



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΟΙΚΙΝΩΝΙΩΝ**  
**ΠΜΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ**  
**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΑΠΟΣΤΟΛΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ**  
**ΑΕΡΟΧΗΜΑΤΩΝ**

Γεωργιάδης Θεόδωρος

Επιβλέπων: Γρηγόριος Δουμένης  
Επίκουρος καθηγητής

Άρτα, Φεβρουάριος, 2026

**ESTIMATION OF ENERGY REQUIREMENTS FOR UAV  
MISSION PLANNING**

## **Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή**

Άρτα, 17/02/2026

### **ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

1. Επιβλέπων καθηγητής  
Γρηγόριος Δουμένης,  
Επίκουρος καθηγητής
  
2. Μέλος επιτροπής  
Φώτιος Βαρτζιώτης,  
Επίκουρος καθηγητής
  
3. Μέλος επιτροπής  
Πέτρος Καρβέλης  
Αναπληρωτής καθηγητής

© Γεωργιάδης, Θεόδωρος, 2026.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

## **Δήλωση μη λογοκλοπής**

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εκ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Γεωργιάδης, Θεόδωρος

Υπογραφή

*Γεωργιάδης Θεωδωρής*

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον κ. Γρηγόρη Δουμένη, καθηγητή μου, για την καθοδήγηση, τη στήριξη και τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική τόσο στην κατανόηση του αντικειμένου όσο και στη διαμόρφωση του τρόπου σκέψης και προσέγγισης τεχνικών προβλημάτων. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Δρ. Γιάννη Μασκλαβάνο για τη βοήθειά του, τις συμβουλές και τη διάθεση να συνδράμει σε τεχνικά ζητήματα που προέκυψαν κατά την πορεία της εργασίας. Ιδιαίτερη μνεία αξίζει στη Βάσω Νάσκαρη, η οποία με τη στήριξη, τις παρατηρήσεις και τη συνεργασία της συνέβαλε ουσιαστικά στην ολοκλήρωση και βελτίωση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την UCANDRONE, η οποία συνέβαλε σημαντικά στη διεύρυνση των γνώσεών μου στον τομέα των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων, προσφέροντας πολύτιμη πρακτική και θεωρητική εμπειρία σχετική με το αντικείμενο της εργασίας. Η συμβολή όλων των παραπάνω υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενεργειακή επάρκεια αποτελεί βασικό περιορισμό στη λειτουργία των Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων (UAV), επηρεάζοντας άμεσα την αυτονομία, την ασφάλεια και την επιτυχία των αποστολών τους. Ο αξιόπιστος προγραμματισμός πτήσεων απαιτεί την ακριβή εκτίμηση της απαιτούμενης ενέργειας, ώστε να αποφεύγονται καταστάσεις ενεργειακής εξάντλησης κατά την εκτέλεση της αποστολής. Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκε αλγόριθμος εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης, ο οποίος υλοποιήθηκε σε γλώσσα Lua και ενσωματώθηκε στο περιβάλλον του Mission Planner, αξιοποιώντας το πρωτόκολλο MAVLink για τη συλλογή και αξιοποίηση δεδομένων τηλεμετρίας και πτήσης. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην ανάλυση παραμέτρων όπως η ταχύτητα πτήσης, το μήκος και η υψομετρική διαφορά κάθε σκέλους της αποστολής, υπολογίζοντας την απαιτούμενη ενέργεια για κάθε επιμέρους φάση της πτήσης.

Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την χρήση απλοποιημένων μετρικών κατανάλωσης και την εφαρμογή τους σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο του κάθε σκέλους της αποστολής του UAV. Η αξιοποίηση δεδομένων από προσομοιώσεις Software-In-The-Loop (SITL) συνέβαλε στην εξαγωγή ρεαλιστικών ρυθμών κατανάλωσης και στη βελτίωση της αξιοπιστίας του αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο υποστήριξης απόφασης για τον προγραμματισμό αποστολών UAV, παρέχοντας τη δυνατότητα πρόβλεψης της ενεργειακής επάρκειας πριν από την εκτέλεση της πτήσης. Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στην ανάπτυξη πιο έξυπνων και ενεργειακά αποδοτικών UAV, ενισχύοντας τη συνολική αυτονομία και την επιχειρησιακή ασφάλεια.

**Λέξεις-κλειδιά:** Μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV), αλγόριθμος εκτίμησης κατανάλωσης, Mission Planner, Software in the loop (SITL)

## **ABSTRACT**

Energy sufficiency constitutes a fundamental limitation in the operation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), directly affecting their autonomy, safety, and mission success. Reliable flight planning requires accurate estimation of the required energy in order to prevent energy depletion during mission execution. Within this context, an energy consumption estimation algorithm was developed, implemented in the Lua programming language, and integrated into the Mission Planner environment, utilizing the MAVLink protocol for the collection and exploitation of telemetry and flight data. The algorithm is based on the analysis of parameters such as velocity, altitude, and total mission distance, calculating the required energy for each individual flight phase, including ascent, cruise, descent, landing, and return.

The proposed methodology incorporates a simplified energy consumption model, based on empirical parameters, taking into account the geometry of the UAV flight path per waypoint. The values of the empirical parameters are extracted from actual consumption measurements during the UAV flight or can be obtained from model-Software-In-The-Loop (SITL) simulations. The results demonstrate that the proposed algorithm can function as a decision-support tool for UAV mission planning, providing the ability to predict energy sufficiency prior to flight execution. This approach contributes to the development of smarter and more energy-efficient UAVs, enhancing overall autonomy and operational safety.

**Keywords:** Unmanned Aerial Vehicles (UAV), Energy consumption estimation Algorithm, Mission Planner, Software in the loop (SITL)

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	7
ABSTRACT .....	8
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	13
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ .....	17
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	18
1 Αρχή των UAV .....	19
1.1 Τύποι και αρχές λειτουργίας των UAV.....	20
1.2 Βασικά χαρακτηριστικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα των τετρακόπτερων .....	23
2 Ενεργειακοί περιορισμοί και παράγοντες των τετρακόπτερων UAV .....	26
2.1 Επιχειρησιακές παράμετροι που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση.....	27
2.1.1 Περιορισμένη διάρκεια πτήσης λόγο μπαταρίας.....	28
2.1.2 Ύψος πτήσης, ταχύτητα πτήσης και πυκνότητα αέρα .....	30
2.1.3 Ωφέλιμο φορτίο (payload) .....	32
2.1.4 Καιρικές συνθήκες και θερμοκρασία.....	33
2.2 Κατασκευαστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση .....	34
2.2.1 Υλικά κατασκευής πλαισίου και μηχανική αντοχή.....	35
2.2.2 Έλικες και αεροδυναμική απόδοση.....	36
2.2.3 Απόδοση των ηλεκτροκινητήρων και σύστημα πρόωσης.....	38
2.2.4 Συνολική μάζα UAV και κατανομή βάρους .....	41
2.3 Αναγκαιότητα πρόβλεψης ενεργειακής επάρκειας .....	42
2.3.1 Θέματα ασφάλειας .....	43
2.3.2 Ακύρωση αποστολών.....	44

2.3.3 Αρχή “bingo fuel” και ενεργειακά κατώφλια .....	44
2.4 Εργαλεία μέτρησης και μοντέλα εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης σε UAV.....	45
3 Ανάπτυξη Αλγορίθμου Εκτίμησης Κατανάλωσης.....	46
3.1 Σκοπός και λειτουργία του αλγορίθμου .....	47
3.2 Αρχιτεκτονική του αλγορίθμου.....	47
3.2.1 Ανάκτηση παραμέτρων από το Mission Planner .....	49
3.2.2 Ανάγνωση σχεδίου αποστολής.....	50
3.3 Μοντελοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης.....	51
3.5 Πυρήνας υπολογισμού του αλγορίθμου .....	61
4.Συστήματα Επικοινωνίας και Ελέγχου UAV.....	65
4.1 Συστήματα Πλοήγησης και Επικοινωνιακά Πρωτόκολλα UAV .....	65
4.1.1 Επικοινωνία των UAV .....	66
4.2 Mission Planner: Σταθμός Ελέγχου και Σχεδιασμού Αποστολών .....	69
4.2.1 Σημασία του Σχεδιασμού Αποστολής.....	71
4.3 Αυτονομία και Προσαρμοστικότητα.....	72
4.4 Περιορισμοί και Προκλήσεις στην Επικοινωνία UAV .....	73
5 Πειραματική Αξιολόγηση και Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	74
5.1 Περιβάλλον Προσομοίωσης και Σχεδιασμός Πειραματικών Σεναρίων .....	74
5.2 Συζήτηση Αποτελεσμάτων.....	78
5.3 Ανάλυση ευαισθησίας.....	83
6. Συμπεράσματα .....	84
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	86

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. [Διάγραμμα Αρχιτεκτονικής Αλγορίθμου].....	48
Πίνακας 2. [Ρυθμός ενεργειακής κατανάλωσης κατά την πλεύση (Cruise Consumption Rate)].....	53
Πίνακας 3. [Συντελεστής ενεργειακής κατανάλωσης πλεύσης ( $R_c$ )].....	53
Πίνακας 4. [Ρυθμός ενεργειακής κατανάλωσης κατά την ανύψωση (Ascent Consumption Rate)].....	54
Πίνακας 5. [Ρυθμός ενεργειακής κατανάλωσης κατά την κάθοδο (Descent Consumption Rate)].....	54
Πίνακας 6. [Συντελεστής ενεργειακής κατανάλωσης ανύψωσης ανά μονάδα ύψους ( $R_a$ )].....	55
Πίνακας 7. [Συντελεστής ενεργειακής κατανάλωσης καθόδου ανά μονάδα ύψους ( $R_d$ )].....	55
Πίνακας 8. [Ενεργειακή κατανάλωση κατά την οριζόντια πλεύση για σταθερή οριζόντια απόσταση σε συνάρτηση του cruise rate].....	56
Πίνακας 9. Ενεργειακή κατανάλωση κατά την άνοδο για σταθερή κατακόρυφη απόσταση σε συνάρτηση του ascent rate].....	56
Πίνακας 10. [Ενεργειακή κατανάλωση κατά την κάθοδο για σταθερή κατακόρυφη απόσταση σε συνάρτηση του descend rate].....	57
Πίνακας 11. [Τρισδιάστατο μοντέλο υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης για θετική υψομετρική μεταβολή].....	58-61
Πίνακας 12. [Τρισδιάστατο μοντέλο υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης για αρνητική υψομετρική μεταβολή].....	58-61

Πίνακας 13. [Τύπος υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης κατά την οριζόντια πλεύση].....	59
Πίνακας 14. [Τύπος υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης κατά την απογείωση].....	59
Πίνακας 15. [Τύπος υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης επιστροφής (Return-To-Launch – RTL)].....	60
Πίνακας 16. [Τύπος υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης κατά την προσγείωση].....	60
Πίνακας 17. [Γραμμικό μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης].....	62
Πίνακας 18. [Βασικός τύπος ηλεκτρικής ενέργειας].....	63
Πίνακας 19. [Τύπος State of Charge (SoC)] .....	63
Πίνακας 20. [Τύπος μετατροπής mAh σε Joule].....	63
Πίνακας 21. [Διαφορά εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ γραμμικού και τρισδιάστατου].....	64
Πίνακας 22. [Τύπος απόκλισης].....	78
Πίνακας 23. [Σύγκριση εκτιμώμενης ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ προσομοίωσης SITL και αλγορίθμου].....	78

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Figure 1. [<https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/types-ofdrones?srsltid=AfmBOop00dAKEqvHQonfCgWG4gLIdSzgaAwKuM71Cwg7hpy5evSFAhye>] .....19

Figure 2. [<https://www.technologyreview.com/2016/07/20/158748/six-ways-drones-are-revolutionizing-agriculture/>] .....20

Figure 3.

[<https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/typesofdrones?srsltid=AfmBOop00dAKEqvHQonfCgWG4gLIdSzgaAwKuM71Cwg7hpy5evSFAhye>] .....21

Figure 4.

[<https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/typesofdrones?srsltid=AfmBOop00dAKEqvHQonfCgWG4gLIdSzgaAwKuM71Cwg7hpy5evSFAhye>] .....22

Figure 5. [<https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/types-ofdrones?srsltid=AfmBOop00dAKEqvHQonfCgWG4gLIdSzgaAwKuM71Cwg7hpy5evSFAhye>] .....23

Figure 6. [[https://www.researchgate.net/figure/Quadcopter-Configuration-and-X-Configuration\\_fig3\\_331298873](https://www.researchgate.net/figure/Quadcopter-Configuration-and-X-Configuration_fig3_331298873)] .....24

Figure 7. [<https://stickmanphysics.com/physics-of-drones/>] .....25

Figure 8. [[https://www.researchgate.net/figure/The-generalized-energy-consumption-of-drone-hover-blue-move-orange-idle-blue-peak\\_fig5\\_383139577](https://www.researchgate.net/figure/The-generalized-energy-consumption-of-drone-hover-blue-move-orange-idle-blue-peak_fig5_383139577)] .....26

Figure 9. [[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-08395-2\\_13](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-08395-2_13)] .....27

Figure 10. [[https://www.researchgate.net/figure/Typical-Commercial-Drones\\_tbl2\\_305453238](https://www.researchgate.net/figure/Typical-Commercial-Drones_tbl2_305453238)] .....28

Figure 11. [<https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-does-drone-payload-affect-flight-time?srsltid=AfmBOooELDikik4Hmx25VZI1gHdN-50IbjIAoN5H2tqN-AOQGwtlT9x8>] .....29

Figure 12. [ <a href="https://www.grepow.com/blog/lithium-ion-vs-lithium-polymer-batteries.html/1000.html">https://www.grepow.com/blog/lithium-ion-vs-lithium-polymer-batteries.html/1000.html</a> ] .....	30
Figure 13. [ <a href="https://www.researchgate.net/figure/Motion-and-battery-power-consumption-of-the-test-drone_fig2_315695709">https://www.researchgate.net/figure/Motion-and-battery-power-consumption-of-the-test-drone_fig2_315695709</a> ] .....	31
Figure 14. [ <a href="https://scied.ucar.edu/sites/default/files/interactives/atmosphere-altitude/index.html">https://scied.ucar.edu/sites/default/files/interactives/atmosphere-altitude/index.html</a> ] .....	32
Figure 15. [ <a href="https://www.researchgate.net/figure/Battery-power-consumption-of-the-test-drone-with-different-payload-weights_fig3_315695709">https://www.researchgate.net/figure/Battery-power-consumption-of-the-test-drone-with-different-payload-weights_fig3_315695709</a> ] .....	32
Figure 16. [ <a href="https://www.onyxstar.net/drone-payload-definition/">https://www.onyxstar.net/drone-payload-definition/</a> ] .....	33
Figure 17. [ <a href="https://www.researchgate.net/figure/Different-Temperature-Discharge-Curves-of-Lithium-ion-Battery-6_fig1_322836042">https://www.researchgate.net/figure/Different-Temperature-Discharge-Curves-of-Lithium-ion-Battery-6_fig1_322836042</a> ] .....	34
Figure 18. [ <a href="https://www.smicomposites.com/carbon-fiber-cost-factors-that-influence-the-most/">https://www.smicomposites.com/carbon-fiber-cost-factors-that-influence-the-most/</a> ] .....	35
Figure 19. [ <a href="https://defencereDEFINED.com.cy/ucandrone-scytalis-%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%B1-%CF%83%CF%84%CE%B7-%CE%B4%CE%B9%CE%B5%CE%B8%CE%BD%CE%AE-%CE%AD%CE%BA%CE%B8/">https://defencereDEFINED.com.cy/ucandrone-scytalis-%CE%B4%CF%85%CE%BD%CE%B1%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%B1-%CF%83%CF%84%CE%B7-%CE%B4%CE%B9%CE%B5%CE%B8%CE%BD%CE%AE-%CE%AD%CE%BA%CE%B8/</a> ] .....	36
Figure 20. [ <a href="https://www.researchgate.net/figure/Definition-of-propeller-pitch_fig1_357234152">https://www.researchgate.net/figure/Definition-of-propeller-pitch_fig1_357234152</a> ] .....	37
Figure 21. [ <a href="https://playgrounddad.com/2-blade-vs-3-blade-prop-quadcopter/">https://playgrounddad.com/2-blade-vs-3-blade-prop-quadcopter/</a> ] .....	37
Figure 22. [ <a href="https://oscarliang.com/carbon-fibre-props-plastic-propeller/">https://oscarliang.com/carbon-fibre-props-plastic-propeller/</a> ] .....	38
Figure 23. [ <a href="https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-brushless-motors-work?srsIid=AfmBOopmeDSEEuQ0I6RaCRzO8d_tn8RM-lGtYwO55nrMMSav1gkr-9V_">https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-brushless-motors-work?srsIid=AfmBOopmeDSEEuQ0I6RaCRzO8d_tn8RM-lGtYwO55nrMMSav1gkr-9V_</a> ] .....	39

Figure 24. [ <a href="https://www.ligpower.com/blog/drone-propulsion-matching.html?srsIid=AfmBOopStwqrtXlatfBO27OOegwdWjHnLxFW1B25iVpDzDXhAc6j-tWO">https://www.ligpower.com/blog/drone-propulsion-matching.html?srsIid=AfmBOopStwqrtXlatfBO27OOegwdWjHnLxFW1B25iVpDzDXhAc6j-tWO</a> ] .....	40
Figure 25. [ <a href="https://www.researchgate.net/figure/UAV-weight-and-payload-vs-flight-time_fig3_337948739">https://www.researchgate.net/figure/UAV-weight-and-payload-vs-flight-time_fig3_337948739</a> ] .....	41
Figure 26. [ <a href="https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/dsa-2021-0036">https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/dsa-2021-0036</a> ] .....	42
Figure 27. [ <a href="https://support.dronelink.com/hc/en-us/community/posts/360051770614-RTH-Battery-Level-mini">https://support.dronelink.com/hc/en-us/community/posts/360051770614-RTH-Battery-Level-mini</a> ] .....	43
Figure 28. [ <a href="https://store.dji.com/gr">https://store.dji.com/gr</a> ] .....	44
Figure 29. [Mission Planner Parameter List] .....	49
Figure 30. [Different WPNAV Speeds] .....	50
Figure 31. [WPNAV RADIUS] .....	50
Figure 32. [Battery Capacity(mAh)] .....	50
Figure 33. [Λίστα εντολών αποστολής στο Mission Planner με υψόμετρα και waypoints].....	51
Figure 34. [Ορισμός ρυθμών ενεργειακής κατανάλωσης (ascent, descent, cruise) στον αλγόριθμο Lua].....	52
Figure 35. [MavLink].....	65
Figure 36. [Γενικό μοντέλο επικοινωνίας UAV – Δορυφόρος – Σταθμός Εδάφους].....	67
Figure 37. [Ροή επικοινωνίας MAVLink μεταξύ Ground Control Station και UAV] .....	68
Figure 38. [Αρχιτεκτονική επικοινωνίας ExpressLRS για μετάδοση MAVLink τηλεμετρίας].....	69
Figure 39. [Mission Planner] .....	70
Figure 40. [Απεικόνιση τηλεμετρικών δεδομένων UAV στο Mission Planner] .....	70
Figure 41. [Σχεδίαση αποστολής με waypoints στο Mission Planner] .....	71

Figure 42. [Φόρτωση και διαχείριση Lua scripts στο Mission Planner] .....	72
Figure 43. [Πρώτο πλάνο πτήσης] .....	75
Figure 44. [Δεύτερο και τρίτο πλάνο πτήσης για 10m/s και 8m/s].....	76
Figure 45. [Τέταρτο πλάνο πτήσης].....	77
Figure 46. [Πέμπτο πλάνο πτήσης].....	77
Figure 47. [Αποτελέσματα πειραματικού σεναρίου πτήσης 1].....	79
Figure 48. [Αποτελέσματα πειραματικού σεναρίου πτήσης 2].....	80
Figure 49. [Αποτελέσματα πειραματικού σεναρίου πτήσης 3].....	81
Figure 50. [Αποτελέσματα πειραματικού σεναρίου πτήσης 4].....	81
Figure 51. [Αποτελέσματα πειραματικού σεναρίου πτήσης 5].....	82

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ΠΜΣ .....	.....Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
UAV.....	.....Unmanned Aerial Vehicle (Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα)
UAS.....	.....Unmanned Aircraft System (Σύστημα Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους)
MAVLink.....	.....Micro Air Vehicle Link (Πρωτόκολλο επικοινωνίας UAV)
SITL.....	..... Software In the Loop (Προσομοίωση Software-In-The-Loop)
VTOL.....	.....Vertical Take-Off and Landing (Κάθετη απογείωση και προσγείωση)
GPS.....	.....Global Positioning System (Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης)
GNSS.....	.....Global Navigation Satellite System (Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης)
IMU.....	.....Inertial Measurement Unit (Μονάδα Αδρανειακής Μέτρησης)
Li-Po.....	.....Lithium Polymer (Μπαταρία Πολυμερών Λιθίου)
Li-Ion.....	.....Lithium-ion (Μπαταρία Ιόντων Λιθίου)
RTL.....	..... Return To Launch (Επιστροφή στο σημείο απογείωσης)
GCS.....	..... Ground Control Station (Επίγειος Σταθμός Ελέγχου)
Lua.....	..... Lua Programming Language (Γλώσσα προγραμματισμού Lua)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία εξάπλωση των Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles – UAV) έχει μεταβάλει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούνται επιθεωρήσεις, μεταφορές, αποτυπώσεις και ερευνητικές αποστολές. Παρ' όλα αυτά, η ενεργειακή αυτονομία παραμένει ένας από τους σημαντικότερους περιοριστικούς παράγοντες που καθορίζουν τη διάρκεια και την ασφάλεια των πτήσεων. Η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της κατανάλωσης ενέργειας πριν την αποστολή συχνά οδηγεί σε απρόβλεπτες διακοπές, πρόωρη ενεργοποίηση της διαδικασίας επιστροφής (RTL) ή ακόμη και σε απώλεια του αεροσκάφους.

Η παρούσα εργασία προτείνει μια ολοκληρωμένη λύση στο πρόβλημα αυτό μέσω της ανάπτυξης ενός αλγορίθμου εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης για UAV, υλοποιημένου σε γλώσσα Lua και ενσωματωμένου στο περιβάλλον του Mission Planner. Ο αλγόριθμος αντλεί δεδομένα πτήσης μέσω του πρωτοκόλλου MAVLink, αναλύει τα προγραμματισμένα σημεία πορείας (waypoints) και υπολογίζει την απαιτούμενη ενέργεια για κάθε φάση της αποστολής, απογείωση, πλεύση, κάθοδο και επιστροφή. Μέσω της χρήσης εμπειρικών δεδομένων και τρισδιάστατης γεωμετρικής ανάλυσης, επιτυγχάνεται σημαντικά υψηλότερη ακρίβεια στην πρόβλεψη κατανάλωσης σε σχέση με τις απλοποιημένες γραμμικές μεθόδους.

Η προτεινόμενη προσέγγιση επιτρέπει στον χειριστή να γνωρίζει εκ των προτέρων αν η αποστολή μπορεί να ολοκληρωθεί με ασφάλεια, προσφέροντας μια έξυπνη και προγνωστική διαχείριση ενέργειας εντός του Mission Planner, χωρίς να απαιτείται εξωτερικό λογισμικό ή επιπλέον υπολογιστική ισχύς. Επιπλέον, ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, ενεργοποιώντας αυτόματα ενέργειες ασφαλείας όταν η διαθέσιμη ενέργεια πλησιάζει κρίσιμα επίπεδα. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της επιχειρησιακής αξιοπιστίας των UAV, παρέχοντας ένα πρακτικό, επεκτάσιμο και ενεργειακά ευφυές μοντέλο που ενισχύει την ασφάλεια και τη ν αποδοτικότητα των αυτόνομων πτήσεων.

## 1 Αρχή των UAV

Στη σύγχρονη τεχνολογική πραγματικότητα, τα Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (Unmanned Aerial Vehicles – UAV) αποτελούν μία από τις πιο δυναμικά αναπτυσσόμενες κατηγορίες αεροπορικών συστημάτων. Η ικανότητά τους να επιχειρούν χωρίς ανθρώπινη παρουσία εντός του αεροσκάφους τα καθιστά ιδανικά για αποστολές σε περιβάλλοντα υψηλού κινδύνου, σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε συνθήκες όπου η ανθρώπινη παρέμβαση είναι αδύνατη ή ανεπιθύμητη.



*Figure 1 DJI Mavic 3 Pro quadcopter*

Τα UAV αποτελούν αεροπορικές πλατφόρμες που βασίζονται στη συνεργασία αισθητήρων, μονάδων ελέγχου, αυτόνομων αλγορίθμων και συστημάτων τηλεπικοινωνίας. Η ολοκληρωμένη αυτή δομή επιτρέπει την πλοήγηση, τη σταθεροποίηση και την εκτέλεση αποστολών με αξιοπιστία και ακρίβεια, είτε υπό τηλεχειρισμό είτε μέσω πλήρους αυτονομίας. Στη διεθνή βιβλιογραφία ο όρος UAV εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο των Unmanned Aircraft Systems (UAS), τα οποία περιλαμβάνουν το αερόχημα, τον επίγειο σταθμό ελέγχου, τα συστήματα επικοινωνίας και το λογισμικό πλοήγησης [1]. Η χρήση των UAV έχει επεκταθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια σε διάφορους τομείς. Στη γεωργία υποστηρίζουν πρακτικές γεωργίας ακριβείας μέσω παρακολούθησης καλλιεργειών.



*Figure 2 Agricultural UAV*

Στη διαχείριση φυσικών καταστροφών συμβάλλουν στην άμεση εκτίμηση ζημιών και στην παροχή κρίσιμων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Σε εφαρμογές ασφάλειας χρησιμοποιούνται για επιτήρηση συνόρων, κρίσιμων υποδομών και ευαίσθητων εγκαταστάσεων. Η περιβαλλοντική έρευνα επωφελείται από την ικανότητά τους να συλλέγουν δεδομένα για τη μελέτη κλιματικών φαινομένων, τη ρύπανση και τη βιοποικιλότητα. Παράλληλα, στον τομέα της φωτογράφισης, της κινηματογράφησης και της εφοδιαστικής αλυσίδας, προσφέρουν νέες δυνατότητες αυτοματοποιημένων και αποδοτικών λύσεων. Ιδιαίτερη σημασία έχει και ο στρατιωτικός τομέας, στον οποίο τα UAV αποτελούν πλέον αναπόσπαστο τμήμα των επιχειρησιακών δογμάτων, παρέχοντας δυνατότητες επιτήρησης, αναγνώρισης, στοχοποίησης και συλλογής πληροφοριών με υψηλή ακρίβεια και χαμηλό κόστος. Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και προηγμένων αλγορίθμων επιτρέπει ακόμη πιο αποτελεσματική αυτόνομη πλοήγηση, συνεργασία μεταξύ πολλαπλών UAV και διασύνδεση με συστήματα cloud και δικτυακά περιβάλλοντα. Παρά τα οφέλη, παραμένουν κρίσιμες προκλήσεις, όπως η περιορισμένη ενεργειακή αυτονομία, η ασφάλεια των επικοινωνιών, η αξιοπιστία των αισθητήρων και οι κανονιστικοί περιορισμοί. Αυτοί οι παράγοντες καθιστούν τον τομέα των UAV αντικείμενο συνεχούς έρευνας και τεχνολογικής εξέλιξης.

### **1.1 Τύποι και αρχές λειτουργίας των UAV**

Η ταξινόμηση των UAV βασίζεται κυρίως στην αεροδυναμική τους διαμόρφωση, στον τρόπο πτήσης και στο επίπεδο αυτονομίας που διαθέτουν. Μία από τις βασικότερες

κατηγορίες είναι τα UAV σταθερών πτερυγών (fixed-wing), τα οποία λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο με τα συμβατικά αεροσκάφη.



*Figure 3 AeroVironment's JUMP 20 fixed wing UAV*

Τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα αποδοτικά σε αποστολές μεγάλης διάρκειας, καθώς η συνεχής οριζόντια κίνηση προσφέρει χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Ωστόσο, απαιτούν διάδρομο απογείωσης και προσγείωσης ή εξειδικευμένες διατάξεις εκτόξευσης, περιορίζοντας τη λειτουργία τους σε περιορισμένους χώρους [2]. Μία δεύτερη σημαντική κατηγορία αποτελείται από τα πολυκόπτερα (multirotors), τα οποία χρησιμοποιούν πολλαπλούς έλικες για παραγωγή άντωσης και έλεγχο θέσης.



*Figure 4 Inspired Flight IF800 Tomcat medium-Lift*

Χαρακτηρίζονται από υψηλή ευελιξία, δυνατότητα αιώρησης και εξαιρετική ακρίβεια κίνησης, καθιστώντας τα ιδανικά για επιθεωρήσεις, εναέρια κινηματογράφηση, χαρτογράφηση μικρής κλίμακας και αποστολές που απαιτούν πτήση σε περιορισμένους χώρους. Η απλότητα της μηχανικής κατασκευής τους, σε συνδυασμό με την ευκολία ενσωμάτωσης αισθητήρων, έχει συμβάλει στην ευρεία διάδοσή τους [3]. Ενδιάμεση κατηγορία αποτελούν τα υβριδικά UAV τύπου VTOL (Vertical Take-Off and Landing), τα οποία συνδυάζουν τις δυνατότητες των δύο παραπάνω τύπων. Μπορούν να απογειώνονται και να προσγειώνονται κάθετα, όπως τα πολυκόπτερα, ενώ σε οριζόντια πτήση λειτουργούν όπως τα fixed-wing UAV, προσφέροντας μεγάλη αυτονομία και αποδοτικότητα [4].



*Figure 5 Archer Midnight eVTOL*

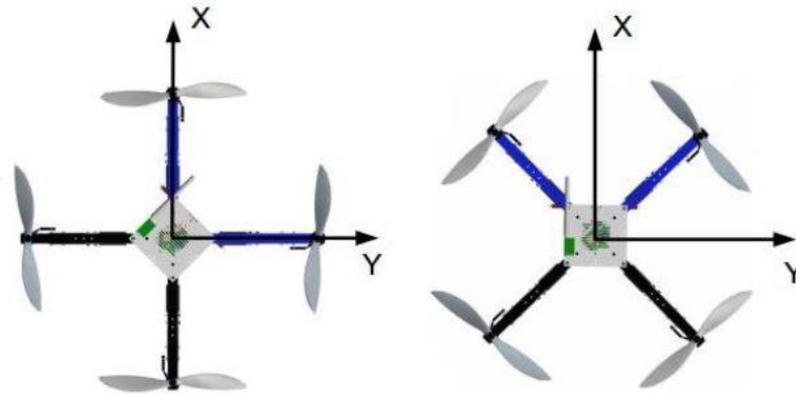
Ως προς τον τρόπο ελέγχου, τα UAV μπορούν να λειτουργούν είτε υπό τηλεχειρισμό μέσω επίγειου σταθμού είτε αυτόνομα, αξιοποιώντας δεδομένα από δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GPS/GNSS), μονάδες αδρανειακής μέτρησης (IMU), υψομετρικούς αισθητήρες και συστήματα οπτικής αναγνώρισης. Η αυτόνομη πλοήγηση βασίζεται σε προγραμματισμένα waypoints, ενώ η εκτίμηση θέσης και στάσης επιτυγχάνεται μέσω αλγορίθμων συγχώνευσης αισθητήρων (sensor fusion), που εξασφαλίζουν σταθερότητα και ακρίβεια ακόμη και σε περιβάλλοντα με αβεβαιότητες.

Παρά τη σημαντική τεχνολογική εξέλιξη στους μηχανισμούς πλοήγησης, στα συστήματα ελέγχου και στις αεροδυναμικές διαμορφώσεις των UAV, η επιχειρησιακή τους απόδοση εξακολουθεί να εξαρτάται σε καθοριστικό βαθμό από την ενεργειακή τους αυτονομία. Ανεξάρτητα από τον τύπο του συστήματος, σταθερών πτερύγων, πολυκοπτερικό ή υβριδικό VTOL, η διαθέσιμη ενέργεια περιορίζει άμεσα τη διάρκεια πτήσης, την εμβέλεια, το ωφέλιμο φορτίο και τελικά τη λειτουργική χρησιμότητα του οχήματος. Έτσι, ενώ οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές προσφέρουν ποικίλα πλεονεκτήματα σε θέματα ευελιξίας, σταθερότητας ή αποδοτικότητας, όλες αντιμετωπίζουν κοινούς ενεργειακούς περιορισμούς που επιβάλλουν προσεκτικό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση.

## **1.2 Βασικά χαρακτηριστικά και λειτουργικά πλεονεκτήματα των τετρακόπτερων**

Τα τετρακόπτερα (quadcopters) αποτελούν έναν από τους πιο διαδεδομένους τύπους πολυκόπτερων UAV λόγω της απλής μηχανικής τους δομής και της υψηλής ευελιξίας που

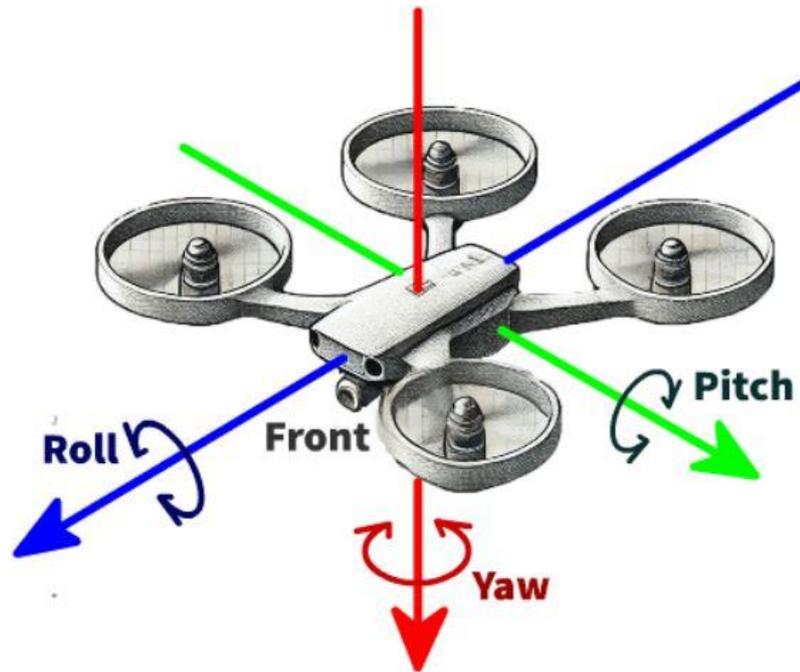
προσφέρουν στην πτήση. Αποτελούνται από τέσσερις βραχίονες στους οποίους προσαρμόζονται ισάριθμοι ηλεκτροκινητήρες με έλικες, διατεταγμένοι συνήθως σε συμμετρική διάταξη τύπου “X” ή “+”.



*Figure 6 Quadcopter X and + configuration*

Η παραγόμενη άντωση και οι ροπές ελέγχου προκύπτουν αποκλειστικά από τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής των επιμέρους κινητήρων. Μέσω κατάλληλων συνδυασμών στροφών επιτυγχάνονται οι βασικές κινήσεις ανόδου–καθόδου, κύλισης (roll), πρόνευσης (pitch) και εκτροπής (yaw) [5].

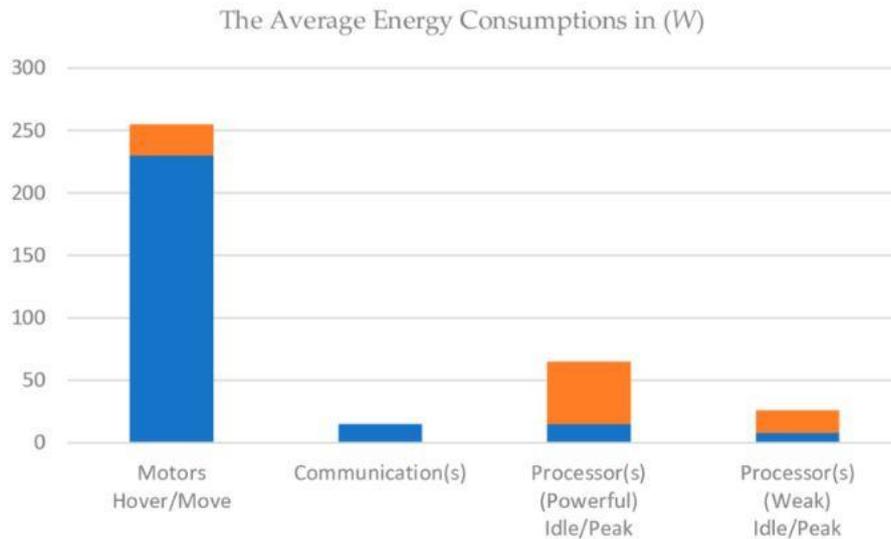
Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των τετρακοπτέρων είναι η δυνατότητα κάθετης απογείωσης και προσγείωσης, καθώς και η ικανότητα αιώρησης σε σταθερό σημείο. Οι ιδιότητες αυτές τα διαφοροποιούν ουσιαστικά από τα UAV σταθερών περυγών, τα οποία απαιτούν συνεχή οριζόντια κίνηση για τη διατήρηση της πτήσης. Η ικανότητα αιώρησης επιτρέπει ακριβείς χειρισμούς σε περιορισμένους χώρους, σταθερή παρατήρηση ενός σημείου και υψηλή ακρίβεια σε αποστολές επιθεώρησης, χαρτογράφησης μικρής κλίμακας και λήψης δεδομένων από αισθητήρες [6].



*Figure 7 Physics of a drone*

Σε επίπεδο ενεργειακής συμπεριφοράς, τα τετρακόπτερα χαρακτηρίζονται από αυξημένες απαιτήσεις ισχύος, καθώς η άντωση παράγεται αποκλειστικά μέσω της συνεχούς λειτουργίας των έλικων. Σε αντίθεση με τα UAV σταθερών πτερυγών, στα οποία η αεροδυναμική άντωση μειώνει την απαιτούμενη μηχανική ισχύ, τα πολυκόπτερα καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια ακόμη και όταν παραμένουν ακίνητα στον αέρα. Το γεγονός αυτό περιορίζει σημαντικά τον χρόνο πτήσης και καθιστά την ενεργειακή αποδοτικότητα των κινητήρων, των ελίκων και των συσσωρευτών κρίσιμο παράγοντα σχεδιασμού [7].

Παρά τους ενεργειακούς περιορισμούς, τα τετρακόπτερα εμφανίζουν υψηλό λόγο ευελιξίας προς πολυπλοκότητα κατασκευής. Η μηχανική τους απλότητα, η σχετικά χαμηλή μάζα και η δυνατότητα ακριβούς ελέγχου της κίνησης τα καθιστούν ιδανική πλατφόρμα για πειραματικές μελέτες δυναμικής πτήσης, ελέγχου, κατανάλωσης ενέργειας και βελτιστοποίησης τροχιών. Για τον λόγο αυτό, τα τετρακόπτερα επιλέγονται ευρέως σε ακαδημαϊκές και ερευνητικές εφαρμογές, ιδίως σε μελέτες που εστιάζουν στην ενεργειακή απόδοση και στην επιχειρησιακή αυτονομία των UAV [8].



*Figure 8 The average energy consumption of a Quadcopter*

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι η κατανόηση των ενεργειακών παραμέτρων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της ανάλυσης και της ανάπτυξης των UAV. Το επόμενο κεφάλαιο εξετάζει αναλυτικά αυτούς τους ενεργειακούς περιορισμούς, διερευνώντας τους παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ισχύος και αναδεικνύοντας την ανάγκη για ακριβή εκτίμηση ενεργειακών απαιτήσεων πριν και κατά τη διάρκεια της πτήσης.

## 2 Ενεργειακοί περιορισμοί και παράγοντες των τετρακόπτερων

### UAV

Η ενεργειακή απόδοση αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο στη σχεδίαση και λειτουργία των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV), καθώς επηρεάζει άμεσα την αυτονομία, την ασφάλεια και την επιχειρησιακή τους αξιοπιστία. Παρότι η τεχνολογική πρόοδος σε τομείς όπως η αεροδυναμική, τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου και η τεχνητή νοημοσύνη έχει αυξήσει τις δυνατότητες των UAV, η ενέργεια παραμένει ο καθοριστικός περιοριστικός παράγοντας. Οι περισσότερες πλατφόρμες εξακολουθούν να βασίζονται σε ηλεκτρικές πηγές ισχύος περιορισμένης χωρητικότητας, γεγονός που επιβάλλει τη βελτιστοποίηση κάθε πτυχής της αποστολής ως προς την κατανάλωση.

Οι ενεργειακοί περιορισμοί των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων και ειδικότερα των τετρακόπτερων διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τους επιχειρησιακούς και τους κατασκευαστικούς παράγοντες. Οι επιχειρησιακοί παράγοντες σχετίζονται με τον τρόπο χρήσης του UAV κατά τη διάρκεια της αποστολής και

περιλαμβάνουν το ωφέλιμο φορτίο (payload), τη διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας, το ύψος πτήσης και την ταχύτητα μετακίνησης. Οι κατασκευαστικοί παράγοντες, σχετίζονται με τα εγγενή χαρακτηριστικά σχεδίασης και υλοποίησης του UAV. Σε αυτούς περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά των ηλεκτροκινητήρων, η ενεργειακή τους απόδοση, η γεωμετρία, το υλικό και η συνολική μάζα του πλαισίου και των επιμέρους εξαρτημάτων. Κινητήρες υψηλής απόδοσης και ελαφρά, ανθεκτικά υλικά συμβάλλουν στη μείωση των ενεργειακών απωλειών και στη βελτίωση της αυτονομίας του συστήματος. Επομένως, η συνολική ενεργειακή συμπεριφορά ενός τετρακόπτερου προκύπτει από τη σύνθετη αλληλεπίδραση επιχειρησιακών και κατασκευαστικών παραμέτρων, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ολιστική προσέγγιση στον σχεδιασμό και στη βελτιστοποίησή του.

## 2.1 Επιχειρησιακές παράμετροί που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση

Η ενεργειακή κατανάλωση ενός μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος αποτελεί το αποτέλεσμα σύνθετων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του συστήματος και των εξωτερικών περιβαλλοντικών και επιχειρησιακών συνθηκών. Ο τύπος του αεροχήματος, οι γεωμετρικές και μαζικές του παράμετροι, το συνολικό βάρος, το ωφέλιμο φορτίο, καθώς και το προφίλ πτήσης και η μετεωρολογική κατάσταση επηρεάζουν άμεσα την απαιτούμενη ισχύ πρόωσης και έμμεσα τη συνολική διάρκεια πτήσης και την ενεργειακή αποδοτικότητα.

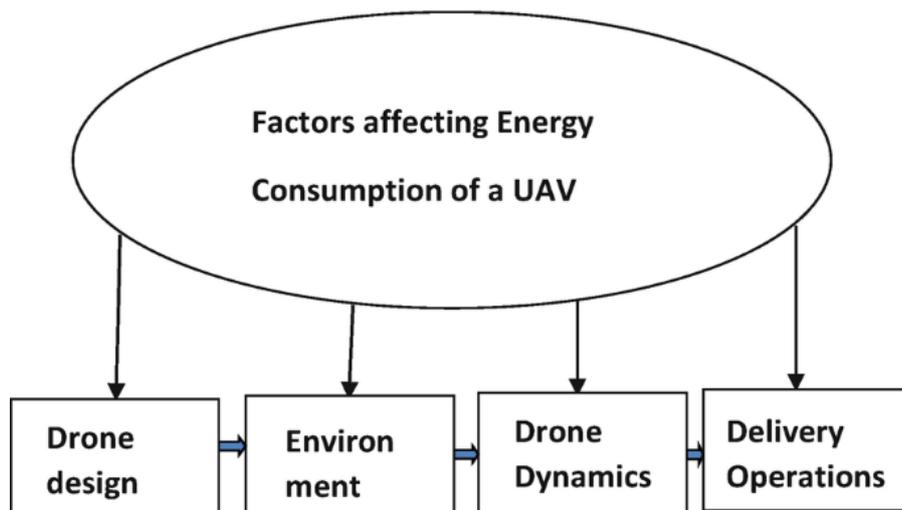


Figure 9 Factors affecting energy consumption of a UAV

Ιδιαίτερα σε επιχειρήσεις υπαίθριου περιβάλλοντος, οι μετεωρολογικοί παράγοντες, με κυριότερους τον άνεμο και τη θερμοκρασία, αποκτούν καθοριστική σημασία και απαιτούν προσεκτική συνεκτίμηση πριν την αποστολή, καθώς και συνεχή επιχειρησιακή παρακολούθηση κατά τη διάρκειά της [1][17].

### 2.1.1 Περιορισμένη διάρκεια πτήσης λόγω μπαταρίας

Η ενεργειακή αυτονομία των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους περιοριστικούς παράγοντες της επιχειρησιακής τους αξιοποίησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η διάρκεια πτήσης καθορίζεται πρωτίστως από τη διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας, καθώς τα σύγχρονα UAV βασίζονται κυρίως σε ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης. Σύγχρονα τεχνικά στοιχεία αναφέρουν ότι τα περισσότερα εμπορικά drones διαθέτουν αυτονομία πτήσης της τάξης των 20 έως 30 λεπτών, ενώ πιο εξειδικευμένα επαγγελματικά συστήματα, ιδίως όταν φέρουν πρόσθετους αισθητήρες ή ωφέλιμο φορτίο, μπορούν να επιτυγχάνουν διάρκεια 60 έως 120 λεπτών, ανάλογα με το φορτίο και τις επικρατούσες συνθήκες πτήσης [22].

Product	Company	Price	Locale	Flight Time/ Payload	Camera/ Operation Range/ Features	Image	Reference
AR Drone 2.0	Parrot	\$249	France	12 min/ 100g.	Built-in 720p Camera 200m/ Supports multiple controlling devices		[73]
Bebop 2	Parrot	\$799	France	22 min/ 20g.	Stabilised 1080p Camera 180° vision HD 2000m/		[74]
Iris+	3D Robotics	\$599	US	22 min/ 400g.	GoPro Camera/ 1000m/		[75]
Solo	3D Robotics	\$919	US	25 min/ 420g.	GoPro Camera/ 805m/ Powered by twin computers Ballistic parachute system		[76]
HEXO+	Squadrone System	\$999	US	15 min/ 200g.	GoPro Camera/ 100m/ 2-second battery swap		[77]
Phantom 4	DJI	\$1,399	China	28 min/ 300g.	Built-in 1080p Camera, 4K resolution video/ 5000m Automatically avoid obstacles.		[78]
Inspire 1 Pro	DJI	\$3,899	China	18 min/ 1700g.	Built-in 1080p Camera, 4K resolution video/ 2000m/ Independent camera controller		[79]
MATRICE 100	DJI	\$3,299	China	40 min/ 1000g.	External camera stabilization gimbal/ 5000m/		[65]
QR X900	Walkera	\$4,399	China	25 min/ 3000g.	External camera stabilization gimbal/ 1000m/ Parachute protection device		[80]
Typhoon H	Yuneec	\$1,299	China	25 min/ 600g.	Built-in 1080p Camera/ 800m/ Integrated autonomous flight models		[81]

Figure 10 Commercial Drones flight time

Η επιδίωξη μεγαλύτερης αυτονομίας επιβάλλει συχνά συμβιβασμούς στο συνολικό βάρος, στον όγκο ή στο ωφέλιμο φορτίο, με άμεσες επιπτώσεις στην αποδοτικότητα και στη λειτουργική ευελιξία του UAV. Επιπλέον, η πρακτική προτεραιοποίηση χαρακτηριστικών όπως τα συστήματα πλοήγησης ή οι απεικονιστικοί αισθητήρες έναντι της ενεργειακής αποδοτικότητας δύναται να οδηγήσει είτε σε υπερδιαστασιολόγηση της απαιτούμενης ενεργειακής υποστήριξης είτε, στον αντίποδα, σε ανεπαρκή ενεργειακά αποθέματα για την ασφαλή ολοκλήρωση μίας προγραμματισμένης αποστολής [12]. Η κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας συνιστά, επομένως, αναγκαία προϋπόθεση για την αξιόπιστη ενεργειακή εκτίμηση και την ορθολογική δρομολόγηση [13]. Η περιορισμένη ενεργειακή χωρητικότητα των μπαταριών αποτελεί τον κυριότερο περιορισμό στην αυτονομία των UAV.

Battery info		Battery capacity (Wh)	Battery weight (g)	Total weight (g)	Control ratio (%)	Thrust / Prop @ Hover (g)	W/Prop	Total power (W)	Flight time (h)	Flight time (min)
Weight Battery (g)	200	10	13	1413	2.19471808	353	50	198	0.0504373996	3.026243976
Capacity Battery (Wh)	150	20	27	1427	2.174206696	357	50	200	0.09983991697	5.990395018
Energy density (Wh/g)	0.75	30	40	1440	2.154075152	360	51	202	0.1482390795	8.894344768
# of props	4	40	53	1453	2.134312995	363	51	204	0.1956651467	11.7399088
Weight without battery (g)	1400	50	67	1467	2.11491015	367	52	206	0.2421471736	14.52883042
		60	80	1480	2.095856905	370	52	209	0.2877130699	17.28278419
		70	93	1493	2.077143897	373	53	211	0.3323896557	19.94337934
<b>Your Flight Time (min)</b>	<b>39.64110784</b>	80	107	1507	2.058762092	377	53	213	0.3762027144	22.57216287
		90	120	1520	2.040702776	380	54	215	0.4191770424	25.15062254
		100	133	1533	2.022957534	383	54	217	0.4613364955	27.68018973
		125	167	1567	1.979915885	392	55	222	0.5633186303	33.79911782
		150	200	1600	1.938667637	400	57	227	0.6606851307	39.64110784
		175	233	1633	1.899102991	408	58	232	0.7536763212	45.22057927
		200	267	1667	1.861120932	417	59	237	0.8425347036	50.55208222
		250	333	1733	1.789539357	433	62	248	1.009095982	60.54575889
		300	400	1800	1.723280122	450	65	258	1.162278689	69.73661216

Figure 11 Drone weight effect on flight time

Πέραν όμως των φυσικών και τεχνικών παραγόντων, όπως το βάρος, η αεροδυναμική αντίσταση, η θερμοκρασία και το φορτίο των αισθητήρων, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η σχεδιαστική προτεραιοποίηση εκ μέρους των κατασκευαστών. Πολλές εταιρείες ανάπτυξης UAV δίνουν προτεραιότητα σε χαρακτηριστικά όπως η ποιότητα απεικόνισης, η σχεδίαση ή η εργονομία και δευτερευόντως στην ενεργειακή αποδοτικότητα. Η ενεργειακή βελτιστοποίηση αποτελεί βασικό αλλά συχνά δευτερεύον στόχο στην έρευνα των UAV [20]. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υποδιαστασιολόγηση της ενεργειακής υποστήριξης, σε αυξημένες απώλειες απόδοσης ή σε σχεδιασμό που δεν αξιοποιεί στο μέγιστο βαθμό τη δυναμική αυτονομίας του συστήματος. Συνεπώς, η θεώρηση της ενέργειας ως δευτερεύουσας απαίτησης επηρεάζει καθοριστικά το συνολικό ενεργειακό προφίλ του UAV. Πέρα από τη συνολική χωρητικότητα, καθοριστικό ρόλο στην πραγματική ενεργειακή απόδοση διαδραματίζει και ο τύπος της μπαταρίας που χρησιμοποιείται. Στα

περισσότερα τετρακόπτερα επιλέγονται συσσωρευτές λιθίου τύπου Li-Po λόγω της υψηλής δυνατότητας παροχής ρεύματος, ενώ οι μπαταρίες Li-ion προσφέρουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα αλλά περιορισμένη ικανότητα εκφόρτισης.

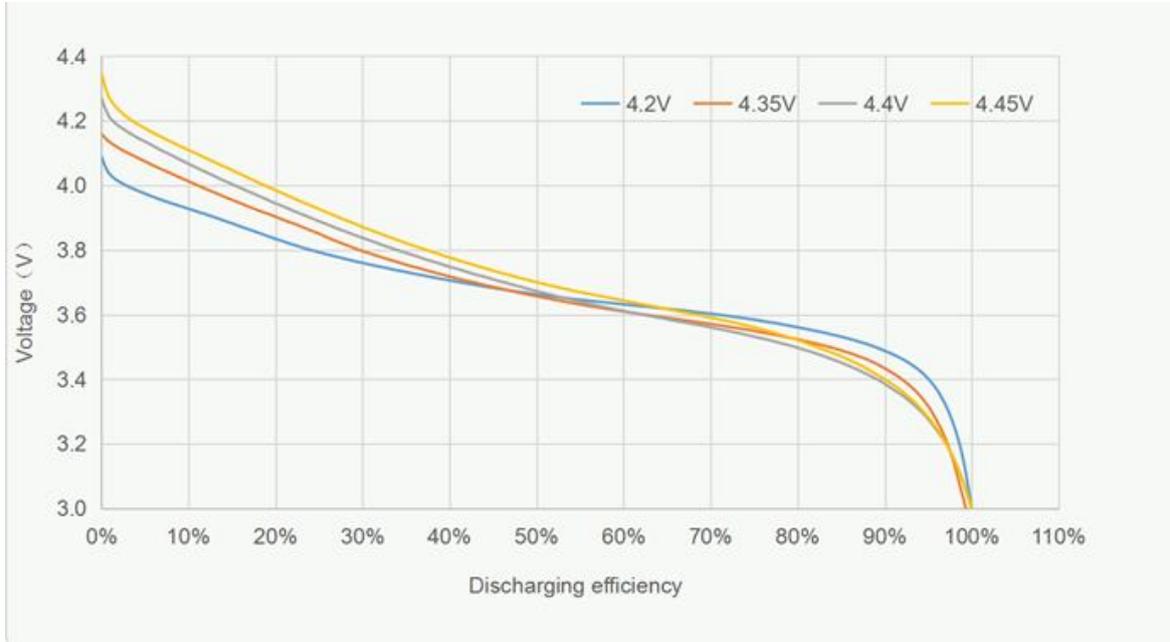


Figure 12 LiPO Discharge rate

Η επιλογή αυτή αποτελεί σαφή κατασκευαστικό και επιχειρησιακό συμβιβασμό μεταξύ ισχύος και αυτονομίας. Επιπλέον, η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας δεν επαρκεί από μόνη της για την εκτίμηση της πραγματικής αυτονομίας, καθώς ο ρυθμός εκφόρτισης επηρεάζει σημαντικά την απόδοση υπό φορτίο. Η αδυναμία παροχής του απαιτούμενου ρεύματος από τη μπαταρία μπορεί να οδηγήσει σε πτώσεις τάσης, αυξημένες απώλειες και πρόωρη εξάντληση της διαθέσιμης ενέργειας. Ταυτόχρονα, η αύξηση της χωρητικότητας συνεπάγεται αυξημένο βάρος, γεγονός που αυξάνει την απαιτούμενη ώση και μπορεί τελικά να αναιρέσει το όφελος της μεγαλύτερης ενεργειακής αποθήκευσης. Συνεπώς, η επιλογή της μπαταρίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα ισορροπίας μεταξύ ενεργειακής διαθεσιμότητας και συνολικού βάρους του UAV.

### 2.1.2 Ύψος πτήσης, ταχύτητα πτήσης και πυκνότητα αέρα

Η πυκνότητα του αέρα μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου, γεγονός που περιορίζει την παραγόμενη άντωση για δεδομένες στροφές έλικα. Για να διατηρηθεί το απαιτούμενο ύψος, απαιτείται αύξηση της γωνιακής ταχύτητας των ελίκων ή της ισχύος πρόωσης, με άμεση συνέπεια την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας [30]. Παράλληλα, η αεροδυναμική αντίσταση αυξάνεται σημαντικά με την ταχύτητα, οδηγώντας σε δυσανάλογη

αύξηση της απαιτούμενης ισχύος όταν το UAV επιχειρεί σε ταχύτητες σημαντικά υψηλότερες της βέλτιστης ταχύτητας πλεύσης. Συνεπώς, τόσο το υψόμετρο όσο και η ταχύτητα αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους που πρέπει να ρυθμίζονται με γνώμονα τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση.

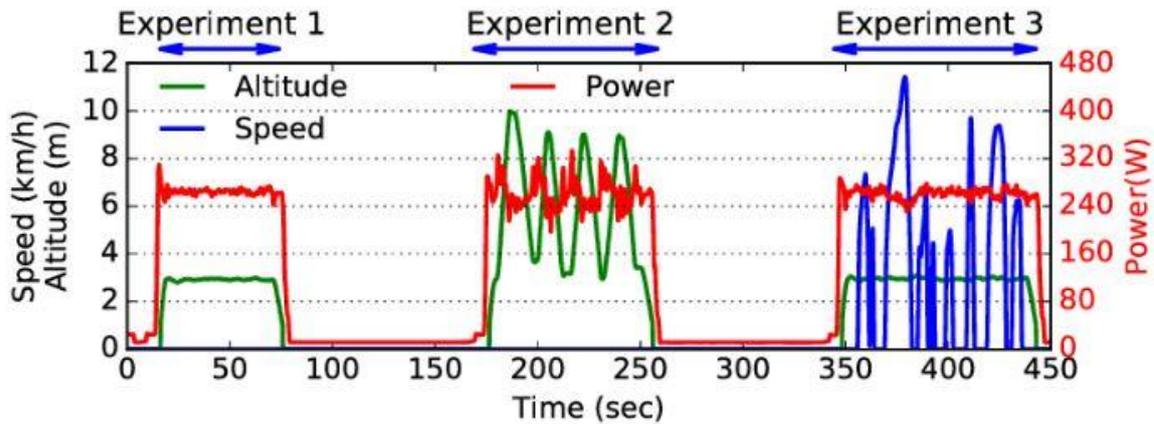


Figure 13 Difference to energy consumption for Hover, Ascend-Descend and Cruising

Οι συνθήκες ανέμου επηρεάζουν επίσης καθοριστικά το ενεργειακό προφίλ του UAV. Οι αντίθετοι άνεμοι αυξάνουν την απαιτούμενη ώθηση για διατήρηση της ταχύτητας ή της θέσης, ενώ οι ούριοι άνεμοι μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση. Ακόμη και κατά την αιώρηση, οι ριπές ανέμου επιβάλλουν συνεχείς διορθώσεις ελέγχου, οι οποίες μεταφράζονται σε πρόσθετη ενεργειακή δαπάνη. Η επιλογή ύψους και ταχύτητας, σε συνδυασμό με την πρόγνωση και την τοπική εκτίμηση του ανέμου, αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης υπό πραγματικές επιχειρησιακές συνθήκες. Η σχέση μεταξύ ταχύτητας και οπισθέλκουσας είναι μη γραμμική, με αποτέλεσμα η λειτουργία σε ταχύτητες σημαντικά υψηλότερες της βέλτιστης να οδηγεί σε έντονη αύξηση της απαιτούμενης ισχύος και, κατ' επέκταση, της κατανάλωσης [33]. Η κατεύθυνση και η ένταση του ανέμου επιδρούν καθοριστικά, η αντίθετη συνιστώσα αυξάνει την ενεργειακή απαίτηση για διατήρηση της γήινης ταχύτητας, ενώ η ούρια συνιστώσα αντισταθμίζει μέρος του απαιτούμενου έργου. Κατά την αιώρηση, οι ανεμορροπές προκαλούν επιπλέον εντολές σταθεροποίησης, οι οποίες αυξάνουν την ισχύ πρόωσης και επηρεάζουν αρνητικά την ενεργειακή αποδοτικότητα [34][35].

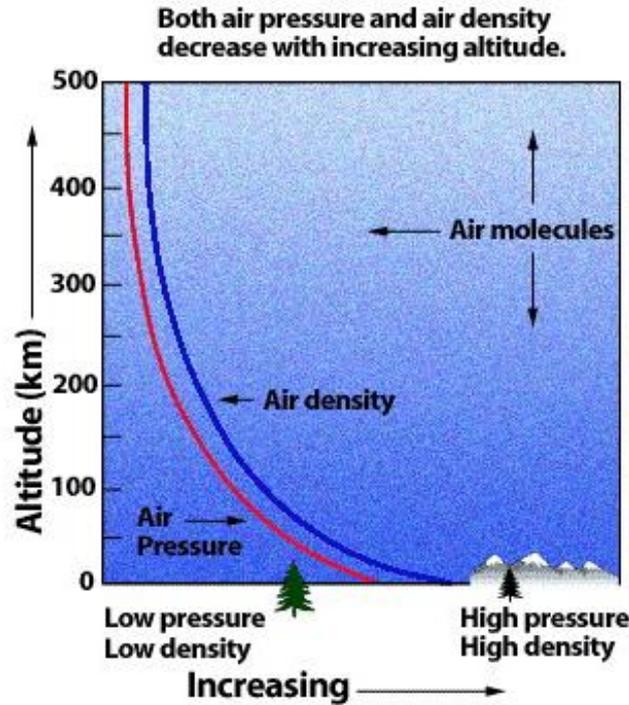


Figure 14 Air pressure changes with altitude

### 2.1.3 Ωφέλιμο φορτίο (payload)

Το συνολικό βάρος του UAV, συμπεριλαμβανομένου του ωφέλιμου φορτίου, καθορίζει το απαιτούμενο επίπεδο ώθησης για τη διατήρηση της στάθμης πτήσης και την εκτέλεση ελιγμών. Η αύξηση της μάζας συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση της απαιτούμενης ισχύος, γεγονός που οδηγεί άμεσα σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας.

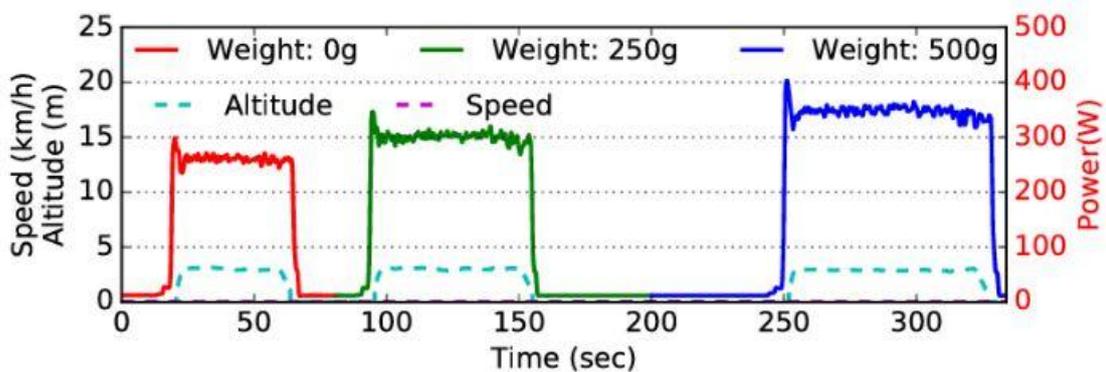


Figure 15 Battery power consumption of the test drone with different payload weights

Σε αποστολές με απαιτητικό ωφέλιμο φορτίο, όπως φωτογραφικά συστήματα υψηλής ανάλυσης, αισθητήρες LiDAR ή γεωργικοί ψεκαστήρες, ο παράγοντας αυτός είναι καθοριστικός για τη διαστασιολόγηση της αποστολής και τον υπολογισμό των διαθέσιμων ενεργειακών περιθωρίων [31].



*Figure 16 Quadcopter with payload*

#### **2.1.4 Καιρικές συνθήκες και θερμοκρασία**

Οι μετεωρολογικές συνθήκες μπορούν να μεταβάλουν ουσιαστικά το ενεργειακό ισοζύγιο ενός UAV. Ισχυροί αντίθετοι άνεμοι απαιτούν αυξημένη ώθηση, ενώ οι χαμηλές θερμοκρασίες υποβαθμίζουν τη χημική απόδοση των συσσωρευτών, μειώνοντας τη διαθέσιμη χωρητικότητα, σε ορισμένες περιπτώσεις έως και 30% [31]. Παράλληλα, το ακραίο ψύχος ή η υψηλή θερμοκρασία επηρεάζουν τη λειτουργία των αισθητήρων και των ηλεκτρονικών, την ψύξη των κινητήρων και τη θερμική καταπόνηση των μπαταριών.

Σε θερμά περιβάλλοντα, η μειωμένη πυκνότητα του αέρα περιορίζει την παραγόμενη άντωση και οδηγεί σε αυξημένα ρεύματα λειτουργίας, τα οποία επιβαρύνουν τη θερμική κατάσταση της μπαταρίας και ενδέχεται να μειώσουν τον διαθέσιμο χρόνο πτήσης [32].

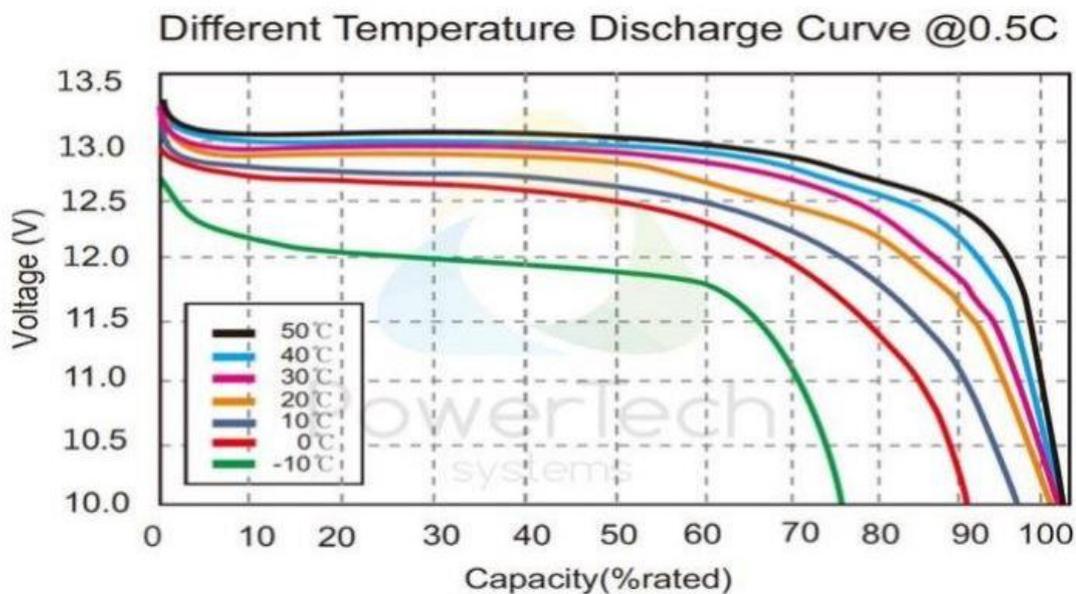


Figure 17 Different temperature discharge curve

Επιπλέον, παράγοντες όπως η ατμοσφαιρική πίεση και η υγρασία μπορούν να επηρεάσουν την αεροδυναμική συμπεριφορά και την απόδοση της πρόωσης. Σε μεγάλα υψόμετρα, η χαμηλή στατική πίεση και πυκνότητα συνεπάγονται αυξημένη απαιτούμενη ισχύ για τη διατήρηση της ανύψωσης, ενώ η υψηλή υγρασία μπορεί να μεταβάλει την τοπική πυκνότητα του αέρα και να αυξήσει την οπισθέλκουσα. Συνεπώς, η προσεκτική μετεωρολογική προετοιμασία και η προσαρμογή του προφίλ πτήσης ως προς το ύψος, την ταχύτητα και την πορεία αποτελούν αναγκαίες πρακτικές για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης.

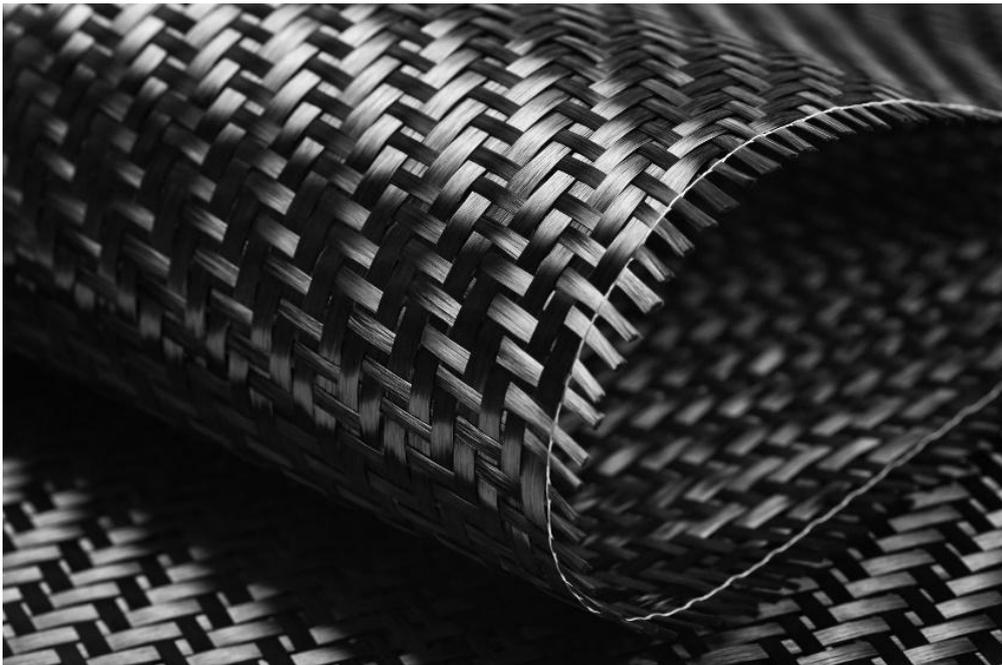
## 2.2 Κατασκευαστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή κατανάλωση

Οι κατασκευαστικοί παράγοντες των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη βασική ενεργειακή τους συμπεριφορά, ανεξάρτητα από τις εκάστοτε επιχειρησιακές συνθήκες. Σε αντίθεση με τους επιχειρησιακούς παράγοντες, οι οποίοι μεταβάλλονται από αποστολή σε αποστολή, οι κατασκευαστικοί παράγοντες σχετίζονται με μόνιμες ιδιότητες του UAV, όπως τα υλικά κατασκευής, το σύστημα πρόωσης, οι έλικες και η συνολική μάζα. Η επιλογή αυτών των στοιχείων επηρεάζει άμεσα την απαιτούμενη ισχύ για την πτήση, την απόδοση του συστήματος και κατ' επέκταση την ενεργειακή αυτονομία του τετρακόπτερου. Η βελτιστοποίηση της ενεργειακής

συμπεριφοράς προϋποθέτει συνεπώς ολιστική θεώρηση του συνόλου της κατασκευής και όχι αποσπασματική αντιμετώπιση μεμονωμένων εξαρτημάτων.

### 2.2.1 Υλικά κατασκευής πλαισίου και μηχανική αντοχή

Το πλαίσιο του UAV και τα υλικά κατασκευής του διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη συνολική μάζα, στη μηχανική ακαμψία, στη δομική αντοχή και κατ' επέκταση στην ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος. Στα σύγχρονα τετρακόπτερα χρησιμοποιούνται ευρέως σύνθετα υλικά, με κυρίαρχο το ανθρακόνημα (carbon fiber), λόγω του εξαιρετικού λόγου αντοχής προς βάρος που προσφέρει. Η χαμηλή πυκνότητα του υλικού επιτρέπει τη σημαντική μείωση της συνολικής μάζας του UAV, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερη απαιτούμενη ώθηση και συνεπώς σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας κατά την πτήση [9]. Παράλληλα, η υψηλή δομική ακαμψία του carbon fiber περιορίζει τις ανεπιθύμητες παραμορφώσεις του πλαισίου υπό φορτίο, συμβάλλοντας στη σταθερότερη πτήση και στη μείωση των διορθωτικών εντολών των κινητήρων [10].



*Figure 18 Carbon Fiber*

Η μηχανική ακαμψία του πλαισίου επηρεάζει άμεσα και τη δυναμική απόκριση του UAV, καθώς ένα πλαίσιο με χαμηλή ακαμψία οδηγεί σε αυξημένες ταλαντώσεις και κραδασμούς. Οι ταλαντώσεις αυτές επηρεάζουν το σύστημα ελέγχου πτήσης, αυξάνοντας τις διορθωτικές παρεμβάσεις των κινητήρων και, κατ' επέκταση, την απαιτούμενη κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν αυξημένη αντοχή σε

κουραστικά φορτία και σε μηχανικές καταπονήσεις, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για UAV που λειτουργούν σε απαιτητικά και δυναμικά περιβάλλοντα πτήσης.



*Figure 19 UCANDRONE AQUILA*

Οι θερμικές καταπονήσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία των κινητήρων, των ελεγκτών στροφών και των ηλεκτρονικών επηρεάζουν επίσης τη μηχανική συμπεριφορά των υλικών. Τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν καλύτερη θερμική σταθερότητα σε σύγκριση με μεταλλικές κατασκευές, μειώνοντας τον κίνδυνο παραμορφώσεων και μηχανικής αστοχίας σε περιβάλλοντα με μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές [11]. Παρά το αυξημένο κόστος και τη δυσκολία κατεργασίας του carbon fiber σε σχέση με υλικά όπως τα κράματα αλουμινίου ή τα ενισχυμένα πολυμερή, η ανώτερη μηχανική του συμπεριφορά, η ανθεκτικότητα και τα ενεργειακά οφέλη που προσφέρει δικαιολογούν τη χρήση του σε UAV υψηλών επιδόσεων [12]. Συνεπώς, η επιλογή των υλικών του πλαισίου αποτελεί κρίσιμο κατασκευαστικό παράγοντα που επηρεάζει άμεσα τόσο τη δομική αξιοπιστία όσο και τη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα του UAV.

### **2.2.2 Έλικες και αεροδυναμική απόδοση**

Οι έλικες αποτελούν ένα από τα πλέον καθοριστικά στοιχεία του συστήματος πρόωσης ενός UAV, καθώς μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια των κινητήρων σε ωφέλιμη ώση. Η γεωμετρική διαμόρφωση της έλικας, η διάμετρος, το βήμα (pitch) καθώς

και το υλικό κατασκευής επηρεάζουν άμεσα τόσο την παραγόμενη άντωση όσο και την ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος. Η μεγαλύτερη διάμετρος αυξάνει την παραγόμενη ώση σε χαμηλότερες στροφές, οδηγώντας σε καλύτερο βαθμό απόδοσης, ενώ ακατάλληλος συνδυασμός διαμέτρου και pitch μπορεί να προκαλέσει υπερφόρτιση του κινητήρα και αυξημένη κατανάλωση ενέργειας [13][14].

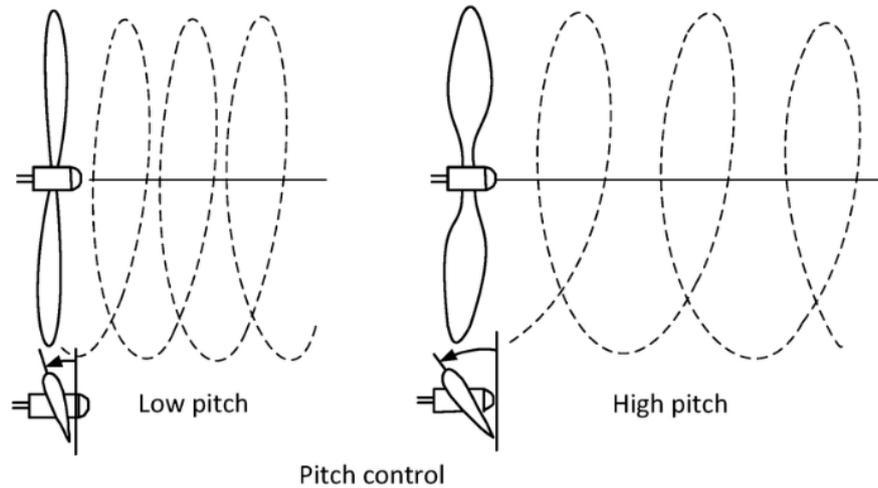


Figure 20 Pitch Control

Η αεροδυναμική απόδοση των ελίκων εξαρτάται επίσης από το προφίλ των πτερυγίων και τον αριθμό τους. Έλικες με περισσότερα πτερύγια παράγουν μεγαλύτερη ώση σε μικρότερο μήκος, αλλά παρουσιάζουν συχνά αυξημένες απώλειες λόγω τριβών και αλληλεπιδράσεων ροής. Αντίθετα, έλικες με λιγότερα πτερύγια και κατάλληλο αεροτομικό προφίλ εμφανίζουν υψηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα σε συνθήκες σταθερής πτήσης και αιώρησης [14]. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το υλικό κατασκευής των ελίκων.

	<b>2-blade</b>		<b>3-blade</b>	
	5 m/s	7 m/s	5 m/s	7 m/s
<b>Mean Throttle in %</b>	54.5	56.3	51.0	50.7
<b>Mean Current in A</b>	25.3	26.0	27.1	26.4
<b>Mean Voltage in V</b>	24.0	23.1	22.5	22.3
<b>Mean Power in W</b>	607	599	610	588

Figure 21 2-blade vs 3-blade propeller

Οι έλικες από ανθρακόνημα (carbon fiber) παρουσιάζουν υψηλή μηχανική αντοχή, χαμηλό βάρος και εξαιρετική ακαμψία, με αποτέλεσμα να περιορίζονται οι ανεπιθύμητες παραμορφώσεις στις υψηλές στροφές και να διατηρείται η αεροδυναμική τους απόδοση σε σταθερά επίπεδα. Αντίθετα, οι πλαστικές έλικες, αν και οικονομικότερες, παρουσιάζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις υπό φορτίο και μεγαλύτερες απώλειες απόδοσης [15].



*Figure 22 Different Material Propellers*

Η σωστή αντιστοίχιση έλικας και κινητήρα αποτελεί κρίσιμο σημείο για τη συνολική ενεργειακή συμπεριφορά του UAV. Η επιλογή έλικας με ακατάλληλα χαρακτηριστικά μπορεί να οδηγήσει είτε σε λειτουργία εκτός του βέλτιστου σημείου απόδοσης του κινητήρα είτε σε αυξημένα ρεύματα, που επιβαρύνουν τόσο την κατανάλωση όσο και τη θερμική λειτουργία του συστήματος. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η βέλτιστη σχεδίαση του συστήματος πρόωσης πρέπει να εξετάζεται ως ενιαίο σύνολο κινητήρα-έλικα-ESC, προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ενεργειακή αποδοτικότητα [15][1].

### **2.2.3 Απόδοση των ηλεκτροκινητήρων και σύστημα πρόωσης**

Οι ηλεκτροκινητήρες αποτελούν τον βασικό ενεργειακό καταναλωτή ενός τετρακόπτερου και καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το συνολικό προφίλ κατανάλωσης του UAV. Στα περισσότερα σύγχρονα πολυκόπτερα χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς

ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless DC – BLDC), οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή ενεργειακή απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής και μειωμένες απώλειες λόγω τριβών. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους περιλαμβάνουν τη μέγιστη ονομαστική ισχύ σε Watt, τον συντελεστή KV, τη ροπή και τον βαθμό απόδοσης κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική [17].

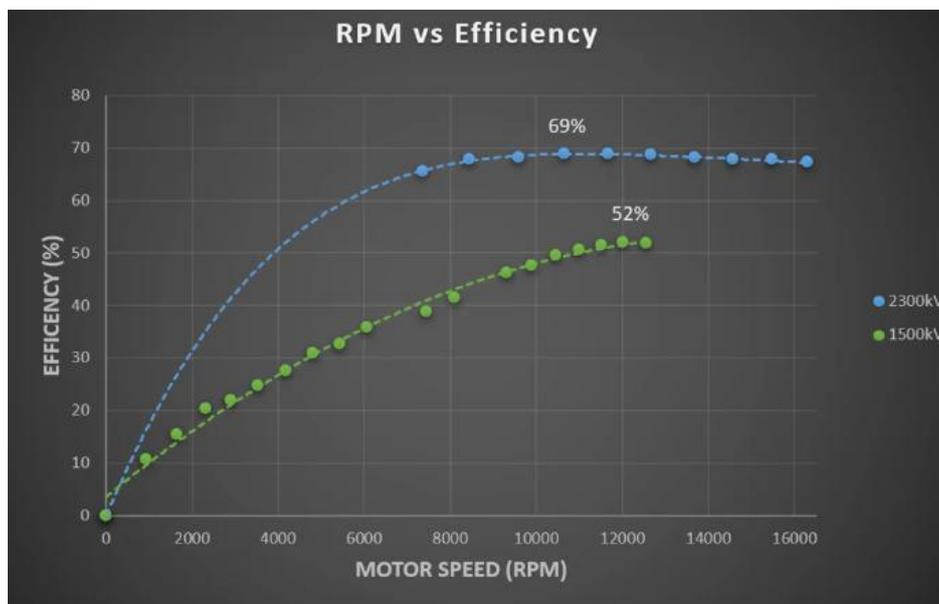
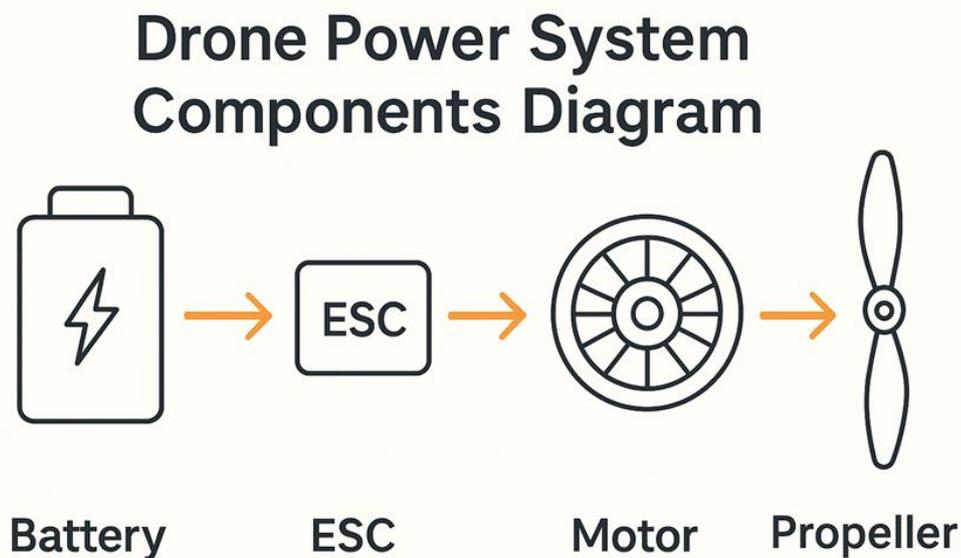


Figure 23 RPM efficiency

Η αύξηση της ονομαστικής ισχύος ενός κινητήρα δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη καλύτερη ενεργειακή συμπεριφορά. Κινητήρες υψηλής ισχύος μπορούν να υποστηρίξουν μεγαλύτερα ωφέλιμα φορτία και επιθετικότερα προφίλ πτήσης, όμως συχνά παρουσιάζουν μειωμένη απόδοση σε συνθήκες μερικού φορτίου, οι οποίες είναι ιδιαίτερα συνηθισμένες κατά την αιώρηση των τετρακόπτερων. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή των κινητήρων οφείλει να γίνεται σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά των ελίκων και της μπαταρίας, έτσι ώστε το σύστημα πρόωσης να λειτουργεί όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο βέλτιστο σημείο απόδοσης [18]. Ιδιαίτερα καθοριστικός είναι και ο ρόλος του συντελεστή KV, ο οποίος εκφράζει τις στροφές ανά Volt χωρίς φορτίο και επηρεάζει άμεσα τη συμβατότητα κινητήρα και έλικας. Χαμηλότερες τιμές KV προτιμώνται σε εφαρμογές αιώρησης και μεταφοράς φορτίου, ενώ υψηλότερες τιμές KV χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που απαιτούνται αυξημένες ταχύτητες και μικρότερες έλικες. Η ακατάλληλη επιλογή KV μπορεί να οδηγήσει είτε σε αυξημένα ρεύματα και υπερθέρμανση είτε σε χαμηλή εκμετάλλευση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν επίσης οι ηλεκτρονικοί ρυθμιστές στροφών (Electronic Speed Controllers – ESC), οι οποίοι καθορίζουν την ποιότητα της τροφοδοσίας των κινητήρων, τη γραμμικότητα της απόκρισης και τις ηλεκτρικές απώλειες. Η κακή αντιστοίχιση κινητήρα, έλικα και ESC οδηγεί σε αυξημένες απώλειες ισχύος, υψηλότερη θερμική καταπόνηση και μειωμένη ενεργειακή αυτονομία. Έχει αποδειχθεί ότι η ορθολογική αντιστοίχιση όλων των στοιχείων του συστήματος πρόωσης μπορεί να βελτιώσει τη συνολική ενεργειακή απόδοση ενός τετρακόπτερου έως και 20–30% [15].



*Figure 24 Drone power system components diagram*

Επιπλέον, η θερμική συμπεριφορά των κινητήρων επηρεάζει άμεσα τόσο την ενεργειακή τους απόδοση όσο και τη μακροχρόνια αξιοπιστία τους. Η παρατεταμένη λειτουργία σε υψηλά ρεύματα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας, γεγονός που μειώνει την απόδοση, αυξάνει τις απώλειες Joule και επιταχύνει τη φθορά των τυλιγμάτων και των μαγνητών. Η επαρκής ψύξη των κινητήρων και η επιλογή σημείων λειτουργίας εντός των ασφαλών ορίων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη διατήρηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της λειτουργικής ασφάλειας του UAV [20]. Συνεπώς, το σύστημα πρόωσης πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένα ενιαίο ενεργειακό σύνολο και όχι ως σύνολο ανεξάρτητων επιμέρους εξαρτημάτων. Η ορθή επιλογή και αντιστοίχιση κινητήρων, ελίκων, ESC και μπαταρίας επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση ενέργειας, τη διάρκεια πτήσης και την επιχειρησιακή αξιοπιστία του τετρακόπτερου.

## 2.2.4 Συνολική μάζα UAV και κατανομή βάρους

Η συνολική μάζα του UAV αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την απαιτούμενη ώση και την κατανάλωση ενέργειας. Κάθε αύξηση της μάζας οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της απαιτούμενης ισχύος για τη διατήρηση της αιώρησης και για την εκτέλεση ελιγμών. Η σχέση μεταξύ μάζας και κατανάλωσης είναι σχεδόν γραμμική κατά την αιώρηση, ενώ σε δυναμικές καταστάσεις πτήσης, όπως επιταχύνσεις και ελιγμοί, η ενεργειακή απαίτηση αυξάνεται με μη γραμμικό ρυθμό λόγω της αυξημένης αεροδυναμικής αντίστασης και των επιπλέον ροπών που αναπτύσσονται [2]. Μελέτες έχουν δείξει ότι ακόμη και μικρές αυξήσεις μάζας μπορούν να επιφέρουν σημαντική μείωση της αυτονομίας, ιδιαίτερα σε πολυκόπτερα που λειτουργούν κοντά στα όρια φόρτου τους [22]. Εξίσου σημαντική είναι η κατανομή του βάρους και η θέση του κέντρου μάζας.

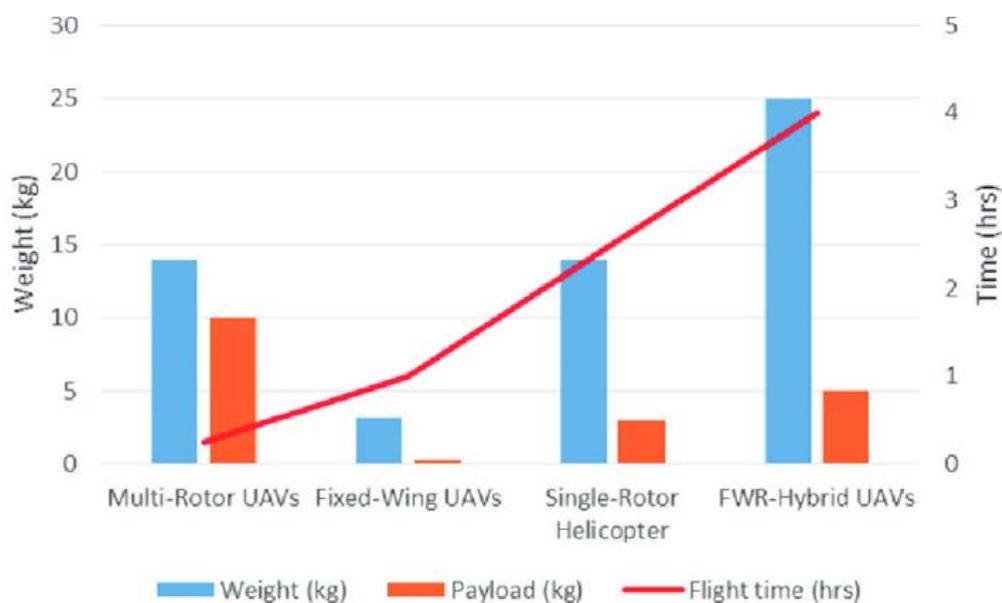


Figure 25 UAV weight and payload vs flight time

Η κακή κατανομή οδηγεί σε μόνιμες διορθώσεις στάσης από το σύστημα ελέγχου πτήσης, αυξάνοντας συνεχώς την απαιτούμενη ισχύ των κινητήρων και κατά συνέπεια την ενεργειακή κατανάλωση. Η σωστή τοποθέτηση της μπαταρίας, των αισθητήρων και του ωφέλιμου φορτίου πλησίον του γεωμετρικού κέντρου του UAV επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της ευστάθειας, τη μείωση των ροπών αδράνειας και τον περιορισμό των ενεργειακών απωλειών [23]. Συνεπώς, η συνολική μάζα και η γεωμετρική κατανομή της αποτελούν κρίσιμες μεταβλητές για τη διαμόρφωση ενός ενεργειακά αποδοτικού και πτητικά σταθερού τετρακόπτερου.

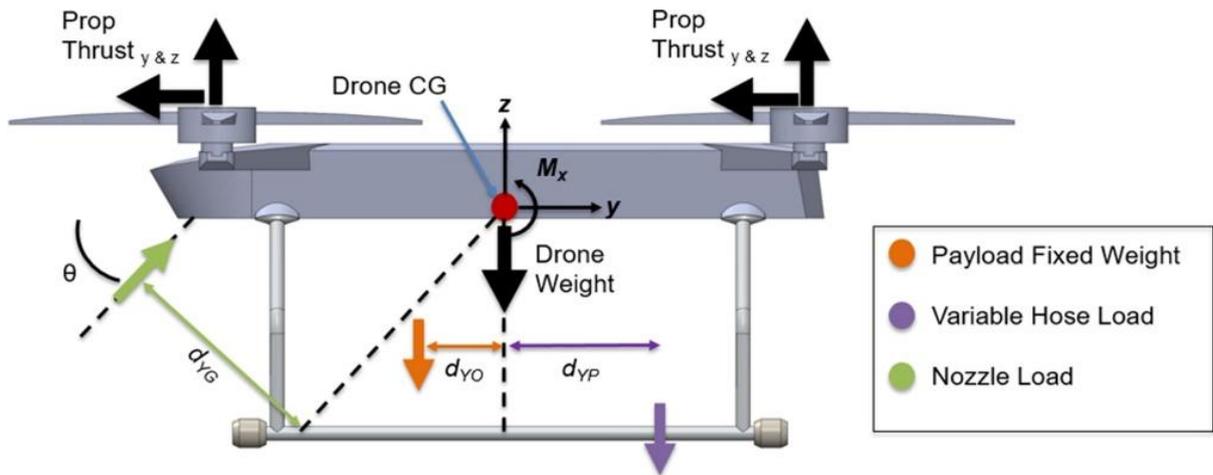
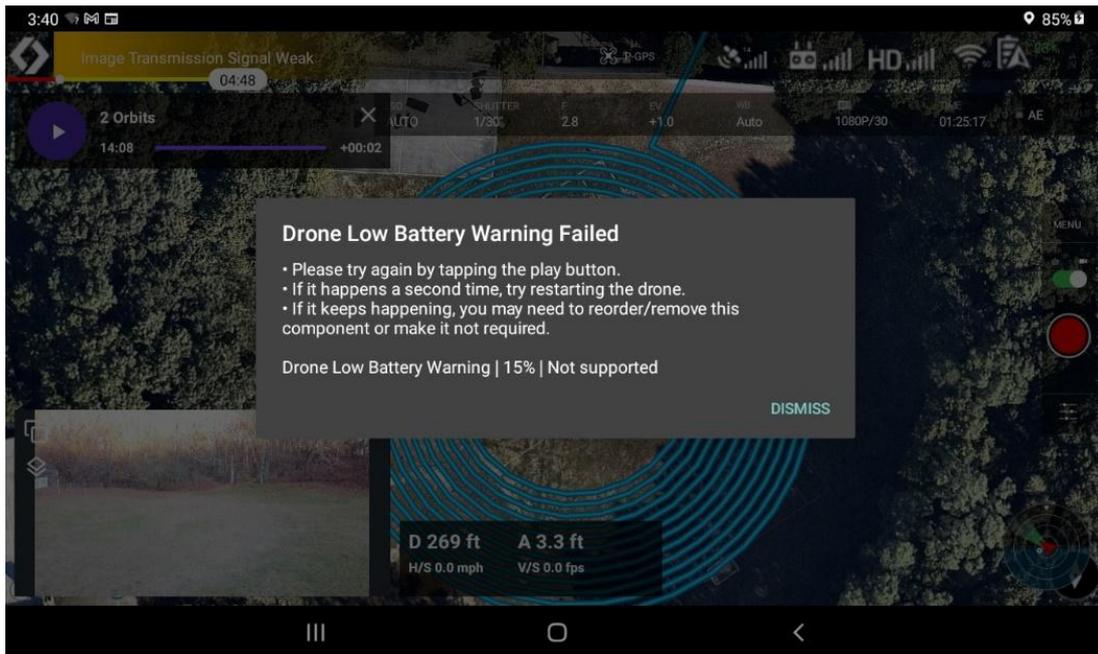


Figure 26 Drone center gravity

### 2.3 Αναγκαιότητα πρόβλεψης ενεργειακής επάρκειας

Οι επιχειρησιακοί και κατασκευαστικοί παράγοντες που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες καθιστούν σαφές ότι η ενέργεια αποτελεί κρίσιμο περιοριστικό στοιχείο για τα τετρακόπτερα UAV. Για τον λόγο αυτό, η ακριβής πρόβλεψη της κατανάλωσης ενέργειας δεν αποτελεί απλώς βελτίωση στην αποδοτικότητα, αλλά προϋπόθεση για την ασφαλή και επιτυχημένη ολοκλήρωση κάθε αποστολής.

Η ενεργειακή κατανάλωση δεν είναι σταθερή ούτε απολύτως προβλέψιμη, καθώς επηρεάζεται από δυναμικές παραμέτρους όπως το ωφέλιμο φορτίο, η ταχύτητα πτήσης, οι ελιγμοί, οι καιρικές συνθήκες και η στιγμιαία απόδοση κινητήρων και μπαταριών [25]. Η παρουσία ισχυρών ανέμων μπορεί, για παράδειγμα, να αυξήσει σημαντικά την απαιτούμενη ισχύ για τη διατήρηση πορείας, υπερβαίνοντας τις αρχικές εκτιμήσεις [26]. Αντίστοιχα, η θερμοκρασία επηρεάζει άμεσα τη διαθέσιμη χωρητικότητα των στοιχείων, με χαμηλές τιμές να οδηγούν σε αισθητή μείωση της αποδιδόμενης ενέργειας [24].



*Figure 27 Drone Low Battery Warning Failed*

Στο πλαίσιο αυτό, καθίσταται απαραίτητη η συνεχής ενεργειακή επιτήρηση (monitoring) και η ύπαρξη μηχανισμών λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, ώστε το UAV να μπορεί να προσαρμόζει το προφίλ πτήσης του και, εφόσον χρειαστεί, να τροποποιεί ή να διακόπτει την αποστολή. Οι συνέπειες ανεπαρκούς πρόβλεψης αποτυπώνονται τόσο στο επίπεδο της ασφάλειας πτήσης όσο και στο επιχειρησιακό επίπεδο αξιοπιστίας, όπως αναλύεται στις υποενότητες που ακολουθούν.

### **2.3.1 Θέματα ασφάλειας**

Σε επίπεδο ασφάλειας πτήσης, η αποτυχία αξιόπιστης πρόβλεψης της ενεργειακής επάρκειας μπορεί να δημιουργήσει σοβαρούς κινδύνους τόσο για το αερόχημα όσο και για το περιβάλλον λειτουργίας του. Αιφνίδια εξάντληση του ενεργειακού αποθέματος δύναται να προκαλέσει απώλεια ισχύος και ανεξέλεγκτη καθίζηση ή πρόσκρουση, ιδίως σε κατοικημένους χώρους ή πλησίον κρίσιμων υποδομών [25]. Σε εφαρμογές παράδοσης ή επιθεώρησης, μία απότομη πτώση τάσης μπορεί να μην αφήσει επαρκή χρόνο ή απόσταση για ασφαλή επιστροφή ή προσγείωση. Για τον λόγο αυτό, η τήρηση ενεργειακών περιθωρίων ασφαλείας (safety margins), τυπικά της τάξης του 15–30% της ονομαστικής χωρητικότητας, θεωρείται βέλτιστη πρακτική και λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας έναντι απροόπτων. Τα περιθώρια αυτά ενσωματώνονται στον επιχειρησιακό σχεδιασμό ώστε η ενεργειακή εξάντληση να μην αποτελεί ποτέ «οριακό» σενάριο, αλλά να προλαμβάνεται με συντηρητικές εκτιμήσεις.

### 2.3.2 Ακύρωση αποστολών

Πέρα από τα ζητήματα ασφάλειας, η ανεπαρκής εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας έχει άμεσο αντίκτυπο και στην επιχειρησιακή αξιοπιστία. Η έλλειψη αξιόπιστου ενεργειακού μοντέλου οδηγεί συχνά σε προληπτικές διακοπές ή ακυρώσεις αποστολών, ακόμη και όταν ο αρχικός σχεδιασμός είναι λεπτομερής. Σε άλλες περιπτώσεις, η αποστολή αποτυγχάνει λόγω αναπάντεχης αύξησης κατανάλωσης σε συγκεκριμένες φάσεις, όπως κατά τη διέλευση από ζώνες έντονου ανέμου ή σε συνθήκες ακραίας θερμοκρασίας [26].



Figure 28 Low Battery Warning

Οι επιπτώσεις δεν είναι μόνο τεχνικές αλλά και επιχειρησιακές: καθυστερήσεις, απώλειες δεδομένων, επανάληψη αποστολών και πιθανές υλικές ζημιές. Σε πεδία όπως η γεωργία ακριβείας ή η επιθεώρηση υποδομών, η μη ολοκλήρωση μιας πτήσης μπορεί να επιβάλει επανασχεδιασμό με σημαντικό οικονομικό κόστος και μειωμένη αποτελεσματικότητα. Επομένως, η πρόβλεψη ενεργειακής επάρκειας συνδέεται άμεσα με τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα των επιχειρησιακών σεναρίων χρήσης των UAV.

### 2.3.3 Αρχή “bingo fuel” και ενεργειακά κατώφλια

Για τη συστηματική διαχείριση των παραπάνω κινδύνων, υιοθετούνται επιχειρησιακές έννοιες και πρακτικές προερχόμενες από την επανδρωμένη αεροπορία. Ο όρος “bingo fuel”, προερχόμενος από τη στρατιωτική αεροπορία, ορίζει το ελάχιστο απαιτούμενο καύσιμο για ασφαλή επιστροφή στη βάση ή σε εναλλακτικό σημείο προσγείωσης [27]. Στο πλαίσιο των UAV, η έννοια αυτή μετασχηματίζεται σε ένα κατώφλι

απομένουσας ενέργειας, κάτω από το οποίο επιβάλλεται η άμεση διακοπή της αποστολής και η έναρξη διαδικασίας επιστροφής ή ασφαλούς προσγείωσης.

Ο προσδιορισμός του κατωφλίου δεν είναι στατικός, αλλά οφείλει να λαμβάνει υπόψη την απόσταση από το σημείο επιστροφής, το εκτιμώμενο προφίλ κατανάλωσης, τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες και τα πιθανά εμπόδια στην πορεία πτήσης. Σε επιχειρήσεις μεγάλης εμβέλειας ή πέραν οπτικής επαφής (BVLOS), το “bingo fuel” λειτουργεί ως κρίσιμο όριο διαχείρισης κινδύνου και ενσωματώνεται στους αλγόριθμους αυτόνομης πλοήγησης και λήψης αποφάσεων [27]. Για την πρακτική εφαρμογή των παραπάνω είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλων εργαλείων μέτρησης, τηλεμετρίας και μοντελοποίησης της κατανάλωσης, καθώς και κατάλληλων αλγορίθμων εκτίμησης της ενεργειακής κατάστασης. Τα εργαλεία αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά στην επόμενη ενότητα. Για την αποτελεσματική εφαρμογή των αρχών πρόβλεψης ενεργειακής επάρκειας που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, απαιτείται η ύπαρξη αξιόπιστων μηχανισμών μέτρησης, καταγραφής και εκτίμησης της κατανάλωσης ενέργειας. Η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης των ενεργειακών μεγεθών, καθώς και η αξιοποίηση κατάλληλων υπολογιστικών μοντέλων, αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για τη λήψη ασφαλών και έγκαιρων αποφάσεων κατά τη διάρκεια της αποστολής. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν τα σύγχρονα εργαλεία τηλεμετρίας, τα λογισμικά επίγειων σταθμών και οι μέθοδοι μοντελοποίησης της ενεργειακής συμπεριφοράς.

## **2.4 Εργαλεία μέτρησης και μοντέλα εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης σε UAV**

Σε άμεση συνέχεια της αναγκαιότητας αξιόπιστης πρόβλεψης της ενεργειακής επάρκειας, καθίσταται σαφές ότι η αποδοτική διαχείριση της ενέργειας προϋποθέτει τη χρήση εξειδικευμένων εργαλείων μέτρησης, καταγραφής και εκτίμησης. Η σύγχρονη τεχνολογία παρέχει πληθώρα λύσεων που επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των UAV τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και σε επίπεδο προσομοίωσης και προγραμματισμού αποστολών. Το Mission Planner, παρέχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σεναρίων σε γλώσσα Lua για την καταγραφή της κατανάλωσης ανά φάση πτήσης, καθώς και για τον έλεγχο της ενεργειακής επάρκειας σε σχέση με τη συνολική διάρκεια και το προφίλ της αποστολής. Παράλληλα, η χρήση ενσωματωμένων αισθητήρων, όπως μετατροπείς μέτρησης ρεύματος και «έξυπνες» μπαταρίες, επιτρέπει τη συνεχή λήψη τηλεμετρικών δεδομένων τάσης, ρεύματος και υπολειπόμενης χωρητικότητας

σε πραγματικό χρόνο [9]. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τη βάση για την εκτίμηση της στιγμιαίας και της σωρευτικής κατανάλωσης σε mAh ή Joule, προσφέροντας ακριβή εικόνα της ενεργειακής κατάστασης του UAV. Συμπληρωματικά, αξιοποιούνται μαθηματικά και υπολογιστικά μοντέλα ενεργειακής κατανάλωσης, τα οποία βασίζονται είτε σε εμπειρικά δεδομένα πτήσης είτε σε φυσικά μοντέλα αεροδυναμικής και πρόωσης. Τα μοντέλα αυτά επιτρέπουν την πρόβλεψη της απαιτούμενης ενέργειας για συγκεκριμένο προφίλ αποστολής, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η μάζα, το ωφέλιμο φορτίο, η ταχύτητα, το ύψος και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η χρήση τέτοιων μοντέλων συμβάλλει καθοριστικά στην πρόληψη της ενεργειακής εξάντλησης, στη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης και στη μείωση του επιχειρησιακού κινδύνου, ιδίως σε αποστολές μεγάλης εμβέλειας ή αυξημένων απαιτήσεων.

Συνοψίζοντας, η ενεργειακή απόδοση ενός UAV δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τα μηχανικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του, αλλά και από την αποτελεσματική αξιοποίηση των εργαλείων μέτρησης, καταγραφής και ελέγχου της ενέργειας. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης αλγορίθμων μέσω scripting μετατρέπει τη διαδικασία ενεργειακής εκτίμησης σε δυναμικό και διαδραστικό μέρος της λειτουργίας του συστήματος UAV. Κατά τον τρόπο αυτό, η ενεργειακή ανάλυση συνδέεται άμεσα με τα συστήματα επικοινωνίας, τηλεμετρίας και αυτόνομου ελέγχου, τα οποία βασίζονται στο πρωτόκολλο MAVLink και καθορίζουν τη συνολική συμπεριφορά του αεροχήματος κατά την πτήση. Το επόμενο κεφάλαιο επικεντρώνεται αναλυτικά στα συστήματα αυτά και στον ρόλο τους στη διασύνδεση μεταξύ UAV και επίγειου σταθμού ελέγχου, με ιδιαίτερη έμφαση στη χρήση αλγορίθμων αυτοματισμού.

### **3 Ανάπτυξη Αλγορίθμου Εκτίμησης Κατανάλωσης**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι ενεργειακοί περιορισμοί των τετρακόπτρων UAV, οι επιχειρησιακοί και κατασκευαστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση, καθώς και τα διαθέσιμα εργαλεία μέτρησης και μοντελοποίησης της ενέργειας. Η θεωρητική αυτή θεμελίωση αναδεικνύει ότι η αξιόπιστη διαχείριση της ενέργειας δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε εκ των υστέρων μετρήσεις, αλλά απαιτεί δυναμική πρόβλεψη και υπολογιστική υποστήριξη σε πραγματικό χρόνο. Στο πλαίσιο αυτό, το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάπτυξη και υλοποίηση ενός αλγορίθμου εκτίμησης της ενεργειακής κατανάλωσης, ο οποίος λειτουργεί εντός του περιβάλλοντος του Mission Planner και βασίζεται στην ανταλλαγή τηλεμετρικών δεδομένων μέσω του

πρωτοκόλλου MAVLink. Ο αλγόριθμος έχει αναπτυχθεί σε γλώσσα Lua και επιτρέπει την εκτίμηση της συνολικής κατανάλωσης, καθώς και τη δυναμική αξιολόγηση της δυνατότητας ασφαλούς επιστροφής στη βάση με βάση την εναπομένουσα ενέργεια. Η προσέγγιση αυτή γεφυρώνει τη θεωρητική ενεργειακή ανάλυση με την πρακτική εφαρμογή σε προσομοιωμένες αποστολές.

### **3.1 Σκοπός και λειτουργία του αλγορίθμου**

Η εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης πριν από την πτήση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα στον προγραμματισμό αποστολών για μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, καθώς συνδέεται άμεσα με τη βιωσιμότητα της αποστολής, την ασφάλεια του εξοπλισμού και τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων. Σκοπός του αλγορίθμου είναι η πρόβλεψη της κατανάλωσης της σχεδιαζόμενης αποστολής, καθώς και η δυναμική επικαιροποίησή της βάσει ζωντανών τηλεμετρικών δεδομένων. Ο αλγόριθμος αξιοποιεί αρχεία αποστολής τύπου `.waypoints`, παραμέτρους του ArduPilot (ταχύτητα πτήσης ανόδου, καθόδου και πλεύσης) και γεωαναφορά (γεωγραφικό πλάτος, μήκος και ύψος). Με τον τρόπο αυτό, η πτήση μοντελοποιείται τρισδιάστατα και το ενεργειακό κόστος εκφράζεται σε Joule. Η υλοποίηση αυτή επιτρέπει στον χρήστη να διαπιστώνει αν η διαθέσιμη μπαταρία επαρκεί για την ασφαλή ολοκλήρωση της αποστολής χωρίς να απαιτείται πραγματική πτήση. Ο αλγόριθμος λειτουργεί, επομένως, ως εργαλείο υποστήριξης απόφασης, ιδιαίτερα σε αποστολές μεγάλης αξίας ή αυξημένου κινδύνου, συμβάλλοντας στην αποφυγή αστοχιών λόγω ενεργειακής εξάντλησης και στην ενίσχυση της επιχειρησιακής αξιοπιστίας του UAV.

### **3.2 Αρχιτεκτονική του αλγορίθμου**

Η υλοποίηση του αλγορίθμου βασίζεται σε στενή διασύνδεση με τη πλατφόρμα Mission Planner και στη χρήση των διαθέσιμων παραμέτρων πτήσης και των δεδομένων αποστολής. Η συνολική αρχιτεκτονική ακολουθεί μια λογική «ανάγνωσης, επεξεργασίας και εκτίμησης», στην οποία οι παράμετροι του συστήματος και το σχέδιο πτήσης ανακτώνται από το Mission Planner. Η λογική του αλγορίθμου στηρίζεται σε μια γεωμετρική αναπαράσταση της αποστολής. Η απόσταση μεταξύ δύο σημείων πτήσης δεν θεωρείται απλώς οριζόντια ευθεία, αλλά τρισδιάστατο διανυσματικό μέγεθος, του οποίου το μήκος υπολογίζεται βάσει του γεωμετρικού μοντέλου τρισδιάστατης απόστασης. Με τον τρόπο αυτό, λαμβάνεται υπόψη η πραγματική απόσταση που διανύει το UAV στον χώρο, ενσωματώνοντας ταυτόχρονα οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις. Έτσι, η εκτίμηση κατανάλωσης προσεγγίζει ρεαλιστικά τη φυσική ενέργεια που απαιτείται για κάθε

επιμέρους φάση πτήσης. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται εμπειρικά δεδομένα από την προσομοίωση(SITL), του Mission Planner, για τη βαθμονόμηση των υπολογισμών, ώστε η θεωρητική προσέγγιση να προσαρμόζεται στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του UAV. Η σύζευξη αυτών των δύο στοιχείων, της γεωμετρικής ανάλυσης και της εμπειρικής προσαρμογής, καθιστά τον αλγόριθμο αξιόπιστο, ευέλικτο και φυσικά θεμελιωμένο, προσδίδοντάς του τη δυνατότητα να προβλέπει με ακρίβεια τη συνολική κατανάλωση ενέργειας μιας αποστολής. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η συνολική ροή λειτουργίας του αλγορίθμου εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης. Το διάγραμμα αποτυπώνει τα βασικά στάδια ανάκτησης παραμέτρων, ανάγνωσης του σχεδίου αποστολής, ελέγχου εγκυρότητας δεδομένων και υπολογισμού της κατανάλωσης ανά εντολή MAVLink και ανά τμήμα πτήσης.



Πίνακας 1: Διάγραμμα Αρχιτεκτονικής Αλγορίθμου

### 3.2.1 Ανάκτηση παραμέτρων από το Mission Planner

Η εκτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων ενός UAV εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια με την οποία ανακτώνται οι λειτουργικές ρυθμίσεις του αυτόματου πιλότου. Το Mission Planner λειτουργεί ως διεπαφή μεταξύ του χρήστη και του λογισμικού ArduPilot, παρέχοντας πρόσβαση στο σύνολο των παραμέτρων που καθορίζουν την κινηματική, την πλοήγηση και τη διαχείριση ισχύος του συστήματος.

Name	Value	Default	Units	Options	Description
ACRO_BA_PITCH	1	1	0.1	0.1	Rate at which pitch angle returns to level in acro and sport mode. A higher value causes the vehicle to return to level faster. For helicopter sets the decay rate of the virtual ball in the pitch axis. Higher values cause faster decay of overshoot virtual attitude.
ACRO_BA_ROLL	1	1	0.1	0.1	Rate at which roll angle returns to level in acro and sport mode. A higher value causes the vehicle to return to level faster. For helicopter sets the decay rate of the virtual ball in the roll axis. Higher values cause faster decay of overshoot virtual attitude.
ACRO_OPTIONS	0	0	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 4.0, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 5.0, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 6.0, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 7.0, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 8.0, 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7, 8.8, 8.9, 9.0, 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5, 9.6, 9.7, 9.8, 9.9, 10.0, 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.8, 10.9, 11.0, 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5, 11.6, 11.7, 11.8, 11.9, 12.0, 12.1, 12.2, 12.3, 12.4, 12.5, 12.6, 12.7, 12.8, 12.9, 13.0, 13.1, 13.2, 13.3, 13.4, 13.5, 13.6, 13.7, 13.8, 13.9, 14.0, 14.1, 14.2, 14.3, 14.4, 14.5, 14.6, 14.7, 14.8, 14.9, 15.0, 15.1, 15.2, 15.3, 15.4, 15.5, 15.6, 15.7, 15.8, 15.9, 16.0, 16.1, 16.2, 16.3, 16.4, 16.5, 16.6, 16.7, 16.8, 16.9, 17.0, 17.1, 17.2, 17.3, 17.4, 17.5, 17.6, 17.7, 17.8, 17.9, 18.0, 18.1, 18.2, 18.3, 18.4, 18.5, 18.6, 18.7, 18.8, 18.9, 19.0, 19.1, 19.2, 19.3, 19.4, 19.5, 19.6, 19.7, 19.8, 19.9, 20.0, 20.1, 20.2, 20.3, 20.4, 20.5, 20.6, 20.7, 20.8, 20.9, 21.0, 21.1, 21.2, 21.3, 21.4, 21.5, 21.6, 21.7, 21.8, 21.9, 22.0, 22.1, 22.2, 22.3, 22.4, 22.5, 22.6, 22.7, 22.8, 22.9, 23.0, 23.1, 23.2, 23.3, 23.4, 23.5, 23.6, 23.7, 23.8, 23.9, 24.0, 24.1, 24.2, 24.3, 24.4, 24.5, 24.6, 24.7, 24.8, 24.9, 25.0, 25.1, 25.2, 25.3, 25.4, 25.5, 25.6, 25.7, 25.8, 25.9, 26.0, 26.1, 26.2, 26.3, 26.4, 26.5, 26.6, 26.7, 26.8, 26.9, 27.0, 27.1, 27.2, 27.3, 27.4, 27.5, 27.6, 27.7, 27.8, 27.9, 28.0, 28.1, 28.2, 28.3, 28.4, 28.5, 28.6, 28.7, 28.8, 28.9, 29.0, 29.1, 29.2, 29.3, 29.4, 29.5, 29.6, 29.7, 29.8, 29.9, 30.0, 30.1, 30.2, 30.3, 30.4, 30.5, 30.6, 30.7, 30.8, 30.9, 31.0, 31.1, 31.2, 31.3, 31.4, 31.5, 31.6, 31.7, 31.8, 31.9, 32.0, 32.1, 32.2, 32.3, 32.4, 32.5, 32.6, 32.7, 32.8, 32.9, 33.0, 33.1, 33.2, 33.3, 33.4, 33.5, 33.6, 33.7, 33.8, 33.9, 34.0, 34.1, 34.2, 34.3, 34.4, 34.5, 34.6, 34.7, 34.8, 34.9, 35.0, 35.1, 35.2, 35.3, 35.4, 35.5, 35.6, 35.7, 35.8, 35.9, 36.0, 36.1, 36.2, 36.3, 36.4, 36.5, 36.6, 36.7, 36.8, 36.9, 37.0, 37.1, 37.2, 37.3, 37.4, 37.5, 37.6, 37.7, 37.8, 37.9, 38.0, 38.1, 38.2, 38.3, 38.4, 38.5, 38.6, 38.7, 38.8, 38.9, 39.0, 39.1, 39.2, 39.3, 39.4, 39.5, 39.6, 39.7, 39.8, 39.9, 40.0, 40.1, 40.2, 40.3, 40.4, 40.5, 40.6, 40.7, 40.8, 40.9, 41.0, 41.1, 41.2, 41.3, 41.4, 41.5, 41.6, 41.7, 41.8, 41.9, 42.0, 42.1, 42.2, 42.3, 42.4, 42.5, 42.6, 42.7, 42.8, 42.9, 43.0, 43.1, 43.2, 43.3, 43.4, 43.5, 43.6, 43.7, 43.8, 43.9, 44.0, 44.1, 44.2, 44.3, 44.4, 44.5, 44.6, 44.7, 44.8, 44.9, 45.0, 45.1, 45.2, 45.3, 45.4, 45.5, 45.6, 45.7, 45.8, 45.9, 46.0, 46.1, 46.2, 46.3, 46.4, 46.5, 46.6, 46.7, 46.8, 46.9, 47.0, 47.1, 47.2, 47.3, 47.4, 47.5, 47.6, 47.7, 47.8, 47.9, 48.0, 48.1, 48.2, 48.3, 48.4, 48.5, 48.6, 48.7, 48.8, 48.9, 49.0, 49.1, 49.2, 49.3, 49.4, 49.5, 49.6, 49.7, 49.8, 49.9, 50.0, 50.1, 50.2, 50.3, 50.4, 50.5, 50.6, 50.7, 50.8, 50.9, 51.0, 51.1, 51.2, 51.3, 51.4, 51.5, 51.6, 51.7, 51.8, 51.9, 52.0, 52.1, 52.2, 52.3, 52.4, 52.5, 52.6, 52.7, 52.8, 52.9, 53.0, 53.1, 53.2, 53.3, 53.4, 53.5, 53.6, 53.7, 53.8, 53.9, 54.0, 54.1, 54.2, 54.3, 54.4, 54.5, 54.6, 54.7, 54.8, 54.9, 55.0, 55.1, 55.2, 55.3, 55.4, 55.5, 55.6, 55.7, 55.8, 55.9, 56.0, 56.1, 56.2, 56.3, 56.4, 56.5, 56.6, 56.7, 56.8, 56.9, 57.0, 57.1, 57.2, 57.3, 57.4, 57.5, 57.6, 57.7, 57.8, 57.9, 58.0, 58.1, 58.2, 58.3, 58.4, 58.5, 58.6, 58.7, 58.8, 58.9, 59.0, 59.1, 59.2, 59.3, 59.4, 59.5, 59.6, 59.7, 59.8, 59.9, 60.0, 60.1, 60.2, 60.3, 60.4, 60.5, 60.6, 60.7, 60.8, 60.9, 61.0, 61.1, 61.2, 61.3, 61.4, 61.5, 61.6, 61.7, 61.8, 61.9, 62.0, 62.1, 62.2, 62.3, 62.4, 62.5, 62.6, 62.7, 62.8, 62.9, 63.0, 63.1, 63.2, 63.3, 63.4, 63.5, 63.6, 63.7, 63.8, 63.9, 64.0, 64.1, 64.2, 64.3, 64.4, 64.5, 64.6, 64.7, 64.8, 64.9, 65.0, 65.1, 65.2, 65.3, 65.4, 65.5, 65.6, 65.7, 65.8, 65.9, 66.0, 66.1, 66.2, 66.3, 66.4, 66.5, 66.6, 66.7, 66.8, 66.9, 67.0, 67.1, 67.2, 67.3, 67.4, 67.5, 67.6, 67.7, 67.8, 67.9, 68.0, 68.1, 68.2, 68.3, 68.4, 68.5, 68.6, 68.7, 68.8, 68.9, 69.0, 69.1, 69.2, 69.3, 69.4, 69.5, 69.6, 69.7, 69.8, 69.9, 70.0, 70.1, 70.2, 70.3, 70.4, 70.5, 70.6, 70.7, 70.8, 70.9, 71.0, 71.1, 71.2, 71.3, 71.4, 71.5, 71.6, 71.7, 71.8, 71.9, 72.0, 72.1, 72.2, 72.3, 72.4, 72.5, 72.6, 72.7, 72.8, 72.9, 73.0, 73.1, 73.2, 73.3, 73.4, 73.5, 73.6, 73.7, 73.8, 73.9, 74.0, 74.1, 74.2, 74.3, 74.4, 74.5, 74.6, 74.7, 74.8, 74.9, 75.0, 75.1, 75.2, 75.3, 75.4, 75.5, 75.6, 75.7, 75.8, 75.9, 76.0, 76.1, 76.2, 76.3, 76.4, 76.5, 76.6, 76.7, 76.8, 76.9, 77.0, 77.1, 77.2, 77.3, 77.4, 77.5, 77.6, 77.7, 77.8, 77.9, 78.0, 78.1, 78.2, 78.3, 78.4, 78.5, 78.6, 78.7, 78.8, 78.9, 79.0, 79.1, 79.2, 79.3, 79.4, 79.5, 79.6, 79.7, 79.8, 79.9, 80.0, 80.1, 80.2, 80.3, 80.4, 80.5, 80.6, 80.7, 80.8, 80.9, 81.0, 81.1, 81.2, 81.3, 81.4, 81.5, 81.6, 81.7, 81.8, 81.9, 82.0, 82.1, 82.2, 82.3, 82.4, 82.5, 82.6, 82.7, 82.8, 82.9, 83.0, 83.1, 83.2, 83.3, 83.4, 83.5, 83.6, 83.7, 83.8, 83.9, 84.0, 84.1, 84.2, 84.3, 84.4, 84.5, 84.6, 84.7, 84.8, 84.9, 85.0, 85.1, 85.2, 85.3, 85.4, 85.5, 85.6, 85.7, 85.8, 85.9, 86.0, 86.1, 86.2, 86.3, 86.4, 86.5, 86.6, 86.7, 86.8, 86.9, 87.0, 87.1, 87.2, 87.3, 87.4, 87.5, 87.6, 87.7, 87.8, 87.9, 88.0, 88.1, 88.2, 88.3, 88.4, 88.5, 88.6, 88.7, 88.8, 88.9, 89.0, 89.1, 89.2, 89.3, 89.4, 89.5, 89.6, 89.7, 89.8, 89.9, 90.0, 90.1, 90.2, 90.3, 90.4, 90.5, 90.6, 90.7, 90.8, 90.9, 91.0, 91.1, 91.2, 91.3, 91.4, 91.5, 91.6, 91.7, 91.8, 91.9, 92.0, 92.1, 92.2, 92.3, 92.4, 92.5, 92.6, 92.7, 92.8, 92.9, 93.0, 93.1, 93.2, 93.3, 93.4, 93.5, 93.6, 93.7, 93.8, 93.9, 94.0, 94.1, 94.2, 94.3, 94.4, 94.5, 94.6, 94.7, 94.8, 94.9, 95.0, 95.1, 95.2, 95.3, 95.4, 95.5, 95.6, 95.7, 95.8, 95.9, 96.0, 96.1, 96.2, 96.3, 96.4, 96.5, 96.6, 96.7, 96.8, 96.9, 97.0, 97.1, 97.2, 97.3, 97.4, 97.5, 97.6, 97.7, 97.8, 97.9, 98.0, 98.1, 98.2, 98.3, 98.4, 98.5, 98.6, 98.7, 98.8, 98.9, 99.0, 99.1, 99.2, 99.3, 99.4, 99.5, 99.6, 99.7, 99.8, 99.9, 100.0		

Figure 29 Mission Planner Parameter List

Η ανάγνωση και ορθολογική αξιοποίησή τους αποτελεί κρίσιμο στάδιο προετοιμασίας πριν την εκτέλεση κάθε υπολογιστικής διαδικασίας. Το Mission Planner προσφέρει μηχανισμό εξαγωγής των παραμέτρων, επιτρέποντας στον αλγόριθμο να αντλήσει σε πραγματικό χρόνο τις παραμέτρους που αφορούν την ταχύτητα πλεύσης, τα όρια επιτάχυνσης, τις ενεργειακές ρυθμίσεις και την ακτίνα πλοήγησης. Αυτές οι παράμετροι δεν είναι απλές σταθερές, αποτελούν δεσμευτικές συνθήκες λειτουργίας, τις οποίες το UAV τηρεί ανεξάρτητα από την προγραμματισμένη γεωμετρία της αποστολής. Επομένως, η ορθή ανάκτησή τους διασφαλίζει ότι η εκτίμηση ενέργειας αντανακλά τα πραγματικά δυναμικά χαρακτηριστικά της πλατφόρμας. Οι παράμετροι του συστήματος πλοήγησης (WPNAV) καθορίζουν τις ονομαστικές ταχύτητες κατά τις διαφορετικές φάσεις της πτήσης, μέγιστη ταχύτητα ανόδου (WPNAV\_SPEED\_UP), μέγιστη ταχύτητα καθόδου (WPNAV\_SPEED\_DN) και ταχύτητα πλεύσης μεταξύ σημείων (WPNAV\_SPEED).

WPNAV_SPEED	1000	1000	cm/s	10 2000	Defines the speed in cm/s which the aircraft will attempt to maintain horizontally during a WP mission
WPNAV_SPEED_DN	150	150	cm/s	10 500	Defines the speed in cm/s which the aircraft will attempt to maintain while descending during a WP mission
WPNAV_SPEED_UP	250	250	cm/s	10 1000	Defines the speed in cm/s which the aircraft will attempt to maintain while climbing during a WP mission

*Figure 30 Different WPNAV Speeds*

Οι τιμές αυτές παρέχονται σε cm/s, οπότε απαιτείται μετατροπή σε m/s για συμβατότητα με τους υπολογισμούς απόστασης και χρόνου πτήσης. Η ανάκτησή τους επιτρέπει στον αλγόριθμο να υπολογίσει με ακρίβεια τον χρόνο για κάθε τμήμα της διαδρομής, άρα και την αντίστοιχη καταναλισκόμενη ενέργεια. Η ακτίνα αποδοχής waypoint (WPNAV\_RADIUS) αποτελεί επίσης κρίσιμη παράμετρο. Το UAV δεν είναι υποχρεωμένο να περάσει από το ακριβές καρτεσιανό σημείο, αλλά θεωρεί το waypoint επιτευχθέν όταν εισέλθει στην καθορισμένη ακτίνα.

WPNAV_RADIUS	200	200	cm	5 1000	Defines the distance from a waypoint, that when crossed indicates the wp has been hit.
--------------	-----	-----	----	--------	--

*Figure 31 WPNAV RADIUS*

Η ενσωμάτωση αυτής της πληροφορίας εξασφαλίζει ρεαλιστικότερη μοντελοποίηση της τροχιάς, ιδιαίτερα σε πυκνά ή καμπύλα σχέδια πτήσης. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για την ολοκλήρωση του αλγορίθμου είναι η συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας (BATT\_CAPACITY), η οποία υπολογίζεται σε mAh και έχει δηλώσει ο χρήστης στις παραμέτρους του Mission Planner.

BATT_CAPACITY	3300	3300	mAh		Capacity of the battery in mAh when full
---------------	------	------	-----	--	--

*Figure 32 Battery Capacity(mAh)*

Οι παράμετροι αυτοί συγκροτούν το σύνολο των «σταθερών εισόδων» του αλγορίθμου και εξασφαλίζουν ότι η εκτίμηση κατανάλωσης προσαρμόζεται στις πραγματικές ρυθμίσεις και δυνατότητες του συγκεκριμένου UAV.

### 3.2.2 Ανάγνωση σχεδίου αποστολής

Το σχέδιο πτήσης αναλύεται με βάση το αρχείο αποστολής .waypoints, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις εντολές MAVLink σε διαδοχική μορφή. Κάθε γραμμή του αρχείου αντιστοιχεί σε ένα σημείο αποστολής και περιέχει, μεταξύ άλλων, τον κωδικό εντολής (π.χ. 16 για Waypoint, 20 για RTL, 21 για Land, 22 για Takeoff) και τις συντεταγμένες γεωγραφικού πλάτους, μήκους και υψομέτρου. Κατά την ανάγνωση, οι εντολές

αποθηκεύονται σε πίνακα εντολών, ενώ οι συντεταγμένες κάθε σημείου οργανώνονται σε αντίστοιχο πίνακα σημείων.

	Command	Delay				Lat	Long	Alt (m)	Frame	Delete			Grad %	Angle	Dist	AZ
1	TAKEOFF	0	0	0	0	0	0	50	Relative	X			0	0	0	0
2	WAYPOINT	0	0	0	0	39,119956	20,9443188	50	Relative	X			27,5	15,3	188,9	247
3	WAYPOINT	0	0	0	0	39,1212461	20,943718	100	Relative	X			32,8	18,1	160,5	340
4	WAYPOINT	0	0	0	0	39,1232854	20,9447908	200	Relative	X			40,8	22,2	264,5	22
5	WAYPOINT	0	0	0	0	39,1232604	20,9479558	100	Relative	X			-36,6	-20,1	290,8	91
6	WAYPOINT	0	0	0	0	39,1218121	20,9499621	100	Relative	X			0,0	0,0	236,4	133
7	WAYPOINT	0	0	0	0	39,1205053	20,9489322	100	Relative	X			0,0	0,0	170,3	211
8	WAYPOINT	0	0	0	0	39,1192901	20,9474301	50	Relative	X			-26,7	-15,0	193,8	224
9	WAYPOINT	0	0	0	0	39,11934	20,945338	50	Relative	X			0,0	0,0	180,6	272
10	RETURN_TO_LAUNCH	0	0	0	0	0	0	0	Relative	X			0	0	0	0

Figure 33 Λίστα εντολών αποστολής στο Mission Planner με υψόμετρα και waypoints

Η αρχική τοποθεσία του UAV (home position) ανακτάται αυτόματα μέσω της λειτουργίας του autopilot, η οποία επιστρέφει το γεωγραφικό πλάτος, το γεωγραφικό μήκος και το υψόμετρο αναφοράς του οχήματος. Η γνώση της θέσης αυτής είναι απαραίτητη για την εκτίμηση της ενέργειας που απαιτείται τόσο κατά την απογείωση όσο και κατά την πιθανή επιστροφή μέσω RTL. Η διαδικασία ανάκτησης παραμέτρων και αποστολής διαμορφώνει το θεμέλιο της υπολογιστικής μονάδας, προσαρμόζοντας τη λειτουργία του αλγορίθμου στις πραγματικές ρυθμίσεις και στο συγκεκριμένο επιχειρησιακό σενάριο πτήσης.

### 3.3 Μοντελοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης

Η ανάπτυξη του αλγορίθμου εκτίμησης ενέργειας βασίζεται σε μία ενιαία υπολογιστική λογική που αποτυπώνει τη φυσική συμπεριφορά του UAV σε όλες τις φάσεις πτήσης. Η ενεργειακή απαίτηση κάθε τμήματος καθορίζεται από τη γεωμετρική διαδρομή που ακολουθεί το UAV και από τους εμπειρικούς ρυθμούς κατανάλωσης που εξάγονται μέσω προσομοιώσεων SITL. Η πτήση αντιμετωπίζεται ως τρισδιάστατη μετακίνηση, όπου τόσο η οριζόντια συνιστώσα (πλεύση) όσο και η κατακόρυφη (άνοδος/κάθοδος) συνεισφέρουν στην κατανάλωση ενέργειας. Η απόσταση μεταξύ δύο σημείων πτήσης προσεγγίζεται ως τρισδιάστατο διανυσματικό μέγεθος. Η οριζόντια απόσταση  $D_h$  υπολογίζεται με μια γεωδαιτική μέθοδο, όπου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεγάλης κυκλικής απόστασης (great-circle distance) μεταξύ δύο σημείων πάνω στην επιφάνεια της Γης, όταν αυτά δίνονται σε γεωγραφικό πλάτος και μήκος. Ενώ η κατακόρυφη μεταβολή εκφράζεται ως  $\Delta h$ , η οποία είναι η διαφορά μεταξύ του ύψους των δυο σημείων.

Ο συνδυασμός τους αποδίδει την πραγματική διαδρομή του UAV στον χώρο, σύμφωνα με το γεωμετρικό μοντέλο τρισδιάστατης απόστασης. Η επιλογή αυτή επιτρέπει στο μοντέλο να συλλάβει κεκλιμένες πορείες και μικτές μεταβάσεις, όπου το UAV δεν κινείται αποκλειστικά οριζόντια ή κατακόρυφα αλλά σε συνδυασμό αυτών. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται εμπειρικά δεδομένα από προσομοιώσεις SITL που παρέχει το Mission Planner, για τη βαθμονόμηση των υπολογισμών. Οι ρυθμοί κατανάλωσης σε mAh ανά δευτερόλεπτο για άνοδο, κάθοδο και πλεύση προκύπτουν από επαναλαμβανόμενες δοκιμές σε ελεγχόμενο περιβάλλον και ενσωματώνονται στο μοντέλο ως παράμετροι.

Η σύζευξη της γεωμετρικής ανάλυσης με την εμπειρική προσαρμογή καθιστά τον αλγόριθμο αξιόπιστο και ευέλικτο, προσδίδοντάς του τη δυνατότητα να προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συνολική κατανάλωση ενέργειας μιας αποστολής. Η πτήση προσεγγίζεται ως ακολουθία μεταβάσεων μεταξύ σημείων, με σαφή διαχωρισμό φάσεων, απογείωση, μετακινήσεις μεταξύ waypoints, ενδεχόμενη επιστροφή (RTL) και προσγείωση. Για κάθε τμήμα εκτιμάται ο χρόνος εκτέλεσης βάσει των χαρακτηριστικών ταχυτήτων και κατόπιν η ενέργεια μέσω ρυθμών κατανάλωσης που έχουν εξαχθεί εμπειρικά από προσομοιώσεις SITL. Χρησιμοποιούνται τρεις ρυθμοί, Ra για άνοδο, Rd για κάθοδο και Rc για οριζόντια πλεύση (σε mAh/s). Η κατανάλωση κάθε τμήματος ισούται με τον αντίστοιχο ρυθμό επί τον χρόνο εκτέλεσης της συγκεκριμένης συνιστώσας κίνησης. Για την τρισδιάστατη απόσταση μεταξύ δύο σημείων λαμβάνεται η οριζόντια συνιστώσα Dh και η διαφορά υψομέτρου Δh. Η συνολική ενεργειακή απαίτηση μιας μετάβασης με ταυτόχρονη οριζόντια και κατακόρυφη κίνηση αποδίδεται με γεωμετρική συνένωση των συνιστωσών κατανάλωσης. Για την εξαγωγή των ρυθμών κατανάλωσης ενέργειας πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές προσομοιώσεις στο περιβάλλον Mission Planner (SITL), χρησιμοποιώντας ένα τετρακόπτερο ως εικονικό μοντέλο. Μέσω των πειραμάτων αυτών υπολογίστηκε ο μέσος ρυθμός κατανάλωσης του οχήματος για κάθε βασική φάση πτήσης, δηλαδή την άνοδο, την κάθοδο και την οριζόντια πλεύση.

```
local ascentRate = 8.9375 / (ascentSpeed) -- consumption rate from mAh/s to mAh/m using ascent speed
local descentRate = 8.7225 / (descentSpeed) --- consumption rate from mAh/s to mAh/m using descend speed
local cruisingRate = 8.25 / (cruisingSpeed)-- consumption rate from mAh/s to mAh/m using crusing speed
```

*Figure 34 Ορισμός ρυθμών ενεργειακής κατανάλωσης (ascent, descent, cruise) στον αλγόριθμο Lua*

Ειδικότερα, για την περίπτωση της οριζόντιας πλεύσης, ο μέσος ρυθμός κατανάλωσης που προέκυψε από τις προσομοιώσεις ισούται με.

$$Cruise = 8.25 \frac{mAh}{Sec}$$

Πίνακας 2: Ρυθμός ενεργειακής κατανάλωσης κατά την πλεύση (Cruise Consumption Rate)

Η τιμή αυτή προέκυψε πειραματικά, έπειτα από επαναλαμβανόμενες δοκιμές όπου το UAV εκτελούσε συνεχή οριζόντια πλεύση με σταθερή ταχύτητα  $VCruise = 10$  m/s για χρονικό διάστημα 60Sec. Κατά τη διάρκεια κάθε δοκιμής καταγραφόταν η πτώση της στάθμης της μπαταρίας, η οποία βρέθηκε κατά μέσο όρο ίση με 15% ανά λεπτό. Για μπαταρία χωρητικότητας 3300 mAh, το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί σε 495 mAh ανά λεπτό, δηλαδή 8.25mAh ανά δευτερόλεπτο. Ωστόσο, για να είναι ο ρυθμός αυτός συμβατός με τον αλγόριθμο, ο οποίος βασίζεται σε γεωμετρικές αποστάσεις μεταξύ waypoints, απαιτείται η μετατροπή του σε κατανάλωση ανά μονάδα απόστασης. Η μετατροπή αυτή πραγματοποιείται μέσω της σχέσης.

$$Rc = \frac{\frac{mAh}{Sec}}{VCruise}$$

Πίνακας 3: Συντελεστής ενεργειακής κατανάλωσης πλεύσης (Rc)

Όπου  $VCruise$  είναι η ταχύτητα οριζόντιας πλεύσης σε m/s. Με τη μετατροπή αυτή, ο ρυθμός κατανάλωσης εκφράζεται σε mAh ανά μέτρο, επιτρέποντας τον άμεσο και αναλυτικό υπολογισμό της ενεργειακής απαίτησης κάθε τμήματος της αποστολής. Γενικότερα, η ταχύτητα πτήσης δεν θεωρείται σταθερή, αλλά λαμβάνεται δυναμικά από τις παραμέτρους του Mission Planner, γεγονός που επιτρέπει πιο ρεαλιστική και ακριβή εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας σε διαφορετικά προφίλ πτήσης. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη μελέτη η οριζόντια ταχύτητα έχει οριστεί σε  $VCruise = 10$  m/s. Αλλά ο αλγόριθμος δεν βασίζεται σε σταθερό χρόνο πτήσης, αλλά σε ρυθμούς κατανάλωσης και

γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αποστολής. Η ταχύτητα δεν αποτελεί σταθερή παράμετρο, αλλά δυναμική είσοδο που λαμβάνεται από το Mission Planner. Ο ρυθμός κατανάλωσης εκφράζεται αρχικά σε mAh ανά δευτερόλεπτο και στη συνέχεια μετατρέπεται σε mAh ανά μέτρο. Με τον τρόπο αυτό, κάθε μεταβολή της ταχύτητας ενσωματώνεται αυτόματα στον υπολογισμό. Αν η ταχύτητα αυξηθεί, το UAV καλύπτει μεγαλύτερη απόσταση στον ίδιο χρόνο, οπότε η κατανάλωση ανά μέτρο μειώνεται. Αντίθετα, αν η ταχύτητα μειωθεί, η κατανάλωση ανά μέτρο αυξάνεται, καθώς απαιτείται περισσότερος χρόνος για να καλυφθεί η ίδια απόσταση. Για σταθερή απόσταση  $D$ , η ταχύτητα επηρεάζει άμεσα τον χρόνο πτήσης  $t = D / V$ . Καθώς η κατανάλωση εκφράζεται ως  $C = Rc \cdot t$ , μικρότερες ταχύτητες οδηγούν σε μεγαλύτερο χρόνο παραμονής στον αέρα και συνεπώς αυξημένη συνολική κατανάλωση για την ίδια διαδρομή.

Αντίστοιχα με την οριζόντια πλεύση, για τις φάσεις ανόδου και καθόδου προέκυψαν από τις προσομοιώσεις οι ακόλουθοι μέσοι ρυθμοί κατανάλωσης. Οι τιμές αυτές προέκυψαν έπειτα από επαναλαμβανόμενες δοκιμές κατακόρυφης κίνησης διάρκειας 60s, κατά τις οποίες καταγράφηκε η μέση πτώση της στάθμης της μπαταρίας. Για μπαταρία χωρητικότητας 3300 mAh, οι ρυθμοί αυτοί αντιστοιχούν σε περίπου 16.25% ανά λεπτό για την άνοδο και 15.85% ανά λεπτό για την κάθοδο, αποτυπώνοντας τις αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις της κατακόρυφης κίνησης σε σχέση με την οριζόντια πλεύση.

$$Ascent = 8.9375 \frac{mAh}{Sec}$$

Πίνακας 4: Ρυθμός ενεργειακής κατανάλωσης κατά την ανύψωση (Ascent Consumption Rate)

$$Descend = 8.7225 \frac{mAh}{Sec}$$

Πίνακας 5: Ρυθμός ενεργειακής κατανάλωσης κατά την κάθοδο (Descent Consumption Rate)

Όπως και στην περίπτωση της οριζόντιας πλεύσης, οι ρυθμοί αυτοί μετατρέπονται σε κατανάλωση ανά μονάδα απόστασης, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον γεωμετρικό υπολογισμό της συνολικής ενεργειακής απαίτησης. Η μετατροπή πραγματοποιείται μέσω των σχέσεων.

$$Ra = \frac{\frac{mAh}{Sec}}{V Ascent}$$

Πίνακας 6: Συντελεστής ενεργειακής κατανάλωσης ανύψωσης ανά μονάδα ύψους (Ra)

$$Rd = \frac{\frac{mAh}{Sec}}{V Descend}$$

Πίνακας 7: Συντελεστής ενεργειακής κατανάλωσης καθόδου ανά μονάδα ύψους (Rd)

Για την επαλήθευση της ορθότητας του προτεινόμενου μοντέλου ενεργειακής κατανάλωσης, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές προσομοιώσεις στο περιβάλλον Mission Planner. Μέσω των προσομοιώσεων αυτών προσδιορίστηκαν αρχικά οι μέσοι ρυθμοί κατανάλωσης ενέργειας του UAV για κάθε βασική φάση πτήσης. Για να επιβεβαιωθεί η ορθότητα των τιμών και η εγκυρότητα του μοντέλου, πραγματοποιήθηκαν επιπλέον προσομοιώσεις για διαφορετικές τιμές ταχύτητας, διατηρώντας σταθερή απόσταση(m). Με τον τρόπο αυτό ήταν δυνατή η άμεση σύγκριση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας για διαφορετικές ταχύτητες, χωρίς να επηρεάζεται το αποτέλεσμα από μεταβολές του χρόνου λειτουργίας. Με βάση τον Πίνακα 8, παρατηρείται ότι για σταθερή οριζόντια απόσταση 600 m, η συνολική κατανάλωση ενέργειας μεταβάλλεται σημαντικά ως συνάρτηση της ταχύτητας. Συγκεκριμένα, για ταχύτητα 3 m/s το UAV καλύπτει την απόσταση σε 200 δευτερόλεπτα καταναλώνοντας 1650 mAh, ενώ για ταχύτητα 10 m/s καλύπτει την ίδια απόσταση σε 60 δευτερόλεπτα καταναλώνοντας 495 mAh. Ως αποτέλεσμα, η κατανάλωση

ανά μέτρο μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα, από 2.75 mAh/m στα 3 m/s σε μόλις 0.825 mAh/m στα 10 m/s.

Ταχύτητα (m/s)	Χρόνος (sec)	Απόσταση(m)	Συνολική κατανάλωση(mAh)	Κατανάλωση ανά μετρό με βάση τη ταχύτητα (mAh/m)
3	200	600	1650	2.75
5	120	600	990	1.65
7	85,7	600	707,14	1.179
10	60	600	495	0.825

Πίνακας 8: Ενεργειακή κατανάλωση κατά την οριζόντια πλεύση για σταθερή οριζόντια απόσταση σε συνάρτηση του cruise rate

Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρείται και στη φάση ανόδου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 9. Για σταθερή κατακόρυφη απόσταση 150 m, η συνολική κατανάλωση εξαρτάται από τον χρόνο ανόδου, ο οποίος μεταβάλλεται ανάλογα με το climb rate. Για παράδειγμα, σε climb rate 1.5 m/s το UAV ανέρχεται κατά 150 m σε 100 δευτερόλεπτα καταναλώνοντας 893.75 mAh, ενώ σε climb rate 3 m/s η ίδια υψομετρική μεταβολή επιτυγχάνεται σε 50 δευτερόλεπτα με κατανάλωση 446.88 mAh. Ως αποτέλεσμα, η κατανάλωση ανά μέτρο ανόδου μειώνεται από 5.95 mAh/m σε 2.97 mAh/m καθώς αυξάνεται η ταχύτητα ανόδου.

Ταχύτητα (m/s)	Χρόνος (sec)	Απόσταση(m)	Συνολική κατανάλωση(mAh)	Κατανάλωση ανά μετρό με βάση τη ταχύτητα (mAh/m)
1.5	100	150	892,5	5.95
2	75	150	670,5	4.47
2.5	60	150	535.5	3.57
3	50	150	445,5	2.97

Πίνακας 9: Ενεργειακή κατανάλωση κατά την άνοδο για σταθερή κατακόρυφη απόσταση σε συνάρτηση του ascent rate

Ταχύτητα (m/s)	Χρόνος (sec)	Απόσταση(m)	Συνολική κατανάλωση(mAh)	Κατανάλωση ανά μέτρο με βάση τη ταχύτητα (mAh/m)
1	90	90	785,07	8.723
1.5	60	90	523.35	5.815
2	45	90	392,49	4.361

Πίνακας 10: Ενεργειακή κατανάλωση κατά την κάθοδο για σταθερή κατακόρυφη απόσταση σε συνάρτηση του descend rate

Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν και για τη φάση καθόδου, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 10. Για σταθερή κατακόρυφη απόσταση, η συνολική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται όσο αυξάνεται το descend rate, καθώς μειώνεται ο χρόνος λειτουργίας των κινητήρων. Για παράδειγμα, σε descent rate 1 m/s η κάθοδος πραγματοποιείται σε μεγαλύτερο χρόνο και με μεγαλύτερη κατανάλωση σε σύγκριση με descent rate 2 m/s. Αντίστοιχα, η κατανάλωση ανά μέτρο μειώνεται από 8.723 mAh/m σε 4.361 mAh/m καθώς αυξάνεται η ταχύτητα καθόδου. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η κατανάλωση ενέργειας του UAV εξαρτάται κυρίως από τον χρόνο λειτουργίας των κινητήρων. Για σταθερή απόσταση, μικρότερες ταχύτητες οδηγούν σε μεγαλύτερο χρόνο λειτουργίας και συνεπώς σε αυξημένη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Αντίθετα, η κατανάλωση ανά μέτρο εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα και είναι αντιστρόφως ανάλογη αυτής, όπως περιγράφεται από την εικόνα 34. Η πλήρης συμφωνία μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και του θεωρητικού μοντέλου επιβεβαιώνει την εγκυρότητα της προσέγγισης που χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο. Συνεπώς, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα για την εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε αποστολές UAV, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις γεωμετρικές παραμέτρους της διαδρομής όσο και τις πραγματικές ταχύτητες πτήσης. Συνολικά, τα πειραματικά αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας σε mAh/sec αποτελεί αξιόπιστο και φυσικά ορθό μέτρο για τη μοντελοποίηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του UAV. Η ταχύτητα δεν μεταβάλλει τον ρυθμό κατανάλωσης ανά μονάδα χρόνου, αλλά επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση ανά μονάδα απόστασης, καθώς καθορίζει τον χρόνο που απαιτείται για την κάλυψη μιας δεδομένης διαδρομής. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει ότι η χρήση των εμπειρικά προσδιορισμένων ρυθμών κατανάλωσης σε συνδυασμό με τη γεωμετρική ανάλυση της

αποστολής αποτελεί μια ακριβή και αξιόπιστη μέθοδο εκτίμησης της συνολικής ενεργειακής απαίτησης του UAV. Με βάση τους πειραματικά προσδιορισμένους ρυθμούς  $R_c$ ,  $R_a$  και  $R_d$ , η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί για κάθε μετακίνηση μεταξύ δύο διαδοχικών waypoints, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την οριζόντια συνιστώσα  $Dh$  όσο και τη διαφορά υψομέτρου  $\Delta h$ . Η διάκριση των περιπτώσεων  $\Delta h > 0$ ,  $\Delta h < 0$  και  $\Delta h = 0$  επιτρέπει την ενιαία περιγραφή της οριζόντιας, της κατακόρυφης και της διαγώνιας (ταυτόχρονα οριζόντιας και κατακόρυφης) κίνησης, έτσι ώστε ο χρόνος πτήσης και η αντίστοιχη κατανάλωση να προκύπτουν απευθείας από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αποστολής και τις εμπειρικές ενεργειακές παραμέτρους. Ωστόσο, πέρα από τις μεταβάσεις μεταξύ waypoints, μια πλήρης αποστολή περιλαμβάνει και διακριτές φάσεις που δεν αποτυπώνονται πάντα επαρκώς ως απλές μετακινήσεις σημείου-σε-σημείο, όπως η απογείωση, η επιστροφή στη βάση (RTL) και η προσγείωση. Για τον λόγο αυτό, οι φάσεις αυτές προσεγγίζονται με ξεχωριστές μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες διαχωρίζουν ρητά την κατακόρυφη και την οριζόντια συνιστώσα της κίνησης, ώστε να υπολογίζεται με μεγαλύτερη σαφήνεια η ενεργειακή τους απαίτηση.

Όταν το  $\Delta h$  είναι μεγαλύτερο του μηδενός ( $\Delta h > 0$ ), παρατηρείται θετική υψομετρική μεταβολή και το όχημα βρίσκεται σε άνοδο.

$$C = \sqrt{(Dh \cdot Rc)^2 + (\Delta h \cdot Ra)^2}, \Delta h > 0$$

Πίνακας 11: Τρισδιάστατο μοντέλο υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης για θετική υψομετρική μεταβολή

Όταν το  $\Delta h$  είναι μικρότερο του μηδενός ( $\Delta h < 0$ ), παρατηρείται αρνητική υψομετρική μεταβολή και το όχημα βρίσκεται σε κάθοδο.

$$C = \sqrt{(Dh \cdot Rc)^2 + (\Delta h \cdot Rd)^2}, \Delta h < 0$$

Πίνακας 12: Τρισδιάστατο μοντέλο υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης για αρνητική υψομετρική μεταβολή

Όταν το  $\Delta h$  ισούται με μηδέν ( $\Delta h = 0$ ), δεν υφίσταται υψομετρική μεταβολή και το όχημα εκτελεί οριζόντια πλεύση.

$$C = Dh \cdot Rc, \Delta h = 0$$

Πίνακας 13: Τύπος υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης κατά την οριζόντια πλεύση

Με τον τρόπο αυτό ο χρόνος πτήσης και η αντίστοιχη κατανάλωση προκύπτουν απευθείας από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αποστολής και τις εμπειρικές ενεργειακές παραμέτρους.

Η απογείωση προσεγγίζεται ως σύνθετη διαδικασία που αποτελείται από δύο διακριτά στάδια. Τη κατακόρυφη άνοδο από το ύψος βάσης ( $altHome$ ) έως το ύψος του πρώτου σημείου πλοήγησης ( $alt1$ ) και η οριζόντια μετάβαση από τη θέση απογείωσης προς το πρώτο waypoint. Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση κατά την απογείωση εκτιμάται ως το άθροισμα της κατανάλωσης των δύο αυτών συνιστωσών και δίνεται από τη σχέση.

$$Takeoff = |alt1 - altHome| * Ra + Dhome \rightarrow 1 * Rc$$

Πίνακας 14: Τύπος υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης κατά την απογείωση

Οπού  $|alt1 - altHome|$  εκφράζει το μέγεθος της κατακόρυφης υψομετρικής μεταβολής,  $Ra$  είναι ο συντελεστής κατανάλωσης για την άνοδο,  $Dhome \rightarrow 1$  είναι η οριζόντια απόσταση από το σημείο απογείωσης έως το πρώτο waypoint,  $Rc$  είναι ο συντελεστής κατανάλωσης οριζόντιας πλεύσης.

Η επιστροφή στη βάση (RTL) προσεγγίζεται ως συνδυασμός δύο βασικών κινήσεων. Την κατακόρυφη υψομετρική μεταβολή από το ύψος του τελευταίου σημείου πλοήγησης ( $altLast$ ) έως το ύψος βάσης ( $altHome$ ) και την οριζόντια πλεύση από το τελευταίο waypoint προς το σημείο απογείωσης. Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση της φάσης RTL προκύπτει από το άθροισμα της κατανάλωσης που απαιτείται για την κατακόρυφη και την οριζόντια συνιστώσα της κίνησης.

$$RTL = |altLast - altHome| * Rd + Dlast \rightarrow (home) * Rc$$

Πίνακας 15: Τύπος υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης επιστροφής (Return-To-Launch – RTL)

Οπού  $|altLast - altHome|$  εκφράζει το μέγεθος της κατακόρυφης υψομετρικής μεταβολής κατά την επιστροφή,  $Ra$  είναι ο συντελεστής κατανάλωσης για την άνοδο,  $Dlast \rightarrow home$  είναι η οριζόντια απόσταση από το τελευταίο waypoint έως τη βάση και  $Rc$  είναι ο συντελεστής κατανάλωσης οριζόντιας πλεύσης.

Η διαδικασία της προσγείωσης προσεγγίζεται ως σύνθετη διαδικασία που αποτελείται από δύο διακριτές φάσεις. Η πρώτη φάση αφορά την κατακόρυφη κάθοδο του οχήματος από το ύψος του τελευταίου σημείου πτήσης ( $alt_{prev}$ ) έως ένα προκαθορισμένο ύψος ασφαλείας 10 m. Η ενεργειακή κατανάλωση αυτής της φάσης εκφράζεται από τον όρο  $|altPrev - 10| * Rd$ , όπου  $Rd$  είναι ο συντελεστής κατανάλωσης κατά την κάθοδο. Η δεύτερη φάση αφορά την τελική προσέγγιση και επαφή με το έδαφος. Η κατανάλωση της φάσης αυτής μοντελοποιείται μέσω του όρου  $10 * (Vf/Rd)$ , ο οποίος λαμβάνει υπόψη την κατακόρυφη κίνηση σε χαμηλό ύψος με ελεγχόμενη τελική ταχύτητα καθόδου  $Vf$ . Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση κατά την προσγείωση προκύπτει ως το άθροισμα των καταναλώσεων των δύο αυτών φάσεων, επιτρέποντας μια απλοποιημένη αλλά λειτουργική εκτίμηση της ενεργειακής απαίτησης της τελικής φάσης της αποστολής.

$$Land = |altPrev - 10| * Rd + 10 * \left( \frac{Vf}{Rd} \right)$$

Πίνακας 16: Τύπος υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης κατά την προσγείωση

Οπού  $|alt prev - 10|$  εκφράζει το ύψος καθόδου πριν την τελική φάση της προσγείωσης,  $Rd$  είναι ο συντελεστής κατανάλωσης για κάθοδο,  $10 * (Vf/Rd)$  εκφράζει την κατανάλωση της τελικής κατακόρυφης φάσης προσέγγισης.

Τέλος, για να αποτυπωθεί ότι το UAV δεν περνά απαραίτητα από το γεωμετρικό κέντρο κάθε waypoint, εφαρμόζεται μικρή διόρθωση λόγω WPNAV\_RADIUS, η οποία αφαιρεί ένα σταθερό, μικρό ποσοστό από τη συνολική εκτίμηση ώστε να μην υπερεκτιμάται η διαδρομή.

### 3.5 Πυρήνας υπολογισμού του αλγορίθμου

Η επιλογή του κατάλληλου υπολογιστικού προτύπου για την εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης ενός Μη Επανδρωμένου Εναέριου Οχήματος (UAV) συνιστά κρίσιμη παράμετρο για την επίτευξη ρεαλιστικού και αξιόπιστου σχεδιασμού αποστολών. Στην παρούσα ενότητα, επιχειρείται μία συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ της μεθοδολογίας που εφαρμόζεται στον υπό ανάπτυξη αλγόριθμο και μίας εναλλακτικής, γραμμικής προσέγγισης που απαντάται συχνά σε απλοποιημένα μοντέλα ή πρώιμα στάδια υπολογιστικής ανάλυσης. Η υλοποιημένη προσέγγιση βασίζεται στη γεωμετρική ενοποίηση των συνιστωσών της πτήσης, αποτυπώνοντας την ενεργειακή απαίτηση ως αποτέλεσμα της συνδυασμένης επίδρασης της οριζόντιας και της κατακόρυφης μετατόπισης. Ο υπολογισμός βασίζεται στην εφαρμογή του γεωμετρικού μοντέλο τρισδιάστατης απόστασης, σύμφωνα με τη σχέση.

$$C = \sqrt{(Dh \cdot Rc)^2 + (\Delta h \cdot Ra)^2}, \Delta h > 0$$

Πίνακας 11: Τρισδιάστατο μοντέλο υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης για θετική υψομετρική μεταβολή

$$C = \sqrt{(Dh \cdot Rc)^2 + (\Delta h \cdot Rd)^2}, \Delta h < 0$$

Πίνακας 12: Τρισδιάστατο μοντέλο υπολογισμού ενεργειακής κατανάλωσης για αρνητική υψομετρική μεταβολή

Όπου Dh συμβολίζει την οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων πλοήγησης, Rc είναι ο ρυθμός κατανάλωσης σε συνθήκες οριζόντιας πλεύσης, Δh η διαφορά

υψομέτρου, και  $R_a$  ή  $R_d$  ο αντίστοιχος ρυθμός κατανάλωσης κατά την ανύψωση ή την κάθοδο. Η παραπάνω διατύπωση επιτρέπει την ακριβή αποτύπωση της ενεργειακής απαίτησης σε αποστολές με τρισδιάστατο προφίλ πτήσης, λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική διανυσματική διαδρομή του UAV. Αντιπαραθετικά, η εναλλακτική απλοποιημένη προσέγγιση διαχωρίζει τις δύο διαστάσεις της μετακίνησης και εκτιμά την κατανάλωση ενέργειας ως άθροισμα των δύο επί μέρους συνιστωσών, χωρίς να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους. Η αντίστοιχη μαθηματική έκφραση είναι.

$$C = Dh \cdot Rc + \Delta h \cdot R \frac{a}{d}$$

Πίνακας 17: Γραμμικό μοντέλο ενεργειακής κατανάλωσης

Σε αυτή την περίπτωση, η κατανάλωση κατά την πλεύση και κατά την κατακόρυφη μετατόπιση υπολογίζονται ανεξάρτητα, γεγονός που καθιστά την προσέγγιση υπολογιστικά απλούστερη και ευκολότερη στην υλοποίηση. Ωστόσο, η απουσία γεωμετρικής συνένωσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις από την πραγματικότητα, ιδίως όταν το προφίλ της αποστολής περιλαμβάνει κεκλιμένες πορείες, μεγάλες διακυμάνσεις υψομέτρου ή εναλλασσόμενες κλίσεις. Η σύγκριση των δύο προσεγγίσεων αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα του γεωμετρικού μοντέλου τρισδιάστατης απόστασης ως προς την ακρίβεια και την ικανότητα αποτύπωσης των πραγματικών ενεργειακών αναγκών ενός UAV σε επιχειρησιακές συνθήκες. Το εν λόγω πρότυπο καθίσταται ιδιαίτερα χρήσιμο σε αποστολές υψηλής ακρίβειας, όπου ακόμη και μικρές αποκλίσεις στην εκτίμηση της κατανάλωσης μπορούν να επηρεάσουν τη βιωσιμότητα ή την ασφάλεια της αποστολής. Αντιθέτως, το γραμμικό μοντέλο ενδείκνυται κυρίως για προκαταρκτικές προσεγγίσεις ή για περιβάλλοντα στα οποία η υπολογιστική απόδοση υπερέχει της ακρίβειας.

Καθώς γνωρίζουμε πως η εκτίμηση της κατανάλωσης ενέργειας πραγματοποιήθηκε σε μονάδες mAh, καθώς το Mission Planner και το σύστημα παρακολούθησης της μπαταρίας βασίζονται στην παρακολούθηση της καταναλισκόμενης χωρητικότητας. Ωστόσο, για την πληρέστερη και φυσικά τεκμηριωμένη ανάλυση της ενεργειακής κατανάλωσης, πραγματοποιήθηκε μετατροπή της κατανάλωσης από mAh σε Joule, χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$E = Q \cdot V$$

Πίνακας 18: Βασικός τύπος ηλεκτρικής ενέργειας

όπου E είναι η ενέργεια σε Joule, Q το φορτίο σε Coulomb και V η τάση της μπαταρίας. Δεδομένου ότι η τάση της μπαταρίας μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, χρησιμοποιήθηκε ένα δυναμικό μοντέλο εκτίμησης της τάσης βασισμένο στην κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (State of Charge – SoC), η οποία υπολογίζεται ως:

$$SoC = 1 - \left( \frac{Q_{Cons}}{Q_{Capacity}} \right)$$

Πίνακας 19: Τύπος State of Charge(SoC)

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ακριβέστερη εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της τάσης της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της αποστολής, και παρέχει μια πιο φυσικά ορθή αναπαράσταση της ενεργειακής συμπεριφοράς του UAV σε σύγκριση με τη χρήση σταθερής τάσης. Τέλος, για την πληρέστερη και φυσικά τεκμηριωμένη εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης, η συνολική κατανάλωση που υπολογίζεται από τον αλγόριθμο σε μονάδες mAh μετατρέπεται σε ενέργεια (Joule). Η μετατροπή αυτή είναι απαραίτητη, καθώς η μονάδα mAh εκφράζει φορτίο, ενώ η ενέργεια αποτελεί τη θεμελιώδη φυσική ποσότητα για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης ενός UAV.

$$E = \left( \frac{Q_{mAh}}{1000} \right) \cdot V_{Avg} \cdot 3600$$

Πίνακας 20: Τύπος μετατροπής mAh σε Joule

Συμπερασματικά, η επιλογή του καταλληλότερου υπολογιστικού προτύπου πρέπει να υπακούει στις απαιτήσεις του επιχειρησιακού σεναρίου, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον βαθμό πολυπλοκότητας της διαδρομής όσο και τους περιορισμούς υπολογιστικών πόρων. Η εφαρμογή του γεωμετρικού μοντέλο τρισδιάστατης απόστασης εντός του παρόντος αλγορίθμου ενισχύει τη ρεαλιστικότητα του μοντέλου και το καθιστά αξιόπιστο εργαλείο για την ενεργειακή ανάλυση πτήσεων UAV, συμβάλλοντας ουσιαστικά στην ασφαλή και αποδοτική εκτέλεση αποστολών. Στο πλαίσιο αυτής της αξιολόγησης, παρακάτω παρατίθεται πίνακας σύγκρισης της υπολογιζόμενης κατανάλωσης ενέργειας (σε Joule) ανά τμήμα διαδρομής μεταξύ επτά σημείων πλοήγησης, σύμφωνα με τα δύο εξεταζόμενα μοντέλα.

	Οριζόντια Απόσταση (m)	Υψομετρική Διαφορά (m)	Κατανάλωση Γραμμικού Μοντέλου (Joule)	Κατανάλωση Τρισδιάστατου Μοντέλου (Joule)	Απόκλιση (%)
WP2→WP3	379.6	+50	22.310,29	16.355,58	36,41%
WP3 →WP4	92.9	+100	19.692,70	16.584,52	18,74%
WP4 →WP5	260.1	-100	34.681,47	26.775,18	29,53%
WP5 →WP6	185.8	-50	19.423,81	14.281,29	36,01%
WP6 →WP7	181.4	+50	14.896,45	10.575,52	40,86%

Πίνακας 21: Διαφορά εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ γραμμικού και τρισδιάστατου μοντέλου

Ως γραμμικό μοντέλο ορίζεται η απλοποιημένη προσέγγιση όπου η συνολική κατανάλωση μιας μετάβασης υπολογίζεται ως το άθροισμα οριζόντιας και κατακόρυφης συνιστώσας, χωρίς γεωμετρική σύνθεση τρισδιάστατης διαδρομής. Συνοψίζοντας τη σύγκριση των δύο υπολογιστικών προσεγγίσεων, η συνολική κατανάλωση ενέργειας που εκτίμησε το γραμμικό μοντέλο ήταν 131.341,28 Joule, ενώ το γεωμετρικό μοντέλο

τρισδιάστατης απόστασης απέδωσε 99.324,62 Joule. Η απόκλιση ανήλθε σε 32.016,66 Joule, δηλαδή το γραμμικό μοντέλο υπερεκτίμησε την κατανάλωση κατά περίπου 32,31% σε σχέση με την τιμή αναφοράς του γεωμετρικού μοντέλου τρισδιάστατης απόστασης. Η διαφορά αυτού του μεγέθους είναι επιχειρησιακά σημαντική όταν τα ενεργειακά περιθώρια είναι περιορισμένα, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε συντηρητικές εκτιμήσεις και ενδεχομένως σε μη βέλτιστες αποφάσεις σχεδιασμού αποστολής.

#### **4.Συστήματα Επικοινωνίας και Ελέγχου UAV**

Για να υλοποιηθεί και να λειτουργήσει ένας αλγόριθμος εντός ενός UAV, απαιτείται πρώτα να εξασφαλιστεί ότι το αερόχημα μπορεί να συλλέγει με αξιοπιστία τα απαραίτητα δεδομένα πτήσης, να τα μεταδίδει ή να τα καθιστά διαθέσιμα στο λογισμικό ελέγχου, και να εκτελεί λογική αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο μέσω onboard κώδικα. Το λειτουργικό αυτό υπόβαθρο επιτυγχάνεται μέσω του συνδυασμού Mission Planner ως σταθμού εδάφους (GCS), MAVLink ως πρωτοκόλλου ανταλλαγής εντολών και τηλεμετρίας, και Lua scripting στο ArduPilot ως μηχανισμού εκτέλεσης του αλγορίθμου πάνω στο ίδιο το σύστημα πτήσης. Η επικοινωνία και ο έλεγχος αποτελούν τον λειτουργικό πυρήνα κάθε μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (UAV), καθορίζοντας τον βαθμό αυτονομίας, ακρίβειας και ασφάλειας της πτήσης. Καθώς τα UAV εξελίσσονται σε ολοένα πιο σύνθετα συστήματα, η αξιόπιστη και αποδοτική μεταφορά δεδομένων μεταξύ του αεροχήματος και του σταθμού εδάφους καθίσταται κρίσιμη τόσο για την εκτέλεση των αποστολών όσο και για τη διαχείριση της ενέργειας και των επιχειρησιακών κινδύνων. Η ανάγκη για ευφυή και προσαρμοστικά συστήματα επικοινωνίας οδήγησε στην ανάπτυξη ανοιχτών πρωτοκόλλων, όπως το MAVLink, τα οποία επιτρέπουν την αμφίδρομη ανταλλαγή πληροφοριών και την ενσωμάτωση αλγορίθμων σε πραγματικό χρόνο μέσω Lua scripting.



*Figure 35 MavLink*

#### **4.1 Συστήματα Πλοήγησης και Επικοινωνιακά Πρωτόκολλα UAV**

Για την ασφαλή και αποδοτική λειτουργία ενός UAV απαιτείται συνδυασμός συστημάτων πλοήγησης και επικοινωνίας, τα οποία συνεργάζονται στενά. Στο επίκεντρο

αυτής της συνεργασίας βρίσκεται ο σταθμός εδάφους (GCS), που αποτελεί το βασικό σημείο διασύνδεσης του χειριστή με το UAV. Μέσω λογισμικών όπως το Mission Planner ή το QGroundControl, ο χειριστής μπορεί να προγραμματίσει αποστολές, να παρακολουθήσει την πορεία της πτήσης, να διαχειριστεί παραμέτρους και να επέμβει σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας συνεχώς κρίσιμα δεδομένα τηλεμετρίας [36][37].

Η πλοήγηση βασίζεται πρωτίστως στο Παγκόσμιο Σύστημα Θέσης (Global Positioning System – GPS), το οποίο παρέχει δεδομένα θέσης, υψομέτρου και ταχύτητας [38]. Η αξιοποίηση του GPS επιτρέπει στο UAV να ακολουθεί με ακρίβεια προκαθορισμένες διαδρομές, να αποφεύγει εμπόδια και να εκτελεί με ασφάλεια τη διαδικασία επιστροφής στο σημείο εκκίνησης (Return-to-Launch – RTL). Ωστόσο, το GPS μπορεί να παρουσιάσει περιορισμούς σε περιοχές με ασθενές σήμα, όπως σε αστικά περιβάλλοντα ή κάτω από πυκνή βλάστηση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, κρίσιμο ρόλο παίζουν τα Αδρανειακά Συστήματα Πλοήγησης (Inertial Navigation Systems – INS), τα οποία βασίζονται σε μετρήσεις της Αδρανειακής Μονάδας Μέτρησης (Inertial Measurement Unit – IMU). Η IMU περιλαμβάνει επιταχυνσιόμετρα, γυροσκόπια, μαγνητόμετρα και υψόμετρα, επιτρέποντας την εκτίμηση κίνησης και προσανατολισμού ακόμη και όταν το GPS είναι ανακριβές ή ανενεργό.

Η επικοινωνία UAV–GCS υλοποιείται μέσω ειδικών πρωτοκόλλων, με κυριότερο το MAVLink (Micro Air Vehicle Link). Το MAVLink είναι ένα ελαφρύ, ανοιχτού κώδικα πρωτόκολλο επικοινωνίας, σχεδιασμένο για αποδοτική μετάδοση δεδομένων σε περιβάλλοντα περιορισμένου εύρους ζώνης. Υποστηρίζει ανταλλαγή εντολών πτήσης, διαχείριση τηλεμετρικών δεδομένων και ενσωμάτωση προγραμματισμένων σεναρίων μέσω Lua scripting, καθιστώντας το σημείο αναφοράς στη σύγχρονη βιομηχανία UAV.

#### **4.1.1 Επικοινωνία των UAV**

Η επικοινωνία αποτελεί τον πυρήνα της λειτουργίας των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles – UAV), καθώς καθορίζει την ικανότητά τους να εκτελούν αποστολές με ακρίβεια, ασφάλεια και, σε πολλές περιπτώσεις, πλήρη αυτονομία. Δεδομένου ότι τα UAV χρησιμοποιούνται συχνά σε αποστολές που εκτελούνται σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές, η ύπαρξη αξιόπιστων καναλιών επικοινωνίας εξασφαλίζει όχι μόνο τη μεταφορά δεδομένων αλλά και τη συνεχή εποπτεία και έλεγχο του αεροσκάφους από τον χειριστή [1]. Σε επιχειρήσεις όπου η ανθρώπινη παρέμβαση είναι

περιορισμένη ή και επικίνδυνη, η επικοινωνία αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για την ολοκλήρωση των αποστολών χωρίς απώλειες.

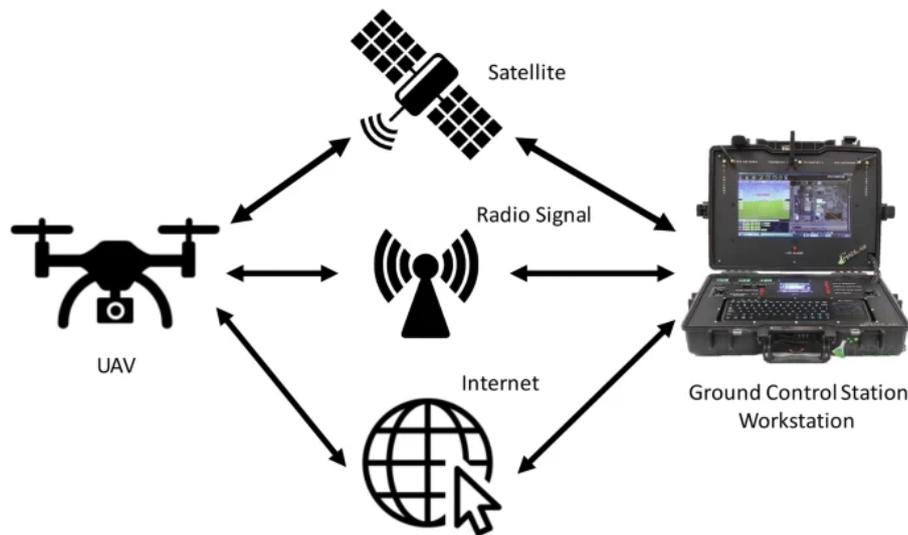
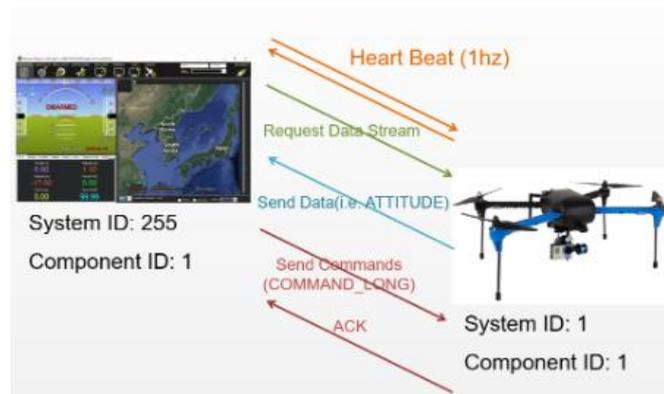


Figure 36 Γενικό μοντέλο επικοινωνίας UAV – Δορυφόρος – Σταθμός Εδάφους

Η επικοινωνία μεταξύ UAV και σταθμού εδάφους (Ground Control Station – GCS) βασίζεται κυρίως σε ασύρματες τεχνολογίες, οι οποίες επιτρέπουν τη μετάδοση εντολών πτήσης και επιχειρησιακών παραμέτρων προς το αερόχημα, αλλά και την αποστολή δεδομένων τηλεμετρίας, εικόνας, βίντεο ή μετρήσεων από το UAV προς τον χειριστή [36]. Σε πιο σύνθετα σενάρια, η επικοινωνία μπορεί να εκτείνεται και μεταξύ πολλαπλών UAV, επιτρέποντας συνεργατικές επιχειρήσεις με κατανομημένη συλλογή δεδομένων. Το σύστημα αυτό υλοποιείται μέσα από ένα πλέγμα υποσυστημάτων, όπως αισθητήρες πλοήγησης (GPS, IMU), κάμερες, πρωτόκολλα επικοινωνίας (MAVLink) και μέσα ασύρματης μετάδοσης (ραδιοσυχνότητες, Wi-Fi, LTE ή δορυφορικά κανάλια) [37]. Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας επικοινωνίας εξαρτάται από παραμέτρους όπως η διάρκεια και η φύση της αποστολής, η απαιτούμενη εμβέλεια, οι ταχύτητες μετάδοσης και η ανθεκτικότητα σε παρεμβολές [38]. Ιδιαίτερη σημασία έχει και η ασφάλεια μετάδοσης, ειδικά σε στρατιωτικές επιχειρήσεις ή εφαρμογές με ευαίσθητα δεδομένα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αξιοπιστία, η ακεραιότητα και η εμπιστευτικότητα της πληροφορίας είναι εξίσου κρίσιμες με την επιχειρησιακή λειτουργικότητα [39]. Στο πλαίσιο αυτό, η ανταλλαγή τηλεμετρίας και εντολών μεταξύ UAV και GCS υλοποιείται στην πράξη μέσω τυποποιημένων πρωτοκόλλων. Το επικρατέστερο στην οικογένεια συστημάτων ArduPilot/PX4 είναι το MAVLink, καθώς συνδυάζει μικρό υπολογιστικό/επικοινωνιακό κόστος με μεγάλη ευελιξία στην περιγραφή μηνυμάτων πτήσης και κατάστασης.

Το MAVLink αποτελεί το θεμέλιο επικοινωνίας στα περισσότερα UAV που βασίζονται σε ανοιχτό λογισμικό, όπως το ArduPilot και το PX4 [1][36]. Πρόκειται για πρωτόκολλο ανοιχτού κώδικα, το οποίο έχει εξελιχθεί σε διεθνές πρότυπο λόγω της αποδοτικότητας και της ευελιξίας του [37]. Βασίζεται σε σειριοποιημένα δυαδικά πακέτα μικρού μεγέθους, ώστε να μειώνεται το εύρος ζώνης που απαιτείται σε σύγκριση με πιο ογκώδη μορφή δεδομένων, όπως XML ή JSON [38]. Η μετάδοση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω σειριακών συνδέσεων, Wi-Fi, TCP/IP ή υποσυστημάτων sub-GHz τηλεμετρίας [44].



*Figure 37 Ροή επικοινωνίας MAVLink μεταξύ Ground Control Station και UAV*

Το πρωτόκολλο επιτρέπει την ανταλλαγή δύο κύριων κατηγοριών δεδομένων: των μηνυμάτων κατάστασης (status messages) που αποστέλλονται από το UAV προς το GCS και των μηνυμάτων εντολών (command messages) που αποστέλλονται από το GCS προς το UAV. Τα πρώτα περιλαμβάνουν δεδομένα όπως θέση, ταχύτητα, ύψος, τηλεμετρία και στάθμη μπαταρίας, ενώ τα δεύτερα σχετίζονται με λειτουργίες πτήσης, αλλαγή κατάσταση ή ενεργοποίηση της διαδικασίας RTL. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το μήνυμα HEARTBEAT, το οποίο παρέχει σε τακτά χρονικά διαστήματα πληροφορίες για την κατάσταση λειτουργίας του UAV και το είδος της πτήσης που εκτελείται [45].

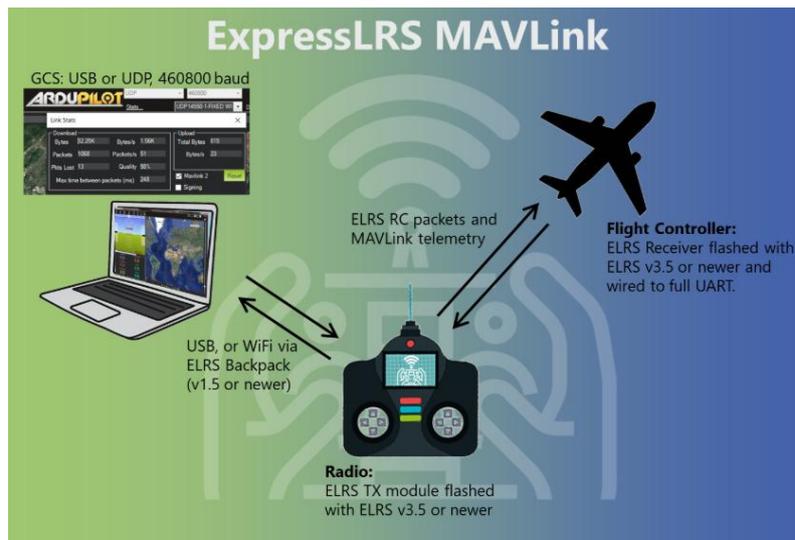


Figure 38 Αρχιτεκτονική επικοινωνίας ExpressLRS για μετάδοση MAVLink τηλεμετρίας

Η χρησιμότητα του MAVLink αναδεικνύεται και στο πλαίσιο ενεργειακής ανάλυσης, καθώς τα δεδομένα που παρέχει, όπως τα BATTERY\_STATUS, GLOBAL\_POSITION\_INT και SYS\_STATUS, είναι απαραίτητα για την εκτίμηση κατανάλωσης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο [47]. Παρά τα πλεονεκτήματά του, το πρωτόκολλο εμφανίζει ορισμένους περιορισμούς. Η έκδοση MAVLink v1 δεν διαθέτει μηχανισμούς κρυπτογράφησης, καθιστώντας την ευάλωτη σε επιθέσεις υποκλοπής ή spoofing [34][46]. Η νεότερη έκδοση v2 εισήγαγε δυνατότητα υπογραφής πακέτων, προσφέροντας έναν βασικό μηχανισμό ασφάλειας, χωρίς όμως να υποκαθιστά την πλήρη κρυπτογράφηση [44][45].

#### 4.2 Mission Planner: Σταθμός Ελέγχου και Σχεδιασμού Αποστολών

Το Mission Planner αποτελεί το κυριότερο λογισμικό εδάφους (GCS) για UAV που χρησιμοποιούν το firmware ArduPilot. Η ανοιχτού κώδικα φύση του, σε συνδυασμό με την ευρεία του αποδοχή, το καθιστούν βασικό εργαλείο για ερευνητές, επαγγελματίες και ερασιτέχνες. Μέσω του Mission Planner είναι δυνατός ο πλήρης σχεδιασμός αποστολών, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και η διαχείριση κρίσιμων παραμέτρων πτήσης. Πέρα από τον σχεδιασμό, το Mission Planner λειτουργεί ως κεντρικός “συγκεντρωτής” πληροφορίας: προβάλλει σε πραγματικό χρόνο τη ροή τηλεμετρίας, επιτρέπει την παρακολούθηση κρίσιμων μεταβλητών (π.χ. τάση/ρεύμα, ποσοστό μπαταρίας, GPS κατάσταση, ταχύτητα, mode πτήσης) και διευκολύνει την άμεση παρέμβαση του χειριστή όταν απαιτείται. Με αυτόν τον τρόπο, το GCS δεν αποτελεί μόνο διεπαφή ελέγχου, αλλά

και εργαλείο επιχειρησιακής επίγνωσης, καθώς μετατρέπει την τηλεμετρία σε πληροφορία που μπορεί να υποστηρίξει αποφάσεις πτήσης.



*Figure 39 Mission Planner*

Η πλατφόρμα επιτρέπει τον καθορισμό waypoints, υψομέτρων, ταχυτήτων και άλλων επιχειρησιακών δεδομένων, ενώ παρέχει τηλεμετρικές πληροφορίες όπως θέση, ύψος, ταχύτητα και στάθμη μπαταρίας [47]. Επιπλέον, υποστηρίζει τη ροή εικόνας από κάμερες σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας στον χειριστή πλήρη επίγνωση της κατάστασης του UAV. Σημαντική είναι επίσης η δυνατότητα προσομοίωσης μέσω Software-In-The-Loop (SITL), που επιτρέπει τη δοκιμή αποστολών χωρίς φυσική πτήση.



*Figure 40 Απεικόνιση τηλεμετρικών δεδομένων UAV στο Mission Planner*

## 4.2.1 Σημασία του Σχεδιασμού Αποστολής

Ο σωστός σχεδιασμός αποστολής καθορίζει την ενεργειακή απόδοση, την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα της πτήσης. Στο Mission Planner, ο χειριστής μπορεί να διαμορφώσει με ακρίβεια κάθε αποστολή, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα της μπαταρίας, την τοποθέτηση waypoints και τις καιρικές συνθήκες. Μέσω της προσομοίωσης SITL αξιολογείται η κατανάλωση ενέργειας και εντοπίζονται πιθανές αδυναμίες του σχεδίου, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση πριν από την πραγματική πτήση.



Figure 41 Σχεδίαση αποστολής με waypoints στο Mission Planner

Ο σωστός σχεδιασμός δεν αφορά μόνο την αποδοτικότητα, αλλά και την ασφάλεια. Οι μηχανισμοί failsafe που ενσωματώνονται στο Mission Planner επιτρέπουν στο UAV να επιστρέψει στη βάση ή να εκτελέσει ελεγχόμενη προσγείωση σε περίπτωση απώλειας σήματος, χαμηλής μπαταρίας ή δυσλειτουργίας αισθητήρων. Έτσι, περιορίζεται ο κίνδυνος απώλειας του οχήματος ή ζημιών στο περιβάλλον. Στην πράξη, ο σχεδιασμός μιας αποστολής μπορεί να ιδωθεί ως διαδικασία ισορροπίας μεταξύ τριών βασικών περιορισμών, ενεργειακής επάρκειας (διαθέσιμη ενέργεια έναντι απαιτούμενης), επικοινωνιακής αξιοπιστίας (εμβέλεια/παρεμβολές/πιθανότητα απώλειας σύνδεσης) και ασφάλειας πτήσης (failsafes, περιθώρια επιστροφής, επιλογές προσγείωσης). Η ύπαρξη προσομοίωσης (SITL) επιτρέπει τη δοκιμή διαφορετικών σεναρίων με ελάχιστο ρίσκο, έτσι ώστε τα όρια των παραπάνω περιορισμών να εκτιμώνται πριν την εκτέλεση της αποστολής.

### 4.3 Αυτονομία και Προσαρμοστικότητα

Η αξία του MAVLink ενισχύεται ακόμη περισσότερο μέσω της δυνατότητας Lua scripting στο περιβάλλον του ArduPilot. Η Lua, ως ελαφριά γλώσσα προγραμματισμού, ενσωματώνεται απευθείας στο firmware και δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης προσαρμοσμένων αλγορίθμων σε πραγματικό χρόνο [44]. Μέσω αυτής, το UAV μπορεί να αξιοποιεί δεδομένα που παρέχει το MAVLink, όπως στάθμη μπαταρίας ή γεωγραφική θέση, για να λαμβάνει αποφάσεις αυτόνομα. Για παράδειγμα, η συνάρτηση `vehicle:get_battery()` επιστρέφει κρίσιμες πληροφορίες για την τάση, το ρεύμα και το επίπεδο φόρτισης, ενώ η `ahrs:get_position()` παρέχει συντεταγμένες και υψόμετρο. Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών waypoints και την εκτίμηση της ενεργειακής επάρκειας. Αντίστοιχα, η συνάρτηση `GCS:send_text()` επιτρέπει την αποστολή ενημερώσεων σε πραγματικό χρόνο προς τον χειριστή. Με αυτόν τον τρόπο, το UAV μπορεί να προσαρμόζει τη συμπεριφορά του κατά την πτήση, ενεργοποιώντας, για παράδειγμα, διαδικασία RTL εφόσον εντοπιστεί χαμηλό επίπεδο ενέργειας. Έτσι, το Lua script λειτουργεί ως το “λογικό κέντρο” του UAV, μετατρέποντας την τηλεμετρία σε επιχειρησιακές αποφάσεις.

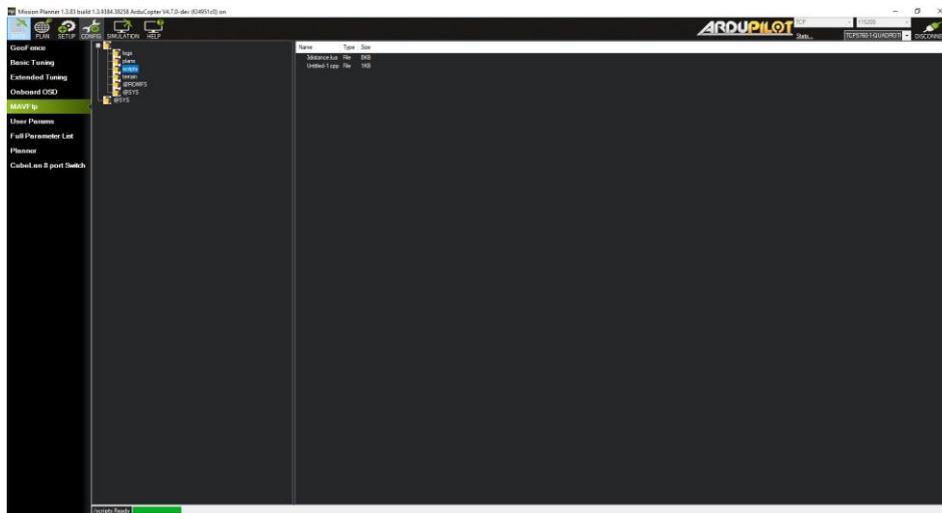


Figure 42 Φόρτωση και διαχείριση Lua scripts στο Mission Planner

Η χρήση Lua scripting στο Mission Planner, σε συνδυασμό με το Mission Planner, δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης εξατομικευμένων συμπεριφορών πτήσης [37][44]. Μέσω της Lua, το UAV αποκτά την ικανότητα να αναλύει δεδομένα, να λαμβάνει αποφάσεις onboard και να προσαρμόζει τη λειτουργία του σε πραγματικό χρόνο. Σε επίπεδο αρχιτεκτονικής, το Lua script εκτελείται onboard και λειτουργεί ως ενδιάμεσο στρώμα μεταξύ τηλεμετρίας και ενεργειών πτήσης. Συλλέγει δεδομένα πτήσης ή κατάστασης του

UAV από τα διαθέσιμα μηνύματα και τις κλήσεις API, εφαρμόζει υπολογιστική λογική (π.χ. υπολογισμό απόστασης, εκτίμηση απαιτούμενης ενέργειας, σύγκριση με διαθέσιμο απόθεμα), και παράγει ενέργειες/ειδοποιήσεις, είτε προς τον χειριστή (messages) είτε προς το σύστημα πτήσης (αλλαγή mode/RTL). Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν απαιτείται άμεση αντίδραση ή όταν η σύνδεση με το GCS δεν μπορεί να θεωρείται συνεχώς διαθέσιμη. Ένα παράδειγμα εφαρμογής είναι η υλοποίηση αλγορίθμου εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης και απόφασης επιστροφής βάσει της έννοιας του bingo fuel. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τη διαθέσιμη ενέργεια, συγκρίνει την απαιτούμενη για επιστροφή και, σε περίπτωση κινδύνου, ενεργοποιεί αυτόματα εντολή RTL, ενημερώνοντας ταυτόχρονα τον χειριστή μέσω του Mission Planner [47]. Η δυνατότητα αυτή μετατρέπει το UAV από παθητικό εκτελεστή εντολών σε δυναμικό, αυτόνομο φορέα αποστολών, ικανό να προσαρμόζεται στις συνθήκες πτήσης και να βελτιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας. Η πλήρης ενσωμάτωση Lua-MAVLink-Mission Planner δημιουργεί ένα τεχνολογικό πλαίσιο που υποστηρίζει την ανάπτυξη έξυπνων και ευέλικτων UAV, με υψηλό βαθμό λειτουργικής ανεξαρτησίας και ασφάλειας. Επιπλέον, το Lua scripting επιτρέπει την παραμετροποίηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου χωρίς αλλαγές στο κύριο firmware: μπορούν να οριστούν κατώφλια ενεργοποίησης, ρυθμοί ελέγχου (π.χ. κάθε 1 s ή 5 s), καθώς και πολιτικές ειδοποίησης (π.χ. προειδοποίηση, επιβεβαίωση συνθηκών, ενεργοποίηση failsafe). Με αυτό τον τρόπο, η λογική ελέγχου μπορεί να προσαρμόζεται σε διαφορετικά προφίλ αποστολών (μεγαλύτερη απόσταση, διαφορετική ταχύτητα πλεύσης, ανάγκη μεγαλύτερου αποθέματος επιστροφής), διατηρώντας σταθερή τη δομή του συστήματος επικοινωνίας και τηλεμετρίας.

#### **4.4 Περιορισμοί και Προκλήσεις στην Επικοινωνία UAV**

Παρά την τεχνολογική πρόοδο, η επικοινωνία UAV-GCS εξακολουθεί να παρουσιάζει προκλήσεις που επηρεάζουν την αξιοπιστία και την ενεργειακή αποδοτικότητα. Η καθυστέρηση μετάδοσης (latency) και η απώλεια πακέτων (packet loss) μπορούν να επηρεάσουν κρίσιμες λειτουργίες, όπως την ενημέρωση για στάθμη μπαταρίας ή την εκτέλεση εντολών Lua σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η περιορισμένη χωρητικότητα καναλιού επικοινωνίας, ιδίως σε περιβάλλοντα με παρεμβολές ή μεγάλη απόσταση, καθιστά αναγκαία τη βελτιστοποίηση του πρωτοκόλλου μετάδοσης δεδομένων. Ενδεικτικά, σε συνθήκες αυξημένων παρεμβολών ή χαμηλού σήματος, η τηλεμετρία μπορεί να φτάνει στο GCS με καθυστέρηση ή ασυνέχεια, με αποτέλεσμα η απεικόνιση κρίσιμων μεγεθών (π.χ. στάθμη μπαταρίας ή GPS quality) να μην αντανακλά τη στιγμιαία πραγματική κατάσταση.

Σε ένα τέτοιο σενάριο, αποφάσεις που λαμβάνονται αποκλειστικά από τον χειριστή βάσει της εικόνας του GCS ενδέχεται να καθυστερήσουν. Για τον λόγο αυτό, η ύπαρξη onboard λογικής (π.χ. σε Lua) λειτουργεί συμπληρωματικά, καθώς επιτρέπει την ανίχνευση κινδύνου με βάση τοπικά δεδομένα και όχι μόνο με βάση την επικοινωνιακή ροή προς το έδαφος. Η ασφάλεια αποτελεί επίσης κρίσιμη παράμετρο. Παρότι η έκδοση MAVLink v2 εισήγαγε υπογραφή πακέτων, η απουσία πλήρους κρυπτογράφησης μπορεί να αφήσει τα συστήματα εκτεθειμένα σε spoofing ή κακόβουλη πρόσβαση. Οι παραπάνω περιορισμοί υποδεικνύουν την ανάγκη για μηχανισμούς αυτονομίας, ώστε το UAV να λαμβάνει αποφάσεις βασισμένες σε τοπικά δεδομένα, ακόμη και σε περιπτώσεις προσωρινής απώλειας σύνδεσης, ρόλο που μπορεί να επιτελέσει το Lua scripting.

## **5 Πειραματική Αξιολόγηση και Αποτελέσματα Προσομοίωσης**

Η αξιολόγηση του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης τύπου Software-In-The-Loop (SITL) μέσω του Mission Planner, αξιοποιώντας το firmware του ArduPilot, ώστε να αναπαρασταθεί με υψηλό βαθμό πιστότητας η λειτουργία της στοίβας πτήσης και η ανταλλαγή τηλεμετρικών δεδομένων μέσω MAVLink. Το βασικό σενάριο περιλάμβανε μία προγραμματισμένη αποστολή με πολλαπλά σημεία διέλευσης (waypoints) και μεταβαλλόμενα υψόμετρα, με στόχο τον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης σε διαφορετικές φάσεις πτήσης. Η προσομοίωση κάλυψε τις βασικές λειτουργικές φάσεις του UAV, συμπεριλαμβανομένων της απογείωσης, της πλεύσης μεταξύ διαδοχικών σημείων, των ελιγμών αλλαγής κατεύθυνσης, της επιστροφής στο σημείο εκκίνησης (RTL) και της τελικής προσγείωσης. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, ο αλγόριθμος εκτελούνταν onboard μέσω Lua scripting και κατέγραφε σε πραγματικό χρόνο τις απαιτούμενες ενεργειακές παραμέτρους, αξιοποιώντας δεδομένα όπως η απόσταση, η υψομετρική μεταβολή και η οριζόντια ταχύτητα.

### **5.1 Περιβάλλον Προσομοίωσης και Σχεδιασμός Πειραματικών Σεναρίων**

Η πειραματική αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε στην πλατφόρμα Mission Planner, αξιοποιώντας περιβάλλον προσομοίωσης Software-In-The-Loop (SITL) με firmware ArduPilot. Η χρήση του SITL επιτρέπει την εκτέλεση και ανάλυση πτήσεων χωρίς την ανάγκη πραγματικής πτητικής δοκιμής, διατηρώντας ωστόσο ρεαλιστικά χαρακτηριστικά συμπεριφοράς του UAV και της στοίβας ελέγχου πτήσης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ο οποίος είναι γραμμένος σε Lua εκτελείται onboard και αξιοποιεί δυναμικά τις παραμέτρους αλλά και τις πληροφορίες του πλάνου πτήσης που παρέχονται από το Mission

Planner, όπως τις αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών waypoints, τις υψομετρικές μεταβολές και την ταχύτητα πλεύσης. Παράλληλα, καταγράφονται οι ενδείξεις κατανάλωσης ενέργειας της μπαταρίας (Consumed Battery), οι οποίες χρησιμοποιούνται ως πραγματικές τιμές αναφοράς για τη σύγκριση με τις εκτιμήσεις του αλγορίθμου. Αρχικά ενα από τα βασικά πειραματικά σενάρια παρουσιάζεται στην Εικόνα 43, όπου απεικονίζεται το πλάνο πτήσης όπως ορίστηκε στο Mission Planner. Στο συγκεκριμένο σενάριο, το UAV εκτελεί αποστολή με πολλαπλά σημεία διέλευσης (waypoints) σε διαφορετικά υψόμετρα, επιτρέποντας την ταυτόχρονη αξιολόγηση της οριζόντιας πλεύσης και των φάσεων ανόδου/καθόδου. Η ταχύτητα πλεύσης ορίστηκε στα 10 m/s, ενώ το συνολικό πλάνο περιλάμβανε απογείωση, διαδοχικές μετακινήσεις μεταξύ σημείων, επιστροφή στη βάση (RTL) και τελική προσγείωση.

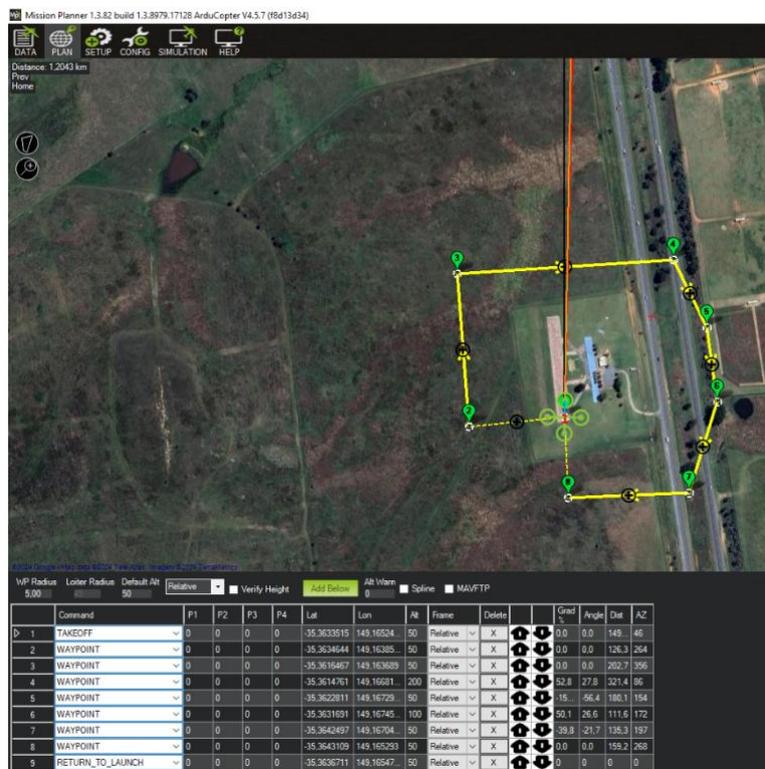


Figure 43 Πρώτο πλάνο πτήσης

Η ύπαρξη υψομετρικών μεταβολών στο σενάριο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ενεργοποιεί πλήρως το τρισδιάστατο ενεργειακό μοντέλο που αναπτύχθηκε, το οποίο λαμβάνει υπόψη τόσο την οριζόντια μετατόπιση όσο και τη μεταβολή υψομέτρου. Για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας και της ακρίβειας του μοντέλου σχεδιάστηκαν ακόμα τεσσερα βασικά πειραματικά σενάρια πτήσης. Και στα πεντε σενάρια το UAV εκτελεί αποστολή με πολλαπλά σημεία διέλευσης (waypoints), περιλαμβάνοντας φάσεις

απογείωσης, οριζόντιας πλεύσης, υψομετρικών μεταβολών, επιστροφής στη βάση (Return-To-Launch – RTL) και τελικής προσγείωσης. Για τον σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν αποστολές με μεταβολές τόσο στη γεωμετρία της διαδρομής όσο και στα υψομετρικά προφίλ και στις ταχύτητες πλεύσης. Στο δευτερο πειραματικό σενάριο, η ταχύτητα πλεύσης ορίστηκε στα 10 m/s. Το πλάνο πτήσης περιλαμβάνει διαδοχικά τμήματα οριζόντιας μετακίνησης σε συνδυασμό με εναλλαγές φάσεων ανόδου και καθόδου, επιτρέποντας την ταυτόχρονη ενεργοποίηση όλων των βασικών συνιστωσών του ενεργειακού μοντέλου (πλεύση, άνοδος, κάθοδος). Το συγκεκριμένο σενάριο λειτουργεί ως βασικό σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου σε τυπικές συνθήκες πτήσης.

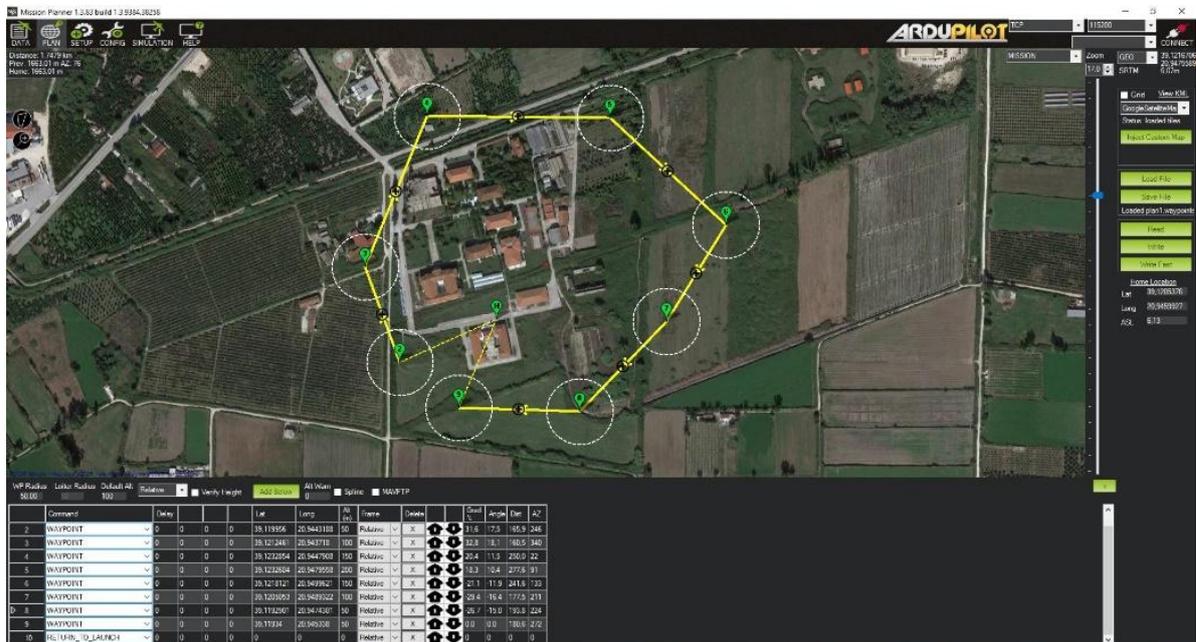


Figure 44 Δεύτερο και τρίτο πλάνο πτήσης για 10m/s και 8m/s

Στο τρίτο πειραματικό σενάριο χρησιμοποιήθηκε το ίδιο γεωμετρικό πλάνο διαδρομής, με μοναδική μεταβολή την ταχύτητα πλεύσης, η οποία μειώθηκε στα 8 m/s. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η απομόνωση της επίδρασης της ταχύτητας πτήσης στην ενεργειακή κατανάλωση και η διερεύνηση της ικανότητας του αλγορίθμου να προσαρμόζεται δυναμικά σε διαφορετικά προφίλ πλεύσης. Η επιλογή πλάνων πτήσης με υψομετρικές μεταβολές είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει την πλήρη ενεργοποίηση του τρισδιάστατου ενεργειακού μοντέλου που αναπτύχθηκε, το οποίο λαμβάνει υπόψη τόσο την οριζόντια απόσταση όσο και τη μεταβολή υψομέτρου. Με τον τρόπο αυτό αξιολογείται η ικανότητα του αλγορίθμου να προσαρμόζεται σε ρεαλιστικές

συνθήκες πτήσης και να αποδίδει αξιόπιστες εκτιμήσεις κατανάλωσης σε διαφορετικές ταχύτητες και δυναμικά χαρακτηρισικά αποστολής.

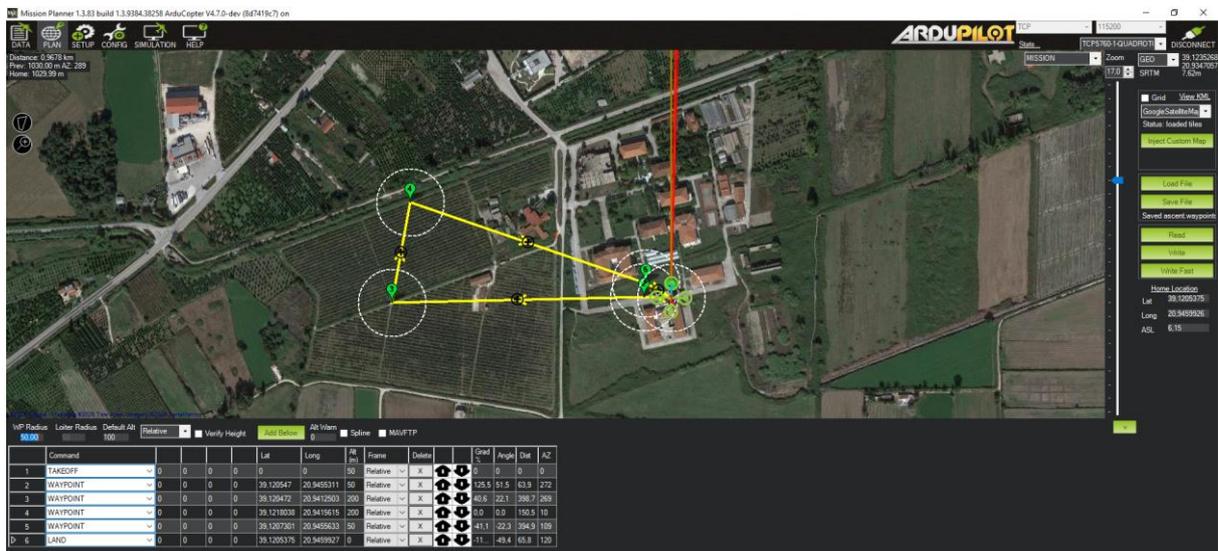


Figure 45 Τέταρτο Πλάνο πτήσης

Στο τέταρτο πειραματικό σενάριο σχεδιάστηκε ένα πλάνο πτήσης με μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές, με στόχο την αξιολόγηση της ακρίβειας των επιμέρους μοντέλων ανόδου και καθόδου. Το σενάριο αυτό δίνει έμφαση στη μεταβολή υψομέτρου και επιτρέπει την εξέταση πιθανών αποκλίσεων που προκύπτουν όταν η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται κυρίως από κατακόρυφες μετακινήσεις.

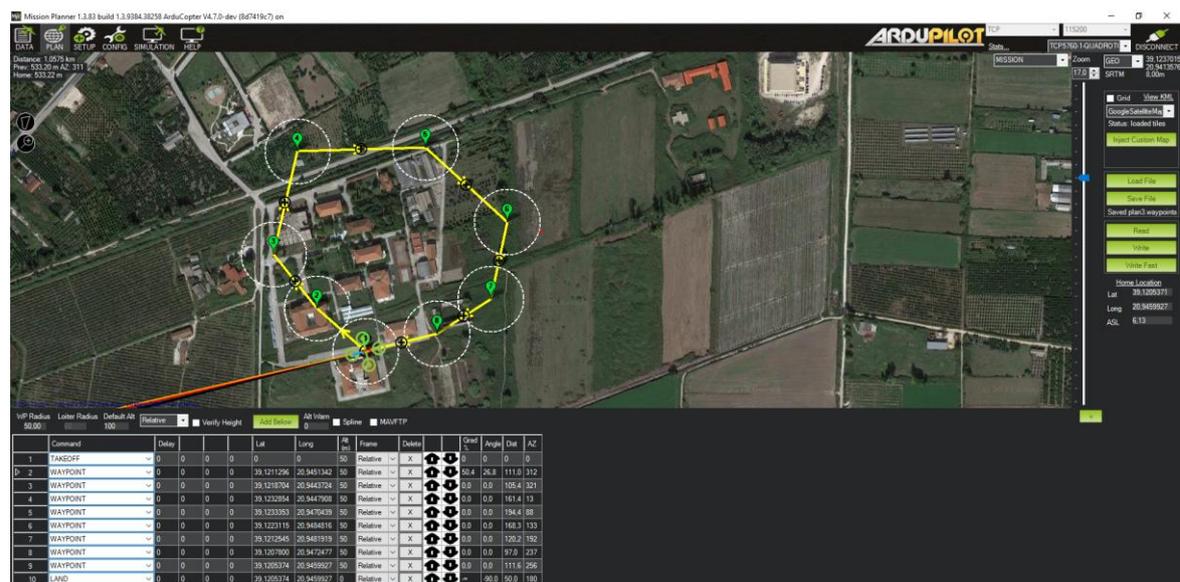


Figure 46 Πέμπτο Πλάνο πτήσης

Τέλος, το πέμπτο πειραματικό σενάριο σχεδιάστηκε για να αναδείξει τη συμπεριφορά του αλγορίθμου σε πλάνο πτήσης που βασίζεται κυρίως στην οριζόντια πλεύση (cruise), με μικρότερη συμμετοχή υψομετρικών μεταβολών. Το σενάριο αυτό επιβεβαιώνει ότι ο αλγόριθμος δεν περιορίζεται μόνο σε φάσεις ανόδου και καθόδου, αλλά μπορεί να εκτιμά αξιόπιστα την κατανάλωση και σε αποστολές μεγάλης οριζόντιας μετατόπισης.

## 5.2 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των πειραματικών σεναρίων καταδεικνύουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει υψηλό βαθμό ακρίβειας στην εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Για την ποσοτική αξιολόγηση της ακρίβειας του προτεινόμενου μοντέλου, ορίστηκε ο σχετικός τύπος απόκλισης ως:

$$Deviation(\%) = \left( \frac{|EAlg - ECon|}{ECon} \right) \cdot 100$$

Πίνακας 22: Τύπος απόκλισης

Ο τύπος αυτός εκφράζει την ποσοστιαία απόκλιση μεταξύ της εκτιμώμενης ενεργειακής κατανάλωσης που προκύπτει από τον αλγόριθμο και της πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας που καταγράφηκε από την μπαταρία του UAV κατά την εκτέλεση του πλάνου πτήσης στο περιβάλλον προσομοίωσης.

Σενάριο	Εκτίμηση κατανάλωσης SITL(Joule)	Εκτίμηση Αλγορίθμου (Joule)	Απόκλιση(Joule)	Απόκλιση (%) <sup>1</sup>
Πλάνο πτήσης 1	133.992	135.332	1.340	1%
Πλάνο πτήσης 2	109.387	109.661	274	0,25%
Πλάνο πτήσης 3	117.668	120.253	2.585	2,20%
Πλάνο πτήσης 4	97.489	102.220	4.731	4,85%
Πλάνο πτήσης 5	66.874	68.514	1.640	2,45%

Πίνακας 23: Σύγκριση εκτιμώμενης ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ προσομοίωσης SITL και αλγορίθμου

<sup>1</sup> θετική απόκλιση = υπερεκτίμηση κατανάλωσης του αλγορίθμου – συνεπώς επιπλέον συντελεστής ασφάλειας

Το Deviation(%) αντιπροσωπεύει το τελικό ποσοστό απόκλισης της εκτίμησης του αλγορίθμου σε σχέση με την πραγματική κατανάλωση και χρησιμοποιείται ως βασικός δείκτης αξιολόγησης της ακρίβειας του μοντέλου. Η μεταβλητή EAlg αντιστοιχεί στην ενέργεια που εκτιμήθηκε από τον αλγόριθμο, ενώ η μεταβλητή Econ αντιστοιχεί στην πραγματική κατανάλωση ενέργειας της μπαταρίας του UAV, όπως αυτή καταγράφηκε από το Mission Planner. Ο τύπος απόκλισης επιτρέπει την αντικειμενική και ποσοτική αξιολόγηση της αξιοπιστίας του αλγορίθμου, καθώς καθιστά δυνατή τη σύγκριση μεταξύ θεωρητικής εκτίμησης και πραγματικής κατανάλωσης ανεξάρτητα από το μέγεθος της αποστολής ή τη συνολική ενεργειακή κλίμακα.

Στο βασικό πειραματικό σενάριο, η απόκλιση μεταξύ υπολογισμένης και πραγματικής κατανάλωσης παρέμεινε κοντά στο 1%, γεγονός που θεωρείται ιδιαίτερα ικανοποιητικό για εφαρμογές προσομοίωσης και προγραμματισμού αποστολών.

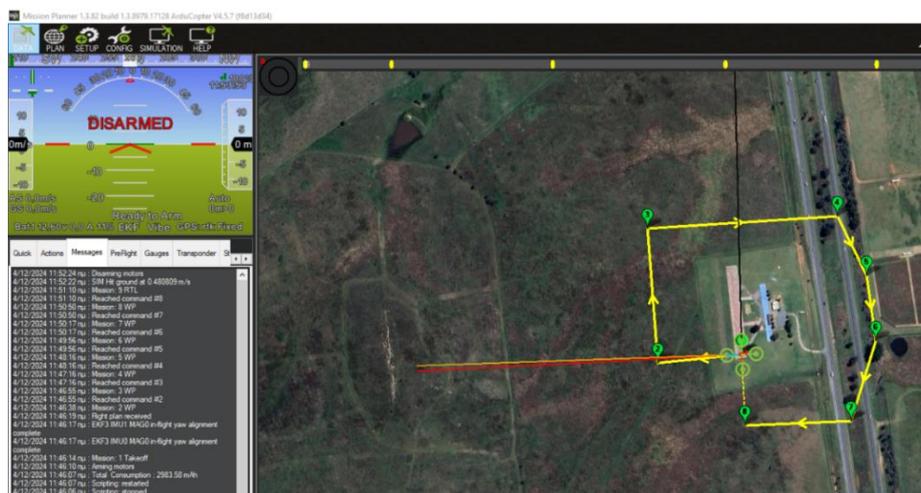


Figure 47 Αποτελέσματα πειραματικού σεναρίου πτήσης 1

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πρώτου πειράματος, ο αλγόριθμος εκτίμησε συνολική ενεργειακή κατανάλωση 135.331,56 Joule, που αντιστοιχεί περίπου στο 90.5% της διαθέσιμης ενέργειας της μπαταρίας (149.688,00 Joule). Από την προσομοίωση προέκυψε ότι το UAV κατανάλωσε τελικά περίπου το 89% της διαθέσιμης ενέργειας, γεγονός που οδηγεί σε απόκλιση της τάξης του 1% μεταξύ θεωρητικής εκτίμησης και πραγματικής κατανάλωσης. Η πολύ μικρή αυτή απόκλιση καταδεικνύει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει υψηλό βαθμό ακρίβειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα για την πρόβλεψη της ενεργειακής επάρκειας μιας αποστολής πριν από την πραγματική εκτέλεσή της. Η πολύ μικρή αυτή απόκλιση καταδεικνύει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει υψηλό βαθμό ακρίβειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα για την



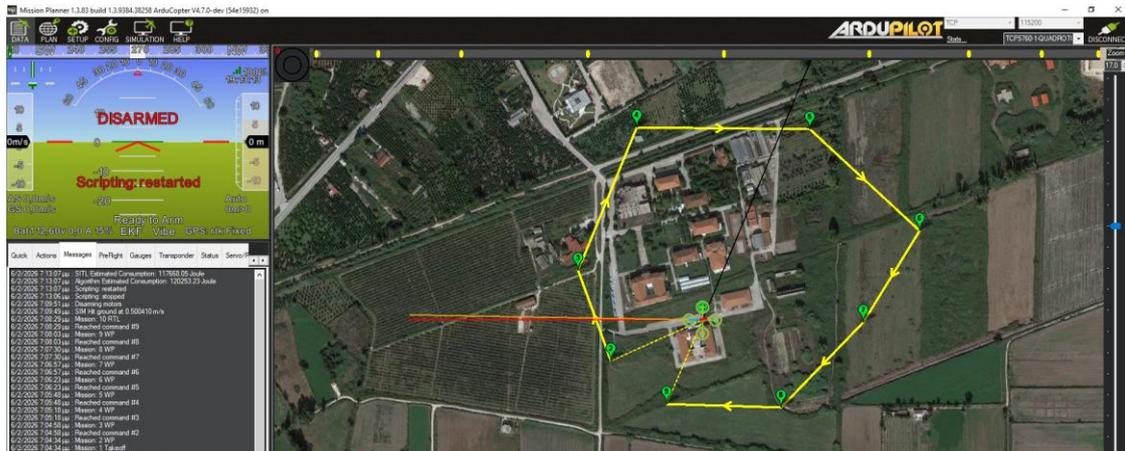


Figure 49 Αποτελέσματα πειραματικού σεναρίου πτήσης 3

Στο τέταρτο πλάνο πτήσης πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση του αλγορίθμου σε σενάριο με έντονες υψομετρικές μεταβολές. Το συγκεκριμένο σενάριο επιλέχθηκε με σκοπό τον έλεγχο της ορθότητας του μαθηματικού μοντέλου ανόδου και καθόδου που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η εκτίμηση της κατανάλωσης της μπαταρίας καταγράφηκε ίση με 97.489,23 Joule, ενώ η αντίστοιχη εκτίμηση του αλγορίθμου ανήλθε στα 102.220,38 Joule. Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών ισούται με 4731,15 Joule, που αντιστοιχεί σε σχετική απόκλιση 4,85% ως προς την πραγματική κατανάλωση. Το αποτέλεσμα αυτό καταδεικνύει ότι το προτεινόμενο μοντέλο διατηρεί υψηλό επίπεδο ακρίβειας ακόμη και σε σενάρια με σημαντικές υψομετρικές μεταβολές, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητά του για εφαρμογές εκτίμησης ενεργειακών απαιτήσεων σε σύνθετα προφίλ πτήσης.

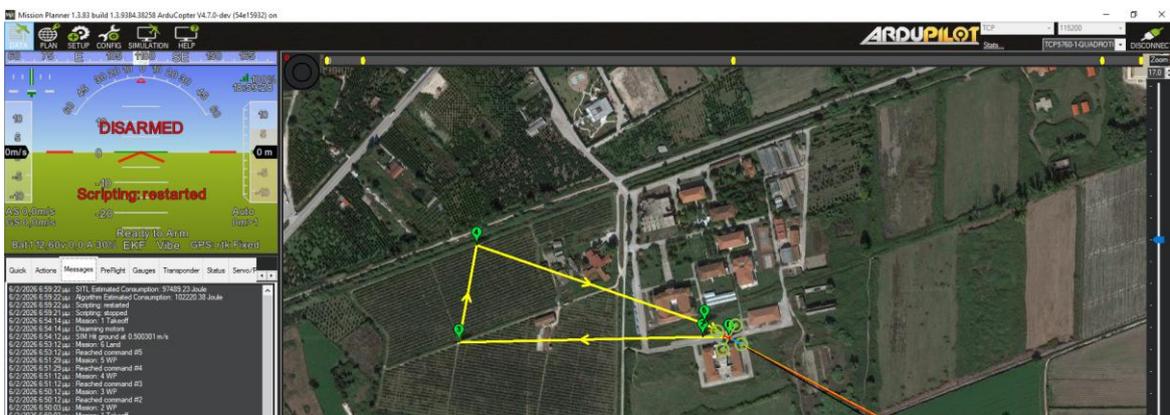


Figure 50 Αποτελέσματα πειραματικού σεναρίου πτήσης 4

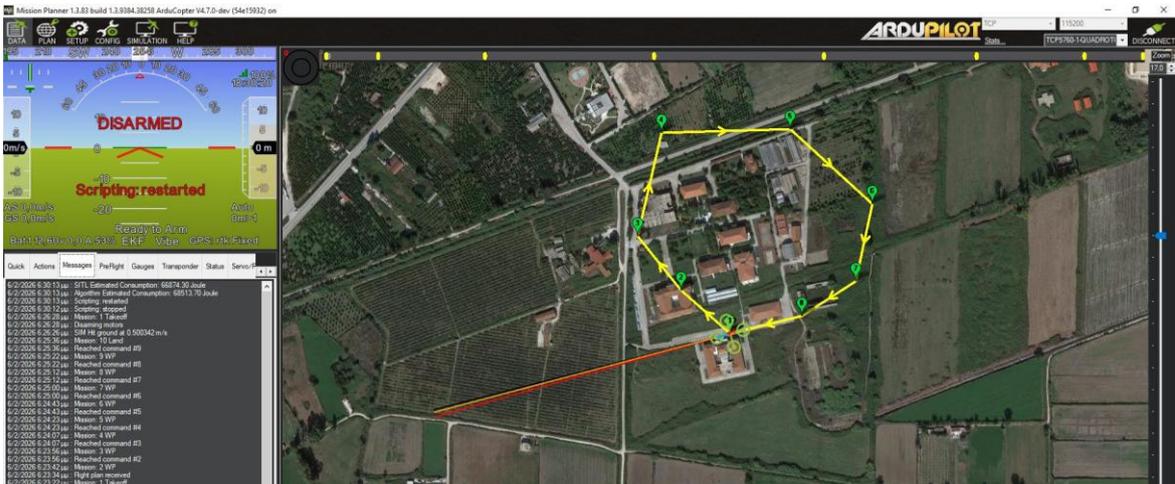


Figure 51 Αποτελέσματα πειραματικού σεναρίου πτήσης 5

Το συγκεκριμένο πλάνο χαρακτηρίζεται από κλειστή κυκλική διαδρομή και σχεδόν σταθερό υψόμετρο, με την ενεργειακή κατανάλωση να προκύπτει κυρίως από συνεχή οριζόντια μετακίνηση του UAV. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η εκτίμηση κατανάλωσης της μπαταρίας καταγράφηκε ίση με 66.874,30 Joule, ενώ η αντίστοιχη εκτίμηση του αλγορίθμου ανήλθε στα 68.513,70 Joule. Η απόλυτη διαφορά μεταξύ των δύο τιμών είναι 1639.40 Joule, η οποία αντιστοιχεί σε σχετική απόκλιση 2.45% ως προς την πραγματική κατανάλωση. Το αποτέλεσμα αυτό καταδεικνύει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει πολύ υψηλή ακρίβεια σε σενάρια πτήσης τύπου cruise, όπου η ενεργειακή κατανάλωση κυριαρχείται από τη φάση οριζόντιας μετακίνησης, επιβεβαιώνοντας τη σταθερότητα και την αξιοπιστία του μοντέλου εκτίμησης σε συνθήκες ομοιόμορφης κίνησης.

Ο μέσος όρος απόκλισης όλων των πειραματικών σεναρίων υπολογίστηκε ίσος με 2.15%, γεγονός που καταδεικνύει τη συνολικά υψηλή ακρίβεια και τη σταθερότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου. Η χαμηλή αυτή μέση απόκλιση επιβεβαιώνει ότι το μοντέλο εκτίμησης ενέργειας παρουσιάζει συνεπή συμπεριφορά σε διαφορετικά προφίλ πτήσης, τόσο σε σενάρια με μεταβολές ταχύτητας όσο και σε σενάρια με σημαντικές υψομετρικές διαφοροποιήσεις. Συνολικά, τα αποτελέσματα της πειραματικής αξιολόγησης καταδεικνύουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αξιόπιστο εργαλείο υποστήριξης απόφασης για τον ενεργειακό προγραμματισμό αποστολών UAV, επιτρέποντας την πρόβλεψη της ενεργειακής επάρκειας πριν από την πραγματική εκτέλεση της αποστολής και συμβάλλοντας ουσιαστικά στη μείωση του επιχειρησιακού κινδύνου.

### 5.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας εξετάζει κατά πόσο η ακρίβεια της εκτίμησης επηρεάζεται από μεταβολές βασικών παραμέτρων πτήσης. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω της εκτέλεσης πολλαπλών σεναρίων πτήσης στο Mission Planner (SITL), με συστηματικές διαφοροποιήσεις στην ταχύτητα πλεύσης, στο προφίλ υψομέτρου και στη γεωμετρία της διαδρομής. Για κάθε σενάριο αξιολογήθηκε η απόκλιση (%) μεταξύ της κατανάλωσης που υπολογίζει ο αλγόριθμος και της κατανάλωσης που προκύπτει από την προσομοίωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μεταβολές στις παραπάνω παραμέτρους επηρεάζουν το απόλυτο επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας (δηλαδή τη συνολική απαιτούμενη ενέργεια για την ολοκλήρωση της αποστολής). Παρ' όλα αυτά, η σχετική απόκλιση μεταξύ εκτιμώμενης και προσομοιωμένης κατανάλωσης παρέμεινε χαμηλή και εντός αποδεκτών ορίων. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι ο αλγόριθμος παρουσιάζει χαμηλή ευαισθησία ως προς την ακρίβεια της εκτίμησης, ακόμη και όταν μεταβάλλονται σημαντικά τα χαρακτηριστικά του πλάνου πτήσης.

Η παρατήρηση αυτή συνάδει με τη διεθνή βιβλιογραφία, όπου επισημαίνεται ότι γενικευμένα μοντέλα εκτίμησης ενέργειας για UAV (μαθηματικά ή/και ML-based) μπορούν να διατηρούν υψηλή ακρίβεια υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες αποστολής [48]. Παράλληλα, αναφέρεται ότι η προσαρμογή ενεργειακών μοντέλων σε διαφορετικές πλατφόρμες UAV και payloads επιτυγχάνεται κυρίως μέσω κατάλληλης παραμετροποίησης, χωρίς να απαιτείται αλλαγή της βασικής δομής του μοντέλου [49]. Επιπλέον, μελέτες που συνδυάζουν ενεργειακή εκτίμηση με σχεδιασμό πλάνων πτήσης καταγράφουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής και πραγματικής κατανάλωσης ακόμη και σε σύνθετα σενάρια αποστολών, στοιχείο που ενισχύει τη γενικευσιμότητα αντίστοιχων προσεγγίσεων [50]. Τέλος, σύγχρονες τεχνικές ενεργειακής βελτιστοποίησης UAV μπορούν να εφαρμοστούν σε ευρύ φάσμα εφαρμογών και επιχειρησιακών περιβαλλόντων [51].

Συνολικά, η ανάλυση ευαισθησίας καταδεικνύει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος δεν αποτελεί μια ειδική λύση περιορισμένης εφαρμογής, αλλά ένα γενικευμένο και ευέλικτο υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί σε διαφορετικά σενάρια πτήσης. Επιπλέον, η δυνατότητα παραμετροποίησης του αλγορίθμου και η σχετική ανεξαρτησία του από συγκεκριμένα χαρακτηριστικά πλατφόρμας επιτρέπουν την προσαρμογή του σε διαφορετικούς τύπους UAV με ελάχιστες τροποποιήσεις, επιβεβαιώνοντας την επεκτασιμότητά του.

## 6. Συμπεράσματα

Αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος εκτίμησης ενεργειακής κατανάλωσης για Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAV), με στόχο τη βελτίωση της επιχειρησιακής αυτονομίας και την ασφαλή εκτέλεση αποστολών. Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε σε γλώσσα Lua και ενσωματώθηκε στο περιβάλλον του Mission Planner, αξιοποιώντας το πρωτόκολλο MAVLink για τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων τηλεμετρίας σε πραγματικό χρόνο. Με τον τρόπο αυτό, το UAV αποκτά τη δυνατότητα να υπολογίζει αυτόνομα την ενεργειακή κατανάλωση σε κάθε φάση της αποστολής και να λαμβάνει έγκαιρες αποφάσεις για την ασφαλή επιστροφή στη βάση όταν η εναπομένουσα ενέργεια βρίσκεται σε κρίσιμα επίπεδα. Η ενεργειακή αυτονομία παραμένει ένας από τους σημαντικότερους περιοριστικούς παράγοντες στη λειτουργία των UAV. Μέσω της ανάλυσης των ενεργειακών επιπτώσεων βασικών παραμέτρων πτήσης, όπως το βάρος, η ταχύτητα, το υψόμετρο και το προφίλ της αποστολής, τεκμηριώθηκε η ανάγκη για την ανάπτυξη εργαλείων προγνωστικού ενεργειακού προγραμματισμού.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος αποτελεί μια τέτοια προσέγγιση, καθώς παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της απαιτούμενης ενέργειας πριν από την εκτέλεση της αποστολής, μειώνοντας τον κίνδυνο επιχειρησιακής αποτυχίας ή απώλειας του οχήματος. Η υπολογιστική λογική του αλγορίθμου βασίστηκε στη φυσική της πτήσης και στην τρισδιάστατη αναπαράσταση των αποστάσεων μέσω του υπολογισμό τρισδιάστατης απόστασης, επιτρέποντας ρεαλιστικό υπολογισμό της συνολικής διαδρομής του UAV. Παράλληλα, εμπειρικά δεδομένα από προσομοιώσεις τύπου SITL χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση των υπολογισμών, εξασφαλίζοντας προσαρμογή στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Η συγκριτική ανάλυση μεταξύ γραμμικού και τρισδιάστατου μοντέλου έδειξε ότι ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε προσφέρει αυξημένη ακρίβεια, μειώνοντας το ποσοστό απόκλισης κατά περίπου 32%, γεγονός που επιβεβαιώνει τη μεθοδολογική εγκυρότητα της προσέγγισης.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής αξιολόγησης έδειξαν ότι ο αλγόριθμος μπορεί να λειτουργήσει ως αξιόπιστο εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τον χειριστή ή για αυτόνομα συστήματα πλοήγησης, προβλέποντας έγκαιρα αν μια αποστολή μπορεί να ολοκληρωθεί με ασφάλεια. Η πλήρης ενσωμάτωση στο Mission Planner καθιστά την εφαρμογή εύχρηστη, επεκτάσιμη και χωρίς πρόσθετες υπολογιστικές απαιτήσεις, επιτρέποντας την άμεση αξιοποίησή της σε υφιστάμενες πλατφόρμες UAV. Συνολικά, η

εργασία συμβάλλει ουσιαστικά στην ανάπτυξη ενεργειακά ευφυών UAV, ικανών να συνδυάζουν προγνωστική ανάλυση, αυτονομία και λειτουργική ασφάλεια. Η ενσωμάτωση αλγορίθμων εκτίμησης ενέργειας σε πραγματικά συστήματα UAV μπορεί να αποτελέσει σημαντικό βήμα προς την υλοποίηση πλήρως αυτόνομων αποστολών, όπου η διαχείριση της ενέργειας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον χειριστή αλλά ενσωματώνεται στη λογική λειτουργίας του ίδιου του συστήματος.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Austin, R. (2010). *Unmanned Aircraft Systems: UAV Design, Development and Deployment*. Wiley.
2. Beard, R., & McLain, T. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press.
3. Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer.
4. Colomina, I., & Molina, P. (2014). "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.
5. Bouabdallah, S., Murrieri, P., & Siegwart, R. (2004). Design and control of an indoor micro quadrotor. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4393–4398.
6. Mahony, R., Kumar, V., & Corke, P. (2012). Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(3), 20–32.
7. Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712.
8. Villa, T. F., Gonzalez, F., Miljevic, B., Ristovski, Z. D., & Morawska, L. (2016). An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements. *Sensors*, 16(7), 1072.
9. Marques, F. L., Cunha, A. M., & da Silva, A. F. (2019). Structural design and material selection for lightweight UAV frames. *Composite Structures*, 216, 55–66.
10. Savage, L., & Imran, M. (2018). Vibration reduction and stiffness optimization in carbon fiber UAV frames. *Aerospace Science and Technology*, 78, 24–33.
11. Sun, X., Zhang, Y., & Li, J. (2020). Thermal and mechanical behavior of carbon fiber composites in aerospace structures. *Materials Today: Proceedings*, 28, 1025–1031.
12. Totaro, G., & D'Alessio, A. (2017). Carbon fiber vs aluminum in UAV frame design: A performance and cost comparison. *International Journal of Aerospace Engineering*, Article ID 4587023.
13. Brandt, J., & Selig, M. (2011). *Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers*. University of Illinois at Urbana–Champaign.
14. NASA Glenn Research Center, *Beginner's Guide to Propellers*.
15. McCrink, M., et al. (2019). Energy Efficient Propulsion System Design for Small UAVs. *MDPI Energies*, 12(6), 1019.

16. Di Franco, C., & Buttazzo, G. (2015). *Energy-aware coverage path planning of UAVs. IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, 111–117.
17. *Performance Testing and Modeling of a Brushless DC Motor, Electronic Speed Controller and Propeller for a Small UAV Application.*
18. *An Analytical Design-Optimization Method for Electric Propulsion Systems of Multicopter UAVs with Desired Hovering Endurance.*
19. Oleynikova, H., Burri, M., Taylor, Z., & Siegwart, R. (2017). *Continuous-time trajectory optimization for UAVs. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Analysis and Assessment of a Brushless DC Outrunner Motor for Agriculture Drones Using JMAG.*
20. Liu, Y., Sengupta, R., & Kurzhanskiy, A. (2017). *A power consumption model for multi-rotor UAVs. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 237–242. *Energy Consumption Model for Multirotor UAVs, IEEE Access.*
21. *Effect of Center of Gravity on Quadcopter Stability and Power Consumption, MDPI Drones Journal.*
22. <https://www.grepow.com/blog/understanding-drone-payload-a-comprehensive-guide.html>
23. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20180004466/downloads/20180004466.pdf>
24. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7014488/>
25. <https://www.pilotmall.com/blogs/news/bingo-fuel-meaning-why-the-term-isnt-used-in-civilian-aviation>
26. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/18/6810>
27. <https://www.t-drones.com/blog/drone-battery-complete-beginner-guide.html>
28. [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220019058/downloads/SAI\\_Paper\\_Format\\_Latex\\_.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220019058/downloads/SAI_Paper_Format_Latex_.pdf)
29. Meier, L. (2015). *PX4 autopilot user guide. PX4 Development Team.* <https://ieeexplore.ieee.org/document/7513397>
30. <https://doras.dcu.ie/27277/1/Main.pdf>
31. <https://www.droneinfo.fi/en/study-material/how-weather-affects-flight-weatherk>
32. Sarıççek, İ., Akkuş, Y.: *Unmanned aerial vehicle hub-location and routing for monitoring geographic borders* page 11.
33. Hattenberger, G., Bronz, M., & Gorraz, A. (2014). "Using the Paparazzi UAV System for Scientific Research." *International Micro Air Vehicle Conference (IMAV).*

34. Mission Planner Documentation. Διαθέσιμο στο: <https://ardupilot.org/planner/>
35. Titterton, D.H., & Weston, J.L. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology* (2nd ed.). IET.
36. Grewal, M. S., Weill, L. R., & Andrews, A. P. (2007). *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Wiley-Interscience.
37. El-Diasty, M. (2013). "Performance analysis of integrated GPS/INS systems." *Measurement*, 46(9), 3241-3258.
38. Meier, L., et al. (2011). "MAVLink Micro Air Vehicle Communication Protocol." Διαθέσιμο στο: <https://mavlink.io/en/>
39. MAVLink Protocol Guide. Διαθέσιμο στο: <https://mavlink.io>
40. Dorling, K., Heinrichs, J., Messier, G., & Magierowski, S. (2017). *Vehicle routing problems for drone delivery*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 47(1), 70–85. ArduPilot – MAVLink Basics. <https://ardupilot.org/dev/docs/mavlink-basics.html>
41. MAVLink Documentation. <https://mavlink.io/en/>
42. Auterion – MAVLink Communication Protocol. <https://auterion.com/mavlink-communication-protocol-the-open-standard/>
43. ArduPilot – MAVLink Requesting Data. <https://ardupilot.org/dev/docs/mavlink-requesting-data.html>
44. E. I. Abd El-Latif and M. El-dosuky, "Energy consumption prediction for UAVs using mathematical and machine learning models," *The Journal of Supercomputing*, Springer, 2025.
45. K. Góra et al., "Machine learning in creating energy consumption model for UAV," *Sensors*, vol. 22, no. 18, 2022.
46. D. Datsko et al., "Energy-aware mission planning for unmanned aerial vehicles," arXiv preprint arXiv:2402.10529, 2024.
47. M. Abubakar et al., "A survey on energy optimization techniques in UAVs," *Drones*, MDPI, vol. 7, no. 3, 2023.

