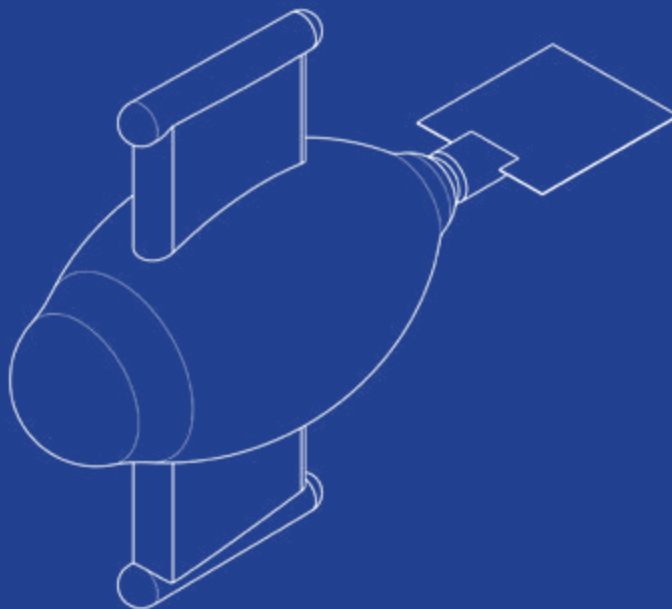


## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΠΩΣΗΣ  
**ΕΝΟΣ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΟΥ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ**  
ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΩΘΗΣΗΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΤΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ

ΣΥΝ-ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΑΛΚΕΤΑΣ ΟΥΓΓΡΙΝΗΣ

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΒΟΛΑΝΗΣ

ΧΑΝΙΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2018



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Δεν θα μπορούσα να φτάσω σε αυτό το αποτέλεσμα χωρίς την πολύτιμη βοήθεια των καθηγητών κ. Σταυρουλάκης και κ. Ουγγρίνης καθώς και άλλων ανθρώπων τους οποίους νιώθω την ανάγκη να τους ευχαριστήσω.

Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον κ. Ουγγρίνη για την καθοδήγησή και το υλικό που μου παρείχε σε κρίσιμα σημεία κατά το ξεκίνημα, αλλά και κατά τη διάρκεια της εργασίας μου, τον κ. Σταυρουλάκη για την καθοριστικής σημασίας παρέμβασή του σε προβλήματα που έχριζαν άμεσης επίλυσης καθώς και τον κ. Παπαδάκη για την πολύτιμη συμβουλή του.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, την αδερφή μου, του φίλους μου για την υποστήριξή τους καθώς και την Χριστίνα Μπ. για την έμπρακτη βοήθειά τους.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

E.1 Εισαγωγή στη Βιομιμητική Ρομποτική .....	13
E.2 Εισαγωγή στα Έξυπνα Υλικά .....	14
E.3 Εισαγωγή στη Θεωρία του Σμήνους .....	16

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Ο Προσδιορισμός των σταδίων ανάπτυξης του βιομιμητικού οχήματος

1.1 Ο Τύπος του ρομπότ .....	20
1.2 Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των βιομιμητικών ρομπότ .....	20
1.3 Αριθμός Froude και Ικανότητα Ελιγμών .....	24
1.4 Περιορισμοί στον σχεδιασμό του βιομιμητικού ρομπότ .....	24
1.5 Περιορισμοί στις διαστάσεις και το βάρος του βιομιμητικού ρομπότ .....	25
1.6 Σύγκριση των διαθέσιμων μηχανισμών ενεργοποίησης για μικρής κλίμακας SFRL .....	25
1.7 Αξιολόγηση των ενεργοποιητών THUNDER ως υποθαλάσσιοι προωθητήρες .....	27

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Ο Προσδιορισμός του Μηχανισμού Προώθησης

2.1 Σχεδιασμός του Μηχανισμού Κίνησης του Ουριαίου Πτερυγίου .....	30
2.2 Ανάλυση Μηχανισμού Κίνησης του Ουριαίου Πτερυγίου .....	30
2.3 Μοντελοποίηση του Πιεζοηλεκτρικού ενεργοποιητή .....	33
2.4 Μηχανισμός Προώθησης με χρήση Εύκαπτου Πτερυγίου .....	33
2.5 Αξιολόγηση της Λειτουργίας του Εύκαπτου Πτερυγίου .....	35
2.6 Ενσωματωμένο Ψηφιακό Σύστημα Ελέγχου .....	36

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Μορφή και Γεωμετρία του Κελύφους

3.1 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά SRFL για υποβρύχια Προώθηση .....	40
3.2 Κατανομή των Δυνάμεων που ασκούνται στο SRFL λόγω πίεσης .....	41

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Προσωμοίωση Βιομιμητικής Κίνησης

4.1 Αναπαράσταση της αρθρωτής μηχανικής διάταξης του ουριαίου πτερυγίου στη MATLAB .....	49
4.2 Ανάλυση κόπωσης στις αρθρωτές μηχανικές διάταξης του ουριαίου πτερυγίου .....	51

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	54
--------------------	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	56
--------------------	----

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	60
-------------------------	----



# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

E.1 Εισαγωγή στη Βιομιμητική Ρομποτική

E.2 Εισαγωγή στα Έξυπνα Υλικά

E.2.1 Αγώγιμα Πολυμερή

E.2.2 Διηλεκτρικά Ελαστομερή

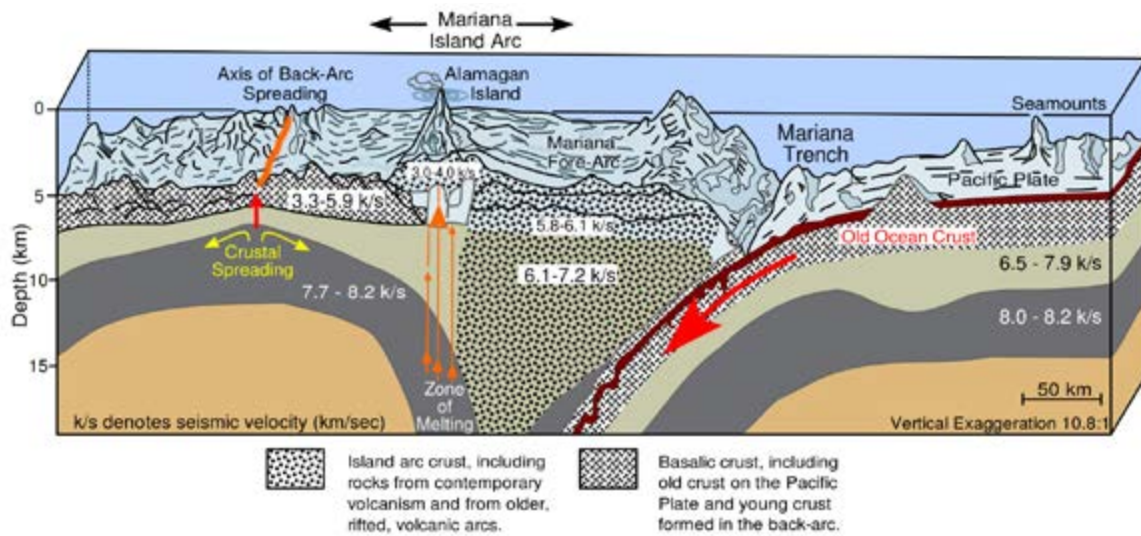
E.2.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

E.2.4 Gel Πολυμερή

E.2.5 Ηλεκτροενεργά Πολυμερή

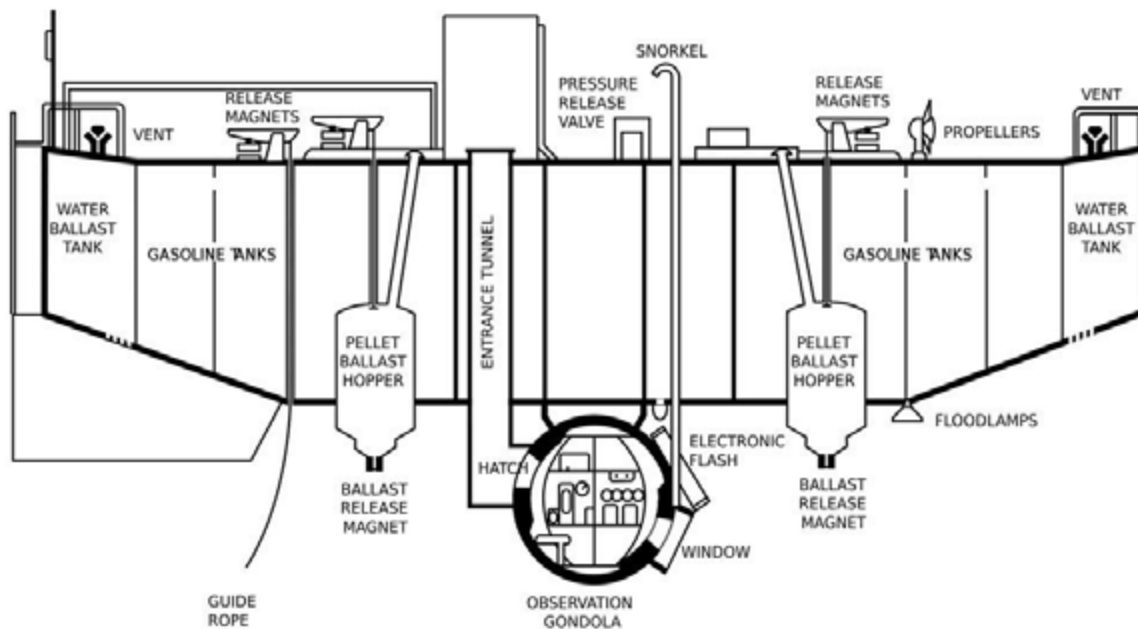
E.2.6 Μορφομεταβλητά Κράματα

E.3 Εισαγωγή στη Θεωρία του Σμήνους

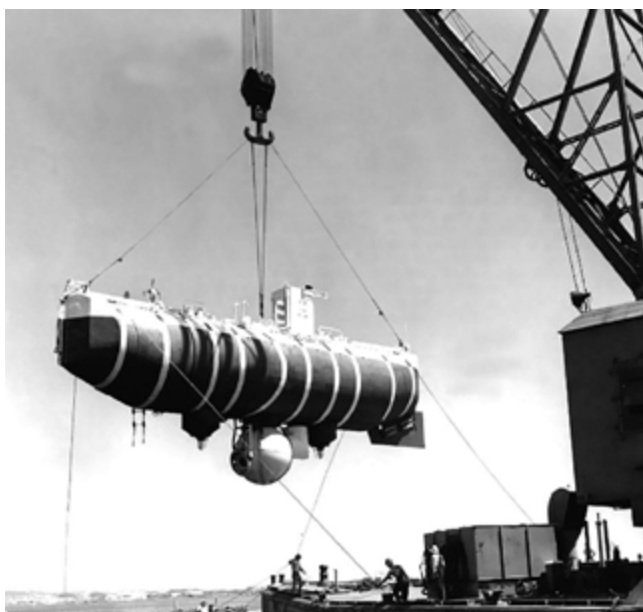


**Cross-Section Sketch of Mariana Arc**

Εικόνα Ε.1



Εικόνα Ε.2



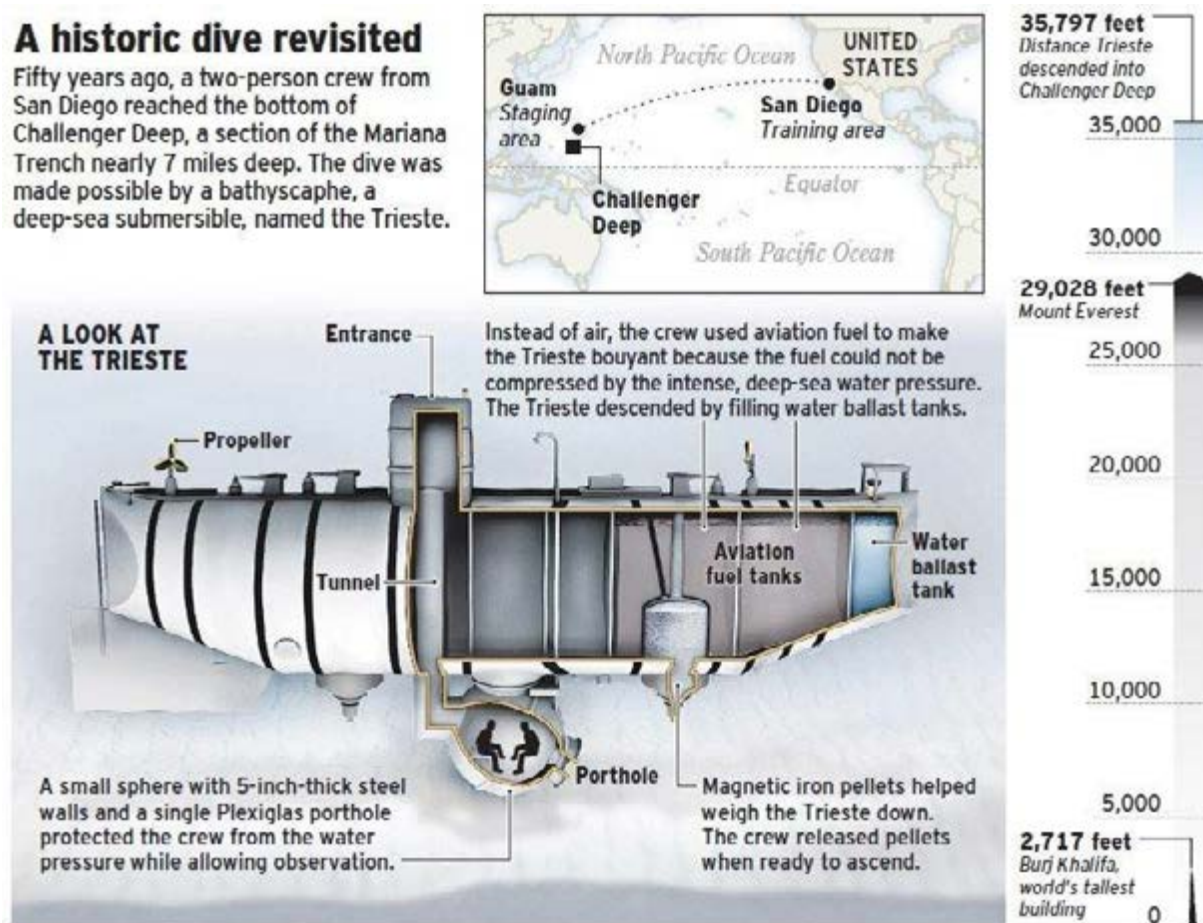
Εικόνα Ε.3



Η παρούσα διπλωματική εργασία παρέχει μια αναλυτική παρουσίαση του συνόλου των διαδικασιών που θα πρέπει να αξιολογηθούν για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τον αποτελεσματικό έλεγχο ενός υποβρύχιου βιομηπτικού οχήματος, με στόχο την εξερεύνηση του θαλάσσιου κόσμου και την παρατήρηση της υποθαλάσσιας ζωής. Ο μηχανισμός ενεργοποίησης της κίνησης του ουριαίου πτερυγίου βασίζεται αποκλειστικά σε έξυπνα υλικά και ποιο συγκεκριμένα στους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές της κατηγορίας THUNDER. Η εξερεύνηση του υποθαλάσσιου κόσμου περιλαμβάνει τη διερεύνηση φυσικών, χημικών και βιολογικών συνθηκών στο θαλάσσιο βυθό, για επιστημονικούς ή εμπορικούς σκοπούς. Η εξερεύνηση του θαλάσσιου βυθού θεωρείται σχετικά πρόσφατη ανθρώπινη δραστηριότητα σε σύγκριση με τους άλλους τομείς της γεωφυσικής έρευνας, με αποτέλεσμα τα βάθη των ωκεανών να εξακολουθούν έως και σήμερα να παραμένουν, σε μεγάλο βαθμό ανεξερεύνητα μέρη του πλανήτη. Οι δύο μεγαλύτερες αποστολές που αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο στην εξερεύνηση του θαλάσσιου βυθού είναι:

- Το 1960, ο Jacques Piccard και ο υπολοχαγός του Ναυτικού του Ηνωμένου Βασιλείου, Donald Walsh, κατέβηκαν στο bathyscaphe της Τεργέστης στο Mariana Trench, το βαθύτερο μέρος των ωκεανών του κόσμου, για να κάνουν την βαθύτερη κατάδυση στην ιστορία: 10.915 μ (εικόνες E.1 έως E.4).
- Στις 25 Μαρτίου 2012, ο σκηνοθέτης James Cameron κατέβηκε στο Mariana Trench και για πρώτη φορά όπου και αναμένεται να έχει κινηματογραφήσει καθώς και να έχει πάρει δείγματα από τον βυθό (εικόνες E.5 έως E.7).

Εικόνα E.4



## SOLO EXPEDITION TO CHALLENGER DEEP

Hollywood filmmaker James Cameron arrived at the Challenger Deep shortly before 2200 GMT on Monday, reaching a depth of 10,898m. He is the first human to reach the Mariana Trench's deepest point alone and the only one to explore it in depth, in person



The Mariana Trench is a crescent-shaped channel that extends more than 2.5km. Its deepest point, Challenger Deep, lies 11km below sea level

### THE DEEPSEA CHALLENGER

#### Material

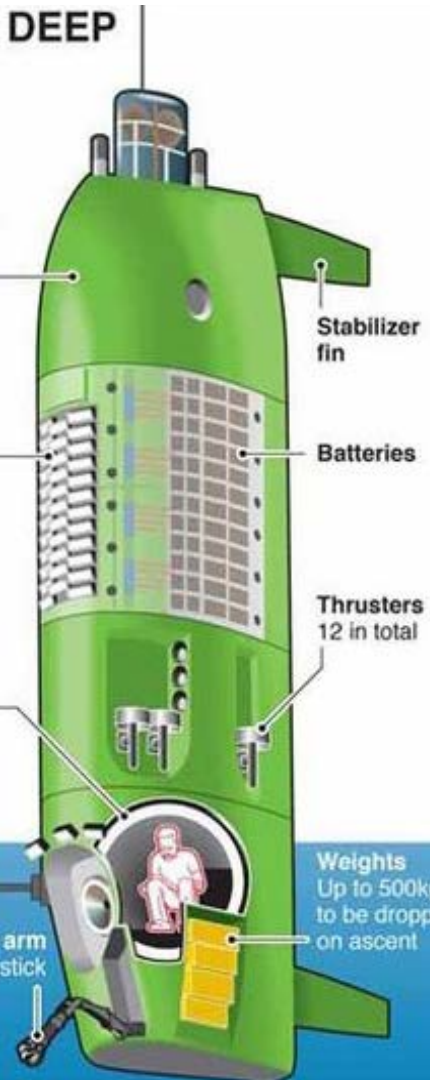
Specially designed "Iso-float" foam makes up 70% of sub's volume

#### Lighting array

2.4m-tall LED (light-emitting diode) array lights up to 30m in clear water

#### Pilot sphere

2.4-ton steel sphere has wall thickness of 6.4 cm, inner diameter of 109 cm. The pressure inside the pilot's sphere stays constant



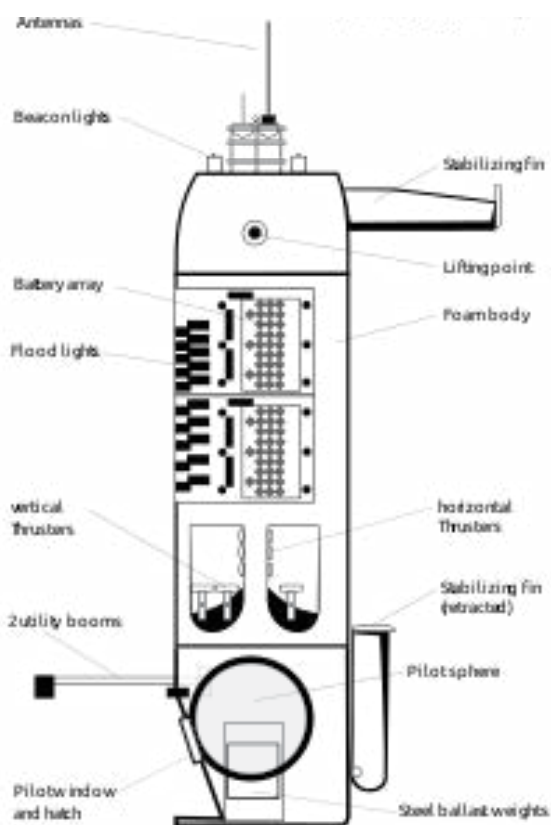
Εικόνα Ε.5

Οι εξερευνητικές αποστολές που έχουν γίνει στον βυθό της θάλασσας ανά τον κόσμο (εικόνα Ε.8), καταδεικνύουν έντονα το γεγονός, ότι οι συμβατικοί τρόποι με τους οποίους προσπαθούμε να ερευνήσουμε τον υποθαλάσσιο κόσμο έχουν φτάσει σε ένα τέλμα. Οι ακραίες συνθήκες που επικρατούν στα βάθη τις θάλασσας έχουν αναγκάσει τα διάφορα ερευνητικά κέντρα να αναζητήσουν λύσεις στα ζώα και τους οργανισμούς που επιβιώνουν σε αυτές τις ακραίες συνθήκες, προσπαθώντας να μιμηθούν τους μηχανισμούς με τους οποίους κινούνται, ενώ η ποικιλία των σχημάτων και των μορφών των οργανισμών αυτών αποτελεί αστείρευτη πηγή έμπνευσης. Η ανάπτυξη αυτής της ερευνητικής δραστηριότητας έχει οδηγήσει στην δημιουργία βιομιμητικών οχημάτων ικανών να λειτουργούν επιτυχημένα στις πολύ υψηλές πιέσεις αλλά και στις χαμηλές θερμοκρασίες που υπάρχουν σε αυτά τα βάθη.

Βασική πηγή έμπνευσης για την υλοποίηση αυτής της εργασίας, υπήρξε το βιβλίο “ON GROWTH AND FORM” του ερευνητή D’ARCY WENTWORTH THOMPSON. Στο βιβλίο αυτό παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται ένας ζωντανός οργανισμός, σε όλα τα στάδια της ζωής του, κρατώντας σταθερό ένα αρχικό σχήμα σκελετικής δομής το οποίο λειτουργεί σαν θεμέλιο για την περεταίρω ανάπτυξη του κελύφους του οργανισμού. Πάνω σε αυτήν ακριβώς την λογική βασίστηκε για τη δημιουργία του κελύφους “θεμέλιο” του βιομιμητικού υποβρύχιου οχήματος που προτείνω, με τελικό σκοπό καθώς το βιομιμητικό όχημα εξελίσσεται, με αποτέλεσμα να γίνεται ποιο “έξυπνο”, η αλλαγή που θα επιφέρει αυτή η εξέλιξη στο κέλυφος να έχει σαν αφετηρία το αρχικό σχήμα που προτείνω. Ξεκινώντας δηλαδή από μια αρχική δομή ενός βιομιμητικού οχήματος, το οποίο εκτελεί τις απόλυτα αναγκαίες λειτουργίες (ευθεία πρόωση), προχωράμε, έχοντας σαν αφετηρία το αρχικό κέλυφος, σε μια ποιο σύνθετη δομή και ένα βιομιμητικό όχημα το οποίο είναι ικανό να εκτελέσει περίπλοκες κινήσεις, όπως κίνηση σε όλους του άξονες, ικανότητα αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον που επιχειρεί και ικανότητα λήψεως αποφάσεων.

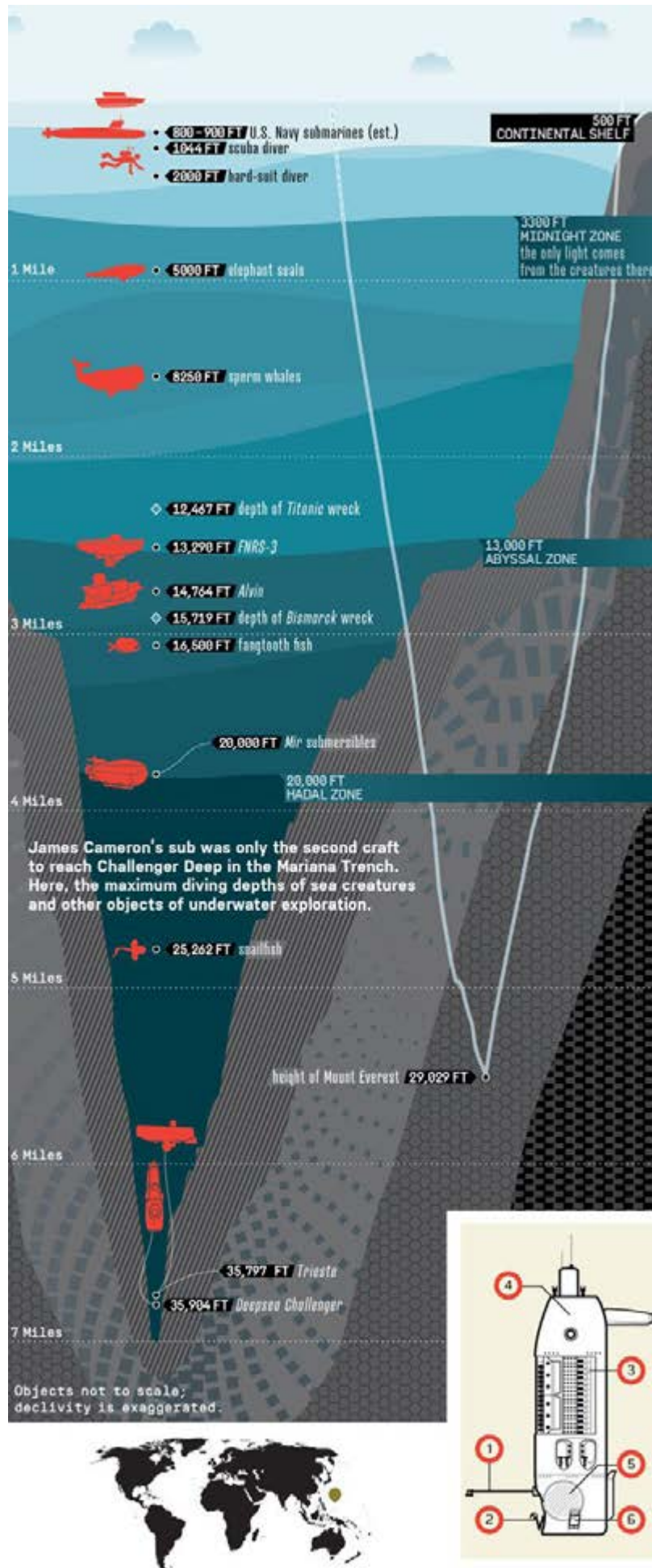


Εικόνα Ε.6



Εικόνα Ε.7





Εικόνα Ε.8

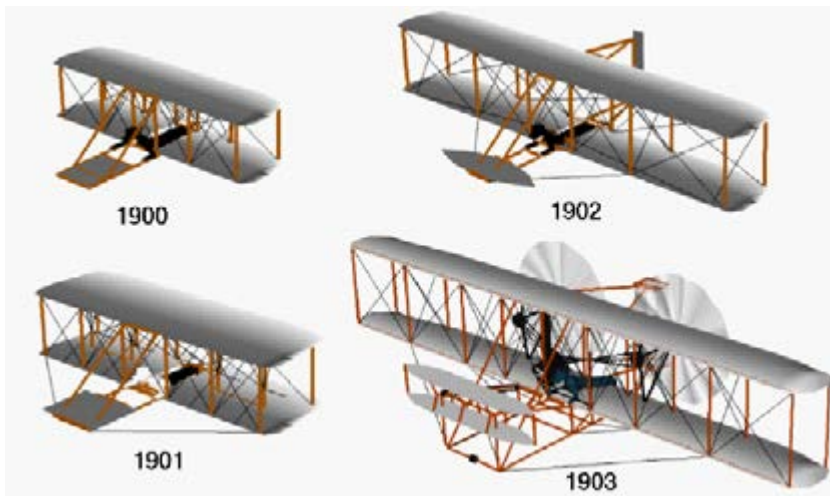
## Ε.1 Εισαγωγή στη Βιομιμητική Ρομποτική

Η πληθώρα βιολογικών δεδομένων σε συνδυασμό με την ανάπτυξη ρομποτικών οχημάτων χαμηλού κόστους καθώς και υπολογιστικά συστήματα τροφοδότησης ενέργειας με μεγάλη αυτονομία, κάνουν εφικτή την ανάπτυξη ρομπότ που μπορούν να μιμούνται έντομα και θαλάσσια πλάσματα τα οποία μπορούν να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του περιβάλλοντος. Σήμερα οι ερευνητές ψάχνουν στη φύση για έμπνευση με σκοπό να δημιουργήσουν μια νέα γενιά ιπτάμενων, έρπουν και θαλάσσιων αυτοματισμών γνωστά ως βιομιμητικά ρομπότ. Ξεκινώντας από το ερέθισμα του πως τα είδη έχουν προσαρμοστεί στο περιβάλλον και στη συνέχεια με τη χρήση της αντίστροφης μηχανικής προσπαθούν να βρουν τα χαρακτηριστικά προσαρμοστικότητας των πλασμάτων αυτών.

Η βιομιμητική είναι μια γενική περιγραφή όπου μηχανοποιεί μια διαδικασία ή ένα σύστημα το οποίο μιμείται βιολογικές διεργασίες. Ο όρος βγήκε από τη βιοχημεία και εφαρμόζεται σε ένα μεγάλο εύρος χημικών και μηχανικών φαινομένων. "Η βιομιμητική είναι ένας γενικός όρος όπως η ρομποτική", λέει ο says Jerry Pratt, ερευνητής στο ινστιτούτο Human and Machine Cognition (<https://www.ihmc.us/>).

Παραδείγματα προσπάθειας μίμησης ζώων ανά τους αιώνες:

1. Leonardo Davinicy: Μηχανισμοί για πτήση βασιζόμενοι στην ανατομία των πουλιών (εικόνα Ε.9).
2. Wright brothers: Κατασκεύασαν το αεροπλάνο μέσω της παρατήρησης και της ανάλυσης της πτήσης των πουλιών (εικόνα Ε.10).



Εικόνα Ε.9

Εικόνα Ε.10



Ο Mark Cutkosky, καθηγητής στο Stanford University's Department of Mechanical Engineering, λέει ότι δύο δυνάμεις οδηγούν το “νέο ρεύμα” της ρομποτικής. Πρώτον, η βιολογική έρευνα έχει εκθέσει ένα τεράστιο όγκο δεδομένων βιολογικών διεργασιών το οποίο η ρομποτική μπορεί να εφαρμόσει. Δεύτερον, οι εξελίξεις σε υπολογιστικά συστήματα χαμηλού κόστους και αποδοτικής χρήσης ενέργειας επιτρέπουν στους ερευνητές να δημιουργούν ρομπότ που εργάζονται εκτός εργαστηρίων. Επίσης, ο Cutkosky λέει ότι η ρομποτική μπορεί να “εφαρμόσει στην πράξη μερικά από αυτά που μαθαίνουμε από τη βιολογία. Πριν από δέκα χρόνια, ακόμα και αν είχα καταλάβει ακριβώς ποια υλικά και μηχανικές αρχές αποτελούν τη βάση της δυναμικής μετακίνησης της κατσαρίδας, δεν θα μπορούσα να οικοδομήσω ένα ρομπότ που να τις ενσωματώνει”.

## Ε.2 Εισαγωγή στα Έξυπνα Υλικά

Ο όρος “Έξυπνα υλικά” περιγράφει μια ομάδα υλικών που αντιδρούν με ελεγχόμενο τρόπο σε εξωτερικά περιβαλλοντικά ερεθίσματα με αποτέλεσμα να μιμούνται τα βιολογικά συστήματα και τις προσαρμοστικές τους ικανότητες. Η αντίδραση αυτή επηρεάζει είτε τις ιδιότητες του υλικού (μηχανικές, ηλεκτρικές ή στην εμφάνιση) είτε τη μοριακή δομή του ή τη σύνθεσή του ή τη λειτουργικότητά του. Μερικά από τα εξωτερικά ερεθίσματα που αντιδρούν με αυτά τα υλικά είναι η πίεση, η υγρασία, η θερμοκρασία, το pH, τα ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία. Τα έξυπνα υλικά είναι μια μοναδική κατηγορία υλικών που έχουν πολλές ομοιότητες στις μικροδομές και τους μηχανισμούς παραμόρφωσής μεταξύ τους, ικανά να μετασχηματίσουν άλλες μορφές ενέργειας σε μηχανική ενέργεια και, μερικές φορές, και αντιστρόφως. Σε γενικές γραμμές, τα υλικά για να ενταχθούν στην κατηγορία των έξυπνων υλικών θα πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκριθούν σε ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες αυτόνομα και με έξυπνο τρόπο. Το πεδίο έρευνας των έξυπνων υλικών είναι διεπιστημονικό, καθώς αφορούν μια σειρά τεχνολογιών, όπως είδος υλικών, έλεγχος, αίσθηση, ενεργοποίηση και απόσβεση. Συνεχίζοντας, τα υλικά αυτά έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε ένα πλήθος εφαρμογών (ρομποτική, βιοϊατρική μηχανική, αισθητήρες, ενεργοποιητές, καταστολείς δονήσεων και συσκευές απόσβεσης, μικρο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα, κ.α.). Ο τεχνολογικός τομέας των έξυπνων υλικών αναπτύσσεται κατά τις τελευταίες δεκαετίες με ταχύτατο ρυθμό και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990. Ωστόσο, η βασική τους συμπεριφορά δεν έχει ακόμα πλήρως κατανοηθεί. Επιπλέον, μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις κύριες κατηγορίες έξυπνων υλικών:

- Υλικά που αλλάζουν χρώμα
- Υλικά που εκπέμπουν φως
- Υλικά που αλλάζουν θερμοκρασία
- Κινούμενα υλικά

Στην εργασία μας θα ασχοληθούμε με περισσότερη λεπτομέρεια με την τελευταία κατηγορία των υλικών (κινούμενα υλικά), προκειμένου να επιλέξουμε εκείνο το υλικό που θα εξυπηρετεί καλύτερα τους στόχους της εργασίας μας, δηλαδή ως ενεργοποιητής προώθησης. Τα κινούμενα υλικά μπορούν να διακριθούν σε έξι ακόμα υποκατηγορίες: Αγώγιμα πολυμερή, Διηλεκτρικά ελαστομερή, Πιεζοηλεκτρικά υλικά, Gel πολυμερή, Ηλεκτροενεργά πολυμερή και Μορφομεταβλητά κράματα μνήμης. Ακόμη, υπάρχουν και λιγότερο εμπορικά γνωστές κατηγορίες έξυπνων υλικών που εμφανίζουν σήμερα αξιοσημείωτη αύξηση στο επίπεδο της έρευνας, όπως τα Magneto-Rheological ρευστά (MRFs), τα Electro-Rheological ρευστά (ERFs)

### Ε.2.1 Αγώγιμα Πολυμερή

Τα Αγώγιμα πολυμερή (Conductive polymers) ή, ακριβέστερα, τα εγγενώς αγώγιμα πολυμερή (intrinsically conducting polymers (ICPs)) είναι συνενωμένα πολυμερή των οποίων τα ηλεκτρόνια μπορούν να

μετακινηθούν από το ένα άκρο του πολυμερούς στο άλλο, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να άγει τον ηλεκτρισμό. Τέτοιες ενώσεις είτε λειτουργούν ως ημιαγωγοί ή έχουν μεταλλική αγωγιμότητα. Επίσης, έχουν αυξημένες δυνατότητες για χρήση τους σε διάφορες εφαρμογές λόγω του μικρού τους βάρους, της αγωγιμότητας, της μηχανικής ευλυγισίας και των χημικών ιδιοτήτων τους. Τα πιο συνηθισμένα αγωγίμα πολυμερή είναι Πολυανιλίνη (PAni) και Πολυπυρρόλη (PPY). Η δεύτερη έχει χρησιμοποιηθεί για ανάπτυξη μικρομυών. Η Πολυανιλίνη είναι περισσότερο ελκυστική για χρήση, επειδή είναι πιο φθηνή και λόγω της αντίδρασής της σε 'ντοπάρισμα' όξινης βάσης, της επιτρέπει να εφαρμόζεται στους χημικούς αισθητήρες ατμών. Επιπλέον, οι μεμβράνες πολυανιλίνης ανάμεσα σε αγωγίμες μεμβράνες ιόντων θεωρούνται ως υλικά για τεχνητούς μύες σε ρομπότ. Δεδομένου ότι μια ροή ρεύματος προσθέτει ηλεκτρόνια στη μία πλευρά και οξειδώνει την άλλη, τα ιόντα μετακινούνται με αποτέλεσμα η μία πλευρά να επεκτείνεται και η άλλη να συστέλλεται. Ως εκ τούτου, οι ηλεκτρικές και οι χημικές μορφές ενέργειας μετατρέπονται σε μηχανική ενέργεια. Τα αγωγίμα πολυμερή, είναι ακόμα ανοικτή περιοχή έρευνας σχετικά με τις ιδιότητές τους. Από τις μελέτες, ο αναμενόμενος χρόνος ζωής ενός τέτοιου μυός είναι οι 1 00.000 κύκλοι.

### E.2.2 Διηλεκτρικά Ελαστομερή

Τα Διηλεκτρικά Ελαστομερή (ονομάζονται επίσης ηλεκτροσταλτικά πολυμερών) ανήκουν στην ομάδα των ηλεκτροενεργών πολυμερών. Με βάση την απλή αρχή λειτουργίας τους, οι ενεργοποιητές από διηλεκτρικά ελαστομερή μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια, όταν υποβληθούν σε ηλεκτρικό πεδίο, απευθείας σε μηχανικό έργο (τροπή). Τα πιο συνηθισμένα είναι τα PMMA ηλεκτροσταλτικά πολυμερή. Εξαιτίας της ηλεκτροσταλτικής τους τροπής, όταν μια ουδέτερη ταινία ελαστομερούς είναι τοποθετημένη μεταξύ δύο ηλεκτροδίων και εφαρμοστεί ένα ηλεκτρικό πεδίο εκτείνεται στο επίπεδο των ηλεκτροδίων, ενισχύοντας τη φυσιολογική συμπίεση λόγω των ηλεκτροστατικών φορτίσεων στα ηλεκτρόδια. Συνήθως, οι τροπές των διηλεκτρικών ελαστομερών ενεργοποιητών είναι της τάξης του 10 – 35%, που μπορεί να φτάσουν το μέγιστο στο 300%. Εάν τυλίξουμε κυλινδρικά μία λεπτή ταινία με πολλά επίπεδα, μπορούμε να επιτύχουμε μεγαλύτερες τροπές. Όπως όμως, και με τα αγωγίμα πολυμερή, τα διηλεκτρικά ελαστομερή βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό επίπεδο, αλλά έχουν τη δυνατότητα να παραχθούν με χαμηλό κόστος.

### E.2.3 Πιεζοηλεκτρικά Υλικά

Τα Πιεζοηλεκτρικά υλικά παράγουν ένα ηλεκτρικό πεδίο ως αντίδραση σε μια επιβαλλόμενη μηχανική δύναμη που προκαλεί αλλαγή στη διάστασή τους. Αντιστρόφως, ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο θα παράγει μια μηχανική τάση. Επομένως, έχουμε ένα μετασχηματισμό μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αντιστρόφως. Αυτό περιγράφεται ως πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Αυτό το φαινόμενο είναι μια αναστρέψιμη διαδικασία, διότι τα υλικά, επίσης, παράγουν μηχανικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου, φαινόμενο που είναι γνωστό ως ηλεκτροσταλτικό. Αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία εφαρμογών, όπως αισθητήρες (π.χ. μικρόφωνα) και ενεργοποιητές (π.χ. multilayer co-fireds, αναφλέξεις, κινητήρες, εκτυπωτές). Παρόμοια με πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι ηλεκτροσταλτικά και μαγνητοσταλτικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε ενεργοποιητές υψηλής ακρίβειας. Πρόκειται για φερρομαγνητικά υλικά τα οποία υπόκεινται σε μια ελαστική τροπή όταν βρίσκονται μέσα σε ένα ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα.

### E.2.4 Gel Πολυμερή

Τα Gel Πολυμερή αποτελούνται από το δίκτυο ατόμων του πολυμερούς διογκωμένο από ένα διαλυτικό μέσο, όπως το νερό. Η βασική ικανότητά τους είναι ότι διογκώνονται ή συρρικνώνονται αναστρέψιμα (έως και 1 000 φορές σε όγκο), ακόμη και αν υπάρχει μια μικρή αλλαγή στο περιβάλλον τους, όπως το pH, η θερμοκρασία και το ηλεκτρικό πεδίο. Μικρού μεγέθους ίνες από gel συστέλλονται σε msec, ενώ πυκνά στρώματα πολυμερών απαιτούν αρκετά λεπτά για να αντιδράσουν (ως και 2 ώρες ή ακόμα και μέρες).

Αν και το ποσοστό της τάσης τους είναι περίπου ίση με εκείνη των ανθρώπινων μυών παρέχοντας πολύ υψηλές δυνάμεις ενεργοποίησης, η διάρκεια ζωής τους είναι πολύ μικρή, καθώς η δομή τους σταδιακά αλλοιώνεται και τελικά καθίστανται άχρηστα. Τα πιο κοινά gel πολυμερή που χρησιμοποιούνται είναι οι πολυβινυλικές αλκοόλες (PVA), τα πολυακρυλικά οξέα (PAA) και τα πολυακρυλονιτρίλια (PAN). Παρά το γεγονός ότι τα Gel πολυμερή είναι λιγότερο εμπορικά γνωστά, μπορούν με επιτυχία να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπως τεχνητοί μύες, ρομποτικοί ενεργοποιητές, προσροφείς τοξικών χημικών.

#### E.2.5 Ηλεκτροενεργά Πολυμερή

Τα Ηλεκτροενεργά Πολυμερή (Electroactive Polymers, ή EAP) παρουσιάζουν μια σημαντική αλλαγή στο σχήμα ή το μέγεθός τους όταν διεγείρονται από ένα ηλεκτρικό πεδίο. Ο κύριος τομέας εφαρμογών τους είναι σε ενεργοποιητές και αισθητήρες. Σε σύγκριση με άλλους συμβατικούς ενεργοποιητές και έξυπνα υλικά, παρουσιάζουν καλύτερα χαρακτηριστικά (ποσά τροπής, ενεργειακή κατανάλωση, μάζα, γήρανση), γεγονός που τα κάνει ελκυστικά για την εφαρμογή τους σε βιοϊατρικές εφαρμογές ή γενικότερα στη βιολογικά εμπνευσμένη τεχνολογία. Για το λόγο αυτό, τα EAP συχνά αναφέρονται ως 'τεχνητοί μύες', καθώς συμπεριφέρονται παρόμοια με τους βιολογικούς μύες. Παρόλα αυτά, τα μειονεκτήματα των EAP δεν μπορούν να αγνοηθούν: υψηλές απαιτήσεις ηλεκτρικής τάσης, πολύπλοκη βιομηχανική διαδικασία παραγωγής ακατάλληλη για μαζική παραγωγή, όπως επίσης και εμπορική έλλειψη των πρώτων υλών τους. Έχοντας υπόψη αυτά τα μειονεκτήματα, οι περισσότερες από τις εφαρμογές αυτών των πολυμερών βρίσκονται ακόμη σε επίπεδο έρευνας και πολύ λίγα είναι διαθέσιμα στο εμπόριο.

#### E.2.6 Μορφομεταβλητά Κράματα

Τα Μορφομνήσιμα Κράματα ή κράματα με μνήμη της μορφής ή πιο γνωστά ως «Shape Memory Alloys» - SMA. Τα SMA είναι μια ομάδα μεταλλικών κραμάτων που παρουσιάζουν δύο μοναδικές ιδιότητες, την υπερελαστικότητα και το φαινόμενο μνήμης της μορφής. Σχετικά με την υπερελαστικότητα, τα SMA είναι σε θέση να διατηρούν ένα μεγάλο ποσοστό παραμόρφωσης σε σταθερή θερμοκρασία και όταν τους ασκηθεί μία δύναμη παραμόρφωσης, επιστρέφουν σε ένα πρότερα ορισμένο σχήμα ή μέγεθος. Συνήθως, αυτά τα κράματα μπορούν να επιτύχουν έως και 10% ελαστική τροπή. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να επανέρχονται στην προηγούμενα καθορισμένη διαμόρφωσή τους όταν υπόκεινται στην κατάλληλη θερμική διεργασία. Αυτή η συμπεριφορά ονομάζεται "Shape Memory Effect" (SME).

Τα SMA μπορούν να παράγουν μεγάλες δυνάμεις, καθώς μπορούν να ανακτήσουν πολύ μεγάλες τροπές και κινήσεις ενεργοποίησης όταν συναντούν αντίσταση κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού τους, γεγονός που δικαιολογεί την χρήση τους ως ενεργοποιητές σε εφαρμογές που απαιτούν μικρό μέγεθος και μεγάλες δυνάμεις. Το SME είναι το αποτέλεσμα ενός μετασχηματισμού martensitic που είχε γίνει γνωστό από τα μέσα της δεκαετίας του 1950, όταν το φαινόμενο ανακαλύφθηκε σε κράματα με βάση το χαλκό. Στις αρχές της δεκαετίας του εξήντα, ο William Beuhler με Frederick Wang από το US Naval Ordnance Laboratory παρατήρησαν το φαινόμενο αυτό σε ένα κράμα νικελίου- τιτανίου (NiTiNOL) (που σημαίνει Νικέλιο (Ni), τιτανίου (Ti) και US Naval Ordnance Laboratory (NOL)). Σήμερα, αυτά τα κράματα είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα SMA, συνδυάζοντας το πιο έντονο φαινόμενο μνήμης της μορφής, την αντοχή στη διάβρωση, την βιοσυμβατότητα και άλλες μοναδικές μηχανικές ιδιότητες που το κάνουν να ξεχωρίζει από τα άλλα SMA.

### **E.3 Εισαγωγή στη Θεωρία του Σμήνους**

Μέσω της παρατήρησης της υποθαλάσσιας ζωής έχει βρεθεί ότι το βέλτιστο μοντέλο συμπεριφοράς είναι αυτό του σμήνους. Ωστόσο, ο τρόπος επικοινωνίας των βιομιμητικών ρομπότ σε σμήνος αποτελεί ξεχωριστό ερευνητικό πεδίο, για αυτό και στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε επιδερμικά με το θέμα. Το βιομιμητικό υποβρύχιο όχημα (SRFL) που προτείνουμε, θα λειτουργεί σε σμήνος, ώστε μέσα



από απλούς κανόνες και τοπικές αλληλεπιδράσεις να πετύχουμε ισχυρές και ευέλικτες συλλογικές συμπεριφορές με στόχο τον συντονισμό μεγάλου αριθμού ρομπότ<sup>1</sup>. Η ρομποτική σμήνους έχει οριστεί ως «μια νέα προσέγγιση για το συντονισμό μεγάλου αριθμού ρομπότ» και ως « η μελέτη του τρόπου με τον οποίο μεγάλος αριθμός σχετικά απλών υλικών ενσωματωμένων πρακτόρων “agents” μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να προκύψει μια επιθυμητή συλλογική συμπεριφορά από τις τοπικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των “agents” καθώς και μεταξύ των πρακτόρων και του περιβάλλοντος.» Sahin ( Sahin, E. 2005:10-20)

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός συστήματος ρομποτικού σμήνους σύμφωνα με τους Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M., (Manuele Brambilla, Eliseo Ferrante, Mauro Birattari, Marco Dorigo 2013:2) είναι τα εξής:

- Τα ρομπότ είναι αυτόνομα
- Είναι προσαρμοσμένα στο περιβάλλον και μπορούν να ενεργήσουν για να το μετασχηματίσουν
- Οι ικανότητες ανίχνευσης και επικοινωνίας των ρομπότ είναι τοπικές
- Τα ρομπότ δεν έχουν πρόσβαση σε κεντρικό έλεγχο
- Τα ρομπότ συνεργάζονται για αντιμετώπιση συγκεκριμένου έργου

Στην παρούσα διπλωματική θα ακολουθήσω την προσέγγιση της συντονισμένης κίνησης “coordinated motion”. Εδώ τα ρομπότ κινούνται σε σχηματισμό παρόμοιο με αυτό των κοπαδιών ψαριών ή πουλιών. Για μια ομάδα αυτόνομων ρομπότ η συντονισμένη κίνηση μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη ως ένας τρόπος περιήγησης σε ένα περιβάλλον με περιορισμένες ή καθόλου συγκρούσεις μεταξύ των ρομπότ καθώς και ως τρόπο βελτίωσης των αισθητήριων ικανοτήτων του σμήνους. Kaminka (Kaminka, G. A., Schechter-Glick, R., & Sadon, V. 2008:271-282). Στην ρομποτική του σμήνους, οι αυτόνομες συμπεριφορές κίνησης βασίζονται συνήθως σε “virtual physics-based design<sup>2</sup>”. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, τα ρομπότ υποτίθεται ότι διατηρούν μια σταθερή απόσταση το ένα από το άλλο και μια ομοιόμορφη ευθυγράμμιση ενώ κινούνται. Reynolds (Reynolds, C. W. 1987b:25-34)

---

1. Ο τρόπος με τον οποίο θα συντονίζονται τα ρομποτικά υποβρύχια οχήματα με σκοπό τον σχηματισμό σμήνους παρουσιάζεται αναλυτικά από τους:

Ο Blach και ο Hybinette (Balch, T., & Hybinette, M. 2000:73-80) πρότειναν μια συντονισμένη συμπεριφορά κίνησης βασισμένη σε κοινωνικές δυνατότητες. Κάθε ρομπότ γνωρίζει τη θέση και τον προσανατολισμό των ρομπότ στην περιοχή ανίχνευσής του και έτσι είναι σε θέση να υπολογίσει τη θέση που θέλει να φτάσει. Οι συγγραφείς δημιούργησαν μια συμπεριφορά συντονισμένης κίνησης που είναι ικανή να αποφύγει εμπόδια και να διαμορφώνει διαφορετικά patterns, όπως τετράγωνα σχήματα. (Manuele Brambilla, Eliseo Ferrante, Mauro Birattari, Marco Dorigo 2013:24)

Ο Baldassare (Baldassarre, G., Nolfi, S., & Parisi, D. 2003:255-267) χρησιμοποίησε artificial evolution για να συντονίσει τις παραμέτρους ενός νευρικού δικτύου προκειμένου να εκτελέσει συντονισμένη κίνηση. Οι συγγραφείς μπόρεσαν να αποκτήσουν 3 συμπεριφορές συντονισμένης κίνησης. Αυτές οι συμπεριφορές διαφέρουν από τον τρόπο με τον οποίο κάθε ρομπότ κινείται σε σχέση με τους άλλους. Στην πρώτη συμπεριφορά τα ρομπότ κρατούν σταθερή ταχύτητα. Στο δεύτερο μόνο ένα ρομπότ κινείται ενώ το υπόλοιπο σμήνος προσπαθεί να παραμείνει κοντά του. Στην τελευταία συμπεριφορά τα ρομπότ περιστρέφονται γύρω από το κέντρο του σμήνους. (Manuele Brambilla, Eliseo Ferrante, Mauro Birattari, Marco Dorigo 2013:24)

2. Το πρώτο έργο για τη συντονισμένη κίνηση δημιουργήθηκε από τον Reynolds (Reynolds, C. W. 1987b:25-34) στον τομέα των Computer graphics. Ο Reynolds ανέπτυξε ένα κοπάδι εικονικών πουλιών στο οποίο τα άτομα είναι σε θέση να αισθάνονται την ταχύτητα και την θέση των γειτόνων. Τα άτομα ακολουθούν 3 απλούς κανόνες: α) αποφυγή σύγκρουσης (collision avoidance), β) ταυτοποίηση ταχύτητας (velocity centering), γ) κεντράρισμα του κοπαδιού (flock centering). Η αποφυγή σύγκρουσης αποτρέπει τα άτομα να συγκρουστούν το ένα με το άλλο. Η ταυτοποίηση ταχύτητας εξασφαλίζει ότι κάθε άτομο ταιριάζει με την ταχύτητα του με αυτή των γειτόνων του καθώς και να συγκεντρώνει τις δυνάμεις κεντραρίσματος κάθε ατόμου ώστε να μένει κοντά στους γείτονες του. (Manuele Brambilla, Eliseo Ferrante, Mauro Birattari, Marco Dorigo 2013:23)



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

---

## Ο ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

1.1 Ο Τύπος του ρομπότ

1.2 Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των βιομιμητικών ρομπότ

1.2.1 Fish-like swimming

1.2.2 Small Scale (Miniaturization)

1.2.3. Broad Range from Tale-beat Frequency and Amplitude

1.3 Αριθμός Froude και Ικανότητα Ελιγμών

1.4 Περιορισμοί στον σχεδιασμό του βιομιμητικού ρομπότ

1.5 Περιορισμοί στις διαστάσεις και το βάρος του βιομιμητικού ρομπότ

1.6 Σύγκριση των διαθέσιμων μηχανισμών ενεργοποίησης για μικρής κλίμακας SRFL

1.7 Αξιολόγηση των ενεργοποιητών THUNDER ως υποθαλάσσιοι προωθητήρες

## 1.1 Ο τύπος του ρομπότ

Ο S. Tuncdemir (Tuncdemir S., 2004: 11) υποστηρίζει ότι, οι συμβατικές μορφές περιστροφικής κίνησης με προπέλα δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις ανάγκες ενός ρομπότ “μινιατούρα<sup>3</sup>” (miniature robot) καθώς και της υψηλής ανάγκης για ευκολία στον ελιγμό (maneuverability) διατηρώντας ταυτόχρονα την μεγάλη σε διάρκεια αντοχή και διακριτικότητα (stealth).

Διάφορα ερευνητικά κέντρα (εικόνες 1.1 έως 1.4) επιλέγουν τη μορφή του ψαριού, λόγω των ιδιομορφών χαρακτηριστικών του (μεγάλη αποδοτικότητα ακόμα και στην micro κλίμακα, πολύ καλή και γρήγορη ανταπόκριση σε ελιγμούς, μεγάλη επιτάχυνση και αθόρυβη κίνηση), και στοχεύουν στην επίτευξη αυτών των χαρακτηριστικών στα ρομποτικά ψάρια - SRFL (Swimming Robots with Fish-like Locomotion) που αναπτύσσουν. Παρ’ ότι ο τρόπος κίνησης των ψαριών διαφέρει από είδος σε είδος, από τη στιγμή που δεν υπάρχουν δεδομένα που να αποδεικνύουν ότι ένας τύπος κίνησης υπερτερεί σε σχέση με κάποιον άλλο, επιλέγω τον τρόπο κίνησης της κατηγορίας carangiform<sup>4</sup>. Αυτός, επιλέγεται λόγω της ιδιαιτερότητάς του, ότι αποτελεί ταλαντευτική (oscillatory) κίνηση, η οποία μας δίνει τη δυνατότητα αναπαραγωγής απλών τρόπων μίμησης, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται ο απαιτούμενος αριθμός μηχανισμών ενεργοποίησης για την κίνηση αυτή (από εδώ και πέρα οι μηχανισμοί ενεργοποίησης της κίνησης θα αναφέρονται ως ενεργοποιητές). Καθώς, η κλίμακα μεγέθους κατεβαίνει από macro σε mini/micro, οι συμβατικοί τύποι ενεργοποιητών στα SRFL (π.χ. ηλεκτροκινητήρας) γίνονται ακατάλληλοι, διότι αφήνουν πολύ λίγο χώρο στο εσωτερικό του ρομπότ για το σύστημα ελέγχου καθώς και για πιθανό φορτίο. Οπότε γίνεται αντιληπτό ότι τα χαρακτηριστικά που αφορούν τις διαστάσεις του ρομπότ (τα οποία θα εξηγηθούν αναλυτικότερα παρακάτω) εξαρτώνται άμεσα τόσο από τον τρόπο χρήσης των ενεργοποιητών, όσο και από τον μηχανισμό που μιμείται την ταλάντωση της κίνησης.

## 1.2 Τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των βιομιμητικών ρομπότ.

Ο προκαταρκτικός σχεδιασμός ενός SRFL απαιτεί τον προσεκτικό προσδιορισμό των τριών βασικών σχεδιαστικών προδιαγραφών, “Fish-like swimming”, “Small scale (miniaturization)”, “Wide tail-beat frequency and amplitude range”.

Υπάρχουν και άλλα κριτήρια όσον αφορά τον σχεδιασμό όπως, το βάρος, το κόστος κ.α. Ωστόσο, στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν θα μας απασχολήσουν, και έτσι ο σχεδιασμός θα προχωρήσει με τις αρχικές προδιαγραφές καθώς και τους περιορισμούς που υπόκεινται στη σχεδίαση.

Σύμφωνα με τον Tuncdemir (Tuncdemir S., 2004: 30-31) το να μιμηθείς την κίνηση των ψαριών δεν είναι ο βέλτιστος τρόπος για υποβρύχια προώθηση, αλλά είναι ο πιο αποδοτικός σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους προώθησης. Ανάμεσα στους τύπους κολύμβησης, ο ostraciform<sup>5</sup> είναι ο

3. Με βάση τις πρόσφατες κατηγοριοποιήσεις “miniature robot” ή “mini robot” θεωρείται το ρομπότ με όγκο περίπου ίσο με 10-3 m<sup>3</sup> που ισούται με έναν κύβο με ακμές= 10cm

4. “Στην κατηγορία “carangiform” ο κυματισμός λαμβάνει χώρα σε ολόκληρο το σώμα και επεκτείνεται προς την ουρά. Ψάρια του είδους Κάραγξ, Σκουμπρί και Λουτιάνος (κοκκινόψαρο) είναι κολυμβητές του είδους carangiform με ψηλή και διχαλωτή ουρά προσκολλημένη σε ένα στενό ουριαίο μίσχο.”

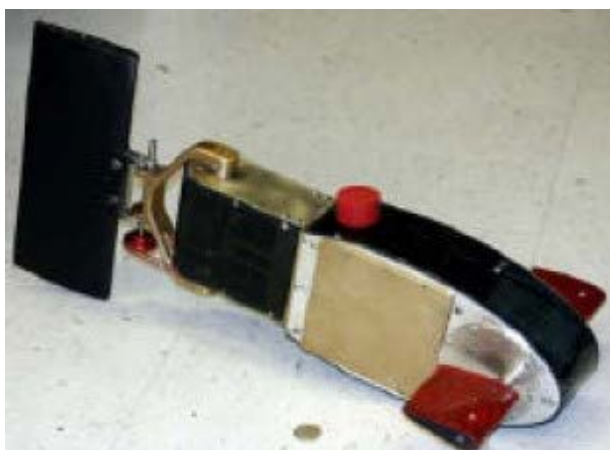
5. “Στην κατηγορία “ostraciform” κατατάσσονται οι κολυμβητές του είδους Τετραοδοντόμορφα (cowfish), Λακτόφρυς (trunk-fish), Ψάρι Κύβος (boxfish) οι οποίοι έχουν ακίνητο σώμα και ένα άκαμπτο πτερύγιο προσκολλημένο σε ένα στενό ουριαίο μίσχο. Το ακίνητο μέρος αυτών των ψαριών καταλαμβάνει περίπου τα τρία τέταρτα του συνολικού μήκους του σώματος.”



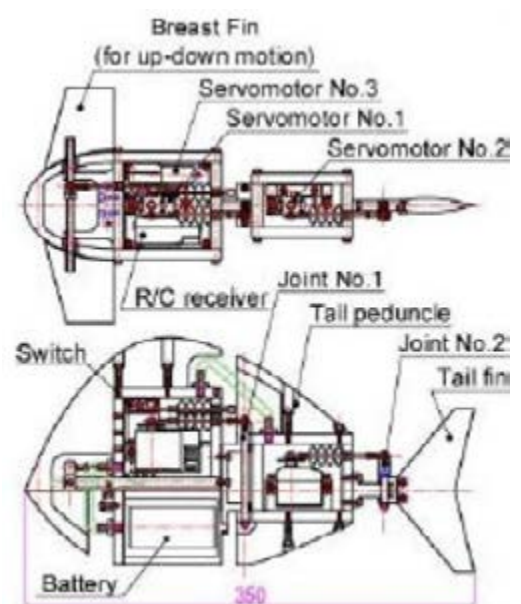
Εικόνα 1.1



Εικόνα 1.2



Εικόνα 1.3



Εικόνα 1.4

απλούστερος από όλους, διότι έχει χαμηλό βαθμό ελευθερίας. Αυτό σημαίνει ότι, όσο περισσότερα άκρα κινούνται, τόσες περισσότερες αρθρώσεις θα κινούνται αντίστοιχα, το οποίο μεταφράζεται σε μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας. Μία άρθρωση σημαίνει ότι έχουμε έναν βαθμό ελευθερίας. Με αυτό τον τρόπο, όσο αυξάνεται ο αριθμός των συνδέσεων και άρα ο βαθμός ελευθερίας, τόσο καλύτερη ικανότητα για ελιγμό θα έχουμε. Παρόλα αυτά, όσο αυξάνεται ο αριθμός των συνδέσεων, τόσο θα μειώνεται η ικανότητα χειρισμού του ρομπότ καθώς θα γίνεται όλο και πιο πολύπλοκη η κατασκευή του.

Βάσει των παραπάνω, επιλέγουμε το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε να έχει ακίνητο σώμα με μία άρθρωση που ελέγχει την κίνηση-πτερούγισμα του ευλύγιστου πτερυγίου. Η κίνηση αυτή, μιμείται τον τύπο κολύμβησης ostraciform. Η απλότητα αυτού του τύπου κολύμβησης είναι απαραίτητη, διότι ελαχιστοποιεί την ανάγκη για εφαρμογή πολύπλοκων υδροδυναμικών εξισώσεων. Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο δεν είναι απαραίτητος ο έλεγχος των ευέλικτων επιφανειών.

### 1.2.2 SMALL SCALE (miniaturization)

Όπως έχουμε αναφέρει στο προηγούμενο κεφάλαιο το μέγεθος του SRFL που επιλέγουμε είναι της κατηγορίας “miniature”, με σκοπό να επιτύχουμε την βέλτιστη ικανότητα ελιγμών, την επίτευξη απόδοτων επιταχύνσεων και την αθόρυβη λειτουργία του μηχανισμού κίνησης. Όσον αφορά τον ορισμό των μεγεθών, στα SRFL, οι Trimmer και Jebens (Trimmer W. & Jebens R., 1989:1547-1552) κατατάσσουν ένα σύστημα σαν “micro” εάν είναι της τάξεως του cm ή μικρότερο, ενώ ο Dario (Dario, P., Valleggi, R., Carrozza, M. C., Montesì, M. C. and Cocco, M., 1992:141-157) το ταξινομεί σε λίγα κυβικά cm για τα miniature και σε λίγα κυβικά micrometer για τα “micro robots”. Η πιο πρόσφατη ταξινόμηση παίρνει υπόψιν τον όγκο των ρομπότ: ένα “micro robot” έχει όγκο περίπου ίσο με  $10^{-6} \text{m}^3$ , ενώ τα “mini robot” έχουν όγκο περίπου ίσο με  $10^{-3} \text{m}^3$  που ισούται με έναν κύβο με ακμές  $= 10 \text{cm}$  Caprari (Caprari, G., 2003).

### 1.2.3 BROAD RANGE FOR TAIL-BEAT FREQUENCY AND AMPLITUDE

Όπως έχουμε αναφέρει το υποβρύχιο βιομιμητικό όχημα που προτείνουμε μιμείται την κίνηση των ψαριών της κατηγορίας “ostraciform”. Για να μπορέσουμε να πετύχουμε την μίμηση της κίνησης του ουριαίου πτερυγίου θα πρέπει να προσδιορίσουμε την κατάλληλη συχνότητα ταλάντωσης καθώς και το βέλτιστο πλάτος ταλάντωσης του πτερυγίου. Ο Webb (Webb, P. W., 1992:157-166) πρότεινε ένα μοντέλο για την εύρεση της δύναμης ώθησης για ένα BCF<sup>6</sup> (Body/Caudal Fin) για μια δοσμένη ταχύτητα U.

$$PT = [(B^2 \cdot p \cdot f^2 \cdot A^2 \cdot \pi^3) / 8] \cdot U \cdot (1 - U/V) \cdot [((2 \cos \theta - 1) \cdot V + U) / 2V \cos \theta]$$

Όπου:

B= μήκος της ουράς “trailing edge span”

Θ= γωνία που σχηματίζει το B με τον εγκάρσιο άξονα Α'Α

P= πυκνότητα του νερού

V= ταχύτητα του κύματος προώθησης

f= συχνότητα ταλάντωσης του ουριαίου πτερυγίου

A= πλάτος ταλάντωσης του ουριαίου πτερυγίου.

6. “Στη λειτουργία BCF (Body/Caudal Fin) η δύναμη προώθησης που έχει διεύθυνση προς τα πίσω (backward) και εκτείνεται προς το ουριαίο πτερύγιο παράγει δύναμη ώθησης κάμπτοντας το σώμα ”

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω τύπο, η δύναμη από το ψάρι στο νερό συσχετίζεται με την συχνότητα και το πλάτος ταλάντωσης του χτυπήματος του ουριαίου πτερυγίου (tail-beat). Έτσι αυξάνοντας την συχνότητα ή το πλάτος ταλάντωσης του tail-beat, έχουμε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύς που παράγει το ψάρι. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, στις ευκίνητες ρομποτικές διατάξεις η ταχύτητα μεταβάλλεται γραμμικά με ρυθμό ανάλογο της ισχύς και της ενέργειας.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι η ταλαντευτική ανυψωτική κίνηση “heaving motion” καθώς και η γωνία χτυπήματος της ουράς είναι σημαντικοί παράμετροι για την επίτευξη της επιθυμητής βιομιμητικής κίνησης. Επιπλέον άλλη μία παράμετρος που παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της βιομιμητικής κίνησης, είναι η ταχύτητα κολύμβησης. Σύμφωνα με τον Sfakiotakis (Sfakiotakis, M., Lane, D. M. and Davies, B. C., 2001), ο έλεγχος της ταχύτητας κολύμβησης βασίζεται στο πλάτος ταλάντωσης, αλλά κατά βάση εξαρτάται από τον ρυθμό αλλαγής της συχνότητας ταλάντωσης στο ουραίο πτερύγιο.

Σύμφωνα με τον Tuncdemir (Tuncdemir S., 2004:35) όσον αφορά την ταχύτητα κολύμβησης και τον έλεγχο της κατεύθυνσης του ρομπότ, η αλλαγή της συχνότητας ταλάντωσης είναι προτιμότερη από την αλλαγή του πλάτους ταλάντωσης. Η προσέγγιση αυτή είναι η βέλτιστη, διότι η συχνότητα ταλάντωσης είναι ελεγχόμενη, ενώ είναι δύσκολο να μετρήσουμε την μετατόπιση που παράγεται στο άκρο της ουράς. Τέλος, καθοριστικό ρόλο, για την επίτευξη της βιομιμητικής κίνησης, παίζει το εύρος της συχνότητας λειτουργίας των ενεργοποιητών, το οποίο καθορίζει την ικανότητα του ρομπότ για κολύμβηση. Σύμφωνα με τον Triantafyllou (Triantafyllou, G. S, Triantafyllou, M. S. and Grosenbaugh M. A., 1993:205-224), για αποδοτικότερη κολύμβηση-προώθηση το εύρος της τιμής του Strouhal<sup>8</sup> (St) πρέπει να βρίσκεται μέσα στα όρια που καθορίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$0.25 \leq \{ St = f \cdot d / U \} \leq 0.35$$

όπου f: η συχνότητα ταλάντωσης, d: το πλάτος του κύματος που δημιουργείται από την ουρά (συσχετίζεται με το πλάτος ταλάντωσης), U: η ταχύτητα προώθησης του ρομπότ σε ακίνητα νερά

Καταλήγοντας, για την επίτευξη του βέλτιστου ελέγχου του ρομπότ, η κίνηση της ουράς απαιτεί συγκεκριμένη συχνότητα και πλάτος ταλάντωσης και ταυτόχρονα διατήρηση της τιμής St μέσα στα όρια της εξίσωσης. Άρα απαιτείται η ύπαρξη μεγάλου εύρους διακύμανσης των τιμών της συχνότητας και του πλάτους ταλάντωσης για να πετύχουμε το βέλτιστο χτύπημα ουράς “tail-beat”.

7. “HEAVING MOTION: Ταλαντευτική κίνηση που ανυψώνει το σώμα (π.χ. πλοίο ή ψάρι) στο νερό. Η κίνηση των ψαριών δεν είναι πάντα ευθεία είναι ημιτονοειδούς μορφής.”

8. Είναι αδιάστατος αριθμός. Για μεγάλους αριθμούς Strouhal (της τάξης 1), το ιξώδες κυριαρχεί στη ροή του ρευστού, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια συλλογική ταλαντευόμενη κίνηση του ρευστού. Για τους αριθμούς Strouhal με χαμηλό ρυθμό (τάξη 10<sup>-4</sup> και κάτω), η υψηλή ταχύτητα, η σχεδόν σταθερή κατάσταση τμήματος της κίνησης του ρευστού, κυριαρχεί στην ταλάντωση. Η ταλάντωση στους ενδιάμεσους αριθμούς Strouhal χαρακτηρίζεται από την συσσώρευση και την ταχεία επακόλουθη απόρριψη των στροβίλων. Περισσότερες πληροφορίες: Triantafyllou, G. S, Triantafyllou, M. S. and Grosenbaugh M. A., 1993, “Thrust development in oscillating foil with application to fish propulsion”, J Fluid Struct., Vol. 7, No: 2, pp. 205-224.



### 1.3 Αριθμός Froude και Ικανότητα Ελιγμών

Η ανάγκη για ελιγμούς είναι χαρακτηριστικό της βιομιμητικής κίνησης, οπότε πρέπει να προσδιοριστεί έτσι ώστε ανταποκρίνεται στις ανάγκες του SRFL που προτείνουμε. Δύο είναι οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν την ικανότητα για ελιγμούς, ο αριθμός “Froude” και η “Maneuverability”. “Maneuverability” ορίζεται ως ο ελάχιστος ρυθμός με τον οποίο ελίσσεται το ρομπότ σε μια δοσμένη επιτάχυνση, ενώ ο διεθνής αριθμός “Froude” μπορεί να ερμηνευτεί σαν μετρητής της ικανότητας για ελιγμούς.

$$\text{Αριθμός Reynolds: } Re = V \cdot L / U$$

$$\text{Διεθνής αριθμός Froude: } F_r = V / (\sqrt{g \cdot L})$$

όπου:  $V$ =ταχύτητα,  $L$ =μήκος,  $U$ =κινηματικό ιξώδες,  $g=9.81 \text{ m/s}^2$

$$F_r^4 / Re = (V^3 \cdot U) / (L^3 \cdot g^2)$$

Αυτή η συνδυαστική παράμετρος χρησιμοποιείται για την ανακατανομή της κανονικής επιτάχυνσης<sup>9</sup>. Το γεγονός ότι, τα ψάρια σε σχέση με τα βιομιμητικά ρομπότ έχουν μεγάλη διαφορά στον τρόπο με τον οποίο επιταχύνουν, καθιστά απαραίτητο αυτό το συνδυασμό, βάσει του οποίου καταφέρνουμε να προσομοιάσουμε καλύτερα την κίνηση των ψαριών.

Μετασχηματίζουμε τον διεθνή αριθμό  $F_r$  σε

$$F_r = V / (\sqrt{g \cdot L}) = (\sqrt{L/g}) \cdot V/L = (1/2\pi) \cdot T/(L/V)$$

Καταλήγοντας, ο αριθμός  $F_r$  είναι συνάρτηση της περιόδου  $T$  καθώς και του χρόνου που απαιτείται ώστε το σώμα να ταξιδέψει απόσταση ίση με το μήκος του. Ο αριθμός  $F_r$  έχει μεγάλη τιμή για μακριά και λεπτά πτερύγια και μικρή τιμή για κοντά και χοντρά. Έτσι μπορούμε να συμπεράνουμε ότι ελαφριά πτερύγια βοηθάνε στο να έχουμε ουδέτερη πλευστότητα, ενώ τα βαριά και κοντά πτερύγια προκαλούν ανατροπές “tumble” στο ρομπότ. Αντιλαμβανόμαστε οπότε ότι ο αριθμός  $F_r$ , η πλευστότητα και το μήκος παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ικανότητα για ελιγμούς.

### 1.4 Περιορισμοί στον σχεδιασμό του βιομιμητικού ρομπότ.

Σύμφωνα με τον Tuncdemir (Tuncdemir S., 2004:36), οι περιορισμοί στο σχεδιασμό των mini swimming robots προέρχονται κυρίως από τις διαστασιολογικές απαιτήσεις. Η παροχή ενέργειας “storage energy” και οι ενεργοποιητές πρέπει να καταλαμβάνουν όσον το δυνατό λιγότερο όγκο, όπως αναφέρουμε και παραπάνω. Έχουμε ήδη καταδείξει ότι η ισχύς είναι ένα κράμα συχνότητας και πλάτους ρεύματος φτιαγμένο ώστε να βελτιστοποιεί το χτύπημα του πτερυγίου “tail-beat”. Επομένως, η βέλτιστη κίνηση του ενεργοποιητή πρέπει να ανταποκρίνεται στο περιορισμένο χώρο του σκάφους. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι ο πρωταρχικός περιορισμός στον σχεδιασμό προέρχεται κατά βάση από το μικρό μέγεθος του υποβρύχιου οχήματος SRFL.

9. Σύμφωνα με τον Bandyopadhyay P. R. (Bandyopadhyay Promode R., 2002: 105-106) η συνεκτικότητα της κανονικής επιτάχυνσης κατά τη διάρκεια του κύκλου κίνησης είναι συνάρτηση των αδρανειακών δυνάμεων, του ιξώδους και της βαρυτικής δύναμης.



## 1.5 Περιορισμοί στις διαστάσεις και το βάρος του βιομιμητικού ρομπότ

Εφόσον ο τελικός σκοπός αυτής της έρευνας είναι ένα υποβρύχιο όχημα SRFL (Swimming Robots with Fish-like Locomotion), το ρομπότ πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιπλέει ελεύθερα. Προκειμένου να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, τα mini swimming robots προσδιορίζονται ως προς τον όγκο  $\leq 1000\text{cm}^3$  και βάρος  $\leq 1000\text{gr}$ , ενώ ένα micro robot περιορίζεται ως προς το βάρος έως 1gr σε υδάτινο περιβάλλον. Προηγούμενες έρευνες βασισμένες στην βιομικρολογία προτείνουν περιορισμούς στο σχήμα του SRFL λόγω υδροδυναμικών περιορισμών. Δεδομένου αυτού, τα περισσότερα SRFL είναι σχεδιασμένα σε τρισδιάστατα ελλειψοειδή εξορθολογισμένα σχήματα. Έτσι, ακολουθώντας τις σχεδιαστικές παραμέτρους και τις διαστασιολογικές αναλογίες ενός ρομπότ ψάρι, δοσμένες από τον Tzeranis (Tzeranis, D., Papadopoulos, E. and Triantafyllou, G., 2003) έχουμε:  $L_1 = 2L_2$ ,  $3L_1 = 10L_3$ ,  $L_1 = 3H_1$  όπου:  $L_1$ : μήκος σώματος (άκαμπο κομμάτι),  $H_1$ : το κατά προσέγγιση μήκος της ουράς,  $L_2$ : το ύψος του σώματος,  $L_3$ : το πάχος του ρομπότ. Σύμφωνα με τις παραμέτρους αυτές, ένα “Mini robot-fish” με συνολικό μήκος σώματος μικρότερο από 10cm μπορεί να καταλαμβάνει όγκο ίσε με μόνο περίπου  $60\text{cm}^3$ . Ο μειωμένος όγκος περιορίζει το βάρος και σαν αποτέλεσμα τα συστατικά μέρη του ρομπότ.

## 1.6 Σύγκριση των διαθέσιμων μηχανισμών ενεργοποίησης για μικρής κλίμακας SRFL

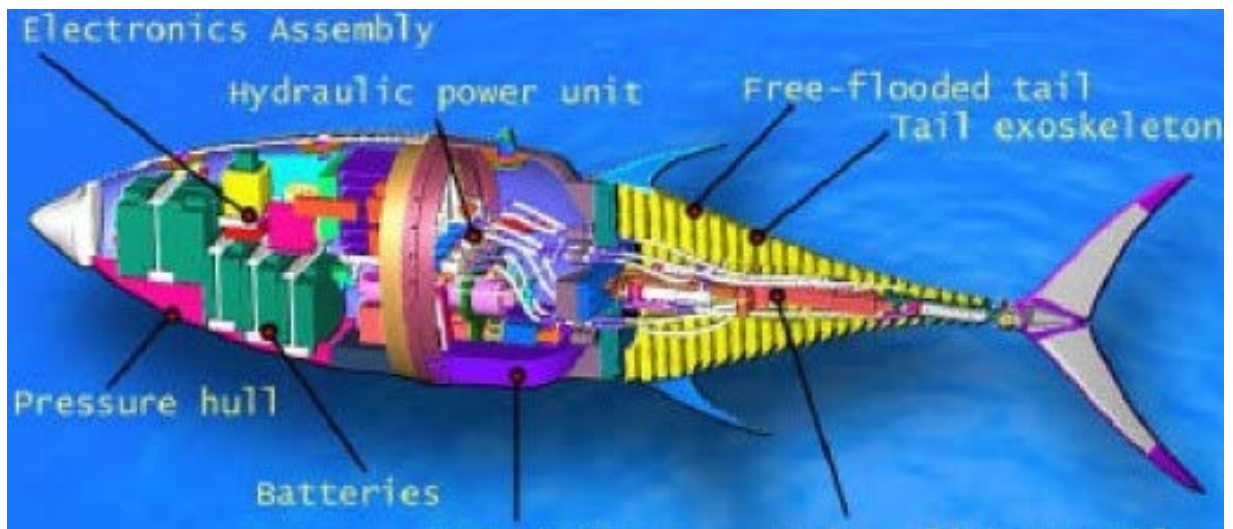
Τα έως τώρα κεκτημένα των πέντε βασικότερων ερευνητικών κέντρων (με έδρα ΗΠΑ, Ιαπωνία, Νότια Κορέα, Κίνα και Ρωσία) πάνω στους μηχανισμούς ενεργοποίησης της κίνησης των βιομιμητικών οχημάτων συνοψίζονται παρακάτω.

MUSCLE ACTUATORS: Έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε οχήματα SRFL. Δεδομένο ότι προσομοιώνουν αληθινούς μυς που δουλεύουν σε εντατικά ελεγχόμενα ενδοαγγειακά μέσα, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της δυσκολίας διατήρησης αυτών των παραμέτρων με αποτέλεσμα να μειώνεται η χρήση τους σε ευκίνητους μηχανισμούς. (Tuncdemir S., 2004:42) (εικόνα 1.4)

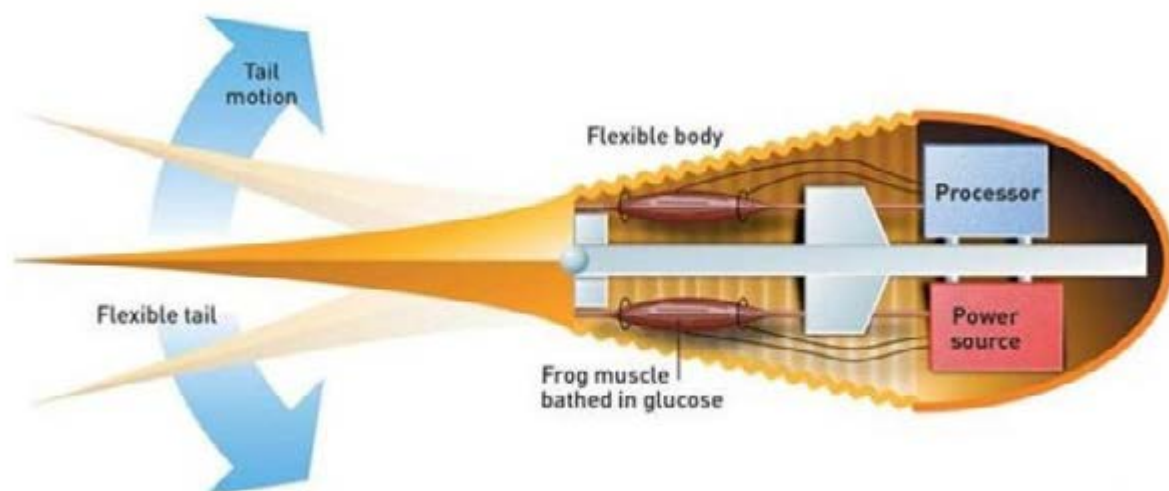
PNEUMATIC, HYDRAULIC AND STIRLING-ENGINE: Έχουν πολύ καλή παραμορφωτική ικανότητα καθώς και πυκνότητα ροπής στρέψης, λόγω ευλυγισίας. Ο χαμηλός ρυθμός ανταπόκρισης είναι ένα μειονέκτημα που οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας των αδρανειακών ρευστών. Επιπλέον η απαίτηση βοηθητικής μονάδας παροχής πίεσης καθώς και η θορυβώδης λειτουργία του, προστίθενται στα μειονεκτήματα. (Tuncdemir S., 2004:42) (εικόνα 1.5)

SMA: Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται στις μελέτες που αφορούν τα SRFL λόγω του μεγάλου βαθμού παραμόρφωσης σε συνδυασμό με την εξαιρετική πυκνότητα ροπής στρέψης και την πυκνότητα υψηλής δύναμης. Παρόλα αυτά, το SMA δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτυχημένα για μικρής κλίμακας SRFL, επειδή έχει χαμηλό θερμοκρασιακό εύρος ζώνης όσον αφορά τη λειτουργία του. Ειδικά όσον αφορά της μικρής κλίμακας SRFL είναι αναγκαία η ύπαρξη μεγάλου εύρους ζώνης λειτουργίας για την εύρυθμη λειτουργία του. Για αυτούς τους λόγους το SMA δεν μπορεί να υποστηρίξει αυτού του είδους τα ρομπότ. (Tuncdemir S., 2004:42) (εικόνα 1.6)

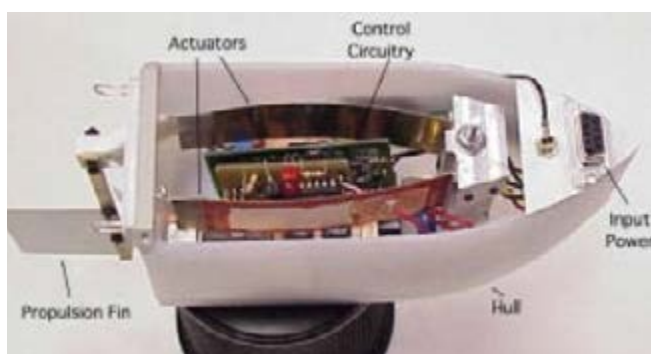
IONIC POLYMER ARTIFICIAL MUSCLES: Έχουν εξαιρετική δύναμη και πυκνότητα ροπής στρέψης. Είναι υδαρές υλικό για την λειτουργία του οποίου απαιτούνται υψηλά ποσά ενέργειας, τα οποία το καθιστούν ακατάλληλο για ευκίνητες συσκευές. (Madden, J., Zimit, R., Vandesteeg, N., Madden, P., Anquetil, P., Lafontaine, S., Takshi, A., Hunter, I. and Wierenga, P., 2004:706-728) (εικόνα 1.7)



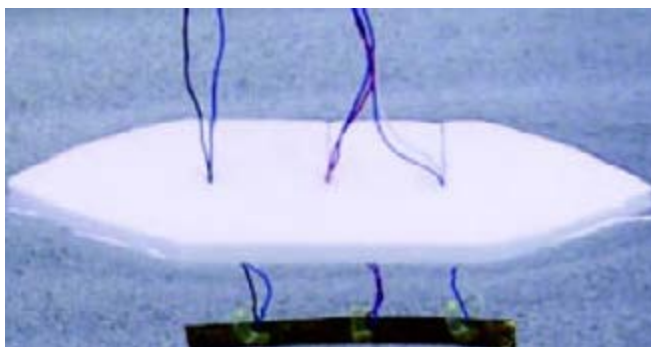
Εικόνα 1.5



Εικόνα 1.6



Εικόνα 1.7



Εικόνα 1.8

PIEZOCERAMIC ACTUATORS (PZT)<sup>10</sup>: Έχουν υψηλούς ρυθμούς μετατόπισης με υψηλούς ρυθμούς ανταπόκρισης. Επίσης διαθέτουν μεγάλο εύρος συχνότητας λειτουργίας και μεγάλη πυκνότητα δύναμης η οποία μπορεί να επιτευχθεί μέσω του σωστού μηχανικού σχεδιασμού. Έχουν την δυνατότητα να παράγουν μεγάλες μετατοπίσεις ακόμα και σε μικρά μεγέθη λόγω της μεγάλης πυκνότητας πίεσης, και άρα να είναι λειτουργικά και σε μεγέθη της τάξεως mini.

Τα κύρια μειονεκτήματα αυτών των υλικών είναι ο χαμηλός ρυθμός παραμόρφωσης και η ανάγκη για ειδικό ηλεκτρικό κύκλωμα. Χαμηλοί ρυθμοί εκτροπής επιτυγχάνονται με διαφορετικούς μηχανισμούς. Η αναγκαιότητα για πολύπλοκο κύκλωμα μπορεί να αποφευχθεί εισάγοντας απλούστερο μηχανικό σύστημα. (Tuncdemir S., 2004:43)

Οι πιεζοκεραμικοί ενεργοποιητές χωρίζονται ανάλογα την κατασκευή τους και την λειτουργία τους. Σύμφωνα με τους Mossi, Bishop, Smith, Banks (Mossi K.M., Bishop R.P., Smith R.C., Banks H.T., 1999:1-2) οι ενεργοποιητές THUNDER<sup>TM</sup> είναι μια νέα γενιά πιεζοκεραμικών ενεργοποιητών ικανή να παράγει σημαντικές δυνάμεις μετατόπισης όταν εφαρμοστεί σε αυτούς ηλεκτρική τάση. Ένας τυπικός THUNDER<sup>TM</sup> αποτελείται από δύο μεταλλικά υλικά, μία φέτα από πιεζοκεραμικό και το συγκολλητικό υλικό σε μορφή φιλμ. Η σύντηξη διαμόρφωση περιλαμβάνει στην κορυφή ένα στρώμα μετάλλου, στη συνέχεια τοποθετούμε συγκολλητικό υλικό, τη φέτα πιεζοηλεκτρικού, ξανά συγκολλητικό στρώμα και τέλος το μεταλλικό στρώμα υποστήριξης (είτε ένα είτε πολλά με συγκολλητικές επιφάνειες ενδιάμεσα). Τα υλικά συνδέονται μεταξύ τους κάτω από υψηλή πίεση και θερμοκρασία (3000°C) και στη συνέχεια ψύχονται σε θερμοκρασία δωματίου, εφόσον πρώτα έχει στερεοποιηθεί το συγκολλητικό υλικό. Λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας "prestresse" που προέρχεται από τις διαφορετικές θερμικές ιδιότητες των υλικών όταν ψύχονται, ο ενεργοποιητής αποκτά υψηλή αντοχή και ευκαμψία. Σαν αποτέλεσμα της κατασκευής αυτής, τάσεις που ξεπερνούν τα 800V μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς να προκαλούν βλάβες με συνέπεια να του δίνετε τη δυνατότητα να αντέχει σε πολύ υψηλές δυνάμεις μετατόπισης (εικόνα 1.8).

## **1.7 Αξιολόγηση των ενεργοποιητών THUNDER ως υποθαλάσσιοι προωθητήρες**

Σύμφωνα με τους Balakrishnan S., Niezrecki C. (Sivakumar Balakrishnan, Christopher Niezrecki, 2002: 193-195), οι THUNDER ενεργοποιητές είναι ικανοί να παρέχουν μετατόπιση της τάξης των 0.5cm. Αυτό του δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιείται σε υποθαλάσσιες εφαρμογές σαν μηχανισμός προώθησης. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και η ηλεκτρομηχανική αποδοτικότητα αυτών των ενεργοποιητών δεν έχει καταγραφεί ακόμα, ειδικά για υποθαλάσσιες προωθήσεις.

Έχει βρεθεί, όμως, ότι η κορυφή του ρυθμού ροής είναι περίπου  $1500\text{cm}^3/\text{s}$  καθώς και ότι μπορεί να δημιουργήσει ώθηση μεγαλύτερη από 4.5N. Ωστόσο, αυτή η ανάλυση απορρίπτει τις δυνάμεις πίεσης που ασκούνται στον ενεργοποιητή και άρα η πραγματική ώθηση δεν έχει υπολογιστεί.

---

10. "piezoelectricity: Λαμβάνει χώρα σε μια συγκεκριμένη κατηγορία φυσικά κρυσταλλικών υλικών όπως τα quartz, Rochelle salt and tourmaline. Λόγω της κρυσταλλικής δομής, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά αλλάζουν την γεωμετρία τους όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο τα διαπεράσει και αντίστροφα παράγουν ηλεκτρικό φορτίο λόγω μηχανικής παραμόρφωσης. Παρόλα αυτά, τα υλικά αυτά παράγουν ένα μικρό ποσό από αυτήν τους την συμπεριφορά. Πιεζοηλεκτρικά κεραμικά από πολυκρυσταλλικά φερεοηλεκτρικά υλικά όπως το  $\text{BaTiO}_3$  και το lead zirconate titanate (PZT) έχουν κατασκευαστεί με βελτιωμένες πιεζοηλεκτρικές δυνατότητες. Νέα μονοκρυστάλλα φερεοηλεκτρικά (PZN-PT, PMN-PT) μπορούν να αναπτύξουν παραμόρφωση που να ξεπερνά το 1% έχοντας 5 φορές περισσότερη πυκνότητα ενέργειας παραμόρφωσης από τα συμβατικά πιεζοκεραμικά." (jaffe et al. 1971)

Η μέση ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνουν 2 THUNDER ενεργοποιητές μέσα σε προστατευμένο κέλυφος λειτουργώντας στα 14Hz είναι περίπου 8W, που είναι κατά πολύ λιγότερη από αυτή που καταναλώνεται σε άλλα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα. Το γεγονός ότι η ανταπόκριση στη μετατόπιση και το ηλεκτρικό ρεύμα είναι μη γραμμικά, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, το THUNDER μπορεί να δημιουργήσει προώθηση με χαμηλή κατανάλωση. Ταυτόχρονα, μπορεί να επιχειρεί σε μεγάλα βάθη καθώς εξαλείφει την ανάγκη για σφραγισμένα σκέπαστρα, προπέλα και ρουλεμάν.

Οι σύγχρονοι ηλεκτροκινητήρες έχουν περίπου 60% απόδοση στη μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε ώθηση. Η απόδοση των THUNDER σαν συσκευές ώθησης είναι άγνωστες ακόμα. Αυτό συμβαίνει λόγω της φύσης των πιεζοηλεκτρικών, οι οποίοι λειτουργούν σαν πυκνωτές.

Είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν αυτοί οι ενεργοποιητές (με τη βοήθεια απαγωγέα) έτσι ώστε να εξαλειφθεί η τρέχουσα κατανάλωση ρεύματος (παράλληλη σύνδεση) ή για να αυξηθεί αρκετά η τάση εξόδου (σύνδεση σε σειρά). Επειδή το ηλεκτρικό φορτίο είναι μη δραστικό, πολύ μικρό κομμάτι ενέργειας καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της επιχείρησης. Άρα θα έχουμε μια συσκευή προώθησης που έχει την ικανότητα να λειτουργεί με υψηλές αποδόσεις.

Οι THUNDER ενεργοποιητές έχουν τις υψηλότερες μετατοπίσεις σε σύγκριση με άλλα έξυπνα υλικά μέχρι σήμερα. Το ποσό της πραγματικής ενέργειας που καταναλώνουν είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις συσκευές που βασίζονται σε μαγνητικά πεδία για να παράγουν μηχανικό έργο.

Παρέχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Εξαιρετικά αθόρυβη λειτουργία
- Μεγάλη αποδοτικότητα στη μετατροπή ηλεκτρικής σε μηχανική ενέργεια
- Αξιοπιστία
- Χαμηλό κόστος
- Χαμηλό βάρος και μικρό μέγεθος
- Μεγάλη επιφάνεια στην οποία μπορεί να παραχθεί μηχανικό έργο
- Υψηλή συχνότητα ανταπόκρισης

Τα σημαντικότερα αρνητικά χαρακτηριστικά είναι:

- Περιορισμοί στη μηχανική μετατόπιση ή ώθηση
- Η λήψη χρήσιμης ενέργειας από αυτούς τους ενεργοποιητές είναι δύσκολη

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

---

## Ο ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΠΡΟΩΘΗΣΗΣ

- 2.1 Σχεδιασμός του Μηχανισμού Κίνησης του Ουριαίου Πτερύγιου
- 2.2 Ανάλυση του Μηχανισμού Κίνησης του Ουριαίου Πτερύγιου
- 2.3 Μοντελοποίηση του Πιεζοηλεκτρικού Ενεργοποιητή
- 2.4 Μηχανισμός Προώθησης με τη χρήση Εύκαμπτου Πτερυγίου
- 2.5 Αξιολόγηση της Λειτουργίας του Εύκαμπτου Πτερυγίου
- 2.6 Ενσωματωμένο Ψηφιακό Σύστημα Ελέγχου

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την ανάλυση της δομής του μηχανισμού προώθησης του υποβρύχιου «miniature swimming vehicle», ο οποίος προκαλεί την ταλάντωση του ευκίνητου πτερυγίου που είναι τοποθετημένο στην πρύμνη. Το πτερύγιο είναι από στυρένιο (εύκαμπτο υλικό ιδανικό για ουρά ψαριού) με διαστάσεις  $1.5 \times 1.625 \times 1.0$  mil και καθοδηγείται μέσω ενός μηχανισμού ο οποίος ενεργοποιείται από 2 καμπυλωτά πιεζοηλεκτρικά της κατηγορίας THUNDER<sup>11</sup>. Χαρακτηριστική είναι η γραμμική ταλαντευτική κίνηση που επιδεικνύουν αυτοί οι ενεργοποιητές, όταν υπόκεινται σε ημιτονοειδή τάση (160-600V peak-to-peak), η οποία είναι ανάλογη της κίνησης που παρουσιάζει το ουριαίο πτερύγιο των ψαριών κατά τη διάρκεια της ώθησης. Η ομοιότητα αυτή επιτρέπει την χρήση ενός απλούστερου μηχανισμού μετάδοσης κίνησης (μεταξύ του ενεργοποιητή και του εξωτερικού πτερυγίου) σε σχέση με τα συμβατικά μέσα ενεργοποίησης (π.χ. ηλεκτρικούς κινητήρες). Επιπλέον, κατά το πρώτο μισό ενός ολόκληρου κύκλου ένα σημαντικό ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία προκαλεί την κάμψη του ενεργοποιητή, μπορεί να συλλεχθεί και να ανακυκλωθεί από ένα σωστά σχεδιασμένο ηλεκτρικό κύκλωμα ελέγχου, έτσι ώστε να οδηγήσει τον ενεργοποιητή κατά τον επόμενο μισό κύκλο<sup>12</sup>. Η σημασία αυτής της ανακύκλωσης είναι μεγάλη, διότι η εκμετάλλευση αυτού του περιθωρίου αποδοτικότητας μας επιτρέπει να σχεδιάζουμε «miniature swimming vehicle» με μεγάλη αυτονομία καυσίμων. Τέλος το ενσωματωμένο σύστημα ψηφιακού ελέγχου, παρουσιάζεται σχεδιαστικά με βάση την απόδοση των χαρακτηριστικών τα οποία έχουν καθοριστεί πειραματικά από τον Borgen (M. Borgen, 2001).

## 2.1 Σχεδιασμός Μηχανισμού Κίνησης Ουριαίου Πτερυγίου

Όσον αφορά την σύνθεση του μηχανισμού, το πρώτο βήμα είναι η επιλογή της επιθυμητής κίνησης της ουράς. Εδώ, η ουρά υποβάλλεται σε μικρή ταλάντωση πλάτους (σε σχέση με το μήκος του πτερυγίου) έτσι ώστε να μιμείται την βιολογική πρόωση<sup>13</sup>. Σύμφωνα με τους Borgen, Washington, και Kinzel (Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, and Kinzel L. Gary, 2003) ο μηχανισμός που επιλέγεται για να μετατρέψει την κίνηση του ενεργοποιητή σε κίνηση πτερυγίου χρησιμοποιεί μόνο κυλινδρικούς συνδέσμους καθιστώντας τον ως απλούστερο τρόπο παροχής μίας εξόδου για δύο εισόδους. Ο μηχανισμός αυτός, γνωστός ως «dyad», αποτελείται από 2 άκαμπτες συνδέσεις πακτωμένες μεταξύ τους, ενώ αφήνει το ένα άκρο κάθε σύνδεσης ελεύθερο. Τα υπόλοιπα σημεία σύνδεσης θεωρούνται σημεία εισόδου και είναι συνδεδεμένα με τον ενεργοποιητή. Ενώ, το πτερύγιο στερεώνεται σε έναν από τους συνδέσμους dyad έτσι ώστε το σημείο περιστροφής του πτερυγίου να είναι τοποθετημένο στο σημείο εξόδου του μηχανισμού (βλ. εικόνα 2.1).

## 2.2 Ανάλυση Μηχανισμού Κίνησης Ουριαίου Πτερυγίου

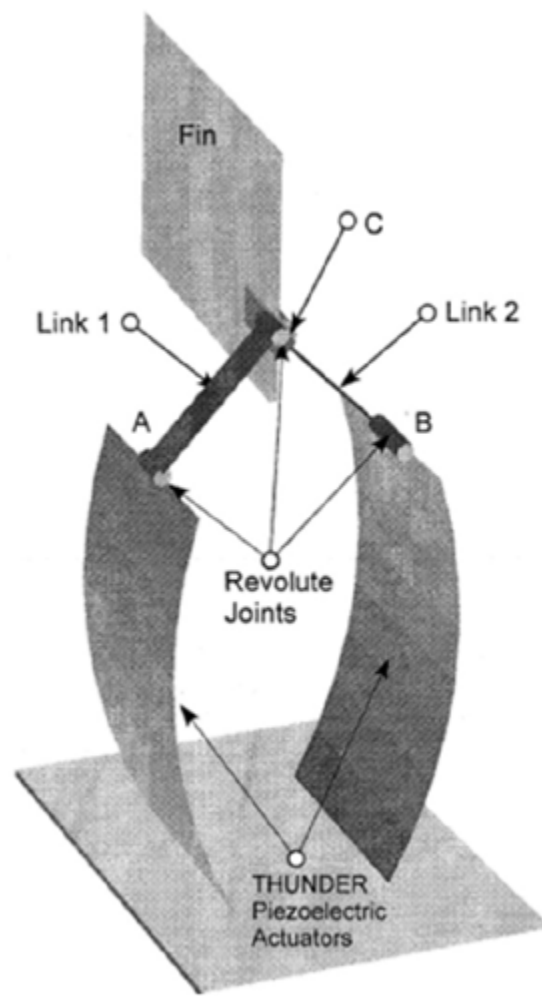
Το πρώτο βήμα στη διεξαγωγή της κινηματικής ανάλυσης θέσης είναι η γραφική αναπαράσταση του φορέα του «dyad»<sup>14</sup>. Στην εικόνα 2.2 τα διανύσματα  $r_A$  και  $r_B$  αντιπροσωπεύουν τις γνωστές θέσεις των

11. Αυτός ο μηχανισμός κίνησης βασίζεται στην ερευνητική δουλειά των Borgen G. Michael, Washington N. Gregory και Kinzel L. Gary, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, 2003.

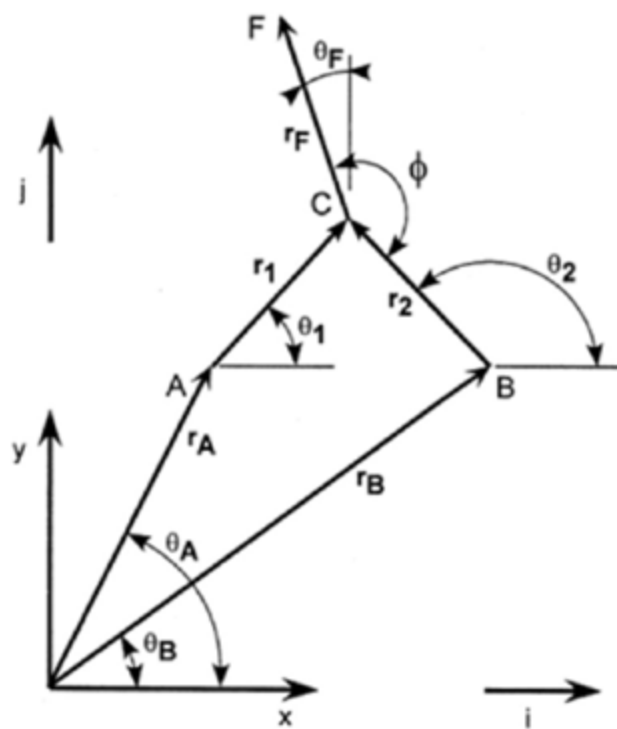
12: για περισσότερες πληροφορίες βλέπε M. Borgen, "Design of a miniature, piezoelectrically actuated swimming vehicle," M.S. thesis, The Ohio State Univ., Columbus, OH, 2001.

13. O Urbach (H. P. Urbach, "Existence of optimum propulsion by means of periodic motion of rigid profile," Studies Appl. Math., vol. 81, pp. 93–116, 1989.), (H. P. Urbach, "On optimum propulsion by means of periodic motion of rigid profile, I. Properties of optimum motions, II. Optimization of the period and numerical results," Studies Appl. Math., vol. 82, pp. 121–215, 1990.) βρήκε λύσεις για την βέλτιστη κίνηση της άκαμπτης ουράς, και η δουλειά του συνοψίζεται από τον Sparenberg (J. A. Sparenberg, Hydrodynamic Propulsion and Its Optimization: Analytic Theory. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 1995.) που είναι η πηγή για τις αριθμητικές τιμές που παρουσιάζονται εδώ.

14. Η ανάλυση θέσης που καλύπτεται σε αυτό το τμήμα παρουσιάζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο M. Borgen, "Design of a miniature, piezoelectrically actuated swimming vehicle," M.S. thesis, The Ohio State Univ., Columbus, OH, 2001.



Εικόνα 2.1



Εικόνα 2.2



ελεύθερων άκρων του ενεργοποιητή, στα σημεία Α και Β στο επίπεδο xy. Το διάνυσμα  $r_1$  εντοπίζει το σημείο c σε σχέση με το σημείο Α, ενώ το  $r_2$  εντοπίζει το σημείο c σε σχέση με το σημείο Β. Η εξίσωση  $r_A + r_1 = r_B + r_2$  εγγυείται το κλείσιμο αυτού του βρόχου. Σε μορφή συνιστωσών η παραπάνω εξίσωση εκφράζεται ως εξής:

$$r_A \cos \theta_A + r_1 \cos \theta_1 = r_B \cos \theta_B + r_2 \cos \theta_2 \quad \text{και} \quad r_A \sin \theta_A + r_1 \sin \theta_1 = r_B \sin \theta_B + r_2 \sin \theta_2$$

Το σχήμα στην εικόνα 2.2 απεικονίζει την κινηματική ανάλυση του μηχανισμού προώθησης του ουριαίου πτερυγίου. Υποθέτουμε ότι και τα 2 μήκη των συνδέσμων καθώς και η θέση των σημείων Α και Β είναι γνωστά. Άρα οι μόνοι άγνωστοι είναι οι γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$ . Εφαρμόζοντας τριγωνομετρικές ταυτότητες και αλγεβρικές εξισώσεις έχουμε ότι<sup>15</sup>:

$$\theta_2 = 2 \tan^{-1} t$$

$$t = \frac{[-b + \sigma \sqrt{b^2 - c^2 + a^2}]}{(c - a)}$$

$$a = [2r_B r_2 \cos \theta_B - 2r_A r_2 \cos \theta_A]$$

$$b = [2r_B r_2 \sin \theta_B - 2r_A r_2 \sin \theta_A]$$

$$c = [r_A^2 + r_B^2 + r_2^2 - r_1^2 - 2r_A r_B \times (\cos \theta_A \cos \theta_B + \sin \theta_A \sin \theta_B)]$$

Μόλις το  $\theta_2$  γίνει γνωστό βρίσκουμε το  $\theta_1$  από την παρακάτω εξίσωση.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[ \frac{r_B \sin \theta_B + r_2 \sin \theta_2 - r_A \sin \theta_A}{r_B \cos \theta_B + r_2 \cos \theta_2 - r_A \cos \theta_A} \right]$$

Μόλις και τα  $\theta_1$  και  $\theta_2$  γίνουν γνωστά, η θέση οποιοδήποτε σημείου στη σύνδεση μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα.

Ο στόχος αυτής της ανάλυσης θέσης είναι η συσχέτιση της δομής του πτερυγίου, που αντιπροσωπεύεται από το  $r_p$  με τη θέση των σημείων εισόδου. Επιπλέον πρέπει να εξετάσουμε την σχέση των «pitching motion<sup>16</sup>» και «heaving motion<sup>17</sup>» με τη θέση των σημείων εισόδου. Όσον αφορά το «heaving motion», το προσδιορίζουμε με βάση το κεντρικό σημείο c στη x-διεύθυνση και εκφράζεται αλγεβρικά ως εξής:

$$x_c = r_B \cos \theta_B + r_2 \cos \theta_2.$$

15. Το  $\sigma = \pm 1$  και είναι μια μεταβλητή σημείων που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μηχανισμού συναρμολόγησης και επιλέγεται κατά περίπτωση.

16. Pitching motion: είναι η κίνηση ανύψωσης που αλλάζει τη γωνία πρόσπτωσης μεταξύ του πτερυγίου και του ελεύθερου ρευστού.

17. Heaving motion: είναι η ανυψωτική κίνηση που μεταφράζεται σε πλευρική μάζα (bulk lateral) και καθοδηγεί την εγκάρσια μετατόπιση (προς την κατεύθυνση «forward travel») του σημείου c πάνω στην ουρά. Το κεντρικό σημείο c (pivotal point) είναι τοποθετημένο στο 1/4 του συνολικού μήκους από την αρχική ακμή.



Η «pitching motion» συνδέει την γωνία μεταξύ του διανύσματος του πτερυγίου και την κατακόρυφο. Όπου  $\theta_F$ :

$$\theta_F = \phi + \theta_2 - \frac{3\pi}{2}.$$

Η γωνία  $\phi$  μετρούμενη μεταξύ των διανυσμάτων  $r_2$  και  $r_F$  δεν μεταβάλλεται μέσω των κύκλων κίνησης της σύνδεσης, καθώς αντιπροσωπεύει μια άκαμπτη σύνδεση μεταξύ του πτερυγίου και του συνδέσμου 2.

## 2.3 Μοντελοποίηση Πιεζοηλεκτρικού Ενεργοποιητή

Όσον αφορά την δομή των ενεργοποιητών που χρησιμοποιούμε, οι ενεργοποιητές που επιλέγουμε αποτελούνται από 9.5cmx2.54cmx0.254mm φύλλο χάλυβα, στο οποίο προσκολλάται πιεζοκεραμικό (PZT-5A) πάχους 10mil (0,254mm), ενώ χρησιμοποιούμε συγκολλητικό υλικό (LaRc-SI) πάχους 0.6mil (0,015239mm). Τα υλικά αυτά ενοποιούνται σε κλίβανους υψηλής θερμοκρασίας. Επιπλέον φύλλο αλουμινίου πάχους 1mil (0,0254mm) προσκολλάται με τη χρήση του ίδιου συγκολλητικού υλικού (LaRc-SI) στο πιεζοκεραμικό (PZT-5A) έτσι ώστε να λειτουργήσει σαν ηλεκτρόδιο.

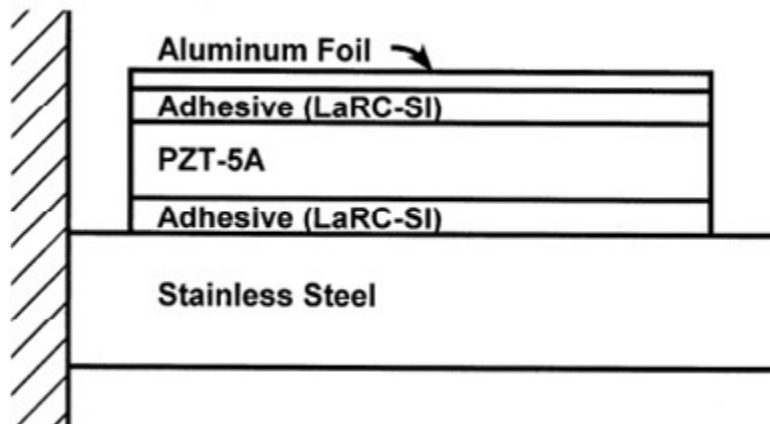
## 2.4 Μηχανισμός Προώθησης με τη χρήση Εύκαμπτου Πτερυγίου

Αυτή η ενότητα αποσκοπεί στο να δώσει στον αναγνώστη μια εννοιολογική κατανόηση της ευέλικτης κίνησης των πτερυγίων, και του τρόπου με τον οποίο διαφέρει από το άκαμπτο πτερύγιο. Έπειτα από μια σειρά προβλημάτων που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια του πειραματικού σχεδιασμού<sup>18</sup>, το μοντέλο του άκαμπτου πτερυγίου εγκαταλείφθηκε. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα κίνησης το οποίο απεικονίζει την ασύμμετρη συμπεριφορά του άκαμπτου πτερυγίου.

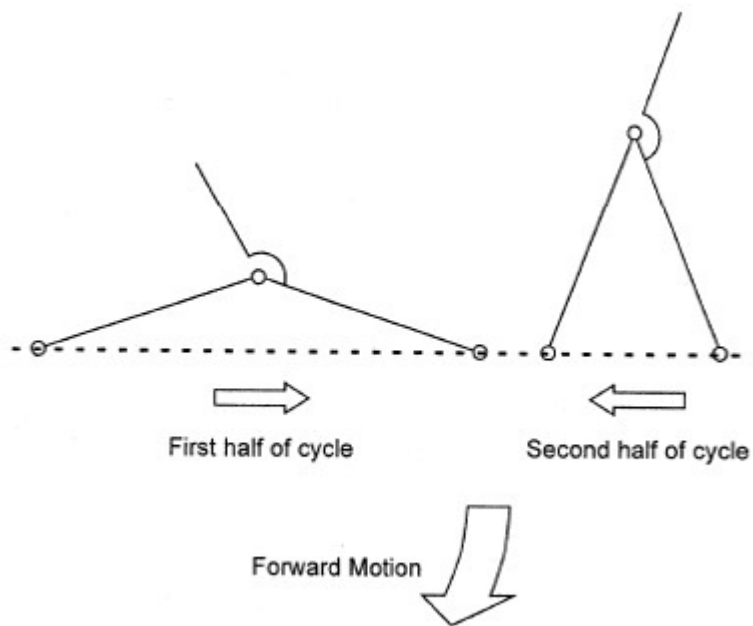
Λόγω της απόρριψης του άκαμπτου πτερυγίου, ένα νέο εύκαμπτο πτερύγιο επιλέχθηκε σαν αντικαταστάτης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της υποβρύχιας κίνησης του εύκαμπτου πτερυγίου (εικόνα 2.6). Η κατανόηση αυτών των φαινομένων είναι καίριας σημασίας, διότι η ώθηση που δημιουργείται από τα φαινόμενα «added mass» και «vorticity» συνδυάζονται για να αποδώσουν την συνολική ώθηση. Ακόμα πρέπει να επισημάνουμε ότι κατά τη διάρκεια της κυματοειδούς κίνησης του εύκαμπτου πτερυγίου, τα δύο αυτά φαινόμενα λειτουργούν συνδυαστικά και οδηγούν σε δύο μεθόδους ταυτόχρονης ώθησης του ρομπότ. Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε καλύτερα τον σημαντικό ρόλο που παίζουν στην βιομιμητική κολύμβηση αυτά τα δύο φαινόμενα, παρακάτω αναλύουμε ξεχωριστά το κάθε φαινόμενο.

Όσον αφορά το φαινόμενο «added mass», το κύμα προώθησης έχει κατεύθυνση προς το πτερύγιο και παράγει μια δύναμη που αυξάνει την ορμή των εκκλύμενων νερών σε κάθε πλευρά του πτερυγίου. Ενώ, μια ίση και αντίθετη δύναμη ( $F_r$ ) αντίδρασης ασκείται στο νερό σε κάθε στοιχείο πρόωσης. Να επισημάνουμε ότι, η  $F_r$  μπορεί να διαχωριστεί σε πλευρικά και ωστικά συστατικά,  $F_r$  και  $F_T$  αντίστοιχα. Όπως βλέπουμε στην εικόνα 2.5 η  $F_T$  αντιπροσωπεύει την πρόωση, ενώ η  $F_L$  μετατοπίζει το νερό πλευρικά, προκαλώντας απώλειες ενέργειας. Επιπλέον το μέγεθος του  $F_T$  αυξάνεται κατά μήκος

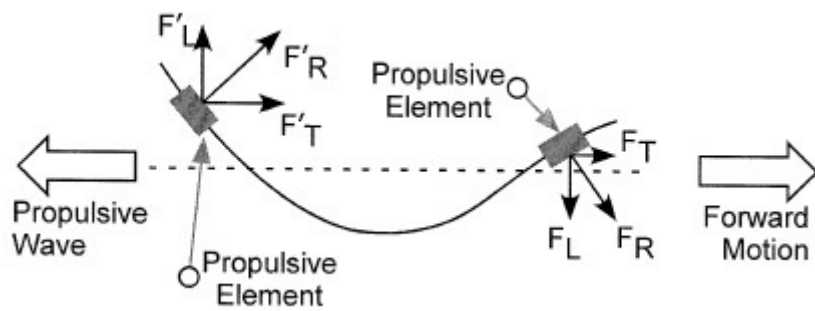
18. Για περισσότερες πληροφορίες δες Borgen G. Michael, Washington N. Gregory and Kinzel L. Gary, "Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle", 2003:71



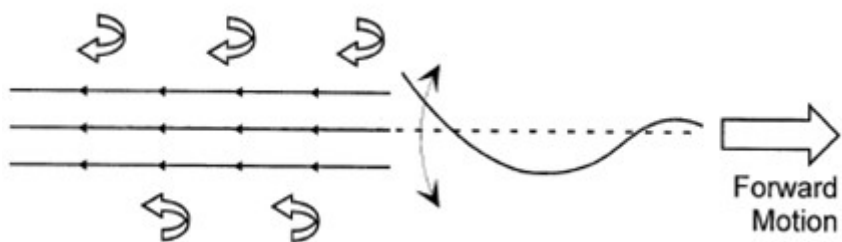
Εικόνα 2.3



Εικόνα 2.4



Εικόνα 2.5



Εικόνα 2.6

του πτερυγίου (γίνεται μέγιστο στην άκρη του) καθώς τα οπίσθια στοιχεία κινούνται σε υψηλότερες ταχύτητες λόγω αύξησης του εύρους της πλευρικής κίνησης. Εκτός από τα παραπάνω, επειδή το πλάτος της μετατόπισης του πτερυγίου είναι υψηλότερο στο πίσω άκρο, τα προωστικά στοιχεία σε αυτό το άκρο έχουν προσανατολισμό προς την κατεύθυνση της «forward motion».

Στην προηγούμενη παράγραφο αναφέραμε ότι το φαινόμενο «added mass» λειτουργεί συνδυαστικά με το φαινόμενο «vorticity» ή αλλιώς στροβιλισμός. Κατά τη διάρκεια του στροβιλισμού τα εκλυόμενα νερά από το εύκαμπτο πτερύγιο αποτελούνται από μια σειρά στροβίλων εναλλασσόμενης κατεύθυνσης<sup>19</sup>. Με αποτέλεσμα όταν η ροή φτάσει στην πίσω άκρη του πτερυγίου (και η πίσω άκρη βρίσκεται σε ακραία θέση), η ροή αλληλοεπιδρά με τις δεσμευμένες δίνες που δημιουργούνται από το πτερύγιο και σχηματίζουν στροβίλους<sup>20</sup>.

Η κατανόηση αυτών των δύο φυσικών φαινομένων, τα οποία λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια της υποβρύχιας κίνησης του εύκαμπτου πτερυγίου, μας παρέχουν την δυνατότητα να διατηρήσουμε σε σταθερά επίπεδα την ορμή του ρομπότ καθώς και να επιτύχουμε σταθερό προσανατολισμό προς την κατεύθυνση της «forward motion».

## 2.5 Αξιολόγηση της Λειτουργίας του Εύκαμπτου Πτερυγίου

Στην προηγούμενη ενότητα αντικαταστήσαμε το άκαμπτο πτερύγιο με εύκαμπτο ορθογώνιο σε μια προσπάθεια να εξαλείψουμε τις ασυμμετρίες που αντιμετωπίσαμε. Παρόλο που το ευέλικτο πτερύγιο επέφερε σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση, δεν καταφέραμε να επιλύσουμε όλα τα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε στον πρώτο σχεδιασμό. Το σύστημα εξακολουθεί να είναι δυναμικά ευαίσθητο σε μεταβολές τόσο στη συχνότητα λειτουργίας όσο και στη διανομή της μάζας, με αποτέλεσμα να απαιτεί προσεκτική διαδικασία συντονισμού μετά από οποιαδήποτε αλλαγή<sup>21</sup>. Επιπλέον για οποιαδήποτε δεδομένη συχνότητα ο ένας ενεργοποιητής απέδειξε μεγάλη απόκλιση ενώ ο άλλος αν και έλαβε την ίδια είσοδο, έδειξε πολύ μικρότερες παραμορφώσεις. Σε μια προσπάθεια να περιοριστούν οι μεταβολές του συστήματος οι, Borgen, Washington, και Kinzel (Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, and Kinzel L. Gary, 2003:73) ρύθμισαν νέα συχνότητα συντονισμού στα 160Hz ως τη νέα ταχύτητα λειτουργίας. Η εύρεση αυτής της νέας συχνότητας συντονισμού είναι αναγκαία, διότι οι ενεργοποιητές πρέπει να παρουσιάζουν μετατοπίσεις του ίδιου μεγέθους έτσι ώστε να επιτύχουμε ευθεία πρόωση και επιτυχημένη βιομιμητική κίνηση. Με βάση τη νέα συχνότητα συντονισμού ένα νέο σχήμα ελέγχου κρίθηκε απαραίτητο, το οποίο στέλνει ένα σήμα δόνησης σε ένα μόνο ενεργοποιητή, το οποίο πρέπει να βρίσκεται κοντά στη συχνότητα συντονισμού του δεύτερου ενεργοποιητή. Σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο, μόνο ένας ενεργοποιητής, στην περίπτωσή μας ο Β (εικόνα 2.1), χρησιμοποιείται για την υποστήριξη των κραδασμών των πτερυγίων. Να επισημάνουμε ότι δεν υπήρξε παρατηρήσιμη πτώση της ταχύτητας και διατηρήθηκε μια ευθεία πορεία με αυτόν τον τρόπο λειτουργίας.

19. Πρόσφατα πειράματα σε ζωντανά ψάρια έχουν δείξει ότι οι περιοχές αναρρόφησης και πίεσης εμφανίζονται στο μοτίβο ροής «flow pattern», σχηματίζοντας ένα μηχανισμό κυματιστής αντλίας που δημιουργεί μια ροή κυκλοφορίας γύρω από τα σημεία καμψής του σώματος. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε U. Müller, B. Van den Heuvel, E. Stamhuis, and J. Videler, "Fish foot prints: morphology and energetics of the wake behind a continuously swimming mullet (*Chelon Labrosus Risso*)," J. Exp. Bio., vol. 200, pp. 2893–2906, 1997.

20. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε T. Y. Fu, "Swimming of a waving plate," J. Fluid Mechanics, vol. 10, pp. 321–344, 1960.

21. Για περισσότερες πληροφορίες δες Borgen G. Michael, Washington N. Gregory and Kinzel L. Gary, "Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle", 2003:73

Έχοντας πλέον σαν δεδομένο, ότι σήμα δόνησης θα στέλνεται μόνο σε έναν ενεργοποιητή για την επίτευξη πρόωσης, αφήνουμε τον άλλο ενεργοποιητή να ελέγχει το σύστημα διεύθυνσης χωρίς την πρόσθεση επιπλέον “hardware”. Επομένως, ο χειρισμός του σκάφους επιτυγχάνεται με την εφαρμογή τάσης συνεχούς ρεύματος στον ενεργοποιητή. Οπότε, ανάλογα με τον παλμό του σήματος, η εφαρμογή μιας σταθερής τάσης να αναγκάζει τη διάταξη «dyad» να κλείνει ή να ανοίγει ελαφρώς, αλλάζοντας τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της διαδρομής και της θέσης του πτερυγίου. Εδώ, θα πρέπει να τονίσουμε ότι ενώ το πτερύγιο συγκρατείται υπό γωνία, το σκάφος ακολουθεί μια διαδρομή εφαπτόμενη τόσο στο πτερύγιο όσο και σε ένα μεσαίο πλαίσιο που είναι προσαρτημένο στην καρίνα.

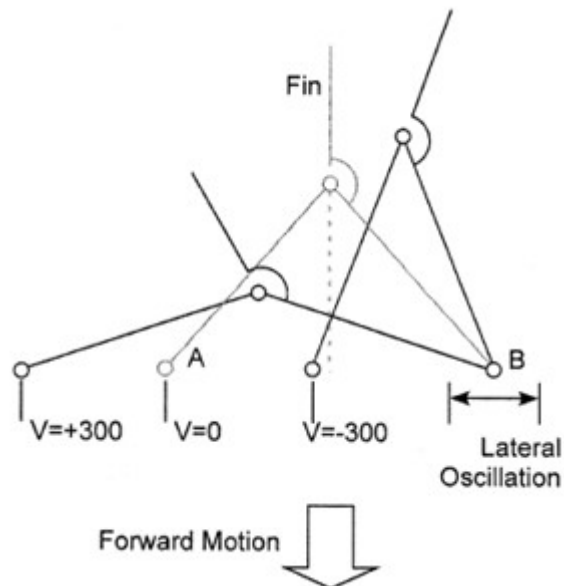
Τα πειραματικά δεδομένα των Borgen, Washington, και Kinzel (Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, and Kinzel L. Gary, 2003:74) δείχνουν ότι ένα σήμα +300V προκαλεί στροφή προς τη δεξιά πλώρη ενώ σήμα -300V προκαλεί στροφή προς την αριστερή πλώρη. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η ηλεκτρική διέγερση είναι αυτή που προκαλεί την παραμόρφωση στον ενεργοποιητή. Όμως, εδώ θα πρέπει να επισημάνουμε ότι, η αύξηση της τάσης από το μηδέν σε μια δεδομένη σταθερή τιμή δεν προκαλεί τόσο μεγάλη παραμόρφωση όσο η αύξηση της τάσης από μια ακραία τιμή στην άλλη. Επιπρόσθετα, λόγω αδράνειας, η άκρη του ενεργοποιητή έρχεται πιο κοντά στην επιθυμητή κατεύθυνση όταν εφαρμόσουμε στον ενεργοποιητή μια αρχική ηλεκτρική τάση έτσι ώστε να προκαλέσουμε μια μικρή μετατόπιση με σκοπό να δώσουμε στον ενεργοποιητή ένα προβάδισμα κίνησης το λεγόμενο «running start». Με την εκμετάλλευση αυτού του φαινομένου, το πρόγραμμα ελέγχου διεύθυνσης διατηρεί σταθερή την πορεία του σκάφους.

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των Borgen, Washington, και Kinzel (Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, and Kinzel L. Gary, 2003:74) η γωνία της θέσης του πτερυγίου είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της δεξιάς στροφής από ότι κατά τη διάρκεια μιας αριστερής στροφής, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.7, με αποτέλεσμα η ακτίνα καμπυλότητας κατά τη δεξιά στροφή να είναι περίπου 1.5m ενώ κατά την αριστερή να είναι περίπου 2m.

## 2.6 Ενσωματωμένο Ψηφιακό Σύστημα Ελέγχου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο, θέσαμε τις παραμέτρους που πρέπει να πληρεί η ηλεκτρική τάση ώστε να επιτύχουμε τη σωστή λειτουργία των ενεργοποιητών. Σκοπός αυτού του κεφαλαίου, είναι να αποδώσει τη δομή του ψηφιακού ηλεκτρικού κυκλώματος έτσι ώστε να μπορέσουμε να επιτύχουμε αυτές τις τιμές.

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να επισημάνουμε ένα αρνητικό φαινόμενο το οποίο παρουσιάζεται στους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές όταν εφαρμοστεί σε αυτούς ηλεκτρική τάση. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως “hysteresis”. Ο όρος “hysteresis” χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια δυναμική χρονική καθυστέρηση μεταξύ μιας εισόδου και μιας εξόδου, η οποία εμφανίζεται αν η είσοδος μεταβάλλεται πιο αργά, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται προβλήματα συντονισμού στις μετατοπίσεις των ενεργοποιητών. Οι ερευνητές Jun-Kyung και Washington (Jun-Kyung Song, Gregory Washington, March 1999) χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης, τον “fussy logic control” με σκοπό τη μείωση του “hysteresis” και την βελτίωση των παροδικών αποκρίσεων. Παρόλα αυτά, το φαινόμενο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψιν λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας που παρουσιάζεται στην ενσωμάτωση ενός τέτοιου αλγορίθμου στο παρόν σύστημα ψηφιακού ελέγχου. Επιπλέον, η μελέτη του βέλτιστου ηλεκτρικού συστήματος ψηφιακού ελέγχου, λόγω πολυπλοκότητας αποτελεί ξεχωριστή ερευνητική δουλειά.

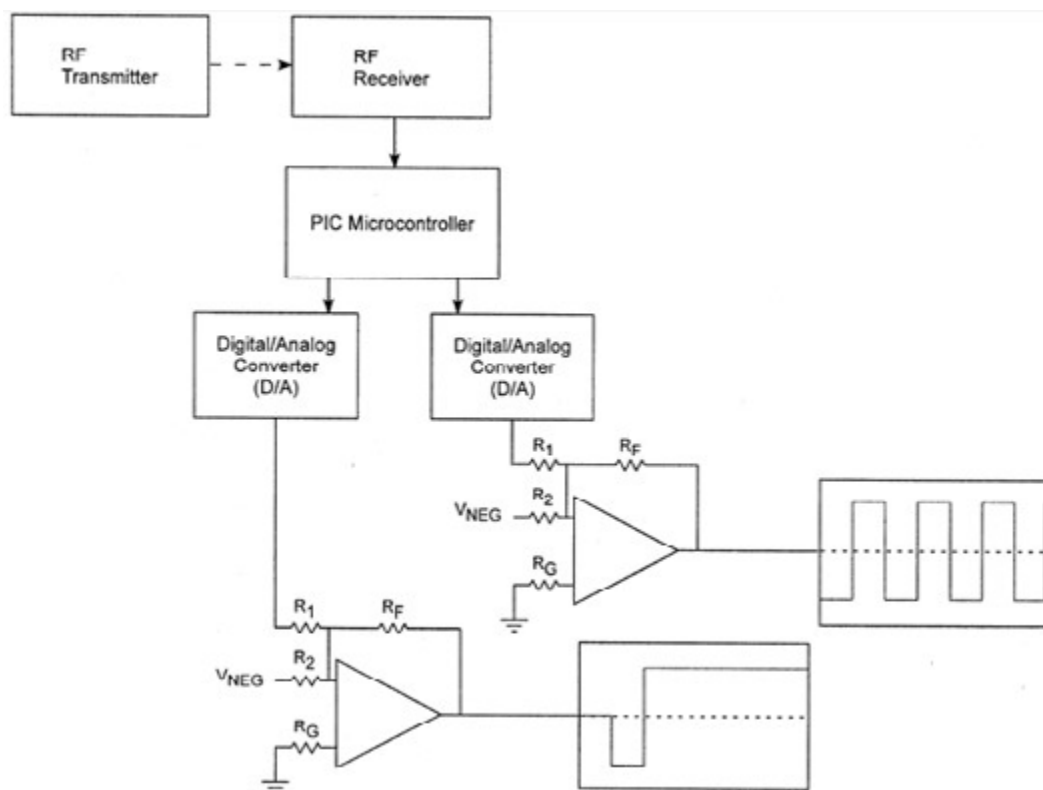


Εικόνα 2.7

TRUTH TABLE SUMMARIZING THE ONBOARD DIGITAL CONTROL STRUCTURE

	Input 1	Input 2	Signal to actuator A	Signal to actuator B
Off	1	1	Off	Off
Forward	0	0	Off	300 V, 160 Hz square wave
Port turn	1	0	+300V pulse, then -300VDC	300 V, 160 Hz square wave
Starboard turn	0	1	-300V pulse, then +300VDC	300 V, 160 Hz square wave

Πίνακας 2.1



Εικόνα 2.8

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αποφασίστηκε η ύπαρξη ενός ενσωματωμένου συστήματος ψηφιακού ελέγχου ανοικτού βρόχου το οποίο ελέγχεται από τον χρήστη. Σκοπός αυτής της ιδέας είναι, το σύστημα να έχει ενσωματωμένο από τον χρήστη μια τροχιά ή ένα σχέδιο διαδρομής, το οποίο θα ακολουθήσει αυτομάτως η συσκευή. Δυστυχώς, επί του παρόντος, τα σήματα ελέγχου παράγονται στο σκάφος από το κύκλωμα, αποστέλλονται στην ακτή μέσω ενός ιμάντα, ενισχύονται από έναν γραμμικό ενισχυτή και παραδίδονται στους ενεργοποιητές του οχήματος. Να επισημάνουμε ότι, το παρών σύστημα ελέγχου δεν έχει εξαλείψει την ανάγκη για ιμάντα, όμως αυτό το κύκλωμα ψηφιακού ελέγχου που παρουσιάζεται από τους Borgen, Washington, και Kinzel (Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, and Kinzel L. Gary, 2003:74), αντιπροσωπεύει το πρώτο βήμα για την προσθήκη προγραμματιζόμενης, αυτόνομης συμπεριφοράς σε όχημα κολύμβησης, και αποτελεί τον λόγο επιλογής του. Το σχήμα ελέγχου συνοψίζεται στον πίνακα 2.1.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.8, η δομή του συστήματος ψηφιακού ελέγχου είναι σχετικά απλή<sup>22</sup>. Η διάταξη του συστήματος ψηφιακού ελέγχου μέσα στο ρομπότ πρέπει να ανταποκρίνεται στους περιορισμούς που έχουμε θέσει, όσον αφορά τις διαστάσεις και το βάρος που πρέπει να έχει ένα SRFL, οι οποίοι παρουσιάζονται αναλυτικά στο πρώτο κεφάλαιο. Με βάση αυτούς τους περιορισμούς, η πλακέτα ελέγχου βρίσκεται ακριβώς κάτω από τους ενεργοποιητές, ενώ ο δέκτης  $R_F$  είναι κάθετος στην πλακέτα έτσι ώστε να τοποθετείται ανάμεσα στους ενεργοποιητές. Για να διατηρηθεί χαμηλό κέντρο βάρους, η 9V μπαταρία βρίσκεται κάτω από την πλακέτα κυκλώματος στο πάτωμα του κύτους. Ενώ, για λόγους στεγανοποίησης, το κύκλωμα ελέγχου και η μπαταρία είναι εγκλωβισμένα σε πλαστικό, ως ένα επιπλέον μέτρο προφύλαξης.

---

22. Το κεντρικό συστατικό του συστήματος ψηφιακού ελέγχου, είναι ένα 8-bit CMOS μικροεπεξεργαστής με μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό (A/D) και είναι PIC16C711/JW. Οι ψηφιακές καταστάσεις υψηλής και χαμηλής (5V και 0V ή 1 και 0) των δύο ακίδων χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο PIC. Τα σήματα ελέγχου αποστέλλονται ως έξοδο από το PIC ως σειριακά δεδομένα και μετατρέπονται σε αναλογικές τιμές χρησιμοποιώντας μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικό (D/A). Υπάρχουν δύο D/As που χρησιμοποιούνται σε αυτό το κύκλωμα ελέγχου, ένα για κάθε σήμα ενεργοποιητή. Το D/As που χρησιμοποιείται εδώ είναι ψηφιακά ποτενσιόμετρα που μεταβάλλουν την αντίσταση τους ανάλογα με το μέγεθος του ψηφιακού αριθμού που αποστέλλεται από το PIC, χρησιμοποιώντας την αρχή της διαίρεσης τάσης για να παράγει την επιθυμητή αναλογική τάση. Οι δείκτες PIC, D/As και RF διεξάγονται σε είσοδο 5V. Ωστόσο, ολόκληρο το κύκλωμα τροφοδοτείται από μια μπαταρία 9V της οποίας η τάση διαιρείται από ένα ποτενσιόμετρο 10k. Η τάση διαιρείται έτσι ώστε τα απαιτούμενα 5V να τροφοδοτούν τα εξαρτήματα, αφήνοντας τα -4V που εφαρμόζονται στις αρνητικές τάσεις τροφοδοσίας δύο op-amp (operational amplifiers). Δεδομένου ότι οι δύο γραμμικοί ενισχυτές που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των σημάτων ελέγχου σε αυτή τη μελέτη έχουν κέρδος 100, τα op-amps αντισταθμίζουν τα σήματα ελέγχου από το D/As έτσι ώστε να καλύπτουν το εύρος -3V έως +3V. Για περισσότερες πληροφορίες δες M. Borgen, "Design of a miniature, piezoelectrically actuated swimming vehicle," M.S. thesis, The Ohio State Univ., Columbus, OH, 2001.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## ΜΟΡΦΗ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

- 3.1 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά SRFL για Υποβρύχια Προώθηση
- 3.2 Κατανομή των Δυνάμεων που ασκούνται στο SRFL λόγω πίεσης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάσαμε τον μηχανισμό κίνησης του SRFL και το απαραίτητο ψηφιακό σύστημα ελέγχου για την επίτευξη της επιθυμητής βιομιμητικής προώθησης. Σε αυτό το σημείο να πούμε ότι, τα διάφορα ερευνητικά κέντρα που έχουν σαν σκοπό την ανάπτυξη πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών για θαλάσσια προώθηση, δεν έχουν καταφέρει επαρκώς να πετύχουν βιομιμητική κίνηση σε υποθαλάσσιο περιβάλλον. Τα έως τώρα κερτημένα των βασικότερων ερευνητικών κέντρων (Αμερική, Ιαπωνία, Κορέα, Κίνα, Ρωσία) βασίζονται στην επίτευξη βιομιμητικής κίνησης στην επιφάνεια της θάλασσας. Επομένως, σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση της μορφής και της γεωμετρίας του SRFL που προτείνουμε για υποβρύχιο περιβάλλον έχοντας σαν κερτημένο όλη την προγενέστερη γνώση πάνω στην βιομιμητική πρόωση. Προχωρώντας ένα βήμα παρακάτω, χρησιμοποιούμε το υπολογιστικό πρόγραμμα CATIA<sup>23</sup> και βρίσκουμε ότι η μέγιστη δύναμη που μπορεί να δεχτεί το κέλυφος χωρίς να προκληθεί θραύση είναι  $2,44 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  για πίεση ίση με 4500psi καθώς και το μέγιστο βάθος στο οποίο μπορεί να επιχειρεί με επιτυχία το ρομπότ είναι στα 3.070,608m. Τέλος, παρουσιάζουμε γραφικά την κατανομή των δυνάμεων που εφαρμόζονται στο κέλυφος του ρομπότ καθώς και την μετατόπιση που υφίσταται το κέλυφος λόγω πίεσης.

### 3.1 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά SRFL για Υποβρύχια Προώθηση

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφερθήκαμε διεξοδικά στους περιορισμούς που υπόκεινται οι διαστάσεις και το βάρος του υποβρύχιου οχήματος. Βάση αυτών των σχεδιαστικών παραμέτρων και διαστασιολογικών αναλογιών του SRFL οχήματος έχουμε:

$$L_1 = 2L_2, 3L_1 = 10L_3, L_1 = 3H_1$$

Όπου,  $L_1$ : μήκος σώματος (άκαμπτο κομμάτι),  $H_1$ : το κατά προσέγγιση μήκος της ουράς,  $L_2$ : το ύψος του σώματος,  $L_3$ : το πάχος του ρομπότ. Άρα για περύγιο με διαστάσεις

$$3,81\text{cm} \times 4,1275\text{cm} \times 0,254\text{mm}$$

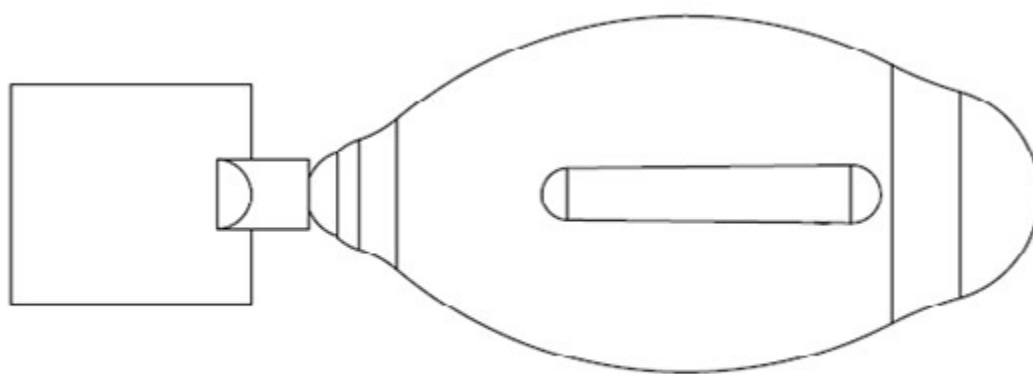
θα έχουμε μήκος σώματος (άκαμπτο κομμάτι) ίσο με 12,3825cm, ύψος ίσο με 6,19125cm και συνολικό πλάτος ίσο με 3,71475cm. Δηλαδή, συνολικό μήκος SRFL ίσο με 16,51cm και όγκο περίπου ίσο με  $284,78\text{cm}^3$  ο οποίος είναι κατά πολύ μικρότερος από τον μέγιστο επιτρεπτό όγκο που είναι  $1000\text{cm}^3$ . Οπότε, μπορούμε να δούμε στις εικόνες 3.1, 3.2, 3.3, να παρουσιάζεται σχεδιαστικά η τελική μορφή του SRFL που προτείνουμε.

Το σχήμα που προτείνουμε για το υποβρύχιο SRFL όχημα είναι σφαιρικό, διότι του δίνει την δυνατότητα να ανταποκρίνεται καλύτερα στις υδροδυναμικές απαιτήσεις<sup>24</sup>. Επιπλέον, η μορφή που επιλέξαμε επιτρέπει την χωρίς εμπόδια τοποθέτηση του μηχανισμού κίνησης και του ψηφιακού συστήματος ηλεκτρικού ελέγχου, ενώ αφήνει αρκετό ελεύθερο χώρο με δυνατότητα εισαγωγής επιπλέον φορτίου. Να επισημάνουμε ότι, τα περύγια είναι τοποθετημένα κατάλληλα έτσι ώστε να βοηθάνε στην διατήρηση της σταθερότητας του ρομπότ, ενώ ταυτόχρονα το σχήμα τους δεν επηρεάζει αρνητικά την υδροδυναμική του συστήματος.

23. Το CATIA υποστηρίζει πολλαπλά στάδια ανάπτυξης προϊόντων, συμπεριλαμβανομένης, του σχεδιασμού(CAD), της μηχανικής(CAE) και της κατασκευής(CAM).

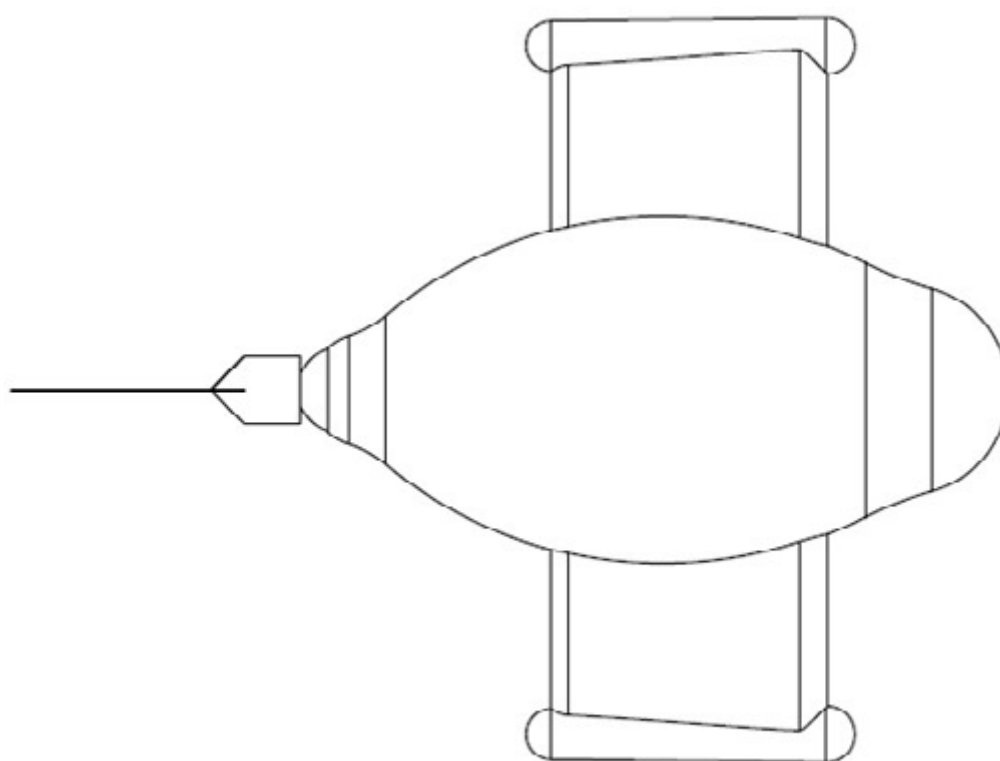
24. BANDYOPADHYAY R. PROMODE "Maneuvering Hydrodynamics of Fish and Small Underwater Vehicles" Propulsion, Hydrodynamics and Silencing Division, Naval Undersea Warfare Center, Newport, Rhode Island 02841





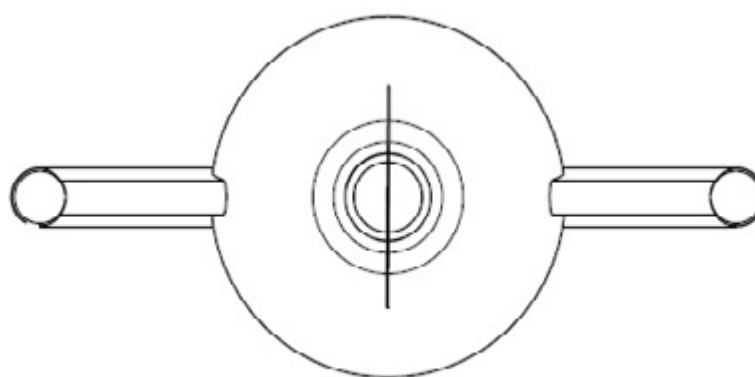
Front view

Εικόνα 3.1



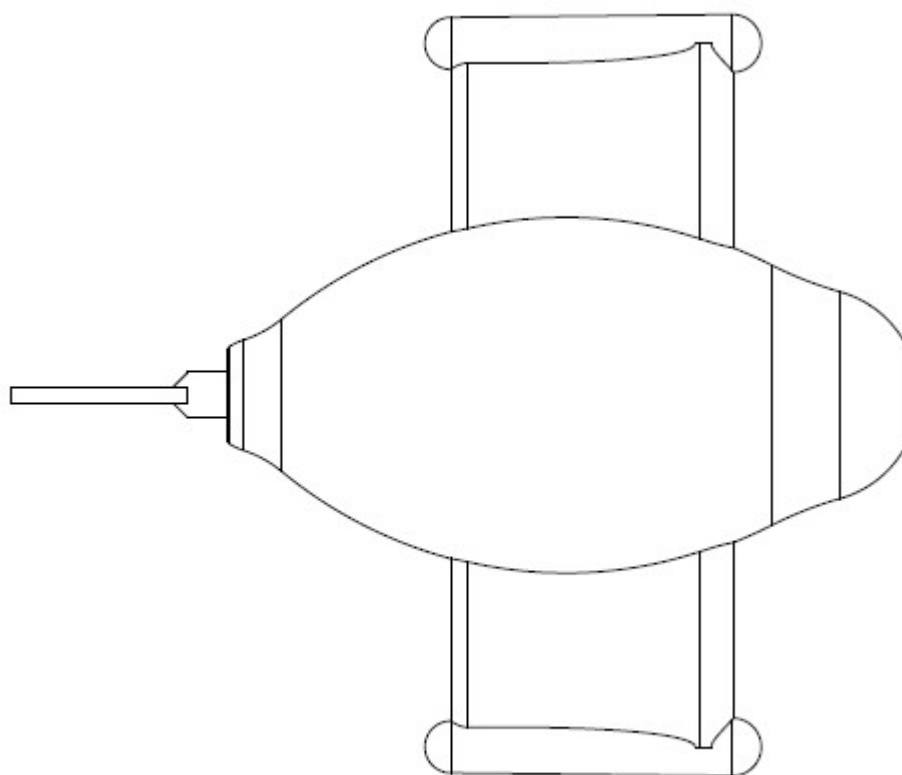
Top view

Εικόνα 3.2



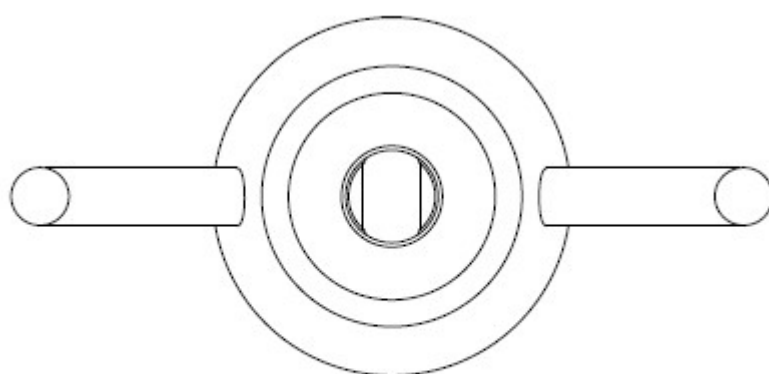
Left view

Εικόνα 3.3



Bottom view

Εικόνα 3.4



Right view  
Scale: 1:1

Εικόνα 3.5

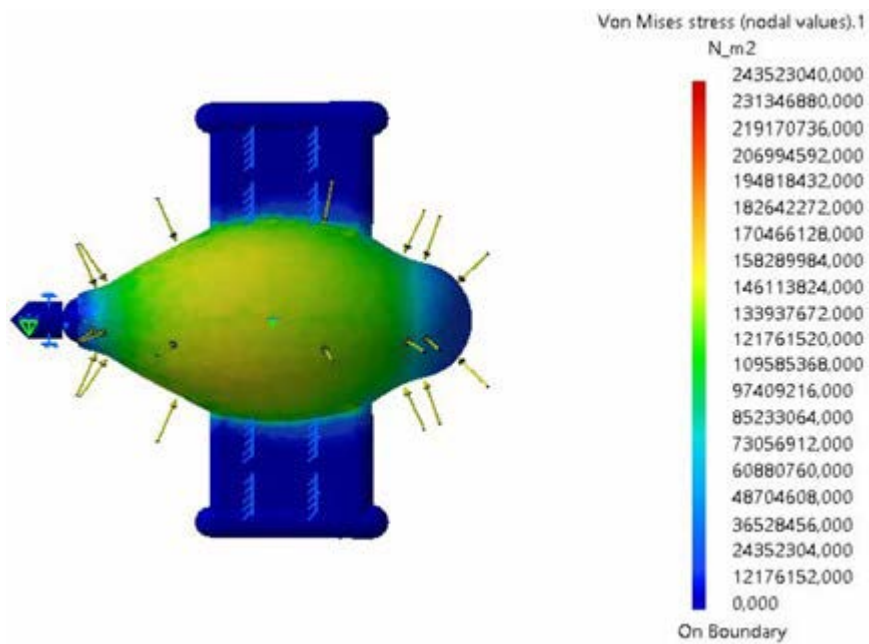
Προχωρώντας ένα βήμα παρακάτω στην σύνθεση του SRFL, τα πτερύγια σχεδιάζονται έτσι ώστε να μην είναι πακτωμένα στο κέλυφος με σκοπό όταν τοποθετηθεί κατάλληλο σύστημα ελέγχου να μετακινούνται προς τα πάνω σε κλίση  $45^\circ$ . Σκοπός αυτής της αλλαγής θέσης δεν είναι να λειτουργήσει σαν βοηθητικός μηχανισμός στον ήδη υπάρχον, αλλά να εκμεταλλευτεί τα υδροδυναμικά φαινόμενα και να ωθήσει το ρομπότ προς την επιφάνεια της θάλασσας. Να επισημάνουμε ότι, οι θέσεις που το πτερύγιο μπορεί να πάρει λόγω αυτής της μετατόπισης είναι δύο. Η πρώτη θέση παρουσιάζεται στις εικόνες 3.1, 3.2, 3.3 και έχει κλίση ίση με  $0^\circ$  και η δεύτερη είναι με τα πτερύγια να βρίσκονται υπό κλίση ίση με  $45^\circ$ . Με την εφαρμογή αυτού του μηχανισμού επιτυγχάνεται κίνηση του ρομπότ και στον κατακόρυφο άξονα, με σκοπό την αποφυγή πιθανών εμποδίων στο βυθό της θάλασσας. Επιπλέον, με αυτόν τον μηχανισμό μπορούμε να εξασφαλίσουμε τον συντονισμό της κίνησης όλου του σμήνους με κατεύθυνση προς την επιφάνεια της θάλασσας και άρα να θέσουμε υπό ελεγχόμενο περιβάλλον την περισυλλογή τους.

### 3.2 Κατανομή των Δυνάμεων που ασκούνται στο SRFL λόγω πίεσης

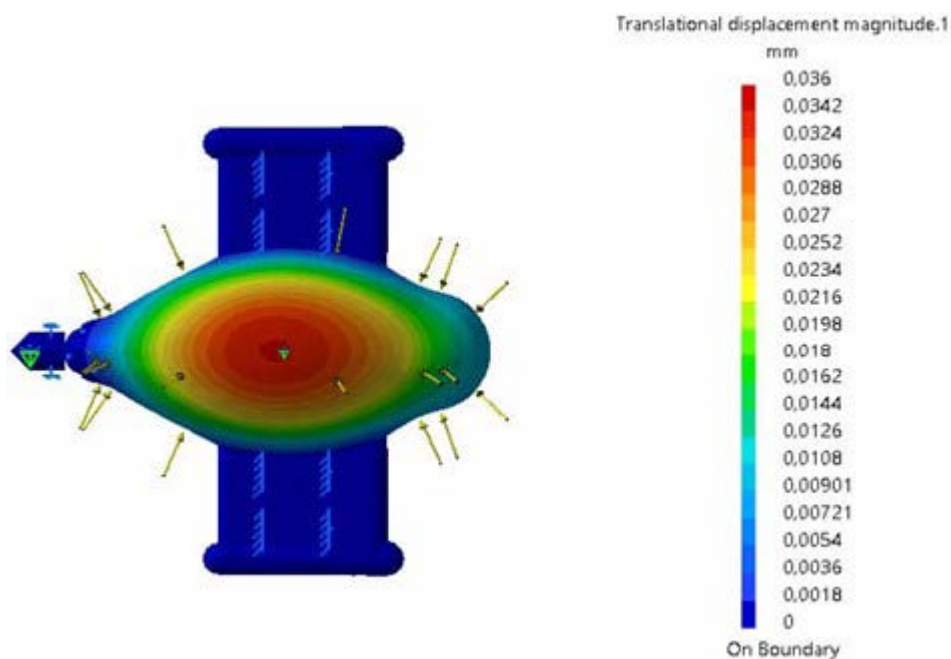
Οι συνθήκες που επικρατούν στα μεγάλα βάθη των ωκεανών απαιτούν έναν πολύ προσεκτικό σχεδιασμό του υποθαλάσσιου SRFL, έτσι ώστε να πετύχουμε, μέσα σε λογικά πλαίσια, μια ικανοποιητική λειτουργία του ρομπότ. Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που έχουμε να αντιμετωπίσουμε είναι οι πολύ υψηλές πιέσεις που δέχεται το κέλυφος του SRFL λόγω βάθους. Μια πρόταση που θα μπορούσε να λύσει αυτό το πρόβλημα σχετικά ανώδυνα, είναι το κέλυφος να μην είναι σφραγισμένο έτσι ώστε να περνάει το νερό από το εσωτερικό του με αποτέλεσμα η πίεση να εξισώνεται σε όλο το ρομπότ και άρα οι πιέσεις αυτές να μην καταπονούν το κέλυφος. Μια πρότυπη πρόταση παρουσιάζεται σχεδιαστικά στις εικόνες 3.4, 3.5, όπου φαίνονται καθαρά οι δύο οπές, μια στο “κεφάλι” του SRFL ακτίνας 13.5mm και μία στην ουρά του SRFL ακτίνας 5mm. Να τονίσουμε ότι, οι δύο οπές δεν επιδρούν αρνητικά στην υδροδυναμική του συστήματος. Το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της πρότασης είναι το γεγονός ότι δεν μπορούμε να προβλέψουμε την επίδραση που προκαλεί η ροή του νερού, εσωτερικά του κελύφους, στους δύο ενεργοποιητές THUNDER. Όπως έχουμε αναφέρει στα προηγούμενα κεφάλαια, οι προδιαγραφές των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών THUNDER είναι ακόμα υπό διερεύνηση και άρα η οποιαδήποτε προσθήκη επιπλέον καταπόνησης στους ενεργοποιητές δεν μπορεί με τα μέσα που διαθέτουμε να υπολογιστεί. Για αυτούς τους λόγους θα θεωρήσουμε ότι το κέλυφος του SRFL είναι σφραγισμένο. Στις εικόνες 3.4, 3.5 παρουσιάζεται σχεδιαστικά η μορφή που έχει το κέλυφος όταν δεν είναι σφραγισμένο.

Το υλικό κατασκευής του κελύφους είναι καθοριστικός παράγοντας για τον ορισμό της αντοχής του κελύφους, όταν αυτό υπόκειται σε συνεχείς υψηλές πιέσεις. Έτσι, για να πετύχουμε την επιθυμητή αντοχή, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε το βιομηχανικό ατσάλι πυκνότητας  $7860 \text{ kg/m}^3$ , αριθμό Poisson ίσο με 0,266 και αντοχή διαρροής (Yield Strength) ίσο με  $2,5e+008 \text{ N/m}^2$ . Όπως θα δούμε στη συνέχεια, οι ιδιότητες αυτές είναι απαραίτητες για την εύρεση της μέγιστης πίεσης που μπορεί να δεχτεί το κέλυφος χωρίς να προκληθεί θραύση.

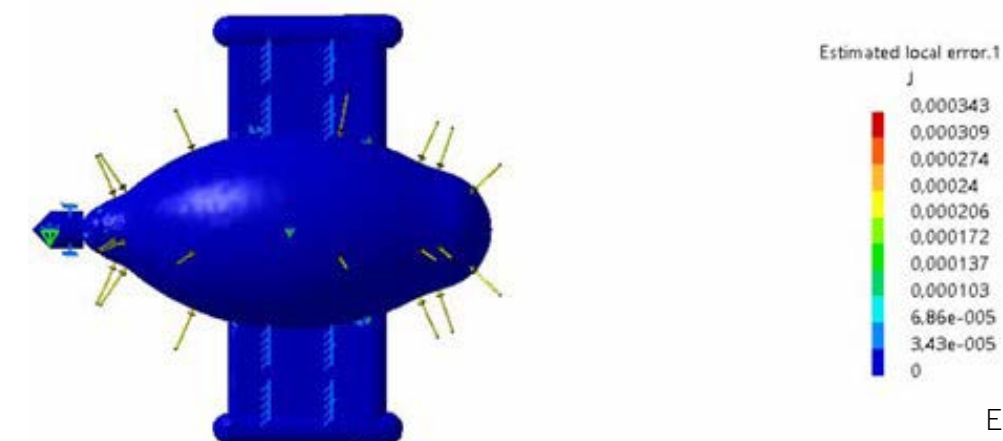
Όπως έχουμε αναφέρει, για τον υπολογισμό της καταπόνησης και της μετατόπισης που υφίσταται το κέλυφος χρησιμοποιούμε το υπολογιστικό πρόγραμμα CATIA. Η μέθοδος που εφαρμόζει για τον υπολογισμό της καταπόνησης είναι αυτή των πεδίων πίεσης του Von Mises<sup>25</sup> (Von Mises Stress). Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι, η μέγιστη τιμή της τάσης Von Mises πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή του ορίου διαρροής (Yield Strength) του ατσάλιου που έχουμε επιλέξει, δηλαδή τα  $2,5e+008 \text{ N/m}^2$  έτσι ώστε να μην προκληθεί θραύση. Με βάση τους περιορισμούς αυτούς η μέγιστη πίεση που μπορεί να δεχτεί το κέλυφος χωρίς να υπάρξει θραύση είναι στα 4500psi, σε βάθος περίπου ίσο με 3.070,608m.



Εικόνα 3.6



Εικόνα 3.7



Εικόνα 3.8

Στην εικόνα 3.6, παρουσιάζεται ο πίνακας τάσης Von Mises για πίεση ίση με 4500psi, μαζί με την τρισδιάστατη αναπαράσταση των πεδίων καταπόνησης που δέχεται το κέλυφος. Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα η μέγιστη τιμή τάσης Von Mises είναι  $2,44e+008 \text{ N/m}^2$  η οποία είναι μικρότερη από το όριο διαρροής (Yield Strength).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.6, στο διάγραμμα Von Mises, η περιοχή με τις υψηλότερες καταπονήσεις βρίσκεται στο κέντρο του κελύφους με αποτέλεσμα η μεγαλύτερη μετατόπιση να παρουσιάζεται σε ακριβώς αυτό το σημείο. Ενώ στην εικόνα 3.7 μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα μεγέθη των μετατοπίσεων με την μεγαλύτερη μετατόπιση στο κέλυφος να είναι στα 0,036mm.

Στην εικόνα 3.8, παρουσιάζονται οι περιοχές όπου εκτιμάμε ότι υπάρχει σφάλμα στην προσομοίωση. Να επισημάνουμε ότι, το περιθώριο σφάλματος στις τιμές της προσομοίωσης που εκτελέσαμε βρίσκεται κοντά στο μηδέν.

---

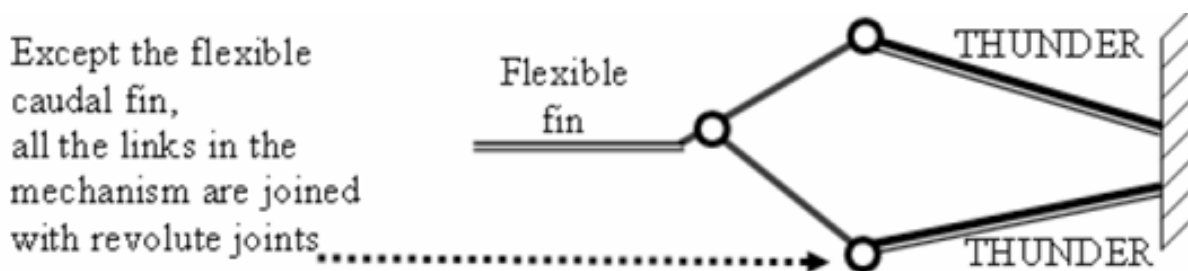
25. Τα πεδία τάσης Von Mises αντιπροσωπεύουν μια ποσότητα πεδίου σε διαβαθμίσεις που λαμβάνεται από την ενεργειακή πυκνότητα παραμόρφωσης όγκου και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της κατάστασης της τάσης. Περισσότερες πληροφορίες βλέπε [http://www.staff.city.ac.uk/~ra600/ME2105/Catia%20course/CATIA%20Tutorials/estug\\_C2/estugbt0502.htm](http://www.staff.city.ac.uk/~ra600/ME2105/Catia%20course/CATIA%20Tutorials/estug_C2/estugbt0502.htm)

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>0</sup>

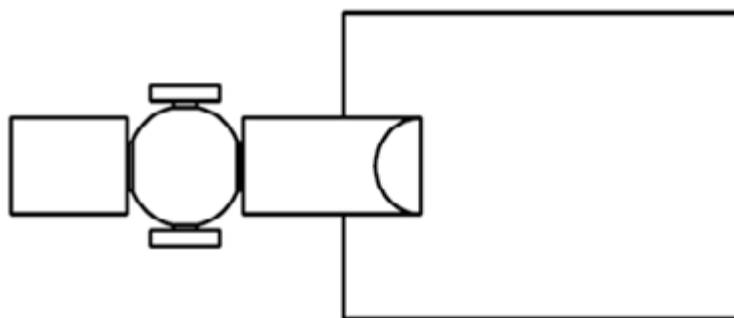
---

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΒΙΟΜΙΜΗΤΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

- 4.1 Αναπαράσταση της αρθρωτής μηχανικής διάταξης του ουριαίου πτερυγίου στη MATLAB
- 4.2 Ανάλυση κόπωσης της αρθρωτής μηχανικής διάταξης του ουριαίου πτερυγίου



Εικόνα 4.1



Εικόνα 4.2

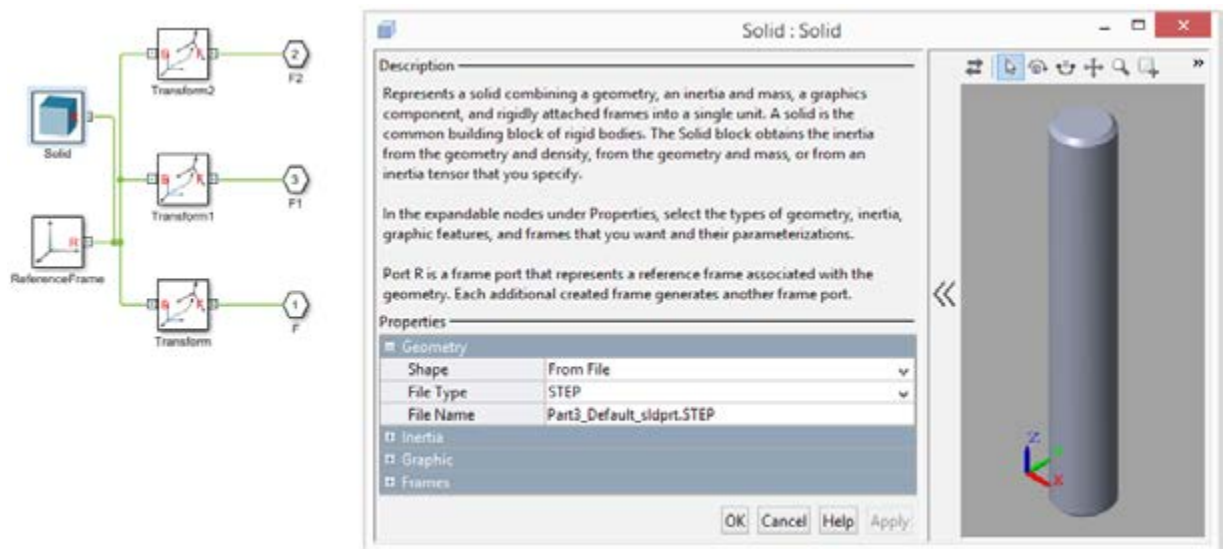
Στο κεφάλαιο αυτό, θα ασχοληθούμε κυρίως με την δομή του αρθρωτού μηχανισμού που κινεί το εύκαμπτο πτερύγιο, διαστάσεων 1.5"x1.625"x10mil, που είναι τοποθετημένο στην πρύμνη. Με βάση τις προδιαγραφές που έχουμε θέσει, ο αρθρωτός μηχανισμός, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1, εκμεταλλεύεται την μετατόπιση των δύο καμπυλωτών πιεζοηλεκτρικών, της κατηγορίας THUNDER, με σκοπό να προωθήσει το SRFL.

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι, η προσομοίωση της βιομιμητικής κίνησης του ουριαίου πτερυγίου (εικόνα 4.2) σε προγραμματιστικό περιβάλλον με τη χρήση του προγράμματος MATLAB<sup>26</sup> SIMULINK MULTIBODY. Μέσω της MATLAB προσδιορίζονται η ταχύτητα του εύκαμπτου πτερυγίου σε  $\omega=68,01 \text{ rad/s}$  ή  $v=4.9 \text{ m/s}$  ή  $v=49 \text{ cm/s}$  και η μέγιστη γωνιακή επιτάχυνση  $a=25.430 \text{ rad/s}^2$  ή  $a=1.825,1 \text{ m/s}^2$ . Ακόμα, υπολογίζεται η μέγιστη ροπή του πτερυγίου,  $\tau=1,83 \text{ Nm}$ , καθώς και η μέγιστη δύναμη που ασκείται στον αρθρωτό μηχανισμό, λόγω αδράνειας,  $F=25,5 \text{ N}$ .

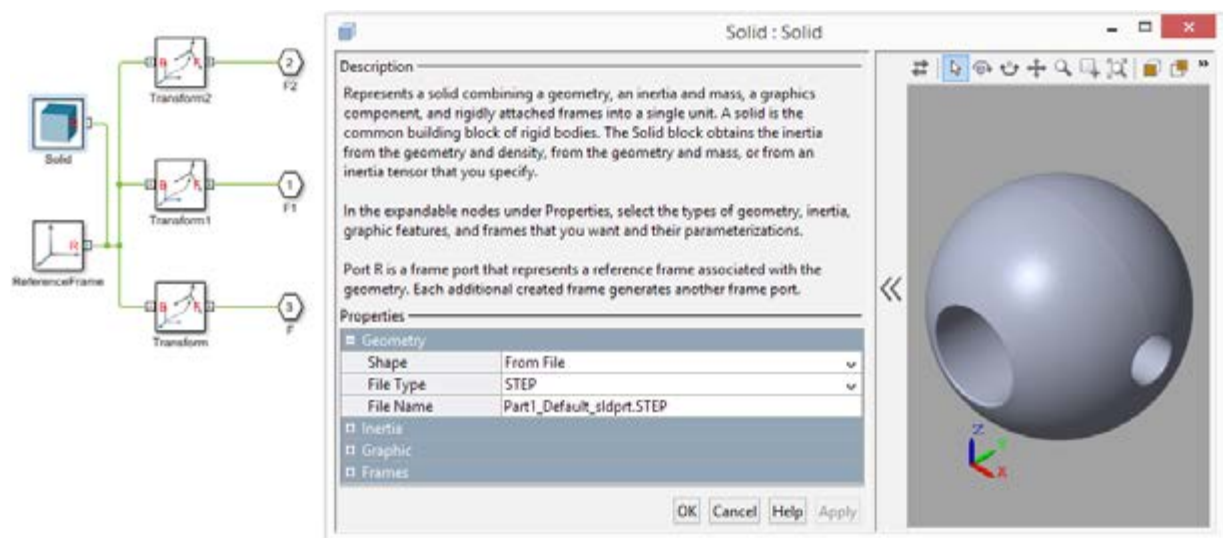
Στη συνέχεια, επειδή το πτερύγιο περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  γύρω από τον σταθερό άξονα Z, έχουμε την εμφάνιση αδρανειακών δυνάμεων οι οποίες ασκούνται στο εύκαμπτο πτερύγιο αλλά και στην αρθρωτή μηχανική διάταξη που το κινεί, με αποτέλεσμα να καταπονείται ο μηχανισμός και το πτερύγιο. Χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα SOLIDWORKS<sup>27</sup> προσδιορίζουμε τις περιοχές όπου υπάρχει μεγαλύτερη καταπόνηση με σκοπό να βρούμε τη διάρκεια ζωής του μηχανισμού προώθησης, η οποία ανέρχεται σε ένα δισεκατομμύριο κύκλους περιστροφής του πτερυγίου.

26. Το MATLAB (matrix laboratory) είναι ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς. Αποθηκεύει και κάνει τις πράξεις με βάση την άλγεβρα μητρών. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε <https://ch.mathworks.com/products/matlab.html>

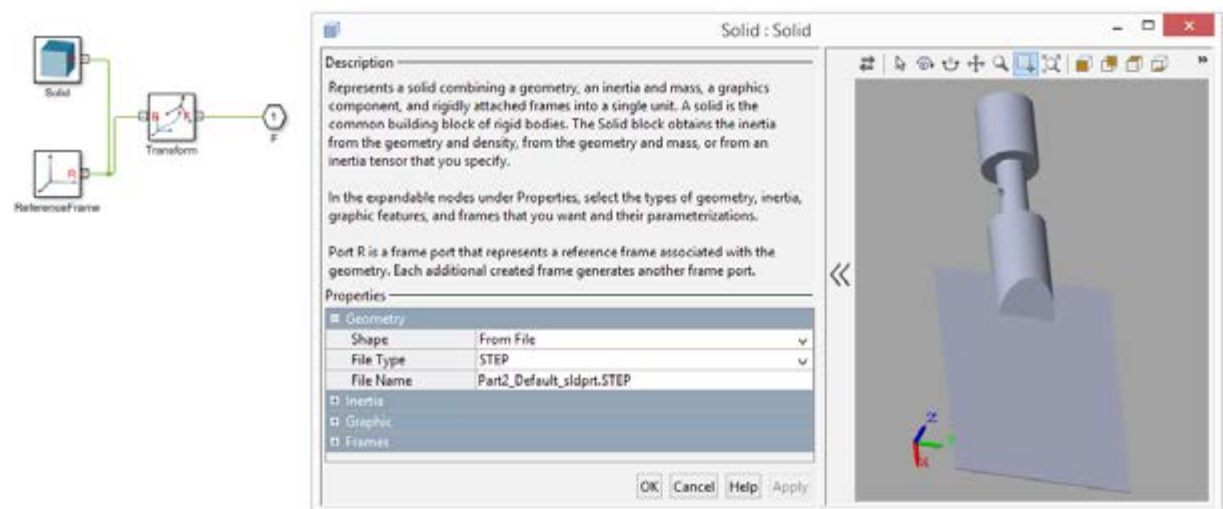
27. Solidworks είναι υπολογιστικό πρόγραμμα στο οποίο σχεδιάζονται και μοντελοποιούνται βιομηχανικά προϊόντα με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD computer-aided design), (CAE computer-aided engineering). Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε <https://www.solidworks.com/>



Εικόνα 4.3



Εικόνα 4.4



Εικόνα 4.5

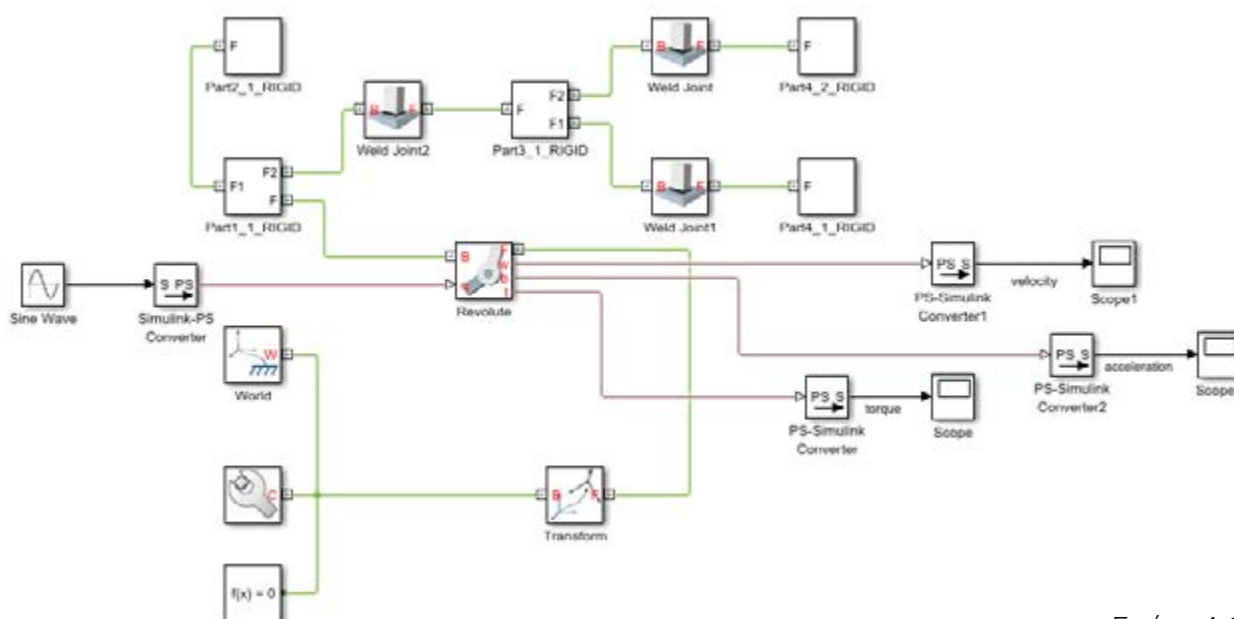


#### 4.1 Αναπαράσταση της αρθρωτής μηχανικής διάταξης του ουριαίου πτερυγίου στη MATLAB

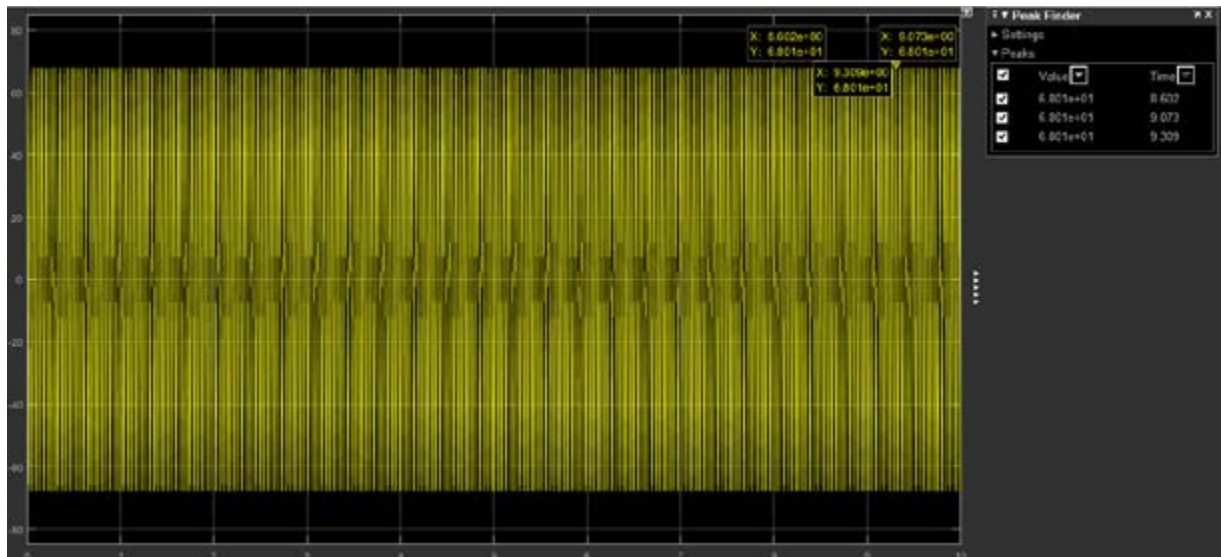
Το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης είναι η αναπαράσταση του αρθρωτού μηχανισμού, που κινεί το εύκαμπτο πτερύγιο, στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κάθε κομμάτια του μηχανισμού ξεχωριστά. (εικόνες 4.3, 4.4, 4.5)

Η σύνδεση των ξεχωριστών κομματιών όπως αυτά έχουν παρουσιαστεί στις εικόνες 4.3 έως 4.5 δημιουργεί τον αρθρωτό μηχανισμό κίνησης του ουριαίου πτερυγίου. Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζεται σε πλήρη μορφή ο αρθρωτός μηχανισμός όπως φαίνεται στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB. Για να μπορέσουμε να επιτύχουμε όσον το δυνατόν καλύτερη αναπαράσταση της βιομιμητικής κίνησης του ουριαίου πτερυγίου, έχουμε επιτρέψει κίνηση μόνο στο σφαιρικό κομμάτι, το οποίο προσομοιάζει την κινητή άρθρωση. Επιπλέον, στην άρθρωση αυτή, έχουμε επιτρέψει μόνο έναν από τους τρεις βαθμούς ελευθερίας. Ο λόγος για τον οποίο επιτρέψαμε μόνο ένα βαθμό ελευθερίας, είναι διότι επιθυμούμε κίνηση μόνο στον Z άξονα, έτσι ώστε η περιστροφική κίνηση να λαμβάνει χώρα γύρω από έναν μόνο σταθερό άξονα. Η κινητή αυτή άρθρωση μεταφράζεται στην MATLAB ως “Revolute Joint”, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.6. Η περιστροφική κίνηση αυτής της άρθρωσης, και άρα όλης της μηχανικής διάταξης του εύκαμπτου πτερυγίου, προέρχεται από την εφαρμογή του κατάλληλου σήματος ενεργοποίησης.

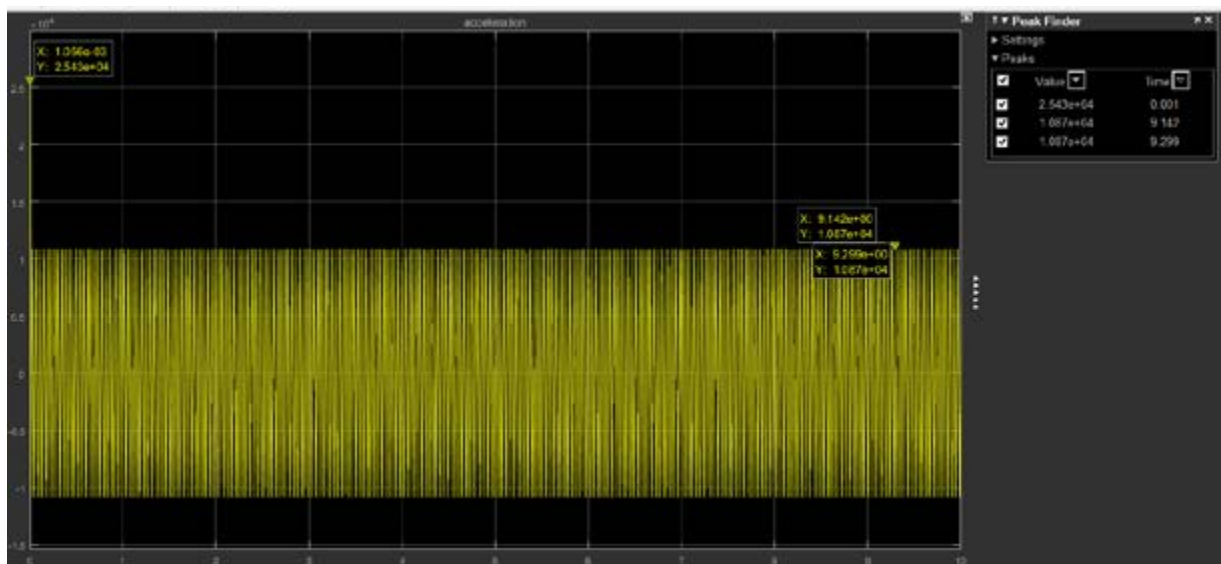
Όπως έχουμε εκτενώς αναφέρει, η μετατόπιση των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών THUNDER κινεί τον αρθρωτό μηχανισμό του ουριαίου πτερυγίου. Για να επιτύχουμε την ευθεία πρόωση του οχήματος και την βέλτιστη βιομιμητική κίνηση του ουριαίου πτερυγίου, οι ενεργοποιητές αυτοί πρέπει να διαπερνιούνται από σήμα δόνησης ημιτονοειδούς μορφής, στην συχνότητα συντονισμού τους, δηλαδή στα 160Hz. Για αυτό τον λόγο, στη “Revolute Joint” εφαρμόζεται σήμα ημιτονοειδούς μορφής με πλάτος ταλάντωσης 25 και συχνότητα 160Hz. Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι, η επιλογή αυτού του ημιτονοειδούς σήματος προσομοιάζει την μετατόπιση που παράγουν οι ενεργοποιητές THUNDER, μέσω της οποίας προκαλείται η ταλάντωση του ουριαίου πτερυγίου. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνουμε την βέλτιστη προσομοίωση των συνθηκών με τις οποίες ταλαντώνεται το ουριαίο πτερύγιο, με αποτέλεσμα να δημιουργούμε ένα περιβάλλον προσομοίωσης όσο γίνεται πιο κοντά στο πραγματικό.



Εικόνα 4.6



Εικόνα 4.7



Εικόνα 4.8

Property	Value	Units
Elastic Modulus	2.049999984e+011	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.29	N/A
Shear Modulus	7.999999987e+010	N/m <sup>2</sup>
Mass Density	7858	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	425000003.2	N/m <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/m <sup>2</sup>
Yield Strength	282685049	N/m <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	1.2e-005	/K

Εικόνα 4.9

Μέσω της προσομοίωσης μπορούμε να προβλέψουμε επιτυχώς την γωνιακή ταχύτητα και επιτάχυνση με την οποία ταλαντώνεται ο αρθρωτός μηχανισμός και άρα να έχουμε την δυνατότητα να εκτιμήσουμε με σχετική ακρίβεια την ταχύτητα και επιτάχυνση του υποβρύχιου οχήματος SRFL. Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζεται η διακύμανση της γωνιακής ταχύτητας με ακραίες τιμές  $\omega = \{+68,01 \text{ rad/s}, -68,01 \text{ rad/s}\}$ , ενώ στην εικόνα 4.8 βλέπουμε τη διακύμανση της γωνιακής επιτάχυνσης με την μέγιστη τιμή να εμφανίζεται την χρονική στιγμή  $t=0.001 \text{ s}$  και είναι ίση με  $a=2,543 \times 10^4 \text{ rad/s}^2$  και στη συνέχεια να μειώνεται σε  $a=\{+1,087 \times 10^4 \text{ rad/s}^2, -1,087 \times 10^4 \text{ rad/s}^2\}$  ή  $a=\{+780,1 \text{ m/s}^2, -780,1 \text{ m/s}^2\}$ .

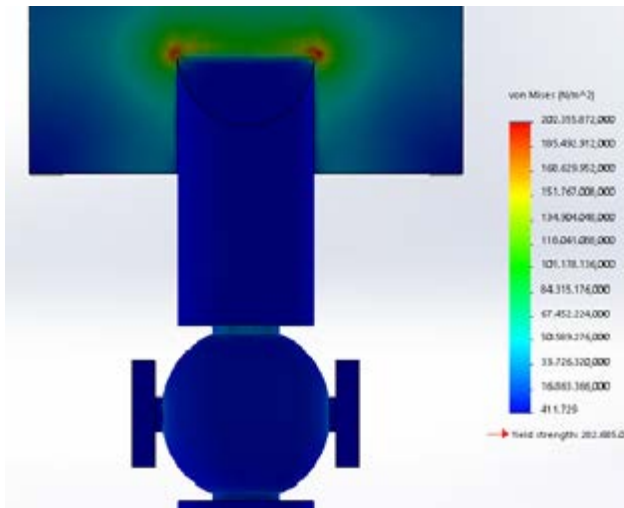
Προχωρώντας ένα βήμα παρακάτω, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έχουμε ότι την χρονική στιγμή  $t=0.001 \text{ s}$ , στην την στιγμή δηλαδή που ξεκινάει η προσομοίωση, εμφανίζεται η μέγιστη επιτάχυνση που είναι ίση με  $a=2,543 \times 10^4 \text{ rad/s}^2$ . Χρησιμοποιώντας τον τύπο  $a=a^*r$ , όπου  $r$  είναι η απόσταση από το κέντρο της σφαίρας μέχρι το άκρο του ουριαίου πτερυγίου και  $a$  η γωνιακή επιτάχυνση, μετατρέπουμε την γωνιακή επιτάχυνση σε γραμμική. Άρα  $a=1.825,1 \text{ m/s}^2$ . Συνεχίζοντας, χρησιμοποιώντας τον δεύτερο νόμο του Newton  $F=m \times a$ , όπου  $m=0.014 \text{ Kg}$ , υπολογίζουμε την μέγιστη ασκούμενη δύναμη  $F$ , η οποία είναι  $F=25,5 \text{ N}$ . Προχωρώντας στην ίδια λογική, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη ροπή που παράγει ο αρθρωτός μηχανισμός, εφαρμόζοντας την εξίσωση  $\tau=F \times r$ , όπου  $r$  η απόσταση από το κέντρο της σφαίρας μέχρι το άκρο του ουριαίου πτερυγίου. Οπότε βρίσκουμε ότι η μέγιστη ροπή είναι  $\tau=1,83 \text{ Nm}$ .

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι, στις συνθήκες της προσομοίωσης δεν συμπεριλαμβάνονται οι δυνάμεις τριβής που εμφανίζονται στην άρθρωση, ενώ ο συντελεστής απόσβεσης<sup>28</sup> θεωρείται αμελητέος.

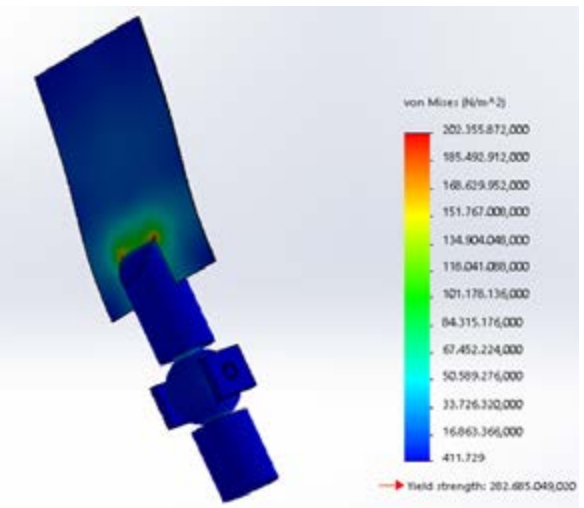
## 4.2 Ανάλυση κόπωσης της αρθρωτής μηχανικής διάταξης του ουριαίου πτερυγίου

Γυρίζοντας πίσω στον μηχανισμό κίνησης υπενθυμίζουμε ότι, η βιομιμητική κίνηση του ουριαίου πτερυγίου επιτυγχάνεται μέσω της ταλάντωσης της αρθρωτής μηχανικής διάταξης, η οποία διεγείρεται από ένα ημιτονοειδές σήμα με συχνότητα ταλάντωσης στα  $160 \text{ Hz}$ . Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι η μεγάλη συχνότητα ταλάντωσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού κόπωσης του αρθρωτού μηχανισμού, λόγω των αδρανειακών δυνάμεων που ασκούνται στο εύκαμπτο πτερύγιο καθώς και στη μηχανική διάταξη που το κινεί. Έτσι, για να πετύχουμε όσον το δυνατόν καλύτερη αντοχή του αρθρωτού μηχανισμού ενάντια σε αυτές τις καταπονήσεις, οπότε να έχουμε και ομαλότερη λειτουργία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, χρησιμοποιούμε βιομηχανικό ατσάλι με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, “Carbon Steel 1023”, τα χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται στην εικόνα 4.9.

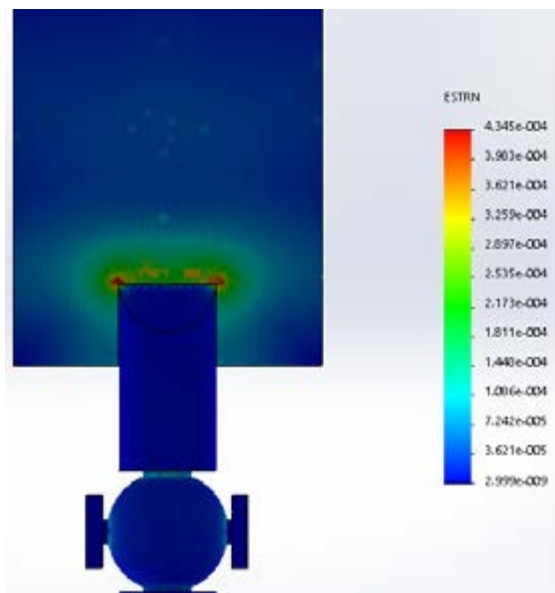
28. Ο συντελεστής απόσβεσης είναι μια αδιαστατή παράμετρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον ρυθμό με τον οποίο φθίνει το σύστημα ταλάντωσης, μετά από την διαταραχή. Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε [https://en.wikipedia.org/wiki/Damping\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Damping_ratio)



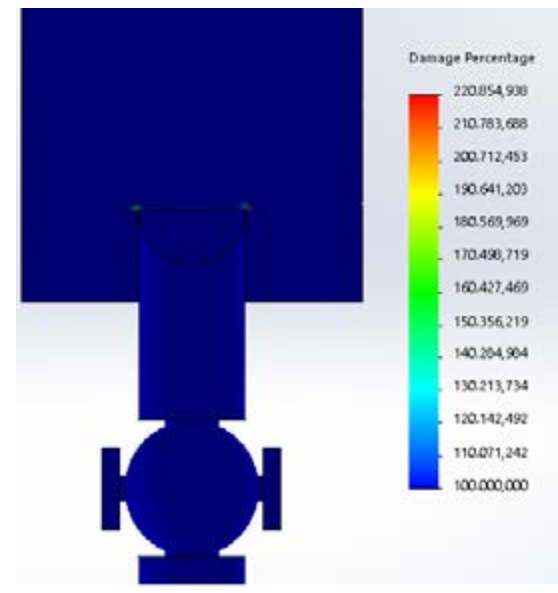
Εικόνα 4.10



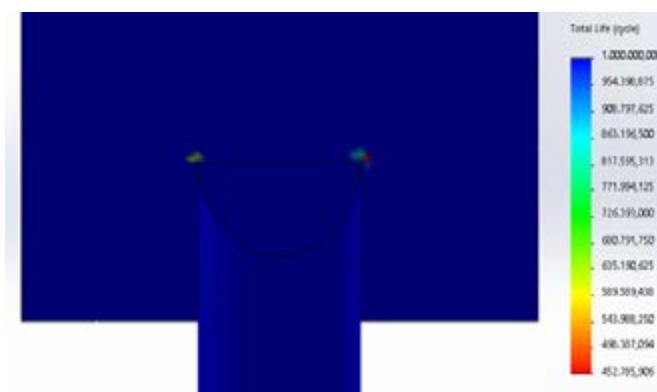
Εικόνα 4.11



Εικόνα 4.12



Εικόνα 4.13



Εικόνα 4.14

Έτσι, προκειμένου να μπορέσουμε προσδιορίσουμε επιτυχώς τον ρυθμό κόπωσης του αρθρωτού μηχανισμού, θα χρησιμοποιήσουμε το υπολογιστικό πρόγραμμα SOLIDWORKS. Η μέθοδος που εφαρμόζει, για τον υπολογισμό της καταπόνησης είναι αυτή των πεδίων πίεσης του Von Mises, όπως αυτή χρησιμοποιήθηκε και στο κεφάλαιο τρία. Η μέγιστη τιμή της τάσης Von Mises πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή του ορίου διαρροής (Yield Strength) του ατσαλιού που έχουμε επιλέξει, δηλαδή τα 282.685.049 N/m<sup>2</sup> έτσι ώστε να μην προκληθεί θραύση. Στις εικόνες 4.10 και 4.11, παρουσιάζεται ο πίνακας τάσης Von Mises με τις αδρανειακές δυνάμεις που καταπονούν τον αρθρωτό μηχανισμό να είναι ίσες με F=25,5N.

Παρατηρούμε ότι, οι περιοχές με τις μεγαλύτερες καταπονήσεις βρίσκονται στα σημεία όπου συνδέονται τα κομμάτια μεταξύ τους, με την υψηλότερη τιμή να είναι στα 202.355.872 N/m<sup>2</sup> στο σημείο σύνδεσης με το εύκαμπτο ουριαίο πτερύγιο. Παρόλα αυτά, οι αδρανειακές δυνάμεις που εμφανίζονται στον αρθρωτό μηχανισμό είναι μικρότερες από το Yield Strength του ατσαλιού (282.685.049 N/m<sup>2</sup>). Στο σημείο αυτό να επισημάνουμε ότι, επειδή η παραμόρφωση του αρθρωτού μηχανισμού είναι πολύ μικρή και άρα μη ορατή στο ανθρώπινο μάτι, το υπολογιστικό πρόγραμμα SOLIDWORKS αυτόματα προσαρμόζει την παραμόρφωση έτσι ώστε να γίνεται αισθητή στον χρήστη.

Σε συνέχεια της προηγούμενης μέτρησης, προσδιορίζονται οι περιοχές με τις υψηλότερες τάσεις (Equivalent strain<sup>29</sup>), όπως φαίνεται στην εικόνα 4.12, με την μέγιστη παραμόρφωση να είναι στα 4,345e-004. Τέλος, στην εικόνα 4.13 παρουσιάζεται η κόπωση που δέχεται ο αρθρωτός μηχανισμός λόγω των αδρανειακών δυνάμεων για χρονικό διάστημα ίσο με 1 δισεκατομμύριο κύκλους περιστροφής του ουριαίου πτερυγίου. Παρατηρούμε ότι οι αδρανειακές δυνάμεις που δέχεται ο μηχανισμός επιφέρουν τοπική θραύση στο σημείο σύνδεσης με το ουριαίο πτερύγιο έπειτα από 452.785.906 εκατομμύρια κύκλους περιστροφής, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.14.

---

29. Η ισοδύναμη τάση (Equivalent strain) προσδιορίζεται ως:  $ESTRN=2[(\epsilon_1 + \epsilon_2)/3](1/2)$  όπου

$$\epsilon_1 = 0.5[(EPSX - \epsilon^*)^2 + (EPSY - \epsilon^*)^2 + (EPSZ - \epsilon^*)^2] \quad \epsilon_2 = [(GMXY)^2 + (GMXZ)^2 + (GMYZ)^2] / 4$$

$$\epsilon^* = (EPSX + EPSY + EPSZ) / 3,$$

για περισσότερες πληροφορίες βλέπε [http://help.solidworks.com/2013/english/SolidWorks/cworks/c\\_strain\\_components\\_output\\_lsa.htm](http://help.solidworks.com/2013/english/SolidWorks/cworks/c_strain_components_output_lsa.htm)

Στην παρούσα εργασία, σχεδιάστηκε το κέλυφος και ο αρθρωτός μηχανισμός κίνησης του ουριαίου εύκαμπτου πτερυγίου, ενός πρωτότυπου υποβρύχιου βιομιμητικού οχήματος. Το όχημα που προτείνουμε χρησιμοποιεί σαν μηχανισμό προώθησης την μετατόπιση, που δημιουργείται από τους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές της κατηγορίας THUNDER, όταν σε αυτούς εφαρμοστεί ελεγχόμενη ηλεκτρική τάση. Παρά τα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε, λόγω των ελάχιστων δεδομένων που υπάρχουν όσον αφορά τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών της κατηγορίας THUNDER, η ηλεκτρική τάση που επιλέξαμε βασίζεται στα πειραματικά δεδομένα των Borgen, Washington, και Kinzel (Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, and Kinzel L. Gary, 2003) και είναι η βέλτιστη για την επίτευξη της βιομιμητικής πρόωσης της κατηγορίας "ostraciform". Όταν ηλεκτρικό σήμα +300V, στη συχνότητα συντονισμού 160Hz, διαπεράσει τον πιεζοηλεκτρικό ενεργοποιητή προκαλείται στροφή προς τη δεξιά πλώρη, ενώ ένα σήμα -300V προκαλεί στροφή προς την αριστερή πλώρη. Δυστυχώς, επί του παρόντος, τα σήματα ελέγχου παράγονται στο σκάφος από το κύκλωμα, αποστέλλονται στην ακτή μέσω ενός ιμάντα, ενισχύονται από έναν γραμμικό ενισχυτή και παραδίδονται στους ενεργοποιητές του οχήματος. Να επισημάνουμε ότι, το παρόν σύστημα ελέγχου δεν έχει εξαλείψει την ανάγκη για ιμάντα, όμως αυτό το κύκλωμα ψηφιακού ελέγχου αντιπροσωπεύει το πρώτο βήμα για την προσθήκη προγραμματιζόμενης, αυτόνομης συμπεριφοράς σε όχημα κολύμβησης. Τέλος, το φαινόμενο "hysteresis", το οποίο παρουσιάζεται στους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές όταν εφαρμοστεί σε αυτούς ηλεκτρική τάση, δεν λαμβάνεται υπόψιν λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας που απαιτείται η εξάλειψη αυτού του φαινομένου μέσω ενός διορθωτικού αλγορίθμου "fussy logic control" που θα χρειαστεί να ενσωματωθεί στο παρόν σύστημα ψηφιακού ελέγχου.

Ένα ειδικά σχεδιασμένο κέλυφος, το οποίο πληρεί τις υδροδυναμικές απαιτήσεις και είναι κατασκευασμένο από βιομηχανικό ατσάλι αναπτύχθηκε, επιτρέποντας στο όχημα να δέχεται πολύ υψηλές πιέσεις (4.500psi), με αποτέλεσμα την εύρυθμη λειτουργία μέχρι και τα 3.070,608m βάθος. Ο αρθρωτός μηχανισμός που κινεί το εύκαμπτο πτερύγιο αποδείχθηκε ικανός να αντέχει τις αδρανειακές δυνάμεις που τον καταπονούν, για χρονικό διάστημα ίσο με ένα δισεκατομμύριο κύκλους περιστροφής. Στον αντίποδα, κάποιος θα μπορούσε να ισχυριστεί ότι, η τοπική θραύση που συμβαίνει στο σημείο ένωσης του εύκαμπτου πτερυγίου με τον αρθρωτό μηχανισμό, μετά από 452.785.906 εκατομμύρια κύκλους περιστροφής επιφέρει μόνιμη ανικανότητα στην βιομιμητική πρόωση του οχήματος. Όμως, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι, τέτοια προβλήματα μπορούν εύκολα να αντιμετωπιστούν χρησιμοποιώντας μεθόδους ταχείας προτυποποίησης για τα σταθερά μέρη.

Προχωρώντας ένα βήμα παρακάτω, για να μπορέσουμε να αποκτήσουμε μια καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ταλαντώνεται το ουριαίο εύκαμπτο πτερύγιο, μέσω του αρθρωτού μηχανισμού, κάνουμε προσομοίωση των συνθηκών της βιομιμητικής κίνησης χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα MATLAB. Επιπλέον, μέσω της προσομοίωσης, μπορούμε να κάνουμε μια αρχική εκτίμηση της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του υποβρύχιου οχήματος. Ένα από τα προβλήματα που κληθήκαμε να λύσουμε ήταν η εύρεση του κατάλληλου σήματος ενεργοποίησης του αρθρωτού μηχανισμού για την επίτευξη της επιθυμητής βιομιμητικής κίνησης. Το ημιτονοειδές σήμα που επιλέξαμε (160Hz) είναι ανάλογο της μετατόπισης που επιδεικνύουν το ζεύγος των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών THUNDER με αποτέλεσμα να έχουμε μετρήσεις κοντά στην πραγματικότητα. Η μέση ταχύτητα του οχήματος βρέθηκε να είναι ίση με  $V=4.9\text{m/s}$ , ενώ η επιτάχυνση κυμαίνεται από  $a=\{+780.1\text{m/s}^2, -780.1\text{m/s}^2\}$ . Στις συνθήκες της προσομοίωσης δεν συμπεριλαμβάνονται οι δυνάμεις τριβής που εμφανίζονται στην άρθρωση, ενώ ο συντελεστής απόσβεσης θεωρείται αμελητέος. Πιθανές βελτιώσεις θα μπορούσαν να αφορούν την ενσωμάτωση της διάταξης των δύο πιεζοηλεκτρικών στον αρθρωτό μηχανισμό κίνησης που δημιουργήσαμε, έτσι ώστε να έχουμε την βέλτιστη δυνατή προσομοίωση των συνθηκών αλλά και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την προώθηση του υποβρύχιου οχήματος.

---

Γενικότερα, το υποβρύχιο όχημα που αναπτύξαμε έχει αρκετές προοπτικές εξέλιξης, και επομένως η μελέτη μελλοντικά είναι αναγκαίο να επικεντρωθεί σε εφαρμογή ακριβέστερων στρατηγικών προσομοίωσης του μηχανισμού προώθησης του οχήματος. Επίσης, η βελτιστοποίηση του κελύφους αλλά και του υλικού από το οποίο θα είναι κατασκευασμένο, ανάλογα με τις συνθήκες στις οποίες θα επιχειρεί (βάθος, θερμοκρασία, μορφολογία βυθού, ένταση θαλάσσιων ρευμάτων), καθώς και της λειτουργίας που θα κληθεί να επιτελέσει (π.χ. ωκεανογραφία, εύρεση ναυαγίων, χαρτογράφηση υποθαλάσσιων αρχαιολογικών χώρων), αποτελεί αντικείμενο επισταμένης μελέτης. Η ερευνά πάνω στο αντικείμενο όμως δεν τελειώνει εδώ, πολύπλοκα υδροδυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο ουριαίο πτερύγιο κατά τη διάρκεια της κίνησής του, όπως αυτά που πρόσφατα παρατηρήθηκαν από πειράματα σε ζωντανά ψάρια, έχουν δείξει ότι κατά τη διάρκεια του στροβιλισμού τα εκλυόμενα νερά από το εύκαμπτο πτερύγιο αποτελούνται από μια σειρά στροβίλων εναλλασσόμενης κατεύθυνσης. Ως αποτέλεσμα, οι περιοχές αυτές αναρρόφησης και πίεσης εμφανίζονται στο μοτίβο ροής "flow pattern", σχηματίζοντας ένα μηχανισμό κυματιστής αντλίας που δημιουργεί μια ροή κυκλοφορίας γύρω από τα σημεία καμπής του σώματος. Η μελέτη και κατανόηση αυτών των φαινομένων θα μας βοηθήσει να αποδείξουμε πλήρως ότι η κίνηση του αρθρωτού μηχανισμού μέσω της χρήσης των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών της κατηγορίας THUNDER είναι εφικτή, αποδοτική και ότι μπορεί να δώσει πλήρως λειτουργικά υποβρύχια οχήματα στο εγγύς μέλλον.

- Κονδυλάκης Γ., 2016, Διπλωματική Εργασία, επιβλέπων καθηγητής: Τσουρβελούδης Ν., Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάδα
- Νικόλαου Ε. Γ., Πέτρου Γ. Θ., 2011, Διπλωματική Εργασία, επιβλέπων καθηγητής: Τζες Α., Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, Ελλάδα
- Asare V. A., Shende R. S., 2014, International Journal of Scientific Engineering and Research (IJS-ER), "Mechatronics and Motionability of an Underwater Robot: A Review"
- Ayers J., Wilbur C., Olcott C., Northeastern University, Marine Science Center, "Lamprey Robots"
- Balakrishnan S., Niezrecki C., 2002, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, "Investigation of THUNDER™ Actuators as Underwater Propulsors"
- Bandyopadhyay P. R., 2002, INTEG. AND COMP. BIOL., "Maneuvering Hydrodynamics of Fish and Small Underwater Vehicles"
- Barrett R., McMurtry R., Vos R., Tiso P., De Breuker R., 2006, Institute of Physics Publishing, "Post-buckled precompressed piezoelectric flight control actuator design, development and demonstration"
- Belmonte A., Eisenberg H., Moses E., 1998, Physical Review Letters, The American Physical Society, "From Flutter to Tumble: Inertial Drag and Froude Similarity in Falling Paper"
- Borgen M. G., Washington G. N., Kinzel G. L., 2003, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, "Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle"
- Brambilla M., Ferrante E., Birattari M., Dorigo M., 2013, Springer, "Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective"
- Caprari G., 2003, Ph.D. Dissertation, "Autonomous Micro-Robots: Applications and Limitations", [http://asl.epfl.ch/aslInternalWeb/ASL/publications/uploadedFiles/Caprari\\_phd2753.pdf](http://asl.epfl.ch/aslInternalWeb/ASL/publications/uploadedFiles/Caprari_phd2753.pdf)
- Webb P. W., 1992, Journal of Experimental Biology, "Is the high cost of body caudal fin undulatory swimming due to the increased friction drag or inertial recoil"
- Clark J. E., Cham J. G., Bailey S. A., Froehlich E. M., Nahata P. K., Full R. J., Cutkosky M. R., 2001, Proceedings of the 2001 IEEE, International Conference on Robotics and Automation, "Biomimetic Design and Fabrication of a Hexapedal Running Robot"
- Crawley E. F., Anderson E. H., 1990, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams"
- Damjanovic D., 2005, Elsevier, "Hysteresis in Piezoelectric and Ferroelectric Materials"
- Dario P., Valleggi R., Carrozza M. C., Montesi M. C., Cocco, M., 1992, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 2, "Microactuators for microrobots: a critical survey"
- Heo S., Wiguna T., Park H. C., Seo Goo N., 2007, Journal of Bionic Engineering 4, Science Direct, "Effect of an Artificial Caudal Fin on the Performance of a Biomimetic Fish Robot Propelled by Piezoelectric Actuators"
- Hulskamp A. W., van Wingerden J. W., Barlas T., Champliand H., van Kuik G. A. M., Bersee H. E. N., Verhaegen M., 2010, John Wiley & Sons, Ltd., "Design of a scaled wind turbine with a smart rotor for dynamic load control experiments"



- 
- Jaehwan Kim, Sungryul Yun, Zoubeida Ounaies, 2006, American Chemical Society, "Discovery of Cellulose as a Smart Material"
- Junzhi Yu, Min Tan, Shuo Wang, Erkui Chen, 2004, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, "Development of a Biomimetic Robotic Fish and Its Control Algorithm"
- Kamamichi N., Yamakita M., Asaka K., Luo Z., 2006, IEEE International Conference on Robotics and Automation, "A Snake-like Swimming Robot Using IPMC Actuator/Sensor"
- Kwang J Kim, Mohsen Shahinpoor, 2003, Institute of Physics Publishing, "Ionic polymer-metal composites: II. Manufacturing techniques"
- Kyu-Jin Cho, Je-Sung Ko, Sangwoo Kim<sup>2</sup>, Won-Shik Chu, Yongtaek Hong, Sung-Hoon Ahn, 2009, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, "Review of Manufacturing Processes for Soft Biomimetic Robots"
- Madden J., Zimit R., Vandesteeg N., Madden P., Anquetil P., Lafontaine S., Takshi A., Hunter I., Wierenga P., 2004, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 29(3), "Artificial Muscle Technology: Physical principals and naval prospects"
- Maki K. Habib, Keigo Watanabe, Kiyotaka Izumi, 2007, 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), "Biomimetics Robots, From Bio-inspiration to Implementation"
- MathWorks Inc., 2007-2017, "Simscape User's Guide: MATLAB & SIMULINK"
- Moskalik A. J, Brei D., 1999, Smart Materials and Structures, "Force-deflection behavior of piezoelectric C-bloc actuator arrays"
- Mossi K. M., Bishop R. P., FACE International Corporation, "Characterization of Different types of High Performance THUNDER<sup>TM</sup> Actuators"
- Mossi K.M., Bishop R. P., Smith R.C., Banks H.T., Bishop R. P., FACE International Corporation, "Evaluation Criteria for THUNDER<sup>TM</sup> Actuators"
- Niezrecki C., Balakrishnan S., 2001, Smart Structures and Integrated Systems, "Power Characterization of THUNDER<sup>TM</sup> Actuators as Underwater Propulsors"
- Ounaies Z., Mossi K., Smith R., Bernd J., 2001, ICASE, NASA Langley Research Center, "Low-field and High-field Characterization of THUNDER actuators"
- Park S. J., Gazzola M., Park K. S., Park S., Di Santo V., Blevins E. L., Lind J. U., Campbell P. H., Dauth S., Capulli A. K., Pasqualini F. S., Ahn S., Cho A., Yuan H., Maoz B. M., Vijaykumar R., Choi J., Deisseroth K., Lauder G. V., Mahadevan L., Parker K. K., 2016, "Phototactic guidance of a tissue-engineered soft-robotic ray"
- Paulson L. D., 2004, IEEE Computer Society, "Biomimetic Robots"
- Pelrine R., Kornbluh R., Pei Q., Stanford S., Oh S., Eckerle J., Full R., Rosenthal M., Meijer K., 2002, Smart Structures and Materials, "Dielectric Elastomer Artificial Muscle Actuators: Toward Biomimetic Motion"
- Pinkerton J. L., Moses R. W., 1997, NASA Technical Memorandum, "A Feasibility Study To Control Airfoil Shape Using THUNDER"

- Robinson D. W., Pratt J. E., Paluska D. J., Pratt G. A., 1999, Proceedings of the 1999 IEEE/ASME, International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, "Series Elastic Actuator Development for a Biomimetic Walking Robot"
- Sahin E., Spears W. M., 2004, Springer, "Swarm Robotics: SAB International Workshop, Santa Monica, CA, USA, July 2004, Revised Selected Papers"
- Sahin E., Spears W. M., Winfield A. F. T., 2006, Springer, "Swarm Robotics: Second SAB 2006 International Workshop, Rome, Italy, September 30-October 1, 2006, Revised Selected Papers"
- Seok Heo, Tedy Wiguna, Hoon Cheol Park, Nam Seo Goo, 2007, Science Direct, Journal of Bionic Engineering 4, "Effect of an Artificial Caudal Fin on the Performance of a Biomimetic Fish Robot Propelled by Piezoelectric Actuators"
- Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies B. C., 2001, IEEE, Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, "An Experimental Undulating-Fin Device Using the Parallel Bellows Actuators"
- Shahinpoor M., Bar-Cohen Y., Simpson J. O., Smith J., 1998, IOP Publishing Ltd, "Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles—a review"
- Shahinpoor M., Kwang J. K., 2004, Institute of Physics Publishing, "Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications"
- Shahinpoor M., Kwang J. K., 2004, Institute of Physics Publishing, "Ionic polymer-metal composites: III. Modeling and simulation as biomimetic sensors, actuators, transducers, and artificial muscles"
- Shahinpoor M., 1991, IOP Publishing Ltd, "Conceptual Design, kinematics and dynamics of swimming robotic structures using ionic polymeric gel muscles"
- Shin H., Jo S., Mikos A. G., 2003, Science direct, Elsevier, "Biomimetic materials for tissue engineering"
- Shuxiang Guo, Toshio Fukuda, Kinji Asaka, 2003, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, "A New Type of Fish-Like Underwater Microrobot"
- Sitti M., Campolo D., Yan J., Fearing R. S., Su T., Taylor D., Sands T. D., Dept. of EECS, University of California, Berkeley, Dept. of Materials Science and Engineering, University of California, Berkeley, "Development of PZT and PZN-PT Based Unimorph Actuators for Micromechanical Flapping Mechanisms"
- Sung-Weon Yeom, Il-Kwon Oh, 2009, IOP Publishing, "A biomimetic jellyfish robot based on ionic polymer metal composite actuators"
- Song J., Washington G., 1999, SPIE Conference on Smart Structures and Integrated Systems, "Thunder Actuator Modeling and Control with Classical and Fuzzy Control Algorithm"
- Tao Lei Sun, Guangyan Qing, 2011, Advanced Materials, "Biomimetic Smart Interface Materials for Biological Applications"
- Thompson D. W., 1945, Cambridge: At the University Press, New York: The McMillan Company, "On Growth and Form"
- Triantafyllou G. S., Triantafyllou M. S., Grosenbaugh M. A., 1993, J Fluid Struct., Vol. 7, "Thrust development in oscillating foil with application to fish propulsion"

---

Trimmer, W. and Jebens, R., 1989, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, "Actuators for Micro Robots"

Tunçdemir S., 2004, Thesis Project, Supervisor: Prof. Dr. Faruk Arinç, School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, "Design of mini Swimming Robot Using Piezoelectric Actuator"

Tzeranis D., Papadopoulos E., Triantafyllou G., 2003, Proc. 11th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED03), Rhodes, "On the Design of an Autonomous Robot Fish"

Urbach H. P., 1988, Phillips Research Laboratories, "Existence of Optimum Propulsion by Means of Periodic Motions of a Rigid Profile"

Won-Shik Chu, Kyung-Tae Lee, Sung-Hyuk Song, Min-Woo Han, Jang-Yeob Lee, Hyung-Soo Kim, Min-Soo Kim<sup>1</sup>, Yong-Jai Park, Kyu-Jin Cho, and Sung-Hoon Ahn, 2012, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, "Review of Biomimetic Underwater Robots Using Smart Actuators"

Wood R.J., Steltz E., Fearing R.S., 2005, Science Direct, "Optimal energy density piezoelectric bending actuators"

Εικόνα E.1: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Cross\\_section\\_of\\_mariana\\_trench.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Cross_section_of_mariana_trench.svg)

Εικόνα E.2: [http://www.bluebird-electric.net/submarines/trieste\\_bathyscaphe\\_us\\_navy\\_jacques\\_piccard\\_don\\_walsh.htm](http://www.bluebird-electric.net/submarines/trieste_bathyscaphe_us_navy_jacques_piccard_don_walsh.htm)

Εικόνα E.3: <https://www.navsource.org/archives/08/08554.htm>

Εικόνα E.4: <http://www.sandiegouniontribune.com/sdut-trieste-took-two-men-worlds-deepest-site-2010jan16-htmlstory.html>

Εικόνα E.5: <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/P/Piccard.html>

Εικόνα E.6: <https://www.theguardian.com/science/gallery/2012/mar/26/james-cameron-mariana-trench-solo>

Εικόνα E.7: <https://www.theguardian.com/science/gallery/2012/mar/26/james-cameron-mariana-trench-solo>

Εικόνα E.8: [https://en.wikipedia.org/wiki/Deepsea\\_Challenger](https://en.wikipedia.org/wiki/Deepsea_Challenger)

Εικόνα E.9: <https://www.pinterest.co.uk/pin/319544536050553303/>

Εικόνα E.10: <https://gr.pinterest.com/pin/411868328406563057/>

Εικόνα E.11: <https://fineartamerica.com/featured/leonardo-da-vinci-antique-flying-machine-under-parchment-nenad-cerovic.html>

Εικόνα E.12: <https://wright.nasa.gov/airplane/planes.html>

Εικόνα 1.1: Towtank, 2004, “MIT Towing Tank”, <http://web.mit.edu/towtank/www/>

Εικόνα 1.2: Kato, N., 2004, “Fish Fin Motion”, Url:<http://www.naoe.eng.osaka-u.ac.jp/naoe/naoe3/kato/fin9.html>

Εικόνα 1.3: Morgansen, K., 2004, “Fish Project”, <http://vger.aa.washington.edu/fishproject.htm>

Εικόνα 1.4: NMRI, 2000b, “Model Fish Robot, PPF-09”, URL: <http://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/model/ppf09/index.html>

Εικόνα 1.5: Anderson and Kerrebrock, 1999, 2000 Charles Stark Draper Laboratory, US as a next generation of RoboTuna

Εικόνα 1.6: Scientific magazine “New Scientist”, 2001

Εικόνα 1.7: Nakabo, Y., Mukai, T., Ogawa, K., Ohnishi, N. and Asaka, K., “Biomimetic Soft Robot Using Artificial Muscle”, [www.bmc.riken.jp/~sensor/papers/IROS2004\(Nakabo\).pdf](http://www.bmc.riken.jp/~sensor/papers/IROS2004(Nakabo).pdf)

Εικόνα 1.8: Washington, G., 2004, “The Intelligent Structures and Systems Laboratory, Miniature Swimming Vehicles, URL: <http://rclsg.eng.ohio-state.edu/~gnwashin/parts/swim.html>

Εικόνα 2.1: <http://issl.eng.uci.edu/miniature-swimming-vehicles>

Εικόνα 2.2: Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, Kinzel L. Gary “Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle”, MARCH 2003

Εικόνα 2.3: Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, Kinzel L. Gary “Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle”, MARCH 2003

---

Εικόνα 2.4: Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, Kinzel L. Gary “Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle”, MARCH 2003

Εικόνα 2.5: Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, Kinzel L. Gary “Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle”, MARCH 2003

Εικόνα 2.6: Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, Kinzel L. Gary “Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle”, MARCH 2003

Εικόνα 2.7: Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, Kinzel L. Gary “Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle”, MARCH 2003

Εικόνα 2.8: Borgen G. Michael, Washington N. Gregory, Kinzel L. Gary “Design and Evolution of a Piezoelectrically Actuated Miniature Swimming Vehicle”, MARCH 2003

Εικόνα 3.1: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 3.2: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 3.3: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 3.4: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 3.5: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 3.6: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 3.7: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 3.8: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.1: Tunçdemir S., 2004, Thesis Project, Supervisor: Prof. Dr. Faruk Arinç, School of Natural and Applied Sciences, Middle East Technical University, “Design of mini Swimming Robot Using Piezoelectric Actuator”

Εικόνα 4.2: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.3: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.4: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.5: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.6: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.7: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.8: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.9: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.10: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.11: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.12: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.13: Προσωπικό αρχείο

Εικόνα 4.14: Προσωπικό αρχείο