



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

**«Ελαστική Ανάλυση Μορφοποιούμενης Πτέρυγας Μεταβλητής Γεωμετρίας
σε Δυο Διευθύνσεις με Εσωτερική Κυψελωτή Δομή
με Χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων»**

Διπλωματική Εργασία
Καραγιάννης Ευάγγελος

Επιβλέπων Καθηγητής:
Βασίλειος Σπίτας, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023

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.

Καραγιάννης Ευάγγελος

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους αποτέλεσαν στήριγμα για μένα, την οικογένειά μου, τους φίλους μου. Όλους αυτούς που σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό έπαιξαν ρόλο ώστε αυτό το «ταξίδι» να στεφθεί με επιτυχία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Βασίλη Σπιτά του οποίου η βοήθεια και οι συμβουλές ήταν καθοριστικές ώστε να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη εργασία με τέτοιο τρόπο που να έχει αφήσει δημιουργικό αποτύπωμα ολόκληρη η πορεία υλοποίησής της, από την σύλληψη, την λήψη αποφάσεων, την αντιμετώπιση ενδεχόμενων προβλημάτων.

Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω το Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών και τον κ. Αρετάκη καθώς και το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και τον υποψήφιο διδάκτορα Ηλία Μπιλάλη, για την παραχώρηση της υπολογιστικής τους υποδομής.

Περίληψη

Η εργασία αυτή καταπιάνεται με την ελαστική ανάλυση μορφοποιούμενης πτέρυγας σε δύο διευθύνσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Με βάση δεδομένα που αντλήθηκαν από διπλωματικές εργασίες που εκπονήθηκαν παλαιότερα στο Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών του Τομέα Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια διαμόρφωσης κατάλληλου μηχανισμού μορφοποίησης, ο οποίος για δεδομένες απαιτήσεις μορφοποίησης (π.χ. βέλος κάμψης στην ακμή εκφυγής) θα τις επιτυχαίνει με αξιοπιστία και ακρίβεια.

Στο πρώτο στάδιο της μελέτης πραγματοποιήθηκε προσομοίωση πειράματος κάμψης τριών σημείων σε πτέρυγα με πυρήνα honeycomb για την εύρεση της ανηγμένης δυσκαμψίας σε κάμψη αυτής. Πραγματοποιήθηκε επίσης παραμετρική ανάλυση για την δυσκαμψία συγκριτικά με τον αριθμό των κυψελών στο εσωτερικό της πτέρυγας (μέσω μεταβολής του μήκους κάθε πλευράς της κυψέλης). Τα μοντέλα που προέκυψαν υπεβλήθησαν σε ιδιοδιανυσματική ανάλυση τόσο για κενό τον χώρο μεταξύ των κυψελών, όσο και για τον ίδιο χώρο γεμάτο με αφρό.

Στο δεύτερο στάδιο της μελέτης διαμορφώθηκε η τελική κατασκευή, η οποία αντικαθιστά τα πηδάκια πτήσης μιας συμβατικής πτέρυγας. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχεται η κλίση και η περιστροφή του αεροσκάφους που λόγω της μοντελοποιούμενης πτέρυγας θεωρείται Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος (UAV). Με χρήση επενεργητή και λεπτού συρματόσχοινου ασκείται δύναμη σε μια κατασκευή αποτελούμενη από διαμήκη και εγκάρσια νεύρα. Η κατασκευή συνδέεται με την κυψελωτή δομή του κυρίου σώματος μέσω άλλης οριζόντιας πλάκας μικρού πάχους, η οποία οδηγείται σε κάμψη από την παραπάνω δύναμη, δίνοντας την απαραίτητη κλίση. Η λογική πίσω από την ανάπτυξη του μηχανισμού για τις γωνίες roll και pitch είναι η ίδια.

Για την προσομοίωση όλων των απαραίτητων δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA) ANSYS.

Abstract

This thesis deals with the elastic analysis of a two-directional shape morphing wing through Finite Element Analysis. Based on data derived from theses previously carried out in the Machine Design Laboratory of the Mechanical Design and Automatic Control Section, an attempt was made to formulate a suitable mechanism, which for given shaping requirements (e.g. bending arrow at the trailing edge) will achieve the objective without the occurrence of failures.

In the first stage of the study, a simulation of a three-point bending experiment on a wing with a honeycomb structure core was performed to find the reduced stiffness in bending of this wing. A parametric analysis was also performed for stiffness versus the number of cells inside the wing (by varying the length of each side of the cell). The resulting models were subjected to eigenvector analysis twice: once after the cells were filled with foam and once for empty space inside the cells.

In the second stage of the study the final structure was modeled, which replaces the flaps and ailerons of a conventional wing. In this way the aircraft's pitch and roll angles are controlled, an aircraft assumed to be an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) due to its small size. Using an actuator and thin wire rope, a force is applied to a structure consisting of longitudinal and transverse ribs. The structure is connected to the honeycomb structure of the main body through another horizontal plate of small thickness, which is driven in bending by the aforementioned force, giving the necessary inclination. The logic behind the development of the mechanism for the roll and pitch angles is the same.

ANSYS finite element analysis (FEA) software was used to simulate all the necessary tests.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	17
1.1. Ιστορική Αναδρομή	18
1.2. Σύγχρονες Προκλήσεις	21
1.3. Αξιοποίηση μορφοποιούμενων πτερυγών και πλεονεκτήματα	23
2. Προσομοίωση κάμψης τριών σημείων και παραμετρική ανάλυση	25
2.1. Αξιοποίηση πλάκας αυξητικής honeycomb δομής	25
2.2. Διαμόρφωση γεωμετρίας για κάμψη τριών σημείων	26
2.3. Προετοιμασία στο ANSYS	27
2.3.1. Επιλογή υλικών	28
2.3.2. Διαμόρφωση Πλέγματος	28
2.4. Επίλυση του προβλήματος κάμψης	30
2.4.1. Υπολογισμός στηρίξεων στην αρχική πτέρυγα	30
2.4.2. Παραμετρική ανάλυση για τον αριθμό των κυψελών	30
3. Ιδιοδιανυσματική ανάλυση	33
3.1. Γενικές αρχές ιδιοδιανυσματικής ανάλυσης	33
3.2. Ιδιοδιανυσματική ανάλυση σε UAV	35
3.3. Μελέτη με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων	35
3.3.1. Δόμηση του πλέγματος	35
3.3.2. Οριακές συνθήκες	37
3.3.3. Λήψη αποτελεσμάτων	37
3.3.4. Παραμετρική ανάλυση	40
3.3.5. Τρόποι απόσβεσης κραδασμών	43
4. Ανάπτυξη της πτέρυγας με μηχανισμό μορφοποίησης δύο διευθύνσεων	51
4.1. Επιλογή αυξητικής δομής για το εσωτερικό και προσδιορισμός της θέσης του μηχανισμού μορφοποίησης	51
4.2. Διαμόρφωση της πτέρυγας σε λογισμικό CAD	51
4.2.1. Μηχανισμός μορφοποίησης στην ακμή εκφυγής	53
4.2.2. Μηχανισμός μορφοποίησης στο ακροπτερύγιο	55
4.2.3. Τελικός πυρήνας της πτέρυγας	56
4.2.4. Ανάπτυξη του κελύφους της πτέρυγας	58
4.3. Ελαστική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων	59

4.3.1. Μοντελοποίηση λειτουργίας του μηχανισμού μορφοποίησης	59
4.3.2. Δόμηση πλέγματος	62
4.3.3. Προετοιμασία της ανάλυσης	65
5. Εκτίμηση των αποτελεσμάτων και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	67

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Γεράκι κατά την διάρκεια της πτήσης	17
Εικόνα 2: Σχέδια για το Eole	18
Εικόνα 3: TBM-3R Avenger με αναδιπλούμενα φτερά	18
Εικόνα 4: Pterodactyl IV, 1931	19
Εικόνα 5: Bell X-5, 1951	19
Εικόνα 6: Ιστορική αναδρομή σημαντικών μορφοποιούμενων αεροσκαφών	20
Εικόνα 7: Ανάπτυξη μορφοποιούμενης πτέρυγας με χρήση επενεργητή	21
Εικόνα 8: Λυγισμός κατά την χορδή μέσω της θέρμανσης λωρίδων από SMA (a) Μη μορφοποιημένη (b) Μορφοποιημένη	22
Εικόνα 9: Στοιχειώδης κυψέλη	25
Εικόνα 10: Σχέδιο της πτέρυγας σε τομή	26
Εικόνα 11: Τελική διαμόρφωση της πτέρυγας για την κάμψη τριών σημείων σε τομή ...	27
Εικόνα 12: Οριακές συνθήκες και μετατοπίσεις στην αυξητική δομή για την προσομοίωση κάμψης τριών σημείων	27
Εικόνα 13: Πλέγμα στο περίβλημα της πτέρυγας για την προσομοίωση κάμψης τριών σημείων	29
Εικόνα 14: Πλέγμα κυψελωτής δομής για την προσομοίωση κάμψης τριών σημείων ...	29
Εικόνα 15: Διαμόρφωση πτέρυγας με κυψελωτή δομή ακμής κυψέλης 15mm σε τομή	31
Εικόνα 16: Διαμόρφωση πτέρυγας με κυψελωτή δομή ακμής κυψέλης 10mm σε τομή	31
Εικόνα 17: Πλέγμα του περιβλήματος της πτέρυγας κατά την ιδιοδιανυσματική ανάλυση	36
Εικόνα 18: Πλέγμα της κυψελωτής δομής της πτέρυγας κατά την ιδιοδιανυσματική ανάλυση	36
Εικόνα 19: 1 ^η Ιδιομορφή	38
Εικόνα 20: 2 ^η Ιδιομορφή	38
Εικόνα 21: 3 ^η Ιδιομορφή	38
Εικόνα 22: 4 ^η Ιδιομορφή	39
Εικόνα 23: 5 ^η Ιδιομορφή	39
Εικόνα 24: 6 ^η Ιδιομορφή	39
Εικόνα 25: Πλέγμα κυψελωτής δομής ακμής κυψέλης 15mm κατά την ιδιοδιανυσματική ανάλυση	41

Εικόνα 26: Πλέγμα του skin της αεροτομής για την πτέρυγα με ακμή κυψέλης αυξητικής δομής 15mm	41
Εικόνα 27: Πλέγμα κυψελωτής δομής ακμής κυψέλης 10mm κατά την ιδιοδιανυσματική ανάλυση.....	42
Εικόνα 28: Πλέγμα του skin της αεροτομής για την πτέρυγα με ακμή κυψέλης αυξητικής δομής 10mm	42
Εικόνα 29: 1 ^η Ιδιομορφή (30mm)	44
Εικόνα 30: 2 ^η Ιδιομορφή (30mm)	45
Εικόνα 31: 3 ^η Ιδιομορφή (30mm)	45
Εικόνα 32: 4 ^η Ιδιομορφή (30mm)	45
Εικόνα 33: 5 ^η Ιδιομορφή (30mm)	46
Εικόνα 34: 6 ^η Ιδιομορφή (30mm)	46
Εικόνα 35: 1 ^η Ιδιομορφή (15mm)	46
Εικόνα 36: 2 ^η Ιδιομορφή (15mm)	47
Εικόνα 37: 3 ^η Ιδιομορφή (15mm)	47
Εικόνα 38: 4 ^η Ιδιομορφή (15mm)	47
Εικόνα 39: 5 ^η Ιδιομορφή (15mm)	48
Εικόνα 40: 6 ^η Ιδιομορφή (15mm)	48
Εικόνα 41: 1 ^η Ιδιομορφή (10mm)	48
Εικόνα 42: 2 ^η Ιδιομορφή (10mm)	49
Εικόνα 43: 3 ^η Ιδιομορφή (10mm)	49
Εικόνα 44: 4 ^η Ιδιομορφή (10mm)	49
Εικόνα 45: 5 ^η Ιδιομορφή (10mm)	50
Εικόνα 46: 6 ^η Ιδιομορφή (10mm)	50
Εικόνα 47: Όψη της κυψελωτής δομής με την γέμιση αφρού	51
Εικόνα 48: Κάτοψη της διαμόρφωσης της πτέρυγας μετά τις τομές	52
Εικόνα 49: Κάτοψη του μηχανισμού μορφοποίησης	53
Εικόνα 50: Όψη του μηχανισμού μορφοποίησης	54
Εικόνα 51: Κάτοψη του μηχανισμού μορφοποίησης του ακροπτερύγιου	55
Εικόνα 52: Όψη του μηχανισμού μορφοποίησης	55
Εικόνα 53: Πλάγια όψη του μηχανισμού μορφοποίησης	56
Εικόνα 54: Κάτοψη ενιαίου τμήματος αυξητικής δομής-μηχανισμού μορφοποίησης	57
Εικόνα 55: Τελική μορφολογία πυρήνα πτέρυγας	57
Εικόνα 56: Διαμόρφωση του κελύφους σε κάτοψη και σε τομή	58
Εικόνα 57: Λειτουργία μηχανισμού μορφοποίησης για την γωνία pitch	59

Εικόνα 58: Γραφική απεικόνιση του μήκους l και του ύψους h	60
Εικόνα 59: Κατακόρυφη απόσταση οριζόντιας πλάκας και σημείου εφαρμογής δύναμης στη θέση 1	61
Εικόνα 60: Κατακόρυφη απόσταση οριζόντιας πλάκας και σημείου εφαρμογής δύναμης στη θέση 2	61
Εικόνα 61: Κομμάτια αφρού με μέγεθος πλέγματος 2mm	62
Εικόνα 62: Κομμάτια αφρού με μέγεθος πλέγματος 1mm	63
Εικόνα 63: Κομμάτι αφρού με μέγεθος πλέγματος 3mm	63
Εικόνα 64: Τμήμα όπου πραγματοποιήθηκε refinement	63
Εικόνα 65: Ορισμός αριθμού κόμβων για τις ακμές του μηχανισμού μορφοποίησης	64
Εικόνα 66: Τμήμα μεγέθους πλέγματος 0.7mm	64
Εικόνα 67: Τμήμα μεγέθους πλέγματος 0.5mm	65
Εικόνα 68: Ανάπτυξη πλέγματος	66
Εικόνα 69: Πλέγμα στο εσωτερικό της πτέρυγας.....	66
Εικόνα 70: Μετατόπιση διαμήκους μηχανισμού για ίδια φορά γωνίας	68
Εικόνα 71: Μετατόπιση εγκάρσιου μηχανισμού για ίδια φορά γωνίας	68
Εικόνα 71: Τάσεις στα σημεία εφαρμογής της δύναμης και στις οριζόντιες πλάκες των μηχανισμών μορφοποίησης	69
Εικόνα 72: Μετατοπίσεις για γωνία αντίθετης φοράς	69

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Μηχανικές ιδιότητες PET	28
Πίνακας 2: Μηχανικές ιδιότητες σύνθετου υλικού	28
Πίνακας 3: Δυσκαμψία Αρχικής Πτέρυγας (Ακμής Κυψέλης 30mm)	30
Πίνακας 4: Σύγκριση μεγεθών δυσκαμψίας και ανηγμένης δυσκαμψίας κατά την παραμετρική ανάλυση	32
Πίνακας 5: Σύγκριση κόμβων και στοιχείων των τριών περυγών κατά την ιδιοδιανυσματική ανάλυση	37
Πίνακας 6: Ιδιοσυχνότητες Αρχικής Πτέρυγας	37
Πίνακας 7: Οι έξι πρώτες ιδιοσυχνότητες για τις τρεις πτέρυγες	43
Πίνακας 8: Συγκριτικά αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων	50

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ανηγμένης δυσκαμψίας	33
---	----

Κεφάλαιο 1.Εισαγωγή

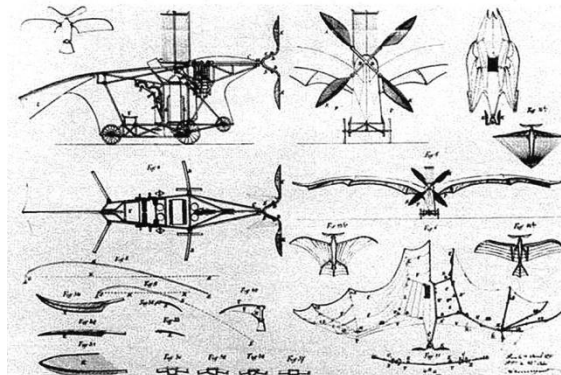
Η δημιουργία πτερύγων μεταβλητής γεωμετρίας σε αεροσκάφη είναι άλλη μια απόδειξη ότι η φύση μπορεί να αποτελέσει έμπνευση για νέες ανακαλύψεις και τεχνολογικά επιτεύγματα. Τα πουλιά που μπορούν να αλλάζουν θέση στα φτερά τους, να τα εκτείνουν ή να τα μαζεύουν, να τους δίνουν κλίση και στροφή με σκοπό να αλλάξουν το ύψος πτήσης, την ταχύτητα και να στρίψουν στον αέρα ήταν αυτό που έδωσε τροφή για σκέψη αναφορικά με τις δυνατότητες που υπάρχουν στην αεροναυπηγική για να ξεπεράσει τα μέχρι τότε δεδομένα της αμετάβλητης πτέρυγας με τα πηδάλια (flaps, ailerons κλπ) για την κατεύθυνση αυτού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού είναι τα γεράκια που κατά την φάση παραμόνευσης, έχουν τα φτερά τους σε πλήρη έκταση, ενώ σε ελιγμούς και «καταδύσεις» για το κυνήγι ενός θυράματός τους, μαζεύουν τα φτερά τους με σκοπό την μεγιστοποίηση της ταχύτητάς τους. Η δυνατότητα για μεταβολή της μορφολογίας της πτέρυγας κατά τη διάρκεια της πτήσης δίνει την δυνατότητα να βελτιστοποιηθούν οι αεροδυναμικές επιδόσεις σε κάθε φάση της πτήσης. Η κλασική αμετάβλητη πτέρυγα δίνει καλές αεροδυναμικές επιδόσεις για το συγκεκριμένο εύρος πτήσης που έχει σχεδιαστεί το αεροσκάφος και για περιορισμένο σετ συνθηκών πτήσης. Έτσι μια προσέγγιση στην αεροναυπηγική που γυρνάει πολύ πίσω στο χρόνο, αντιμετωπίζει στην σύγχρονη εποχή νέες προκλήσεις.



Εικόνα 1: Γεράκι κατά την διάρκεια της πτήσης

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η σχέση της κατασκευής αεροσκαφών με τις έννοιες της μορφοποίησης στις πτέρυγες, γυρνάει πολλές δεκαετίες πίσω. Οι πρώτες αναφορές για μορφοποιούμενα αεροσκάφη ξεκίνησαν γύρω στο 1890 με τον Γάλλο πρωτοπόρο της αεροναυπηγικής Clement Ader να προτείνει ως σχέδιο για αεροσκάφος μια κατασκευή που έμοιζε με φτερά νυχτερίδας. Η συγκεκριμένη κατασκευή που ονομάστηκε Eole μπορούσε να μειώσει το εκπέτασμά της στο μισό ή και στο 1/3 ακόμη του αρχικού.



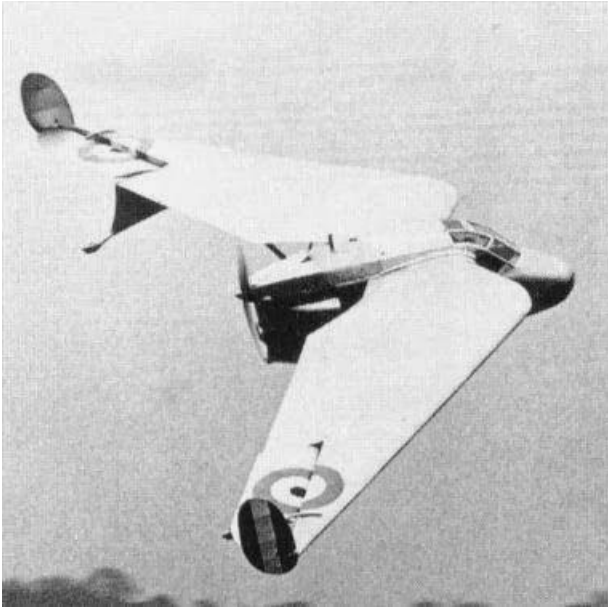
Εικόνα 2: Σχέδια για το Eole

Από το 1903 άρχισαν να διαμορφώνονται τα πρώτα αεροσκάφη τα οποία μπορούσαν να αλλάξουν την γωνία κλίση της πτέρυγας –μέσω συρματόσχοινων που χειριζόταν ο πιλότος- για να εξυπηρετηθεί ο έλεγχος της γωνίας roll. Τέτοιο αεροσκάφος ήταν το Wright Flyer. Η έναρξη του 1^{ου} ΠΠ έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη μαχητικών με αναδιπλούμενα φτερά ώστε να καταλαμβάνουν μικρότερο χώρο στα αεροπλανοφόρα.



Εικόνα 3: Grumman TBM-3R Avenger με αναδιπλούμενα φτερά

Στις αρχές της δεκαετίας του '30 αναπτύχθηκε το πρώτο αεροσκάφος μεταβλητής οπισθόκλισης, το Pterodactyl IV που αποτέλεσε την αρχή για άλλα αεροσκάφη με μεταβλητή την κλίση των φτερών όπως μια σειρά εμβληματικών αεροσκαφών ειδικά την δεκαετία του '60 όπως το F111 και μια σειρά σοβιετικά πολεμικά αεροσκάφη όπως το MiG-23, το SU-24, μέχρι το F-14 Tomcat στις αρχές της δεκαετίας του '70.
























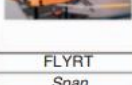


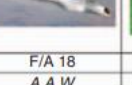

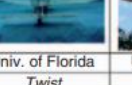


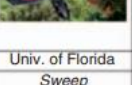
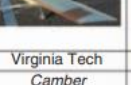




Εικόνα 4: Pterodactyl IV, 1931



Εικόνα 5: Bell X-5, 1951

Η μεταβολή της οπισθόκλισης της πτέρυγας (sweep) εξυπηρετεί τα αεροσκάφη τα οποία μπορούν να πετάξουν με ταχύτητα κοντινή με αυτή του ήχου. Σε τέτοιες ταχύτητες, τα φτερά ξεκινούν να ταλαντώνονται και ένα ωστικό κύμα δημιουργείται πίσω από αυτά με αποτέλεσμα την αύξηση της οπισθέλκουσας. Αυτό αντιμετωπίζεται με την κλίση των φτερών προς τα πίσω όπου δίνει την αίσθηση μιας πτέρυγας με μεγαλύτερο πλάτος. Αυτή η διαμόρφωση έχει καλές επιδόσεις στις υψηλές ταχύτητες, μα για χαμηλές ταχύτητες παρουσίαζε χαμηλή αποδοτικότητα. Αυτή ήταν η βάση διαμόρφωσης των αεροσκαφών μεταβλητής οπισθόκλισης, που παρόλο την αύξηση του βάρους και της πολυπλοκότητας κατασκευής, τα πλεονεκτήματα υπερτερούν των μειονεκτημάτων.

Παρότι από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα είχαν κατασκευαστεί αεροσκάφη με πτέρυγες μεταβλητής γεωμετρίας, κατά βάση η μελέτη στον εν λόγω τομέα πήγε πίσω καθώς πήρε προβάδισμα η χρήση αποσπόμενων μερών και μηχανισμάτων για να αυξήσουν την άνωση κατά την διάρκεια της απογείωσης και της προσγείωσης. Ρόλο έπαιξε εκεί η αύξηση του βάρους και της στιβαρότητας των φτερών τόσο όσο να απογεύγονται μια σειρά αεροελαστικά φαινόμενα. Τέτοια αποσπόμενα μέρη είναι τα γνωστά flaps και ailerons. Ήταν η δεκαετία του 1970 αυτή κατά την οποία η έρευνα έστρεψε το βλέμμα της προς τις πτέρυγες μεταβλητού σχήματος. Η έρευνα πάνω σε αυτό το κομμάτι επικεντρώθηκε πάνω στον ενεργό έλεγχο της καμπυλότητας κατά το μήκος της πτέρυγας και στην εφαρμογή εύκαμπτων περυγών, ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευση των αεροελαστικών δυνάμεων ώστε η πτέρυγα να πάρει το κατάλληλο σχήμα [1].

1903	1931	1931	1932	1937	1947	1951
						
Wright Flyer Twist	Pterodactyl IV Sweep	MAK-10 Span	IS-1 Bi-to monoplane	LIG-7 Chord	MAK-123 Span	X 5 Sweep
1952	1964	1964	1966	1967	1967	1969
						
XF10F Sweep	F 111 Sweep	XB 70 Span bending	Su 17 IG Sweep	MIG 23 Sweep	SU 24 Sweep	Tu 22 M Sweep
1970	1972	1974	1974	1979	1981	1985
						
F 14 Sweep	FS 29 Span	B 1 Sweep	Tornado Sweep	AD 1 Obliquing	Tu 160 Sweep	AFTI/F 111 M.A.W.
1993	1994	2001	2002	2003	2004	2005
						
FLYRT Span	MOTHRA Camber	AAL Pitch	F/A 18 A.A.W.	Virginia Tech Span	Univ. of Florida Twist	Univ. of Florida Gull
2006	2006	2007	2007	2007	2008	2010
						
MFX 1 Sweep & Span	Univ. of Florida Sweep	Virginia Tech Camber	Univ. of Florida Folding	MFX 2 Sweep & span	Delft Univ. Sweep	Virginia tech Camber

Εικόνα 6: Ιστορική αναδρομή σημαντικών μορφοποιούμενων αεροσκαφών.

1.2 Σύγχρονες Προκλήσεις

Παρότι εδώ και κάποια χρόνια οι τεχνολογίες μορφοποίησης είχαν αφεθεί «στην άκρη» νέα δεδομένα των τελευταίων χρόνων έχουν οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα να ξανακαταπιαστεί με το συγκεκριμένο θέμα. Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών άνοιξε τους δρόμους για νέες δυνατότητες μορφοποίησης. Σε αυτές μέσα τον κυριότερο ρόλο έπαιξε η ανάπτυξη διάφορων τύπων επενεργητών και έξυπνων υλικών. Το ζήτημα αυτό θα αναπτυχθεί εκτενέστερα παρακάτω. Άλλη μια σοβαρή αιτία είναι πως στο επίπεδο της στρατιωτικής αξιοποίησης, οι αποστολές που χρησιμοποιούνται τα πολεμικά αεροσκάφη έχουν μεταβληθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες με ότι συνέπειες μπορεί να έχει αυτό για την ανάγκη για ευελιξία και προσαρμοστικότητα.[2] Βέβαια η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η χρήση της είναι σε άμεση συνάρτηση σε σχέση με ποιος την κατέχει και για ποιον λόγο την παράγει.

Η ανάπτυξη επενεργητών μεγάλου εύρους μεγεθών και ισχύος έδωσε την δυνατότητα για βελτιστοποίηση της κατανομής των δυνάμεων και ισχύος στο εσωτερικό της μορφοποιούμενης πτέρυγας. Η χρήση τους δύναται να μειώσει σημαντικά το βάρος μια μορφοποιούμενης πτέρυγας σε σύγκριση με άλλους, καθιερωμένους μηχανισμούς μορφοποίησης.



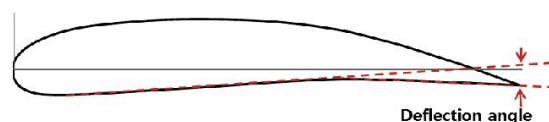
(a) Without actuation



(b) With actuation



(a) Model 1 : 0.0 A(0°)



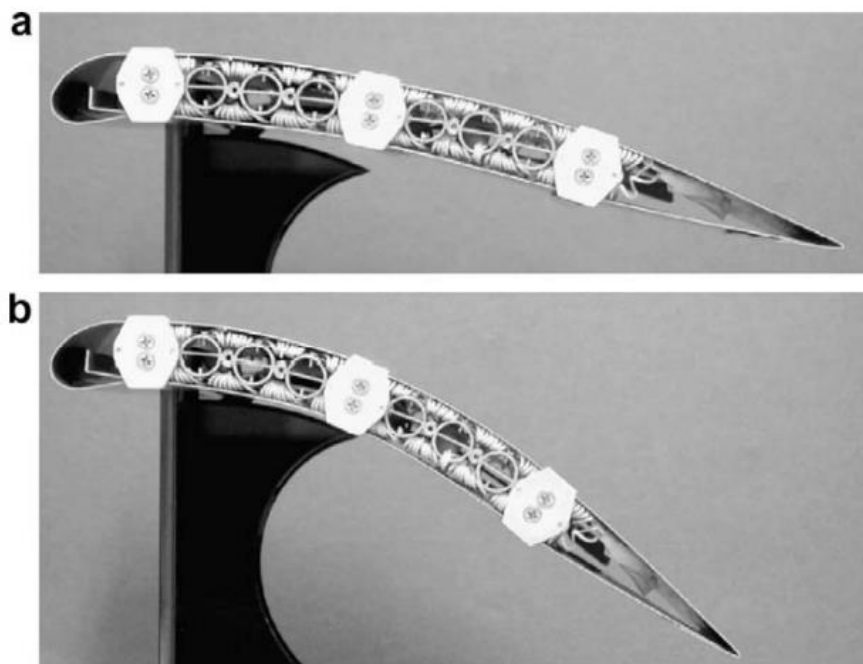
(b) Model 2 : 1.8 A(6.4°)



(c) Model 3 : 2.4 A(15.85°)

Εικόνα 7: Ανάπτυξη μορφοποιούμενης πτέρυγας με χρήση επενεργητή

Σύνδεση με το παραπάνω έφερε η ανάπτυξη νέων, «έξυπνων» υλικών. Το 2005 ο Jacob και οι άλλοι παρουσίασαν την χρήση καλωδίων κράματος μνήμης σχήματος για την παραμόρφωση μιας «φουσκωτής» πτέρυγας. Προσεδεσαν το σύρμα από το κράμα μνήμης σχήματος (Shape Memory Alloy - SMA) στην κάτω επιφάνεια της πτέρυγας. Το χείλος εκφυγής μπορούσε να εκτραπεί με την θέρμανση του επενεργητή από SMA, διατηρώντας όμως την γεωμετρία του χείλους προσβολής αναλλοίωτη. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η περιστροφή του ακροπτερύγιου κατά 3° . Δεν δώθηκαν πληροφορίες σε σχέση με την αντιστρεψιμότητα του συστήματος επενέργειας ή τις επιδόσεις υπό φορτίο [2].



Εικόνα 8: Λυγισμός κατά την χορδή μέσω της θέρμανσης λωρίδων από SMA (a) Μη μορφοποιημένη (b) Μορφοποιημένη [3]

Σε όλη την διάρκεια της πρώτης δεκαετίας του 21^{ου} αιώνα εκδόθηκαν papers για την χρήση SMA σε μορφοποιούμενες πτέρυγες, για μεταβολή κατά βάση της γραμμής καμπυλότητας. Ο Seow και οι άλλοι το 2008 παρουσίασαν μελέτη για μορφοποιούμενα πηδάλια με επενέργεια από σύρματα από SMA, συμπεριλαμβανομένου και μιας θεωρητικής ανάλυσης για την αεροδυναμική φόρτιση [4]. Κατασκευάστηκε πρωτότυπη πτέρυγα η οποία έφερε γωνία επενέργειας στις $5,2^\circ$. Ένα δεύτερο πρωτότυπο κατάφερε να φέρει εκτροπή 15° , ενώ έγινε και έρευνα και πειραματισμός με ευέλικτα κελύφη. Πέρα από SMA, έχουν αξιοποιηθεί για επενέργεια και πιεζοηλεκτρικά υλικά.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος ειδικά αναφορικά με την μορφοποίηση σε σχέση με τις παραμέτρους της αεροτομής (γραμμή καμπυλότητας, μήκος χορδής κλπ), ειδικά εκεί που απαιτούνται μεγάλες αλλαγές στο σχήμα, είναι η εύρεση κατάλληλου κελύφους το οποίο αποτελεί πρόκληση.

Το κέλυφος χρειάζεται να μπορεί να συγκεράσει την αντοχή στα αεροδυναμικά φορτία, την κατασκευαστική του ακεραιότητα, ενώ ταυτόχρονα να συμμορφώνεται με τον μηχανισμό μορφοποίησης, να φέρει τις απαραίτητες παραμορφώσεις. Χρειάζεται δηλαδή να είναι ταυτόχρονα αρκετά μαλακό και αρκετά άκαμπτο. Η ανάπτυξη του κατάλληλου κελύφους απαιτεί και την χρήση υλικών κατάλληλων για να συνεννώσει αυτές τις φαινομενικά αντικρουόμενες απαιτήσεις. Η απαίτηση για το συγκεκριμένο κάθε φορά κέλυφος προκύπτει από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις φόρτισης. [5]

Μια νεοαναπτυσσόμενη τεχνολογία που πιστεύεται πως θα αξιοποιηθεί για ανάπτυξη τέτοιων κελυφών είναι τα πολυμερή μνήμης σχήματος. Όταν θερμανθούν, το σχήμα που λαμβάνουν είναι χαμηλής δυσκαμψίας και με σχετική ευκολία μπορεί να μεταβληθεί από επενεργητές. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, αποκτά χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας.

Άλλα υλικά που μπορούν να αξιοποιηθούν στην ανάπτυξη των κατάλληλων κελυφών είναι κάποια ηλεκτροενεργά πολυμερή και κάποια νανοσύνθετα υλικά.

1.3 Αξιοποίηση μορφοποιούμενων πτερύγων και πλεονεκτήματα

Αν και ιστορικά οι μορφοποιούμενες πτέρυγες έχουν οδηγήσει σε αύξηση του κόστους, της συνθετότητας της κατασκευής ή/και του βάρους, τα πλεονεκτήματα που αποκομίζονται συνολικότερα για το αεροσκάφος, τα αντισταθμίζουν κάνοντας την μορφοποίηση βιώσιμη τεχνολογία.

Το βασικό πλεονέκτημα είναι πως μια πτέρυγα η οποία μπορεί να προσαρμόζεται στις δεδομένες συνθήκες πτήσης μειώνει τους συμβιβασμούς που χρειάζονται να γίνουν για να διασφαλιστεί η λειτουργία του αεροσκάφους σε όλες τις συνθήκες πτήσης [Stanewsky, 2001] [1].

Σημαντική πλευρά είναι η εκοικονόμηση καυσίμων που είναι ιδιαίτερα σημαντική σε πολιτικά αεροσκάφη και σε αεροσκάφη HALE. Η χρήση μορφοποιούμενης πτέρυγας, της οποίας το σχήμα αλλάζει σύμφωνα με τα εξωτερικά αεροδυναμικά φορτία παίζει ρόλο στην βελτιστοποίηση της ροής σε κάθε φάση της πτήσης του αεροσκάφους. Οι

αεροδυναμικές επιδόσεις μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά συμπαρασύροντας μαζί τους την μείωση της κατανάλωσης καυσίμων.

Επιπλέον αυξάνονται σημαντικά οι αποστολές που μπορεί να αναλάβει ένα αεροσκάφος να φέρει εις πέρας, να αναλάβει νέους ρόλους, επεκτείνοντας τον κατάλογο πτήσεων για τα αεροσκάφη. Ειδικότερα σε UAV's, η τεχνολογία μεταβλητής πτέρυγας αυξάνει την αναλογία ωφέλιμου φορτίου, μπορεί να πετύχει μικρότερη απόσταση απογείωσης, να προσγειωθεί και να σταματήσει σε μικρότερη απόσταση, έχει πιο αποδοτική αλλαγή υψομέτρου σε χαμηλότερες στροφές του κινητήρα, μπορεί να αποκτήσει μεγαλύτερη ταχύτητα πλεύσης, μπορεί να μειώσει την ταχύτητα απώλειας στήριξης, να μειώσει την οπισθέλκουσα όπου είναι απαραίτητο [1], [5].

Κεφάλαιο 2: Προσομοίωση Κάμψης Τριών Σημείων και Παραμετρική Ανάλυση

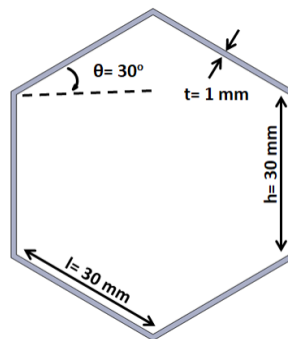
2.1 Αξιοποίηση Πλάκας Αυξητικής Honeycomb Δομής

Στην πορεία διαμόρφωσης της μορφοποιούμενης πτέρυγας η κάμψη αυτής πρέπει να μοντελοποιηθεί ως κάμψη μιας πλάκας. Στην πλάκα που έρχεται σε κάμψη έρχονται σε σύγκρουση δύο αντίθετα φαινόμενα. Ένας εφελκυσμός και μια θλίψη στις 2 μεγάλες επιφάνειες της πλάκας που όμως οδηγούν με την σειρά τους εξαιτίας της ιδιότητας της διατήρησης του όγκου που αποτυπώνεται με τον λόγο Poisson, σε θλίψη στην άλλη πλευρά της επιφάνειας που εφελκύεται και σε εφελκυσμό στην άλλη πλευρά της επιφάνειας που θλίβεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η πλάκα να πάρει μορφή σάγματος, μορφή μη επιθυμητή για την εν λόγω μελέτη. Στις μορφοποιούμενες πτέρυγες αεροσκαφών και UAV το σχήμα της πτέρυγας επιρρεάζει ισχυρά τις αεροδυναμικές ιδιότητες. Άρα η απαίτηση που υπάρχει είναι η μορφή της να μένει αναλλοίωτη πέρα από το μορφοποιούμενο κομμάτι.

Στην ικανοποίηση αυτής της απαίτησης μπορούν να συμβάλλουν δομές honeycomb, των οποίων μηχανική ιδιότητα είναι να φέρουν μηδενικό λόγο Poisson, $\nu=0$. Οι δομές αυτές όταν κάμπτονται δεν παρουσιάζουν αυτό το φαινόμενο «σαγματοποίησης», και συμβάλλουν ώστε η πτέρυγα να διατηρεί τον στιβαρό σχεδιασμό της.

Προηγουμένως στο εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών [6], έχουν αναπτυχθεί τέτοιες δομές που θα αξιοποιηθούν σε αυτή την διπλωματική εργασία. Συγκεκριμένα θα αξιοποιηθεί honeycomb auxetic δομή με τα παρακάτω κατασκευαστικά χαρακτηριστικά:

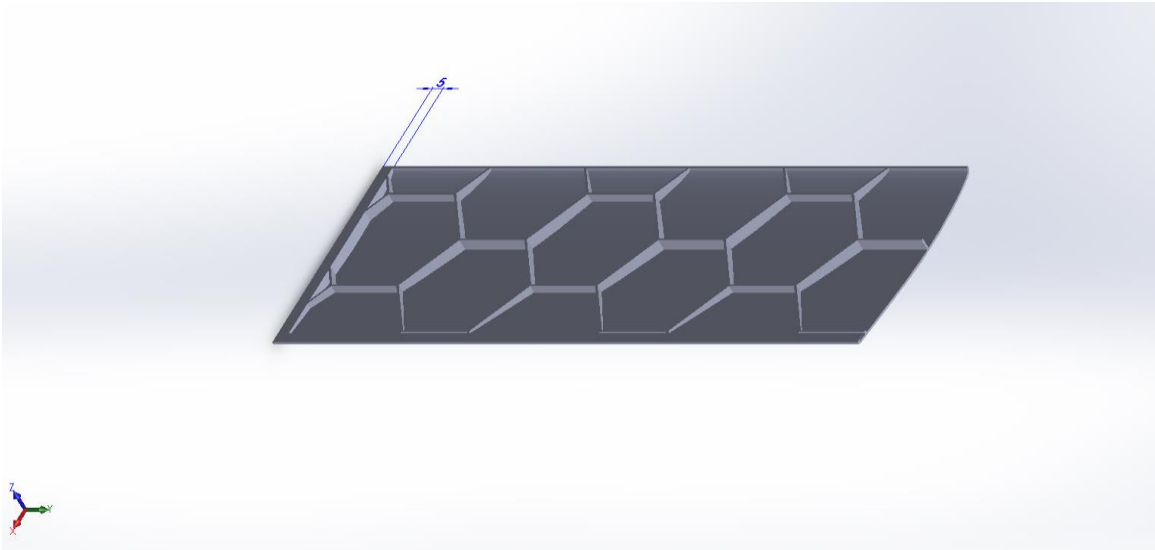
- Μήκος Ακμής 30mm
- Πάχος πλευράς 1mm



Εικόνα 9: Στοιχειώδης κυψέλη

Η συγκεκριμένη δομή συμβάλλει στην αύξηση της δυσκαμψίας της πτέρυγας για αυτό χρειάζεται να ελεγχθούν οι μηχανικές ιδιότητές της ως προς την μορφολογία της.

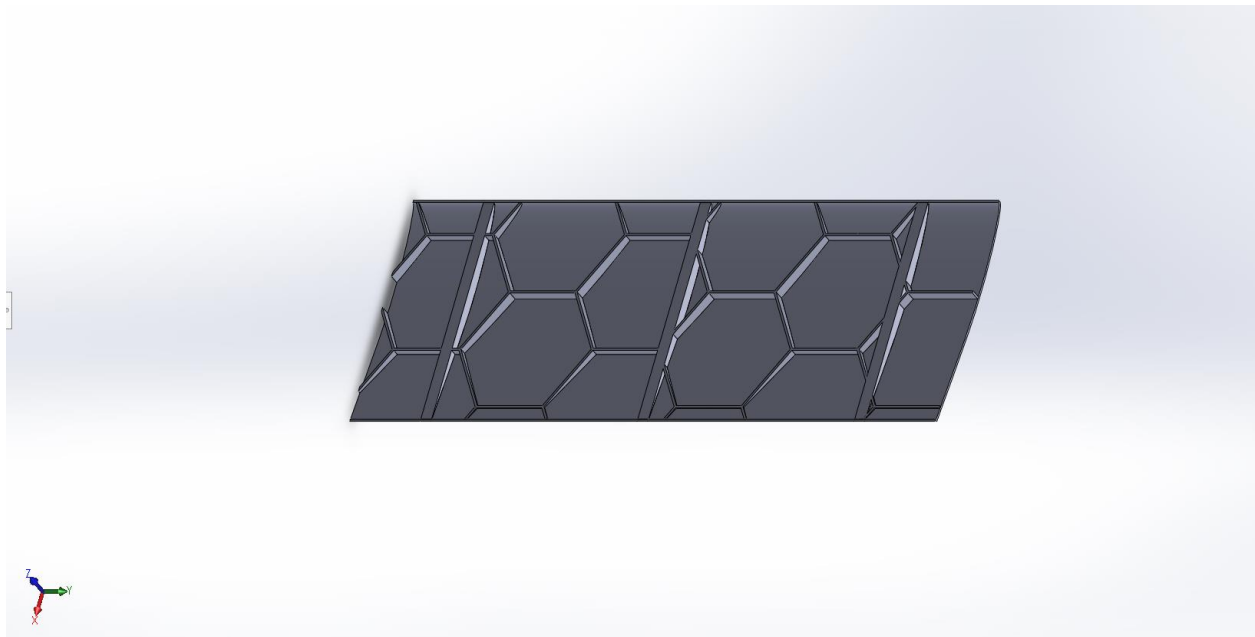
Η μελέτη θα γίνει πάνω σε πτέρυγα μικρού μη επανδρωμένου αεροσκάφους μήκους 270mm με αεροτομή NACA64010 μήκους χορδής 100mm.



Εικόνα 10: Σχέδιο της πτέρυγας σε τομή

2.2 Διαμόρφωση Γεωμετρίας για Κάμψη Τριών Σημείων

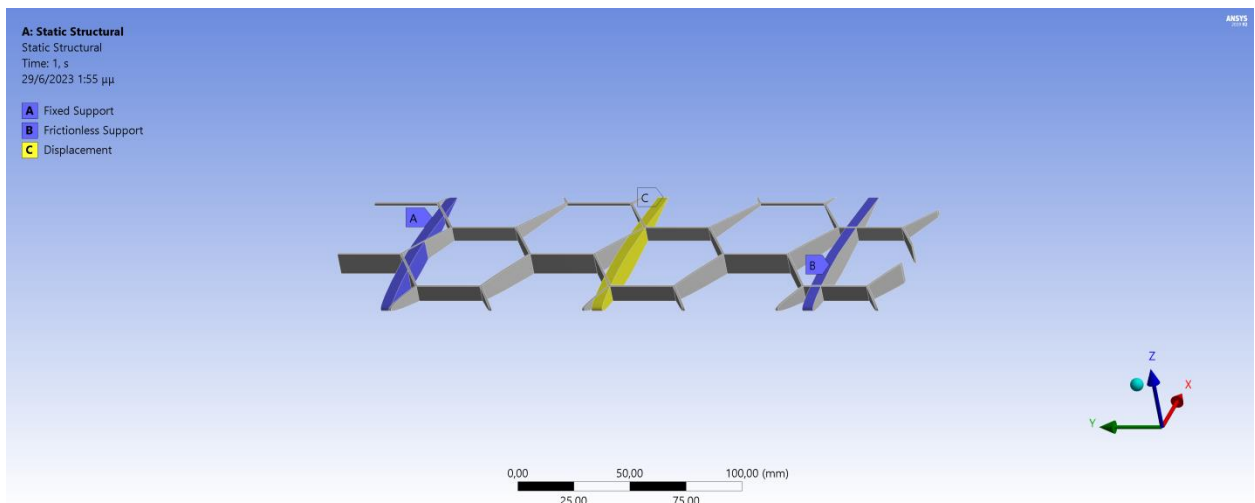
Μέσω του προγράμματος Solidworks κατασκευάστηκε η γεωμετρία για το πείραμα κάμψης τριών σημείων. Για την εξυπηρέτηση του πειράματος στην πτέρυγα προστέθηκε γέφυρα από το ίδιο υλικό σε 3 θέσεις. Μια στο κέντρο της πτέρυγας και δύο συμμετρικά, 100mm εκατέρωθεν του κέντρου. Το πάχος της γέφυρας επιλέχθηκε να είναι στα 5mm. Σκοπός είναι η μια πλευρική γέφυρα να λειτουργεί ως μια πάκτωση, ενώ η άλλη να παίζει το ρόλο μιας άρθρωσης που θα περιορίζει την κίνηση στον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο της πτέρυγας κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Η μεσαία γέφυρα προσομοιώνει το σημείο επαφής της πτέρυγας που υπόκειται στην κάμψη με το αντίστοιχο μηχανήμα.



Εικόνα 11: Τελική διαμόρφωση πτέρυγας για την κάμψη τριών σημείων σε τομή

2.3 Προετοιμασία στο ANSYS

Η προσομοίωση του πειράματος κάμψης 3 σημείων έγινε μέσω του προγράμματος ANSYS. Στις επιφάνειες της αριστερής πτέρυγας επιλέχθηκε να δοθεί οριακή συνθήκη πάκτωσης ενώ στην δεξιά περιορίστηκε η κίνηση περί τους άξονες x,z . Η κεντρική γέφυρα έπαιξε το ρόλο του φορέα της μετατόπισης, η οποία ορίστηκε στα 5cm. Η προετοιμασία του πειράματος αποτυπώνεται γραφικά παρακάτω.



Εικόνα 12: Οριακές συνθήκες και μετατοπίσεις στην αυξητική δομή για την προσομοίωση κάμψης τριών σημείων

2.3.1 Επιλογή Υλικών

Για την κυψελωτή δομή επιλέχθηκε η χρήση PET. Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιείται ευρέως για τρισδιάστατη εκτύπωση. Χαρακτηρίζεται από το μικρό του βάρος σε σχέση με την ακαμψία του.

PET		
Density	1340	kg/m ³
Young's Modulus	2,9E+09	Pa
Poisson's Ratio	0,389	
Bulk Modulus	4,3544E+09	Pa
Shear Modulus	1,0439E+09	Pa
Tensile Yield Strength	5,2E+07	Pa
Tensile Ultimate Strength	5,74E+07	Pa

Πίνακας 1: Μηχανικές Ιδιότητες PET

Για το περίβλημα της πτέρυγας έγινε χρήση ειδικού σύνθετου υλικού, με σκοπό να συνδιάζει το μικρό του βάρος σε συνάρτηση με την σχετική δυσκαμψία του.

composite		
Young's Modulus	7E+10	Pa
Poisson's Ratio	0,36	
Bulk Modulus	8,3333E+10	Pa
Shear Modulus	2,5735E+10	Pa

Πίνακας 2: Μηχανικές Ιδιότητες Σύνθετου Υλικού

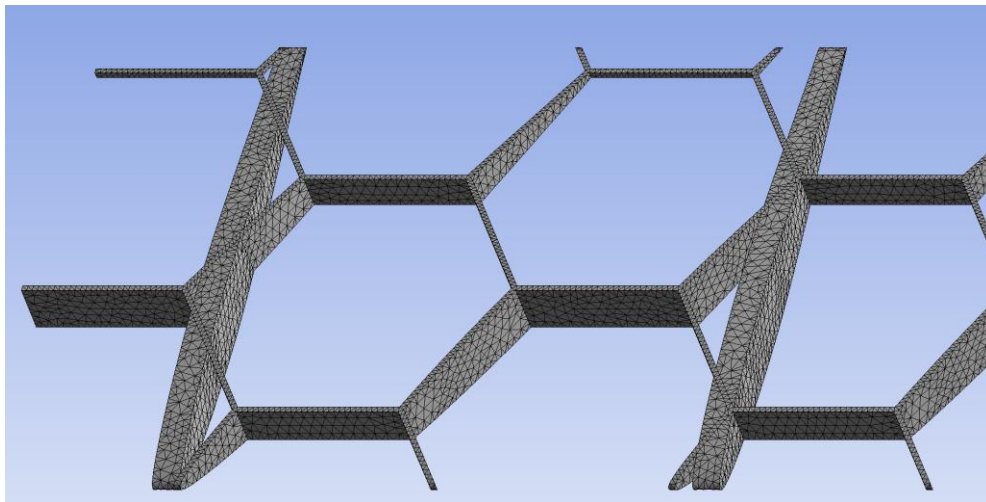
2.3.2 Διαμόρφωση Πλέγματος

Το skin της πτέρυγας διαμορφώθηκε με δομημένο (structured) πλέγμα μεγέθους 1mm. Το συγκεκριμένο είδος πλέγματος χαρακτηρίζεται από την απλότητά του, απαιτεί λιγότερη μνήμη και το χαρακτηρίζει σχετικά μικρός χρόνος υπολογισμού. Για την ανεξαρτητοποίηση των αποτελεσμάτων από το μέγεθος του πλέγματος έγινε ανάλυση ευαισθησίας με μεγέθη από 8mm μέχρι 0.7mm. Η επιλογή στο 1mm έγινε καθώς για μεγέθη μικρότερα η μεταβολή στα αποτελέσματα είναι κάτω από 0,5%.



Εικόνα 13: Πλέγμα στο skin της πτέρυγας για την προσομοίωση κάμψης τριών σημείων

Από την άλλη, για την κυψελωτή δομή επιλέχθηκε πάλι δομημένο πλέγμα μεγέθους 1mm. Με τον ίδιο τρόπο που αναλυθηκε και παραπάνω, το μέγεθος προέκυψε μέσα από τις ανάγκες για την ανεξαρτητοποίησή του.



Εικόνα 14: Πλέγμα κυψελωτής δομής για την προσομοίωση κάμψης τριών σημείων

2.4 Επίλυση του Προβλήματος Κάμψης

2.4.1 Υπολογισμός Στηρίξεων στην Αρχική Πτέρυγα

Σε πρώτη φάση υπολογίζονται οι αντιδράσεις στήριξης στις γέφυρες. Παρατηρείται πως η συνιστώσα της δύναμης που είναι κάθετη στο επίπεδο που εκτείνεται η γέφυρα είναι αρκετών τάξεων μεγέθους μεγαλύτερη από ότι στις δύο άλλες κάτι που καθιστά τις άλλες αμελητέες για την εξαγωγή συμπερασμάτων από το πείραμα.

Η συνισταμένη των δυνάμεων αντίδρασης στον άξονα z θα είναι η δύναμη η οποία ασκήθηκε στην κυψελωτή δομή και προκάλεσε μετατόπιση της κεντρικής γέφυρας κατά 5cm κατά αυτόν τον άξονα. Σημειώνεται πως το πρόβλημα της κάμψης τριών σημείων, καθώς και οι περαιτέρω υπολογισμοί έγιναν συνυπολογίζοντας την δυσκαμψία και το βάρος του skin, το οποίο όμως λόγω των σταθερών ιδιοτήτων του δεν θα επηρεάσει την παραμετρική ανάλυση που θα γίνει παρακάτω.

Για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας της πτέρυγας, αυτή μοντελοποιείται ως ένα ελατήριο που υπακούει τον νόμο του Hooke

$$F = x \cdot k \Leftrightarrow k = \frac{F}{x}$$

Στην παραπάνω σχέση $x=5\text{cm}$ η μετατόπιση της κεντρικής γέφυρας κατά τον άξονα z, ενώ F η δύναμη που ασκήθηκε στην κεντρική γέφυρα, ξανά, κατά τον άξονα z.

Initial Wing (30mm)			
Reaction Force 1(z)	Reaction Force 2(z)	Overall Reaction(z)	
32030	44078	76108	N
Stiffness K	=F/x		
	1522.16		kN/m

Πίνακας 3: Δυσκαμψία Αρχικής Πτέρυγας (Ακμής Κυψέλης 30mm)

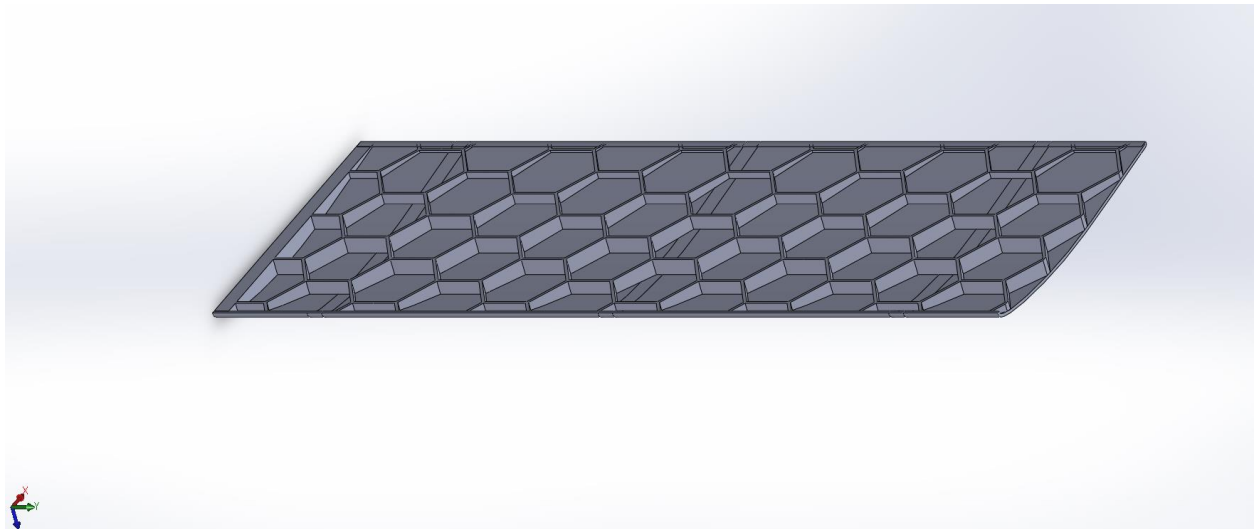
2.4.2 Παραμετρική Ανάλυση για τον Αριθμό των Κυψελών

Για την πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της συμπεριφοράς δυσκαμψίας της πλάκας σε σχέση με την κατασκευή της (πχ αριθμός κυψελών ανά μονάδα εμβαδού), πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση του πειράματος της κάμψης τριών σημείων. Παράμετρος αυτής υπήρξε το μήκος ακμής της κυψέλης.

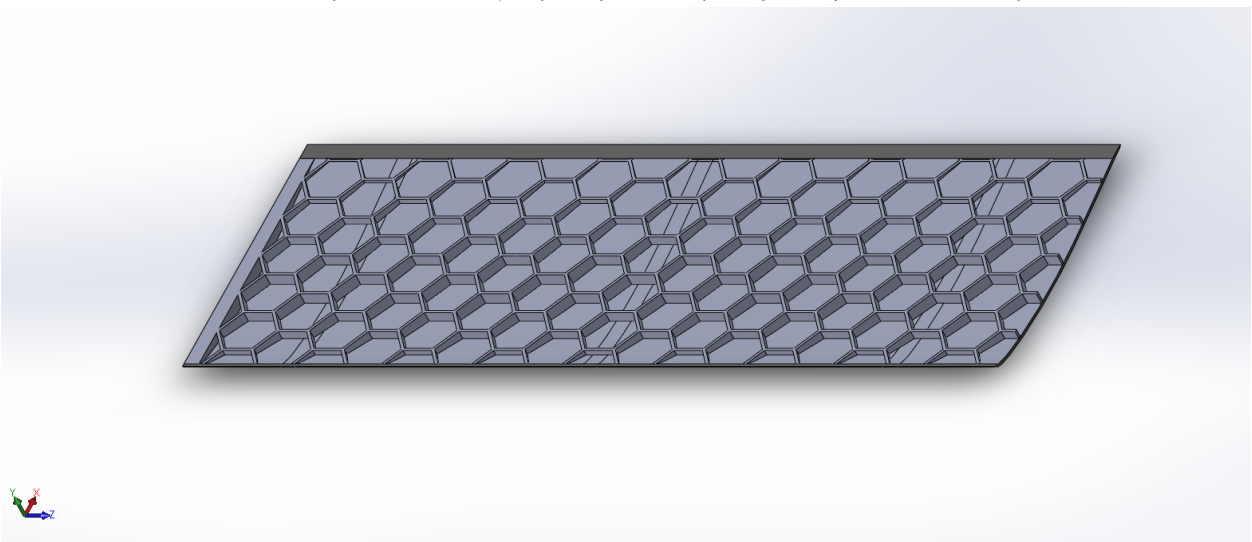
Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ορθή λήψη αποτελεσμάτων ήταν η εξής: 1) Μεταβολή του μήκους ακμής της κυψέλης, άρα και γραμμική μεταβολή της γεωμετρικής πυκνότητας των κυψελών, 2) Επανάληψη του πειράματος υπό τις ίδιες συνθήκες, 3) Εξαγωγή της δυσκαμψίας για την κάθε πτέρυγα, με τον διαφορετικό αριθμό κυψελών στην πλάκα που βρίσκεται στο εσωτερικό τους, 4) Αναγωγή της υπολογιζόμενης δυσκαμψίας ως προς την μάζα της κάθε πτέρυγας.

Επιλέχθηκαν δύο μήκη ακμής για την κατασκευή της αντίστοιχης δομής για το εσωτερικό της πτέρυγας:

- 15mm, όπου διπλασιάζει τον αριθμό των κυψελών στο εσωτερικό της πτέρυγας
- 10mm, όπου τριπλασιάζει τον αριθμό των κυψελών στο εσωτερικό της πτέρυγας.



Εικόνα 15: Διαμόρφωση πτέρυγας με κυψελωτή δομή ακμής κυψέλης 15mm σε τομή

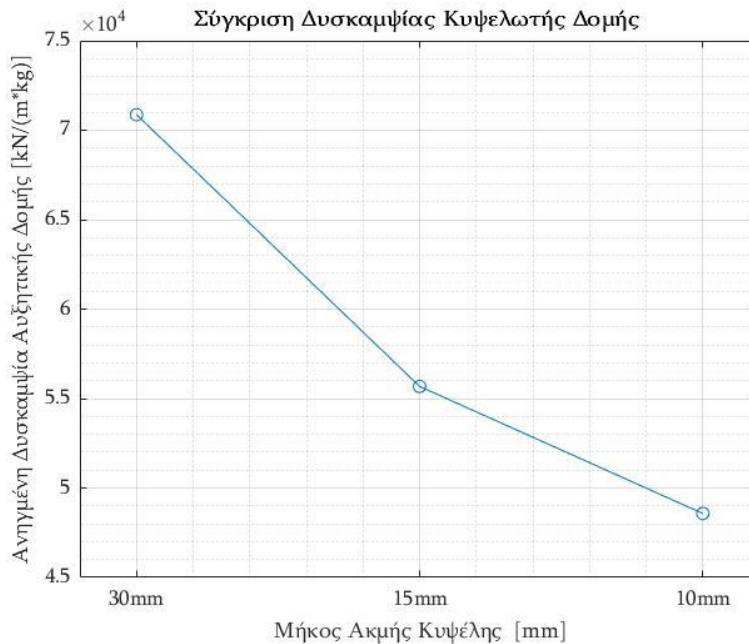


Εικόνα 16: Διαμόρφωση πτέρυγας με κυψελωτή δομή ακμής κυψέλης 10mm σε τομή

Initial Wing (30mm)			
Reaction Force 1(z)	Reaction Force 2(z)	Overall Reaction(z)	
32030	44078	76108	N
Stiffness K	=F/x		
	1522.16		kN/m
mass m	0.021478		kg
K/m	70870.7		kN/(m*kg)
Wing (15mm)			
Reaction Force 1(z)	Reaction Force 2(z)	Overall Reaction(z)	
35691	49682	85373	N
Stiffness K	=F/x		
	1707.46		kN/m
mass m	0.030668		kg
K/m	55675.6		kN/(m*kg)
Wing (10mm)			
Reaction Force 1(z)	Reaction Force 2(z)	Overall Reaction(z)	
38879	54661	93540	N
Stiffness K	=F/x		
	1870.80		kN/m
mass m	0.038514		kg
K/m	48574.54432		kN/(m*kg)

Πίνακας 4: Σύγκριση μεγεθών δυσκαμψίας και ανηγμένης δυσκαμψίας κατά την παραμετρική ανάλυση

Τα συγκριτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται παραπάνω αποκαλύπτουν κάποια ενδιαφέροντα στοιχεία. Με μια πρώτη, πιο επιφανειακή ματιά φαίνεται πως η αύξηση της πυκνότητας των κυψελών οδηγεί σε αύξηση της δυσκαμψίας, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη δύναμη για την επίτευξη της ίδιας μετατόπισης. Παρόλα αυτά όμως δεν λαμβάνεται υπόψη πως η αύξηση των κελιών στο εσωτερικό της πτέρυγας οδηγεί στην αύξηση του αναγκαίου υλικού άρα και της μάζας. Η μάζα όμως αποτελεί το μέτρο της αδράνειας, συμβάλλοντας στην αύξηση της δυσκαμψίας. Αποτελέσματα τα οποία θα οδηγήσουν σε ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων θα προκύψουν από την αδιαστατοποίηση της δυσκαμψίας ως προς την μάζα της κάθε πτέρυγας. Καθώς δεν ορίστηκε πυκνότητα για το σύνθετο υλικό του κελύφους της πτέρυγας, η μάζα αυτού δεν λήφθηκε υπόψη στον υπολογισμό της τελικής μάζας από το ANSYS άρα και στην εξαγωγή των συμπερασμάτων. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η αδιαστατοποιημένη ως προς την μάζα δυσκαμψία.



Διάγραμμα 1: Διάγραμμα ανηγμένης δυσκαμψίας

Φαίνεται πως η ανηγμένη δυσκαμψία μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των κυψελών, μην μπορώντας όμως να χαρακτηρίσουμε αυτή την μείωση γραμμική. Η εξήγηση πίσω από το φαινόμενο αυτό είναι πως με την αύξηση των του αριθμού των κυψελών μειώνεται η φαινόμενη δυσκαμψία της δομής ως σύνολο , με αποτέλεσμα να γίνεται πιο ευλύγιστη η πλάκα.

Η απαίτηση της μέγιστης δυσκαμψίας σε συνάρτηση με την μείωση του βάρους της τελικής κατασκευής οδηγεί στην χρήση της κυψελωτής δομής με ακμή κυψέλης 30mm για την τελική κατασκευή.

Κεφάλαιο 3: Ιδιοδιανυσματική Ανάλυση

3.1 Γενικές Αρχές Ιδιοδιανυσματικής Ανάλυσης

Η ιδιοδιανυσματική ανάλυση αποτελεί την πιο συνηθισμένη κατασκευαστική δυναμική ανάλυση που πραγματοποιείται σε μια μηχανολογική κατασκευή. Μέσω αυτής είναι δυνατό να αναλυθεί η δυναμική συμπεριφορά συμπεριφορά της εν λόγω κατασκευής, η απόκριση σε κραδασμούς και άλλα. Μέσω αυτής υπολογίζονται οι ιδιοσυχνότητες, οι παράγοντες απόσβεσης και οι ιδιομορφές μιας κατασκευής.

Εξ αρχής πρέπει να δωθεί ο παρακάτω ορισμός.

- **Ιδιοσυχνότητα ή Φυσική Συχνότητα:** Είναι η συχνότητα με την οποία ταλαντώνεται ένα σώμα μετά από αρχικό ερέθισμα [7].

Βάση της ιδιοδιανυσματικής ανάλυσης θα είναι η παρακάτω διαφορική εξίσωση 2^{ης} τάξης

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{f}(t)\}$$

Όπου

- $[\mathbf{M}]$ το μητρώο μάζας
- $[\mathbf{C}]$ το μητρώο απόσβεσης
- $[\mathbf{K}]$ το μητρώο δυσκαμψίας
- $\{\mathbf{u}\}, \{\dot{\mathbf{u}}\}, \{\ddot{\mathbf{u}}\}$ τα διανύσματα μετατόπισης, ταχύτητας και επιτάχυνσης αντίστοιχα
- $\{\mathbf{f}(t)\}$ το διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων

Καθώς στην ιδιοδιανυσματική ανάλυση δεν υπάρχει εξωτερικό φορτίο και η ταλάντωση είναι ελεύθερη χωρίς κάποια απόσβεση, ο όρος της απόσβεσης και ο όρος της εξωτερικής δύναμης μηδενίζονται.

Η τελική εξίσωση που χαρακτηρίζει την ανάλυση είναι η

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{0\}$$

Παρατηρείται πως η συγκεκριμένη εξίσωση επιλύεται στο πεδίο του χρόνου, ενώ οι ανάγκες της ανάλυσης απαιτούν την επίλυση στο πεδίο της συχνότητας. Για να επιτευχθεί ο μετασχηματισμός γίνεται η παραδοχή πως κάθε σημείο του συστήματος κάνει μια απλή αρμονική κίνηση, όπως για παράδειγμα κινείται μια μάζα που κρέμεται από ένα ελατήριο. Με την παραδοχή πως η μετατόπιση κάθε σημείου της κατασκευής ταλαντώνεται με ένα ημιτονοειδώς με ένα πλάτος φ , γωνιακή ταχύτητα ω , και μια φάση θ , η διαφορική εξίσωση μετατρέπεται ως εξής:

- $\{\mathbf{u}\} = \{\varphi\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i)$
- $\{\ddot{\mathbf{u}}\} = -\omega_i^2 \{\varphi\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i)$
- $([\mathbf{K}] - \omega_i^2 [\mathbf{M}]) \{\varphi\}_i = \{0\}$

Αυτή η διαφορική εξίσωση επιλύεται ως ένα κλασσικό πρόβλημα ιδιοτιμών [8].

3.2 Ιδιοδιανυσματική Ανάλυση σε UAV's

Γνωρίζοντας τις ιδιοσυχνότητες μιας κατασκευής, εν προκειμένου της πτέρυγας του UAV, μπορούν να παρθούν τα κατάλληλα μέτρα ώστε να αποφευχθεί ο συντονισμός, φαινόμενο το οποίο θα μπορούσε να αποβεί καταστροφικό για το μη επανδρωμένο αεροσκάφος. Το εύρος των συχνοτήτων των ταλαντώσεων και των κυμάτων που αλληλεπιδρούν με το UAV είναι αρκετά μεγάλο και κυμαίνεται από κάποιες δεκάδες Hz μέχρι τάξη μεγέθους GHz.

Οι συχνότητες οι οποίες θα επηρεάσουν περισσότερο την κατασκευή θα είναι οι χαμηλότερες που προκύπτουν κατά βάση από μηχανικές ταλαντώσεις μερών του UAV όπως ταλαντώσεις προερχόμενες από τον επενεργητή, καθώς και οι ταλαντώσεις που θα προέλθουν από την αεροελαστική σύζευξη των ταλαντώσεων που δημιουργούνται λόγω δυνάμεων από την ροή γύρω από την πτέρυγα (άνωση, οπισθέλκουσα) και των μηχανικών δυνάμεων λόγω βάρους. Στα αποτελέσματα της ιδιοδιανυσματικής ανάλυσης θα γίνει πιο ειδική μελέτη σε σχέση με το ποιες από τις ιδιοσυχνότητες παίζουν πιο αποφασιστικό ρόλο στην ταλάντωση.

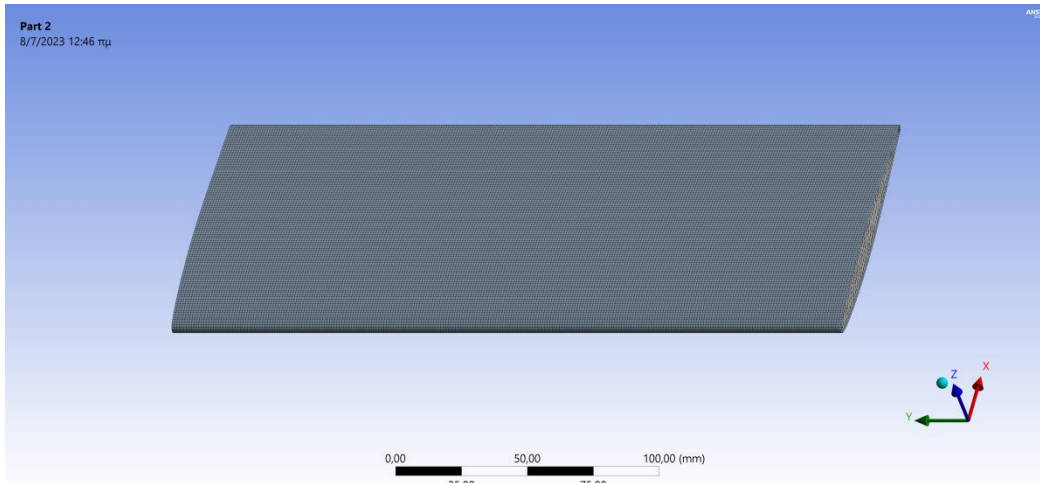
3.3 Μελέτη με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων

3.3.1 Δόμηση του Πλέγματος

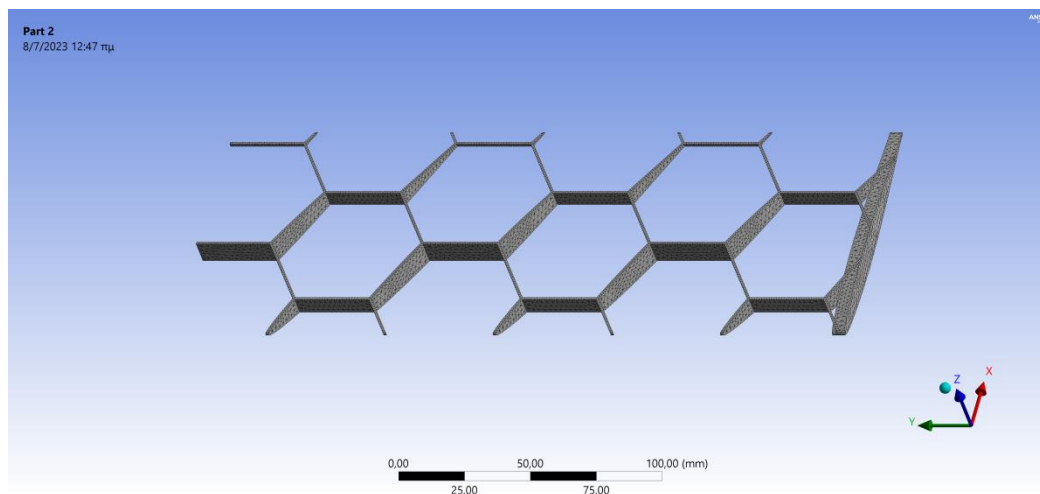
Το πλέγμα της κατασκευής δημιουργήθηκε αυτόματα από το ANSYS. Στην αυτόματη λειτουργία το λογισμικό ψάχνει για επιφάνειες για τις οποίες μπορεί να δημιουργήσει πλέγμα και με το ίδιο ακριβώς μοτίβο να σαρώσει και να δημιουργήσει πλέγμα σε όλο το σώμα του κομματιού που πρέπει να πλεγματοποιηθεί, φτάνοντας μέχρι μια επιφάνεια στόχο. Η τεχνική αυτή λέγεται sweep [9].

Εάν το λογισμικό δεν εντοπίσει σώματα τα οποία μπορεί να δημιουργήσει πλέγμα με sweep, τότε δημιουργεί τετραεδρικό πλέγμα. Μία ιδιαιτερότητα αυτού είναι ότι η πλεγματοποίηση ξεκινά από ακμές και λεπτομέρειες της γεωμετρίας, τις επιφάνειες και στη συνέχεια δημιουργεί το πλέγμα κατά τον όγκο. Αυτό βοηθά στο να βελτιώνεται η ποιότητα του πλέγματος, να είναι πιο «καθαρό» και να αποτυπώνονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια

τα φαινόμενα που ελέγχονται σε δύσκολες γεωμετρίες. Το μέγεθος του πλέγματος επιλέχθηκε στο 1mm, όπου και προηγουμένως αποδείχθηκε ότι πληρεί τη συνθήκη ανεξαρτησίας των αποτελεσμάτων από την πυκνότητα. Για το skin της αεροτομής επιλέχθηκαν εξαεδρικά στοιχεία και για την κυψελωτή δομή τετραεδρικά



Εικόνα 17: Πλέγμα του skin της πτέρυγας κατά την ιδιοδιανυσματική ανάλυση



Εικόνα 18: Πλέγμα της κυψελωτής δομής της πτέρυγας κατά την ιδιοδιανυσματική ανάλυση

Number of Nodes	Number of Elements
Initial Wing (30mm)	
455251	81759
Wing (15mm)	
508054	105379
Wing (10mm)	
561242	105379

3.3.2 Οριακές Συνθήκες

Η μοντελοποίηση θα προσομοιώνει μια πτέρυγα πακτωμένη στο κύριο σώμα του αεροσκάφους. Για αυτό το λόγο στην πλευρά της πτέρυγας που εφάπτεται στο αεροσκάφος δημιουργείται γέφυρα πλάτους 5mm της και προηγουμένως ώστε να θεωρηθεί αυτή το μέρος της πτέρυγας που θα είναι πακτωμένο, μαζί με το skin της πτέρυγας.

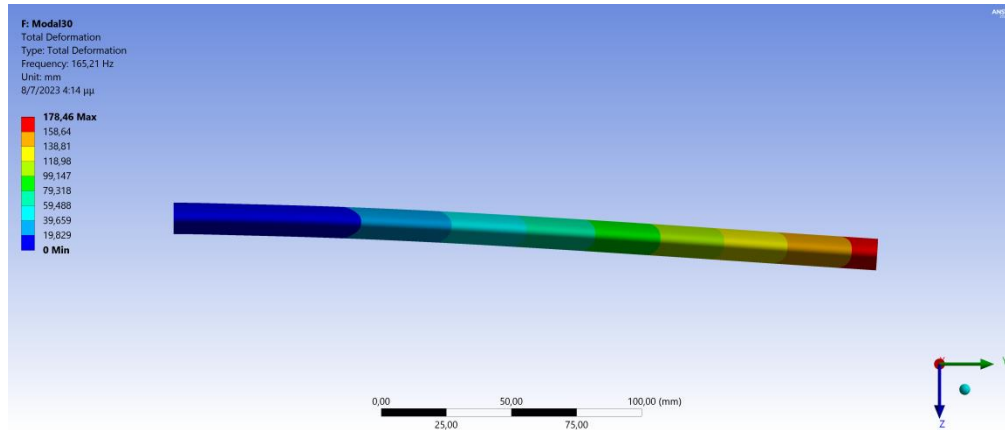
3.3.3 Λήψη αποτελεσμάτων

Επιλέγεται να υπολογισθούν πο πρώτες έξι ιδιοσυχνότητες. Αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω. Επίσης στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αντίστοιχες ιδιομορφές. Από τις μετατοπίσεις που δίνει η ιδιοδιανυσματική ανάλυση για περίπτωση συντονισμού, η πτέρυγα οδηγείται σε καταστροφή. Είναι ενδεικτικό πως το πλάτος ταλάντωσης σε περίπτωση συντονισμού είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερο από την τις διαστάσεις της πτέρυγας.

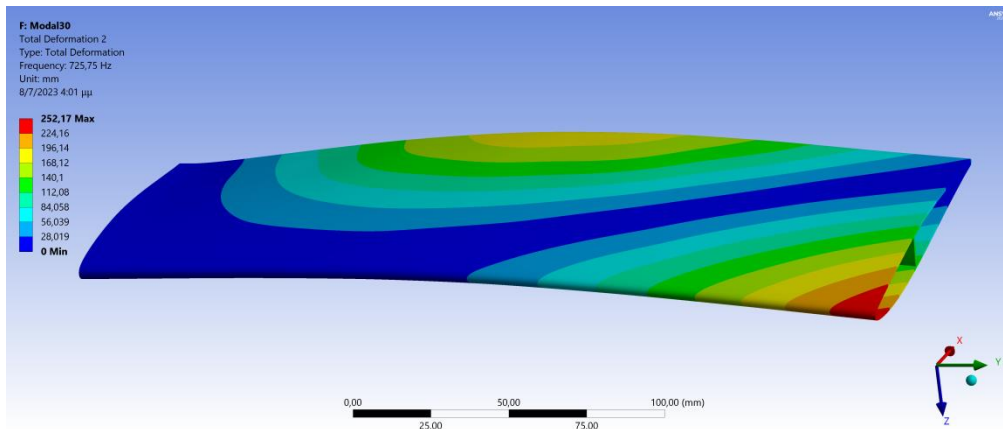
Modal Analysis		
Frequency 1	165.21	Hz
Frequency 2	725.75	Hz
Frequency 3	797.17	Hz
Frequency 4	1165.4	Hz
Frequency 5	1344	Hz
Frequency 6	1541.4	Hz

Πίνακας 6: Ιδιοσυχνότητες Αρχικής Πτέρυγας

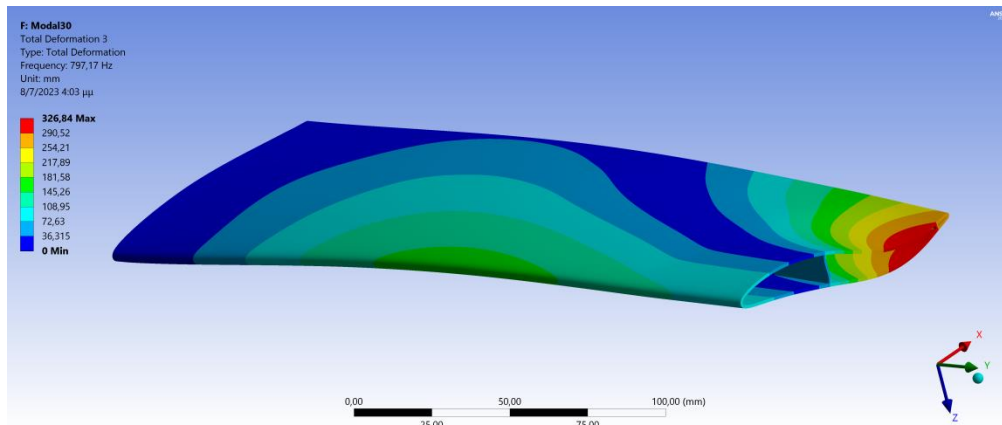
Οι ιδιοτιμές αυτές αντιστοιχούν της εξής ιδιομορφές:



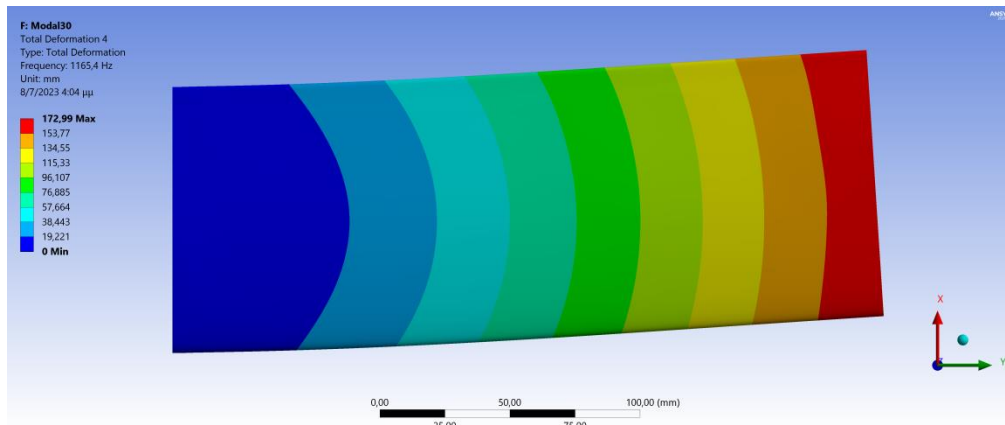
Εικόνα 19: 1^η Ιδιομορφή



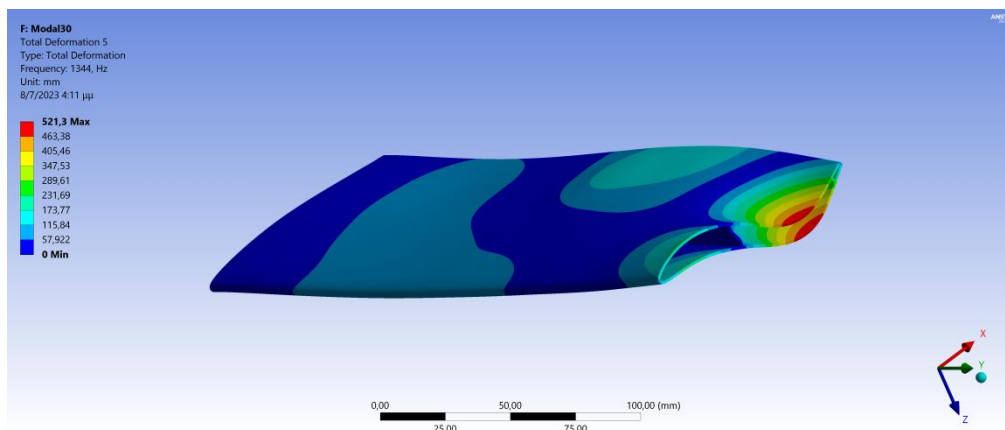
Εικόνα 20: 2^η Ιδιομορφή



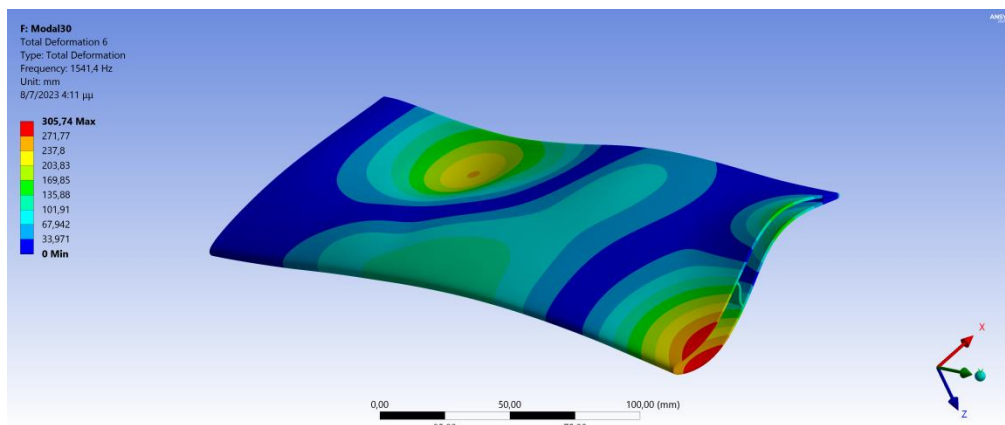
Εικόνα 21: 3^η Ιδιομορφή



Εικόνα 22: 4^η Ιδιομορφή



Εικόνα 23: 5^η Ιδιομορφή



Εικόνα 24: 6^η Ιδιομορφή

Φαίνεται από της ιδιοσυχνότητες πως είναι πολύ υψηλές άρα μειώνεται αισθητά ο κίνδυνος συντονισμού, άρα και εκτεταμένων ταλαντώσεων. Η πρώτη και χαμηλότερη από της έξι ιδιοσυχνότητες που υπολογίστηκαν βρίσκεται στα 162,67Hz, ενώ η αμέσως μεγαλύτερη στα 726,07Hz. Σε αυτό το εύρος που κυμαίνονται οι ιδιοσυχνότητες δύσκολα θα παρουσιαστεί κάποια εξωτερική διέγερση στην πτέρυγα. Από τα αποτελέσματα η ιδιοσυχνότητα που παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στην ταλαντωτική συμπεριφορά στον άξονα x και y είναι η 4^η ιδιοσυχνότητα, ενώ στον άξονα z είναι η πρώτη. Για της στροφές γύρω από της άξονες x,y κυρίαρχο ρόλο στην ταλαντωτική συμπεριφορά παίζει η 1^η ιδιοσυχνότητα ενώ γύρω από τον άξονα z η 4^η. Οι υπόλοιπες συχνότητες έχουν πολύ μικρή έως και μηδαμινή συνεισφορά στην ταλαντωτική συμπεριφορά.

Παρακάτω παρατίθεται ο πίνακας αποτελεσμάτων, συγκριτικά για κάθε ιδιοσυχνότητα και την συνεισφορά της στην ταλάντωση περί κάθε βαθμό ελευθερίας. Σημαντικά μεγέθη για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι ο Συντελεστής Συμμετοχής (Participation Factor) και η Ενεργή Μάζα (Effective Mass). Όσο πιο μεγάλοι αυτοί οι παράγοντες, τόσο μεγαλύτερη η συμβολή της ιδιοσυχνότητας στην ταλάντωση.

- Participation Factor:

$$\gamma_i = \{\varphi\}_i^T [M] \{D\}$$

- Effective mass

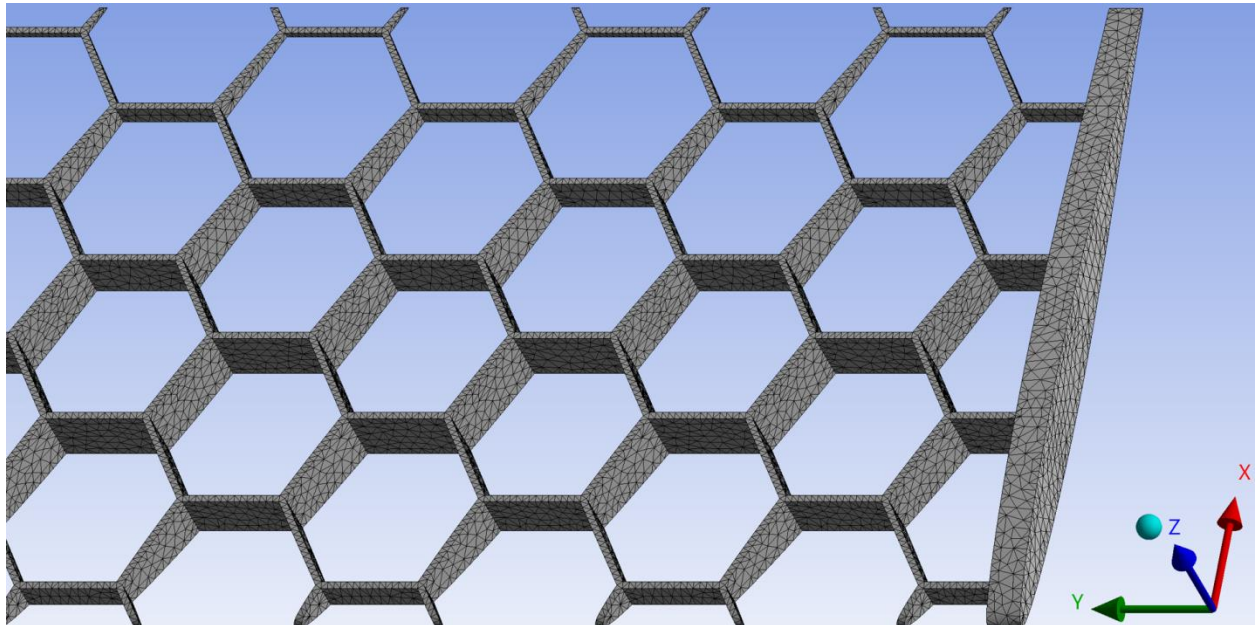
$$M_{eff,i} = \gamma_i^2$$

Όπου {D} είναι το διάνυσμα μοναδιαίας μετατόπισης και βασίζεται στην κατεύθυνση της διέγερσης για καθεμία διεύθυνση του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων και την περιστροφή γύρω από κάθε άξονα. Ο πίνακας {φ} εξαρτάται από τις ιδιομορφές που προκαλούνται από κάθε ιδιοσυχνότητα. Οι δύο αυτοί δείκτες υπολογίζουν την ποσότητα της μάζας που σε κάθε κατεύθυνση για κάθε ιδιοτιμή [10].

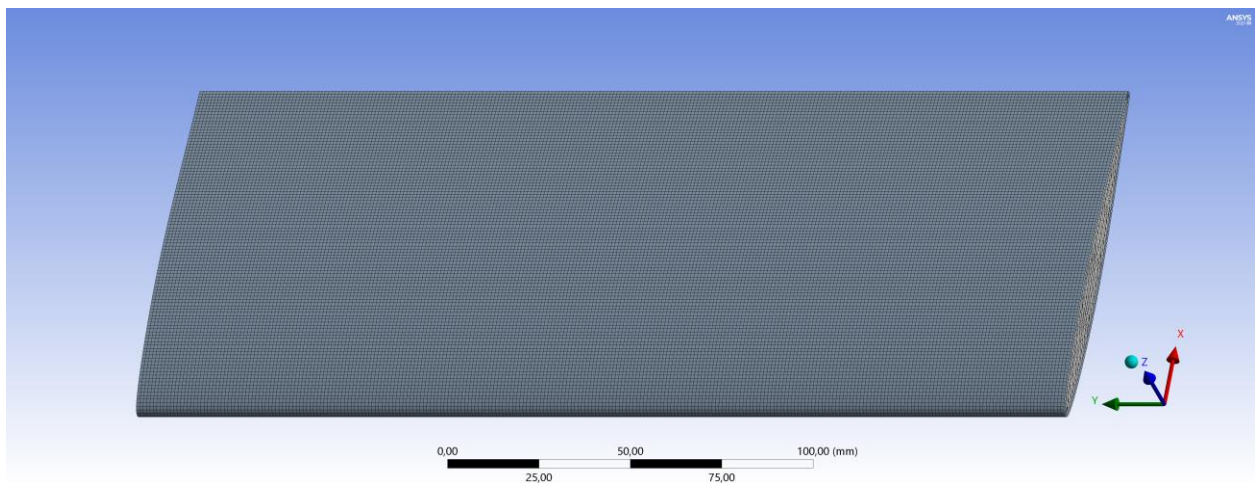
3.3.4 Παραμετρική Ανάλυση

Για άλλη μια φορά πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση συγκριτικά με τον αριθμό των κυψελών της αυξητικής δομής στην πτέρυγα. Μέσω της της ανάλυσης η προσοχή επικεντρώνεται στην μετατόπιση των ιδιοσυχνοτήτων πιο ψηλά ή πιο χαμηλά, της και στην συμβολή αυτών στην ταλαντωτική συμπεριφορά της πτέρυγας.

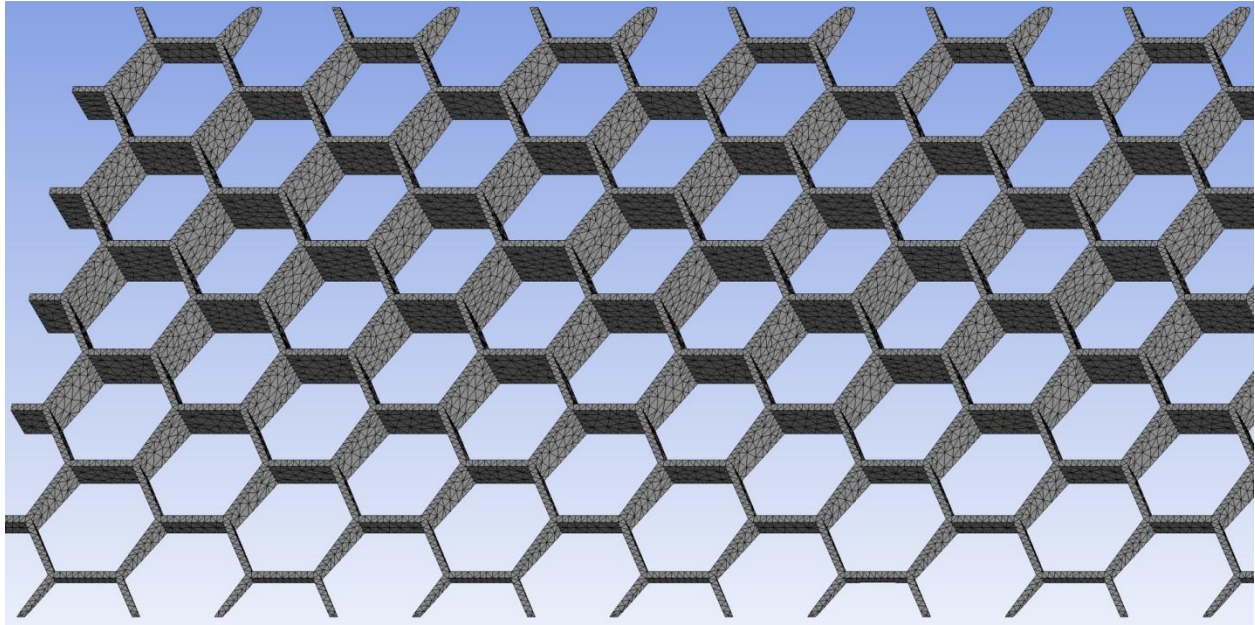
Οι οριακές συνθήκες και οι παράμετροι διαμόρφωσης του πλέγματος επιλέχθηκαν να είναι οι της, ενώ η γεωμετρία της αυξητικής δομής επιλέχθηκε να είναι η ίδια που χρησιμοποιήθηκε και στην παραμετρική ανάλυση για την κάμψη τριών σημείων με την ίδια μεταβολή που πραγματοποιήθηκε και για την την αυξητική δομή με μήκος ακμής 30mm – την δημιουργία μιας γέφυρας 5mm στην άκρη της, εκεί που θα εφάπτεται στο κύριο σώμα του UAV.



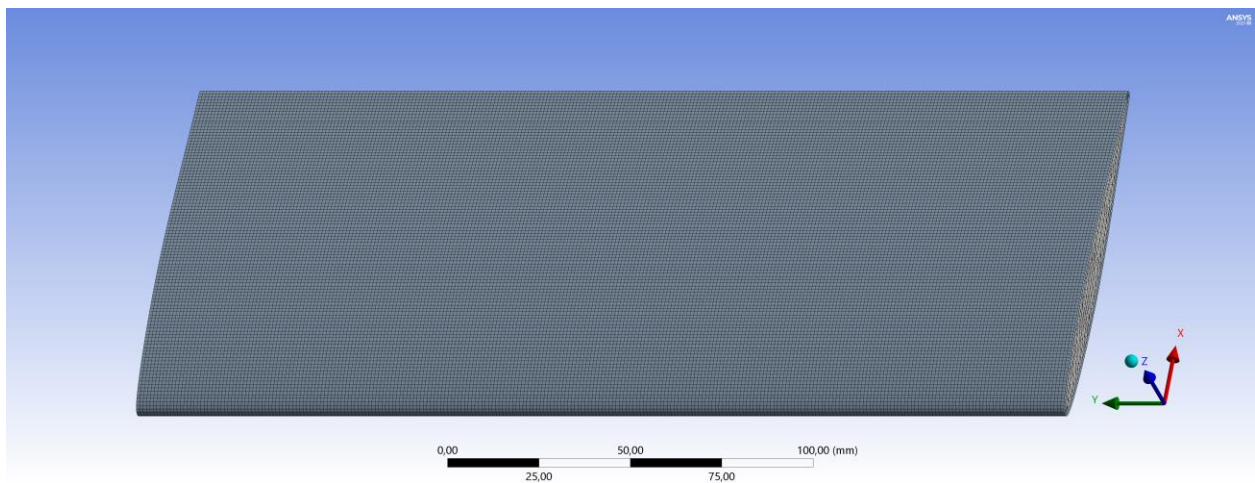
Εικόνα 25: Πλέγμα κυψελωτής δομής ακμής κυψέλης 15mm κατά την ιδιοδιανυσματική ανάλυση



Εικόνα 26: Πλέγμα του skin της αεροτομής για την πτέρυγα με ακμή κυψέλης αυξητικής δομής 15mm



Εικόνα 27: Πλέγμα κυψελωτής δομής ακμής κυψέλης 10mm κατά την ιδιοδιανυσματική ανάλυση



Εικόνα 28: Πλέγμα του skin της αεροτομής για την πτέρυγα με ακμή κυψέλης αυξητικής δομής 10mm

Modal Analysis Initial Wing (30mm)		
Frequency 1	165.21	Hz
Frequency 2	725.75	Hz
Frequency 3	797.17	Hz
Frequency 4	1165.4	Hz
Frequency 5	1344	Hz
Frequency 6	1541.4	Hz
Modal Analysis Wing (15mm)		
Frequency 1	160.94	Hz
Frequency 2	741.73	Hz
Frequency 3	836.86	Hz
Frequency 4	1120.5	Hz
Frequency 5	1654.1	Hz
Frequency 6	2034.1	Hz
Modal Analysis Wing (10mm)		
Frequency 1	158.15	Hz
Frequency 2	747.12	Hz
Frequency 3	834.01	Hz
Frequency 4	1091.6	Hz
Frequency 5	1728.3	Hz
Frequency 6	2106.5	Hz

Πίνακας 7: Οι έξι πρώτες ιδιοσυχνότητες για τις τρεις πτέρυγες

Παρουσιάζονται εδώ τα συγκριτικά αποτελέσματα για την παραμετρική ανάλυση.

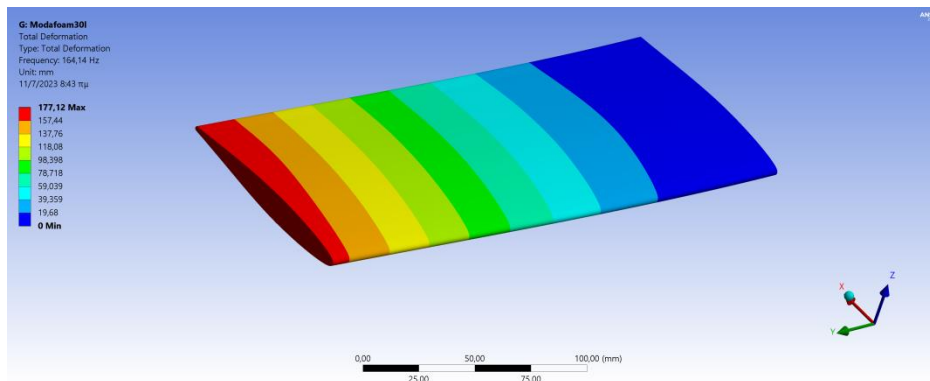
3.3.5 Τρόποι Απόσβεσης Κραδασμών

Παρατηρείται πως η ταλάντωση της πτέρυγας που προκύπτει από την ιδιοδιανυσματική ανάλυση σε περίπτωση συντονισμού έχει υπέρμετρο πλάτος, το οποίο είναι λογικό καθώς θεωρητικά σε περίπτωση συντονισμού το πλάτος μιας ταλάντωσης απειρίζεται. Αυτό οδηγεί σε καταστροφή της πτέρυγας, για αυτό πρέπει να αντιμετωπιστεί. Αυτό το φαινόμενο είναι κοινό για κάθε πτέρυγα.

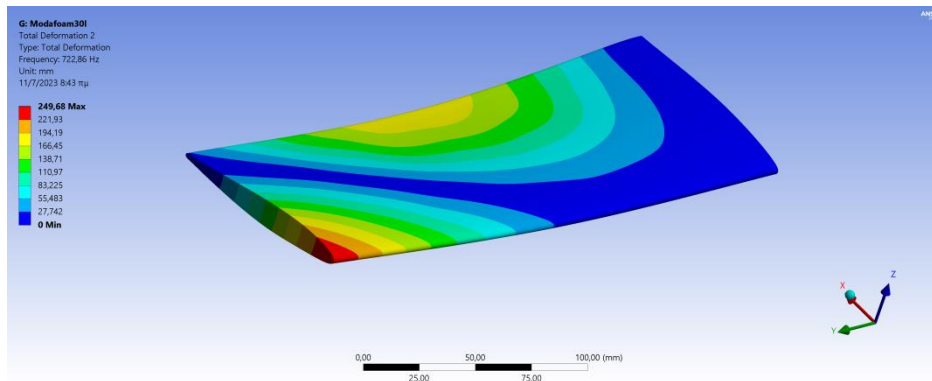
Ένας συχνά χρησιμοποιούμενος τρόπος για την απόσβεση ταλαντώσεων, αύξηση της στατικής ακεραιότητας, στιβαρότητας και μείωσης του βάρους σε μικρά μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι το γέμισμα των φτερών με αφρό. Συμβάλλει στην κατανομή των φορτίων για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων σε μέρη της πτέρυγας που θα οδηγούσαν σε αστοχία σε συγκεκριμένη περιοχή αυτής. Επιπλέον η χρήση αφρού συμβάλλει και στην αντοχή σε σύγκρουση καθώς έχει μεγάλη ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας πρόσκρουσης και αποτρέπει την υπερβολική παραμόρφωση κατά την διάρκεια της πτήσης. Με την χρήση αφρού που χαρακτηρίζεται από πάρα πολύ μικρή πυκνότητα, μειώνεται το συνολικότερο βάρος της πτέρυγας χωρίς να θυσιάζεται η στιβαρότητα. Ταυτόχρονα παίζει ρόλο στη θερμομόνωση της πτέρυγας και συνολικότερα του UAV, καθώς πολύ συχνά τα UAV φέρουν συστήματα (κατά βάση ηλεκτρονικά) τα οποία είναι ευαίσθητα στις ακραίες θερμοκρασίες. Τέλος μπορεί να παίζει και τον ρόλο ηχομόνωσης, απορροφώντας ήχους που προέρχονται και από την ίδια την λειτουργία του UAV και από ακουστικά φαινόμενα που συνδέονται με την ανάπτυξη της ροής γύρω από τις πτέρυγες. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί πρώτα και κύρια για την ικανότητά του απόσβεσης ταλαντώσεων. Την ικανότητα δηλαδή να απορροφά και να διαχέει τις δονήσεις και τους κραδασμούς.

Οι πτέρυγες με το γέμισμα από αφρό θα δοκιμαστούν και αυτές σε ιδιοδιανυσματική ανάλυση, ώστε να υπολογιστούν οι νέες ιδιοσυχνότητες και η συμβολή καθεμίας από αυτές στην ταλαντωτική συμπεριφορά της πτέρυγας. Η πτέρυγα με τα καλύτερα αποτελέσματα θα γίνει εν συνεχεία η βάση για την ανάπτυξη του μηχανισμού μορφοποίησης.

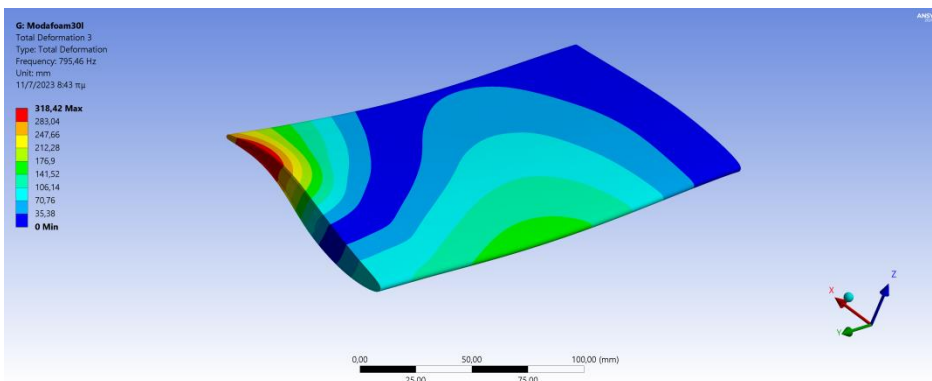
Οι νέες ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές παρουσιάζονται παρακάτω. Ακολουθεί πίνακας με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ανάλυσης.



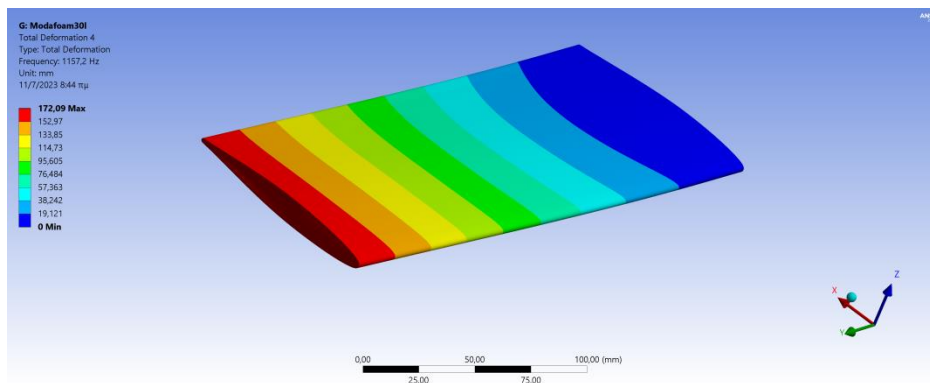
Εικόνα 29: 1^η Ιδιομορφή (30mm)



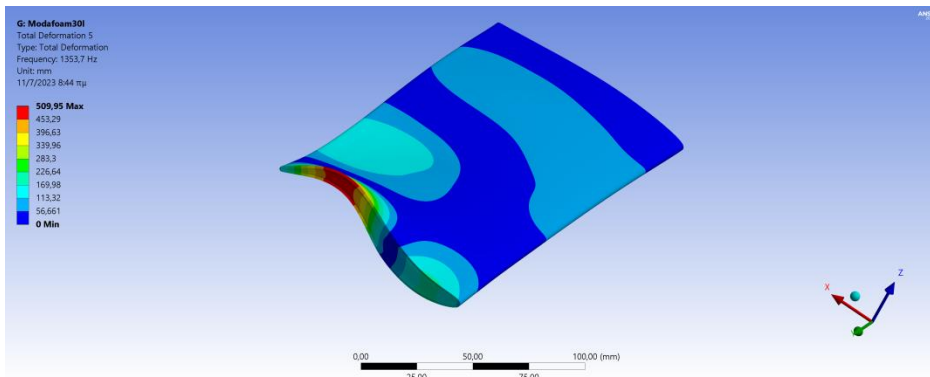
Εικόνα 30: 2^η Ιδιομορφή (30mm)



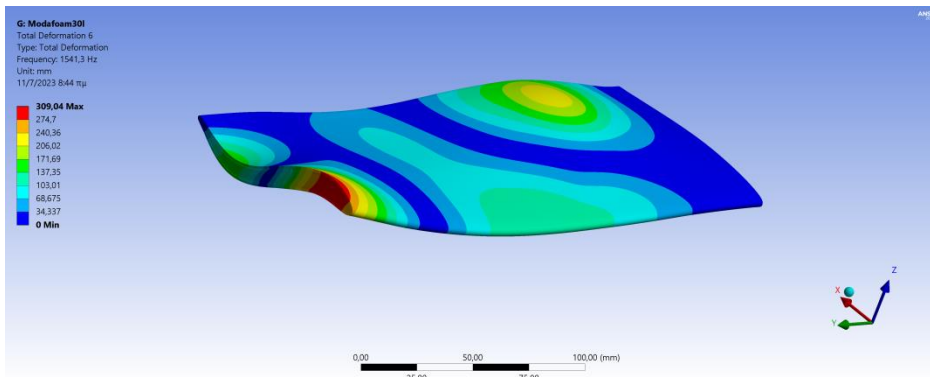
Εικόνα 31: 3^η Ιδιομορφή (30mm)



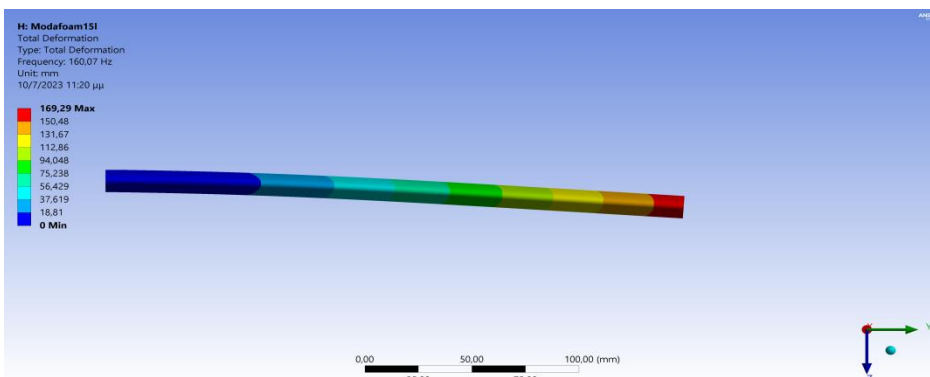
Εικόνα 32: 4^η Ιδιομορφή (30mm)



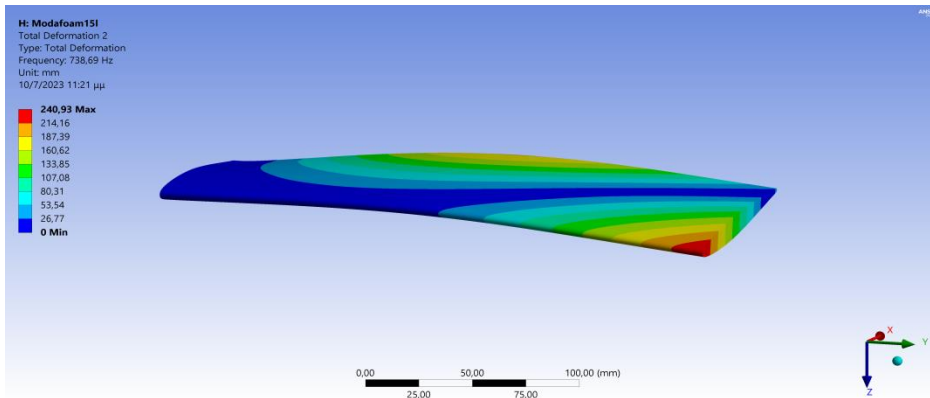
Εικόνα 33: 5^η Ιδιομορφή (30mm)



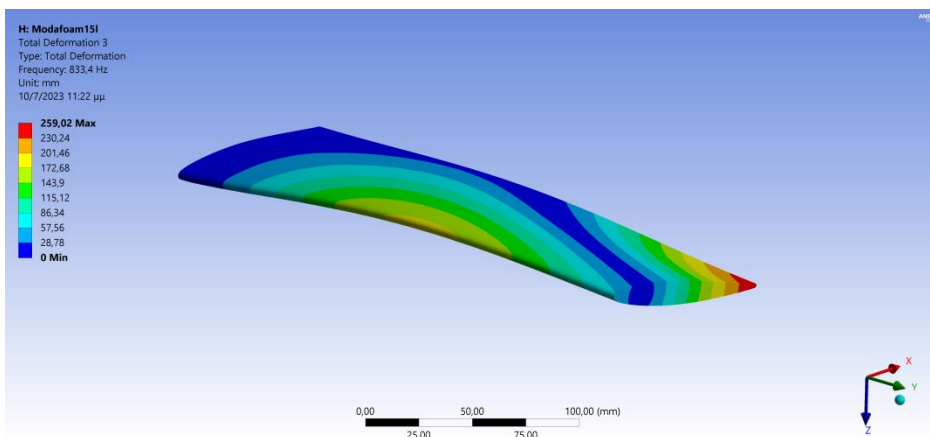
Εικόνα 34: 6^η Ιδιομορφή (30mm)



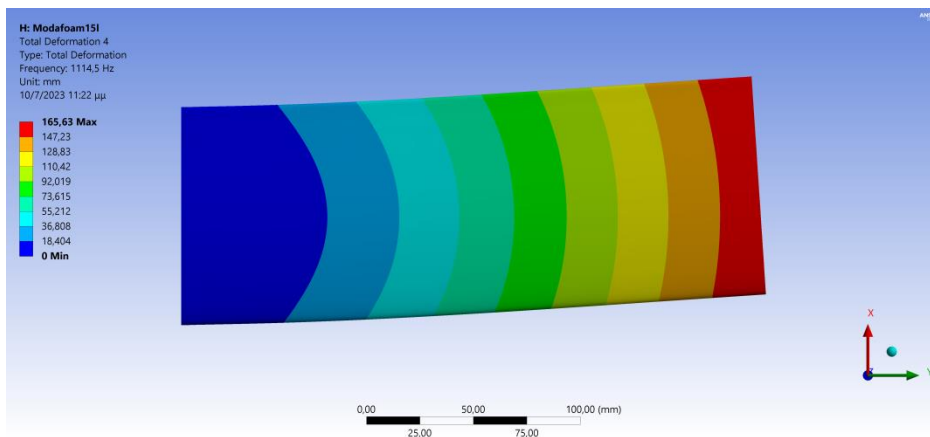
Εικόνα 35: 1^η Ιδιομορφή (15mm)



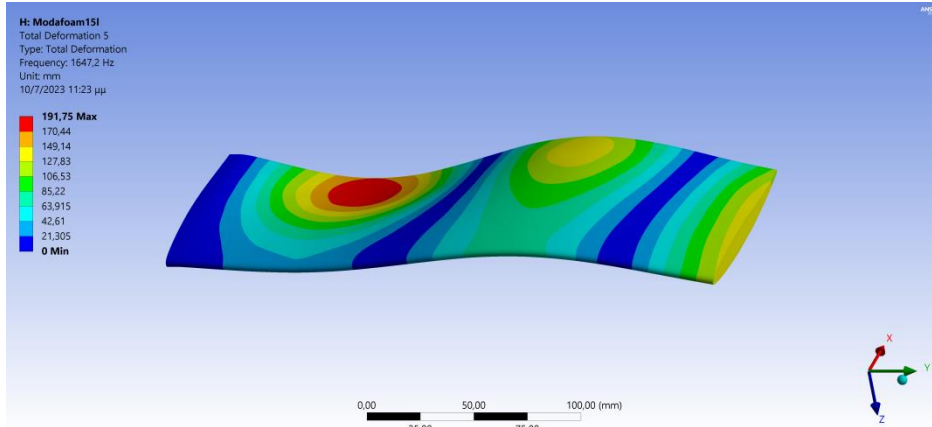
Εικόνα 36: 2^η Ιδιομορφή (15mm)



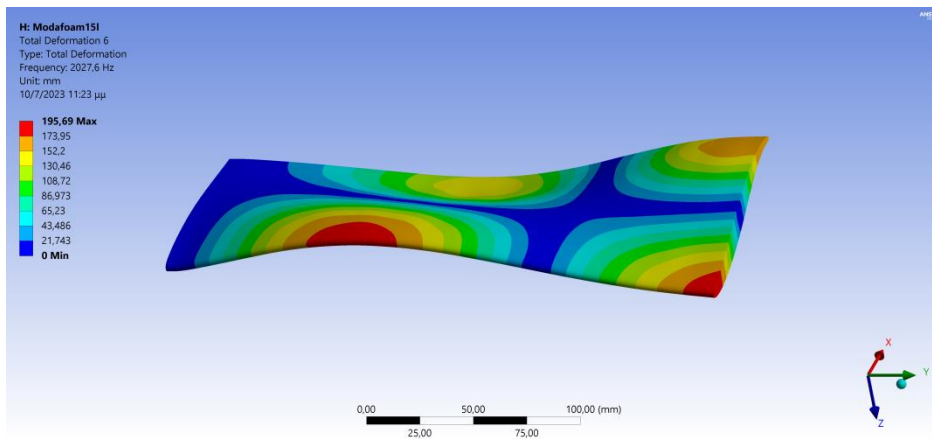
Εικόνα 37: 3^η Ιδιομορφή (15mm)



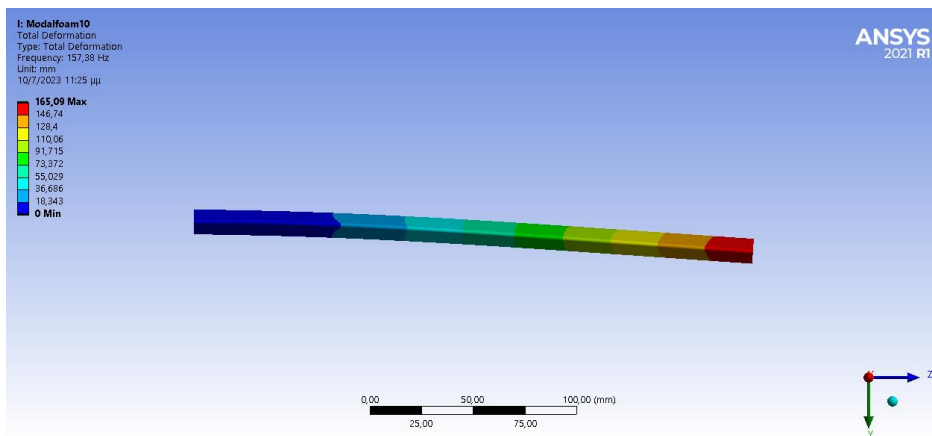
Εικόνα 38: 4^η Ιδιομορφή (15mm)



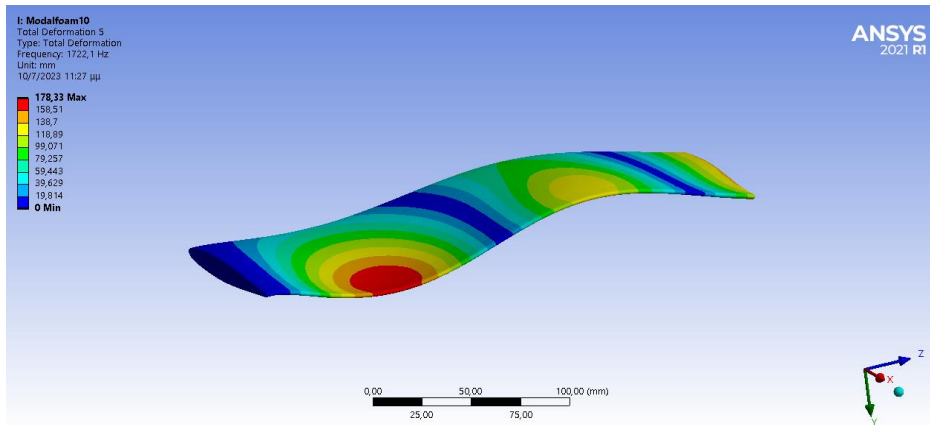
Εικόνα 39: 5^η Ιδιομορφή (15mm)



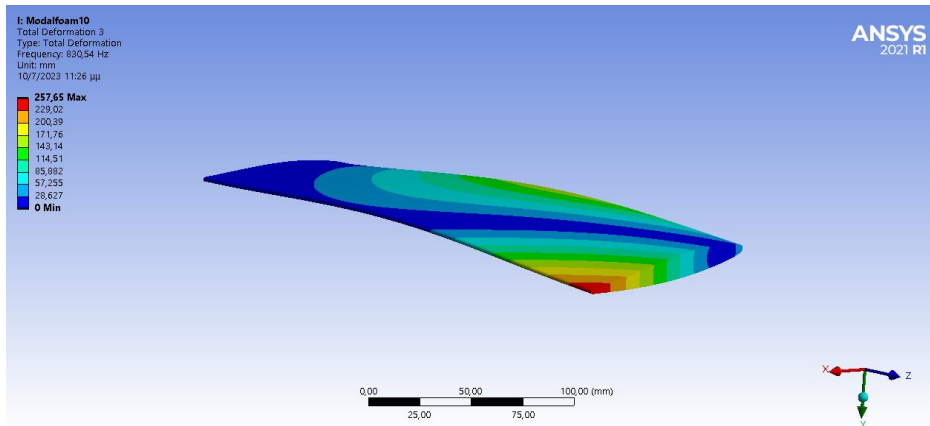
Εικόνα 40: 6^η Ιδιομορφή (15mm)



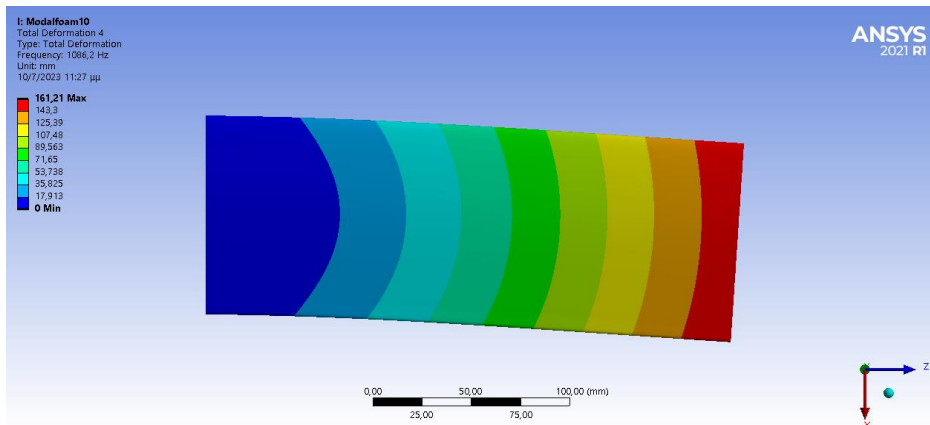
Εικόνα 41: 1^η Ιδιομορφή (10mm)



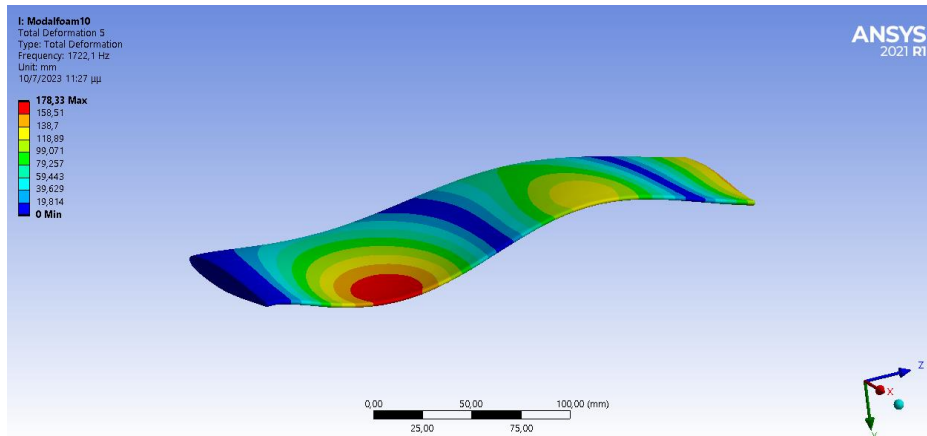
Εικόνα 42: 2^η Ιδιομορφή (10mm)



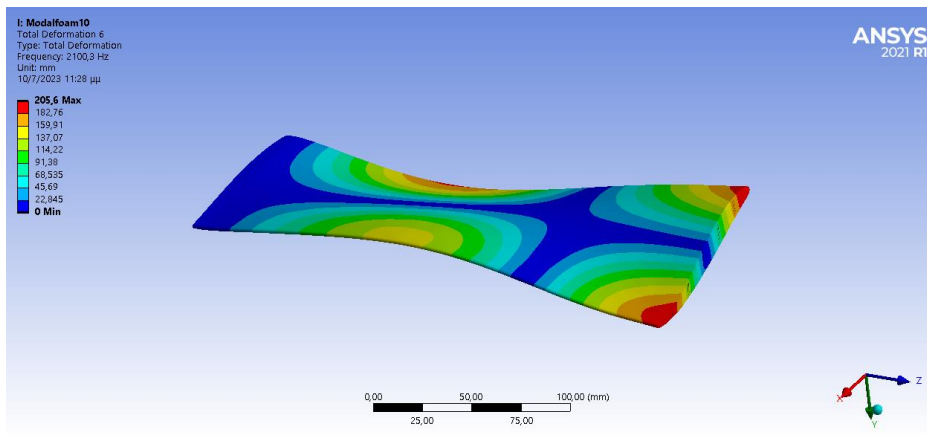
Εικόνα 43: 3^η Ιδιομορφή (10mm)



Εικόνα 44: 4^η Ιδιομορφή (10mm)



Εικόνα 45: 5^η Ιδιομορφή (10mm)



Εικόνα 46: 6^η Ιδιομορφή (10mm)

Initial Foam Filled Wing		
Frequency 1	144.45	Hz
Frequency 2	648.75	Hz
Frequency 3	721.19	Hz
Frequency 4	1013.5	Hz
Frequency 5	1284.5	Hz
Frequency 6	1439.6	Hz

Foam Filled Wing (15mm)		
Frequency 1	141.87	Hz
Frequency 2	661.26	Hz
Frequency 3	741.08	Hz
Frequency 4	985.29	Hz
Frequency 5	1475.2	Hz
Frequency 6	1764.1	Hz

Foam Filled Wing (10mm)		
Frequency 1	140.51	Hz
Frequency 2	669.8	Hz
Frequency 3	745.83	Hz
Frequency 4	961.97	Hz
Frequency 5	1547.9	Hz
Frequency 6	1895	Hz

Πίνακας 8: Συγκριτικά αποτελέσματα ιδιοσυχνοτήτων

Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη της πτέρυγας με μηχανισμό μορφοποίησης δύο διευθύνσεων

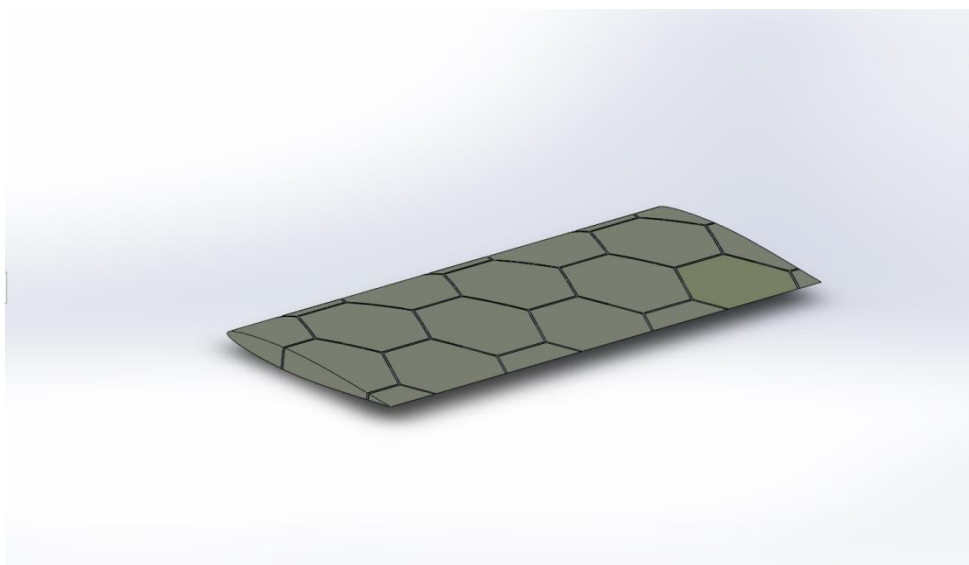
4.1 Επιλογή Αυξητικής Δομής για το Εσωτερικό και Προσδιορισμός της θέσης του μηχανισμού μορφοποίησης.

Βάση για την ανάπτυξη της μορφοποιούμενης πτέρυγας είναι, όπως αναφέρθηκε και σε άλλο σημείο, η πτέρυγα με την αυξητική δομή μήκους ακμής κυψέλης 30mm. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς η σχετική της δυσκαμψία είναι μεγαλύτερη από τις άλλες δύο εναλλακτικές (μήκους ακμής κυψέλης 10mm και 15mm), το βάρος είναι μικρότερο καθώς επίσης η κατασκευή της τελικής μορφολογίας είναι πιο απλή. Επιπλέον στο εσωτερικό των κυψελών διατηρήθηκε ο αφρός για την απόσβεση των ταλαντώσεων

Η απαίτηση μορφοποίησης για την τελική πτέρυγα οδηγεί σε ανάπτυξη του μηχανισμού κατά μήκος της πτέρυγας για την αντικατάσταση των πηδαλίων κλίσης και κατά μήκος του ακροπτερύγιου, όπου η αξιοποίησή τους αντικαθιστά τα πηδάλια περιστροφής. Πρακτικά ο μηχανισμός μορφοποίησης που θα αναπτυχθεί δίνει την δυνατότητα κλίσης και περιστροφής στο αεροσκάφος χωρίς την ύπαρξη πηδαλίων.

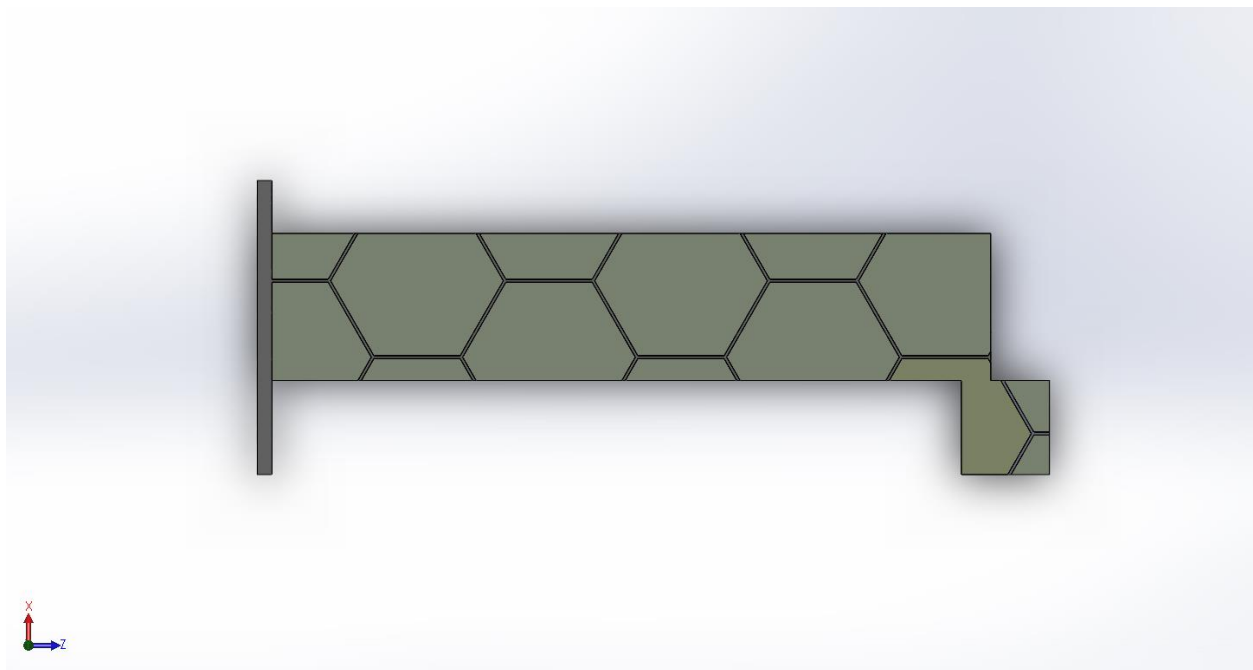
4.2 Διαμόρφωση της πτέρυγας σε λογισμικό CAD.

Η τελική πτέρυγα, στην οποία εφαρμόστηκε η ελαστική ανάλυση κατασκευάστηκε στο λογισμικό Solidworks.



Εικόνα 47: Όψη της κυψελωτής δομής με την γέμιση αφρού

Στο μέρος που βρίσκεται το χείλος πρόσπτωσης, δημιουργείται κάθετη τομή. Σκοπός αυτής της διαμόρφωσης είναι να δημιουργηθεί ο απαιτούμενος χώρος ανάμεσα στο κέλυφος και το κύριο σώμα της πτέρυγας ώστε να χωράνε οι επενεργητές που θα αλληλεπιδρούν με τον μηχανισμό μορφοποίησης. Αντίστοιχη τομή γίνεται και σε τμήμα της ακμής εκφυγής, εκεί όπου θα κατασκευαστεί στην συνέχεια ο μηχανισμός μορφοποίησης. Δεν θα γίνει αντίστοιχη τομή σε όλο το μήκος της πτέρυγας καθώς στο ακροπτερύγιο θα κατασκευαστεί αντίστοιχος μηχανισμός.



Εικόνα 48: Κάτοψη της διαμόρφωσης της πτέρυγας μετά τις τομές

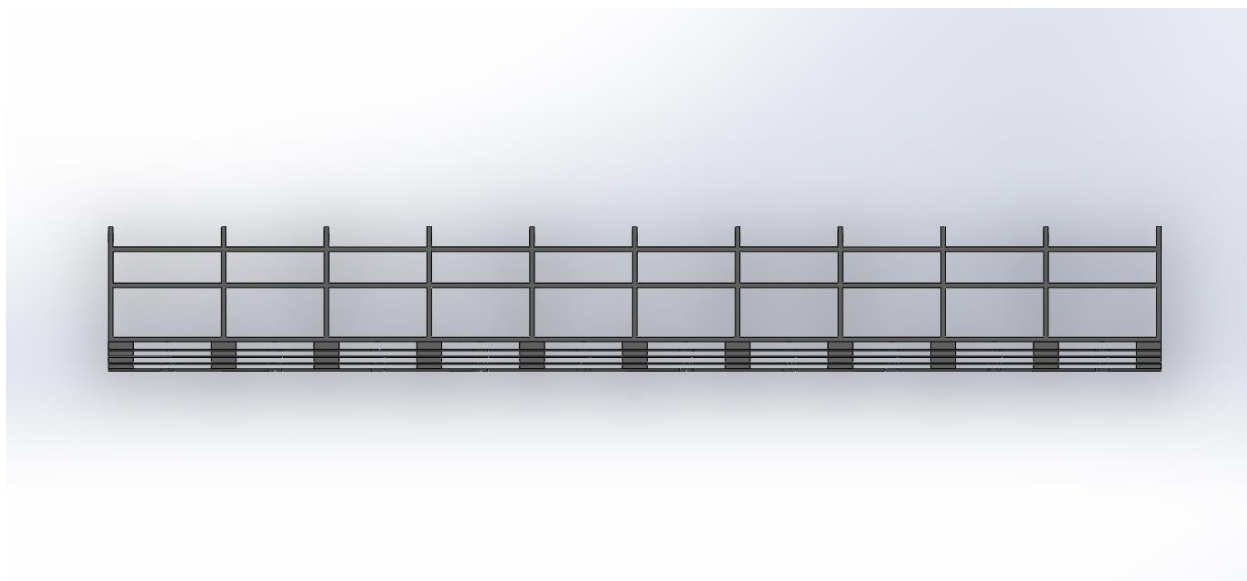
Το μήκος τομής στην πλευρά της ακμής εκφυγής επιλέχθηκε μετά από διάφορες προσαρμογές. Αρχική απαίτηση ήταν η μορφοποίηση να ξεκινά περίπου στο 70% του μήκους της χορδής της αεροτομής. Τομή επίσης πραγματοποιείται και στο ακροπτερύγιο στη θέση όπου θα διαμορφωθεί ο μηχανισμός μορφοποίησης για την περιστροφή. Στο τμήμα της ακμής εκφυγής, στην πλευρά του ακροπτερύγιου επιλέγεται να διατηρείται ένα τμήμα αφρού με κομμάτι πλαστικού στο εσωτερικό του από την αρχική κυψέλη της πλάκας αυξητικής δομής για την διατήρηση της δομής της πτέρυγας υπό το κέλυφος. Με αυτό τον τρόπο θα αποφεύγεται η υποχώρηση υπό αεροδυναμικά φορτία, κάτι που θα οδηγούσε σε πτώση της αεροδυναμικής απόδοσης της πτέρυγας.

Στα σημεία όπου πραγματοποιήθηκαν τομές, δημιουργούνται λεπτές πλάκες από το ίδιο υλικό με την αυξητική δομή (PET). Στην πλάκα στο μέρος του χείλους πρόσπτωσης θα συγκολληθούν-συγκρατούνται οι επενεργητές που θα χρησιμοποιηθούν για την μορφοποίηση του τμήματος της ακμής εκφυγής. Οι πλάκες στο τμήμα της ακμής εκφυγής και στο τμήμα του ακροπτερυγίου θα γίνουν οι βάσεις για να αναπτυχθούν οι μηχανισμοί μορφοποίησης.

4.2.1 Μηχανισμός μορφοποίησης στην ακμή εκφυγής

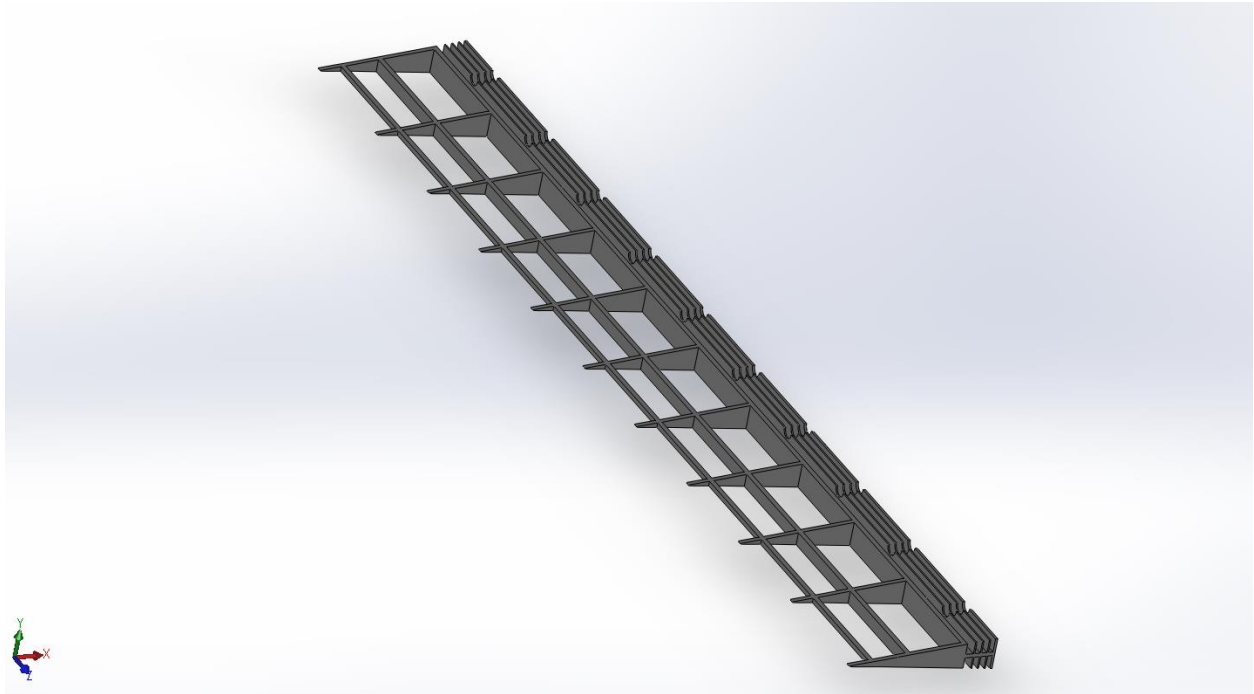
Ο μηχανισμός μορφοποίησης και στην ακμή εκφυγής και στο ακροπτερύγιο θα αποτελεί ένα ενιαίο μέρος με την αυξητική δομή στο εσωτερικό της πτέρυγας, από το ίδιο υλικό και θα αντιμετωπίζεται και στην ανάλυση με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων ως τέτοιο.

Ο μηχανισμός μορφοποίησης ουσιαστικά αποτελείται από μια σειρά εγκάρσια ribs τα οποία στηρίζονται από άλλα οριζόντια, ενώ μια κατακόρυφη πλάκα παράλληλη σε αυτή που βρίσκεται στο κυρίως σώμα της πτέρυγας τα ενώνει όλα μαζί. Η σύνδεση με το κύριο σώμα θα γίνει με σειρά λεπτών πλακών μικρού πλάτους. Αυτές οι μικρές, λεπτές πλάκες είναι που κάμπτονται και λειτουργεί ο μηχανισμός μορφοποίησης. Η διαμόρφωση αυτή επιλέχθηκε αντί τις ενιαίας πλάκας για την μικρότερη ροπή αδράνειας που έχει στην κάμψη, με αποτέλεσμα την μικρότερη απαίτηση σε φορτίο για την μορφοποίηση.



Εικόνα 49: Κάτοψη του μηχανισμού μορφοποίησης

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται, παράλληλα στην πλάκα που εφάπτεται στο κύριο σώμα και στην πλάκα πάνω στην οποία ασκούνται δυνάμεις από τον επενεργητή για την μορφοποίηση, μια λεπτή δομή αποτελούμενη από τρεις πολύ λεπτές πλάκες που έχουν μορφή «ψαροκόκκαλου». Ο ρόλος τους είναι η συγκράτηση του κελύφους στο σημείο εκείνο, ώστε αυτό να μην υποχωρεί .



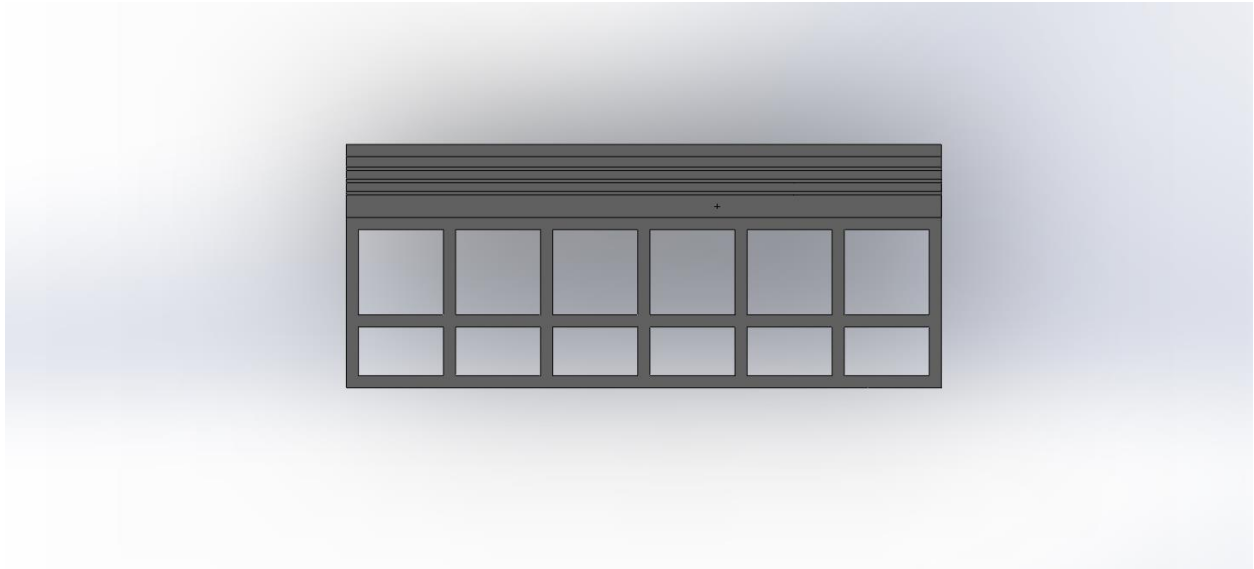
Εικόνα 50: Όψη του μηχανισμού μορφοποίησης

Επιπλέον έχουν διαμορφωθεί «λούκια» στις θέσεις όπου θα περνούν τα συρματόσχοινα μέσω των οποίων ο επενεργητής θα μεταφέρει ροπή στον μηχανισμό μορφοποίησης. Στην παραπάνω εικόνα εντοπίζονται στα σημεία που υπάρχει «κόψιμο».

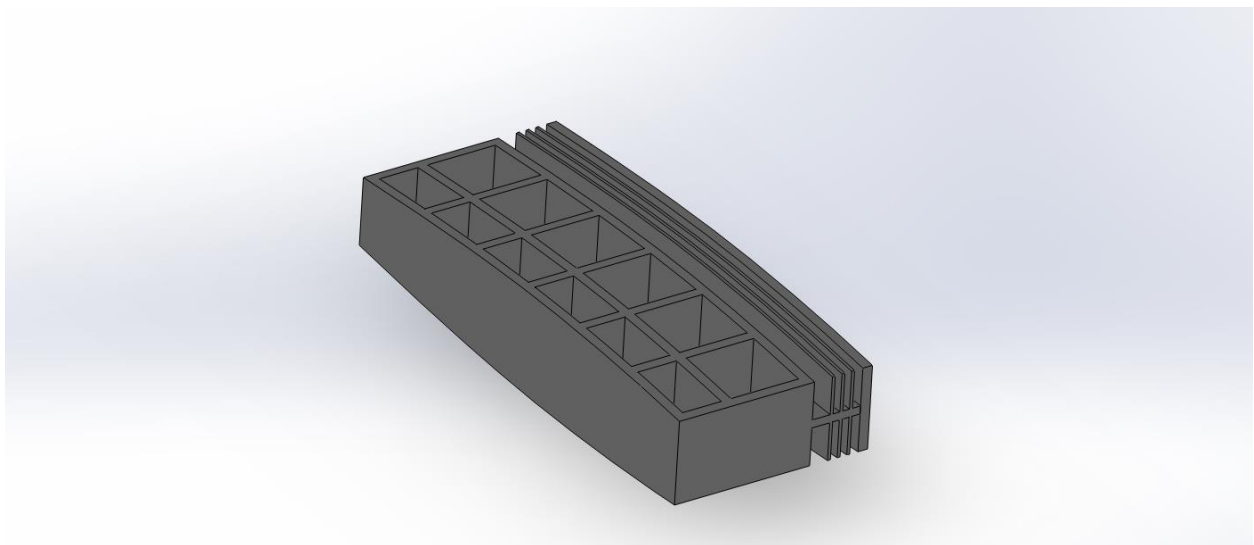
Βασική πρόκληση στην κατασκευή του μηχανισμού μορφοποίησης αποτέλεσε το να συγκεραστούν η μείωση της ροπής αδράνειας ώστε η κάμψη ως προς το σημείο στήριξης της οριζόντιας πλάκας να μειωθεί με ταυτόχρονη διατήρηση της κατασκευασιμότητας. Η ανάγκη μείωσης της απαιτούμενης για την μορφοποίηση ροπής η οποία εξαρτάται από το μέγεθος των υπάρχοντων επενεργητών, συγκρούεται με την μείωση του πάχους της οριζόντιας πλάκας, το οποίο δεν μπορεί να πέσει πολύ κάτω από το ένα χιλιοστό. Η μείωση της ροπής αδράνειας επιτεύχθη με την αφαίρεση υλικού όπως προαναφέρθηκε σε συνδιασμό με την μείωση του πάχους της πλάκας. Σημειώνεται ότι στην συνέχεια ο μηχανισμός θα δοκιμαστεί σε κάμψη με σκοπό την μελέτη της ακεραιότητάς του.

4.2.2 Μηχανισμός μορφοποίησης στο ακροπτερύγιο

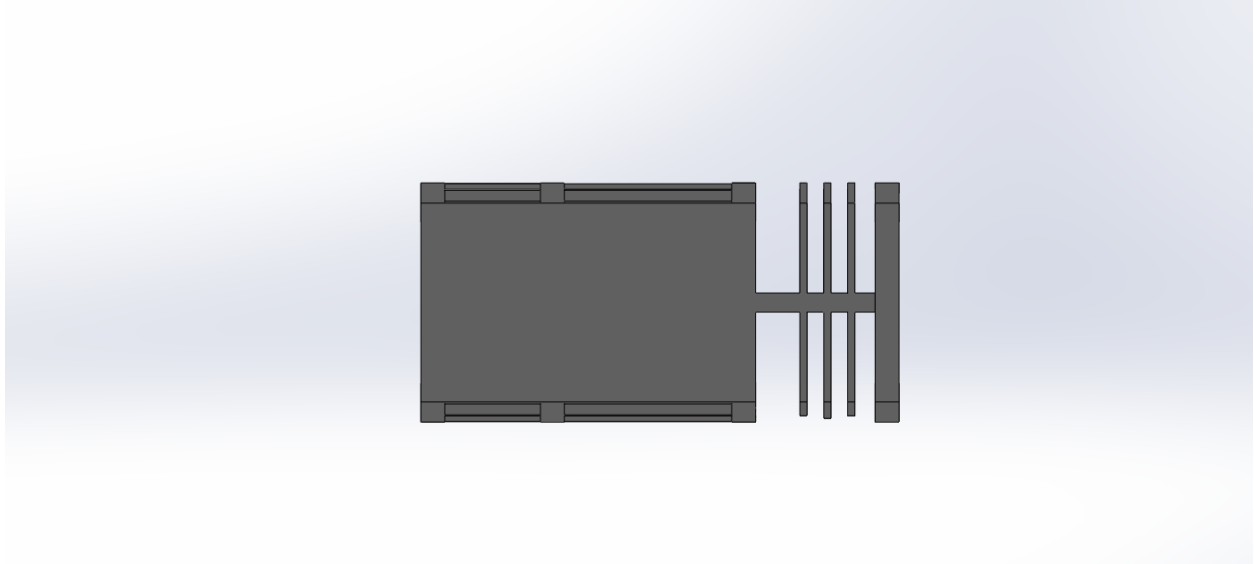
Με την ίδια μεθοδολογία κατασκευάστηκε και ο μηχανισμός μορφοποίησης στο ακροπτερύγιο. Το πάχος των νεύρων παρέμεινε σταθερό ενώ υπήρξε αλλαγή στο πάχος της οριζόντιας πλάκας.



Εικόνα 51: Κάτοψη του μηχανισμού μορφοποίησης του ακροπτερύγιου



Εικόνα 52: Όψη του μηχανισμού μορφοποίησης



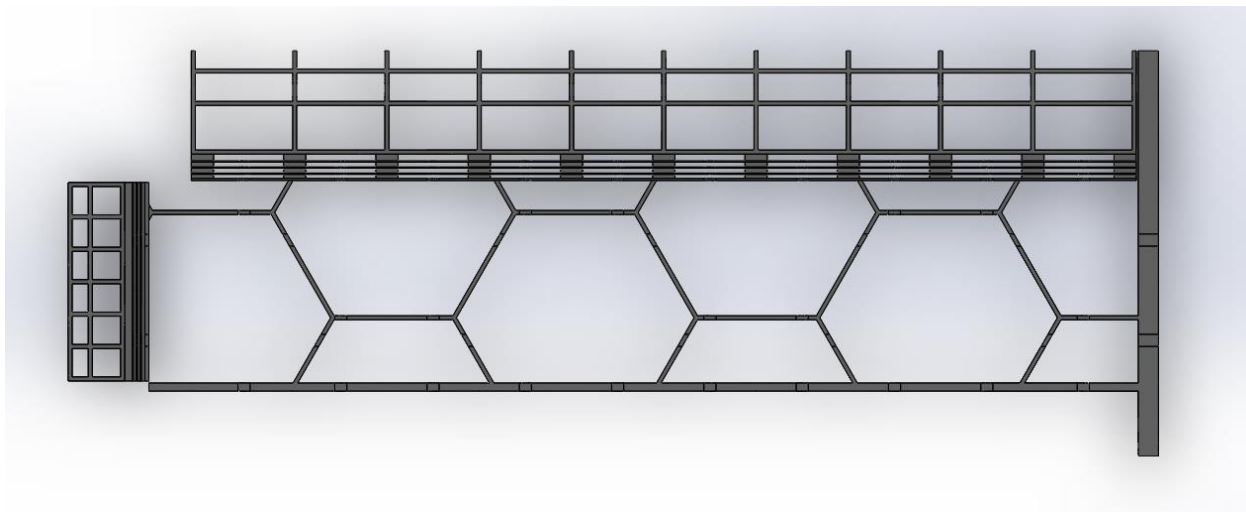
Εικόνα 53: Πλάγια όψη του μηχανισμού μορφοποίησης

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η σύνδεση του μηχανισμού μορφοποίησης με την πλάκα που συνδέεται με το κύριο σώμα της πτέρυγας και την honeycomb δομή γίνεται επίσης με οριζόντια πλάκα.

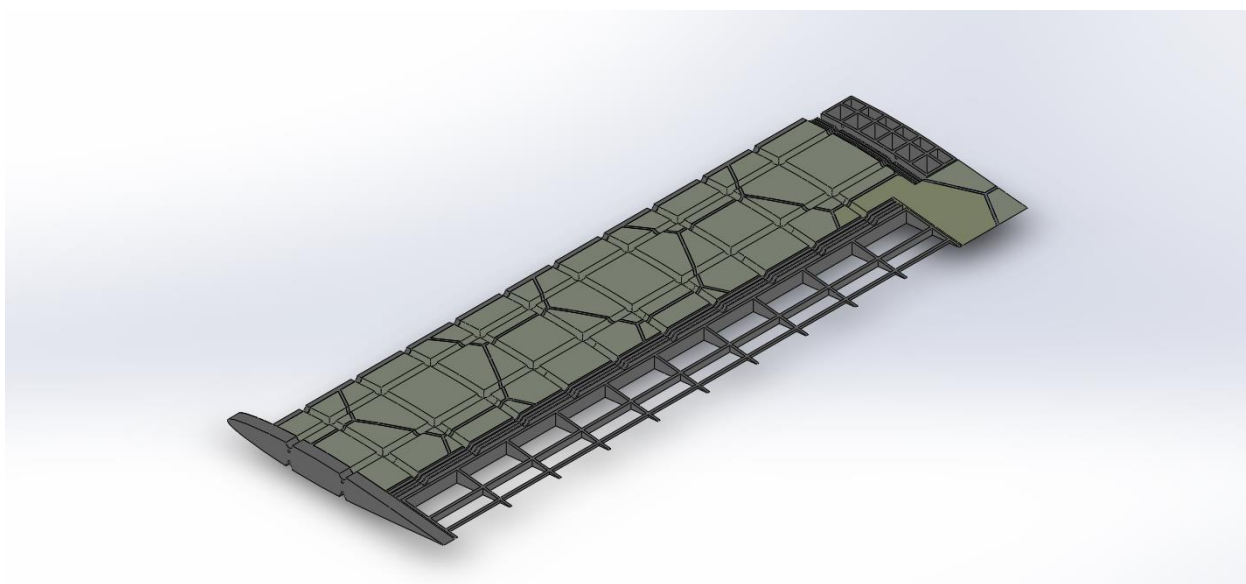
Χρειάζεται να αναφερθεί πως στις άκρες τους οι μηχανισμοί μορφοποίησης διατηρούν μικρό κενό (τεσσάρων τάξεων μεγέθους μικρότερο από την τάξη μεγέθους των κύριων διαστάσεων της πτέρυγας) με το σώμα της πτέρυγας για να αποφευχθεί η ανάπτυξη αχρειαστων ροπών λόγω τριβής που θα έμπαιναν εμπόδιο στη μορφοποίηση.

4.2.3 Τελικός πυρήνας της πτέρυγας

Η αυξητική δομή μαζί με τους μηχανισμούς μορφοποίησης συνδέονται και αποτελούν ένα ενιαίο σώμα από το ίδιο υλικό και λειτουργούν ως ο βασικός πυρήνας της μορφοποιούμενης πτέρυγας. Συνδετικό ρόλο μεταξύ όλων των επιμέρους τμημάτων (μηχανισμών μορφοποίησης, κυψελωτής δομής) είναι η γέφυρα που, όπως και προηγουμένως, αποτελεί το σημείο σύνδεσης της πτέρυγας με το κύριο σώμα του αεροσκάφους. Αφήνοντας αναλλοίωτα τα θεμελιώδη γεωμετρικά χαρακτηριστικά που αναπτύχθηκαν πριν, η γέφυρα παρέμεινε στα 5mm πλάτος.



Εικόνα 54: Κάτοψη ενιαίου τμήματος αυξητικής δομής-μηχανισμού μορφοποίησης



Εικόνα 55: Τελική μορφολογία πυρήνα πτέρυγας

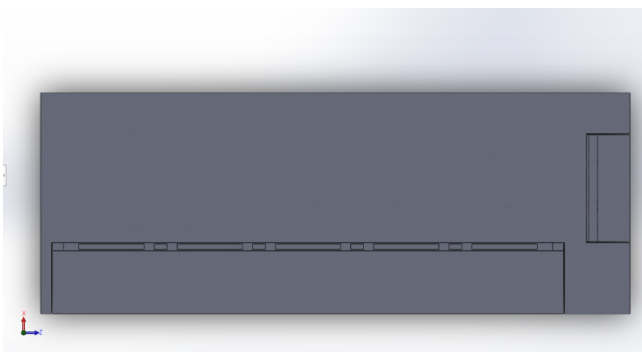
Οι εγκάρσιες και διαμήκεις τομές που φαίνονται παραπάνω είναι τα λούκια που διαμορφώθηκαν για να περνούν τα συρματόσχοινα που μεταφέρουν την ροπή των επενεργητών προς τις μορφοποιούμενες άκρες όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Το σχήμα της τομής που επιλέχθηκε είναι μέρος κύκλου με το κέντρο του να εφάπτεται της αεροτομής για τα διαμήκη λούκια, ενώ για τα εγκάρσια η τομή έγινε «ακολουθώντας» την αεροτομή. Κατασκευαστικά δεν υπήρχε κάποια απαίτηση από το βάθος της τομής παρά μόνο να μην καταστρέφουν την αυξητική δομή και την δομή ψαροκόκκαλου, δίνοντας την ευχέρια να κατευθυνθεί το συρματόσχοινο στον προορισμό του που είναι οι κατακόρυφες πλάκες των μηχανισμών μορφοποίησης. Η διάμετρος των κύκλων επιλέχθηκε αυθαίρετα να είναι 3mm.

4.2.4 Ανάπτυξη του κελύφους της πτέρυγας

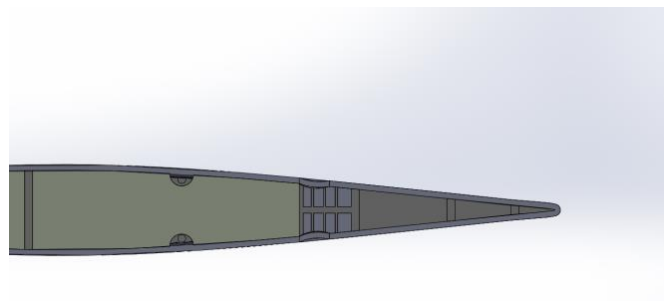
Η ανάπτυξη του κελύφους μορφοποιούμενης πτέρυγας είναι σύνθετο πρόβλημα που η επιστημονική κοινότητα ερευνά. Ένα συμβατικό κέλυφος πτέρυγας αεροσκάφους δεσμεύει την κίνηση του μηχανισμού μορφοποίησης λόγω της υψηλής δυσκαμψίας και των μηχανικών ιδιοτήτων των κλασσικών υλικών που χρησιμοποιούνται για αυτές.

Συνήθως χρησιμοποιούνται υλικά μνήμης σχήματος, ικανά μέσω επενέργειας, να μεταβάλλουν το σχήμα τους και έτσι εξυπηρετούν την μορφοποίηση. Στην παρούσα εργασία θα αναπτυχθεί κέλυφος για την πτέρυγα, που όμως δεν θα αξιοποιηθεί στο σύνολό του για την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων καθώς στις περιοχές που αλλάζει η μορφολογία δεν έχει την απαιτούμενη συμπεριφορά για να δώσει η ελαστική ανάλυση ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στο κέλυφος της πτέρυγας που αναπτύσσεται, πέρα από την κλασσική μορφολογία που ακολουθεί το περίγραμμα της αεροτομής, αναπτύσσονται τομές για να μην δεσμεύει το τμήμα της πτέρυγας που δεν μορφοποιείται το μορφοποιούμενο μέρος. Ταυτόχρονα στο μεταβατικό τμήμα, στο τμήμα δηλαδή που η μορφοποίηση απαιτεί σημαντικές αλλαγές στη γεωμετρία του κελύφους, συγκολλείται κυρτό τμήμα αλουμινίου για να υπάρχει υλικό που μπορεί να λάβει παραμόρφωση. Σε αυτό το τμήμα κόβονται τμήματα κατά μήκος για να μειωθεί η ροπή αδράνειας σε κάμψη. Από το τμήμα αλουμινίου είναι που δεν θα αξιοποιηθεί στην προσομοίωση.



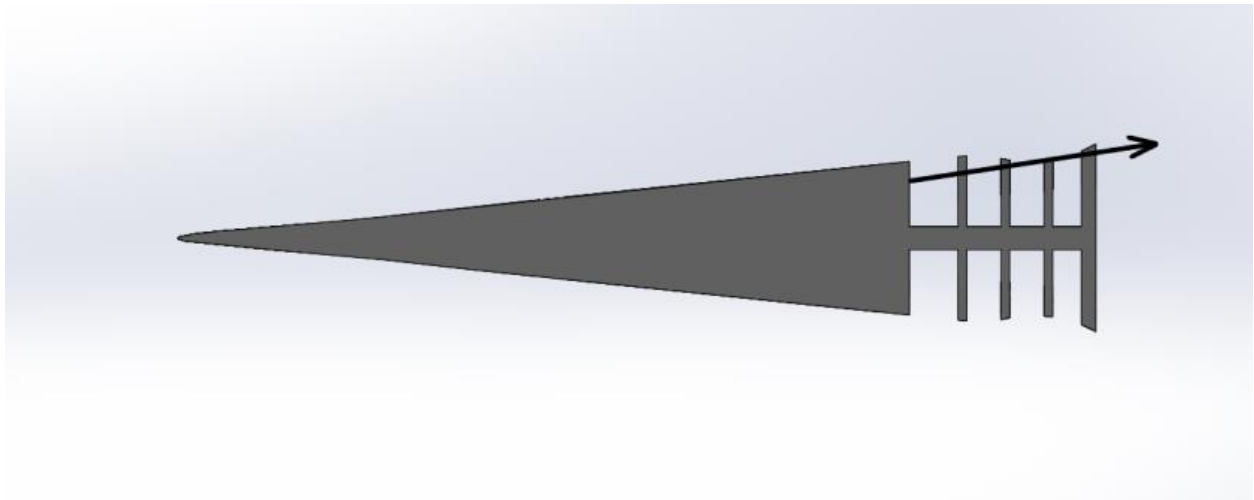
Εικόνα 56: Διαμόρφωση του κελύφους σε κάτοψη και σε τομή



4.3 Ελαστική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

4.3.1 Μοντελοποίηση της λειτουργίας του μηχανισμού μορφοποίησης

- Διαμήκης μηχανισμός την κλίση

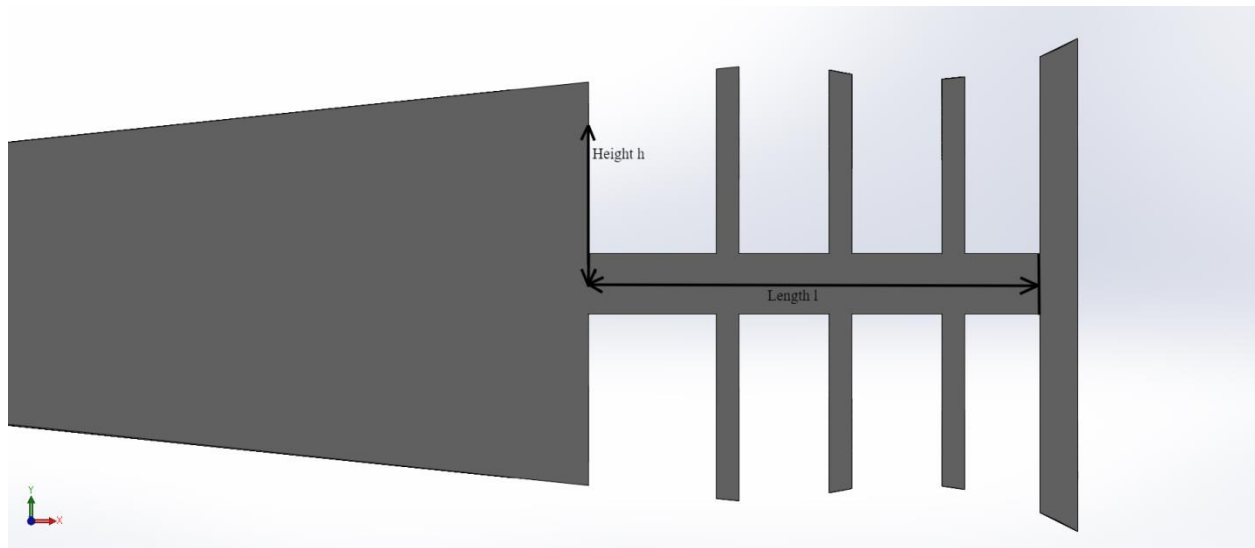


Εικόνα 57: Λειτουργία μηχανισμού μορφοποίησης για την γωνία pitch

Το βέλος της παραπάνω εικόνας παρουσιάζει την διεύθυνση της δύναμης F που ασκείται από τα συρματόσχοινα στον μηχανισμό μορφοποίησης. Η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της δύναμης και της οριζόντιας διεύθυνσης της οριζόντιας πλάκας μπορεί να ελεγχθεί μέσω των οδηγών μέσα στα οποία κινούνται τα συρματόσχοινα (δεν είναι σκοπός της παρούσας μελέτης η ανάλυση του μηχανισμού ανάπτυξης ροπής).

Από την οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης F θα εμφανιστούν ζεύγος ροπών οι οποίες θα τείνουν να κάμψουν τον μηχανισμό κατά την ίδια φορά. Συγκεκριμένα

- $M_{x1} = F_x \cdot h$, όπου h το ύψος από την μέση γραμμή της οριζόντιας πλάκας έως το σημείο εφαρμογής της δύναμης και F_x η οριζόντια συνιστώσα της δύναμης F
- $M_{x2} = F_y \cdot l$, όπου l το μήκος της οριζόντιας πλάκας

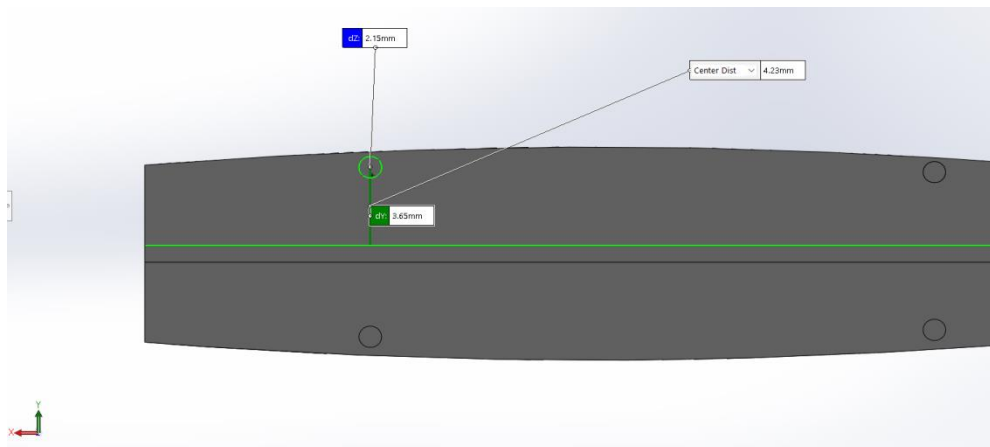


Εικόνα 58: Γραφική απεικόνιση του μήκους l και του ύψους h

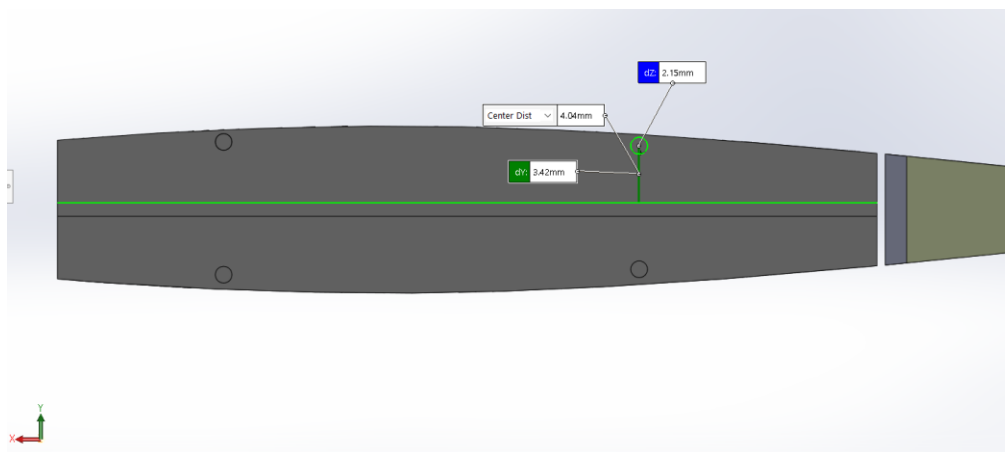
Πάνω στον μηχανισμό μορφοποίησης υπάρχουν 10 σημεία, σε ίσες αποστάσεις το ένα από το άλλο, στα οποία ασκείται η απαιτούμενη δύναμη, όπως φαίνεται και παραπάνω.

- Μηχανισμός την περιστροφή

Ο μηχανισμός αυτός έχει μια μικρή διαφοροποίηση σε σχέση με τον διαμήκη μηχανισμό για την κλίση. Καθώς οι θέσεις στις οποίες τα συρματόσχοινα συνδέονται με τον μηχανισμό μορφοποίησης ακολουθούν την αεροτομή έχουν διαφορετική κατακόρυφη απόσταση από την οριζόντια πλάκα, άρα για ίδια οριζόντια συνιστώσα της δύναμης δημιουργούν διαφορετική ροπή, άρα και διαφορετική ανύψωση για το ακροπτερύγιο. Αυτό θα έχει αρνητικές επιπτώσεις στην αεροδυναμική της πτέρυγας. Αυτό πάει να πει ότι χρειάζεται να ασκηθεί διαφορετική δύναμη σε κάθε θέση ώστε η μετατόπιση κατά τον κατακύρφο άξονα να είναι η ίδια και στις δύο θέσεις.



Εικόνα 59: Κατακόρυφη απόσταση οριζόντιας πλάκας και σημείου εφαρμογής δύναμης στη θέση 1



Εικόνα 60: Κατακόρυφη απόσταση οριζόντιας πλάκας και σημείου εφαρμογής δύναμης στη θέση 2

Η ροπή που αναπτύσσεται από την κατακόρυφη συνιστώσα της δύναμης παραμένει σταθερή για τις δύο θέσεις καθώς το μήκος της οριζόντιας πλάκας l , παραμένει σταθερό. Η διαφοροποίηση παρατηρείται στην ροπή που αναπτύσσεται από την οριζόντια συνιστώσα της δύναμης. Συγκεκριμένα

$$M_1 = F_{y1} \cdot h_1$$

$$M_2 = F_{y2} \cdot h_2$$

Όμως χρειάζεται οι ροπές που αναπτύσσονται να έχουν ίσο μέτρο, άρα:

$$F_{1y} \cdot h_1 = F_{2y} \cdot h_2 \Leftrightarrow$$

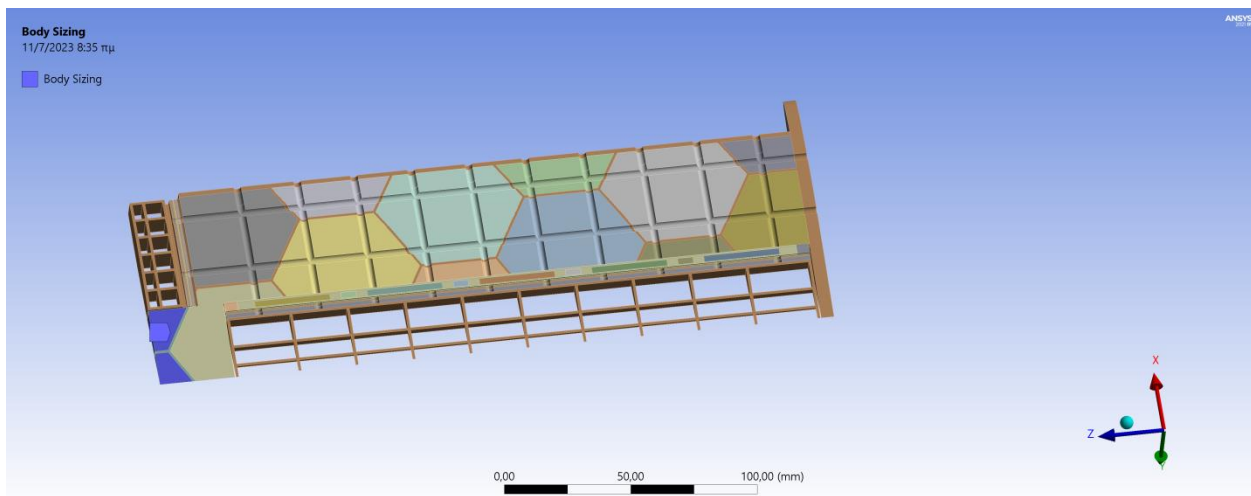
$$F_{1y} = \frac{h_2}{h_1} F_{2y} = \frac{3.42}{3.65} \cdot F_{2y} = 0.937 \cdot F_{2y}$$

Καθώς η αεροτομή είναι συμμετρική, και για τους δύο μηχανισμούς μορφοποίησης, οι παραπάνω σχέσεις θα ισχύουν και για τις μετατοπίσεις προς τα θετικά του άξονα y και προς τα αρνητικά του άξονα y .

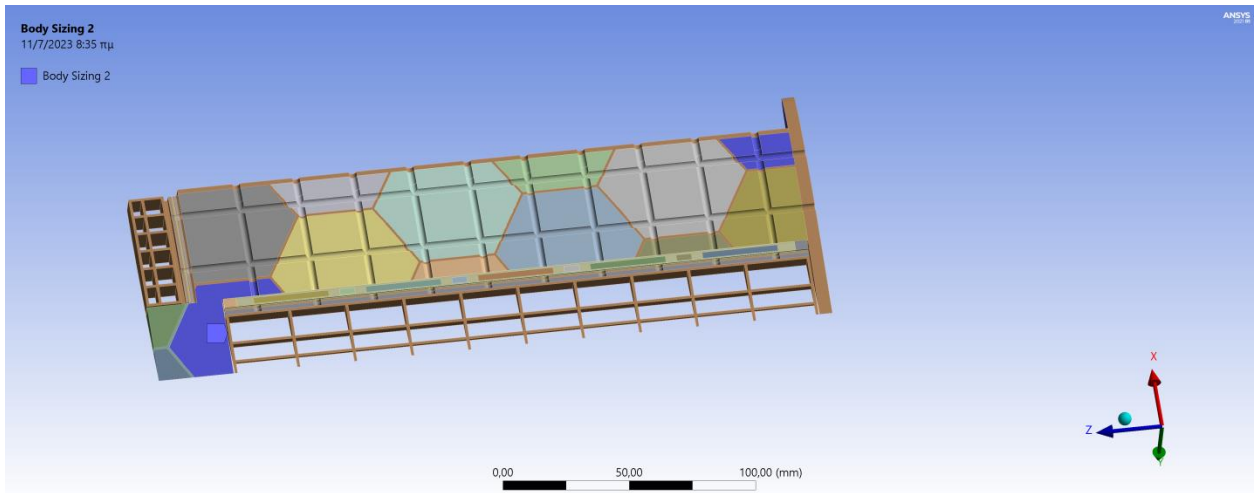
4.3.2 Δόμηση Πλέγματος

Η δόμηση του πλέγματος για το κέλυφος και τον πυρήνα της πτέρυγας ακολουθεί τις ίδιες βασικές αρχές όπως και στα προηγούμενα πειράματα. Για την αύξηση της ταχύτητα των υπολογισμών, στον αφρό το μέγεθος του πλέγματος αυξήθηκε στα 3mm, τόσο ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Ταυτόχρονα, σε κομμάτια αφρού, λόγω τις σύνθετης γεωμετρίας τους υπήρξε ανάγκη για την μείωση του μεγέθους του πλέγματος στο 1mm και σε άλλα δύο σε 2mm. Σε άλλη περίπτωση δεν υπήρχε δυνατότητα να κατασκευαστεί το πλέγμα. Ταυτόχρονα στις άκρες του διαμήκους μηχανισμού μορφοποίησης πραγματοποιήθηκε refinement καθώς η κακή ποιότητα του πλέγματος σε εκείνο το σημείο αλλοίωνε την γεωμετρία και εμφάνιζε τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων σε κόμβους. Τέλος στις ακμές του διαμήκους μηχανισμού μορφοποίησης, ορίστηκε χειροκίνητα αριθμός κόμβων, είκοσι οχτώ(28) κατά μήκος κάθε ακμής.

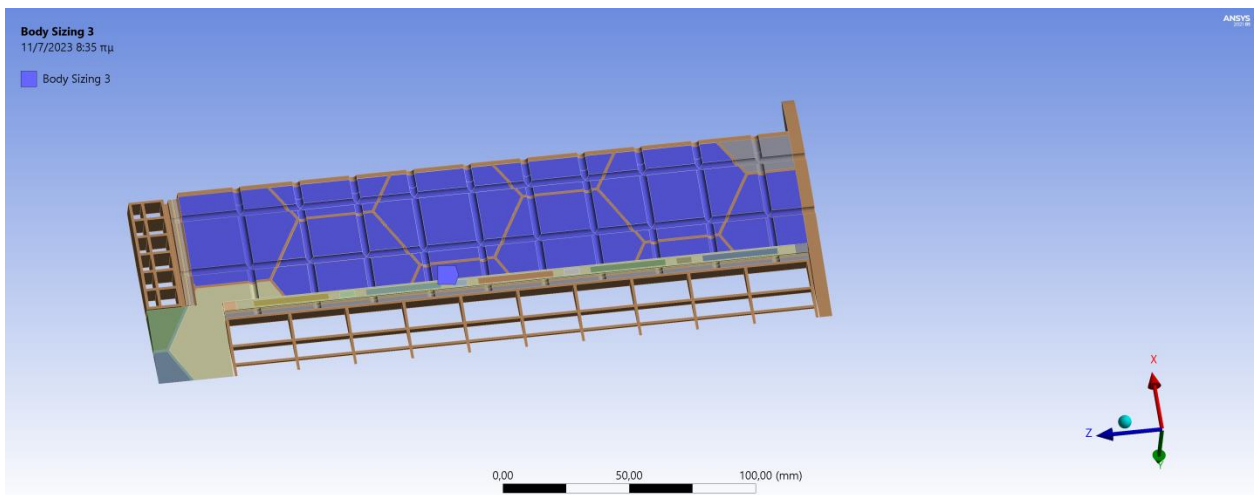
Παρακάτω φαίνονται γραφικά οι ρυθμίσεις του πλέγματος.



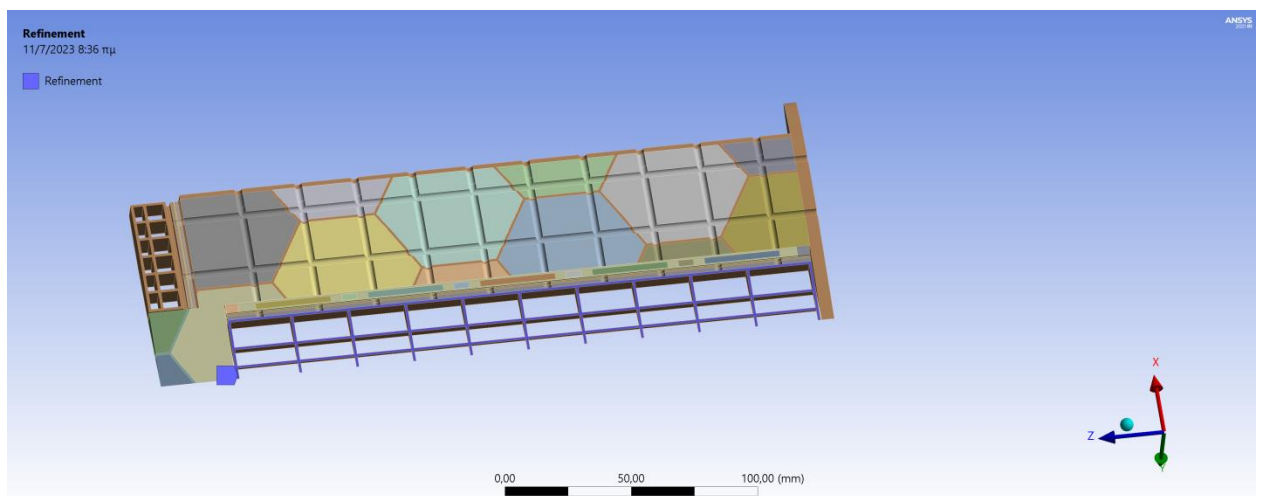
Εικόνα 61: Κομμάτια αφρού με μεγεθος πλέγματος 2mm



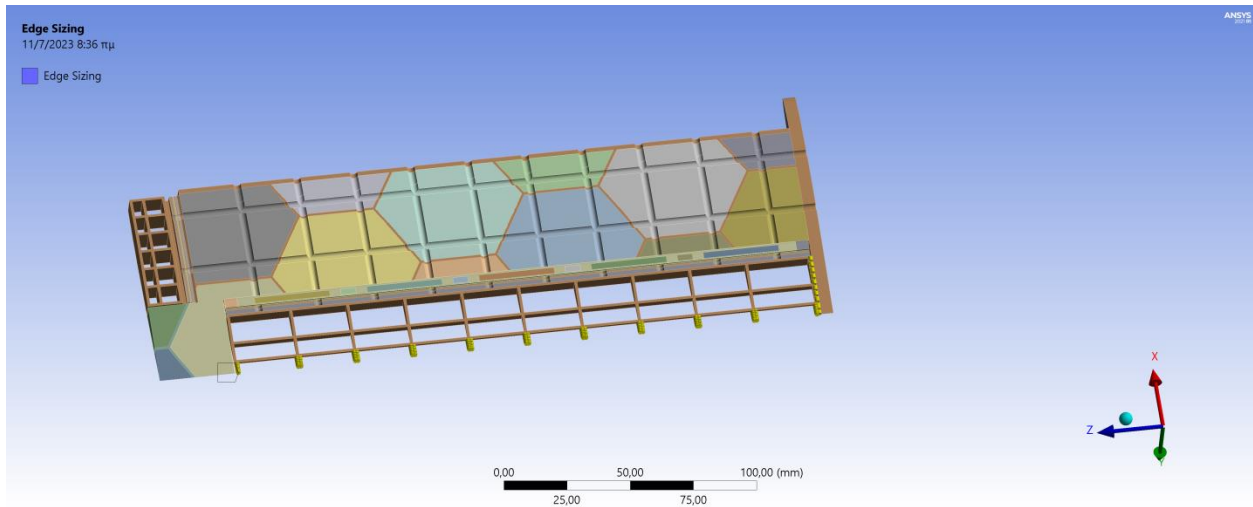
Εικόνα 62: Κομμάτια αφρού με μέγεθος πλέγματος 1mm



Εικόνα 63: Κομμάτια αφρού με μέγεθος πλέγματος 3mm

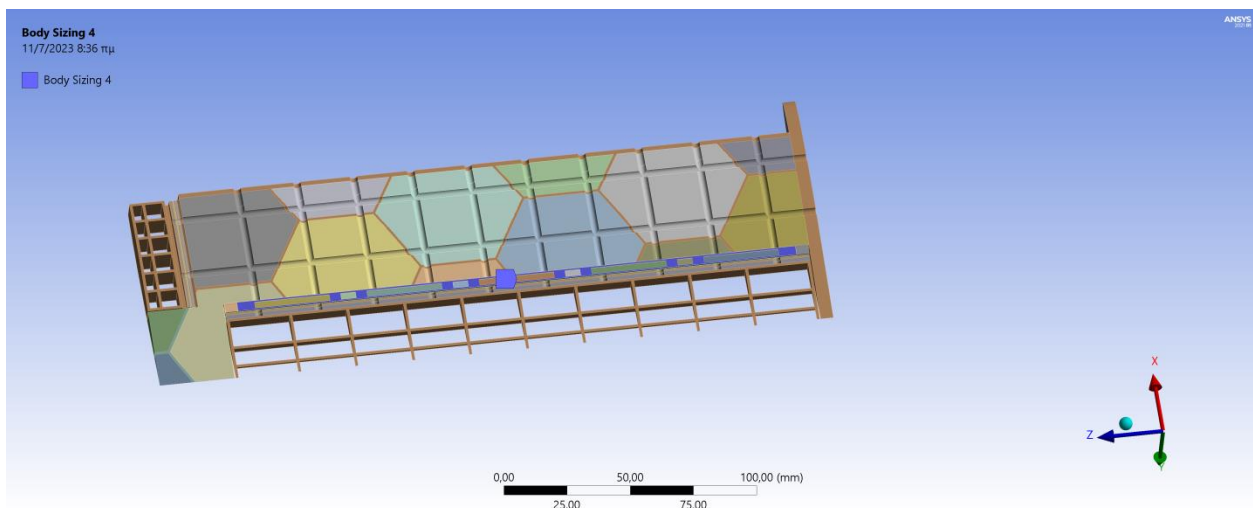


Εικόνα 64: Κομμάτια όπου πραγματοποιήθηκε refinement.

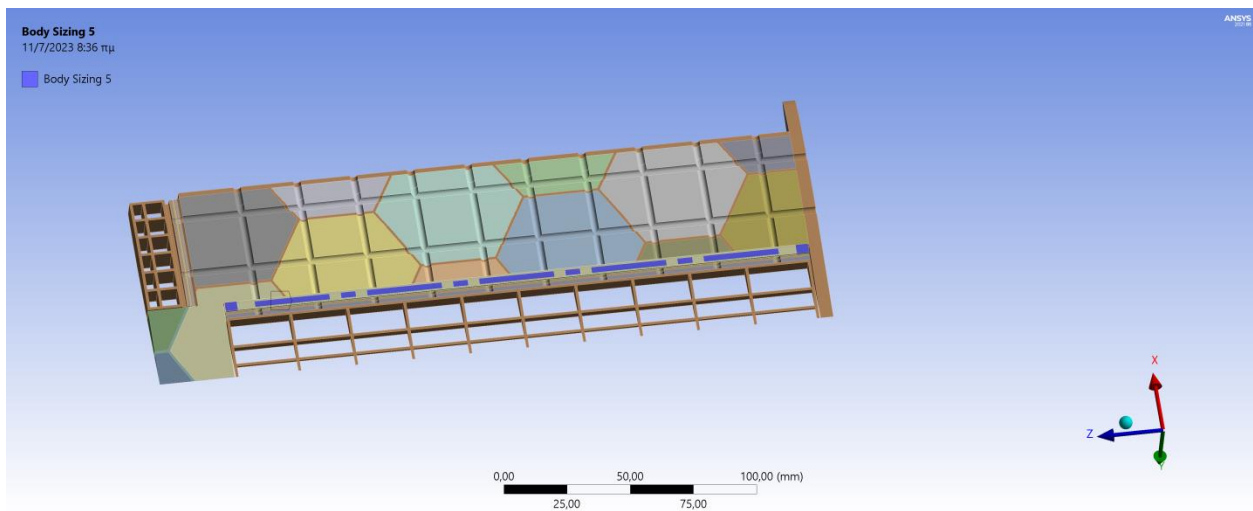


Εικόνα 65: Ορισμός αριθμού κόμβων για τις ακμές του μηχανισμού μορφοποίησης

Τέλος στο suppressed τμήμα, μειώθηκε το μέγεθος του πλέγματος στα 0.7mm και 0.4mm.



Εικόνα 66: Τμήμα μεγέθους πλέγματος 0.7mm



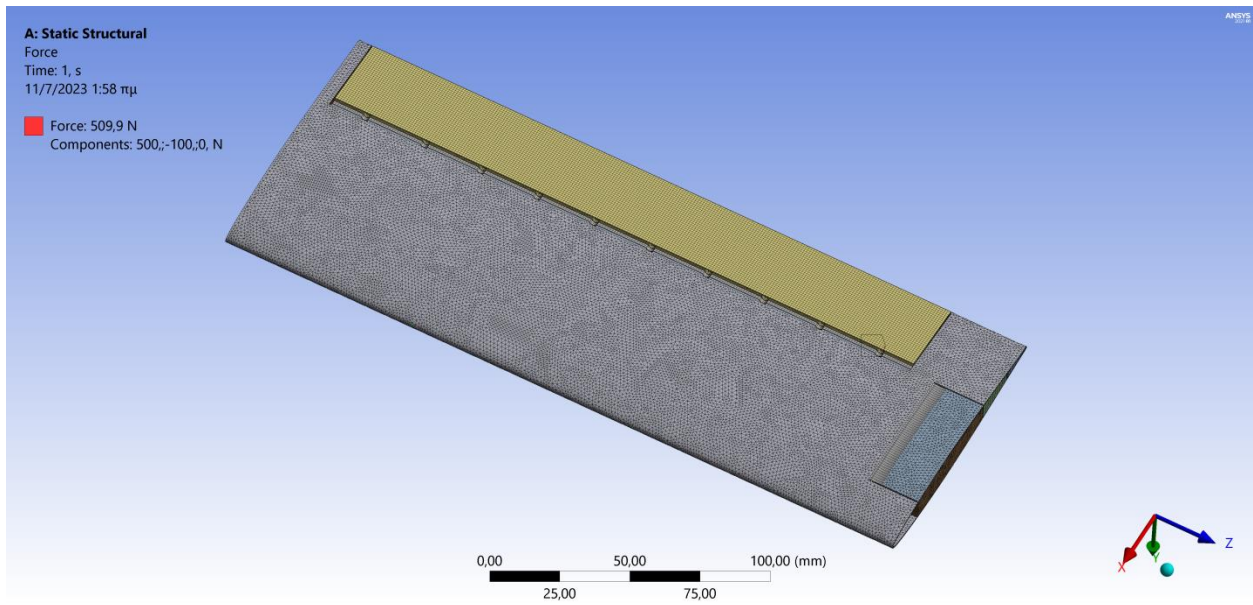
Εικόνα 67: Τμήμα μεγέθους πλέγματος 0.5mm

Για το τμήμα μορφοποίησης στο ακροπτερύγιο, δεν χρειάζεται κάποια περαιτέρω επεξεργασία του πλέγματος.

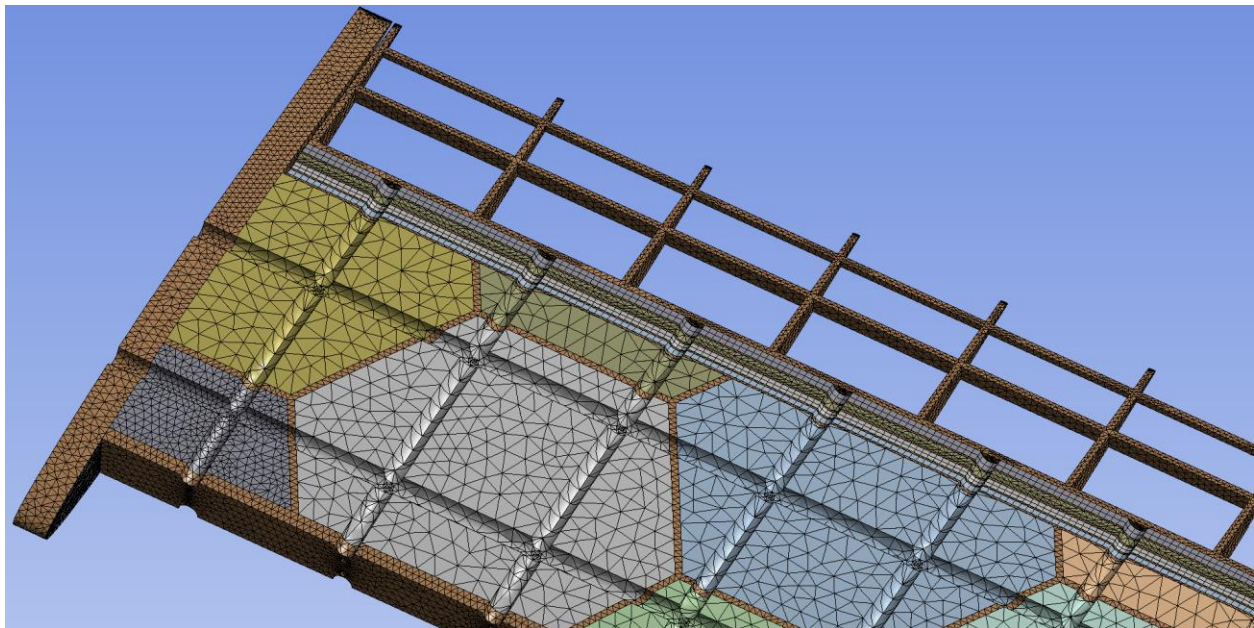
4.3.3 Προετοιμασία της ανάλυσης

Για την μορφοποίηση στη θέση του πηδαλίου κλίσης

Για την διεξαγωγή της ελαστικής ανάλυσης έγινε και κατάλληλη προετοιμασία της γεωμετρίας. Αρχικά διαμορφώθηκαν μικρές κυκλικές τομές στα σημεία εφαρμογής των δυνάμεων μορφοποίησης. Στην πλευρά της γέφυρας και του τμήματος του κελύφους που ακουμπά στο κύριο σώμα του αεροσκάφους θεωρήθηκε πάκτωση, όπως και στις δύο κατακόρυφες πλάκες, τη μία που στηρίζει τον επενεργητή και την άλλη που συνδέεται με τον μηχανισμό μορφοποίησης. Το μεταβατικό τμήμα του κελύφους, επειδή επηρέαζε αρνητικά τα αποτελέσματα καθώς δεν αντιστοιχεί σε κέλυφος που αναπτύσσεται για μορφοποιούμενα αεροσκάφη θεωρήθηκε suppressed. Κατά τον οριζόντιο άξονα ασκήθηκε μια δύναμη 500N, ενώ κατά τον κατακόρυφο 200N.



Εικόνα 68: Ανάπτυξη πλέγματος



Εικόνα 69: Πλέγμα στο εσωτερικό της πτέρυγας

Για την μορφοποίηση στη θέση του πηδαλίου περιστροφής

Η προετοιμασία της μορφοποίησης στην εγκάρσια διεύθυνση ακολουθεί τις ίδιες αρχές με την μορφοποίησης στην διαμήκη διεύθυνση. Η πάκτωση, πέρα από το τμήμα του κελύφους και της γέφυρας που εφάπτεται στο κύριο σώμα του αεροσκάφους θεωρείται και στην

κατακόρυφη πλάκα που συνδέεται με το κύριο σώμα του μηχανισμού μορφοποίησης. Στον οριζόντιο άξονα ασκείται μια δύναμη 100N ενώ στον κατακόρυφο άξονα 20N. Αντίστοιχα το μεταβατικό τμήμα του κελύφους, πάνω από τον μηχανισμό μορφοποίησης θεωρείται suppressed για τον ίδιο λόγο που αναπτύχθηκε παραπάνω.

Κεφάλαιο 5: Εκτίμηση αποτελεσμάτων και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Βασικό συμπέρασμα είναι πως για τις δυνάμεις που ασκούνται από τον επενεργητή κατά την ελαστική ανάλυση, αφενός οι γωνίες μορφοποίησης είναι ικανές ώστε να προσομοιώνουν την λειτουργία των πηδαλίων κλίσης και να αλλάζουν κατάλληλα τα αεροδυναμικά φορτία. Συνολικά ο μηχανισμός κρίνεται λειτουργικός, με περαιτέρω περιθώρια βέβαια για την βελτιστοποίησή του.

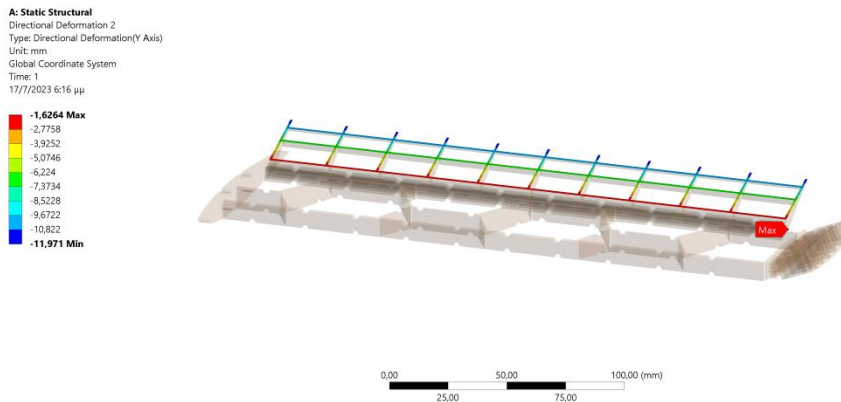
Συγκεκριμένα έγινε προσομοίωση για ταυτόχρονη λειτουργία και των δύο μηχανισμών ώστε η καταπόνηση στους μηχανισμούς και στην κυψελωτή δομή να είναι η μέγιστη. Αυτός είναι και ο ασφαλέστερος τρόπος για να δοκιμαστεί ο μηχανισμός ως προς την αντοχή του. Αξιοποιήθηκε το κριτήριο ισοδύναμης τάσης von Mises. Η μέση τάση που αναπτύσσεται στην πτέρυγα και κατά βάση στον μηχανισμό μορφοποίησης είναι κάτω από 40MPa που βρίσκεται εντός των ορίων θραύσης του PET, ενώ λίγα MPa παραπάνω αναπτύσσονται γύρω από το σημείο εφαρμογής των δυνάμεων, φτάνοντας τα 45,422MPa. Η μέση τάση που ασκείται στην πτέρυγα είναι περίπου στα 2,87MPa, τιμή που δεν θίγει τα όρια αντοχής κανενός υλικού.

Γενική παρατήρηση είναι ότι η ανάπτυξη αυξημένων τάσεων στα σημεία εφαρμογής των δυνάμεων έχει να κάνει άμεσα με την μικρή διατομή των οπών πάνω στις οποίες εφαρμόζεται η δύναμη, ενώ ταυτόχρονα υψηλές τάσεις παρατηρούνται στις άκρες του μηχανισμού μορφοποίησης που βρίσκεται κατά μήκος του φτερού, εξαιτίας της υπερβολικά μικρής διάστασης που έχουν. Παρόλα αυτά δεν κρίνονται αρκετά υψηλές ώστε να οδηγήσουν σε καταστροφή του μηχανισμού μορφοποίησης και αμελούνται σκόπιμα από την ανάλυση.

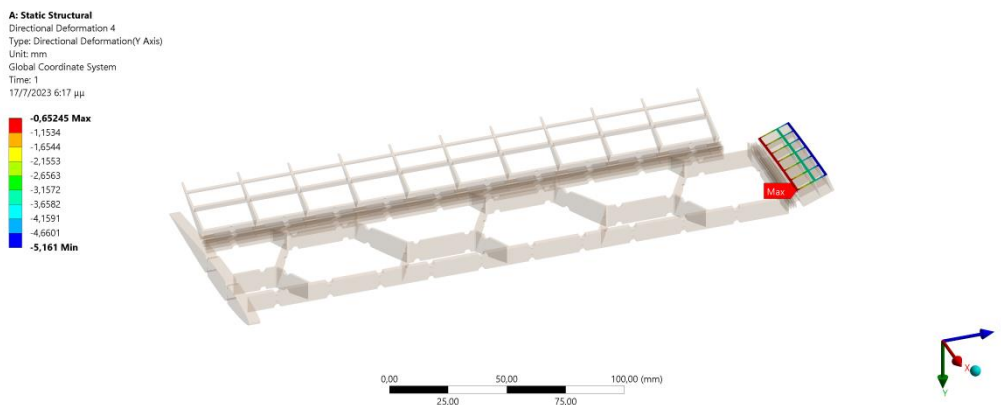
Συγκεκριμένα για τον διαμήκη μηχανισμό μορφοποίησης η κατακόρυφη μετατόπιση υπολογίστηκε στα 11,97mm, το οποίο αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης των 21,48°, ενώ για τον

εγκάρσιο στο ακροπτερύγιο η κατακόρυφη μετατόπιση υπολογίστηκε στα 5,16mm που αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης 15,75°. Τέτοιες γωνίες στην διεθνή βιβλιογραφία θεωρούνται ικανές για να προσομοιώσουν την λειτουργία των πηδαλίων, άρα και να δίνουν στην πτέρυγα τις απαραίτητες αεροδυναμικές επιδόσεις [4]. Δοκιμή έγινε επίσης και για αντίστροφη φορά στροφής στους μηχανισμούς που ξανά τα αποτελέσματα δεν έφεραν μεγάλες αποκλίσεις στις αναπτυσσόμενες δυνάμεις. Η μέση αναπτυσσόμενη τάση εκτιμάται στα 2,89 MPa, πάλι πολύ κάτω από τα όρια αντοχής των υλικών

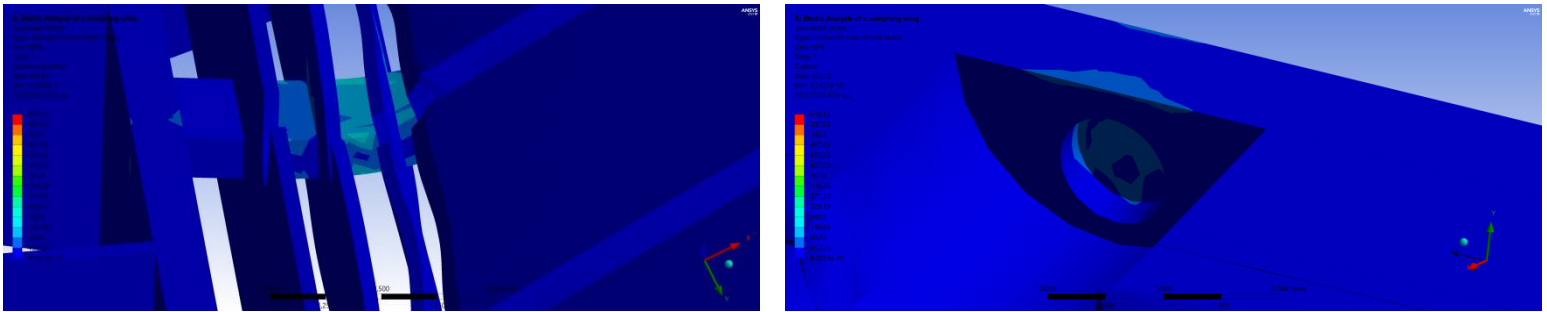
Επιπλέον η προσομοίωση δοκιμάστηκε με οριακές συνθήκες πάκτωσης, αυτή τη φορά μόνο στη γέφυρα και στην κατακόρυφη πλάκα πάνω στην οποία τοποθετείται ο επενεργητής και προσομοιάζει πειστικότερα τις συνθήκες πτήσης. Βέβαια εκεί παρατηρείται ανάπτυξη ισχυρών τάσεων στις οριζόντιες πλάκες του διαμήκους μηχανισμού μορφοποίησης, κοντά στα 100MPa, που μπορούν να μειωθούν μεγάλωνοντας το μήκος της κάθε πλάκας, κάτι που όμως θα επηρέαζε αρνητικά την δυσκαμψία αυτής.



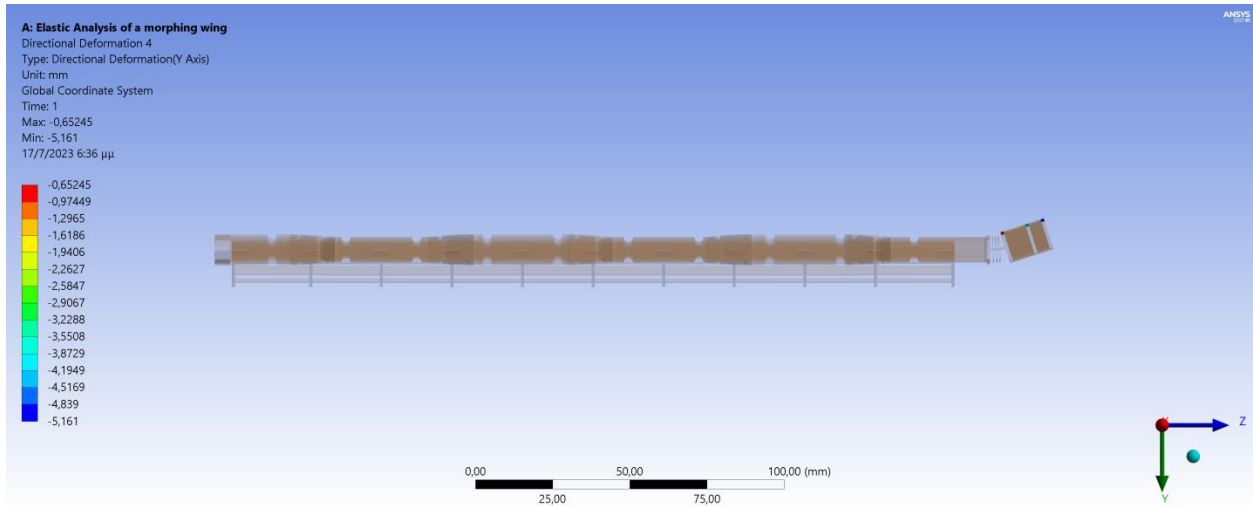
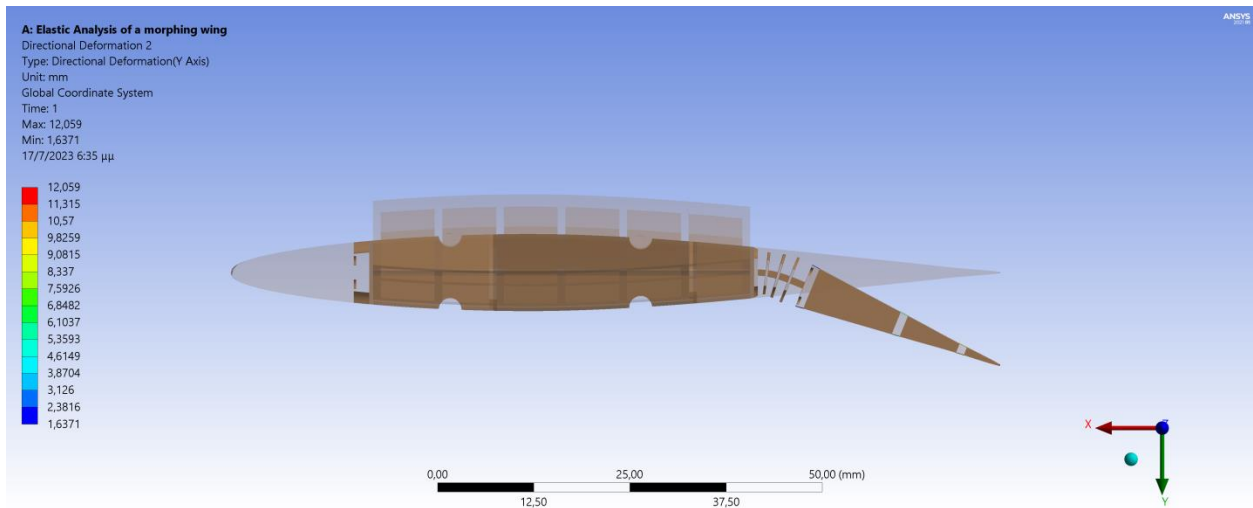
Εικόνα 70: Μετατόπιση διαμήκους μηχανισμού για ίδια φορά γωνίας



Εικόνα 71: Μετατόπιση εγκάρσιου μηχανισμού για ίδια φορά γωνίας



Εικόνα 71: Τάσεις στα σημεία εφαρμογής της δύναμης και στις οριζόντιες πλάκες των μηχανισμών μορφοποίησης



Εικόνα 72: Μετατοπίσεις για γωνία αντίθετης φοράς

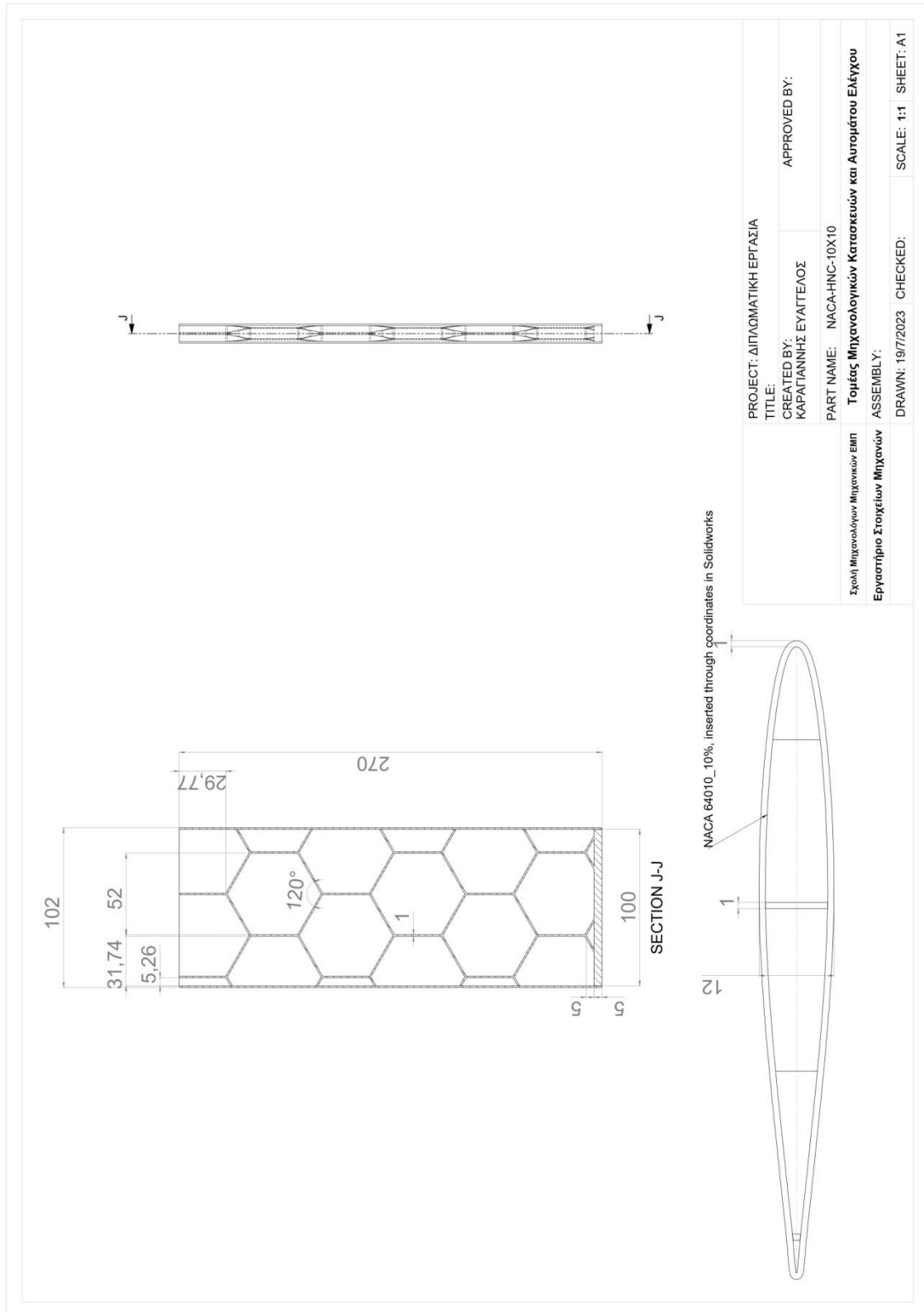
Πάνω στη συγκεκριμένη μελέτη υπάρχουν δυνατότητες να αναπτυχθούν περαιτέρω νέες ερευνητικές εργασίες. Για την συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση που αποτυπώνει τις ιδιότητες της πτέρυγας αμετάβλητες σε σχέση με τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας, άρα και φόρτισης. Οι κατασκευαστικές ανάγκες διαφοροποιούνται από την στενή αυτή μελέτη καθώς υπάρχει ανάγκη για μελέτη και υπολογισμό των κύκλων ζωής του μηχανισμού μορφοποίησης καθώς και την αντοχή στα αεροελαστικά φαινόμενα.

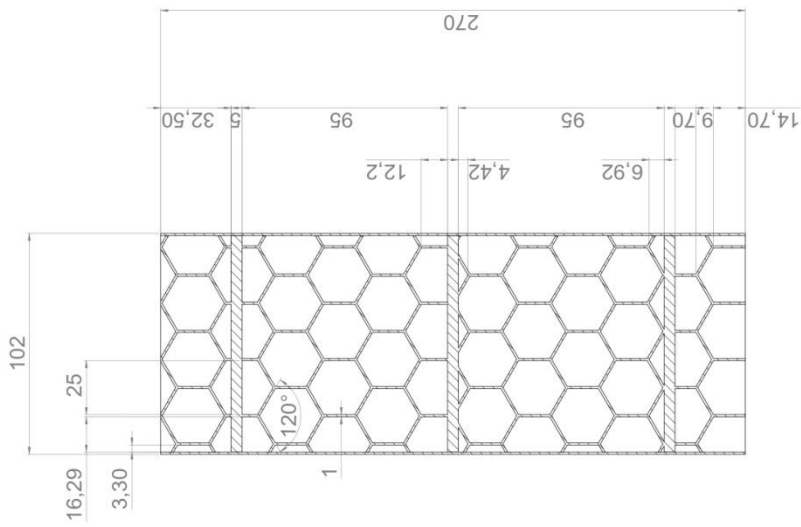
Επιπλέον, για την ανάγκη μείωσης του βάρους του μηχανισμού μορφοποίησης και του αεροσκάφους (επανδρωμένου ή μη) που χρησιμοποιείται, δύναται να πραγματοποιηθεί έλεγχος σε σχέση με την κατασκευαστική βελτιστοποίηση του μηχανισμού μορφοποίησης ώστε να μπορεί με λιγότερο υλικό και λιγότερο βάρος να επιτελέσει τις απαραίτητες λειτουργίες.

Βιβλιογραφία

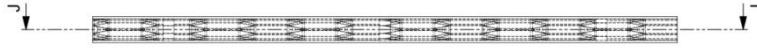
- [1] Onur Bilgen, Rafic M. Ajaj, Michael I. Friswell, Daniel J. Inman Silvestro Barbarino, "A Review of Morphing Aircraft," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 22, no. 9, pp. 823-877, June 2011.
- [2] S.A. Meguid, K.T. Tan, W.K Yeo A.Y.N Sofla, "Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges," *Materials and Design*, vol. 31, no. 3, pp. 1284-1292, March 2010.
- [3] Aarash Y. N. Sofla, Haydn N. G. Wadley Dana M. Elzey, "Shape-memory-based multifunctional structural actuator panels," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 42, no. 7, pp. 1943-1955, April 2005.
- [4] Silvestro Barbarino, Onur Bilgen, Rafic M. Ajaj, Michael I. Friswell, and Daniel J. Inman, "A Review of Morphing Aircraft," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 22, no. 9, pp. 862-863, June 2011.
- [5] Cevdet Ozel, Emre Ozbek, and Selcuk Ekici, "A Review on Applications and Effects of Morphing Wing Technology on UAVs," *International Journal of Aviation Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 30-40, 2020.
- [6] Stylianos Kesopoulos. (2020, November) DSpace@NTUA. [Online]. <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/51885>
- [7] Michael S. Forsthoffer, "Compressors," in *More Best Practices for Rotating Equipment.*, 2017, p. 123.
- [8] ANSYS, Inc. courses.ansys.com. [Online]. courses.ansys.com/index.php/courses/modal-analysis/lessons/an-eigenvalue-problem-lesson-3/
- [9] Ahmed Nagib Elmekawy. <https://drahmednagib.com/courses/cad/lectures>. [Online]. [https://drahmednagib.com/CAD 2018/Lecture 2 Meshing 1.pdf](https://drahmednagib.com/CAD%202018/Lecture%20Meshing%201.pdf)
- [10] ANSYS, Inc. courses.ansys.com. [Online]. <https://courses.ansys.com/index.php/courses/modal-analysis/lessons/mode-participation-factor-and-effective-mass-lesson-4/>

Παράρτημα

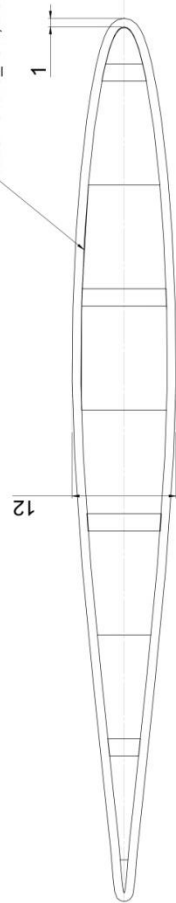




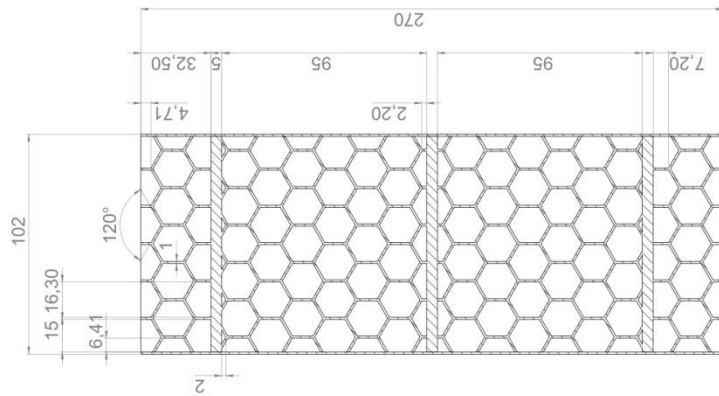
SECTION J-J



NACA 64010_10%, inserted through coordinates in Solidworks



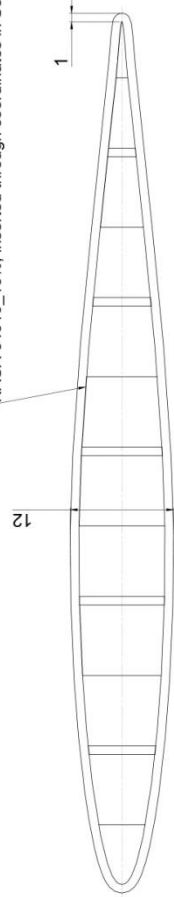
PROJECT: ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	APPROVED BY:
TITLE:	Καραγιάννης Ευάγγελος
CREATED BY:	PART NAME: NACA-HNC15-FILL-3PB
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ	Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου Ελέγχου
Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών	DRAWN: 19/7/2023
	CHECKED:
	SCALE: 1:1
	SHEET: A1



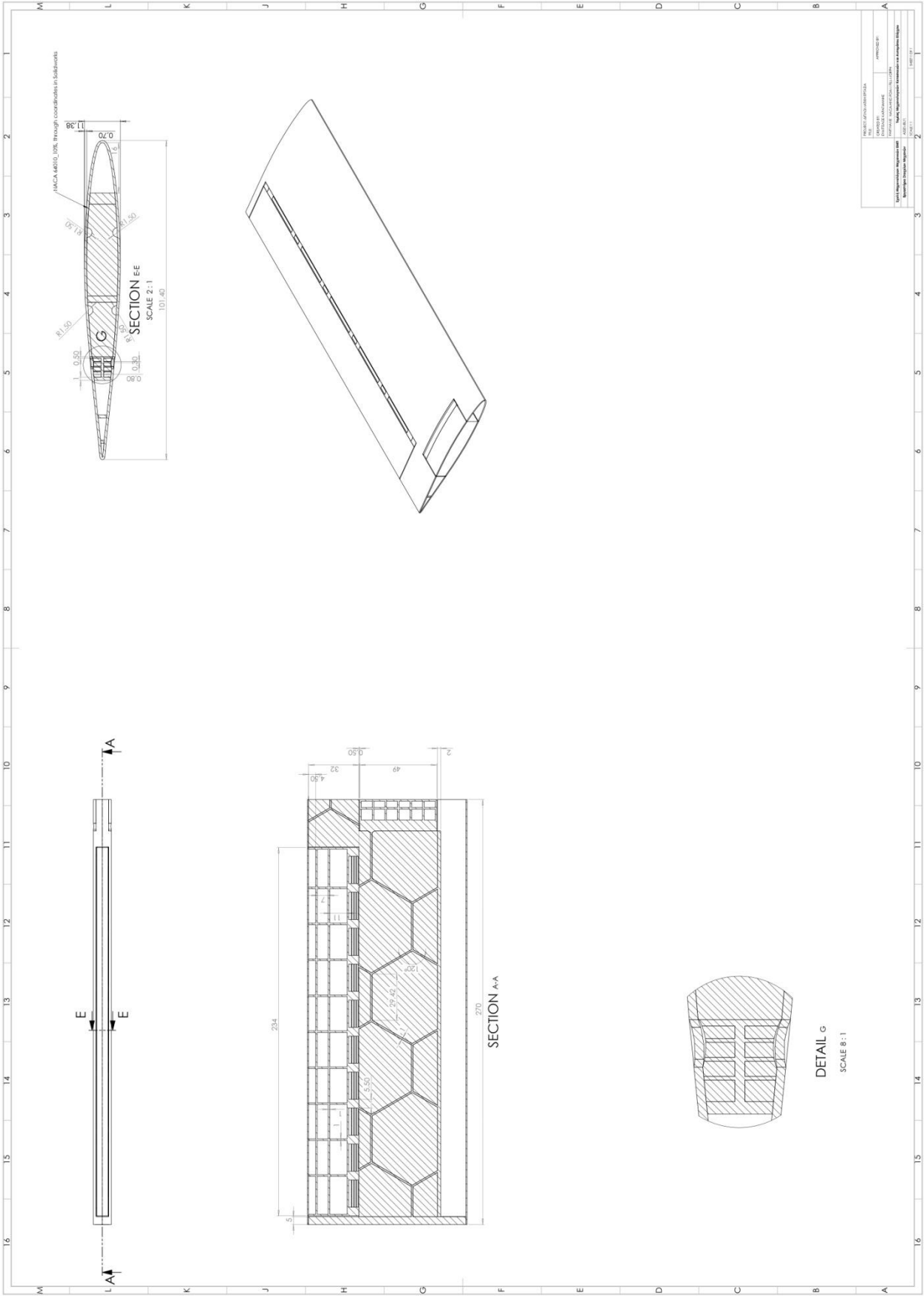
SECTION J-J



NACA 64010_10%, inserted through coordinates in Solidworks



PROJECT: ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	APPROVED BY:
TITLE: ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ	
CREATED BY:	
PART NAME: NACA-HNC10-FILL-3PB	
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ	Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτόματου Ελέγχου
Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών	
DRAWN: 19/7/2023	CHECKED:
	SCALE: 1:1
	SHEET: A1



PROJECT: JAMES BEYERMAN	DATE: 01/15/2011
DESIGNER: JAMES BEYERMAN	PROJECT NO: 1001000001
DATE: 01/15/2011	PROJECT NO: 1001000001
PROJECT: JAMES BEYERMAN DATE: 01/15/2011 PROJECT NO: 1001000001	