONTRACT OR WARRANTY, SHALL BE LIMITED AT ZENITH'S OPTION TO REPAIR OR REPLACEMENT OF THE POWER SUPPLIES OR ISSUANCE OF A CREDIT OR REBATE OF THE PURCHASE PRICE.

UNDER NO CIRCUMSTANCES SHALL ZENITH BE LIABLE IN ANY WAY FOR ANY INDIRECT, SPECIAL, INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, LOST BUSINESS OR PROFITS, WHETHER OR NOT FORESEEABLE, AND WHETHER OR NOT BASED ON CONTRACT, TORT, WARRANTY CLAIMS OR OTHERWISE IN CONNECTION WITH THE POWER SUPPLIES.

#### Buyer Responsibility

In the event Buyer claims that any Products are non-conforming, Buyer shall: (1) promptly notify Zenith in writing of the basis of such claim; (2) obtain a Return Material Authorization (RMA) number from Zenith prior to returning any Products; and (3) return such Products freight collect to Zenith's designated facility or, at Zenith's request, allow Zenith to inspect and/or repair such Products at Buyer's facility. Products within warranty shall be returned to Buyer freight collect. Products returned by Buyer and found by Zenith to be non-defective and conforming shall be returned to Buyer freight collect, and Buyer shall reimburse Zenith for all costs of transportation, insurance, inspection and testing incurred by Zenith. Final determination as to whether the Products are, in fact, defective rests with Zenith.

All warranty claims must be made within thirty (30) days of the expiration of this warranty.

#### User's Manual

Read your User's Manual carefully so that you will understand the installation and operation of the Power Supply.

### TABLE OF CONTENTS

	PAGE NUMBER
POWER SUPPLY MODEL GUIDE.....	2
RECEIVING AND INSPECTION INSTRUCTIONS.....	2
SAFETY CONSIDERATIONS.....	3
INSTALLATION AND ADJUSTMENTS.....	4
INPUT/OUTPUT DIAGRAM, FIG. 1.....	4
INPUT/OUTPUT VOLTAGE SELECTION DIAGRAM, FIG. 2.....	5
DAMAGE CLAIMS.....	6
RETURN MATERIAL AUTHORIZATION (RMA) PROCEDURE.....	6
ELECTRICAL SPECIFICATIONS, FIG. 3, FIG. 4.....	8, 9
MECHANICAL SPECIFICATIONS, FIG. 5, FIG. 6.....	10
BLOCK DIAGRAM, FIG. 7.....	11
ZPS-250A SCHEMATIC, FIG. 8.....	12
ZPS-300A SCHEMATIC, FIG. 9.....	13
ZPS-400A SCHEMATIC, FIG. 10.....	14
TROUBLE SHOOTING GUIDE.....	15

Read this manual carefully before installing and operating any Zenith power supply

1

### POWER SUPPLY MODEL GUIDE

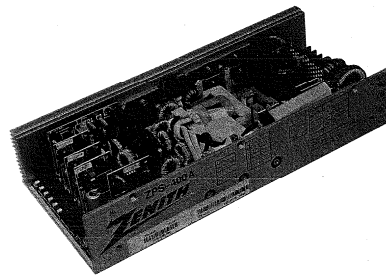
The following guide provides output and current information for the ZPS-250A, ZPS-300A and ZPS-400A products:

#### Output Voltage & Current Ratings:

Model	Max Output Power (Watts)	Main Output		2nd Output		3rd Output		4th Output		Size (Depth) LxWxH
		Volts DC (Nominal)	Amps (Min/Max)	Volts DC (Nominal)	Amps (Min/Max)	Volts DC (Nominal)	Amps (Min/Max)	Volts DC (Nominal)	Amps (Min/Max)	
ZPS-250A	250	± 75V±5	1.5/16.0	11.5/28.0	0.2/0.8	± 75V±10	0.2/0.8	± 75V±10	0.2/0.8	13x6.7x2.5
ZPS-300A	300	4.75V±2.5	4.5/45.0	11.5/28.0	0.6/8.0	4.75V±10.0	0.6/8.0	4.75V±10.0	0.4/4.0	13x5.0x2.5
ZPS-400A	400	4.75V±2.5	5.5/55.0	11.5/26.0	0.7/7.0	4.75V±10.0	1.0/10.0	4.75V±10.0	0.6/6.0	13x6.0x2.5

### RECEIVING AND INSPECTION INSTRUCTIONS

Upon receipt, perform a visual inspection of the power supply. Examine the chassis carefully to see that it is in good condition. Check for any loose components. If any problems are encountered, refer to the section on "Damage Claims."



2

# Τροφοδοτικό Ισχύος ZPS\_400A (συνέχεια)

## SAFETY CONSIDERATIONS

### CAUTION:

1. The AC input terminals and the primary section (see Figure 2.) of the power supply are at dangerous voltage potentials. Avoid touching these areas when AC power is supplied to avoid a hazardous electric shock. Wait 50 seconds after removing AC power before servicing the power supply to avoid shock from energy stored in the capacitors.
2. Connect input ground terminal to safety earth ground to minimize electric shock hazard and assure low EMI.
3. Check that 115V/230V selector strap is in the proper position. Operation in the wrong position will damage the power supply and is not covered under warranty.
4. Use proper screw sizes for mounting. Excessively long screws may damage the power supply or create a hazardous electric shock.
5. Provide proper cooling (see specifications on page 10).
6. Do not allow liquids or small metallic shavings or parts to fall into the power supply. Internal arcing could result causing a possible fire hazard.
7. Replace input fuse only with a fuse of the same type and rating.
8. Repair and servicing should only be performed by qualified service personnel. See page 6 for return policy.
9. With voltage selector shunt removed, the auxiliary output voltage is the same as the high range. Do not remove shunt when voltage sensitive circuits are connected to the output.

3

## INSTALLATION AND ADJUSTMENTS

1. Inspect unit for visible transit damage. Should there be any cause for concern, please contact supplier before returning unit.
  2. Check that power supply is set to the correct input voltage i.e., 115/230VAC. Incorrect setting may damage the power supply. See Figure 2 for setting information.
  3. Connect as shown in Figure 1 (remote sense connections are optional—may be open circuit).
  4. Before switching on, check that the output selectors have been set to the desired voltage. See Figure 2 for selection information.
  5. The output voltage of the main rail can be set using R24. Clockwise adjustment increases output voltage.
  6. The output voltage of rails 2, 3 and 4 can be adjusted using the J1 connector shunt and R6 located on the appropriate daughter board. See Figure 2 for more information.
  7. **Use of remote sense terminals.** The terminals are identified by the numbers 1 and 2 stamped on the output terminal block. (The PCB is also marked with the letters —R.S.+). Connect a sense wire from the R.S. — terminal to the Ch. 1 RTN load terminal and from the R.S. + terminal to the Ch.1 + V load terminal.
- In order to minimize noise pick up, it is recommended that these wires form a twisted pair. Further improvements can be made by the use of screened cable, run separately from the power lead, which should also form a twisted pair if possible. It is also recommended that a 0.47 ufd ceramic capacitor and a 10 ufd electrolytic capacitor be connected across the load end of the remote sense leads.
8. **Use of remote on/off terminals.** The power supply output may be switched off from the secondary side of the power supply using a mechanical or electrical switch to place a short circuit across pins 1 and 2 of connector J3. Automatic start up occurs upon removal of the short.
  9. **The Power Good Signal is available on Pins 3 and 4 of connector J3.** The signal is TTL compatible and referenced to the main output ground. Logic 0 occurs when input power is removed. Logic 0 occurs at least 1 millisecond before the outputs drop to 5% below nominal voltage.

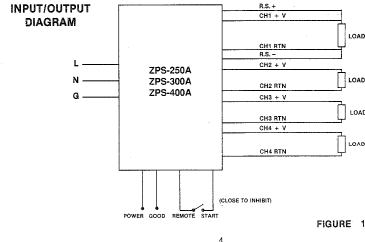
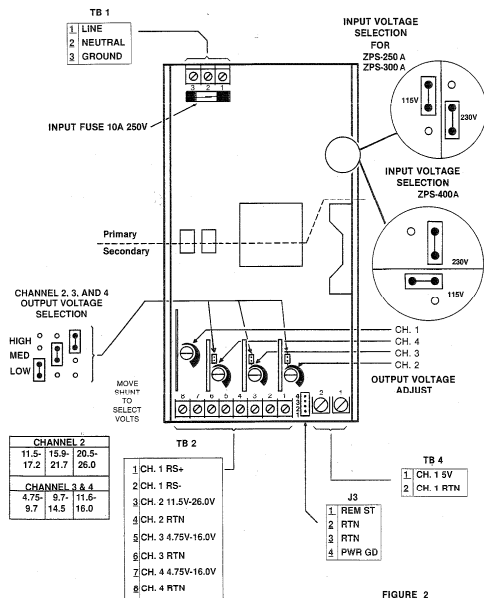


FIGURE 1

## ZENITH INPUT/OUTPUT VOLTAGE SELECTION DIAGRAM



5

FIGURE 2

## DAMAGE CLAIMS

The enclosed power supply was carefully inspected and approved prior to shipment from our factory. After inspection, any damage claims should be sent to the freight carrier.

If power supply has been damaged by the freight carrier, a claim for the cost of the power supply should be filed with the carrier for direct reimbursement. Be sure to include model and serial numbers of the damaged units in all correspondence to the freight carrier. In the interim, another power supply may be purchased from Zenith.

## ZENITH OEM CUSTOMER RETURN MATERIAL AUTHORIZATION (RMA) POLICY FOR SWITCH MODE POWER SUPPLIES

### WHEN PURCHASED THROUGH AN AUTHORIZED ZENITH DISTRIBUTOR:

Return to distributor for repair or replacement.

### WHEN PURCHASED DIRECTLY FROM ZENITH:

1. A Return Material Authorization (RMA) number is required for all product returns and the assigned number applies only to those units.
2. A valid purchase order for return of RMA units must be placed at the time the RMA number is assigned. The purchase order must reflect the unit price in effect at the time the RMA is assigned.
3. Failure symptoms are required to be attached to each unit submitted for repair.
4. The corresponding RMA number must be visible on the outside of the shipping cartons. If the shipping carton is not properly marked, the material will be rejected and shipped back freight collect. Incoming freight must be prepaid.
5. Units for repair must be shipped within two weeks of the RMA number assignment to:
 

Plant 51 -  
Zenith Electronics of Texas  
13007 Zane Gray Road  
El Paso, TX 79906
6. **OUT OF WARRANTY** units will be separated from **IN WARRANTY** units upon receipt at the repair plant.
7. Customer may not take a debit memo until warranty status information has been confirmed by Customer Service.

6

# Τροφοδοτικό Ισχύος ZPS\_400A (συνέχεια)

## IN WARRANTY UNITS

- A customer may issue a debit memo for IN WARRANTY units only, using the unit price in effect at the time the RMA number is assigned.
- Repaired units will be invoiced using the unit price reflected on debit memo.
- In warranty units received by Zenith with Check OK Classification\*\* will be returned freight collect and reinvoiced the amount shown on the debit memo, plus a service charge equal to 25% of that amount.

## OUT OF WARRANTY UNITS\*

- Customers will be notified of the quantity of OUT OF WARRANTY units.
- Customers may not issue a debit memo for OUT OF WARRANTY units.
- A charge equal to 55% of the unit price in effect at the time the RMA number is assigned will be for the repair of OUT OF WARRANTY units.
- A written Purchase Order to cover the cost of repair must be received by Customer Service before the repair of OUT OF WARRANTY units will be undertaken.
- OUT OF WARRANTY units will be held for 30 days after you are notified of the quantities. If a written purchase order for the repair charge is not received by this office within 30 days, these OUT OF WARRANTY units will be returned freight collect. You will be invoiced a service charge of 25% of the unit price in effect at the time the RMA number is assigned.
- Repaired OUT OF WARRANTY units will be shipped back to you freight collect.
- Upon request, Zenith will scrap non-repairable units. An invoice equal to 15% of the unit price in effect at the time the RMA number is assigned will be issued for this service.
- OUT OF WARRANTY units received by Zenith with Check OK Classification\*\* will be returned to you freight collect and you will be invoiced a charge equal to 25% of the unit price in effect at the time the RMA number is assigned.

\*Definition of Out of Warranty Units:  
A unit is out of warranty when the warranty period Zenith has set for that product has expired or when the product has been abused or stressed in such a way as stated in the warranty to void it.

\*\*Definition of Check OK Classification:  
An individual unit that is fully operational. A unit with a failure symptom attached will be fully tested to ensure that this failure does not occur upon testing.

7

## ELECTRICAL SPECIFICATIONS

<b>Input Voltage</b>	90-132 VAC or 180-264 VAC (user selectable).	<b>Regulation</b>	Line: $\pm 0.2\%$ all outputs Load: $\pm 0.2\%$ all outputs Cross: $\pm 0.2\%$ all outputs
<b>Input Current</b>	ZPS-250A 4.2A/2.5A ZPS-300A 4.9A/2.8A ZPS-400A 6.7A/3.9A	<b>Ripple &amp; Noise</b>	1% peak to peak all outputs (20 MHz Bandwidth) 10 $\mu$ F & 0.1 $\mu$ F external capacitance added.
<b>Input Frequency</b>	47-65 Hertz single phase.	<b>Transient Response</b>	A step load change of 25% at 1 Amps per microsecond will give rise to a maximum excursion of 4% (Ch. 1) or 3% (Ch. 2-4), returning to within 1% in less than 500 microseconds.
<b>Inrush Current Limiting</b>	Cold start inrush is limited to 70 Amps peak for one half cycle at 230 VAC.	<b>Start-up Surge Current</b>	1.5 times rated current for 5 seconds on Ch. 2 and Ch. 3.
<b>Input Fusing</b>	10 Amp, 250 Volt internal fuse.	<b>Overshoot</b>	No overshoot at turn on or turn off.
<b>Input Voltage Transients</b>	Protection to 1000 Volts for 50 microseconds exponentially decaying voltage spikes. (IEEE Standard 587-1980).	<b>Turn on Delay</b>	After the application of input power, output voltages will reach nominal values within one second.
<b>Leakage Current</b>	3.5mA maximum.	<b>Temperature Coefficient</b>	0.03% per °C maximum all outputs.
<b>Brownout Protection</b>	85 VAC in 115 Volt mode, 170 VAC in 230 Volt mode.	<b>Overvoltage Protection</b>	The power supply will be latched off in the event of an overvoltage condition (8.0V $\pm$ 0.2V) on the main output and can be restarted by cycling the AC power off for 15 seconds.
<b>Holdup Time</b>	At nominal AC line voltage (115/230 VAC) and full load, the output voltage will remain within regulation for 20ms (6ms at low line limit) after the removal of the AC line voltage.	<b>Short Circuit Protection</b>	The power supply will be latched off if a short circuit is applied to any output. Overload must be removed and input power cycled off for 15 seconds to reset.
<b>Efficiency</b>	75% efficiency at nominal input full load and maximum output voltage settings.	<b>Overload Protection</b>	The power supply will shut down if the sum of the total output power exceeds its power rating.
<b>Total Output Power</b>	Maximum total continuous power limited to values in table.	<b>Thermal Protection</b>	Automatic shut down if the switching transistor heat sink temperature exceeds 90 °C (typical). Automatic reset at elimination of excessive temperature.
<b>Startup Surge</b>	ZPS-250A 300W max. total output power ZPS-300A 360W max. total output power ZPS-400A 480W max. total output power		
<b>Voltage Range</b>	All outputs are fully adjustable between the voltages specified on page 2.		

8

## No-Load Operation

All outputs may be operated at no load. The main output must be loaded at minimum load or greater to obtain power from Ch. 2-4 outputs. Ch. 2-4 will regulate at  $\pm 3.0\%$  when loaded at less than minimum load.

## Output Polarity Protection

The power supply will be latched off in the event of a momentary application of a reverse voltage at up to rated output currents. Continuous reverse voltage current should be limited to 1A.

## Remote Sense

Remote sense on main output will compensate for up to a 250mV drop in power distribution cables. Protected against open sense leads.

## Load Capacitance

The main output is stable in the remote sensing mode when the remote sensing capacitance is at least 10 $\mu$ F per load ampere.

## Parallel Operation

In general, parallel operation is not recommended.

## Power Good Signal

Under nominal operating conditions, this signal is TTL compatible Logic 1. Upon loss of input power, a TTL compatible Logic 0 occurs. This signal is referenced to the main output return terminal. This signal appears at least 1 millisecond prior to the output dropping 5% below its nominal value. The output can sink 16mA in the low state.

## Remote Start

This signal also provides a 100ms minimum delay after the main 5V output is within regulation. The power supply can be remotely started with a user supplied electronic signal applied to the Remote Start terminal and referenced to the main output return terminal. The signal may be applied by either a TTL Logic, mechanical, or open collector driver.

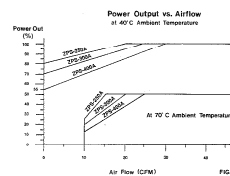
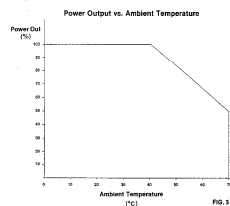
A logic 1, or open, turns on the unit. A logic 0, or short, turns off the unit.

**MTBF** 150,000 hours minimum at 25°C per MIL-STD-217E.

**Safety** UL 475, UL1950, CSA 22.2 No. 220, IEC 380, 435, 950, VDE 0806, VDE EN 60950.

**EMI** FCC Part 15J, Class B, VDE 0871, Class B.

**Operating Temperature** 0°C to +70°C (Full power maintained to +40°C. Output power linearly derated to 50% at +70°C).



**Storage Temperature** -10°C to +85°C. Unit should be stabilized at operating temperature range for 2 hours prior to operation.

**Relative Humidity** 0% to 90% noncondensing.

9

## MECHANICAL SPECIFICATIONS

<b>Size (L x W x H):</b>	ZPS-250A: 13.0" x 5.0" x 2.5" (33.02cm x 12.70cm x 6.35cm). ZPS-300A: 13.0" x 5.0" x 2.5" (33.02cm x 12.70cm x 6.35cm). ZPS-400A: 13.0" x 6.0" x 2.5" (33.02cm x 15.25cm x 6.35cm).
<b>Weight:</b>	ZPS-250A: 5.0 pounds (2.3 kilograms) ZPS-300A: 5.0 pounds (2.3 kilograms) ZPS-400A: 7.0 pounds (3.2 kilograms)
<b>Construction:</b>	Anodized aluminum U-channel Optional EMI cover
<b>Cooling:</b>	ZPS-250A: Forced air, 20 CFM minimum ZPS-300A: Forced air, 25 CFM minimum ZPS-400A: Forced air, 30 CFM minimum
<b>Shock &amp; Vibration (Non-operating):</b>	Meets MIL-STD-810C
<b>Outline Dimensions:</b>	See Figures 5 and 6.
<b>Mounting Hole Locations:</b>	See Figures 5 and 6.
<b>Input/Output Connections:</b>	See Figure 2

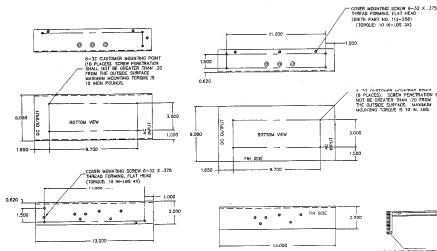



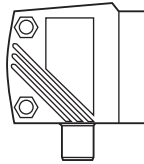


FIGURE 5

FIGURE 6

10



# Οπτικός Αισθητήρας Απόστασης EFFECTOR200

<p style="text-align: center;">ifm electronic </p> <p style="text-align: center;">Οδηγίες λειτουργίας Οπτικός αισθητήρας απόστασεων</p> <p style="text-align: center;"><b>EFFECTOR200</b> O1D100 O1D103</p> <p style="text-align: center;"><b>GR</b></p> <p style="text-align: center;"></p> <p style="text-align: center;">704991 / 00 06 / 2012</p> <p style="text-align: center;">CE</p>	<p><b>Inhalt</b></p> <p>1 Προεισαγωγική σημείωση .....4  1.1 Συμβολισμοί.....4  1.2 Προειδοποιητικά σήματα .....4  2 Οδηγίες ασφαλείας .....4  3 Τρόπος λειτουργίας και χαρακτηριστικά .....6  3.1 Εφαρμογές .....6  4 Λειτουργίες.....6  4.1 Λειτουργία υστέρησης εξόδου.....6  4.2 Λειτουργία παράθρου εξόδου .....6  4.3 Λειτουργία αναλογικής εξόδου.....6  5 Εγκατάσταση .....7  5.1 Παράμετροι εγκατάστασης .....7  5.2 Παρελκόμενα συναρμολόγησης .....7  6 Ηλεκτρική σύνδεση.....8  7 Στοιχεία λειτουργίας και ενδείξεων.....9  8 Μενού .....10  8.1 Δομή μενού .....10  8.2 Επεξήγηση του μενού.....11  9 Τρόποι λειτουργίας .....13  9.1 Κανονική λειτουργία.....13  9.2 Λειτουργία απεικόνισης.....13  9.3 Λειτουργία ευθυγράμμισης .....13  9.4 Λειτουργία προγραμματισμού.....13  10. Παραμετροποίηση .....14  10.1 Παραμετροποίηση γενικά .....14  10.1.1 Παραμετροποίηση τιμών .....14  10.1.2 Αλλάζοντας από το μενού επιπέδου 1 στο 2 .....15  10.1.3 Ηλεκτρονικό κλειδί.....15  10.2 Διαμόρφωση των βασικών ρυθμίσεων .....16  10.2.1 Επιλογή μονάδας ένδειξης σθόνης.....16  10.2.2 Ρύθμιση σθόνης .....16  10.2.3 Διαμόρφωση εξόδου 1 (OUT1) .....16</p> <p style="text-align: center;">2</p>
<p>10.2.4 Λειτουργία υστέρησης.....17  10.2.5 Ρύθμιση του σημείου μεταγωγής στη λειτουργία υστέρησης OUT1..18  10.2.6 Λειτουργία παράθρου.....18  10.2.7 Ρύθμιση των σημείων μεταγωγής για τη λειτουργία παράθρου OUT1 .....19  10.2.8 Διαμόρφωση του OUT2 .....20  10.2.9 Ρύθμιση του σημείου μεταγωγής στη λειτουργία υστέρησης OUT2..20  10.2.10 Ρύθμιση των σημείων μεταγωγής για τη λειτουργία παράθρου OUT2.....20  10.2.11 Αλλαγή κλίμακας εύρους μέτρησης (αναλογική έξοδος).....20  10.3 Λειτουργία εκμάθησης (teach) .....22  10.3.1 Ρύθμιση βαθμού δειγματοληψίας .....22  10.3.2 Ρύθμιση επαναληψιμότητας .....22  10.3.3 Πίνακας επαναληψιμότητας και ακριβείας.....23  10.4 Επεκτεταμένες λειτουργίες .....25  10.4.1 Ρύθμιση χρονικής καθυστέρησης για εξόδους μεταγωγής .....25  10.4.2 Ρύθμιση φιλμωσης μετρούμενου σήματος.....25  10.4.3 Επαναφορά όλων των παραμέτρων στις εργοστασιακές ρυθμίσεις..25  10.4.4 Ένδειξη του αριθμού έκδοσης του λογισμικού.....25</p> <p>11 Εγκατάσταση / Λειτουργία.....25  11.1 Μηνύματα λάθους.....26  12 Συντήρηση, επιδιόρθωση και καταστροφή .....26  13 Σχέδιο διαστάσεων .....27  14 Εργοστασιακές ρυθμίσεις .....28</p> <p style="text-align: center;">3</p>	<p><b>1 Προεισαγωγική σημείωση</b></p> <p><b>1.1 Συμβολισμοί</b></p> <p>► Οδηγία  &gt; Αντίδραση, αποτέλεσμα  [...] Επεξήγηση των πλήκτρων επαφής, μπουτόν ή ενδείξεων  → Σημείο αναφοράς</p> <p> Σημαντική σημείωση  Η μη συμμόρφωση μπορεί να οδηγήσει σε δυσλειτουργίες ή παρεμβολή.</p> <p> Πληροφορία  Συμπληρωματική σημείωση.</p> <p><b>1.2 Προειδοποιητικά σήματα</b></p> <p><b>⚠ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗ</b>  Προειδοποίηση για σοβαρό τραυματισμό.  Θάνατος ή σοβαροί μη αναστρέψιμοι τραυματισμοί μπορεί να προκληθούν.</p> <p><b>2 Οδηγίες ασφαλείας</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Παρακαλούμε διαβάστε αυτό το έντυπο πριν προετοιμάσετε για λειτουργία την συσκευή. Διασφαλίστε ότι το προϊόν είναι κατάλληλο για την εφαρμογή σας χωρίς περιορισμούς.</li> <li>• Εσφαλμένη ή μη συμβατή χρήση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα δυσλειτουργία της συσκευής ή ακόμα και ανεπιθύμητα αποτελέσματα στην εφαρμογή σας. Γι' αυτόν το λόγο η εγκατάσταση, ηλεκτρική σύνδεση, λειτουργία και συντήρηση της συσκευής θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μόνο από εξειδικευμένο προσωπικό εξουσιοδοτημένο από το χειριστή της μηχανής.</li> <li>• Σε περίπτωση δυσλειτουργίας της συσκευής παρακαλούμε επικοινωνήστε με τον κατασκευαστή. Αν η συσκευή έχει υποστεί οποιαδήποτε επέμβαση ή μετατροπή, τότε κάθε υποχρέωση και εγγύηση αποκλείονται.</li> </ul> <p style="text-align: center;">4</p>

## Οπτικός Αισθητήρας Απόστασης EFFECTOR200 (συνέχεια)

### ⚠️ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗ

Ορατό φως λέιζερ - Λέιζερ βαθμού προστασίας κατηγορίας 2.

Η χρήση άλλων μεθόδων ελέγχου ή ρυθμίσεων πέρα από τις συνιστώμενες μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την έκθεση σε επικίνδυνη ραδιενέργεια. Είναι πιθανή ζημιά στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού.

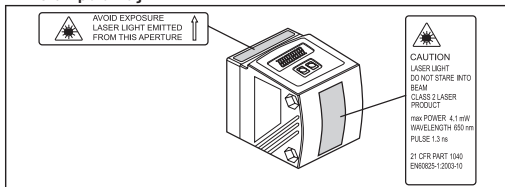
- ▶ Μην κοιτάτε μέσα στη δέσμη του λέιζερ!
- ▶ Τοποθετήστε τις εσωκλειστές ετικέτες (laser warning) πολύ κοντά στην συσκευή σε ευδιάκριτη θέση.
- ▶ Συμμορφωθείτε στα μηνύματα προειδοποίησης και κινδύνου που αναφέρονται στην ετικέτα του προϊόντος.
- ▶ Χρησιμοποιήστε την εσωκλειστή ετικέτα για το καλώδιο τροφοδοσίας.

GR

### Ετικέτα για το καλώδιο τροφοδοσίας



### Ετικέτα προϊόντος



5

### 3 Τρόπος λειτουργίας και χαρακτηριστικά

Η συσκευή χρησιμοποιείται ως οπτικός αισθητήρας αποστάσεων.

#### 3.1 Εφαρμογές

- Ο οπτικός αισθητήρας αποστάσεων μετράει αποστάσεις από 0.2 έως και 10 m.
- Έχει καταστολή φόντου σε αποστάσεις > 10...19 m.
- Η τιμή μέτρησης εμφανίζεται σε οθόνη 10 τμημάτων.
- Σύμφωνα με τη ρύθμιση των λειτουργιών εξόδου, 2 σήματα εξόδου μπορούν να παραχθούν.
- O1D100: Πιστοποιητικό 21 CFR PART 1040



Η απόσταση ανάμεσα στον αισθητήρα και στο φόντο πρέπει να περιοριστεί το μέγιστο στα 19 m, από τη χρήση. Διαφορετικά η τιμή μέτρησης μπορεί να είναι διαφορετική. → 5.1 Παράμετροι εγκατάστασης  
Ως εναλλακτικός κωδικός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο O1D105 (απόσταση μεταξύ αισθητήρα και φόντου μπορεί να είναι έως 100 m).

### 4 Λειτουργίες

#### 4.1 Λειτουργία υστέρησης εξόδου

Η υστέρηση διατηρεί την κατάσταση μεταγωγής της εξόδου σταθερή, εάν η μετρούμενη τιμή έχει διακυμάνσεις γύρω από την απόσταση ανίχνευσης. Και οι δύο εξόδοι (OUT1 και OUT2) μπορούν να ρυθμιστούν με λειτουργία υστέρησης. → 10.2.4 Λειτουργία υστέρησης

#### 4.2 Λειτουργία παράθυρου εξόδου

Η λειτουργία παράθυρου επιτρέπει την επιτήρηση μίας καθορισμένης αποδεκτής περιοχής. Και οι δύο εξόδοι (OUT1 και OUT2) μπορούν να ρυθμιστούν με λειτουργία παράθυρου.

→ 10.2.6 Λειτουργία παράθυρου

#### 4.3 Λειτουργία αναλογικής εξόδου

Ο αισθητήρας μπορεί επίσης να παράγει αναλογικό σήμα στην έξοδο 2 (OUT2) ανάλογο της απόστασης. → 10.2.11 Αλλαγή κλίμακας εύρους μέτρησης (αναλογική έξοδος)

6

### 5 Εγκατάσταση

#### 5.1 Παράμετροι εγκατάστασης

- ▶ Εγκαταστήστε την συσκευή έτσι ώστε το υπό ανίχνευση αντικείμενο να είναι εντός του εύρους μέτρησης 0.2...10 m.

Το όριο μονοσήμαντης αναγνώρισης του αισθητήρα είναι καθορισμένο στα 19.2 m. Αντικείμενα σε απόσταση ανίχνευσης > 10...19.2 m καταστρέφονται.

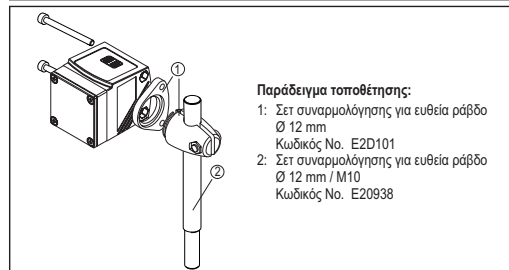
- ⚠️ Γυαλιστερά αντικείμενα στην ευθεία της δέσμης του αισθητήρα - όπως επίσης και σε αποστάσεις > 19.2 m - θα πρέπει να αποφεύγονται από το χρήστη. Διαφορετικά οι τιμές μέτρησης μπορεί να είναι διαφορετικές.

GR

#### 5.2 Παρελκόμενα συναρμολόγησης

Η συσκευή διατίθεται χωρίς παρελκόμενα συναρμολόγησης.

Παράδειγμα παρελκόμενων συναρμολόγησης	Κωδικός No.
Κάλυμμα προστασίας O1D	E21133
Σετ συναρμολόγησης E2D101 + E20938 + E20951	E21079
Σετ συναρμολόγησης O1D (για ράβδο Ø 12 mm)	E2D101
Σετ συναρμολόγησης για ευθεία ράβδο Ø 12 mm / M10	E20938
Σετ συναρμολόγησης O1D (για ράβδο Ø 14 mm)	E2D111
Σετ συναρμολόγησης για ευθεία ράβδο Ø 14 mm / M12	E20939
Εξάρτημα στήριξης για μικρομετρική ρύθμιση των λέιζερ O1D (ράβδος ή ελεύθερη τοποθέτηση - εξαρτάται από τον σφικτήρα)	E1D100



7

### 6 Ηλεκτρική σύνδεση



Η συσκευή θα πρέπει να συνδεθεί από εξειδικευμένο ηλεκτρολόγο.

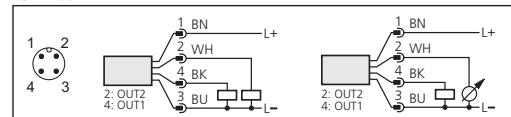
- ▶ Οι εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί για την εγκατάσταση ηλεκτρολογικού εξοπλισμού πρέπει να τηρούνται πιστά.

- ▶ Διασφαλίστε τάση τροφοδοσίας σύμφωνα με EN 50178, SELV, PELV. O1D100: cULus, ηλεκτρική τροφοδοσία κατηγορίας 2

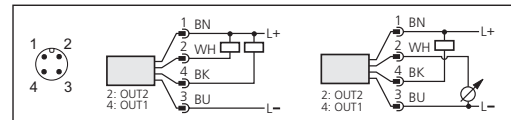
- ▶ Αποσυνδέστε την τροφοδοσία.

- ▶ Συνδέστε το καλώδιο όπως παρακάτω:

#### O1D100 PNP



#### O1D103 NPN



Χρώματα κλώνων των ifm βυσμάτων:

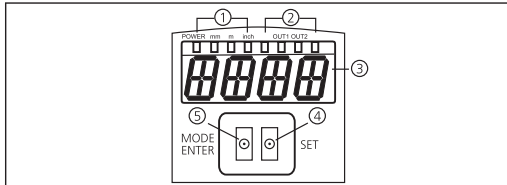
1 = BN (καφέ), 2 = WH (άσπρο), 3 = BU (μπλέ), 4 = BK (μαύρο)

8



# Οπτικός Αισθητήρας Απόστασης EFFECTOR200 (συνέχεια)

## 7 Στοιχεία λειτουργίας και ενδείξεων



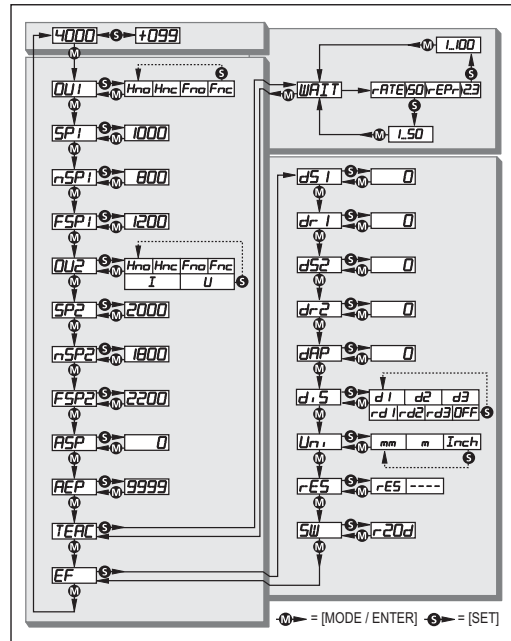
1: 4 x LED πράσινα	Αναμμένο LED = ένδειξη τροφοδοσίας και μονάδας μέτρησης (mm, m, inch)
2: 4 x LED κίτρινα (δύο ανενεργά)	Ένδειξη της κατάστασης μεταγωγής - ανάβει, όταν είναι ενεργοποιημένη η αντίστοιχη έξοδος.
3: Αλφαριθμητική οθόνη 4-ψηφίων	Ένδειξη της μετρούμενης απόστασης, παραμέτρων και τιμών παραμέτρων.
4: Πλήκτρο προγραμματισμού [SET]	Παραμετροποίηση τιμών (κύλιση τιμής αν το κρατήσετε πατημένο, αυξάνει την τιμή αν το πατήσετε μία φορά).
5: Πλήκτρο προγραμματισμού [MODE/ENTER]	Επιλογή των παραμέτρων και επιβεβαίωση των τιμών τους.

GR

9

## 8 Μενού

### 8.1 Δομή μενού



10

## 8.2 Επεξήγηση του μενού

Για τις εργασιαστικές ρυθμίσεις παρακαλούμε ανατρέξτε στο τέλος αυτών των οδηγιών (→ 14 Εργασιαστικές ρυθμίσεις).

<b>OU 1</b>	<b>Διαμόρφωση εξόδου 1</b> Μπορούν να επιλεγθούν 4 λειτουργίες μεταγωγής: [Hno], [Hnc], [Fno], [Fnc] → 10.2.3 Διαμόρφωση εξόδου OUT1
<b>SP 1</b>	<b>Σημείο μεταγωγής της λειτουργίας υστέρησης OUT1</b> Τιμή ορίου κατά την οποία η έξοδος με την επιλεγμένη υστέρηση αλλάζει κατάσταση μεταγωγής (αντικείμενο πιο κοντά/μακριά από την ορισμένη απόσταση). [SP1] είναι ενεργό μόνο αν [OU1] = [Hno] ή [Hnc]. → 10.2.5 Ρύθμιση του σημείου μεταγωγής για τη λειτουργία υστέρησης OUT1
<b>nSP 1</b> <b>FSP 1</b>	<b>Σημεία μεταγωγής για τη λειτουργία παραθύρου OUT1</b> Τιμή ορίου κατά την οποία η έξοδος με την επιλεγμένη λειτουργία παραθύρου αλλάζει κατάσταση μεταγωγής (αντικείμενο παρών/απών ανάμεσα στην απόσταση "κοντά" και στην απόσταση "μακριά"). [nSP1] = σημείο μεταγωγής "κοντά" / [FSP1] = σημείο μεταγωγής "μακριά". [nSP1] / [FSP1] είναι ενεργά μόνο αν [OU1] = [Fno] ή [Fnc]. → 10.2.7 Ρύθμιση των σημείων μεταγωγής για τη λειτουργία παραθύρου OUT1
<b>OU 2</b>	<b>Διαμόρφωση εξόδου 2</b> Μπορούν να επιλεγθούν 4 λειτουργίες μεταγωγής και 2 αναλογικά σήματα: [Hno], [Hnc], [Fno], [Fnc], [U] → 10.2.8 Διαμόρφωση εξόδου 2 (OUT2)
<b>SP 2</b>	<b>Σημείο μεταγωγής της λειτουργίας υστέρησης OUT2</b> Τιμή ορίου κατά την οποία η έξοδος με την επιλεγμένη υστέρηση αλλάζει κατάσταση μεταγωγής (αντικείμενο πιο κοντά/μακριά από ορισμένη απόσταση). [SP2] είναι ενεργό μόνο αν [OU2] = [Hno] ή [Hnc]. → 10.2.9 Ρύθμιση του σημείου μεταγωγής στη λειτουργία υστέρησης OUT2
<b>nSP 2</b> <b>FSP 2</b>	<b>Σημεία μεταγωγής για τη λειτουργία παραθύρου OUT2</b> Τιμή ορίου κατά την οποία η έξοδος με την επιλεγμένη λειτουργία παραθύρου αλλάζει κατάσταση μεταγωγής (αντικείμενο παρών/απών ανάμεσα στην απόσταση "κοντά" και στην απόσταση "μακριά"). [nSP2] = σημείο μεταγωγής "κοντά" / [FSP2] = σημείο μεταγωγής "μακριά". [nSP2] / [FSP2] είναι ενεργά μόνο αν [OU2] = [Fno] ή [Fnc]. → 10.2.10 Ρύθμιση των σημείων μεταγωγής για τη λειτουργία παραθύρου OUT2

11

<b>ASP</b>	<b>Αναλογικό αρχικό σημείο</b> Τιμή μέτρησης στην οποία παρέχεται σήμα 4 mA / 0 V. [ASP] είναι ενεργό μόνο αν [OU2] = [I] ή [U]. → 10.2.11 Αλλαγή κλίμακας εύρους μέτρησης (αναλογική έξοδος)
<b>AEP</b>	<b>Αναλογικό τελικό σημείο</b> Τιμή μέτρησης στην οποία παρέχεται σήμα 20 mA / 10 V. [AEP] είναι ενεργό μόνο αν [OU2] = [I] ή [U]. → 10.2.11 Αλλαγή κλίμακας εύρους μέτρησης (αναλογική έξοδος)
<b>TEAC</b>	<b>Λειτουργία εκμάθησης (teach)</b> Επιλογή "ρυθμός δειγματοληψίας" ή "επαναληψιμότητα" → 10.3 Λειτουργία εκμάθησης (teach)
<b>EF</b>	<b>Επεκτεταμένες λειτουργίες</b> Πατήστε [SET] για να ανοίξετε το υπομενού "Επεκτεταμένες λειτουργίες" → 10.4 Επεκτεταμένες λειτουργίες
<b>dS 1</b> <b>dr 1</b>	<b>Καθυστέρηση των εξόδων μεταγωγής</b> [dSx] = χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης; [drx] = χρονοκαθυστέρηση σβήσιματος Η λειτουργία εξόδου δεν αλλάζει την κατάσταση της μεταγωγής όταν οριστούν οι παράμετροι, παρά μόνο όταν παρέλθει η χρονοκαθυστέρηση. Εάν η κατάσταση μεταγωγής δεν ισχύει μετά το πέρας της χρονοκαθυστέρησης, τότε η κατάσταση της εξόδου δεν αλλάζει. [dS2] και [dr2] δεν έχουν ισχύ αν [OU2] = [I] ή [U]. → 10.4.1 Ρύθμιση χρονοκαθυστέρησης για εξόδους μεταγωγής
<b>dS 2</b> <b>dr 2</b>	<b>Φίμωση μετρούμενου σήματος</b> Αυτή η λειτουργία επιτρέπει την καταστολή σύντομου κορεσμού του στοιχείου μέτρησης (τέτοιος κορεσμός μπορεί να προκληθεί από απευθείας ανάκλαση ή μεγάλες διακυμάνσεις της φωτεινότητας). Κατά την ενεργοποίηση της καθυστέρησης, εμφανίζεται η τελευταία αξιόπιστη τιμή μέτρησης, τα σήματα εξόδου παραμένουν αμετάβλητα. → 10.4.2 Ρύθμιση φίμωσης μετρούμενης τιμής
<b>d1, 5</b>	<b>Ρυθμίσεις οθόνης</b> Μπορούν να επιλεγθούν 7 ρυθμίσεις: [d1], [d2], [d3], [rd1], [rd2], [rd3], [OFF] 10.2.2 Ρύθμιση οθόνης
<b>Urr</b>	<b>Ρύθμιση της μονάδας ένδειξης οθόνης</b> Επιλογή της μονάδας μέτρησης για [SP1], [SP2], [ASP], [AEP] Επιλογές: [mm] [m] [inch] → 10.2.1 Επιλογή μονάδας ένδειξης οθόνης

12

# Οπτικός Αισθητήρας Απόστασης EFFECTOR200 (συνέχεια)

<b>RES</b>	<b>Επαναφορά εργοστασιακών ρυθμίσεων</b> → 10.4.3 Επαναφορά όλων των παραμέτρων στις εργοστασιακές ρυθμίσεις
<b>SW</b>	<b>Εμφάνιση του αριθμού έκδοσης του λογισμικού</b> → 10.4.4 Εμφάνιση του αριθμού έκδοσης του λογισμικού

## 9 Τρόποι λειτουργίας

### 9.1 Κανονική λειτουργία

Η κανονική λειτουργία είναι η φυσιολογική λειτουργία.

Μόλις τροφοδοτηστεί, η συσκευή ξεκινά σε κανονική λειτουργία. Εφαρμόζει τις λειτουργίες επιτήρησης και παράγει σήματα εξόδου σύμφωνα με τις προκαθορισμένες παραμέτρους.

Η οθόνη ενδείξεων δείχνει την τρέχουσα απόσταση, τα κίτρινα LEDs απεικονίζουν την κατάσταση εξόδων.

### 9.2 Λειτουργία απεικόνισης

Ένδειξη των παραμέτρων και ρύθμιση των τιμών τους.

▶ Πατήστε για λίγο [MODE/ENTER].

> Η συσκευή πηγαίνει σε λειτουργία απεικόνισης. Εσωτερικά παραμένει σε λειτουργία.

Οι τιμές των παραμέτρων μπορούν να αναγνωστούν.

▶ Για να κυλιέστε τις παραμέτρους, πιέστε για λίγο [MODE/ENTER].

▶ Για να εμφανίσετε τις αντίστοιχες τιμές τους, πιέστε για λίγο [SET].

> Μετά από 15 δευτερόλεπτα η συσκευή επιστρέφει σε κανονική λειτουργία.

### 9.3 Λειτουργία ευθυγράμμισης

Ένδειξη τιμής προσανατολισμού ισχύος σήματος.

▶ Πιέστε [SET] σε κανονική λειτουργία.

> Η συσκευή εμφανίζει την τιμή προσανατολισμού για την ισχύ του σήματος (+100 αντιστοιχεί σε λευκό αντικείμενο, +020 σε γκρι αντικείμενο).

### 9.4 Λειτουργία προγραμματισμού

Ρύθμιση των παραμέτρων → 10.1 Παραμετροποίηση γενικά

GR

13

## 10. Παραμετροποίηση

Κατά τη διάρκεια της παραμετροποίησης η συσκευή παραμένει εσωτερικά σε λειτουργία. Συνεχίζει την επιτήρηση με τις τρέχουσες παραμέτρους μέχρι να ολοκληρωθεί η αλλαγή.

### 10.1 Παραμετροποίηση γενικά

#### 10.1.1 Παραμετροποίηση τιμών

! Επιλογή μονάδας μέτρησης [Uni] πριν καθορίσετε τις τιμές των παραμέτρων. Σε περίπτωση μεταγενέστερων αλλαγών της μονάδας ένδειξης μπορεί να παρουσιαστούν λάθη στρωγγυλοποίησης κατά τον εσωτερικό υπολογισμό των ρυθμιζόμενων τιμών.  
→ 10.2.1 Επιλογή μονάδας μέτρησης οθόνης

<b>1</b>	<b>Επιλογή παραμέτρου</b> ▶ Πατήστε [MODE/ENTER] μέχρι να εμφανιστεί η ζητούμενη παράμετρος.	
<b>2</b>	<b>Παραμετροποίηση τιμών</b> ▶ Πατήστε [SET] και κρατήστε το πατημένο. > Η τρέχουσα τιμή της παραμέτρου αναβοβλίνει για 5 s. ▶ Αυξήστε την επιθυμητή τιμή πατώντας το μπουτόν μία φορά ή συνεχόμενα κρατώντας το πατημένο. Μείωση της τιμής: Αφήστε τη συσκευή να φτάσει στη μέγιστη ρυθμιζόμενη τιμή. Τότε ο κύκλος ξεκινά ξανά από τη μικρότερη ρυθμιζόμενη τιμή.	
<b>3</b>	<b>Επιβεβαίωση της παραμετροποίησης</b> ▶ Πατήστε [MODE/ENTER] για λίγο. > Η παράμετρος απεικονίζεται ξανά, η νέα ορισθείσα τιμή είναι ενεργή.	
<b>4</b>	<b>Ρύθμιση άλλων παραμέτρων</b> ▶ Ξεκινήστε ξανά από το βήμα 1.	
<b>5</b>	<b>Τελειώστε τη ρύθμιση παραμέτρων</b> ▶ Περιμένετε για 15 s ή πατήστε [MODE/ENTER]. > Η τρέχουσα μέτρηση εμφανίζεται.	

14

### 10.1.2 Αλλάζοντας από το μενού επιπέδου 1 στο 2

▶ Πατήστε [MODE/ENTER] αρκετές φορές μέχρι να εμφανιστεί [EF].	
▶ Πατήστε [SET] για λίγο. > Η πρώτη παράμετρος από το υπομενού εμφανίζεται (εδώ: [dr1]).	

GR

### 10.1.3 Ηλεκτρονικό κλειδίωμα

Η συσκευή μπορεί να κλειδωθεί ηλεκτρονικά για την αποφυγή καταλάθος εσφαλμένων ρυθμίσεων. Κατά την παράδοση η συσκευή δεν είναι κλειδωμένη.

<b>Κλειδίωμα</b> ▶ Βεβαιωθείτε ότι η συσκευή είναι σε κανονική λειτουργία. ▶ Κρατήστε τα [MODE/ENTER] + [SET] μαζί πατημένα έως ότου η ένδειξη [Loc] εμφανιστεί. > Η συσκευή είναι κλειδωμένη. [Loc] εμφανίζεται στην οθόνη, εάν κατά τη λειτουργία της συσκευής προσπαθήσετε να αλλάξετε κάποια παράμετρο.	
<b>Ξεκλειδίωμα</b> ▶ Κρατήστε τα [MODE/ENTER] + [SET] μαζί πατημένα έως ότου η ένδειξη [uLoc] εμφανιστεί. > Η συσκευή είναι ξεκλειδωτή.	

### Λήξη χρόνου αναμονής:

! Εάν δεν πατήσετε κανένα μπουτόν για 15 s κατά τη διάρκεια της ρύθμισης, τότε η συσκευή επανέρχεται στην κανονική λειτουργία χωρίς αλλαγές.

15

## 10.2 Διαμόρφωση των βασικών ρυθμίσεων

### 10.2.1 Επιλογή μονάδας ένδειξης οθόνης

Ορίστε [Uni] πριν καθορίσετε τιμές για τις παραμέτρους [SPx], [nSPx], [FSPx], [ASP], [AEP].  
Σε περίπτωση μεταγενέστερων αλλαγών της μονάδας ένδειξης οθόνης μπορεί να παρουσιαστούν λάθη στρωγγυλοποίησης κατά τον εσωτερικό υπολογισμό των ρυθμιζόμενων τιμών.

▶ Αλλάξτε σε [EF].  
▶ Επιλέξτε [Uni] και ορίστε τη μονάδα μέτρησης.  
Επιλογή της συσκευής μέτρησης: [mm], [m], [inch]  
▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].  
> Η επιλεγμένη μονάδα απεικονίζεται με πράσινο LED στην οθόνη ενδείξεων.

Uni

### 10.2.2 Ρύθμιση οθόνης

▶ Αλλάξτε σε [EF].  
▶ Επιλέξτε [diS] και κάντε τις ρυθμίσεις.  
Μπορούν να επιλεγθούν 7 ρυθμίσεις:  
• [d1] = ανανέωση της τιμής μέτρησης κάθε 50 ms.  
• [d2] = ανανέωση της τιμής μέτρησης κάθε 200 ms.  
• [d3] = ανανέωση της τιμής μέτρησης κάθε 600 ms.  
• [rd1], [rd2], [rd3] = οθόνη ενδείξεων όπως [d1], [d2], [d3] με περιστροφή κατά 180°.  
Η ανανέωση της τιμής μέτρησης αναφέρεται μόνο στην οθόνη ενδείξεων. Δεν έχει καμία επίδραση στις εξόδους.  
• [OFF] = Η ένδειξη της οθόνης απενεργοποιείται στην κανονική λειτουργία.  
Πατήστε ένα μπουτόν για να εμφανίσει την τρέχουσα μετρούμενη τιμή για 15 s.  
▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].  
Τα LED παραμένουν ενεργά ακόμα και όταν η οθόνη ενδείξεων απενεργοποιηθεί.

di S

### 10.2.3 Διαμόρφωση εξόδου 1 (OUT1)

▶ Επιλέξτε και ενεργοποιήστε τις λειτουργίες μεταγωγής.  
Λειτουργίες μεταγωγής:  
• [Hno] = λειτουργία υστέρησης / ανοικτή επαφή NO  
• [Hnc] = λειτουργία υστέρησης / κλειστή επαφή NC  
• [Fno] = λειτουργία παραθύρου / ανοικτή επαφή NO  
• [Fnc] = λειτουργία παραθύρου / κλειστή επαφή NC  
▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].

OU 1

16

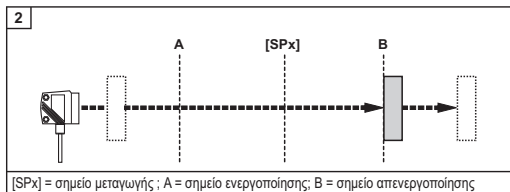
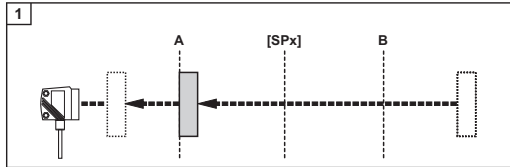
## Οπτικός Αισθητήρας Απόστασης EFFECTOR200 (συνέχεια)

### 10.2.4 Λειτουργία υστέρησης

Η υστέρηση διατηρεί την κατάσταση μεταγωγής της εξόδου σταθερή εάν η μετρούμενη τιμή μεταβάλλεται γύρω από την τιμή της απόστασης ανίχνευσης. Σε κάθε περίπτωση τα σημεία ενεργοποίησης και απενεργοποίησης είναι ορισμένα συμμετρικά γύρω από το επιλεγμένο σημείο μεταγωγής [SPx]. Η υστέρηση είναι η απόσταση ανάμεσα στα σημεία ενεργοποίησης και απενεργοποίησης - υπολογίζεται βάσει της επαναληψιμότητας με βαθμό ασφαλείας 1.5.

#### Παράδειγμα Ηho

1. Για την λειτουργία εξόδου [Hno] η έξοδος ενεργοποιείται όταν το αντικείμενο προσεγγίζει και όταν φθάσει στο σημείο μεταγωγής (A).
2. Όταν το αντικείμενο απομακρυνθεί, η έξοδος δεν απενεργοποιείται μέχρι να υπερβεί το σημείο απενεργοποίησης (B).  
Το σημείο απενεργοποίησης (B) είναι μεγαλύτερο του σημείου ενεργοποίησης (A).



[SPx] = σημείο μεταγωγής ; A = σημείο ενεργοποίησης ; B = σημείο απενεργοποίησης

Όταν έχει επιλεγεί η λειτουργία εξόδου [Hnc], το σημείο ενεργοποίησης και το σημείο απενεργοποίησης αντιστρέφονται. Η έξοδος απενεργοποιείται όταν το αντικείμενο προσεγγίζει. Όταν το αντικείμενο απομακρυνθεί, η έξοδος ενεργοποιείται.

GR

17

### Κατάσταση μεταγωγής εξόδων

Λειτουργία εξόδου	Απόσταση αντικείμενου (D)	Κατάσταση εξόδου
[Hno]	$D < [SPx]$	Κλειστή
	$D > [SPx]$	Ανοιχτή
[Hnc]	$D < [SPx]$	Ανοιχτή
	$D > [SPx]$	Κλειστή

#### Παράδειγμα της λειτουργίας εξόδου [Hno]

Δειγματοληψία στα 50 Hz, απόσταση αντικείμενου 1200 mm, γκρι τιμή (18 % αναπόκλιση):  
Υστέρηση = ± 10 mm (επαναληψιμότητα → 10.3.3 πίνακας) x συντελεστή 1.5 = 15 mm  
- Σημείο απενεργοποίησης 1200 mm + (15 mm) = 1215 mm  
- Σημείο ενεργοποίησης 1200 mm - (15 mm) = 1185 mm

### 10.2.5 Ρύθμιση του σημείου μεταγωγής στη λειτουργία υστέρησης OUT1

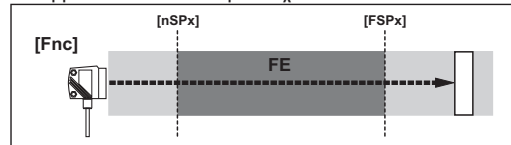
- ▶ Επιλογή της λειτουργίας εξόδου [Hno] ή [Hnc] στα [OU1].
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].
- ▶ Επιλέξτε [SP1] και ρυθμίστε το σημείο μεταγωγής.
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].

**OU 1**  
**SP 1**

### 10.2.6 Λειτουργία παραθύρου

Είναι δυνατό να καθορίσετε ένα παράθυρο για αναγνώριση αντικείμενου για κάθε μία από τις δύο εξόδους (OUT1 / OUT2).

#### Απενεργοποιείται όταν το αντικείμενο ανιχνευθεί

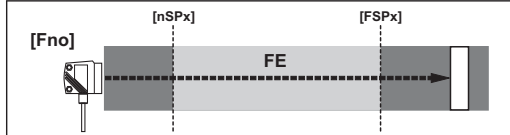


[nSPx] = σημείο μεταγωγής "κοντά"; [FSPx] = σημείο μεταγωγής "μακριά"; FE = παράθυρο

Εάν οι τιμές μέτρησης είναι μεταξύ του σημείου μεταγωγής "κοντά" [nSPx] και του σημείου μεταγωγής "μακριά" [FSPx], τότε η έξοδος είναι ανοιχτή (όταν [OUx] = [Fnc]).

18

### Αλλάζει κατάσταση όταν ανιχνευθεί το αντικείμενο



[nSPx] = σημείο μεταγωγής "κοντά"; [FSPx] = σημείο μεταγωγής "μακριά"; FE = παράθυρο

Εάν οι τιμές μέτρησης είναι μεταξύ του σημείου μεταγωγής "κοντά" [nSPx] και του σημείου μεταγωγής "μακριά" [FSPx], τότε η έξοδος είναι κλειστή (όταν [OUx] = [Fno]).

#### Κατάσταση μεταγωγής εξόδων

Λειτουργία εξόδου	Απόσταση αντικείμενου (D)	Κατάσταση εξόδου
[Fno]	$D < [nSPx]$	Ανοιχτή
	$D > [FSPx]$	Ανοιχτή
	$[nSPx] < D < [FSPx]$	Κλειστή
[Fnc]	$D < [nSPx]$	Κλειστή
	$D > [FSPx]$	Κλειστή
	$[nSPx] < D < [FSPx]$	Ανοιχτή

Και οι δύο οριοθετημένες τιμές του παραθύρου ([nSPx] και [FSPx]) λειτουργούν με υστέρηση → 10.2.4 Λειτουργία υστέρησης / παράδειγμα της λειτουργίας εξόδου [Hno].

### 10.2.7 Ρύθμιση των σημείων μεταγωγής για τη λειτουργία παραθύρου OUT1

- ▶ Επιλογή της λειτουργίας εξόδου [Fno] ή [Fnc] στα [OU1].
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].
- ▶ Επιλογή [nSP1] και ρυθμίστε το σημείο μεταγωγής "κοντά".
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].
- ▶ Επιλογή [FSP1] και ρυθμίστε το σημείο μεταγωγής "μακριά".
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].

**OU 1**  
**nSP 1**  
**FSP 1**

GR

19

### 10.2.8 Διαμόρφωση του OUT2

- ▶ Επιλέξτε [OU2].
- ▶ Ενεργοποιήστε την λειτουργία μεταγωγής ή τα αναλογικά σήματα:
  - [Hno] = λειτουργία υστέρησης / ανοικτή επαφή NO
  - [Hnc] = λειτουργία υστέρησης / κλειστή επαφή NC
  - [Fno] = λειτουργία παραθύρου / ανοικτή επαφή NO
  - [Fnc] = λειτουργία παραθύρου / κλειστή επαφή NC
  - [I] = αναλογική έξοδος 4...20 mA
  - [U] = αναλογική έξοδος 0...10 V
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].

**OU 2**

### 10.2.9 Ρύθμιση του σημείου μεταγωγής στη λειτουργία υστέρησης OUT2

- ▶ Επιλογή [Hno] ή [Hnc] στα [OU2].
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].
- ▶ Επιλέξτε [SP2] και ρυθμίστε το σημείο μεταγωγής.
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].

**OU 2**  
**SP 2**

→ 10.2.4 Λειτουργία υστέρησης

### 10.2.10 Ρύθμιση των σημείων μεταγωγής για τη λειτουργία παραθύρου OUT2

- ▶ Επιλογή [Fno] ή [Fnc] στα [OU2].
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].
- ▶ Επιλέξτε [nSP2] και ρυθμίστε το σημείο μεταγωγής "κοντά".
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].
- ▶ Επιλογή [FSP2] και ρυθμίστε το σημείο μεταγωγής "μακριά".
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].

**OU 2**  
**nSP 2**  
**FSP 2**

### 10.2.11 Αλλαγή κλίμακας εύρους μέτρησης (αναλογική έξοδος)

- ▶ Επιλογή [I] ή [U] στα [OU2].
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].
- ▶ Επιλέξτε [ASP] και ορίστε "Αναλογικό αρχικό σημείο".  
Με το [ASP] καθορίζετε σε ποια τιμή μέτρησης το σήμα εξόδου είναι 4 mA / 0V.
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].
- ▶ Επιλέξτε [AEP] και ορίστε "Αναλογικό τελικό σημείο".  
Με το [AEP] καθορίζετε σε ποια τιμή μέτρησης το σήμα εξόδου είναι 20 mA / 10 V. Μπορεί επίσης να επιλεγεί πριν από το [ASP]. Έτσι μπορεί να πραγματοποιηθεί πιπτική καμπύλη.
- ▶ Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].

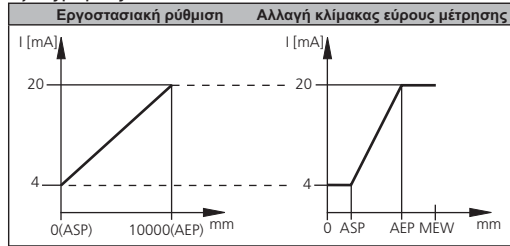
**OU 2**  
**ASP**  
**AEP**

**Ελάχιστη απόσταση ανάμεσα [ASP] και [AEP]: 100 mm**  
Όταν η ελάχιστη απόσταση δεν προσεγγιστεί, εμφανίζεται η ένδειξη λάθους "SIZE".

20

# Οπτικός Αισθητήρας Απόστασης EFFECTOR200 (συνέχεια)

## Έξοδος ρεύματος 4... 20 mA



MEW = τελική τιμή του εύρους μέτρησης

Κατά την ενεργοποίηση του εύρους μέτρησης το σημείο εξόδου είναι ανάμεσα 4 και 20 mA.

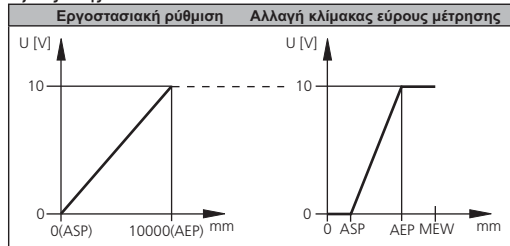
Σφάλματα επίσης εμφανίζονται:

Πολύ φως ή το αντικείμενο είναι πολύ κοντά: 3.5 mA για ανοδική καμπύλη ([ASP] < [AEP]), 20.5 mA για πτωτική καμπύλη ([ASP] > [AEP]).

Αντικείμενο πολύ μακριά ή απών:

20.5 mA για ανοδική καμπύλη; 3.5 mA για πτωτική καμπύλη.

## Έξοδος τάσης 0... 10 V



MEW = τελική τιμή του εύρους μέτρησης

Κατά την ενεργοποίηση η λειτουργία εξόδου είναι ανάμεσα 0 και 10V.

21

## 10.3 Λειτουργία εκμάθησης (teach)

### 10.3.1 Ρύθμιση βαθμού δειγματοληψίας

Η δειγματοληψία δείχνει το χρόνο μετά από καινούριο αποτέλεσμα μέτρησης και ενημερωμένες λειτουργίες εξόδου. Η συχνότητα μεταγωγής είναι περίπου 1/3 της δειγματοληψίας.

- ▶ Επιλέξτε [TEAC], και μετά πατήστε [SET] και κρατήστε το πατημένο μέχρι η ένδειξη [WAIT] εμφανιστεί.
- > [rATE] και [rEP] εμφανίζονται εναλλάξ.
- ▶ Όταν η ένδειξη [rATE] εμφανιστεί: Πατήστε [SET] μέχρι η προρυθμισμένη μετρούμενη τιμή δειγματοληψίας αναβοσβήσει.
- ▶ Αυξήστε την τιμή πατώντας [SET] μία φορά.
- ▶ Επιβεβαιώστε με [MODE/ENTER].
- > Η ένδειξη [WAIT] εμφανίζεται όταν η επαναληψιμότητα [rEP] υπολογίζεται.
- > Η δειγματοληψία [rATE] και η επαναληψιμότητα [rEP] εμφανίζονται εναλλάξ.

TEAC  
rATE

### 10.3.2 Ρύθμιση επαναληψιμότητας

- ▶ Επιλέξτε [TEAC], και μετά πατήστε [SET] και κρατήστε το πατημένο μέχρι η ένδειξη [WAIT] εμφανιστεί.
- > [rATE] και [rEP] εμφανίζονται εναλλάξ.
- ▶ Όταν η ένδειξη [rEP] εμφανιστεί: Πατήστε [SET] μέχρι η προρυθμισμένη τιμή επαναληψιμότητας αναβοσβήσει.
- ▶ Αυξήστε την τιμή πατώντας [SET] μία φορά.
- ▶ Επιβεβαιώστε με [MODE/ENTER].
- > Η ένδειξη [WAIT] εμφανίζεται όταν η δειγματοληψία [rEP] υπολογίζεται.
- > Η δειγματοληψία [rATE] και η επαναληψιμότητα [rEP] εμφανίζονται εναλλακτικά.

TEAC  
rEP

22

### 10.3.3 Πίνακας επαναληψιμότητας και ακριβείας

#### Τιμές δειγματοληψίας 50 Hz, εξωτερικός φωτισμός το μέγιστο 40 klx\*

Απόσταση σε [mm]	Επαναληψιμότητα		Ακρίβεια	
	άσπρο 90 % αντανάκλαση	γκρί 18 % αντανάκλαση	άσπρο 90 % αντανάκλαση	γκρί 18 % αντανάκλαση
200...1000	± 5.0 mm	± 7.5 mm	± 15.0 mm	± 18.0 mm
1000...2000	± 5.5 mm	± 10.0 mm	± 15.0 mm	± 20.0 mm
2000...4000	± 17.5 mm	± 22.5 mm	± 25.0 mm	± 32.0 mm
4000...6000	± 27.5 mm	± 40.0 mm	± 35.0 mm	± 50.0 mm
6000...10000	± 60.0 mm	—	± 70.0 mm	—

#### Τιμές δειγματοληψίας 50 Hz, εξωτερικός φωτισμός 40...100 klx\*

Απόσταση σε [mm]	Επαναληψιμότητα		Ακρίβεια	
	άσπρο 90 % αντανάκλαση	γκρί 18 % αντανάκλαση	άσπρο 90 % αντανάκλαση	γκρί 18 % αντανάκλαση
200...1000	± 16.5 mm	± 16.5 mm	± 26.5 mm	± 26.5 mm
1000...2000	± 16.5 mm	± 16.5 mm	± 26.5 mm	± 26.5 mm
2000...4000	± 30.0 mm	± 37.0 mm	± 40.0 mm	± 47.0 mm
4000...6000	± 37.0 mm	± 57.0 mm	± 47.0 mm	± 67.0 mm
6000...10000	± 75.0 mm	—	± 85.0 mm	—

#### Τιμές δειγματοληψίας 1 Hz, εξωτερικός φωτισμός το μέγιστο 40 klx\*

Απόσταση σε [mm]	Επαναληψιμότητα		Ακρίβεια	
	άσπρο 90 % αντανάκλαση	γκρί 18 % αντανάκλαση	άσπρο 90 % αντανάκλαση	γκρί 18 % αντανάκλαση
200...1000	± 4.0 mm	± 4.5 mm	± 14.0 mm	± 15.0 mm
1000...2000	± 4.5 mm	± 6.0 mm	± 14.5 mm	± 16.0 mm
2000...4000	± 13.5 mm	± 14.5 mm	± 23.5 mm	± 24.0 mm
4000...6000	± 19.0 mm	± 21.0 mm	± 29.0 mm	± 31.0 mm
6000...10000	± 37.0 mm	—	± 47.0 mm	—

23

#### Τιμές δειγματοληψίας 1 Hz, εξωτερικός φωτισμός 40...100 klx\*

Απόσταση σε [mm]	Επαναληψιμότητα		Ακρίβεια	
	άσπρο 90 % αντανάκλαση	γκρί 18 % αντανάκλαση	άσπρο 90 % αντανάκλαση	γκρί 18 % αντανάκλαση
200...1000	± 10.0 mm	± 10.0 mm	± 20.0 mm	± 20.0 mm
1000...2000	± 10.0 mm	± 10.0 mm	± 20.0 mm	± 20.0 mm
2000...4000	± 17.0 mm	± 18.0 mm	± 27.0 mm	± 28.0 mm
4000...6000	± 22.0 mm	± 25.0 mm	± 32.0 mm	± 35.0 mm
6000...10000	± 37.0 mm	—	± 47.0 mm	—

\*Εμβέλεια αναφερόμενη σε μαύρο (6 % αντανάκλαση) ≤ 4000 mm.

Οι τιμές εφαρμόζονται σε:

- σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες (23°C / 960 hPa)
- μετά τουλάχιστον από 10 λεπτά από την ενεργοποίηση της συσκευής

24

## Οπτικός Αισθητήρας Απόστασης EFFECTOR200 (συνέχεια)

### 10.4 Επεκτεταμένες λειτουργίες

#### 10.4.1 Ρύθμιση χρονικής καθυστέρησης για εξόδους μεταγωγής

<ul style="list-style-type: none"> <li>► Επιλογή [EF].</li> <li>► Πατήστε [SET] για να αλλάξετε το μενού [EF].</li> <li>► Επιλογή παραμέτρων με [MODE/ENTER]: [dSx] = χρονοκαθυστέρηση εκκίνησης; [drx] = χρονοκαθυστέρηση τερματισμού</li> <li>► Ενεργοποιήστε την τιμή παραμετροποίησης με [SET]: Περιοχή ρύθμισης [s]: 0 / 0.1 ... 5 s με βήμα των 0.1s (0 = χρονοκαθυστέρηση δεν είναι ενεργοποιημένη)</li> <li>► Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].</li> </ul>	<b>EF</b> <b>dS1</b> <b>dr1</b> <b>dS2</b> <b>dr2</b>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------

GR

#### 10.4.2 Ρύθμιση φάσμωσης μετρούμενου σήματος

<ul style="list-style-type: none"> <li>► Επιλογή [EF].</li> <li>► Πατήστε [SET] για να αλλάξετε το μενού [EF].</li> <li>► Επιλογή [dAP].</li> <li>► Ενεργοποιήστε την τιμή παραμετροποίησης με [SET]: Περιοχή ρύθμισης [s]: 0...0.1...0.2...0.5...1...2...5.</li> <li>► Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].</li> </ul>	<b>EF</b> <b>dAP</b>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------

#### 10.4.3 Επαναφορά όλων των παραμέτρων στις εργοστασιακές ρυθμίσεις

<ul style="list-style-type: none"> <li>► Επιλογή [EF].</li> <li>► Πατήστε [SET] για να αλλάξετε το μενού [EF].</li> <li>► Επιλογή [rES], μετά πατήστε [SET] και κρατήστε το πατημένο μέχρι η ένδειξη [---] εμφανιστεί.</li> <li>► Επιβεβαίωση με [MODE/ENTER].</li> <li>&gt; Η συσκευή πηγαίνει σε κανονική λειτουργία.</li> </ul>	<b>EF</b> <b>rES</b>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------

#### 10.4.4 Ένδειξη του αριθμού έκδοσης του λογισμικού

<ul style="list-style-type: none"> <li>► Επιλογή [EF].</li> <li>► Πατήστε [SET] για να αλλάξετε το μενού [EF].</li> <li>► Επιλογή [SW], και μετά πατήστε [SET].</li> <li>&gt; Ο αριθμός του λογισμικού εμφανίζεται στην οθόνη.</li> <li>► Πατήστε [MODE/ENTER] και επιστρέψτε στο μενού [EF].</li> </ul>	<b>EF</b> <b>SW</b>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------

### 11 Εγκατάσταση / Λειτουργία

- Αφού ολοκληρώσετε την εγκατάσταση, συνδεσμολογία και τον προγραμματισμό, ελέγξτε εάν η συσκευή λειτουργεί σωστά.
- > Εάν η συσκευή έχει προγραμματιστεί σωστά, τότε απεικονίζεται η απόσταση από το αντικείμενο.

25

Διάρκεια ζωής διόδου λέιζερ: 50000 ώρες

### 11.1 Μηνύματα λάθους

Ένδειξη	Πιθανή αιτία	Έξοδος μεταγωγής				Έξοδος ρεύματος / τάση εξόδου	
		[Hno]	[Hnc]	[Fno]	[Fnc]	[ASP] < [AEP]	[ASP] > [AEP]
[+]	πολύ φως, π.χ επιφάνεια ανάκλασης	ON	OFF	OFF	ON	3.5 mA / 0 V	20.5 mA / 10 V
[-]	λίγο φως, όχι παρουσία αντικείμενου	OFF	ON	OFF	ON	20.5 mA / 10 V	3.5 mA / 0 V
[near]	το αντικείμενο είναι εκτός του εύρους μέτρησης < 0.2 m	ON	OFF	OFF	ON	3.5 mA / 0 V	20.5 mA / 10 V
[far]	το αντικείμενο είναι εκτός του εύρους μέτρησης < 10 m	OFF	ON	OFF	ON	20.5 mA / 10 V	3.5 mA / 0 V
[Errp]	λογικότητα (π.χ το αντικείμενο πολύ γρήγορο)	X <sup>1)</sup>	X <sup>1)</sup>	X <sup>1)</sup>	X <sup>1)</sup>	X <sup>1)</sup>	X <sup>1)</sup>
[SC1]	βραχυκύκλωμα της εξόδου μεταγωγής 1					<sup>2)</sup>	<sup>2)</sup>
[SC2]	βραχυκύκλωμα της εξόδου μεταγωγής 2					<sup>2)</sup>	<sup>2)</sup>
[SC]	βραχυκύκλωμα σε όλες τις εξόδους μεταγωγής						

<sup>1)</sup> Αμετάβλητη

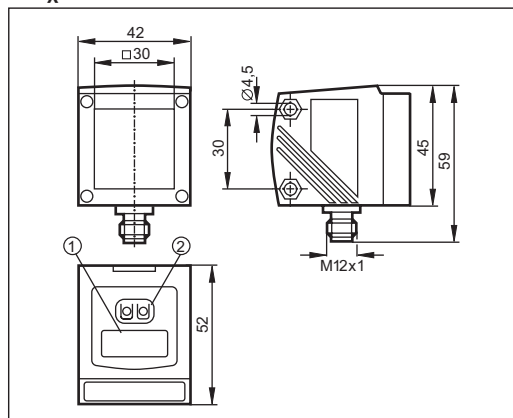
<sup>2)</sup> [SC1] ή [SC] είναι ενεργά, εάν η έξοδος 2 έχει διαμορφωθεί ως έξοδος μεταγωγής.

### 12 Συντήρηση, επιδιόρθωση και καταστροφή

- Ελαττωματικοί αισθητήρες θα πρέπει να επιδιορθώνονται μόνο από τον κατασκευαστή.
- Διατηρήστε τον εμπρόσθιο φακό του αισθητήρα καθαρό από βρωμιά.
- Μετά την χρήση αποσύρετε τη συσκευή με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον σύμφωνα με τους εφαρμοσμένους διεθνείς κανονισμούς.

26

### 13 Σχέδιο διαστάσεων



Διαστάσεις σε mm

- 1: Αλφαριθμητική οθόνη 4 ψηφίων / οθόνη λειτουργιών LED
- 2: πλῆκτρο προγραμματισμού

27

### 14 Εργοστασιακές ρυθμίσεις

Παράμετρος	Περιοχή ρύθμισης	Εργοστασιακή ρύθμιση	Ρύθμιση κυριότητας
Uni	mm, m, inch	mm	
OU1	Hno, Hnc, Fno, Fnc	Hno	
SP1	200...9999	1000	
nSP1	200...9999	800	
FSP1	200...9999	1200	
OU2	Hno, Hnc, Fno, Fnc, I, U	I	
SP2	200...9999	2000	
nSP2	200...9999	1800	
FSP2	200...9999	2200	
ASP	0...9999	0	
AEP	0...9999	9999	
rATE	1...50	50 Hz	
dS1	0...0.1...0.5	0 s	
dr1	0...0.1...0.5	0 s	
dS2	0...0.1...0.5	0 s	
dr2	0...0.1...0.5	0 s	
dAP	0...0.1...0.2...0.5...1...2...5	0 s	
diS	d1...3; rd1...3; OFF	d3	

Τεχνικά δεδομένα και επιπλέον πληροφορίες σε [www.ifm.com](http://www.ifm.com)

28