



Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

---

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΜΕΡΩΝ ΓΙΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΣΚΑΦΟΣ**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΑΟΥΚΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΠΕΤΟΥΣΗΣ ΜΑΡΚΟΣ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2015



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση υποβρύχιων, μη επανδρωμένων οχημάτων, με στόχο την τρισδιάστατη χαρτογράφηση του βυθού, έχει οδηγήσει στην ανάγκη για συνεχή βελτίωσή τους σε ταχύτητα, ευελιξία και οικονομία.

Στην εργασία αυτήν, μελετάται ένα ήδη κατασκευασμένο πρωτότυπο ρομποτικό σκάφος και αξιολογούνται οι πιθανές βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν, έτσι ώστε να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που έχουν προκύψει σε λειτουργικό επίπεδο.

Σε πρώτη φάση αξιολογείται η ήδη υπάρχουσα κατασκευή, καθώς και η αρχή λειτουργίας της. Εν συνεχεία εντοπίζονται τα μηχανικά μέρη τα οποία δημιουργούν προβλήματα στην επιθυμητή ομαλή λειτουργία του σκάφους.

Στην πορεία αναλύονται όλες οι μεταβολές που έγιναν με στόχο τη βελτίωση της κατασκευής και την εξέλιξή της.

Τέλος γίνεται αναφορά στα αποτελέσματα σύγκρισης και στις πιθανότητες μελλοντικής βελτίωσης του ρομποτικού σκάφους, με απώτερο στόχο την ορθή του χρήση ως όργανο χαρτογράφησης.



## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

Περίληψη.....	3
Σκοπός.....	7
Κεφάλαιο 1.....	9
1.1. Εισαγωγή-Θεωρητικά Δεδομένα.....	9
1.2. Αντίστοιχες κατασκευές.....	9
1.3. Έργο "Squidbot".....	13
1.4. Αρχή Λειτουργίας "Squidbot".....	15
Κεφάλαιο 2.....	17
2.1. Η πρώτη κατασκευή.....	17
2.2. Εντοπισμός Δυσλειτουργιών στο Πρωτότυπο.....	19
2.3. Μεθοδολογία Προσέγγισης, με Στόχο τη Βελτιστοποίηση του Πρωτοτύπου..	21
Κεφάλαιο 3.....	23
3.1. Τοποθεσία Διεξαγωγής Πειραμάτων.....	23
3.2. Εργαλεία που Χρησιμοποιήθηκαν.....	23
Κεφάλαιο 4.....	29
4.1. Κριτήρια Επιλογής Εξαρτημάτων.....	29
4.1.1. Οδηγός Κύλισης.....	29
4.1.1.2 Σχεδιασμός και Υπολογισμοί για τον Οδηγό RBB.....	31

4.1.2. Φορείο.....	35
4.1.3. Σύνδεσμος Οδηγού Κύλισης με Κινητήρες.....	36
4.1.4. Ράγα MicroRax (mraX).....	39
4.1.5. Βάση Στήριξης Σερβοκινητήρων.....	41
4.1.6. ServoCap.....	44
4.1.7. Στήριξη Οδηγού Κύλισης στη Δεξαμενή.....	47
4.1.8. Αισθητήρες Δύναμης.....	51
4.1.9. Ράβδοι Κίνησης Πτερυγίου (Στικς).....	52
4.1.10. Κατασκευή και Κατεργασία των Στικς.....	58
4.2. Μεθοδολογία Συναρμολόγησης Τελικής Κατασκευής.....	63
Κεφάλαιο 5.....	71
5.1. Αποτελέσματα.....	71
5.2. Συμπεράσματα.....	71
Βιβλιογραφία.....	75

## **ΣΚΟΠΟΣ**

Η παρούσα πτυχιακή αποτελεί τμήμα του έργου Αρχιμήδης Squidbot, στο οποίο επιστημονικός υπεύθυνος είναι ο Επίκουρος Καθηγητής του Τμήματος Ηλεκτρολογίας ΤΕΙ Κρήτης Δρ. Μιχαήλ Σφακιωτάκης. Στα πλαίσια αυτού του έργου, θα κατασκευαστεί ένα ρομποτικό σκάφος, το οποίο θα κινείται μιμούμενο τις κινήσεις θαλάσσιων οργανισμών.

Ένα λειτουργικό πρωτότυπο έχει ήδη κατασκευαστεί. Σε αυτό έχουν παρατηρηθεί ορισμένα προβλήματα στη λειτουργία κάποιων μηχανισμών. Επιπλέον, απαιτείται η βελτίωση του σχεδιασμού των μηχανικών μερών, ώστε να αυξηθεί η στιβαρότητα τους, να μειωθεί ο όγκος και το βάρος τους και να δημιουργηθούν κατάλληλες υποδοχές για την τοποθέτηση επιπλέον τμημάτων της κατασκευής, όπως αισθητήρων και άλλων οργάνων.

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός των απαιτούμενων βελτιώσεων της κατασκευής, σε σχέση με τα μηχανικά της μέρη, ώστε να αντιμετωπιστούν τα λειτουργικά προβλήματα που έχουν εντοπιστεί στο ήδη κατασκευασμένο πρωτότυπο.





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1**

### **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

Οι σύγχρονες υποθαλάσσιες επιχειρήσεις χρησιμοποιούν αυτόνομα υποβρύχια, μη επανδρωμένα οχήματα, με στόχο την τρισδιάστατη χαρτογράφηση του βυθού, κάτι που θα βοηθήσει σημαντικά το έργο των ωκεανογράφων, αρχαιολόγων, γεωλόγων, θαλάσσιων βιολόγων και άλλων επιστημόνων. Οι καινοτόμες δυνατότητες του ρομποτικού σκάφους, θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στον τομέα της κατασκευής και της επιθεώρησης υποβρύχιων κατασκευών και βιομηχανικών υποδομών, όπως επίσης και σε υποθαλάσσιες διαδικασίες έρευνας και διάσωσης. Παράλληλα, όπως είναι προφανές, τέτοιοι μίνι-στόλοι μπορούν να έχουν διάφορες στρατιωτικές εφαρμογές (παρακολούθηση εχθρικών σκαφών, εντοπισμός ναρκών κ.α.).

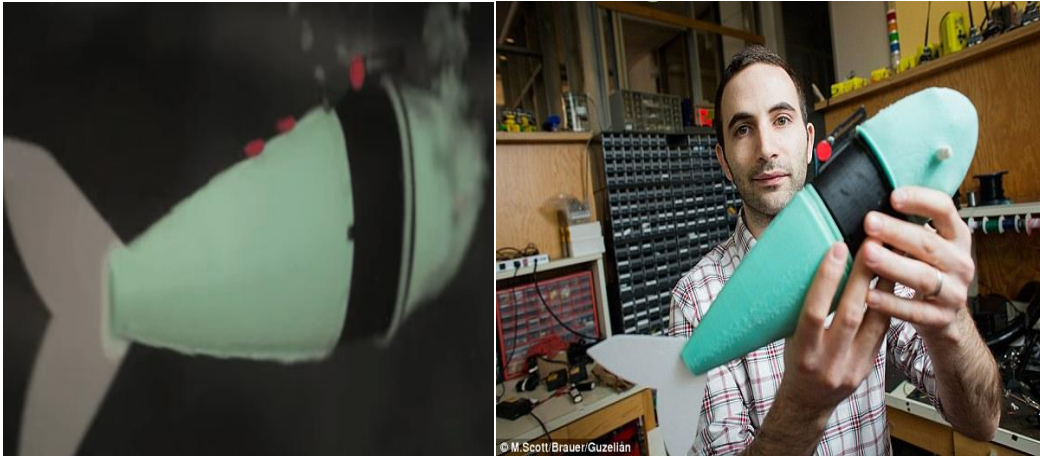
Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση τέτοιων υποβρύχιων οχημάτων, έχει οδηγήσει στην ανάγκη για συνεχή βελτίωσή τους σε ταχύτητα, ευελιξία και οικονομία. Προκειμένου να ανταποκριθούν στις αυξημένες απαιτήσεις κατασκευής, οι επιστήμονες παρατηρούν και αναλύουν τις κινήσεις των υδρόβιων ζώων, τα οποία στη διάρκεια της εξέλιξής τους, έχουν αναπτύξει γρήγορες τεχνικές κίνησης, με επίπεδα ελιγμών που ξεπερνούν κατά πολύ αυτά των θαλάσσιων μηχανοκίνητων συστημάτων. Δεδομένου ότι αυτά τα ρομπότ γίνονται όλο και πιο πολύπλοκα, οι επιστήμονες μπορούν να τα χρησιμοποιήσουν για να συλλέξουν πληροφορίες που δε θα ήταν δυνατό μόλις πριν από λίγα χρόνια.

Παράλληλα, η «φυσική» εμφάνιση ενός τέτοιου σκάφους, θα μπορούσε να οδηγήσει στην κρυφή του ένταξη σε ένα υποθαλάσσιο οικοσύστημα με στόχο τη μελέτη του. Τόσο η φιλική προς το περιβάλλον μορφολογία του, όσο και η συμπεριφορά του, θα μπορούσαν να συμβάλουν στη μελέτη υποθαλάσσιων οικοσυστημάτων χωρίς να διαταράσσεται η αρμονία τους.

### **1.2 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ**

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν διάφορες κατασκευές που έχουν γίνει από επιστήμονες του εξωτερικού, τόσο για περιβαλλοντικούς, όσο και για πολεμικούς σκοπούς. Μερικά παραδείγματα αναφέρονται παρακάτω.

- Το Μάρτιο του 2014 στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (MIT) ,ο Andrew Marchese δημιουργεί μία κατασκευή που μιμείται σε πολύ μεγάλο βαθμό τόσο την εμφάνιση, όσο και τις κινήσεις των ψαριών (εικόνα 1).



**Εικόνα 1. Κατασκευή μηχανικού ψαριού από το MIT**

Το πρώτο αυτοδύναμο, αυτόνομο, μαλακό ρομπότ ταχείας κίνησης του σώματος, είναι κατασκευασμένο από καουτσούκ σιλικόνης σε 3D εκτυπωτή, ενώ έχει τη δυνατότητα να αλλάξει κατεύθυνση σε ένα κλάσμα του δευτερολέπτου. Η λειτουργία αυτής της κατασκευής βασίζεται στη τροφοδότηση διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται από ένα ενσωματωμένο κάνιστρο στην κοιλιά του ρομπότ. Όταν απελευθερωθεί το αέριο, διέρχεται μέσα από ένα μακρύ κανάλι, προκαλώντας την ουρά να λυγίσει σε αντίθετες κατευθύνσεις (εικόνα 2).



**Εικόνα 2. Κανάλι διοχέτευσης διοξειδίου του άνθρακα στο εσωτερικό του ρομπότ**

Οι μελλοντικές εκδόσεις αυτών των ψαριών αναμένεται να είναι σε θέση να κολυπήσουν συνεχώς για περίπου 30 λεπτά, ενώ θα χρησιμοποιηθεί αντλία νερού αντί για διοξείδιο του άνθρακα για να φουσκώνουν τα κανάλια. Η διεύθυνση του εργαστηρίου Επιστήμης Υπολογιστών και Τεχνητής Νοημοσύνης του MIT, προβλέπει ότι με αυτήν την κατασκευή θα είναι σε θέση να διεισδύσουν στο πραγματικό κόσμο των θαλάσσιων πλασμάτων και να συγκεντρώσουν πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά τους στο φυσικό περιβάλλον.

- Οι ερευνητές του Εθνικού Πανεπιστημίου της Σιγκαπούρης κατασκευάζουν ένα ρομπότ εμπνευσμένο από την κίνηση της θαλάσσιας χελώνας (εικόνα 3). Αυτή η μικροσκοπική μηχανική χελώνα, η οποία θα έχει τη δυνατότητα να βουτήξει κάθετα στο νερό (όπως ακριβώς μία αληθινή χελώνα), θα μπορεί να εισβάλλει σε στενούς και δύσβατους χώρους, όπως ρωγμές, σήραγγες ή σωλήνες. Χρησιμοποιώντας ειδικούς αισθητήρες επί του σκάφους, το Robo-turtle θα μπορεί να αξιολογήσει τη ρύπανση των υδάτινων συστημάτων από τα τοξικά απόβλητα. Στο πρόγραμμα είναι ο εφοδιασμός του με ηλιακά επαναφορτιζόμενα πάνελ, έτσι ώστε η μπαταρία να επαναφορτίζεται όταν η μηχανική χελώνα έρχεται στην επιφάνεια.



**Εικόνα 3. Κατασκευή Robo-turtle National University of Singapore**

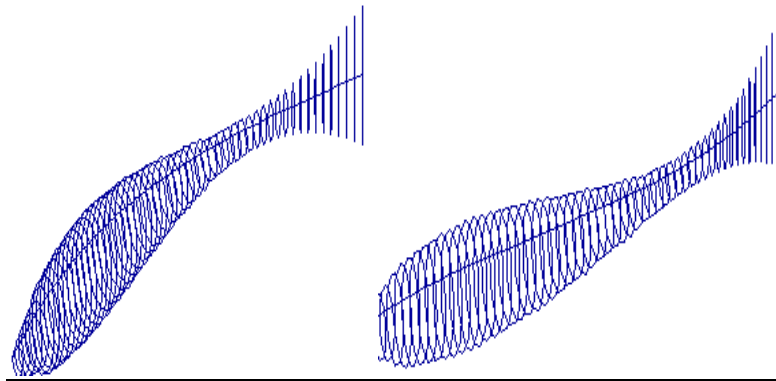
Απώτερος στόχος είναι η δημιουργία σμήνους από μικροσκοπικές μηχανικές χελώνες που επικοινωνούν μεταξύ τους και θα ενεργούν από κοινού για την εκτέλεση των καθηκόντων τους. Με βελτιωμένη ευελιξία θα μπορούν να κατευθυνθούν σε στενά σημεία όπου μεγαλύτερες κατασκευές θα είναι αδύνατο να πάνε και να επιτηρούν το περιβάλλον πραγματοποιώντας διερεύνηση πετρελαιοκηλίδων, καταγραφή σε μεγάλα βάθη, έλεγχο πυρηνικής ρύπανσης.

- Το μηχανικό ψάρι που σχεδιάστηκε από το Στρατιωτικό Ινστιτούτο της Virginia (VMI, ΗΠΑ) αποσκοπεί σε αμυντικές στρατιωτικές εφαρμογές για τη μη ανίχνευση των μεταφορών σε μυστικές επιχειρήσεις, όπως η διείσδυση των μελών της ομάδας SEAL σε εχθρικά λιμάνια. Μία άλλη πιθανή χρήση του είναι η δημιουργία μίας «σιωπηλής» τορπίλης. Το ψάρι αυτό είναι βασισμένο σε ένα πλαίσιο που είχε αναπτυχθεί προηγουμένως από το Michigan State University από τους δόκιμους Darren Wellner και Chris Petree '06 (εικόνα 4).



**Εικόνα 4. Κατασκευή μηχανικού ψαριού από το VMI**

Παρακάτω απεικονίζεται ο σχεδιασμός της κατασκευής, χρησιμοποιώντας περίπου 1000 σημεία περιγραφής των διαφόρων διαστάσεων των ελλείψεων από το εμπρόσθιο έως το οπίσθιο μέρος του ψαριού (εικόνα 5). Το μηχανικό αυτό ψάρι, αποτελείται από 59 ελλείψεις, οι διαστάσεις των οποίων ελέγχονται από σφήνες στις πλευρικές και στις ραχιαίες επιφάνειές του. Με το σχήμα που ορίζεται, το μοντέλο αυτό μπορεί να πορευθεί σε οποιαδήποτε μορφή κίνησης, όπως η προσομοιωμένη ημιτονοειδής κίνηση ενός αληθινού ψαριού.



**Εικόνα 5. Απεικόνιση ελλείψεων για το σχηματισμό του ψαριού**

Ο γενικός στόχος της παραπάνω έρευνας είναι να συσχετισθούν οι κινήσεις του μηχανικού ψαριού με τις εξισώσεις που έχουν ήδη αναπτυχθεί σχετικά με την πραγματική κίνηση των ψαριών στο νερό. Προκειμένου να επικυρωθούν αυτές οι εξισώσεις, απαιτούνται περισσότερες πειραματικές δοκιμές για τη διεξαγωγή περισσότερων δεδομένων.

- Το Δεκέμβριο του 2014 το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό ανακοίνωσε ότι ολοκλήρωσε τις δοκιμές του σχεδιασμού ενός μέρους ενός πειράματος για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων της χρήσης βιομιμητικών, μη επανδρωμένων, υποβρύχιων οχημάτων. Το GhostSwimmer, με μάκρος πέντε πόδια και βάρος σχεδόν 100 κιλά, έχει περίπου το μέγεθος ενός μακρύπτερου τόνου, αλλά μοιάζει περισσότερο με καρχαρία (εικόνα 6).



*Εικόνα 6. GhostSwimmer από το Αμερικανικό Πολεμικό Ναυτικό*

Το ρομπότ χρησιμοποιεί την ουρά του για τον έλεγχο της πρόωσης, όπως ένα πραγματικό ψάρι. Μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε βαθιά νερά, όσο και στα ρηχά, ενώ έχει τη δυνατότητα να ελέγχεται εξ αποστάσεως μέσω ενός σχοινιού, ή να κολυμπήσει ανεξάρτητα.

### **1.3 ΈΡΓΟ "SQUIDBOT"**

Το έργο "Squidbot" στοχεύει στην ανάπτυξη ενός βιο μιμητικού, υποβρύχιου ρομπότ, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα πρόωσης, στηριζόμενο στους μηχανισμούς κίνησης των θαλάσσιων οργανισμών. Οι οργανισμοί αυτοί έχουν την ικανότητα να κινούνται



υποβρύχια, με αξιοσημείωτη ευελιξία, η οποία οφείλεται στα πλευρικά τοποθετημένα εύκαμπτα πτερύγια τους.

Βασική έμπνευση για το σχεδιασμό αποτέλεσε το Black Ghost Knife fish, ένα ψάρι που συναντάται στα ποτάμια της νοτίου Αμερικής. Το ψάρι αυτό, μοιάζει με χέλι και χρησιμοποιεί για την κίνησή του ένα πτερύγιο, το οποίο βρίσκεται στο κάτω μέρος του σώματος του ψαριού και εκτείνεται από το κεφάλι μέχρι και την ουρά (εικόνα 7).

Αντλώντας έμπνευση από αυτόν το μηχανισμό κίνησης, η πρώτη φάση της προτεινόμενης έρευνας, επικεντρώνεται στη θεωρητική ανάλυση, το σχεδιασμό και την ανάπτυξη μιας πειραματικής δοκιμής με κυματοειδή μηχανισμό πτερυγίων.



*Εικόνα 7. Black Ghost Knife Fish*

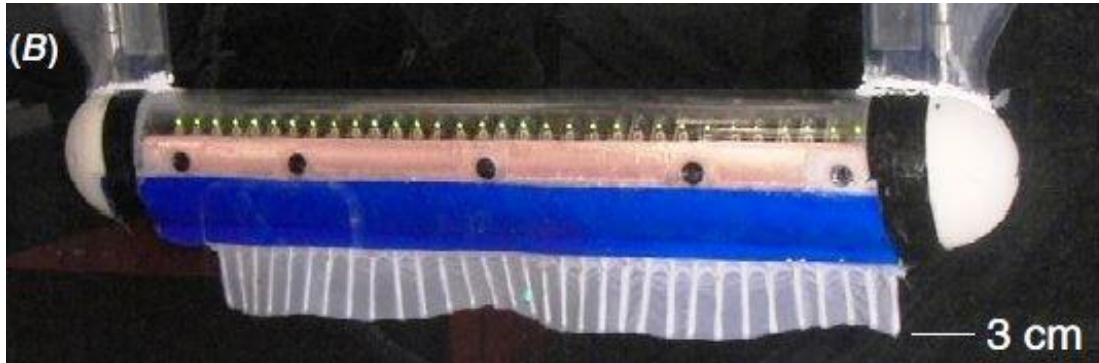
Μια σειρά πειραμάτων με την παραπάνω δοκιμή, η οποία θα περιλαμβάνει επίσης τη χρήση τεχνικών Particle Image Velocimetry (PIV) για την ανάλυση της σχετικής υδροδυναμικής, θα χρησιμοποιηθεί με στόχο τη μελέτη των μηχανισμών δημιουργίας προωθητικής δύναμης και την απόκτηση γνώσεων σχετικά με την τελειοποίηση του σχεδιασμού και τον έλεγχο του πρωτοτύπου.

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης της προτεινόμενης έρευνας, θα αναπτυχθεί ένα ρομπότ ελεύθερης κολύμβησης, με μηχανισμό κυματιστών πτερυγίων στηριζόμενο στα αποτελέσματα του παραπάνω πειράματος. Επιπλέον, θα κατασκευαστούν υπολογιστικά μοντέλα με σκοπό την προσομοίωση και τον έλεγχο του τελικού σχεδιασμού.

Το τελικό στάδιο θα περιλαμβάνει πειράματα που θα πραγματοποιηθούν τόσο σε δοκιμαστικό δοχείο με νερό, όσο και σε ρηχό τμήμα της θάλασσας, με σκοπό τη συνολική εκτίμηση του ρομποτικού πρωτοτύπου.

#### 1.4 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ "SQUIDBOT"

Για την προσομοίωση της κυματοειδούς κίνησης των πτερυγίων χρησιμοποιείται μία μεμβράνη, η οποία συγκρατείται επάνω σε ράβδους-άξονες που της δίνουν κίνηση. Η κίνηση προέρχεται από κινητήρες servo, που συγκρατούν τον κάθε άξονα ξεχωριστά. Το σύστημα αυτό στηρίζεται επάνω σε ράγες κύλισης (οδηγούς). Το τελικό αποτέλεσμα είναι η οριζόντια μετακίνηση του συστήματος επάνω στους οδηγούς.



*Εικόνα 8. Κατασκευή ρομποτικού σκάφους, βασισμένο στην ανατομία του Black Ghost Knife Fish*

Η κατάλληλη επιλογή των κινητήρων servo, καθώς και του συνδυασμού ράβδων και μεμβράνης (μέγεθος, βάρος, υλικό, ελαστικότητα), αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα στη μετάβαση του πειράματος στο επόμενο στάδιο.

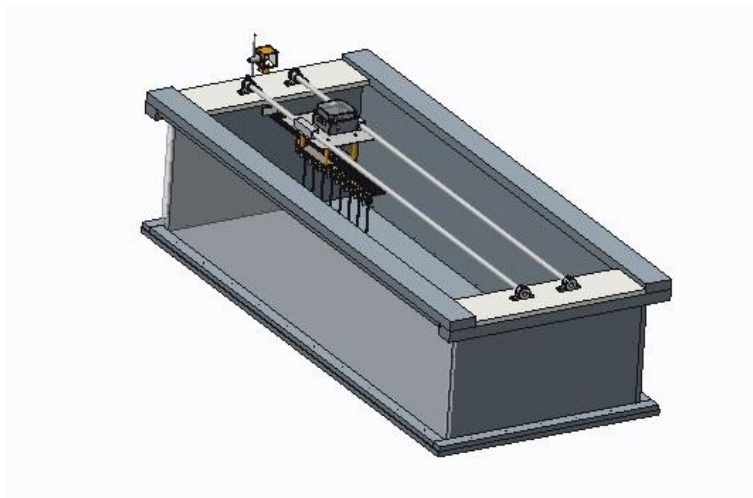




## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2**

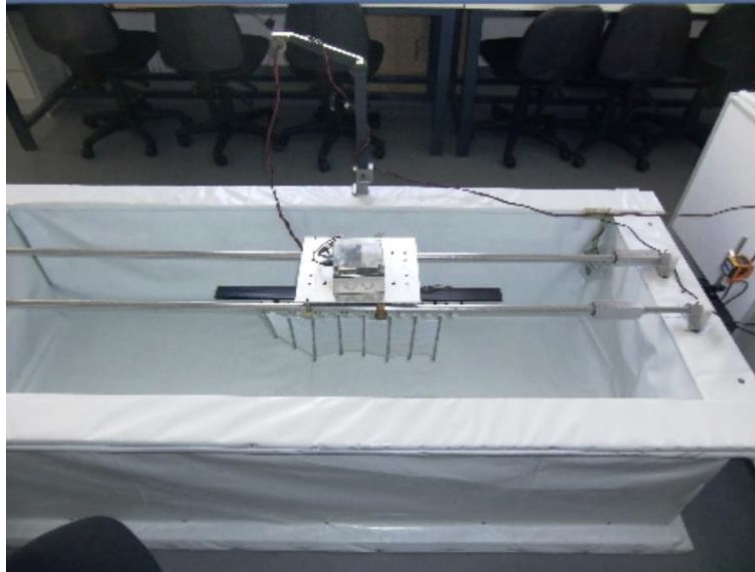
### **2.1 Η ΠΡΩΤΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ**

Στηριζόμενη στην παραπάνω αρχή λειτουργίας, η πρώτη κατασκευή αποτελείτο από ένα αντίστοιχο σύστημα. Δύο ράγες κύλισης στήριζαν τους κινητήρες servo, οι οποίοι έδιναν κίνηση στο περύγιο (μεμβράνη συνδεδεμένη σε ράβδους). Το περύγιο βυθίστηκε σε μία δεξαμενή, μέσα στην οποία έγινε πειραματική δοκιμή της κυματοειδούς κίνησής του (εικόνα 9).



*Εικόνα 9. Ο σχεδιασμός της πρώτης διάταξης του Squidbot*

Οι ράγες κύλισης αποτελούνταν από δύο σωλήνες αλουμινίου τοποθετημένους παράλληλα σε απόσταση 200mm ενώ επάνω τους ήταν προσαρμοσμένο ένα φορείο κατασκευασμένο από ξύλο και μία πλάκα πάχους 2mm από ανοξείδωτο ασάλι (εικόνα 10). Οι οχτώ ροδέλες που ήταν τοποθετημένες είτε άμεσα είτε έμμεσα στη μεγάλη μεταλλική πλάκα, έρχονταν σε επαφή με τους σωλήνες και επέτρεπαν στην κατασκευή να κινείται. Στο επάνω μέρος της μεταλλικής πλάκας ήταν τοποθετημένη η μονάδα ελέγχου, ενώ 4 ντίζες προεξείχαν στο κάτω μέρος, συγκρατώντας μία δεύτερη μεταλλική πλάκα, η οποία με την σειρά της ήταν υπεύθυνη για τη συγκράτηση του μηχανικού ψαριού.



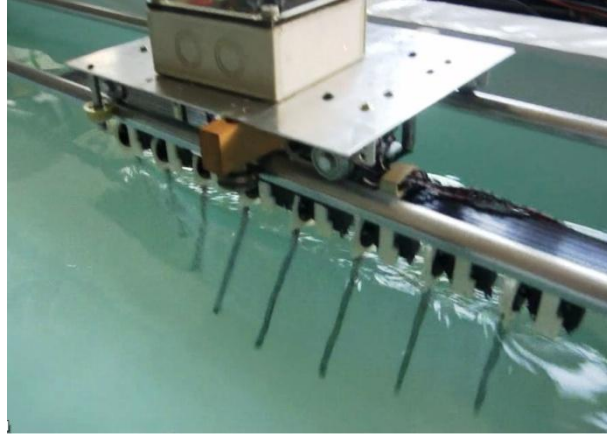
*Εικόνα 10. Διάταξη της πρώτης πειραματικής κατασκευής.*

Πιο συγκεκριμένα, στο φορείο, στη μία πλευρά υπήρχαν δύο ροδέλες, άμεσα ενωμένες στη μεταλλική πλάκα και κάθετα εφραπτόμενες στους σωλήνες αλουμινίου. Σε μικρή απόσταση υπήρχαν δύο ροδέλες εφραπτόμενες στους σωλήνες από την εξωτερική πλευρά, ενωμένες έμμεσα μέσω ενός ξύλου με τη μεταλλική πλάκα. Ενώ στην άλλη πλευρά υπήρχαν τέσσερις ροδέλες μικρότερης διαμέτρου, με τις δύο να εφάπτονται κάθετα ενώ οι άλλες δύο εφάπτονταν στις εξωτερικές πλευρές του κάθε σωλήνα. Οι εξωτερικές ροδέλες δεν προσέφεραν κάτι το ιδιαίτερο στην κινητική ενέργεια (εκτός από σπατάλη ενέργειας) αλλά ευελπιστούσαν στην αποφυγή πλάγιων μετατοπίσεων του φορείου, λόγω των ροπών που προέρχονταν από τους σερβοκινητήρες.

Το μηχανικό ψάρι αποτελείτο από οχτώ σερβοκινητήρες τοποθετημένους μέσα σε ειδικά διαμορφωμένες θήκες, κατασκευασμένες σε 3d printer και αυτοί με τη σειρά τους ήταν βιδωμένοι επάνω σε ράβδους αλουμινίου. Οι ράβδοι αλουμινίου είχαν 30mm φάρδος με πάχος 8mm και περίπου 370mm η κάθε μία και ενώνονταν μεταξύ τους για να δημιουργήσουν μια ενιαία ράβδο μήκους 750mm. Ωστόσο η κοπή τους δεν ήταν ομοιόμορφη, με αποτέλεσμα να δημιουργεί προβλήματα. Η ένωση αυτή γινόταν με συνολικά οχτώ βίδες, οι οποίες ταυτόχρονα συγκρατούσαν και τις ράβδους επάνω στη μεταλλική πλάκα.

Επάνω στους σερβοκινητήρες, και πιο συγκεκριμένα επάνω στο κινητό μέρος του σερβοκινητήρα (αυτό που μεταδίδει την κίνηση) είχε προσαρμοστεί και βιδωθεί μια

κατασκευή από 3d printer (horncap), η οποία συγκρατούσε δύο ράβδους πάχους περίπου 1,5mm και μήκους 210mm από ανοξείδωτο ατσάλι, οι οποίες με τη σειρά τους συγκρατούσαν μια μεμβράνη (η κατασκευή αυτή των ράβδων με την μεμβράνη αποτελούσε το πτερύγιο του μηχανικού ψαριού).



*Εικόνα 11 Η μεταλλική πλάκα με τη μονάδα ελέγχου*

## **2.2 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΔΥΣΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΣΤΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ**

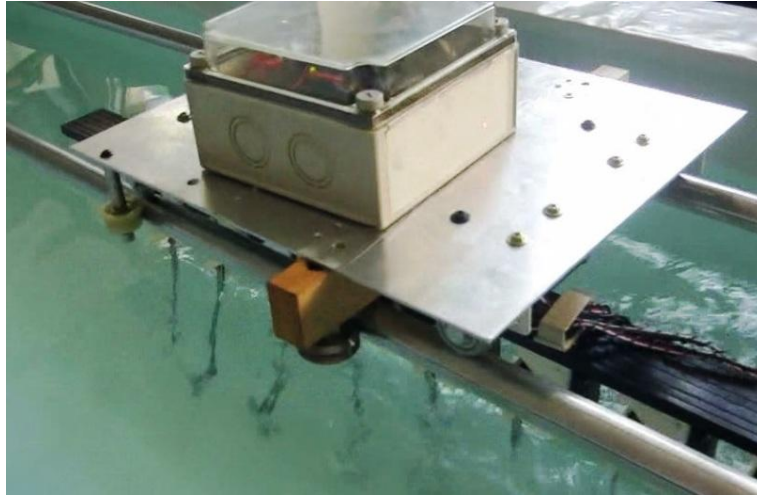
Κατά τις πειραματικές δοκιμές της πρώτης κατασκευής εμφανίστηκαν προβλήματα, τα οποία επηρέαζαν την ομαλή της λειτουργία.

Τα μειονεκτήματα εντοπίστηκαν κυρίως στον οδηγό κύλισης, ο οποίος φάνηκε να παρέχει ανεπιθύμητες ταλαντώσεις, που με τη σειρά τους επηρέαζαν αρνητικά την κίνηση των πτερυγίων και τη συλλογή των σωστών δεδομένων για την συνέχιση του προγράμματος.

Οι σωλήνες αλουμινίου δεν είχαν την κατάλληλη αντοχή για το βάρος του φορείου και εμφάνιζαν μία έντονη κλίση, ορατή ακόμα και με γυμνό μάτι, όταν η κατασκευή βρισκόταν στο μέσο της διαδρομής, ακόμα και όταν οι κινητήρες ήταν εκτός λειτουργίας. Ενώ κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των κινητήρων εμφανίζονταν τόσο κάθετες, όσο και πλευρικές ταλαντώσεις.

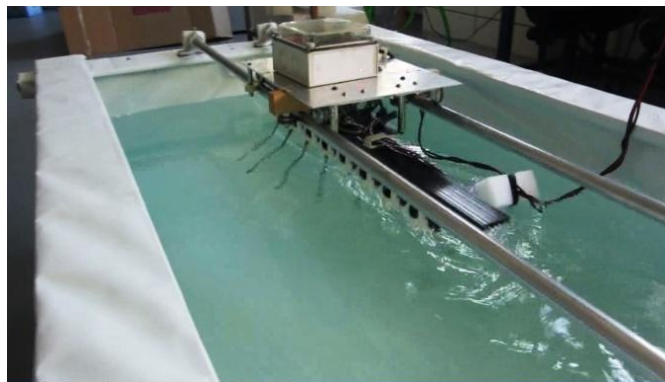
Το φορείο, όντας κατασκευασμένο στο χέρι με διαφορετικά υλικά σε κάθε πλευρά του και με διαφορετικό μέγεθος και τύπο ροδελών σε κάθε επιφάνεια σίγουρα δεν μπορούσε να μεταφέρει ομοιόμορφα την κινητική του δύναμη, ενώ και το βάρος δεν ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να υπάρχουν και εδώ ταλαντώσεις (ξεχωριστές από αυτές που εμφανίζονταν στις σωλήνες) και ιδιαίτερα

πλευρικές. Το πρόβλημα αυτό επιχειρήθηκε να λυθεί με την τοποθέτηση των ροδελών στο πλάι (εικόνα 12), χωρίς όμως κάποια ιδιαίτερη επιτυχία, αφού και σε αυτήν την περίπτωση οι ροδέλες δεν εφάπτονταν όπως θα έπρεπε.



*Εικόνα 12. Τρόπος τοποθέτησης ροδελών*

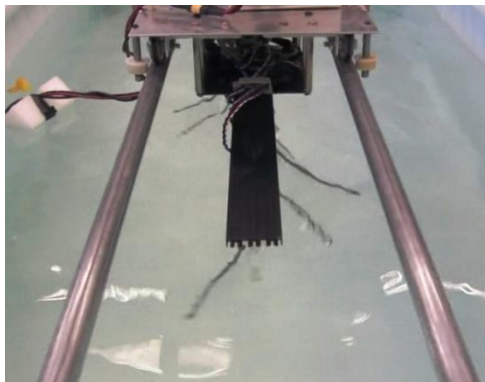
Για τις δύο ράγες που συγκρατούσαν τους σερβοκινητήρες (ΣΒ) χρησιμοποιήθηκαν κοινές ράγες του εμπορίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται για γενικής χρήσης ηλεκτρολογικές κατασκευές. Ήταν μια πάρα πολύ καλή λύση, καθώς προσέφερε πολύ καλή στιβαρότητα με χαμηλό βάρος και κόστος. Τα προβλήματα σε αυτήν την κατασκευή εντοπίστηκαν αφενός στο μεγάλο -χωρίς λόγο- μήκος τους, το οποίο περιορίζει το μήκος της διαδρομής και αφετέρου στον τρόπο συγκράτησης τους με την υπόλοιπη κατασκευή, αφού και εκεί εντοπίστηκαν παρουσίες ταλαντώσεων, ενώ ταυτόχρονα υπήρχε περιορισμός στην ευελιξία της τοποθέτησης των σερβοκινητήρων (εικόνα 13).



*Εικόνα 13. Η πρώτη κατασκευή σε λειτουργία.  
Το σκάφος είναι προσαρμοσμένο στον οδηγό κύλισης.*

Οι ΣΒ ήταν βιδωμένοι με τέσσερις βίδες από την επάνω μεριά για κάθε ΣΒ. Αυτό δυσχέραινε τις προσπάθειες αντικατάστασης κάποιου κινητήρα ενώ η θέση των ΣΒ ήταν προκαθορισμένη χωρίς την δυνατότητα αλλαγής της διάταξης για την διεξαγωγή διαφόρων δοκιμών.

Το πτερύγιο αποτελείτο από λεπτές ράβδους από ανοξείδωτο ατσάλι, οι οποίες προέρχονταν από ένα ενιαίο φύλλο μετάλλου και κόπηκαν και κατεργάστηκαν πλήρως με το χέρι. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι ράβδοι να είναι ανομοιόμορφες μεταξύ τους, και στην κάθετη επιφάνεια τους (διαφορετικό φάρδος κατά μήκος της ράβδου) αλλά και στην επιφάνεια συγκράτησης της μεμβράνης, με αποτέλεσμα να μην έχουν καλή επαφή με αυτήν.



*Εικόνα 14. Η πρώτη κατασκευή σε λειτουργία, όπου φαίνεται η κίνηση της μεμβράνης μέσω των κινούμενων ράβδων.*

Όλες οι προαναφερθείσες δυσλειτουργίες δημιουργούσαν προβλήματα στη συλλογή δεδομένων, όπως στο πόση ροπή και με ποια συχνότητα πρέπει να λειτουργήσουν οι σερβοκινητήρες για να επιτευχθεί μια επιθυμητή ταχύτητα ή στο να μετρηθούν σωστά οι κάθετες και οι πλευρικές δυνάμεις που δημιουργούνται ανάλογα με τη λειτουργία των ΣΒ.

### **2.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ**

Απώτερος στόχος της βελτίωσης του πρωτοτύπου, ήταν η νέα κατασκευή να εμφανίζει μεγαλύτερη στιβαρότητα και εργονομία, να έχει χαμηλό βάρος και να προσφέρει ευελιξία στα μελλοντικά πειράματα.

Πρώτο μέλημα για τη βελτίωση της κατασκευής ήταν ο οδηγός κύλισης, καθώς εκεί θα στηριζόταν ο πιθανός σχεδιασμός και των υπολοίπων τμημάτων του ρομποτικού σκάφους. Ο νέος οδηγός κύλισης θα έπρεπε να αντέχει όλες τις καταπονήσεις και δυνάμεις που θα του ασκούνται, χωρίς να μετατοπίζεται και να παραμορφώνεται σε τέτοιο βαθμό που να επηρεάζει τις μετρήσεις. Ταυτόχρονα να επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση για πιθανές μετατροπές και αλλαγές, ακόμα και την πιθανή μετατόπιση της ράγας.

Στην πορεία των ερευνών βελτίωσης, υπήρξε απόφαση από την ομάδα του κ. Σφακιωτάκη για αντικατάσταση των υπάρχοντων ΣΒ με νέους πιο εξελιγμένους για την συνέχιση των πειραμάτων.

Αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής ήταν η εύρεση του κατάλληλου τρόπου στήριξης των νέων κινητήρων τόσο μεμονωμένα, όσο και με τη ράγα κύλισης, έτσι ώστε να μπορούν να επανατοποθετηθούν με ευκολία, να μην επηρεάζουν την ένωση των καλωδίων και ταυτόχρονα να αποφεύγονται οι ταλαντώσεις.

Ακολούθησε αντικατάσταση των ράβδων που θα αποτελούσαν το πτερύγιο, έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη επιφάνεια επαφής με τη μεμβράνη, μειωμένο βάρος και να ακολουθείται μια τυποποίηση και ομοιομορφία ως προς το σχήμα και το μέγεθός τους.

Οι νέοι κινητήρες και οι καινούριες ράβδοι απαιτούσαν και νέες συνδέσεις (ServoCaps) μεταξύ τους, τηρώντας πάντα τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Τέλος, έπρεπε να ληφθεί υπόψη και η τοποθέτηση των κατάλληλων αισθητήρων στην κατάλληλη θέση για τη λήψη επιπλέον χρήσιμης πληροφορίας, των απαραίτητων μετρήσεων. Μέχρι την παρούσα φάση, δεν υπήρχαν αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων, παρά μόνο από τις μετρήσεις και τις αναλύσεις των αποτελεσμάτων που έδιναν οι σερβοκινητήρες. Για αυτό θα έπρεπε να μελετηθεί η τοποθέτηση 2 αισθητήρων δύναμης.

Αυτή ήταν η βασική μεθοδολογία, προσέγγιση και σειρά διεξαγωγής των κατασκευών. Κατά τη διάρκεια της μελέτης και της κατασκευής υπήρξαν και άλλες μικροκατασκευές και μελέτες για τη βοήθεια της ομάδας του κ. Σφακιωτάκη που παράλληλα μελετούσαν και άλλες προσεγγίσεις για το έργο Squidbot

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **3.1 ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ**

Η έρευνα για τη βελτίωση πραγματοποιήθηκε στο ΤΕΙ Ηρακλείου και πιο συγκεκριμένα στο Εργαστήριο Ηλεκτρολογίας, στο Εργαστήριο Ρομποτικής και στο Μηχανουργείο. Είχε διάρκεια περίπου ένα έτος, μέσα στο οποίο, παράλληλα με τις δοκιμές που γίνονταν στις νέες κατασκευές, εκτελούνταν πειραματικές διαδικασίες από ταυτόχρονες ερευνητικές εργασίες άλλων σπουδαστών υπό την επίβλεψη του Δρ Μιχαήλ Σφακιωτάκη, οι οποίες θα βοηθούσαν στην εκτίμηση της συνέχειας της παρούσας εργασίας.

### **3.2 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ**

Τα εργαστήρια του ΤΕΙ παρείχαν πληθώρα εργαλείων που θα μπορούσαν να κατεργαστούν και να χρησιμοποιηθούν σε μικροκατασκευές και υπολογισμούς, όπως:

#### **Εργαλεία**

- Μεταλλικές πλάκες από παλιούς εκτυπωτές
- Ντίζες από παλιά μηχανήματα
- Βίδες διαφόρων σπειρωμάτων και μηκών
- Ρουλεμάν
- Γυαλόχαρτα
- Παχύμετρα
- Ζυγαριές
- Κατσαβίδια
- Κατσαβίδια τύπου Allen
- Πένσες

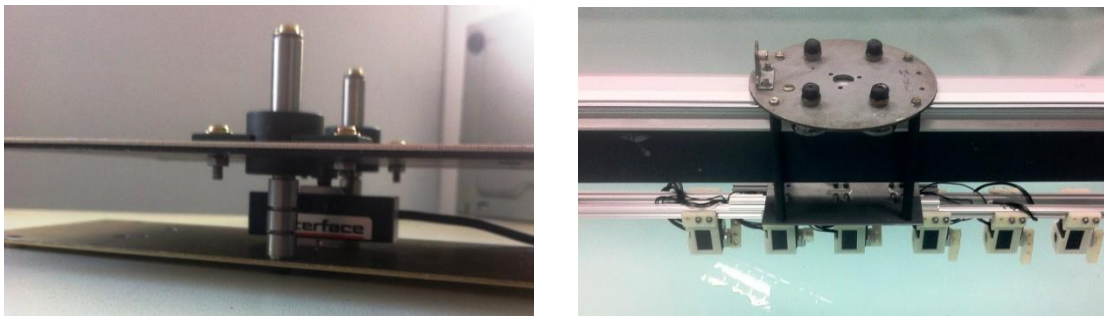
#### **Μηχανήματα**

- Ηλεκτρικό τρυπάνι χειρός
- Ηλεκτρικός τροχός χειρός
- CNC φρέζα



- CNC τόννος
- Ηλεκτρικό πριόνι (σταθερού τύπου)
- Πολυεργαλείο Dremel 300i
- 3d Printer Stratasys

Σημαντική βοήθεια για τις μελέτες και τις κατασκευές καθώς και λύσεις σε αρκετά προβλήματα, έδωσαν τα εργαλεία και τα ανταλλακτικά που υπήρχαν ήδη στα εργαστήρια μηχανολογίας και ιδιαίτερα της ηλεκτρολογίας. Στο εργαστήριο ηλεκτρολογίας υπήρχε πληθώρα μικροεξαρτημάτων και διαφόρων τύπων ανταλλακτικών. Αυτό βοήθησε πολύ στο να εξοικονομηθεί πολύτιμος χρόνος και χρήμα, αφού δε χρειάστηκε να ερευνηθούν και να αγοραστούν τα αντίστοιχα εξαρτήματα, αλλά και συχνά ήταν πηγές έμπνευσης για την συνέχιση της κατασκευής.



*Εικόνα 15. Ανταλλακτικές Μεταλλικές πλακέτες, ντίζες και ρουλεμάν σε πειραματικές διατάξεις*

Για να αξιοποιηθούν αυτά τα εξαρτήματα έπρεπε να γίνουν αρκετές κατεργασίες και μετατροπές (πχ νέες οπές, λείανση ,αφαίρεση υλικού κ.α). Στις κατεργασίες αυτές, σημαντική βοήθεια παρείχε το πολυεργαλείο Dremel 300I (εικόνα 16) που υπήρχε στο εργαστήριο Ηλεκτρολογίας. Το εργαλείο αυτό έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει με μεγάλη ευκολία μια πληθώρα εξαρτημάτων, για σχεδόν οποιαδήποτε κατεργασία και σε οποιοδήποτε υλικό επιθυμεί ο χρήστης του. Αυτό σε συνδυασμό με τις πολύ καλές τεχνικές προδιαγραφές τις οποίες έχει για ένα εργαλείο τέτοιου μεγέθους έγινε άμεσα το κύριο εργαλείο για σχεδόν όλες τις κατεργασίες. Σε αυτό έγιναν όλες οι κατεργασίες τριψίματος, γυαλίσματος, αφαίρεση μικρών κομματιών αλλά και οπές μικρών διαμέτρων.





### ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

- Προβλεπόμενη ονομαστική ισχύς: 125 W
- Τάση: 230 V
- Βάρος: 0,55 kg
- Ταχύτητα χωρίς φορτίο: 10.000 - 33.000 στροφές/λεπτό
- Ηχητική πίεση: 69 dB(A)
- Ηχητική ισχύς: 80 dB(A)
- Κραδασμός: 2,5 m/s<sup>2</sup>

*Εικόνα 16. Πολυεργαλείο Dremel*

Ο σχεδιασμός βελτίωσης και ο υπολογισμός μεγεθών των διαφόρων τμημάτων της κατασκευής έγινε με τη χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος **3D Design CREO II**. Το πρόγραμμα αυτό ανήκει στην εταιρία PTC, η οποία σχεδιάζει και παρέχει για πολλά χρόνια, σχεδιαστικά προγράμματα βασιζόμενη στον παραμετρικό σχεδιασμό. Το πρόγραμμα αυτό μπορεί να σχεδιάσει οποιαδήποτε κατασκευή σε δισδιάστατη και τρισδιάστατη γεωμετρία, έχει τη δυνατότητα να κάνει εικονική συναρμολόγηση διαφόρων εξαρτημάτων, υπολογισμό της αντοχής της εκάστοτε γεωμετρίας αλλά και να δημιουργήσει κώδικα κατεργασίας για τις κατασκευαστικές εργαλειομηχανές CNC.

Η κατασκευή νέων εξαρτημάτων έγινε με τη βοήθεια του εκτυπωτή **3D Printer** από υλικό Abs και Abs+.

Το εργαστήριο ρομποτικής έχει στη διάθεση του 2 τρισδιάστατους εκτυπωτές της εταιρίας Stratasys . Οι εκτυπωτές αυτοί είναι της σειράς Dimensions και τα μοντέλα που διατίθενται στο εργαστήριο είναι ο Dimension Elite και ο Dimension bst768. Ο Dimension bst768 έχει ακρίβεια 0,254mm και εκτυπώνει με υλικό ABS, ενώ ο Dimension Elite είναι καλύτερος και έχει ακρίβεια που φτάνει τα 0.1778 mm ενώ εκτυπώνει με υλικό ABS+



*Εικόνα 17. 3D Printers*

Οι κατεργασίες των υλικών πραγματοποιήθηκαν σε **τόρνο CNC** και στις CNC φρέζες, από τον εξοπλισμό του Εργαστηρίου Ρομποτικής. Οι κατεργασίες των μεταλλικών στίκς (κεφάλαιο 4) και του υλικού ερτασετάλ έγιναν στις ψηφιακά καθοδηγούμενες μηχανές (CNC) φρέζας και τόρνου. Στο εργαστήριο ρομποτικής υπάρχουν μία CNC φρέζα τεσσάρων αξόνων, μία CNC φρέζα 3 αξόνων και ένας CNC τόρνος 2+2 αξόνων (εικόνες 18, 19). Οι μηχανές αυτές σε συνδυασμό με τα τρισδιάστατα σχεδιαστικά προγράμματα ( cnc ) παρέχουν τρομερές δυνατότητες στην κατεργασία και κατασκευή σύνθετων τεμαχίων. Η ακρίβεια στις κατεργασίες τους είναι της τάξης των μερικών μικρομέτρων ( $\mu\text{m}$ ).



**Εικόνα18. Φρέζα 4 αξόνων εικόνα 2 Φρέζα 3 αξόνων**



**Εικόνα 19. CNC φρέζα 2+2 αξόνων**

Ένα ηλεκτρικό τρυπάνι χειρός και ένας ηλεκτρικός τροχός χειρός, τα οποία είναι διαθέσιμα στο εργαστήριο ρομποτικής ήταν τα εργαλεία τα οποία χρειάστηκαν για τις βοηθητικές κατεργασίες και για την προετοιμασία κυρίως των ερτασετάλ και ερταλών πριν την χρήση τους

Για τα παρακάτω εξαρτήματα, η έρευνα αγοράς έγινε στα καταστήματα της πόλης του Ηρακλείου, καθώς είναι βασικά εργαλεία και υλικά τα οποία χρήζουν άμεσης αγοράς και χρήσης. Η τελική επιλογή καταστήματος για την αγορά αυτών των προϊόντων ήταν η εταιρεία "Μεταλλοβιομηχανική" αφού είχε πληθώρα προϊόντων στις πλέον ανταγωνιστικές τιμές στην περιοχή του Ηρακλείου

- Mrax kit
- Κινητήρες Herculex DRS-0201
- Ερτασετάλ Φ100
- Αισθητήρες δύναμης interface SMT1 και interface SML
- Πλάκες από αλουμίνιο και από ασάλι πάχους 2mm
- Βίδες Φ3 μήκους 5mm και 10mm
- Βίδες Φ2
- Λαμαρινόβιδες μήκους 10mm και 20mm
- Βίδες Allen Φ3
- Κολαούζος Φ8 Dormer
- Κοπτικό Τρυπάνι A100 Φ3 της Dormer
- Κοπτικό τρυπάνι Φ3 της Bosch



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **4.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ**

Στις παρακάτω ενότητες ακολουθεί ανάλυση του κάθε επιμέρους τμήματος που αποτελεί τη βελτιωμένη κατασκευή του μηχανικού ψαριού, καθώς και τα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέχθηκαν ή αποκλείστηκαν κάποιες εναλλακτικές επιλογές.

#### **4.1.1 ΟΔΗΓΟΣ ΚΥΛΙΣΗΣ**

Ο οδηγός κύλισης αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της κατασκευής, καθώς εκεί στηρίζεται ο υπόλοιπος μηχανισμός. Πριν επιλεγθεί το κατάλληλο υλικό, έπρεπε να υπολογισθεί η κατάλληλη θέση στην οποία θα τοποθετούνταν ο οδηγός επάνω στη δεξαμενή.

Αρχική σκέψη ήταν η τοποθέτησή του στην άκρη της δεξαμενής, όπου φάνηκε να παρέχει καλύτερη προσβασιμότητα στην κατασκευή του ψαριού και ταυτόχρονα ευκολότερη τοποθέτηση των αισθητήρων. Ωστόσο, η τοποθέτησή του στο κέντρο της δεξαμενής αποτελούσε δοκιμασμένη επιλογή χωρίς να παρουσιάζει προβλήματα.

Έπειτα από μελέτη και συζητήσεις αποφασίστηκε ο οδηγός να τοποθετηθεί στο κέντρο της δεξαμενής. Παρόλα αυτά ο σχεδιασμός και η κατασκευή θα έπρεπε να διατηρεί ανοιχτό και το ενδεχόμενο να γίνει αλλαγή στο μέλλον και ο οδηγός να τοποθετηθεί στην άκρη της δεξαμενής.

Αναζητώντας λοιπόν το κατάλληλο υλικό, η έρευνα περιορίστηκε στο διαδίκτυο και συγκεκριμένα σε ιστοσελίδες εντός Ευρωπαϊκής Ένωσης για λόγους ασφαλείας, ταχύτητας και οικονομίας. Σχετικά σύντομα φάνηκε ότι οι γραμμικοί οδηγοί αλουμινίου θα πληρούσαν εύκολα τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Τα βασικά σχέδια των οδηγών που υπήρχαν ανεξάρτητα από τις ιστοσελίδες ήταν τα ακόλουθα:

α) Roller and linear closed block bearing. Είναι μια φαρδιά ράβδος, όπου στο κενό της κινείται το φορείο. Αποκλείστηκε γρήγορα λόγω της μη παραγωγής στο επιθυμητό μήκος (εικόνα 20).



**Εικόνα 20. Roller and linear closed block bearing**

β) Shaft bottom. Αποτελείται από μια "τριγωνική" βάση όπου στην κορυφή της υπάρχει ένας κύλινδρος (διαφόρων διαστάσεων) και πάνω σε αυτόν εφάπτεται πλήρως το φορείο. Το φορείο κινείται έχοντας μικρά ρουλεμάν σε όλη την εσωτερική του επιφάνεια και έτσι διευκολύνει την κύλιση επάνω στον οδηγό. Θα μπορούσε να είναι η τελική επιλογή, όμως η προηγούμενη εμπειρία (είχε χρησιμοποιηθεί κάτι αντίστοιχο στο εργαστήριο ηλεκτρολογίας) σε τέτοιους οδηγούς μας έδειξε ότι δεν παρέχει την απαιτούμενη ομαλή κίνηση και για το λόγο αυτόν αποκλείστηκε. (εικόνα 21).



**Εικόνα 21. Shaft bottom**

γ) Roller Block Bearing (RBB). Είναι παρόμοιος με τον πρώτο οδηγό, με διαφορά ότι το φορείο έχει στην εξωτερική μεριά του τα ρουλεμάν. Το φορείο στηρίζεται σε 4 ρουλεμάν, τα οποία είναι κοίλα με διάμετρο ανάλογα με το μέγεθος του οδηγού. Αποτέλεσε την τελική επιλογή, καθώς τα ρουλεμάν επέτρεπαν την ομαλή κύλιση του φορείου και ταυτόχρονα παρείχε την επιθυμητή στιβαρότητα (εικόνα 22).



**Εικόνα 22. Roller Block Bearing (RBB)**

Αφού αποκλείστηκε ο οδηγός Roller and linear closed block bearing λόγω διαστάσεων, η επιλογή έπρεπε να γίνει ανάμεσα στον Shaft Bottom (SB) και τον Roller Block bearing (RBB). Ο SB χρησιμοποιεί μικρές μπίλιες για την κύλιση του φορείου, ενώ ο RBB έχει για τον ίδιο λόγο τέσσερα κοίλα ρουλεμάν, τα οποία αποδίδουν περισσότερο. Ένα άλλο πλεονέκτημα του RBB είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ανάποδα. Η επιλογή ήταν ανάμεσα στον RRB 8mm ή των 6mm, η ονομασία και η διαφορά τους οφείλεται στις διαστάσεις των πλαϊνών κυλίνδρων όπου εκεί στηρίζεται και κινείται το φορείο κύλισης. Η επιλογή του μεγαλύτερου οδηγού των 8mm έγινε για μεγαλύτερη ασφάλεια στη στιβαρότητα αφού και το κόστος αγοράς του ήταν κατά περίπου 20€ πιο οικονομικό.

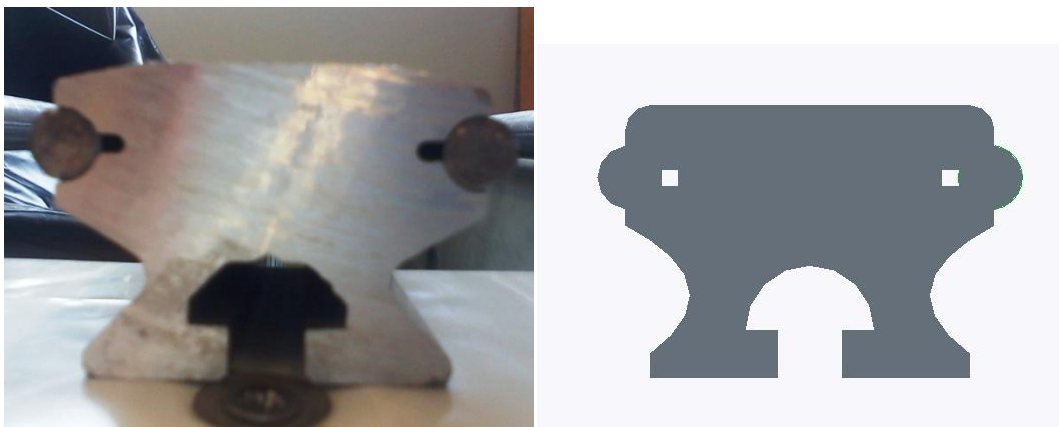
#### **4.1.1.2 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΟΔΗΓΟ RBB**

Έχοντας ξεχωρίσει τον οδηγό RBB 8mm ως την πιθανότερη τελική επιλογή, ξεκίνησε ο σχεδιασμός του στο CREO PARAMETRIC II, έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η αντοχή του με πεπερασμένα στοιχεία στο CREO SIMULATE.

Οι πληροφορίες που χρησιμοποιήθηκαν, συλλέχθηκαν από την ιστοσελίδα, η οποία περιείχε αρκετές πληροφορίες για τις διαστάσεις του οδηγού, υπήρξε ωστόσο και

τηλεφωνική επικοινωνία με τον αντιπρόσωπο, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η εγκυρότητα των πληροφοριών αυτών, αλλά και να εκτιμηθούν οι προσωπικές απόψεις και συμβουλές του για την ορθή επιλογή οδηγού και του σχεδιασμού του.

Το σχέδιο έγινε στο CREO II, ξεκινώντας από ένα συμπαγές τετράγωνο και αφαιρώντας όπου ήταν απαραίτητο υλικό. Οι "κύλινδροι" των 8mm σχεδιάστηκαν ξεχωριστά ως επιπρόσθετα κομμάτια. Οι διαστάσεις είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα εκτός των 2 καμπυλών, όπου εκεί δεν υπήρχαν πληροφορίες για την καμπυλότητα τους (εικόνα 23). Μικρή διαφορά παρουσιάζεται και στην εσωτερική καμπύλη, όπου στην πραγματικότητα δεν είναι συνεχείς αλλά μικρές γραμμές σε σχήμα καμπύλης.



**Εικόνα 23. Καμπύλες Οδηγού Κύλισης RBB**

Αυτές οι μικροδιαφορές εντοπίστηκαν αφού ο οδηγός αγοράστηκε, αλλά θεωρήθηκαν αμελητέες για να επηρεάσουν τις δοκιμές που έγιναν και παρουσιάζονται παρακάτω.

Λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα τοποθέτησης στην άκρη ή στη μέση της δεξαμενής στην προσπάθεια επιλογής του κατάλληλου μεγέθους του οδηγού, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με πεπερασμένα στοιχεία. Με την άσκηση κάθετης δύναμης στο μέσο του οδηγού, θα φαινόταν η παραμόρφωση που θα προέκυπτε. Η δύναμη των 10kg που επιλέχθηκε να ασκηθεί στον οδηγό, προέκυψε μετά από υπολογισμό των μετρήσεων της ήδη υπάρχουσας κατασκευής και με βάση τα μέτρα ασφαλείας (εικόνα 24).

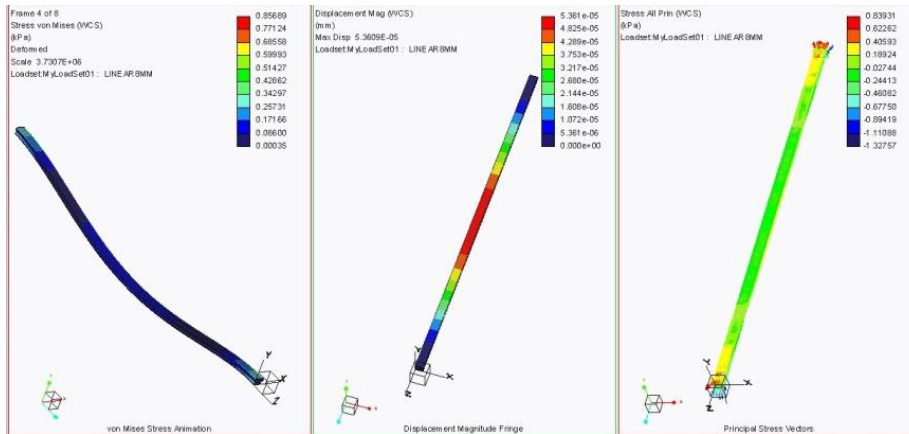
Τα αποτελέσματα των δοκιμών με πεπερασμένα στοιχεία παρουσιάζονται παρακάτω. Στην εικόνα 25 εμφανίζονται τα αποτελέσματα των παραμορφώσεων από την πίεση 10kg στο μέσο της ράγας. Αυτή ήταν η πρώτη "γρήγορη" δοκιμή για να φανεί αν αξίζει να συνεχιστεί η διαδικασία και σε άλλες δοκιμές. Το βάρος των



10kg επιλέχτηκε έπειτα από συζητήσεις, αφού όλα τα εξαρτήματα για το μηχανικό ψάρι θα ζύγισαν περίπου 5kg. Έτσι επιλέχτηκε για πρώτη δοκιμή η άσκηση στιγμιαίας κάθετης δύναμης των 10kg με στήριξη πάκτωσης στις άκρες του οδηγού . Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 24.

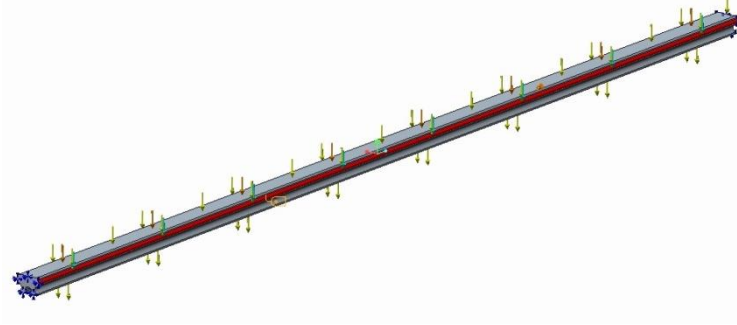


**Εικόνα 24. Άσκηση κάθετης δύναμης 10kg στο μέσο του οδηγού κύλισης.**



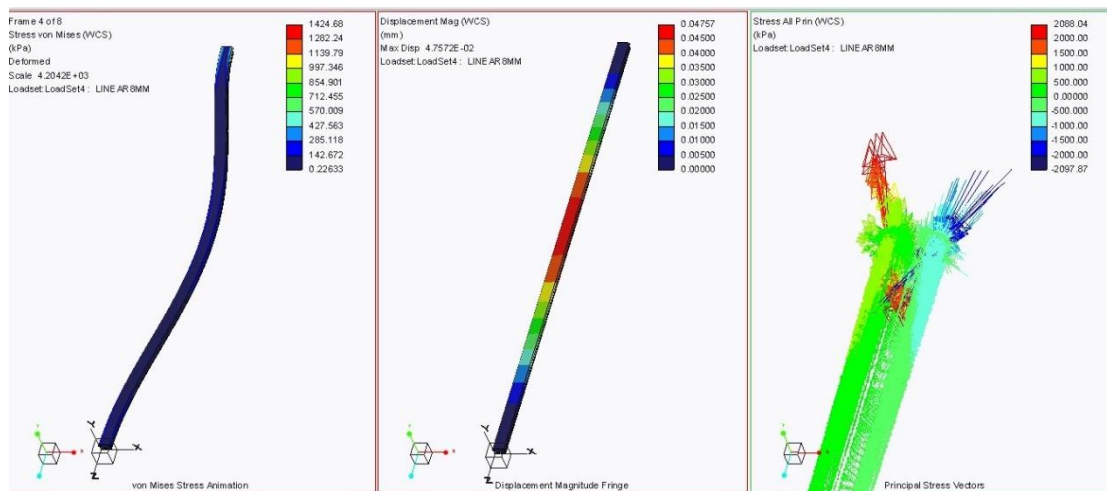
**Εικόνα 25. Κατά την άσκηση κάθετης δύναμης στο μέσο του οδηγού, η μέγιστη πίεση παρουσιάζεται κοντά στις συνδέσεις στήριξης του οδηγού και είναι της τάξης του 0,30kPa (αριστερά). Η μέγιστη παραμόρφωση εντοπίζεται στο μέσον του οδηγού και είναι 0,5μm (μέσον). Οι δυνάμεις που ασκούνται στις συνδέσεις του οδηγού είναι στα 0,8kPa (δεξιά)**

Ακολούθησαν και άλλες προσομοιώσεις όπως αυτή στην εικόνα 26, όπου ασκούνται δυνάμεις 10kg ομοιόμορφα κατά μήκος της επιφάνειας του οδηγού κύλισης, αντίστοιχα και στις πλαϊνές επιφάνειες (εκεί όπου θα εφάπτονται τα ρουλεμάν), αλλά και δυνάμεις που τείνουν να στρέψουν την ράγα.



**Εικόνα 26. Άσκηση δυνάμεων κατά μήκος και περιφερικά στον οδηγό κύλισης**

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εικόνα 27 δείχνουν ότι η ράγα κύλισης δεν θα έχει κάποιο πρόβλημα από τις καταπονήσεις των 3 δυνάμεων που της ασκούνται, καθώς η μέγιστη καταπόνηση φτάνει τα 450kPa στα σημεία κοντά στις πακτώσεις, ενώ η μέγιστη παραμόρφωση βρίσκεται όπως είναι φυσικό στο μέσο της δοκού και είναι 0,047mm. Μεγάλες δυνάμεις φαίνονται να ασκούνται στα σημεία των πακτώσεων, αλλά αυτό δεν είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό καθώς μπορούν να υπάρξουν σύνδεσμοι που να αντέξουν τέτοιες καταπονήσεις.



**Εικόνα 27. Προσομοίωση παραμορφώσεων του οδηγού κατά την άσκηση ομοιόμορφης δύναμης 10kg.**

Έπειτα από αυτές τις δοκιμές με σχεδόν διπλάσια δύναμη από την αναμενόμενη και με μέγιστη παραμόρφωση στα 0,5μm, ο οδηγός RRB των 8mm θεωρήθηκε η ιδανικότερη επιλογή.

#### 4.1.2 ΦΟΡΕΙΟ

Το φορείο (εικόνα 28) που είναι ενσωματωμένο επάνω στη ράγα RBB, στο οποίο θα προσαρμοστεί το ρομποτικό σκάφος, είναι κατασκευασμένο και αυτό από αλουμίνιο και έχει μέγεθος τέτοιο, ώστε να εξυπηρετεί το σχεδιασμό της ολοκληρωμένης κατασκευής. Έχει στην επιφάνειά του τέσσερις μεγάλες οπές, στις οποίες βρίσκονται τα ρουλεμάν κύλισης και 4 μικρότερες οπές, διαμέτρου 6mm οι οποίες διευκολύνουν τη σύνδεσή του με τα υπόλοιπα τμήματα της κατασκευής (εικόνα 29).



*Εικόνα 28. Φορείο ράγας RBB*

*Εικόνα 29. Διαστάσεις φορείου  
Διάμετροι οπών (αριστερά) – Μήκη πλευρών (δεξιά)*

Με τελικό βάρος τα 543g, το φορείο που επιλέχθηκε είναι ελαφρύτερο από αυτό της προηγούμενης διάταξης, κάτι που ενισχύει την ομαλότερη κίνησή του επάνω στη ράγα.



*Εικόνα 30. Έλεγχος τελικού βάρους φορείου (543g)*

#### **4.1.3 ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΟΔΗΓΟΥ ΚΥΛΙΣΗΣ ΜΕ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ**

Μετά την επιλογή του οδηγού κύλισης, σειρά είχε ο κατάλληλος τρόπος σύνδεσής του με την υπόλοιπη κατασκευή.

Στόχος ήταν η δημιουργία μιας ελαφριάς ράγας που να συγκρατεί σταθερά τους σερβοκινητήρες και ταυτόχρονα να μπορεί εύκολα να δεχτεί διαφόρων τύπου στηρίγματα, ανάλογα με τη θέση της επάνω στη δεξαμενή. Το ίδιο έπρεπε να ισχύει για όλες τις συνδεσμολογίες, όσον αφορά στις δυνατότητες και την ευελιξία. Υπήρξαν διάφορα σχέδια και ιδέες που θα πληρούσαν αυτά τα χαρακτηριστικά, αλλά θα έπρεπε να κατασκευαστούν εξ' αρχής, σε βάρος χρόνου και χρημάτων.

Με τις βασικές προϋποθέσεις τη στιβαρότητα και το μικρό βάρος, ξεκίνησε ο σχεδιασμός στο πρόγραμμα CREO II. Υπήρξαν διάφορες σκέψεις και προσεγγίσεις.

Βασική αρχή ήταν η σταθερή στήριξη των σερβοκινητήρων, με ταυτόχρονη ευελιξία στην αλλαγή της θέσης τους. Έτσι ξεκίνησε ο σχεδιασμός εξαρτημάτων όπου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ανεξάρτητα με το που θα τοποθετούνταν ο οδηγός κύλισης ( στο κέντρο ή στο πλάι)

Αρχικά σχεδιάστηκε μία ράγα στήριξης με οπές διαμέτρου 5mm, ανά διαστήματα του 1cm, σε όλο της το μήκος (εικόνα 31). Αυτό θα επέτρεπε την εύκολη συνδεσμολογία των κινητήρων σε όποιο σημείο θα ήταν επιθυμητό, καθώς επίσης και τη μείωση του βάρους της συνολικής κατασκευής.

***Εικόνα 31. Αρχικός σχεδιασμός της ράγας στήριξης των σερβοκινητήρων***

Με βάση τον παραπάνω σχεδιασμό της ράγας, προέκυψαν οι ακόλουθες ιδέες στήριξης της επάνω στον οδηγό κύλισης, ανάλογα με την περίπτωση τοποθέτησής του απάνω στη δεξαμενή (κέντρο ή πλάγια).

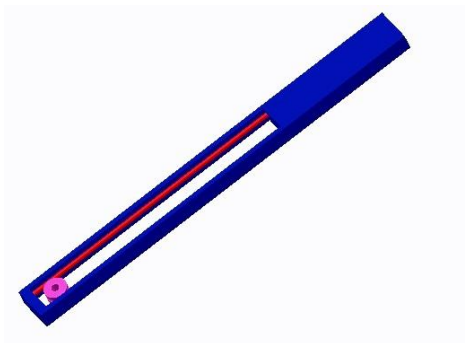
Σε πρώτη φάση υπήρξε η παραδοχή ότι η στήριξη του οδηγού κύλισης θα ήταν στο πλάι (εικόνα 32), χωρίς όμως αυτό να περιορίζει σημαντικά την περίπτωση της μεταφοράς του στο κέντρο.

***Εικόνα 32. Συνδεσμολογία ράγας στήριξης σερβοκινητήρων με οδηγό κύλισης σε περίπτωση τοποθέτησής του στο πλάι της δεξαμενής.***

Σε δεύτερη φάση, διατηρήθηκε ο ίδιος τρόπος συνδεσμολογίας, με διαφορά ότι προστέθηκαν έτοιμοι κύλινδροι ένωσης με τον οδηγό, καθώς βρέθηκαν εύκολα στο εμπόριο και διευκόλυναν την κατασκευή (εικόνα 33).

**Εικόνα 33. Συνδεσμολογία ράγας στήριξης σερβοκινητήρων με οδηγό κύλισης σε περίπτωση τοποθέτησής του στο πλάι της δεξαμενής.**

Το τελευταίο σχέδιο είχε σαν βασική ιδέα το βαθμό ελευθερίας. Σχεδιάστηκε έτσι ώστε να επιτρέπει την κίνηση σε 2 άξονες. Η μπλε ράγα που εμφανίζεται στις παραπάνω εικόνες θα έδινε τη θέση της σε αυτήν που φαίνεται στην εικόνα 34. Η ράγα αυτή φέρει μία ροδέλα, η οποία επιτρέπει την οριζόντια κίνηση. Αυτός ο σχεδιασμός δεν ήταν αυτός που τελικά χρησιμοποιήθηκε, ωστόσο μπορεί να φανεί χρήσιμο στην περαιτέρω εξέλιξη της κατασκευής.



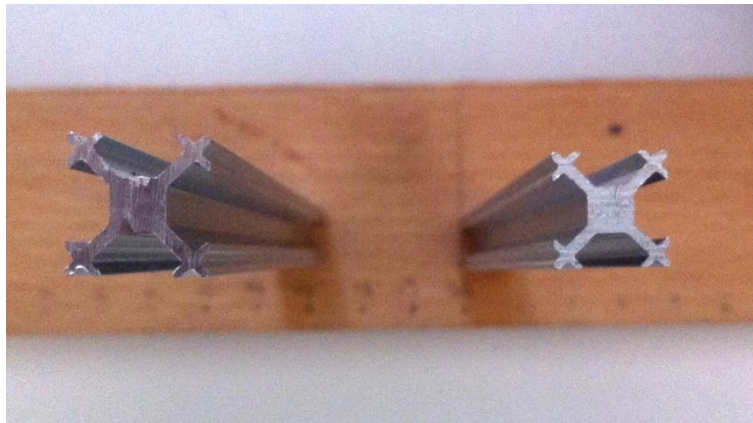
**Εικόνα 34. Συνδεσμολογία ράγας στήριξης σερβοκινητήρων με οδηγό κύλισης, με δυνατότητα κίνησης σε δύο άξονες**

Οι παραπάνω ιδέες σχεδιάζονταν και εξελίσσονταν, έτσι ώστε να τεθούν προς συζήτηση για ποιο λεπτομερή σχεδιασμό, ενώ παράλληλα γινόταν και έρευνα στην αγορά για την εύρεση κατάλληλων εξαρτημάτων με στόχο την εξοικονόμηση χρημάτων και χρόνου. Στην πορεία της αναζήτησης, θεωρήθηκε ότι το προϊόν MicroRax (mrax), θα μπορούσε να δώσει λύση τόσο στη στιβαρότητα, όσο και στην ευελιξία της συνολικής κατασκευής.

#### 4.1.4 ΡΑΓΑ MicroRAX (mrax)

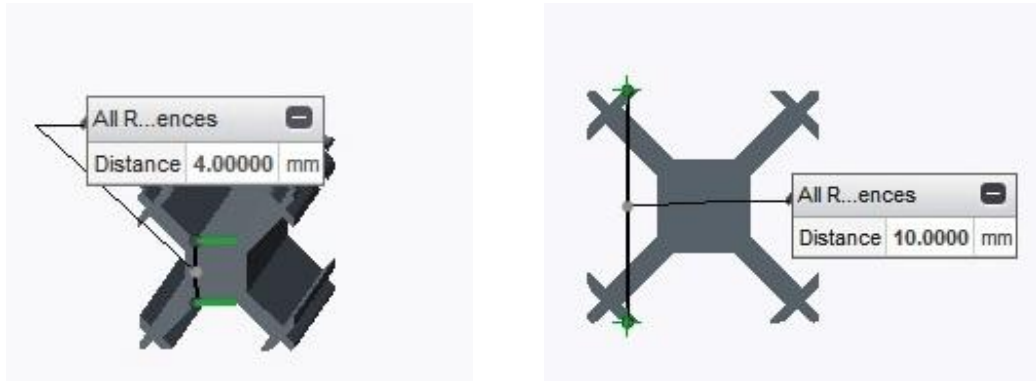
Το mrax κατασκευάζεται από την εταιρία Twintec. Η βασική ιδέα του mrax είναι μια μικρή δοκός-ράγα με γεωμετρία τέτοια, ώστε με τις κατάλληλες αρθρώσεις και συνδέσεις να μπορεί να συνδεθεί - ενωθεί με τις άλλες δοκούς, αλλά και με αντικείμενα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται εντυπωσιακές και λειτουργικές κατασκευές.

Η γεωμετρία της ράγας mrax είναι απλή αλλά έξυπνη (εικόνα 35). Είναι μία δοκός κατασκευασμένη από συμπαγές αλουμίνιο 4mm και σχηματίζει τέσσερις προεξοχές στις άκρες της, που συνολικά δημιουργούν ένα τετράγωνο 10x10mm, ενώ παράγεται σε διάφορα μήκη από 60mm έως και 300mm (έως την ημέρα που γράφεται το παρών κείμενο) .



*Εικόνα 35. Ράγα mrax*

Ανάμεσα στις εσοχές που δημιουργούν οι προεκτάσεις τοποθετείται το nutplate (αναλύεται παρακάτω) παράλληλα με την εσωτερική πλευρά του τετραγώνου (Αυτό καθιστά δυνατή την ένωση με τις διάφορες κατασκευές και τα λοιπά εξαρτήματα χρησιμοποιώντας βίδεςΦ3 με μεγάλη ακρίβεια και στιβαρότητα.

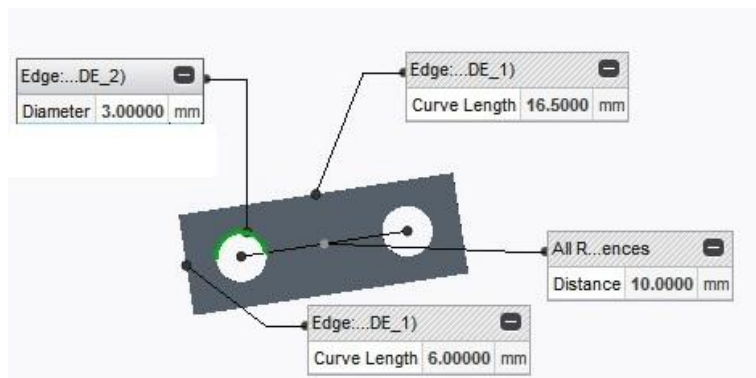


Εικόνα 36. Διαστάσεις τμημάτων mrax

Το Mrax διατίθεται σε διάφορα πακέτα αγοράς, τα οποία εκτός από τις ράβδους σε διάφορα μήκη, παρέχουν και τα υπόλοιπα εξαρτήματα τα οποία είναι απαραίτητα για μια κατασκευή.

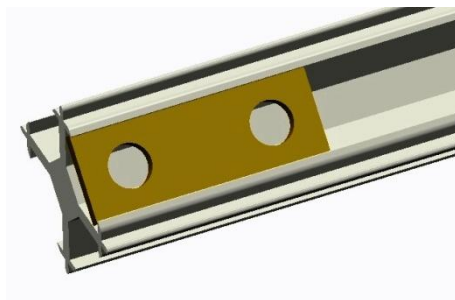
Τα υπόλοιπα βασικά εξαρτήματα του mrax χωρίζονται σε 2 κατηγορίες. Τις αρθρώσεις και τα υλικά σταθεροποίησης.

Το βασικότερο υλικό σταθεροποίησης του mrax είναι το nutplate, μία πλακέτα με διαστάσεις 16,5x6 με 2 τρύπες Φ3 με σπείρωμα σε απόσταση 10mm (εικόνα 37) . Αυτό αποτελεί και το πλέον σημαντικό εξάρτημα του mrax καθώς το nutplate εισχωρεί στις εσοχές των ράβδων και επιτρέπει την ένωση και την συγκράτηση με τις υπόλοιπες δοκούς ή αντικείμενα.



Εικόνα 37. Nutplate





*Εικόνα 38. Nutplate τοποθετημένο στην εσοχή της ράγας mraX.*

Τα υπόλοιπα υλικά σταθεροποίησης, είναι οι βίδες M3 με μήκος 5mm και το κλειδί τύπου allen των 2mm. Αυτά παρέχονται μαζί με το βασικό πακέτο αγοράς του mraX αλλά μπορούν να βρεθούν και αντίστοιχα υλικά στην αγορά.

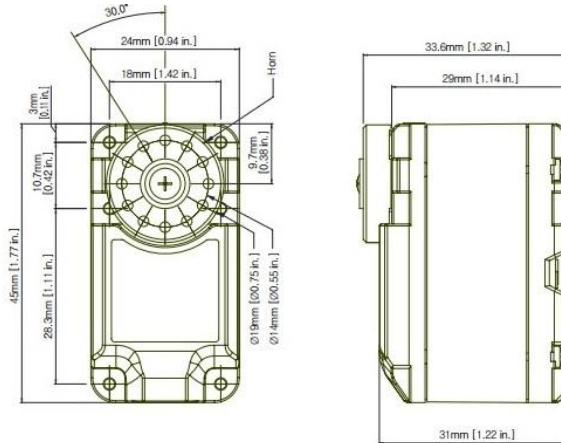
#### **4.1.5 ΒΑΣΗ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ (SERVOHOLDER)**

Η αντικατάσταση των παλιών σερβοκινητήρων (ΣΒΚ) από τους πιο ισχυρούς HerculeX DRS-0201, με διαφορετικό γεωμετρικό σχήμα (εικόνα 39), είχε ως αποτέλεσμα και την αλλαγή γεωμετρίας στις βάσεις στήριξής τους.



*Εικόνα 39. Σερβοκινητήρας HerculeX DRS-0201*

Αρχικά μελετήθηκε το εγχειρίδιο λειτουργίας του Herkulex, καθώς επίσης και διάφοροι ιστότοποι για πληροφορίες σχετικά με την γεωμετρία του ΣΒΚ και βεβαίως χρησιμοποιήθηκε ο παραδοσιακός τρόπος μέτρησης με το παχύμετρο και άλλα εργαλεία μέτρησης. Έτσι ξεκίνησε ο σχεδιασμός του στο πρόγραμμα CREO II.



**Εικόνα 40 Γεωμετρία Σερβοκινητήρα**

Βασικό μέλημα ήταν η σταθερή συγκράτηση του ΣΒΚ, η προστασία του από τα νερά της δεξαμενής, η εύκολη πρόσβαση στις υποδοχές των καλωδίων και των φωτεινών ενδείξεων του κινητήρα καθώς και η πιθανότητα για σύνδεση των νέων κινητήρων με την υπάρχουσα κατασκευή για την διεξαγωγή δοκιμών.

**Εικόνα 41. Σχεδιασμός θηκών με βάση τη γεωμετρία των σερβοκινητήρων σε πρόγραμμα 3D cad.**

Αρχικά κατασκευάστηκε μία θήκη για να εντοπιστούν τυχόν λάθη και ελλείψεις (εικόνα 42).



**Εικόνα 42. Η πρώτη κατασκευή της θήκης**

Δεν εντοπίστηκε κάποιο λάθος, ωστόσο θεωρήθηκε χρήσιμο να προστεθούν 2 μπράτσα στήριξης σε κάθε μεριά στο σημείο που προεξέχει και ενώνεται η βάση, καθώς εκεί ασκούνται οι μεγαλύτερες δυνάμεις και θεωρήθηκε το πιο ευάλωτο σημείο (εικόνα 43).

**Εικόνα 43. Βελτίωση θηκών με ενίσχυση υλικού**

Η βάση έχει πλήρη κάλυψη στο σημείο που θα είναι κοντά στο νερό, ενώ έχουν σχεδιαστεί τρύπες  $\Phi 2$  στην πίσω επιφάνεια για τη σταθεροποίησή τους. Το στρογγυλό κενό στο πίσω μέρος, δημιουργήθηκε με σκοπό να υπάρχει ορατότητα στις φωτεινές ενδείξεις του ΣΒΚ, ενώ τα κενά τμήματα στο πλάι και στο υπόλοιπο

πίσω μέρος σχεδιάστηκαν έξυπνα για μείωση του βάρους και του υλικού. Στο πάνω μέρος της βάσης, το πάχος των τοιχωμάτων αυξάνεται, καθώς εκεί μεταφέρονται οι δυνάμεις από την κίνηση του κινητήρα και εκεί είναι το σημείο όπου θα γίνεται η σύνδεση με την υπόλοιπη κατασκευή .

Στο επάνω μέρος των θηκών τοποθετούνται βίδες Φ3, μήκους 15mm για την προσαρμογή τους επάνω στην κατασκευή, και το κενό ανάμεσα είναι 30mm. Θα μπορούσε να ήταν μεγαλύτερο για την προσαρμογή του στην υπάρχουσα κατασκευή αλλά αυτό θεωρήθηκε περιττό διότι τα ελαττώματα της προηγούμενης κατασκευής δεν θα έδιναν ασφαλή αποτελέσματα μετρήσεων. Σύντομα βρέθηκε και ο τρόπος σύνδεσης (mRax) και έτσι η απόσταση των 30mm θεωρήθηκε η καλύτερη.

Η κατασκευή τους έγινε σε 3D Printer με υλικό abs+. Το τελικό βάρος της κάθε θήκης διατηρήθηκε στα 17g.

Στο πρώτο κομμάτι που κατασκευάστηκε δεν εντοπίστηκαν λάθη. Η μόνη επεξεργασία η οποία χρειάστηκε να γίνει, ήταν η λείανση με γυαλόχαρτο της επιφάνειας επαφής της βάσης με τον κινητήρα, και το καθάρισμα των οπών που θα περνούσαν οι βίδες.



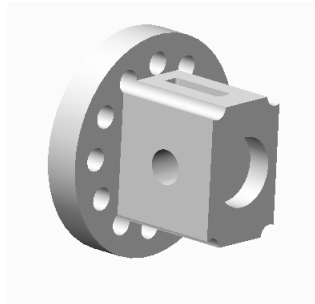
*Εικόνα 44. Τελική κατασκευή βάσεων στήριξης των κινητήρων, με 3D printer*

#### **4.1.6 SERVO CAP**

Το servo cap είναι το "καπάκι" που βρίσκεται επάνω στο κινητό μέρος του servo-κινητήρα συγκρατώντας και μετακινώντας τις ράβδους-άξονες. Όπως και οι βάσεις στήριξης, είναι κατασκευασμένο σε 3d printer από υλικό abs+.

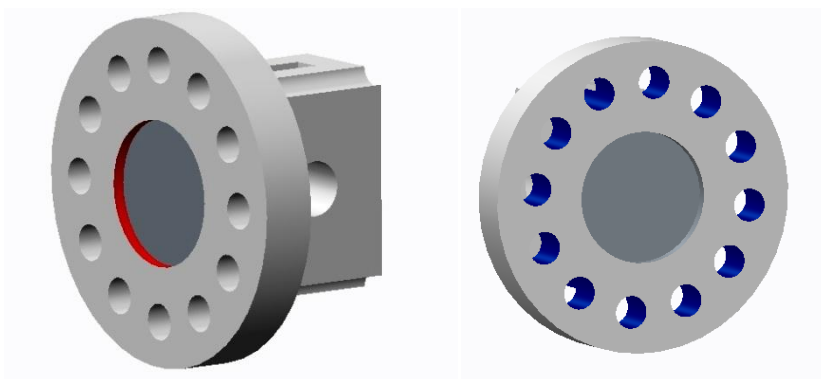
Η σκέψη για την κατασκευή του, ήταν να υπάρχει ένας σύνδεσμος που να μεταδίδει την κίνηση του σέρβο-κινητήρα στους άξονες χωρίς απώλειες. Έμφαση δόθηκε στη διατήρηση της καλής επαφής και της σωστής στήριξης τόσο του servo-κινητήρα, όσο και του άξονα, με τη χρήση όσο ήταν δυνατό, λιγότερου υλικού (κάτι το οποίο συντελεί στην πιο ελαφριά και ταυτόχρονα στην πιο οικονομική κατασκευή. Επιπλέον ζητούμενο ήταν να είναι ανθεκτικό στις καταπονήσεις.

Το πρώτο servo cap είχε μια πολύ απλή μορφή με όγκο τα  $1410 \text{ mm}^3$  και βάρος  $1,1\text{gr}$  (εικόνα 45).



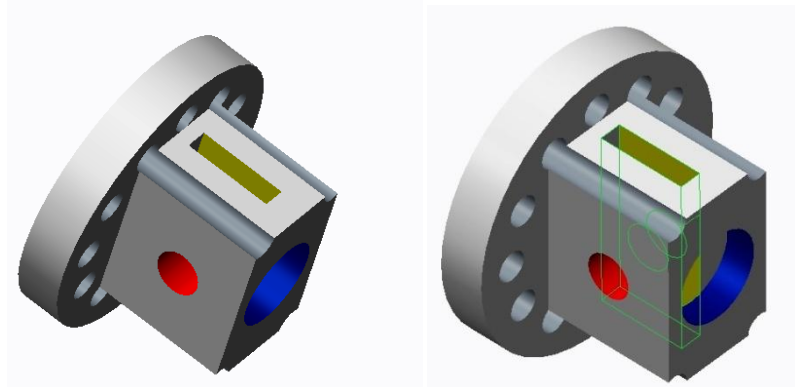
**Εικόνα 45. Αρχική μορφή servocap.**

Το servo cap έχει ακριβώς την ίδια διάμετρο με το κεφάλι του ΣΒΚ. Όπως φαίνεται και στις εικόνες, το πρώτο σχέδιο είχε στην πλάτη ένα μικρό κυκλικό σκαλοπάτι έτσι ώστε να εφάπτεται τέλεια με το "κεφάλι" του σερβοκινητήρα (εικόνα 46), και έχει σε όλη την περιφέρειά του διαμπερείς τρύπες  $\Phi 2$ , με απόσταση μεταξύ τους ίδια με την απόσταση των οπών στο κεφάλι του ΣΒΚ.



**Εικόνα 46. Όψεις του servocap**

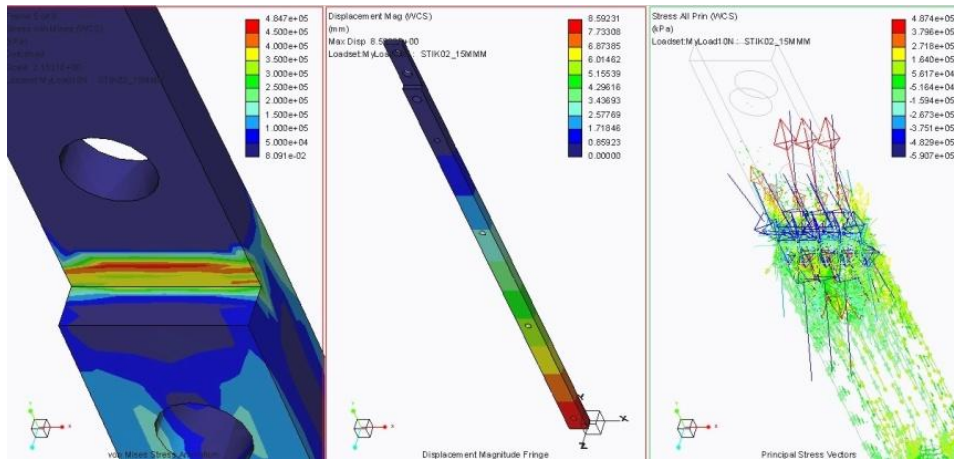
Πάνω σε αυτόν τον κύκλο σχεδιάστηκε η προεξοχή, στην οποία θα γίνει η στήριξη του πτερυγίου (κίτρινο χρώμα-εικόνα 47). Με βάση την προηγούμενη σχεδίαση, θα περνούσε ένα στικ-ράβδος (η μία λάμα του πτερυγίου) και θα στηριζόταν με μία βίδα Φ3 (κόκκινο χρώμα-εικόνα 47). Σχεδιάστηκε άλλη μία οπή στο μπροστινό μέρος της προεξοχής (μπλε χρώμα-εικόνα 47) τόσο για τη μείωση του βάρους του υλικού, όσο και για το ενδεχόμενο στήριξης ενός άξονα μεταξύ των σερβοκινητήρων\*.



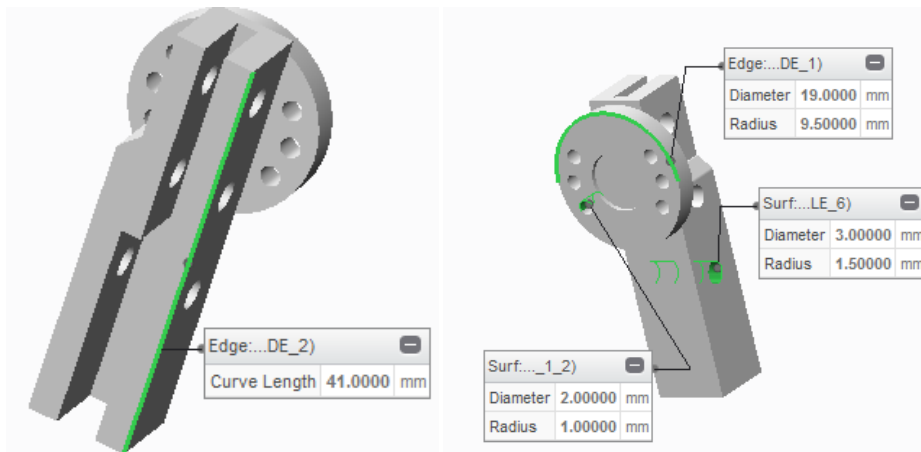
*Εικόνα 47. Χρήσιμα σημεία συνδεσμολογίας του servocap*

Παρ' ότι το servocap σε αυτήν τη μορφή ήταν πολύ στιβαρό, οι προσομοιώσεις που έγιναν με πεπερασμένα στοιχεία, αλλά και σε πραγματικές συνθήκες, έδειξαν ότι οι άξονες αλουμινίου δέχονταν πολλές τάσεις στο σημείο όπου τελειώνει το servo cap με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του αλουμινίου, πέραν της πλαστικής περιοχής. (εικόνα 48). Το πρόβλημα που προέκυψε εντοπίστηκε κυρίως στις ράβδους και όχι τόσο στο ίδιο το servo cap. Ωστόσο στην προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα, ακολούθησαν πολλές δοκιμές με κάποια πρόσθετα κομμάτια στήριξης. Το τελικό αποτέλεσμα είναι αυτό που εμφανίζεται στην εικόνα 49.

\*(Σημείωση: το σκεπτικό αυτό υπήρχε ώστε να υπάρξει καλύτερη στήριξη και αποφυγή ταλαντώσεων του ΣΒΚ. Στην περίπτωση αυτή, ο σχεδιασμός του ΣΒΚ ήταν ιδανικός, καθώς υπήρχε εσοχή στο πίσω μέρος του, ομόκεντρη με τον άξονα περιστροφής, έτσι διευκόλυνε τη σύνδεση στην περίπτωση που αυτό κρινόταν αναγκαίο)



**Εικόνα 48. Αποτελέσματα προσομοίωσης των ράβδων αλουμινίου με Πάκτωση στα σημεία που εφάπτεται με το servocap**



**Εικόνα 49. Μορφή servocap με προέκταση**

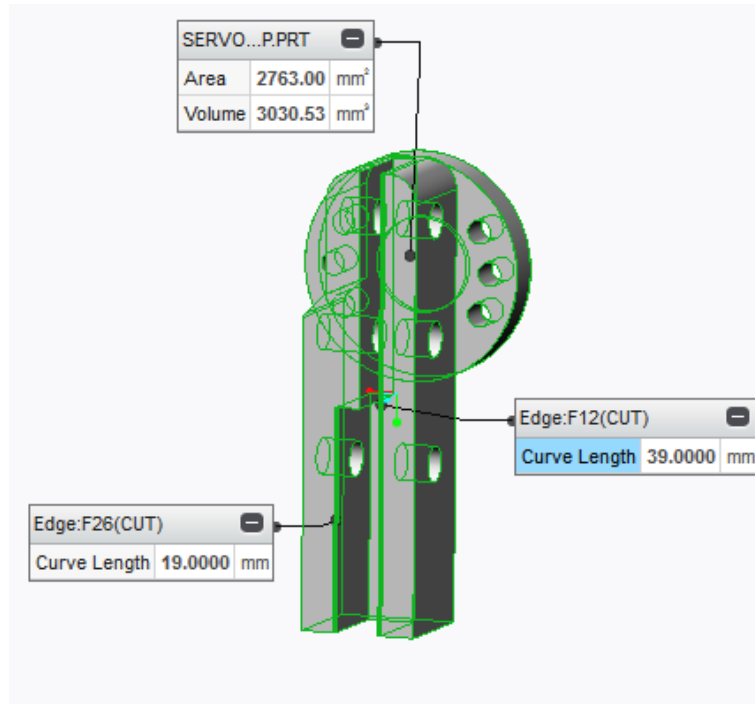
Η προέκταση του servo cap προς την φορά που είναι οι άξονες, του έδωσε μία στήριξη, ικανή να αντέξει και να απορροφήσει τις δυνάμεις που ασκούνταν και παραμόρφωναν τις ράβδους αλουμινίου. Η προέκταση αυτή δεν επηρεάζει τη λειτουργία των πτερυγίων στο νερό, ούτε και τη χρήση οποιουδήποτε πλάτους ζελατίνας, καθώς δεν εισέρχεται στο ωφέλιμο μήκος των αξόνων.

Έτσι η τελική κατασκευή του servo cap (εικόνα 50) διατήρησε τον αρχικό σχεδιασμό στην επιφάνεια εφαρμογής του με τον ΣΒΚ, όπου η εφαρμογή του ήταν άριστη. Στην κυκλική επιφάνεια αφαιρέθηκαν 6 οπές και διατηρήθηκαν άλλες 6 για να μπορέσει να υπάρχει η επέκταση της στήριξης των ράβδων και ταυτόχρονα η απαιτούμενη συγκράτηση του servocar πάνω στο ΣΒΚ. Η σκέψη για τοποθέτηση άξονα μεταξύ των ΣΒΚ απορρίφθηκε, κυρίως γιατί θεωρήθηκε ότι θα προσέθετε επιπλέον βάρος χωρίς κανένα επιπλέον όφελος, εφόσον δεν παρατηρήθηκαν ταλαντώσεις στη διάρκεια λειτουργίας του ΣΒΚ. Έτσι αφαιρέθηκε όλο το υλικό από την πρόσοψη του servo cap, κίνηση η οποία εκτός από την οικονομία σε υλικό και βάρος, διευκόλυνε και την τοποθέτηση των ράβδων. Η προέκταση του servo cap ήταν αναγκαία για την στήριξη των ράβδων. Έτσι η τελική μορφή που φαίνεται στην εικόνα 51, έχει στο πλάι 3 οπές για την συγκράτηση των ράβδων και αρκετό υλικό για την στήριξη τους. Ο όγκος του είναι στα 3030,53 κυβικά χιλιοστά και το βάρος του στα 2,36gr μέγιστο μήκος στα 39mm.



**Εικόνα 50. Τελικό servocar κατασκευασμένο σε 3D printer**





Εικόνα 51. Τελική μορφή servocap

#### 4.1.7 ΣΤΗΡΙΞΗ ΟΔΗΓΟΥ ΚΥΛΙΣΗΣ ΣΤΗ ΔΕΞΑΜΕΝΗ

Για τη στήριξη του οδηγού επάνω στην δεξαμενή θεωρήθηκε σημαντικό να υπάρχει μια ενδιάμεση στήριξη ανάμεσα στον οδηγό και την δεξαμενή.

Τα κριτήρια για το υλικό και τον τρόπο στήριξης του οδηγού, ήταν κυρίως η σταθερότητα, αλλά και η δυνατότητα της εύκολης μετακίνησής του, σε περίπτωση που χρειαζόταν για οποιοδήποτε λόγο η αφαίρεσή του από την κατασκευή.

Για τη στήριξη του οδηγού, επιλέχθηκε το υλικό ερτασετάλ. Είναι υλικό που κατεργάζεται εύκολα και έχει τις απαραίτητες φυσικές ιδιότητες αντοχής για τις καταπονήσεις που θα δεχθεί ως βάση στήριξης του οδηγού κύλισης.

Το ερτασετάλ που χρησιμοποιήθηκε ήταν Φ100mm και επεξεργάστηκε έτσι ώστε να έχει μία τρύπα Φ8 με σπείρωμα για τη σταθερή στήριξη του οδηγού, ενώ περιμετρικά έχει τρύπες Φ3 χωρίς σπείρωμα, οι οποίες στηρίζουν το υπόλοιπο σύστημα σταθερά επάνω στη δεξαμενή (εικόνα 52).

Το σκεπτικό ήταν ο οδηγός να εφαρμόζει πάνω με μία ενδιάμεση στήριξη στη δεξαμενή. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα στο να μεταφέρεται πιο εύκολα, αλλά και να μπορεί να ρυθμιστεί το ύψος στην κάθε πλευρά ώστε να υπάρχει η δυνατότητα για πλήρη ευθυγράμμιση ή και μεταβολή της επιθυμητής κλίσης, ανάλογα με τη φύση

του πειράματος. Ο οδηγός βοηθούσε σε αυτό, καθώς το κενό που έχει προσαρμοζόταν εύκολα μια βίδα Φ8, η οποία έχει τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για την σταθερή συγκράτηση του οδηγού.



**Εικόνα 52. Αρχική μορφή ερτασετάλ (αριστερά), κατεργασμένο ερτασετάλ (δεξιά)**

Η κατεργασία του ερτασετάλ έγινε αρχικά με τόρνο (χειροκίνητο) για να εξασφαλισθεί η κυκλικότητα της περιμέτρου στα 10mm. Έπειτα κόπηκε στην πριονοκορδέλα χωρίς ακρίβεια στα 5cm και κατεργάστηκε με CNC φρέζα και τόρνο για να τροποποιηθεί στα 4cm όπου είχε υπολογισθεί το ιδανικό ύψος στήριξης τόσο του οδηγού, όσο και του συστήματος ερτασετάλ-οδηγός κύλισης επάνω στη δεξαμενή. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε χειροκίνητα σπείρωμα 8mm στην τρύπα στο κέντρο του κομματιού, ενώ τρύπες Φ3 ανά 45 μοίρες έγιναν στην CNC φρέζα. Η κεντρική Φ8 τρύπα με σπείρωμα, έγινε για να βιδωθεί ο οδηγός κύλισης, ενώ οι Φ3 τρύπες για να γίνει η ένωση του συστήματος στη δεξαμενή. Αυτό έγινε με λαμαρινόβιδες των 3mm περιμετρικά του ερτασετάλ.

Συνθήκες Κατεργασίας Ερτασετάλ CNC Φρέζα	
Ταχύτητα Κοπής	180 m/min
Πρόωση	0,102 mm/δόντι
Συνθήκες Κατεργασίας Οπών	
Ταχύτητα Κοπής	35 m/min
Πρόωση	0,15mm/rev

**Πίνακας 1. Συνθήκες κατεργασίας ερτασετάλ στη CNC φρέζα**

Για την κεντρική οπή, αρχικά έγινε μια τρύπα 6mm και στην συνέχεια ανοίχτηκε το σπείρωμα με το σπειροτόμο των 8mm. Η κατεργασία αυτή έγινε στο μηχανουργείο. Κατά την κατασκευή των οπών των 3mm στην CNC φρέζα, εμφανίστηκε πρόβλημα καθώς το πολυμερές έλιωνε και κολλούσε επάνω στο κοπτικό μηχανήμα. Η κατάσταση αυτή αντιμετωπίστηκε με τη διακοπή της παροχής του κοπτικού υγρού και με τη μείωση των στροφών της φρέζας CNC.

Ένα άλλο πρόβλημα που παρουσιάστηκε, ήταν ότι με τη χρήση της CNC φρέζας δεν κατάφεραν να παραλληλισθούν οι δύο επιφάνειες του ερτασετάλ. Και αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με τη χρήση του CNC τόρνου αφαιρώντας υλικό από τις 2 πλευρές του ερτασετάλ. Σημαντικό ήταν και το δέσιμο επάνω στον τόρνο, όπου δεν πιάστηκε το κομμάτι, όπως συνηθίζεται στις κατεργασίες των μετάλλων. Αυτό έγινε έπειτα από την παρατήρηση στην κατεργασία του ερτασετάλ στην CNC φρέζα, όπου για την ανωμαλία που παρουσίασαν οι 2 πλευρές του κομματιού το πιθανότερο να οφείλονταν στο σφιχτό δέσιμο του κομματιού πάνω στην τράπεζα της φρέζας.

Γενικότερα το αποτέλεσμα της κατεργασίας και της συμπεριφοράς του ερτασετάλ ήταν επιτυχημένο καθώς η βίδα Φ8 συγκρατούσε σταθερά τον οδηγό και η δυνατότητα ρύθμισης του ύψους σε κάθε πλευρά ήταν εφικτή ανάλογα με το πόσες "στροφές" θα ρυθμίζαμε το ερτασετάλ.

#### **4.1.8 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΔΥΝΑΜΗΣ**

Στην κατασκευή χρειάστηκε να προσαρμοστούν 2 αισθητήρες δύναμης, οι οποίοι υπολογίζουν τις μεταβολές των δυνάμεων που ασκούνται, ανάλογα με το επίπεδο που χρειάζεται να μετρηθεί.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο interface SMT1 και ο interface SML (εικόνα 53). Ο αισθητήρας SMT1 χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της οριζόντιας δύναμης (φορά του ψαριού), ενώ ο SML για τον έλεγχο των μεταβολών των κάθετων δυνάμεων.



Εικόνα 53. Αισθητήρες δύναμης. Interface SMT1 (αριστερα) και Interface SML (δεξιά)

#### 4.1.9 ΡΑΒΔΟΙ ΚΙΝΗΣΗΣ ΠΤΕΡΥΓΙΟΥ (ΣΤΙΚΣ)

Τα στικς είναι ορθογώνιες μεταλλικές ράβδοι με τρύπες κατά μήκος της επιφάνειάς τους, έτσι ώστε να συνδέονται και να συγκρατούν τη μεμβράνη, δημιουργώντας έτσι το πτερύγιο. Το πτερύγιο αποτελείται από το συνδυασμό των στικς και της μεμβράνης και είναι αυτό το οποίο δίνει κίνηση σε όλη την κατασκευή. Είναι λοιπόν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι για την σωστή και καλή λειτουργία όλου του συστήματος.

Οι προηγούμενες ράβδοι ήταν φτιαγμένες από ανοξείδωτο ατσάλι (SS) πάχους 1.5mm (όχι σταθερό σε όλη την επιφάνεια), και δεν εμφάνιζαν ομαλή επιφάνεια σε καμία από τις πλευρές τους. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μη συγκρατούν καλά τη μεμβράνη, αλλά και να κάμπτονται σε ορισμένα σημεία λόγω την ανομοιόμορφης επιφάνειάς τους.

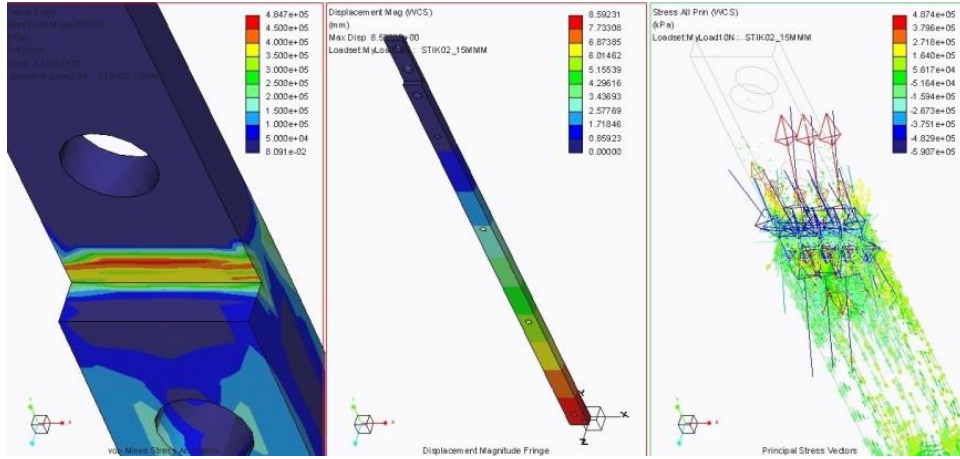
Στόχος λοιπόν για την δημιουργία των καινούριων στικς ήταν να είναι ελαφρύτερα, με πολύ καλές, επίπεδες, ομοιόμορφες και ομαλές επιφάνειες για τη συγκράτηση της μεμβράνης, και ταυτόχρονα αρκετά στιβαρά για να αντέχουν τις καταπονήσεις. Για αυτόν το λόγο δοκιμάστηκε η κατασκευή των στικς από αλουμίνιο (Al).

Για αυτόν το σκοπό κατασκευάστηκαν αρχικά 5 ζευγάρια ράβδων από αλουμίνιο πάχους 2mm (είναι η πιο λεπτή λαμαρίνα που υπάρχει στην αγορά για αλουμίνιο) για τη γρήγορη διεξαγωγή πειραμάτων που θα καθορίσουν την μετέπειτα πορεία.

Οι δοκιμές στα πεπερασμένα έγιναν με μέγιστη δύναμη 10N, (τη διπλάσια από αυτήν που παράγει ο ΣΒΚ) και έδειξαν ότι τα στικς δε θα άντεχαν τις καταπονήσεις. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 54, η πίεση που δέχεται το στικ στην ένωση φτάνει τα 484MPa και η μετατόπιση του αλουμινίου από τον κεντρικό άξονα είναι περίπου

10mm. Αυτό βέβαια όπως είναι κατανοητό καταστρέφει το στικ.. Τόσο από περιέργεια, όσο και για επαλήθευση έγινε δοκιμή και σε πραγματικές συνθήκες καταστρέφοντας έτσι ένα ζευγάρι ράβδων.

Όμως το AI ήταν το μόνο υλικό που θα έδινε ελαφρύτερο αποτέλεσμα και ταυτόχρονα θα είχε μια στοιχειώδη αντοχή σε μία οικονομικά προσιτή τιμή.



**Εικόνα 54. Απεικόνιση δυνάμεων στην επιφάνεια των ράβδων στην δοκιμή με το servo cap**

Πίνακας Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης Ράβδων Αλουμινίου με το πρώτο Servocap		
Υλικό	AL 6061	Πάχος 2mm και 4mm στα σημεία επαφής των ράβδων
Δύναμη	10 N	Ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια
Συγκράτηση	Πάκτωση	Σε όλη την επιφάνεια επαφής με servocap
Μέγιστη Τάση	484MPa	Εκεί που τελειώνει η επαφή με το servocap
Μέγιστη Μετατόπιση	8,59 mm	Στην κάτω άκρη των ράβδων

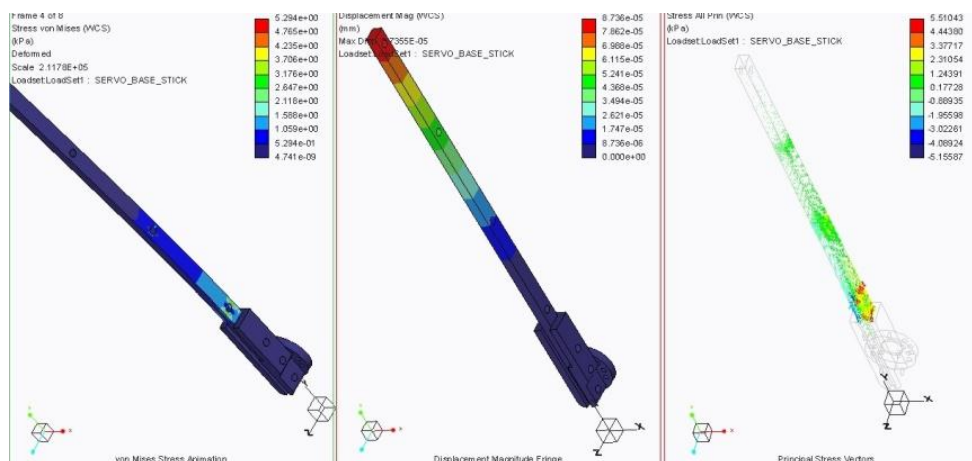
**Πίνακας 2. Αποτελέσματα για τα στικς αλουμινίου από τη δοκιμή με το πρώτο servocap**

Για να φανεί αν ευθύνεται μόνο το αλουμίνιο, έγιναν αλλαγές στις παραμέτρους και στη θέση του αλουμινίου μπήκε το ανοξείδωτο ατσάλι (SS), με τα αποτελέσματα να είναι σχετικά ίδια, καθώς η μέγιστη καταπόνηση ήταν στα 300MPa και η μέγιστη μετατόπιση έπεσε στο 1,5mm (πίνακας 3).

Πίνακας Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης Ράβδων SS με το πρώτο Servocar		
Υλικό	SS	Πάχος 2mm και 4mm στα σημεία επαφής των ράβδων
Δύναμη	10 N	Ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια
Συγκράτηση	Πάκτωση	Σε όλη την επιφάνεια επαφής με servocar
Μέγιστη Τάση	300MPa	Εκεί που τελειώνει η επαφή με το servocar
Μέγιστη Μετατόπιση	1.34mm	Στην κάτω άκρη των ράβδων

*Πίνακας 3. Αποτελέσματα για τα στικς από ανοξείδωτο ατσάλι από τη δοκιμή με το πρώτο servocar*

Έτσι έπειτα από μελέτη και σύγκριση στις δοκιμές, έγινε κατανοητό ότι δεν έφταιγε μόνο το αλουμίνιο, αλλά η προσέγγιση της συναρμολόγησης του στίκ με το HornCar αφού τις μέγιστες καταπονήσεις τις δεχόταν η μία ράβδος με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα ήταν να αλλαχθεί η κατασκευή του ServoCar και το σημείο μέγιστης καταπόνησης να μεταφερθεί εκεί όπου οι 2 ράβδοι είναι ενωμένες. Τα νέα αποτελέσματα των δοκιμών σε ράβδους αλουμινίου 2mm παρουσιάζονται στην εικόνα 55 και στον πίνακα 4.



**Εικόνα 55. Απεικόνιση δυνάμεων στην επιφάνεια των ράβδων από αλουμίνιο αφού έχουν προσαρμοστεί στη νέα κατασκευή servoCap.**

Πίνακας Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης Ράβδων AL 6061 με το τελικό Servocar		
Υλικό	AL 6061	Πάχος 2mm και 4mm στα σημεία επαφής των ράβδων
Δύναμη	10 N	Ομοιόμορφη σε όλη την επιφάνεια
Συγκράτηση	Πάκτωση	Σε όλη την επιφάνεια επαφής με servocar
Μέγιστη Τάση	5.3 kPa	Εκεί που τελειώνει η επαφή με το servocar
Μέγιστη Μετατόπιση	0.89 μm	Στην κάτω άκρη των ράβδων

**Πίνακας 4. Αποτελέσματα για τα στικς αλουμινίου από τη δοκιμή με τη νέα κατασκευή του servocar**

Οι δυνάμεις που ασκούνται και στις 2 περιπτώσεις είναι ίδιες και σε φορά και σε μέγεθος. Ωστόσο, με την προέκταση του servoCap, το σημείο μέγιστης καταπόνησης είναι πάλι στο σημείο που τελειώνει το servoCap, όμως εκεί πλέον συναντά 2 ράβδους αλουμινίου συνολικού πάχους 4 mm. Έτσι στο σημείο αυτό οι καταπονήσεις στις ράβδους του αλουμινίου είναι λίγο πάνω από τα 5kPa και με μέγιστη μετατόπιση μικρότερη των 0,9μm.

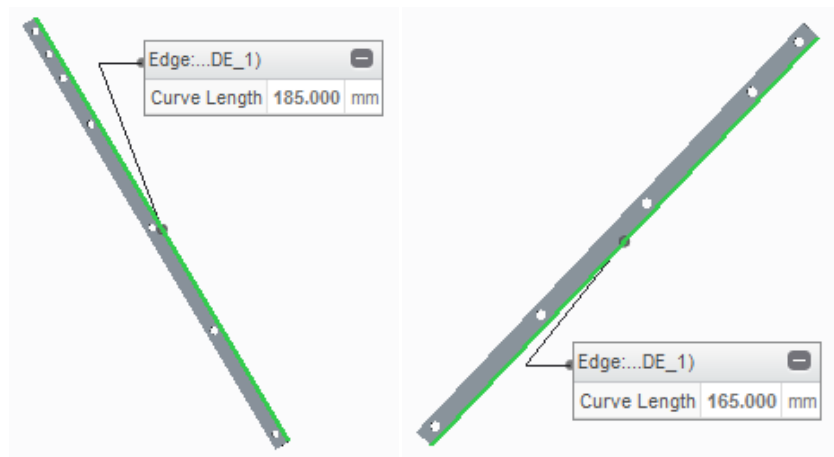
Παρότι το αλουμίνιο φάνηκε να αντέχει, κατασκευάστηκαν και στικς από ανοξείδωτο ασάλι (SS). Όπως είναι αυτονόητο το βάρος δεν μειώθηκε, όμως οι επιφάνειες ήταν εντελώς επίπεδες και ομοιόμορφες, με αποτέλεσμα να συγκρατούν τη μεμβράνη πολύ καλά. Αυτό έγινε γιατί το φύλλο του SS δεν ήταν πολύ ακριβό και το πρόγραμμα κοπής στη CNC είναι σχεδόν το ίδιο.

Στην πορεία εμφανίστηκε η ανάγκη κατασκευής και άλλων, διαφορετικού μήκους στικς (μικρότερα από το προηγούμενα) για τη διενέργεια και άλλων πειραματικών δοκιμών από την ομάδα του Δρ. Σφακιωτάκη.

Το πλάνο με τα 2 μεταλλικά φύλλα (αλουμίνιο, ανοξείδωτο) ήταν να κατασκευαστούν 4 διαφορετικού τύπου στικς, 2 από AL και 2 από SS σε 3 διαφορετικά μήκη. Όλα τα στικς θα είχαν το ίδιο πάχος 2mm και εκτιμήθηκε ότι θα κατασκευάζονταν 15 ζευγάρια από το κάθε είδος.

Τελικά κατασκευάστηκαν:

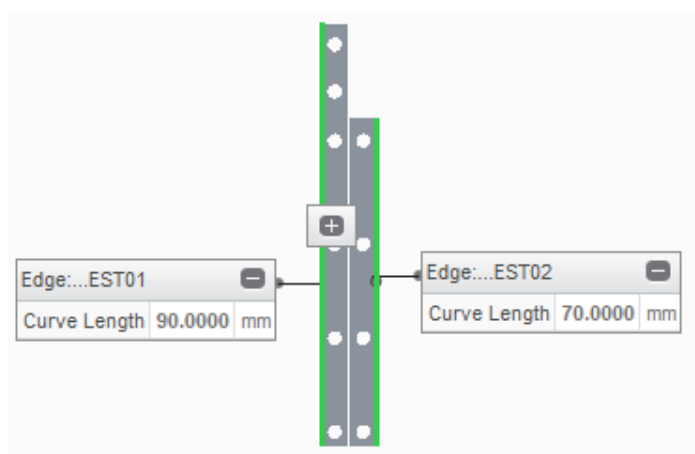
Απο αλουμίνιο: 13 ζευγάρια από τα μακριά στικς, με το βάρος του κάθε ζεύγους να είναι 10.6g (εικόνα 56).



**Εικόνα 56. Μακριά στικς από Αλουμίνιο**

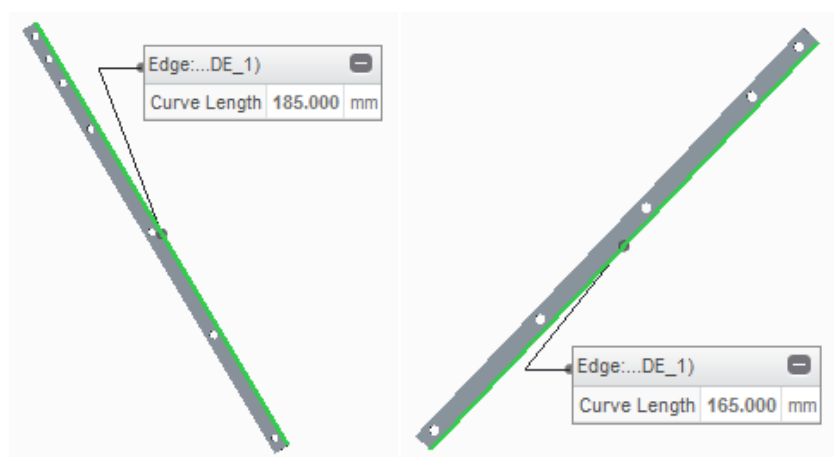
14 ζευγάρια από τα κοντά στικς, με βάρος ζεύγους στα 5g (εικόνα 57).





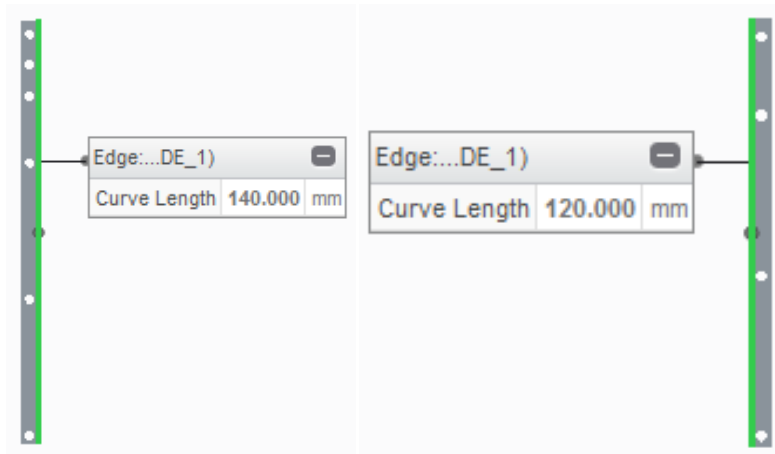
**Εικόνα 57. Κοντά στικς από Αλουμίνιο**

Απο ανοξείδωτο αστάλι: 14 ζευγάρια από τα μακριά στικς με βάρος 31g (εικόνα 58).



**Εικόνα 58.**

12 ζευγάρια από τα κοντά στικς με βάρος 22g το ζευγάρι (εικόνα 59).



Εικόνα 59

Πίνακας κατασκευής Στικς από Αλουμίνιο		
Αριθμός Στικς	Μέγιστο / Ελάχιστο Μήκος	Βάρος/ ζεύγος
13	185 / 165 mm	10.6 g
14	90 / 70 mm	5 g

Πίνακας κατασκευής Στικς απο SS		
Αριθμός Στικς	Μέγιστο / Ελάχιστο Μήκος	Βάρος/ Στικ
14	185 / 165 mm	31 g
12	140 / 120 mm	22 g

#### 4.1.10 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΣΤΙΚΣ

Η κατασκευή των στικς ήταν η πιο δύσκολη και χρονοβόρα εργασία

Αρχικά κατασκευάστηκαν 5 ζευγάρια σε εξωτερικό εργαστήριο. Αυτό έγινε διότι έπρεπε να γίνουν άμεσα ορισμένες δοκιμές που θα καθόριζαν την μετέπειτα πορεία στο σχεδιασμό και την κατασκευή μεγάλου μέρους της εργασίας. Αυτό κόστισε 50€ (η τιμή είχε συμφωνηθεί πριν την κατασκευή) και έπειτα από την ολοκλήρωση, ζητήθηκε από το εργαστήριο αυτό, να μην ξαναγίνει τέτοια κατασκευή αφού

αποδείχτηκε πιο δύσκολη από ότι είχε αρχικά σχεδιαστεί (έσπασαν 2 κοπτικά και χρειάστηκαν αρκετές ώρες εργασίας).

Η κατεργασία τους έγινε στο εργαστήριο ρομποτικής σε CNC φρέζα, και η πρώτη ύλη ήταν φύλλο μετάλλου (AL, SS). Το μέγεθος του ακατέργαστου κομματιού ήταν αρχικά 1x0.4 m, το οποίο υπολογίστηκε ότι θα παρήγαγε 15 ζευγάρια στικς σε 2 διαφορετικά μήκη.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην όλη διαδικασία κατασκευής των στικς ήταν η τοποθέτηση και στήριξη του ακατέργαστου κομματιού στην CNC μηχανή. Το αρχικό μέγεθος του ακατέργαστου φύλλου, χωρούσε στην μηχανή και ήταν μέσα στα όρια κατεργασίας, δεν μπορούσε όμως να στηριχτεί σωστά στην τράπεζα στήριξης της CNC. Αυτό διορθώθηκε κόβοντας τα φύλλα στη μέση, με διαστάσεις 0.5x0.4m. Με αυτόν τον τρόπο θα πραγματοποιούνταν 4 κατεργασίες αντί για 2, αυξάνοντας έτσι τις πιθανότητες λάθους, και πιθανών προβλημάτων στις κατεργασίες, όπως και έγινε. Η μεγαλύτερη πρόκληση στην κατεργασία, ήταν ότι το φύλλο είχε πολύ μικρό πάχος και έπρεπε να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην πολύ καλή στήριξή του και από την κάτω επιφάνεια στη διάρκεια της κατεργασίας, ώστε να αποφευχθούν οι ταλαντώσεις.

Αφού το κομμάτι κόπηκε στη μέση, μπορούσε πλέον να πιαστεί από τους σφικτήρες της μηχανής. Για την αποφυγή των πολλών ταλαντώσεων που θα υπήρχαν, τοποθετήθηκε από κάτω για καλύτερη στήριξη ένα κομμάτι ερταλόν. Αρχικά έγιναν οι τρύπες Φ3 (εικόνα 45) των στικς και σε αυτές τοποθετήθηκαν βίδες για τη συγκράτησή του φύλλου κατεργασίας με το ερταλόν. Το ερταλόν έδωσε μια πολύ καλή λύση, καθώς το ξύλο απαγορεύεται στην CNC μηχανή και το μέταλλο κοστίζει αρκετά. Επιπλέον έδινε τη δυνατότητα να ανοίξουμε τρύπες για την καλύτερη δυνατή στήριξη και σταθεροποίηση του φύλλο κατεργασίας.

Έτσι η κατεργασία είχε ως εξής: Το κομμένο πλέον κομμάτι (0,5x0,4m), τοποθετήθηκε στη μηχανή και δέθηκε στην τράπεζα (εικόνα 46, 47). Χρησιμοποιώντας τρυπάνι A100 Φ3 της Dormer δημιουργήθηκαν οι τρύπες των στικς. Στη συνέχεια βιδώθηκαν οι αντίστοιχες βίδες με το ερταλόν για να υπάρχει η καλύτερη δυνατή στήριξη. Έπειτα προτιμήθηκε με τρυπάνι Φ8 να δημιουργηθούν τρύπες δίπλα από κάθε στικ ώστε από εκεί να κατεβαίνει και να ξεκινήσει το κοπτικό που τελικά έκοψε το περίγραμμα των στικς. Έτσι εξοικονομήθηκε πολύς χρόνος κατεργασίας καθώς το συγκεκριμένο κοπτικό μηχανήμα δεν έχει τη δυνατότητα κάθετης κοπής.

Έπειτα θα γινόταν η τελική κατεργασία milling για να πάρουν την μορφή τους οι ράβδοι, με κοπτικό Dormer c352. Λόγο προβλήματος στην εύρεση του κοπτικού η κατεργασία έγινε με κοπτικό Alimaster. Ε7, οι συνθήκες κοπής (πίνακας 5, 6) επιλέχτηκαν βάση του πίνακα της Dormer ( με περίπου 15% μείωση σε κάθε τιμή) διότι δεν υπήρχε ο αντίστοιχος κατάλογος της Alimaster. Έτσι το κοπτικό κατέβηκε στην τρύπα Φ10 και ξεκίνησε την κατεργασία του χωρίς να παρουσιαστεί ιδιαίτερο πρόβλημα.

Συνθήκες κοπής AL6061 στικς	
Οπές 3mm με κοπτικό Dormer A100 Φ3	
Speed	3183 rev / min
Feed	318,31 mm/min
Axial depth	3 mm
Radial depth	3 mm
Κατεργασία Οπών 8 Φ10mm	
Speed	909 rev/min
Feed	500 mm/min
Axial depth	3
Radial depth	8
Κατεργασία κοπής ράβδων κοπτικό Alimaster	
Speed	7957 rev/min
Feed	636,62 mm/min
Axial depth	2
Radial depth	8

*Πίνακας 5*

Συνθήκες κοπής στικς SS	
Οπές 3mm με κοπτικό Dormer A100 Φ3	
Speed	1500 rev / min
Feed	35 mm/min
Axial depth	3 mm
Radial depth	3 mm
Κατεργασία Οπών 8 Φ10mm	
Speed	200rev/min
Feed	50 mm/min
Axial depth	3
Radial depth	8
Κατεργασία κοπής ράβδων κοπτικό Alimaster	
Speed	2785 rev/min
Feed	130 mm/min
Axial depth	2
Radial depth	8

*Πίνακας 6*

Το αποτέλεσμα της κοπής φαίνεται στην εικόνα 60. Από τις ταλαντώσεις ορισμένα από τα κομμάτια έφυγαν από τη θέση τους, παρότι ήταν βιδωμένα με τουλάχιστον 2 βίδες πάνω στο ερταλόν. Οι άκρες των στικς χρειάζονταν και περεταίρω κατεργασία, αφού λόγω των ταλαντώσεων η CNC δεν μπορούσε να δώσει άμεσα το επιθυμητό αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητο να κατεργαστούν τα στικς με το τρυπάνι Dremel, έτσι ώστε να ομαλοποιηθούν οι άκρες τους και να απορριφθεί όποιο περιττό υλικό είχε απομείνει. Το τελικό αποτέλεσμα εμφανίζεται στην εικόνα 61.



**Εικόνα 60. Τοποθέτηση και συγκράτηση φύλλου μετάλλου στην CNC φρέζα, υπάρχουν 4 σφικτήρες στις άκρες του κομματιού και ένα κομμάτι μετάλλου στο κέντρο για την αποφυγή ταλαντώσεων.**



**Εικόνα 61. Συγκράτηση στην CNC. Το εργαλόν βρίσκεται κάτω από το φύλλο μετάλλου και κάτω από αυτό υπάρχει άλλο ένα ορθογώνιο κομμάτι στην μέση για την αποφυγή των έντονων ταλαντώσεων στο μέσο του κατεργαζόμενου κομματιού.**



**Εικόνα 62. Αποτέλεσμα έπειτα την κατεργασία. Παρατηρούνται οι ράβδοι μετάλλου οι οποίοι είναι βιδωμένοι με το εργαλόν και έτσι παραμένουν στις θέσεις του, εκτός από 2 ράβδους που δεν συγκροτήθηκαν πλήρως .**



**Εικόνα 63. Ράβδος μετάλλου αμέσως μετά την κατεργασία του στην CNC φρέζα. Παρατηρούνται οι ατέλειες στα σημεία όπου πέρασε το κοπτικό.**



**Εικόνα 64. Τελικό αποτέλεσμα των ράβδων μετάλλου έπειτα απο κατεργασία στο χέρι με το τρυπάνι Dremel.**

#### **4.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ**

Μετά την κατασκευή των επιμέρους τμημάτων που θα συντελούσαν στη βελτιστοποίηση του ρομποτικού σκάφους, σειρά είχε η συναρμολόγησή τους και η ολοκλήρωση της κατασκευής.

➤ Αρχικά, προσδιορίστηκε η θέση του οδηγού κύλισης κεντρικά επάνω στη δεξαμενή. Ως δεξαμενή χρησιμοποιήθηκε η ήδη υπάρχουσα κατασκευή, που είχε χρησιμοποιηθεί και στο πρωτότυπο. Ο σκελετός της δεξαμενής είναι κατασκευασμένος από ξύλο, το οποίο είναι επενδυμένο από νάιλον μουσαμά, έτσι ώστε να συγκρατεί τα νερά εντός της κοιλότητας της κατασκευής. Στην κορυφή της δεξαμενής βιδώθηκε με λαμαρινόβιδες το τμήμα του ερτασετάλ, επάνω στο οποίο είχε προσαρμοστεί ο οδηγός κύλισης (εικόνα 65).



*Εικόνα 65. Προσαρμογή του οδηγού κύλισης με το ερτασετάλ, επάνω στη δεξαμενή.*

Το φορείο τοποθετήθηκε με τα ρουλεμάν στις εγκοπές του οδηγού RBB (εικόνα 66),

*Εικόνα 66. Συναρμολόγηση του φορείου με τα ρουλεμάν επάνω στον οδηγό κύλισης*

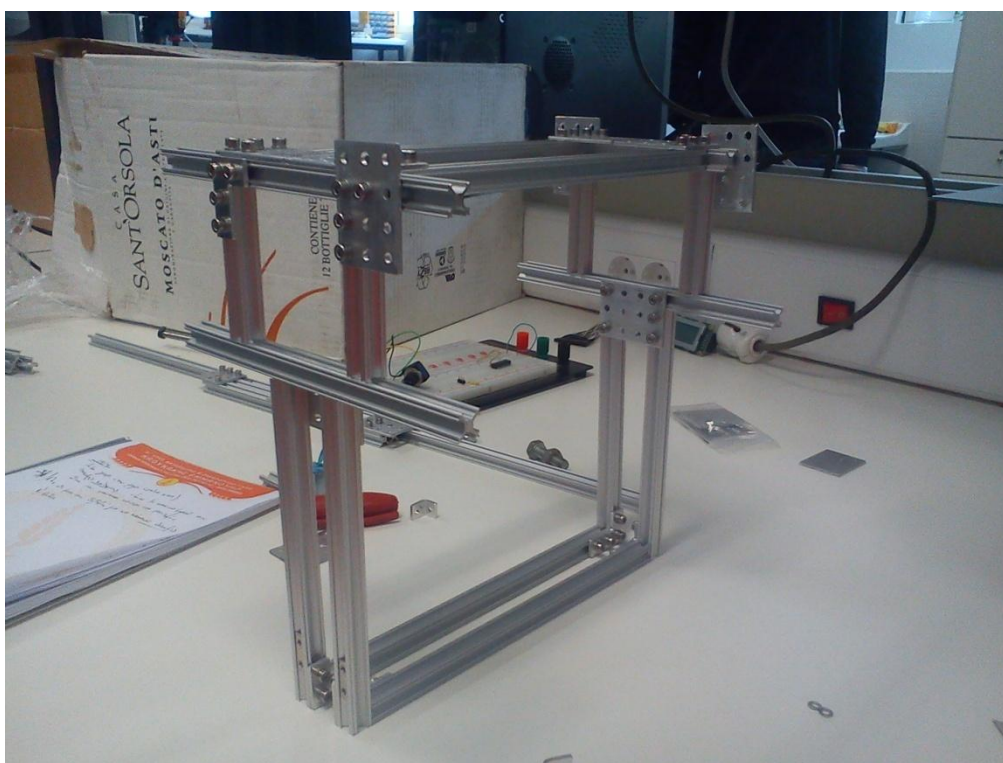
➤ Σειρά είχε η συναρμολόγηση των τμημάτων της ράγας *mgax*, έτσι ώστε να μπορούν να συνδεθούν οι κινητήρες με τον οδηγό. Στις αρθρώσεις χρησιμοποιήθηκαν οι 3 βασικές αρθρώσεις που υπήρχαν στο βασικό πακέτο. Αυτές ήταν οι εξής: η άρθρωση τύπου "L" που έχει 4 τρύπες, η γωνιακή άρθρωση που επιτρέπει να στερεωθεί μια δοκός σε γωνία 45 μοιρών και ο γωνιακός βραχίονας των 90 μοιρών (εικόνα 67).

Στην πορεία χρειάστηκε να κατασκευαστούν αρθρώσεις από πλάκες αλουμινίου 35x40mm με συνολικά 12 τρύπες 3mm σε απόσταση 10mm μεταξύ τους. Αυτό έγινε αφενός επειδή υπήρχε περιορισμένος αριθμός σε L plates και αφετέρου να μπορέσει η κατασκευή να έχει την κατάλληλη στιβαρότητα.



Έτσι έπειτα από διάφορες δοκιμές, η τελική γεωμετρία των mRax που χρησιμοποιήθηκε, είναι αυτή που απεικονίζεται στην εικόνα 68:

**Εικόνα 67. Άρθρωση τύπου "L" (αριστερά), γωνιακή άρθρωση 45° (μέσον) και γωνιακός βραχίονας 90° (δεξιά)**



**Εικόνα 68. Τελική κατασκευή του συνδέσμου του οδηγού κύλισης με τους σερβοκινητήρες, κατασκευασμένη από mRax.**

Κάθε μία ράγα μεμονωμένα έχει τη δυνατότητα να αντικατασταθεί ή ακόμα και να μετακινηθεί, παρέχοντας έτσι την απαραίτητη ευελιξία για οποιαδήποτε ενδεχόμενη μελλοντική μεταβολή.

Επιπλέον, σχεδιάστηκε και πραγματοποιήθηκε άλλη μια ενδιάμεση κατασκευή, η οποία συνέδεε τους νέους σερβοκινητήρες, με την υπάρχουσα διάταξη της δεξαμενής. Αυτό έγινε για την διευκόλυνση των δοκιμών, την εξοικονόμηση χρόνου, αλλά και τη διεξαγωγή νέων δεδομένων που θα βοηθήσουν στην ολοκλήρωση της τελικής κατασκευής και των τελικών ρυθμίσεων.

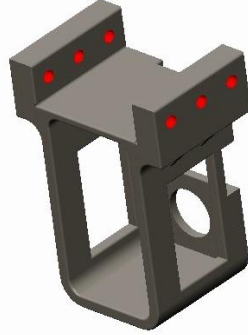
➤ Στη συνέχεια οι σερβοκινητήρες θα έπαιρναν τη θέση τους μέσα στις νέες βάσεις στήριξης που κατασκευάστηκαν με βάση τη γεωμετρία τους.

Μετά την εκτύπωση της πρώτης βάσης, αρχικά έγινε έλεγχος της σύνδεσης που θα είχε με τον ΣΒΚ. Αυτή ήταν άψογη, αφού ο κινητήρας εφαπτόταν τέλεια με την θήκη και απαιτούσε λίγη πίεση για να "κουμπώσει" στην θήκη χωρίς να τραυματίζεται το περίβλημα. Οι οπές των Φ2mm στο πίσω μέρος της θήκης βρίσκονταν ακριβώς εκεί που έπρεπε και έτσι πολύ εύκολα βιδώθηκε και σταθεροποιήθηκε σωστά ο κινητήρας (εικόνα 69).

***Εικόνα 69. Κινητήρας προσαρμοσμένος μέσα στη βάση στήριξης.***

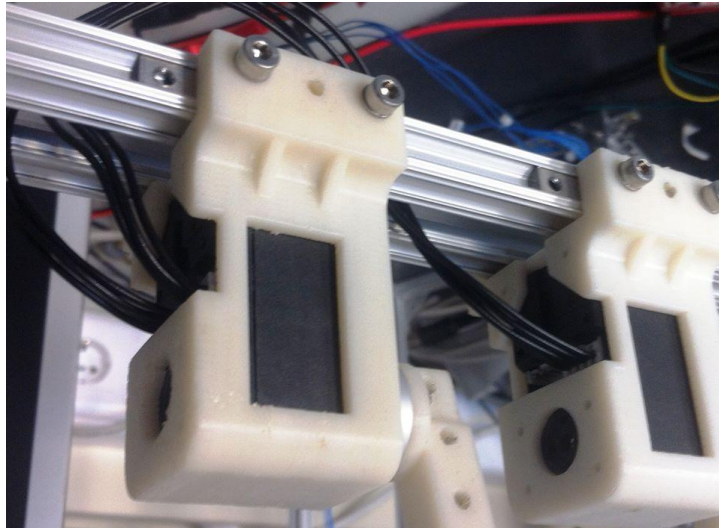
➤ Ακολούθησε η συναρμολόγηση των βάσεων των κινητήρων επάνω στην κατασκευή mraX. Η βάση έχει συνολικά 6 οπές ώστε να περάσουν από εκεί βίδες 3mm, οι οποίες θα τη συγκρατούν επάνω στη ράγα mraX (εικόνα 70). Οι οπές βρίσκονται σε τέτοιο ύψος από την επιφάνεια της βάσης, ώστε να επιτρέπουν στη ράβδο του mRaX να εφάπτεται παράλληλα με την θήκη. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης

βοηθάει πολύ στην εξομάλυνση των δυνάμεων και στην αποφυγή ταλαντώσεων κατά την λειτουργία των κινητήρων.



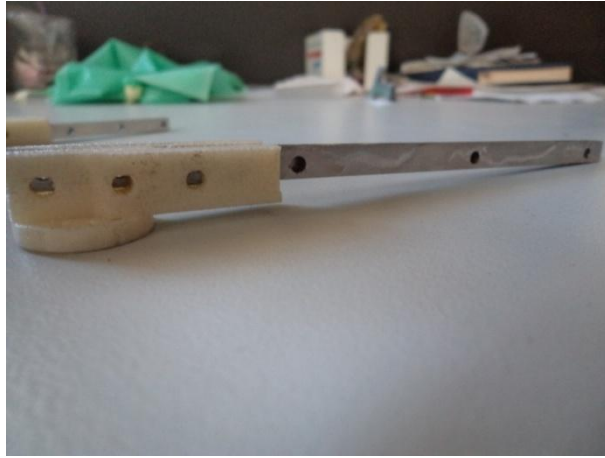
**Εικόνα 70. Οπές σύνδεσης της θήκης με τη ράγα mRax**

Η σύνδεση ήταν πολύ απλή και πραγματοποιήθηκε ως εξής. Αρχικά τοποθετήθηκε ο απαραίτητος αριθμός nutplate στην ράβδο mRax και στην συνέχεια βιδώθηκαν επάνω στα nutplates οι θήκες servoholders. Στη συνέχεια, με μεγάλη ευκολία οι θήκες είχαν τη δυνατότητα να μετακινηθούν στο επιθυμητό σημείο και στις σωστές αποστάσεις, ανάλογα με τη φύση της διεξαγωγής του πειράματος. Στην εικόνα 71 φαίνεται η τελική συναρμολόγηση.



**Εικόνα 71. Συναρμολόγηση των servoholders επάνω στη ράγα mRax.**

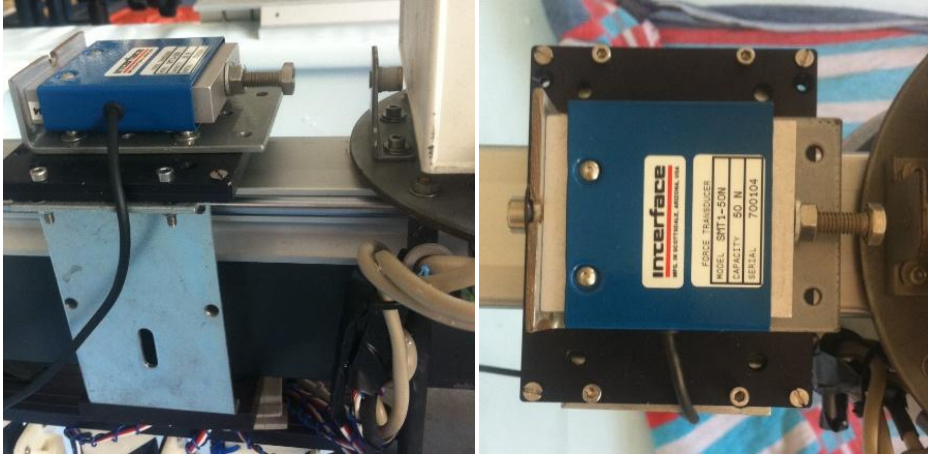
- Εφόσον οι κινητήρες είχαν πάρει τη θέση τους, έμενε να προσαρμοστούν επάνω τους τα servoCaps που συγκρατούσαν τις μεταλλικές ράβδους κίνησης (εικόνα 72)



*Εικόνα 72. ServoCap με ενσωματωμένη μεταλλική ράβδο κίνησης.*

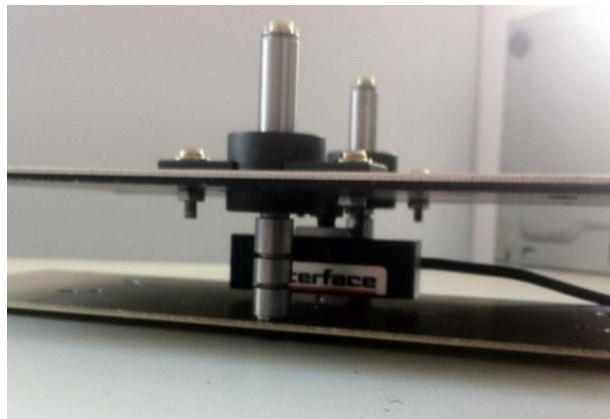
- Η βασική κατασκευή ήταν πλέον έτοιμη, επομένως σε αυτό το σημείο, έπρεπε να τοποθετηθούν στις κατάλληλες θέσεις οι αισθητήρες δύναμης.

Ο αισθητήρας SMT1 έπρεπε να τοποθετηθεί στην ράγα κύλισης με τέτοιο τρόπο, ώστε το μηχανικό ψάρι να βρίσκεται στη μέση της δεξαμενής και να μπλοκάρει σταθερά την οριζόντια κίνηση του ψαριού έτσι ώστε να μετράει τις μεταβολές της δύναμης που ασκεί σε διάφορες συχνότητες κίνησης των πτερυγίων, για την εξαγωγή των δεδομένων. Το σημαντικό για τη σωστή λειτουργία του ήταν να στηριχθεί πολύ σταθερά πάνω στην ράγα, αλλά και να δέχεται κάθετα τις δυνάμεις του ψαριού (για την αποφυγή απωλειών). Όλα αυτά οδήγησαν στην κατασκευή μίας βάσης για τον αισθητήρα, από το συνδυασμό διαφόρων κομματιών και εξαρτημάτων που υπήρχαν ήδη στο εργαστήριο, έτσι ώστε να εφαρμόζει πολύ καλά και εύκολα, επάνω στη ράγα κύλισης.



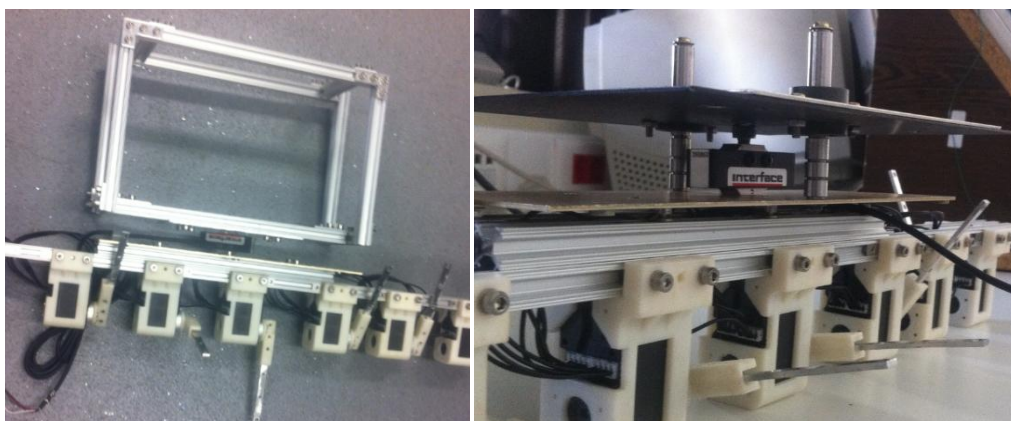
**Εικόνα 73. Προσαρμογή αισθητήρα SMT1**

Ο αισθητήρας interface SML ο οποίος υπολογίζει τις κάθετες δυνάμεις εμφάνιζε από την αρχή ( από τον σχεδιασμό) τη μεγαλύτερη δυσκολία στην εφαρμογή του. Σκοπός ήταν να τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να δέχεται τις κάθετες δυνάμεις από το μηχανικό ψάρι, αλλά ταυτόχρονα να μην επηρεάζεται από τις υπόλοιπες κινήσεις του. Όμως για να μπορεί ο αισθητήρας να δεχτεί τις μετρήσεις, θα έπρεπε να αφαιρεθούν τα στηρίγματα που ενώνουν τις διατάξεις των servo με τον οδηγό. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, η διάταξη αυτή να έχει πολλές ταλαντώσεις, και κινήσεις εκτός των κάθετων που ήταν το επιθυμητό.



**Εικόνα 74. Προσαρμογή αισθητήρα Interface SML.**





*Εικόνα 75. Προσαρμογή αισθητήρα Interface SML.*

Στην προσπάθεια βελτίωσης αυτής της στήριξης, υπήρξαν αρκετές ενδιαφέρουσες λύσεις, ωστόσο κρίθηκε ότι δεν ήταν εφικτές αυτήν την περίοδο, καθώς δεν ήταν επιτακτική ανάγκη να δοθεί έμφαση σε αυτές τις μετρήσεις στην παρούσα φάση, επομένως το συγκεκριμένο πρόβλημα προσπεράστηκε.

➤ Μετά την τελική συναρμολόγηση η εικόνα του βελτιωμένου ρομποτικού σκάφους είναι η ακόλουθη:



*Εικόνα 76. Ολοκλήρωση βελτιωμένου σχεδιασμού για το ρομποτικό σκάφος.*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αξιολογώντας τη νέα κατασκευή εν συγκρίσει με την παλιά, εντοπίζονται πλεονεκτήματα τόσο στη στιβαρότητά της, όσο και στη μεγάλη αντοχή στις καταπονήσεις. Μεγάλο όφελος παρέχεται από τις πολλές δυνατότητες συναρμολόγησης που δίνουν τα νέα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην ευελιξία στις αλλαγές της διάταξης των ΣΒΚ. Σχεδόν όλα τα τμήματα είναι τυποποιημένα και σχεδιασμένα σε 3D πρόγραμμα με αποτέλεσμα να δίνεται η δυνατότητα αναπαραγωγής όποιου εξαρτήματος είναι αναγκαίο χωρίς να διαφέρει από τα υπόλοιπα.

### 5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια των πειραματικών κατασκευών, προτείνεται να γίνουν κάποιες βελτιώσεις, οι οποίες εκτιμάται ότι θα βοηθήσουν σημαντικά σε μελλοντικές έρευνες, σχετικά με τα:

- ΣΤΙΚΣ

Ήταν γνωστό ότι αυτή θα ήταν η πιο δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία, εφόσον απαιτούνται αρκετές γνώσεις για την κατεργασία και τα λεπτά φύλλα μετάλλου το καθιστούσαν ακόμη πιο δύσκολο. Κατά την διάρκεια της κατασκευής τους, καταστράφηκαν δύο τρυπάνια Φ3 λόγω των ταλαντώσεων που είχε το λεπτό φύλλο του μετάλλου. Αυτό έγινε στις τρύπες που ήταν πιο κοντά στο κέντρο του κομματιού και δεν υπήρχε αρκετή στήριξη από τα κομμάτια ερταλόν που είχαν τοποθετηθεί από κάτω. Από την κατεργασία αυτή επαληθεύθηκε περίτρανα ότι το πιο σημαντικό κομμάτι στις κατεργασίες με CNC είναι το καλό δέσιμο του προς κατεργασία κομματιού στην μηχανή.

Για μελλοντικές παρόμοιες εργασίες πρέπει να υπάρχει πολύ καλή στήριξη όπως επιχειρήθηκε με το ερταλόν. Ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση, το πρόβλημα ήταν ότι τα κομμάτια που βρέθηκαν ήταν χρησιμοποιημένα και παρόλη την προσπάθεια κατεργασίας τους, δεν υπήρχαν οι επιθυμητές διαστάσεις και οι επίπεδες επιφάνειες που απαιτούνταν για το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η ιδέα στο να μη γίνει μια συνεχής

κατεργασία, αλλά να διακοπεί για να τοποθετηθούν οι βίδες στις τρύπες που αρχικά είχαν ανοιχτεί, ήταν καθοριστική για την πορεία της κατεργασίας.

Επιπλέον, εκτιμάται ότι τα στικς μελλοντικά θα μπορούσαν να γίνουν πιο λεπτά (να έχουν πάχος 1,5mm αντί για 2mm). Αυτό θα είναι λίγο δύσκολο, αφού μέχρι τώρα δεν υπήρχε μεγάλη πρόσβαση στην αγορά φύλλου αλουμινίου και αυτό μπορεί να ανεβάσει το κόστος. Αν όμως κριθεί απαραίτητο, με αρκετή προσοχή στο δέσιμο του κομματιού με την CNC αυτό είναι εφικτό.

- Ερτασετάλ

Προβλήματα υπήρξαν και κατά την προσπάθεια κατεργασίας του ερτασετάλ στη CNC μηχανή χωρίς να μπορεί να δοθεί ακριβής αιτιολογία. Κατά την προσπάθεια να παραλληλιστούν οι δύο επίπεδες επιφάνειες (πρώτα να κατεργαστεί η μία πλευρά και μετά η επόμενη), πάντα υπήρχε μια σημαντική απόκλιση από το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το πρόβλημα λύθηκε στον τόρνο, όπου φάνηκε ότι η πιο σταθερή και περιμετρική στήριξη που μπορούσε να παρέχει, έδωσε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Να σημειωθεί βέβαια ότι το δέσιμο στον τόρνο έγινε με την λιγότερη δυνατή πίεση από τις σιαγώνες συγκράτησής του.

- Οδηγός κύλισης

Μία επιπλέον υποστήριξη στον οδηγό κύλισης είναι πιθανόν να χρειαστεί. Αυτό προτείνεται επειδή ο συγκεκριμένος οδηγός εμφανίζει μεγάλο βάρος, με αποτέλεσμα υπό αυτές τις συνθήκες να παρουσιαστεί κάποια κλίση με την πάροδο του χρόνου της τοποθέτησής του στη δεξαμενή.

- Mrax

Αξίζει να τονιστεί, ότι το mrax μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στη βελτίωση της κατασκευής, εφόσον είναι ένα κομμάτι το οποίο εξελίσσεται συνεχώς. Νέες ράγες παράγονται σε νέα μήκη και νέες αρθρώσεις, που επιτρέπουν πιο περίπλοκες και στιβαρές κατασκευές, διατηρώντας ταυτόχρονα την ευκολία στη συναρμολόγηση.

Άλλα σημαντικά προβλήματα δεν υπήρξαν. Αξίζει ίσως να σημειωθεί ότι έγιναν και άλλες μικρές ενδιάμεσες κατασκευές για την προσπάθεια της διεξαγωγής παράλληλων πειραμάτων.



Πιθανόν σύντομα η κατασκευή, να χρειαστεί να λειτουργήσει σε πειράματα με περισσότερους βαθμούς ελευθερίας. Τότε θα μπορούσε να εξεταστεί η περίπτωση όπως το σχέδιο στην σελίδα 21 (αν και χρειάζεται πολύ μελέτη ακόμα).



## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Torque-Position Transformer for Task Control of Position Controlled Robots : Oussama Khatib,1 Peter Thaulad,1 Taizo Yoshikawa,1,2 and Jaeheung Park11: *Stanford Artificial Intelligence Laboratory*
2. Στοιχεία Μηχανών I & II : Δρ Αχιλλέας Βαΐρης
3. Μηχανική Ρευστών : Παντζαλης Νικόλαος
4. Compliant Humanoid Robot Control by the Torque Transformer : Taizo Yoshikawa and Oussama Khatib
5. Modeling Using Creo Parametric 2.0 : Sridhar Condo
6. Μάθημα CAM Σημειώσεις Εργαστηρίου για το λογισμικό Pro Engineer 2001 : Μάρκος Α. Πετούσης.
7. Εργαλειομηχανές με Ψηφιακή Καθοδήγηση : Νεκτάριος Βιδάκης, Αριστομένης Αντωνιάδης

### Ιστοσελίδες

1. <http://www.wired.com/2014/12/navy-ghostswimmer-robot-fish/>
2. <http://www.treehugger.com/gadgets/sea-turtle-robot-looks-out-water-pollution.html>
3. <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2580908/The-robot-set-make-splash-Mechanical-FISH-perfectly-mimics-movement-marine-creatures.html>
4. <http://www.vmi.edu/Content.aspx?id=10737427788>
5. [http://en.wikipedia.org/wiki/Ghost\\_knifefish](http://en.wikipedia.org/wiki/Ghost_knifefish)
6. [http://www.aluminium-profile.gr/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=34&Itemid=64](http://www.aluminium-profile.gr/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=34&Itemid=64)
7. <http://gr.rsdelivers.com/catalogue/category/power-transmission-linear-slides-guides-positioning-tables/8029.aspx>
8. <http://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium>
9. <http://www.aerospacemetals.com/aluminum-distributor.html>
10. <http://www.aerospacemetals.com/stainless-steel-distributor.html>

11. <http://www.seekpart.com/mechanical-parts-fabrication-services/>
12. <http://microrax.com/>
13. <http://www.boschrexroth.com/en/xc/>
14. <https://www.youtube.com/watch?v=LyMfcRI71do>
15. [https://www.youtube.com/watch?v=AUynnGz\\_nuU](https://www.youtube.com/watch?v=AUynnGz_nuU)
16. [http://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product\\_Data\\_Sheets\\_PDF/GEP/Ertacetal\\_C\\_PDS\\_E\\_04042012.pdf](http://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product_Data_Sheets_PDF/GEP/Ertacetal_C_PDS_E_04042012.pdf)
17. <http://www.edplastics.co.uk/Acetal.htm>
18. <http://science.time.com/>
19. <http://www.sgbotic.com/>
20. <http://jeb.biologists.org/content/216/13/2501.full>
21. <http://www.livescience.com/21081-robot-fish-patrol-nsf-ria.html>
22. <http://www.norsemandrill.com/drillFeedSpeed.php>
23. <http://www.dormerpramet.com/>