

Ανάλυση και σχεδιασμός εύκαμπτου μηχανισμού
μορφοποίησης ακμής εκφυγής πτέρυγας μικρού
αεροσκάφους και υλοποίηση του με χρήση
τρισδιάστατης εκτύπωσης.



Τομέας: Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου
Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2023

ILIAS GEORGAKOPOULOS

Analysis and design of a flexible morphing mechanism
of the trailing edge of a small aircraft wing and
validation using 3d printing.

Section: Mechanical Design & Automatic Control

Supervisor: Vasilios Spitas, NTUA Associate Professor

Athens 2023



SCHOOL OF MECHANICAL ENGINEERING

Ευχαριστίες

Στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνέδραμαν αποφασιστικά ο επιβλέπων καθηγητής Β. Σπιτάς με την καθοδήγηση και τις πολύτιμες γνώσεις του και ο υποψήφιος διδάκτορας Δ. Κρυφός με την συνεχή υποστήριξή του, τους οποίους και ευχαριστώ θερμά.

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Γεωργακόπουλος Ηλίας

Περιεχόμενα

| | |
|--|----|
| Σύνοψη - Περίληψη | 8 |
| Abstract | 9 |
| 1. Εισαγωγή..... | 10 |
| 1.1 Περιγραφή αντικειμένου | 10 |
| 1.2 Ιστορική αναδρομή | 11 |
| 1.3 Σύγχρονη έρευνα | 12 |
| 1.4 Εξαρτήματα του συστήματος μορφοποίησης της πτέρυγας | 14 |
| 2. Προδιαγραφές μηχανισμού και πιθανές σχεδιαστικές λύσεις | 16 |
| 2.1 Προδιαγραφές | 16 |
| 2.2 Πιθανές σχεδιαστικές λύσεις | 17 |
| 2.2.1 Μηχανισμός μεταβολής του σχήματος της ακμής εκφυγής..... | 17 |
| 2.2.2 Επενεργητής..... | 18 |
| 2.2.3 Εξωτερικό κέλυφος πτέρυγας..... | 18 |
| 3. Περιγραφή μηχανισμού..... | 21 |
| 4. Αεροδυναμική Ανάλυση | 23 |
| 5. Σχεδιασμός και μελέτη σκελετού και κελύφους | 27 |
| 5.1 Προκαταρκτική σχεδίαση και μελέτη | 27 |
| 5.2 Μελέτη κελύφους..... | 33 |
| 5.3 Τελικός σχεδιασμός σκελετού | 35 |
| 6. Σχεδιασμός, μελέτη και επιλογή λοιπών εξαρτημάτων..... | 40 |
| 6.1 Επενεργητής | 40 |
| 6.2 Τροχαλία..... | 41 |
| 6.3 Τένοντες..... | 42 |
| 6.4 Κοχλίες..... | 42 |
| 7. Κατασκευή πρωτοτύπου..... | 51 |
| 7.1 Επιλογή υλικού σκελετού και αρχικές δοκιμές..... | 51 |
| 7.2 Εκτύπωση πρωτότυπου σκελετού και συναρμολόγηση | 52 |
| 7.3 Τοποθέτηση αφρού και κελύφους | 53 |
| 7.4 Αξιολόγηση πρωτοτύπου | 53 |
| 8. Συμπεράσματα | 55 |
| 9. Κατάλογος πινάκων | 57 |
| 10. Κατάλογος εικόνων..... | 58 |
| 11. Κατάλογος Αναφορών | 60 |

Σύνοψη - Περίληψη

Ο μετασχηματισμός της μορφής (shape morphing) των ιπτάμενων μέσων για την βελτίωση της απόδοσής τους σε ένα διευρυμένο φάκελο πτήσης αποτελεί την μεγαλύτερη σύγχρονη πρόκληση της αεροναυπηγικής βιομηχανίας. Οι αντικρουόμενες απαιτήσεις στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του αεροσκάφους σε κάθε φάση της πτήσης επιβάλλουν την μεταβολή της μορφής του ώστε να ανταποκρίνεται βέλτιστα σε αυτές. Η κυρίαρχη δομή του αεροσκάφους που επηρεάζει τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του είναι η πτέρυγα και κατ' επέκταση σε αυτήν εστιάζεται κυρίως η προσπάθεια μορφοποίησης εν πτήσει. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην μελέτη και ανάπτυξη ενός συστήματος που μεταβάλλει την μορφή της πτέρυγας στην περιοχή πλησίον της ακμής εκφυγής (trailing edge) ώστε να επιτυγχάνεται αντίστοιχη αεροδυναμική συμπεριφορά με αυτήν που προκαλούν τα συμβατικά πηδάλια στο επίπεδο ελαφρού αεροσκάφους. Η ανάλυση γίνεται με τη χρήση του λογισμικού SOLIDWORKS και περιλαμβάνει τον σχεδιασμό του συστήματος και την προσομοίωση της λειτουργίας του με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, ο μηχανισμός υλοποιείται με τη χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή και μέσω αυτού διερευνάται αφενός η επιτυχία του σχεδιασμένου συστήματος στην ικανοποίηση των προδιαγραφών και αφετέρου η ανταπόκριση του θεωρητικού μοντέλου στην ρεαλιστική αποτύπωση της πραγματικότητας.

Abstract

Shape morphing of aerial vehicles for the improvement of their performance over a wide flight envelope is the biggest modern challenge of the aeronautical engineering industry. The conflicting demands of the aerodynamic characteristics of an aircraft depending on the flight phase necessitate the transformation of its shape so that it performs optimal under each phase. The most important aircraft structure that affects the aerodynamic characteristics is the wing, thus efforts of shape morphing are focused on the wing. In this context, the current study involves the development of a shape morphing system near the trailing edge of a wing which succeeds to achieve similar performance to conventional flaps of a lightweight aircraft. The analysis is carried out using SOLIDWORKS and it includes the design of the system and the simulation of its functioning using finite elements. Moreover, the system is constructed using additive manufacturing and based on the real model it is investigated the success of the designed system and the effectiveness of the theoretical model to represent the actual model.

1. Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή αντικειμένου

Η αεροναυπηγική επιστήμη στον έναν αιώνα ύπαρξής της έχει προοδεύσει ραγδαία και τα επιτεύγματά της έχουν αλλάξει ριζικά την ανθρώπινη πραγματικότητα. Τα αεροσκάφη πλέον είναι αξιόπιστα, επιτυγχάνουν υψηλές ταχύτητες, έχουν μεγάλο βεληνεκές και εν γένει ικανοποιούν τις ανθρώπινες απαιτήσεις. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα προβλήματα που χρίζουν αντιμετώπισης και τομείς που επιδέχονται βελτίωση. Στην παρούσα συγκυρία, οι στόχοι τους οποίους θέτει, μεταξύ άλλων, η εξέλιξη των αεροσκαφών είναι:

- μείωση περιβαλλοντικού αποτυπώματος μέσω της μείωσης παραγωγής ρύπων,
- μείωση παραγόμενου θορύβου και
- βελτίωση της αποδοτικότητάς τους σε διαφορετικές φάσεις της πτήσης ή σε διαφορετικές αποστολές.

Αναλογιζόμενοι τα πουλιά, τα οποία είναι σε θέση να μεταβάλουν το σχήμα τόσο του κορμού τους όσο και των πτερύγων τους καθόλη τη διάρκεια της πτήσης, εύκολα αντιλαμβανόμαστε πως ένας ιδανικός τρόπος για την επίτευξη του τρίτου στόχου είναι η συνεχής μεταβολή του σχήματος των ιπτάμενων μέσων και δη των πτερύγων τους. Στο μεταίχμιο μεταξύ της πλήρους μορφοποίησης της πτέρυγας και της πτέρυγας σταθερής γεωμετρίας βρίσκεται η δυνατότητα μεταβολής της αεροδυναμικής επιφάνειας τμημάτων της, η οποία είναι ήδη εφικτή βέβαια μέσω των επιφανειών ελέγχου (flap, slat, aileron). Ωστόσο, τα συμβατικά αυτά συστήματα δυσχεραίνουν την επίτευξη των πρώτων δύο στόχων καθώς αφενός δημιουργούν μεγαλύτερη οπισθέλκουσα και άρα απώλεια ενέργειας και αύξηση κατανάλωσης καυσίμου και αφετέρου παράγουν περισσότερο θόρυβο λόγω των ανωμαλιών που προκαλούν στη ροή του αέρα. Ταυτόχρονα, έχουν περιορισμένες δυνατότητες όσον αφορά στην επίτευξη του τρίτου στόχου, καθώς πλέον έχουν φτάσει στο απόγειο της εξέλιξής τους.

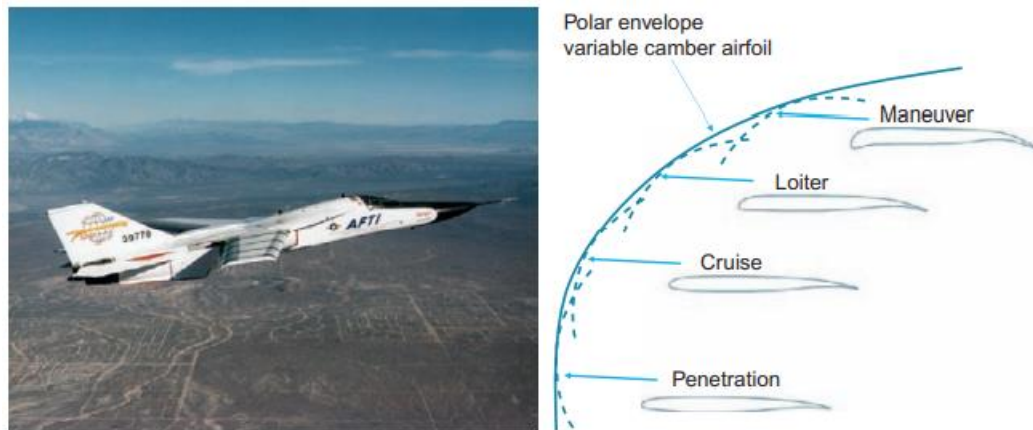
Τομή στην εξέλιξη και επίτευξη των ανωτέρω στόχων αποτελεί ο μετασχηματισμός της μορφής της πτέρυγας, η μορφοποίησή της δηλαδή, η οποία επιτελείται με ενσωματωμένα συστήματα εσωτερικά της πτέρυγας. Η μορφοποίηση αυτή ενδέχεται να περιλαμβάνει την αυξομείωση του εκπετάσματος, την μεταβολή του σχήματος του χείλους προσβολής και του χείλους εκφυγής, την αλλαγή της καμπυλότητας της πτέρυγας και εν γένει κάθε είδους προσαρμογή του σχήματος ώστε να επιτυγχάνονται τα εκάστοτε κατάλληλα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά. Σε κάθε περίπτωση, επειδή η επιφάνεια δεν παρουσιάζει ασυνέχειες, διατηρείται η ομαλότητα της ροής και η πτέρυγα καθίσταται πιο αποδοτική σε κάθε φάση της πτήσης.

Ένα από τα σημαντικότερα τμήματα της πτέρυγας το οποίο απαιτείται να μεταβάλει το σχήμα του είναι το χείλος εκφυγής καθώς έτσι είναι δυνατόν να επιτευχθεί ο έλεγχος όλων των κινήσεων του αεροπλάνου. Ενδεικτικά, στα περισσότερα αεροσκάφη, τα πηδάλια κλίσης, ανόδου-καθόδου και εκτροπής βρίσκονται στις ακμές εκφυγής των πτερύγων, των οριζόντιων ουραίων και του οριζόντιο κάθετου πτερυγίου αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία επιδιώκεται ο σχεδιασμός ενός συστήματος που ενσωματώνοντας την ιδέα της μορφοποίησης μεταβάλει καταλλήλως το σχήμα του χείλους εκφυγής ώστε να επιτυγχάνεται ο έλεγχος του αεροσκάφους.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Ανατρέχοντας στο παρελθόν, γίνεται αντιληπτό ότι η προσπάθεια υλοποίησης της ιδέας της μεταβολής του σχήματος των πτερύγων συντελείται καθόλη τη διάρκεια εξέλιξης των αεροσκαφών. Το πρώτο αεροσκάφος των αδερφών Wright χρονολογίας 1903 έφερε μηχανισμό που επέτρεπε στον χειριστή να το πλοηγεί μεταβάλλοντας το σχήμα της κάτω πτέρυγας. Τα επόμενα χρόνια, πολλοί μηχανικοί όπως ο Ολλανδός Alexander Albert Holle το 1915 και ο Αμερικάνος H.F. Parker το 1920 κατοχύρωσαν διπλώματα ευρεσιτεχνίας για μεταβλητής γεωμετρίας πτέρυγες. Ωστόσο, η επίτευξη υψηλών ταχυτήτων στα αεροσκάφη σε συνδυασμό με την έλλειψη τεχνολογίας κυρίως σε αισθητήρες και εξειδικευμένα υλικά κατέστησε την χρήση των συμβατικών κινούμενων επιφανειών (aileron, flap etc.) στις πτέρυγες μονόδρομο στα χρόνια που ακολούθησαν.

Το ενδιαφέρον της βιομηχανίας αναζωπυρώθηκε τη δεκαετία του 1980 οπότε η τεχνολογική εξέλιξη το επέτρεψε. Ειδικότερα, αξιοσημείωτο είναι το ερευνητικό πρόγραμμα F-111 Mission Adaptive Wing μεταξύ Boeing, USAF και NASA στο οποίο επιδιώχθηκε ο σχεδιασμός προσαρμοζόμενων επιφανειών στις ακμές πρόσπτωσης και εκφυγής για την αντικατάσταση των συμβατικών slats και flaps. Η καινοτόμος πτέρυγα που αναπτύχθηκε προσαρμόστηκε στο μαχητικό ΑΦ F-111 και εκτελέστηκαν 59 πτήσεις μεταξύ 1985 – 1989 στις οποίες η πτέρυγα εμφάνισε βελτιωμένα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά σε όλες τις φάσεις της πτήσης, αποδίδοντας καλύτερα σε σχέση με την συμβατική. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα επισκιάστηκαν από το αυξημένο βάρος και την πολυπλοκότητα του συστήματος με αποτέλεσμα το πρόγραμμα να παραμείνει σε ερευνητικό στάδιο.



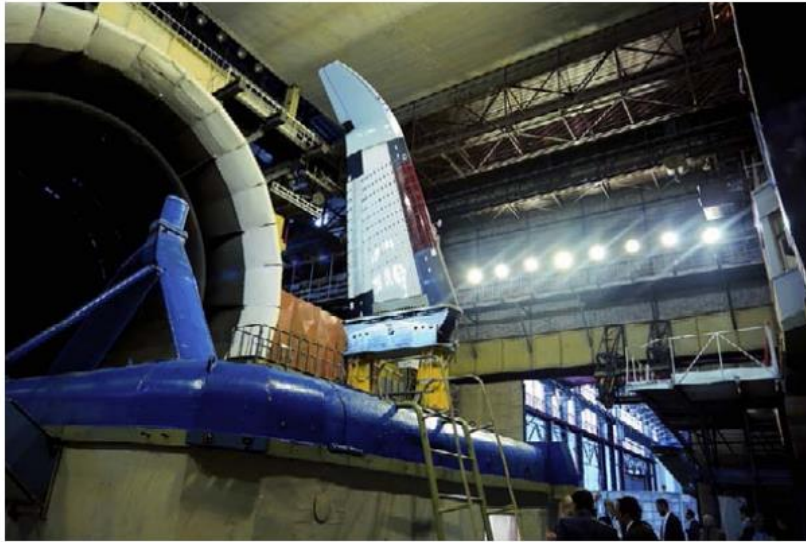
Εικόνα 1: Το ΑΦ F-111 και η φιλοσοφία μορφοποίησης των πτερύγων [1]

1.3 Σύγχρονη έρευνα

Η παρούσα κατάσταση αναφορικά με την μορφοποίηση των πτερύγων περιλαμβάνει διάφορα ερευνητικά προγράμματα που υλοποιούνται με τη συνεργασία μεγάλων εταιρειών στο χώρο της αεροναυπηγικής και πανεπιστημίων.

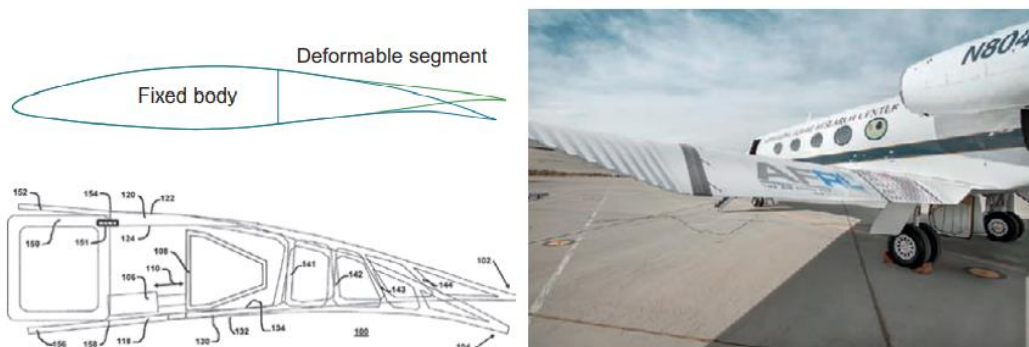
Συγκεκριμένα, στην Ευρώπη ξεχωρίζει το πρόγραμμα SARISTU καθοδηγούμενο από την Airbus στο οποίο εμπλέκονται πάνω από 60 οργανισμοί. Το πρόγραμμα, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει την ανάπτυξη μιας μορφοποιήσιμης πτέρυγας η οποία σε τμήμα της 5.5m φέρει τα ακόλουθα τρία συστήματα:

- Ένα σύστημα μεταβολής της ακμής πρόσπτωσης το οποίο χρησιμοποιώντας ηλεκτρομηχανικό επενεργητή μεταβάλλει το συνθετικό κέλυφος (skin) της πτέρυγας και αποσκοπεί στην βελτίωση της απόδοσης κατά την απογείωση και την προσγείωση.
- Ένα καινοτόμο μορφοποιήσιμο πτερύγιο (winglet) που μοιάζει με flap και αποσκοπεί στην εξομάλυνση των διαταραχών από ριπές αέρα.
- Τέλος, ένα σύστημα μεταβολής της ακμής εκφυγής (Adaptive Trailing Edge Device) το οποίο μεταβάλλοντας κατάλληλα τη μορφή της πτέρυγας στην ακμή εκφυγής αποσκοπεί στην βελτίωση της απόδοσης κατά τη διάρκεια της πτήσης μέσω μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου.



Εικόνα 2: Η πτέρυγα του προγράμματος SARISTU στην αεροδυναμική σήραγγα

Ένα άλλο αξιοσημείωτο ερευνητικό έργο αναπτύσσεται από την FlexSys στο οποίο επιδιώκεται η παραμόρφωση της πτέρυγας πλησίον της ακμής εκφυγής. Παρόλο που δεν είναι δημοσιοποιημένος ο ακριβής μηχανισμός, είναι γνωστό ότι το σύστημα περιλαμβάνει μία εύκαμπτη (compliant) δομή την οποία παραμορφώνει κάποιο κλασικό σύστημα επενεργητή. Το κέλυφος είναι εύκαμπτο και ενιαίο σε οποιοδήποτε σχήμα λαμβάνει. Ενδεικτικά, το σύστημα επιτυγχάνει παραμόρφωση -10 έως +40 μοίρες και έχει δοκιμαστεί στο αεροσκάφος Gulfstream III με επιτυχία.



Εικόνα 3: Το σύστημα FlexSys από την σύλληψη της ιδέας (πάνω αριστερά) στην πατέντα (κάτω αριστερά) και στην δοκιμή εν πτήξει (δεξιά) [2].

1.4 Εξαρτήματα του συστήματος μορφοποίησης της πτέρυγας

Κάθε σύστημα που μετασχηματίζει τη μορφή μιας πτέρυγας περιλαμβάνει τα παρακάτω δομικά μέρη:

- Σκελετό (structural skeleton)
- Σύστημα επενεργητή (actuator system)
- Κέλυφος (skin)
- Σύστημα αισθητήρων (sensor system)
- Σύστημα ελέγχου (control system)
- Καλωδίωση (cabling)

Ο σκελετός συνιστά το σώμα του συστήματος και φέρει τα φορτία που ασκούνται από τον επενεργητή, τον αέρα ή τα υπόλοιπα μέλη με τα οποία συνδέεται. Ο σκελετός σε μια μορφοποιήσιμη πτέρυγα δύναται να μεταβάλλει το σχήμα του είτε αποτελούμενος από άκαμπτες δομές συνεργαζόμενες μεταξύ τους με αρθρώσεις είτε από ελαστικές δομές. Ταυτόχρονα, αποτελεί την έδραση των υπόλοιπων δομικών μερών του συστήματος και την σύνδεση με την υπόλοιπη πτέρυγα. Συχνά, δεδομένου ότι στα μορφοποιούμενα συστήματα ο επενεργητής λαμβάνει το εξωτερικό φορτίο, ο σκελετός χρησιμοποιείται για την κατάλληλη ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου ώστε να μην επιβαρύνεται ο επενεργητής. Τέλος, διατηρεί το σχήμα του συστήματος για οποιαδήποτε παραμορφωμένη κατάσταση.

Το σύστημα του επενεργητή περιλαμβάνει τον επενεργητή, δηλαδή έναν κινητήρα, και τα παρελκόμενά του που συμβάλουν στην μετάδοση κίνησης. Το σύστημα αυτό διαδραματίζει πολλαπλούς ρόλους, μεταξύ των οποίων οι βασικότεροι είναι ο μετασχηματισμός της μορφής και η μεταφορά φορτίων. Παρόλο που η μεταφορά φορτίων από τους επενεργητές συναντάται ήδη στις συμβατικές επιφάνειες ελέγχου όπου οι επενεργητές μεταφέρουν δυνάμεις στην κύρια πτέρυγα, καινοτομία αποτελεί το γεγονός ότι πλέον οι επενεργητές είναι ενσωματωμένοι στον σκελετό. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας της μορφής που ενδεχομένως επιδιώκεται να λαμβάνει η πτέρυγα, συχνά απαιτούνται παραπάνω του ενός επενεργητές για την επίτευξη μια κίνησης.

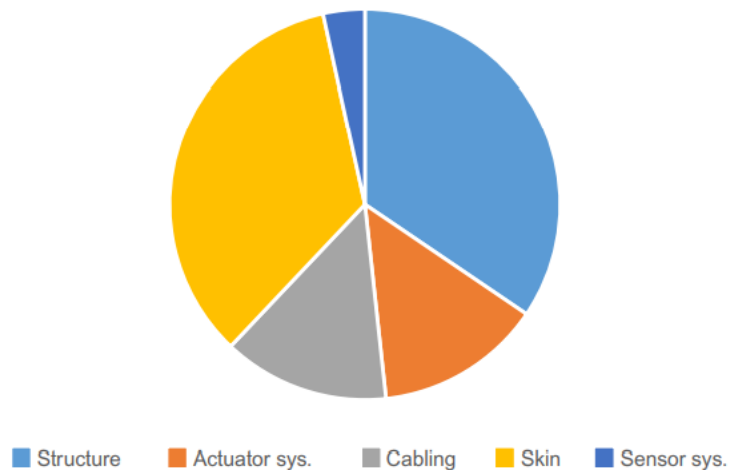
Το κέλυφος αποτελεί την εξωτερική επιφάνεια της πτέρυγας και είναι το δομικό στοιχείο που αλληλεπιδρά άμεσα με τον περιβάλλοντα αέρα. Η διαφορά του με τα συμβατικά κελύφη και η δυσκολία στην κατασκευή του έγκειται στην ικανότητα παραμόρφωσης με ταυτόχρονη διατήρηση του παραμορφωμένου σχήματος που πρέπει να διαθέτει. Το ιδανικό κέλυφος πρέπει να έχει μηδενικό μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση της επιθυμητής παραμόρφωσης και άπειρο στην κάθετη διεύθυνση στην επιφάνειά του.

Το σύστημα αισθητήρων περιλαμβάνει το σύνολο των αισθητήρων οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος. Οι αισθητήρες είναι

ενσωματωμένοι στα υπόλοιπα δομικά μέρη του συστήματος και συχνά εμφανίζουν πολυπλοκότητα στην τοποθέτηση και χωροθέτησή τους καθώς στις συγκεκριμένες εφαρμογές είναι απαραίτητο να λαμβάνονται πληροφορίες από πολλά μέρη του συστήματος.

Το σύστημα ελέγχου συνδυάζει τις πληροφορίες από το δίκτυο αισθητήρων και τις αναδιαμορφώνει ώστε να είναι κατάλληλες για το σύστημα επενέργειας. Το σύστημα αυτό πάσχει από προβλήματα που σχετίζονται με τον χρόνο ανάδρασης αφού αλληλεπιδρά με πολλαπλά δεδομένα εισόδου και εξόδου.

Η καλωδίωση περιλαμβάνει τα καλώδια σύνδεσης των ανωτέρω υποσυστημάτων και αποτελεί αντικείμενο προσεκτικού σχεδιασμού αφού το πλήθος και το μήκος των καλωδίων είναι μεγάλο, σε βαθμό που να δημιουργεί προβλήματα αυξημένου βάρους ή χωροταξίας.



Εικόνα 4: Ποιοτική αναπαράσταση του σχετικού βάρους των δομικών μερών ενός συστήματος μορφοποίησης [1].

2. Προδιαγραφές μηχανισμού και πιθανές σχεδιαστικές λύσεις

2.1 Προδιαγραφές

Σκοπός της παρούσης εργασίας όπως προαναφέρθηκε είναι ο σχεδιασμός ενός μηχανισμού που μεταβάλλει το σχήμα της πτέρυγας στην περιοχή πλησίον της ακμής εκφυγής ώστε να επιτυγχάνεται λειτουργία ανάλογη με τα συμβατικά πηδάλια ελέγχου. Με άλλα λόγια, επιδιώκεται ο σχεδιασμός των πηδαλίων ελέγχου σε μια πτέρυγα που ενσωματώνει την τεχνολογία του shape morphing.

Για την ρεαλιστικότερη προσέγγιση του προβλήματος, θεωρούμε ότι ο μηχανισμός προορίζεται για πτέρυγα μη επανδρωμένου αεροσκάφους μεσαίου μεγέθους. Έτσι, οι προδιαγραφές ως προς τις επιδόσεις του σχεδιαζόμενου συστήματος, η διαστασιολόγησή του και η παραμετροποίηση του προβλήματος κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης γίνονται με σημείο αναφοράς αυτόν τον τύπο αεροσκάφους. Τα αεροσκάφη αυτά έχουν εκπέτασμα 5-10m, βάρος 50-200kg και ταχύτητα πτήσης 200km/h. Ενδεικτικά, σημείο αναφοράς στην κατηγορία του αποτελεί το AAI RQ-2 Pioneer (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Το UAV AAI RQ-2 Pioneer

Όσον αφορά στο συγκεκριμένο τμήμα της πτέρυγας που σχεδιάζουμε, αυτό θα επιτυγχάνει εκτροπή ανάλογη των συμβατικών πηδαλίων, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 10° - 30° . Στην προκειμένη περίπτωση, τίθεται ο στόχος το ενσωματωμένο σύστημα να επιτυγχάνει εκτροπή 20° .

2.2 Πιθανές σχεδιαστικές λύσεις

Οι σχεδιαστικές λύσεις που δύναται να επιλεγούν είναι πλείστες και παρουσιάζονται παρακάτω κατηγοριοποιούμενες με βάση τα επιμέρους τμήματα που απαρτίζουν τον μηχανισμό.

2.2.1 Μηχανισμός μεταβολής του σχήματος της ακμής εκφυγής

Για την μεταβολή του σχήματος της ΑΕ μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφόρων ειδών μηχανισμοί οι οποίοι είναι είτε αρθρωτοί είτε εύκαμπτοι (compliant mechanisms).

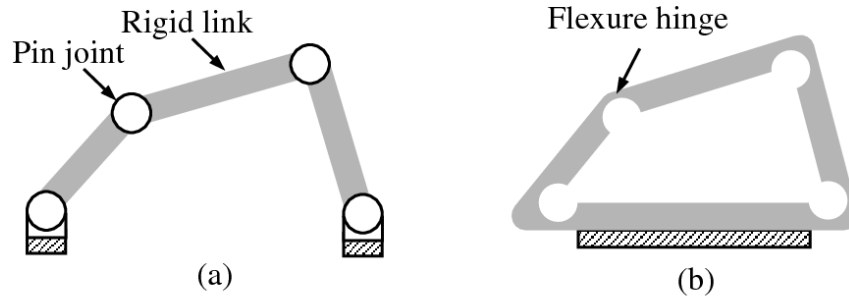
Οι αρθρωτοί μηχανισμοί αποτελούνται από συνεργαζόμενα μέλη συνήθως άκαμπτα που συνδέονται μέσω αρθρώσεων και εκτελούν προκαθορισμένες κινήσεις στο χώρο. Είναι πολυπλοκότεροι τόσο στη σχεδίασή τους όσο και στη λειτουργία τους και μειονεκτούν λόγω του μεγάλου βάρους που αναπόφευκτα έχουν. Ωστόσο, αποτελούν παραδοσιακή σχεδιαστική λύση και είναι ικανοί να φέρουν υψηλά φορτία γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για μεγάλα επιβατικά αεροσκάφη και επιπλέον δύναται να εκτελούν πιο σύνθετες κινήσεις προϋποθέτοντας την ύπαρξη πολλών επενεργητών.



Εικόνα 6: Αρθρωτός μηχανισμός μεταβολής της ακμής εκφυγής [1]

Όσον αφορά στους εύκαμπτους μηχανισμούς, αυτοί συνιστούν μια εύκαμπτη δομή η οποία μεταβάλλει το σχήμα της υπό την επίδραση φορτίου μέσω ελαστικής παραμόρφωσης επιτυγχάνοντας έτσι την απαιτούμενη προδιαγεγραμμένη κίνηση. Υπερτερούν ως προς το χαμηλό τους βάρος και την αποδοτικότητά τους αφού αφενός δεν έχουν απώλειες λόγω τριβής, αφετέρου αποθηκεύουν ενέργεια η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί προς όφελος της κίνησης. Εντούτοις, αποτελούν επίτευγμα της σύγχρονης επιστήμης γεγονός που τους καθιστά λιγότερο μελετημένους και κατ'επέκταση ενδεχομένως πιο αναξιόπιστους, παράμετρος ιδιαίτερα σημαντική στην αεροναυπηγική. Ταυτόχρονα, η λειτουργικότητά

τους περιορίζεται από το φορτίο που μπορούν να φέρουν, το οποίο είναι σχετικά χαμηλό εξαιτίας της συγκέντρωσης τάσεων που εμφανίζεται στους εύκαμπτους συνδέσμους της δομής.



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση συμβατικού και εύκαμπτου μηχανισμού [3]

2.2.2 Επενεργητής

Οι επενεργητές αποτελούν τα συστήματα με τα οποία επιτυγχάνεται η μεταβολή της μορφή της πτέρυγας και εν προκειμένω ελέγχεται το πηδάλιο. Η τεχνολογική πρόοδος καθιστά δυνατή την επιλογή μεταξύ διαφόρων συμβατικών και δοκιμασμένων επενεργητών καθώς και μη συμβατικών και καινοτόμων.

Συγκεκριμένα, αξιόπιστη λύση αποτελεί το πνευματικό σύστημα το οποίο πλεονεκτεί σε βάρος, απλότητα κατασκευής και ταχύτητα. Ωστόσο, κρίνεται κατάλληλο για κινήσεις μεταξύ ενός αρχικού και ενός τελικού σημείου, όπως απαιτούν τα πτερύγια καμπυλότητας και όχι τα πηδάλια.

Εκτός αυτού, συμβατική λύση συνιστά ο ηλεκτρομηχανικός επενεργητής και ειδικότερα ο σερβοκινητήρας. Έχει ταχεία απόκριση και μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια και επαναληψιμότητα σε ένα πλήθος σημείων μεταξύ μιας αρχικής και μιας τελικής θέσης. Επιπλέον, η συντήρησή του είναι μικρή σε σχέση με άλλα συστήματα.

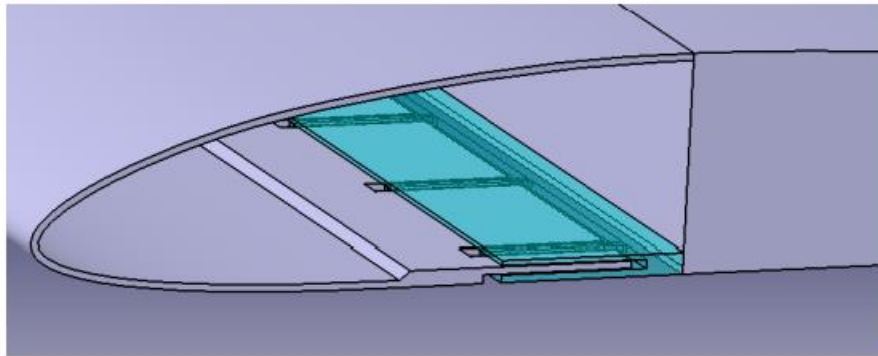
Μία λύση η οποία ερευνάται ευρέως για τα πλεονεκτήματα που διαθέτει είναι η χρήση Shape Memory Alloys. Τα κράματα αυτά ανάλογα με τη θερμοκρασία που έχουν μεταβάλλουν το σχήμα τους από μία αρχική μορφή σε μία τελική με παραμόρφωση έως 8% και ταυτόχρονα μπορούν να φέρουν πολύ υψηλό φορτίο. Εντούτοις, δεν έχουν γρήγορη απόκριση στη μεταβολή του σχήματός τους και λειτουργούν μεταξύ δύο θέσεων.

2.2.3 Εξωτερικό κέλυφος πτέρυγας

Το εξωτερικό κέλυφος πρέπει να μεταβάλει το σχήμα του στην κατεύθυνση της κίνησης του αileron και να διατηρεί τις ιδιότητές του στις υπόλοιπες κατευθύνσεις. Όπως και στα

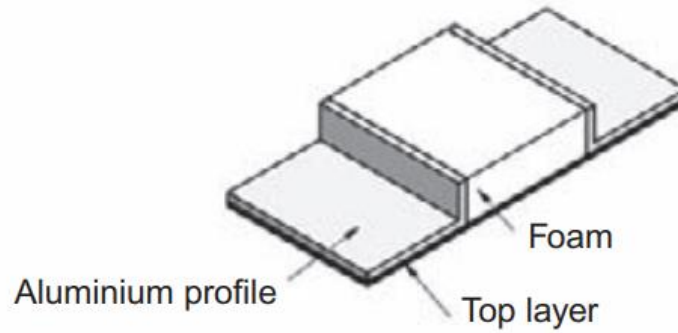
προηγούμενα τμήματα του μηχανισμού, οι επιλογές ποικίλουν με την αρχική επιλογή να αφορά στο αν το κέλυφος θα αποτελείται από μη ελαστικό ή ελαστικό υλικό.

Η περίπτωση του μη ελαστικού κελύφους περιλαμβάνει τη χρήση συμβατικών υλικών, είτε μεταλλικών είτε σύνθετων. Προϋποθέτει ότι κέλυφος αποτελείται από ξεχωριστά τμήματα και ότι υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ τους. Η σχετική κίνηση απαιτεί κάποιο είδος μηχανισμού και μειονεκτεί καθώς η αεροδυναμική επιφάνεια της πτέρυγας δεν θα είναι τελείως ομαλή στο σημείο σύνδεσης των τμημάτων. Ωστόσο, η λύση αυτή πλεονεκτεί όσον αφορά στην αποδεδειγμένη ικανότητα του κελύφους να φέρει φορτία εγκάρσια στην επιφάνειά του.



Εικόνα 8: Σχηματική αναπαράσταση συρταρωτού μηχανισμού για την μεταβολή του σχήματος του κελύφους [4]

Η περίπτωση του ελαστικού κελύφους περιλαμβάνει τη χρήση υλικών που δύνανται να επιμηκύνονται σε μεγάλο βαθμό. Η επιμήκυνση αυτή μπορεί να οφείλεται είτε σε εγγενείς ελαστικές ιδιότητες, είτε σε κατασκευαστική διαμόρφωση. Οι ελαστικές επιφάνειες από ελαστομερή υλικά μειονεκτούν στην ικανότητα να φέρουν φορτίο κάθετα στο επίπεδό τους, γεγονός που αποτελεί λειτουργική αναγκαιότητα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος είτε χρησιμοποιούνται υποστηρικτικές δομές κάτω από το κέλυφος (Εικόνα 9) ή τα υλικά ενισχύονται με ίνες.



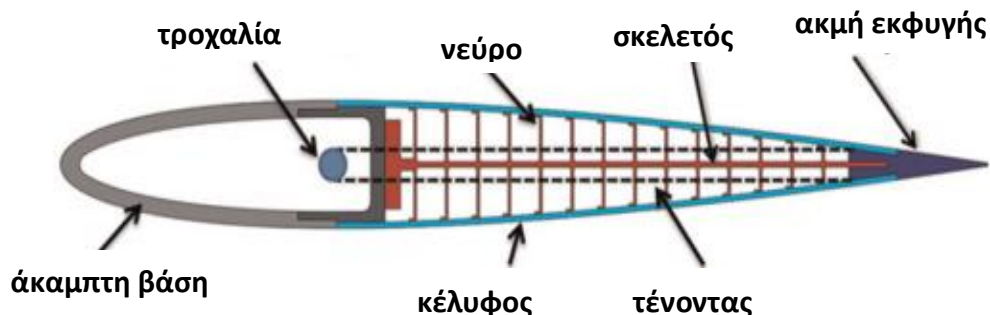
Εικόνα 9: Σύνθετη δομή κελύφους: Η εξωτερική ελαστική μεμβράνη στηρίζεται στα απαραμόρφωτα ελάσματα αλουμινίου και παραμορφώνεται στα τμήματα του αφρώδους υλικού (FlexSys Project) [1].

3. Περιγραφή μηχανισμού

Βάσει των προαναφερθέντων προδιαγραφών και κατόπιν εξέτασης πλήθους σχεδιαστικών λύσεων στη βιβλιογραφία, επιλέχθηκε ο σχεδιασμός ενός εύκαμπτου μηχανισμού ο οποίος παραμορφώνεται με τη δύναμη ενός ηλεκτροκινητήρα και περιβάλλεται από ελαστομερές κέλυφος (Εικόνα 10). Η ιδέα αυτή βασίζεται στον μηχανισμό Fishbone Active Camber Morphing Concept του Benjamin KS Woods [5].

Πιο συγκριμένα, ο σκελετός του μηχανισμού σχεδιάζεται στη βάση του βιομημιτισμού και είναι εμπνευσμένος από την ανατομία του ψαριού και δη το ψαροκόκαλο. Η σπονδυλική στήλη - βραχίονας έχει την κατεύθυνση της χορδής, και τα κάθετα κόκαλα - νεύρα κατεύθυνση από την χορδή στο κέλυφος. Η δομή αυτή εκτείνεται κατά μήκος του εκπετάσματος. Το πλεονέκτημα της δομής αυτής είναι η ανισότροπη συμπεριφορά ως προς την κάμψη, η ευκαμψία της δηλαδή κατά μήκος της χορδής και η δυσκαμψία κατά μήκος του εκπετάσματος. Η ευκαμψία επιτυγχάνεται με την ελαστικότητα του βραχίονα και η δυσκαμψία με την ακαμψία των νεύρων. Επιπλέον αυτής της λειτουργίας, τα νεύρα συνδέουν τον σκελετό με το κέλυφος, διατηρούν το σχήμα του κατά την παραμόρφωση και μεταφέρουν τα αεροδυναμικά φορτία στον σκελετό.

Στις δύο άκρες του, ο σκελετός έχει δύο απαραμόρφωτες δομές. Η εσωτερική, αυτή που συνορεύει δηλαδή με τον υπόλοιπο κορμό της πτέρυγας, έχει κατάλληλη διαμόρφωση ώστε να εδράζεται εκεί ο επενεργητής και αποτελεί το σημείο σύνδεσης του συνόλου του μηχανισμού του πηδαλίου κλίσης με τον κορμό. Η εξωτερική, αυτή που βρίσκεται δηλαδή στην άκρη της ακμής εκφυγής, έχει αιχμηρό σχήμα στην άκρη της όπως επιτάσσει η αεροδυναμική και διατηρεί το σχήμα της αεροτομής απαραμόρφωτο όντας σε πλήρη επαφή με το κέλυφος.



Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού και επιμέρους δομικών μερών

Η μεταβολή του σχήματος του σκελετού επιτελείται μέσω δύο τενόντων. Οι τένοντες αυτοί είναι ανταγωνιστές και τοποθετούνται εκατέρωθεν του βραχίονα και σε ορισμένη απόσταση από αυτόν. Η μία άκρη του καθενός προσδένεται στο άκρο του βραχίονα και η άλλη συνδέεται με άξονα τον οποίο κινεί ο επενεργητής. Στην ουδέτερη θέση οι τένοντες έχουν ελαφριά προένταση, τόση ώστε να μην υπάρχει υστέρηση στην κίνηση που προκαλεί

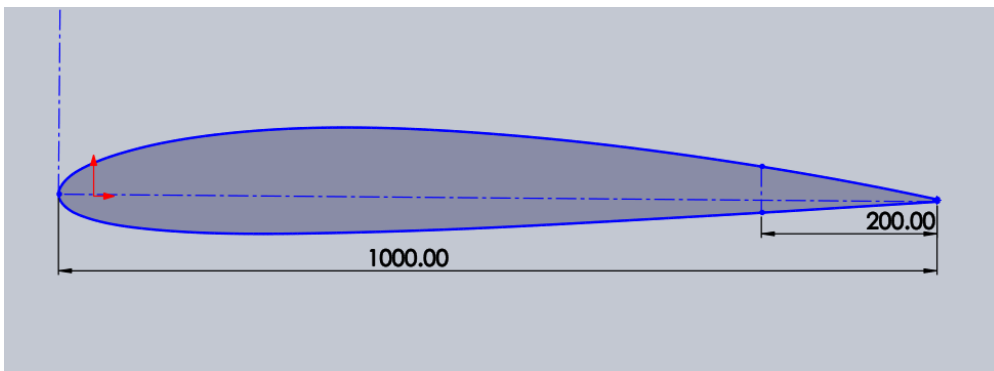
ο επενεργητής. Με την περιστροφή που επιβάλλει ο επενεργητής στον άξονα και κατ' επέκταση στον τένοντα, έχουμε κάμψη του βραχίονα λόγω του εφελκυσμού που ασκεί ο τένοντας σε απόσταση από τον ουδέτερο άξονα του βραχίονα. Κατά την παραμόρφωση, ο ένας τένοντας τραβάει το άκρο του βραχίονα ενώ ταυτόχρονα ο άλλος τένοντας είναι χαλαρός. Έτσι, επενεργώντας ξεχωριστά σε κάθε τένοντα δημιουργούμε θετική και αρνητική κλίση στο πηδάλιο ελέγχου.

Την εσωτερική δομή καλύπτει το κέλυφος το οποίο αποτελείται από ελαστομερές υλικό. Το υλικό αυτό κρίνεται κατάλληλο λόγω της μεγάλης παραμορφωσιμότητάς του, της τάξης του 10%. Για την αποφυγή δημιουργίας πτυχώσεων (buckling) στην πλευρά που βραχύνεται, το κέλυφος συνδέεται στον σκελετό έχοντας ελαφριά επιμήκυνση, τέτοια ώστε ακόμα και όταν υπό φυσιολογικές συνθήκες θα ήταν σε συμπίεση, να καταπονείται στα σημεία σύνδεσης με εφελκυσμό. Επιπλέον, για την διατήρηση του αεροδυναμικού σχήματος του κελύφους κατά την επιβολή των αεροδυναμικών φορτίων που ασκούνται κυρίως εγκάρσια στην επιφάνεια, τοποθετείται αφρώδες υλικό κάτω από το κέλυφος και στα σημεία που δεν υποστηρίζεται από τον σκελετό.

4. Αεροδυναμική Ανάλυση

Η αεροδυναμική ανάλυση περιλαμβάνει την ανάλυση των αεροδυναμικών φορτίων που καταπονούν την εν δυνάμει πτέρυγα στην οποία θα προσαρμοστεί ο υπό εξέταση μηχανισμός, η οποία υλοποιείται μέσω του προγράμματος προσομοίωσης SOLIDWORKS Flow Simulation. Το μοντέλο και το περιβάλλον προσομοίωσης εναρμονίζονται με τις προδιαγραφές που ετέθησαν.

Για τη μελέτη, επιλέγεται η αεροτομή NACA 2412 (Εικόνα 11), η οποία κρίνεται κατάλληλη για εφαρμογές συμβατικών UAV που σχεδιάζονται για μέση υποηχητική ταχύτητα. Το μήκος της χορδής καθορίζεται στο 1m και το ποσοστό της χορδής που καταλαμβάνει η παραμορφώσιμη επιφάνεια του aileron στο 20% του μήκους της χορδής, σύμφωνα με τη συνήθη κατασκευαστική πρακτική. Έτσι, το μήκος της χορδής που καταλαμβάνει το aileron είναι 200mm.



Εικόνα 11: Η NACA 2412 και οι διαστάσεις της μελετώμενης αεροτομής

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές που προκαθορίστηκαν, η μέγιστη απόκλιση του πηδαλίου κλίσης είναι $\pm 20^\circ$ (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Μορφή αεροτομών στις ακραίες θέσεις παραμόρφωσης

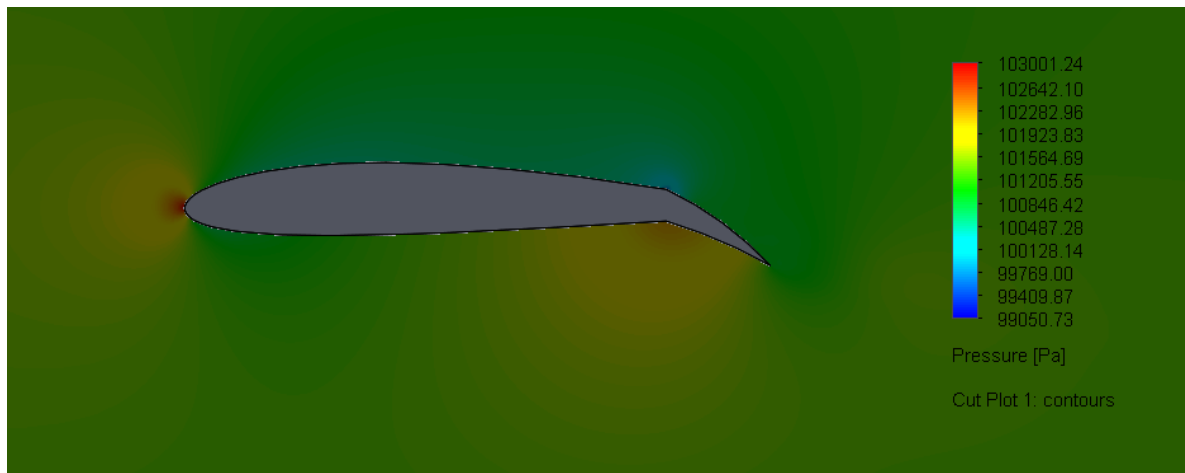
Η προσομοίωση είναι δισδιάστατη και γίνεται σε περιβάλλον αέρα θερμοκρασίας 20°C και ατμοσφαιρικής πίεσης και η ταχύτητα του αέρα ορίζεται στα 50m/s με μηδενική γωνία πρόσπτωσης σε σχέση με την αεροτομή.

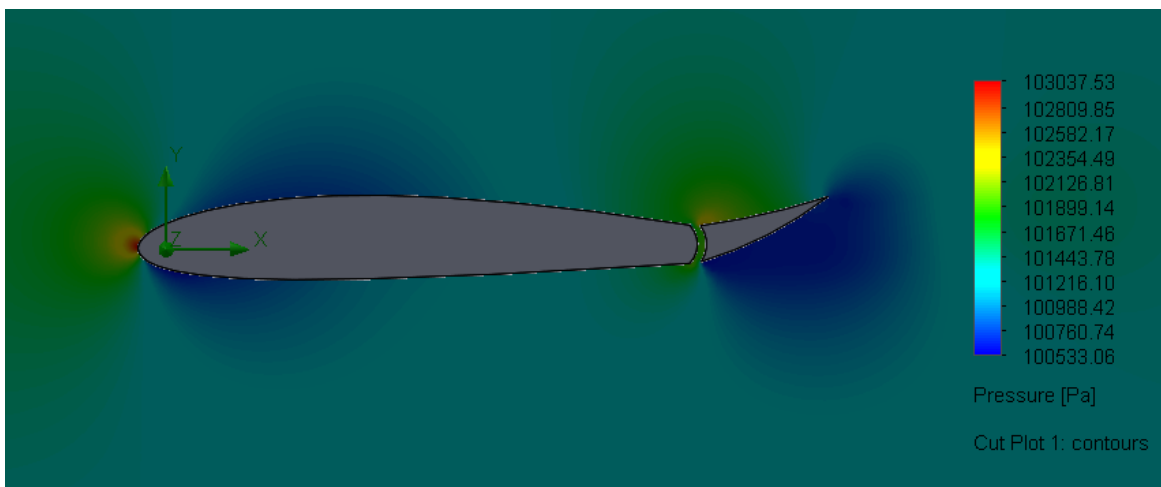
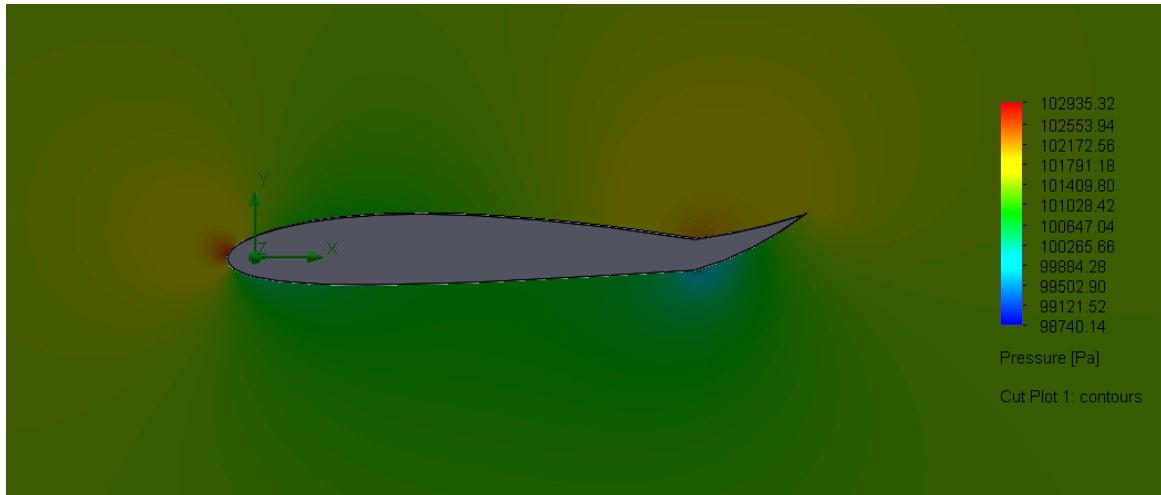
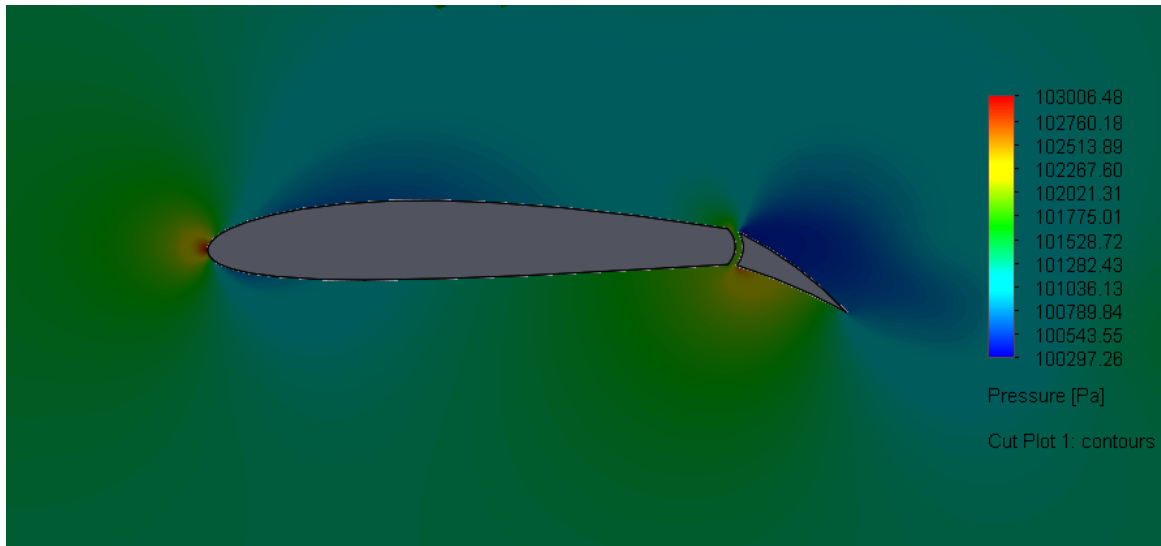
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επαληθεύουν τις εκτιμήσεις για την γεωμετρία της αεροτομής και προσφέρουν ενδιαφέροντα δεδομένα. Ειδικότερα, η αεροτομή με αρνητική

εκτροπή του πηδαλίου δέχεται συνισταμένη δύναμη προς τα πάνω (άνωση) ενώ η αεροτομή με θετική εκτροπή προς τα κάτω. Ενδεικτική της αποτελεσματικότητας της αεροτομής με ενσωματωμένα πηδάλια σε σχέση με την κλασσική αεροτομή με αρθρωτά πηδάλια, είναι η σύγκριση των δύο μοντέλων ως προς τη συνισταμένη δύναμη, η οποία φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Παρατηρούμε πως ενώ στην κατεύθυνση της ροής η δύναμη αντίστασης (drag) είναι παρόμοια και στους δύο τύπους πηδαλίων, στην κάθετη κατεύθυνση η δύναμη είναι αισθητά μεγαλύτερη στο ενσωματωμένο πηδάλιο γεγονός που αποδεικνύει πως το ενσωματωμένο πηδάλιο είναι πιο αποτελεσματικό στον χειρισμό του αεροσκάφους.

| Παραμόρφωση | Τύπος πηδαλίου | X- direction | Y- direction | Συνισταμένη δύναμη |
|-------------|----------------|--------------|--------------|--------------------|
| -20 degrees | Hingless | 28.0 | 165.2 | 167.8 |
| | Hinged | 30.8 | 112.1 | 116.2 |
| +20 degrees | Hingless | 17.4 | -156.5 | 157.6 |
| | Hinged | 17.5 | -43.9 | 47.3 |

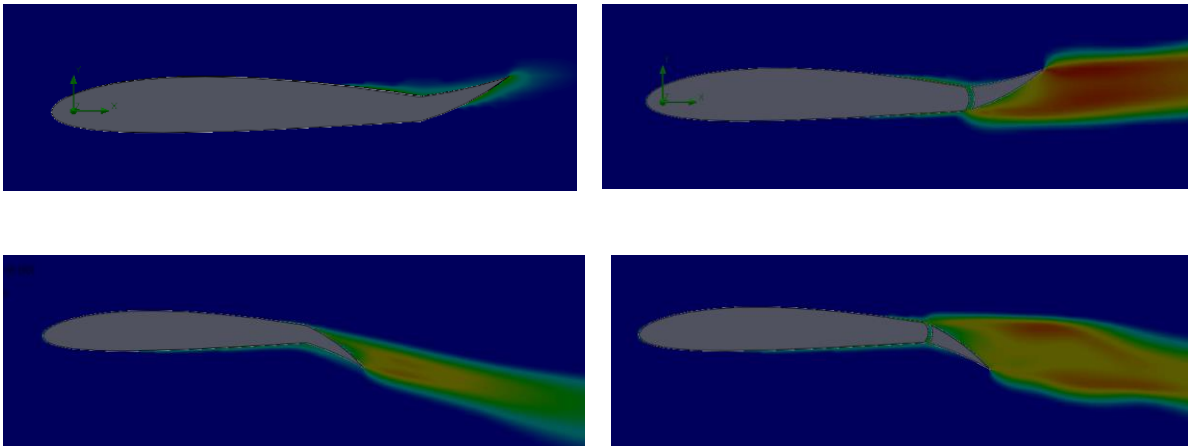
Πίνακας 1: Συσχέτιση αεροδυναμικού φορτίου με τύπο ΠΚ και παραμόρφωση





Εικόνα 13: Πεδίο ολικών πιέσεων γύρω από κάθε τύπο πηδαλίου

Συμπληρωματικά, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της παραπάνω αεροδυναμικής ανάλυσης, εξετάζεται η ένταση του ήχου που προκαλείται λόγω της ροής γύρω από κάθε αεροτομή και συγκρίνεται η περίπτωση του ενσωματωμένου πηδαλίου με του αρθρωτού. Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση, το αρθρωτό aileron παράγει περισσότερο θόρυβο. Στη περίπτωση της θετικής κλίσης του aileron, η μέγιστη ένταση είναι 100.3dB ενώ στην περίπτωση της αρνητικής κλίσης είναι 108.0dB. Αντίθετα, για το ενσωματωμένο aileron, οι τιμές αυτές είναι 64.7dB και 94.7dB αντίστοιχα.



Εικόνα 14: Συγκριτικές εικόνες πεδίων θορύβου γύρω από κάθε αεροτομή

Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν σε θεωρητικό επίπεδο την μείωση του θορύβου με τη χρήση ενσωματωμένων πηδαλίων, η οποία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους της ανάπτυξης της τεχνολογίας shape morphing στις πτέρυγες.

5. Σχεδιασμός και μελέτη σκελετού και κελύφους

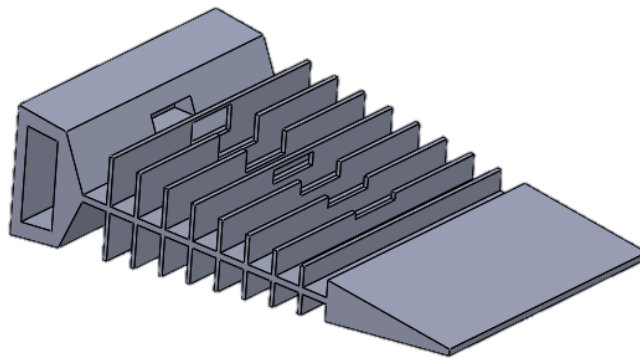
5.1 Προκαταρκτική σχεδίαση και μελέτη

Ο σχεδιασμός του μηχανισμού περιλαμβάνει την μελέτη της παραμορφούμενης δομής σε κινηματικό και δυναμικό επίπεδο και την επιλογή και προσαρμογή του κατάλληλου επενεργητή ώστε να επιτυγχάνεται η επιδιωκόμενη κίνηση. Ο σχεδιασμός γίνεται στη βάση της δυνατότητας εκπλήρωσης των προδιαγραφών και με γνώμονα την ικανότητα κατασκευής του με τα ελάχιστα δυνατά διατιθέμενα μέσα από το εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών.

Επαναλαμβάνοντας και εξειδικεύοντας στη σκελετική δομή του μηχανισμού όσα αναφέρθηκαν σχετικά στο 4^ο κεφάλαιο, αυτή σχεδιάζεται με σκοπό:

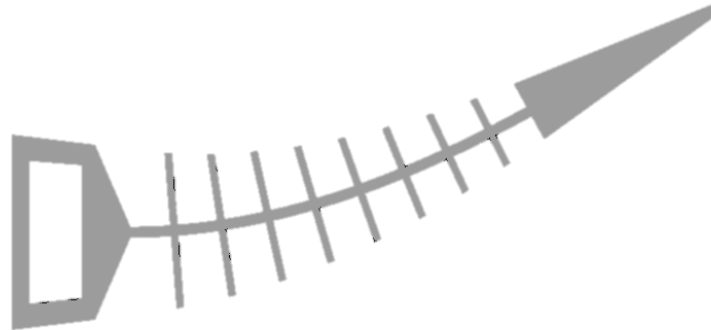
- να έχει μεγάλη ευκαμψία στο επίπεδο της αεροτομής
- να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη παραμορφωσιμότητα στην εγκάρσια διεύθυνση, δηλαδή κατά μήκος του εκπετάσματος της πτέρυγας
- να φέρει τον επενεργητή
- να συνδέεται με το κύριο σώμα της πτέρυγας
- να στηρίζει και να παραμορφώνει την επιφάνεια (skin) της πτέρυγας με την οποία έρχεται σε επαφή.

Η μορφή ψαροκόκαλου η οποία επιλέγεται και η οποία θα βελτιωθεί στη συνέχεια αφού διερευνηθούν στοιχειωδώς η κινηματική και δυναμική της συμπεριφορά φαίνεται στην Εικόνα 15.



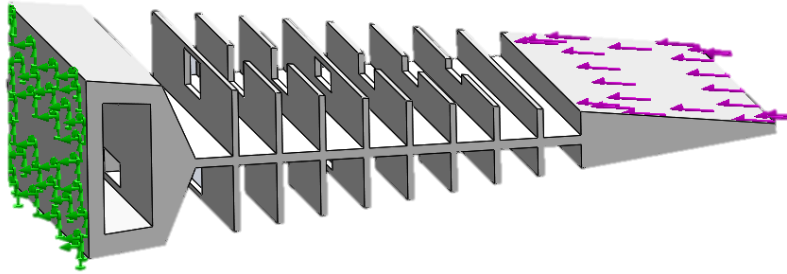
Εικόνα 15: Αδρή αναπαράσταση σκελετού

Όπως ορίσθηκε στις προδιαγραφές, στην τελική θέση της ακμής εκφυγής η εκτροπή της ακμής σε σχέση με την αρχική θέση είναι 20° , όπου αυτό αντιστοιχεί σε κατακόρυφη μετατόπιση $68.4mm$, δεδομένου ότι το μήκος του τμήματος που παραμορφώνεται είναι $200mm$ στην αρχική θέση. Η μορφή του σκελετού στην τελική θέση φαίνεται στην Εικόνα 16 και μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά με το πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού $y = -7 \cdot 10^{-7}x^3 + 0.0011x^2 - 0.032x + 0.947$.



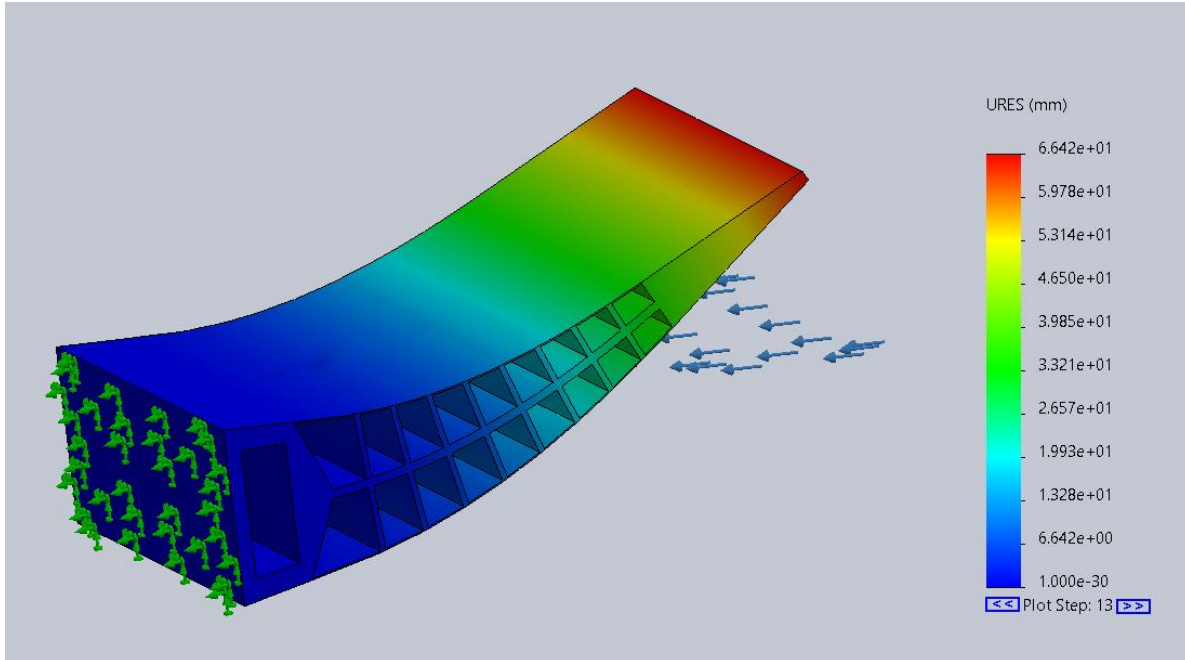
Εικόνα 16: Τομή σκελετού στη μέγιστη παραμόρφωση

Για τον υπολογισμό της δύναμης που απαιτείται για την παραμόρφωση του σκελετού χρησιμοποιείται το πακέτο Πεπερασμένων Στοιχείων του SOLIDWORKS. Η ανάλυση είναι μη γραμμική λόγω της μεγάλης παραμόρφωσης την οποία υπόκειται το μοντέλο. Η δύναμη εφαρμόζεται όπως φαίνεται στην Εικόνα 17, παρομοιάζοντας την δύναμη που ασκεί ο ιμάντας στην πραγματική κατασκευή. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την ανάλυση είναι το πλαστικό Acrylonitrile Butadiene Styrene, κοινώς ABS, το οποίο είναι συμβατό με την διαδικασία προσθετικής κατασκευής που θα περιγραφεί διεξοδικά στη συνέχεια. Παρότι το υλικό αυτό ενδεχομένως να μην είναι το βέλτιστο για τον προς μελέτη μηχανισμό, η ταύτιση του υλικού της προσομοίωσης με το διατιθέμενο υλικό για την πρωτοτυποποίηση βοηθάει αφενός στην αυξημένη πιθανότητα επιτυχημένης κατασκευής του πρωτοτύπου και αφετέρου στην σύγκριση του μοντέλου προσομοίωσης με το πραγματικό. Αυξάνοντας σταδιακά την επιβαλλόμενη δύναμη, προσδιορίζουμε την τιμή της για την απαιτούμενη παραμόρφωση στα $53N$.



Εικόνα 17: Τρόπος προσομοίωσης φορτίων

Στη συνέχεια, συμπεριλαμβάνεται το κέλυφος στην ανάλυση ώστε να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η απαιτούμενη δύναμη, εφόσον στα αποτελέσματα της μελέτης αυτής θα βασιστεί η επιλογή του επενεργητή. Το κέλυφος σχεδιάζεται με πάχος 0.5mm και για την προσομοίωση επιλέγεται ελαστομερές υλικό οι ιδιότητες του οποίου προσομοιάζουν τις μηχανικές ιδιότητες της σιλικόνης, η οποία αποτελεί και υποψήφιο υλικό. Συγκεκριμένα, η πυκνότητα είναι 1200kg/m^3 , το μέτρο ελαστικότητας 50000 N/m^2 και η αντοχή εφελκυσμού 10^7N/m^2 [6]. Κατά την ανάλυση, επειδή το υλικό είναι υπερελαστικό και ο λόγος Poisson κοντά στην τιμή 0.5, η συμπεριφορά του κελύφους προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας το υπερελαστικό μοντέλο Blatz-Ko. Στην προκειμένη περίπτωση, η δύναμη που απαιτείται για την παραμόρφωση του συστήματος είναι 55N.



Εικόνα 18: Μορφή σκελετού και κελύφους στη μέγιστη παραμόρφωση

Για την αποφυγή συντονισμού του συστήματος, κρίνεται σκόπιμο να προσδιοριστεί η φυσική συχνότητα του μηχανισμού και να συγκριθεί με το εύρος συχνοτήτων στις οποίες λειτουργεί το σύστημα. Υποτίθεται ότι ο μηχανισμός αποτελείται από τον σκελετό και τον ιμάντα που χρησιμοποιείται για την παραμόρφωση, έχει έναν βαθμό ελευθερίας, αυτόν ο οποίος επιδιώκεται να ελεγχθεί με τον επενεργητή. Η φυσική συχνότητα του συστήματος δίνεται από τη σχέση: $\omega = \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}}$ όπου k η δυσκαμψία του συστήματος, η οποία εκφράζεται συναρτήσει της δυσκαμψίας των επιμέρους τμημάτων.

Για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας του σκελετού, δεδομένης της μεγάλης παραμόρφωσης και επομένως της χρήσης μη γραμμικού μοντέλου ανάλυσης, λαμβάνεται η μέση τιμή των επιμέρους τιμών δυσκαμψίας που προκύπτουν από προσομοιώσεις στο Solidworks για διαφορετικές τιμές φόρτισης. Έτσι, χρησιμοποιώντας το νόμο του Hook, $F = kx$, προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

| Φορτίο (N) | Παραμόρφωση (mm) | Δυσκαμψία (N/mm) |
|------------|------------------|------------------|
| 10 | 4.77 | 2.096 |
| 20 | 11.33 | 1.765 |

| | | |
|----|-------|-------|
| 30 | 20.82 | 1.441 |
| 40 | 35.32 | 1.133 |
| 50 | 58.56 | 0.854 |
| 60 | 91.72 | 0.654 |

Πίνακας 2: Δυσκαμψία σκελετού συναρτήσει του φορτίου

από τα οποία προκύπτει ότι $k = 1.32N/mm = 1320N/m$.

Ακολούθως, παρότι η δυσκαμψία του κελύφους είναι μικρή δεδομένου ότι αποτελείται από ελαστομερές υλικό, για την ρεαλιστικότερη προσέγγιση του προβλήματος επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία συμπεριλαμβάνοντας στην προσομοίωση και το κέλυφος.

| Φορτίο (N) | Παραμόρφωση (mm) | Σταθερά δυσκαμψίας (N/mm) |
|------------|------------------|---------------------------|
| 10 | 4.55 | 2.197 |
| 20 | 10.69 | 1.870 |
| 30 | 19.40 | 1.546 |
| 40 | 32.36 | 1.236 |
| 50 | 52.73 | 0.948 |
| 60 | 82.44 | 0.728 |

Πίνακας 3: Δυσκαμψία συστήματος σκελετού - κελύφους συναρτήσει του φορτίου

Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι η μέση δυσκαμψία του συστήματος σκελετός – κέλυφος είναι $k = 1.42 N/mm = 1420 N/m$. Παρατηρείται ότι η σταθερά δυσκαμψίας του συστήματος δεν μεταβάλλεται σημαντικά γεγονός που αποτιμάται θετικά καθώς επιδιώκουμε την ελάχιστη αντίσταση του κελύφους στην παραμόρφωση του σκελετού.

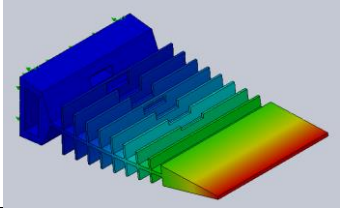
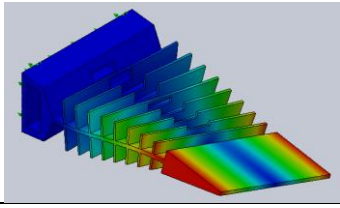
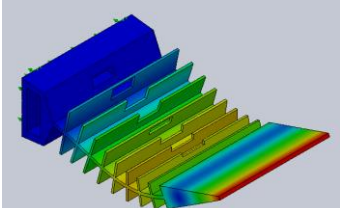
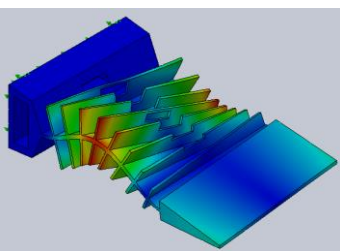
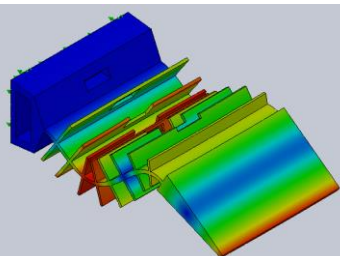
Επιπλέον, η δυσκαμψία του ιμάντα είναι $417N/m$ [7].

Θεωρώντας ότι τα ελαστικά επιμέρους τμήματα του μηχανισμού (σκελετός, κέλυφος, ιμάντας) είναι συνδεδεμένα παράλληλα, η συνολική δυσκαμψία προκύπτει ίση με $k_{tot} = 1837N/m$.

Λαμβάνοντας την τιμή για την μάζα του σκελετού και του κελύφους από το SOLIDWORKS ίση με $408.5gr$ και του ιμάντα $40gr$, η συνολική μάζα του συστήματος είναι $448.5gr$.

Επομένως, η φυσική συχνότητα κάμψης του σκελετού είναι $\omega = \left(\frac{k}{m}\right)^{\frac{1}{2}} = 63.70\text{Hz}$.

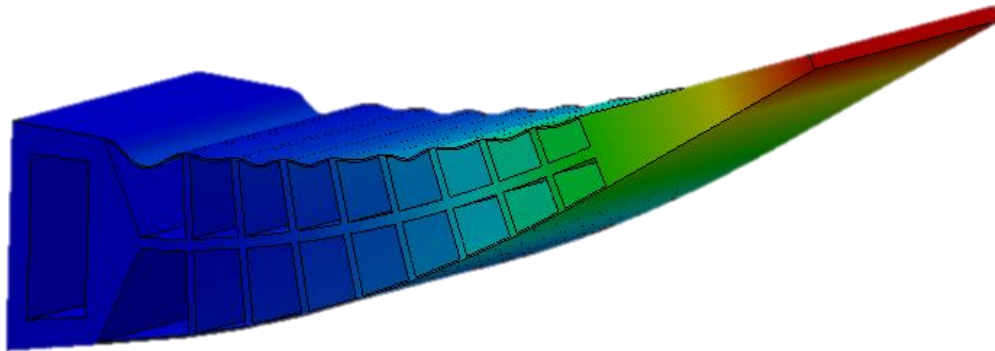
Ακολούθως, προσδιορίζονται οι ιδιοσυχνότητες του σκελετού μέχρι 5^{ης} ιδιομορφής με τη χρήση της κατάλληλης προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

| Ιδιομορφή | Ιδιοσυχνότητα | |
|----------------|---------------|---|
| 1 ^η | 12.53 Hz |  |
| 2 ^η | 51.78 Hz |  |
| 3 ^η | 94.99 Hz |  |
| 4 ^η | 241.27 Hz |  |
| 5 ^η | 277.21 Hz |  |

Πίνακας 4: Ιδιοσυχνότητες σκελετού στο λογισμικό προσομοίωσης

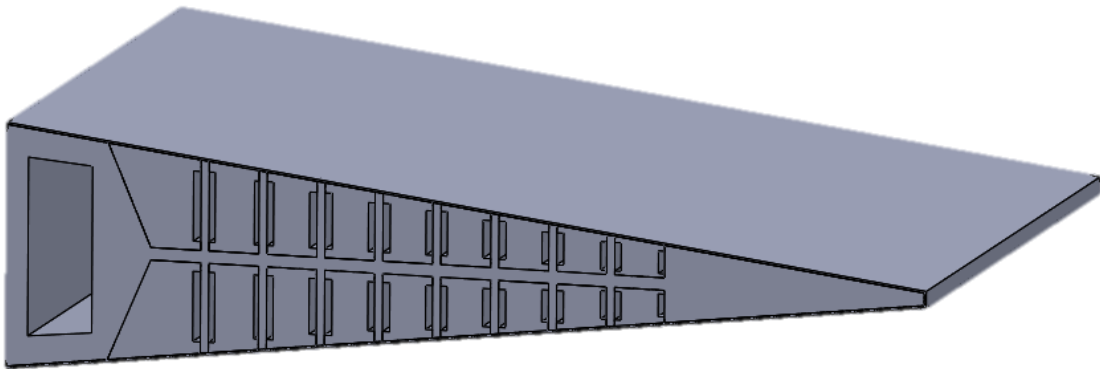
5.2 Μελέτη κελύφους

Το κέλυφος κρίνεται αναγκαίο να μελετηθεί ως προς την αντοχή του στην αεροδυναμική πίεση ιδιαιτέρως στην προκειμένη περίπτωση όπου αποτελείται από ελαστομερές υλικό. Από την αεροδυναμική μελέτη εξάγεται το συμπέρασμα ότι μία ασφαλής τιμή της πίεσης στην επιφάνεια της πτέρυγας για την εξέταση της αντοχής του κελύφους είναι τα $400N/m^2$. Η πίεση επιβάλλεται ομοιόμορφα στην άνω επιφάνεια της πτέρυγας και το αποτέλεσμα της προσομοίωσης αποτυπώνεται στην Εικόνα 19. Παρατηρείται μη αποδεκτή παραμόρφωση του κελύφους μεταξύ των νεύρων η οποία προφανώς καταστρέφει την αεροδυναμική απόδοση του πηδαλίου και κατ' επέκταση απαιτείται η επίλυση του προβλήματος.

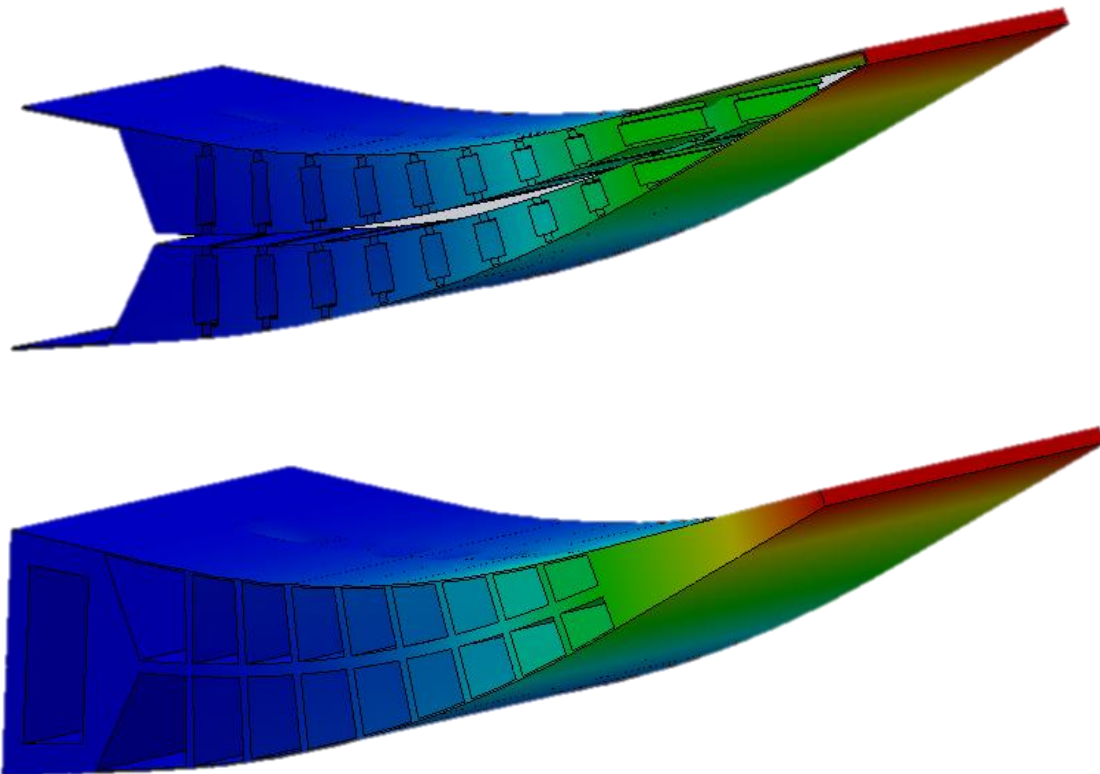


Εικόνα 19: Παραμόρφωση κελύφους υπό την επίδραση επιφανειακής πίεσης.

Για το σκοπό αυτό επιλέγεται η προσθήκη αφρώδους υλικού μεταξύ των νεύρων ώστε να μειώνει την ανεπιθύμητη παραμόρφωση του κελύφους χωρίς να δυσκολεύει την κάμψη του πτερυγίου σε μεγάλο βαθμό. Αυτό αποτελείται από πολυουρεθάνη με πυκνότητα $16kg/m^3$, μέτρο ελαστικότητας $1MPa$, αντοχή σε εφελκυσμό $0.5MPa$ και αντοχή σε συμπίεση $0.05MPa$ [6]. Στο μοντέλο τα τμήματα αφρού μοντελοποιούνται έτσι ώστε να μην εφάπτονται στα τοιχώματα των νεύρων (Εικόνα 20) ώστε να μην αλληλεπιδρούν οι δύο επιφάνειες κατά την προσομοίωση, ωστόσο αυτό δεν αποτελεί σχεδιαστική αναγκαιότητα στο πραγματικό μοντέλο. Με αυτή την προσθήκη αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της ανεπιθύμητης παραμόρφωσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 21.



Εικόνα 20: Μοντέλο με προσθήκη τμημάτων αφρού για την υποστήριξη του κελύφους

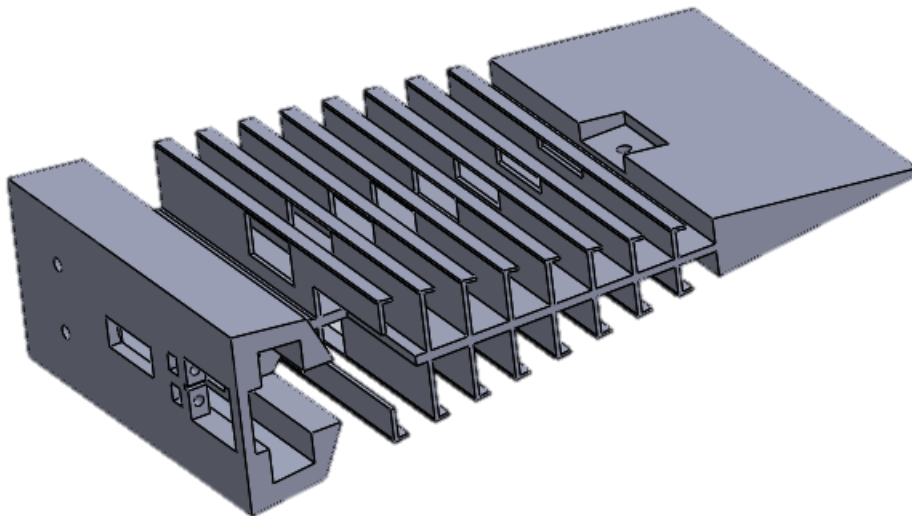


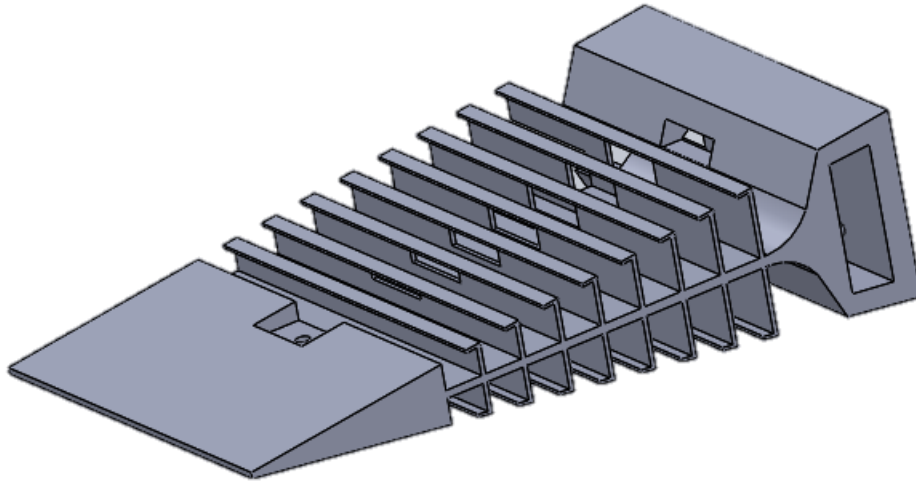
Εικόνα 21: Παραμόρφωση συστήματος με την προσθήκη αφρού σε όψη χωρίς τον σκελετό (άνω) και χωρίς τον αφρό (κάτω).

5.3 Τελικός σχεδιασμός σκελετού

Ο τελικός σχεδιασμός του σκελετού συνιστά το τελικό αποτέλεσμα πολλών επιμέρους δοκιμών και των συνεπακόλουθων βελτιώσεων. Οι δοκιμές αφορούν τόσο σε προσομοιώσεις όσο και σε κατασκευή δοκιμών. Σε αυτές, άλλοτε τα αποτελέσματα ήταν μη αποδεκτά και απαιτείτο η επίλυση των προβλημάτων και άλλοτε επιδέχονταν βελτίωσης. Επιπλέον, στον σχεδιασμό περιλαμβάνονται όλες οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες ώστε να συνδέονται κατάλληλα όλα τα επιμέρους συστήματα του μηχανισμού. Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται η τελική μορφή του σκελετού και η απαραίτητη μελέτη σε επίπεδο προσομοίωσης πριν την κατασκευή.

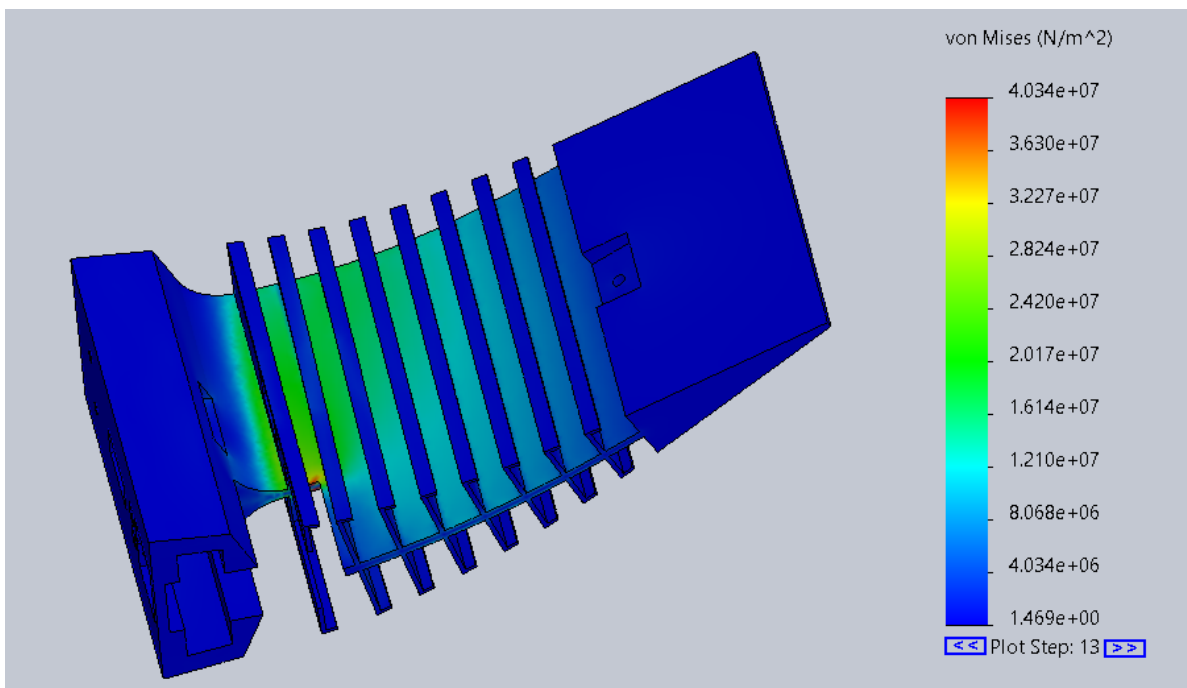
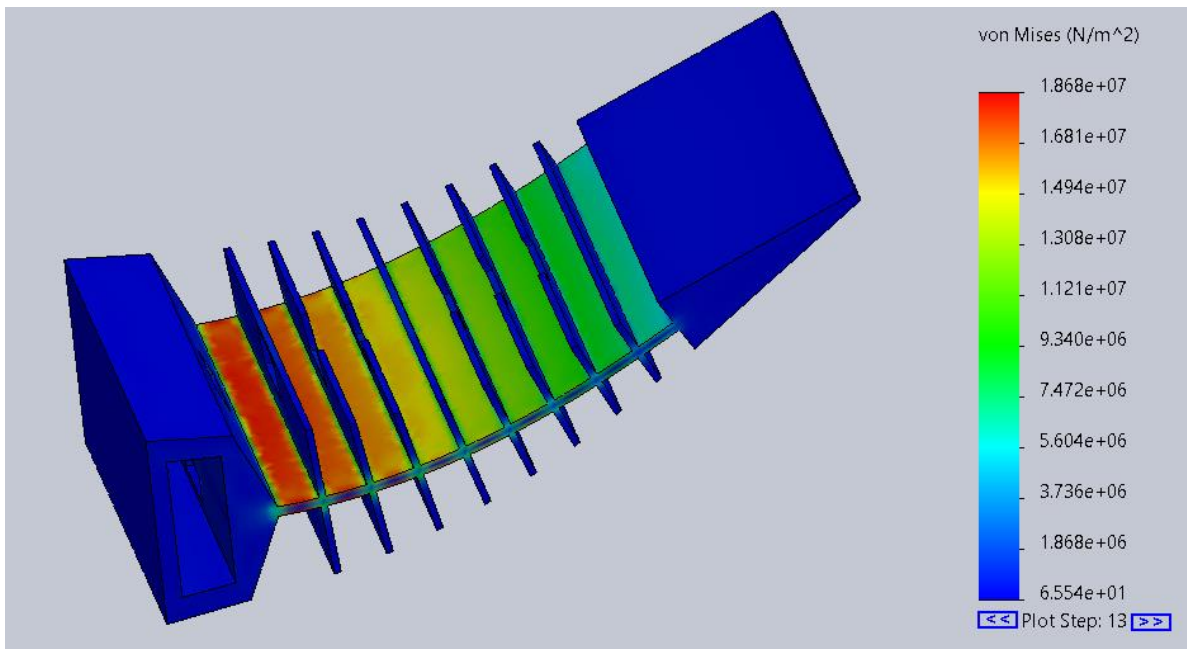
Σε σχέση με τη γεωμετρία του αρχικού σκελετού στην οποία βασίστηκε η προκαταρκτική μελέτη παρατηρούνται οι ακόλουθες διαφοροποιήσεις. Στο εσωτερικό άκρο του σκελετού υπάρχει κατάλληλη διαμόρφωση ώστε να τοποθετηθεί ο επενεργητής FS5115M και η τροχαλία που μεταφέρει την κίνηση στον ιμάντα. Επιπλέον, κατά μήκος της χορδής υπάρχουν ανοίγματα από τα οποία περνάει ο ιμάντας και τα οποία περιορίζουν την κίνησή του ώστε να μην έρχεται σε επαφή με το κέλυφος κατά την παραμόρφωση. Τέλος, στην άκρη κάθε νεύρου, εκτός του τελευταίου, υπάρχει επίπεδη επιφάνεια στην οποία προσδένεται το κέλυφος ώστε να ακολουθεί την γεωμετρία του σκελετού.





Εικόνα 22: Όψεις τελικής μορφής σκελετού

Αναφορικά με την καταπόνηση κατά την παραμόρφωση του σκελετού, αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα ανισοκατανομής των τάσεων και υπερβολικής επιβάρυνσης του βραχίονα μεταξύ του εσωτερικού άκρου και του πρώτου νεύρου. Αυτό επετεύχθη με τη μεταβολή του σχήματος του βραχίονα κατά τρόπο ώστε η διατομή του να μειώνεται προς το εξωτερικό άκρο και με την προσθήκη καμπύλου νεύρου στο εσωτερικό άκρο. Έτσι, παρατηρείται πιο ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων κατά μήκος του βραχίονα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 23.

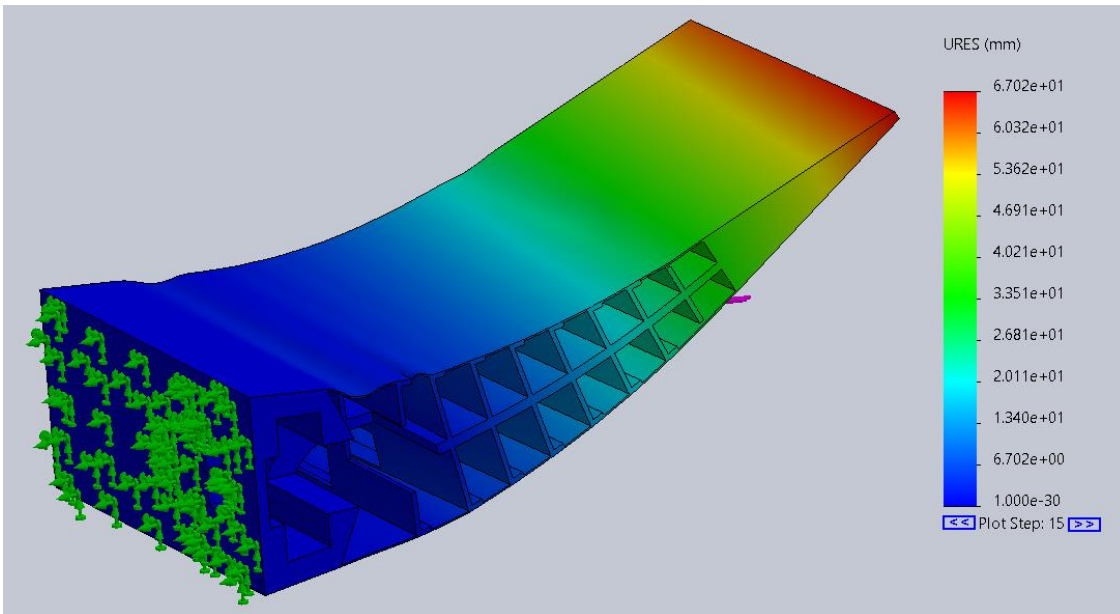


Εικόνα 23: Συγκριτικές εικόνες ανάπτυξης τάσεων στον αρχικό και τελικό σκελετό

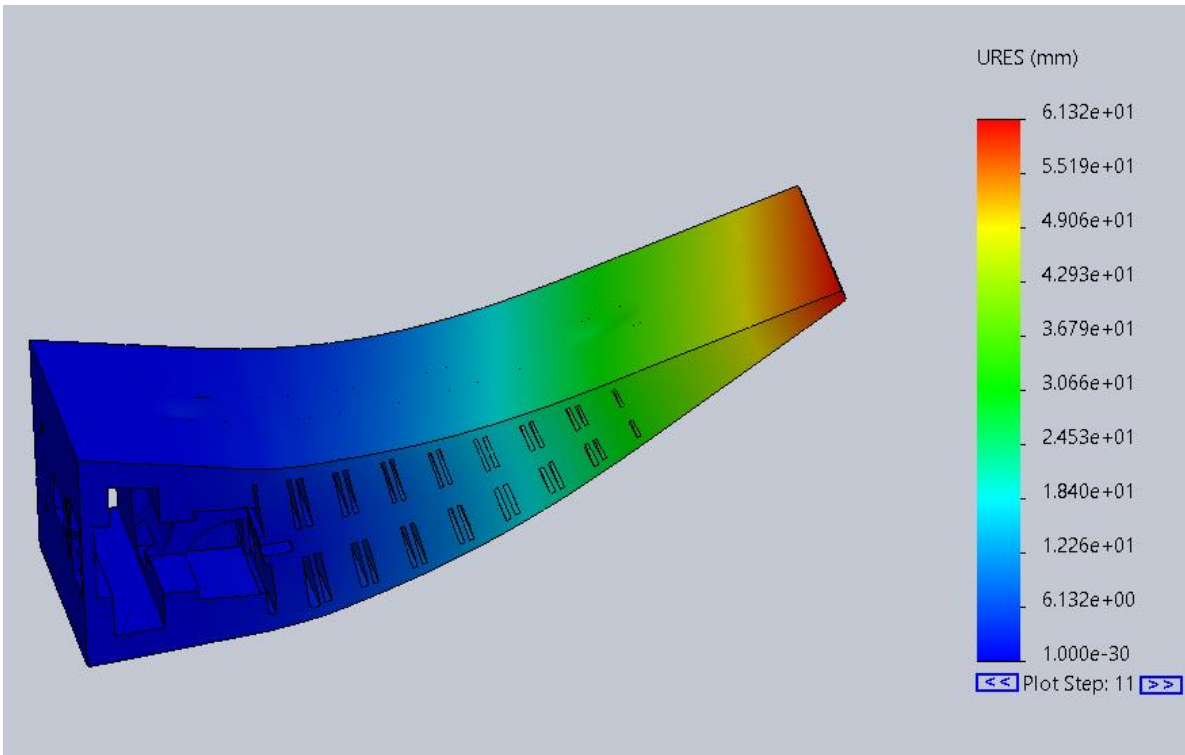
Σημειώνεται ότι στην επίλυση του μοντέλου εμφανίζεται στρέψη του σκελετού λόγω της αφαίρεσης υλικού στο σημείο τοποθέτησης του επενεργητή. Η στρέψη αυτή δεν λαμβάνεται υπόψιν και θα μελετηθεί στο πρωτότυπο δοκίμιο καθώς πιθανώς θα

αποφευχθεί λόγω του ότι ο επενεργητής εφαρμόζοντας σφικτά πάνω στον σκελετό, αποτελεί δομικό του μέρος του.

Η απαιτούμενη δύναμη για την επιδιωκόμενη παραμόρφωση του σκελετού είναι 68N και είναι αυξημένη σε σχέση με την προκαταρκτική μελέτη καθώς το φορτίο επιβάλλεται πιο κοντά στον άξονα ως προς τον οποίο κάμπτεται ο σκελετός μειώνοντας την ροπή που προκαλεί. Συνυπολογίζοντας το κέλυφος στην ανάλυση η δύναμη ανέρχεται στα 71N.



Εικόνα 24: Τελική μορφή παραμορφωμένου συστήματος σκελετού-κελύφους



Εικόνα 25: Τελική μορφή παραμορφωμένου συστήματος σκελετού, κελύφους και αφρώδους

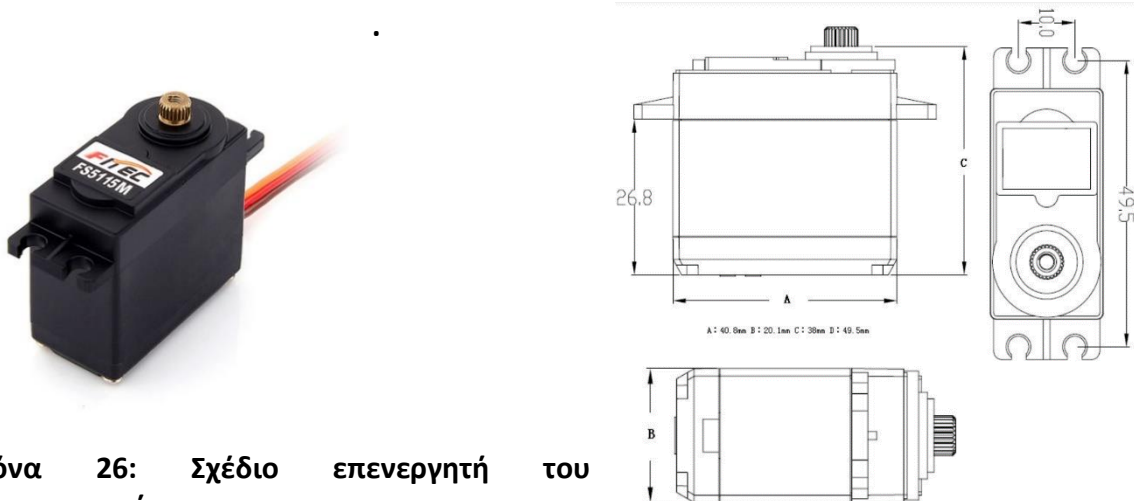
6. Σχεδιασμός, μελέτη και επιλογή λοιπών εξαρτημάτων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η μελέτη των λοιπών εξαρτημάτων που απαρτίζουν τον μηχανισμό ώστε να εξασφαλίζεται η ορθή και ασφαλής λειτουργία του συστήματος.

Για την ορθότερη προσέγγιση των επιβαλλόμενων φορτίων, προστίθεται το φορτίο της αεροδυναμικής αντίστασης όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο στο ήδη υπολογισμένο φορτίο των 71N για την κάμψη του συστήματος. Η τιμή του φορτίου προσεγγίζεται υπολογίζοντας την αεροδυναμική αντίσταση στην κάθετη επιφάνεια στη ροή που προκύπτει στην μέγιστη παραμόρφωση. Έτσι, από τον τύπο $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A$, για ταχύτητα $v=50\text{m/s}$, πυκνότητα αέρα $\rho = 1.21\text{kg/m}^3$, $C_D = 1.1$ και κάθετη επιφάνεια $A = 125 \times 68\text{mm}^2$, η δύναμη προκύπτει 14N.

6.1 Επενεργητής

Ο επενεργητής καλείται να ανταποκρίνεται κατάλληλα στο σήμα ελέγχου και να παράγει την απαιτούμενη ροπή για την παραμόρφωση του συστήματος. Ειδικότερα, πρέπει να λειτουργεί μεταξύ δύο ακραίων γωνιών και ταυτόχρονα να έχει τη δυνατότητα να λάβει και όλες τις ενδιάμεσες γωνίες. Ο τύπος επενεργητή που λειτουργεί κατ' αυτόν τον τρόπο είναι ο σερβοκινητήρας. Όσον αφορά στην ικανότητα παραγωγής ισχύος, σύμφωνα με την δομική ανάλυση του 6^{ου} κεφαλαίου, η εφελκυστική δύναμη που απαιτείται από τον τένοντα για την κάμψη του βραχίονα και του κελύφους είναι 71N. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι το κέλυφος πιθανόν να μην έχει την επιθυμούμενη ελαστικότητα καθώς και το αεροδυναμικό φορτίο, εκτιμάται με μεγάλο περιθώριο ασφαλείας ότι ο επενεργητής θα πρέπει να μπορεί να ασκήσει φορτίο 120N στον τένοντα. Δεδομένου ότι ο άξονας στον οποίο προσδένεται ο τένοντας έχει ακτίνα περίπου 1cm, επιλέγεται επενεργητής με μέγιστη ροπή 15kg.cm. Ένας επενεργητής μεταξύ πολλών που ικανοποιεί τις απαιτήσεις είναι ο Feetech FS5115M του οποίου τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.



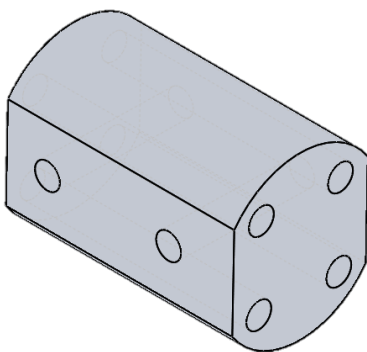
Εικόνα 26: Σχέδιο επενεργητή του κατασκευαστή

| | |
|----------------------|-------------------------|
| Τάση λειτουργίας | 4.8V |
| Εύρος γωνιών | 180 ⁰ |
| Μέγιστη ροπή | 14kg.cm |
| Εύρος πλάτους παλμού | 500-2500μsec |
| Βάρος | 58.5gr |
| Εύρος θερμοκρασιών | -15 – 70 ⁰ C |
| Τύπος κινητήρα | Metal Brush Motor |
| Υλικό γκραναζιών | Μεταλλικά |

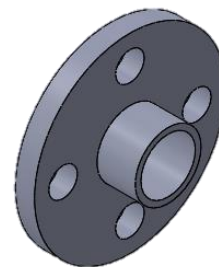
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά λειτουργίας επενεργητή

6.2 Τροχαλία

Η τροχαλία (Εικόνα 28) αποτελεί το μέλος του μηχανισμού που μεταφέρει την κίνηση από τον επενεργητή στους τένοντες. Έτσι, αφενός πρέπει να συνδέει κατάλληλα αυτά τα δύο μέλη και αφετέρου να αντέχει στις επιβαλλόμενες καταπονήσεις. Η τροχαλία συνδέεται με τον επενεργητή παρεμβάλλοντας έναν εμπορεύσιμο κυλινδρικό σύνδεσμο (Εικόνα 28) που φέρει κατάλληλη διαμόρφωση σύνδεσης με τον άξονα του επενεργητή. Ο σύνδεσμος συνδέεται με την τροχαλία μέσω τεσσάρων κοχλιών με την σύσφιξη να επιτυγχάνεται με περικόχλια.



Εικόνα 27: Τρισδιάστατη όψη τροχαλίας



Εικόνα 28: Σύνδεσμος

Όσον αφορά στην σύνδεση τροχαλίας και ιμάντα, αυτός προσδένεται στην τροχαλία με τη χρήση δύο κοχλιών. Μεταξύ ιμάντα και κοχλιών παρεμβάλλεται μεταλλικό ορθογωνικό παρέμβυσμα ώστε να καταπονείται πιο ομοιόμορφα ο ιμάντας στο σημείο πρόσδεσης.

Η τροχαλία κατασκευάζεται από υλικό PLA, τουλάχιστον στην φάση της πρωτοτυποποίησης.

6.3 Τένοντες

Οι τένοντες υλοποιούνται μέσω ιμάντα. Ο ιμάντας είναι σταθερά συνδεδεμένος με την τροχαλία μέσω κοχλιών σε αντίθεση με την λειτουργία του συμβατικού συστήματος ιμάντα-τροχαλίας όπου η σύζευξη της μεταξύ τους κίνησης επιτυγχάνεται μέσω τριβής η οποία εξασφαλίζεται με την προένταση του ιμάντα. Επομένως στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται δεδομένη η μετάδοση της κίνησης από την τροχαλία στον ιμάντα, δίνεται ωστόσο έμφαση στην ακρίβεια με την οποία μεταφέρεται η κίνηση. Για την επίτευξη ακρίβειας είναι απαραίτητη η προένταση του ιμάντα ώστε η ελαστική του παραμόρφωση λόγω επιβολής φορτίου να μην επηρεάζει την επιδιωκόμενη κίνηση. Το φορτίο που καλείται να μεταφέρει ο ιμάντας είναι 85N (71N + 14N). Για ιμάντα από Nylon με μέτρο ελαστικότητας ανά χιλιοστό πλάτους 3878.82 N/mm, η επιμήκυνση είναι $\delta = \frac{lF}{AE} = 0.004mm$, όπου $l = 165$ mm το μήκος του ιμάντα, $A = 1 \times 25mm^2$ η κάθετη επιφάνεια στην καταπόνηση και $E = 3878.82 \times 25$ N/mm². Η επιμήκυνση αυτή θεωρείται αμελητέα επομένως ο ιμάντας δεν χρειάζεται προένταση.

6.4 Κοχλίες

Στο σύνολο του μηχανισμού χρησιμοποιούνται ζεύγη κοχλιών - περικοχλιών για την σύνδεση των εξαρτημάτων μεταξύ τους. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται για την σύνδεση:

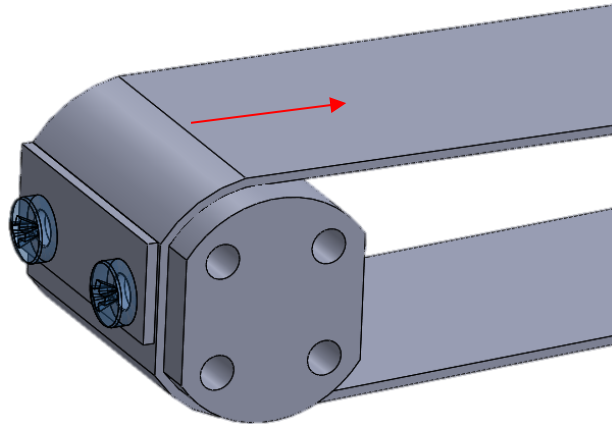
- του ιμάντα με την τροχαλία και με τον σκελετό
- του επενεργητή με τον σκελετό
- της τροχαλίας με τον επενεργητή

Στη συνέχεια παρατίθενται οι υπολογισμοί αντοχής των κοχλιών στις επιβαλλόμενες φορτίσεις δεδομένου ότι οι διαστάσεις τους είναι προκαθορισμένες από τα εμπορεύσιμα εξαρτήματα. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται δεδομένα από το βιβλίο «Στοιχεία Μηχανών» του Χ. Παπαδόπουλου [8].

Κοχλίας σύνδεσης ιμάντα με τροχαλία

Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται μέσω δύο κοχλιών M3 και των αντίστοιχων περικοχλιών. Για την ομοιόμορφη καταπόνηση του ιμάντα στο σημείο της σύνδεσης, τοποθετείται μεταλλικό παρέμβυσμα μεταξύ κοχλιών και ιμάντα. Έτσι, όταν ο ιμάντας κάμπτεται το σύστημα με την απαιτούμενη δύναμη $F=85N$ (κόκκινο διάνυσμα), οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ ιμάντα και τροχαλίας - παρεμβύσματος είναι παράλληλες στο επίπεδο κάθετο στον κορμό των κοχλιών. Θεωρώντας ότι στην χειρίστη περίπτωση αναπτύσσεται τριβή μόνο μεταξύ

ιμάντα και παρεμβύσματος και όχι μεταξύ ιμάντα και τροχαλίας, η τριβή αυτή θα πρέπει να ισούται με την δύναμη F . Η δύναμη τριβής είναι $T = \mu N$, όπου $\mu=0.2$ ο συντελεστής τριβής μεταξύ ιμάντα υλικού Νylon και παρεμβύσματος χάλυβα και N η δύναμη που αναπτύσσεται λόγω της σύσφιξης του κοχλίου.



Εικόνα 29: Συνδεσμολογία ιμάντα - τροχαλίας

Από τα παραπάνω υπολογίζεται η $N = \frac{F}{\mu} = \frac{85}{0.2} = 425N$ η οποία επιμερίζεται στους δύο κοχλίες. Έτσι προκύπτει η δύναμη πρότασης για κάθε κοχλία $F_i=212.5N$.

Για κοχλία μετρικού σπειρώματος M3 οι πρότυπες διαστάσεις είναι: βήμα $P=0.5mm$, ονομαστική διάμετρος $d=3mm$, μέση διάμετρος $d_2=2.675mm$, εσωτερική διάμετρος $d_3=2.387mm$, $d_m=2.531mm$, φορτιζόμενη επιφάνεια $A_s=5.03mm^2$, γωνία κλίσης σπειρώματος $\alpha=3.1^\circ$.

Επιπλέον, για συντελεστή τριβής $\mu=0.15$ μεταξύ κοχλίας και περικοχλίου και γωνία μετρικού σπειρώματος $\beta=60^\circ$ ισχύει $\tan\rho' = \frac{\mu}{\cos(\frac{\beta}{2})} = 0.17$.

Η εφελκυστική τάση στον κορμό του κοχλίας είναι $\sigma = \frac{F_i}{A_s} = 42.25MPa$.

Η ροπή σύσφιξης είναι $M_i = F_i \tan(\rho' + \alpha) \frac{d_2}{2} = 64.05Nmm$.

Η διατμητική τάση είναι $\tau = \frac{16M_i}{\pi d_3^3} = 23.99MPa$.

Η ισοδύναμη τάση σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = 63.93MPa$ και λαμβάνοντας όριο διαρροής του χάλυβα $S_y=200MPa$ και συντελεστή ασφαλείας 1.5, η σύνδεση θεωρείται ασφαλής.

Όσον αφορά στην καταπόνηση του κοχλίου και του περικοχλίου, ακολουθεί η αντίστοιχη μελέτη.

Καταρχάς, το περικόχλιο που χρησιμοποιείται έχει ύψος $h_\pi = 1.8mm$ και το βήμα του σπειρώματος είναι $P=0.5$, επομένως, οι σπείρες που χρησιμοποιούνται για την σύσφιξη είναι $n = \frac{h_\pi}{P} = 3.6$. Επιπλέον, το ύψος της σπείρας στην εσωτερική διάμετρο είναι $b=0.5mm$ και το ύψος του σπειρώματος είναι $H_1 = 0.541P = 0.271mm$.

Η επιφάνεια του σπειρώματος που παραλαμβάνει την δύναμη μεταξύ κοχλίου-περικοχλίου είναι $A_\sigma = n(\pi d_2 H_1) = 8.198mm^2$.

Η μέση διατμητική τάση στο σπείρωμα του κοχλίου είναι $\tau_\kappa = \frac{F_i}{\pi d_3 n b} = \frac{212.5}{\pi \cdot 2.387 \cdot 3.6 \cdot 0.5} = 15.74MPa$.

Η επιφανειακή τάση σπειρώματος του κοχλίου και του περικοχλίου είναι $\sigma_b = \frac{F_i}{A_\sigma} = 25.92MPa$ και κρίνεται αποδεκτή για επιτρεπόμενη επιφανειακή πίεση κοχλίου – περικοχλίου από χάλυβα – χυτοσίδηρο 120MPa.

Η καμπτική τάση σπειρώματος είναι $\sigma = \frac{3F_i h}{\pi d_m n b^2} = 24.14MPa$.

Η ισοδύναμη τάση του σπειρώματος του κοχλίου σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{ολ}^2 + 4\tau_\kappa^2} = 59.14MPa$.

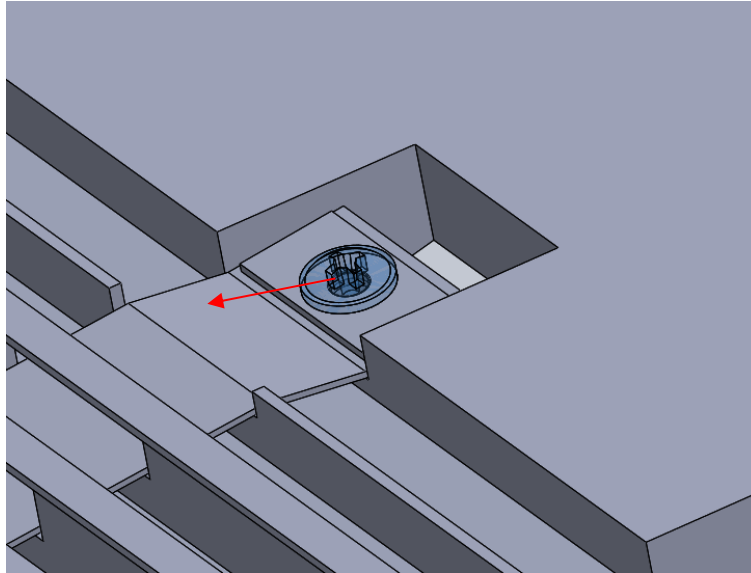
Η μέση διατμητική τάση στο σπείρωμα του περικοχλίου είναι $\tau_\pi = \frac{F_i}{\pi d_1 n b} = \frac{212.5}{\pi \cdot 2.459 \cdot 3.6 \cdot 0.5} = 15.28MPa$.

Η ισοδύναμη τάση στο σπείρωμα του περικοχλίου σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{ολ}^2 + 4\tau_\pi^2} = 52.34MPa$.

Για όριο διαρροής 200MPa όπως ανωτέρω, η σύνδεση κρίνεται ασφαλής.

Κοχλίας σύνδεσης ιμάντα με σκελετό

Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται κοχλίας – περικόχλιο M4 και ο τρόπος σύνδεσης του ιμάντα με τον σκελετό είναι όμοιος με τον τρόπο σύνδεσης με την τροχαλία, ωστόσο εδώ χρησιμοποιείται ένας κοχλίας ο οποίος ασκεί όλη την δύναμη πρότασης $F_i=425N$.



Εικόνα 30: Συνδεσμολογία ιμάντα με σκελετό

Για κοχλία μετρικού σπειρώματος M4 ισχύουν: βήμα $P=0.7mm$, ονομαστική διάμετρος $d=4mm$, μέση διάμετρος $d_2=3.545mm$, εσωτερική διάμετρος $d_3=3.141mm$, $d_m=3.343mm$, φορτιζόμενη επιφάνεια $A_s=8.78mm^2$, γωνία κλίσης σπειρώματος $\alpha=3.2^\circ$.

Επιπλέον, για συντελεστή τριβής $\mu=0.15$ μεταξύ κοχλία και περικοχλίου και γωνία μετρικού σπειρώματος $\beta=60^\circ$ υπολογίζεται $\tan\rho' = \frac{\mu}{\cos(\frac{\beta}{2})} = 0.17$.

Η εφελκυστική τάση στον κορμό του κοχλία είναι $\sigma = \frac{F_i}{A_s} = 48.41MPa$.

Η ροπή σύσφιξης είναι $M_i = F_i \tan(\rho' + \alpha) \frac{d_2}{2} = 171.15Nmm$.

Η διατμητική τάση είναι $\tau = \frac{16M_i}{\pi d_3^3} = 28.13MPa$.

Η ισοδύναμη τάση σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} = 74.22MPa$ και λαμβάνοντας όριο διαρροής του χάλυβα $S_y=200MPa$ και συντελεστή ασφαλείας 1.5, η σύνδεση θεωρείται ασφαλής.

Όσον αφορά στην καταπόνηση του κοχλία και του περικοχλίου, ακολουθεί η αντίστοιχη μελέτη.

Καταρχάς, το περικόχλιο που χρησιμοποιείται έχει ύψος $h_\pi = 2.2mm$ και το βήμα του σπειρώματος είναι $P=0.7$, επομένως, οι σπείρες που χρησιμοποιούνται για την σύσφιξη είναι $n = \frac{h_\pi}{P} = 3.1$. Επιπλέον, το ύψος της σπείρας στην εσωτερική διάμετρο είναι

$b=0.7mm$, το ύψος του σπειρώματος είναι $H_1 = 0.541P = 0.379mm$ και η εσωτερική διάμετρος του περικοχλίου είναι $d_1=3.242mm$.

Η επιφάνεια του σπειρώματος που παραλαμβάνει την δύναμη μεταξύ κοχλία-περικοχλίου είναι $A_\sigma = n(\pi d_2 H_1) = 13.085mm^2$

Η μέση διατμητική τάση στο σπείρωμα του κοχλία είναι $\tau_\kappa = \frac{F_i}{\pi d_3 n b} = \frac{425}{\pi \cdot 3.141 \cdot 3.1 \cdot 0.7} = 19.85MPa$.

Η επιφανειακή τάση σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου είναι $\sigma_b = \frac{F_i}{A_\sigma} = 32.48MPa$ και κρίνεται αποδεκτή για επιτρεπόμενη επιφανειακή πίεση κοχλία – περικοχλίου από χάλυβα – χυτοσίδηρο 120MPa.

Η καμπτική τάση σπειρώματος είναι $\sigma = \frac{3F_i h}{\pi d_m n b^2} = 30.29MPa$.

Η ισοδύναμη τάση του σπειρώματος του κοχλία σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{ολ}^2 + 4\tau_\kappa^2} = 74.27MPa$.

Η μέση διατμητική τάση στο σπείρωμα του περικοχλίου είναι $\tau_\pi = \frac{F_i}{\pi d_1 n b} = \frac{425}{\pi \cdot 3.242 \cdot 3.1 \cdot 0.7} = 19.23MPa$.

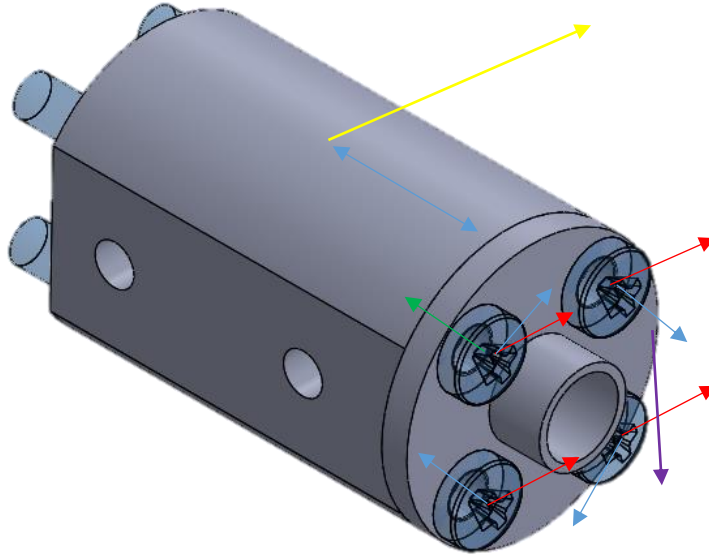
Η ισοδύναμη τάση στο σπείρωμα του περικοχλίου σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{ολ}^2 + 4\tau_\pi^2} = 73.62MPa$.

Για όριο διαρροής 200MPa όπως ανωτέρω, η σύνδεση κρίνεται ασφαλής.

Κοχλίες σύνδεσης τροχαλίας με επενεργητή

Οι εικονιζόμενοι κοχλίες συγκρατούν την τροχαλία με τον σύνδεσμο του επενεργητή και η σύσφιξη επιτυγχάνεται με περικόχλιο. Δεδομένου ότι οι κοχλίες φορτίζονται λόγω της δύναμης του ιμάντα (κίτρινο διάνυσμα) που ασκείται περιφερειακά στην τροχαλία, η δύναμη αυτή προκαλεί στους κοχλίες μια δύναμη με κατεύθυνση την κατεύθυνση του ιμάντα (κόκκινο διάνυσμα) και μια ροπή (μπλε διάνυσμα). Οι δύο αυτές δυνάμεις προκαλούν διατμητική τάση στον κοχλία η οποία γίνεται μέγιστη όταν τα διανύσματα δύναμης και ροπής είναι συγγραμμικά, δηλαδή όταν ο κοχλίας βρίσκεται στην ανώτερη θέση. Επομένως υπολογίζεται η καταπόνηση αυτού του κοχλία. Επιπλέον, θεωρώντας ότι η δύναμη ασκείται στην τροχαλία στο σημείο που βρίσκεται το μέσο του ιμάντα, προκαλεί μια ροπή ως προς το άκρο της τροχαλίας (μωβ διάνυσμα, η αρχή του διανύσματος είναι το σημείο ως προς το οποίο υπολογίζουμε τον μοχλοβραχίονα). Η ροπή αυτή προκαλεί με τη σειρά της μια εφελκυστική δύναμη στον κοχλία (πράσινο διάνυσμα) η οποία γίνεται

μέγιστη όταν ο κοχλίας βρίσκεται 90° ανθρωπολογικά. Επομένως, θα υπολογιστεί η καταπόνηση των κοχλιών στην άνω κατακόρυφη και αριστερή οριζόντια θέση.



Εικόνα 31: Συνδεσμολογία τροχαλίας με σύνδεσμο επενεργητή

Για κοχλία μετρικού σπειρώματος M3 ισχύουν οι προαναγραφθείσες διαστάσεις και οι κοχλίες βρίσκονται σε απόσταση $r=7.5mm$ από τον άξονα της τροχαλίας.

Για ασκούμενη δύναμη από τον ιμάντα $F=85N$, το διατμητικό φορτίο λόγω διάτμησης επιμερίζεται σε όλους τους κοχλίες και είναι $V = \frac{85}{4} = 21.3N$ ενώ λόγω ροπής είναι $T = \frac{M_{\sigma}}{4r} = \frac{85 \cdot 10}{4 \cdot 7.5} = 28.3N$.

Η ροπή της F με κατακόρυφη διεύθυνση είναι $M_{\kappa} = F \cdot 15.35 = 1305Nmm = 1.305Nm$

1^η Περίπτωση: Αριστερή οριζόντια θέση

Η ροπή M_{κ} προκαλεί εφελκυστική δύναμη στον κοχλία $F_{\kappa} = \frac{M_{\kappa}}{17.5} = \frac{1305}{17.5} = 74.6N$.

Για πρόταση κοχλία $F_i = 1.5F_{\kappa} = 111.9N$, η ροπή σύσφιξης είναι $M_i = F_i \tan(\rho' + \alpha) \frac{d_2}{2} = 33.66Nmm = 0.034Nm$.

Το συνολικό διατμητικό φορτίο είναι λόγω της F είναι $F_{\tau} = \sqrt{V^2 + T^2} = 35.4N$.

Η συνολική διατμητική τάση είναι $\tau_{ολ} = \frac{16M_i}{\pi d_2^3} + \frac{F_{\tau}}{A_s} = 19.64MPa$.

Η συνολική εφελκυστική τάση είναι $\sigma_{o\lambda} = \frac{F_i + F_{\kappa}}{A_s} = 37.08 \text{MPa}$.

Η ισοδύναμη τάση σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{o\lambda}^2 + 4\tau_{o\lambda}^2} = 54.01 \text{MPa}$.

2^η Περίπτωση: Άνω κατακόρυφη θέση

Η ροπή M_{κ} προκαλεί εφελκυστική δύναμη στον κοχλία $F_{\kappa} = \frac{M_{\kappa}}{10} = \frac{1305}{10} = 13.1 \text{N}$.

Το διατμητικό φορτίο λόγω της F είναι $F_{\tau} = V + T = 49.6 \text{N}$.

Διατηρώντας την ανωτέρω δύναμη πρότασης η οποία είναι η μεγαλύτερη προτεινόμενη, η συνολική διατμητική τάση είναι $\tau_{o\lambda} = \frac{16M_i}{\pi d_3^3} + \frac{F_{\tau}}{A_s} = 22.47 \text{MPa}$ και η συνολική εφελκυστική τάση είναι $\sigma_{o\lambda} = \frac{F_i + F_{\kappa}}{A_s} = 24.85 \text{MPa}$.

Η ισοδύναμη τάση σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{o\lambda}^2 + 4\tau_{o\lambda}^2} = 51.35 \text{MPa}$.

Εκ του αποτελέσματος, ο κοχλίας στην οριζόντια αριστερή θέση καταπονείται περισσότερο όμως σε κάθε περίπτωση για όριο διαρροής $S_y = 200 \text{MPa}$ και συντελεστή ασφαλείας $N = 1.5$ η διάταξη είναι ασφαλής.

Μελέτη καταπόνησης σπειρώματος κοχλία και περικοχλίου στην περίπτωση μέγιστης εφελκυστικής τάσης στον κοχλία

Στη μελέτη χρησιμοποιούνται τα ίδια στοιχεία για το σπείρωμα του κοχλία και του περικοχλίου που χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω για κοχλία Μ3.

Η μέση διατμητική τάση στο σπείρωμα του κοχλία είναι $\tau_{\kappa} = \frac{F_{o\lambda}}{\pi d_3 n b} = \frac{186.5}{\pi \cdot 2.387 \cdot 3.6 \cdot 0.5} = 13.82 \text{MPa}$.

Η επιφανειακή τάση σπειρώματος του κοχλία και του περικοχλίου είναι $\sigma_b = \frac{F_{o\lambda}}{A_{\sigma}} = \frac{186.5}{8.198} = 22.75 \text{MPa}$ και κρίνεται αποδεκτή για επιτρεπόμενη επιφανειακή πίεση κοχλία – περικοχλίου από χάλυβα – χυτοσίδηρο 120MPa .

Η καμπτική τάση σπειρώματος είναι $\sigma = \frac{3F_{o\lambda} h}{\pi d_m n b^2} = 21.13 \text{MPa}$.

Η ισοδύναμη τάση του κοχλία σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{o\lambda}^2 + 4\tau_{o\lambda}^2} = 51.85 \text{MPa}$.

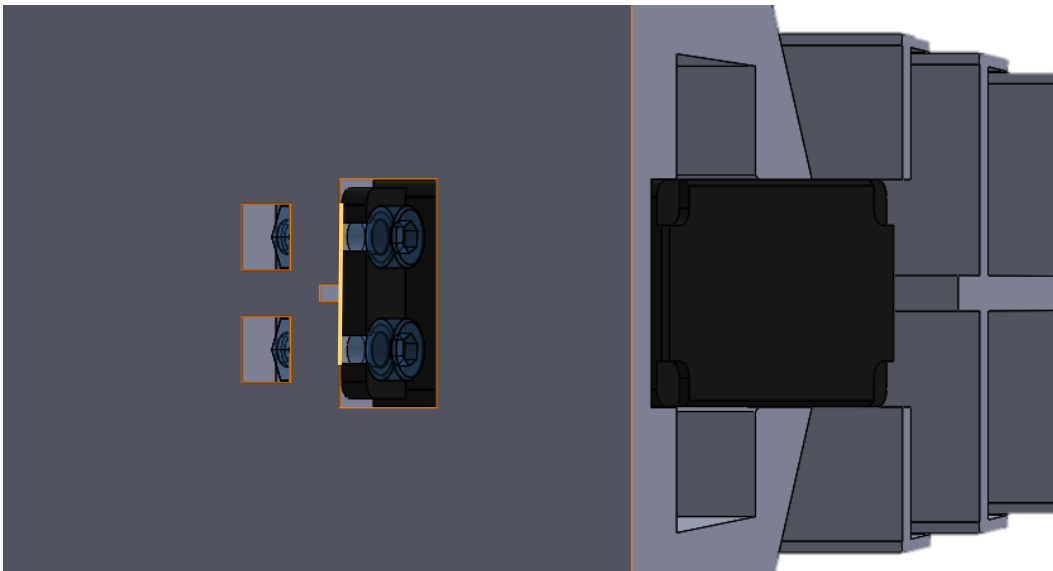
Η μέση διατμητική τάση στο σπείρωμα του περικοχλίου είναι $\tau_{\kappa} = \frac{F_{o\lambda}}{\pi d_1 n b} = \frac{186.5}{\pi \cdot 2.459 \cdot 3.6 \cdot 0.5} = 13.41 \text{MPa}$.

Η ισοδύναμη τάση του περικοχλίου σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{o\lambda}^2 + 4\tau_{o\lambda}^2} = 51.43MPa$.

Για όριο διαρροής 200MPa όπως ανωτέρω, η σύνδεση κρίνεται ασφαλής.

Κοχλίες σύνδεσης επενεργητή με σκελετό

Ο επενεργητής προσδένεται στον σκελετό μέσω δύο ζευγών κοχλίας – περικοχλίου όπως φαίνεται στην εικόνα. Ο επενεργητής φορτίζεται από την δύναμη που προκαλεί ο ιμάντας στην τροχαλία και αυτή με τη σειρά της την μεταφέρει στο σώμα του επενεργητή.



Εικόνα 32: Συνδεσμολογία επενεργητή με σκελετό

Για ασκούμενη δύναμη από τον ιμάντα $F=85N$, το διατμητικό φορτίο λόγω διάτμησης επιμερίζεται στους δύο κοχλίες και είναι $V = \frac{85}{2} = 42.5N$ ενώ λόγω ροπής θεωρείται ότι παραλαμβάνεται από τον σκελετό καθώς ο επενεργητής εφαρμόζει ακριβώς στον σκελετό.

Η ροπή της F η οποία έχει κατακόρυφη διεύθυνση και ασκείται ως προς την κίτρινη ακμή (βλ. Εικόνα 32) είναι $M_{\kappa} = F \cdot 32.5 = 2762Nmm = 2.762Nm$.

Η ροπή M_{κ} προκαλεί εφελκυστική δύναμη σε ένα κοχλία που απέχει απόσταση $3mm$ από την κίτρινη ακμή ίση με: $F_{\kappa} = \frac{M_{\kappa}}{2 \cdot 3} = \frac{2762}{6} = 460N$.

Για πρόταση κοχλία $F_i = 1.5F_k = 690N$, η ροπή σύσφιξης είναι $M_i = F_i \tan(\rho' + \alpha) \frac{d_2}{2} = 171.67Nmm = 0.172Nm$.

Η συνολική διατμητική τάση είναι $\tau_{ολ} = \frac{16M_i}{\pi d_3^3} + \frac{V}{A_s} = 72.73MPa$.

Η συνολική εφελκυστική τάση είναι $\sigma_{ολ} = \frac{F_i + F_k}{A_s} = 228.63MPa$

Η ισοδύναμη τάση σύμφωνα με το κριτήριο Μ.Δ.Τ είναι $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{ολ}^2 + 4\tau_{ολ}^2} = 270MPa$.

Επομένως, για τους συγκεκριμένους κοχλίες πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατ' ελάχιστον κατηγορία αντοχής 5.8.

7. Κατασκευή πρωτοτύπου

Το τελικό στάδιο της ανάπτυξης του συστήματος πηδαλίου ελέγχου αποτελεί η κατασκευή του σε πραγματική κλίμακα με τα διατιθέμενα μέσα στο εργαστήριο. Η κατασκευή περιλαμβάνει την εκτύπωση του πρωτότυπου σκελετού, τη συναρμολόγηση των επιμέρους δομικών μερών μεταξύ τους ώστε να αποτελούν ένα ενιαίο και λειτουργικό σύνολο ικανό να επιτελέσει την απαραίτητη παραμόρφωση και τέλος την κατασκευή και προσαρμογή του κελύφους. Η παρουσίαση της κατασκευής ακολουθεί την χρονολογική σειρά των διεργασιών και περιλαμβάνει λεπτομερή περιγραφή της διαδικασίας.

7.1 Επιλογή υλικού σκελετού και αρχικές δοκιμές

Η ορθή επιλογή του υλικού είναι υψίστης σημασίας σε έναν συμμορφωτό μηχανισμό καθώς πέραν των άλλων απαιτήσεων της αεροναυπηγικής όπως το χαμηλό βάρος και την αντοχή σε πολυκυκλική κόπωση και μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, απαιτείται η ανισότροπη συμπεριφορά ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης. Αυτή η ιδιότητα επιτυγχάνεται με το κατάλληλο σχήμα του εξαρτήματος, απαιτεί όμως και ανάλογες ιδιότητες από το υλικό.

Στην προκειμένη περίπτωση, δεδομένου ότι η κατασκευή του σκελετού γίνεται με 3D εκτυπωτή, η επιλογή του υλικού περιορίζεται από τη συμβατότητα του υλικού με τους διαθέσιμους εκτυπωτές του εργαστηρίου. Οι εκτυπωτές που χρησιμοποιούνται είναι τύπου Fused Deposition Modeling (FDM) και τυπώνουν θερμοπλαστικά υλικά. Από τα διαθέσιμα υλικά, ορισμένα απορρίπτονται εξαρχής λόγω των χαρακτηριστικών τους όπως τα σύνθετα (ανθρακόνημα, υαλόνημα) λόγω κόστους και δυσκολίας κατεργασίας ή των ιδιοτήτων τους όπως το PLA λόγω σκληρότητας και ψαθυρότητας. Αντιθέτως, ορισμένα φαινομενικά ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση ως προς την καταλληλότητά τους. Αυτά είναι το ABS, το TPU και το Nylon με επικρατέστερο το ABS.

Η πρώτη απόπειρα εκτύπωσης έγινε με τον εκτυπωτή Creality ENDER-3 και τα δοκίμια τυπώθηκαν σε κλίμακα 1:2 προς εξοικονόμηση υλικού. Το πρώτο δοκίμιο ήταν από υλικό ABS και παρουσίαζε μεγαλύτερη δυσκαμψία της επιθυμητής. Επιπλέον, το υλικό κατά την εκτύπωση ξεκόλλησε από το επίπεδο εκτύπωσης και εμφάνισε ασυνέχειες κατά μήκος των ινών εκτύπωσης οι οποίες διευρύνθηκαν με την πάροδο των ημερών. Ωστόσο, η ακρίβεια στις διαστάσεις κατασκευής ήταν εντός των αποδεκτών ορίων. Ακολούθως, το δοκίμιο τυπώθηκε με υλικό TPU το οποίο ωστόσο είναι υπερβολικά ελαστικό και εμφανίζει χαμηλή ακρίβεια στις λειτουργικές διαστάσεις επομένως απορρίπτεται.

Εν τέλει, αποφασίστηκε η συνέχιση εκτύπωσης με υλικό ABS κάνοντας ορισμένες αλλαγές στον τρόπο εκτύπωσης με την πεποίθηση ότι θα επιτευχθούν οι απαιτούμενες προδιαγραφές. Ειδικότερα, για την αποφυγή ασυνεχειών κατά μήκος των ινών του υλικού αποφασίστηκε η εκτύπωση σε εκτυπωτή θερμαινόμενου θαλάμου και συγκεκριμένα τον

XYZprinting da Vinci 1.0 που διατίθεται στο εργαστήριο. Επιπλέον, αυξήθηκε η θερμοκρασία της τραπέζης εκτύπωσης ώστε να αποτραπεί η αποκόλληση της κάτω επιφάνεια του δοκιμίου.

7.2 Εκτύπωση πρωτότυπου σκελετού και συναρμολόγηση

Η εκτύπωση του σκελετού σε πραγματική κλίμακα κατέστη δυνατή μετά από μερικές αποτυχημένες προσπάθειες κυρίως λόγω δυσκολίας εκτύπωσης ABS με τον συγκεκριμένο εκτυπωτή. Το τελικό δοκίμιο ικανοποιεί τις απαιτήσεις για την κατασκευή του πρωτοτύπου, ωστόσο έχει ελαττώματα, όπως η αποκόλληση στρώσεων και η βράχυνση του υλικού στην μία άκρη της ακμής εκφυγής. Τα ελαττώματα όπως και οι αποτυχημένες προσπάθειες οφείλονται κατά κύριο λόγο στην χαμηλή θερμοκρασία της τραπέζης του εκτυπωτή.

Η συναρμολόγηση των επιμέρους εξαρτημάτων δεν παρουσιάζει δυσκολία καθότι υπάρχει διαθέσιμος χώρος για την εύκολη τοποθέτηση κάθε τεμαχίου και επιπλέον καθένα από αυτά «κουμπώνει» στον σκελετό. Η συναρμολόγηση γίνεται με την εξής σειρά:

1. Πρόσδεση ιμάντα στην τροχαλία με τους απαραίτητους κοχλίες-περικόχλια και το παρέμβυσμα.
2. Πρόσδεση συνδετικού μέλους στον άξονα του επενεργητή.
3. Πρόσδεση τροχαλίας στο συνδετικό μέλος με τους απαραίτητους κοχλίες.
4. Ταυτοχρόνως τοποθέτηση συστήματος επενεργητή-τροχαλίας-ιμάντα στον σκελετό και πέρασμα ιμάντα στα κατάλληλα ανοίγματα.
5. Σύσφιξη επενεργητή στον σκελετό με το κατάλληλο σύστημα κοχλιών-περικόχλιων.
6. Πρόσδεση άκρων ιμάντα στον σκελετό με τον απαραίτητο κοχλία-περικόχλιο και τα παρεμβύσματα.

Είναι αξιοσημείωτο ότι για τον ακριβέστερο έλεγχο της κάμψης του σκελετού και την μείωση της υστέρησης κρίνεται απαραίτητη η προένταση του ιμάντα. Αυτή επιτυγχάνεται εύκολα με την περιστροφή της τροχαλίας από το ουδέτερο σημείο προς την αντίθετη φορά της κάμψης που προκαλεί ο συγκεκριμένος τένοντας, δηλαδή κατά τρόπο ώστε να μειώνεται το μήκος του τένοντα, πριν την πρόσδεση του άκρου του τένοντα.

7.3 Τοποθέτηση αφρού και κελύφους

Το τελικό στάδιο της κατασκευής περιλαμβάνει την τοποθέτηση του αφρώδους υλικού και την κόλληση του ελαστικού κελύφους στην επιφάνεια του σκελετού.

Το αφρώδες υλικό που χρησιμοποιείται είναι αφρολέξ εμπορίου όμοιο με αυτό που απαντάται στην κατασκευή επίπλων ή μαξιλαριών. Το αφρολέξ κόβεται σε μικρά κομμάτια με κατάλληλο σχήμα και τοποθετείται μεταξύ των νεύρων του σκελετού ώστε να δημιουργείται επίπεδη επιφάνεια στην άνω και κάτω πλευρά του πτερυγίου.

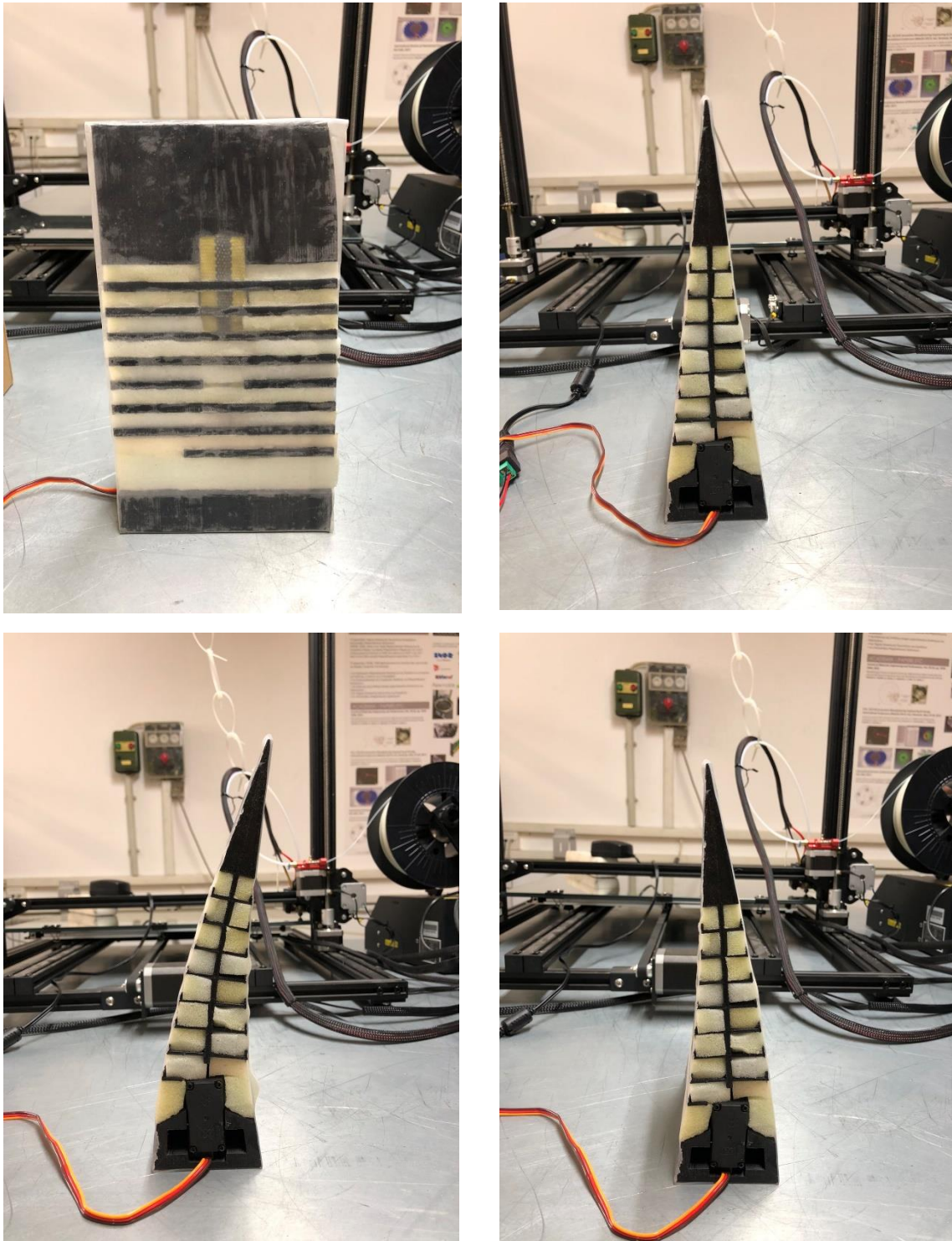
Το κέλυφος το οποίο αποτελείται από φύλλο σιλικόνης 0.5mm κολλιέται με κοινή κόλλα σιλικόνης διάφανη στην πάνω επιφάνεια των νεύρων και στην άκρη του πτερυγίου αφού πρώτα τριφτούν ελαφρώς τόσο το φύλλο σιλικόνης όσο και ο σκελετός στις περιοχές κόλλησης. Εκ του αποτελέσματος φαίνεται ότι η κόλλα σιλικόνης αλληλεπιδρά χημικά με το φύλλο σιλικόνης και καταστρέφει ελαφρώς την δομή του φύλλου σιλικόνης μειώνοντας την ελαστικότητα του κελύφους.

7.4 Αξιολόγηση πρωτοτύπου

Η αξιολόγηση του πρωτοτύπου περιλαμβάνει την εξέταση της λειτουργικότητας του, δηλαδή τον βαθμό στον οποίο επιτυγχάνεται η επιδιωκόμενη παραμόρφωση και η συμπεριφορά των επιμέρους τμημάτων κατά την διάρκεια αυτής. Για τον έλεγχο του επενεργητή χρησιμοποιείται ένας mini servo tester ο οποίος περιστρέφει τον επενεργητή μεταξύ -90° και 90° .

Στις ακραίες θέσεις το πηδάλιο επιτυγχάνει εκτροπή 12° . Η παραμόρφωση του βραχίονα του σκελετού δεν είναι ομοιόμορφη αλλά εντοπίζεται περισσότερο στο τμήμα μεταξύ της απαραμόρφωτης βάσης και του πρώτου νεύρου γεγονός που ενώ με την δεδομένη εκτροπή και για λίγους κύκλους φόρτισης δεν δημιουργεί πρόβλημα, ενδεχομένως να είναι καταστροφικό σε μεγαλύτερες γωνίες ή πολυκυκλική καταπόνηση.

Όσον αφορά στο κέλυφος, αυτό παραμορφώνεται διατηρώντας την αεροδυναμική επιφάνεια παντού εκτός από το την περιοχή μεταξύ βάσης και πρώτου νεύρου όπου δημιουργείται πτύχωση στην βραχύμενη επιφάνεια. Αυτό θα μπορούσε να αποφευχθεί κολλώντας το κέλυφος με τον αφρό υπό την προϋπόθεση ότι η κόλλα δεν επηρεάζει το υλικό του κελύφους όπως συνέβη στην προκειμένη περίπτωση. Πέραν αυτού, το κέλυφος υποστηριζόμενο από τα νεύρα και τον αφρό είναι ικανό εκ πρώτης όψεως να παραλαμβάνει ικανοποιητικά το κάθετο φορτίο στην επιφάνειά του και να παραμορφώνεται ελαστικά.



Εικόνα 33: Τελική μορφή πρωτοτύπου σε ουδέτερη θέση και σε εκτροπή

8. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αναλύεται και σχεδιάζεται ένας εύκαμπτος μηχανισμός μεταβολής της ακμής εκφυγής για εφαρμογές μικρών αεροσκαφών. Της σύλληψης της ιδέας του μηχανισμού προηγείται η μελέτη της υπάρχουσας τεχνολογίας και των πιθανών σχεδιαστικών λύσεων. Εν συνεχεία εξετάζεται η αεροδυναμική συμπεριφορά της αεροτομής της πτέρυγας με το πηδάλιο στη μέγιστη εκτροπή, προσδιορίζονται τα αεροδυναμικά φορτία και αναδεικνύεται η αεροδυναμική υπεροχή της εύκαμπτης πτέρυγας σε σχέση με τη συμβατική. Ακολουθεί ο λεπτομερής σχεδιασμός του εύκαμπτου σκελετού και της αλληλεπίδρασής του με το κέλυφος και κατόπιν μελετώνται τα επιμέρους δευτερεύοντα στοιχεία μηχανών ώστε το σύστημα του πηδαλίου να είναι πλήρες. Τέλος, ο σκελετός κατασκευάζεται σε τρισδιάστατο εκτυπωτή και υλοποιείται ο πρωτότυπος μηχανισμός. Η συνολική μελέτη αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στον σχεδιασμό και την υλοποίηση του μηχανισμού ώστε σε πρώτο στάδιο να εξεταστεί η λειτουργικότητά του, πλην όμως απαιτείται επιπλέον μελέτη σε διάφορους τομείς οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω, με σκοπό να διευκολυνθεί ενδεχόμενη περαιτέρω μελέτη στο μέλλον.

Συγκεκριμένα, όσον αφορά στην αεροδυναμική ανάλυση, κρίνεται σκόπιμο να εξεταστεί η συμπεριφορά της αεροτομής με το πηδάλιο εκτραπέν σε αρνητικές και θετικές γωνίες προσβολής και στη συνέχεια να γίνει πειραματική μελέτη σε αεροδυναμική σήραγγα.

Σχετικά με τα επιμέρους δομικά μέρη του συστήματος προτείνεται να εξεταστεί η αντοχή τους σε πολυκυκλική κόπωση καταρχάς σε επίπεδο προσομοίωσης. Επιπλέον, δύναται να μελετηθεί η χρήση άλλου υλικού για τον σκελετό με διατήρηση της ίδιας γεωμετρίας, όπως ελάσματα μετάλλου τα οποία φαινομενικά εξυπηρετούν επαρκώς την κάμψη του πηδαλίου. Επιπρόσθετα, για την καλύτερη στήριξη της τροχαλίας στον σκελετό και την μείωση της καταπόνησης στον άξονα του επενεργητή αποτελεσματική και εύκολα υλοποιήσιμη με τον παρόντα σχεδιασμό λύση είναι η στήριξη της τροχαλίας σε ακτινικό έδρανο κύλισης. Τέλος, για την μείωση του φόρτου του επενεργητή είναι δυνατή η σύνδεση της τροχαλίας με τον επενεργητή μέσω μη αναστρέψιμου (non-backdrivable) μηχανισμού.

Όσον αφορά στο κέλυφος, για την βελτίωση της αντοχής στο κάθετο στην επιφάνεια φορτίο προτείνεται η δημιουργία κελύφους από ενισχυμένο ελαστομερές υλικό, σύνθετο υλικό δηλαδή με μήτρα από ελαστομερές και ενίσχυση από ίνες.

Η αεροναυπηγική επίκειται να εξελιχθεί ραγδαία στο άμεσο και μεσοπρόθεσμο μέλλον με την ώθηση που προσφέρει η τεχνολογική πρόοδος στους τομείς των υλικών, του αυτομάτου ελέγχου και της ρευστομηχανικής. Απώτερος στόχος αποτελεί η βελτίωση της αποδοτικότητας των αεροσκαφών στην οποία βρίσκει άμεση εφαρμογή η μορφοποίηση της πτέρυγας και για τον λόγο αυτό η μορφοποίηση αποτελεί μείζονα τομέα έρευνας. Ο εύκαμπτος μηχανισμός που σχεδιάστηκε αποτελεί μια πρωτότυπη ιδέα για την υλοποίηση του πηδαλίου ενός αεροσκάφους εφαρμόζοντας τις αρχές της μορφοποίησης και μπορεί να

αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη ενός πλήρους συστήματος πηδαλίου μικρού αεροσκάφους.

9. Κατάλογος πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1: Συσχέτιση αεροδυναμικού φορτίου με τύπο ΠΚ και παραμόρφωση..... | 24 |
| Πίνακας 2: Δυσκαμψία σκελετού συναρτήσσει του φορτίου | 31 |
| Πίνακας 3: Δυσκαμψία συστήματος σκελετού - κελύφους συναρτήσσει του φορτίου..... | 31 |
| Πίνακας 4: Ιδιοσυχνότητες σκελετού στο λογισμικό προσομοίωσης..... | 32 |
| Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά λειτουργίας επενεργητή..... | 41 |

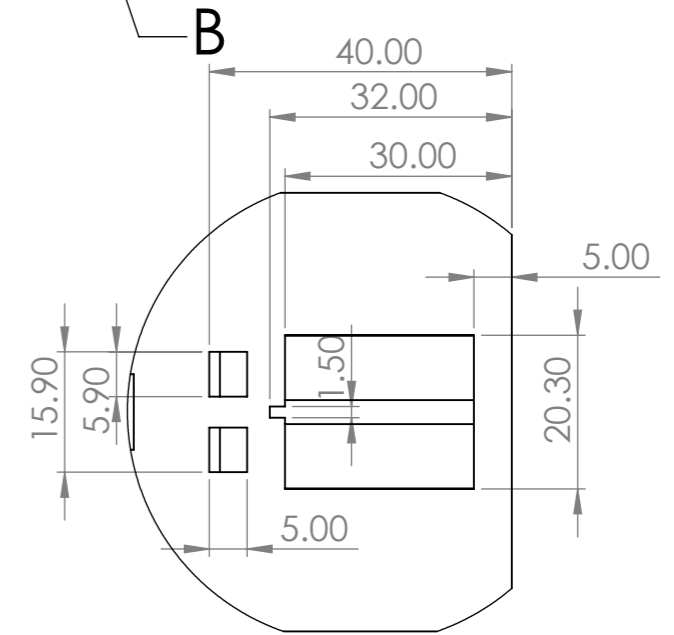
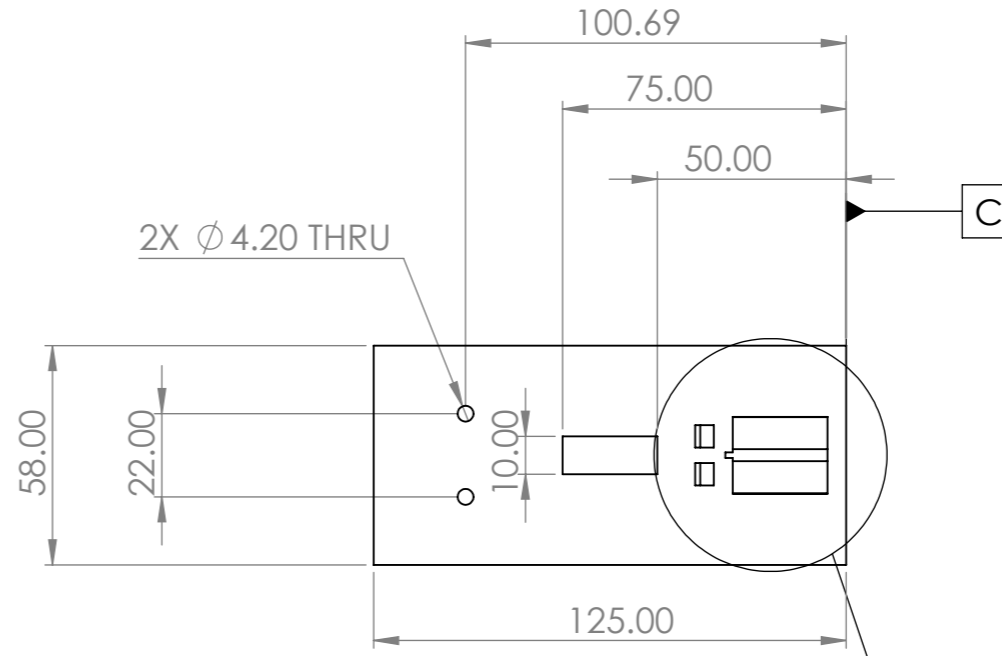
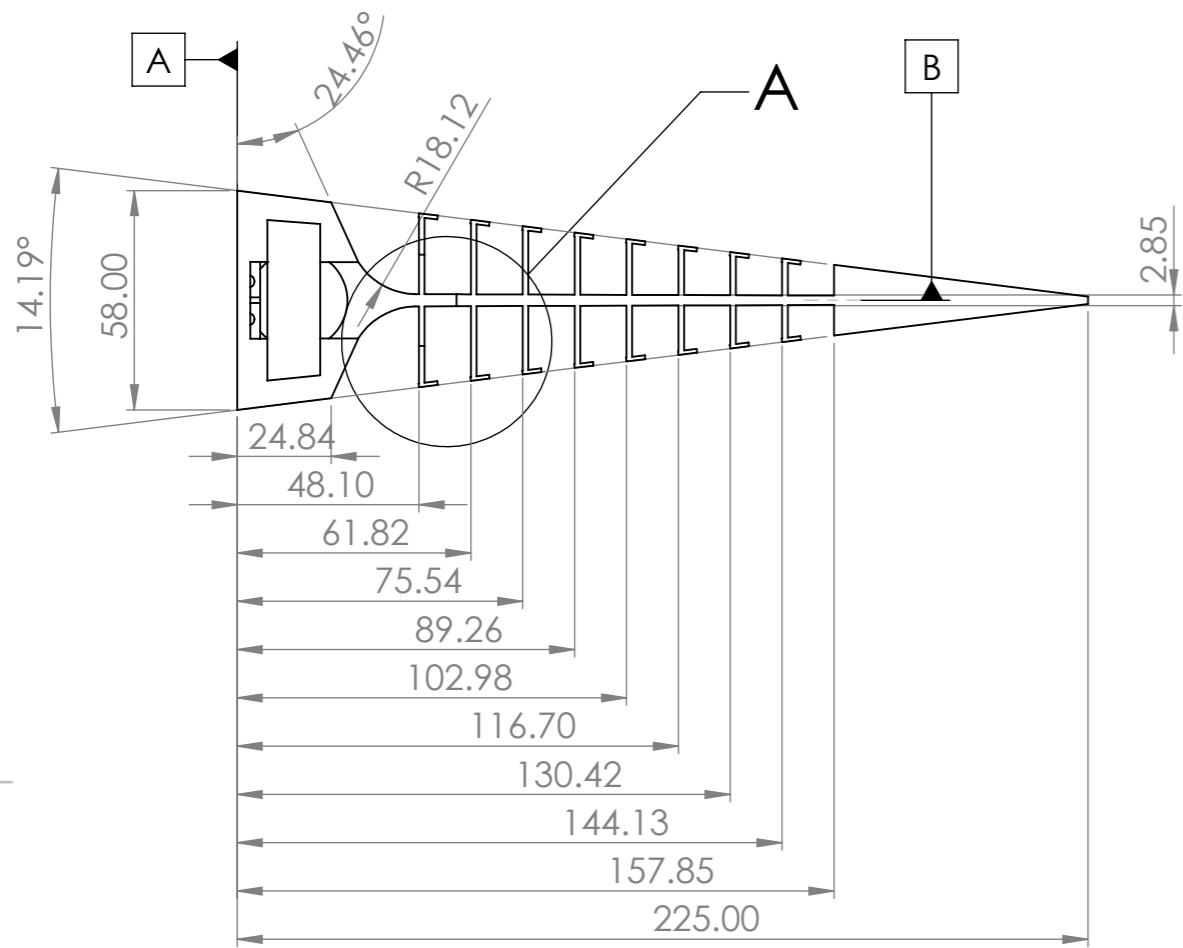
10. Κατάλογος εικόνων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1: Το ΑΦ F-111 και η φιλοσοφία μορφοποίησης των πτερύγων [1]..... | 12 |
| Εικόνα 2: Η πτέρυγα του προγράμματος SARISTU στην αεροδυναμική σήραγγα..... | 13 |
| Εικόνα 3: Το σύστημα FlexSys από την σύλληψη της ιδέας (πάνω αριστερά) στην πατέντα (κάτω αριστερά) και στην δοκιμή εν πτήση (δεξιά) [2]. | 13 |
| Εικόνα 4: Ποιοτική αναπαράσταση του σχετικού βάρους των δομικών μερών ενός συστήματος μορφοποίησης [1]. | 15 |
| Εικόνα 5: Το UAV AAI RQ-2 Pioneer | 16 |
| Εικόνα 6: Αρθρωτός μηχανισμός μεταβολής της ακμής εκφυγής [1] | 17 |
| Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση συμβατικού και εύκαμπτου μηχανισμού [3] | 18 |
| Εικόνα 8: Σχηματική αναπαράσταση συρταρωτού μηχανισμού για την μεταβολή του σχήματος του κελύφους [4] | 19 |
| Εικόνα 9: Σύνθετη δομή κελύφους: Η εξωτερική ελαστική μεμβράνη στηρίζεται στα απαραμόρφωτα ελάσματα αλουμινίου και παραμορφώνεται στα τμήματα του αφρώδους υλικού (FlexSys Project) [1]. | 20 |
| Εικόνα 10: Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού και επιμέρους δομικών μερών..... | 21 |
| Εικόνα 11: Η NACA 2412 και οι διαστάσεις της μελετώμενης αεροτομής | 23 |
| Εικόνα 12: Μορφή αεροτομών στις ακραίες θέσεις παραμόρφωσης | 23 |
| Εικόνα 13: Πεδίο ολικών πιέσεων γύρω από κάθε τύπο πηδαλίου | 25 |
| Εικόνα 14: Συγκριτικές εικόνες πεδίων θορύβου γύρω από κάθε αεροτομή | 26 |
| Εικόνα 15: Αδρή αναπαράσταση σκελετού | 27 |
| Εικόνα 16: Τομή σκελετού στη μέγιστη παραμόρφωση | 28 |
| Εικόνα 17: Τρόπος προσομοίωσης φορτίων | 29 |
| Εικόνα 18: Μορφή σκελετού και κελύφους στη μέγιστη παραμόρφωση | 30 |
| Εικόνα 19: Παραμόρφωση κελύφους υπό την επίδραση επιφανειακής πίεσης. | 33 |
| Εικόνα 20: Μοντέλο με προσθήκη τμημάτων αφρού για την υποστήριξη του κελύφους ... | 34 |
| Εικόνα 21: Παραμόρφωση συστήματος με την προσθήκη αφρού σε όψη χωρίς τον σκελετό (άνω) και χωρίς τον αφρό (κάτω). | 34 |
| Εικόνα 22: Όψεις τελικής μορφής σκελετού | 36 |
| Εικόνα 23: Συγκριτικές εικόνες ανάπτυξης τάσεων στον αρχικό και τελικό σκελετό | 37 |
| Εικόνα 24: Τελική μορφή παραμορφωμένου συστήματος σκελετού-κελύφους | 38 |
| Εικόνα 25: Τελική μορφή παραμορφωμένου συστήματος σκελετού, κελύφους και αφρώδους | 39 |
| Εικόνα 26: Σχέδιο επενεργητή του κατασκευαστή | 40 |
| Εικόνα 27: Τρισδιάστατη όψη τροχαλίας | 41 |
| Εικόνα 28: Σύνδεσμος..... | 41 |
| Εικόνα 29: Συνδεσμολογία ιμάντα - τροχαλίας | 43 |
| Εικόνα 30: Συνδεσμολογία ιμάντα με σκελετό..... | 45 |
| Εικόνα 31: Συνδεσμολογία τροχαλίας με σύνδεσμο επενεργητή | 47 |
| Εικόνα 32: Συνδεσμολογία επενεργητή με σκελετό | 49 |

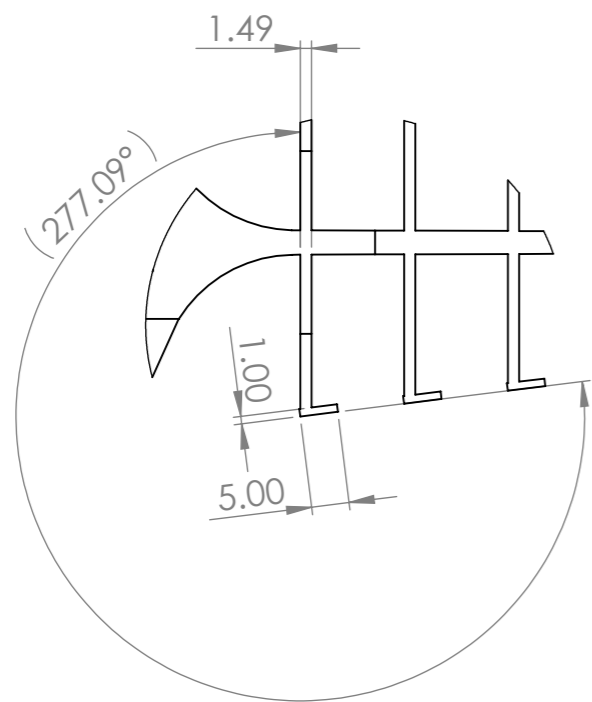
Εικόνα 33: Τελική μορφή πρωτοτύπου σε ουδέτερη θέση και σε εκτροπή54

11. Κατάλογος Αναφορών

- [1] A. Concilio, I. Dimino, L. Lecce και R. Pecora, *Morphing Wing Technologies*, New York: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [2] NASA, «NASA Website,» 7 November 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.nasa.gov/press/2014/november/nasa-tests-revolutionary-shape-changing-aircraft-flap-for-the-first-time>.
- [3] L. Cao, «On Advancing the Topology Optimization Technique to Compliant Mechanisms and Robots,» 23 March 2015. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/On-Advancing-the-Topology-Optimization-Technique-to-Cao/972331dbc652b378c48636d3590c0adb2ce1ce41#paper-header>.
- [4] G. P. Spirlet, *Design of Morphing Leading and Trailing Edge Surfaces for Camber and Twist Control*, TU Delft, 2015.
- [5] B. K. Woods, O. Bilgen και M. I. Friswell, «Wind Tunnel Testing of the Fishbone Active Camber Morphing Concept,» *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014.
- [6] «MatWeb,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.matweb.com/index.aspx>.
- [7] P. Patel, D. Shepherd και D. Hukins, 9 October 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2575212/#:~:text=are%20discussed%20later.-,For%20the%200.16%20g.cm%2D3%20and%200.32%20g.,4.5%20MPa%20\(yield%20strength\)..](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2575212/#:~:text=are%20discussed%20later.-,For%20the%200.16%20g.cm%2D3%20and%200.32%20g.,4.5%20MPa%20(yield%20strength)..)
- [8] X. A. Παπαδόπουλος, *Στοιχεία Μηχανών*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2017.

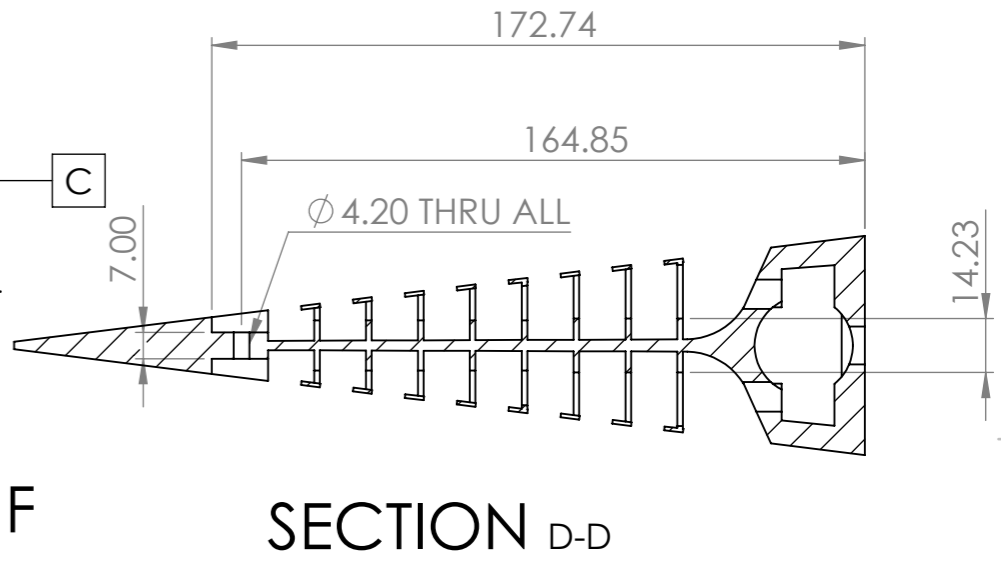
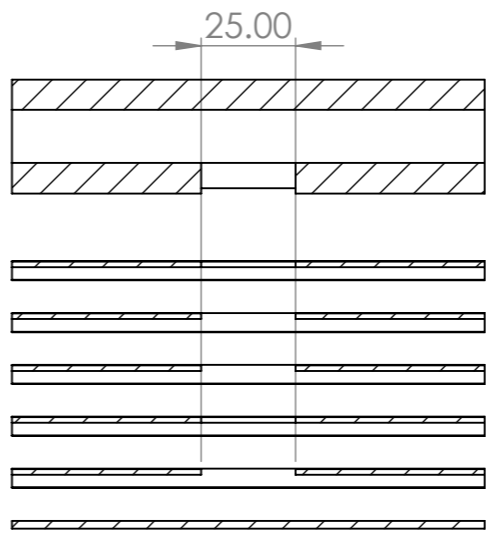
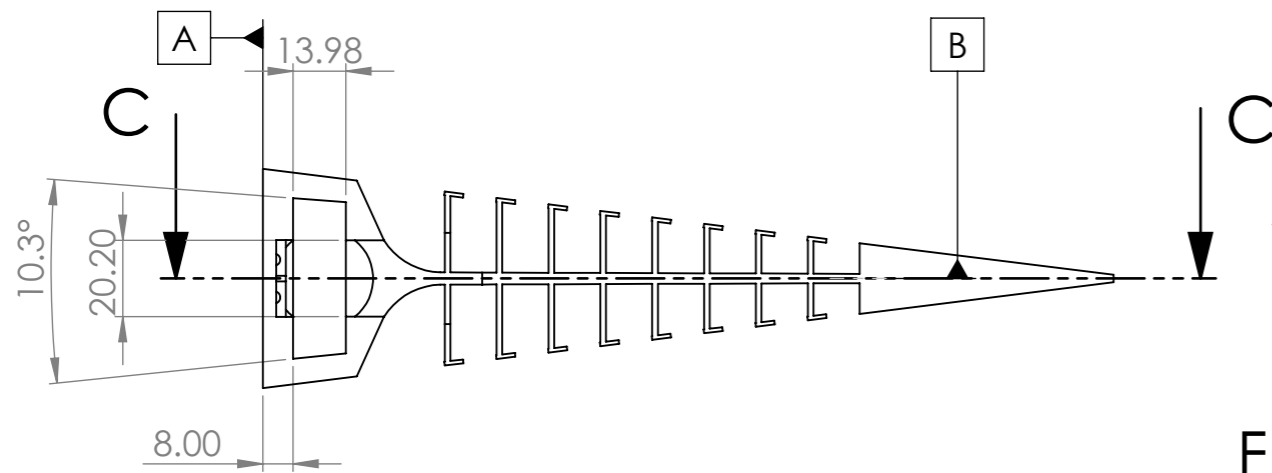
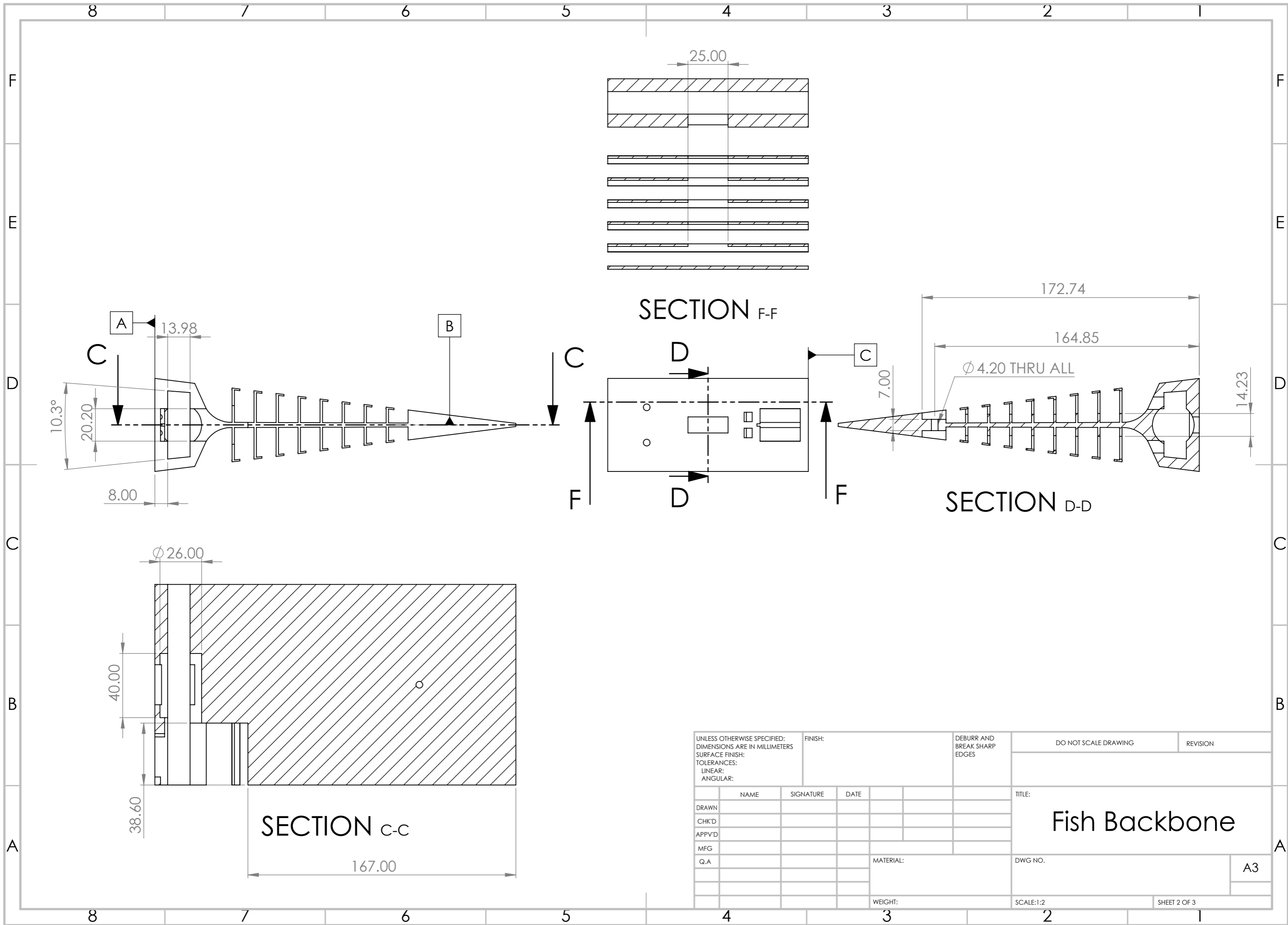


DETAIL B
SCALE 1 : 1

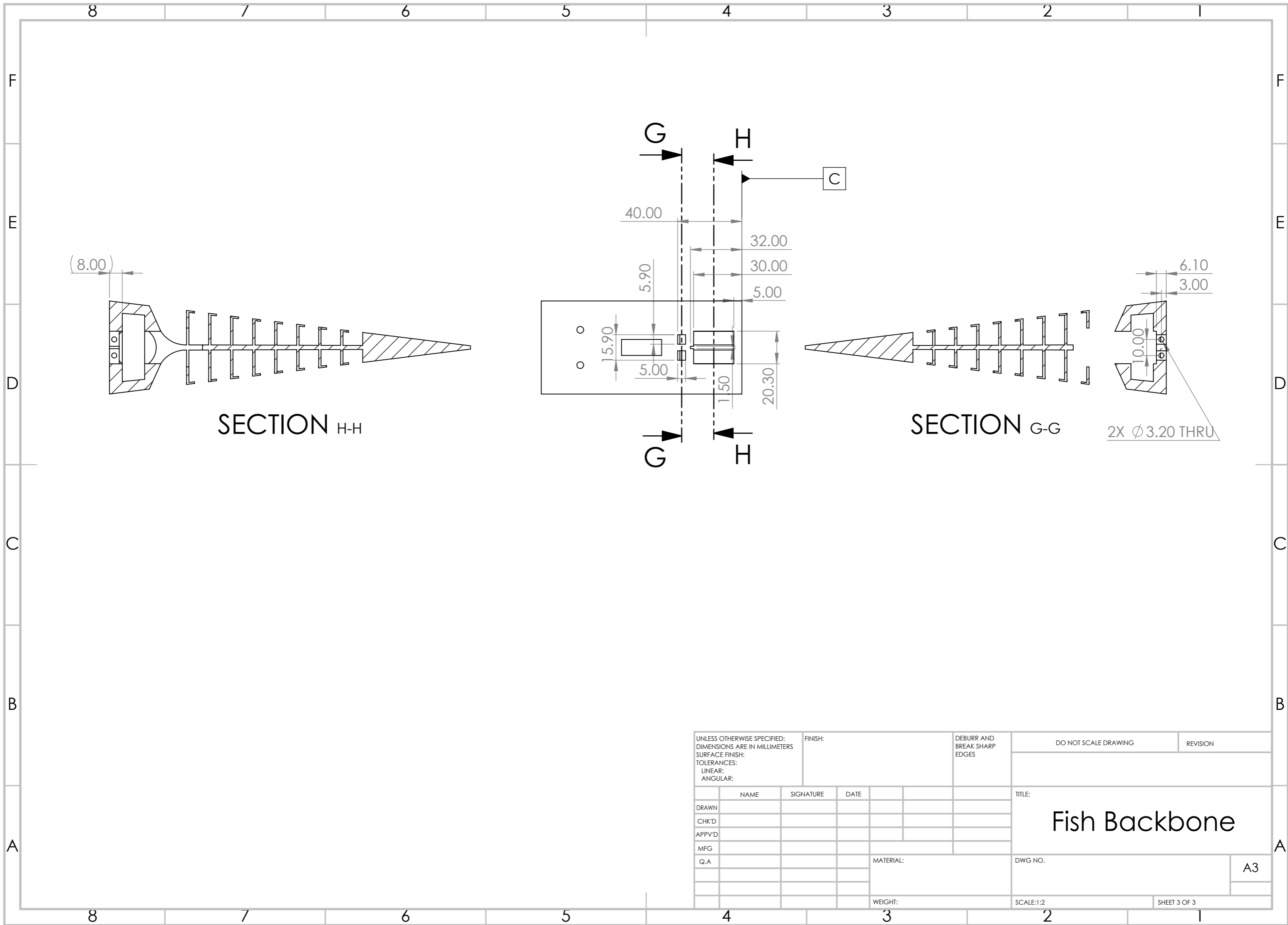


DETAIL A
SCALE 1 : 1

| | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|---------|--|------------------------------------|--|----------------------|--|----------------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | | FINISH: | | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| DRAWN | | | | NAME | | SIGNATURE | | DATE | | TITLE: | |
| CHK'D | | | | | | | | | | Fish Backbone | |
| APPV'D | | | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | | DWG NO. | |
| Q.A | | | | | | | | | | A3 | |
| | | | | | | | | | | SCALE:1:2 | |
| | | | | | | | | | | SHEET 1 OF 3 | |



| | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|---------|--|------------------------------------|--|----------------------|--|---------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | | FINISH: | | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| DRAWN | | | | NAME | | SIGNATURE | | DATE | | TITLE: | |
| CHK'D | | | | | | | | | | Fish Backbone | |
| APPV'D | | | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | | DWG NO. | |
| Q.A | | | | | | | | | | A3 | |
| | | | | | | | | MATERIAL: | | SCALE:1:2 | |
| | | | | | | | | WEIGHT: | | SHEET 2 OF 3 | |

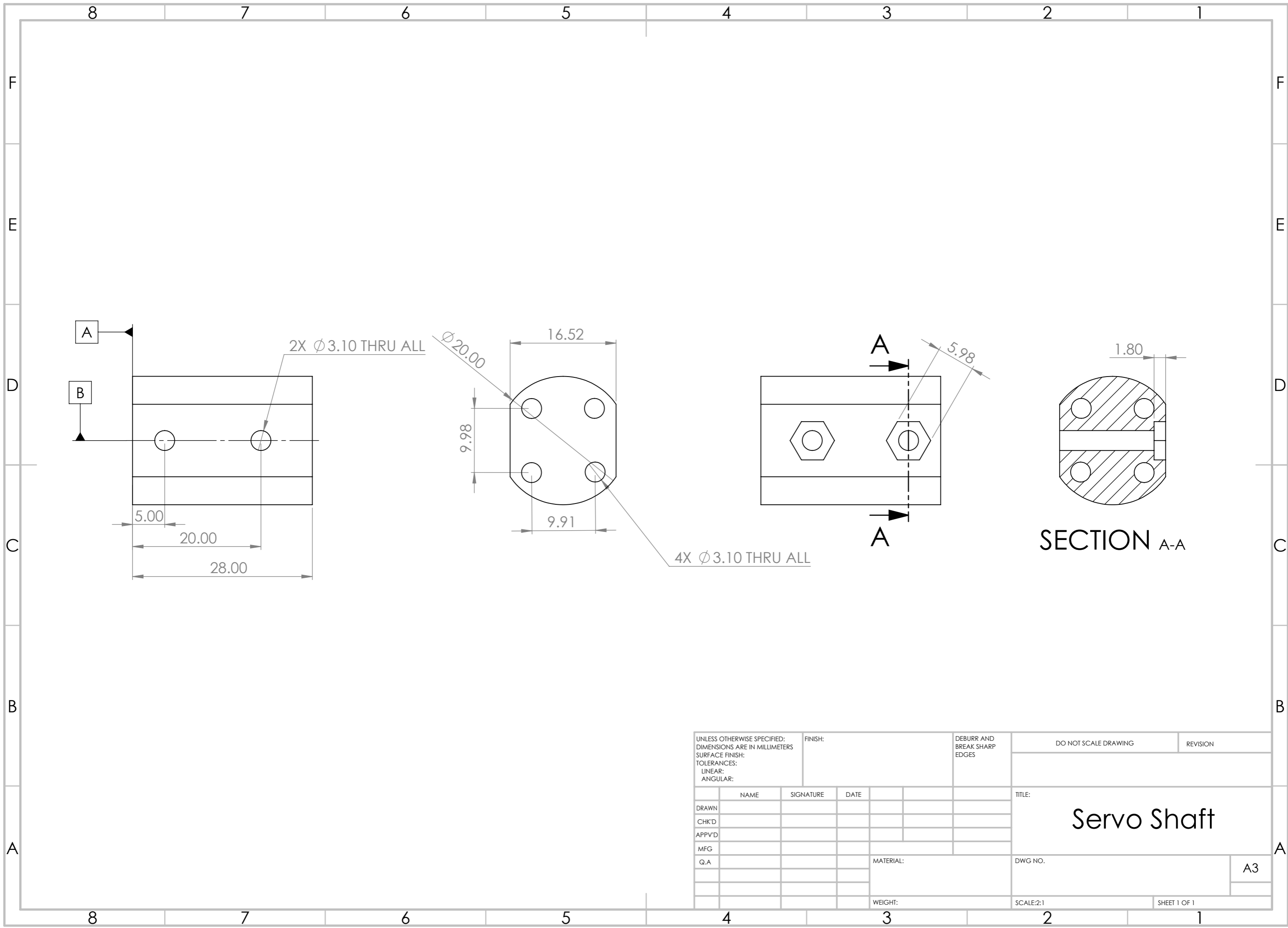


SECTION H-H

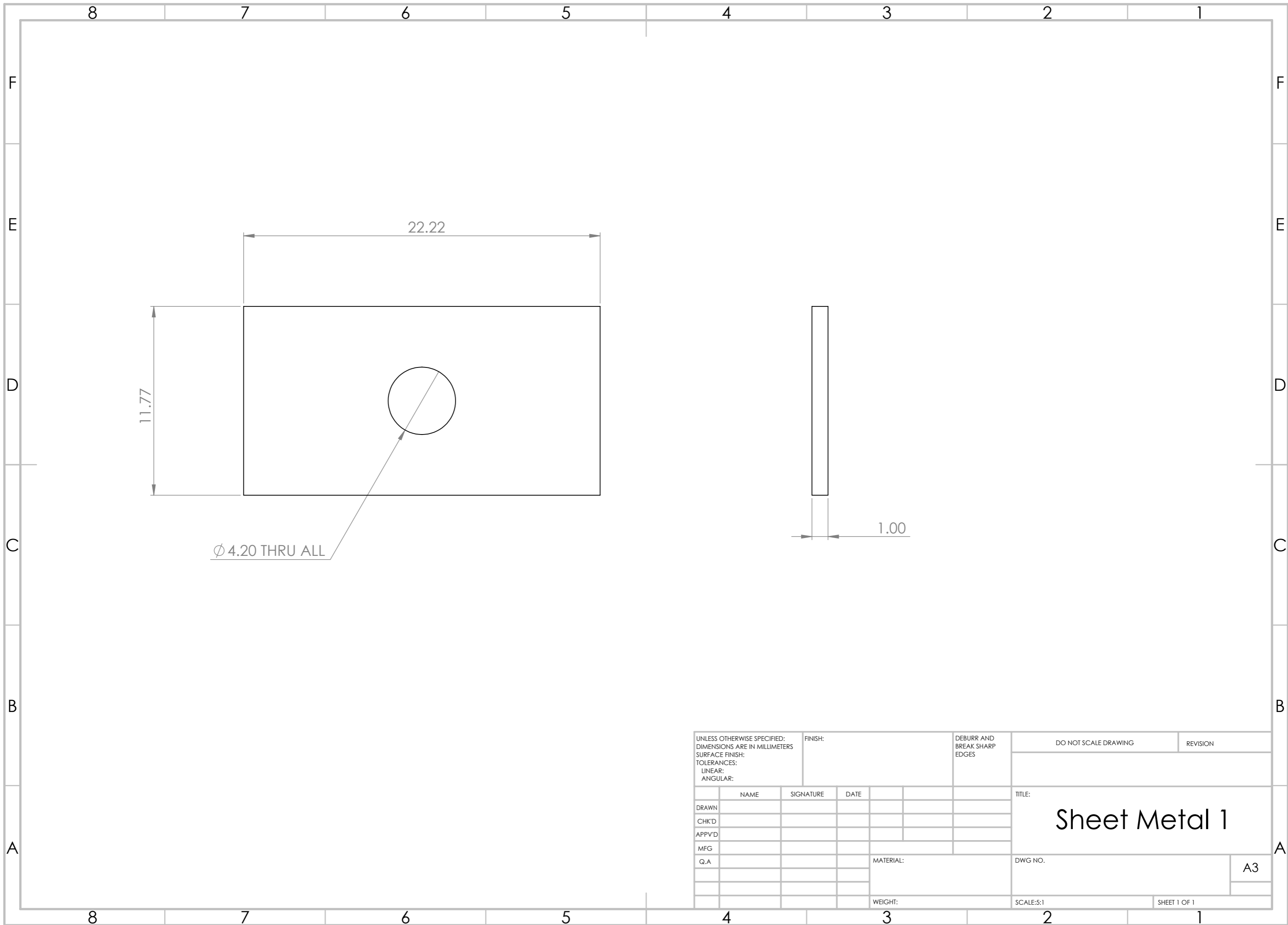
SECTION G-G

2X Ø 3.20 THRU

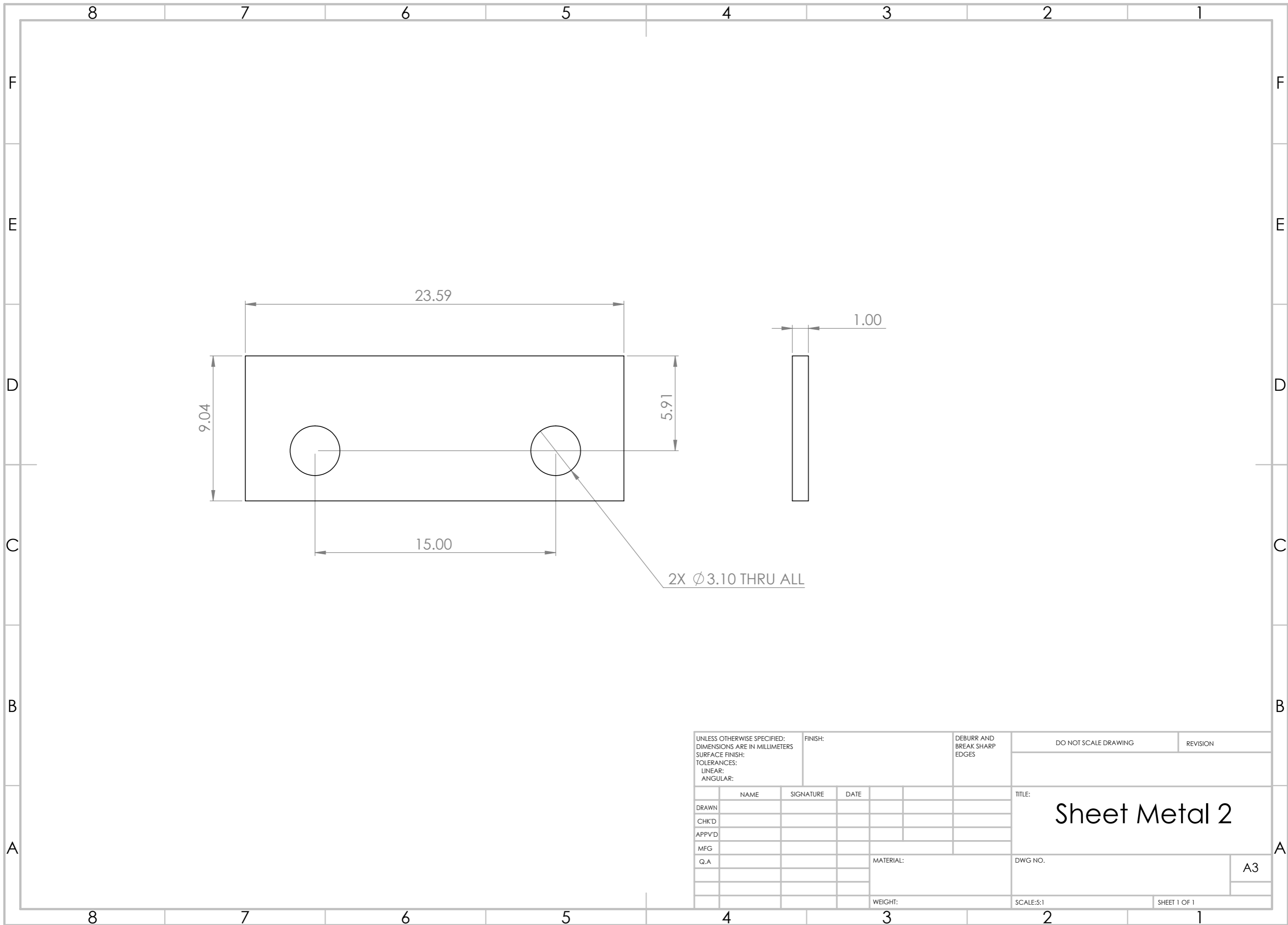
| | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|---------|--|------------------------------------|--|----------------------|--|----------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | | FINISH: | | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| DRAWN | | | | | | TITLE: | | | | | |
| CHK'D | | | | | | Fish Backbone | | | | | |
| APPV'D | | | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | DWG NO. | | | | | |
| Q.A | | | | | | MATERIAL: | | | | | |
| | | | | | | WEIGHT: | | | | | |
| | | | | | | SCALE:1:2 | | | | | |
| | | | | | | SHEET 3 OF 3 | | | | | |
| | | | | | | A3 | | | | | |



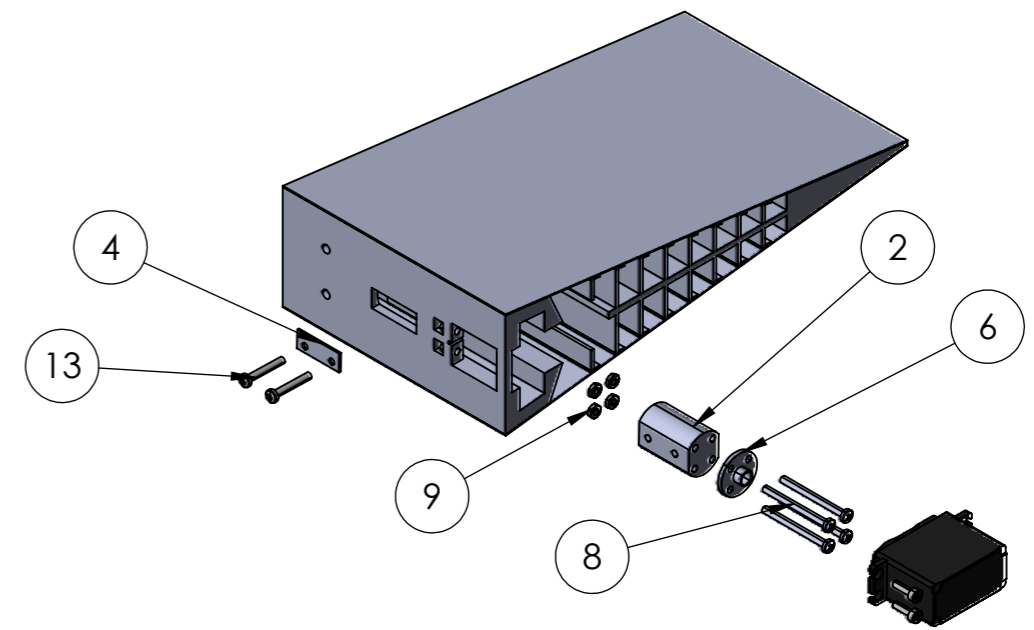
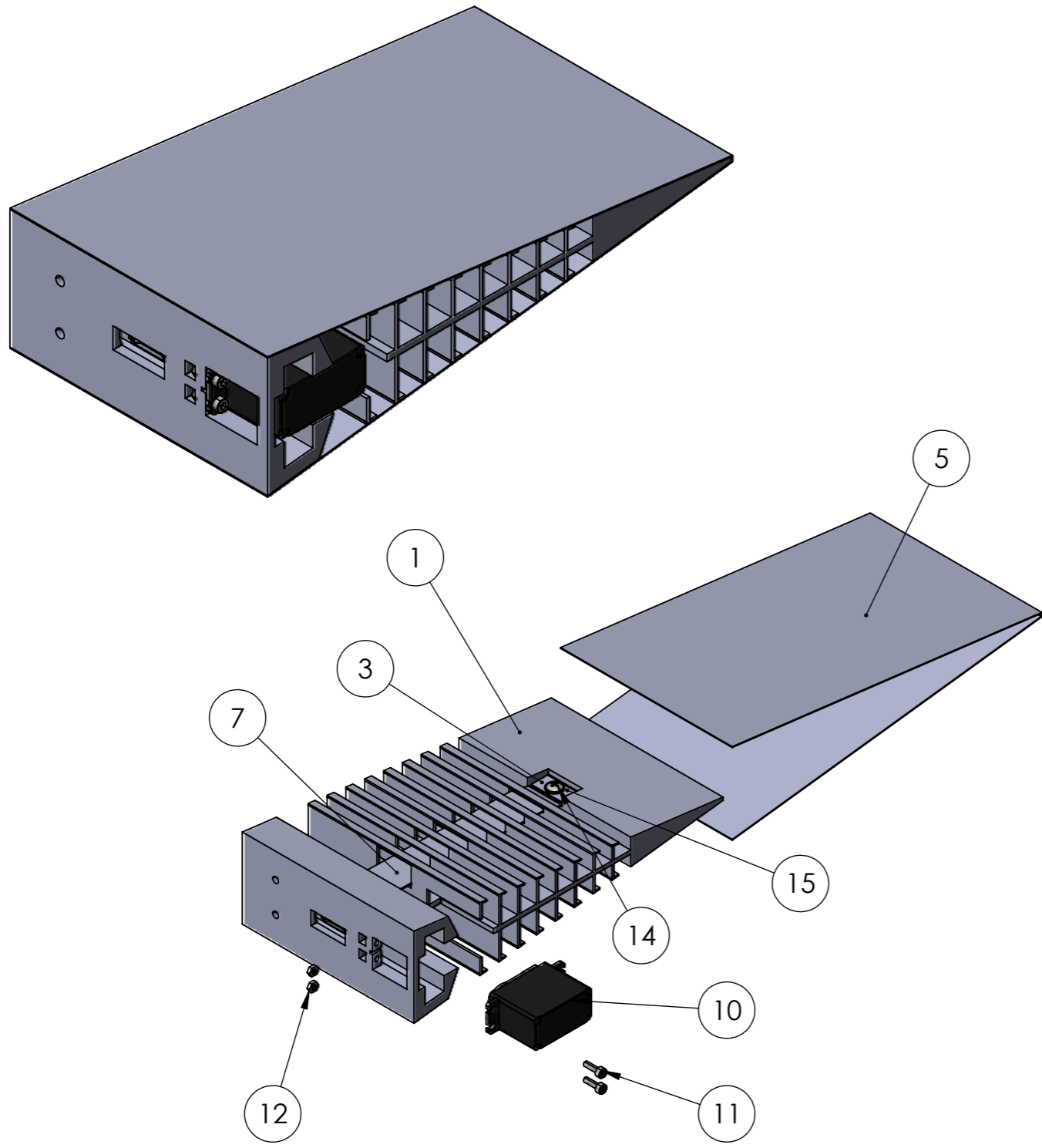
| | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|---------|--|------------------------------------|--|----------------------|--|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | | FINISH: | | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| DRAWN | | | | NAME | | SIGNATURE | | DATE | | TITLE: | |
| CHK'D | | | | | | | | | | Servo Shaft | |
| APPV'D | | | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | | | |
| Q.A | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | MATERIAL: | | DWG NO. | |
| | | | | | | | | WEIGHT: | | SCALE:2:1 | |
| | | | | | | | | | | SHEET 1 OF 1 | |
| | | | | | | | | | | A3 | |



| | | | | | | | | | | | |
|--|------|-----------|------|---------|--|------------------------------------|--|------------------------|--|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | | | FINISH: | | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH: | | | | | | | | <h1>Sheet Metal 1</h1> | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | | | |
| LINEAR: | | | | | | | | | | | |
| ANGULAR: | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | NAME | SIGNATURE | DATE | | | TITLE: | | | | | |
| DRAWN | | | | | | | | | | | |
| CHK'D | | | | | | | | | | | |
| APPV'D | | | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | | | |
| Q.A | | | | | | MATERIAL: | | DWG NO. | | A3 | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | WEIGHT: | | SCALE:5:1 | | SHEET 1 OF 1 | |



| | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|---------|--|------------------------------------|--|--------------------------------|--|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | | FINISH: | | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| | | | | | | | | TITLE: Sheet Metal 2 | | | |
| DRAWN | | | | NAME | | SIGNATURE | | DATE | | DWG NO. | |
| CHK'D | | | | | | | | | | A3 | |
| APPV'D | | | | | | | | | | SCALE:5:1 | |
| MFG | | | | | | | | | | SHEET 1 OF 1 | |
| Q.A | | | | | | | | MATERIAL: | | WEIGHT: | |
| | | | | | | | | | | | |



| | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|---------|--|------------------------------------|---------------------------------|----------------------|--|----------|--|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | FINISH: | | DEBURR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | | |
| DRAWN | | | | | | TITLE: Total assembly | | | | | |
| CHK'D | | | | | | DWG NO. | | | | | |
| APPV'D | | | | | | SCALE:1:3 | | | | | |
| MFG | | | | | | SHEET 1 OF 1 | | | | | |
| Q.A | | | | | | A3 | | | | | |
| WEIGHT: | | | | | | | | | | | |

| BILL OF MATERIALS | | | | |
|-------------------|---------------------|----------------|-----|-------------------------|
| No | DESCRIPTION | Material | QTY | PART NUMBER |
| 1 | Fish Backbone | ABS 3D Printed | 1 | |
| 2 | Servo Shaft | PLA 3D Printed | 1 | |
| 3 | Sheet Metal 1 | Metal | 2 | |
| 4 | Sheet Metal 2 | Metal | 1 | |
| 5 | Skin | Silicon Sheet | 1 | |
| 6 | Servo Hub | Aluminum | 1 | |
| 7 | Drive Belt | Nylon | 1 | |
| 8 | Shaft-Hub Screw | Steel | 4 | DIN EN ISO 7045 – M3X32 |
| 9 | Shaft-Hub Nut | Steel | 4 | ISO 4035 – M3 |
| 10 | Servo Motor | | 1 | Feetech FS5115M |
| 11 | Servo Screw | Steel | 2 | DIN 912 – M3X10 |
| 12 | Servo Nut | Steel | 2 | ISO 4036 – M3 |
| 13 | Belt-Shaft Screw | Steel | 2 | DIN EN ISO 7045 – M3X20 |
| 14 | Belt-Backbone Screw | Steel | 1 | DIN 967 – M4X12 |
| 15 | Belt-Backbone Nut | Steel | 1 | ISO 4036 – M4 |