



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Μελέτη και Βιβλιογραφική Έρευνα Συστημάτων Parafoil/Payload

Ιάσοντας Χατζηγεωργίου

1054444

Βασίλειος Κωστόπουλος, Επιβλέπων Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, Σεπτέμβριος/2021

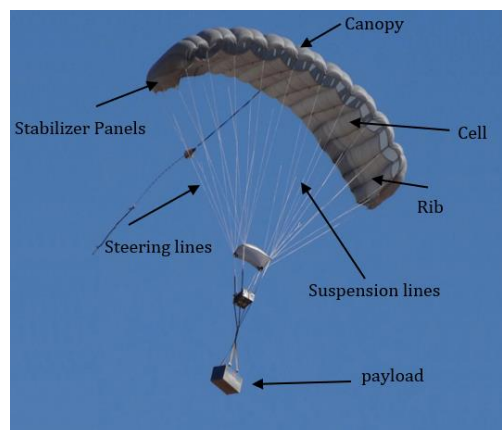
Ο όρος parafoil προέρχεται από τον συνδυασμό των λέξεων “parachute” και “airfoil” δηλαδή αλεξίπτωτο και αεροτομή. Σε αντίθεση με τα συμβατικά αλεξίπτωτα που παράγουν μόνο οπισθέλκουσα δύναμη (drag), τα parafoils μπορούν να παράγουν και αεροδυναμική άνωση (Lift) εξαιτίας του σχήματος της αεροτομής. Κατασκευάζονται από νάιλον υφάσματα και δεν έχουν άκαμπτα εξαρτήματα. Η αρνητική πίεση πάνω στην καμπυλόγραμμη επιφάνεια του φτερού και η εσωτερική πίεση από το άνοιγμα που βρίσκεται στο μπροστινό μέρος του parafoil, το βοηθάνε στην διατήρηση του σχήματος άκαμπτου φτερού.

Το parafoil διαφέρει από ένα συμβατικό αεροσκάφος με διάφορους τρόπους. Αρχικά, ο έλεγχος του parafoil γίνεται μέσω αλλαγής του σχήματος του θόλου ενώ τα αεροσκάφη έχουν σταθερές επιφάνειες ελέγχου γεωμετρίας όπως πτερύγια και πηδάλια. Επιπλέον, συνήθως δεν έχουν εξωτερική ισχύ για κίνηση προς τα εμπρός, όπως έχουν τα αεροπλάνα από την ώθηση του κινητήρα.

Τα συστήματα Parafoil/ωφέλιμου φορτίου διαθέτουν την ικανότητα ακριβούς προσγείωσης ακόμη και σε συνθήκες ανέμου και μπορούν να είναι εξαιρετικά ελεγχόμενα. Η αυτόνομη πτήση είναι επίσης δυνατή με GPS, αλγόριθμο καθοδήγησης και έλεγχο κλειστού βρόχου.

Δομικά Στοιχεία

Τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα parafoil/ωφέλιμου φορτίου παρουσιάζονται συνοπτικά στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Δομικά Στοιχεία Συστήματος parafoil/ωφέλιμου φορτίου

Ο θόλος (canopy) είναι το κύριο συστατικό του συστήματος parafoil/ωφέλιμου φορτίου. Αποτελείται από μία άνω και κάτω επιφάνεια μεμβράνης, συνήθως κατασκευασμένη από νάιλον, μια ορθογώνια κάτοψη και μια διατομή σε σχήμα αεροτομής. Οι άνω και κάτω επιφάνειες ενώνονται μεταξύ τους με νευρώσεις (ribs). Υπάρχουν δύο τύποι νευρώσεων, αυτές που φέρουν φορτίο και οι μη φέροντες. Η διαφορά είναι ότι οι νευρώσεις που φέρουν φορτίο έχουν προσαρτημένα σκοινιά ανάρτησης (suspension lines). Μεταξύ δύο νευρώσεων του θόλου σχηματίζεται ένα κελί (cell) και διαθέτει δύο ανοίγματα που επιτρέπουν τη ροή του αέρα να φουσκώσει το θόλο εξισώνοντας ομοιόμορφα την πίεση. Τα πάνελ σταθεροποίησης (stabilizer panels) είναι στερεωμένα και στα δύο άκρα του θόλου και βελτιώνουν τη σταθερότητα κατεύθυνσης του συστήματος parafoil/ωφέλιμου φορτίου.

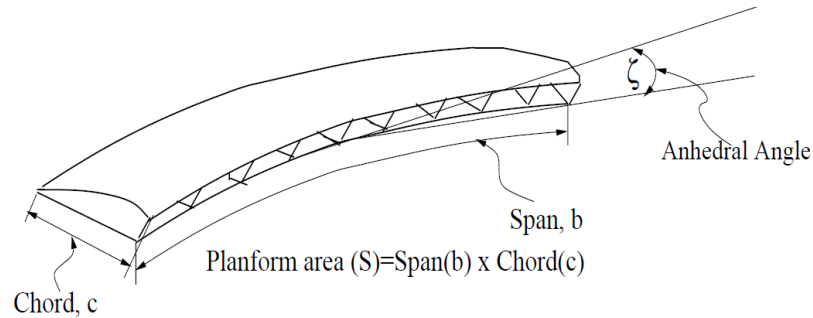
Τα σκοινιά (lines) συνδέουν τον θόλο με το ωφέλιμο φορτίο και μεταφέρουν το βάρος του ωφέλιμου φορτίου στο θόλο. Υπάρχουν δύο τύποι σκοινιών που παρουσιάζονται παρακάτω. Τα σκοινιά ανάρτησης διατηρούν το προφίλ της χορδής της κάτω επιφάνειας του θόλου και είναι γενικά προσαρτημένα σε εναλλασσόμενες νευρώσεις με απόσταση ενός μέτρου. Τα σκοινιά οδήγησης (steering lines) είναι τοποθετημένα στην άκρη του θόλου και ο κύριος σκοπός τους είναι να εκτρέψουν την άκρη του θόλου παρέχοντας πλευρικό ή διαμήκη έλεγχο.

Ως ωφέλιμο φορτίο ορίζεται οτιδήποτε πρέπει να παραδοθεί σε έναν απαιτούμενο προορισμό και βρίσκεται στο κάτω μέρος του συστήματος parafoil/ωφέλιμου φορτίου. Πολλές φορές, το ωφέλιμο φορτίο μπορεί να έχει αμβλύ γεωμετρία για να αυξήσει την αεροδυναμική αντίσταση του συστήματος.

Γεωμετρία

Η μπροστινή άκρη της αεροτομής κόβεται για να δημιουργήσει μια είσοδο όπου μπορεί να εισέλθει αέρας για να φουσκώσει το θόλο και να διατηρηθεί το σχήμα της αεροτομής. Λόγω αυτής της κοπής, η χορδή(chord) του parafoil υπολογίζεται ως η οριζόντια γραμμή που ενώνει την πίσω άκρη με την άνω μπροστινή άκρη. Συμβολίζεται με c . Το άνοιγμα του φτερού(span) του parafoil υπολογίζεται ως το μήκος του τόξου που δημιουργείται από τη μία άκρη του parafoil

στην άλλη. Συμβολίζεται με b . Η κάτοψη (planform area) του parafoil είναι το προϊόν του ανοίγματος και της χορδής. Η αρνητική δίδεδος γωνία (anhedral angle) του θόλου ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της γραμμής που ενώνει το μεσαίο σημείο και της κορυφής του θόλου και της οριζόντιας γραμμής όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Συμβολίζεται με ζ .



Ένα parafoil έχει δύο βαθμούς ελέγχου ελευθερίας, πλευρικό και διαμήκη. Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για να επιτευχθεί ο πλευρικός έλεγχος είναι με μια ασύμμετρη εκτροπή τμημάτων του πίσω άκρου του θόλου. Αυτά τα εκτρεπόμενα τμήματα ονομάζονται πτερύγια ή φρένα. Η εκτρεπόμενη πλευρά δημιουργεί μια μικρή αύξηση της άντωσης και μια μεγάλη αύξηση της αντίστασης σε αυτή την πλευρά. Αυτή η διαφορά οπισθέλκουσας δημιουργεί μια γωνία πλευρικής ολίσθησης που δημιουργεί μια πλευρική δύναμη που αναγκάζει το θόλο σε στροφή.

Ο διαμήκης έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί με συμμετρική εκτροπή των πτερυγίων. Η συμμετρική εκτροπή του πτερυγίου μειώνει την ταχύτητα του αέρα, καθιστώντας το χρήσιμο για ελιγμούς προσγείωσης για την εξασφάλιση ασφαλούς προσγείωσης του ωφέλιμου φορτίου.

Αεροδυναμική

Ο Lingard[1] εισάγει τις εκφράσεις για τους συντελεστές άντωσης και οπισθέλκουσας και τον λόγο άντωσης-οπισθέλκουσας για μια πτέρυγα χαμηλού aspect ratio. Στη συνέχεια, αυτές οι εκφράσεις τροποποιούνται ώστε να περιλαμβάνουν το την αρνητική δίδεδο και παρουσιάζονται οι επιδράσεις της αλλαγής στο μήκος των σκοινιών σε αυτούς τους συντελεστές.

Οι Mortaloni et al.[2] αντικαθιστούν τα δεδομένα της δοκιμής της σήραγγας ανέμου από -10 έως 80 μοίρες γωνίας προσβολής με γραμμικές εξαρτήσεις γωνίας προσβολής από 0 έως 20 μοίρες. Μετατρέπουν αυτές τις εξαρτήσεις σε τύπους που ονομάζουν εφαρμοσμένο

αεροδυναμικό μοντέλο που έχει ως εισόδους την γωνία προσβολής, την γωνία πλευρικής ολίσθησης και την συμμετρική και ασύμμετρη εκτροπή του πτερυγίου. Αυτό το μοντέλο στη συνέχεια εφαρμόζεται σε σύστημα έξι βαθμών ελευθερίας parafoil/ωφέλιμου φορτίου που αναπτύσσεται σε περιβάλλον MATLAB/Simulink. Τα αποτελέσματα δείχνουν επαρκή ανταπόκριση στις εισόδους ελέγχου και σύγκλιση με τα αποτελέσματα των δοκιμών πτήσης.

Οι Nicolaides και Tragarz [3] παρουσίασαν τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά για διάφορα συστήματα parafoil/ωφέλιμου φορτίου και διαγράμματα για τον λόγο άντωσης-οπισθέλκουσας των δεδομένων δοκιμών πτήσης.

Ο Jann [4] παρουσίασε ημι-αναλυτικές εκφράσεις για τις αεροδυναμικές παραγώγους για μια πτέρυγα με αρνητική δίδρο βασισμένο στη θεωρία της δαπανηρής γραμμής ανύψωσης.

Φαινόμενη Μάζα

Οι φαινομενικές επιδράσεις μάζας εμφανίζονται όταν ένα σώμα, που βρίσκεται μέσα σε ένα υγρό, κινείται. Αυτή η κίνηση απαιτεί επίσης την κίνηση του υγρού. Η αντίσταση του υγρού στην αλλαγή κίνησης δημιουργεί πίεση στο σώμα. Για τα εναέρια οχήματα με υψηλό φορτίο φτερών (μεγαλύτερο από 5 kg/m^2) όπως τα αεροπλάνα, αυτό το φαινόμενο μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο. Στην περίπτωση του parafoil, που είναι μια ελαφριά κατασκευή, αυτές οι επιδράσεις από τον περιβάλλοντα αέρα έχουν μεγάλη επιρροή στη δομή και πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Οι Lissaman και Brown[5] πρότειναν μια μέθοδο υπολογισμού της φαινομενικής μάζας και των όρων αδράνειας που δίνονται σε παραμετρική μορφή. Οι προτεινόμενες εξισώσεις αυτών των όρων βασίστηκαν σε μια δισδιάστατη γεωμετρία και τροποποιήθηκαν με μια σειρά σταθερών για συγκεκριμένο λόγο διαστάσεων και λόγο αψίδας προς άνοιγμα φτερού για να περιγράψουν τα αποτελέσματα σε τρεις διαστάσεις.

Ο Barrows [6], εξετάζοντας ένα σύστημα parafoil/ωφέλιμου φορτίου και χρησιμοποιώντας δυναμική δύο σωμάτων, εισάγει την έννοια περισσότερων του ενός κέντρων φαινομενικής μάζας για ένα αυθαίρετο σχήμα σώματος.

Ο Eaton [7] παρουσίασε τη σωστή μορφή της φαινομενικής μάζας εξετάζοντας ένα άκαμπτο άξονο-συμμετρικό αλεξίπτωτο σε ιδανική ροή. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας τον σωστό φαινόμενο τανυστή μάζας σε ένα σύστημα αλεξίπτωτου έξι βαθμών ελευθερίας, παρατήρησε ότι οι τανυστικοί όροι κατά μήκος του άξονα συμμετρίας έχουν ισχυρή επιρροή στη σταθερότητα του συστήματος.

Καθοδήγηση και Έλεγχος

Οι Blevins et al. [8] παρουσίασαν μια μέθοδο σχεδιασμού διαδρομής χρησιμοποιώντας διαδρομές Dubins για εφαρμογή σε συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών σταθερής πτέρυγας, όπως είναι τα parafoils.

Οι Rakesh και ο Harikumar [9] ανέπτυξαν ένα μικρό σύστημα καθοδήγησης και ελέγχου συστήματος parafoil και δοκίμασαν την ακρίβειά του. Η επιθυμητή τροχιά βασίζεται στον αλγόριθμο σχεδιασμού των διαδρομών Dubins και για το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής PID για τις ασύμμετρες εκτροπές των φρένων και χρησιμοποιώντας συμμετρικές εκτροπές των φρένων, εξετάζεται η δυνατότητα επιβίωσης του ωφέλιμου φορτίου.

Οι Sun et al. [10] εισήγαγαν μια βελτιωμένη τεχνική ελέγχου PID για parafoils χρησιμοποιώντας έναν γραμμικό παρατηρητή εκτεταμένης κατάστασης (LESO). Τα αποτελέσματα δείχνουν μεγάλη ακρίβεια, με σφάλμα παρακολούθησης τροχιάς είκοσι μέτρων, στιβαρότητα και εύκολη προσαρμογή, καθιστώντας την καλύτερη επιλογή από ένα τυπικό χειριστήριο PID.

Οι Sledgers και ο Costello[11] ανέπτυξαν μια στρατηγική Model Predictive Control για τον έλεγχο ενός συστήματος parafoil/ωφέλιμου φορτίου για να ακολουθήσει μία επιθυμητή τροχιά. Την θεωρούν κατάλληλη μέθοδος ελέγχου για ένα σύστημα parafoil καθώς μιμείται τον τρόπο που σκέφτονται οι άνθρωποι όταν ελέγχουν ένα σύστημα parafoil κοιτάζοντας την επιθυμητή διαδρομή και εκτιμώντας τη βέλτιστη ακολουθία ελέγχου για να επιτύχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. LINGARD, "The Aerodynamics of Gliding Parachutes," 1986, doi: 10.2514/6.1986-2427.
- [2] P. A. Mortaloni, O. A. Yakimenko, V. N. Dobrokhodov, and R. M. Howard, "ON THE DEVELOPMENT OF A SIX-DEGREE-OF-FREEDOM MODEL OF A LOW-ASPECT-RATIO PARAFOIL DELIVERY SYSTEM."
- [3] J. NICOLAIDES, "Parafoil flight performance," Sep. 1970. doi: 10.2514/6.1970-1190.
- [4] T. Jann, "Aerodynamic coefficients for a parafoil wing with arc anhedral - Theoretical and experimental results," *17th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar*, no. May, 2003, doi: 10.2514/6.2003-2106.
- [5] P. B. S. Lissaman and G. J. Brown, "Apparent Mass effects on parafoil dynamics," *AIAA/AHS/ASEE Aerospace Design Conference, 1993*, 1993, doi: 10.2514/6.1993-1236.
- [6] T. M. Barrows, "Apparent mass of parafoils with spanwise camber," *16th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar*, vol. 39, no. 3, 2001, doi: 10.2514/6.2001-2006.
- [7] J. A. Eaton, "Added mass and the dynamic stability of parachutes," *Journal of Aircraft*, vol. 19, no. 5, pp. 414–416, 1982, doi: 10.2514/3.44766.
- [8] A. Blevins, S. Keshmiri, D. Shukla, and G. Godfrey, "Dubins path guidance for fixed-wing uas remote sensing applications," *AIAA Scitech 2020 Forum*, vol. 1 PartF, no. January, pp. 1–15, 2020, doi: 10.2514/6.2020-1236.
- [9] R. Rakesh and R. Harikumar, "Autonomous Airdrop System Using Small-Scale Parafoil," *2019 International Conference on Computer Communication and Informatics, ICCCI 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ICCCI.2019.8822085.
- [10] H. Sun, Q. Sun, J. Tao, S. Luo, and Z. Chen, "A flight control system for parafoils based on improved PID control approach," *Chinese Control Conference, CCC*, no. July, pp. 1168–1173, 2017, doi: 10.23919/ChiCC.2017.8027506.

- [11] N. Slegers and M. Costello, "Model predictive control of a parafoil and payload system," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 28, no. 4, pp. 816–821, 2005, doi: 10.2514/1.12251.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΠΕΞΗΓΗΣΗΣ ΑΓΓΛΙΚΗΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

<u>Αγγλική Ορολογία</u>	<u>Ελληνική Ορολογία</u>
parafoil	Αλεξίπτωτο με διατομή αεροτομής
payload	Ωφέλιμο φορτίο
Lift	Άντωση
Drag	Οπισθέλκουσα δύναμη
Ram-air Pressure	Πίεση λόγω αέρα στροβιλισμού
Canopy	Θόλος
Chord	Χορδή
Span	Άνοιγμα φτερών
Planform Area	Εμβαδό θόλου
Anhedral Angle	Αρνητική δίεδρος γωνία
Sideslip Angle	Πλάγια γωνία τροχιάς
Side Force	Εγκάρσια δύναμη
Aspect Ratio	Λόγος επιμήκους
Angle of Attack	Γωνία πρόσπτωσης
Apparent Mass	Φαινόμενη μάζα
Wing Loading	Πτερυγική φόρτιση
Roll	Διατοιχισμός
Pitch	Πρόνευση
Yaw	Εκτροπή
Glide Slope Angle	Γωνία ίχνους καθόδου