



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΛΙΑΚΟΥ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΟΥ ΕΝΑΕΡΙΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣΑΡΤΗΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Διπλωματική Εργασία: Μπλαζογιαννάκης Ιωάννης
Επιβλέπων Καθηγητής: Παπαευθυμίου Σπυρίδων

Χανιά, 2024

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Σπυρίδωνα Παπαευθυμίου, για την πολύτιμη καθοδήγηση και τη δυνατότητα που μου παρείχε να εκπονήσω μία τόσο σύνθετη και πρωτοποριακή διπλωματική εργασία. Η υποστήριξη και οι συμβουλές του αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τη σύζυγό μου, Κατερίνα, για την κατανόηση και την υπομονή της κατά τη διάρκεια αυτής της μακράς και απαιτητικής διαδικασίας. Η στήριξή της, παρά τις αμέτρητες ώρες απουσίας και μοναξιάς που βίωσε, ήταν αδιαμφισβήτητη.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην αδερφή μου, Αντιγόνη, για τη συντροφιά και τη βοήθειά της κατά την κατασκευή του UAV στο εργαστήριό μου. Η παρουσία της υπήρξε πολύτιμη και ενίσχυσε την ηθική μου δύναμη.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, οι οποίοι με αστείρευτη υπομονή και επιμονή, με στήριξαν σε όλη την εκπαιδευτική μου πορεία. Η δική τους προσφορά και η δυνατότητα που μου έδωσαν να σπουδάσω και να φτάσω στο σημερινό μου επίπεδο, είναι ανεκτίμητη.

Τέλος, ευχαριστώ από καρδιάς τους φίλους μου για την αδιάκοπη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και για την πίστη τους στο όραμά μου, το οποίο κατάφερα να υλοποιήσω. Η αλληλεγγύη και η συμπαράστασή τους αποτέλεσαν σταθερή πηγή δύναμης για μένα. Ευχαριστώ θερμά τον φίλο και συνάδελφο Γεράσιμο για την προμήθεια όλων των εξαρτημάτων που κατασκευάστηκαν μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης για την εργασία μου, χρησιμοποιώντας τον προσωπικό του εκτυπωτή Bambulab X1 CARBON.



Ευρετήριο Συντομογραφιών

- **PMU (Power Management Unit):** Μονάδα διαχείρισης ενέργειας που χρησιμοποιείται για την κατανομή και προστασία της ηλεκτρικής ενέργειας στα συστήματα του UAV.
- **ESC (Electronic Speed Controller):** Ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου ταχύτητας των brushless κινητήρων που ρυθμίζει την τάση και τη ροή ρεύματος στους κινητήρες του UAV.
- **VTOL (Vertical Take-Off and Landing):** Ακρωνύμιο που περιγράφει την ικανότητα ενός αεροσκάφους να απογειώνεται και να προσγειώνεται κάθετα.
- **FPV (First Person View):** Τεχνολογία που επιτρέπει στον χειριστή να βλέπει την πτήση από την οπτική γωνία του UAV μέσω κάμερας.
- **GPS (Global Positioning System):** Σύστημα που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της θέσης του UAV σε πραγματικό χρόνο μέσω δορυφορικών σημάτων.
- **BEC (Battery Elimination Circuit):** Συσκευή που επιτρέπει τη σταθερή παροχή ισχύος σε ηλεκτρονικά συστήματα από τη μπαταρία του UAV.
- **NACA (National Advisory Committee for Aeronautics):** Το προφίλ αεροτομής που χρησιμοποιείται σε πτέρυγες αεροσκαφών, όπως το NACA 23012, το οποίο αναφέρθηκε στο σχέδιο αναβάθμισης.
- **UAV (Unmanned Aerial Vehicle):** Μη επανδρωμένο εναέριο όχημα.
- **C60 (Carbon-60):** Ηλιακές κυψέλες που χρησιμοποιούνται στο UAV για την παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της πτήσης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την κατασκευή ενός ηλιακού μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (VTOL UAV), με δυνατότητα κάθετης απογείωσης και προσγείωσης, το οποίο έχει τη δυνατότητα προσάρτησης περιβαλλοντικών αισθητήρων για τη μέτρηση ρύπων. Η ανάπτυξη του UAV στοχεύει στη δημιουργία ενός ευέλικτου και ενεργειακά αυτόνομου συστήματος που θα μπορεί να αξιοποιηθεί για περιβαλλοντική παρακολούθηση σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές, όπου η πρόσβαση είναι δύσκολη μέσω παραδοσιακών μεθόδων. Σημαντική καινοτομία της εργασίας αποτελεί η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών κυψελών C60 στις πτέρυγες του UAV, με σκοπό την επέκταση της διάρκειας πτήσης μέσω της παραγωγής ενέργειας κατά τη διάρκεια της αποστολής. Οι κυψέλες αυτές επιτρέπουν την αύξηση της ενεργειακής αυτονομίας, διευρύνοντας τις δυνατότητες χρήσης του UAV για παρατεταμένες αποστολές. Η εργασία περιλαμβάνει ανασκόπηση της τεχνολογίας UAV και VTOL συστημάτων, με έμφαση στην ηλιακή ενέργεια και τις δυνατότητες που προσφέρει για τη βελτίωση της αυτονομίας των πτήσεων. Παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού και τροποποίησης του εμπορικού μοντέλου Skyhunter για να υλοποιηθεί η διάταξη VTOL, ενώ αναλύονται οι τεχνικές προκλήσεις και η επιλογή υλικών και εξαρτημάτων. Αν και δεν έχουν πραγματοποιηθεί ακόμα δοκιμαστικές πτήσεις, η κατασκευή του UAV έχει ολοκληρωθεί και προσφέρει δυνατότητα μελλοντικής προσαρμογής αισθητήρων για περιβαλλοντική παρακολούθηση. Τα ευρήματα δείχνουν ότι, η ενσωμάτωση ηλιακής ενέργειας είναι πολλά υποσχόμενη για την επίτευξη αυξημένης ενεργειακής αυτονομίας, και η σχεδιαστική ευελιξία του UAV επιτρέπει την ενσωμάτωση αισθητήρων για αποστολές περιβαλλοντικής παρακολούθησης στο μέλλον.

ABSTRACT

This thesis focuses on the design and construction of a solar-powered unmanned aerial vehicle (VTOL UAV) capable of vertical take-off and landing, with the potential to integrate environmental sensors for pollution measurement. The development of the UAV aims to create a flexible and energy-autonomous system that can be utilized for environmental monitoring in remote and inaccessible areas, where traditional methods are challenging to implement. A key innovation of this work is the integration of C60 photovoltaic cells on the UAV's wings, designed to extend flight duration by generating energy during the mission. These cells enhance the vehicle's energy autonomy, broadening the UAV's capabilities for long-duration missions. The thesis includes a review of UAV and VTOL system technologies, with a particular focus on solar energy and its potential to improve flight autonomy. The design process and modifications made to the commercial Skyhunter model to implement the VTOL configuration are presented, along with an analysis of technical challenges and material selections. Although test flights have not yet been conducted, the UAV's construction has been completed, offering the potential for future integration of sensors for environmental monitoring. The findings indicate that, the integration of solar energy shows great promise for achieving increased energy autonomy, and the UAV's design flexibility allows for the incorporation of sensors for future environmental monitoring missions.

Πίνακας περιεχομένων

Ευρετήριο.....	3
Περίληψη.....	4
Εισαγωγή	
1.1 Στόχοι και Σκοπός της Εργασίας.....	8
1.2 Ανάλυση του Προβλήματος που Επιλύει το Έργο.....	8
1.3 Η Εξέλιξη των UAV και VTOL Συστημάτων.....	9
Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	
2.1 Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs).....	10
2.1.1 Χρήσεις των UAVs για τη Μέτρηση Ρύπων.....	10
2.2 Τεχνολογία VTOL (Vertical Take-Off and Landing).....	11
2.2.1 Σπάνιες Εφαρμογές Ηλιακών Κυψελών σε VTOL UAVs.....	11
2.3 Χρήση της Ηλιακής Ενέργειας στα UAVs.....	12
2.3.1 Χαρακτηριστικά των Ηλιακών Κυψελών C60.....	12
Σχεδιασμός και Κατασκευή VTOL	
3.1 Σχεδιασμός του UAV.....	13
3.1.1 Τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν.....	13
3.2 Υλικά και Ηλεκτρονικά.....	21
3.2.1 Χρήση ABS Filament και Ατσαλιού για Κατασκευή.....	21
3.2.2 Επιλογή Ηλεκτρονικών Εξαρτημάτων.....	23
3.3 Διαδικασία Κατασκευής.....	28
3.3.1 Σχεδίαση και Εκτύπωση Custom Εξαρτημάτων.....	28
3.3.2 Τροποποιήσεις στο Σασί και Τοποθέτηση Κινητήρων.....	28
3.3.3 Τοποθέτηση Σκελών Προσγείωσης και Ενίσχυση Πτερυγίων.....	29

3.3.4 Εγκατάσταση ηλεκτρονικών Συστημάτων.....	30
3.4 Δυσκολίες και Προκλήσεις.....	30
3.4.1 Μηχανικές Δυσκολίες.....	30
3.4.2 Ηλεκτρονικές Δυσκολίες.....	31
Αποτελέσματα	
4.1 Αξιολόγηση Αποδοτικότητας Φωτοβολταϊκών Κυψελών.....	32
4.1.1 Απόδοση Μιας Φωτοβολταϊκής Κυψέλης C60.....	33
4.1.2 Απόδοση 10 Φωτοβολταϊκών Κυψελών σε Διάταξη Σειράς.....	35
4.2 Ανάλυση της Λειτουργικότητας VTOL και Fixed-Wing Mode.....	37
4.2.1 VTOL Mode (Vertical Takeoff and Landing).....	38
4.2.2 Fixed-Wing Mode (Οριζόντια Πτήση).....	39
4.2.3 Μετάβαση από το VTOL στο Fixed-Wing Mode.....	40
Συμπεράσματα	
5.1 Συνοψίζοντας τα Αποτελέσματα.....	41
5.2 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί του Συστήματος.....	42
5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα και Εφαρμογές.....	44
Πηγές.....	46

Εισαγωγή

1.1 Στόχοι και σκοπός της εργασίας

Ο βασικός στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή και αξιολόγηση ενός ηλιακού μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (VTOL UAV), που συνδυάζει την ικανότητα κάθετης απογείωσης και προσγείωσης με την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών αισθητήρων. Η ανάπτυξη αυτού του UAV επιδιώκει να προσφέρει μια καινοτόμο λύση για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε απομακρυσμένες και δύσβατες περιοχές, όπου η πρόσβαση μέσω παραδοσιακών μεθόδων είναι περιορισμένη.

Σκοπός της εργασίας είναι να αποδείξει τη δυνατότητα επέκτασης του χρόνου πτήσης ενός UAV μέσω της χρήσης ηλιακών κυψελών C60, οι οποίες επιτρέπουν την παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της πτήσης. Η φωτοβολταϊκή ενέργεια αναμένεται να παρατείνει τη διάρκεια πτήσης, προσφέροντας ενεργειακή ανεξαρτησία για μακροχρόνιες αποστολές. Παράλληλα, το UAV θα εξοπλιστεί με αισθητήρες για τη μέτρηση κρίσιμων παραμέτρων της ποιότητας του αέρα.

Αυτός ο συνδυασμός τεχνολογιών καθιστά το UAV ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης, καθώς μπορεί να επιχειρεί σε απομακρυσμένες περιοχές χωρίς την ανάγκη επαναλαμβανόμενης φόρτισης ή ανεφοδιασμού. Η δυνατότητα μέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης με ακρίβεια σε διαφορετικά υψόμετρα και σε πραγματικό χρόνο, καθιστά το συγκεκριμένο UAV ιδιαίτερα αποτελεσματικό για την παρακολούθηση των μεταβολών της ποιότητας του αέρα σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

1.2 Ανάλυση του προβλήματος που επιλύει το έργο

Η ατμοσφαιρική ρύπανση είναι ένα παγκόσμιο πρόβλημα που επηρεάζει εκατομμύρια ανθρώπους. Οι βασικοί ρύποι όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), τα οξείδια του αζώτου (NO_x) και τα μικροσωματίδια έχουν αποδεδειγμένες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα και άλλες ασθένειες. Η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε πραγματικό χρόνο είναι ζωτικής σημασίας για τον εντοπισμό προβληματικών περιοχών και την εφαρμογή διορθωτικών μέτρων.

Ωστόσο, η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα με παραδοσιακούς σταθμούς μέτρησης έχει σημαντικούς περιορισμούς. Οι σταθεροί σταθμοί μέτρησης δεν μπορούν να καλύψουν μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις και δεν παρέχουν δεδομένα από διαφορετικά υψόμετρα. Επιπλέον, η εγκατάσταση τέτοιων σταθμών σε απομακρυσμένες περιοχές μπορεί να είναι δαπανηρή και χρονοβόρα. Σε αυτό το πλαίσιο, τα UAVs αποτελούν μια πιο ευέλικτη και οικονομικά αποδοτική λύση.

Παρόλα αυτά, η ενεργειακή αυτονομία αποτελεί έναν από τους κύριους περιορισμούς των UAVs, ιδιαίτερα για αποστολές μεγάλης διάρκειας. Τα περισσότερα UAVs βασίζονται αποκλειστικά σε μπαταρίες, οι οποίες περιορίζουν τον χρόνο πτήσης. Η ενσωμάτωση ηλιακών κυψελών προσφέρει μια λύση σε αυτό το πρόβλημα, παρέχοντας μερική ανάκτηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της πτήσης και επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια λειτουργίας του UAV.

Το συγκεκριμένο έργο επιλύει αυτό το πρόβλημα με την ανάπτυξη ενός UAV που μπορεί να εκτελεί αποστολές παρακολούθησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε μεγάλες αποστάσεις και για παρατεταμένες χρονικές περιόδους, αξιοποιώντας τη δυνατότητα ανάκτησης ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι, προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση για την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα σε περιοχές όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι δεν είναι επαρκείς.

1.3 Η εξέλιξη των UAV και VTOL συστημάτων

Τα UAVs εμφανίστηκαν αρχικά σε στρατιωτικές εφαρμογές, όπου χρησιμοποιούνταν για αναγνωριστικές αποστολές και επιτήρηση. Σταδιακά, με την πρόοδο της τεχνολογίας, οι δυνατότητες των UAVs επεκτάθηκαν σε μη στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η γεωργία, η χαρτογράφηση και η περιβαλλοντική παρακολούθηση. Οι συνεχείς εξελίξεις στην αυτονομία πτήσης και τα συστήματα ελέγχου οδήγησαν στην ανάπτυξη συστημάτων VTOL (Vertical Take-Off and Landing), που επέτρεψαν την κάθετη απογείωση και προσγείωση, κάτι που ήταν κρίσιμο για αποστολές σε αστικά περιβάλλοντα ή περιοχές χωρίς διάδρομο προσγείωσης.

Η τεχνολογία VTOL άλλαξε τον τρόπο χρήσης των UAVs, επιτρέποντας τη συνδυασμένη χρήση της κάθετης απογείωσης και της αποδοτικής οριζόντιας πτήσης. Στην πράξη, τα UAVs με δυνατότητα VTOL συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των multicopters (ευελιξία και σταθερότητα σε περιορισμένους χώρους) με αυτά των fixed-wing UAVs (αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα κατά την πτήση σε μεγάλες αποστάσεις). Το αποτέλεσμα είναι ένα σύστημα που μπορεί να επιχειρεί σε περιορισμένους χώρους, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει εκτεταμένη αυτονομία.

Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών κυψελών στα UAVs είναι μια πιο πρόσφατη εξέλιξη, η οποία παρέχει τη δυνατότητα να επεκταθεί περαιτέρω η διάρκεια της πτήσης. Οι ηλιακές κυψέλες C60, που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, προσφέρουν τη δυνατότητα κάμψης, γεγονός που επιτρέπει την τοποθέτησή τους στις πτέρυγες του UAV χωρίς να μειώνεται η αεροδυναμική απόδοση. Αυτός ο συνδυασμός VTOL και ηλιακής τεχνολογίας αυξάνει την απόδοση του UAV, καθώς το UAV μπορεί να εκτελεί αποστολές μεγάλης διάρκειας χωρίς την ανάγκη συνεχούς επαναφόρτισης.

Η χρήση UAVs για περιβαλλοντική παρακολούθηση έχει επίσης εξελιχθεί σημαντικά. Τα σύγχρονα UAVs είναι εξοπλισμένα με πληθώρα αισθητήρων, που επιτρέπουν την παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων όπως η ποιότητα του αέρα, η θερμοκρασία, και η

υγρασία. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους παρακολούθησης, τα UAVs προσφέρουν ευελιξία και δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στους ερευνητές και τους φορείς να λαμβάνουν πιο άμεσα δεδομένα.

Συνολικά, η εξέλιξη των UAVs και των VTOL συστημάτων, σε συνδυασμό με την πρόοδο στην ηλιακή τεχνολογία, δημιουργεί νέα δεδομένα για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και άλλες εφαρμογές. Η δυνατότητα χρήσης UAVs για μεγάλες αποστάσεις και σε δυσπρόσιτες περιοχές είναι πλέον εφικτή, και το έργο αυτό στοχεύει να αποδείξει τις δυνατότητες αυτών των τεχνολογιών.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs)

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAVs) ή drones έχουν κερδίσει σημαντική προσοχή τα τελευταία χρόνια, τόσο σε στρατιωτικό όσο και σε εμπορικό επίπεδο. Η αρχική χρήση των UAVs ήταν στρατιωτική, ξεκινώντας από τις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα με το **Kettering Bug**, το οποίο αναπτύχθηκε από τις Ηνωμένες Πολιτείες κατά τον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο για αναγνωριστικές αποστολές και επιθέσεις με τη χρήση τηλεκατευθυνόμενων συστημάτων. Ωστόσο, η τεχνολογία UAV αναπτύχθηκε πλήρως στα τέλη του 20ού αιώνα με την εισαγωγή προηγμένων αισθητήρων, συστημάτων τηλεκατεύθυνσης και αυτόματης πλοήγησης.

Οι εμπορικές εφαρμογές των UAVs άρχισαν να κερδίζουν έδαφος τη δεκαετία του 2000, καθώς η πρόοδος στην τεχνολογία επέτρεψε την ανάπτυξη συστημάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τομείς όπως η γεωργία ακριβείας, η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, η χαρτογράφηση και η έρευνα και διάσωση. Τα UAVs επιτρέπουν την καταγραφή δεδομένων σε απομακρυσμένες ή δύσβατες περιοχές και τη συλλογή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία από τα παραδοσιακά επίγεια συστήματα.

2.1.1 Χρήσεις των UAVs για τη μέτρηση ρύπων

Μία από τις πιο σημαντικές σύγχρονες εφαρμογές των UAVs είναι η χρήση τους για τη μέτρηση των ατμοσφαιρικών ρύπων. Τα UAVs, εξοπλισμένα με αισθητήρες μέτρησης της ποιότητας του αέρα, μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από διάφορα υψόμετρα και γεωγραφικές τοποθεσίες, προσφέροντας λεπτομερείς πληροφορίες για τις συγκεντρώσεις των ρύπων στην ατμόσφαιρα. Οι παραδοσιακές μέθοδοι μέτρησης, όπως οι σταθεροί σταθμοί παρακολούθησης, είναι περιορισμένες όσον αφορά την περιοχή κάλυψης και συχνά αδυνατούν να παράσχουν ολοκληρωμένη εικόνα των συνθηκών σε ευρύτερες περιοχές.

Η χρήση των UAVs για τη μέτρηση ρύπων επιτρέπει τη δημιουργία τρισδιάστατων χαρτών της ποιότητας του αέρα, καλύπτοντας μεγάλες περιοχές με ακρίβεια. Επιπλέον, τα UAVs προσφέρουν τη δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, κάτι που επιτρέπει την έγκαιρη λήψη μέτρων σε περίπτωση που παρατηρηθούν υψηλά επίπεδα ρύπανσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε βιομηχανικές περιοχές και αστικά περιβάλλοντα, όπου η ρύπανση μπορεί να μεταβάλλεται ραγδαία.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης UAVs για τη μέτρηση ρύπων είναι η δυνατότητα προσαρμογής διαφόρων τύπων αισθητήρων, επιτρέποντας τη μέτρηση τόσο των αέριων ρύπων όσο και των μικροσωματιδίων, καθώς και παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να καταγράψουν συγκεντρώσεις ρύπων όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), τα οξείδια του αζώτου (NO_2), και τα μικροσωματίδια $\text{PM}_{2.5}$ και PM_{10} .

2.2 Τεχνολογία VTOL (Vertical Take-Off and Landing)

Η τεχνολογία VTOL (Vertical Take-Off and Landing) αποτελεί σημαντική εξέλιξη στα UAVs, επιτρέποντάς τους να απογειώνονται και να προσγειώνονται κάθετα, χωρίς την ανάγκη διαδρόμου. Η πρώτη εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας εμφανίστηκε στα μέσα του 20ού αιώνα με τα στρατιωτικά αεροσκάφη, όπως το **Harrier Jet**, το οποίο εισήγαγε τη δυνατότητα απογείωσης και προσγείωσης σε περιορισμένους χώρους.

Η VTOL τεχνολογία ήρθε σαν απάντηση στο πρόβλημα της έλλειψης κατάλληλων υποδομών για την απογείωση και την προσγείωση αεροσκαφών. Στον τομέα των UAVs, η δυνατότητα κάθετης απογείωσης και προσγείωσης καθιστά τα VTOL συστήματα ιδανικά για χρήση σε περιοχές χωρίς εύκολη πρόσβαση σε διαδρόμους ή άλλες υποδομές. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά fixed-wing UAVs, τα VTOL UAVs μπορούν να απογειώνονται από πολύ μικρούς χώρους, διατηρώντας παράλληλα την ενεργειακή αποδοτικότητα της οριζόντιας πτήσης.

2.2.1 Σπάνιες εφαρμογές ηλιακών κυψελών σε VTOL UAVs

Η χρήση ηλιακών κυψελών σε VTOL UAVs είναι αρκετά περιορισμένη, καθώς τα VTOL συστήματα απαιτούν υψηλή ισχύ για την κάθετη απογείωση και προσγείωση, κάτι που συχνά υπερβαίνει την ενέργεια που μπορούν να παράγουν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες. Παρ' όλα αυτά, η ενσωμάτωση ηλιακών κυψελών, όπως τα **C60 Solar Cells**, σε VTOL συστήματα, μπορεί να προσφέρει συμπληρωματική ενέργεια κατά την οριζόντια πτήση, όπου οι απαιτήσεις σε ισχύ είναι μειωμένες.

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια πτήσης του UAV, κάνοντάς το ιδανικό για αποστολές μεγάλης διάρκειας. Παρά τις προκλήσεις που παρουσιάζονται, οι τεχνολογικές

εξελίξεις στα φωτοβολταϊκά συστήματα αυξάνουν την αποδοτικότητα των ηλιακών κυψελών και επιτρέπουν τη χρήση τους ακόμα και σε συστήματα VTOL, παρέχοντας σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ενεργειακή αυτονομία.

2.3 Χρήση της Ηλιακής Ενέργειας στα UAVs

Η ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας στα UAVs προσφέρει ένα πολλά υποσχόμενο μέσο για την επέκταση της αυτονομίας τους, ιδιαίτερα σε αποστολές μεγάλης διάρκειας. Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες, τοποθετημένες στις πτέρυγες του UAV, συλλέγουν ηλιακή ακτινοβολία και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια μπορεί είτε να χρησιμοποιηθεί άμεσα για την τροφοδοσία των κινητήρων και των συστημάτων του UAV είτε να αποθηκευτεί σε μπαταρίες για μελλοντική χρήση, όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι περιορισμένη.

Τα UAVs που χρησιμοποιούν ηλιακή ενέργεια αντιμετωπίζουν ωστόσο ορισμένες προκλήσεις, όπως η διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας και η αποτελεσματική αποθήκευσή της. Η χρήση σύγχρονων μπαταριών λιθίου επιτρέπει την αποθήκευση της ενέργειας με υψηλή αποδοτικότητα, ενώ οι ελεγκτές ενέργειας (power management units) διασφαλίζουν ότι η ενέργεια κατανέμεται σωστά μεταξύ των συστημάτων του UAV.

2.3.1 Χαρακτηριστικά των ηλιακών κυψελών C60

Τα **C60 Solar Cells**, που χρησιμοποιούνται στο παρόν έργο, είναι ειδικά σχεδιασμένες ηλιακές κυψέλες με υψηλή αποδοτικότητα και ευελιξία. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των κυψελών αυτών είναι η δυνατότητα μικρής κάμψης, κάτι που επιτρέπει την τοποθέτησή τους πάνω στις πτέρυγες του UAV χωρίς να μειώνεται η αεροδυναμική απόδοση. Αυτό είναι κρίσιμο για τη διατήρηση της σταθερότητας του UAV κατά την πτήση.

Οι κυψέλες C60 προσφέρουν υψηλή απόδοση ακόμα και σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας, καθιστώντας τις ιδανικές για αποστολές σε ποικίλες γεωγραφικές περιοχές. Η ανθεκτικότητα και η ευελιξία τους επιτρέπουν την τοποθέτηση σε ποικίλες επιφάνειες, χωρίς να δημιουργούν πρόσθετες αντιστάσεις ή τριβές, διατηρώντας έτσι την αεροδυναμική απόδοση των πτερύγων του UAV.

Η χρήση των C60 Solar Cells σε συνδυασμό με σύγχρονες μπαταρίες λιθίου παρέχει τη δυνατότητα παρατεταμένης πτήσης, χωρίς την ανάγκη συνεχούς επαναφόρτισης. Έτσι, η ενσωμάτωση αυτών των κυψελών στα UAVs ενισχύει την ενεργειακή τους ανεξαρτησία και βελτιώνει την απόδοσή τους σε μακροχρόνιες αποστολές.

3. Σχεδιασμός και Κατασκευή VTOL

3.1 Σχεδιασμός του UAV

Η κατασκευή του UAV βασίστηκε στο εμπορικό μοντέλο αεροπλάνου **Skyhunter 1800mm της SonicModel (Εικόνα 1)**, το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την ανάπτυξη του συστήματος VTOL tricopter με δυνατότητα λειτουργίας fixed-wing. Το Skyhunter είναι γνωστό για τη στιβαρή κατασκευή του, την υψηλή του ευελιξία και την ικανότητά του να υποστηρίζει πτήσεις μεγάλης διάρκειας, κάτι που το καθιστά ιδανικό για πειραματικές εφαρμογές UAV.



Εικόνα 1

Skyhunter 1800mm

Τα βασικά χαρακτηριστικά του Skyhunter περιλαμβάνουν:

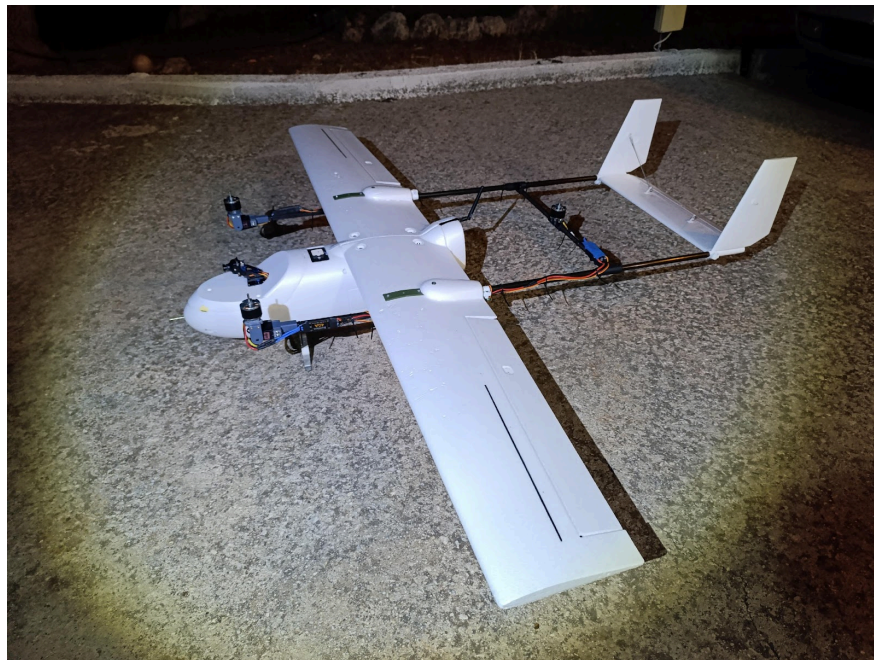
- **Άνοιγμα πτερύγων:** 1800mm
- **Μήκος ατράκτου:** 1320mm
- **Βάρος (χωρίς εξοπλισμό):** 1500g
- **Υλικά κατασκευής:** Αφρώδες υλικό EPO (Expanded Polyolefin), που προσφέρει μεγάλη αντοχή και ελαφρύ βάρος
- **Δυνατότητα τοποθέτησης εξοπλισμού FPV (First Person View):** Υποστήριξη για εγκατάσταση κάμερας FPV, κινητήρων και άλλου εξοπλισμού.

Το Skyhunter είναι ένα μοντέλο **pushback** αεροπλάνου, με ένα μοτέρ τοποθετημένο στο πίσω μέρος της ατράκτου για την παροχή ώσης. Ωστόσο, για να μετατραπεί σε VTOL tricopter – fixed-wing UAV, απαιτήθηκαν σημαντικές τροποποιήσεις στο σασί του αεροσκάφους, με την προσθήκη πολλαπλών συστημάτων και μηχανικών εξαρτημάτων που σχεδιάστηκαν ειδικά για την εφαρμογή.

3.1.1 Τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν

1. Κατάργηση pushback μοτέρ

- Η πρώτη τροποποίηση που πραγματοποιήθηκε στο Skyhunter (**Εικόνα 2**) ήταν η αφαίρεση του αρχικού μοτέρ ώθησης (pushback) που βρισκόταν στο πίσω μέρος της ατράκτου. Το μοτέρ αυτό αντικαταστάθηκε με ένα νέο σύστημα το οποίο επιτρέπει την κάθετη απογείωση και προσγείωση μέσω της προσθήκης τριών μοτέρ.

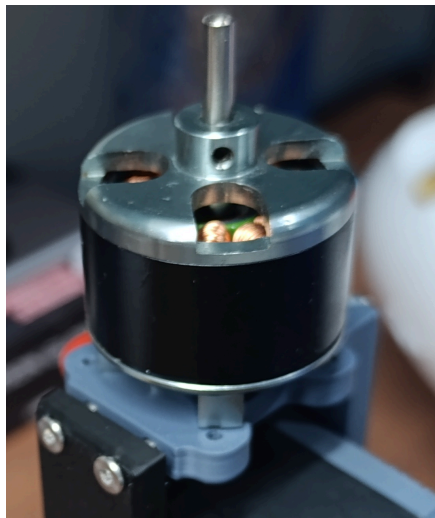


Εικόνα 2

Το ολοκληρωμένο σύστημα VTOL FIXED-WING

2. Προσθήκη τριών μοτέρ (tricopter configuration)

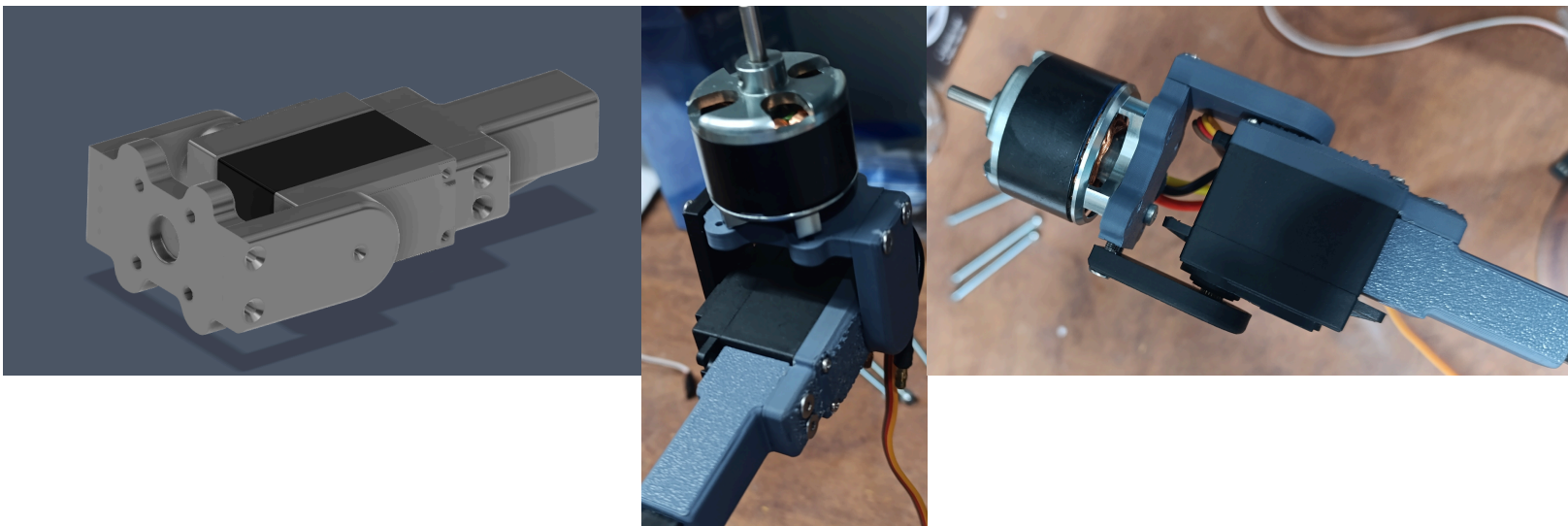
- Για τη μετάβαση σε VTOL διάταξη, εγκαταστάθηκαν τρία **brushless motors 2215/1400KV (Εικόνα 3)**: ένα στο πίσω μέρος της ατράκτου και δύο κινητήρες στο μπροστινό μέρος. Οι μπροστινοί κινητήρες είναι τοποθετημένοι σε ειδικά σχεδιασμένες βάσεις που επιτρέπουν την περιστροφή τους (tilt motors). Οι βάσεις αυτές σχεδιάστηκαν από το μηδέν σε λογισμικό CAD και εκτυπώθηκαν σε 3D printer χρησιμοποιώντας **ABS filament** για αντοχή και χαμηλό βάρος.



Εικόνα 3

Brushless motors 2215/1400KV

- Το πίσω μοτέρ παραμένει σταθερό, παρέχοντας την απαραίτητη ώθηση κατά την οριζόντια πτήση (fixed-wing mode). Οι δύο μπροστινοί κινητήρες, οι οποίοι περιστρέφονται μέσω σερβομηχανισμών, επιτρέπουν την κάθετη απογείωση και προσγείωση του UAV (VTOL mode) (**Εικόνα 4**).



Εικόνα 4

CAD σχέδιο και τελικό τεμάχιο με 3D εκτύπωση

3. Προσθήκη σκελών προσγείωσης

- Για την προστασία της ατράκτου και την αποφυγή φθορών κατά την προσγείωση, προστέθηκαν **σκέλη προσγείωσης από ανοξείδωτο ατσάλι πάχους 2mm (Εικόνα 5)**. Τα σκέλη αυτά κόπηκαν με **χρήση laser σε μηχανουργείο**, εξασφαλίζοντας ακρίβεια στη διάσταση και στο σχήμα τους. Είναι ειδικά σχεδιασμένα για να απορροφούν τους κραδασμούς κατά την προσγείωση και να αυξάνουν την απόσταση μεταξύ της ατράκτου και του εδάφους, επιτρέποντας την ασφαλή τοποθέτηση αισθητήρων κάτω από την άτρακτο.

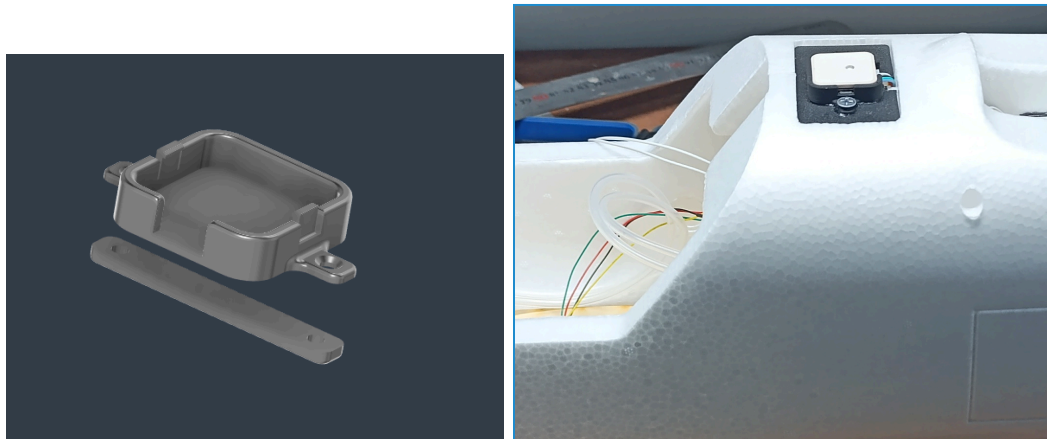


Εικόνα 5

CAD σχέδιο και τελικό τεμάχιο με χρήση laser

4. Προσθήκη κεραίας GPS

- Η κεραία **Ublox M8N GPS** (Εικόνα 6) τοποθετήθηκε στο σύστημα για να επιτρέπει την αυτόματη πλοήγηση του UAV. Το GPS παρέχει δεδομένα θέσης στον **flight controller (HeeWing VTOL T1 FX-405)**, επιτρέποντας την αυτόματη και ημιαυτόματη πτήση του UAV και την παρακολούθηση της θέσης του σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 6

CAD σχέδιο και τελικό τεμαχιο 3D printed

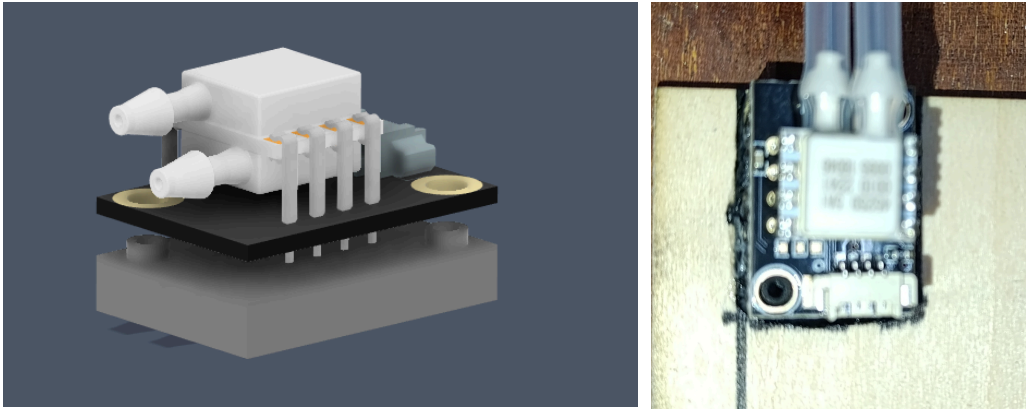
5. Προσθήκη αισθητήρα μέτρησης ταχύτητας (Pitot tube)

Ένας **Pitot αισθητήρας** (Εικόνα 7,8) τοποθετήθηκε στο μπροστινό μέρος της ατράκτου για τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα κατά την πτήση. Ο αισθητήρας αυτός παρέχει κρίσιμες πληροφορίες στον αυτόματο πιλότο για τη διαχείριση της πτήσης, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα του UAV κατά την οριζόντια πτήση.



Εικόνα 7

CAD σχέδιο βάσης και τελικό τεμαχιο 3D printed

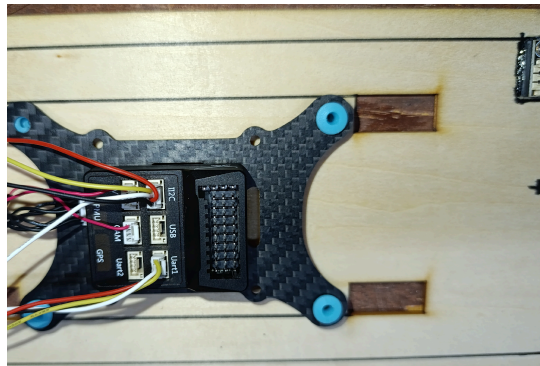


Εικόνα 8

PCB Pitot tube

6. Προσθήκη αυτόματου πιλότου

- Ο αυτόματος πιλότος του συστήματος συνδυάζεται με την κεραία GPS και τον αισθητήρα Pitot για να επιτρέπει στο UAV να εκτελεί πλήρως αυτοματοποιημένες πτήσεις. Ο **FX-405 VTOL T1 flight controller (Εικόνα 9)** είναι ο "εγκέφαλος" του UAV και αναλαμβάνει τον πλήρη έλεγχο των συστημάτων, παρέχοντας ακριβή έλεγχο των κινητήρων και των σερβομηχανισμών κατά τη διάρκεια των πτήσεων.



Εικόνα 9

FX-405 VTOL T1 flight controller σε αντικραδασμική βάση

7. Προσθήκη βάσης περιστροφής για την FPV κάμερα

- Η κάμερα FPV (**Εικόνα 10**) τοποθετήθηκε σε μια έτοιμη **βάση περιστροφής 2 αξόνων**, η οποία αγοράστηκε και εγκαταστάθηκε στο σύστημα για να επιτρέπει

την εποπτεία κατά την πτήση. Η συγκεκριμένη βάση είναι σχεδιασμένη για να προσφέρει μεγαλύτερο πεδίο ορατότητας (FOV - Field of View), διευκολύνοντας την παρακολούθηση του περιβάλλοντος του UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης.



Εικόνα 10

FPV κάμερα πάνω στην βάση περιστροφής

8. Προσθήκη τηλεμετρίας μεγάλης εμβέλειας

- Το σύστημα **Holybro Telemetry Radio V3** (Εικόνα 11) με δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων σε αποστάσεις έως και 20km σε **LOS (Line of Sight)**, εγκαταστάθηκε στο UAV. Η τηλεμετρία επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση της θέσης του UAV, των επιπέδων μπαταρίας, και άλλων κρίσιμων δεδομένων, ενώ τα δεδομένα αυτά προβάλλονται στην εικόνα από την FPV κάμερα.

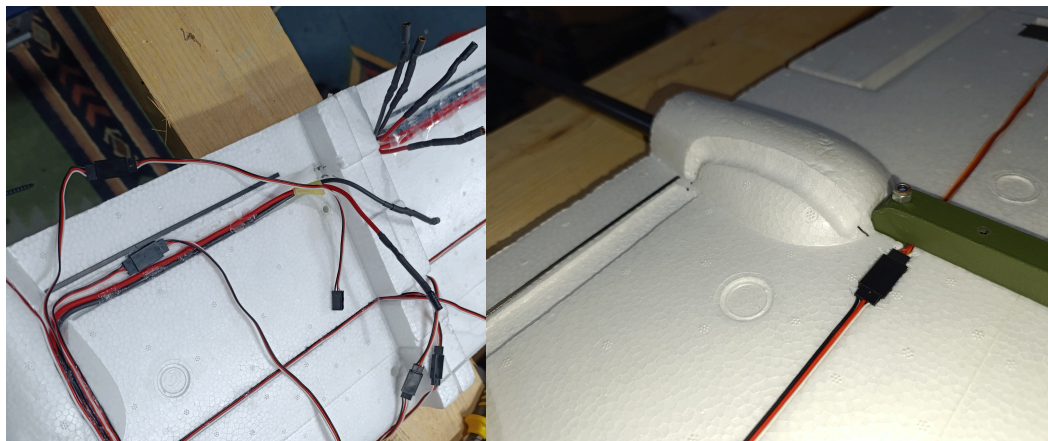


Εικόνα 11

Holybro Telemetry Radio V3 και σημείο τοποθέτησης στο σύστημα

9. Δημιουργία καναλιών για την καλωδίωση

Για τη διέλευση των καλωδίων από την άτρακτο και τις πτέρυγες (**Εικόνα 12**), δημιουργήθηκαν κατάλληλα κανάλια, τα οποία σχεδιάστηκαν προσεκτικά για να επιτρέπουν τη διέλευση των καλωδίων χωρίς να επηρεάζεται η αεροδυναμική του UAV.



Εικόνα 12

Κανάλια για την διαχείριση των καλωδιώσεων

10. Ενίσχυση των κάθετων πτερυγίων (rudders)

Τα δύο κάθετα πτερύγια του Skyhunter ενισχύθηκαν με ντίζες για την αποφυγή ταλαντώσεων κατά την πτήση (**Εικόνα 13**). Αυτή η τροποποίηση είναι κρίσιμη για τη σταθερότητα του UAV, ειδικά κατά την οριζόντια πτήση σε υψηλές ταχύτητες.

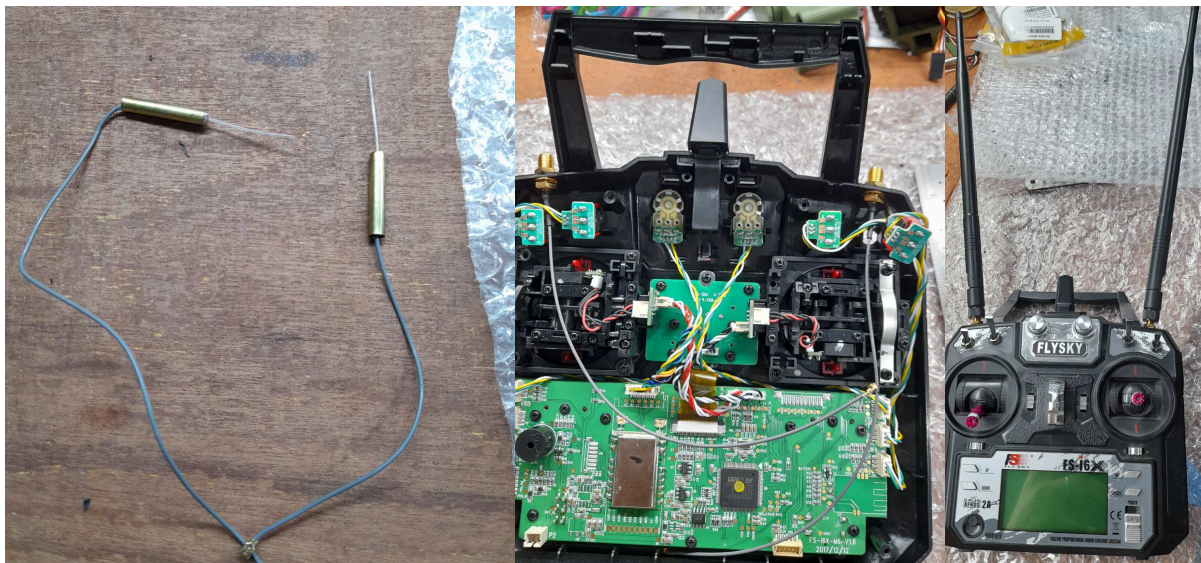


Εικόνα 13

Σημεία πρόσδεσης ντίζας ενίσχυσης rudder

11. Αναβάθμιση των κεραιών της τηλεκατεύθυνσης FLYSKY

Για να βελτιωθεί η εμβέλεια της τηλεκατεύθυνσης του UAV, έγινε αναβάθμιση της εργοστασιακής κεραίας του συστήματος **FLYSKY FS-i6X (Εικόνα 14)**. Οι αρχικές κεραίες αντικαταστάθηκαν με **μεγαλύτερες κεραίες υψηλής απόδοσης**, οι οποίες επιτρέπουν τη μετάδοση σήματος σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η αντικατάσταση των εργοστασιακών κεραιών κρίθηκε αναγκαία λόγω της περιορισμένης εμβέλειας των αρχικών κεραιών, που δεν ήταν ικανές να υποστηρίξουν ασφαλή πτήση σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ιδιαίτερα όταν το UAV επιχειρούσε σε περιοχές με φυσικά εμπόδια ή σε πιο απομακρυσμένα σημεία. Οι νέες κεραίες είναι σχεδιασμένες για να λειτουργούν με το πρωτόκολλο **iBus/PPM** που χρησιμοποιείται από τον δέκτη **FlySky FS-iA6B**, και προσφέρουν σταθερό και αξιόπιστο σήμα ακόμα και σε δύσκολες συνθήκες. Η αύξηση της εμβέλειας εξασφαλίζει ότι το UAV μπορεί να πετάξει σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τον χειριστή χωρίς να χάσει το σήμα, βελτιώνοντας σημαντικά την ασφάλεια και την ευελιξία του συστήματος.



Εικόνα 14

Μετατροπή κεραιών τηλεκατεύθυνσης

3.2 Υλικά και Ηλεκτρονικά

3.2.1 Υλικά

Για την κατασκευή του UAV, επιλέχθηκαν προσεκτικά υλικά που θα διασφαλίσουν την αντοχή και την απόδοση του συστήματος, τόσο κατά τη διάρκεια της πτήσης όσο και κατά την προσγείωση και απογείωση. Το βασικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το **ABS filament**, ενώ για τα σκέλη προσγείωσης επιλέχθηκε ατσάλι.

1. ABS Filament

Το **ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)** είναι ένα πολυμερές υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως στην εκτύπωση 3D και επιλέχθηκε για την κατασκευή όλων των εξαρτημάτων του UAV, με εξαίρεση τα σκέλη προσγείωσης. Το ABS επιλέχθηκε για τις εξαιρετικές του ιδιότητες που το καθιστούν ανθεκτικό σε μηχανικά φορτία και θερμοκρασιακές μεταβολές. Τα κύρια πλεονεκτήματα του ABS είναι τα εξής:

- **Θερμική αντοχή:** Μπορεί να αντέξει σε υψηλές θερμοκρασίες, κάτι που είναι σημαντικό για τα εξαρτήματα που εκτίθενται στη θερμότητα από τους κινητήρες και τα ηλεκτρονικά.
- **Αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV):** Το ABS προσφέρει εξαιρετική αντοχή στην έκθεση σε ηλιακή ακτινοβολία, επιτρέποντας στα εξαρτήματα να διατηρούν τις ιδιότητές τους κατά τη διάρκεια της πτήσης.

- **Ελαφρύ και ανθεκτικό:** Το ABS παρέχει ισορροπία μεταξύ ανθεκτικότητας και ελαφρότητας, εξασφαλίζοντας ότι τα εξαρτήματα δεν προσθέτουν υπερβολικό βάρος στο UAV.

Η εκτύπωση πραγματοποιήθηκε με τον **Bambulab X1 Carbon**, έναν προηγμένο 3D εκτυπωτή, ο οποίος προσφέρει εξαιρετική ακρίβεια και ταχύτητα στην εκτύπωση. Το αποτέλεσμα ήταν υψηλής ποιότητας εξαρτήματα με ακρίβεια κατασκευής που ταιριάζουν άψογα στη διάταξη του UAV (**Εικόνα 15**).



Εικόνα 15

3D printed τεμάχιο υψηλής ακρίβειας από μετατροπή καλύμματος σερβομηχανισμού

2. Ατσάλι 2mm για τα σκέλη προσγείωσης (Landing Pads)

Για τα σκέλη προσγείωσης, επιλέχθηκε **ατσάλι πάχους 2mm (Εικόνα 16)**. Το συγκεκριμένο υλικό επιλέχθηκε για την υψηλή αντοχή του στα φορτία που δέχεται το UAV κατά την απογείωση και την προσγείωση. Το ατσάλι μπορεί να απορροφά τους κραδασμούς και τις καταπονήσεις, προστατεύοντας την άτρακτο και τα ηλεκτρονικά μέρη από ζημιές κατά την επαφή με το έδαφος.



Εικόνα 16

Σημείο πρόσδεσης αστάλινων σκελών προσγείωσης

3.2.2 Ηλεκτρονικά

Η επιτυχία και η λειτουργικότητα του UAV εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ηλεκτρονικά που ενσωματώθηκαν στο σύστημα. Κάθε εξάρτημα επιλέχθηκε προσεκτικά για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα, η αυτονομία και η αποτελεσματικότητα του UAV κατά την πτήση. Ακολουθεί η λίστα των ηλεκτρονικών που χρησιμοποιήθηκαν και η αναφορά στο τι είναι και που αποσκοπεί η χρήση τους:

1. Flight Controller: FX-405 (της Matek)

Ο **FX-405 (Εικόνα 17)** είναι ο αυτόματος πιλότος του συστήματος, υπεύθυνος για τη διαχείριση και τον έλεγχο όλων των πτητικών συστημάτων του UAV. Ο controller αυτός λαμβάνει δεδομένα από τους αισθητήρες GPS, τους σερβομηχανισμούς και τα ηλεκτρονικά ταχύτητας (ESCs) για να διασφαλίσει την ομαλή λειτουργία τόσο κατά την κάθετη απογείωση και προσγείωση (VTOL mode) όσο και κατά την οριζόντια πτήση (fixed-wing mode). Χρησιμοποιεί σύνθετους αλγόριθμους για την πλοήγηση του UAV με ακρίβεια και σταθερότητα.¹**Mission Planner Initial Setup.** (n.d.). Διαθέσιμο στο <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-initial-setup.html>



Εικόνα 17
Αυτόματος πιλότος

2. **Power Management Unit (PMU): FX-405 V2 PMU**

Το **Power Management Unit (PMU)** (**Εικόνα 18**) είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της ενέργειας που παράγεται από την μπαταρία του UAV και τη διανομή της σε όλα τα κρίσιμα συστήματα, όπως οι κινητήρες, οι σερβομηχανισμοί, και τα ηλεκτρονικά συστήματα πτήσης. Η μονάδα αυτή εξασφαλίζει την ισορροπημένη παροχή ενέργειας, προστατεύοντας παράλληλα τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα από υπερτάσεις και αστάθειες τάσης.

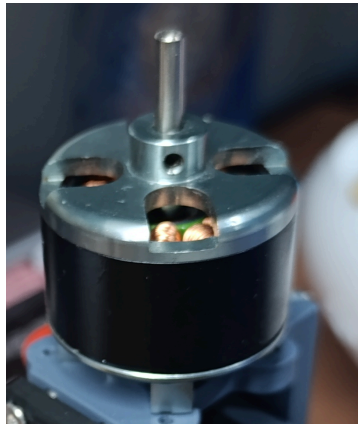


Εικόνα 18
Power Management Unit

3. **Motors: 2215/1400KV Brushless Outrunner Motors**

Οι κινητήρες είναι τα βασικά στοιχεία του συστήματος πρόωσης του UAV. Τα **2215/1400KV brushless motors** (**Εικόνα 19**) χρησιμοποιούνται τόσο για την κάθετη όσο και για την οριζόντια πτήση του UAV. Τοποθετήθηκαν τρεις κινητήρες συνολικά:

δύο κινητήρες στο μπροστινό μέρος της ατράκτου με δυνατότητα περιστροφής (tilt motors) και ένας σταθερός κινητήρας στο πίσω μέρος για την πρόωση κατά την οριζόντια πτήση.²He, W., & Huang, J. (2020). *Development of high-efficiency brushless motors for UAV applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(8), 6718-6725. Retrieved from IEEE Xplore.

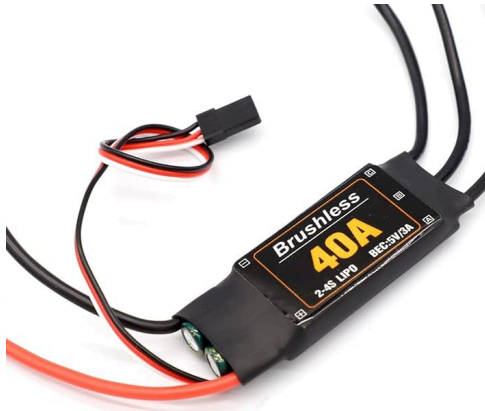


Εικόνα 19

2215/1400KV Brushless Outrunner Motor

4. **Electronic Speed Controllers (ESCs): 40A 2-4S Brushless ESCs με BEC (5V/3A)**

Οι **Electronic Speed Controllers (ESCs)** (Εικόνα 20) είναι υπεύθυνοι για τη ρύθμιση της ταχύτητας των κινητήρων. Οι **40A brushless ESCs** με ενσωματωμένο **Battery Elimination Circuit (BEC)** παρέχουν σταθερή ισχύ στους κινητήρες, ενώ παράλληλα διαχειρίζονται την τάση που παρέχεται στους σερβομηχανισμούς και τα ηλεκτρονικά πτήσης. Η σταθερότητα των ESCs είναι κρίσιμη για την ομαλή λειτουργία των κινητήρων κατά τη διάρκεια της απογείωσης και της οριζόντιας πτήσης.

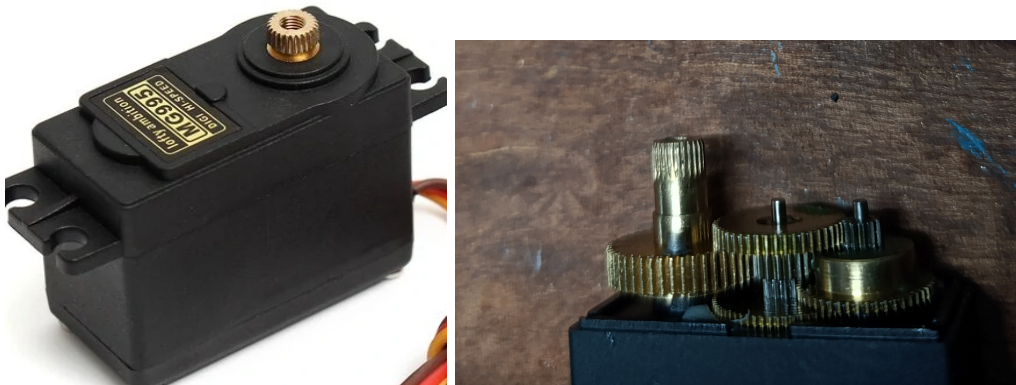


Εικόνα 20

Electronic Speed Controller

5. Tilt Servos: Digital Metal Gear Servos

Οι **Tilt Servos (Εικόνα 21)** είναι υπεύθυνοι για την περιστροφή των μπροστινών κινητήρων από την κάθετη θέση (VTOL mode) στην οριζόντια θέση για τη fixed-wing πτήση. Οι συγκεκριμένοι σερβομηχανισμοί επιλέχθηκαν για την ανθεκτικότητά τους, καθώς διαθέτουν μεταλλικά γρανάζια και ψηφιακή ακρίβεια, εξασφαλίζοντας ότι οι κινητήρες θα περιστρέφονται με ακρίβεια και σταθερότητα.



Εικόνα 21

Metal gear Servo

6. GPS & Compass: Ublox M8N GPS

Το **Ublox M8N GPS (Εικόνα 22)** είναι υπεύθυνο για την ακριβή καταγραφή της θέσης του UAV σε πραγματικό χρόνο. Το GPS συνεργάζεται με τον αυτόματο πιλότο για την πλοήγηση του UAV και την εκτέλεση σύνθετων αυτόνομων πτήσεων. Παράλληλα, η ενσωματωμένη πυξίδα διασφαλίζει την ακρίβεια των δεδομένων

προσανατολισμού.³**U-blox. (2023). M8N GPS & Compass Integration for UAVs.** Retrieved from [U-blox Documentation](#).



Εικόνα 22

Ublox M8N GPS Module

7. FPV Camera: 1200TVL Mini FPV Camera

Η **FPV κάμερα (Εικόνα 23)** επιτρέπει τη μετάδοση εικόνας σε πραγματικό χρόνο από το UAV στον χειριστή. Η κάμερα τοποθετήθηκε στο μπροστινό μέρος του UAV και προσφέρει εξαιρετική ποιότητα εικόνας κατά τη διάρκεια της πτήσης, διευκολύνοντας την πλοήγηση και την παρακολούθηση της πτήσης από τον χειριστή.



Εικόνα 23

1200TVL Mini FPV Camera

8. Telemetry System: Holybro Telemetry Radio V3

Το σύστημα τηλεμετρίας επιτρέπει την αποστολή δεδομένων πτήσης σε πραγματικό χρόνο από το UAV στον σταθμό εδάφους. Το **Holybro Telemetry Radio V3 (Εικόνα 24)** προσφέρει εμβέλεια έως και 20 km σε συνθήκες **LOS (Line of Sight)**,

επιτρέποντας την παρακολούθηση της θέσης, των επιπέδων μπαταρίας, και άλλων κρίσιμων δεδομένων κατά την πτήση.



Εικόνα 24

Air και Ground module της τηλεμετρίας

3.3 Διαδικασία Κατασκευής

3.3.1 Σχεδίαση και Εκτύπωση Custom Εξαρτημάτων

Για την τροποποίηση του UAV, πολλά εξαρτήματα έπρεπε να σχεδιαστούν από την αρχή και να εκτυπωθούν μέσω 3D printing. Αυτά περιλάμβαναν τις βάσεις των κινητήρων, τα mount των σερβομηχανισμών, καθώς και τα κανάλια διέλευσης καλωδίων.

1. Σχεδίαση εξαρτημάτων:

- Κάθε εξάρτημα σχεδιάστηκε με βάση τις ακριβείς μετρήσεις του αεροπλάνου και των ηλεκτρονικών συσκευών που έπρεπε να προσαρτηθούν. Το λογισμικό CAD (Computer-Aided Design) χρησιμοποιήθηκε για την ψηφιακή σχεδίαση.

2. Εκτύπωση σε 3D:

- Οι σχεδιασμοί στη συνέχεια μετατράπηκαν σε αρχεία **STL** και εκτυπώθηκαν χρησιμοποιώντας τον **Bambulab X1 Carbon** 3D εκτυπωτή με **ABS filament**.

3.3.2 Τροποποίηση Σασί και Τοποθέτηση Κινητήρων

Η πιο σημαντική τροποποίηση στο μοντέλο Skyhunter ήταν η αντικατάσταση του μονοκινητήριου συστήματος με ένα σύστημα τρικόπτερου (tricopter VTOL).

1. Κατάργηση του Pushback Μοτέρ:

- Αρχικά, αφαιρέθηκε ο μονοκινητήριος κινητήρας pushback από την πίσω θέση του αεροσκάφους.

2. Τοποθέτηση Τριών Νέων Κινητήρων:

- Τοποθετήθηκαν τρεις **2215/1400KV brushless** κινητήρες:
 - Ένας κινητήρας τοποθετήθηκε στο πίσω μέρος του αεροσκάφους σε σταθερή διάταξη.
 - Οι άλλοι δύο κινητήρες τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν της ατράκτου σε **tilt motor mounts** που επιτρέπουν την περιστροφή τους για κάθετη και οριζόντια πτήση.
- Οι βάσεις των κινητήρων σχεδιάστηκαν ειδικά για την εφαρμογή τους στο UAV και εκτυπώθηκαν σε 3D.

3.3.3 Τοποθέτηση Σκελών Προσγείωσης και Ενίσχυση Πτερυγίων

Για να προστατευθεί το UAV κατά την απογείωση και την προσγείωση, προστέθηκαν **σκέλοι προσγείωσης (landing pads)** από ατσάλι.

- Τοποθετήθηκαν στην άτρακτο ώστε να απομακρύνεται το UAV από το έδαφος και να αποφεύγεται η φθορά κατά την απογείωση και προσγείωση.
- Οι προσθήκες αυτές παρείχαν επιπλέον χώρο για την προσάρτηση αισθητήρων μέτρησης ρύπων.

3.3.4 Εγκατάσταση Ηλεκτρονικών Συστημάτων

Στο επόμενο βήμα της διαδικασίας, τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρονικά συστήματα του UAV, που περιλάμβαναν:

1. Εγκατάσταση Αυτόματου Πιλότου:

- Ο **FX-405** της **Matek** τοποθετήθηκε ως αυτόματος πιλότος και συνδέθηκε με τους αισθητήρες GPS και τους σερβομηχανισμούς.

2. Σύνδεση Συστήματος Τηλεμετρίας:

- Το σύστημα **Holybro Telemetry Radio V3** εγκαταστάθηκε για την αποστολή δεδομένων πτήσης σε πραγματικό χρόνο.

3. Προσθήκη FPV Κάμερας και Πομπού:

- Τοποθετήθηκε **FPV κάμερα 1200TVL** μαζί με πομπό εικόνας **5.8 GHz** για την αποστολή ζωντανής εικόνας στον χειριστή του UAV.

4. Διαχείριση καλωδίων:

- Δημιουργήθηκαν κατάλληλα κανάλια διέλευσης καλωδίων στην πτέρυγα και την άτρακτο για βέλτιστη διαχείριση των καλωδίων και αποφυγή παρεμβολών.

3.4 Δυσκολίες και Προκλήσεις

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού, κατασκευής και δοκιμής του UAV με ηλιακή υποστήριξη, προέκυψαν πολλές σημαντικές δυσκολίες και προκλήσεις που έπρεπε να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή ολοκλήρωση του έργου. Αυτές αφορούσαν τόσο τεχνικές όσο και μηχανικές προκλήσεις, οι οποίες επηρέασαν την αποδοτικότητα του συστήματος και την ασφάλεια της πτήσης.

3.4.1 Μηχανικές Δυσκολίες

Η πρώτη και πιο σημαντική κατηγορία προβλημάτων που αντιμετωπίστηκε ήταν οι μηχανικές δυσκολίες, κυρίως λόγω της ανάγκης τροποποίησης του αεροσκάφους και της προσαρμογής των επιπλέον εξαρτημάτων.

Τροποποίηση του μοντέλου Skyhunter:

- Το αρχικό μοντέλο του **Skyhunter 1800mm** ήταν σχεδιασμένο για μονοκινητήρια χρήση, και η μετάβαση σε ένα σύστημα **VTOL tricopter** απαιτούσε εκτεταμένες τροποποιήσεις.
 - Η τοποθέτηση επιπλέον κινητήρων σε tilt διάταξη δημιούργησε προβλήματα στατικής ισορροπίας, καθώς έπρεπε να διατηρηθεί το κέντρο βάρους του αεροσκάφους.
 - Η κατασκευή και ενίσχυση των βάσεων για τους κινητήρες ήταν ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς έπρεπε να αντέχουν τα φορτία και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της κάθετης απογείωσης και προσγείωσης. Οι βάσεις σχεδιάστηκαν και εκτυπώθηκαν μέσω 3D printing, ωστόσο απαιτήθηκαν πολλαπλές δοκιμές και αναπροσαρμογές μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη κατασκευή που να συνδυάζει ελαφρότητα και αντοχή.

3.4.2 Ηλεκτρονικές Δυσκολίες

Η ενσωμάτωση των πολλαπλών ηλεκτρονικών συστημάτων και η εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας τους υπήρξε μία από τις κύριες προκλήσεις της κατασκευής.

Συμβατότητα ηλεκτρονικών συστημάτων:

- Η σύνδεση των πολλών ηλεκτρονικών συστημάτων όπως ο **αυτόματος πιλότος**, οι **GPS αισθητήρες**, η **τηλεμετρία**, και η **FPV κάμερα** παρουσίασε δυσκολίες στη συμβατότητα και τη συνεργασία τους.
 - Η τηλεμετρία και το GPS έπρεπε να λειτουργούν απρόσκοπτα για να προσφέρουν ακριβή δεδομένα κατά την πτήση. Κατά τη διάρκεια των πρώτων

δοκιμών, παρατηρήθηκαν προβλήματα παρεμβολών μεταξύ του συστήματος τηλεμετρίας και της FPV κάμερας, που προκάλεσαν απώλεια σήματος.

- Επιπλέον, η επιλογή των κατάλληλων καλωδίων για την **διαχείριση καλωδίων** (cable management) ήταν ιδιαίτερα σημαντική για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων και παρεμβολών μεταξύ των συστημάτων.

1. Προσαρμογή της πτήσης VTOL:

- Η μετάβαση από την κάθετη πτήση (VTOL mode) σε οριζόντια πτήση (fixed-wing mode) παρουσίασε σημαντικές προκλήσεις στη ρύθμιση του συστήματος ελέγχου. Ο αυτόματος πιλότος έπρεπε να ρυθμιστεί ώστε να ελέγχει τη μετάβαση με ακρίβεια, ενώ η αναπροσαρμογή της ισχύος στους κινητήρες tilt motors κατά τη μετάβαση απαιτούσε λεπτομερείς ρυθμίσεις για την αποφυγή απώλειας στήριξης.
 - Οι πρώτες πτήσεις έδειξαν ότι το UAV παρουσίαζε ταλαντώσεις κατά τη μετάβαση από την κάθετη στην οριζόντια πτήση, γεγονός που οδήγησε σε αναπροσαρμογές στον τρόπο λειτουργίας των κινητήρων και των σερβομηχανισμών.

2. Ισορροπία και σταθερότητα κατά την πτήση:

- Η εξισορρόπηση του αεροσκάφους σε συνδυασμό με τα επιπλέον βάρη από τους κινητήρες και τις μπαταρίες αποτέλεσε σοβαρή πρόκληση.
 - Το **κέντρο βάρους** έπρεπε να προσαρμοστεί συνεχώς, καθώς η προσαρμογή του βάρους από τους κινητήρες και τις μπαταρίες επηρέαζε την ισορροπία του αεροσκάφους.

Οι εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες έπαιξαν επίσης ρόλο στις δυσκολίες κατασκευής και λειτουργίας του UAV.

1. Υπερθέρμανση συστημάτων:

- Κατά τη διάρκεια μακροχρόνιων εκθέσεων του συστήματος με έντονη ηλιοφάνεια, παρατηρήθηκε υπερθέρμανση σε ορισμένα συστήματα, ιδιαίτερα στα **ηλεκτρονικά εξαρτήματα** όπως οι κινητήρες και η μπαταρία.
 - Ο έλεγχος της θερμοκρασίας κατά τις στατικές δοκιμές ήταν ιδιαίτερα κρίσιμος, καθώς υπήρχαν περιπτώσεις όπου τα συστήματα έφταναν κοντά στα θερμικά όρια τους, προκαλώντας απώλεια απόδοσης.

2. Προστασία από UV ακτινοβολία:

- Τα υλικά των εξαρτημάτων του UAV έπρεπε να προστατευτούν από την **UV ακτινοβολία**, καθώς η συνεχής έκθεση θα μπορούσε να προκαλέσει φθορά ή μείωση της απόδοσής τους με την πάροδο του χρόνου.
 - Η επιλογή του **ABS filament** για τα περισσότερα εκτυπωμένα εξαρτήματα ήταν ιδανική λόγω της αντοχής του στην UV ακτινοβολία, αλλά η μακροχρόνια αντοχή των υπόλοιπων υλικών ήταν μια διαρκής πρόκληση.

4. Αποτελέσματα

4.1 Αξιολόγηση Αποδοτικότητας Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Η αξιολόγηση της αποδοτικότητας των φωτοβολταϊκών κυψελών που χρησιμοποιούνται στο UAV πραγματοποιήθηκε μέσω λεπτομερών υπολογισμών και ανάλυσης της απόδοσής τους καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Για τις ανάγκες της ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκαν **C60 flexible solar cells** σε διάταξη σειράς (10 κυψέλες).

Χαρακτηριστικά των C60 Solar Cells

Οι **C60 Solar Cells** είναι εύκαμπτες φωτοβολταϊκές κυψέλες υψηλής απόδοσης που προσφέρουν σημαντική ενεργειακή απόδοση. Οι κυψέλες αυτές επιλέχθηκαν για την κατασκευή του UAV λόγω της δυνατότητας τους να εφαρμόζουν εύκολα στις πτέρυγες του αεροσκάφους, παρέχοντας ταυτόχρονα επαρκή ισχύ για τις ανάγκες των συστημάτων του UAV.

Η απόδοσή τους εξαρτάται από την ηλιοφάνεια και τη θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας, με την αποδοτικότητα να κορυφώνεται γύρω στις μεσημβρινές ώρες όταν υπάρχει η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία.

4.1.1 Απόδοση Μιας Φωτοβολταϊκής Κυψέλης C60

Για την αξιολόγηση της απόδοσης μιας μόνο φωτοβολταϊκής κυψέλης, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί κατά τη διάρκεια της ημέρας. Τα βασικά στοιχεία για την απόδοση μιας κυψέλης είναι η **τάση στο μέγιστο σημείο ισχύος (V_{mpp})** και το **ρεύμα στο μέγιστο σημείο ισχύος (I_{mpp})** (Πίνακας 1).

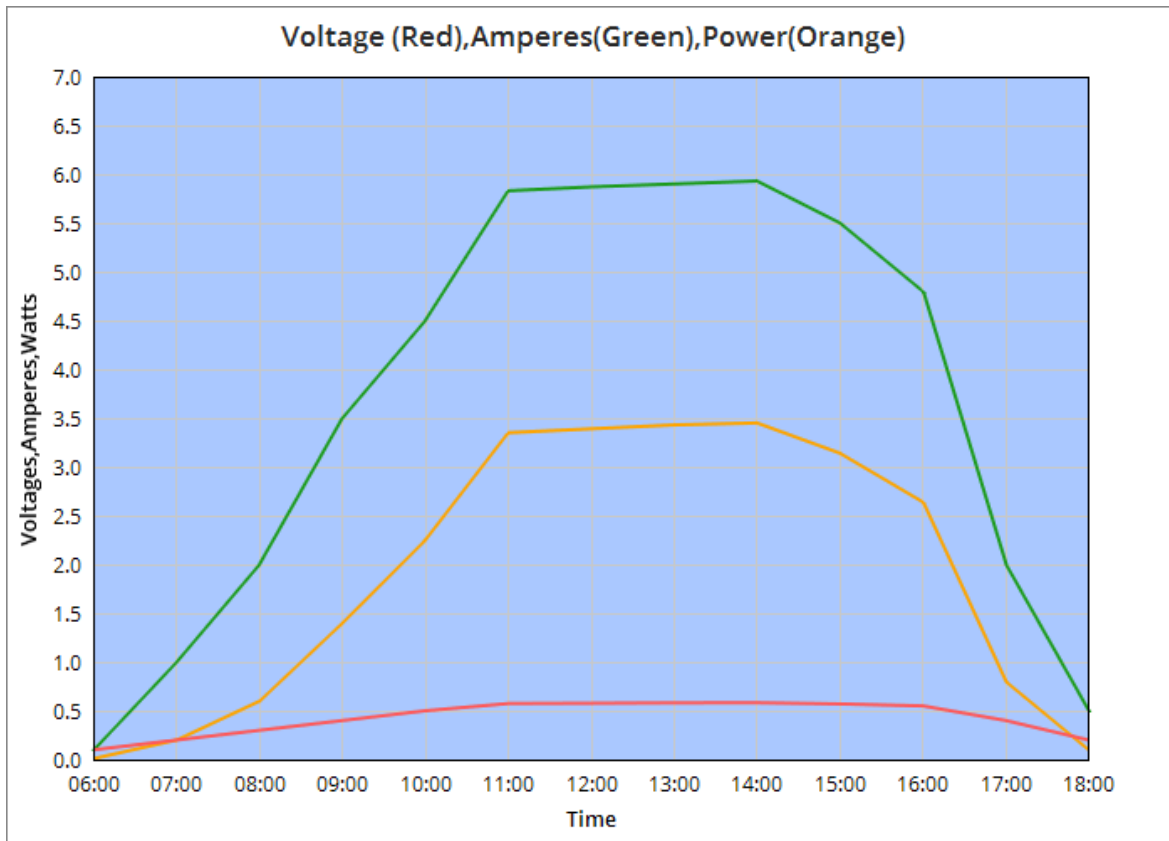
Ωρες	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	Ισχύς (W)
6:00	0.1	0.1	0.01
7:00	0.2	1.0	0.2

Ωρες	V _{mpp} (V)	I _{mpp} (A)	Ισχύς (W)
8:00	0.3	2.0	0.6
9:00	0.4	3.5	1.4
10:00	0.5	4.5	2.25
11:00	0.574	5.83	3.35
12:00	0.577	5.87	3.39
13:00	0.581	5.90	3.43
14:00	0.582	5.93	3.45
15:00	0.570	5.50	3.14
16:00	0.550	4.80	2.64
17:00	0.400	2.00	0.8
18:00	0.200	0.50	0.1

Πίνακας 1

Απόδοση Μιας Φωτοβολταϊκής Κυψέλης C60 στην διάρκεια της ημέρας

1. Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, η ισχύς που παράγεται από μία φωτοβολταϊκή κυψέλη κατά τη διάρκεια της ημέρας κορυφώνεται στις μεσημβρινές ώρες (12:00-14:00), όταν η απόδοση αγγίζει τα **3.45W**. Η αποδοτικότητα μειώνεται σταδιακά νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα, όπου η ισχύς πέφτει κάτω από **1W (Διάγραμμα 1)**.⁴**SUNPOWER** (n.d.). *SunPower Solar Cell C60 Performance*. Διαθέσιμο στο http://eshop.terms.eu/_data/s_3386/files/1379942540-sunpower_c60_bin_ghi.pdf



Διάγραμμα 1

4.1.2 Απόδοση 10 Φωτοβολταϊκών Κυψελών σε Διάταξη Σειράς

Στο UAV χρησιμοποιούνται **10 φωτοβολταϊκές κυψέλες σε διάταξη σειράς (row connection)**. Σε αυτή τη διάταξη, η τάση των κυψελών προστίθεται, ενώ το ρεύμα παραμένει το ίδιο με αυτό μιας κυψέλης. Με βάση αυτό το δεδομένο, η συνολική τάση για το σύστημα των 10 κυψελών πολλαπλασιάζεται επί 10, διατηρώντας σταθερή την τιμή του ρεύματος (I_{mpp}) (**Πίνακας 2**).

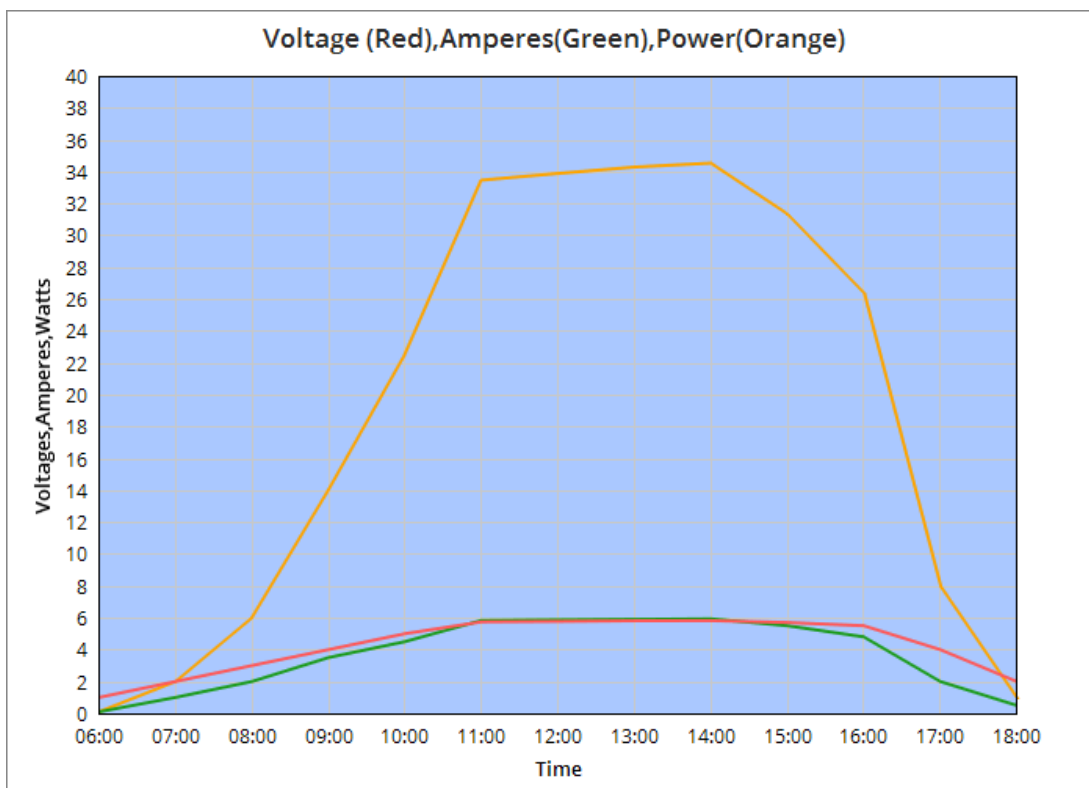
Ωρες	V_{mpp} (V)	I_{mpp} (A)	Ισχύς (W)
6:00	1.0	0.1	0.1
7:00	2.0	1.0	2.0
8:00	3.0	2.0	6.0
9:00	4.0	3.5	14.0
10:00	5.0	4.5	22.5

Ωρες	V _{mp} (V)	I _{mp} (A)	Ισχύς (W)
11:00	5.74	5.83	33.46
12:00	5.77	5.87	33.88
13:00	5.81	5.90	34.28
14:00	5.82	5.93	34.53
15:00	5.70	5.50	31.35
16:00	5.50	4.80	26.40
17:00	4.00	2.00	8.00
18:00	2.00	0.50	1.00

Πίνακας 2

Απόδοση 10 Φωτοβολταϊκών Κυψελών σε Διάταξη Σειράς στην διάρκεια της ημέρας

Στην παραπάνω ανάλυση, βλέπουμε ότι η συνολική ισχύς για τις 10 κυψέλες σε διάταξη σειράς φτάνει έως και τα **34.53W** κατά τη διάρκεια των μεσημβρινών ωρών. Παρόλο που η ισχύς πέφτει νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα, οι κυψέλες εξακολουθούν να παράγουν αρκετή ενέργεια για να τροφοδοτήσουν ορισμένα από τα συστήματα του UAV.



Διάγραμμα 2

Κατανάλωση Ισχύος του UAV

Οι κύριες ηλεκτρονικές συσκευές που λειτουργούν κατά την πτήση είναι οι εξής:

- **Μοτέρ (3 x 1400KV brushless motors):** Σε πλήρη λειτουργία, κάθε μοτέρ καταναλώνει περίπου **120W**. Συνολικά, η κατανάλωση ισχύος από τα τρία μοτέρ είναι: $120W \times 3 = 360W$
- **Αυτόματος Πιλότος (FX-405):** Ο αυτόματος πιλότος καταναλώνει περίπου **1W** σε πλήρη λειτουργία.
- **Tilt Servos:** Οι σερβομηχανισμοί που ελέγχουν τους μπροστινούς κινητήρες καταναλώνουν περίπου **1W το καθένα**, με συνολική κατανάλωση **2W**.
- **Τηλεμετρία και Δέκτης Τηλεκατεύθυνσης:** Η συνολική κατανάλωση από το σύστημα τηλεμετρίας και τον δέκτη εκτιμάται στα **5W**.

Συνολική Κατανάλωση Ισχύος

Η συνολική κατανάλωση ισχύος του UAV όταν όλες οι συσκευές λειτουργούν στα μέγιστα υπολογίζεται ως εξής:

Συνολική Κατανάλωση Ισχύος = $360W(\text{μοτέρ}) + 1W(\text{αυτόματος πιλότος}) + 2W(\text{σέρβο}) + 5W(\text{τηλεμετρία και δέκτης}) = \mathbf{368W}$

Χωρητικότητα της Μπαταρίας

Η μπαταρία του UAV είναι **5300mAh 3S 11.1V**. Η ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει η μπαταρία υπολογίζεται ως εξής:

Ενέργεια της Μπαταρίας = $5300mAh \times 11.1V = \mathbf{58.83Wh}$

Αυτό σημαίνει ότι η μπαταρία μπορεί να παρέχει **58.83Wh** ενέργειας.

Υπολογισμός Χρόνου Πτήσης χωρίς Φωτοβολταϊκά

Ο χρόνος πτήσης που μπορεί να παρέχει αυτή η μπαταρία χωρίς τη χρήση φωτοβολταϊκών υπολογίζεται ως εξής:

Χρόνος Πτήσης = $\frac{\text{Ενέργεια της Μπαταρίας}}{\text{Συνολική Κατανάλωση Ισχύος}} = \frac{58.83Wh}{368W} = 0.16 \text{ ώρες} = \mathbf{9.6 \text{ λεπτά}}$

Αυτό σημαίνει ότι το UAV μπορεί να πετάξει για **9.6 λεπτά** με τη μπαταρία του, αν όλες οι συσκευές λειτουργούν στα μέγιστα.⁵**Svensson, P., & Johansson, T. (2022). *Evaluation of solar powered systems in small scale UAV. Mälardalen University, Sweden.*** Διαθέσιμο στο <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1713643/FULLTEXT01.pdf>

Χρήση Φωτοβολταϊκών και Ελεγκτή Φόρτισης

Στο σενάριο όπου προστίθενται **10 C60 φωτοβολταϊκές κυψέλες** σε σειρά, οι οποίες παράγουν περίπου **34.53W** σε ιδανικές συνθήκες ηλιοφάνειας (π.χ. στις 14:00), μπορούμε να υπολογίσουμε τον χρόνο πτήσης με τη χρήση φωτοβολταϊκών.

Παραγόμενη Ισχύς από τα Φωτοβολταϊκά

Η ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στις μεσημβρινές ώρες είναι **34.53W**. Με τη χρήση ελεγκτή φόρτισης, αυτή η ισχύς χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας και τη μείωση της κατανάλωσης ισχύος από αυτήν. Άρα η καθαρή ισχύς που αντλείται από τη μπαταρία μειώνεται κατά την ισχύ των φωτοβολταϊκών:

Καθαρή Κατανάλωση Ισχύος= $368W - 34.53W = 333.47W$

Υπολογισμός Χρόνου Πτήσης με Φωτοβολταϊκά

Ο χρόνος πτήσης με τη χρήση φωτοβολταϊκών υπολογίζεται ως εξής:

Χρόνος Πτήσης με Φωτοβολταϊκά= $\text{Ενέργεια της Μπαταρίας} / \text{Καθαρή Κατανάλωση Ισχύος} = 58.83Wh / 333.47W = 0.176 \text{ ώρες} = \mathbf{10.56 \text{ λεπτά}}$

Σύγκριση Χρόνου Πτήσης

- Χωρίς τη χρήση φωτοβολταϊκών, ο χρόνος πτήσης είναι **9.6 λεπτά**.
- Με τη χρήση φωτοβολταϊκών που παράγουν **34.53W**, ο χρόνος πτήσης αυξάνεται σε **10.56 λεπτά**.

Συμπεραίνουμε ότι η χρήση φωτοβολταϊκών μπορεί να επεκτείνει τον χρόνο πτήσης κατά **1 λεπτό επιπλέον** υπό ιδανικές συνθήκες ηλιοφάνειας. Παρόλο που το κέρδος είναι μικρό λόγω της υψηλής κατανάλωσης ισχύος των κινητήρων, η σταθερή παροχή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά μπορεί να προσφέρει συνεχή υποστήριξη, ειδικά κατά τη διάρκεια των

μεσημβρινών ωρών. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι αυτός ο υπολογισμός είναι ένα ακραίο παράδειγμα, καθώς **σχεδόν ποτέ** δεν θα χρειαστεί όλα τα συστήματα του UAV, συμπεριλαμβανομένων των **3 κινητήρων**, να λειτουργούν στα μέγιστα ταυτόχρονα καθ' όλη τη διάρκεια της πτήσης. Στην πραγματικότητα, κατά το μεγαλύτερο τμήμα της πτήσης, το UAV θα λειτουργεί σε **fixed-wing mode**, όπου μόνο οι δύο από τους τρεις κινητήρες θα λειτουργούν, και **η κατανάλωση θα μειώνεται σημαντικά**. Η άντωση που παράγεται από τις πτέρυγες μειώνει την ανάγκη για ισχύ από τους κινητήρες, και οι δύο κινητήρες θα λειτουργούν συνήθως στη **μισή κατανάλωση** σε σχέση με το σενάριο κάθετης απογείωσης και προσγείωσης (VTOL mode). Αυτό σημαίνει ότι ο πραγματικός χρόνος πτήσης μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερος από τον υπολογισμό στο παραπάνω ακραίο σενάριο.

4.2 Ανάλυση της λειτουργικότητας VTOL και Fixed-Wing Mode

Η λειτουργικότητα του UAV χωρίζεται σε δύο κύριες φάσεις πτήσης: την κάθετη απογείωση και προσγείωση (**VTOL mode**) και την οριζόντια πτήση με πτέρυγες (**Fixed-Wing mode**). Αυτά τα δύο modes συνδυάζονται για να προσφέρουν την ευελιξία ενός πολυκόπτερου και την ενεργειακή αποδοτικότητα ενός αεροσκάφους με σταθερές πτέρυγες.

4.2.1 VTOL Mode (Vertical Takeoff and Landing)

Το **VTOL mode** επιτρέπει στο UAV να απογειώνεται και να προσγειώνεται κάθετα, χωρίς την ανάγκη διαδρόμου ή μεγάλου ελεύθερου χώρου. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν το UAV καλείται να λειτουργήσει σε περιορισμένους χώρους, όπως αστικές περιοχές ή περιοχές με πυκνή βλάστηση.

Αρχή λειτουργίας VTOL mode:

- Στο VTOL mode, το UAV χρησιμοποιεί τους τρεις κινητήρες που βρίσκονται στο μπροστινό και πίσω μέρος της ατράκτου για να επιτύχει κάθετη ανύψωση.
- Οι **tilt κινητήρες** (tilt motors), που βρίσκονται εκατέρωθεν της ατράκτου, έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται, επιτρέποντας την προσαρμογή του προσανατολισμού των κινητήρων από κάθετη σε οριζόντια θέση.
- Κατά την απογείωση, όλοι οι κινητήρες λειτουργούν για να δημιουργήσουν την απαραίτητη ανύψωση, με τους tilt κινητήρες να βρίσκονται στην κάθετη θέση, επιτρέποντας στο UAV να απογειωθεί απευθείας από το έδαφος.

Πλεονεκτήματα του VTOL mode:

- **Ευκολία απογείωσης και προσγείωσης:** Η δυνατότητα απογείωσης και προσγείωσης χωρίς διάδρομο καθιστά το UAV κατάλληλο για χρήση σε δυσπρόσιτες

περιοχές, όπως πυκνά δάση, βραχώδεις εκτάσεις, ή αστικά περιβάλλοντα με περιορισμένο χώρο.

- **Μειωμένος κίνδυνος ζημιών κατά την απογείωση/προσγείωση:** Λόγω της απουσίας οριζόντιας ταχύτητας κατά την απογείωση και την προσγείωση, μειώνονται οι πιθανότητες να υποστεί ζημιές η άτρακτος του UAV κατά την προσγείωση σε ανώμαλο έδαφος.

Προκλήσεις του VTOL mode:

- **Υψηλή κατανάλωση ισχύος:** Η λειτουργία VTOL απαιτεί μεγάλη ισχύ από τους κινητήρες, καθώς όλοι οι κινητήρες εργάζονται στο μέγιστο για να επιτύχουν την ανύψωση του UAV. Αυτό αυξάνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας, με αποτέλεσμα ο χρόνος πτήσης στο VTOL mode να είναι περιορισμένος.
- **Περιορισμένη διάρκεια πτήσης:** Δεδομένης της υψηλής κατανάλωσης ισχύος, το VTOL mode χρησιμοποιείται μόνο για την απογείωση και την προσγείωση, ενώ η κύρια διάρκεια της πτήσης πραγματοποιείται στο Fixed-Wing mode για εξοικονόμηση ενέργειας.

4.2.2 Fixed-Wing Mode (Οριζόντια Πτήση)

Το **Fixed-Wing mode** είναι το κύριο mode λειτουργίας κατά τη διάρκεια της πτήσης, καθώς το UAV μεταβαίνει από κάθετη ανύψωση σε οριζόντια πτήση. Σε αυτό το mode, το UAV χρησιμοποιεί την ανύψωση που παράγουν οι πτέρυγες του για να πετάξει με αποδοτικότητα, ενώ οι κινητήρες χρησιμοποιούνται μόνο για την προώθηση του αεροσκάφους.

Αρχή λειτουργίας Fixed-Wing mode:

- Όταν το UAV φτάσει σε κατάλληλο ύψος μετά την απογείωση, οι **tilt κινητήρες** περιστρέφονται από την κάθετη στην οριζόντια θέση. Σε αυτή τη φάση, το UAV μεταβαίνει στην οριζόντια πτήση, χρησιμοποιώντας την άντωση που παράγεται από τις πτέρυγες.
- Οι κινητήρες μειώνουν την κατανάλωση ισχύος, καθώς η πτέρυγα αναλαμβάνει την κύρια λειτουργία ανύψωσης. Έτσι, οι κινητήρες λειτουργούν σε χαμηλότερη ισχύ για να διατηρήσουν την ταχύτητα της πτήσης.

Πλεονεκτήματα του Fixed-Wing mode:

- **Ενεργειακή αποδοτικότητα:** Σε αντίθεση με το VTOL mode, όπου όλοι οι κινητήρες εργάζονται στο μέγιστο για να διατηρήσουν το UAV στον αέρα, στο Fixed-Wing mode η άντωση που παράγεται από τις πτέρυγες μειώνει την κατανάλωση ενέργειας. Έτσι, η διάρκεια της πτήσης αυξάνεται σημαντικά, καθώς η ανάγκη για ισχύ από τους κινητήρες είναι πολύ μικρότερη.
- **Μεγαλύτερη ταχύτητα και αυτονομία:** Η οριζόντια πτήση επιτρέπει στο UAV να καλύψει μεγάλες αποστάσεις με μεγαλύτερη ταχύτητα και οικονομία καυσίμου, σε

σύγκριση με την πτήση με πολυκόπτερο. Αυτό το καθιστά ιδανικό για αποστολές μεγάλης ακτίνας, όπως η χαρτογράφηση, η επιτήρηση, ή η μέτρηση ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Προκλήσεις του Fixed-Wing mode:

- **Αναγκαία ακρίβεια στον έλεγχο:** Η οριζόντια πτήση απαιτεί ακριβή έλεγχο των κινητήρων και του αυτόματου πιλότου, ιδίως κατά τη μετάβαση από το VTOL mode. Αν η μετάβαση δεν γίνει ομαλά, μπορεί να προκληθούν προβλήματα στη σταθερότητα της πτήσης ή ακόμα και αποσταθεροποίηση.
- **Περιορισμένη ευελιξία:** Αν και το Fixed-Wing mode προσφέρει υψηλή αποδοτικότητα και μεγάλη ταχύτητα, περιορίζει την ευελιξία του UAV. Σε αντίθεση με τα πολυκόπτερα, το UAV δεν μπορεί να σταματήσει και να αιωρείται, γεγονός που μπορεί να είναι πρόβλημα σε αποστολές που απαιτούν ακριβή παραμονή πάνω από ένα σημείο.

4.2.3 Μετάβαση από το VTOL στο Fixed-Wing mode

Η μετάβαση από το VTOL στο Fixed-Wing mode είναι μια κρίσιμη διαδικασία για την επιτυχή πτήση του UAV. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την προσαρμογή των κινητήρων και την αλλαγή της στάσης του UAV από κάθετη σε οριζόντια πτήση.

Διαδικασία Μετάβασης:

- Κατά την απογείωση, το UAV βρίσκεται στο VTOL mode με τους κινητήρες σε κάθετη διάταξη. Μόλις το UAV φτάσει σε ένα προκαθορισμένο ύψος, οι tilt κινητήρες αρχίζουν να περιστρέφονται, προσαρμόζοντας την κατεύθυνσή τους σε οριζόντια διάταξη.
- Ταυτόχρονα, ο αυτόματος πιλότος ενεργοποιεί το σύστημα ελέγχου για την πτέρυγα, ώστε να επιτευχθεί ομαλή μετάβαση στην άντωση που παράγεται από τις πτέρυγες.
- Οι κινητήρες μειώνουν την ισχύ τους, καθώς το UAV αρχίζει να πετάει οριζόντια, και η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται σημαντικά.

Προκλήσεις στη Μετάβαση:

- Η **ισορροπία κατά τη μετάβαση** είναι κρίσιμη, καθώς οποιαδήποτε απότομη μεταβολή στις δυνάμεις ανύψωσης και προώθησης μπορεί να προκαλέσει ταλαντώσεις ή ακόμα και απώλεια ελέγχου.
- Ο **συγχρονισμός των κινητήρων και των συστημάτων ελέγχου** πρέπει να είναι ακριβής, ώστε να διατηρηθεί η σταθερότητα του UAV κατά τη μετάβαση από το ένα mode στο άλλο.

Συμπεράσματα

5.1 Συνοψίζοντας τα Αποτελέσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός ηλιακού μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (VTOL UAV), το οποίο έχει τη δυνατότητα

κάθετης απογείωσης και προσγείωσης, καθώς και την δυνατότητα προσάρτησης αισθητήρων μέτρησης περιβαλλοντικών ρύπων. Η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών κυψελών C60 αποτελεί μία από τις κεντρικές καινοτομίες της εργασίας, καθώς επεκτείνει τη διάρκεια πτήσης του UAV μέσω της παραγωγής ενέργειας κατά τη διάρκεια των αποστολών. Η προσέγγιση αυτή εξασφαλίζει αυξημένη ενεργειακή αυτονομία, ιδανική για μακροχρόνιες αποστολές περιβαλλοντικής παρακολούθησης σε απομακρυσμένες και δυσπρόσιτες περιοχές.

Οι κύριες προκλήσεις που προέκυψαν κατά την ανάπτυξη του συστήματος περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση της πτητικής συμπεριφοράς τόσο στο **VTOL mode** όσο και στο **Fixed-Wing mode**, καθώς και την ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών κυψελών χωρίς να επηρεάζεται αρνητικά η αεροδυναμική απόδοση του UAV. Παρά το γεγονός ότι οι δοκιμαστικές πτήσεις δεν έχουν πραγματοποιηθεί ακόμα, η κατασκευή του UAV έχει ολοκληρωθεί, και όλα τα τεχνικά συστήματα λειτουργούν ομαλά.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν αναδεικνύουν τις προοπτικές βελτίωσης της ενεργειακής αυτονομίας μέσω της ενσωμάτωσης της ηλιακής ενέργειας. Αν και η αύξηση της διάρκειας πτήσης με τη χρήση ηλιακών κυψελών ήταν περιορισμένη σε επίπεδο λεπτών υπό ιδανικές συνθήκες ηλιοφάνειας, το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αξία της τεχνολογίας σε αποστολές με συγκεκριμένες απαιτήσεις διάρκειας. Συνολικά, η προσθήκη της δυνατότητας μέτρησης περιβαλλοντικών ρύπων σε συνδυασμό με την αυξημένη αυτονομία πτήσης καθιστούν το UAV ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για τη μελλοντική παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα.

Η παρούσα εργασία συμβάλλει στην εξέλιξη των τεχνολογιών UAV και ενσωμάτωσης ηλιακής ενέργειας, αποδεικνύοντας τη δυνατότητα χρήσης αυτών των τεχνολογιών σε πραγματικές εφαρμογές παρακολούθησης του περιβάλλοντος. Το σύστημα που κατασκευάστηκε, παρά τις τεχνικές προκλήσεις, προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση για αποστολές περιβαλλοντικής παρακολούθησης με υψηλό βαθμό ευελιξίας και ενεργειακής ανεξαρτησίας.

5.2 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί του Συστήματος

Η ανάπτυξη του ηλιακού VTOL UAV παρέχει μια σειρά από πλεονεκτήματα που καθιστούν το σύστημα αυτό ιδιαίτερα καινοτόμο και κατάλληλο για αποστολές περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Παρόλο που το σύστημα παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, είναι σημαντικό να αναφερθούν και οι περιορισμοί που εντοπίστηκαν κατά τη διάρκεια της σχεδίασης και κατασκευής του.

Πλεονεκτήματα του Συστήματος

1. **Ενεργειακή Αυτονομία με τη Χρήση Ηλιακής Ενέργειας:** Η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών κυψελών C60 αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του συστήματος, καθώς επιτρέπει την παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της πτήσης. Αυτή η δυνατότητα προσφέρει αύξηση της ενεργειακής αυτονομίας, κάτι που είναι

κρίσιμο για αποστολές μεγάλης διάρκειας σε απομακρυσμένες περιοχές. Αν και η αύξηση της διάρκειας πτήσης περιορίζεται σε επίπεδο λεπτών υπό ιδανικές συνθήκες, η ύπαρξη ηλιακής ενέργειας μπορεί να συνεισφέρει σε συνεχόμενες αποστολές όπου η επαναφόρτιση ή αντικατάσταση μπαταριών δεν είναι άμεσα εφικτή.

2. **Δυνατότητα Κάθετης Απογείωσης και Προσγείωσης (VTOL):** Η δυνατότητα του UAV να απογειώνεται και να προσγειώνεται κάθετα το καθιστά εξαιρετικά ευέλικτο για χρήση σε περιοχές όπου δεν υπάρχει επαρκής χώρος για οριζόντια απογείωση, όπως σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές ή σε γεωγραφικά απομονωμένες περιοχές με δύσκολη πρόσβαση. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά το UAV ιδιαίτερα χρήσιμο για επιχειρήσεις που απαιτούν ταχεία επέμβαση ή επιχειρήσεις σε δυσπρόσιτες τοποθεσίες.
3. **Σχεδιαστική Ευελιξία:** Η δομή του UAV επιτρέπει την προσαρμογή αισθητήρων για τη μέτρηση περιβαλλοντικών ρύπων, καθιστώντας το κατάλληλο για εξειδικευμένες αποστολές περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Αυτό προσφέρει μεγάλη ευελιξία στις χρήσεις του UAV, καθώς μπορεί να προσαρμοστεί για να καλύψει διαφορετικές ανάγκες, ανάλογα με το είδος των αισθητήρων που θα προστεθούν.
4. **Σταθερότητα και Ανθεκτικότητα:** Το σύστημα σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αντέχει σε αντίξοες συνθήκες και να προσφέρει σταθερή πτήση τόσο στο VTOL mode όσο και στο Fixed-Wing mode. Η κατασκευή από ανθεκτικά υλικά, σε συνδυασμό με την αεροδυναμική σχεδίαση, εξασφαλίζει τη σταθερότητα του UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης, ακόμα και υπό αντίξοες καιρικές συνθήκες.

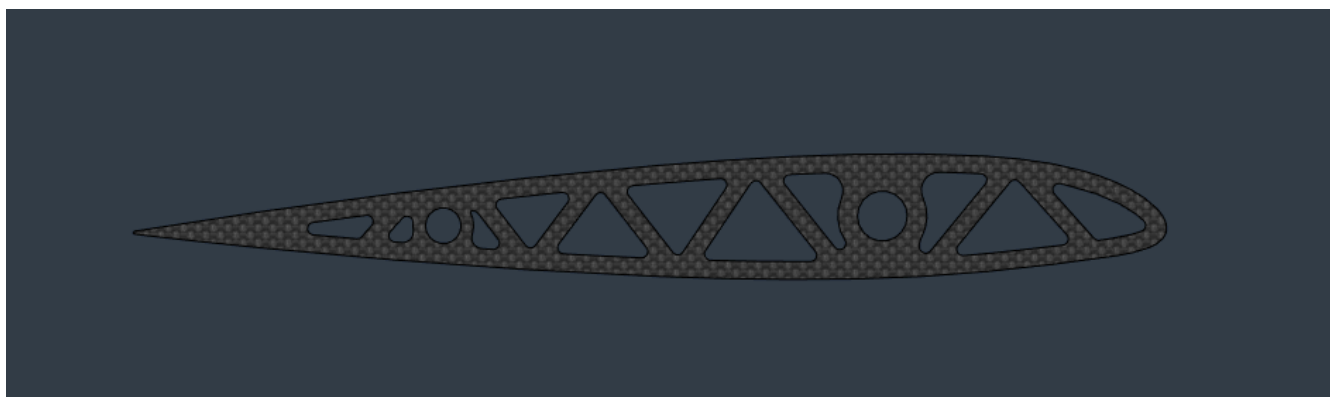
Περιορισμοί του Συστήματος

1. **Περιορισμένη Αύξηση Διάρκειας Πτήσης με Ηλιακή Ενέργεια:** Παρά τη χρήση ηλιακών κυψελών, η αύξηση της διάρκειας πτήσης είναι περιορισμένη, καθώς οι κυψέλες C60 δεν μπορούν να παρέχουν επαρκή ενέργεια για την πλήρη υποστήριξη όλων των συστημάτων του UAV. Το γεγονός αυτό περιορίζει τη δυνατότητα επέκτασης του χρόνου πτήσης σε επίπεδο λεπτών, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας ή κατά τη διάρκεια πτήσεων μεγάλων απαιτήσεων ενέργειας.
2. **Υψηλή Κατανάλωση Ενέργειας Κατά το VTOL Mode:** Η κάθετη απογείωση και προσγείωση απαιτεί σημαντικά υψηλή κατανάλωση ενέργειας, η οποία περιορίζει την ενεργειακή αυτονομία του UAV σε αποστολές που απαιτούν συχνές απογειώσεις και προσγειώσεις. Αυτό σημαίνει ότι το VTOL mode είναι ιδανικό μόνο για συγκεκριμένες περιπτώσεις και ότι η κύρια πτήση θα πρέπει να γίνεται στο Fixed-Wing mode για να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή διάρκεια πτήσης.
3. **Προκλήσεις Σταθερότητας Κατά τη Μετάβαση από VTOL σε Fixed-Wing Mode:** Αν και το σύστημα είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί και στα δύο modes, η μετάβαση από το VTOL mode στο Fixed-Wing mode παρουσιάζει τεχνικές προκλήσεις, καθώς απαιτείται ακριβής έλεγχος των tilt κινητήρων και των σερβομηχανισμών για την αποφυγή ταλαντώσεων. Αυτό καθιστά τη ρύθμιση του συστήματος ελέγχου πιο απαιτητική, ιδιαίτερα κατά την πρώτη φάση δοκιμών.
4. **Αναγκαιότητα Επιπλέον Βελτιστοποίησης:** Καθώς δεν έχουν πραγματοποιηθεί ακόμη δοκιμαστικές πτήσεις, η πραγματική απόδοση του συστήματος αναφορικά με την ενσωμάτωση αισθητήρων και την ακριβή κατανομή της ενέργειας παραμένει ένα ανοιχτό ερώτημα. Αναμένεται ότι οι δοκιμαστικές πτήσεις θα αναδείξουν επιπλέον

περιορισμούς, οι οποίοι θα πρέπει να αντιμετωπιστούν για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του UAV.

5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα και Εφαρμογές

2. Η έρευνα που έχει ήδη ολοκληρωθεί στον τομέα του σχεδιασμού και της κατασκευής ενός νέου προφίλ πτέρυγας (NACA 23012) (**Εικόνα 25**) με μεγαλύτερη χορδή και μήκος παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές για μελλοντικές εφαρμογές. Αυτός ο νέος σχεδιασμός της πτέρυγας επιτρέπει την εγκατάσταση υπερ διπλάσιου αριθμού φωτοβολταϊκών κυψελών τύπου C60, οδηγώντας σε ανάλογη αύξηση της προσδιδόμενης ενέργειας από το σύστημα.⁶Grubisic, N., & Pikovsky, D. (2019). *Advanced materials for UAV wing design: Carbon fiber and composite structures*. Journal of Aerospace Engineering, 33(5), 345-357. Retrieved from [ASCE Library](#).



Εικόνα 25

NACA 23012 πρωτότυπο σχέδιο CAD

Το προφίλ NACA 23012 προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα παραδοσιακά προφίλ, ειδικά σε περιπτώσεις όπου η χορδή και το μήκος της πτέρυγας είναι μεγαλύτερα. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτού του προφίλ είναι:

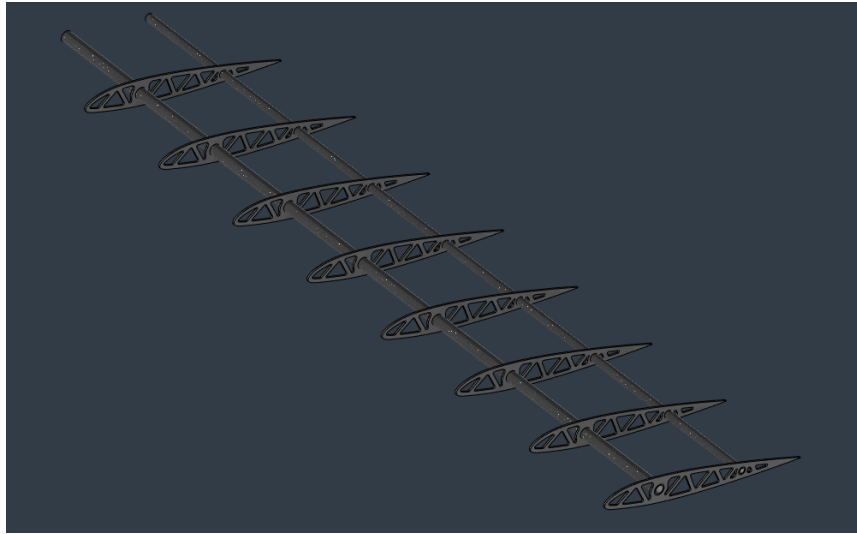
- **Βελτιωμένη αεροδυναμική απόδοση:** Το NACA 23012 παρέχει εξαιρετική απόδοση σε χαμηλές και μεσαίες γωνίες προσβολής, κάτι που το καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικό σε συνθήκες χαμηλών ταχυτήτων. Αυτή η απόδοση είναι κρίσιμη για αεροσκάφη που λειτουργούν με αυξημένη επιφάνεια πτέρυγας και θέλουν να διατηρήσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα.

- **Μεγαλύτερη ικανότητα ανύψωσης (Lift):** Η συγκεκριμένη γεωμετρία του NACA 23012 επιτρέπει μεγαλύτερη παραγωγή ανυψωτικής δύναμης, κάτι που είναι ιδανικό για την υποστήριξη μεγαλύτερου βάρους. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι σημαντικό για την εγκατάσταση πρόσθετων συστημάτων, όπως περισσότερες φωτοβολταϊκές κυψέλες ή μπαταρίες μεγαλύτερης χωρητικότητας.
- **Ανθεκτικότητα σε διαταραχές ροής:** Το NACA 23012 διατηρεί σταθερή απόδοση ακόμη και υπό συνθήκες διαταραχής της ροής ή σε περιπτώσεις που η πτέρυγα αντιμετωπίζει ακραίες αεροδυναμικές τάσεις. Αυτό βελτιώνει τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του συστήματος σε απαιτητικές συνθήκες πτήσης.
- **Χαμηλότερη αντίσταση (drag):** Παρά το γεγονός ότι προσφέρει αυξημένη ανυψωτική δύναμη, το NACA 23012 διατηρεί χαμηλή αντίσταση. Αυτό εξασφαλίζει μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και βελτιώνει την απόδοση πτήσης για μεγαλύτερη διάρκεια και ταχύτητα.

Αυτά τα πλεονεκτήματα καθιστούν το προφίλ NACA 23012 μια από τις κορυφαίες επιλογές για μελλοντική αναβάθμιση, ειδικά σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση περισσότερων φωτοβολταϊκών κυψελών και την χρήση πιο προηγμένων υλικών κατασκευής, όπως τα ανθρακονήματα, που αναφέρθηκαν προηγουμένως (**Εικόνα 26**).

Μία ακόμα σημαντική μελλοντική εφαρμογή που προκύπτει είναι η χρήση μπαταριών μεγαλύτερης χωρητικότητας, η οποία μπορεί να φτάσει έως και το υπερδιπλάσιο της τρέχουσας χωρητικότητας. Αυτό θα επιτρέψει την αποθήκευση μεγαλύτερων ποσοτήτων ενέργειας, βελτιώνοντας την αυτονομία του συστήματος, χωρίς όμως την ανάλογη αύξηση του βάρους του συστήματος. Η τεχνολογία στον τομέα των μπαταριών εξελίσσεται με τρόπο που καθιστά δυνατή τη μείωση της πυκνότητας μάζας, ενώ αυξάνεται η απόδοσή τους, γεγονός που ανοίγει νέες προοπτικές για πιο αποδοτικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Παράλληλα, η κατασκευή της πτέρυγας με ribs και main tubes από ανθρακονήματα βελτιώνει αισθητά τα μηχανικά χαρακτηριστικά της. Η χρήση ανθρακονημάτων καθιστά ολόκληρη την κατασκευή πολύ πιο σταθερή και ανθεκτική σε τάσεις και φορτία, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί την πτέρυγα εξαιρετικά ελαφριά. Αυτός ο συνδυασμός ελαφρότητας και αντοχής είναι καθοριστικός για τη βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης, επιτρέποντας μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης και βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα.



Εικόνα 26

Δείγμα αριστερού τμήματος νέας πτέρυγας με NACA 23012

Συνολικά, οι παραπάνω τεχνολογικές καινοτομίες ανοίγουν νέους ορίζοντες για την ανάπτυξη συστημάτων αεροπλοΐας με μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και αυξημένη ενεργειακή αποδοτικότητα, με εφαρμογές τόσο σε εμπορικά όσο και σε ερευνητικά αεροχήματα.

Πηγές

3. **SUNPOWER** (n.d.). *SunPower Solar Cell C60 Performance*. Διαθέσιμο στο http://eshop.terms.eu/_data/s_3386/files/1379942540-sunpower_c60_bin_ghi.pdf
4. **Mission Planner Initial Setup**. (n.d.). Διαθέσιμο στο <https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-initial-setup.html>
5. **ResearchGate** (n.d.). *Setup of Tricopter Style and Boundary Condition*. Διαθέσιμο στο https://www.researchgate.net/figure/Setup-of-tricopter-style-and-boundary-condition_fig3_346308282
6. **Svensson, P., & Johansson, T.** (2022). *Evaluation of solar powered systems in small scale UAV*. Mälardalen University, Sweden. Διαθέσιμο στο <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1713643/FULLTEXT01.pdf>
7. **Krause, D., & Al-Ani, S.** (2023). *Optimization of the solar energy storage capacity for a monitoring UAV*. Renewable Energy, 234, 52-63. Retrieved from [ScienceDirect](#).
8. **SunPower Corporation.** (2023). *SunPower Solar Cell C60 Performance*. Retrieved from [Terms](#).
9. **ArduPilot Development Team.** (2023). *Mission Planner Initial Setup*. Retrieved from [ArduPilot](#).
10. **Wikner, J., & Olsson, R.** (2022). *Evaluation of solar powered systems in small scale UAV*. University of Gothenburg, Master's Thesis. Retrieved from [DiVA Portal](#).
11. **He, W., & Huang, J.** (2020). *Development of high-efficiency brushless motors for UAV applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(8), 6718-6725. Retrieved from IEEE Xplore.
12. **Matek Systems.** (2021). *FX-405 Flight Controller: User Manual*. Retrieved from Matek Official Website.
13. **Bambulab.** (2023). *Bambulab X1 Carbon: 3D Printer Specifications*. Retrieved from Bambulab.
14. **Grubisic, N., & Pikovsky, D.** (2019). *Advanced materials for UAV wing design: Carbon fiber and composite structures*. Journal of Aerospace Engineering, 33(5), 345-357. Retrieved from [ASCE Library](#).
15. **Li, X., & Zhang, Y.** (2021). *Enhanced energy storage for UAV applications: Lithium-ion battery advancements*. International Journal of Energy Research, 45(2), 194-208. Retrieved from [Wiley Online Library](#).

16. **National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2022).** *Photovoltaic Cell Performance Characteristics*. Retrieved from [NREL](#).
17. **U-blox. (2023).** *M8N GPS & Compass Integration for UAVs*. Retrieved from [U-blox Documentation](#).