



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΘΕΜΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές σχεδιασμού
για μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα
μεγάλου ύψους και μεγάλης αντοχής



ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ : **ΜΗΛΙΑΡΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ**

ΑΜ: 43889

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. ΧΡΗΣΤΟΣ ΔΡΟΣΟΣ

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024

**Ενεργειακά αποδοτικές στρατηγικές σχεδιασμού για μη
επανδρωμένα εναέρια οχήματα μεγάλου ύψους και μεγάλης
αντοχής**

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract	4
Εισαγωγή	5
Κεφάλαιο 1: Αεροδυναμικός σχεδιασμός και συστήματα πρόωσης	7
1.1 Βασικές αρχές της αεροδυναμικής στα UAVs.....	7
1.2 Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση των πτερυγίων	10
1.3 Τεχνικές μείωσης της αεροδυναμικής αντίστασης	12
1.4 Αξιοποίηση ελαφρών υλικών.....	14
1.5 Τύποι συστημάτων πρόωσης για UAV HALE.....	16
1.5.1 Ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες πρόωσης	17
1.5.2 Υβριδικά συστήματα πρόωσης	19
Κεφάλαιο 2: Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και αυτονομίας	21
2.1 Σημασία των διαφόρων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στα UAV HALE	21
2.2 Τεχνολογίες μπαταριών	23
2.3 Υπερπυκνωτές και κυψέλες καυσίμου.....	25
2.4 Συστήματα διαχείρισης ενέργειας	27
2.5 Συστήματα αυτόνομης πλοήγησης.....	30
2.6 Ενσωμάτωση αισθητήρων	32
2.7 Επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο	34
2.8 Εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης.....	37
Κεφάλαιο 3: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και βιωσιμότητα.....	40
3.1 Περιβαλλοντικές εκτιμήσεις στο σχεδιασμό UAV.....	40
3.2 Βιώσιμες επιλογές υλικών.....	41
3.3 Μείωση θορύβου και εκπομπών.....	43
3.4 Αξιολόγηση του κύκλου ζωής.....	45
Κεφάλαιο 4: Μελέτες περίπτωσης επιτυχημένων εφαρμογών HALE UAV	48
4.1 Global Hawk	48
4.2 Airbus Zephyr	49
4.3 Orion	51
4.4 Scaled Composites Proteus	54
Συμπέρασμα.....	57
Βιβλιογραφία	60

Περίληψη

Η παρούσα διερεύνησε στρατηγικές ενεργειακά αποδοτικού σχεδιασμού για μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) μεγάλου υψομέτρου και μεγάλης αντοχής (HALE). Αναλύθηκαν οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των UAV, συμπεριλαμβανομένης της αεροδυναμικής βελτιστοποίησης, των συστημάτων πρόωσης και των προηγμένων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Η μελέτη τόνισε τη σημασία των αρχών αεροδυναμικού σχεδιασμού, όπως η βελτιστοποίηση της πτέρυγας και η μείωση της αντίστασης, μαζί με τη χρήση ελαφρών υλικών, όπως τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP), για την ενίσχυση της απόδοσης των UAV. Εξετάστηκαν διάφορες τεχνολογίες πρόωσης, συμπεριλαμβανομένων των ηλιακών-ηλεκτρικών, υβριδικών συστημάτων και κυψελών καυσίμου υδρογόνου, ως προς τις δυνατότητές τους να μεγιστοποιήσουν τη χρήση ενέργειας και να ελαχιστοποιήσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η εργασία συζήτησε επίσης την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών μπαταριών και συστημάτων διαχείρισης ενέργειας για τη βελτίωση της επιχειρησιακής αυτονομίας. Επιπλέον, τονίστηκε η σημασία των πρακτικών βιώσιμου σχεδιασμού και των τεχνικών μείωσης του θορύβου για τη διασφάλιση φιλικών προς το περιβάλλον λειτουργιών UAV. Τέλος, αναλύθηκαν 4 μελέτες περίπτωσης για την καλύτερη κατανόηση του θεωρητικού πλαισίου. Η εργασία ολοκληρώθηκε με πληροφορίες για τις μελλοντικές τάσεις, όπως η ενσωμάτωση της TN, οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης και η προσθετική κατασκευή, που διαμορφώνουν την επόμενη γενιά ενεργειακά αποδοτικών UAV.

Λέξεις-κλειδιά: μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, UAV, βιωσιμότητα, ενέργεια

Abstract

This paper investigated energy-efficient design strategies for high-altitude, high-endurance unmanned aerial vehicles (UAVs) (HALE). Key factors affecting UAV performance were analyzed, including aerodynamic optimization, propulsion systems, and advanced energy storage technologies. The study highlighted the importance of aerodynamic design principles, such as wing optimization and drag reduction, along with the use of lightweight materials, such as carbon fiber reinforced polymers (CFRP), to enhance UAV performance. Various propulsion technologies, including solar-electric, hybrid systems and hydrogen fuel cells, were examined for their potential to maximise energy use and minimise environmental impact. The paper also discussed the integration of advanced battery technologies and energy management systems to improve operational autonomy. In addition, the importance of sustainable design practices and noise reduction techniques to ensure environmentally friendly UAV operations was highlighted. Finally, 4 flyover studies were analysed to better understand the theoretical framework. The paper concluded with insights into future trends, such as AI integration, solid-state batteries and additive manufacturing, that are shaping the next generation of energy-efficient UAVs.

Keywords: unmanned aerial vehicles, UAV, sustainability, energy

Εισαγωγή

Οι ραγδαίες εξελίξεις στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV) έχουν επηρεάσει σημαντικά διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένων των στρατιωτικών επιχειρήσεων, της επιτήρησης, της περιβαλλοντικής παρακολούθησης και άλλων. Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, ιδίως εκείνα που έχουν σχεδιαστεί για αποστολές μεγάλου υψομέτρου και μεγάλης αντοχής (HALE), προσφέρουν απaráμιλλες δυνατότητες για εκτεταμένες επιχειρήσεις σε ποικίλα περιβάλλοντα. Αυτά τα UAV είναι ικανά να διατηρούν διαρκείς πτήσεις σε μεγάλα ύψη, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές όπως η επιτήρηση συνόρων, η παρακολούθηση δασών και η συλλογή επιστημονικών δεδομένων. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των UAV HALE εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από καινοτόμες στρατηγικές σχεδιασμού που βελτιώνουν τις αεροδυναμικές επιδόσεις, τα συστήματα πρόωσης, την αποθήκευση ενέργειας και τη συνολική επιχειρησιακή τους απόδοση. Δεδομένης της αυξανόμενης απαίτησης για UAV να αναλαμβάνουν σύνθετα καθήκοντα με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, η διερεύνηση στρατηγικών ενεργειακά αποδοτικού σχεδιασμού καθίσταται ζωτικής σημασίας. Οι στρατηγικές αυτές περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση του αεροδυναμικού σχεδιασμού, των τεχνολογιών πρόωσης, των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και της χρήσης ελαφρών υλικών, με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερης διάρκειας πτήσης και υψηλότερης χωρητικότητας ωφέλιμου φορτίου UAV (Panagiotou et al., 2016).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση στρατηγικών ενεργειακά αποδοτικού σχεδιασμού για UAV HALE. Στο επίκεντρο βρίσκεται η παροχή μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης των βασικών παραγόντων που επηρεάζουν τις επιδόσεις των UAV, συμπεριλαμβανομένων των αεροδυναμικών αρχών, της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού της πτέρυγας, των συστημάτων πρόωσης και των προηγμένων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Με την εξέταση των σημερινών εξελίξεων σε αυτούς τους τομείς, το παρόν έγγραφο έχει ως στόχο να αναδείξει τη σημασία μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης σχεδιασμού που όχι μόνο βελτιώνει τη λειτουργική απόδοση των UAV αλλά και επεκτείνει τις δυνατότητες αποστολής τους. Επιπλέον, η μελέτη αυτή εμβαθύνει στις τελευταίες τεχνολογικές καινοτομίες, όπως η ενσωμάτωση ελαφρών υλικών και υβριδικών συστημάτων πρόωσης, για να καταδείξει τις δυνατότητές τους στην ενίσχυση της αντοχής και των επιδόσεων των UAV HALE. Η έρευνα διερευνά επίσης τον ρόλο των αυτόνομων συστημάτων, της ενσωμάτωσης αισθητήρων και της επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στη βελτίωση της επιχειρησιακής αυτονομίας και της αποτελεσματικότητας των UAVs, διασφαλίζοντας ότι τα

αεροσκάφη αυτά μπορούν να αποδίδουν αποτελεσματικά σε διάφορες αποστολές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η δομή της παρούσας εργασίας είναι οργανωμένη σε διάφορα βασικά κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο διερευνά τον αεροδυναμικό σχεδιασμό και τα συστήματα πρόωσης, συζητώντας τις θεμελιώδεις αεροδυναμικές αρχές, τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της πτέρυγας και τις τεχνικές για τη μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης. Καλύπτει επίσης τη χρήση ελαφρών υλικών για τη βελτίωση των αεροδυναμικών επιδόσεων. Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και την αυτονομία, τονίζοντας τη σημασία των διαφόρων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας για την ενίσχυση της αντοχής των UAV HALE. Το κεφάλαιο αυτό εξετάζει προηγμένες τεχνολογίες μπαταριών, υπερπυκνωτές, κυψέλες καυσίμου και συστήματα διαχείρισης ενέργειας που διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του UAV. Το τρίτο κεφάλαιο ασχολείται με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο και τη βιωσιμότητα, αξιολογώντας τις επιλογές βιώσιμων υλικών, τις τεχνικές μείωσης του θορύβου και την αξιολόγηση του κύκλου ζωής για τη διασφάλιση φιλικών προς το περιβάλλον λειτουργιών UAV. Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει μελέτες περιπτώσεων επιτυχημένων εφαρμογών HALE UAV για να παρέχει παραδείγματα από τον πραγματικό κόσμο αυτών των αρχών σχεδιασμού στην πράξη. Οι καταληκτικές ενότητες ενσωματώνουν αυτά τα στοιχεία σχεδιασμού, παρουσιάζοντας μια ολιστική θεώρηση του σχεδιασμού ενεργειακά αποδοτικών HALE UAV ικανών να εκτελούν αποστολές μεγάλης διάρκειας και μεγάλου ύψους. Η εργασία ολοκληρώνεται με πληροφορίες για τις μελλοντικές τάσεις και τις πιθανές τεχνολογικές εξελίξεις στον σχεδιασμό UAV, εστιάζοντας στη συνεχή εξέλιξη των ενεργειακά αποδοτικών στρατηγικών για την επόμενη γενιά UAV.

Κεφάλαιο 1: Αεροδυναμικός σχεδιασμός και συστήματα πρόωσης

1.1 Βασικές αρχές της αεροδυναμικής στα UAVs

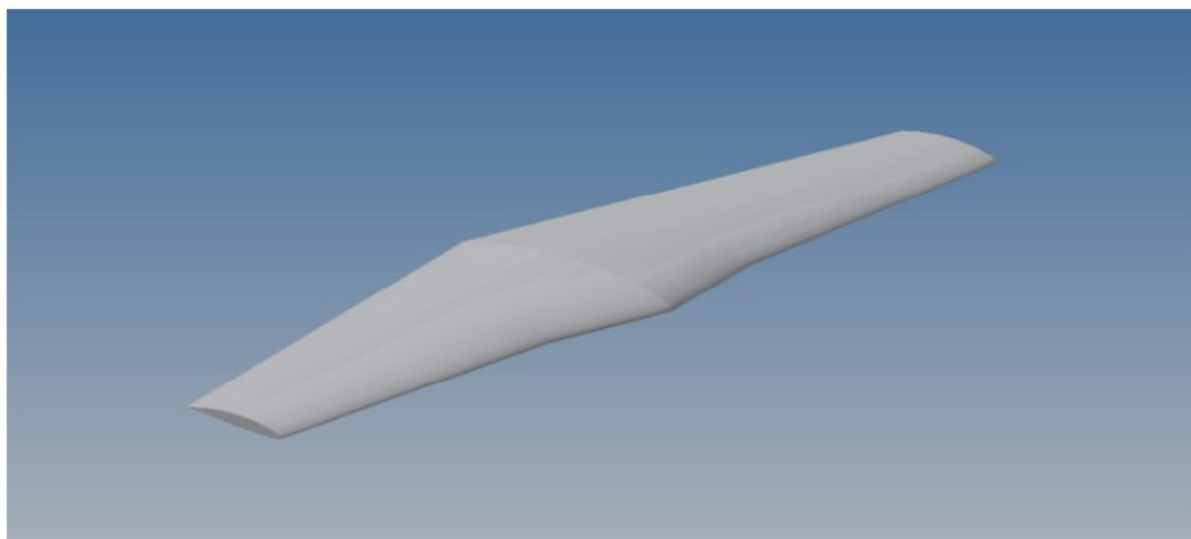
Οι βασικές αρχές της αεροδυναμικής στα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) περιστρέφονται γύρω από τις δυνάμεις της άντωσης και της αντίστασης. Η ανύψωση δημιουργείται από τη διαφορά πίεσης μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας των φτερών του UAV, η οποία επιτρέπει στο όχημα να υπερνικήσει τη βαρύτητα και να διατηρήσει το ύψος του. Από την άλλη πλευρά, η αντίσταση δημιουργείται καθώς το UAV κινείται στον αέρα. Ως εκ τούτου, ο αποτελεσματικός αεροδυναμικός σχεδιασμός είναι απαραίτητος για την ελαχιστοποίηση της αντίστασης και την ενίσχυση της ανύψωσης, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη συνολική απόδοση και αποδοτικότητα του UAV (Panagiotou et al., 2016).

Επιπλέον, ο σχεδιασμός της αεροτομής, το σχήμα της διατομής της πτέρυγας, είναι καθοριστικός για την αεροδυναμική απόδοση. Διαφορετικοί σχεδιασμοί αεροτομής επηρεάζουν σημαντικά τον λόγο ανύψωσης προς οπισθέλκουσα, έναν κρίσιμο παράγοντα για την απόδοση του UAV. Για παράδειγμα, το project Hellenic Civil Unmanned Aerial Vehicle (HCUAV) χρησιμοποίησε μια αεροτομή NASA NLF(1)-1015 για την κύρια πτέρυγα για να επιτύχει χαμηλότερους συντελεστές αντίστασης και υψηλότερη αεροδυναμική απόδοση (Εικ. 1) (Panagiotou et al., 2016). Η επιλογή αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της επιλογής των κατάλληλων σχημάτων αεροτομής για την κάλυψη συγκεκριμένων απαιτήσεων της αποστολής.



Εικόνα 1. Ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα του project Hellenic Civil Unmanned Aerial Vehicle (HCUAV) (Combat-Master, 2020)

Εκτός από το σχεδιασμό της αεροτομής, η διαμόρφωση και η γεωμετρία των πτερύγων παίζουν σημαντικό ρόλο στην αεροδυναμική απόδοση. Τα πτερύγια με υψηλό λόγο πλευρών, οι οποίες είναι μακριές και στενές, παρέχουν γενικά καλύτερη αεροδυναμική απόδοση μειώνοντας την επαγόμενη αντίσταση (Εικ. 2). Ο σχεδιασμός του HCUAV περιελάμβανε τη δοκιμή διαφόρων διαμορφώσεων για τη βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών επιδόσεων, όπως το άνοιγμα των φτερών, το μήκος χορδής και ο λόγος πλευρών, διασφαλίζοντας ότι το όχημα θα μπορούσε να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στις επιχειρησιακές απαιτήσεις του (Panagiotou et al., 2016).



Εικόνα 2. Τρισδιάστατη αναπαράσταση της γεωμετρίας της κύριας πτέρυγας του HCUAV

Εξίσου σημαντικοί είναι ο λόγος ώσης προς βάρος και η φόρτιση της πτέρυγας. Ο λόγος ώσης προς βάρος, ο οποίος είναι ο λόγος της ώσης του UAV προς το βάρος του, καθορίζει την ικανότητά του να ανεβαίνει και να επιταχύνει. Εν τω μεταξύ, το φορτίο πτέρυγας, ή το βάρος που υποστηρίζεται από κάθε μονάδα επιφάνειας της πτέρυγας, επηρεάζει τα χαρακτηριστικά πτήσης του UAV, συμπεριλαμβανομένης της ταχύτητας ακινητοποίησης και της ευελιξίας του. Και οι δύο παράμετροι πρέπει να είναι λεπτομερώς ρυθμισμένες ώστε να διασφαλίζεται ότι το UAV μπορεί να εκτελεί αποτελεσματικά τις προβλεπόμενες λειτουργίες του (Silkon & Zirka, 2014).

Επιπρόσθετα, η σταθερότητα και ο έλεγχος είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή λειτουργία των UAV. Αυτό περιλαμβάνει τον σχολαστικό σχεδιασμό του εμπρόσθιου τμήματος (συγκρότημα ουράς) και των επιφανειών ελέγχου, όπως τα πηδάλια, οι ανυψωτήρες και τα πηδάλια. Το έργο HCUAV, για παράδειγμα, χρησιμοποίησε μια διαμόρφωση ανεστραμμένης ουράς V με βραχίονα, η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα διαφορετικών σχεδιασμών ουράς για την ενίσχυση τόσο της σταθερότητας όσο και του ελέγχου. Αυτή η

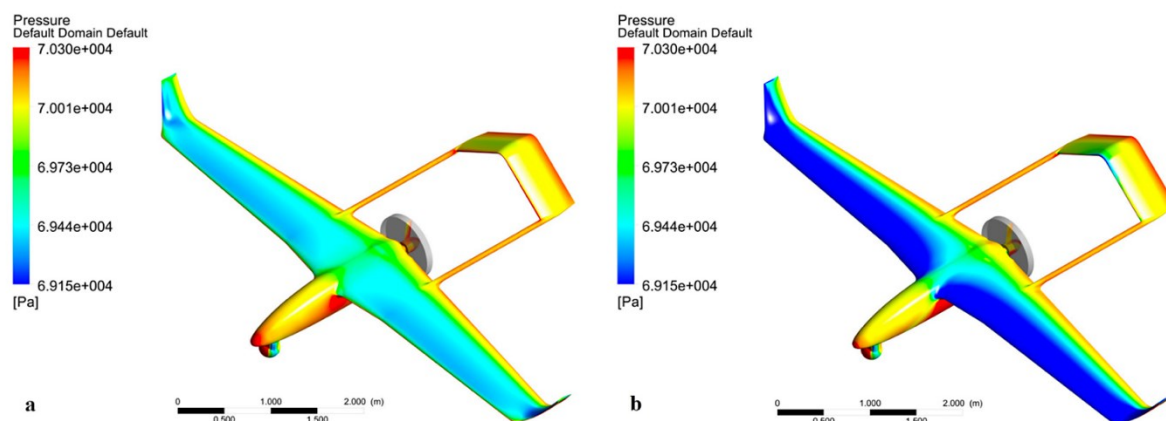
σχεδιαστική επιλογή αναδεικνύει την ανάγκη βελτιστοποίησης των επιφανειών ελέγχου για τη διατήρηση της σταθερότητας σε διάφορες συνθήκες πτήσης (Zuo et al., 2022).

Επιπλέον, οι προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) παίζουν καθοριστικό ρόλο στον αεροδυναμικό σχεδιασμό των UAV. Αυτές οι προσομοιώσεις μοντελοποιούν και προβλέπουν την αεροδυναμική συμπεριφορά, βοηθώντας στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού με την ανάλυση παραγόντων όπως η άνωση, η αντίσταση και ο διαχωρισμός της ροής υπό διάφορες συνθήκες πτήσης. Το έργο HCUAV χρησιμοποίησε εκτενώς το CFD για την επικύρωση και την τελειοποίηση των αεροδυναμικών μοντέλων του, διασφαλίζοντας ότι ο σχεδιασμός πληρούσε τους επιθυμητούς στόχους απόδοσης (Sreelakshmi & Jagadeeswar, 2018).

Ο σχεδιασμός των UAV πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη τις ειδικές απαιτήσεις της αποστολής, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τον αεροδυναμικό σχεδιασμό τους (Finger, Braun & Bil, 2018). Για παράδειγμα, οι αποστολές μεγάλης διάρκειας απαιτούν σχεδιασμούς που μεγιστοποιούν την αποδοτικότητα καυσίμου και ελαχιστοποιούν την αντίσταση, ενώ οι αποστολές υψηλής ταχύτητας μπορεί να δίνουν προτεραιότητα σε διαφορετικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά. Το HCUAV σχεδιάστηκε ειδικά για αποστολές όπως η παρακολούθηση των δασών και η επιτήρηση των συνόρων, οι οποίες απαιτούν υψηλή αντοχή και διάρκεια (Panagiotou et al., 2016).

Ακόμη, η διαδικασία σχεδιασμού των UAV είναι συνήθως επαναληπτική, περιλαμβάνοντας επανειλημμένες προσαρμογές και βελτιστοποιήσεις. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη βελτίωση των εκτιμήσεων του βάρους, την προσαρμογή των αεροδυναμικών παραμέτρων και τη διενέργεια αξιολογήσεων επιδόσεων, ώστε να διασφαλιστεί ότι ο τελικός σχεδιασμός πληροί όλες τις επιχειρησιακές απαιτήσεις. Μια τέτοια επαναληπτική προσέγγιση διασφαλίζει ότι όλες οι πτυχές της απόδοσης του UAV βελτιστοποιούνται πριν από την οριστικοποίηση (Panagiotou et al., 2016).

Τέλος, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό UAV, καθώς αυτά λειτουργούν υπό διάφορες συνθήκες (Duffy et al., 2017). Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, την πίεση και την υγρασία, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την αεροδυναμική απόδοση (Εικ. 3). Το HCUAV, για παράδειγμα, σχεδιάστηκε για να λειτουργεί σε υψόμετρο έως και 5000 μέτρα, γεγονός που απαιτεί συγκεκριμένες σχεδιαστικές προσαρμογές για τη διατήρηση της απόδοσης σε διαφορετικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (Panagiotou et al., 2016).



Εικόνα 3. Περιγράμματα πίεσης στην επιφάνεια του HC UAV σε (α) 0 και (β) 12 μοίρες γωνίας προσβολής (Panagiotou et al., 2016)

Συμπερασματικά, οι αρχές της αεροδυναμικής στα UAV είναι αλληλένδετες και διασφαλίζουν συλλογικά την αποτελεσματική και ασφαλή λειτουργία τους. Από την επιλογή της αεροτομής έως τις προσομοιώσεις CFD, κάθε πτυχή διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη συνολική διαδικασία σχεδιασμού, προσαρμοσμένη ώστε να ανταποκρίνεται στις συγκεκριμένες απαιτήσεις της αποστολής και στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η συνεχής βελτιστοποίηση αυτών των στοιχείων είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή ανάπτυξη και απόδοση των UAV σε διάφορες εφαρμογές.

1.2 Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση των πτερυγίων

Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των πτερυγίων των UAV (μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων) περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες για τη βελτίωση της αεροδυναμικής απόδοσης, της δομικής ακεραιότητας και της συνολικής απόδοσης. Η διαδικασία ξεκινά με τον καθορισμό των επιχειρησιακών απαιτήσεων του UAV, όπως η αντοχή, η χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου και το προφίλ αποστολής. Με βάση αυτές τις απαιτήσεις, οι φάσεις του εννοιολογικού και προκαταρκτικού σχεδιασμού καθορίζουν τη βασική γεωμετρία των πτερυγίων, την επιλογή της αεροτομής και τα δομικά υλικά.

Μια κρίσιμη πτυχή του σχεδιασμού της πτέρυγας είναι η ελαχιστοποίηση της αντίστασης με παράλληλη μεγιστοποίηση της ανύψωσης. Η αεροδυναμική απόδοση της πτέρυγας καθορίζεται κυρίως από τον λόγο ανύψωσης προς αντίσταση (L/D). Για παράδειγμα, οι Panagiotou et al. (2014) χρησιμοποίησαν την Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) για να βελτιστοποιήσουν τους σχεδιασμούς πτερυγίων σε ένα UAV μεσαίου ύψους και μεγάλης αντοχής (MALE). Συγκρίνοντας διάφορες διαμορφώσεις winglet, βελτίωσαν την

αεροδυναμική απόδοση προσαρμόζοντας παραμέτρους όπως η γωνία κλίσης, η οποία με τη σειρά της βελτίωσε τον συνολικό χρόνο πτήσης του UAV κατά περίπου 10% (Panagiotou et al., 2014).

Ο δομικός σχεδιασμός των πτερύγων UAV συχνά ενσωματώνει σύνθετα υλικά για την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ αντοχής και βάρους. Οι Długosz και Klimek (2018) διερευνήσαν τη βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων μιας δομής πτέρυγας UAV με χρήση σύνθετων υλικών. Η προσέγγισή τους αποσκοπούσε στην ενίσχυση της αντοχής και της ακαμψίας με ταυτόχρονη μείωση του βάρους. Χρησιμοποίησαν εξελικτικούς αλγορίθμους για να περιηγηθούν στο σύνθετο τοπίο βελτιστοποίησης που χαρακτηρίζεται από αντικρουόμενους στόχους, όπως η ελαχιστοποίηση της τάσης και της μετατόπισης με ταυτόχρονη μείωση του όγκου της πτέρυγας (Długosz & Klimek, 2018).

Η αριθμητική μοντελοποίηση και οι προσομοιώσεις διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα, οι Długosz και Klimek (2018) χρησιμοποίησαν προσομοιώσεις με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για να επικυρώσουν τους σχεδιασμούς τους έναντι πειραματικών δεδομένων. Δημιούργησαν ένα λεπτομερές αριθμητικό μοντέλο που περιλάμβανε διαφορετικά σύνθετα υλικά και το επαλήθευσαν μέσω δοκιμών κάμψης τριών σημείων. Αυτό εξασφάλισε ότι οι βελτιστοποιημένοι σχεδιασμοί τους πληρούσαν τα απαιτούμενα κριτήρια δομικής απόδοσης (Długosz & Klimek, 2018).

Επιπλέον, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης όπως ο γενετικός αλγόριθμος μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης II (NSGA-II) χρησιμοποιούνται συνήθως για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων στο σχεδιασμό των πτερυγίων UAV. Αυτοί οι αλγόριθμοι βοηθούν στον εντοπισμό των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων, όπου οι βελτιώσεις σε έναν στόχο μπορεί να οδηγήσουν σε συμβιβασμούς σε άλλους. Με τη χρήση τέτοιων αλγορίθμων, οι σχεδιαστές μπορούν να δημιουργήσουν ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων από τις οποίες μπορεί να επιλεγεί ο καλύτερος συμβιβασμός με βάση τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της αποστολής (Hinojosa et al., 2018).

Συμπερασματικά, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των πτερύγων UAV περιλαμβάνουν μια διεπιστημονική προσέγγιση που ενσωματώνει την αεροδυναμική απόδοση, τη δομική ακεραιότητα και προηγμένες τεχνικές βελτιστοποίησης. Αξιοποιώντας υπολογιστικά εργαλεία και αλγορίθμους βελτιστοποίησης, οι μηχανικοί μπορούν να αναπτύξουν πτέρυγες UAV που πληρούν αυστηρά κριτήρια επιδόσεων, ενισχύοντας τελικά τις επιχειρησιακές δυνατότητες και την αποτελεσματικότητα του UAV.

1.3 Τεχνικές μείωσης της αεροδυναμικής αντίστασης

Η μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση των επιδόσεων και της αποδοτικότητας των αεροσκαφών. Έχουν αναπτυχθεί και δοκιμαστεί διάφορες τεχνικές, τόσο παθητικές όσο και ενεργητικές, για την ελαχιστοποίηση των δυνάμεων αντίστασης σε διάφορα εξαρτήματα του αεροσκάφους. Οι αεροτομές φυσικής στρωτής ροής (NLF) έχουν σχεδιαστεί για να καθυστερούν τη μετάβαση του οριακού στρώματος από τη στρωτή στην τυρβώδη ροή, μειώνοντας σημαντικά την αντίσταση τριβής του δέρματος. Αυτές οι αεροτομές μπορούν να αυξήσουν τη στρωτή περιοχή πάνω από την πτέρυγα μέχρι το 60% του μήκους χορδής, γεγονός που μειώνει την αντίσταση τριβής σε χαμηλές γωνίες προσβολής (Panagiotoy, 2020). Τα Riblets, μικρο-κοιλώματα ευθυγραμμισμένα με τη διεύθυνση της ροής, είναι μια άλλη παθητική τεχνική που είναι γνωστό ότι μειώνει την τυρβώδη αντίσταση τριβής δέρματος μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά του οριακού στρώματος στην περιοχή κοντά στο τοίχωμα. Εργαστηριακές συνθήκες έχουν δείξει ότι τα riblets μπορούν να επιτύχουν μείωση της αντίστασης κατά 8-10% (Bliamis et al., 2022). Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά όταν εφαρμόζονται σε θέσεις όπως η κύρια πτέρυγα, η άτρακτος και το εμπρόσθιο μέρος, όπου το οριακό στρώμα μεταβαίνει από στρωτή σε τυρβώδη ροή (Panagiotoy, 2020; Cacciatori et al., 2022).

Οι ενεργές τεχνικές ελέγχου της ροής περιλαμβάνουν συσκευές υψηλής ανύψωσης, όπως πτερύγια ή πτερύγια ουράς, τα οποία ενισχύουν την παραγωγή ανύψωσης και τον μέγιστο συντελεστή ανύψωσης. Αυτές οι συσκευές καθυστερούν το ακινητοποιημένο αεροσκάφος και μειώνουν την ανάγκη για χαμηλό φορτίο πτέρυγας κατά την απογείωση και την προσγείωση, αν και συνοδεύονται από σημαντικές ποινές βάρους. Τα συστήματα Variable Camber (VC), που χρησιμοποιούν πτερύγια της ουράς για να ρυθμίζουν την κατανομή της πίεσης της αεροτομής ή της πτέρυγας, βελτιστοποιούν την αεροδυναμική απόδοση για συνθήκες εκτός σχεδιασμού. Αυτό το σύστημα μπορεί να βελτιώσει τον λόγο ανύψωσης προς οπισθέλκουσα κατά 2-3% κατά τη διάρκεια των συνθηκών πλεύσης, αλλά είναι λιγότερο κατάλληλο για μεσαίου μεγέθους UAV λόγω του βάρους (Panagiotoy, 2020).

Τα Winglets χρησιμοποιούνται εκτενώς στο σχεδιασμό αεροσκαφών για να μετριάσουν την επίδραση των στροβίλων στην άκρη των πτερύγων, μειώνοντας έτσι την επαγόμενη αντίσταση. Τα winglets μπορούν να αποφέρουν σημαντικές βελτιώσεις στην αεροδυναμική απόδοση, ειδικά για UAV όπου η επαγόμενη αντίσταση παίζει κυρίαρχο ρόλο λόγω της υψηλότερης φόρτισης των άκρων των πτερύγων και του περιορισμένου ανοίγματος των πτερύγων (Cacciatori et al., 2022). Τα βελτιστοποιημένα winglets μπορούν να οδηγήσουν

σε μείωση της συνολικής αντίστασης κατά περισσότερο από 10%, αν και η γεωμετρία τους πρέπει να σχεδιαστεί και να δοκιμαστεί προσεκτικά (Cacciatori et al., 2022). Μια άλλη τεχνική περιλαμβάνει χρώματα μείωσης της αντίστασης που εφαρμόζονται στην επιφάνεια του αεροσκάφους για να αλληλεπιδρούν με τη ροή και να μειώνουν την αντίσταση τριβής. Ωστόσο, η απόδοσή τους μπορεί να επιδεινωθεί με την πάροδο του χρόνου και επί του παρόντος έχουν χαμηλό επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας (Panagiotoy, 2020).

Η ρευματοποίηση του σχήματος της ατράκτου μπορεί να μειώσει τη συμβολή της στην αντίσταση κατά περίπου 10-15% της συνολικής δύναμης αντίστασης. Αυτό απαιτεί συχνά πολύπλοκα σχήματα που μπορούν να αντιμετωπιστούν με προηγμένα σύνθετα υλικά και σύγχρονες τεχνικές κατασκευής (Panagiotoy, 2020). Το εμπρόσθιο περύγιο και άλλα εξαρτήματα, όπως τα gimbals της κάμερας και τα συστήματα ψύξης, συμβάλλουν επίσης στη συνολική αντίσταση. Η βελτιστοποίηση αυτών των εξαρτημάτων μέσω σχεδιαστικών αλλαγών και αεροδυναμικών βελτιώσεων μπορεί να μειώσει περαιτέρω τη συνολική αντίσταση (Panagiotoy, 2020). Επιπλέον, η μείωση της οπισθέλκουσας με riblets έχει δοκιμαστεί ειδικά σε ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV) σταθερής πτέρυγας, χαμηλής ταχύτητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα riblets που εφαρμόζονται σε διάφορα μέρη της επιφάνειας του αεροσκάφους μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της αντίστασης. Για παράδειγμα, η κάλυψη της άνω επιφάνειας της πτέρυγας με riblets πέτυχε μείωση της συνολικής αντίστασης κατά 1,7% με κάλυψη μόνο 29% της επιφάνειας, ενισχύοντας τη σχέση κόστους-οφέλους αυτής της τεχνικής (Cacciatori et al., 2022).

Η αποτελεσματικότητα των riblets στις επιδόσεις ενός UAV μεσαίου ύψους μεγάλης αντοχής (MALE) έχει επίσης εξεταστεί με τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα riblets που εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες θέσεις, όπως η κύρια πτέρυγα, η άτρακτος και το εμπρόσθιο περύγιο, θα μπορούσαν να προσφέρουν όφελος από τη μείωση της αντίστασης τόσο κατά τη διάρκεια των τμημάτων πτήσης σε στάση αναμονής όσο και κατά τη διάρκεια πτήσης σε πτήση ταξιδιού. Το όφελος από τη μείωση της αντίστασης παρουσιάστηκε με σαφήνεια στα πολικά διαγράμματα αντίστασης του αεροσκάφους, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα αύξησης των επιδόσεων πτήσης όσον αφορά την αντοχή και την αύξηση του βάρους του ωφέλιμου φορτίου (Bliamis et al., 2022).

Αυτές οι τεχνικές μείωσης της αεροδυναμικής αντίστασης στοχεύουν συλλογικά στη βελτίωση των επιδόσεων του αεροσκάφους μέσω της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου και της αύξησης της αεροδυναμικής απόδοσης. Ενώ ορισμένες τεχνικές χρησιμοποιούνται ήδη, άλλες βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικά στάδια, παρουσιάζοντας υποσχέσεις για μελλοντικές

εφαρμογές τόσο σε επανδρωμένα όσο και σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Panagiotoy, 2020), (Cacciatori et al., 2022; Bliamis et al., 2022).

1.4 Αξιοποίηση ελαφρών υλικών

Η χρήση ελαφρών υλικών στην κατασκευή μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) είναι μια κρίσιμη πτυχή που επηρεάζει σημαντικά τις επιδόσεις, την αποδοτικότητα και τις επιχειρησιακές τους δυνατότητες. Τα UAV, τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των στρατιωτικών, της επιτήρησης και της παρακολούθησης του περιβάλλοντος, επωφελούνται σε μεγάλο βαθμό από την ενσωμάτωση προηγμένων σύνθετων υλικών. Τα υλικά αυτά προσφέρουν έναν μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων, όπως υψηλή αντοχή, χαμηλό βάρος και εξαιρετική ανθεκτικότητα, καθιστώντας τα ιδανικά για αεροδιαστημικές εφαρμογές.

Ένα από τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή UAV είναι το πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP). Το CFRP προτιμάται για την ανώτερη αναλογία αντοχής προς βάρος σε σύγκριση με παραδοσιακά υλικά όπως το αλουμίνιο και ο χάλυβας. Αυτή η υψηλή αντοχή και το χαμηλό βάρος είναι ιδιαίτερα ευεργετικά για τα UAV, καθώς επιτρέπουν μεγαλύτερους χρόνους πτήσης, υψηλότερες χωρητικότητες ωφέλιμου φορτίου και βελτιωμένη ευελιξία. Σύμφωνα με τους Khan et al. (2021), η ενσωμάτωση σύνθετων υλικών από ίνες άνθρακα στα UAVs όχι μόνο βελτιώνει τη δομική τους ακεραιότητα, αλλά και τις θερμομηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση των επιδόσεων υπό ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες (Khan et al., 2021).

Για την κατασκευή αυτών των σύνθετων υλικών χρησιμοποιείται συνήθως η τεχνική του κενού. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την τοποθέτηση ινών άνθρακα σε ένα καλούπι και στη συνέχεια τον εμποτισμό τους με εποξειδική ρητίνη. Στη συνέχεια σφραγίζεται σε μια σακούλα κενού και σκληραίνεται, γεγονός που βοηθά στην επίτευξη βέλτιστης κατανομής της ρητίνης και στην ελαχιστοποίηση των κενών εντός της σύνθετης δομής. Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική και οικονομικά αποδοτική, καθιστώντας την κατάλληλη για την παραγωγή εξαρτημάτων υψηλής ποιότητας για UAV. Τα σύνθετα υλικά που προκύπτουν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες αντοχές σε εφελκυσμό και κάμψη, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές όπου απαιτείται τόσο ελαφρύ βάρος όσο και υψηλή αντοχή.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης ελαφρών υλικών όπως το CFRP στα UAV είναι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Δεδομένου ότι τα UAV συχνά τροφοδοτούνται από ηλεκτρικές μπαταρίες ή μικρούς κινητήρες, η μείωση του συνολικού

βάρους μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Αυτή η αποδοτικότητα μεταφράζεται σε μεγαλύτερη διάρκεια αποστολής και στη δυνατότητα μεταφοράς πρόσθετου εξοπλισμού ή αισθητήρων χωρίς να διακυβεύεται η απόδοση. Οι Utami κ.ά. (2022) τόνισαν ότι η χρήση προηγμένων σύνθετων υλικών επιτρέπει στα UAV να επιτύχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση, επεκτείνοντας έτσι την επιχειρησιακή τους εμβέλεια και αποτελεσματικότητα (Utami κ.ά., 2022).

Επιπλέον, η έλευση της προσθετικής κατασκευής (AM) έχει φέρει επανάσταση στην παραγωγή εξαρτημάτων UAV. Η AM, γνωστή και ως τρισδιάστατη εκτύπωση, επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων δομών που είναι δύσκολο ή αδύνατο να επιτευχθούν με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παραγωγή ελαφρών και περίπλοκων σχεδίων που μπορούν να βελτιώσουν την αεροδυναμική απόδοση και τη συνολική απόδοση των UAV. Οι Goh et al. (2016) σημείωσαν ότι η AM επιτρέπει την άμεση κατασκευή πολύπλοκων εσωτερικών δομών χωρίς την ανάγκη για καλούπια, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για την κατασκευή ελαφρών UAV (Goh et al., 2016).

Η δυνατότητα εκτύπωσης εξαρτημάτων UAV με χρήση AM επιτρέπει επίσης την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων και τον επαναληπτικό σχεδιασμό, γεγονός που μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία ανάπτυξης και να μειώσει το κόστος. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας τη μοντελοποίηση με τη μέθοδο της τήξης εναπόθεσης (FDM) και την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS), οι ερευνητές μπορούν να παράγουν και να δοκιμάζουν γρήγορα διαφορετικά σχέδια UAV για τη βελτιστοποίηση των επιδόσεών τους. Αυτή η ευελιξία στον σχεδιασμό και την παραγωγή αποτελεί βασικό παράγοντα για την αυξανόμενη υιοθέτηση της AM στην αεροδιαστημική βιομηχανία.

Συμπερασματικά, η χρήση ελαφρών υλικών όπως τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα και οι εξελίξεις στις τεχνικές προσθετικής κατασκευής είναι καθοριστικής σημασίας για την ενίσχυση των επιδόσεων, της αποδοτικότητας και των δυνατοτήτων των UAV. Αυτά τα υλικά και οι μέθοδοι παρέχουν σημαντικά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της βελτιωμένης δομικής αντοχής, της μειωμένης κατανάλωσης καυσίμων και της δυνατότητας παραγωγής σύνθετων και βελτιστοποιημένων σχεδίων. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, ο ρόλος των ελαφρών υλικών και της προσθετικής κατασκευής στην κατασκευή UAV πιθανότατα θα επεκταθεί, οδηγώντας σε ακόμη πιο προηγμένα και ικανά μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα.

1.5 Τύποι συστημάτων πρόωσης για UAV HALE

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) μεγάλου υψομέτρου μεγάλης αντοχής (HALE) βασίζονται σε προηγμένα συστήματα πρόωσης για να διατηρούν την πτήση σε μεγάλα υψόμετρα για παρατεταμένες περιόδους. Έχουν διερευνηθεί διάφορα συστήματα πρόωσης για την ικανοποίηση των μοναδικών απαιτήσεων των UAV HALE, συμπεριλαμβανομένων των κινητήρων εσωτερικής καύσης, των συστημάτων υπερσυμπίεσης και της ηλεκτρικής πρόωσης.

Πρώτον, ένα από τα σημαντικότερα συστήματα πρόωσης για τα UAV HALE είναι ο κινητήρας εσωτερικής καύσης με καύσιμο υδρογόνο και σύστημα υπερσυμπίεσης. Το σύστημα αυτό είναι ειδικά σχεδιασμένο για να ενισχύει την απόδοση του κινητήρα σε μεγάλα υψόμετρα όπου η πυκνότητα του αέρα είναι σημαντικά χαμηλότερη. Ο κινητήρας χρησιμοποιεί μια σειρά υπερσυμπιεστών για να αυξήσει την πίεση του αέρα εισαγωγής, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση της καύσης. Λόγω της χαμηλής ενέργειας ανάφλεξης του υδρογόνου, μπορεί να εμφανιστεί ανάφλεξη ή προανάφλεξη- ως εκ τούτου, η αναλογία καυσίμου προς αέρα μειώνεται για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων. Αυτό απαιτεί την αύξηση της πίεσης του αέρα εισαγωγής σε περίπου 1,7 bar με τη χρήση ενός συστήματος υπερσυμπιεστή πολλαπλών σταδίων με ενδιάμεσους ψύκτες για τη διατήρηση επαρκούς ισχύος του κινητήρα (Young-Seok Kang et al., 2018).

Ομοίως, οι υγρόψυκτοι υπερτροφοδοτούμενοι κινητήρες έχουν διερευνηθεί ως επιλογή πρόωσης για τα UAV HALE. Ένας κινητήρας ανάφλεξης με σπινθήρα, σε συνδυασμό με ένα σύστημα υπερσυμπιεστή, μπορεί να βελτιστοποιηθεί για απόδοση σε υψόμετρο που κυμαίνεται από 50.000 έως 100.000 πόδια. Η προσθήκη ενός στροβίλου ισχύος για στροβιλοσυμπύκνωση μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω τις επιδόσεις μειώνοντας την ειδική κατανάλωση καυσίμου κατά την πέδηση (BSFC). Αυτός ο τύπος συστήματος πρόωσης προσφέρει σημαντικές επιδόσεις σε αντοχή και υψόμετρο, έχοντας θέσει ρεκόρ για πτήσεις μεγάλης αντοχής (Wilkinson & Benway, 1991).

Από την άλλη πλευρά, η ηλιακή-ηλεκτρική πρόωση είναι μια άλλη βιώσιμη επιλογή, ιδίως για αποστολές που απαιτούν μεγάλης διάρκειας και φιλικές προς το περιβάλλον λειτουργίες. Τα ηλιακά UAV HALE ενσωματώνουν συστήματα πρόωσης με κινητήρα-προπέλα που τροφοδοτούνται από ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται και στη συνέχεια χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια νυχτερινών πτήσεων. Η ενσωμάτωση κατανεμημένων συστημάτων πρόωσης κατά μήκος του μεγάλου εύρους των πτερύγων του UAV μπορεί να μεταβάλει τη σταθερότητα του αεροσκάφους και απαιτεί προσεκτική προσαρμογή για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας της

πτήσης και της αποδοτικότητας του συστήματος (Wei Xiao & Zhou Zhou, 2011). Αυτός ο τύπος συστήματος πρόωσης είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικός λόγω των ελάχιστων περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Μια άλλη αναδυόμενη τεχνολογία είναι η χρήση υβριδικών συστημάτων κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων/στρόβιλου αερίου. Αυτή η υβριδική προσέγγιση αποσκοπεί στην αύξηση της συνολικής απόδοσης και στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη του στόχου αντοχής μιας εβδομάδας για τα UAV HALE. Η διαμόρφωση της χωρητικότητας των κυψελών καυσίμου σε διακριτές στοίβες, με παράλληλο σύστημα διανομής καυσίμου και τροφοδοσία αέρα σε σειρά, μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα του συστήματος. Για τέτοια συστήματα που λειτουργούν με υδρογόνο έχει προβλεφθεί απόδοση έως και 66,3% (κατώτερη θερμογόνος δύναμη) (Aguilar et al., 2008). Τέλος, τα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης κερδίζουν επίσης έδαφος, ιδίως με την πρόοδο στην τεχνολογία των μπαταριών και των κινητήρων υψηλής πυκνότητας ισχύος. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν τη δυνατότητα πιο αθόρυβης λειτουργίας και μειωμένου κόστους συντήρησης. Ωστόσο, συχνά περιορίζονται από τις τρέχουσες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες περιορίζουν την αντοχή των HALE UAV (Zhang et al., 2022).

1.5.1 Ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες πρόωσης

Οι ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες πρόωσης είναι ζωτικής σημασίας για τις επιδόσεις και την αντοχή των UAV μεγάλου υψομέτρου μεγάλης διάρκειας (HALE). Οι τεχνολογίες αυτές αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής αξιοποίησης, στην παράταση του χρόνου πτήσης και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεκριμένες τεχνολογίες ενεργειακά αποδοτικής πρόωσης και οι αναλύσεις τους με βάση τα ερευνητικά ευρήματα.

Ηλιακή-ηλεκτρική πρόωση: Τα ηλιακά-ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης χρησιμοποιούν ηλιακούς συλλέκτες για τη συλλογή ηλιακής ενέργειας, η οποία στη συνέχεια αποθηκεύεται σε μπαταρίες ή χρησιμοποιείται απευθείας για την τροφοδοσία των ηλεκτροκινητήρων του UAV. Αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τα UAV HALE, καθώς λειτουργούν σε μεγάλα υψόμετρα, λαμβάνοντας άπλετο ηλιακό φως. Μια μελέτη των Yoon-Su Nam και To-Soon Park (2015) διερεύνησε τη διαχείριση της ενέργειας σε ηλιακά τροφοδοτούμενα UAV HALE, εστιάζοντας στους μηχανισμούς ενεργειακής ισορροπίας κατά τη διάρκεια ημερήσιων και νυχτερινών επιχειρήσεων. Με την ενσωμάτωση ηλιακών κυψελών με αναγεννητικές κυψέλες καυσίμου, η ενέργεια που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί τη νύχτα, εξασφαλίζοντας συνεχή λειτουργία

(Nam & Park, 2015). Το σύστημα αυτό επιτρέπει τη μηδενική εκπομπή ρύπων κατά την πτήση, καθιστώντας το μια φιλική προς το περιβάλλον επιλογή.

Υβριδικά συστήματα πρόωσης: Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης συνδυάζουν κινητήρες εσωτερικής καύσης με ηλεκτρική πρόωση για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Κατά την αξιολόγηση υβριδικών συστημάτων πρόωσης και συγκομιδής ενέργειας για UAV, οι ερευνητές του Κέντρου Αεροδιαστημικής Έρευνας του Πανεπιστημίου της Βικτώριας (UVIC-CfAR) απέδειξαν ότι τα υβριδικά συστήματα μπορούν να επιτύχουν χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αυξημένη αντοχή με τη σύλληψη και αξιοποίηση της θερμικής ενέργειας από τα καυσαέρια (Matlock et al., 2018). Η προσέγγιση αυτή παρέχει το πλεονέκτημα της κατανεμημένης πρόωσης και του πλεονασμού, που είναι ζωτικής σημασίας για τα κρίσιμα για την αποστολή UAV.

Υβριδικά συστήματα κυψελών καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) και αεριοστροβίλων: Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) σε συνδυασμό με αεριοστροβίλους αντιπροσωπεύουν μια άλλη ενεργειακά αποδοτική επιλογή πρόωσης. Τα συστήματα αυτά παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της χημικής αντίδρασης υδρογόνου και οξυγόνου, προσφέροντας υψηλότερη απόδοση και χαμηλότερες εκπομπές σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα πρόωσης. Οι Aguiar, Brett και Brandon (2008) ανέλυσαν τέτοια συστήματα για UAV HALE, επιτυγχάνοντας συνολική απόδοση του συστήματος 66,3% (LHV) όταν λειτουργεί με υδρογόνο. Με την αρθρωτή διαμόρφωση της χωρητικότητας των κυψελών καυσίμου και την παράλληλη διανομή του καυσίμου, η τεχνολογία αυτή μπορεί να επεκτείνει σημαντικά την αντοχή των UAV (Aguiar et al., 2008).

Συστήματα υπερσυμπίεσης: Τα συστήματα υπερσυμπίεσης έχουν σχεδιαστεί για να βελτιώνουν την απόδοση των κινητήρων εσωτερικής καύσης σε μεγάλα υψόμετρα. Σε μια μελέτη που επικεντρώθηκε σε UAV HALE, χρησιμοποιήθηκε ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης με καύσιμο υδρογόνο με μια σειρά υπερσυμπιεστών για την ενίσχυση της πίεσης του αέρα εισαγωγής στο απαιτούμενο επίπεδο για αποτελεσματική καύση. Το σύστημα χρησιμοποιεί πολλαπλούς υπερσυμπιεστές με ενδιάμεσους ψύκτες, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική απόδοση του κινητήρα σε υψόμετρα όπου η πυκνότητα του αέρα είναι χαμηλή (Kang et al., 2018).

Κατανεμημένη ηλεκτρική πρόωση: Η κατανεμημένη ηλεκτρική πρόωση περιλαμβάνει τη χρήση πολλαπλών ηλεκτρικών κινητήρων κατανεμημένων κατά μήκος των πτερύγων ή του σώματος του UAV. Αυτή η διαμόρφωση βελτιώνει την απόδοση της πτήσης και τη μετατροπή ενέργειας επιτρέποντας τη βελτιστοποιημένη κατανομή ισχύος και μειώνοντας την αεροδυναμική αντίσταση. Μια μελέτη σχετικά με την κατανεμημένη ηλεκτρική πρόωση για

UAV με κυψέλη καυσίμου και σύστημα ηλεκτρικής αποθήκευσης κατέδειξε αύξηση της αντοχής πτήσης και μείωση του θορύβου, παρέχοντας μια λύση πρόωσης χωρίς εκπομπές ρύπων (Lei et al., 2022).

Συμπερασματικά, οι ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες πρόωσης για τα UAV HALE περιλαμβάνουν ηλιακή-ηλεκτρική, υβριδική πρόωση, υβριδικά συστήματα κυψελών καυσίμου, συστήματα υπερσυμπίεσης και κατανεμημένη ηλεκτρική πρόωση. Οι τεχνολογίες αυτές αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση της χρήσης ενέργειας, στην επέκταση της διάρκειας ζωής των UAV και στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

1.5.2 Υβριδικά συστήματα πρόωσης

Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης για UAV μεγάλων αποστάσεων σε μεγάλο υψόμετρο (HALE) συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα διαφορετικών πηγών ενέργειας, όπως κινητήρες εσωτερικής καύσης, ηλεκτροκινητήρες, κυψέλες καυσίμου και ηλιακή ενέργεια. Τα συστήματα αυτά έχουν σχεδιαστεί για να βελτιστοποιούν την ενεργειακή απόδοση, να μειώνουν τις εκπομπές και να επεκτείνουν το επιχειρησιακό εύρος και την αντοχή των UAV.

Ηλιακή-ηλεκτρική υβριδική πρόωση: Αναλύθηκε στην προηγούμενη υποενότητα.

Παράλληλη και σειριακή υβριδική-ηλεκτρική πρόωση: Τα υβριδικά-ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης συνδυάζουν κινητήρες εσωτερικής καύσης (MEK) με ηλεκτροκινητήρες είτε σε παράλληλη είτε σε σειριακή διάταξη. Σε μια παράλληλη διαμόρφωση, τόσο η MEK όσο και ο ηλεκτροκινητήρας μπορούν να κινούν ταυτόχρονα τον έλικα, επιτρέποντας στο σύστημα να εναλλάσσει μεταξύ των πηγών ενέργειας ή να χρησιμοποιεί και τις δύο ανάλογα με τη φάση της πτήσης. Οι Diogo Marto και F. Brójo (2022) δοκίμασαν ένα παράλληλο υβριδικό-ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης που συνδύαζε έναν δίχρονο MEK 28 κ.εκ. με μια γεννήτρια 200 Watt. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η διαμόρφωση προσφέρει χαμηλότερη ειδική κατανάλωση καυσίμου και προάγει τη σταθερή λειτουργία με μειωμένους κραδασμούς (Marto & Brójo, 2022).

Σε μια υβριδική διαμόρφωση σειράς, η MEK τροφοδοτεί μια γεννήτρια, η οποία στη συνέχεια φορτίζει τις μπαταρίες ή τροφοδοτεί απευθείας τον ηλεκτροκινητήρα. Αυτή η διάταξη παρέχει ευελιξία στη διαχείριση της ισχύος και μπορεί να βελτιστοποιηθεί για διαφορετικές φάσεις πτήσης. Η έρευνα των J. Hung και L. F. Gonzalez (2012) κατέδειξε την αποτελεσματικότητα ενός παράλληλου υβριδικού-ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης για μικρά UAV σταθερών πτερύγων. Η μελέτη τους ενσωμάτωσε μια στρατηγική ελέγχου ιδανικής

γραμμής λειτουργίας (IOL), επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση καυσίμου 6,5% σε σύγκριση με μια διαμόρφωση μόνο με κινητήρα (Hung & Gonzalez, 2012).

Υβριδική πρόωση κυψελών καυσίμου: Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης με κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου, όπως κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC), σε συνδυασμό με μπαταρίες ή υπερπυκνωτές. Οι κυψέλες καυσίμου παρέχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, ενώ οι μπαταρίες προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ισχύος για απαιτήσεις ισχύος αιχμής. Οι Bin Wang κ.ά. (2020) εξέτασαν τα υβριδικά συστήματα πρόωσης κυψελών καυσίμου για UAV, τονίζοντας την ενσωμάτωση των κυψελών καυσίμου με άλλες πηγές ενέργειας για την παράταση της διάρκειας πτήσης και τη βελτίωση της οικονομίας καυσίμου. Η μελέτη υπογράμμισε την ανάγκη για αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης της ενέργειας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης αυτών των συστημάτων (Wang et al., 2020).

Υβριδική πρόωση για πολυτροπικά UAV : Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης μπορούν επίσης να προσαρμοστούν για πολυτροπικά UAV που μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως ο αέρας και το νερό. Οι J. Ye κ.ά. (2018) ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο υβριδικό σύστημα πρόωσης για ένα πολυτροπικό UAV σχεδιασμένο για εναέριες και υδάτινες επιχειρήσεις. Το σύστημα διέθετε υβριδικούς έλικες βελτιστοποιημένους τόσο για εναέρια όσο και για υποβρύχια πρόωση, αναδεικνύοντας την ευελιξία των υβριδικών συστημάτων για διάφορα προφίλ αποστολών (Ye et al., 2018).

Πλεονεκτήματα και προκλήσεις: Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως αυξημένη αντοχή πτήσης, μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και χαμηλότερες εκπομπές θορύβου. Παρέχουν ευελιξία στη διαχείριση της ισχύος και τη δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ των πηγών ισχύος ανάλογα με τις απαιτήσεις της αποστολής. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των υβριδικών συστημάτων απαιτεί εξελιγμένες στρατηγικές ελέγχου για τη διανομή ισχύος και τη διαχείριση ενέργειας. Επιπλέον, η ενσωμάτωση διαφορετικών πηγών ενέργειας απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό για την εξισορρόπηση του βάρους και τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων.

Συμπερασματικά, τα υβριδικά συστήματα πρόωσης για τα UAV HALE αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα πολλαπλών πηγών ενέργειας, ενισχύοντας την ενεργειακή απόδοση και τις επιχειρησιακές δυνατότητες. Συνδυάζοντας τεχνολογίες όπως ηλιακή ενέργεια, κινητήρες εσωτερικής καύσης, ηλεκτροκινητήρες και κυψέλες καυσίμου, τα συστήματα αυτά επιτρέπουν στα UAV HALE να επιτυγχάνουν μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης με βελτιωμένες επιδόσεις.

Κεφάλαιο 2: Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και αυτονομίας

2.1 Σημασία των διαφόρων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στα UAV

HALE

Η αποθήκευση ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τα UAV μεγάλων αποστάσεων σε μεγάλο υψόμετρο (HALE), καθώς επηρεάζει άμεσα την αντοχή πτήσης, τις επιχειρησιακές τους ικανότητες και την ικανότητά τους να διατηρούν την πτήση σε περιόδους που δεν υπάρχουν ηλιακές ή πρωτογενείς πηγές ενέργειας. Τα αποδοτικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ενισχύουν την αυτονομία αυτών των UAV, καθιστώντας τα κατάλληλα για αποστολές μεγάλης διάρκειας, ιδίως σε απομακρυσμένα ή δύσκολα περιβάλλοντα.

Συστήματα αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας: Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί πρωταρχική πηγή ενέργειας για πολλά UAV HALE, ιδίως για εκείνα που έχουν σχεδιαστεί για παρατεταμένες αποστολές. Η ενέργεια που αξιοποιείται από τους ηλιακούς συλλέκτες αποθηκεύεται σε μπαταρίες ή κυψέλες καυσίμου για τη διατήρηση της πτήσης κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας. Μια μελέτη των Reinhardt et al. (1996) τόνισε τη σημασία της ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας στο μέγεθος και τις δυνατότητες του αεροσκάφους. Η ανάλυσή τους έδειξε ότι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, συγκεκριμένα οι αναγεννητικές κυψέλες καυσίμου, επηρεάζουν σημαντικά το μέγεθος και την αντοχή των ηλιακών UAV HALE. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ειδική ενέργεια αποθήκευσης ενέργειας της τάξης των 250-500 Wh/kg είναι απαραίτητη για την ενεργοποίηση των πιο χρήσιμων αποστολών, υποδεικνύοντας τον κρίσιμο ρόλο των προηγμένων συστημάτων αποθήκευσης στις επιδόσεις των HALE UAV (Reinhardt et al., 1996).

Μπαταρίες λιθίου-πολυμερούς (LiPo): Η εξέλιξη των μπαταριών LiPo έχει αλλάξει τα δεδομένα στην ανάπτυξη των UAV HALE. Οι μπαταρίες LiPo προσφέρουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και ελαφριά χαρακτηριστικά, καθιστώντας τις ιδανικές για εφαρμογές UAV όπου το βάρος είναι κρίσιμος παράγοντας. Οι Chang κ.ά. (2016) συζήτησαν τον αντίκτυπο της αποθήκευσης ενέργειας των μπαταριών LiPo στη βελτίωση των επιδόσεων πτήσης των μικρών μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων (UAS). Διεξήγαγαν πειράματα για τη μέτρηση της κατανάλωσης ενέργειας σε διάφορους ελιγμούς πτήσης, αποκαλύπτοντας πώς θα μπορούσε να βελτιστοποιηθεί η αποθήκευση ενέργειας για τη βελτίωση της διάρκειας και της απόδοσης της πτήσης. Η έρευνα αυτή υπογραμμίζει τη σημασία της ακριβούς μοντελοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό αυτόνομων αποστολών, ιδίως για τα UAV HALE (Chang et al., 2016).

Υβριδικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας: Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί της συμβατικής αποθήκευσης ενέργειας, έχουν αναπτυχθεί υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες, κυψέλες καυσίμου και ηλιακούς συλλέκτες. Οι Chen και Khaligh (2010) πρότειναν ένα υβριδικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για UAV που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πάνελ, επαναφορτιζόμενες κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες. Αυτός ο συνδυασμός επιτρέπει στο UAV να αξιοποιεί την ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας και να αποθηκεύει την περίσσεια ενέργειας για χρήση σε περιόδους χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας, επιτυγχάνοντας έτσι μεγάλη αντοχή. Με την ενσωμάτωση πολλαπλών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, τα HALE UAV μπορούν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά την ενεργειακή τους τροφοδοσία, εξασφαλίζοντας συνεχή λειτουργία ακόμη και υπό ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες (Chen & Khaligh, 2010).

Αναδιαμορφώσιμη αποθήκευση ενέργειας: Καινοτόμα σχέδια αποθήκευσης ενέργειας, όπως το σύστημα Hydrone που προτάθηκε από τους Kim et al. (2020), προσφέρουν αναδιαμορφώσιμες αρχιτεκτονικές που μεγιστοποιούν το χρόνο πτήσης, διαχειριζόμενες δυναμικά την παροχή ενέργειας με βάση τα πρότυπα πτήσης του UAV. Το σύστημα χρησιμοποιεί έναν υπερπυκνωτή (UC) ελάχιστης χωρητικότητας ως απομονωτή για τον μετριασμό των διακυμάνσεων ισχύος και έναν έλεγχο διακοπών με βάση την ενισχυτική μάθηση για την επιλογή του κατάλληλου τρόπου λειτουργίας. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει την αποτελεσματική χρήση της ενέργειας, παρατείνοντας το χρόνο πτήσης του UAV και βελτιστοποιώντας την απόδοση της μπαταρίας (Kim et al., 2020).

Δομική ενσωμάτωση της αποθήκευσης ενέργειας: Μια άλλη προσέγγιση για την ενίσχυση της αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνει την ενσωμάτωσή της στη δομή του UAV. Οι Górný και Uhl (2017) πρότειναν την ενσωμάτωση μπαταριών και φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων στη δομή της πτέρυγας του αεροσκάφους. Αυτή η ενσωμάτωση όχι μόνο αυξάνει τη χωρητικότητα αποθήκευσης αλλά και βελτιστοποιεί την κατανομή του βάρους και τη δομική ακεραιότητα. Με την ενσωμάτωση της αποθήκευσης ενέργειας στη δομή του UAV, η συνολική χωρητικότητα αποθήκευσης μπορεί να μεγιστοποιηθεί χωρίς να επηρεαστεί σημαντικά το βάρος και η αεροδυναμική του UAV (Górný & Uhl, 2017).

Συνοπτικά, η αποθήκευση ενέργειας είναι κομβικής σημασίας για τα UAV HALE, επηρεάζοντας την αντοχή τους, την επιχειρησιακή τους εμβέλεια και τη συνολική αποδοτικότητά τους. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία μπαταριών, τα υβριδικά συστήματα, η αναδιαμορφώσιμη αποθήκευση και η δομική ολοκλήρωση αποτελούν κρίσιμες εξελίξεις που διασφαλίζουν ότι τα HALE UAV μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτητικές απαιτήσεις των αποστολών μεγάλης διάρκειας.

2.2 Τεχνολογίες μπαταριών

Οι τεχνολογίες μπαταριών είναι καθοριστικής σημασίας για την τροφοδοσία μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV), προσφέροντας διαφορετικές συμβιβαστικές λύσεις όσον αφορά την ενεργειακή πυκνότητα, το βάρος, τη δυνατότητα επαναφόρτισης και την ισχύ εξόδου. Έχουν αναπτυχθεί και βελτιστοποιηθεί διάφοροι τύποι μπαταριών για εφαρμογές UAV, ο καθένας με τα διακριτά πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς του.

Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Li-ion): Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου συγκαταλέγονται μεταξύ των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων πηγών ενέργειας για UAV λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, του μικρού βάρους και της σχετικά μεγάλης διάρκειας ζωής κύκλου. Παρέχουν σημαντική ποσότητα ισχύος, διατηρώντας παράλληλα μια συμπαγή μορφή, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για διάφορες εφαρμογές UAV, από καταναλωτικά drones έως στρατιωτικά UAV HALE. Ωστόσο, ένας περιορισμός είναι το σχετικά χαμηλό εύρος λειτουργίας τους σε ακραίες θερμοκρασίες, το οποίο μπορεί να μειώσει τη διάρκεια της πτήσης. Έχουν αναπτυχθεί προηγμένα συστήματα διαχείρισης μπαταριών για την παρακολούθηση και τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους σε UAV. Για παράδειγμα, οι Zhang και Zhang (2022) σχεδίασαν ένα σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS) για την παρακολούθηση της φόρτισης και της εκφόρτισης των μπαταριών ιόντων λιθίου σε πραγματικό χρόνο για UAVs, βελτιώνοντας τη λειτουργική τους ασφάλεια και αποδοτικότητα (Zhang & Zhang, 2022).

Μπαταρίες λιθίου-πολυμερούς (LiPo): Οι μπαταρίες LiPo είναι ένας υποτύπος των μπαταριών ιόντων λιθίου, που διαθέτουν πολυμερή ηλεκτρολύτη αντί για υγρό. Αυτό τους δίνει το πλεονέκτημα ότι είναι πιο ευέλικτες σε σχήμα και μέγεθος, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για την ενσωμάτωση σε UAV, όπου οι περιορισμοί βάρους και χώρου είναι κρίσιμοι. Οι Reid κ.ά. (2004) διερεύνησαν τη χρήση μπαταριών LiPo για UAVs, τονίζοντας τη δυνατότητά τους να προσφέρουν ένα αμιγώς ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης για μικρά UAVs. Οι μπαταρίες LiPo μπορούν να παρέχουν υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης, γεγονός που είναι επωφελές για UAV που απαιτούν γρήγορες εκρήξεις ισχύος κατά την απογείωση ή τους ελιγμούς. Ωστόσο, απαιτούν επίσης προσεκτική θερμική διαχείριση για την αποφυγή υπερθέρμανσης και πιθανών κινδύνων για την ασφάλεια (Reid et al., 2004).

Μπαταρίες φωσφορικού λιθίου-σιδήρου (LiFePO₄): Οι μπαταρίες φωσφορικού λιθίου-σιδήρου είναι γνωστές για την υψηλή ασφάλεια και τη μεγάλη διάρκεια ζωής τους. Προσφέρουν χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τις μπαταρίες Li-ion και LiPo, αλλά είναι πιο σταθερές σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, μειώνοντας τον κίνδυνο

θερμικής διαφυγής. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για UAV που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η ασφάλεια και η αξιοπιστία είναι υψίστης σημασίας, όπως στρατιωτικές αποστολές ή αποστολές περιβαλλοντικής παρακολούθησης υψηλού κινδύνου. Είναι επίσης πιο ανεκτικοί στην υπερφόρτιση και έχουν χαμηλότερο ρυθμό αυτοεκφόρτισης, καθιστώντας τις ασφαλέστερη και πιο ανθεκτική επιλογή για αποστολές UAV μεγάλης διάρκειας (Mehendale, 2021).

Μπαταρίες λιθίου-αέρα (Li-air): Οι μπαταρίες λιθίου-αέρα είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που έχει τη δυνατότητα να παρέχει σημαντικά υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις παραδοσιακές μπαταρίες ιόντων λιθίου. Αυτές οι μπαταρίες χρησιμοποιούν οξυγόνο από τον αέρα ως αντιδρών, το οποίο θεωρητικά τους επιτρέπει να επιτύχουν ενεργειακή πυκνότητα συγκρίσιμη με τη βενζίνη. Οι Depcik κ.ά. (2020) συνέκριναν διάφορες επιλογές κίνησης για UAV, συμπεριλαμβανομένων των μπαταριών Li-αέρα. Διαπίστωσαν ότι, θεωρητικά, οι μπαταρίες Li-αέρα θα μπορούσαν να οδηγήσουν στη μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης και στην απλούστερη διαμόρφωση λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας. Ωστόσο, η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, με προκλήσεις όπως οι περιορισμένοι κύκλοι επαναφόρτισης και τα ζητήματα σταθερότητας που πρέπει να αντιμετωπιστούν πριν γίνουν βιώσιμες για UAV (Depcik et al., 2020).

Μπαταρίες νικελίου-μεταλλικού υδριδίου (NiMH): Οι μπαταρίες νικελίου-μεταλλικού υδριδίου είναι ένας άλλος τύπος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας που χρησιμοποιείται στα UAV, ιδίως για εκείνα που απαιτούν μέτρια ενεργειακή πυκνότητα και χαμηλή συντήρηση. Οι μπαταρίες NiMH προσφέρουν μια καλή ισορροπία μεταξύ ενεργειακής πυκνότητας, κόστους και ασφάλειας. Δεν υποφέρουν από το φαινόμενο μνήμης, το οποίο αποτελεί περιορισμό των παλαιότερων μπαταριών νικελίου-καδμίου (NiCd). Αν και έχουν μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου, μπορεί να είναι πιο αποδοτικές από άποψη κόστους και ασφαλέστερες στο χειρισμό, καθιστώντας τις κατάλληλη επιλογή για ορισμένες εφαρμογές UAV, ιδίως σε σενάρια όπου η υψηλή αναλογία ισχύος προς βάρος δεν αποτελεί πρωταρχικό μέλημα (Leuchter & Zobaa, 2016).

Μπαταρίες στερεάς κατάστασης: Οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία που υπόσχεται να προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και βελτιωμένη ασφάλεια σε σχέση με τις τρέχουσες μπαταρίες ιόντων λιθίου, αντικαθιστώντας τον υγρό ηλεκτρολύτη με έναν στερεό. Αυτές οι μπαταρίες έχουν τη δυνατότητα να φέρουν επανάσταση στην τεχνολογία μπαταριών UAV, επιτρέποντας μεγαλύτερους χρόνους πτήσης και ταχύτερη επαναφόρτιση. Ωστόσο, βρίσκονται ακόμη στο

στάδιο της έρευνας και της ανάπτυξης, με προκλήσεις όπως η πολυπλοκότητα της κατασκευής και το κόστος που πρέπει να ξεπεραστούν (Wei et al., 2022).

Συμπερασματικά, η επιλογή της τεχνολογίας μπαταρίας για UAV εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής, συμπεριλαμβανομένης της ενεργειακής πυκνότητας, της ασφάλειας, του εύρους θερμοκρασιών λειτουργίας και του κόστους. Κάθε τύπος μπαταρίας παρουσιάζει μοναδικά πλεονεκτήματα και προκλήσεις, γεγονός που καθιστά αναγκαία την προσεκτική αξιολόγηση για τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων των UAV για διαφορετικά προφίλ αποστολών.

2.3 Υπερπυκνωτές και κυψέλες καυσίμου

Οι υπερπυκνωτές και οι κυψέλες καυσίμου αντιπροσωπεύουν προηγμένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και παροχής ισχύος με ξεχωριστά χαρακτηριστικά, που τα καθιστούν κατάλληλα για συγκεκριμένες εφαρμογές σε UAV, ιδίως για εκείνες που απαιτούν υψηλή αντοχή και απόδοση. Οι υπερπυκνωτές χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να αποθηκεύουν ενέργεια ηλεκτροστατικά και όχι μέσω χημικών αντιδράσεων, επιτρέποντας γρήγορους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης. Αυτό το χαρακτηριστικό τους καθιστά ιδανικούς για καταστάσεις όπου τα UAV απαιτούν μια γρήγορη έκρηξη ενέργειας, όπως κατά την απογείωση, την προσγείωση ή τους ξαφνικούς ελιγμούς. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές μπορούν να αντέξουν περισσότερους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης χωρίς σημαντική υποβάθμιση, προσφέροντας μεγαλύτερη λειτουργική διάρκεια ζωής. Οι Thounthong κ.ά. (2009) τόνισαν τη σημασία της χρήσης υπερπυκνωτών σε υβριδικά συστήματα ισχύος, όπου η υψηλή πυκνότητα ισχύος τους επιτρέπει να χειρίζονται αποτελεσματικά τις παροδικές απαιτήσεις ισχύος. Με την απορρόφηση φορτίων αιχμής, οι υπερπυκνωτές μπορούν να ανακουφίσουν την καταπόνηση της κύριας πηγής ενέργειας, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση και τη μακροζωία του συστήματος (Thounthong et al., 2009).

Οι κυψέλες καυσίμου, ιδίως οι κυψέλες καυσίμου με μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC), έχουν κερδίσει την προσοχή για την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και την ικανότητά τους να παρέχουν συνεχή ισχύ για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου, με μοναδικό παραπροϊόν το νερό, γεγονός που τις καθιστά φιλική προς το περιβάλλον επιλογή για UAV. Ωστόσο, ένα αξιοσημείωτο μειονέκτημα των κυψελών καυσίμου είναι η σχετικά αργή δυναμική τους απόκριση. Δεν μπορούν να προσαρμοστούν

γρήγορα σε ταχείες αλλαγές στη ζήτηση ισχύος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα απόδοσης εάν δεν γίνει σωστή διαχείριση. Για την αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού, ερευνητές όπως οι Thounthong et al. (2006) έχουν προτείνει την ενσωμάτωση κυψελών καυσίμου με υπερπυκνωτές σε ένα υβριδικό σύστημα. Σε αυτή τη διαμόρφωση, η κυψέλη καυσίμου χρησιμεύει ως κύρια πηγή ενέργειας, παρέχοντας σταθερή έξοδο, ενώ ο υπερπυκνωτής λειτουργεί ως βοηθητική πηγή για την παροχή ενέργειας κατά τη διάρκεια ξαφνικών αιχμών ζήτησης. Αυτή η συνέργεια επιτρέπει στην κυψέλη καυσίμου να λειτουργεί σε πιο σταθερές συνθήκες, μειώνοντας τις μηχανικές καταπονήσεις και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της (Thounthong et al., 2006).

Η ενσωμάτωση υπερπυκνωτών και κυψελών καυσίμου σε ένα υβριδικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί προσεκτική διαχείριση της ενέργειας για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και των δύο στοιχείων. Οι υπερπυκνωτές, με τις δυνατότητες ταχείας φόρτισης-εκφόρτισης, μπορούν να απορροφήσουν ή να απελευθερώσουν γρήγορα ενέργεια, εξισορροπώντας έτσι το φορτίο ισχύος στην κυψέλη καυσίμου. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα επωφελές κατά τη διάρκεια δυναμικών συνθηκών πτήσης, όπου οι απαιτήσεις ισχύος αυξομειώνονται συχνά. Οι Gong κ.ά. (2018) πραγματοποίησαν μια ανάλυση χρησιμοποιώντας έναν προσομοιωτή hardware-in-the-loop για την αξιολόγηση ενός υβριδικού συστήματος πρόωσης κυψέλης καυσίμου/μπαταρίας/υποπυκνωτή. Η μελέτη τους έδειξε ότι ο υπερπυκνωτής εξομάλυνε αποτελεσματικά το φορτίο στην κυψέλη καυσίμου, ιδίως σε συνθήκες πτήσης με ανεμοθύελλα. Με τον μετριασμό του αντίκτυπου των ταχέων αλλαγών φορτίου, ο υπερπυκνωτής όχι μόνο βελτίωσε την αντοχή και την εμβέλεια του UAV, αλλά βοήθησε επίσης να παραταθεί η διάρκεια ζωής της κυψέλης καυσίμου αποτρέποντας την υποβολή της σε ταχείες διακυμάνσεις ισχύος (Gong et al., 2018).

Η διαχείριση της ροής ισχύος μεταξύ υπερπυκνωτών και κυψελών καυσίμου είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης. Οι Thounthong et al. (2009) πρότειναν έναν αλγόριθμο ελέγχου που ρυθμίζει τη διανομή ενέργειας σε ένα υβριδικό σύστημα, χρησιμοποιώντας υπερπυκνωτές για τη ρύθμιση της τάσης του διαύλου DC. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στους υπερπυκνωτές να ανταποκρίνονται γρήγορα σε ξαφνικές απαιτήσεις ισχύος, ενώ παράλληλα διασφαλίζει ότι η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σε συνθήκες σταθερής κατάστασης. Τα πειραματικά αποτελέσματα επικύρωσαν αυτή τη στρατηγική ελέγχου, δείχνοντας ότι ενίσχυσε την απόδοση του συστήματος κατά τη διάρκεια κύκλων φορτίου και διατήρησε σταθερή λειτουργία. Ο αλγόριθμος ελέγχου απέτρεψε επίσης την ασιτία καυσίμου στην κυψέλη καυσίμου, ένα συνηθισμένο πρόβλημα όταν η κυψέλη

καυσίμου εκτίθεται σε ταχείες αλλαγές φορτίου χωρίς επαρκή χρόνο για να προσαρμόσει την έξοδο της (Thounthong et al., 2009).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών σε ένα υβριδικό σύστημα κυψελών καυσίμου είναι η ικανότητά τους να ενισχύουν τη συνολική απόδοση της πηγής ενέργειας. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να αποθηκεύουν την περίσσεια ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης ισχύος, η οποία μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια φορτίων αιχμής. Η διαδικασία αυτή μειώνει την ανάγκη της κυψέλης καυσίμου να ανεβοκατεβαίνει συχνά, γεγονός που όχι μόνο είναι πιο αποδοτικό αλλά και μειώνει τη φθορά της κυψέλης καυσίμου, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της. Επιπλέον, η ικανότητα ταχείας παροχής ενέργειας των υπερπυκνωτών μπορεί να αξιοποιηθεί για τη βελτίωση των επιδόσεων των UAV κατά τη διάρκεια κρίσιμων φάσεων πτήσης, προσφέροντας άμεση ισχύ όταν απαιτείται χωρίς να περιμένει την πιο αργή απόκριση της κυψέλης καυσίμου. Η έρευνα των Thounthong κ.ά. αναδεικνύει τη συμβατότητα των υπερπυκνωτών με τις κυψέλες καυσίμου, υποδηλώνοντας ότι ο συνδυασμός αυτός μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τις προκλήσεις των δυναμικών απαιτήσεων ισχύος στις επιχειρήσεις UAV (Thounthong κ.ά., 2009).

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, η ενσωμάτωση υπερπυκνωτών με κυψέλες καυσίμου παρουσιάζει αρκετές προκλήσεις, ιδίως όσον αφορά τον σχεδιασμό και τον έλεγχο του συστήματος. Η ανάγκη για ακριβείς στρατηγικές διαχείρισης της ενέργειας είναι υψίστης σημασίας για να διασφαλιστεί ότι η ροή ισχύος μεταξύ του υπερπυκνωτή και της κυψέλης καυσίμου είναι ισορροπημένη. Εάν δεν γίνει σωστή διαχείριση, ο υπερπυκνωτής θα μπορούσε είτε να αδειάσει πολύ γρήγορα είτε να μην αξιοποιηθεί αποτελεσματικά, οδηγώντας σε μη βέλτιστες επιδόσεις του συστήματος. Ωστόσο, όταν εφαρμόζεται με επιτυχία, ο συνδυασμός υπερπυκνωτών και κυψελών καυσίμου μπορεί να παρέχει μια στιβαρή λύση ισχύος για UAV, ικανή να διαχειρίζεται ποικίλες απαιτήσεις ισχύος, μεγιστοποιώντας παράλληλα την ενεργειακή απόδοση και τη μακροζωία του συστήματος. Αυτή η υβριδική προσέγγιση αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα και των δύο τεχνολογιών, με τον υπερπυκνωτή να παρέχει ταχεία παροχή ενέργειας και την κυψέλη καυσίμου να προσφέρει συνεχή παροχή ενέργειας για εκτεταμένες πτητικές λειτουργίες.

2.4 Συστήματα διαχείρισης ενέργειας

Τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (EMS) στα UAV διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτιστοποίηση της κατανομής και της χρήσης ενέργειας μεταξύ πολλαπλών πηγών

ενέργειας, όπως μπαταρίες, κυψέλες καυσίμου και ηλιακά πάνελ. Τα συστήματα αυτά έχουν σχεδιαστεί για να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τη ροή ενέργειας, διασφαλίζοντας ότι τα UAV μπορούν να ανταποκρίνονται στις ποικίλες επιχειρησιακές απαιτήσεις, μεγιστοποιώντας παράλληλα την αντοχή της πτήσης και ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση καυσίμων.

Στα υβριδικά UAV που συνδυάζουν κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες, το EMS πρέπει να εξισορροπεί την ισχύ που παρέχεται από κάθε πηγή. Μια μελέτη των Zhang et al. (2018) πρότεινε μια online ασαφή στρατηγική διαχείρισης ενέργειας για ένα σύστημα ισχύος κυψελών καυσίμου/μπαταριών σε UAV. Το σύστημα χρησιμοποιεί έναν ενιαίο προγραμματιζόμενο μετατροπέα DC-DC για τον αποτελεσματικό διαχωρισμό της ισχύος μεταξύ των δύο πηγών. Ρυθμίζοντας το ρεύμα εξόδου της κυψέλης καυσίμου με βάση τη ζήτηση ισχύος του UAV και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, το ΣΔΠ διασφαλίζει τη βέλτιστη κατανομή ισχύος. Αυτή η στρατηγική ευνοεί τη χρήση της ισχύος της μπαταρίας κατά τη διάρκεια των φορτίων αιχμής, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση υδρογόνου από την κυψέλη καυσίμου. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η προσέγγιση επέκτεινε με επιτυχία την αντοχή του UAV, διατηρώντας παράλληλα την υγεία της μπαταρίας και της κυψέλης καυσίμου (Zhang et al., 2018).

Για τα UAV που βασίζονται στην ηλιακή ενέργεια, το EMS πρέπει να προσαρμόζεται στη διακύμανση της διαθεσιμότητας ενέργειας λόγω των μεταβαλλόμενων καιρικών συνθηκών και της έντασης του ηλιακού φωτός. Οι He et al. (2018) σχεδίασαν ένα EMS για ένα μικρό UAV με ηλιακή τροφοδοσία, το οποίο λειτουργεί με βάση την τιμή της τάσης του διαύλου DC για τη διαχείριση της ροής ισχύος από τις φωτοβολταϊκές (PV) μονάδες και το σύστημα αποθήκευσης. Αυτό το EMS επιτρέπει στις φωτοβολταϊκές μονάδες να λειτουργούν σε πολλαπλούς τρόπους λειτουργίας μέσω μιας αυτοπροσαρμοζόμενης στρατηγικής ελέγχου, συντονίζοντας τη διανομή ενέργειας για να εξασφαλιστεί η σταθερή λειτουργία του UAV. Το σύστημα ρυθμίζει δυναμικά την κατανομή ισχύος μεταξύ των φωτοβολταϊκών μονάδων και του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για να προσαρμόζεται στις ταχείες ατμοσφαιρικές αλλαγές, διατηρώντας μια σταθερή παροχή ισχύος για το UAV (He et al., 2018).

Τα υβριδικά ηλεκτρικά UAV που ενσωματώνουν ηλιακές κυψέλες, κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες απαιτούν πιο σύνθετα ΣΠΔ για τη διαχείριση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ πολλαπλών πηγών ενέργειας. Σε τέτοια συστήματα, το EMS αποτελείται συνήθως από ένα ανώτερο στρώμα λήψης αποφάσεων και ένα κατώτερο στρώμα ελέγχου. Το ανώτερο στρώμα χρησιμοποιεί έλεγχο πρόβλεψης μοντέλου (MPC) για τον προσδιορισμό της βέλτιστης κατανομής ισχύος μεταξύ των πηγών, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η αποδοτικότητα καυσίμου και η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας. Οι Zhao κ.ά. (2022) εφάρμοσαν αυτή την

προσέγγιση σε ένα υβριδικό σύστημα ισχύος UAV. Το ανώτερο στρώμα λήψης αποφάσεων χρησιμοποίησε τη στρατηγική ελαχιστοποίησης της ισοδύναμης κατανάλωσης (ECMS) για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης υδρογόνου, ενώ το κατώτερο στρώμα ελέγχου διαχειρίστηκε την τάση και το ρεύμα εξόδου για τη διασφάλιση της σταθερής λειτουργίας του συστήματος. Αυτό το ιεραρχικό ΣΔΠ εξασφάλιζε ότι η διανομή ισχύος ήταν αποτελεσματική και ότι κάθε πηγή χρησιμοποιούνταν υπεύθυνα (Zhao et al., 2022).

Για την περαιτέρω βελτίωση των επιδόσεων των UAV, ορισμένα EMS χρησιμοποιούν έξυπνες στρατηγικές ελέγχου, όπως η ασαφής λογική ή τα προσαρμοστικά νευρο-ασαφή συστήματα συμπερασμού (ANFIS). Αυτές οι στρατηγικές επιτρέπουν στο EMS να προσαρμόζεται στις δυναμικές συνθήκες πτήσης και να βελτιστοποιεί τη ροή ισχύος σε πραγματικό χρόνο. Οι Elkerdany κ.ά. (2020) διερεύνησαν ένα ΣΠΔ με βάση το ANFIS για ένα υβριδικό σύστημα κυψέλης καυσίμου/μπαταρίας σε UAV. Αυτό το σύστημα προσαρμόσε έξυπνα τη διανομή ισχύος ανάλογα με τις μεταβολές του φορτίου και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, διατηρώντας σταθερή τάση διαύλου DC. Χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο μάθησης, το EMS βελτιστοποιούσε συνεχώς την απόδοσή του, εξασφαλίζοντας αποτελεσματική διαχείριση ισχύος και παρατείνοντας τη διάρκεια πτήσης του UAV (Elkerdany et al., 2020).

Μια άλλη βασική πτυχή του EMS στα UAV είναι ο έλεγχος των μετατροπέων ισχύος που διασυνδέουν διαφορετικές πηγές ισχύος. Το EMS χρησιμοποιεί συχνά αμφίδρομους μετατροπείς για τον έλεγχο των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών, διασφαλίζοντας τη λειτουργία τους εντός ασφαλών ορίων. Οι Karunarathne κ.ά. (2010) ανέπτυξαν ένα ΣΔΠ βασισμένο σε μοντέλο για ένα υβριδικό σύστημα κυψέλης καυσίμου PEM/μπαταρίας ιόντων. Το σύστημα αυτό χρησιμοποίησε έναν προσαρμοστικό αλγόριθμο ελέγχου για τη διαχείριση της παροχής αέρα στην κυψέλη καυσίμου, βελτιστοποιώντας την απόδοσή της και παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής της. Το EMS ρύθμιζε τη ροή ισχύος μεταξύ της κυψέλης καυσίμου και της μπαταρίας σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ότι η κυψέλη καυσίμου λειτουργούσε στη βέλτιστη περιοχή ισχύος της, ενώ η μπαταρία παρείχε μεταβατικές απαιτήσεις ισχύος (Karunarathne et al., 2010).

Συνολικά, τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας στα UAV είναι αναπόσπαστο μέρος της διασφάλισης της αποτελεσματικής κατανομής ισχύος μεταξύ των διαφόρων πηγών ενέργειας, της προσαρμογής στις δυναμικές συνθήκες πτήσης και της επέκτασης της επιχειρησιακής διάρκειας ζωής του UAV. Μέσω προηγμένων στρατηγικών ελέγχου και ευφυών αλγορίθμων, τα ΣΔΕ μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση κυψελών καυσίμου,

μπαταριών, ηλιακών συλλεκτών και άλλων πηγών ενέργειας για να ανταποκριθούν στις ποικίλες απαιτήσεις των αποστολών UAV.

2.5 Συστήματα αυτόνομης πλοήγησης

Τα αυτόνομα συστήματα πλοήγησης σε UAV είναι απαραίτητα για την επίτευξη αυτόνομης πτήσης σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, όπου ο χειροκίνητος έλεγχος ή η εξωτερική καθοδήγηση μπορεί να μην είναι εφικτή. Τα συστήματα αυτά βασίζονται σε έναν συνδυασμό αισθητήρων, αλγορίθμων και υπολογιστικών μοντέλων που επιτρέπουν στα UAV να πλοηγούνται με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα, ακόμη και σε άγνωστο ή δυναμικό περιβάλλον.

Μια κρίσιμη πτυχή της αυτόνομης πλοήγησης είναι η ικανότητα αντίληψης του περιβάλλοντος και λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο με βάση τα δεδομένα των αισθητήρων. Η πλοήγηση με βάση την όραση έχει κερδίσει την προβολή λόγω της ευελιξίας και της στιβαρότητάς της. Οι Sinopoli et al. (2001) ανέπτυξαν ένα σύστημα πλοήγησης με βάση την όραση υπολογιστή για UAV, χρησιμοποιώντας ενσωματωμένες κάμερες για την παροχή συνεχούς ροής οπτικών πληροφοριών. Το UAV επεξεργάζεται ακολουθίες εικόνων για να κατασκευάσει και να ενημερώσει ένα εικονικό τρισδιάστατο μοντέλο του περιβάλλοντός του. Συνδυάζοντας αυτά τα οπτικά δεδομένα με δεδομένα από αισθητήρες GPS/INS, το σύστημα μπορεί να αποφεύγει εμπόδια και να βελτιώνει δυναμικά την πορεία πτήσης του. Αυτή η ιεραρχική προσέγγιση επιτρέπει στο UAV να πλοηγείται από μια αρχική θέση σε έναν τελικό προορισμό σε ένα μερικώς γνωστό τρισδιάστατο περιβάλλον, μειώνοντας τον κίνδυνο σύγκρουσης (Sinopoli et al., 2001).

Σε σενάρια όπου η προηγούμενη γνώση του περιβάλλοντος είναι περιορισμένη, οι τεχνικές σύντηξης πολλαπλών αισθητήρων καθίστανται ζωτικής σημασίας για την αυτόνομη πλοήγηση. Οι Huang et al. (2019) πρότειναν ένα αυτόνομο σύστημα πλοήγησης με την ονομασία MDFAN (multi-sensor data-fusion-based autonomous navigation) για UAVs που λειτουργούν σε άγνωστα περιβάλλοντα. Το σύστημα αυτό διατυπώνει το πρόβλημα πλοήγησης ως πρόκληση σχεδιασμού διαδρομής λήψης αποφάσεων, μειώνοντας την εξάρτηση από προϋπάρχοντα περιβαλλοντικά δεδομένα. Χρησιμοποιώντας μια βαθιά προσέγγιση ενισχυτικής μάθησης, το UAV μαθαίνει να χειρίζεται αβέβαιες καταστάσεις και να εξάγει δυναμικά σχετικές πληροφορίες από πολλαπλούς αισθητήρες. Ο συνδυασμός δεδομένων από διάφορες πηγές, όπως LiDAR, κάμερες και μονάδες αδρανειακής μέτρησης (IMU), επιτρέπει στο UAV να λαμβάνει τεκμηριωμένες αποφάσεις για την αποφυγή συγκρούσεων και τον

σχεδιασμό διαδρομής, ενισχύοντας έτσι την αυτονομία του σε άγνωστο έδαφος (Huang et al., 2019).

Σε αστικά περιβάλλοντα, τα UAV αντιμετωπίζουν πρόσθετες προκλήσεις, όπως η πλοήγηση μέσα σε πυκνές υποδομές και η αποφυγή συγκρούσεων τόσο με στατικά όσο και με δυναμικά εμπόδια. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, οι Hughes και Engelbrecht (2023) ανέπτυξαν ένα αυτόνομο σύστημα πλοήγησης σχεδιασμένο για πολλαπλά UAV που λειτουργούν σε αστικό περιβάλλον. Το σύστημα περιλαμβάνει έναν μακροπρόθεσμο σχεδιαστή διαδρομής και μια βραχυπρόθεσμη μονάδα αποφυγής συγκρούσεων με συνεργασία. Χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο μοντέλο του αστικού εδάφους, το σύστημα λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς κίνησης των UAV και προβλέπει πιθανές συγκρούσεις. Χρησιμοποιώντας προσομοιώσεις Monte Carlo, οι ερευνητές απέδειξαν την αποτελεσματικότητα του συστήματος που επιτρέπει στα UAV να ταξιδεύουν με ασφάλεια από τα σημεία αναχώρησης στους προορισμούς τους, αποφεύγοντας τις συγκρούσεις μεταξύ τους και με το στατικό έδαφος. Η ενσωμάτωση του μακροπρόθεσμου σχεδιασμού και του βραχυπρόθεσμου αντιδραστικού ελέγχου είναι ζωτικής σημασίας για την ασφαλή λειτουργία των UAV σε δυναμικά αστικά περιβάλλοντα (Hughes & Engelbrecht, 2023).

Μια άλλη καινοτόμος προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση παρακολούθησης με βάση την όραση και διαφορικού GNSS (Global Navigation Satellite System) για τη βελτίωση της ακρίβειας πλοήγησης. Οι Vetrella et al. (2016) πρότειναν έναν συνεργατικό αλγόριθμο πλοήγησης UAV που αξιοποιεί έναν σχηματισμό αρχηγού-υπαρχηγού. Το αρχηγικό UAV είναι εξοπλισμένο με αδρανειακούς και μαγνητικούς αισθητήρες, δέκτη GPS και σύστημα όρασης. Βελτιώνει τις επιδόσεις πλοήγησης αξιοποιώντας τα διαφορικά σήματα GPS από τα αναπληρωματικά UAV. Ενσωματώνοντας την παρακολούθηση με βάση την όραση σε έναν αλγόριθμο σύντηξης αισθητήρων που βασίζεται σε ένα εκτεταμένο φίλτρο Kalman, το σύστημα βελτιώνει την ακρίβεια πλοήγησης, ακόμη και σε εξωτερικά περιβάλλοντα όπου είναι απαραίτητη η ακριβής στόχευση των αισθητήρων. Αυτή η συνεργατική προσέγγιση επιτρέπει τη βελτίωση της επίγνωσης της κατάστασης και της ακρίβειας στην πλοήγηση UAV (Vetrella et al., 2016).

Η αυτόνομη πλοήγηση σε UAV απαιτεί επίσης προηγμένους αλγορίθμους ελέγχου που μπορούν να προσαρμόζονται σε διάφορες επιχειρησιακές συνθήκες. Οι Dong et al. (2016) παρουσίασαν ένα σύστημα αυτόνομης πλοήγησης που χρησιμοποιεί μια μέθοδο οπτικής ροής με ισχυρά χαρακτηριστικά ταχύτητας (SURF) για τη φάση προσέγγισης της πτήσης UAV. Η μέθοδος αυτή ενσωματώνει δεδομένα από πολλαπλούς αισθητήρες, συμπεριλαμβανομένου ενός συστήματος αδρανειακής πλοήγησης (INS), ηλεκτρονικής πυξίδας, αισθητήρων οπτικής

ροής και υψομέτρων. Χρησιμοποιώντας ένα έμμεσο φίλτρο Kalman πολλαπλών ρυθμών και διόρθωση σφαλμάτων με βάση την ανατροφοδότηση, το σύστημα μπορεί να εκτιμήσει τη στάση, το υψόμετρο και την οριζόντια ταχύτητα του UAV. Αυτό το σύστημα πλοήγησης επιτρέπει στα UAV να λειτουργούν με ακρίβεια ακόμη και σε φάσεις πτήσης σε χαμηλό υψόμετρο, όπου τα σήματα GPS ενδέχεται να μην είναι αξιόπιστα, ενισχύοντας την ικανότητά τους για αυτόνομη λειτουργία σε ποικίλα περιβάλλοντα (Dong et al., 2016).

Συνολικά, τα αυτόνομα συστήματα πλοήγησης στα UAV συνδυάζουν προηγμένη ανίχνευση, επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο και έξυπνη λήψη αποφάσεων για την ασφαλή πλοήγηση σε πολύπλοκα και άγνωστα περιβάλλοντα. Αξιοποιώντας την όραση υπολογιστή, τη συγχώνευση δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων, τους συνεργατικούς αλγορίθμους και τις προσαρμοστικές στρατηγικές ελέγχου, τα συστήματα αυτά επιτρέπουν στα UAV να επιτύχουν υψηλά επίπεδα αυτονομίας και επίγνωσης της κατάστασης, εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική λειτουργία σε ένα ευρύ φάσμα σεναρίων.●

2.6 Ενσωμάτωση αισθητήρων

Η ενσωμάτωση αισθητήρων στα UAV αποτελεί βασικό παράγοντα για την ενίσχυση της πλοήγησης, της απόκτησης δεδομένων και των συνολικών επιχειρησιακών δυνατοτήτων τους. Τα σύγχρονα UAV χρησιμοποιούν μια σειρά ολοκληρωμένων αισθητήρων, όπως GPS, LiDAR, κάμερες και μονάδες αδρανειακής μέτρησης (IMU), για να παρέχουν ακριβή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τον έλεγχο της πτήσης και για ειδικές εργασίες αποστολής.

Μια ουσιαστική πτυχή της ενσωμάτωσης αισθητήρων στα UAV είναι η εφαρμογή συστημάτων πλοήγησης που συνδυάζουν δεδομένα από πολλαπλούς αισθητήρες για να εξασφαλίσουν ακριβή έλεγχο της πτήσης. Για παράδειγμα, οι Bu κ.ά. (2017) παρουσίασαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρων πλοήγησης που χρησιμοποιεί GPS και εκτιμήσεις υψηλής ακρίβειας με φίλτρο σωματιδίων (PF) για την ανίχνευση ανωμαλιών στην πλοήγηση UAV. Συγκρίνοντας τις μετρήσεις GPS με τα υπολείμματα PF, το σύστημα μπορεί να εντοπίσει τις αποκλίσεις στα δεδομένα των αισθητήρων, επιτρέποντας στο UAV να ανιχνεύει και να ανταποκρίνεται στις ανωμαλίες σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση βελτιώνει την ευρωστία και την αξιοπιστία της πλοήγησης UAV, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια της πτήσης ακόμη και σε δύσκολα περιβάλλοντα (Bu et al., 2017).

Επιπλέον, η χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN) ενσωματωμένων με UAV προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για εργασίες παρακολούθησης και συλλογής δεδομένων. Οι Zhou et al. (2016) κατέδειξαν την ανάπτυξη και τον έλεγχο κινητών ασύρματων

δικτύων αισθητήρων με χρήση UAV για την παρακολούθηση της δομικής υγείας. Η μελέτη τους διερεύνησε την ενσωμάτωση UAVs με ασύρματους αισθητήρες Martlet, επιτρέποντας στο UAV να εγκαθιστά αισθητήρες σε δομές, να εισάγει φορτία πρόσκρουσης και να συλλέγει δεδομένα. Η ενσωμάτωση των WSNs με UAVs όχι μόνο αυτοματοποιεί τη διαδικασία τοποθέτησης αισθητήρων, αλλά παρέχει επίσης μια κινητή πλατφόρμα για την απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα χρησιμοποιεί έναν ενσωματωμένο αλγόριθμο εκτίμησης της στάσης για να ενισχύσει την ικανότητα του UAV να τοποθετεί με ακρίβεια αισθητήρες και να συλλέγει δομικά δεδομένα, παρουσιάζοντας τη δυνατότητα των UAV να εκτελούν σύνθετες εργασίες ανίχνευσης αυτόνομα (Zhou et al., 2016).

Η ενσωμάτωση αισθητήρων επεκτείνεται επίσης στην ανίχνευση και διαχείριση βλαβών, όπου οι ενσωματωμένοι αισθητήρες παρακολουθούν την υγεία και την απόδοση του UAV. Οι Sun κ.ά. (2017) πρότειναν μια προσέγγιση με βάση τα δεδομένα για την ανίχνευση βλαβών αισθητήρων πλοήγησης UAV χρησιμοποιώντας ένα προσαρμοστικό σύστημα ασαφούς συμπερασμού νευρώνων (ANFIS). Αυτό το σύστημα ενσωματώνει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από πολλαπλούς αισθητήρες, συμπεριλαμβανομένων των IMU και GPS, για να εκτελέσει ανάλυση υπολειμμάτων μέσω ενός φίλτρου Kalman. Αξιολογώντας τα κατάλοιπα μέσω του συστήματος αποφάσεων που βασίζεται στο ANFIS, το UAV μπορεί να ανιχνεύσει σφάλματα αισθητήρων γρήγορα και με ακρίβεια. Αυτός ο ολοκληρωμένος μηχανισμός ανίχνευσης σφαλμάτων διασφαλίζει ότι το UAV μπορεί να διατηρήσει αξιόπιστες πτητικές λειτουργίες, αντιμετωπίζοντας άμεσα τις πιθανές ανωμαλίες των αισθητήρων (Sun et al., 2017).

Στις εφαρμογές εναέριας επιτήρησης, η ενσωμάτωση αισθητήρων επιτρέπει στα UAV να συλλέγουν αποτελεσματικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Οι Rahmaniar και Santoso (2022) παρουσίασαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα αισθητήρων για εναέρια επιτήρηση, συνδυάζοντας αισθητήρες για την ανίχνευση εμποδίων, τη συλλογή δεδομένων πτήσης και τη λήψη εικόνας. Οι ενσωματωμένοι αισθητήρες του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των καμερών και των μονάδων ανίχνευσης εμποδίων, μεταδίδουν σε πραγματικό χρόνο δεδομένα πτήσης και εναέριας εικόνας σε έναν επίγειο σταθμό. Η ενσωμάτωση των αισθητήρων επιτρέπει στο UAV να προσαρμόζει την πορεία πτήσης του σε απόκριση σε εμπόδια και περιβαλλοντικές αλλαγές, ενισχύοντας την ικανότητά του να εκτελεί αυτόνομα καθήκοντα επιτήρησης. Η διεπαφή του επίγειου σταθμού διευκολύνει την παρακολούθηση και τον έλεγχο, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των λειτουργιών του UAV (Rahmaniar & Santoso, 2022).

Επιπλέον, η ενσωμάτωση αισθητήρων στα UAV επεκτείνεται σε προηγμένες λειτουργίες πλοήγησης και αποφυγής εμποδίων. Οι Zhou και Reichle (2010) ανέπτυξαν μια μέθοδο επεξεργασίας σύντηξης δεδομένων πολλαπλών αισθητήρων για χαρτογράφηση με βάση UAV, τονίζοντας την αναγκαιότητα της ενσωμάτωσης αισθητήρων όπως κάμερες, IMU και LiDAR για ακριβή χαρτογράφηση και πλοήγηση. Με τη συγχώνευση δεδομένων από αυτούς τους αισθητήρες, το UAV μπορεί να επιτύχει ακρίβεια χαρτογράφησης 1-2 εικονοστοιχείων, διευκολύνοντας την περιβαλλοντική χαρτογράφηση υψηλής ανάλυσης και ακρίβειας. Αυτό το επίπεδο ενσωμάτωσης αισθητήρων επιτρέπει στα UAV να πλοηγούνται σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, ενώ παράλληλα συλλέγουν λεπτομερή χωρικά δεδομένα, καθιστώντας τα ανεκτίμητα για εργασίες όπως η χαρτογράφηση εδάφους και η ανίχνευση εμποδίων (Zhou & Reichle, 2010).

Συνοπτικά, η ενσωμάτωση αισθητήρων στα UAV είναι ένα κρίσιμο στοιχείο που ενισχύει την ικανότητά τους να πλοηγούνται, να εντοπίζουν ανωμαλίες, να εκτελούν αυτόνομη επιτήρηση και να συλλέγουν δεδομένα υψηλής ακρίβειας. Αξιοποιώντας ένα συνδυασμό GPS, καμερών, IMU και άλλων αισθητήρων, τα UAV μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικότερα σε μια ποικιλία εφαρμογών, από την παρακολούθηση της δομικής υγείας έως την εναέρια επιτήρηση σε πραγματικό χρόνο.

2.7 Επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

Η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στα UAV είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές που απαιτούν άμεση ανάλυση και λήψη αποφάσεων, όπως η επιτήρηση, η περιβαλλοντική παρακολούθηση και η ανίχνευση αντικειμένων. Η ικανότητα αυτή βασίζεται σε προηγμένους αλγορίθμους και αρχιτεκτονικές συστημάτων που έχουν σχεδιαστεί για να χειρίζονται τους υψηλούς ρυθμούς απόκτησης δεδομένων και τις υπολογιστικές απαιτήσεις των επιχειρήσεων UAV.

Στα σενάρια απόκτησης δεδομένων με βάση UAV, τα δεδομένα πρέπει συχνά να υποβάλλονται σε επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο για την υποστήριξη της έγκαιρης λήψης αποφάσεων. Για παράδειγμα, οι Zeng και Tang (2023) πρότειναν ένα πλαίσιο που υποστηρίζεται από κινητή υπολογιστική ακμή (MEC) και επιτρέπει την απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε UAV που εκτελούν γενικές αποστολές. Το σύστημα αυτό συλλέγει δυναμικά πληροφορίες μέσω αισθητήρων επί του σκάφους και τις επεξεργάζεται με τη βοήθεια διακομιστών MEC. Βελτιστοποιώντας από κοινού την τροχιά του UAV, την κατανομή των πόρων και τη χρονική διάρκεια, το σύστημα ελαχιστοποιεί την

κατανάλωση ενέργειας, ενώ παράλληλα πληροί τις απαιτήσεις ποιότητας επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο. Η προσέγγισή τους ενσωματώνει τεχνικές διαδοχικής κυρτής προσέγγισης και καθόδου συντεταγμένων μπλοκ για τη διαχείριση σύνθετων προβλημάτων που σχετίζονται με την κινητικότητα του UAV και τους ρυθμούς επεξεργασίας δεδομένων, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του UAV κατά τη διάρκεια των αποστολών (Zeng & Tang, 2023).

Μια άλλη πτυχή της επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι η βελτίωση της ανακατασκευής τρισδιάστατης σκηνής με βάση την εικόνα. Οι Liénard κ.ά. (2016) ασχολήθηκαν με το κοινό μειονέκτημα της επεξεργασίας εικόνων μετά την πτήση, όπου οι ανεπαρκείς επικαλύψεις χαρακτηριστικών μεταξύ των εικόνων οδηγούν σε αποτυχίες στην τρισδιάστατη ανακατασκευή. Πρότειναν ένα ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου σε πραγματικό χρόνο που καθοδηγεί το UAV να στοχεύει σε συγκεκριμένες χωρικές θέσεις για την απόκτηση εικόνων, εξασφαλίζοντας επαρκή επικάλυψη χαρακτηριστικών. Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο μετασχηματισμού χαρακτηριστικών με κλίμακα-αναλλοίωτο (SIFT) σε υλικό επεξεργασίας χαμηλού κόστους ενσωματωμένο στο UAV, το σύστημα είναι ικανό να εκτελείται σε πραγματικό χρόνο. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της πτήσης, μειώνοντας την πιθανότητα σφαλμάτων ανακατασκευής και βελτιώνοντας την ποιότητα των τρισδιάστατων μοντέλων, η οποία είναι κρίσιμη για εφαρμογές όπως η τοπογραφία και η χαρτογράφηση (Liénard et al., 2016).

Η επιθεώρηση επιφανειών σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση πολλαπλών UAV παρουσιάζει έναν άλλο τομέα όπου η επεξεργασία των δεδομένων πρέπει να γίνεται άμεσα. Οι Hoang κ.ά. (2019) ανέπτυξαν μια αρχιτεκτονική συστήματος για τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο των UAV που εκτελούν επιθεωρήσεις επιφανειών. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί μια πλατφόρμα μετάδοσης δεδομένων με βάση το δίκτυο χρησιμοποιώντας το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT). Τα UAV συντονίζονται σε συγκεκριμένο σχηματισμό για τη συλλογή και τη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε απομακρυσμένες υπολογιστικές μονάδες. Μια τεχνική επεξεργασίας εικόνας σε απευθείας σύνδεση που βασίζεται σε ιστογράμματα χρησιμοποιείται για την ανίχνευση πιθανών ζημιών ή ελαττωμάτων στην επιθεωρούμενη επιφάνεια. Το σύστημα αποδεικνύει αποτελεσματικά την ενσωμάτωση της επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για κρίσιμες εργασίες, διασφαλίζοντας ότι τα UAV μπορούν να εντοπίζουν και να ανταποκρίνονται άμεσα σε ανωμαλίες επιφάνειας κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεών τους (Hoang et al., 2019).

Στο πλαίσιο της ανίχνευσης οχημάτων, ο Azimi (2018) εισήγαγε ένα υπολογιστικά αποδοτικό δίκτυο ανίχνευσης σε πραγματικό χρόνο με την ονομασία ShuffleDet, το οποίο έχει σχεδιαστεί για την επεξεργασία εικόνων UAV επί του σκάφους. Αυτό το δίκτυο χρησιμοποιεί

ανακατεύθυνση καναλιών και ομαδοποιημένες συνελίξεις για τη βελτιστοποίηση της ταχύτητας, διατηρώντας παράλληλα την ακρίβεια στην ανίχνευση οχημάτων. Ενσωματώνονται ενότητες σύλληψης και παραμορφώσιμες ενότητες για την προσαρμογή σε διαφορετικά μεγέθη και γεωμετρικά σχήματα οχημάτων. Το ShuffleDet τρέχει σε ενσωματωμένες συσκευές όπως το NVIDIA Jetson TX2 και επιτυγχάνει απόδοση σε πραγματικό χρόνο με 14 καρέ ανά δευτερόλεπτο. Η μέθοδος αυτή αποτελεί παράδειγμα για το πώς η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε UAV μπορεί να εφαρμοστεί σε σύνθετες εργασίες, όπως η ανίχνευση οχημάτων σε εφαρμογές παρακολούθησης και επιτήρησης της κυκλοφορίας (Azimi, 2018).

Για το ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) με UAV, ο Hui-ju (2014) πρότεινε μια ροή επεξεργασίας σήματος σε πραγματικό χρόνο και μια δομή υλικού για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτουν ο μεγάλος όγκος δεδομένων και η υψηλή πολυπλοκότητα των αλγορίθμων. Η δομή υλικού περιλαμβάνει μια πλακέτα διασύνδεσης για δειγματοληψία AD και πλακέτες επεξεργασίας σήματος που βασίζονται στην αρχιτεκτονική TS201. Ο προηγμένος αλγόριθμος range-Doppler (RD) χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση των σφαλμάτων κίνησης χρησιμοποιώντας τόσο δεδομένα GPS όσο και ηχώ σήματος. Αυτή η σχεδίαση επιτυγχάνει απεικόνιση SAR σε πραγματικό χρόνο στην πλατφόρμα UAV, επικυρώνοντας την αξιοπιστία του επεξεργαστή και τη σκοπιμότητα του αλγορίθμου απεικόνισης. Αυτή η ικανότητα είναι ζωτικής σημασίας για τα UAV που έχουν αναλάβει τη χαρτογράφηση επιφανειών και εδάφους σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντάς τους να επεξεργάζονται άμεσα σήματα ραντάρ και να παράγουν αξιοποιήσιμες πληροφορίες κατά τη διάρκεια της πτήσης (Schartel et al., 2018).

Συνοπτικά, η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στα UAV περιλαμβάνει την ενσωμάτωση προηγμένων αλγορίθμων, αρχιτεκτονικών υλικού και τεχνικών βελτιστοποίησης για τον χειρισμό των τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων που αποκτώνται κατά τη διάρκεια της πτήσης. Παρέχοντας τη δυνατότητα στα UAV να επεξεργάζονται πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, τα συστήματα αυτά ενισχύουν την ικανότητα των UAV να λαμβάνουν άμεσες αποφάσεις, βελτιώνοντας έτσι την απόδοσή τους σε διάφορες εφαρμογές, από την παρακολούθηση του περιβάλλοντος έως την επιθεώρηση επιφανειών και την ανίχνευση αντικειμένων.

2.8 Εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης

Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και η μηχανική μάθηση (ML) έχουν επεκτείνει σημαντικά τις δυνατότητες των UAV, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να εκτελούν πολύπλοκα καθήκοντα αυτόνομα και να προσαρμόζονται σε δυναμικά περιβάλλοντα. Οι αλγόριθμοι AI στα UAV βελτιώνουν λειτουργίες όπως η πλοήγηση, η ανίχνευση αντικειμένων και η λήψη αποφάσεων, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία τους σε ποικίλες εφαρμογές.

Μία από τις βασικές εφαρμογές της TN σε UAV είναι η αυτόνομη πλοήγηση, όπου οι αλγόριθμοι TN επιτρέπουν στα UAV να πλοηγούνται σε πολύπλοκα περιβάλλοντα με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Οι παραδοσιακές μέθοδοι πλοήγησης βασίζονται σε προ-προγραμματισμένες διαδρομές, οι οποίες περιορίζουν την ευελιξία του UAV. Αντίθετα, η πλοήγηση με βάση την TN χρησιμοποιεί προηγμένους αλγορίθμους όπως η ενισχυτική μάθηση και η βαθιά μάθηση για να ερμηνεύσει δεδομένα από αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο και να λάβει αποφάσεις σχετικά με τις διαδρομές πτήσης. Οι Rezwan και Choi (2022) συζήτησαν διάφορες προσεγγίσεις TN για αυτόνομη πλοήγηση UAV, τονίζοντας πώς οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης και οι προσεγγίσεις μάθησης που βασίζονται σε μοντέλα, όπως η βαθιά ενισχυτική μάθηση, επιτρέπουν στα UAV να πλοηγούνται αυτόνομα μαθαίνοντας συνεχώς από το περιβάλλον τους. Αυτό επιτρέπει στα UAVs να προσαρμόζουν τις διαδρομές πτήσης τους σε απόκριση σε εμπόδια ή αλλαγές στο περιβάλλον τους, καθιστώντας τα πιο ευέλικτα και ικανά να λειτουργούν σε προηγουμένως απρόσιτες ή επικίνδυνες περιοχές (Rezwan & Choi, 2022).

Η τεχνητή νοημοσύνη διαδραματίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας που βασίζονται σε UAV. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να βελτιστοποιήσουν την ανάπτυξη UAV για να βελτιώσουν την κάλυψη του δικτύου και τη φασματική αποδοτικότητα. Οι Puente-Castro (2020) εξέτασαν τη χρήση της μηχανικής μάθησης σε δίκτυα που βασίζονται σε UAV, εξηγώντας πώς η TN μπορεί να βελτιστοποιήσει τις θέσεις των UAV για τη δημιουργία και τη διατήρηση συνδέσεων επικοινωνίας σε οπτική επαφή με τους χρήστες. Με τη χρήση ενισχυτικής μάθησης και άλλων τεχνικών ML, τα UAV μπορούν να προσαρμόζουν δυναμικά τις διαδρομές πτήσης τους για να διατηρούν τη βέλτιστη συνδεσιμότητα, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη και υψηλής ποιότητας επικοινωνία ακόμη και σε περιβάλλοντα με κυμαινόμενες συνθήκες. Η εφαρμογή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας επόμενης γενιάς, όπου τα UAV χρησιμεύουν ως κινητοί σταθμοί βάσης, παρέχοντας κάλυψη σε περιοχές όπου οι επίγειες υποδομές δεν επαρκούν (Puente-Castro et al., 2021).

Στο πλαίσιο του Διαδικτύου των Οχημάτων (IoV), τα UAV εξοπλισμένα με TN μπορούν να συλλέγουν και να επεξεργάζονται δεδομένα για εφαρμογές όπως η πρόβλεψη της κυκλοφορίας και η διαχείριση χώρων στάθμευσης. Οι Lim κ.ά. (2020) πρότειναν μια προσέγγιση ομοσπονδιακής μάθησης για εφαρμογές IoV με UAV, όπου τα UAV εκπαιδεύουν συνεργατικά μοντέλα AI χωρίς να μοιράζονται ακατέργαστα δεδομένα. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει το απόρρητο των δεδομένων και επιτρέπει την αποτελεσματική εκπαίδευση μοντέλων TN σε ένα δίκτυο UAV, επιτρέποντας εργασίες όπως η βελτιστοποίηση της ροής της κυκλοφορίας και η έξυπνη στάθμευση. Η ομοσπονδιακή μάθηση επιτρέπει στα UAV να διαχειρίζονται πολλαπλές πηγές δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που προέρχονται από διαφορετικούς αισθητήρες και οχήματα, ενισχύοντας τη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια των δεδομένων (Lim et al., 2020).

Η τεχνητή νοημοσύνη χρησιμοποιείται επίσης στα UAV για την ανίχνευση και τον εντοπισμό αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο. Οι Lee et al. (2020) εισήγαγαν ένα πλαίσιο AI πολλαπλών επιπέδων για UAVs για την εκτέλεση οπτικών εργασιών σε πραγματικό χρόνο, όπως η ανίχνευση αντικειμένων και η παρακολούθηση στόχων. Το πλαίσιο ενσωματώνει μοντέλα βαθιάς μάθησης που επιτρέπουν στα UAVs να ανιχνεύουν, να παρακολουθούν και να παραδίδουν στόχους σε πραγματικό χρόνο, πράγμα ζωτικής σημασίας για εφαρμογές όπως η επιτήρηση και οι αποστολές έρευνας και διάσωσης. Αξιοποιώντας τα νευρωνικά δίκτυα συνελκτικής μάθησης (CNN) και άλλες τεχνικές βαθιάς μάθησης, τα UAV μπορούν να επεξεργάζονται και να αναλύουν ταχέως τις ροές βίντεο, διακρίνοντας αντικείμενα και άτομα μέσα σε πολύπλοκα περιβάλλοντα. Αυτή η ικανότητα ενισχύει την επίγνωση της κατάστασης και την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα των UAVs, παρέχοντας σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια των αποστολών (Lee et al., 2017).

Η τεχνητή νοημοσύνη και η ML χρησιμοποιούνται επίσης στον σχεδιασμό διαδρομών για τα UAV, επιτρέποντάς τους να βρίσκουν αυτόνομα τις πιο αποτελεσματικές και ασφαλείς διαδρομές. Οι αλγόριθμοι σχεδιασμού διαδρομής με τεχνητή νοημοσύνη, όπως ο αλγόριθμος A* και οι παραλλαγές του, χρησιμοποιούν ευρετικές μεθόδους για τον υπολογισμό διαδρομών χωρίς συγκρούσεις για UAV. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στα UAV να προσαρμόζονται σε δυναμικά περιβάλλοντα και εμπόδια, υπολογίζοντας εκ νέου τις βέλτιστες διαδρομές σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, αυτά τα συστήματα που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας και το χρόνο πτήσης, διασφαλίζοντας ότι τα UAV μπορούν να ολοκληρώσουν αποτελεσματικά τις αποστολές τους, εξοικονομώντας παράλληλα ενέργεια. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα UAV που

αναπτύσσονται σε απομακρυσμένες ή υψηλού κινδύνου περιοχές, όπου οι δυνατότητες αυτόνομης και προσαρμοστικής πλοήγησης είναι απαραίτητες για την επιτυχία της αποστολής (Zhang, 2021).

Συνοπτικά, η τεχνητή νοημοσύνη και το ML στα UAV επιτρέπουν την αυτόνομη πλοήγηση, ενισχύουν τα δίκτυα επικοινωνίας, διευκολύνουν την ανίχνευση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο και βελτιστοποιούν τον σχεδιασμό διαδρομής. Μαθαίνοντας διαρκώς από το περιβάλλον τους, τα UAV με τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και να εκτελούν σύνθετα καθήκοντα, καθιστώντας τα ανεκτίμητα σε διάφορες εφαρμογές που κυμαίνονται από την επιτήρηση έως τις έξυπνες πόλεις.

Κεφάλαιο 3: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις και βιωσιμότητα

3.1 Περιβαλλοντικές εκτιμήσεις στο σχεδιασμό UAV

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV) έχουν γίνει βασικά εργαλεία για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, απαιτώντας προσεκτική εξέταση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων και των χαρακτηριστικών βιώσιμου σχεδιασμού τους. Για την ελαχιστοποίηση του οικολογικού τους αποτυπώματος πρέπει να εξεταστούν διάφορες πτυχές, όπως η αρθρωτότητα, η κατανάλωση ενέργειας, η χρήση υλικών και η λειτουργική αποδοτικότητα.

Αρχικά, η διάρθρωση των UAV είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων, καθώς επιτρέπει την εύκολη προσαρμογή τους για πολλαπλές χρήσεις, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής τους. Τα παραδοσιακά UAV αντιμετωπίζουν συχνά περιορισμούς λόγω του σχεδιασμού τους, ο οποίος συνήθως επιτρέπει την ενσωμάτωση μόνο των ωφέλιμων φορτίων για τα οποία κατασκευάστηκαν αρχικά. Ωστόσο, οι αρθρωτοί σχεδιασμοί, όπως αυτός που προτείνεται από τους Tripolitsiotis et al. (2017), επιτρέπουν την ενσωμάτωση διαφόρων αισθητήρων χωρίς πρόσθετες τροποποιήσεις. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει την παρακολούθηση του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο και τη συλλογή δεδομένων σε διαφορετικά σενάρια, μειώνοντας την ανάγκη για πολλαπλά UAV και ελαχιστοποιώντας έτσι το περιβαλλοντικό κόστος παραγωγής και ανάπτυξης (Tripolitsiotis et al., 2017).

Επίσης, το σύστημα πρόωσης και η κατανάλωση ενέργειας των UAV είναι ζωτικής σημασίας για τη βιωσιμότητα. Τα UAV με προηγμένες πηγές ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια ή οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, έχουν αναπτυχθεί για να παρατείνουν τους χρόνους πτήσης και να μειώσουν το αποτύπωμα άνθρακα της λειτουργίας τους. Οι Thiryopas et al. (2019) περιγράφουν τον σχεδιασμό ενός UAV με ηλιακή ενέργεια που μπορεί να επιτύχει έως και 6 ώρες συνεχούς πτήσης, χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά στοιχεία για την αποτελεσματική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Τέτοιοι σχεδιασμοί αναδεικνύουν τη δυνατότητα χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε UAV για τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων (Thiryopas et al., 2019).

Επιπλέον, ο βιώσιμος σχεδιασμός UAV περιλαμβάνει την προσεκτική επιλογή υλικών για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά την κατασκευή και τη διάθεση. Οι τεχνικές γεννητικού σχεδιασμού μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση υλικών, με αποτέλεσμα ελαφριές αλλά ανθεκτικές δομές UAV. Οι Paz και Bustamante (2022) συζητούν

πώς η χρήση γεννητικού σχεδιασμού οδηγεί σε UAV που δεν είναι μόνο ασφαλέστερα αλλά και καταναλώνουν λιγότερες πρώτες ύλες. Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στη βιωσιμότητα των UAV μειώνοντας την εκμετάλλευση των πόρων και την παραγωγή αποβλήτων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του UAV (Paz & Bustamante, 2022).

Ακόμη, η επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα των UAV επηρεάζει σημαντικά το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Ο σωστός σχεδιασμός πτήσης, συμπεριλαμβανομένης της βελτιστοποίησης της διαδρομής και της αποφυγής επικίνδυνων περιβαλλοντικών συνθηκών, διασφαλίζει την αποδοτική χρήση ενέργειας. Οι Jones et al. (2022) τονίζουν τη σημασία της ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας σε πολύπλοκα περιβάλλοντα μέσω προηγμένων μηχανισμών σχεδιασμού διαδρομής και αποφυγής συγκρούσεων. Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός διαδρομής μειώνει την περιττή κατανάλωση ενέργειας και ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ατυχημάτων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μόλυνση ή διαταραχή του περιβάλλοντος (Jones et al., 2022).

Τέλος, τα UAV χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, συμβάλλοντας στη μείωση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, παρέχοντας ένα λιγότερο παρεμβατικό μέσο συλλογής δεδομένων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Οι Liu κ.ά. (2020) παρουσιάζουν την εφαρμογή των UAV στην παρακολούθηση της ατμόσφαιρας, όπου τα πολυροτροφόρα UAV που είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες και ένα σύστημα μετάδοσης μέσω δικτύου 4G παρέχουν παρακολούθηση και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο. Τέτοιες δυνατότητες επιτρέπουν πιο στοχευμένες παρεμβάσεις και ελαχιστοποιούν την περιβαλλοντική διαταραχή που συνήθως συνδέεται με τις επίγειες μεθόδους παρακολούθησης (Liu et al., 2020).

Συμπερασματικά, ο σχεδιασμός των UAV πρέπει να ενσωματώνει περιβαλλοντικές εκτιμήσεις σε όλες τις πτυχές της αρθρωτότητας, της ενεργειακής απόδοσης, της χρήσης υλικών και του επιχειρησιακού σχεδιασμού για την επίτευξη βιωσιμότητας. Με τη βελτιστοποίηση αυτών των παραγόντων, τα UAV μπορούν να μειώσουν σημαντικά το οικολογικό τους αποτύπωμα, ενισχύοντας παράλληλα τον ρόλο τους στην περιβαλλοντική παρακολούθηση και διατήρηση.

3.2 Βιώσιμες επιλογές υλικών

Η επιλογή βιώσιμων υλικών αποτελεί κρίσιμη πτυχή του σχεδιασμού UAV, με στόχο την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και τη διατήρηση των επιδόσεων. Οι

καινοτομίες στην επιστήμη των υλικών και στις τεχνικές κατασκευής οδηγούν στην ανάπτυξη UAV που είναι ελαφρύτερα, αποδοτικότερα και φιλικότερα προς το περιβάλλον.

Αρχικά, η προσθετική κατασκευή (AM) έχει αναδειχθεί ως βιώσιμη μέθοδος για την παραγωγή εξαρτημάτων UAV με τη χρήση βιώσιμων υλικών. Οι Junk και Schröder (2016) συζητούν τη χρήση της AM στο σχεδιασμό UAV, τονίζοντας τις δυνατότητές της για τη δημιουργία ελαφρών δομών που μειώνουν τη χρήση υλικών και τα απόβλητα. Χρησιμοποιώντας την προσθετική κατασκευή, οι σχεδιαστές μπορούν να δημιουργήσουν πολύπλοκες γεωμετρίες με ελάχιστο υλικό, με αποτέλεσμα ελαφρύτερα UAV που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια κατά τη λειτουργία τους. Επιπλέον, η AM επιτρέπει την ενσωμάτωση βιώσιμων υλικών, όπως τα βιοπλαστικά, σε εξαρτήματα UAV, συμβάλλοντας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Junk & Schröder, 2016).

Επίσης, η χρήση βιοπλαστικών αποτελεί μια αναδυόμενη τάση στον σχεδιασμό UAV, προσφέροντας μια βιώσιμη εναλλακτική λύση στα συμβατικά πλαστικά με βάση το πετρέλαιο. Οι Coe et al. (2019) παρουσιάζουν ένα πρωτότυπο UAV που κατασκευάστηκε με χρήση βιοπλαστικού φυτικής προέλευσης μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η προσέγγιση αυτή καταδεικνύει τη δυνατότητα δημιουργίας σκελετών UAV με τουλάχιστον 70 % βιώσιμο υλικό κατ' όγκο. Το βιοπλαστικό όχι μόνο παρέχει τις απαραίτητες μηχανικές ιδιότητες για την πτήση, αλλά διασφαλίζει επίσης ότι το UAV μπορεί να είναι πιο φιλικό προς το περιβάλλον καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, συμπεριλαμβανομένης της διάθεσης στο τέλος του κύκλου ζωής του (Coe et al., 2019).

Η ενσωμάτωση ανακυκλωμένων υλικών, όπως τα ανακυκλωμένα πλαστικά, στην κατασκευή UAV είναι μια άλλη στρατηγική για την ενίσχυση της βιωσιμότητας. Οι Niemand et al. (2018) περιγράφουν την ανάπτυξη ενός πτυσσόμενου UAV κατασκευασμένου από ανακυκλωμένο πλαστικό πολυαιθυλενοτερεφθαλικού εστέρα (PET). Με τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών, η διαδικασία κατασκευής UAV μειώνει τη ζήτηση για παρθένα υλικά, οδηγώντας σε μείωση του συνολικού αποτυπώματος άνθρακα. Επιπλέον, ο πτυσσόμενος σχεδιασμός του UAV ενισχύει την επιχειρησιακή του ευελιξία, μειώνοντας περαιτέρω τον περιβαλλοντικό του αντίκτυπο, βελτιστοποιώντας τη χρήση υλικών και την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς (Niemand et al., 2018).

Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά, όπως οι ίνες άνθρακα, οι ίνες γυαλιού και το Kevlar, χρησιμοποιούνται ευρέως στον σχεδιασμό UAV λόγω της υψηλής αναλογίας αντοχής προς βάρος. Οι Verma κ.ά. (2018) διερευνούν τη χρήση αυτών των σύνθετων υλικών στην κατασκευή UAV, τονίζοντας την ικανότητά τους να ενισχύουν τη δομική απόδοση με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του βάρους. Ωστόσο, σημειώνουν επίσης ότι, ενώ τα σύνθετα

υλικά προσφέρουν σημαντικά οφέλη απόδοσης, πρέπει να λαμβάνονται προσεκτικά υπόψη οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής τους και της διάθεσης στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, καταβάλλονται προσπάθειες για την ανάπτυξη σύνθετων υλικών βιολογικής προέλευσης, τα οποία συνδυάζουν ανανεώσιμες ίνες με βιοδιασπώμενες ρητίνες, προσφέροντας μια πιο βιώσιμη εναλλακτική λύση σε σχέση με τα παραδοσιακά σύνθετα υλικά (Verma et al., 2018).

Τέλος, η ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας στα UAV απαιτεί υλικά που δεν είναι μόνο ελαφριά αλλά και ικανά να ενσωματώνουν αποτελεσματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Οι García-Gascón κ.ά. (2022) προτείνουν τη χρήση προσθετικής κατασκευής για την παραγωγή εξαρτημάτων UAV που έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν ηλιακά πάνελ, ενισχύοντας την αυτονομία πτήσης και μειώνοντας την εξάρτηση από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Χρησιμοποιούν καινοτόμα υλικά και τεχνικές τριδιάστατης εκτύπωσης, όπως ελάχιστες επιφάνειες και γυροειδή, για να ενισχύσουν τις δομές UAV, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το βάρος. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες των UAV, αλλά συμβάλλει και στη βιωσιμότητα του σχεδιασμού μεγιστοποιώντας την ενεργειακή απόδοση (García-Gascón et al., 2022).

Συμπερασματικά, οι βιώσιμες επιλογές υλικών στο σχεδιασμό UAV περιλαμβάνουν ένα φάσμα στρατηγικών, συμπεριλαμβανομένης της προσθετικής κατασκευής, της χρήσης βιοπλαστικών, ανακυκλωμένων υλικών και προηγμένων σύνθετων υλικών. Οι επιλογές αυτές αποσκοπούν στη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων των UAV καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη πιο βιώσιμων εναέριων συστημάτων.

3.3 Μείωση θορύβου και εκπομπών

Η μείωση του θορύβου και των εκπομπών των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) είναι ζωτικής σημασίας για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων και την αύξηση της αποδοχής τους από το κοινό, ιδίως σε αστικές και ευαίσθητες περιοχές. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων εφαρμόζονται διάφορες στρατηγικές, συμπεριλαμβανομένων τροποποιήσεων στο σχεδιασμό, στις επιχειρησιακές τεχνικές και στη χρήση προηγμένων τεχνολογιών.

Ο θόρυβος που παράγεται από τα UAV προέρχεται κυρίως από τους κινητήρες και τους έλικες τους. Ενώ ο θόρυβος των ελίκων έχει μελετηθεί ευρέως, ο θόρυβος των κινητήρων παίζει επίσης σημαντικό ρόλο. Οι Qian κ.ά. (2021) προτείνουν μια παθητική προσέγγιση μείωσης του θορύβου με τη χρήση απορροφητών μικροδιάτρητων πάνελ (MPP) και

ηχομονωτικών υλικών για τον μετριασμό του θορύβου του κινητήρα. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν σημαντική μείωση του συνολικού επιπέδου θορύβου, υποδεικνύοντας ότι η αντιμετώπιση τόσο του θορύβου του κινητήρα όσο και του θορύβου των ελίκων μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά το ακουστικό αποτύπωμα των UAV (Qian et al., 2021).

Μια άλλη προσέγγιση περιλαμβάνει την τροποποίηση της διαμόρφωσης του ρότορα. Οι Pereira κ.ά. (2023) μελέτησαν ένα οκταπλό πολυροτέρ UAV με αντίθετα περιστρεφόμενους έλικες, διαπιστώνοντας ότι η μεταβολή της εισόδου λειτουργίας μεταξύ των εμπρόσθιων και οπίσθιων κινητήρων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του θορύβου. Συγκεκριμένα, η προσαρμογή των στροφών του μπροστινού και του πίσω κινητήρα είχε ως αποτέλεσμα την εξασθένηση της συνολικής στάθμης ηχητικής πίεσης κατά 5 έως 8 dBA. Αυτή η μέθοδος δυναμικής ρύθμισης μπορεί να αποτελέσει έναν πρακτικό τρόπο μετριασμού του θορύβου κατά τη διάρκεια των πτητικών λειτουργιών (Pereira et al., 2023).

Επίσης, η χρήση της ψυχοακουστικής ανάλυσης βοηθά στην κατανόηση και τη μείωση του αντιληπτού θορύβου των UAV. Οι Torija et al. (2021) διερεύνησαν τον θόρυβο των αντίθετα περιστρεφόμενων ελίκων και διαπίστωσαν ότι η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των ελίκων μπορεί να μειώσει σημαντικά την ενόχληση από τον θόρυβο. Με τη βελτιστοποίηση της αξονικής απόστασης διαχωρισμού μεταξύ των ρότορων, τα UAV μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τα δυσάρεστα ηχητικά χαρακτηριστικά, όπως η ένταση του ήχου, η τραχύτητα και η ένταση της διακύμανσης, βελτιώνοντας το ακουστικό τους προφίλ σε διάφορα επιχειρησιακά σενάρια (Torija et al., 2021).

Επιπλέον, η λειτουργία UAV σε αστικά περιβάλλοντα έχει αξιοσημείωτο αντίκτυπο στο ηχητικό τοπίο. Οι Torija κ.ά. (2019) εξέτασαν τον τρόπο με τον οποίο ο θόρυβος των UAV επηρεάζει διάφορα αστικά ηχητικά περιβάλλοντα, προτείνοντας ότι οι διαδρομές πτήσης θα μπορούσαν να συγκεντρώνονται κατά μήκος πολυσύχναστων δρόμων για τον μετριασμό των επιπτώσεων. Όταν τα UAV λειτουργούν σε περιοχές όπου ήδη κυριαρχεί ο θόρυβος της οδικής κυκλοφορίας, ο πρόσθετος θόρυβος τους έχει λιγότερο σημαντική επίδραση στην αντιληπτή ενόχληση, υπογραμμίζοντας τη σημασία του στρατηγικού επιχειρησιακού σχεδιασμού (Torija et al., 2019).

Οι εκπομπές από τα UAV σχετίζονται κυρίως με τις πηγές ενέργειάς τους. Η μετάβαση σε ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης μειώνει σημαντικά τις άμεσες εκπομπές. Ωστόσο, πρέπει επίσης να δοθεί προσοχή στις ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τα συστήματα επικοινωνίας. Οι Sakai κ.ά. (2023) αξιολόγησαν τις επιπτώσεις του θορύβου εκπομπών και της ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης σε UAV που είναι εξοπλισμένα με συστήματα κινητής επικοινωνίας. Διαπίστωσαν ότι ο θόρυβος εκπομπής μπορεί να

υποβαθμίσει την ευαισθησία του δέκτη των συστημάτων LTE, υποδεικνύοντας την ανάγκη για κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική θωράκιση για να διασφαλιστεί η ασφαλής και αξιόπιστη λειτουργία, ιδίως σε κατοικημένες περιοχές (Sakai et al., 2023).

Οι καινοτομίες στα συστήματα ελέγχου πτήσης συμβάλλουν επίσης στη μείωση του θορύβου και των εκπομπών. Οι Chudý και Rzučidlo (2011) εισήγαγαν ένα φιλικό προς το περιβάλλον σύστημα ελέγχου πτήσης που βασίζεται στο σύστημα ελέγχου Total X Control System (TXCS). Το σύστημα αυτό μειώνει τη συνολική διάχυση ενέργειας βελτιστοποιώντας τις διαδρομές πτήσης και τους ελιγμούς, μειώνοντας έτσι τόσο τον θόρυβο όσο και τις εκπομπές. Οι προκαταρκτικές δοκιμές έδειξαν ότι υπόσχονται την ενσωμάτωση τέτοιων συστημάτων σε UAV για τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεών τους (Chudý & Rzučidlo, 2011).

Η αποτελεσματική μείωση του θορύβου και των εκπομπών στα UAV περιλαμβάνει ένα συνδυασμό τεχνικών μετριασμού του θορύβου, διαχείρισης των εκπομπών και έξυπνων συστημάτων ελέγχου της πτήσης. Οι στρατηγικές αυτές αποσκοπούν στο να καταστήσουν τα UAV πιο αποδεκτά σε διάφορα περιβάλλοντα, μειώνοντας τις επιπτώσεις τους τόσο στον άνθρωπο όσο και στο περιβάλλον.

3.4 Αξιολόγηση του κύκλου ζωής

Η αξιολόγηση κύκλου ζωής είναι μια κρίσιμη μεθοδολογία για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει την εξόρυξη πρώτων υλών, την κατασκευή, τη λειτουργία, τη συντήρηση και τη διάθεση στο τέλος του κύκλου ζωής τους, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της βιωσιμότητάς τους.

Το αρχικό στάδιο του κύκλου ζωής ενός UAV περιλαμβάνει τις διαδικασίες σχεδιασμού και κατασκευής, οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι Thokala et al. (2010) ανέπτυξαν ένα πλαίσιο για την εκτίμηση του κόστους κύκλου ζωής των UAV, το οποίο ενσωματώνει περιβαλλοντικές εκτιμήσεις στη φάση του σχεδιασμού. Το πλαίσιο επιτρέπει στους σχεδιαστές να αξιολογούν τις αντισταθμίσεις μεταξύ διαφορετικών διαμορφώσεων, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής υλικών και μεθόδων παραγωγής. Με την ενσωμάτωση βιώσιμων υλικών και τεχνικών παραγωγής, τα UAV μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουν εξαρχής το αποτύπωμα άνθρακα και την κατανάλωση πόρων (Thokala et al., 2010).

Η επιχειρησιακή φάση είναι ένα άλλο κρίσιμο στοιχείο του κύκλου ζωής ενός UAV, όπου η κατανάλωση ενέργειας, οι εκπομπές και η συντήρηση αποτελούν πρωταρχικές ανησυχίες. Οι Balli και Caliskan (2021) διεξήγαγαν αξιολόγηση ενός στροβιλοκινητήρα που χρησιμοποιείται σε UAV, αναλύοντας τόσο τις συνθήκες εντός όσο και εκτός σχεδιασμού για να αξιολογήσουν την κατανάλωση καυσίμου, την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητά τους. Διαπίστωσαν ότι η κατάσταση εκτός σχεδιασμού είχε καλύτερη απόδοση καυσίμου και χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, γεγονός που υποδηλώνει ότι η βελτιστοποίηση των λειτουργικών παραμέτρων μπορεί να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των UAV. Επιπλέον, εντόπισαν τον θάλαμο καύσης ως βασικό τομέα για βελτίωση, υποδεικνύοντας ότι οι εξελίξεις στην τεχνολογία των κινητήρων μπορούν να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα των λειτουργιών των UAV (Balli & Caliskan, 2021).

Η αξιοπιστία και η συντήρηση των UAV διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση του κύκλου ζωής τους. Οι Petritoli et al. (2018) τονίζουν την ανάγκη για μια λογιστική προσέγγιση που βασίζεται σε αξιολογήσεις αξιοπιστίας και συντήρησης για τον καθορισμό αποτελεσματικών διαστημάτων συντήρησης. Με την ανάλυση της αξιοπιστίας των συστημάτων UAV στο στάδιο του σχεδιασμού και την εφαρμογή στρατηγικών προληπτικής και διορθωτικής συντήρησης, μπορεί να παραταθεί η επιχειρησιακή διάρκεια ζωής των UAV. Η προσέγγιση αυτή όχι μόνο μειώνει τη συχνότητα των αντικαταστάσεων και των επισκευών, αλλά και ελαχιστοποιεί τη χρήση πόρων και τη δημιουργία αποβλήτων με την πάροδο του χρόνου (Petritoli et al., 2018).

Το τελικό στάδιο του κύκλου ζωής των UAV περιλαμβάνει τη διάθεση, την ανακύκλωση ή την επαναχρησιμοποίηση των εξαρτημάτων, η οποία μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη συνολική περιβαλλοντική τους επίδοση. Ο Mishra (2017) διεξήγαγε μια αξιολόγηση της διάρκειας ζωής ενός μικρού στροβιλοκινητήρα που μπορεί να ανακτηθεί στη θάλασσα για εφαρμογές UAV, εστιάζοντας στην ικανότητα επαναχρησιμοποίησης του κινητήρα μετά από έκθεση σε δύσκολες συνθήκες, όπως το αλμυρό νερό. Η μελέτη αυτή υπογραμμίζει τη σημασία του σχεδιασμού των UAV για ανθεκτικότητα και δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης, επιτρέποντάς τους να αντέχουν σε περιβαλλοντικές καταπονήσεις και μειώνοντας την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις. Τέτοιες στρατηγικές μπορούν να οδηγήσουν στη μείωση των αποβλήτων και τη διατήρηση των πόρων στο στάδιο του τέλους του κύκλου ζωής (Mishra, 2017).

Συμπερασματικά, η αξιολόγηση του κύκλου ζωής των UAV αποκαλύπτει τη σημασία του βιώσιμου σχεδιασμού, της αποδοτικής λειτουργίας, της αξιόπιστης συντήρησης και της υπεύθυνης διαχείρισης στο τέλος του κύκλου ζωής. Με την αντιμετώπιση αυτών των

παραγόντων, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των UAV μπορεί να ελαχιστοποιηθεί, συμβάλλοντας σε πιο βιώσιμες εναέριες επιχειρήσεις των UAV.

Κεφάλαιο 4: Μελέτες περίπτωσης επιτυχημένων εφαρμογών HALE UAV

4.1 Global Hawk

Το RQ-4 Global Hawk της Northrop Grumman αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της αποτελεσματικότητας των UAV μεγάλου υψομέτρου και μεγάλης αντοχής (HALE) στην κλιματική έρευνα. Η ικανότητα του Global Hawk να βρίσκεται σε μεγάλο υψόμετρο, έως και 65.000 πόδια, του επιτρέπει να συλλέγει αποτελεσματικά ατμοσφαιρικά δεδομένα, ελαχιστοποιώντας τις παρεμβολές του στο περιβάλλον από κάτω. Πετώντας πάνω από την εμπορική εναέρια κυκλοφορία και τα καιρικά συστήματα, αποφεύγει τις αναταράξεις που συνήθως αυξάνουν την κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές ρύπων στα επανδρωμένα αεροσκάφη, βελτιώνοντας έτσι την αποδοτικότητα των καυσίμων του και μειώνοντας το συνολικό περιβαλλοντικό του αποτύπωμα (Thokala et al., 2010).

Η εκτεταμένη αντοχή του, που ξεπερνά τις 30 ώρες, του επιτρέπει να καλύπτει τεράστιες περιοχές, συλλέγοντας ολοκληρωμένα κλιματικά δεδομένα, όπως θερμοκρασία, υγρασία και επίπεδα αερίων του θερμοκηπίου. Η χρήση αρθρωτών ωφέλιμων φορτίων αισθητήρων, μια βασική πτυχή του σχεδιασμού UAV, όπως περιγράφεται λεπτομερώς στο θεωρητικό πλαίσιο, αυξάνει την επιχειρησιακή ευελιξία του UAV. Αυτή η προσαρμοστικότητα σημαίνει ότι το Global Hawk μπορεί να εξοπλιστεί με διάφορους αισθητήρες προσαρμοσμένους σε συγκεκριμένες ερευνητικές αποστολές, μειώνοντας την ανάγκη για πολλαπλά UAV και εξοικονομώντας έτσι πόρους και ελαχιστοποιώντας τις εκπομπές παραγωγής (Balli & Caliskan, 2021).

Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός του Global Hawk, ο οποίος ευθυγραμμίζεται με τις αρχές που συζητήθηκαν στο κεφάλαιο 1 του εγγράφου, δίνει έμφαση στη μείωση της αντίστασης και στη βελτιστοποίηση του λόγου ανύψωσης προς αντίσταση. Αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει στο UAV να λειτουργεί πιο αποτελεσματικά σε μεγάλα ύψη, καταναλώνοντας λιγότερα καύσιμα και μεγιστοποιώντας παράλληλα τη διάρκεια της πτήσης. Επιπλέον, το σύστημα πρόωσης του UAV, που ενδεχομένως ενσωματώνει ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες και μέτρα μείωσης του θορύβου, διασφαλίζει τη διατήρηση χαμηλών εκπομπών κατά τη διάρκεια εκτεταμένων επιχειρήσεων.

Επιπλέον, ο σχεδιασμός του Global Hawk ευθυγραμμίζεται με τις πρακτικές βιωσιμότητας βελτιστοποιώντας τον κύκλο ζωής του. Ο αρθρωτός σχεδιασμός του όχι μόνο επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και αισθητήρων με την πάροδο του χρόνου,

αλλά διευκολύνει επίσης τη συντήρηση και τις αναβαθμίσεις, παρατείνοντας έτσι τη λειτουργική του ζωή και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής και της διάθεσης. Εκπληρώνοντας διάφορες ερευνητικές ανάγκες σε μια ενιαία πλατφόρμα, το Global Hawk αποδεικνύει πώς τα UAV HALE μπορούν να παρέχουν μια βιώσιμη λύση για ατμοσφαιρικές μελέτες μεγάλης κλίμακας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το οικολογικό αποτύπωμα που συνδέεται με τα παραδοσιακά επανδρωμένα αεροσκάφη.

Η περίπτωση αυτή αποτελεί παράδειγμα της έμφασης του θεωρητικού πλαισίου στις περιβαλλοντικές εκτιμήσεις κατά το σχεδιασμό UAV, αναδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα του Global Hawk στη μείωση τόσο των εκπομπών όσο και της χρήσης πόρων σε εφαρμογές κλιματικής έρευνας.



Εικόνα 4. Το UAV RQ-4 Global Hawk της εταιρίας Northrop Grumman (Δημητράτος, 2024)

4.2 Airbus Zephyr

Το Airbus Zephyr είναι ένα UAV HALE τελευταίας τεχνολογίας που έχει σχεδιαστεί ειδικά για την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για πτήσεις μεγάλης διάρκειας, διευρύνοντας τα όρια της βιώσιμης αεροπορίας. Αυτό το UAV μπορεί να πετάξει σε υψόμετρο έως και 70.000 πόδια και να παραμείνει στον αέρα για αρκετές εβδομάδες, χρησιμοποιώντας ηλιακούς συλλέκτες που είναι ενσωματωμένοι στα φτερά του για να τροφοδοτούν τους ηλεκτροκινητήρες του κατά τη διάρκεια της ημέρας και να φορτίζουν τις μπαταρίες του για τη νυχτερινή πτήση. Αυτός ο λειτουργικός σχεδιασμός εξασφαλίζει

συνεχή πτήση χωρίς εκπομπές ρύπων, αναδεικνύοντας το ρόλο του σε αποστολές βιώσιμης περιβαλλοντικής παρακολούθησης, όπως η ανίχνευση δασικών πυρκαγιών και η θαλάσσια επιτήρηση (Junk & Schröder, 2016).

Η εξαιρετικά ελαφριά δομή του Zephyr έχει κεντρικό ρόλο στη βιωσιμότητα και την επιχειρησιακή του αποτελεσματικότητα. Με βάρος περίπου 75 κιλά και άνοιγμα φτερών 25 μέτρων, το UAV κατασκευάζεται κυρίως από προηγμένα σύνθετα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των ανθρακονημάτων. Τα υλικά αυτά, τα οποία αναλύονται στο κεφάλαιο 1 του εγγράφου, επιλέγονται για την υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, η οποία μειώνει σημαντικά τη συνολική μάζα του UAV, ενισχύοντας την αναλογία ανύψωσης προς έλξη. Αυτός ο δομικός σχεδιασμός επιτρέπει στο Zephyr να μεγιστοποιεί τη συλλογή ηλιακής ενέργειας χωρίς να διακυβεύεται η σταθερότητα ή η αντοχή της πτήσης. Με την ενσωμάτωση ηλιακών κυψελών λεπτού φιλμ σε όλη την έκταση των πτερύγων, το UAV εξασφαλίζει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της δομικής ακεραιότητας και των δυνατοτήτων συλλογής ενέργειας (Verma et al., 2018).

Το σύστημα πρόωσης του UAV είναι σχεδιασμένο για αθόρυβη, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας λειτουργία, χρησιμοποιώντας εξαιρετικά αποδοτικούς ηλεκτροκινητήρες που καταναλώνουν ελάχιστη ενέργεια, επεκτείνοντας περαιτέρω την αντοχή του. Το ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης, σε συνδυασμό με τη συστοιχία ηλιακής ενέργειας, επιτρέπει στο Zephyr να λειτουργεί χωρίς τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που συνήθως συνδέονται με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα πλεονεκτικό σε εφαρμογές περιβαλλοντικής παρακολούθησης, όπου το ελάχιστο οικολογικό αποτύπωμα είναι απαραίτητο. Επιπλέον, η ικανότητά του για μεγάλο υψόμετρο εξασφαλίζει ότι μπορεί να εκτελεί τις λειτουργίες παρακολούθησης χωρίς να παρεμβαίνει στην εμπορική εναέρια κυκλοφορία ή να επηρεάζει τα οικοσυστήματα που βρίσκονται από κάτω.

Επιχειρησιακά, το Zephyr είναι προσαρμοσμένο για επίμονη επιτήρηση και συλλογή δεδομένων σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές. Η ικανότητά του να διατηρεί σταθερή θέση στη στρατόσφαιρα το καθιστά πολύτιμο πλεονέκτημα για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε σενάρια όπως η διαχείριση καταστροφών, οι ωκεανογραφικές μελέτες και η παρακολούθηση της ατμόσφαιρας. Η αντοχή του Zephyr μειώνει την ανάγκη για πολλαπλές απογειώσεις και προσγειώσεις, ελαχιστοποιώντας τις διαταραχές σε ευαίσθητα περιβάλλοντα και αποφεύγοντας την απαιτητική σε πόρους υλικοτεχνική υποδομή που συνήθως συνδέεται με τις επιχειρήσεις επανδρωμένων αεροσκαφών.

Επιπλέον, ο διαρθρωτικός σχεδιασμός του Zephyr επιτρέπει την ενσωμάτωση διαφόρων ωφέλιμων φορτίων αισθητήρων, όπως κάμερες υψηλής ανάλυσης, αισθητήρες υπερύθρων και εξοπλισμός περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Αυτή η ευελιξία ευθυγραμμίζεται με τις πρακτικές βιώσιμου σχεδιασμού, επιτρέποντας σε μια ενιαία πλατφόρμα UAV να εκτελεί μια ποικιλία αποστολών, μειώνοντας την ανάγκη για πρόσθετα UAV και εξοικονομώντας έτσι πόρους καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του UAV.

Συνοπτικά, ο προηγμένος σχεδιασμός του Zephyr, ο οποίος ενσωματώνει ηλιακή πρόωση, ελαφριά σύνθετα υλικά και αποτελεσματική αεροδυναμική, το τοποθετεί ως ηγέτη στις βιώσιμες επιχειρήσεις UAV. Όχι μόνο αποδεικνύει τη δυνατότητα πτήσης μακράς διάρκειας, χωρίς εκπομπές ρύπων, αλλά θέτει επίσης πρότυπα για τα μελλοντικά σχέδια UAV που στοχεύουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ παράλληλα εκπληρώνουν κρίσιμους ρόλους παρακολούθησης.



Εικόνα 5. Το UAV HALE Airbus Zephyr. (Airbus, 2021)

4.3 Orion

Το Orion, που αναπτύχθηκε από την Aurora Flight Sciences, είναι ένα UAV HALE ειδικά σχεδιασμένο για εκτεταμένες αποστολές θαλάσσιας επιτήρησης. Η ικανότητά του να παραμένει στον αέρα για έως και 120 ώρες και να λειτουργεί σε ύψος 30.000 ποδών το καθιστά εξαιρετική πλατφόρμα για τη συνεχή παρακολούθηση μεγάλων θαλάσσιων περιοχών. Αυτή η αντοχή μειώνει σημαντικά την ανάγκη για συχνές απογειώσεις και προσγειώσεις, ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση καυσίμων και τις σχετικές εκπομπές, καθώς και τη μείωση της φθοράς του αεροσκάφους. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά επανδρωμένα αεροσκάφη επιτήρησης, το Orion προσφέρει μια πιο αποδοτική ως προς τους πόρους λύση για την παρακολούθηση δραστηριοτήτων όπως η παράνομη αλιεία, το λαθρεμπόριο και η ασφάλεια των θαλάσσιων συνόρων (Gawron et al., 2018).

Το σύστημα πρόωσης του Orion έχει σχεδιαστεί με έμφαση στην αποδοτικότητα των καυσίμων και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Χρησιμοποιεί έναν στροβιλοκινητήρα που εξοικονομεί καύσιμα και είναι βελτιστοποιημένος για πτήσεις μεγάλης διάρκειας σε μεγάλα ύψη. Ο κινητήρας αυτός είναι εξοπλισμένος με προηγμένα συστήματα διαχείρισης καυσίμου

που ρυθμίζουν την κατανάλωση καυσίμου με βάση το προφίλ πτήσης του UAV, εξασφαλίζοντας βέλτιστη απόδοση καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής. Λειτουργώντας στη στρατόσφαιρα, όπου η αντίσταση του αέρα είναι μικρότερη, το Orion μεγιστοποιεί την αναλογία ανύψωσης προς έλξη, μειώνοντας την ενέργεια που απαιτείται για τη διατήρηση της πτήσης. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο εξοικονομεί καύσιμα αλλά μειώνει επίσης το αποτύπωμα άνθρακα του UAV κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής του ζωής. Επιπλέον, το σύστημα πρόωσης του UAV περιλαμβάνει τεχνολογίες μείωσης του θορύβου, καθιστώντας το λιγότερο ενοχλητικό για τη θαλάσσια ζωή, πράγμα που είναι απαραίτητο για τις περιβαλλοντικά ευαίσθητες θαλάσσιες ζώνες.

Δομικά, το Orion κατασκευάζεται με τη χρήση προηγμένων σύνθετων υλικών, όπως ίνες άνθρακα και κράματα υψηλής αντοχής. Τα υλικά αυτά συμβάλλουν σε ένα ελαφρύ αλλά ανθεκτικό πλαίσιο, ενισχύοντας τις αεροδυναμικές επιδόσεις του UAV και εξασφαλίζοντας παράλληλα ανθεκτικότητα σε σκληρά θαλάσσια περιβάλλοντα. Η χρήση σύνθετων υλικών ευθυγραμμίζεται με τις αρχές του βιώσιμου σχεδιασμού UAV μειώνοντας το συνολικό βάρος του αεροσκάφους, οδηγώντας σε βελτιωμένη αποδοτικότητα καυσίμου και διευρυμένη επιχειρησιακή εμβέλεια. Επιπλέον, τα υλικά αυτά επιλέγονται για την αντοχή τους στη διάβρωση, γεγονός ζωτικής σημασίας για τα UAV που λειτουργούν πάνω από τον ωκεανό, όπου το αλμυρό νερό μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στα συμβατικά υλικά. Αυτή η ανθεκτικότητα μειώνει την ανάγκη για συχνή συντήρηση και επισκευές, παρατείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής του UAV και ελαχιστοποιώντας τη χρήση αποβλήτων και πόρων (Petrìtoli et al., 2018).

Ο σχεδιασμός του UAV περιλαμβάνει αρθρωτές θυρίδες ωφέλιμου φορτίου που μπορούν να φιλοξενήσουν μια ποικιλία εξοπλισμού επιτήρησης και αναγνώρισης, όπως ραντάρ, αισθητήρες υπέρυθρων και κάμερες υψηλής ανάλυσης. Αυτή η αρθρωτότητα επιτρέπει στο Orion να διαμορφώνεται για συγκεκριμένες αποστολές χωρίς να απαιτούνται σημαντικές δομικές αλλαγές, ενισχύοντας την ευελιξία του και μειώνοντας την ανάγκη για πολλαπλά UAV. Αυτή η προσαρμοστικότητα συμβάλλει στη βιώσιμη λειτουργία του, καθώς ένα μόνο UAV Orion μπορεί να αναλάβει διάφορους τύπους αποστολών επιτήρησης, εξοικονομώντας πόρους και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την παραγωγή πρόσθετων πλατφορμών UAV.

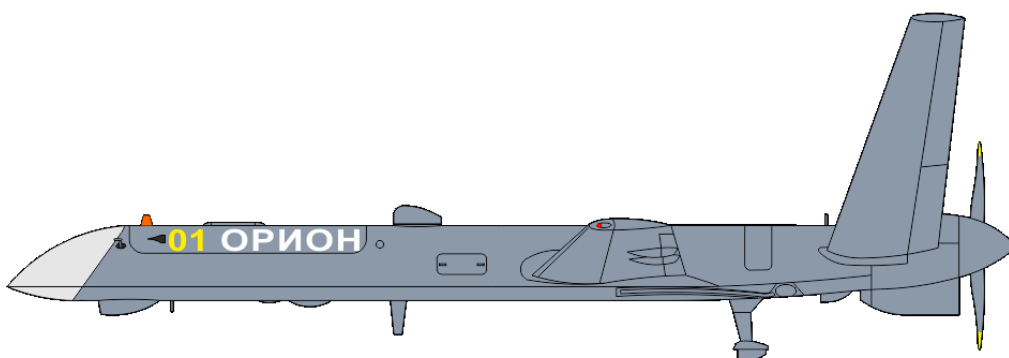
Το προηγμένο σύστημα ελέγχου πτήσης του Orion ενισχύει περαιτέρω την επιχειρησιακή του αποτελεσματικότητα. Το UAV είναι εξοπλισμένο με ένα αυτόνομο σύστημα διαχείρισης πτήσης που βελτιστοποιεί τις διαδρομές πτήσης για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ιδίως κατά τη διάρκεια των επιχειρήσεων παραμονής και επιτήρησης.

Χρησιμοποιώντας επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και προσαρμοστικούς αλγορίθμους ελέγχου, το σύστημα διασφαλίζει ότι το UAV διατηρεί το βέλτιστο ύψος και ταχύτητα, ελαχιστοποιώντας τη χρήση καυσίμου. Αυτός ο ευφυής σχεδιασμός πτήσης είναι ζωτικής σημασίας για αποστολές μεγάλης διάρκειας, καθώς μεγιστοποιεί την αντοχή του UAV, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών, το Orion χρησιμοποιεί κινητήρα που συμμορφώνεται με αυστηρά πρότυπα εκπομπών, εξασφαλίζοντας χαμηλότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς κινητήρες αεροσκαφών. Η εκτεταμένη αντοχή του έως και 120 ώρες μεταφράζεται σε λιγότερες αποστολές για την επίτευξη της ίδιας κάλυψης επιτήρησης, μειώνοντας έτσι τις σωρευτικές εκπομπές με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, η ικανότητα του UAV να διεξάγει επίμονη επιτήρηση σημαίνει ότι απαιτούνται λιγότερες επανδρωμένες πτήσεις, γεγονός που μειώνει σημαντικά το συνολικό αποτύπωμα εκπομπών των επιχειρήσεων θαλάσσιας επιτήρησης.

Συνοπτικά, ο σχεδιασμός του Orion ενσωματώνει την αποδοτική πρόωση καυσίμου, προηγμένα σύνθετα υλικά και έξυπνα συστήματα πτήσης για την παροχή μιας βιώσιμης λύσης για τη θαλάσσια επιτήρηση. Η μεγάλη αντοχή του, οι μειωμένες εκπομπές και οι ευέλικτες επιχειρησιακές δυνατότητες το καθιστούν πρότυπο παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο τα UAV HALE μπορούν να προσφέρουν αποτελεσματική και περιβαλλοντικά υπεύθυνη παρακολούθηση σε μεγάλες ωκεάνιες περιοχές.

UAV "Orion" / БПЛА «Орион»



Εικόνα 6. Orion UAV (Παινιτσίδης, 2016)

4.4 Scaled Composites Proteus

Το Scaled Composites Proteus είναι ένα HALE UAV σχεδιασμένο κυρίως για να χρησιμεύει ως πλατφόρμα αναμετάδοσης επικοινωνιών σε μεγάλο ύψος, επιδεικνύοντας εξαιρετική ευελιξία σε απομακρυσμένες και πληγείσες από καταστροφές περιοχές. Με την ικανότητα να μεταφέρει βαριά ωφέλιμα φορτία έως και 2.000 κιλά και να διατηρεί υψόμετρο 50.000 ποδών για παρατεταμένη διάρκεια, το Proteus προσφέρει μια σταθερή και αξιόπιστη πλατφόρμα για την αναμετάδοση σημάτων επικοινωνίας σε τεράστιες αποστάσεις. Αυτή η ικανότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε καταστάσεις όπου η επίγεια υποδομή δεν είναι διαθέσιμη ή είναι εκτεθειμένη, όπως σε ζώνες καταστροφών ή απομακρυσμένες περιοχές. Προσφέροντας μια ενιαία, υψηλού υψομέτρου πλατφόρμα για συνδέσεις επικοινωνίας, το Proteus μειώνει την ανάγκη για πολλαπλά UAV ή εκτεταμένες επίγειες υποδομές, βελτιστοποιώντας έτσι τη χρήση πόρων και ελαχιστοποιώντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμά του (Mishra, 2017).

Ο δομικός σχεδιασμός του Proteus είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του, επιτρέποντάς του να φιλοξενεί ένα ευρύ φάσμα ωφέλιμων φορτίων χωρίς να απαιτούνται δομικές τροποποιήσεις. Αυτή η αρθρωτή δομή συνάδει με τις αρχές του βιώσιμου σχεδιασμού που συζητήθηκαν στο θεωρητικό πλαίσιο, όπου η προσαρμοστικότητα και η πολυλειτουργικότητα αποτελούν το κλειδί για την παράταση του κύκλου ζωής των UAV. Το Proteus μπορεί να εξοπλιστεί με διάφορους αισθητήρες, εξοπλισμό επικοινωνίας και εργαλεία επιτήρησης, επιτρέποντάς του την απρόσκοπτη μετάβαση μεταξύ διαφορετικών προφίλ αποστολής. Αυτή η προσαρμοστικότητα μειώνει την ανάγκη για πολλαπλά εξειδικευμένα UAV, εξοικονομώντας έτσι υλικά και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την παραγωγή και την ανάπτυξη πολλαπλών εναέριων πλατφορμών (Thokala et al., 2010).

Όσον αφορά την πρόωση, το Proteus τροφοδοτείται από δύο κινητήρες στροβιλοανεμιστήρων Williams FJ44-2E, οι οποίοι είναι γνωστοί για την αποδοτικότητα καυσίμου και την αξιοπιστία τους. Αυτοί οι κινητήρες επιτρέπουν στο UAV να επιτυγχάνει πτήσεις σε μεγάλο ύψος και μεγάλης διάρκειας, ενώ καταναλώνουν λιγότερα καύσιμα σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς κινητήρες αεροσκαφών. Η ικανότητα του Proteus να διατηρεί σταθερή θέση σε μεγάλα ύψη για παρατεταμένες περιόδους μειώνει σημαντικά την κατανάλωση καυσίμων που διαφορετικά θα απαιτούνταν για επαναλαμβανόμενες απογειώσεις και προσγειώσεις. Επιπλέον, οι κινητήρες στροβιλοανεμιστήρων έχουν σχεδιαστεί για να

λειτουργούν αθόρυβα, ελαχιστοποιώντας τη ρύπανση από θόρυβο - ένα κρίσιμο στοιχείο για τις επιχειρήσεις UAV σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές.

Ο σκελετός του UAV κατασκευάζεται με συνδυασμό προηγμένων σύνθετων υλικών, όπως ανθρακονήματα και υαλονήματα, τα οποία συμβάλλουν στην ελαφριά αλλά ανθεκτική δομή του. Αυτή η ελαφριά κατασκευή όχι μόνο βελτιώνει τις αεροδυναμικές επιδόσεις του UAV, αλλά αυξάνει επίσης τη χωρητικότητα του ωφέλιμου φορτίου του, επιτρέποντάς του να μεταφέρει βαρύ εξοπλισμό επικοινωνιών χωρίς να διακυβεύεται η αντοχή της πτήσης. Η χρήση αυτών των υλικών εξασφαλίζει επίσης τη δομική ακεραιότητα του UAV σε διάφορες επιχειρησιακές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των πτήσεων σε μεγάλο υψόμετρο, όπου η θερμοκρασία και η ατμοσφαιρική πίεση μεταβάλλονται σημαντικά. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται στο Proteus επιλέγονται για την αντοχή τους σε περιβαλλοντικές καταπονήσεις, όπως η υπεριώδης ακτινοβολία σε μεγάλα υψόμετρα, εξασφαλίζοντας μακροζωία και μειώνοντας τις απαιτήσεις συντήρησης κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής του ζωής.

Το Proteus χρησιμοποιεί προηγμένα συστήματα ελέγχου πτήσης για τη διατήρηση της σταθερότητας και της αποτελεσματικότητας κατά τη διάρκεια παρατεταμένων αποστολών. Οι δυνατότητες αυτόνομης πτήσης του επιτρέπουν να ακολουθεί προκαθορισμένες διαδρομές πτήσης ή να προσαρμόζεται στις συνθήκες πραγματικού χρόνου, εξασφαλίζοντας τη βέλτιστη χρήση ενέργειας και μειώνοντας την περιττή κατανάλωση καυσίμων. Αυτός ο ακριβής έλεγχος πτήσης όχι μόνο βελτιστοποιεί την επιχειρησιακή απόδοση του UAV, αλλά διασφαλίζει επίσης ότι μπορεί να διατηρεί συνεπή αναμετάδοση επικοινωνιών χωρίς διακοπή, γεγονός που είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση καταστροφών και τα σενάρια διαχείρισης έκτακτης ανάγκης.

Επιπλέον, η υψηλή επιχειρησιακή οροφή του Proteus στα 50.000 πόδια το τοποθετεί πάνω από την εμπορική εναέρια κυκλοφορία, μειώνοντας τον κίνδυνο παρεμβολών και συγκρούσεων. Σε αυτά τα ύψη, το UAV μπορεί να καλύψει μια ευρεία περιοχή, επεκτείνοντας την εμβέλεια των δικτύων επικοινωνίας και παρέχοντας κρίσιμες συνδέσεις σε διαφορετικά απρόσιτες περιοχές. Λειτουργώντας ως ενιαία πλατφόρμα μεγάλου υψομέτρου, το Proteus ελαχιστοποιεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των επιχειρήσεων αναμετάδοσης επικοινωνιών μειώνοντας την ανάγκη για πολλαπλά UAV ή προσωρινούς επίγειους σταθμούς, εξοικονομώντας έτσι ενέργεια και πόρους (Rajpal et al., 2018).

Συνολικά, το Scaled Composites Proteus ξεχωρίζει ως ένα πολυλειτουργικό UAV HALE βελτιστοποιημένο για βιώσιμες επιχειρήσεις. Ο αρθρωτός σχεδιασμός του, το αποτελεσματικό σύστημα πρόωσης και η χρήση προηγμένων υλικών του επιτρέπουν να

εκτελεί διάφορες αποστολές με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Παρέχοντας μια αξιόπιστη και προσαρμόσιμη πλατφόρμα υψηλού υψομέτρου για επικοινωνίες και επιτήρηση, το Proteus αποτελεί παράδειγμα για το πώς τα UAV HALE μπορούν να συμβάλουν σε βιώσιμες αεροπορικές πρακτικές, ενώ παράλληλα εκπληρώνουν κρίσιμες επιχειρησιακές ανάγκες.



Εικόνα 7. Scaled Composites Proteus (Norris, 2024)

Συμπέρασμα

Η εξέλιξη των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV) έχει επιφέρει σημαντικές εξελίξεις στον σχεδιασμό UAV μεγάλου υψομέτρου και μεγάλης αντοχής (HALE), τονίζοντας τη σημασία των στρατηγικών ενεργειακής απόδοσης. Η λεπτομερής ανάλυση στο παρόν έγγραφο υπογραμμίζει ότι η βελτιστοποίηση του αεροδυναμικού σχεδιασμού, των συστημάτων πρόωσης και των τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση των επιδόσεων και της επιχειρησιακής απόδοσης των UAV HALE. Η ενσωμάτωση προηγμένων υλικών, καινοτόμων τεχνολογιών πρόωσης και εξελιγμένων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας έχει καταδείξει τη δυνατότητα επέκτασης της διάρκειας πτήσης και αύξησης της χωρητικότητας ωφέλιμου φορτίου αυτών των αεροσκαφών. Με την υιοθέτηση μιας ολιστικής προσέγγισης που εξετάζει την αεροδυναμική, την πρόωση και την ενεργειακή απόδοση, τα UAV μπορούν να ανταποκριθούν καλύτερα στις απαιτητικές απαιτήσεις διαφόρων εφαρμογών, από την παρακολούθηση του περιβάλλοντος έως τη στρατιωτική επιτήρηση.

Η αεροδυναμική βελτιστοποίηση, όπως συζητήθηκε, αποτελεί θεμελιώδη πτυχή του ενεργειακά αποδοτικού σχεδιασμού UAV. Τεχνικές όπως η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της πτέρυγας, η μείωση της αεροδυναμικής αντίστασης και η χρήση ελαφρών υλικών διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ενίσχυση του λόγου ανύψωσης προς αντίσταση, ο οποίος επηρεάζει άμεσα την αντοχή και την αποδοτικότητα του UAV. Τα προηγμένα υλικά, όπως τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP), προσφέρουν υψηλές αναλογίες αντοχής προς βάρος, συμβάλλοντας στη μείωση του βάρους χωρίς να διακυβεύεται η δομική ακεραιότητα. Επιπλέον, η χρήση προσομοιώσεων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) έχει γίνει συνήθης πρακτική στην επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού, επιτρέποντας στους μηχανικούς να βελτιώσουν τις αεροδυναμικές ιδιότητες των UAV για να επιτύχουν βέλτιστες επιδόσεις σε διάφορες συνθήκες πτήσης.

Το σύστημα πρόωσης είναι ένα άλλο κρίσιμο στοιχείο στην επιδίωξη ενεργειακά αποδοτικών UAV. Η διερεύνηση διαφόρων τύπων πρόωσης, συμπεριλαμβανομένων των ηλιακών-ηλεκτρικών, των υβριδικών συστημάτων πρόωσης και των κυψελών καυσίμου υδρογόνου, υπογραμμίζει την ανάγκη για λύσεις που μεγιστοποιούν την αξιοποίηση της ενέργειας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η ηλιακή-ηλεκτρική πρόωση, για παράδειγμα, αξιοποιεί την ηλιακή ενέργεια για την τροφοδοσία του UAV, προσφέροντας μια βιώσιμη επιλογή για αποστολές μεγάλης διάρκειας. Τα υβριδικά συστήματα πρόωσης συνδυάζουν διαφορετικές πηγές ενέργειας, όπως κινητήρες εσωτερικής καύσης και

ηλεκτροκινητήρες, για τη βελτιστοποίηση της ισχύος και της απόδοσης με βάση τις απαιτήσεις της αποστολής. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, με την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και τις χαμηλές εκπομπές τους, αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη οδό για την ενίσχυση της αντοχής των UAV HALE, ιδίως όταν ενσωματώνονται σε προηγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας.

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση της επιχειρησιακής αυτονομίας των UAV HALE. Η ανάπτυξη μπαταριών μεγάλης χωρητικότητας, υπερπυκνωτών και αναγεννητικών κυψελών καυσίμου έχει επεκτείνει τις δυνατότητες αποτελεσματικής αποθήκευσης ενέργειας. Οι μπαταρίες λιθίου-πολυμερούς (LiPo) και ιόντων λιθίου (Li-ion) χρησιμοποιούνται συνήθως σε UAVs λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας και των ελαφρών χαρακτηριστικών τους. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών, όπως οι μπαταρίες θείου λιθίου (Li-S), έχουν δείξει δυνατότητες περαιτέρω βελτίωσης της ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της αποθήκευσης ενέργειας στη δομή του UAV, όπως η ενσωμάτωση μπαταριών στα φτερά, αποτελεί παράδειγμα των καινοτόμων προσεγγίσεων που διερευνώνται για τη μεγιστοποίηση της αποθήκευσης ενέργειας χωρίς να διακυβεύονται οι αεροδυναμικές επιδόσεις.

Επιπλέον, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος και η βιωσιμότητα των επιχειρήσεων UAV έχουν γίνει όλο και πιο σημαντικά ζητήματα. Η χρήση βιώσιμων υλικών, οι τεχνικές μείωσης του θορύβου και οι εκτιμήσεις του κύκλου ζωής αποτελούν ουσιώδη στοιχεία για το σχεδιασμό φιλικών προς το περιβάλλον UAV. Η υιοθέτηση πιο αθόρυβων συστημάτων πρόωσης, όπως ηλεκτρικοί κινητήρες και έλικες βελτιστοποιημένοι για τη μείωση του θορύβου, μπορεί να ελαχιστοποιήσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των UAV, ιδίως σε ευαίσθητες περιοχές. Οι αξιολογήσεις του κύκλου ζωής παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των UAV, καθοδηγώντας την επιλογή υλικών και τεχνολογιών που ευθυγραμμίζονται με τους στόχους βιωσιμότητας.

Το μέλλον του σχεδιασμού UAV έγκειται στη συνεχή εξέλιξη των στρατηγικών ενεργειακής απόδοσης και στην ενσωμάτωση τεχνολογιών αιχμής. Οι μελλοντικές τάσεις στο σχεδιασμό UAV περιλαμβάνουν την ανάπτυξη πιο προηγμένων συστημάτων πρόωσης, όπως υβριδικά ηλεκτρικά και ηλιακά συστήματα, ικανά να επιτύχουν ακόμη μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης με ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η συνεχιζόμενη έρευνα σε μπαταρίες στερεάς κατάστασης και κυψέλες καυσίμου υδρογόνου υπόσχεται σημαντική βελτίωση της ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας και της ασφάλειας. Επιπλέον, η υιοθέτηση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (AI) και μηχανικής μάθησης για την επεξεργασία δεδομένων σε

πραγματικό χρόνο και την αυτόνομη λήψη αποφάσεων θα ενισχύσει την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα και την προσαρμοστικότητα των UAV σε δυναμικά περιβάλλοντα. Τα συστήματα ελέγχου πτήσης με βάση την τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις διαδρομές πτήσης, να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και να επιτρέψουν στα UAV να εκτελούν σύνθετες εργασίες με μεγαλύτερη ακρίβεια και αυτονομία.

Τέλος, η χρήση της προσθετικής κατασκευής (τρισδιάστατη εκτύπωση) στην κατασκευή UAV αναμένεται να φέρει επανάσταση στις διαδικασίες σχεδιασμού και παραγωγής. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων, ελαφρών κατασκευών που ήταν προηγουμένως ανέφικτες με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής. Η προσθετική κατασκευή μπορεί επίσης να διευκολύνει την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων και την προσαρμογή, επιτρέποντας την ανάπτυξη UAV προσαρμοσμένων στις απαιτήσεις συγκεκριμένων αποστολών. Επιπλέον, η ενσωμάτωση κατανεμημένων συστημάτων πρόωσης και τεχνολογιών μορφοποίησης πτερύγων θα παρέχει στα UAV βελτιωμένη ευελιξία, αποδοτικότητα και προσαρμοστικότητα σε διάφορες συνθήκες πτήσης.

Συνοπτικά, η εξέλιξη των στρατηγικών ενεργειακής αποδοτικότητας για το σχεδιασμό UAV είναι έτοιμη να συνεχιστεί, λόγω των εξελίξεων στα συστήματα πρόωσης, στις τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας και στις αυτόνομες δυνατότητες. Το μέλλον των UAV HALE θα χαρακτηρίζεται από καινοτόμους σχεδιασμούς που μεγιστοποιούν την αντοχή, την επιχειρησιακή αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα. Αγκαλιάζοντας αυτές τις αναδυόμενες τεχνολογίες και τάσεις, η επόμενη γενιά UAV θα είναι καλά εξοπλισμένη για να ανταποκριθεί στις αυξανόμενες απαιτήσεις διάφορων εφαρμογών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους.

Βιβλιογραφία

- Δημητράτος, Α. (2024). *Global Hawk: Σύμβαση των ΗΠΑ αξίας 387 εκατ. δολαρίων για την υποστήριξη των προηγμένων UAV συμμαχικών κρατών*. [online] OnAlert. Available at: <https://www.onalert.gr/eksoplismoi/global-hawk-symvasi-axias-387-ekad-dolarion-gia-tin-ypostirixi-ton-proigmenon-uav-tis-italias-tis-iaponias-kai-tis-notias-koreas/571454/> [Accessed 18 Sep. 2024].
- Παυνισίδης, Κ. (2016). *MALE UAV 'Orion' - RedStar*. [online] Redstar.gr. Available at: https://www.redstar.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=5273:males-uav-orion&catid=783&lang=en&Itemid=530 [Accessed 18 Sep. 2024].
- Aguiar, P., Brett, D. And Brandon, N. (2008). Solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system analysis for high-altitude long-endurance unmanned aerial vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(23), pp.7214–7223. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.012>.
- Airbus (2021). *Zephyr. The world's most advanced solar-powered High Altitude Platform Station*. [online] Airbus. Available at: <https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/uas-solutions/zephyr> [Accessed 18 Sep. 2024].
- Azimi, S.M. (2019). ShuffleDet: Real-Time Vehicle Detection Network in On-Board Embedded UAV Imagery. *Lecture Notes in Computer Science*, pp.88–99. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-11012-3_7.
- Balli, O. and Caliskan, H. (2021). On-design and off-design operation performance assessment of an aero turboprop engine used on unmanned aerial vehicles (UAVs) in terms of aviation, thermodynamic, environmental and sustainability perspectives. *Energy Conversion and Management*, [online] 243, p.114403. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114403>.
- Bliamis, C., Vlahostergios, Z., Misirlis, D. and Yakinthos, K. (2022). Numerical Evaluation of Riblet Drag Reduction on a MALE UAV. *Aerospace*, [online] 9(4), pp.218–218. doi:<https://doi.org/10.3390/aerospace9040218>.

- Bu, J., Sun, R., Bai, H., Xu, R., Xie, F., Zhang, Y. and Ochieng, W.Y. (2017). Integrated method for the UAV navigation sensor anomaly detection. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 11(5), pp.847–853. doi:<https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0427>.
- Cacciatori, L., Brignoli, C., Mele, B., Gattere, F., Monti, C. and Quadrio, M. (2022). Drag Reduction by Riblets on a Commercial UAV. *Applied sciences*, [online] 12(10), pp.5070–5070. doi:<https://doi.org/10.3390/app12105070>.
- Chang, K., Rammos, P., Wilkerson, S.A., Bundy, M. and Gadsden, S.A. (2016). LiPo battery energy studies for improved flight performance of unmanned aerial systems. *Proceedings of SPIE*. doi:<https://doi.org/10.1117/12.2223352>.
- Chen, H. and Khaligh, A. (2010). Hybrid energy storage system for unmanned aerial vehicle (UAV). *ECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. doi:<https://doi.org/10.1109/iecon.2010.5675076>.
- Coe, J., Dunbar, C., Epps, K., Hagensee, J. and Moore, A.L. (2019). A low-altitude unmanned aerial vehicle (UAV) created using 3D-printed bioplastic. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7(2), pp.118–128. doi:<https://doi.org/10.1139/juvs-2017-0023>.
- Combat-Master (2020). *Greece UAV/UCAV Programs*. [online] DefenceHub | Global Military & Security Forum. Available at: <https://defencehub.live/threads/greece-uav-ucav-programs.11212/> [Accessed 16 Jul. 2024].
- Depcik, C., Cassady, T., Collicott, B., Burugupally, S.P., Li, X., Alam, S.S., Arandia, J.R. and Hobeck, J. (2020). Comparison of lithium ion Batteries, hydrogen fueled combustion Engines, and a hydrogen fuel cell in powering a small Unmanned Aerial Vehicle. *Energy Conversion and Management*, [online] 207, p.112514. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112514>.
- Długosz, A. and Klimek, W. (2018). The optimal design of UAV wing structure. *AIP conference proceedings*. [online] doi:<https://doi.org/10.1063/1.5019124>.
- Dong, Z., Li, W. and Zhou, Y. (2016). An autonomous navigation scheme for UAV in approach phase. *2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC)*. doi:<https://doi.org/10.1109/cgncc.2016.7828919>.

- Duffy, J.P., Cunliffe, A.M., DeBell, L., Sandbrook, C., Wich, S.A., Shutler, J.D., Myers-Smith, I.H., Varela, M.R. and Anderson, K. (2017). Location, location, location: considerations when using lightweight drones in challenging environments. *Remote sensing in ecology and conservation*, [online] 4(1), pp.7–19. doi:<https://doi.org/10.1002/rse2.58>.
- Elkerdany, M.S., Safwat, I.M., Medhat, A. and Elkhatib, M.M. (2020). Hybrid Fuel Cell/Battery Intelligent Energy Management system for UAV. *2020 16th International Computer Engineering Conference (ICENCO)2020 16th International Computer Engineering Conference (ICENCO)*. doi:<https://doi.org/10.1109/icenco49778.2020.9357393>.
- Finger, D.F., Braun, C. and Bil, C. (2018). Impact of electric propulsion technology and mission requirements on the performance of VTOL UAVs. *CEAS aeronautical journal*, [online] 10(3), pp.827–843. doi:<https://doi.org/10.1007/s13272-018-0352-x>.
- García-Gascón, C., Castelló-Pedrero, P. and García-Manrique, J.A. (2022). Minimal Surfaces as an Innovative Solution for the Design of an Additive Manufactured Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Drones*, [online] 6(10), p.285. doi:<https://doi.org/10.3390/drones6100285>.
- Gawron, J.H., Keoleian, G.A., De Kleine, R.D., Wallington, T.J. and Kim, H.C. (2018). Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects. *Environmental Science & Technology*, 52(5), pp.3249–3256. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04576>.
- Goh, G.D., Agarwala, S., Goh, G.L., V. Dikshit, Sing, S.L. and W.Y. Yeong (2017). Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential. *Aerospace science and technology*, [online] 63, pp.140–151. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ast.2016.12.019>.
- Gong, A., MacNeill, R., Verstraete, D. and Palmer, J.A. (2018). Analysis of a Fuel-Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Propulsion System for a UAV using a Hardware-in-the-Loop Flight Simulator. *AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)*. doi:<https://doi.org/10.2514/6.2018-5017>.
- He, X., Sun, X., Wang, F., Li, X., Zhuo, F. and Luo, S. (2018). Design of Energy Management System for a Small Solar-powered Unmanned Aerial Vehicle. *2018 9th IEEE*

International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG),. doi:<https://doi.org/10.1109/pedg.2018.8447677>.

Hinojosa, S., Avalos, O., Oliva, D., Cuevas, E., Pajares, G., Zaldivar, D. and Gálvez, J. (2018). Unassisted thresholding based on multi-objective evolutionary algorithms. *Knowledge-based systems*, [online] 159, pp.221–232. doi:<https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.06.028>.

Hoang, V.T., Phung, M.D., Dinh, T.H. and Ha, Q.P. (2019). System Architecture for Real-Time Surface Inspection Using Multiple UAVs. *IEEE Systems Journal*, pp.1–12. doi:<https://doi.org/10.1109/jsyst.2019.2922290>.

Huang, H., Gu, J., Wang, Q. and Zhuang, Y. (2019). An Autonomous UAV Navigation System for Unknown Flight Environment. *2019 15th International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks (MSN)*. doi:<https://doi.org/10.1109/msn48538.2019.00025>.

Hughes, M.S.M. and Engelbrecht, J.A.A. (2023). Autonomous navigation for multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) in urban environments. *MATEC Web of Conferences*, 388, pp.04011–04011. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/202338804011>.

Hung, J.Y. and Gonzalez, L.F. (2012). On parallel hybrid-electric propulsion system for unmanned aerial vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 51, pp.1–17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2011.12.001>.

Jones, M.R., Djahel, S. and Welsh, K. (2022). Path-planning for Unmanned Aerial Vehicles with Environment Complexity Considerations: A Survey. *ACM Computing Surveys*. doi:<https://doi.org/10.1145/3570723>.

Junk, S. and Schröder, W. (2016). Application of Sustainable Design in Additive Manufacturing of an Unmanned Aerial Vehicle. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 52, pp.375–385. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-32098-4_32.

Kang, Y.S., Rhee, D.H., Lim, B.J., Jun, S., Park, T.C., Lee, Y.J. and Jun, Y.M. (2018). Design of Turbo-Compression System for HALE UAV Propulsion System. *The American society of mechanical engineers*, 2. doi:<https://doi.org/10.1115/fedsm2018-83354>.

- Karunarathne, L., Economou, J.T. and Knowles, K. (2010). *Model based power and energy management system for PEM fuel cell/ Li-Ion battery driven propulsion system*. [online] IEEE Xplore. doi:<https://doi.org/10.1049/cp.2010.0088>.
- Khan, Z.I., Mohamad, Z., Rahmat, A.R. and Habib, U. (2021). Synthesis and Characterization of Composite Materials with Enhanced Thermo-Mechanical Properties for Unmanned Aerial Vehicles (Uavs) and Aerospace Technologies. *Pertanika journal of science & technology*, [online] 29(3). doi:<https://doi.org/10.47836/pjst.29.3.15>.
- Kim, J., Baek, S., Choi, Y., Ahn, J. and Cha, H. (2020). Hydrone: Reconfigurable Energy Storage for UAV Applications. *IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems*, 39(11), pp.3686–3697. doi:<https://doi.org/10.1109/tcad.2020.3013052>.
- Lee, J., Wang, J., Crandall, D., Sabanovic, S. and Fox, G. (2017). Real-Time, Cloud-Based Object Detection for Unmanned Aerial Vehicles. [online] doi:<https://doi.org/10.1109/irc.2017.77>.
- Lei, T., Wang, Y., Deng, S., Min, Z., Zhang, X. and Zhang, X. (2022). A distributed energy management strategies of fuel-cell electric propulsion UAV based on multi-agent system. *2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. doi:<https://doi.org/10.1109/iciea54703.2022.10006217>.
- Leuchter, J. and Zobaa, A.F. (2016). Batteries investigations of small unmanned aircraft vehicles. *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*. [online] doi:<https://doi.org/10.1049/cp.2016.0306>.
- Liénard, J., Vogs, A., Gatzolis, D. and Strigul, N. (2016). Embedded, real-time UAV control for improved, image-based 3D scene reconstruction. *Measurement*, 81, pp.264–269. doi:<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.014>.
- Lim, W.Y.B., Huang, J., Xiong, Z., Kang, J., Niyato, D., Hua, X.-S., Leung, C. and Miao, C. (2021). Towards Federated Learning in UAV-Enabled Internet of Vehicles: A Multi-Dimensional Contract-Matching Approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(8), pp.5140–5154. doi:<https://doi.org/10.1109/tits.2021.3056341>.

Liu, X., Wen, H., Li, A., Xu, D. and Hou, Z. (2020). Research of multi-rotor UAV atmospheric environment monitoring system based on 4G network. *E3S Web of Conferences*, 165, p.02029. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016502029>.

Marto, D. and Brójo, F. (2022). Hybrid-Electric Propulsion Solutions for UAV Application. *Volume 3: Advanced Materials: Design, Processing, Characterization and Applications; Advances in Aerospace Technology*. doi:<https://doi.org/10.1115/imece2022-95375>.

Matlock, J., Philipp Sharikov, Warwick, S., Richards, J. and Suleman, A. (2018). Evaluation Of Energy Efficient Propulsion Technologies For Unmanned Aerial Vehicles. *Progress in Canadian Mechanical Engineering*. doi:<https://doi.org/10.25071/10315/35397>.

Mehendale, N. (2021). Investigating the Battery Life Issues in Unmanned Aerial Vehicles: An Analysis of Challenges and Proposed Solutions. *SSRN Electronic Journal*. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.4324196>.

Mishra, R.K. (2017). Life Assessment of a Sea-Recoverable Small Turbojet Engine Designated for UAV Application. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 17(3), pp.539–544. doi:<https://doi.org/10.1007/s11668-017-0284-5>.

Mosaddek, A., Kommula, H.K.R. and Gonzalez, F. (2020). Design and Testing of Recycled 3D Printed Foldable Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing. *QUT ePrints (Queensland University of Technology)*. doi:<https://doi.org/10.1109/icuas48674.2020.9213961>.

Nam, Y. and Park, T.S. (2015). A Research for Energy Harvest/Distribution/Control of HALE UAV based on the Solar Energy. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 19(4), pp.77–84. doi:<https://doi.org/10.6108/kspe.2015.19.4.077>.

Norris, G. (2024). *Flying High In Scaled Composites' Unique Proteus* | *Aviation Week Network*. [online] Aviationweek.com. Available at: <https://aviationweek.com/aerospace/aircraft-propulsion/flying-high-scaled-composites-unique-proteus> [Accessed 18 Sep. 2024].

Panagiotou, P. and Yakinthos, K. (2020). Aerodynamic efficiency and performance enhancement of fixed-wing UAVs. *Aerospace Science and Technology*, p.105575. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105575>.

- Panagiotou, P., Kaparos, P., Salpingidou, C. and Yakinthos, K. (2016). Aerodynamic design of a MALE UAV. *Aerospace Science and Technology*, 50, pp.127–138. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.12.033>.
- Panagiotou, P., P. Kaparos and K. Yakinthos (2014). Winglet design and optimization for a MALE UAV using CFD. *Aerospace science and technology*, [online] 39, pp.190–205. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ast.2014.09.006>.
- Pereira, L.T.L., Puroja, B., Zamponi, R., Rosa, I. and Ragni, D. (2023). Aeroacoustic measurements of a contra-rotating UAV vehicle. *NOISE-CON proceedings*, 268(3), pp.5175–5184. doi:https://doi.org/10.3397/in_2023_0733.
- Petritoli, E., Leccese, F. and Ciani, L. (2018). Reliability and Maintenance Analysis of Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*, 18(9), p.3171. doi:<https://doi.org/10.3390/s18093171>.
- Puente-Castro, A., Rivero, D., Pazos, A. and Fernandez-Blanco, E. (2021). A review of artificial intelligence applied to path planning in UAV swarms. *Neural Computing and Applications*, [online] 34(1), pp.153–170. doi:<https://doi.org/10.1007/s00521-021-06569-4>.
- Qian, Y., Wei, Y., Kong, D. and Xu, H. (2021). Experimental investigation on motor noise reduction of Unmanned Aerial Vehicles. *Applied Acoustics*, 176, p.107873. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107873>.
- Rahmaniar, W. and Santoso, A.W. (2022). Sensor integration for real-time data acquisition in aerial surveillance. *Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 19(2), pp.117–128. doi:<https://doi.org/10.1080/1448837x.2021.2023070>.
- Rajpal, D., Roeland De Breuker, Timmermans, H., Wim Lammen and F. Torrigiani (2018). Including aeroelastic tailoring in the conceptual design process of a composite strut braced wing. *TU Delft Research Portal*, [online] pp.2018-0786. Available at: <https://research.tudelft.nl/en/publications/including-aeroelastic-tailoring-in-the-conceptual-design-process-> [Accessed 18 Sep. 2024].
- Reid, C.M., Manzo, M.A. and Logan, M.J. (2004). Performance Characterization of a Lithium-Ion Gel Polymer Battery Power Supply System for an Unmanned Aerial Vehicle. *SAE technical papers on CD-ROM/SAE technical paper series*. doi:<https://doi.org/10.4271/2004-01-3166>.

- Reinhardt, K.C., Lamp, T., Geis, J.W. and Colozza, A.J. (1996). Solar-powered unmanned aerial vehicles. *Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*. doi:<https://doi.org/10.1109/iecec.1996.552842>.
- Rezwan, S. and Choi, W. (2022). Artificial Intelligence Approaches for UAV Navigation: Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Access*, 10, pp.26320–26339. doi:<https://doi.org/10.1109/access.2022.3157626>.
- Sakai, R., Watanabe, K., Ashida, S., Uehara, H., Tanaka, S. and Nagata, M. (2023). Impact of Emission Noise and Electromagnetic Shielding on Mobile Communication Systems in Unmanned Aerial Vehicles. *2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*. doi:<https://doi.org/10.1109/emceurope57790.2023.10274281>.
- Salguero Paz, J.D. and Bustamante, A.A.P. (2022). *Applicability of Generative Design in the Construction of UAVs*. [online] IEEE Xplore. doi:<https://doi.org/10.1109/ICCRE55123.2022.9770256>.
- Schartel, M., Burr, R., Mayer, W., Nando Docci and Waldschmidt, C. (2018). UAV-Based Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar. *Open Access Repository der Universität Ulm (OPARU) (Ulm University)*. [online] doi:<https://doi.org/10.1109/icmim.2018.8443503>.
- Silkov, V. and Zirka, A. (2014). CALCULATION OF THE CHARACTERISTICS OF A UAV LAUNCH FROM A RAMP. *Aviation*, 18(4), pp.178–184. doi:<https://doi.org/10.3846/16487788.2014.985476>.
- Sinopoli, B., Micheli, M., Donato, G. and Koo, T.J. (2001). *Vision based navigation for an unmanned aerial vehicle*. [online] IEEE Xplore. doi:<https://doi.org/10.1109/ROBOT.2001.932864>.
- Sreelakshmi, K. and Jagadeeswar, K.K. (2018). Aerodynamic analysis over Unmanned Aerial Vehicle (UAV) using CFD. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 455, p.012044. doi:<https://doi.org/10.1088/1757-899x/455/1/012044>.
- Sun, R., Cheng, Q., Wang, G. and Ochieng, W. (2017). A Novel Online Data-Driven Algorithm for Detecting UAV Navigation Sensor Faults. *Sensors*, 17(10), p.2243. doi:<https://doi.org/10.3390/s17102243>.

Thipyopas, C., Sripawadkul, V. and Warin, N. (2019). Design and Development of a Small Solar-Powered UAV for Environmental Monitoring Application. *2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*,.

doi:<https://doi.org/10.1109/ecice47484.2019.8942777>.

Thokala, P., Scanlan, J. and Chipperfield, A. (2009). Life cycle cost modelling as an aircraft design support tool. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 224(4), pp.477–488.

doi:<https://doi.org/10.1243/09544100jaero574>.

Thounthong, P., Raël, S. and Davat, B. (2006). Control strategy of fuel cell/supercapacitors hybrid power sources for electric vehicle. *Journal of Power Sources*, 158(1), pp.806–814.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.09.014>.

Thounthong, P., Rael, S. and Davat, B. (2009). Analysis of Supercapacitor as Second Source Based on Fuel Cell Power Generation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(1), pp.247–255. doi:<https://doi.org/10.1109/tec.2008.2003216>.

Torija, A.J., Chaitanya, P. and Li, Z. (2021). Psychoacoustic analysis of contra-rotating propeller noise for unmanned aerial vehicles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(2), pp.835–846. doi:<https://doi.org/10.1121/10.0003432>.

Torija, A.J., Li, Z. and Self, R.H. (2019). Effects of a hovering unmanned aerial vehicle on urban soundscapes perception. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78, p.102195. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.024>.

Tripolitsiotis, A., Prokas, N., Kyritsis, S., Dollas, A., Papaefstathiou, I. and Partsinevelos, P. (2017). Dronesourcing: a modular, expandable multi-sensor UAV platform for combined, real-time environmental monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), pp.2757–2770. doi:<https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1287975>.

Utami, M., Sirait, J.E., Septyanto, B.B., Sudiarso, A. and Putra, N. (2022). Laminar composite materials for unmanned aircraft wings. *Defense and security studies*, [online] 3, pp.106–112. doi:<https://doi.org/10.37868/dss.v3.id211>.

Verma, A.K., Pradhan, N.K., Nehra, R. and Prateek (2018). Challenge and Advantage of Materials in Design and Fabrication of Composite UAV. *IOP conference series*, 455(1), pp.012005–012005. doi:<https://doi.org/10.1088/1757-899x/455/1/012005>.

Vetrella, A., Fasano, G., Accardo, D. and Moccia, A. (2016). Differential GNSS and Vision-Based Tracking to Improve Navigation Performance in Cooperative Multi-UAV Systems. *Sensors*, 16(12), p.2164. doi:<https://doi.org/10.3390/s16122164>.

Wang, B., Zhao, D., Li, W., Wang, Z., Huang, Y., You, Y. and Becker, S. (2020). Current technologies and challenges of applying fuel cell hybrid propulsion systems in unmanned aerial vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, [online] 116, p.100620. doi:<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100620>.

Wei, L., Liu, S.-T., Balaish, M., Li, Z., Zhou, X.-Y., Rupp, J.L.M. and Guo, X. (2022). Customizable solid-state batteries toward shape-conformal and structural power supplies. *Materials Today*, [online] 58, pp.297–312. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.06.007>.

Wilkinson, R.E. and Benway, R.B. (1991). Liquid Cooled Turbocharged Propulsion System for HALE Application. *Volume 2: Aircraft Engine; Marine; Microturbines and Small Turbomachinery*. doi:<https://doi.org/10.1115/91-gt-399>.

Xiao, W. and Zhou, Z. (2011). Analysis on Flight Dynamics of Solar UAV with Multiple Propulsion Systems. *Applied Mechanics and Materials*, 138-139, pp.453–458. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.138-139.453>.

Ye, J. and Marzocca, P. (2018). Hybrid Propulsion Strategies for a Multi-Modal UAV. *Aerospace Research Central*. doi:<https://doi.org/10.2514/6.2018-1011>.

Zeng, Y. and Tang, J. (2023). MEC-Assisted Real-Time Data Acquisition and Processing for UAV With General Missions. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(1), pp.1058–1072. doi:<https://doi.org/10.1109/tvt.2022.3203704>.

Zhang, B., Song, Z., Zhao, F. and Liu, C. (2022). Overview of Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles. *Energies*, 15(2), p.455. doi:<https://doi.org/10.3390/en15020455>.

Zhang, J. (2021). *AI based Algorithms of Path Planning, Navigation and Control for Mobile Ground Robots and UAVs*. [online] arXiv.org. Available at: <https://arxiv.org/abs/2110.00910> [Accessed 16 Sep. 2024].

Zhang, X. and Zhang, X. (2022). Battery management system of UAV Based on IOT. *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*, 1(2), pp.41–43.
doi:<https://doi.org/10.54097/fcis.v1i2.1703>.

Zhang, X., Liu, L., Dai, Y. and Lu, T. (2018). Experimental investigation on the online fuzzy energy management of hybrid fuel cell/battery power system for UAVs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(21), pp.10094–10103.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.075>.

Zhao, H., Jiang, X., He, L., Wu, Y., Ai, F., Liang, X. and Li, W. (2022). Energy Management Strategy for Hybrid-Electric Propulsion UAVs. *2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. doi:<https://doi.org/10.1109/itecasia-pacific56316.2022.9942171>.

Zhou, H., Hirose, M., Greenwood, W., Xiao, Y., Lynch, J., Zekkos, D. and Kamat, V. (2016). Demonstration of UAV deployment and control of mobile wireless sensing networks for modal analysis of structures. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*. doi:<https://doi.org/10.1117/12.2223441>.

Zuo, Z., Liu, C., Han, Q.-L. and Song, J. (2022). Unmanned Aerial Vehicles: Control Methods and Future Challenges. *IEEE/CAA journal of automatica sinica*, [online] 9(4), pp.601–614. doi:<https://doi.org/10.1109/jas.2022.105410>.