



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ανάπτυξη και Μοντελοποίηση Αυτόνομου ΣμΕΑ επιτρέποντας την  
Υλοποίηση Ψηφιακού Διδύμου**

**Φοιτητής: Λιόλης Ευάγγελος**

**Αριθμός μητρώου: 50106529**

**Επιβλέπων Καθηγητής:**

**Πυρομάλης Δημήτριος**

**Αναπληρωτής Καθηγητής**

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

# **Development and Modeling of autonomous UAV System as a Digital Twin Enabler**

**Student: Liolis Evangelos**

**Registration Number: 50106529**

**Supervisor: Piromalis Dimitrios**

**Associate Professor**

**ATHENS-EGALEO, March 2024**

Η διπλωματική εργασία έγινε δεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελής επιτροπή:

Πυρομάλης Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής	Καμινάρης Σταύρος, Καθηγητής	Παπαγέωργας Παναγιώτης, Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

**Copyright** © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και (Όνοματεπώνυμο Φοιτητή/ήτριας),  
Μήνας, Έτος**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

#### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Λιόλης Ευάγγελος του Δημητρίου, με αριθμό μητρώου 50106529 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος/ουσας καθηγητή/ήτριας.»

Ο Δηλών  
Λιόλης Ευάγγελος

(Υπογραφή φοιτητή/ήτριας)

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Liolis', with a stylized flourish extending to the right.

## **Ευχαριστίες**

Ολοκληρώνοντας πλέον την διπλωματική μου εργασία και όντας σύντομα, ελπίζω, Διπλωματούχος, θα ήθελα να ευχαριστήσω πρώτα την οικογένεια μου που με βοήθησε σε κάθε βήμα της πορείας μου στο τμήμα και δεύτερον τους καθηγητές κύριο Παπαγέωργα και κύριο Πυρομάλη, διότι με τον τρόπο διδασκαλίας τους με βοήθησαν να συνειδητοποιήσω πόσο μου αρέσει το αντικείμενο της ενασχόλησης μας. Και οι δυο τους ήταν δίπλα μου και προσέφεραν βοήθεια σε κάθε πρόβλημα που αντιμετώπιστηκε κατά την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

## **Περίληψη**

Κατά την υλοποίηση αυτής της εργασίας έγινε προσπάθεια για κατασκευή ενός συστήματος ψηφιακού διδύμου για έναν ελεγκτή πτήσης Pixhawk 4. Αυτή η προσπάθεια έγινε χρησιμοποιώντας την τεχνική του Model-based Design μέσω της πλατφόρμας Simulink του MATLAB. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Simulink για παραγωγή κώδικα και προσομοιώσεις software-in-the-loop, ενώ έγινε προσπάθεια και για hardware-in-the-loop προσομοίωση. Όσον αφορά το φυσικό αντικείμενο, δηλαδή το τετρακόπτερο το οποίο χρησιμοποιήθηκε, του περάσαμε υλικολογισμικό (firmware) και βαθμονομήθηκε στο πρόγραμμα QGroundControl. Αφού τελικά βεβαιωθήκαμε για την πλήρη λειτουργικότητα όλων των εξαρτημάτων του τετρακόπτερου, έγινε προσπάθεια για την σύνδεση του με την πλατφόρμα Simulink, η οποία απέτυχε. Έτσι έγινε μια προσομοίωση software-in-the-loop, με το λογισμικό PX4 να τρέχει στον υπολογιστή αντί για τον φυσικό ελεγκτή πτήσης, και οπτικοποίηση της μέσω του προγράμματος προσομοίωσης jMAVSim, το οποίο είναι ενσωματωμένο στο MATLAB.

Λέξεις κλειδιά: Ελεγκτής πτήσης, PX4, Pixhawk 4, FMUK66, MATLAB/Simulink, μοντελοποίηση, προσομοίωση, τετρακόπτερο, ΣμηΕΑ , jMAVSim, Model-based Design, Software-in-the-Loop, Hardware-in-the-Loop

## **Abstract**

This thesis attempts the implementation of a digital twin system for a Pixhawk 4 flight controller. This attempt was carried out using the Model-based Design approach through MATLAB's Simulink suite. More specifically, Simulink was utilized for code generation and software-in-the-loop simulations, with attempts made for a hardware-in-the-loop simulation as well. Regarding the physical object, namely the quadcopter used, it underwent firmware installation and calibration using QGroundControl. After ensuring that all quadcopter components were functional, an attempt was made to connect it to the Simulink platform, which was unsuccessful. Consequently, a software-in-the-loop simulation was performed, with the PX4 software running on Host Target (a computer) instead of the physical flight controller, and was visualised through jMAVSim, a simulation application integrated into MATLAB..

Keywords: flight controller, PX4, Pixhawk 4, FMUK66, MATLAB/Simulink, modelling, simulation, quadcopter, UAV, jMAVSim, Model-based Design, Software-in-the-Loop, Hardware-in-the-Loop, UAS

## **Κατάλογος Εικόνων**



Εικόνα 2.2.1: ο Reginald Denny με το Radioplane-1 (RP-1)

Εικόνα 2.3.1: Το AN/USD-1

Εικόνα 2.3.2: MQ-9 Reaper

Εικόνα 2.3.3: Πολωνικό FlyEye mini-UAV της WB Electronics

Εικόνα 2.3.4: Black Hornet nano-UAV

Εικόνα 2.4.1: Ανάπτυξη αγοράς ΣμηΕΑ, έτη 2008-Q2 2020 [3]

Εικόνα 2.4.2: Κατανομή εφαρμογών ΣμηΕΑ, 2020 [9]

Εικόνα 2.4.3: Εξακόπτερο της εταιρίας DroneSeed ψεκάζει με ζιζανιοκτόνο μια περιοχή πριν την σπορά

Εικόνα 3.2.1.1 Παραδείγματα αεροτομών στη φύση και σε διάφορα οχήματα

Εικόνα 3.2.1.2 Αεροτομή

Εικόνα 3.3.1 Απεικόνιση της Αρχής του Bernoulli

Εικόνα 3.5.1 Δυνάμεις σε ένα αεροπλάνο

Εικόνα 3.6.1: Τα pitch, yaw και roll όπως φαίνονται σε ένα μοντέλο ελικοπτέρου (Lee & Shia – Introduction to Embedded Systems, σελίδα 20)

Εικόνα 3.6.2: Τα pitch, yaw και roll όπως φαίνονται σε ένα μοντέλο αεροπλάνου

Εικόνα 3.6.3: Τα pitch, yaw και roll όπως φαίνονται σε ένα τετρακόπτερο [21]

Εικόνα 3.7.1 Παράδειγμα της αντίδρασης ροπής σε ένα αεροσκάφος [23]

Εικόνα 3.7.2 Ελικόπτερο Piasecki H-21B με ρότορες σε διαφορετικούς άξονες [24]

Εικόνα 3.7.3 Ελικόπτερο Kamov Ka-50 με ομοαξονικές έλικες [25]

Εικόνα 3.7.4 Το ελικόπτερο Ingenuity της NASA, προοριζόμενο για τον Άρη[25]

Εικόνα 3.7.5 OnyxStar HYDRA-12, εξακόπτερο με 2 ομοαξονικές έλικες σε κάθε κινητήρα [27]

Εικόνα 3.8.1.1 Το φαινόμενο εδάφους σε ένα αεροπλάνο [29]

Εικόνα 3.8.2.1 Το φαινόμενο εδάφους σε ένα ελικόπτερο [28]

Εικόνα 3.8.3.1 Το φαινόμενο εδάφους σε ένα VTOL [30]

Εικόνα 3.8.3.2 Φαινόμενα αέρα και συντριβανιού σε ένα VTOL [31]

Εικόνα 3.8.4.1 Ekranoplan A-90 Orlyonok

Εικόνα 4.1.1: Αύξηση κόστους σφαλμάτων κατά την διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός προϊόντος. [33]

Εικόνα 4.1.2 : Διάγραμμα ροής για model-based design [36]

Εικόνα 4.1.3: Διάγραμμα από τον σχεδιασμό μέχρι την υλοποίηση ενός συστήματος βάσει της αρχής του model-based design (γνωστό και ως V diagram) [37]

Εικόνα 5.1.1 Το σκάφος S500 με σύστημα προσγείωσης από ανθρακόνημα

Εικόνα 5.2.1 Κινητήρες DJI 2212 920KV Brushless Motor

Εικόνα 5.3.1 Το APM 2.5 [48]

Εικόνα 5.4.1 Ο πομπός-χειριστήριο Fs-i6s

Εικόνα 5.4.2 δέκτης Fs-iA6B

Εικόνα 5.5.1 Το UBEC

Εικόνα 5.6.1 Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε στο ΣμηΕΑ

Εικόνα 5.7.1 Ο FMUK66 ελεγκτής πτήσης [52]

Εικόνα 5.7.2 Το servorail του FMUK66

Εικόνα 5.8.1 Το τετρακόπτερο με όλα του τα εξαρτήματα

Εικόνα 5.9.4.1 Άξονες Αναφοράς Σκάφους και Αδράνειας

Εικόνα 7.1.1 Στιγμιότυπο οθόνης από την διαδικασία ανεβάσματος του bootloader

Εικόνα 7.1.2 Στιγμιότυπο οθόνης όπου φαίνεται πως υπάρχει σύνδεση μεταξύ της πλακέτας του ελεγκτή και του J-Link

Εικόνα 7.3.1 Στιγμιότυπο οθόνης όπου φαίνεται το «δέσιμο» μεταξύ πομπού και δέκτη

Εικόνα 7.3.2 Το μενού Function

Εικόνα 7.3.3 το μενού Output Mode

Εικόνα 7.3.4 Δημιουργία διακόπτη failsafe

Εικόνα 7.4.1 Επιλογή σκάφους στο QGroundControl

Εικόνα 7.4.2 Βαθμονόμηση αισθητήρων στο QGroundControl

Εικόνα 7.4.3 Βαθμονόμηση Συστήματος Πομποδέκτη στο QGround Control

Εικόνα 7.4.4 Ανάθεση καναλιών

Εικόνα 7.4.5 Βαθμονόμηση μπαταρίας στο QGround Control

Εικόνα 7.4.6 Τέλος βαθμονόμησης

Εικόνα 7.5.1 Κατεύθυνση στροφής κινητήρων

Εικόνα 7.5.2 Οι κινητήρες και το UBEC συνδεδεμένα στο servorail του FMUK66

Εικόνα 7.5.3 Πίνακας με τις συνδέσεις του DCD-LZ

Εικόνα 7.5.4 Ο Διακόπτης Όπλισης

Εικόνα 8.1.2.1 Η αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου του PX4

Εικόνα 8.1.2.2 Τα κομμάτια της αρχιτεκτονικής που προσομοιώνονται με το toolbox

Εικόνα 8.1.3.1 Οθόνη επιλογής σχεδιασμού στο Simulink

Εικόνα 8.1.3.2 Επιλογή φακέλου του FMUK66-v3

Εικόνα 8.1.3.3 Επιτυχής παραγωγή κώδικα υλικολογισμικού από το MATLAB

Εικόνα 8.1.3.4 Επιταχυνσιόμετρο στο Simulink

Εικόνα 8.1.4.1 Επιλογή του PX4\_Host\_Target

Εικόνα 8.1.5.1 Ελεγκτής που σχεδιάστηκε στο Simulink βασισμένος στο PX4 toolbox

Εικόνα 8.1.6.1 uORB Blocks

Εικόνα 8.1.7.1 Το υποσύστημα ελέγχου ύψους και ταχύτητας

Εικόνα 8.1.8.1 Το υποσύστημα Attitude Control

Εικόνα 8.1.9.1 Το υποσύστημα PWM Output

Εικόνα 8.1.10.1 Μπλοκ Αισθητήρων

## Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Τι Είναι ΣμηΕΑ</b> .....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Ιστορική Αναδρομή</b> .....	16
<b>2.1 Α' Π.Π.</b> .....	16
<b>2.2 Μεσοπόλεμος και Β' Π.Π.</b> .....	16
<b>2.3 Μετά τον Β' Π.Π.</b> .....	18

2.4 Στην Πολιτική Ζωή .....	21
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: Μηχανική της Πτήσης.....</b>	<b>24</b>
3.1 Εισαγωγή .....	24
3.2 Βασικά Στοιχεία και Ορισμοί .....	24
3.2.1 Αεροτομή .....	24
3.3 Αρχή του Bernoulli.....	26
3.4 Γυροσκοπική Κίνηση.....	28
3.5 Οι τέσσερις βασικές δυνάμεις .....	28
3.5.1 Βάρος.....	29
3.5.2 Ωθηση.....	29
3.5.3 Άνωση .....	29
3.6 Κλίση, Στρέψη και Κύλιση (Pitch, Yaw, Roll).....	30
3.7 Αντίδραση Ροπής .....	32
3.8 Φαινόμενο Εδάφους (Ground Effect).....	35
3.8.1 Φαινόμενο Εδάφους στα αεροσκάφη με σταθερές πτέρυγες.....	36
3.8.2 Φαινόμενο Εδάφους στα ελικόπτερα.....	37
3.8.3 Φαινόμενο Εδάφους στα VTOLs.....	38
3.8.4 Οχήματα Φαινομένου Εδάφους .....	40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Model-Based Design και Digital Twins .....</b>	<b>41</b>
4.1 Model Based Design.....	41
4.2 Digital Twin .....	44
4.2.1 Ορισμός .....	44
4.2.2 Χρησιμότητα .....	44
4.3 HITL (Hardware-in-the-Loop) και SITL (Software-in-the Loop) Simulation .....	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Υλισμικό.....</b>	<b>45</b>
5.1 Σκάφος .....	45
5.2 Κινητήρες .....	46
5.3 Power Module.....	48
5.4 Σύστημα Ραδιοελέγχου .....	48
5.5 BEC (Battery Eliminator Circuit) .....	51
5.6 Μπαταρία.....	52
5.7 Flight Controller (Ελεγκτής Πτήσης) .....	54
5.8 GPS Module.....	56

<b>5.9 Εξισώσεις Τετρακόπερου</b> .....	59
<b>5.9.1 Στατική Ωθηση</b> .....	59
<b>5.9.2 Άνωση</b> .....	60
<b>5.9.3 Εξίσωση Οπισθέλκουσας</b> .....	61
<b>5.9.4 Εξισώσεις Κινηματικής</b> .....	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: Λογισμικό</b> .....	63
<b>6.1 Περιβάλλοντα MATLAB και Simulink</b> .....	63
<b>6.2 QGroundControl</b> .....	64
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>: Πορεία Εργασίας στο ΣμηΕΑ</b> .....	64
<b>7.1 Bootloader</b> .....	64
<b>7.2 PX4 Firmware</b> .....	66
<b>7.3 Ρύθμιση του FlySky FS-i6S RC</b> .....	66
<b>7.4 Βαθμονόμηση μέσω του QGroundControl</b> .....	72
<b>7.5 Έλεγχος Προ Πτήσης</b> .....	76
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>: Προσομοίωση στο Simulink</b> .....	79
<b>8.1 Το UAV Toolbox Support Package for PX4 Autopilots</b> .....	79
<b>8.1.2 Ενσωμάτωση με την γενική αρχιτεκτονική του PX4</b> .....	79
<b>8.1.3 Πορεία εργασίας με τον FMUK66</b> .....	82
<b>8.1.4 Πορεία εργασίας με τον PX4 Host Target</b> .....	88
<b>8.1.5 Είδη Προσομοιώσεων</b> .....	89
<b>8.1.5 Μοντέλο Ελεγκτή</b> .....	89
<b>8.1.6 Τα uORB Blocks</b> .....	90
<b>8.1.7 Υποσύστημα Ελέγχου Ύψους και Ταχύτητας</b> .....	91
<b>8.1.8 Υποσύστημα Attitude Control</b> .....	93
<b>8.1.9 PX4 PWM Output</b> .....	93
<b>8.1.10 Αισθητήρες</b> .....	95
.....	95
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα</b> .....	96
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές</b> .....	96

## Εισαγωγή

Εδώ και αρκετές δεκαετίες, τα ιπτάμενα οχήματα αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ανθρώπινης δραστηριότητας. Έχουν έναν σημαντικό αριθμό εφαρμογών όπως μεταφορές ατόμων και εμπορευμάτων, λήψη βίντεο και φωτογραφιών, πυρόσβεση και πληθώρα στρατιωτικών εφαρμογών. Πιο προηγμένες εφαρμογές αποτελούν η διάσωση μετά από φυσικές καταστροφές, η δασοπροστασία, η παράδοση δεμάτων κατ' οίκων και ο αεροψεκασμός καλλιερχειών, η αναγνώριση προτύπων και ακολούθηση στόχου χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, αλλά και η σπορά δασών και χωραφιών, στις οποίες τα drones αναλαμβάνουν ρόλους οι οποίοι ανήκαν πιο παλιά σε ελικόπτερα ή αεροπλάνα, ή ακόμα και ρόλους για τους οποίους δεν ήταν ποτέ ικανά.

Επιπλέον, μέσω νέων τεχνολογιών είναι ικανή όχι μόνο η προσομοίωση τέτοιων συστημάτων, αλλά και η αλλαγή του περιβάλλοντος τους σε πραγματικό χρόνο ώστε να είναι δυνατή η παρατήρηση αλλαγών στο ψηφιακό τους ανάλογο και η αποφυγή ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων στο φυσικό κομμάτι του συστήματος αυτού, με την χρήση του ψηφιακού διδύμου.

## Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι τόσο η φυσική υλοποίηση ενός ΣμηΕΑ, όσο και η μοντελοποίηση του ελεγκτή πτήσης του μέσω του πακέτου Simulink για το MATLAB. Εν συνεχεία, θα γίνει προσπάθεια για την δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου του ΣμηΕΑ μέσω της τεχνικής του Model-based Design και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων αυτής της προσπάθειας μέσω προγράμματος προσομοίωσης.

## Σκοπός και στόχοι

Σκοποί αυτής της εργασίας είναι:

- Επαρκής κατανόηση της λειτουργίας ενός φυσικού συστήματος ΣμηΕΑ
- Κατανόηση των αρχών του Model-based Design, Software-in-the-loop, Hardware-in-the-loop
- Μοντελοποίηση τμήματος ενός ελεγκτή πτήσης στο Simulink
- Προσομοίωση του μοντέλου Simulink μέσω ενός προγράμματος οπτικοποίησης

## Μεθοδολογία

Ακολουθήθηκαν οι αρχές του Model-based Design για την προσομοίωση του ελεγκτή πτήσης στο Simulink, αφού βεβαιώθηκε η πλήρης λειτουργικότητα του φυσικού αντικειμένου (ΣμηΕΑ) και αφού έγινε η προσομοίωση μέχρι το σημείο του Software-in-the-Loop έγινε οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων με το jMAVSim.

## **Καινοτομία**

Η καινοτομία αυτής της εργασίας έγκειται στην προσπάθεια δημιουργίας ψηφιακού διδύμου για τον ελεγκτή πτήσης FMUK66 χρησιμοποιώντας την τεχνική του Model-based Design και χρησιμοποιώντας τόσο τον ελεγκτή, όσο και το υλικολογισμικό PX4 για προσπάθεια προσομοίωσης software-in-the-loop και hardware-in-the-loop.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Τι Είναι ΣμηΕΑ

Για του σκοπούς αυτής της εργασίας, είναι πολύ σημαντικό αρχικά να ορίσουμε τι σημαίνει Σύστημα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους (ή ΣμηΕΑ, σύμφωνα με την ΥΠΑ): Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο περιλαμβάνει:

- Το μη επανδρωμένο αεροσκάφος
- Σταθμό ελέγχου εδάφους
- Εξοπλισμό επικοινωνίας μεταξύ τους
- Φορτίο (payload) το οποίο είναι ανάλογο της αποστολής που έχει αναλάβει το ΣμηΕΑ (σπορά, λήψη βίντεο) (το φορτίο δεν είναι απαραίτητο τμήμα του ΣμηΕΑ)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Ιστορική Αναδρομή

Αυτή η εργασία πρόκειται να ασχοληθεί με την προσομοίωση ενός Συστήματος μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους. Κρίθηκε σκόπιμη λοιπόν μια μικρή αναδρομή στην ιστορία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών, καθώς και της εξέλιξης τους στο χρόνο, από τα πρώτα πρωτότυπα που θα μπορούσαν με τα σημερινά δεδομένα να θεωρηθούν Συστήματα μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους μέχρι τις μέρες μας.

### 2.1 Α' Π.Π.

Από την εφεύρεση του αεροσκάφους, αρχικά, και για την μελέτη και βελτίωση του εν συνεχεία, έχουν απασχοληθεί χιλιάδες μηχανικοί διαφόρων ειδικοτήτων εδώ και δεκαετίες.

Ενδιαφέρον έχει το γεγονός πώς η ιδέα για την υλοποίηση ιπτάμενων οχημάτων τα οποία δεν θα χρειαζόντουσαν ανθρώπινο πλήρωμα και θα πλοηγούνταν εξ 'αποστάσεως εντοπίζεται στα χρόνια του Α' Παγκοσμίου Πολέμου με την ιδέα μη επανδρωμένων αεροσκαφών που θα επιτίθονταν σε αερόπλοια. Την Τετάρτη, 21<sup>η</sup> Μαρτίου 1917 το Royal Flying Corps (RFC, πρόγονος της RAF) απογείωσε το πρώτο μη επανδρωμένο αεροσκάφος το οποίο δεχόταν εντολές μέσω ραδιοσημάτων. Επρόκειτο για αεροπλάνα κανονικού μεγέθους, τα οποία ελέγχονταν από το έδαφος και είχαν χαρακτηριστεί ως «ιπτάμενοι στόχοι» για λόγους ασφαλείας, όμως είχαν αναπτυχθεί με σκοπό να μεταφέρουν εκρηκτικά για να χτυπήσουν εχθρικά αερόπλοια, θα χρησιμοποιούνταν δηλαδή ως kamikaze drones σύμφωνα με πιο σύγχρονη ορολογία [1].

Στην πράξη η χρήση των πρώτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών ήταν ως εναέριοι στόχοι για πληρώματα αντιαεροπορικών στοιχείων[2].

### 2.2 Μεσοπόλεμος και Β' Π.Π.

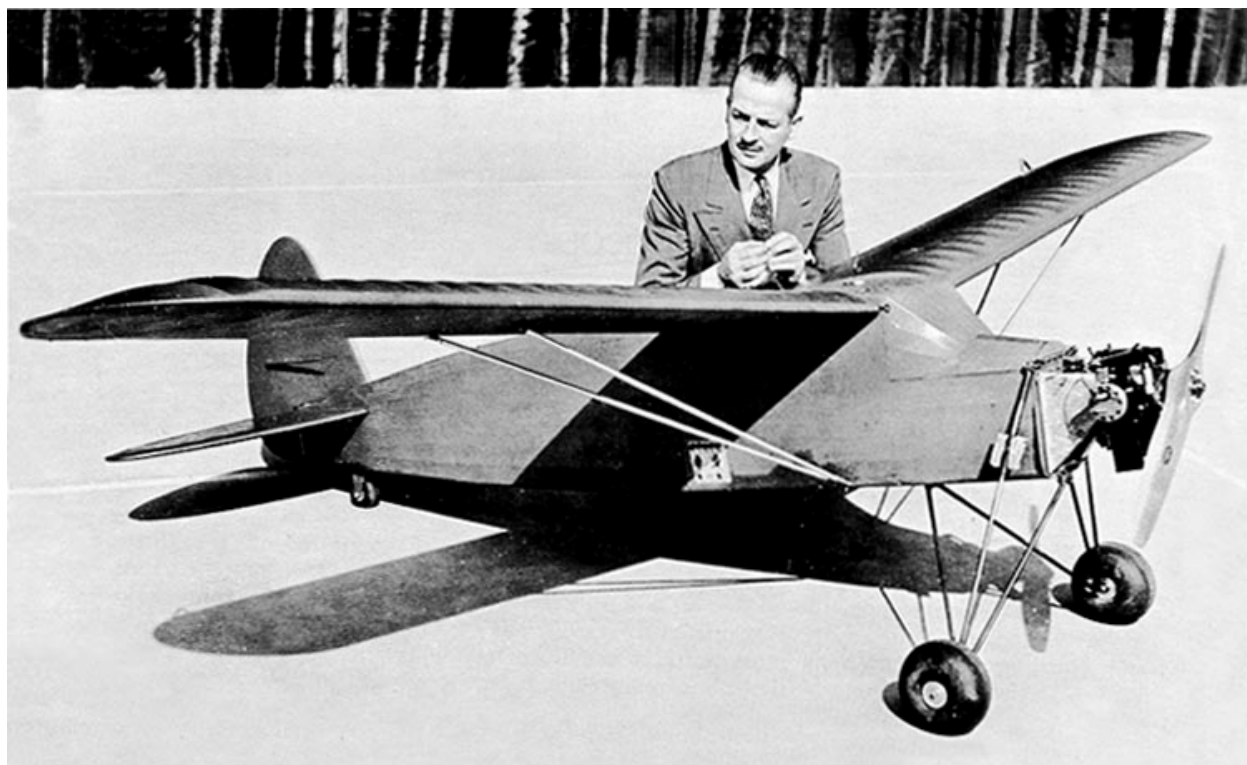
Κατά τον μεσοπόλεμο, η εξέλιξη των ΣμηΕΑ παρέμεινε όπως και στον Α' Π.Π. κυρίως σε στρατιωτικό επίπεδο. Εξετάστηκαν εφαρμογές όπως η μεταφορά μηνυμάτων μεταξύ αρχηγείων από τον Αμερικανικό Στρατό, αλλά η τεχνολογία της εποχής δεν επέτρεψε την υλοποίηση της σε



ικανοποιητικό επίπεδο. Σε αυτήν την εφαρμογή εξετάστηκε η χρήση πλοήγησης μέσω ραδιοσημάτων, η οποία θα αντικαθιστούσε το προηγούμενο αδρανειακό σύστημα πλοήγησης [2].

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1930 η Βρετανία είχε ήδη έναν μεγάλο στόλο αεροσκαφών βασισμένα στο αεροσκάφος de Havilland DH.82 Tiger Moth (συγκεκριμένα τα DH.82 Queen Bee), τα οποία ελέγχονταν από χειριστές οι οποίοι βρίσκονταν στο έδαφος[1].

Την ίδια περίοδο στις ΗΠΑ αναπτύχθηκε η Radioplane Company από τον ηθοποιό Reginald Denny, η οποία παρήγαγε κι αυτή τηλεκατευθυνόμενους στόχους από το 1934. Σε αντίθεση με τις άλλες προσπάθειες κατασκευής «πρωτόγονων» ΣμΕΑ, η ανάπτυξη των συστημάτων της Radioplane έχει πολιτικές και όχι στρατιωτικές καταβολές[2].



Εικόνα 2.2.1: ο Reginald Denny με το Radioplane-1 (RP-1) [84]

Στη Γερμανία, ο Δρ. Fritz Gossiau της Argus Motor Works σχεδίασε το FZG-43 (Flakzielgerat-43), το οποίο ήταν, όπως και η πλειοψηφία των drones της εποχής, ένας ιπτάμενος στόχος. Ο ίδιος πρότεινε και ένα σύστημα στο οποίο ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος θα έφερε φορτίο ενός τόνου και θα ελεγχόταν από ένα επανδρωμένο αεροσκάφος όμοιου τύπου[2]. Αν και η ιδέα αυτή δεν θα έφτανε στην υλοποίηση, είναι μια από τις πρώτες απόπειρες για δημιουργία ΣμΕΑ το οποίο δεν ήταν ιπτάμενος στόχος, ούτε σύστημα kamikaze (με σημερινούς όρους θα ήταν UCAV, δηλαδή unmanned combat aerial vehicle).

Ενδιαφέρον έχει ότι σε αυτήν την περίοδο, η ανάπτυξη των drones ήταν συνδεδεμένη με αυτή των βαλλιστικών πυραύλων.

### 2.3 Μετά τον Β' Π.Π.

Τη δεκαετία του 1950 τα ΣμηΕΑ χρησιμοποιούνταν με αυξανόμενη συχνότητα ως ιπτάμενοι στόχοι, αλλά η ανάπτυξη αεροσκαφών δίχως πιλότο επικεντρωνόταν κυρίως σε βαλλιστικούς πυραύλους. Αυτό άλλαξε στα μέσα της δεκαετίας όταν τα πρώτα ΣμηΕΑ, βασισμένα στο Radioplane RP-71, άρχισαν να εξοπλίζονται με κάμερες για τον ρόλο της αναγνώρισης. Αυτά ονομάστηκαν AN/USD-1 και ήταν τα πρώτα επιτυχημένα UAV αναγνώρισης.



Εικόνα 2.3.1: Το AN/USD-1 [85]

Κατά τις επόμενες δεκαετίες, οι χώρες οι οποίες ήταν οι κύριοι παίκτες κατά την διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, συνέχισαν να εξελίσσουν τα συστήματα ΣμηΕΑ τους καθώς οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των αντιαεροπορικών μέσων έκαναν ριψοκίνδυνη την χρήση επανδρωμένων αεροσκαφών για αναγνώριση. Είναι ενδιαφέρον πως ενώ το Ηνωμένο Βασίλειο ήταν η πρώτη χώρα που ανέπτυξε και χρησιμοποίησε ΣμηΕΑ, έμεινε πίσω στην ανάπτυξή τους μετά το πέρας του Β' Π.Π. [2]

Κατά τις πρώτες δεκαετίες του Ψυχρού Πολέμου και μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980, τα ΣμηΕΑ πλοηγούνταν μέσω προγραμματισμένων διαδρομών στον ελεγκτή πτήσης τους. Αυτό άλλαξε καθότι οι εξελίξεις στον τομέα των ηλεκτρονικών (μικροεπεξεργαστές, μικροελεγκτές και αισθητήρες) επέτρεψαν στα ΣμηΕΑ να εξοπλίζονται με πιο ακριβείς αισθητήρες, οθόνες και συστήματα, με αποτέλεσμα αυτή η μέθοδος να αντικατασταθεί, εν μέρει, από πλοήγηση μέσω ραδιοσημάτων (κυρίως RADAR). Η υβριδική μορφή πλοήγησης ήταν η πιο συνηθισμένη, δηλαδή το αεροσκάφος εκτελούσε αυτόνομα ένα μέρος της διαδρομής και ο πιλότος αναλάμβανε τον έλεγχο όταν έφτανε στην περιοχή ενδιαφέροντος. Ο έλεγχος μέσω ραδιοσημάτων είχε πολλούς περιορισμούς, καθώς μπορούσε να χαθεί λόγω καιρού (π.χ. βροχής, έντονου ανέμου) και χαρακτηριστικών του γεωγραφικού τοπίου. Ο έλεγχος του ΣμηΕΑ μπορούσε να γίνεται είτε μέσω αεροσκάφους, είτε από το έδαφος (οι περιορισμοί στον έλεγχο από έδαφος ήταν σαφώς σημαντικά αυξημένοι). Την δεκαετία του 1990 έχουμε πλέον καθοδήγηση μέσω δορυφόρων [2].

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990 έχουμε πλέον την πρώτη (σύγχρονη) μελέτη UCAV (uninhabited combat air vehicle) από την Αμερικανική Αεροπορία και το Αμερικανικό Ναυτικό, με πολλές χώρες (για παράδειγμα Γαλλία, Ρωσία, Γερμανία) να δείχνουν ενδιαφέρον για παρόμοια προγράμματα μέσα στην επόμενη δεκαετία. Ένα από τα αποτελέσματα αυτού του προγράμματος ήταν το MQ-9 Reaper [2].



Εικόνα 2.3.2: MQ-9 Reaper [86]

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, η αυξανόμενη πρόοδος στον τομέα των ηλεκτρονικών, η οποία επέφερε σμίκρυνση εξαρτημάτων (όπως αισθητήρες και κάμερες) έχει επιτρέψει την εξέλιξη των λεγόμενων mini-UAVs (**miniature Unmanned Aerial Vehicles**) και micro-UAVs, τα οποία έχουν πληθώρα στρατιωτικών εφαρμογών όπως να κουβαλούν παρεμβολείς σημάτων ή παρακολουθήση και αναγνώριση (η σημαντική διαφορά με τα κανονικά ΣμηΕΑ είναι ότι σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα βρίσκεται πολύ πιο κοντά στο έδαφος και λειτουργεί σε πολύ πιο άμεση συνεργασία με τον χειριστή) [4].



Εικόνα 2.3.3: Πολωνικό FlyEye mini-UAV της WB Electronics [87]

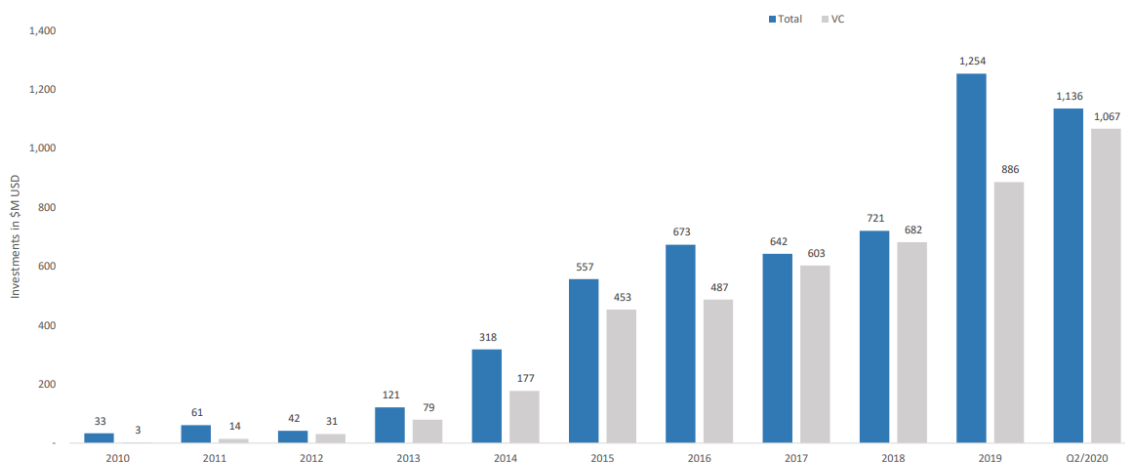


Εικόνα 2.3.4: Black Hornet nano-UAV [88]

## 2.4 Στην Πολιτική Ζωή

Τα ΣμηΕΑ εισήλθαν στην σύγχρονη πολιτική ζωή (τουλάχιστον σε βαθμό ο οποίος είναι παρατηρήσιμος) περίπου το 2013, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

## How much was invested?



Source: Droneii.com Investment database (c) by Drone Industry Insights

DRONEII.COM  
DRONE INDUSTRY INSIGHTS

UNC2020

© DRONE INDUSTRY INSIGHTS 2020 |

Εικόνα 2.4.1: Ανάπτυξη αγοράς ΣμηΕΑ, έτη 2008-Q2 2020 [3]

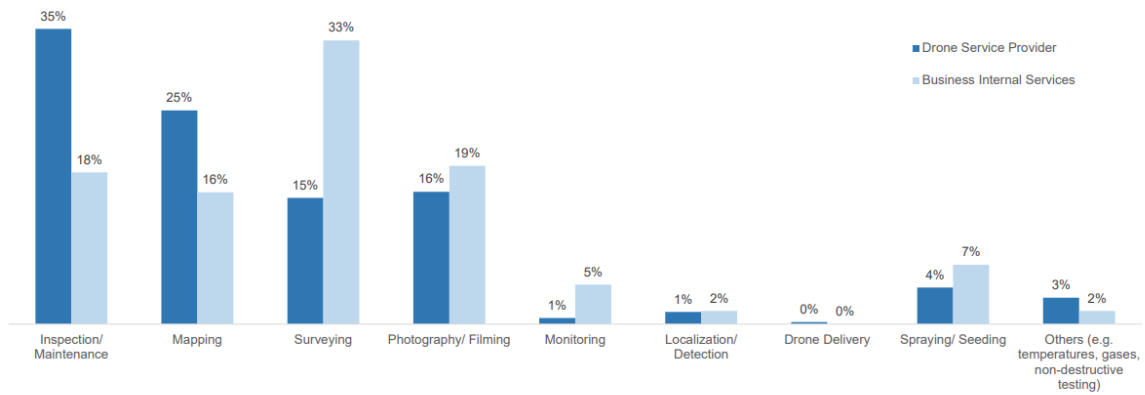
Όπως φαίνεται από τις στατιστικές, το έτος 2013 οι επενδύσεις στην αγορά ΣμηΕΑ σχεδόν τριπλασιάστηκαν σε σχέση με το 2012, και το 2014 σχεδόν διπλασιάστηκαν σε σχέση με το 2013. Επίσης, είναι ευκόλως παρατηρήσιμο ότι από το έτος 2013 και μετά, οι επενδύσεις σε ΣμηΕΑ είναι σταθερά ανοδικές, ενώ πριν είχαμε διακυμάνσεις, κάτι που δείχνει αστάθεια στην αγορά του προϊόντος.

Από το 2013 η FAA (Federal Aviation Administration, Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπλοΐας) εισήγαγε την απαραίτητη νομοθεσία, η οποία θα επέτρεπε την ιδιωτική χρήση ΣμηΕΑ για εμπορικούς σκοπούς [5] (πριν από αυτή τη νομοθεσία, η άδεια χρήσης ΣμηΕΑ απαιτούσε την παρουσία μιας δημόσιας οντότητας ως σπόνσορα). Οι πρώτες χρήσεις ΣμηΕΑ για ιδιωτικούς σκοπούς περιορίζονταν κυρίως στο γύρισμα ταινιών [6] ή επιτήρηση [7].

Από τότε, μια σειρά εξελίξεων στη ρομποτική, την Τεχνητή Νοημοσύνη και τα ηλεκτρονικά, έχουν πολλαπλασιάσει τις χρήσεις των ΣμηΕΑ σε πληθώρα τομέων. Θα μπορούσε να πει κανείς πως δεν περνάει μια μέρα δίχως να εμφανιστεί μια νέα εφαρμογή για κάποιο ΣμηΕΑ. Το 2016 η Amazon έκανε την πρώτη παράδοση χρησιμοποιώντας ΣμηΕΑ [8], μια σημαντική εξέλιξη καθώς η παράδοση έγινε αυτόνομα.

Πλέον οι εφαρμογές των ΣμηΕΑ ποικίλουν, και εμφανίζονται σε τομείς που δύσκολα θα περίμενε κανείς, όπως δασοπροστασία, γεωργία, έρευνα και διάσωση αλλά και σε πιο «κλασικές» εφαρμογές όπως φωτογραφία.

## How companies use drones?



Source: Drone Industry Barometer 2020 (c) by Drone Industry Insights

DRONEII.COM  
DRONE INDUSTRY INSIGHTS

UNC2020

© DRONE INDUSTRY INSIGHTS 2020 |

Εικόνα 2.4.2: Κατανομή εφαρμογών ΣμηΕΑ, 2020 [9]



Εικόνα 2.4.3: Εξακόπτερο της εταιρίας DroneSeed ψεκάζει με ζιζανιοκτόνο μια περιοχή πριν την σπορά [89]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: Μηχανική της Πτήσης

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μια σύντομη εισαγωγή στις βασικές αρχές που διέπουν την πτήση ενός σκάφους. Είναι σημαντική η κατανόηση αυτών των αρχών σε ένα επαρκές επίπεδο πριν δουλέψει κανείς επάνω στον σχεδιασμό και την μοντελοποίηση ενός συστήματος το οποίο είναι ικανό για πτήση, τόσο για λόγους ευκολίας στην σχεδίαση αυτή αλλά και για λόγους ασφαλείας. Οι περισσότερες από τις αρχές αυτές, μας είναι γνωστές εδώ και εκατοντάδες χρόνια, αλλά ακόμα στηριζόμαστε σε αυτές για πάρα πολλές εφαρμογές.

### 3.1 Εισαγωγή

Από την αρχαιότητα, ένα από τα όνειρα του ανθρώπου ήταν να πετάξει. Αυτό έγινε πραγματικότητα τον 18<sup>ο</sup> αιώνα με την εφεύρεση των πρώτων αερόστατων. Χρειάστηκε να περάσουν άλλοι 2 αιώνες μέχρι ο άνθρωπος να πετάξει με την χρήση αεροπλάνου, για την εφεύρεση του οποίου είναι οι αδερφοί Wright (Orville Wright και Wilbur Wright). Βέβαια, είχε προηγηθεί ένας αιώνας τελειοποίησης της μηχανικής της πτήσης, με πληθώρα πειραμάτων από διάφορους επιστήμονες και μηχανικούς, χρησιμοποιώντας ανεμόπτερα και ιπτάμενες μηχανές που είχαν ως κινητήριο δύναμη τον ατμό. [10]

Από το μακρινό 1905 και την πρώτη πτήση του αεροπλάνου των αδερφών Wright, η εξέλιξη των ιπτάμενων κατασκευών ήταν ραγδαία με την δημιουργία πολλών διαφορετικών μέσων, οι οποίες όμως ήταν βασισμένες στις ίδιες αρχές. Σε αυτήν την ενότητα θα συζητηθούν οι βασικές αυτές αρχές.

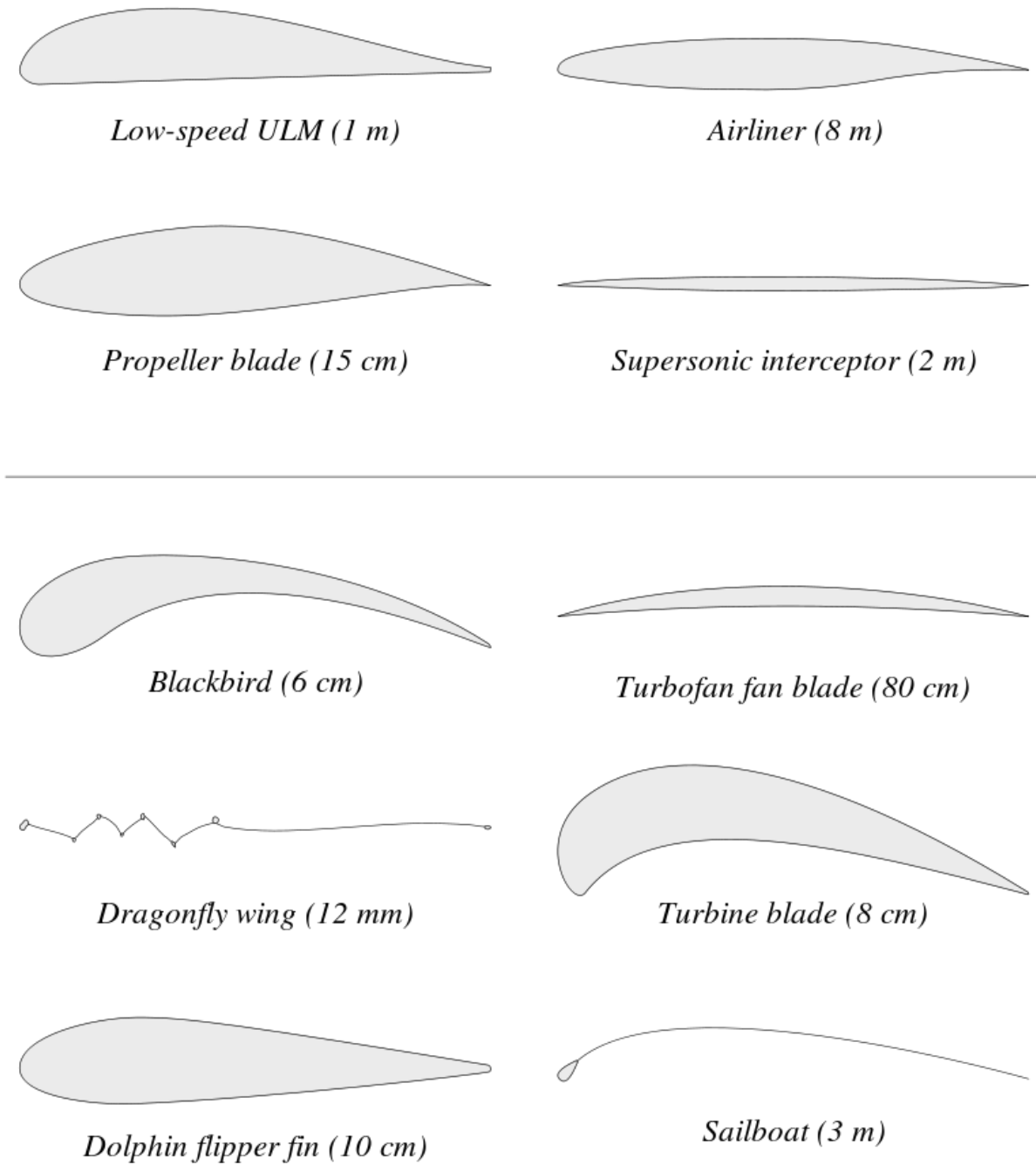
### 3.2 Βασικά Στοιχεία και Ορισμοί

Η βασικότερη ίσως έννοια που πρέπει να οριστεί για να γίνει κατανοητό το φαινόμενο της πτήσης, είναι η αεροδυναμική. Η λέξη αεροδυναμική προέρχεται από τις λέξεις «αήρ» (αέρας) και «δυναμική» και ορίζεται ως η μελέτη της κίνησης του αέρα, συγκεκριμένα όταν επηρεάζεται από ένα στερεό αντικείμενο όπως το φτερό ενός αεροπλάνου ή η έλικα ενός ελικοπτέρου. Αποτελεί μέρος της Δυναμικής Ρευστών και του υποπεδίου αυτής, Δυναμικής Αερίων και είναι ένα σημαντικό πεδίο μελέτης της αεροναυτικής. Η μελέτη της αεροδυναμικής με την σύγχρονη έννοια ξεκίνησε τον 18<sup>ο</sup> αιώνα, αλλά διάφορα φαινόμενα τα οποία σχετίζονται με αυτήν είχαν παρατηρηθεί πολύ νωρίτερα. [11]

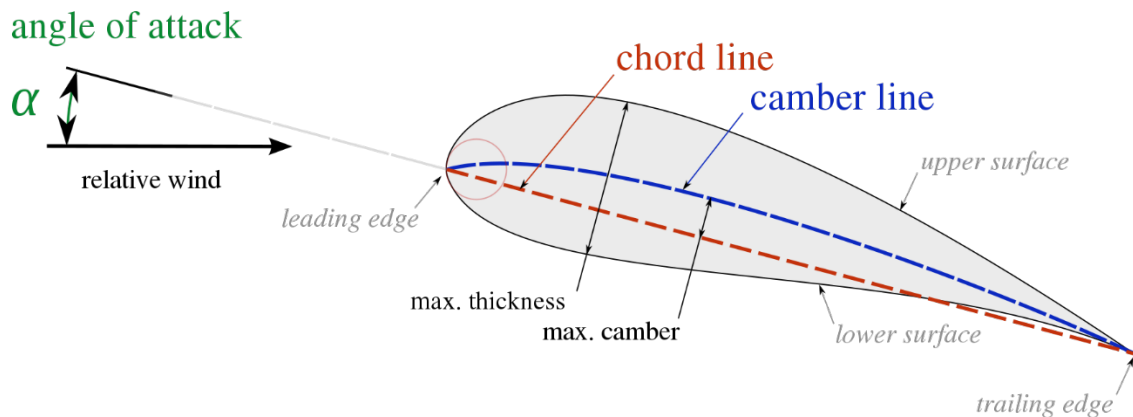
#### 3.2.1 Αεροτομή

Μια αεροτομή είναι μορφή πτέρυγας, λεπίδας (ενός έλικα, ενός στροφείου ή ενός στροβίλου) ή ιστίου. Μια αεροτομή που κινείται μέσα σε ένα ρευστό υπό την κατάλληλη κλίση, παράγει αεροδυναμική δύναμη. Η συνιστώσα της δύναμης που είναι κάθετη προς την κίνηση ονομάζεται άντωση, ενώ η συνιστώσα που είναι παράλληλη προς την κατεύθυνση της κίνησης ονομάζεται οπισθέλκουσα. Οι αεροτομές είναι σχεδιασμένες και κατασκευασμένες κατά τέτοιον τρόπο ώστε η άντωση να είναι πολύ μεγαλύτερη της οπισθέλκουσας προς όφελος του συστήματος στο οποίο χρησιμοποιούνται. [12]





Εικόνα 3.2.1.1 Παραδείγματα αεροτομών στη φύση και σε διάφορα οχήματα



Εικόνα 3.2.1.2 Αεροτομή

Στην παραπάνω εικόνα που είναι παρμένη από την Wikipedia μπορούμε να παρατηρήσουμε το σχέδιο μιας αεροτομής με τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω της. Βλέπουμε πως το  $\alpha$  είναι η γωνία επίθεσης του σχετικού αέρα προς την αεροτομή, τις γραμμές chord (γραμμή πλάτους πτερυγίου) και camber (γραμμή καμπύλης). Μπορούμε να παρατηρήσουμε πως το μέγιστο πλάτος της αεροτομής είναι μετατοπισμένο προς τα εμπρός, διότι εκεί ασκείται η περισσότερη δύναμη. Η αεροτομή πρέπει να είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε οι δυνάμεις που της ασκούνται να μην υπερβαίνουν το όριο φορτίου της. Εάν η γραμμή καμπύλης είναι πάνω από την γραμμή πλάτους πτερυγίου τότε παρατηρείται ανύψωση του αεροσκάφους, ενώ σε αντίθετη περίπτωση κάθοδος του. Η γωνία  $\alpha$  μπορεί να λάβει τιμές ανάμεσα στις  $0^\circ$  και τις  $90^\circ$ . Το σχήμα των αεροτομών αλλάζει αναλόγως της ταχύτητας στην οποία θέλουμε να λειτουργήσει: σε υποηχητικές ταχύτητες συνήθως έχουμε στρογγυλεμένη μπροστινή άκρη, ενώ σε υπερηχητικές προτιμάται αιχμηρή μπροστινή άκρη (όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα στο σχήμα του supersonic interceptor). Μεταξύ της βάσης του φτερού και του πτερυγίου δημιουργούνται κυκλώσεις αέρα όσο αυξάνεται η ταχύτητα του συστήματος, πράγμα το οποίο προκαλεί κραδασμούς στην αεροτομή και άρα στο συνολικό σύστημα. Αυτό το χαρακτηριστικό συστροφής των φτερών ονομάζεται washout και σκοπό έχει να διαφοροποιήσει την κατανομή της δύναμης ανύψωσης καθ' όλο το μήκος των φτερών ώστε η γωνία υπεκφυγής να συμβαίνει αρχικά στο κέντρο του φτερού και με περαιτέρω αύξηση της στις άκρες του. Το αποτέλεσμα αυτού είναι ότι η γωνία επίθεσης είναι πιο μεγάλη στη ρίζα της αεροτομής (το σημείο σύνδεσης της με την άτρακτο) από ότι στο άκρο.

### 3.3 Αρχή του Bernoulli

Η αρχή Bernoulli είναι μια βασική έννοια στην μηχανική ρευστών η οποία συνδυάζει την πίεση, την ταχύτητα και το ύψος. Η αρχή αυτή δηλώνει ότι μια αύξηση στην ταχύτητα ενός ρευστού συμβαίνει ταυτόχρονα με μια μείωση της στατικής πίεσης ή της δυναμικής ενέργειας του ρευστού.

Η αρχή Bernoulli μπορεί να προέλθει από την αρχή της διατήρησης της ενέργειας: σε μια σταθερή ροή, το άθροισμα όλων των μορφών ενέργειας σε ένα ρευστό είναι το ίδιο σε όλα τα σημεία που είναι απαλλαγμένα από ιξώδεις δυνάμεις. Αυτό απαιτεί το άθροισμα της κινητικής ενέργειας, της δυναμικής ενέργειας και της εσωτερικής ενέργειας να παραμένει σταθερό. Έτσι, μια αύξηση στην ταχύτητα του ρευστού —που συνεπάγεται αύξηση της κινητικής του ενέργειας— συμβαίνει με ταυτόχρονη μείωση στο (το άθροισμα) από τη δυναμική του ενέργεια (συμπεριλαμβανομένης της στατικής πίεσης) και την εσωτερική του ενέργεια. Μπορεί επίσης να προέλθει από τον Δεύτερο Νόμο Κίνησης του Νεύτωνα.[14]

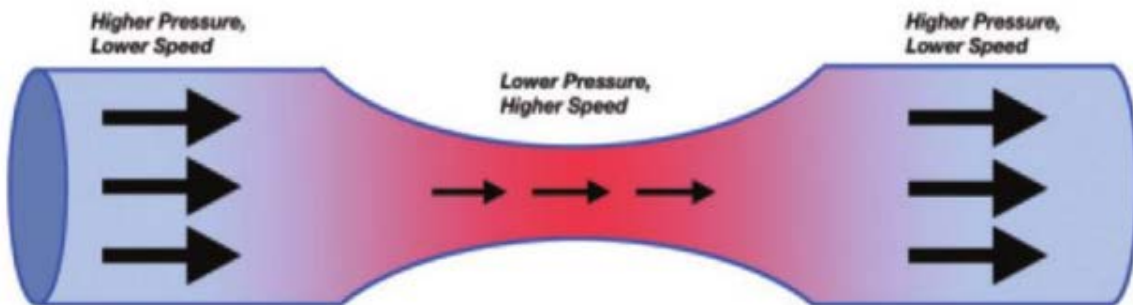
Μια συνήθης μορφή της εξίσωσης Bernoulli είναι η εξής:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{σταθερό (1)}$$

Όπου:

- P η πίεση του ρευστού
- ρ η πυκνότητα του ρευστού
- v η ταχύτητα του ρευστού
- g η σταθερά επιτάχυνσης της βαρύτητας
- h το ύψος του ρευστού σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς [13]

Η εξίσωση Bernoulli ισχύει για υγρά και αέρια σε χαμηλή ταχύτητα διότι η πυκνότητα τους μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφη. Το ρευστό τότε μπορεί να θεωρηθεί ασυμπίεστο, και η εξίσωση Bernoulli ισχύει για αυτό. [14]



Εικόνα 3.3.1 Απεικόνιση της Αρχής του Bernoulli

### 3.4 Γυροσκοπική Κίνηση

Γυροσκοπική κίνηση ή το φαινόμενο του γυροσκοπίου είναι η τάση ενός περιστρεφόμενου αντικείμενου να διατηρεί τον προσανατολισμό της περιστροφής του. Ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο έχει γωνιακή ορμή και αυτή η ορμή πρέπει να διατηρηθεί. Το αντικείμενο θα αντισταθεί σε οποιαδήποτε αλλαγή στον άξονα περιστροφής του, καθώς μια αλλαγή στον προσανατολισμό θα οδηγήσει σε αλλαγή της γωνιακής ορμής

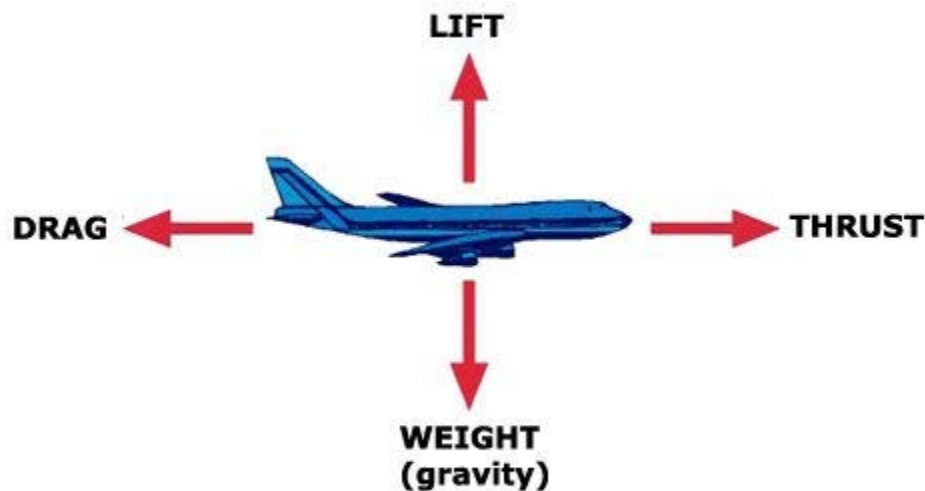
Η γυροσκοπική κίνηση χρησιμοποιείται σε αδρανειακά συστήματα πλοήγησης αεροσκαφών και διαστημοπλοίων. [15]

Ο κύριος ρότορας ενός ελικοπτέρου λειτουργεί σαν γυροσκόπιο. Η κίνησή του επηρεάζεται από την αρχή της γυροσκοπικής μετάπτωσης, η οποία είναι η έννοια ότι μια δύναμη που εφαρμόζεται σε ένα περιστρεφόμενο αντικείμενο θα έχει μέγιστη αντίδραση περίπου 90 μοίρες αργότερα. Η αντίδραση μπορεί να διαφέρει από 90 μοίρες όταν παίζουν άλλες ισχυρότερες δυνάμεις. Για να αλλάξουν κατεύθυνση, τα ελικόπτερα πρέπει να προσαρμόσουν τη γωνία κλίσης και τη γωνία επίθεσης. [16]

### 3.5 Οι τέσσερις βασικές δυνάμεις

Κατά την πτήση ενός αεροσκάφους ασκούνται σε αυτό πάρα πολλές δυνάμεις. Σε αυτήν την εργασία θα μας απασχολήσουν οι τέσσερις βασικότερες από αυτές:

το βάρος, η ώθηση, η άντωση και η οπισθέλκουσα.



Εικόνα 3.5.1 Δυνάμεις σε ένα αεροπλάνο [90]

Μπορούμε να παρατηρήσουμε στην παραπάνω εικόνα ότι οι δυνάμεις αυτές είναι μεταξύ τους αντίθετες, με την ώθηση να ασκείται σε αντίθετη φορά από την αεροδυναμική οπισθέλκουσα και την άντωση να είναι αντίθετη του βάρους. Προφανώς όταν η πτήση δεν είναι ομαλή, δηλαδή όταν έχουμε αυξομειώσεις στην ταχύτητα ή αλλαγή κατεύθυνσης η ισορροπία των δυνάμεων αυτών αλλάζει. Η κατανόηση αυτών των δυνάμεων είναι βασική για μηχανικούς και τεχνικούς οι οποίοι ασχολούνται με την πτήση σε κάθε επίπεδο. [17]

### 3.5.1 Βάρος

Το βάρος είναι η ελκτική δύναμη που ασκεί η Γη σε όλα τα αντικείμενα τα οποία βρίσκονται στο μέσα στο πεδίο βαρύτητας της. Το βάρος ασκείται πάντα με φορά το κέντρο της γης. Το βάρος ενός αεροσκάφους μετριέται αφού έχει συναρμολογηθεί πλήρως. Το βάρος πτήσης περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα για την πτήση, όπως καύσιμα αλλά και πιθανό φορτίο. Θεωρείται σταθερό στο χρόνο και σε κάθε υψόμετρο. Το βάρος πρέπει να είναι λιγότερο από τη δύναμη ανύψωσης κατά την απογείωση αλλά όχι και κατά την διάρκεια της πτήσης. [18]

### 3.5.2 Ώθηση

Η ώθηση είναι μια δύναμη αντίδρασης που περιγράφεται από τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα. Όταν ένα σύστημα σπρώχνει ή επιταχύνει τη μάζα προς μία κατεύθυνση, η επιταχυνόμενη μάζα θα προκαλέσει την εφαρμογή μιας δύναμης ίσου μεγέθους αλλά αντίθετης κατεύθυνσης σε αυτό το σύστημα. Η δύναμη που ασκείται σε μια επιφάνεια σε διεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια αυτή ονομάζεται επίσης ώθηση. Η δύναμη, και επομένως η ώθηση, μετράται χρησιμοποιώντας το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) σε Newton (N). Στη μηχανολογία, η δύναμη ορθογώνια ως προς το κύριο φορτίο αναφέρεται ως στατική ώθηση. [19]

### 3.5.3 Άνωση

Άντωση ή Δυναμική άνωση ενός σώματος που κινείται μέσα σε ένα ρευστό, είναι η συνιστώσα της δύναμης που ασκείται στο σώμα από το ρευστό, σε διεύθυνση κάθετη στην κίνηση του σώματος. Η μελέτη του φαινομένου της άντωσης εμπίπτει στον κλάδο της φυσικής που ονομάζεται "δυναμική των ρευστών". Η άντωση εμφανίζεται σε σώματα που παρουσιάζουν ασυμμετρία όταν τα εξετάζουμε κατά άξονα παράλληλο με την διεύθυνση της κίνησης. Στην περίπτωση αυτή λόγω διαφοράς ταχυτήτων του ρευστού μεταξύ δύο πλευρών του σώματος δημιουργείται δύναμη που ωθεί το σώμα προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Για να συμβεί κάτι τέτοιο το σώμα δεν θα πρέπει να είναι συμμετρικό ή αν είναι συμμετρικό θα πρέπει να περιστρέφεται και να περι-ρέεται ταυτόχρονα από το ρευστό. Μαθηματικά η δυναμική άνωση εκφράζεται ως:

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A U^2 \quad (2)$$

Όπου:

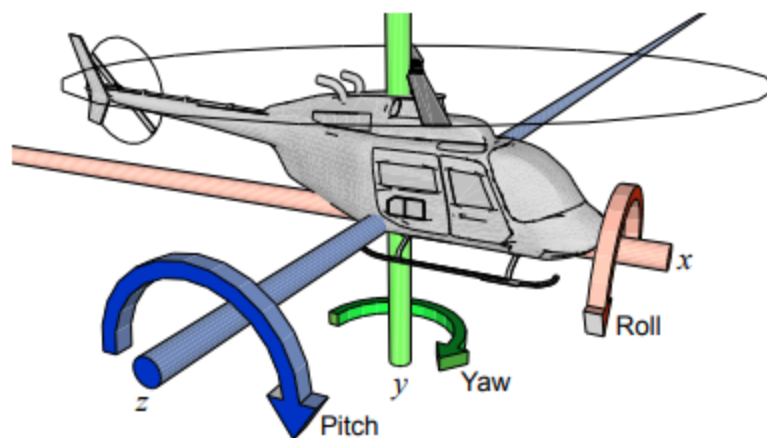
- $C_L$  ο συντελεστής άνωσης (Lift coefficient)
- $\rho$ : πυκνότητα ρευστού
- $A$ : επιφάνεια σώματος κάθετη στη ροή
- $U$ : ταχύτητα σώματος ως προς το ρευστό

### 3.5.4 Οπισθέλκουσα

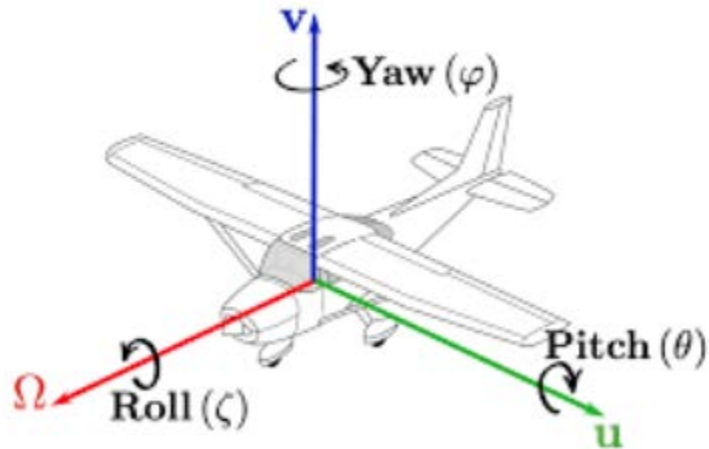
Στην αεροδυναμική, η αεροδυναμική οπισθέλκουσα (επίσης γνωστή ως αντίσταση αέρα) είναι η δύναμη έλξης ρευστού που δρα σε οποιοδήποτε κινούμενο στερεό σώμα προς την κατεύθυνση της ροής ελεύθερης ροής του αέρα.

### 3.6 Κλίση, Στρέψη και Κόλιση (Pitch, Yaw, Roll)

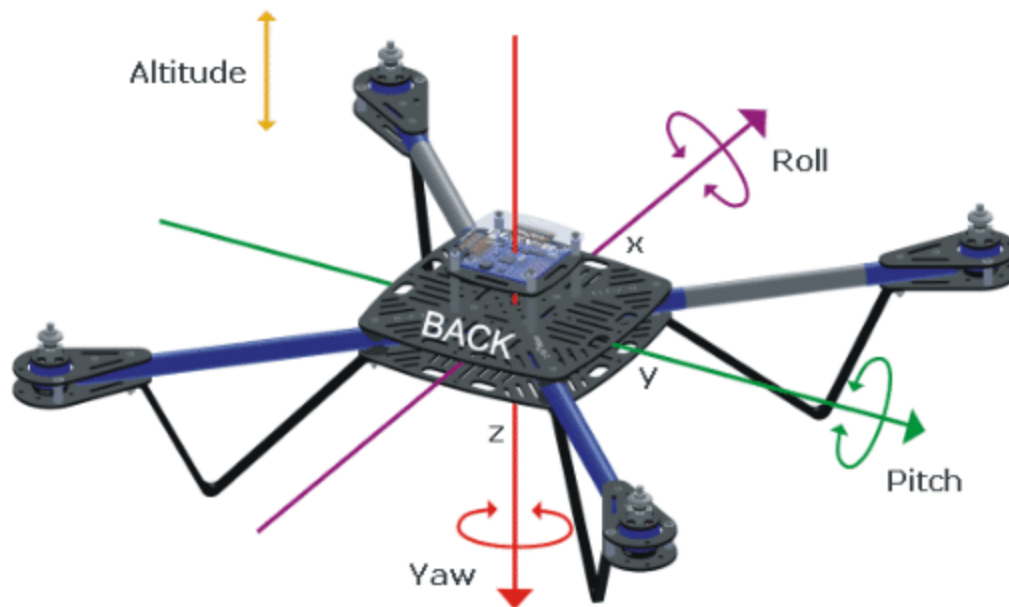
Κατά την πτήση οποιοδήποτε αεροσκάφους, ο χειριστής του (άνθρωπος ή όχι) καλείται να κατευθύνει το σκάφος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας σειράς συστημάτων ελέγχου τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν καλώδια, σερβοκινητήρες, πηδάλια και πτερύγια και διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο και την κατασκευή του εκάστοτε αεροσκάφους. Κάθε σύστημα αεροσκάφους έχει έξι βαθμούς ελευθερίας, τα λεγόμενα pitch (περιστροφή γύρω από το νοητό άξονα  $y$ ), yaw (περιστροφή γύρω από το νοητό άξονα  $z$ ) και roll (περιστροφή γύρω από το νοητό άξονα  $x$ ). Οι συντεταγμένες των αξόνων  $x$ ,  $y$ ,  $z$  δίνουν τη θέση του σώματος, ενώ τα pitch, yaw και roll μας δίνουν την κατεύθυνση του [20]. Οι επόμενες εικόνες βοηθούν στην κατανόηση αυτών των όρων.



Εικόνα 3.6.1: Τα pitch, yaw και roll όπως φαίνονται σε ένα μοντέλο ελικοπτερου (Lee & Shia – Introduction to Embedded Systems, σελίδα 20)



Εικόνα 3.6.2: Τα pitch, yaw και roll όπως φαίνονται σε ένα μοντέλο αεροπλάνου [91]



Εικόνα 3.6.3: Τα pitch, yaw και roll όπως φαίνονται σε ένα τετρακόπτερο [21]

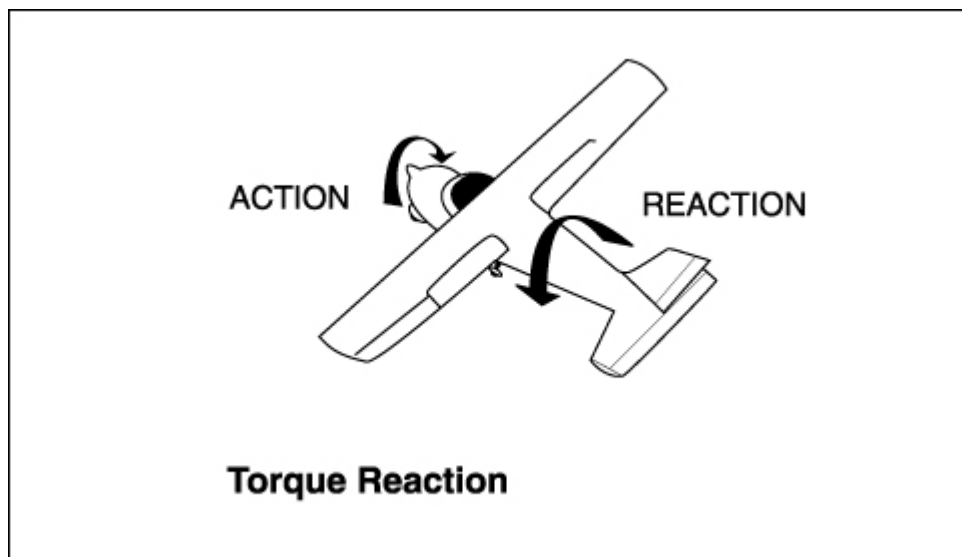
Όπως μπορούμε να δούμε στις εικόνες αυτές, φαίνεται πως η κλίση (pitch) ορίζεται από τον άξονα ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο του αντικειμένου, στο ορθοκανονικό σύστημα αξόνων συνήθως ο άξονας z όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα από το βιβλίο Lee & Shia - Introduction to Embedded Systems. Η στρέψη (yaw) είναι η κίνηση γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (συνήθως y) και η κύλιση (roll) η κίνηση γύρω από τον οριζόντιο άξονα (συνήθως x).

### 3.7 Αντίδραση Ροπής

Η αντίδραση ροπής παρατηρείται στα ελικόπτερα και στα μονοκινητήρια αεροσκάφη είναι συνέπεια του τρίτου νόμου κίνησης του Νεύτωνα, «για κάθε δράση, υπάρχει μια ίση και αντίθετη αντίδραση».

Στα ελικόπτερα, το φαινόμενο της ροπής αναγκάζει τον κύριο ρότορα να περιστρέφει την άτρακτο προς την αντίθετη κατεύθυνση από την περιστροφή του ρότορα. Ένας μικρός ουραίος ρότορας είναι η πιο κοινή διαμόρφωση για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου. Σε μερικές πιο σπάνιες υλοποιήσεις, χρησιμοποιούνται δύο ρότορες με αντίθετη κατεύθυνση περιστροφής. Αυτοί οι ρότορες μπορεί να είναι στον ίδιο άξονα ή σε διαφορετικούς άξονες επάνω στην άτρακτο του εκάστοτε οχήματος. Αυτό το φαινόμενο είναι και ο λόγος που οι κινητήρες ενός τετρακόπτερου έχουν αντίθετη κατεύθυνση περιστροφής ανά δύο.

Σε ένα μονοκινητήριο αεροσκάφος, η αντίδραση ροπής αναγκάζει την άτρακτο να στρίψει προς τα πάνω και προς τα αριστερά ως απόκριση στο ότι η έλικα στρέφει το επίπεδο προς την αντίθετη κατεύθυνση από τη δεξιόστροφη περιστροφή της έλικας. [22]



Εικόνα 3.7.1 Παράδειγμα της αντίδρασης ροπής σε ένα αεροσκάφος [23]





Εικόνα 3.7.2 Ελικόπτερο Piasecki H-21B με ρότορες σε διαφορετικούς άξονες [24]



Εικόνα 3.7.3 Ελικόπτερο Καμον Κα-50 με ομοαξονικές έλικες [25]



Εικόνα 3.7.4 Το ελικόπτερο Ingenuity της NASA, προοριζόμενο για τον Άρη[25]



Εικόνα 3.7.5 OnyxStar HYDRA-12, εξακόπτερο με 2 ομοαξονικές έλικες σε κάθε κινητήρα [27]

### 3.8 Φαινόμενο Εδάφους (Ground Effect)

Το φαινόμενο εδάφους επηρεάζει διαφορετικά τα αεροσκάφη με σταθερές πτέρυγες (fixed wing aircraft), τα ελικόπτερα και τα αεροσκάφη κάθετης απογείωσης (VTOLs). Θα γίνει μια μικρή

εισαγωγή για αυτές τις περιπτώσεις ξεχωριστά, ώστε να γίνει κατανοητή η σημασία του φαινομένου αυτού για τα ιπτάμενα οχήματα.

### **3.8.1 Φαινόμενο Εδάφους στα αεροσκάφη με σταθερές πτέρυγες**

Για αεροσκάφη σταθερών πτερύγων, το φαινόμενο εδάφους είναι η μειωμένη αεροδυναμική αντίσταση που δημιουργούν τα φτερά τους όταν βρίσκονται κοντά σε μια σταθερή επιφάνεια. Κατά την απογείωση, το φαινόμενο εδάφους μπορεί να κάνει το αεροσκάφος να «επιπλέει» ενώ είναι κάτω από την ταχύτητα ανάβασης. Ο πιλότος μπορεί στη συνέχεια να πετάξει ακριβώς πάνω από τον διάδρομο προσγείωσης ενώ το αεροσκάφος επιταχύνει μέσω του φαινομένου εδάφους μέχρι να επιτευχθεί η ταχύτητα ανάβασης.

Πιο αναλυτικά, όταν ένα αεροσκάφος πετά στο ή κάτω από το ήμισυ περίπου του μήκους του ανοίγματος των φτερών του αεροσκάφους πάνω από το έδαφος ή το νερό, εμφανίζεται ένα συχνά αισθητό φαινόμενο εδάφους. Το αποτέλεσμα είναι χαμηλότερη επαγόμενη οπισθέλκουσα στο αεροσκάφος. Αυτό προκαλείται κυρίως από το έδαφος ή το νερό που εμποδίζει τη δημιουργία στροβιλισμών στο άκρο των φτερών και την καταβατική ροή πίσω από το φτερό.

Ένα φτερό δημιουργεί ανύψωση εκτρέποντας την επερχόμενη αεροπορική μάζα προς τα κάτω. Η εκτροπή ή "στρεφόμενη" ροή του αέρα δημιουργεί μια προκύπτουσα δύναμη στο φτερό προς την αντίθετη κατεύθυνση (3ος νόμος του Νεύτωνα). Η προκύπτουσα δύναμη προσδιορίζεται ως ανύψωση. Πετώντας κοντά σε μια επιφάνεια, αυξάνει αυξάνεται η πίεση του αέρα στην κάτω επιφάνεια της πτέρυγας, βελτιώνοντας την αναλογία ανύψωσης προς βάρος του αεροσκάφους. Όσο πιο κοντά είναι το αεροσκάφος στο έδαφος, τόσο πιο έντονο γίνεται το φαινόμενο εδάφους. Όσο επηρεάζεται από το φαινόμενο εδάφους, ένα φτερό απαιτεί χαμηλότερη γωνία επίθεσης για να παράγει την ίδια ποσότητα ανύψωσης. Το φαινόμενο εδάφους μεταβάλλει επίσης την ώθηση έναντι της ταχύτητας, όπου η μειωμένη επαγόμενη οπισθέλκουσα απαιτεί λιγότερη ώθηση προκειμένου να διατηρηθεί η ίδια ταχύτητα.

Τα αεροσκάφη με φτερά τοποθετημένα χαμηλότερα στην άτρακτο επηρεάζονται περισσότερο από το φαινόμενο του εδάφους. Λόγω των φαινομένων που δημιουργούνται όσο το αεροσκάφος παραμένει σε φαινόμενο εδάφους, είναι πιθανόν τα όργανα να δείχνουν λάθος τιμές ταχύτητας εξαιτίας της τοπικής πίεσης του εδάφους.



Vortices fully formed at altitude



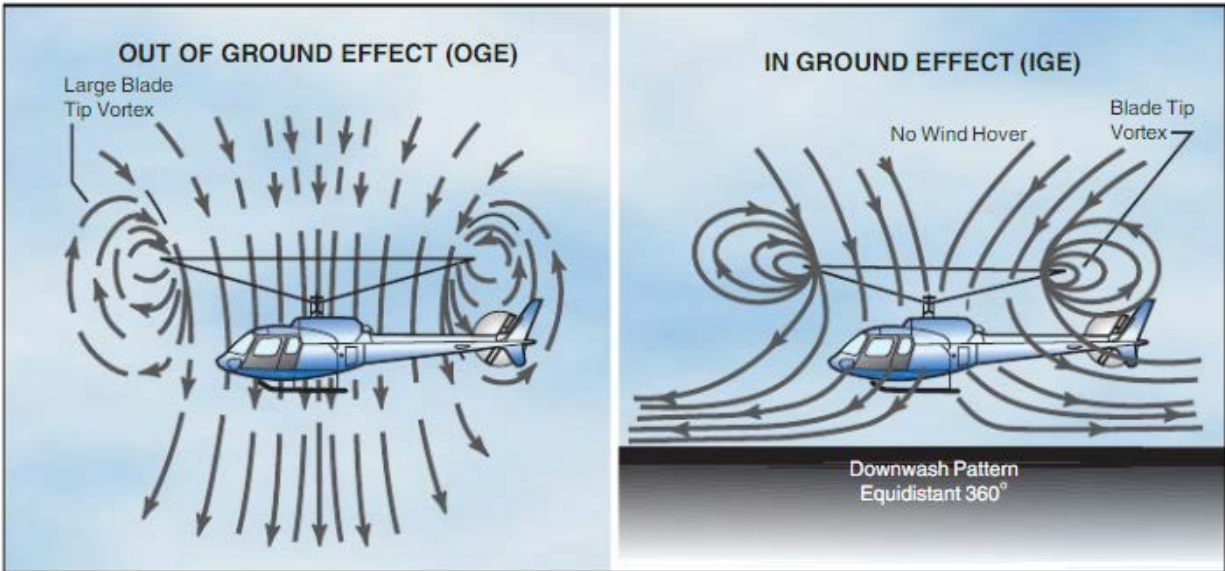
Vortices "compressed" near the ground

Εικόνα 3.8.1.1 Το φαινόμενο εδάφους σε ένα αεροπλάνο [29]

### 3.8.2 Φαινόμενο Εδάφους στα ελικόπτερα

Για τα ελικόπτερα, το φαινόμενο εδάφους έχει ως αποτέλεσμα λιγότερη αντίσταση στον έλικα κατά την αιώρηση κοντά στο έδαφος. Σε μεγάλα βάρη, αυτό μερικές φορές επιτρέπει στο στροφέιο να σηκωθεί ενώ είναι ακίνητο αλλά δεν του επιτρέπει να μεταβεί σε πτήση διότι σε μεγαλύτερη απόσταση από το έδαφος παύει το φαινόμενο εδάφους.

Όταν ένα ελικόπτερο είναι κοντά στο έδαφος, η ροή του αέρα μέσω του έλικα μηδενίζεται. Αυτό μειώνει την ισχύ που απαιτείται για την απογείωση, οπότε είναι εφικτό το ελικόπτερο να απογειωθεί ακόμα και με βάρη που δεν θα ήταν εφικτή η πτήση. Μερικά πρώιμα ελικόπτερα με χαμηλή ισχύ μπορούσαν να αιωρούνται μόνο κοντά στο έδαφος. Το φαινόμενο εδάφους είναι στο μέγιστο του πάνω από μια σταθερή, λεία επιφάνεια.

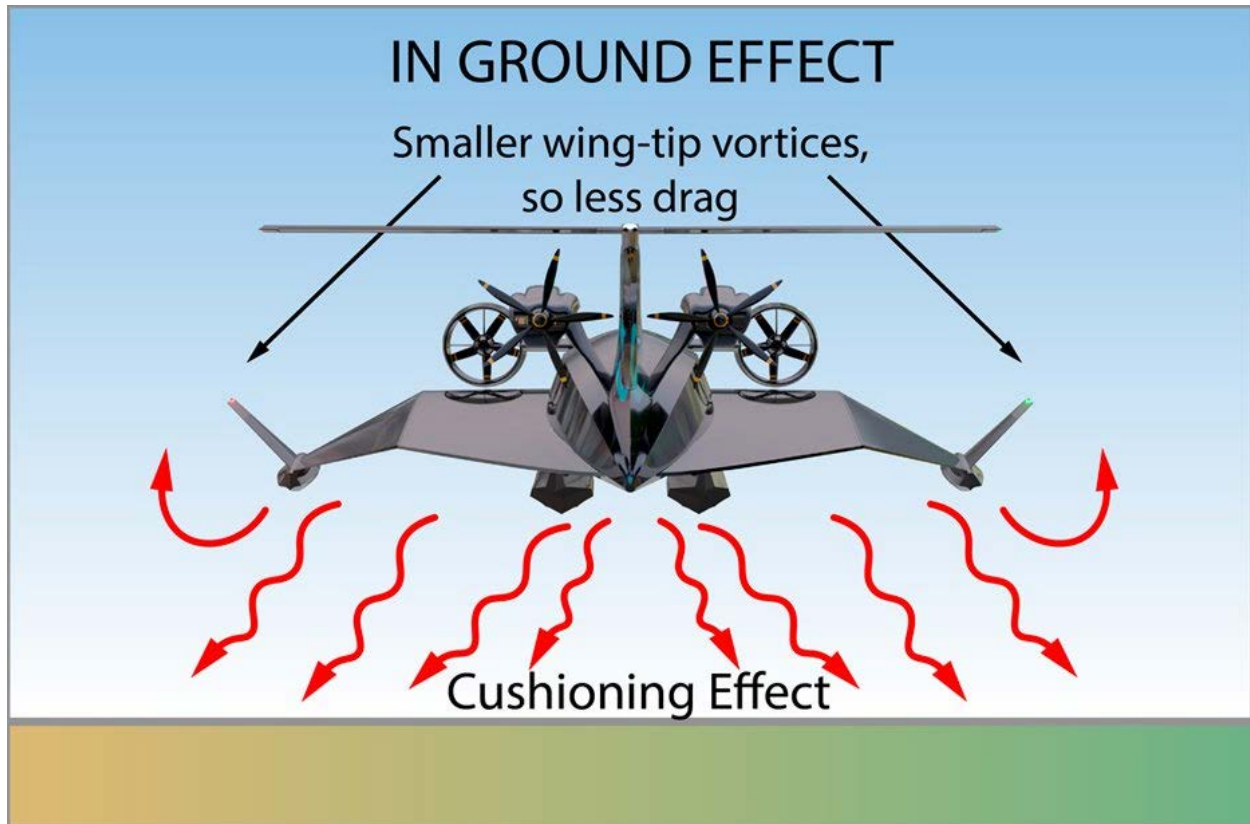


Εικόνα 3.8.2.1 Το φαινόμενο εδάφους σε ένα ελικόπτερο [28]

### 3.8.3 Φαινόμενο Εδάφους στα VTOLs

Για αεροσκάφη κάθετης απογείωσης και προσγείωσης (VTOL – Vertical Take Off and Landing) που λειτουργούν με turbofan και jet μηχανές, το φαινόμενο εδάφους μπορεί να προκαλέσει κάποια φαινόμενα γνωστά ως suckdown και fountain lift στο πλαίσιο του αεροσκάφους και απώλεια ώθησης αιώρησης εάν ο κινητήρας απορροφά τα δικά του καυσαέρια, το οποίο είναι γνωστό ως κατάποση θερμού αερίου (HGI).

Το πόσο καλά, όσον αφορά το πόσο βάρος ανυψώνεται, ένα αεροσκάφος VTOL αιωρείται εντός του φαινομένου εδάφους εξαρτάται από το φαινόμενο suckdown στην άτρακτο, την πρόσκρουση αερίων (fountain impingement) στην κάτω πλευρά της ατράκτου και το HGI στον κινητήρα που προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου (inlet temperature rise, ITR). Το φαινόμενο suckdown λειτουργεί ενάντια στην ανύψωση του κινητήρα ως δύναμη προς τα κάτω στην άτρακτο του αεροσκάφους ενώ το fountain lift λειτουργεί με το ρεύμα αέρος ανύψωσης του κινητήρα ως δύναμη προς τα πάνω. [26]



Εικόνα 3.8.3.1 Το φαινόμενο εδάφους σε ένα VTOL [30]

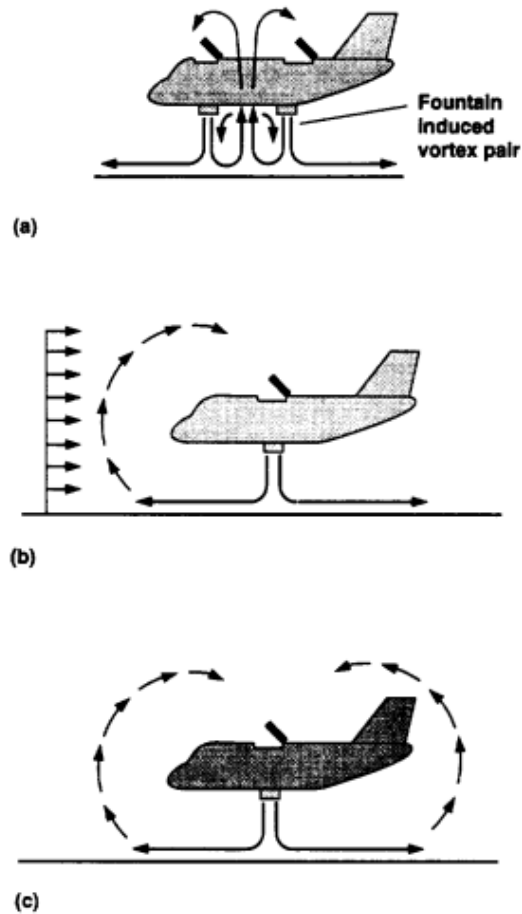


Figure 1. The general flow patterns which cause HGI. (a) Multiple-jet configuration, fountain effect; (b) single-jet configuration, wind effect; (c) single-jet configuration, buoyancy effect.

Εικόνα 3.8.3.2 Φαινόμενα αέρα και συντριβανιού σε ένα VTOL [31]

### 3.8.4 Οχήματα Φαινομένου Εδάφους

Ως κλείσιμο αυτού του κεφαλαίου, αξίζει να γίνει μια μικρή αναφορά στα λεγόμενα ground effect vehicles (GEVs). Αυτά είναι οχήματα τα οποία είναι σχεδιασμένα για πτήση μόνο με χρήση του φαινομένου εδάφους, γλιστρώντας πάνω από λείες επιφάνειες, συνήθως τη θάλασσα, αν και μερικά μπορούν να λειτουργούν πάνω από οποιαδήποτε λεία επιφάνεια όπως παγωμένες λίμνες ή πεδιάδες. [27]





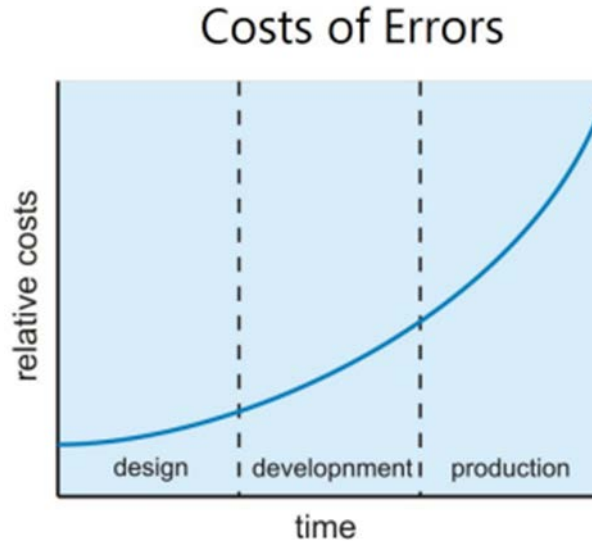
Εικόνα 3.8.4.1 Ekranoplan A-90 Orlyonok

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Model-Based Design και Digital Twins

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια παρουσίαση των αρχών του Model-based Design καθώς και των Digital Twins. Η εργασία αυτή βασίζεται στις αρχές του Model-based Design οπότε βασικές θεωρητικές γνώσεις πάνω στο τρόπο εργασίας που ακολουθείται στην τεχνική αυτή κρίνονται απαραίτητες.

### 4.1 Model Based Design

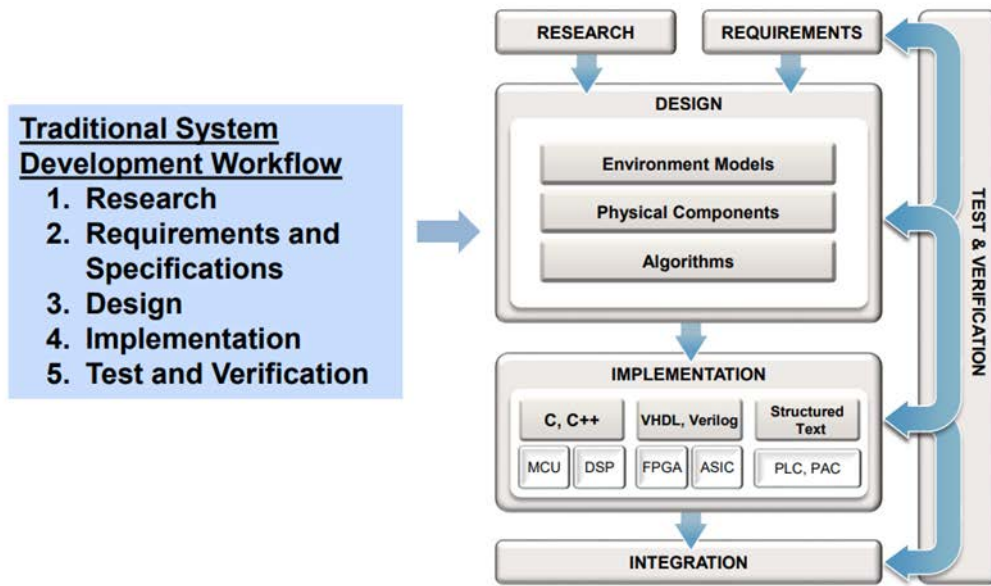
Η εργασία αυτή πρόκειται να υλοποιηθεί με την τεχνική του model-based design. Το model-based design είναι μια τεχνική η οποία αναπτύχθηκε για να ξεπεραστούν προβλήματα τα οποία αντιμετωπίζονταν κατά τον σχεδιασμό συστημάτων ελέγχου κλειστού βρόχου σε ενσωματωμένα συστήματα. Κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος, το λογισμικό συνήθως σχεδιάζεται και υλοποιείται πολύ πριν την δημιουργία φυσικών πρωτοτύπων, με αποτέλεσμα τυχόν λάθη και αστοχίες του να οδηγούν σε σημαντικές απώλειες χρόνου και χρήματος εάν ανακαλυφθούν κατά τα τελευταία στάδια της ανάπτυξης του συστήματος. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι κατά τις παραδοσιακές διαδικασίες σχεδιασμού, οι λεπτομέρειες και απαιτήσεις του σχεδίου μεταφέρονται μέσω κειμένου, το οποίο πολλές φορές είναι ανοιχτό σε παραπάνω από μία ερμηνείες, λόγω των πολλών επιστημονικών πεδίων τα οποία μπορεί εμπλέκονται στον σχεδιασμό ενός συστήματος ελέγχου. [32]



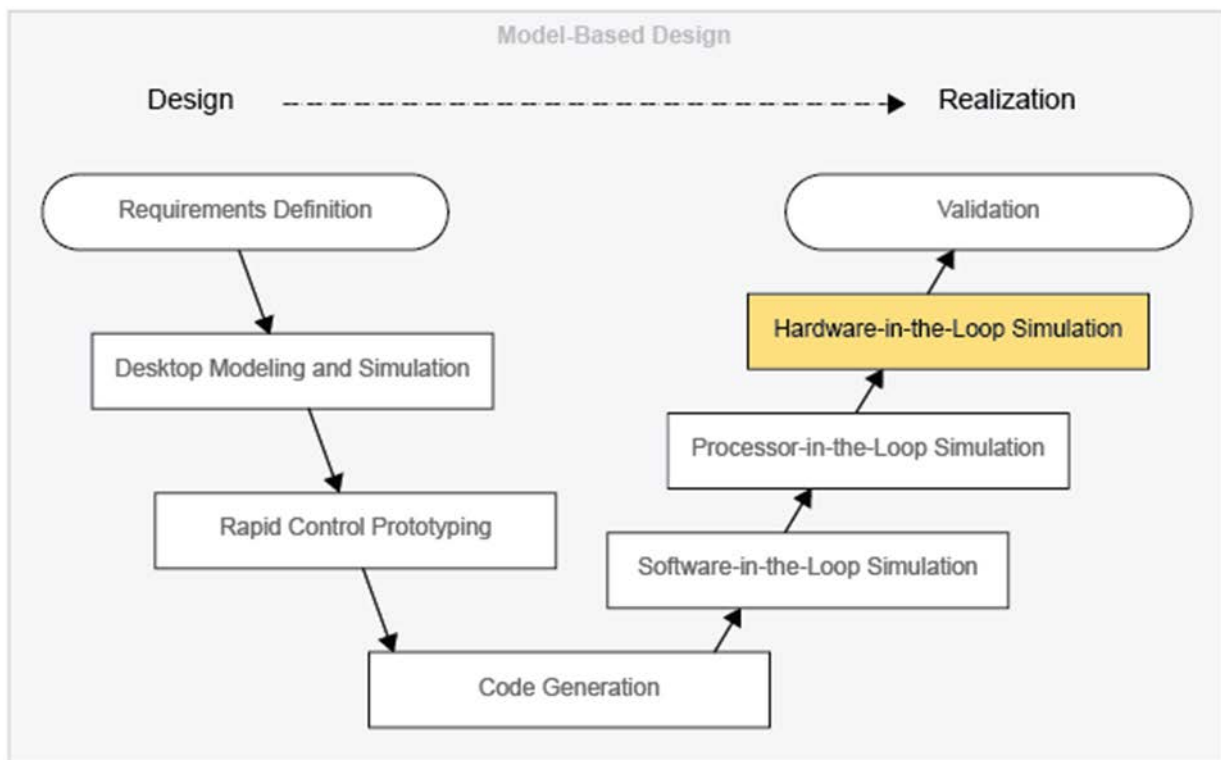
Εικόνα 4.1.1: Αύξηση κόστους σφαλμάτων κατά την διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός προϊόντος. [33]

Εν αντιθέσει, τεχνική του model-based design παρέχει πολύ περισσότερες λεπτομέρειες για το αντικείμενο που μελετάται, μέσω προσομοιώσεων αλλά πολλές φορές και φυσικών πρωτοτύπων τα οποία ενσωματώνονται στον εικονικό βρόχο ελέγχου (τεχνική γνωστή ως hardware-in-the-loop, HIL) [34]. Αφού το μοντέλο ελεγχθεί διεξοδικά, είναι δυνατή η αυτόματη παραγωγή κώδικα C ή C++ κάτι το οποίο μειώνει σημαντικά τα έξοδα και τον χρόνο ανάπτυξης του προϊόντος, αλλά και κάνει ευκολότερη την εξέταση και βελτιστοποίηση υποσυστημάτων. Η τεχνική του model-based design έχει σημαντικές εφαρμογές στους εξής τομείς:

- Αεροηλεκτρονική
- Ηλεκτρονικά Οχημάτων
- Συστήματα Ελέγχου σε Εργοστάσια Ηλεκτρισμού
- Ψηφιακοί ελεγκτές κινητήρων
- Ιατρικές Συσκευές
- Επεξεργαστές σήματος ήχου [35]



Εικόνα 4.1.2 : Διάγραμμα ροής για model-based design [36]



Εικόνα 4.1.3: Διάγραμμα από τον σχεδιασμό μέχρι την υλοποίηση ενός συστήματος βάσει της αρχής του model-based design (γνωστό και ως V diagram) [37]

## 4.2 Digital Twin

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου για έναν ελεγκτή πτήσης. Πρέπει λοιπόν να ορίσουμε τι εννοούμε όταν μιλάμε για έναν ψηφιακό δίδυμο.

### 4.2.1 Ορισμός

Όταν αναφερόμαστε στον όρο “Digital Twin” ή “Ψηφιακός Δίδυμος”, εννοούμε είτε μια μηχανή, εικονική ή πραγματική, είτε ένα μοντέλο το οποίο προσομοιώνει, εξομοιώνει, αντικατοπτρίζει ή κατά κάποιον τρόπο μιμείται ή κλωνοποιεί (twinning) την ζωή μια φυσικής οντότητας, η οποία μπορεί να είναι ένα αντικείμενο, μια διαδικασία, ένας άνθρωπος ή ακόμα και η αλληλεπίδραση αυτών. [38] Η ιδέα του ψηφιακού διδύμου γεννήθηκε το 2002 από τον Michael Grieves, στα πλαίσια της ιδέας για δημιουργία ενός Κέντρου Διαχείρισης Κύκλου Ζωής Προϊόντων (PLM, Product Lifecycle Management center) [39][40][41], και παρόλο που έχει αλλάξει ορολογία μερικές φορές (μια προηγούμενη ήταν το 3S: Sensors, Software and Service) η βασική ιδέα παραμένει σχετικά σταθερή [42]. Ο Ψηφιακός Δίδυμος αποτελείται από:

- Έναν πραγματικό χώρο που περιέχει ένα πραγματικό αντικείμενο
- Έναν εικονικό χώρο που περιέχει ένα εικονικό αντικείμενο
- Μια σύνδεση για μεταφορά δεδομένων από τον πραγματικό χώρο στον ψηφιακό χώρο και μια σύνδεση για μεταφορά πληροφορίας από τον ψηφιακό στον πραγματικό χώρο [43]

### 4.2.2 Χρησιμότητα

Η χρησιμότητα του Ψηφιακού Διδύμου έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχει ένα ψηφιακό αντίγραφο κάποιου φυσικού αντικειμένου, το οποίο μπορεί να “σκεφτεί” και να “πράξει” δίχως κανένα ρίσκο, σε αντίθεση με τα φυσικά αντικείμενα στα οποία πιθανά πειράματα θα μπορούσαν να έχουν καταστροφικά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, ο Ψηφιακός Δίδυμος διευκολύνει την ανάλυση των αποτελεσμάτων που έχει ένας αριθμός διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων στο ψηφιακό μοντέλο, και τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να επηρεάσουν την ανάπτυξη και υλοποίηση του φυσικού μοντέλου. [44] Σε αντίθεση με την πιο τυπική τεχνική της απλής προσομοίωσης, η οποία προβλέπει μελλοντικές καταστάσεις ενός συστήματος χρησιμοποιώντας ένα σύνολο αρχικών υποθέσεων, ο Ψηφιακός Δίδυμος παρέχει διασύνδεση δεδομένων μεταξύ του ψηφιακού και πραγματικού αντικειμένου και καταγράφει το ιστορικό καταστάσεων του πραγματικού αντικειμένου. Ο Ψηφιακός Δίδυμος μπορεί να παρέχει περαιτέρω πληροφορίες για την προσομοίωση του συστήματος, ενώ τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν με τη σειρά τους να βοηθήσουν στην εποικοδομητικότερη λήψη αποφάσεων αλλά και να προβλέψουν καλύτερα τις μελλοντικές φθορές του φυσικού συστήματος χρησιμοποιώντας τα πιο λεπτομερή δεδομένα που παρέχει ο Ψηφιακός Δίδυμος [45].

### 4.3 HITL (Hardware-in-the-Loop) και SITL (Software-in-the Loop) Simulation

Σημαντικά κομμάτια της διαδικασίας του model-based design αποτελούν η προσομοίωση με υλισμικό-στον-βρόχο (hardware-in-the-loop) και λογισμικό-στον-βρόχο (software-in-the-loop). Οι όροι αυτοί υπάρχουν εδώ και μερικές δεκαετίες, αλλά τα τελευταία χρόνια η χρήση αυτών των μεθόδων έχει γίνει πολύ εύκολη με την χρήση λογισμικού όπως το MATLAB/Simulink, το dSPACE [62]

και το JBSim [63], καθιστώντας τις προσιτές σε επίπεδο ακόμα και ενός χρομπίστα στην περίπτωση του JBSim που είναι open source λογισμικό.

Η τεχνική του hardware-in-the-loop είναι ένας τρόπος να ελεγχθούν οι αισθητήρες και ενεργοποιητές ενός συστήματος (το πραγματικό υλισμικό και λογισμικό) σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης και να γίνουν οι αντίστοιχες συγκρίσεις μεταξύ των πραγματικών τιμών και αυτών που απαιτούνται ή έχουν προβλεφθεί [64].

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται εδώ και περίπου μισό αιώνα στον τομέα της προσομοίωσης πτήσης και των συστημάτων ελέγχου πυραύλων. Πιο πρόσφατα, οι προκλήσεις που δημιουργούνται από τα σύγχρονα ηλεκτρονικά ισχύος, τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα και τον έλεγχο αυτών, με χρήση σε τομείς όπως η αεροδιαστημική, η μετάδοση και διανομή ενέργειας, τα υβριδικά οχήματα και τα πλοία αντιμετωπίζονται με χρήση εργαλείων όπως το MATLAB. Άλλοι τομείς όπου έχει εφαρμογή αυτή η τεχνική είναι η σχεδίαση ιατρικού εξοπλισμού και η αυτοκινητοβιομηχανία.[67]

Το software-in-the-loop είναι ένας όρος ο οποίος αφορά την αυτόματη παραγωγή κώδικα για ένα μοντέλο και το τρέξιμο του [65] ή το τρέξιμο ενός κώδικα που αφορά κάποιο συγκεκριμένο σύστημα σε υπολογιστή αντί για το ίδιο το σύστημα, για παράδειγμα το τρέξιμο και μεταγλώττιση κώδικα ενός ελεγκτή πτήσης σε υπολογιστή αντί για τον ίδιο τον ελεγκτή.[66]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: Υλισμικό

Οι πόροι που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν διάφορα κομμάτια υλισμικού και λογισμικού. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση των εξαρτημάτων από τα οποία αποτελείται το ΣμηΕΑ, καθώς και των χαρακτηριστικών τους, το οποίο θα βοηθήσει στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του. Τέλος θα παρατεθούν ορισμένες εξισώσεις οι οποίες αφορούν την πτήση του συγκεκριμένου τετρακόπτερου βάσει του σχήματος του σκάφους του.

### 5.1 Σκάφος

Το σκάφος του συγκεκριμένου ΣμηΕΑ είναι το S500 της εταιρίας Readytosky. Ζυγίζει 454 γραμμάρια και είναι κατασκευασμένο από ανθρακόνημα. Οι διαστάσεις του είναι: 29cm (μήκος) x 18cm (πλάτος) x 6cm (ύψος). Το σύστημα προσγείωσης του μπορεί να είναι κατασκευασμένο είτε από πλαστικό είτε από ανθρακόνημα, διαθέσιμο ήταν αυτό από ανθρακόνημα.[46]



Εικόνα 5.1.1 Το σκάφος S500 με σύστημα προσγείωσης από ανθρακόνημα

## 5.2 Κινητήρες

Οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρίας DJI και συγκεκριμένα το μοντέλο DJI 2212 920KV Brushless Motor. Ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψύκτρες, μια κατηγορία γνωστή και ως ηλεκτρονικά εναλλάξιμοι κινητήρες. Αυτοί είναι σύγχρονοι κινητήρες οι οποίοι τροφοδοτούνται από μια πηγή συνεχούς ρεύματος μέσω ενός ενσωματωμένου αντιστροφέα, ο οποίος παράγει εναλλασσόμενο σήμα ώστε να οδηγήσει τον κινητήρα. Το μοντέλο του κινητήρα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- KV(rpm/v): 920 (Αυτό σημαίνει πως για 1V τάσης ο κινητήρας θα

περιστρέφεται στις 920rpm. Με συνδεδεμένους τους έλικες η απόδοση στην πράξη αναμένεται περίπου στο 75-80% του θεωρητικού μεγέθους).

- Μέγιστη Ισχύς: 370W
- Μέγιστη Ωθηση: 1200gr
- Βάρος: 53gr
- Διάμετρος Άξονα: 4mm
- Μήκος Άξονα: 59mm
- Τροφοδοσία με μπαταρίες 2S, 3S (ή ακόμα και 4S) από 7V μέχρι 12V

[47]

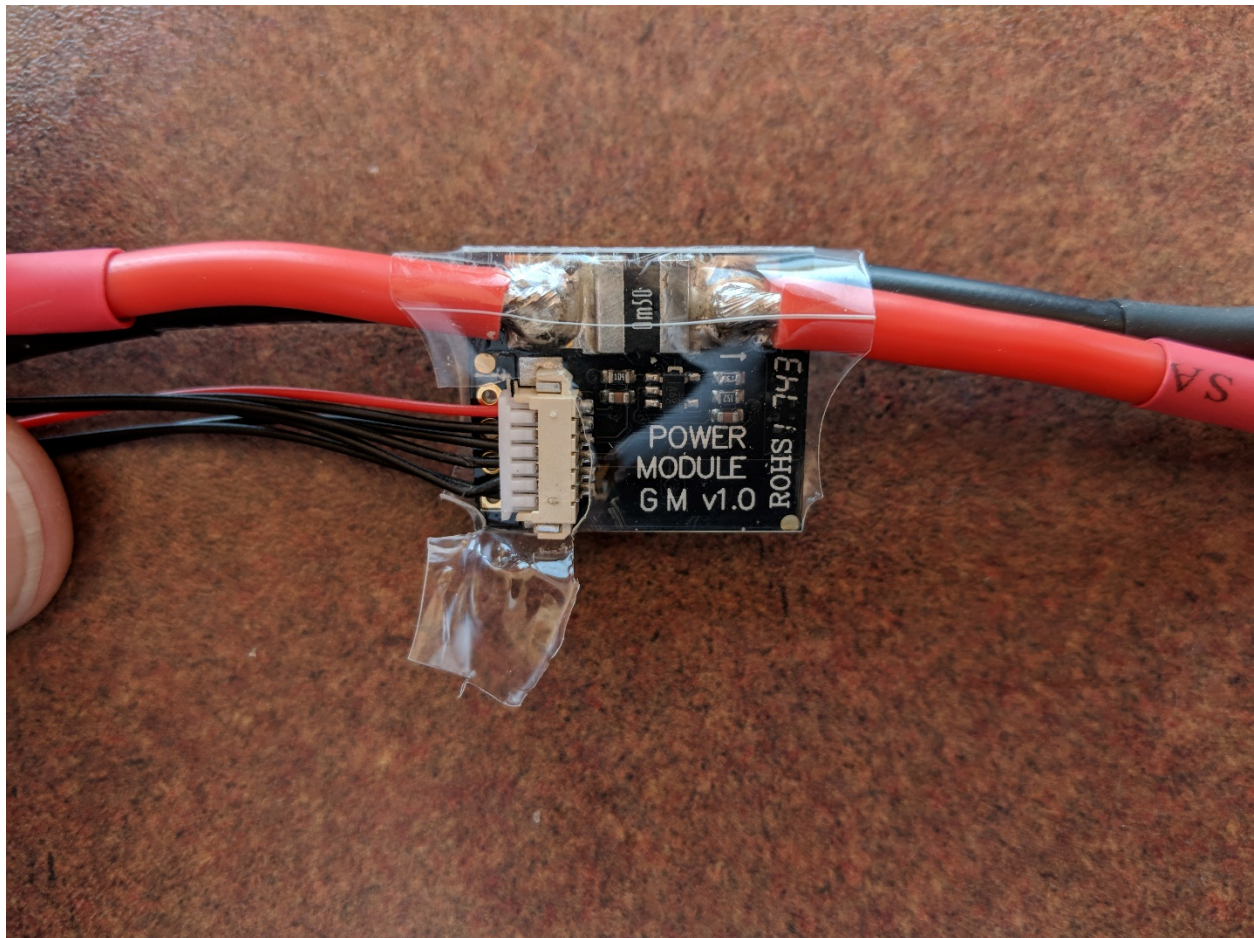


Εικόνα 5.2.1 Κινητήρες DJI 2212 920KV Brushless Motor

### 5.3 Power Module

Στην κατασκευή του ΣμηΕΑ έχει χρησιμοποιηθεί ο συνηθισμένος προσαρμογέας της σειράς PX4. Αυτός προσαρμόζει την τάση από την μπαταρία [2S (7.4V), 3S (11.1V), ή 4S (14.8V)] στα +/- 5.3V για χρήση από τον ελεγκτή πτήσης.

Περιλαμβάνει επίσης αισθητήρες για παρακολούθηση τάσης και ρεύματος. Αυτό το εξάρτημα χρησιμοποιείται και για την διανομή ισχύος στους κινητήρες του ΣμηΕΑ. Το μοντέλο του προσαρμογέα είναι το APM 2.5.



Εικόνα 5.3.1 Το APM 2.5 [48]

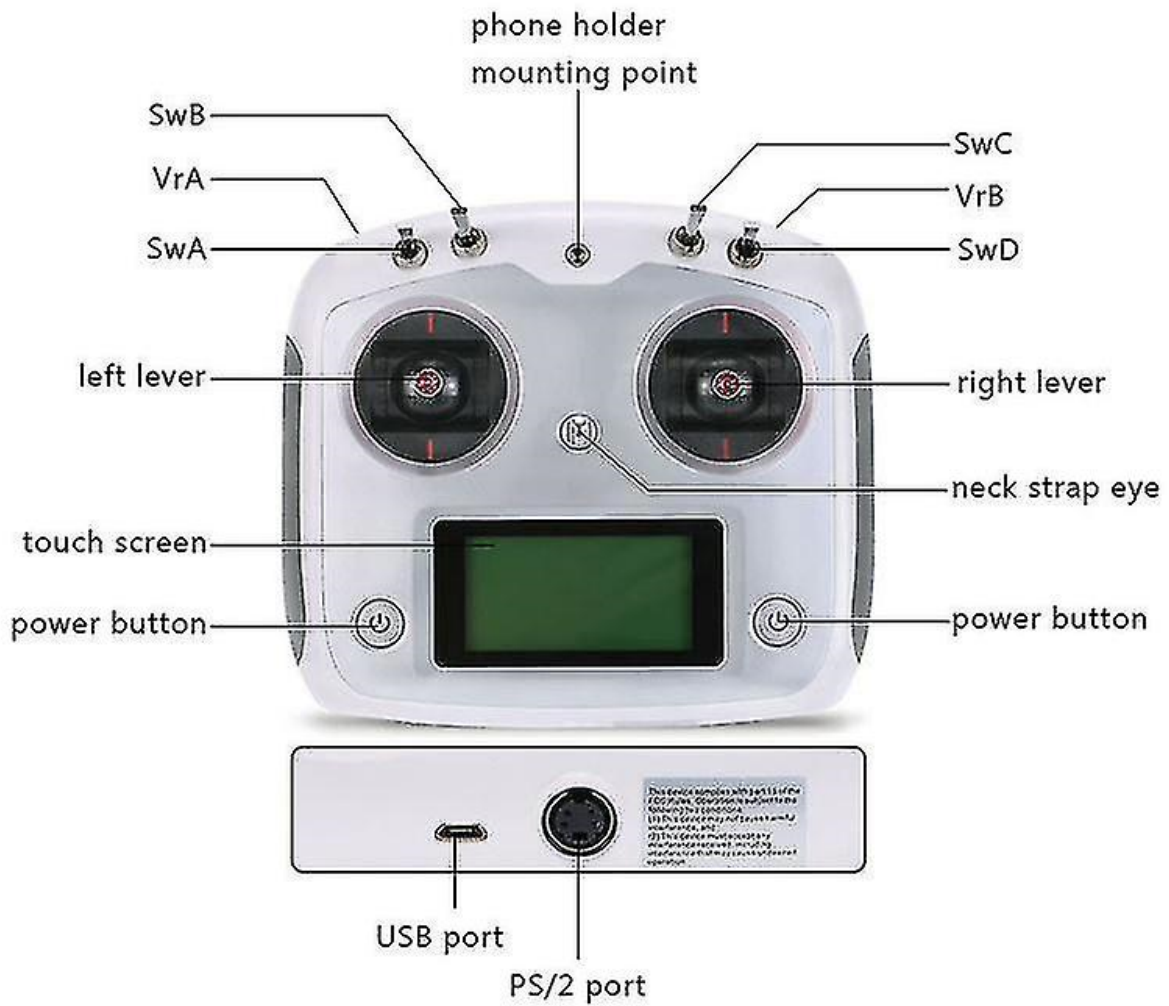
### 5.4 Σύστημα Ραδιοελέγχου

Ως σύστημα ραδιοελέγχου χρησιμοποιήθηκε το ζεύγος πομπού FLYSKY FS-i6S και



δέκτη FLYSKY FS iA6B Receiver 2.4G 6CH with Double Antenna. Το σύστημα αυτό αποτελεί ένα ψηφιακό, αναλογικό (proportional), ηλεκτρονικό σύστημα ραδιοελέγχου 6 καναλιών στα 2.4 GHz, με τεχνολογία AFHDS 2A (Automatic Frequency Hopping Digital System) της εταιρίας FLYSKY. Η τεχνολογία AFHDS 2A (δεύτερης γενιάς) προσφέρει αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη, με τον δέκτη να είναι ικανός να δεχθεί δεδομένα από αισθητήρες θερμοκρασίας, υψομέτρου και άλλων τύπων και βαθμονόμησης σερβοκινητήρων. Το εύρος συχνοτήτων του συστήματος είναι μεταξύ 2.4055GHz και 2.475GHz, χωρισμένο σε 140 κανάλια. Ο πομπός μεταπηδάει μεταξύ 16 καναλιών (ή 32 στην κορεατική και ιαπωνική έκδοση) ώστε να μειώσει τις παρεμβολές από άλλους πομπούς. Το σύστημα έχει την δική του ID, το οποίο σημαίνει πως όταν ένας πομπός κλειδώνει με έναν δέκτη, αποτρέπεται η επικοινωνία με άλλα συστήματα, εμποδίζοντας τα να παρεμβληθούν στην ομαλή λειτουργία του συστήματος. Τέλος, έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην χαμηλή κατανάλωση ισχύος, με την χρήση εξαρτημάτων υψηλής ευαισθησίας αλλά χαμηλής κατανάλωσης, ώστε να βελτιωθεί ο χρόνος ζωής των μπαταριών. [49]

## FS-i6s



Εικόνα 5.4.1 Ο πομπός-χειριστήριο Fs-i6s



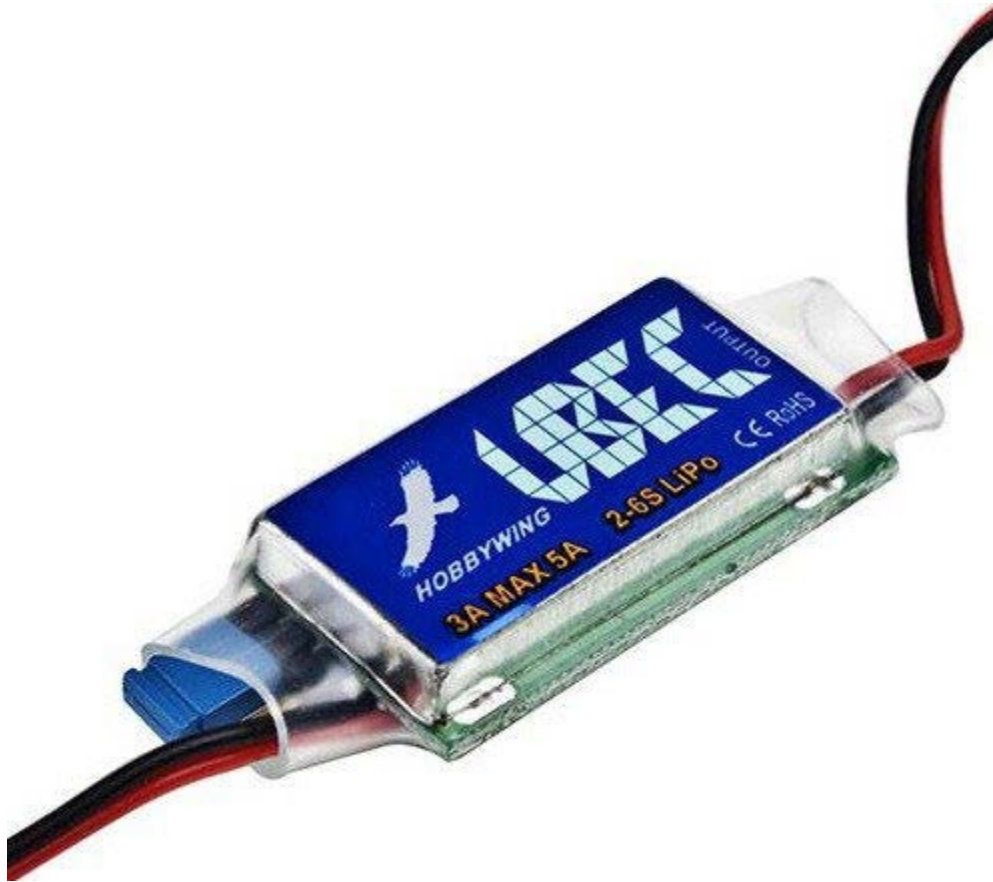
Εικόνα 5.4.2 δέκτης Fs-iA6B

### 5.5 BEC (Battery Eliminator Circuit)

Ως BEC (Battery Eliminator Circuit) χρησιμοποιήθηκε το Hobbywing UBEC 3A 2-6S. Η χρήση ενός BEC είναι πρακτικά αυτή ενός voltage regulator. Το εξάρτημα αυτό μετατρέπει υψηλές τάσεις (5.5V έως 26V) της μπαταρίας του συστήματος σε τάσεις ασφαλείς για τον πομπό και το γυροσκόπιο. Συνήθως χρησιμοποιείται και για την τροφοδοσία του ελεγκτή πτήσεως αλλά στο σύστημα που εξετάσαμε

δεν χρειάζεται, καθώς η μετατροπή τάσης γίνεται από το power module. Τα χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Έξοδος: 5V/3A και 6V/3A
- Ripple: <math><50\text{mVp-p}</math> (2A/12V)
- Είσοδος: 5.5-26V (2 με 6 cells μπαταρία LiPo, 5 με 18 cells μπαταρία NiMH)
- Μέγεθος: 51mm (μήκος) x 16.6mm (πλάτος) x 8.5mm (ύψος)
- Βάρος: 11.5 g



Εικόνα 5.5.1 Το UBEC

[50]

## 5.6 Μπαταρία

Για το σύστημα επιλέχθηκε η μπαταρία Tattu R-Line 750mAh 11.1V 95C 3S1P XT30U-F διότι η τάση της βρίσκεται μέσα στο εύρος τιμών τάσης των κινητήρων αλλά και λόγω του χαμηλού της βάρους. Έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Τάση: 11,1 V

- Χωρητικότητα: 750 mAh
- Αριθμός κελιών: 3
- Τύπος βύσματος: XT-30U-F
- Τύπος Ισορροπιστή: JST-XHR
- Ρεύμα Εκφόρτισης (συνεχές): 95C
- Ρεύμα Εκφόρτισης (peak): 190C
- Μήκος: 60mm
- Πλάτος: 31mm
- Ύψος: 21mm
- Βάρος: 62g

Λόγω του χαμηλού της βάρους και υψηλού ρυθμού εκφόρτισης, η μπαταρία αυτή ενδείκνυται για ένα σκάφος αγώνων και όχι για παρατεταμένες πτήσεις που θα απαιτούνταν από εφαρμογές όπως η λήψη βίντεο. Δεδομένου του ότι το σύστημα μας προέρχεται από τα Hovergames της NXP, πρόκειται για μια ταιριαστή επιλογή.



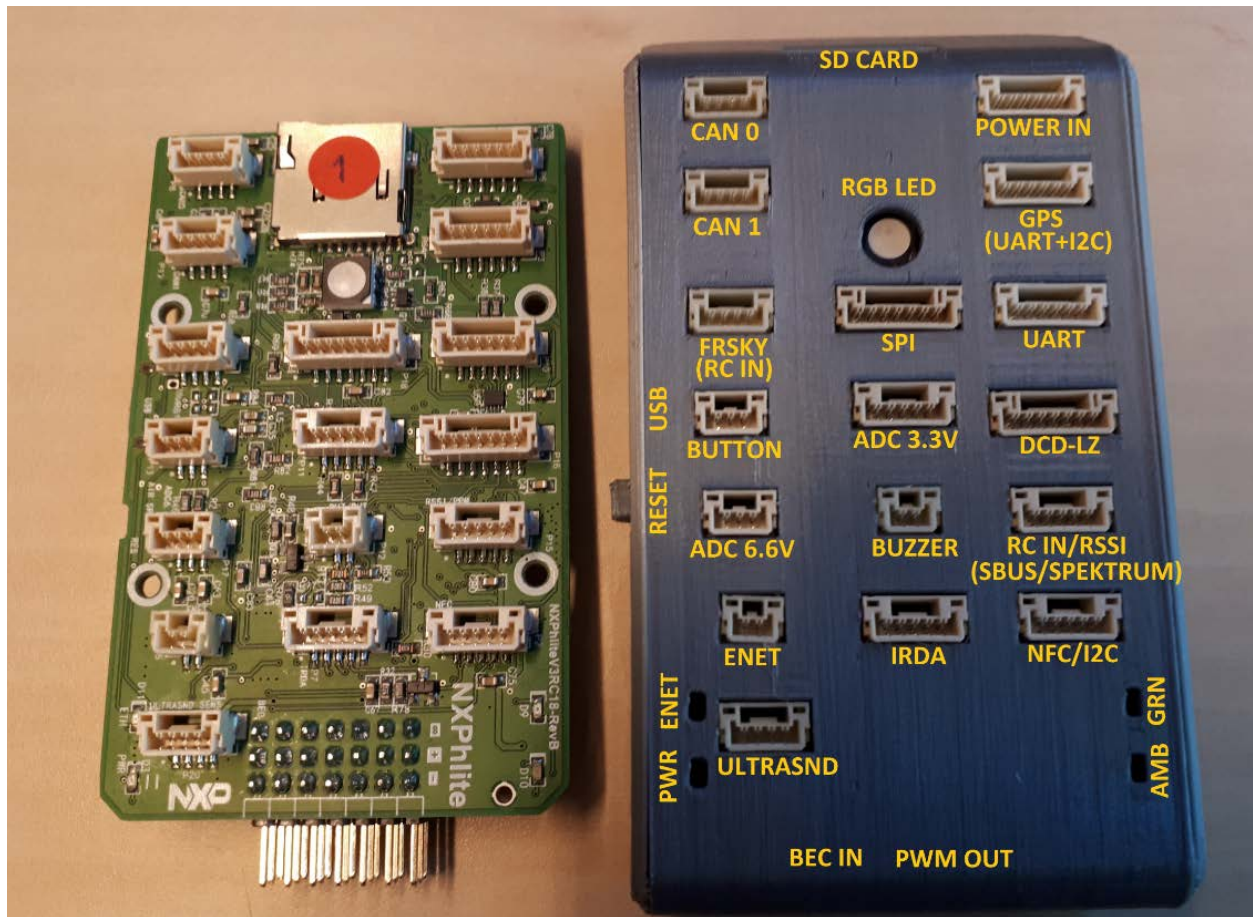
Εικόνα 5.6.1 Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε στο ΣμηΕΑ

[51]

### 5.7 Flight Controller (Ελεγκτής Πτήσης)

Ως ελεγκτής πτήσης ήταν διαθέσιμος ο ελεγκτής FMUK66 Rev.B της NXP. Όπως οι περισσότεροι ελεγκτές που λειτουργούν με λογισμικό PX4, ο FMUK66 περιλαμβάνει ενσωματωμένους αισθητήρες πτήσης όπως μαγνητόμετρα και επιταχυνσιόμετρα και δυνατότητα σύνδεσης διαφόρων περιφερειακών όπως κάμερες και GPS μέσω των συνδέσεων JST-GH που διαθέτει. Η βασική διαφορά του με πολλούς PX4 controllers είναι ότι απαιτείται το ανέβασμα ενός bootloader

πριν ανέβει το PX4 firmware. Αυτό γίνεται μέσω του αντάπτορα DCD-LZ για τον οποίο υπάρχει ειδική θύρα επάνω στην πλακέτα του controller. Δίχως τον bootloader δεν γίνεται να λειτουργήσει ο ελεγκτής, διότι το firmware αρχίζει να τρέχει από την γραμμή 6000 και χωρίς τον bootloader γραμμένο στην πλακέτα αυτή η συνθήκη δεν ικανοποιείται. [53] Ο συγκεκριμένος ελεγκτής πτήσης είναι μοντέλο του 2018 και είναι έκδοση FMUv3, που σημαίνει πως έχει διπλάσια flash μνήμη από την FMUv2, η οποία είχε 1MB. Οι FMUv2 και FMUv3 τρέχουν με τον επεξεργαστή STM32427VI.



Εικόνα 5.7.1 Ο FMUK66 ελεγκτής πτήσης [52]

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, ο ελεγκτής διαθέτει δυνατότητες επικοινωνίας μέσω I2C και UART καθώς και USB για ανέβασμα του firmware.

Το RGB LED χρησιμοποιείται ως εξής: Κόκκινο για ένδειξη σφάλματος, πράσινο για κατάσταση ready χωρίς GPS και μπλε για κατάσταση ready με GPS. Τα LEDs PWR και ENET ανάβουν όταν έχουμε τροφοδοσία, το ENET χρησιμοποιείται για να δείξει ότι έχει ανέβει ο bootloader και ο controller είναι έτοιμος για ανέβασμα του firmware.

Επίσης διαθέτει θύρα για κάρτα SD όπου βρίσκεται το rcS script, το οποίο είναι το σενάριο εκκίνησης του PX4 λογισμικού. Το συγκεκριμένο σενάριο δύναται να προσαρμοστεί ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη, για παράδειγμα να μην χρησιμοποιηθούν ορισμένοι αισθητήρες κατά την εκκίνηση του συστήματος, και το προσαρμοσμένο σενάριο να φορτωθεί στην SD κάρτα αντί του rcS.

Σύμφωνα με το διάγραμμα του FMUK66 Rev. B που (προς το παρόν) μπορεί να βρεθεί εδώ [54], ο ελεγκτής αυτός είναι κατασκευασμένος γύρω από τον μικροελεγκτή Kinetis K66 και περιλαμβάνει 2 εσωτερικά βαρόμετρα (αισθητήρες πίεσης), γυροσκόπιο, 2 επιταχυνσιόμετρα και 2 μαγνητόμετρα.



Εικόνα 5.7.2 Το servorail του FMUK66 [52]

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το servorail στην κάτω άκρη της πλακέτας, όπου ο controller λαμβάνει την τροφοδοσία από το BEC και στέλνει PWM σήματα στους κινητήρες. Η πάνω σειρά είναι η γείωση, η μεσαία η τροφοδοσία και η κάτω το σήμα της PWM κυματομορφής.

Σημειώνεται πως η επιλογή αυτή έγινε για δύο λόγους: Πρώτον διότι ο ελεγκτής αυτός ήταν άμεσα διαθέσιμος, αλλά και διότι όταν είδαμε πως ήταν αδύνατη η σύνδεση του με το Simulink, ήταν αδύνατον να αγοραστεί κάποιος άλλος ελεγκτής πτήσης. Αυτό συνέβη διότι υπήρχαν ελάχιστοι διαθέσιμοι ελεγκτές πτήσης PX4, καθώς υπήρχε τεράστια διακοπή των εφοδιαστικών αλυσίδων λόγω της πανδημίας του COVID-19.

## 5.8 GPS Module

Η διαθέσιμη μονάδα GPS ήταν η Holybro M8N. Διαθέτει έναν επεξεργαστή UBLOX M8N, πυξίδα IST8310, προειδοποιητικό LED με τρία χρώματα και διακόπτη ασφαλείας. Επίσης διαθέτει τρεις διαφορετικές επιλογές συνδέσεων για διάφορους σκοπούς και έχει baud rate 38400 στα 5Hz. Τα πιο παλιά μοντέλα του M8N, όπως αυτό που ήταν διαθέσιμο, δεν έχουν ενσωματωμένο κομβίο για όπλιση του συστήματος σε αντίθεση με τα πιο σύγχρονα που διαθέτουν αυτό το κομβίο στο κάτω μέρος της κεραίας.



Μερικά από τα χαρακτηριστικά του είναι:

- Ευαισθησία πλοήγησης -167 dBm
- Cold starts: 26s
- Κεραία κεραμικής επικάλυψης 25 x 25 x 4 mm
- Επαναφορτιζόμενη χωρητικότητα Farah
- Ρυθμιστής τάσης 3.3V χαμηλού θορύβου
- Κατανάλωση ρεύματος λιγότερο από 150mA στα 5V
- Διορθωτικά LED ενδείξεων
- Θήκη προστασίας
- Μήκος καλωδίου 26cm ή 42cm
- Συνολική διάμετρος 50mm
- Βάρος: 32 γραμμάρια με την θήκη

[55]

Το τελικό τετρακόπτερο είναι αυτό που φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία:



Εικόνα 5.8.1 Το τετρακόπτερο με όλα του τα εξαρτήματα

Με όλα τα εξαρτήματα το ΣμηΕΑ ζυγίζει 1070 γραμμάρια. Δεδομένου πως κάθε κινητήρας έχει μέγιστη ώθηση 1200 γραμμάρια και πως η μπαταρία είναι σε πλήρη φόρτιση, έχουμε ένα ωφέλιμο βάρος της τάξεως των:

$$4 \times 1200 - 1070 = 3730 \text{ γραμμαρίων.}$$

Είδαμε όμως πως οι κινητήρες έχουν βαθμό απόδοσης περίπου 75%.

Οπότε τελικά έχουμε:  $75\% \times 1200 = 900$   
και άρα το συνολικό ωφέλιμο φορτίο είναι ίσο με περίπου 2530gr.

## 5.9 Εξισώσεις Τετρακόπτερου

Όπως έχουμε δει, το τετρακόπτερο που έχουμε στη διάθεση μας είναι τύπου «X». Αυτό σημαίνει πως οι εξισώσεις που ορίζουν την κίνηση του στον χώρο είναι αυτές που ορίζουν την κίνηση κάθε παρόμοιου τετρακόπτερου. Αρχικά θα οριστούν οι εξισώσεις ώθησης και άνωσης, και στην συνέχεια οι εξισώσεις αλλαγής πορείας.

### 5.9.1 Στατική Ώθηση

Η σχέση που δίνει την στατική ώθηση σε ένα τετρακόπτερο με σκάφος παρόμοιο με το S500 είναι η εξής:

$$\text{Ισχύς} = \text{Σταθερά Έλικας} \times \text{rpm}^{\text{Συντελεστής Ισχύος}} \quad (3)$$

Όπου η ισχύς είναι σε Watt και το rpm σε χιλιάδες στροφές ανά λεπτό.

Βάσει της Θεωρίας της Ορμής, η ώθηση σε έλικα περιγράφεται ως εξής:

$$T = \frac{\pi}{4} D^2 \rho v \Delta v \quad (4)$$

Όπου:

T = ώθηση (Newton)

D = διάμετρος έλικα (Μέτρα)

v = ταχύτητα του αέρα στον έλικα (m/s)

$\Delta v$  = ταχύτητα του αέρα που επιταχύνεται από τον έλικα (m/s)

$\rho$  = πυκνότητα του αέρα (σταθερή και ίση με  $1,225 \text{kg/m}^3$ )

Μια συνηθισμένη απλοποίηση είναι ότι η ταχύτητα του αέρα στον έλικα είναι ίση με  $v = \frac{1}{2} \Delta v$ , οπότε η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$T = \frac{\pi}{8} D^2 \rho (\Delta v)^2 \quad (5)$$

Η ισχύς που απορροφάται από έναν κινητήρα είναι ίση με:

$$P = \frac{T \Delta v}{2} \quad (6)$$

, όπου P η ισχύς. Λύνοντας ως προς  $\Delta v$ :

$$\Delta v = \frac{2P}{T} \quad (7)$$

Και αντικαθιστώντας στην σχέση (4) το  $\Delta v$  που βρήκαμε από την σχέση (7) έχουμε:

$$T = \left( \frac{\pi}{2} D^2 \rho P^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

Τέλος, είναι χρήσιμο σε κάποιες περιπτώσεις να εκφράσουμε την σχέση (8) συναρτήσει της μάζας. Χρησιμοποιώντας τον Δεύτερο Νόμο του Νεύτωνα,  $F=ma$ , έχουμε:

$$m = \frac{\left( \frac{\pi}{2} D^2 \rho P^2 \right)^{\frac{1}{3}}}{g} \quad (9)$$

Όπου m η μάζα και g η σταθερά της βαρύτητας και ίση με  $9,81 \text{m/s}^2$ . [56]

### 5.9.2 Άνοση

Όπως έχουμε δει και στο κεφάλαιο 3.5.3, η εξίσωση της άνοσης είναι:

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A U^2$$

Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να επεξηγηθεί περισσότερο ο όρος  $C_L$ .

Ο όρος αυτός είναι ο συντελεστής ανύψωσης ή αλλιώς coefficient of lift, και ορίζεται ως εξής:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (10)$$

Όπου:

$L$  = η άνωση (Lift) (Newton)

$\rho$  = πυκνότητα του αέρα (σταθερή και ίση με  $1,225\text{kg}/\text{m}^3$ )

$v$  = ταχύτητα (m/s)

$A$  = έκταση του έλικα ( $\text{m}^2$ )

Για να είναι δυνατή η απογείωση οποιουδήποτε ιπτάμενου οχήματος, θα πρέπει η άνωση να είναι μεγαλύτερη του βάρους. [57]

### 5.9.3 Εξίσωση Οπισθέλκουσας

Η οπισθέλκουσα (drag) περιγράφεται από την εξίσωση:

$$D = \frac{C_d \rho V^2 A}{2} \quad (11)$$

Όπου:

$D$  = οπισθέλκουσα (Newton)

$C_d$  = συντελεστής οπισθέλκουσας

$V$  = ταχύτητα (m/s)

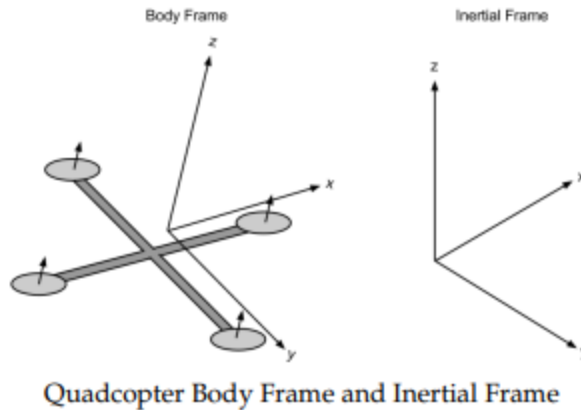
$A$  = επιφάνεια αναφοράς ( $\text{m}^2$ )

$\rho$  = πυκνότητα του αέρα (σταθερή και ίση με  $1,225\text{kg}/\text{m}^3$ )

Ο συντελεστής οπισθέλκουσας συνήθως καθορίζεται πειραματικά. [58]

### 5.9.4 Εξισώσεις Κινηματικής

Θα δούμε τις εξισώσεις που ορίζουν την κίνηση ενός τετρακόπτερου τόσο στους βαθμούς ελευθερίας του (pitch, yaw και roll) όσο και τις εξισώσεις ταχύτητας και θέσης του. Ορίζοντας δύο διαφορετικά πλαίσια αναφοράς, το πλαίσιο σκάφους και το πλαίσιο αδράνειας, θα κάνουμε μια βασική ανάλυση αυτών των εξισώσεων.



Εικόνα 5.9.4.1 Άξονες Αναφοράς Σκάφους και Αδράνειας

Το πλαίσιο αδράνειας ορίζεται με βάση το έδαφος, με την βαρύτητα να δείχνει στον αρνητικό άξονα z. Το πλαίσιο σκάφους ορίζεται από τον προσανατολισμό του τετρακόπτερου, με τους άξονες των κινητήρων να δείχνουν στον θετικό άξονα z και τους βραχίονες να δείχνουν στους θετικούς άξονες x και y.

Το τετρακόπτερο είναι ικανό για κλίση, στρέψη και κύλιση και άρα έχει 6 βαθμούς ελευθερίας. Η θέση του τετρακόπτερου ορίζεται ως  $x = (x, y, z)^T$  και η ταχύτητα του ως  $\dot{x} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T$ . Αντίστοιχα για το σκάφος, οι εξισώσεις των βαθμών ελευθερίας είναι:  $\theta = (\varphi, \theta, \psi)^T$  για την θέση και για τις γωνιακές ταχύτητες:  $\dot{\theta} = (\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T$ . Πρέπει να δοθεί προσοχή στο ότι το διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας  $\omega$  δεν είναι ίσο με το διάνυσμα γωνιακών ταχυτήτων  $\dot{\theta}$ , καθώς το διάνυσμα  $\omega$  είναι ένα διάνυσμα το οποίο δείχνει κατά μήκος του άξονα περιστροφής ενώ το  $\dot{\theta}$  είναι η παράγωγος των pitch, yaw και roll στον χρόνο. Για να πάμε από τις γωνιακές ταχύτητες που ορίζει το  $\dot{\theta}$  στο διάνυσμα  $\omega$  μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξής σχέση:

$$\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (12)$$

Μπορούμε να μεταπηδήσουμε από το πλαίσιο σκάφους στο πλαίσιο αδράνειας χρησιμοποιώντας έναν πίνακα περιστροφής R. Ο πίνακας αυτός εμφανίζεται εάν πάρουμε τις συμβάσεις γωνίας ZYZ κατά Euler και λύσουμε ως προς τα pitch, yaw και roll.

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\psi - \cos\theta\cos\varphi\cos\psi & -\cos\varphi\cos\psi - \cos\theta\cos\varphi\sin\psi & \sin\theta\sin\psi \\ \cos\theta\cos\psi\sin\varphi + \cos\varphi\sin\psi & \cos\varphi\cos\theta\cos\psi - \sin\varphi\sin\psi & -\cos\psi\sin\theta \\ \sin\varphi\sin\psi & \cos\varphi\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

Για ένα διάνυσμα  $v$  στο πλαίσιο σκάφους, το αντίστοιχο διάνυσμα στο πλαίσιο αδράνειας είναι το  $Rv$ . [59]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: Λογισμικό

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστεί επιγραμματικά το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας αυτής, αφού έγινε και παρουσίαση του υλισμικού. Το λογισμικό και υλικολογισμικό Pixhawk 4 καθώς και το UAV Toolbox Support Package for PX4 Autopilots του MATLAB παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 8, καθώς έχουν άμεση σχέση με την πορεία εργασίας που ακολουθήθηκε εκεί.

### 6.1 Περιβάλλοντα MATLAB και Simulink

Το MATLAB (MATrix LABoratory) είναι υπολογιστικό περιβάλλον και μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, με κύρια εφαρμογή τους μαθηματικούς υπολογισμούς και την ανάλυση δεδομένων. Έχει σχεδιαστεί από την εταιρία MathWorks και χρησιμοποιούνται ευρέως στον ακαδημαϊκό και βιομηχανικό χώρο για διάφορες εφαρμογές, όπως ανάλυση δεδομένων, μοντελοποίηση, προσομοίωση, οπτικοποίηση δεδομένων και ανάπτυξη αλγορίθμων.

Πέρα από τη βασική έκδοση του MATLAB η οποία περιλαμβάνει το υπολογιστικό περιβάλλον, η MathWorks παρέχει διάφορες βιβλιοθήκες (toolboxes) τα οποία προσφέρουν προ-εφαρμοσμένους αλγορίθμους, μοντέλα και συναρτήσεις για την απλοποίηση πολύπλοκων εργασιών και επιτρέπουν στο χρήστη να αντιμετωπίζει εξειδικευμένες εργασίες με μεγαλύτερη ευκολία και οικονομία χρόνου. Αυτές οι βιβλιοθήκες έχουν και αντίστοιχα κομμάτια στο περιβάλλον Simulink, το οποίο δεν περιλαμβάνεται στο βασικό υπολογιστικό περιβάλλον αλλά αποτελεί επέκταση του. Μερικά toolboxes είναι τα:

- DSP System toolbox, για επεξεργασία ψηφιακού σήματος
- UAV toolbox, το οποίο προσφέρει εργαλεία μοντελοποίησης και προσομοίωσης για ΣμηΕα
- Aerospace toolbox, για αεροδιαστημικές εφαρμογές

Πέρα από τα διαφορά toolboxes, υπάρχει υποστήριξη για διασύνδεση του MATLAB με υλισμικό και λογισμικό όπως είναι η πλατφόρμα Arduino, διάφοροι ελεγκτές πτήσης PX4 καθώς και η δυνατότητα χρήσης του μόνο με το λογισμικό του PX4 (PX4 Host Target, όπου host target είναι ο υπολογιστής που χρησιμοποιούμε για να τρέξουμε την προσομοίωση) και το πρόγραμμα προσομοίωσης Gazebo.

Το Simulink είναι ένα περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού, το οποίο αποτελεί επέκταση του MATLAB και των διάφορων toolboxes του. Στο περιβάλλον αυτό γίνεται να χρησιμοποιηθούν διάφορα προκατασκευασμένα κομμάτια (blocks) από τα toolboxes για την δημιουργία ενός πλήρους συστήματος ή μερών αυτού. Τα blocks αυτά προσομοιώνουν συμπεριφορές πραγματικών εξαρτημάτων και περιλαμβάνουν από εξισώσεις έως πλήρεις αλγορίθμους.

Τέλος, το MATLAB παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης παραγωγής κώδικα C/C++ μέσω του Embedded Coder, και οι πιο πρόσφατες εκδόσεις του γίνεται να χρησιμοποιηθούν για SITL και HITL προσομοιώσεις μέσω εργαλείων που παρέχονται από το πρόγραμμα. [60]

## 6.2 QGroundControl

Το πρόγραμμα QGroundControl προσφέρει έλεγχο πτήσης και σχεδιασμό αποστολών για οχήματα (κυρίως ΣμηΕΑ) που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο MAVLink (Micro Air Vehicle Link). Το πρωτόκολλο αυτό χρησιμοποιείται για επικοινωνία μικρών οχημάτων με ένα σταθμό ελέγχου εδάφους. Ο κύριος στόχος του QGroundControl είναι η ευκολία χρήσης για επαγγελματίες και developers. Πρόκειται για λογισμικό open source. Μπορεί να τρέξει σε διάφορα λειτουργικά συστήματα όπως Windows, OS X, Linux, Android και iOS και υποστηρίζει αυτόματους πιλότους PX4, Ardupilot και κάθε όχημα που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο MAVLink. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κάθε όχημα που είναι συμβατό με PX4 και Ardupilot.

Συγκεκριμένα για τους ελεγκτές πτήσης PX4, το PX4 μπορεί να βαθμονομίσει αισθητήρες πτήσης όπως μαγνητόμετρα και επιταχυνσιόμετρα, να φορτώσει κατάλληλες παραμέτρους αναλόγως του σκάφους που χρησιμοποιείται, να ορίσει την χρήση καναλιών του χειριστηρίου και να δημιουργήσει την πορεία αυτόνομης αποστολής μέσω GPS. [61]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>: Πορεία Εργασίας στο ΣμηΕΑ

Η πορεία εργασίας θα χωριστεί σε δύο ενότητες, μια καθαρά για το ΣμηΕΑ και μια που έχει να κάνει με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στο MATLAB. Σε αυτό το κεφάλαιο εξηγούνται οι δυσκολίες και τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν με τον ελεγκτή πτήσης FMUK66, όπως και ο τρόπος αντιμετώπισης τους.

### 7.1 Bootloader

Το πρώτο βήμα για τον προγραμματισμό του FMUK66 flight controller, ο οποίος είναι βασικό κομμάτι του Hovergames Kit της NXP, είναι να περάσουμε τον bootloader στην πλακέτα του. Ο bootloader γράφεται στην πλακέτα με την χρήση debugger, στην προκειμένη του J-Link EDU Mini της Segger. Η σύνδεση μεταξύ του FMUK66 και του J-Link γίνεται μέσω μιας συμπληρωματικής πλακέτας, της DCD-LZ, η οποία συνδέει το J-Link με τον FMUK66. Ο bootloader ανεβαίνει στην πλακέτα με την χρήση του προγράμματος J-Link Commander, ακολουθώντας τα εξής βήματα:

1. Συνδέουμε τον FMUK66 με τον υπολογιστή μέσω ενός USB Type B καλωδίου ώστε να παρέχεται τροφοδοσία στην πλακέτα
2. Στην κονσόλα γράφουμε connect



3. Γράφουμε “?” για να επιλέξουμε device, ή πληκτρολογούμε το όνομα της συσκευής “MK66FN2M0XXX18”
4. Ως interface επιλέγουμε το S) SWD
5. Ως interface speed επιλέγουμε 4000 kHz

```
Type "connect" to establish a target connection, '?' for help
J-Link>connect
Please specify device / core. <Default>: MK66FN2M0XXX18
Type '?' for selection dialog
Device>MK66FN2M0XXX18
Please specify target interface:
  J) JTAG (Default)
  S) SWD
  T) cJTAG
TIF>S
Specify target interface speed [kHz]. <Default>: 4000 kHz
Speed>
```

Εικόνα 7.1.1 Στιγμιότυπο οθόνης από την διαδικασία ανεβάσματος του bootloader

Ακολουθώντας αυτή τη διαδικασία θα πρέπει να έχει να έχει επιτευχθεί η σύνδεση μεταξύ του J-Link και του FMUK66. Καταλαβαίνουμε ότι η σύνδεση υπάρχει όταν εμφανιστεί το μήνυμα Cortex-M4 identified.

```
Found SW-DP with ID 0x2BA01477
DPIDR: 0x2BA01477
Scanning AP map to find all available APs
AP[2]: Stopped AP scan as end of AP map has been reached
AP[0]: AHB-AP (IDR: 0x24770011)
AP[1]: JTAG-AP (IDR: 0x001C0000)
Iterating through AP map to find AHB-AP to use
AP[0]: Core found
AP[0]: AHB-AP ROM base: 0xE00FF000
CPUID register: 0x410FC241. Implementer code: 0x41 (ARM)
Found Cortex-M4 r0p1, Little endian.
FPUnit: 6 code (BP) slots and 2 literal slots
CoreSight components:
ROMTbl[0] @ E00FF000
ROMTbl[0][0]: E000E000, CID: B105E00D, PID: 000BB00C SCS-M7
ROMTbl[0][1]: E0001000, CID: B105E00D, PID: 003BB002 DWT
ROMTbl[0][2]: E0002000, CID: B105E00D, PID: 002BB003 FPB
ROMTbl[0][3]: E0000000, CID: B105E00D, PID: 003BB001 ITM
ROMTbl[0][4]: E0040000, CID: B105900D, PID: 000BB9A1 TPIU
ROMTbl[0][5]: E0041000, CID: B105900D, PID: 000BB925 ETM
ROMTbl[0][6]: E0042000, CID: B105900D, PID: 003BB907 ETB
ROMTbl[0][7]: E0043000, CID: B105900D, PID: 001BB908 CSTF
Cortex-M4 identified.
J-Link>
```

Εικόνα 7.1.2 Στιγμιότυπο οθόνης όπου φαίνεται πως υπάρχει σύνδεση μεταξύ της πλακέτας του ελεγκτή και του J-Link

Συνεχίζοντας, για να ανέβει τελικά το binary του bootloader στην πλακέτα, πληκτρολογούμε loadbin και έπειτα μπορούμε είτε να πληκτρολογήσουμε το πλήρες μονοπάτι του φακέλου στον οποίο βρίσκεται, είτε να το σύρουμε το binary αρχείο στην κονσόλα του J-Link Commander. Δίπλα από το μονοπάτι πληκτρολογούμε 0x0 ώστε ο bootloader να φορτωθεί από την κατάλληλη θέση μνήμης. Αυτή η διαδικασία φαίνεται στην εξής σελίδα της NXP [70].

## 7.2 PX4 Firmware

Για να γραφτεί το PX4 Firmware στον FMUK66 δύναται να χρησιμοποιηθεί ο J-Link Commander και να πληκτρολογήσουμε ξανά loadbin, ακολουθούμενο από το path στον φάκελο του firmware και 0x6000. Εναλλακτικά, μπορούμε απλά να φορτώσουμε το firmware χρησιμοποιώντας το QGroundControl, απλά συνδέοντας τον FMUK66 με το καλώδιο USB Type B και επιλέγοντας Firmware στο μενού του QGroundControl. Ο FMUK66 χρησιμοποιεί την έκδοση Pixhawk 4 v3.x.

## 7.3 Ρύθμιση του FlySky FS-i6S RC

Το επόμενο βήμα είναι να ρυθμίσουμε το σύστημα πομπού και δέκτη του ΣμηΕΑ. Αυτό γίνεται πριν την βαθμονόμηση των αισθητήρων και λοιπών ρυθμίσεων του πομποδέκτη στο QGroundControl ώστε να υπάρχει σιγουριά πως πομπός και δέκτης είναι «δεμένοι» μεταξύ τους, και πως υπάρχουν ρυθμίσεις τις οποίες μπορούμε μέσω του QGroundControl να αναθέσουμε σε κανάλια (όπως η λειτουργία kill switch).

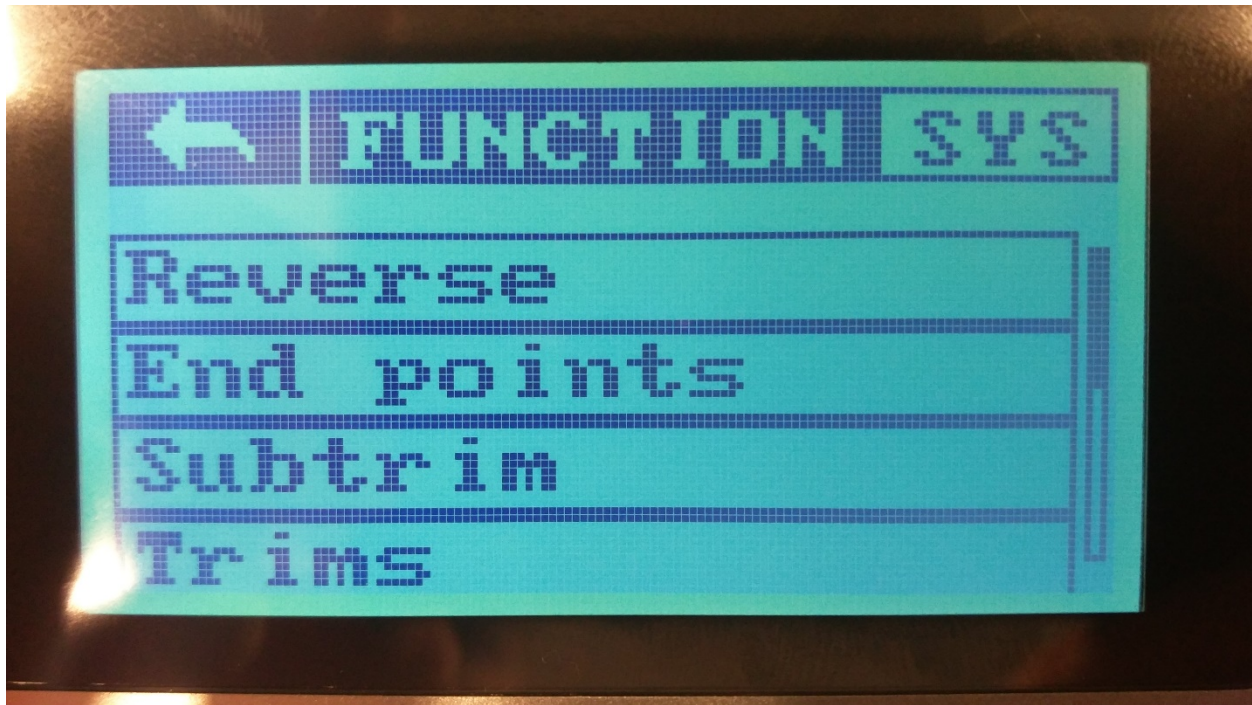
Ξεκινώντας, βάζουμε όλους τους διακόπτες στην ανώτερη δυνατή θέση και πατάμε τα δύο κομβία ώστε να θέσουμε το χειριστήριο σε λειτουργία (δεδομένου ότι πομπός και δέκτης έρχονται «δεμένοι» από το εργοστάσιο, πλην απροόπτου, εάν ο δέκτης είναι ήδη σε λειτουργία όταν ανοίξουμε το χειριστήριο-πομπό τότε το χειριστήριο θα απαιτήσει να θέσουμε τον δέκτη εκτός λειτουργίας πρωτού τεθεί ο ίδιος σε λειτουργία). Εάν το binding πομπού και δέκτη έχει γίνει σωστά, η οθόνη που εμφανίζεται είναι η εξής:



Εικόνα 7.3.1 Στιγμιότυπο οθόνης όπου φαίνεται το «δέσιμο» μεταξύ πομπού και δέκτη

Σημειώνεται πως το TX δείχνει το επίπεδο μπαταρίας του πομπού, αλλά το RX δεν δείχνει το επίπεδο μπαταρίας του δέκτη. Αυτό που πραγματικά δείχνει το RX είναι μια τιμή ανάμεσα σε 4V και 8.4V, η οποία είναι η τροφοδοσία που λαμβάνει μέσω του FMUK66 (και πρέπει πάντοτε να είναι 5V). Στην περίπτωση μας, είναι μόνο χρήσιμο για να βλέπουμε πως υπάρχει επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη.

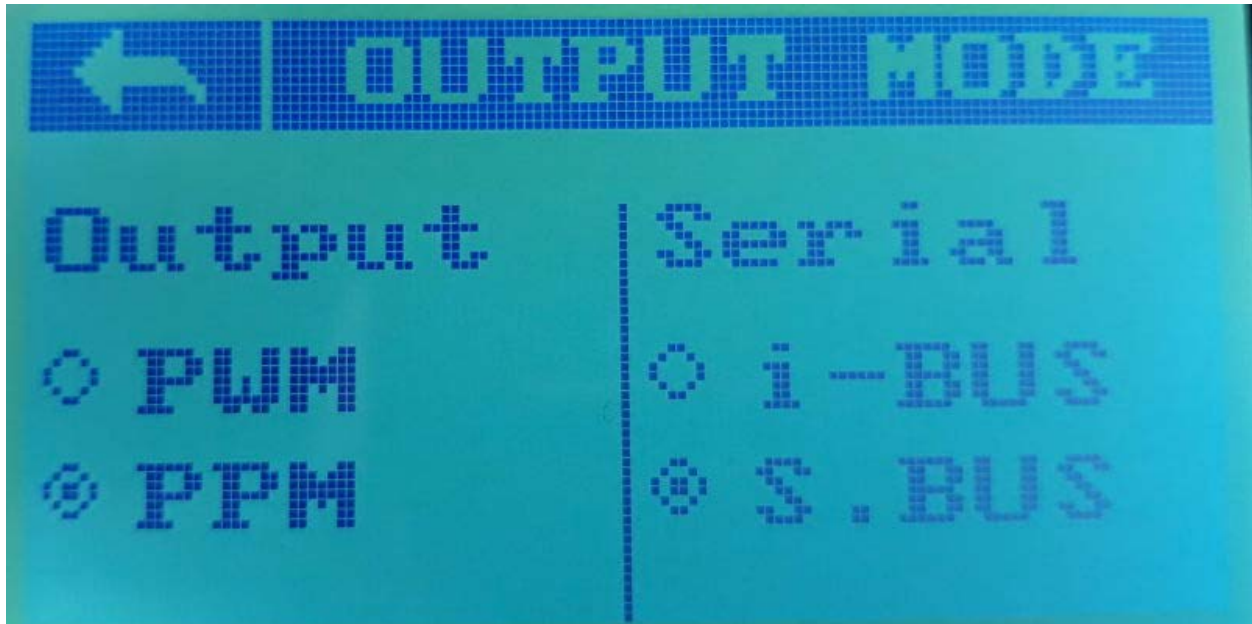
Ο πομπός έχει μια οθόνη αφής με 3 μενού. Η διαμόρφωση γίνεται πατώντας το εικονίδιο με το κατσαβίδι και το κλειδί, επιτρέποντας μας να τροποποιήσουμε παραμέτρους. Πατώντας το εικονίδιο, οδηγούμαστε σε μια οθόνη με 2 μενού, τα function και system.



Εικόνα 7.3.2 Το μενού Function

Το μενού function επιτρέπει αλλαγές στη χρήση των μοχλών και κομβίων ενώ το system έχει να κάνει με το setup του πομπού.

Όσον αφορά το output του δέκτη, υποστηρίζει PWM, PPM, S.BUS and i-BUS outputs, αλλά ο FMUK66 υποστηρίζει μόνο PPM και S.BUS. Πηγαίνοντας στο μενού settings > system view > OUTPUT SETTINGS, επιλέγουμε ως output PPM και ως serial S.BUS.



Εικόνα 7.3.3 το μενού Output Mode

Με το πρωτόκολλο S.BUS ο δέκτης υποστηρίζει 10 κανάλια, 4 από τα οποία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του ΣμηΕΑ με τους μοχλούς του πομπού. Αυτό αφήνει 6 κανάλια ελεύθερα για χρήση σε βοηθητικούς control switches, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την αλλαγή flight modes. Για την ανάθεση κομβίων, διακοπών και μοχλών σε κανάλια πηγαίνουμε στο μενού settings > function > aux. channels. Ο FlySky FS-i6S έχει 4 διακόπτες μπροστά, 2 κομβία στην κορυφή και 2 κομβία στο πίσω μέρος του. Η NXP προτείνει μια συγκεκριμένη διαμόρφωση για τα HoverGames, η οποία χρησιμοποιήθηκε και από εμάς. Φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Channel	Switch (SWX), dial (VRx) or button (KEY)
5	SwA
6	SwB
7	SwC
8	SwD
9	VrA
10	VrB

(Σημειώνεται πως τα κανάλια 9 και 10 δεν θα χρησιμοποιηθούν σε αυτό το setup και μπορούν να ανατεθούν στην χρήση ενός gimbal για τον έλεγχο κάμερας)

Τέλος, το πιο σημαντικό κομμάτι όσον αφορά την ασφάλεια, είναι να δημιουργήσουμε ένα failsafe σε περίπτωση που χαθεί η σύνδεση μεταξύ πομπού και δέκτη. Από προεπιλογή, εάν ο δέκτης χάσει επαφή με τον πομπό, ο δέκτης συνεχίζει να στέλνει στον flight controller την τελευταία θέση που είχαν οι μοχλοί του δέκτη πριν την απώλεια της επαφής. Αν και αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο

σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να αποδειχθεί επικίνδυνο κατά την πτήση ενός ΣμηΕΑ καθώς μπορεί να χαθεί το όχημα και να μην μπορεί να βρεθεί. Στο μενού settings > function > failsafe μπορούμε να θέσουμε μια τιμή που θα πάρει κάθε κανάλι σε περίπτωση απώλειας σύνδεσης.

Παρόλο που η FMU κανονικά μπορεί να εντοπίσει την απώλεια της σύνδεσης και μπορεί να αντιδράσει σε μια τέτοια κατάσταση με διάφορους τρόπους, κρίνεται σκόπιμη η δημιουργία ενός failsafe και στον πομπό, σε περίπτωση που η FMU δεν εντοπίσει την απώλεια σύνδεσης όπως θα έπρεπε. Αυτό το failsafe θα σταματήσει τους κινητήρες του ΣμηΕΑ εάν η FMU δεν εντοπίσει την απώλεια σύνδεσης. Αυτή είναι η μόνη επιλογή που έχουμε, καθώς είναι πολύ επικίνδυνο να συνεχίσει να πετάει το ΣμηΕΑ χωρίς έλεγχο.

Για το failsafe θα έχουμε:

- Τον αριστερό μοχλό τέρμα κάτω και οριζόντια κεντραρισμένο
- Τον δεξί μοχλό οριζόντια και κάθετα κεντραρισμένο
- Τους διακόπτες SwA, SwB και SwC στην πάνω θέση και τον SwD στην κάτω θέση



Εικόνα 7.3.4 Δημιουργία διακόπτη failsafe

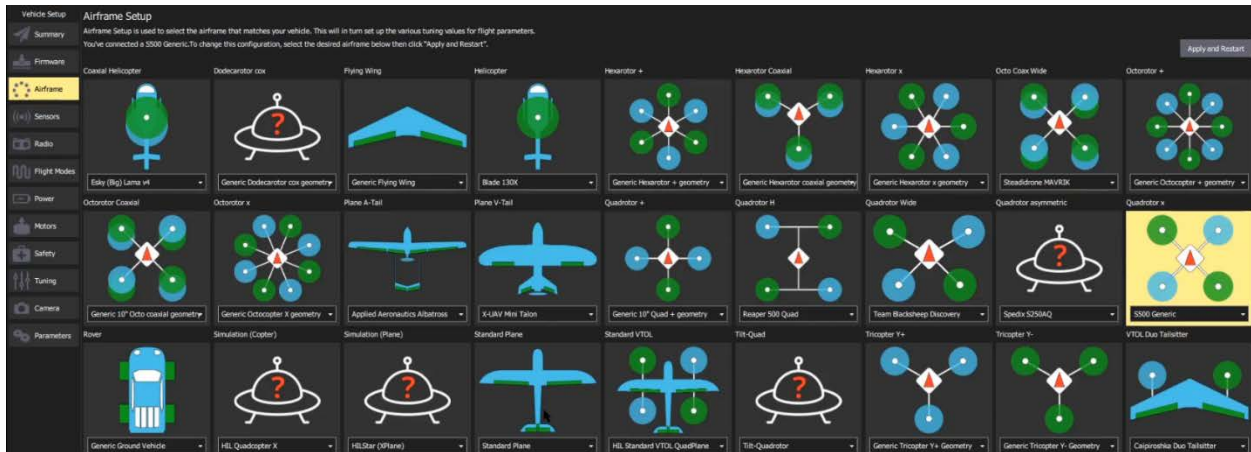
Για την δημιουργία του failsafe, αφού ακολουθήσουμε το μονοπάτι settings > function > failsafe πατάμε το κομβίο Off δίπλα στο κανάλι. Στην οθόνη που εμφανίζεται πατάμε On για να ενεργοποιήσουμε το failsafe για το κάθε κανάλι. Βεβαιωνόμαστε ότι ο μοχλός ή ο διακόπτης και το κανάλι είναι στη σωστή θέση και πατάμε το κομβίο Setup για να σώσουμε αυτή τη θέση. Μετά το πέρας της διαδικασίας, οι τιμές failsafe θα πρέπει να είναι (περίπου) ίδιες με του πίνακα:

Channel	Fail-safe value
1	0%
2	0%
3	-100%
4	0%
5	-100%
6	-100%
7	-100%
8	100%
9	0%
10	0%

Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται λεπτομερώς εδώ [71].

### 7.4 Βαθμονόμηση μέσω του QGroundControl

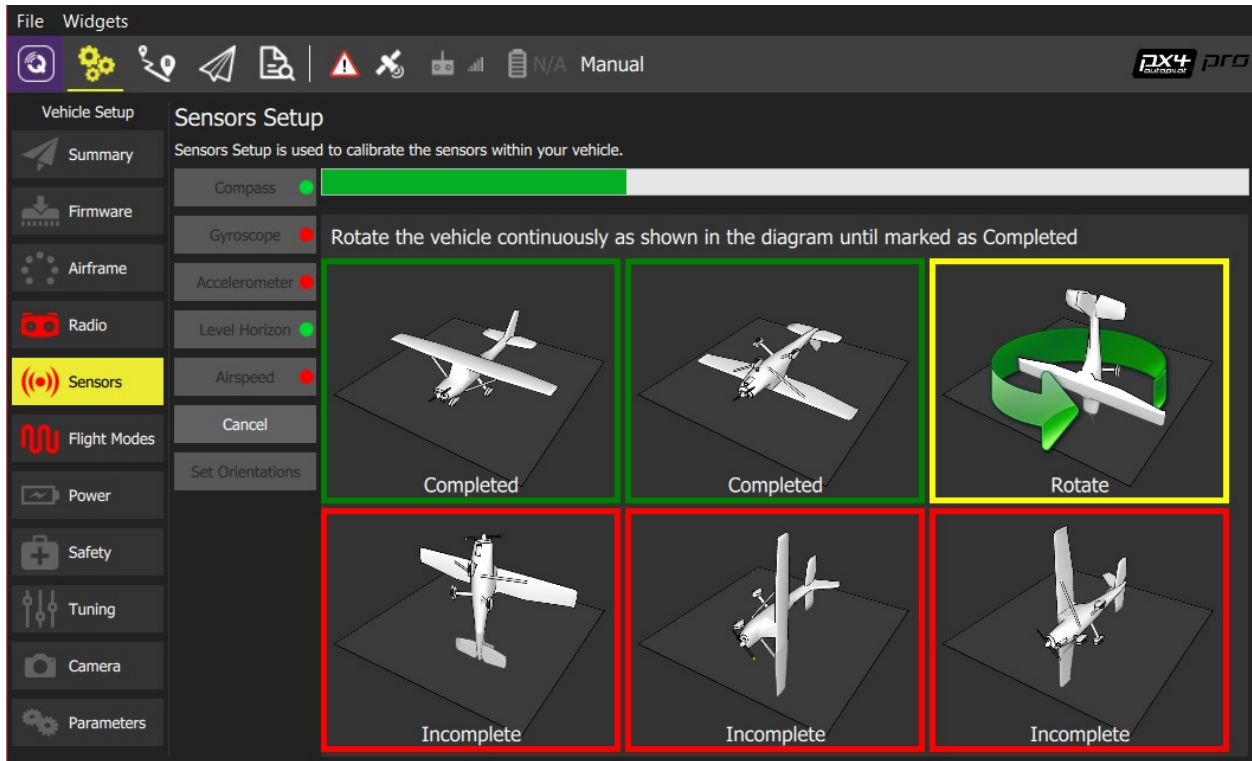
Έχοντας ολοκληρώσει το setup του ζεύγους πομπού-δέκτη, στη συνέχεια βαθμονομούμε τους αισθητήρες της FMU στο πρόγραμμα QGroundControl. Το πρώτο βήμα αφού συνδέσουμε το ΣμηΕΑ στον υπολογιστή μέσω USB (για αυτό το βήμα πρέπει να είναι η FMU πάνω στο ΣμηΕΑ ώστε η βαθμονόμηση να γίνει σωστά, δεν γίνεται να είναι μόνη της), χωρίς τροφοδοσία από μπαταρία, είναι να επιλέξουμε τον τύπο σκάφους. Στο μενού airframe επιλέγουμε το S500 Generic.



Εικόνα 7.4.1 Επιλογή σκάφους στο QGroundControl

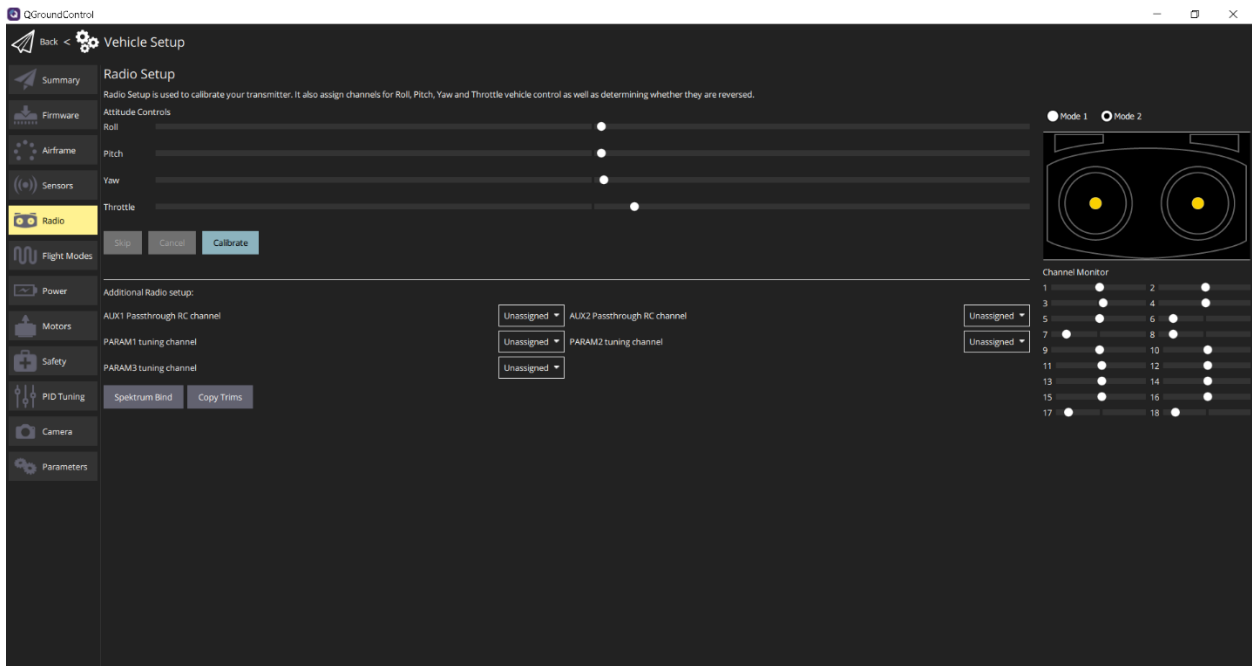
Έπειτα στο μενού sensors ακολουθούμε τα βήματα στα οποία μας καθοδηγεί το QGroundControl, αλλάζοντας το ΣμηΕΑ σε 6 διαφορετικές θέσεις για την βαθμονόμηση των αισθητήρων.





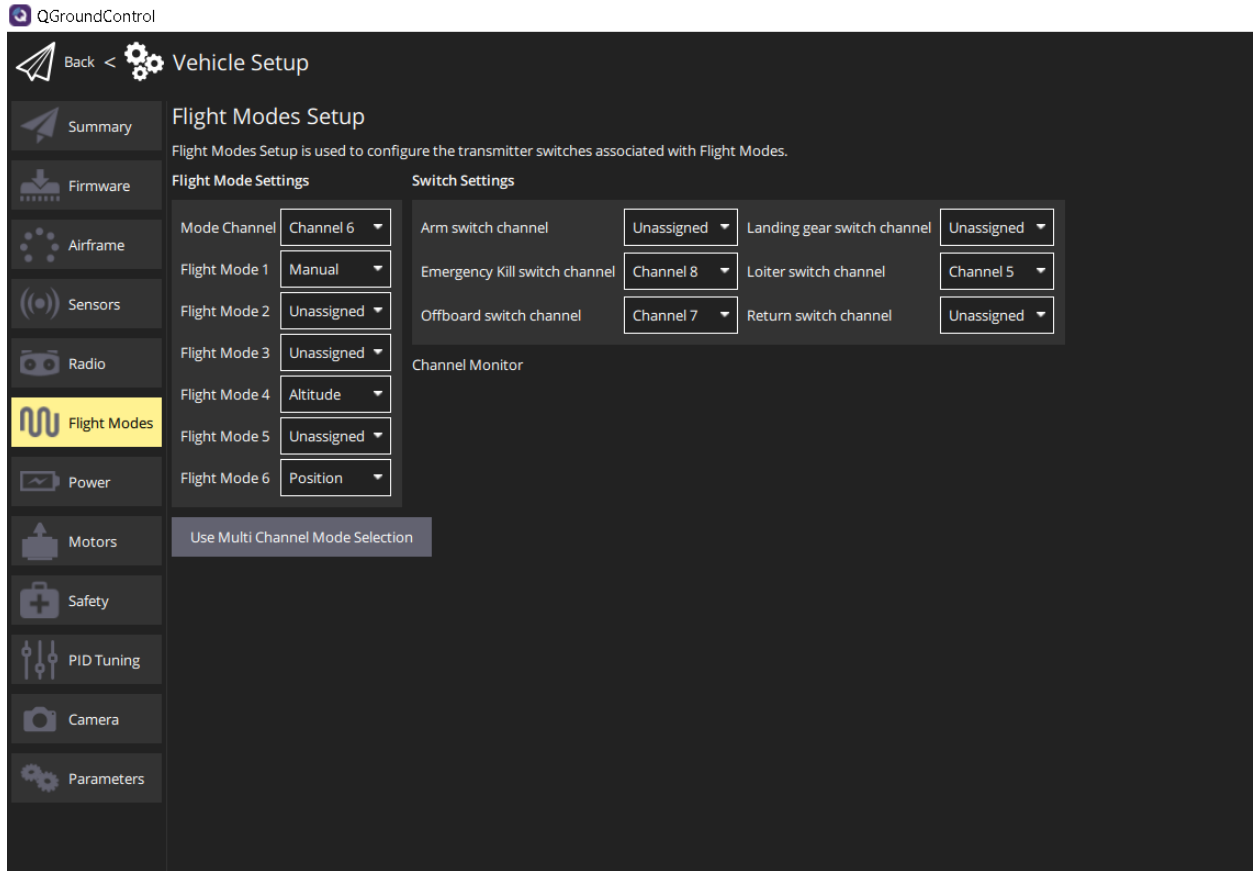
Εικόνα 7.4.2 Βαθμονόμηση αισθητήρων στο QGroundControl

Στη συνέχεια βαθμονομούμε το σύστημα πομπού και δέκτη. Αφού πάμε στο μενού Radio και επιλέξουμε Mode 2, ακολουθούμε τα βήματα που μας υποδεικνύει το QGroundControl για να αναθέσουμε τα roll, pitch, yaw και throttle σε κανάλια.



Εικόνα 7.4.3 Βαθμονόμηση Συστήματος Πομποδέκτη στο QGround Control

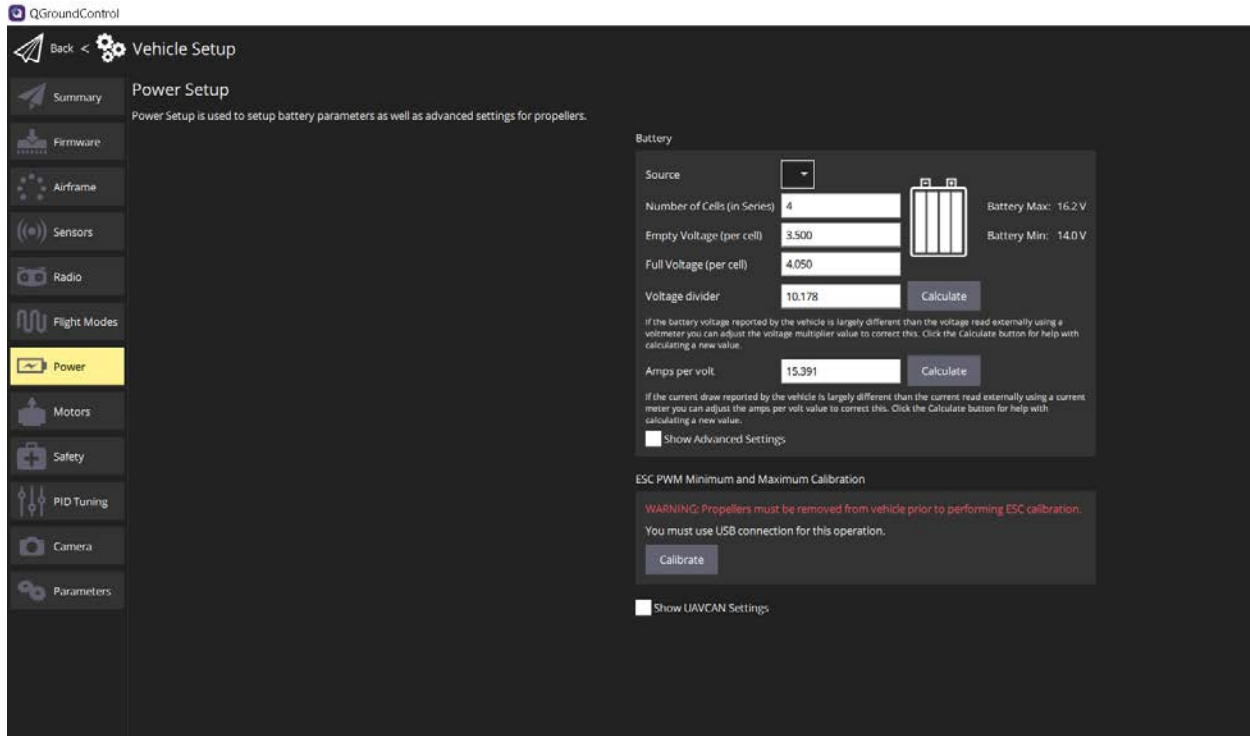
Στο επόμενο βήμα επιλέγουμε τα flight modes. Στο μενού flight modes αναθέτουμε σε κάθε κανάλι το flight mode που του αντιστοιχεί. Αυτά επιλέχθηκαν με βάση του τι προτείνει η NXP για τα HoverGames, και συμπληρώθηκαν παρατηρώντας την ανάθεση flight modes από άλλους χρήστες ΣμηΕΑ.



Εικόνα 7.4.4 Ανάθεση καναλιών

Όπως φαίνεται, το modes channel είναι το κανάλι 6, το loiter switch channel είναι το κανάλι 5, το emergency kill switch channel είναι το κανάλι 8. Το kill switch ενεργοποιείται θέτοντας τον αριστερό μοχλό περίπου στις 5 η ώρα, τον δεξί κεντραρισμένο οριζόντια και κάθετα και τον διακόπτη D στην πάνω θέση. Το flight mode 1 είναι το manual flight mode που θα χρησιμοποιήσουμε κατά την πτήση και το flight mode 6 είναι το position, στο οποίο η θέση του ΣμηΕΑ παραμένει σταθερή.

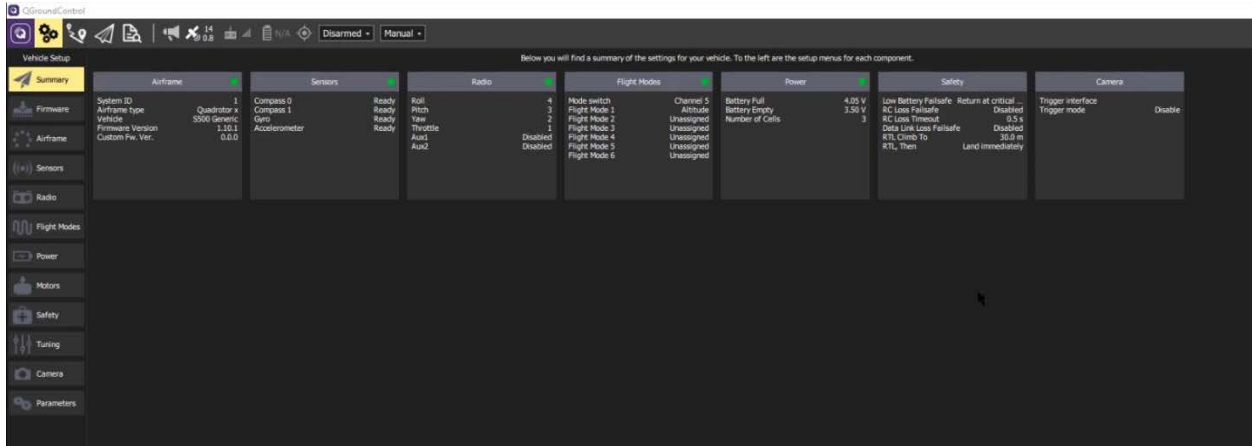
Τέλος, στο μενού power βαθμονομούμε την χρήση της μπαταρίας που έχει επιλεγεί για το ΣμηΕΑ. Αυτή η λειτουργία δίνει σημαντικές πληροφορίες στην FMU για την μπαταρία και το πόση ισχύ μπορεί να δώσει ώστε να ρυθμίσει την κατανάλωση αναλόγως. Σε αυτό το βήμα συνδέουμε την μπαταρία στο ΣμηΕΑ.



Εικόνα 7.4.5 Βαθμονόμηση μπαταρίας στο QGround Control

Αυτό που παρατηρήθηκε είναι πως με το PX4 v1.14.0 δεν είναι εφικτός ο έλεγχος των κινητήρων στο μενού motors. Με το PX4 v1.12.3 που ανέβηκε μέσω του MATLAB ήταν εφικτός ο έλεγχος των κινητήρων, οπότε έγινε σίγουρο πως είναι πλήρως λειτουργικά όλα τα εξαρτήματα.

Τελικά, αφού έχουμε ολοκληρώσει όλους τους ελέγχους που απαιτούνται από το QGroundControl, το αρχικό μενού θα πρέπει να μοιάζει έτσι:

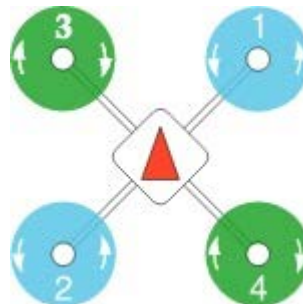


Εικόνα 7.4.6 Τέλος βαθμονόμησης

Δηλαδή οι δείκτες δίπλα σε κάθε κατηγορία να είναι πράσινοι. Εάν είναι κόκκινοι, τότε η αντίστοιχη κατηγορία δεν έχει βαθμονομηθεί και είτε δεν είναι ασφαλές, είτε είναι αδύνατον να πετάξει το ΣμηΕΑ διότι το QGroundControl δεν το αφήνει. Επιπλέον, εάν δεν υπάρχει GPS συνδεδεμένο στον ελεγκτή πτήσης ή το QGroundControl, είναι αδύνατη η δημιουργία αυτόνομης αποστολής στον χάρτη. [72] [73]

## 7.5 Έλεγχος Προ Πτήσης

Σαν τελευταίο βήμα, πρέπει να ελεγχθεί η ικανότητα του ΣμηΕΑ για πτήση. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, ελέγχθηκαν τα εξαρτήματα του ΣμηΕΑ για φθορά και βεβαιώθηκε ότι η μπαταρία ήταν επαρκώς φορτισμένη. Επιπλέον, ελέγχθηκε η καλωδίωση του ΣμηΕΑ, διότι είχε παραληφθεί κατασκευασμένο, οπότε ένας τελικός έλεγχος κρίθηκε σκόπιμος. Βεβαιώθηκε ότι οι κινητήρες είναι συνδεδεμένοι στη σωστή σειρά στην FMU, και ότι είχε συνδεθεί το BEC για την παροχή τάσης.



### Εικόνα 7.5.1 Κατεύθυνση περιστροφής κινητήρων

Στην εικόνα φαίνεται η σειρά που πρέπει να είναι συνδεδεμένοι οι κινητήρες στο servorail της FMU. [73]



Εικόνα 7.5.2 Οι κινητήρες και το UBEC συνδεδεμένα στο servorail του FMUK66

Προβλήματα που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κομμάτι ήταν:

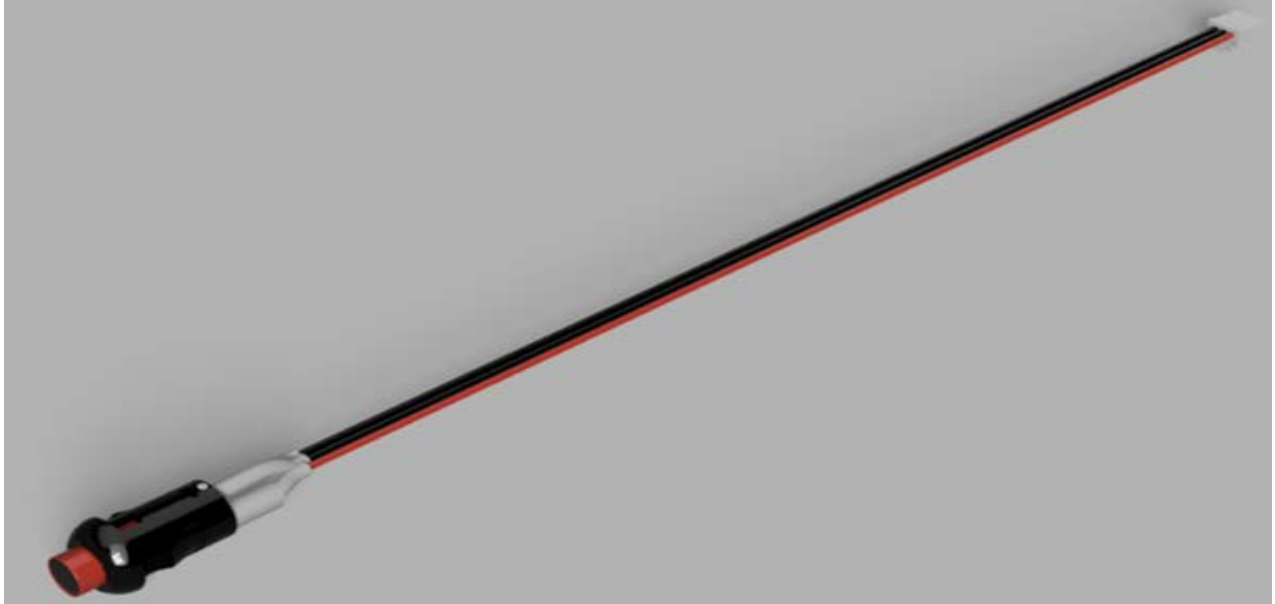
- 1) η μπαταρία είχε βύσμα XT30 ενώ το σκάφος XT60. Αντιμετωπίστηκε κολλώντας στην μπαταρία ένα βύσμα XT60 που ήταν διαθέσιμο.
- 2) Η πλακέτα DCD-LZ δεν ήταν διαθέσιμη. Έγινε προσπάθεια για κατασκευή εναλλακτικής συσκευής σύμφωνα με τις παρακάτω συνδέσεις που είναι διαθέσιμες στη σελίδα της NXP. [68]

## Connector pinout

Pin	Signal	Voltage
1	VCC	+3.3V
2	UART TX	+3.3V
3	UART RX	+3.3V
4	SWD DIO	+3.3V
5	SWD CLK	+3.3V
6	MCU RESET	+3.3V
7	GND	GND

Εικόνα 7.5.3 Πίνακας με τις συνδέσεις του DCD-LZ

- 3) Τέλος ένα πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε ήταν το γεγονός πως το ΣμηΕΑ δεν γινόταν να οπλίσει για την πτήση. Μετά από διάφορες προσπάθειες επίλυσης του προβλήματος, οι οποίες είχαν να κάνουν με εντοπισμό προβλημάτων στο GPS, τον ελεγκτή πτήσης αλλά και τις συνδέσεις του ΣμηΕΑ, το πρόβλημα ανακαλύφθηκε πως είχε να κάνει με έναν διακόπτη οπλισμού, ο οποίος στις σύγχρονες εκδόσεις του GPS M8N είναι ενσωματωμένος σε αυτό (από την έκδοση Rev.C και μετά), ενώ σε πιο παλιές εκδόσεις είναι ξεχωριστό εξάρτημα και πρέπει να κουμπωθεί στον ελεγκτή πτήσης [69]. Ο εν λόγω διακόπτης είναι αυτός:



Εικόνα 7.5.4 Ο Διακόπτης Όπλισης

Μετά την τοποθέτηση του το ΣμηΕΑ λειτούργησε κανονικά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>: Προσομοίωση στο Simulink

Αφού είδαμε πως το ΣμηΕΑ λειτουργούσε κανονικά, έγινε προσπάθεια για την προσομοίωση του controller στο MATLAB. Αρχικά θα γίνει μια παρουσίαση για το toolbox που χρησιμοποιήθηκε, και έπειτα για την πορεία εργασίας που ακολούθησε. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα βήματα παραγωγής κώδικα τόσο για τον ελεγκτή πτήσης, όσο και για τον υπολογιστή (Host Target)

### 8.1 Το UAV Toolbox Support Package for PX4 Autopilots

Το toolbox αυτό είναι μια προσθήκη στο UAV toolbox που υπήρχε ήδη στο MATLAB και προσθέτει συγκεκριμένα εργαλεία για προσομοιώσεις SITL και HITL στο Simulink χρησιμοποιώντας ελεγκτές πτήσης οι οποίοι λειτουργούν με λογισμικό PX4. Διαθέτει ικανότητα αλληλεπίδρασης με διάφορα προγράμματα προσομοίωσης ΣμηΕΑ όπως τα Gazebo και jMAVsim, αλλά και το QGroundControl για προσομοίωση πτήσης σε λειτουργία HITL.

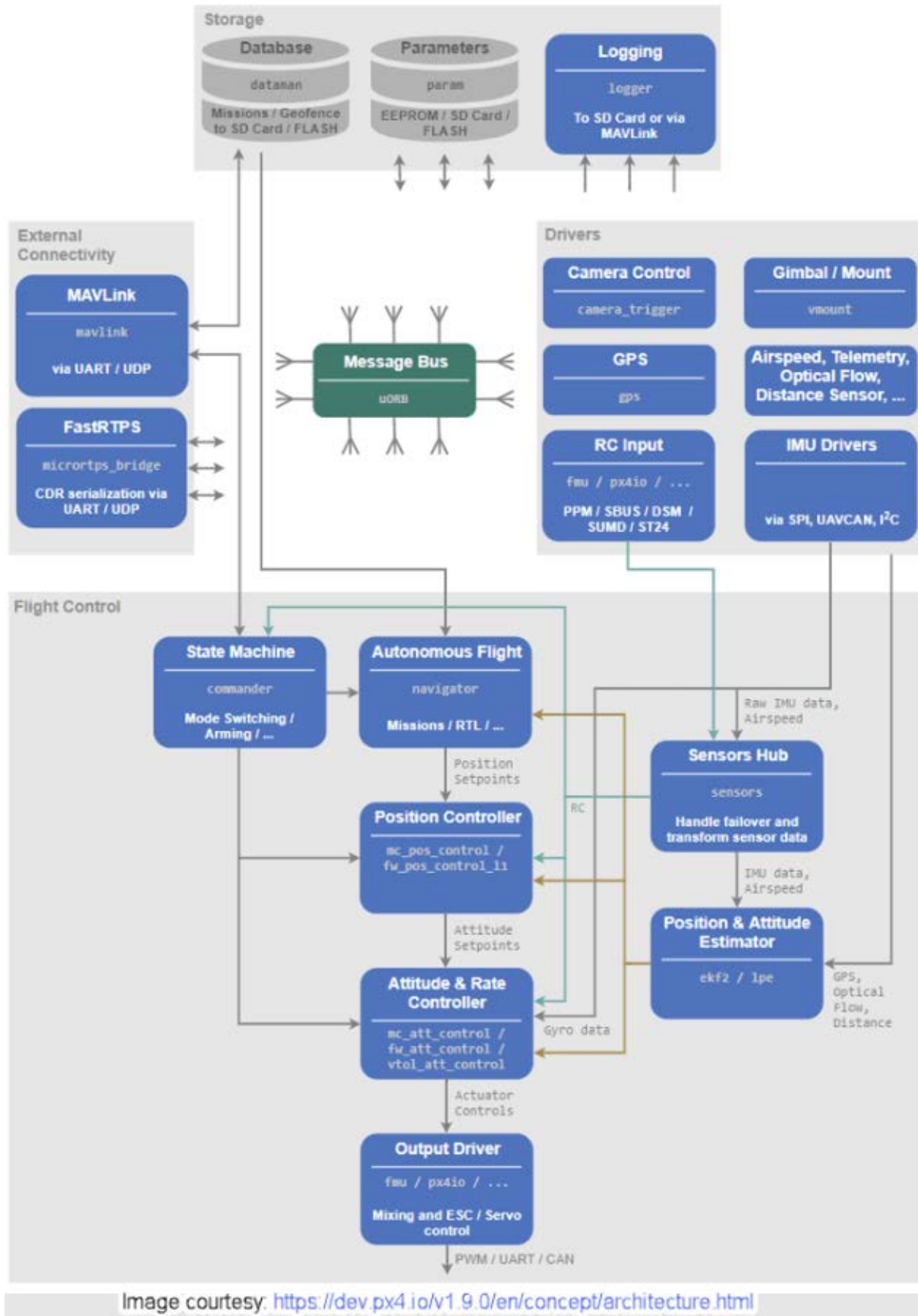
#### 8.1.2 Ενσωμάτωση με την γενική αρχιτεκτονική του PX4

Το Pixhawk 4 είναι λογισμικό και υλικολογισμικό που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο πλοήγησης διαφόρων οχημάτων, όπως τετρακόπτερα, ελικόπτερα, αεροπλάνα σταθερής πτέρυγας και σκάφη επιφανείας.

Είναι ένα open source λογισμικό, κάτι που επιτρέπει στον καθένα να το χρησιμοποιήσει και να το αλλάξει με βάση την εφαρμογή που έχει κατά νου.

Η γενική αρχιτεκτονική του PX4 φαίνεται εδώ:

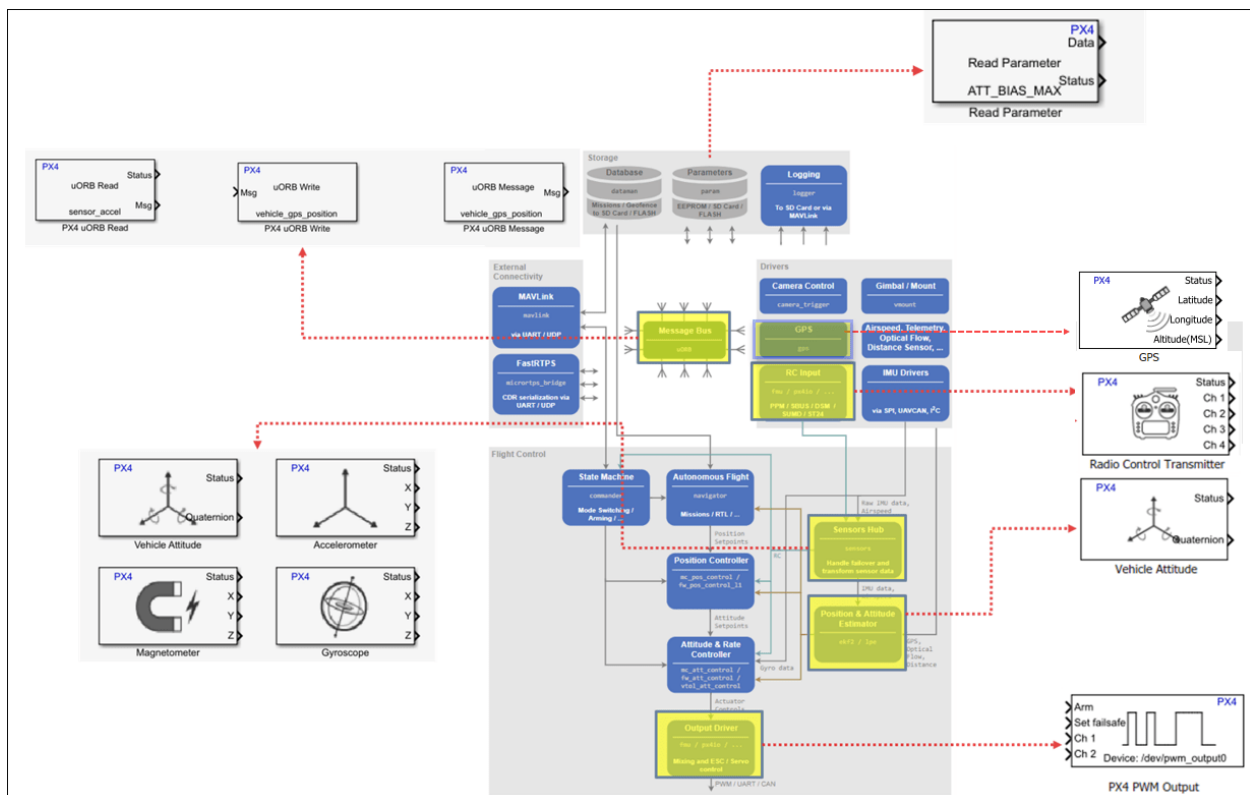




Εικόνα 8.1.2.1 Η αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου του PX4

Αυτή είναι η αρχιτεκτονική υψηλού επιπέδου του PX4 που όπως παρατηρούμε είναι αρκετά πολύπλοκη. Μερικά κομμάτια του είναι αισθητήρες, ελεγκτές για τους σερβοκινητήρες, δυνατότητα για υπολογισμό θέσης, GPS και gimbal για τον έλεγχο κάμερας.

Μερικά από αυτά τα κομμάτια της αρχιτεκτονικής είναι δυνατόν να προσομοιωθούν με το εν λόγω toolbox.



Εικόνα 8.1.2.2 Τα κομμάτια της αρχιτεκτονικής PX4 που προσομοιώνονται με το UAV Toolbox Support Package for PX4 Autopilots

Επίσης, με τον Embedded Coder του MATLAB είναι δυνατόν να παραχθεί κώδικας για την αντικατάσταση ορισμένων τμημάτων του ελεγκτή πτήσης. Αυτός ο κώδικας ενσωματώνεται ως module με όνομα px4\_simulink\_app στο PX4 υλικολογισμικό. [74]

### 8.1.3 Πορεία εργασίας με τον FMUK66

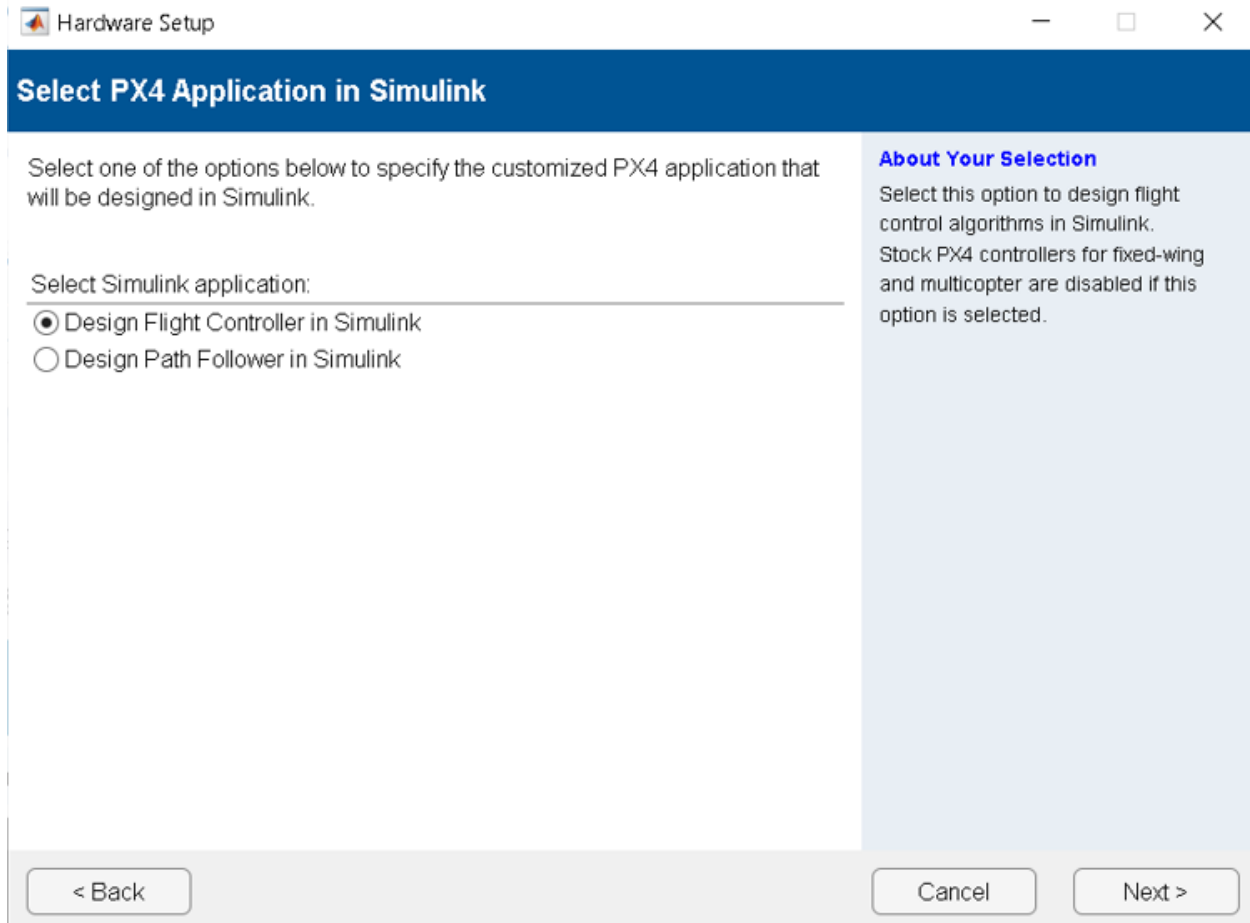
Ξεκινώντας την πορεία εργασίας, ακολουθήθηκαν τα βήματα που προτείνει η εταιρία Mathworks. Αρχικά κατεβάσαμε το πακέτο του συγκεκριμένου toolbox, διότι δεν συμπεριλαμβάνεται στο

UAV toolbox, έπειτα πηγαίνοντας στον Add-on Manager επιλέγουμε το toolbox. Αρχικά κατεβάζουμε την Python 3.8 ή νεότερη έκδοση και με τη βοήθεια του Cygwin Toolchain κατεβάζουμε το υλικολογισμικό PX4. Σε αυτό το βήμα είναι πολύ εύκολο να γίνουν κάποια σφάλματα από τον χρήστη ή από το ίδιο το λογισμικό:

- Εάν το μονοπάτι για τον φάκελο PX4 που θα δημιουργηθεί είναι πολύ μεγάλο, τότε ο coder δεν θα μπορεί να εντοπίσει τα αρχεία και η παραγωγή κώδικα θα βγάλει σφάλμα. Αυτό το πρόβλημα δεν εμφανίστηκε διότι το λογισμικό κατεβαίνει κατευθείαν στον βασικό δίσκο του συστήματος και το μονοπάτι είναι πολύ μικρότερο από αυτό που θα εμφάνιζε σφάλμα. Επίσης θα πρέπει όλες οι λέξεις στο μονοπάτι να είναι στα αγγλικά.
- Το λογισμικό κατεβαίνει χωρίς να έχει όλα τα αρχεία που πρέπει στους φακέλους του. Αυτό το σφάλμα αντιμετωπίστηκε 2 φορές παρόλο που ακολουθήθηκαν τα βήματα όπως φαίνονται εδώ [75].
- Το λογισμικό PX4 γίνεται να κατέβει και χειροκίνητα [76], στην οποία περίπτωση ο χρήστης πρέπει να εισάγει κάποιες εντολές. Ο χρήστης δύναται να εισάγει κάποια εντολή πριν ολοκληρωθεί η εκτέλεση της προηγούμενης, το οποίο οδηγεί είτε σε φακέλους χωρίς αρχεία, είτε σε κατέβασμα λάθος έκδοσης του υλικολογισμικού. Πρέπει να σημειωθεί πως το συγκεκριμένο toolbox λειτουργεί αποκλειστικά με την έκδοση 1.12.3 του Pixhawk 4, και οποιαδήποτε άλλη έκδοση οδηγεί τον Embedded Coder σε σφάλμα κατά την παραγωγή κώδικα. Για αυτό υπάρχει ενσωματωμένος έλεγχος για την έκδοση του στα βήματα.

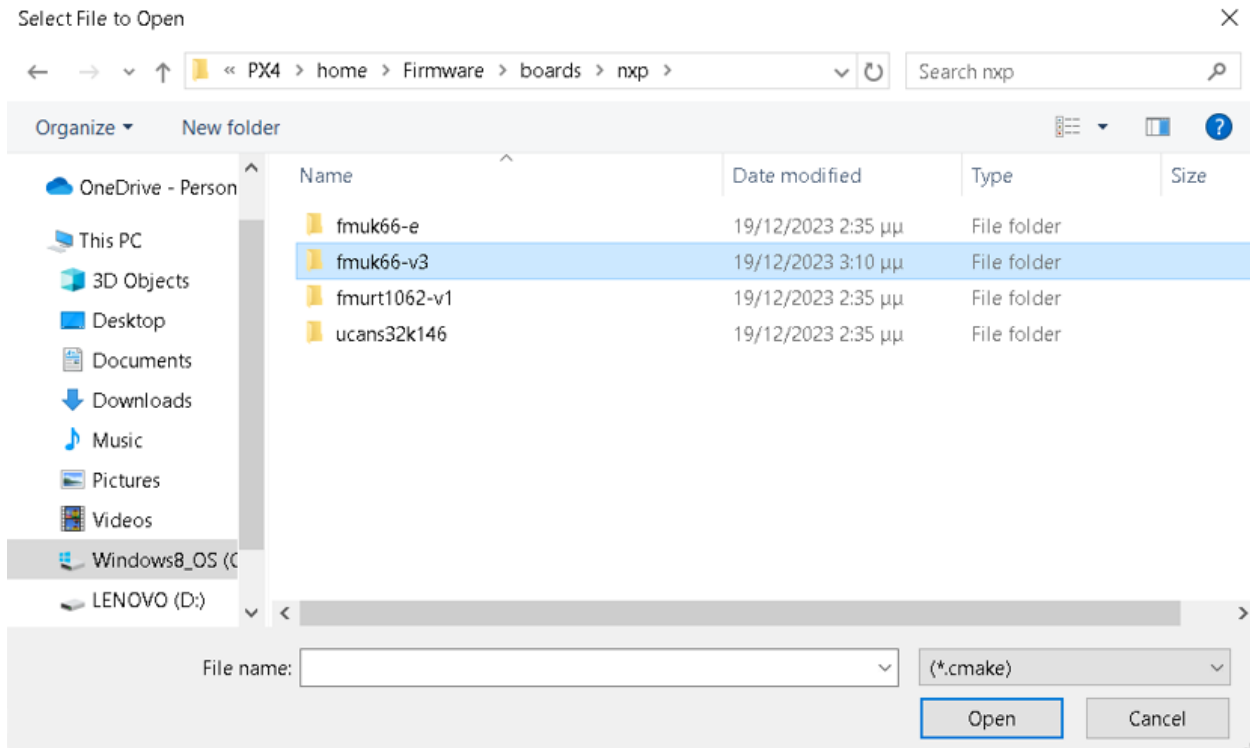
Μετά από μερικές αποτυχημένες προσπάθειες, το υλικολογισμικό κατέβηκε, έγινε build αυτόματα από το MATLAB και έγινε επιλογή για τον σχεδιασμό ελεγκτή πτήσης στο Simulink.

Το Simulink προσφέρει δύο επιλογές, ελεγκτή πτήσης και path follower. Επιλέχθηκε ο ελεγκτής πτήσης διότι δεν χρειαζόμασταν αλληλεπίδραση του πραγματικού ελεγκτή με κάποιο υποσύστημα του ΣμηΕΑ [77], αλλά και ο αρχικός σκοπός μας ήταν η δημιουργία ψηφιακού διδύμου για τον ελεγκτή πτήσης, όχι μια προσομοίωση πτήσης.



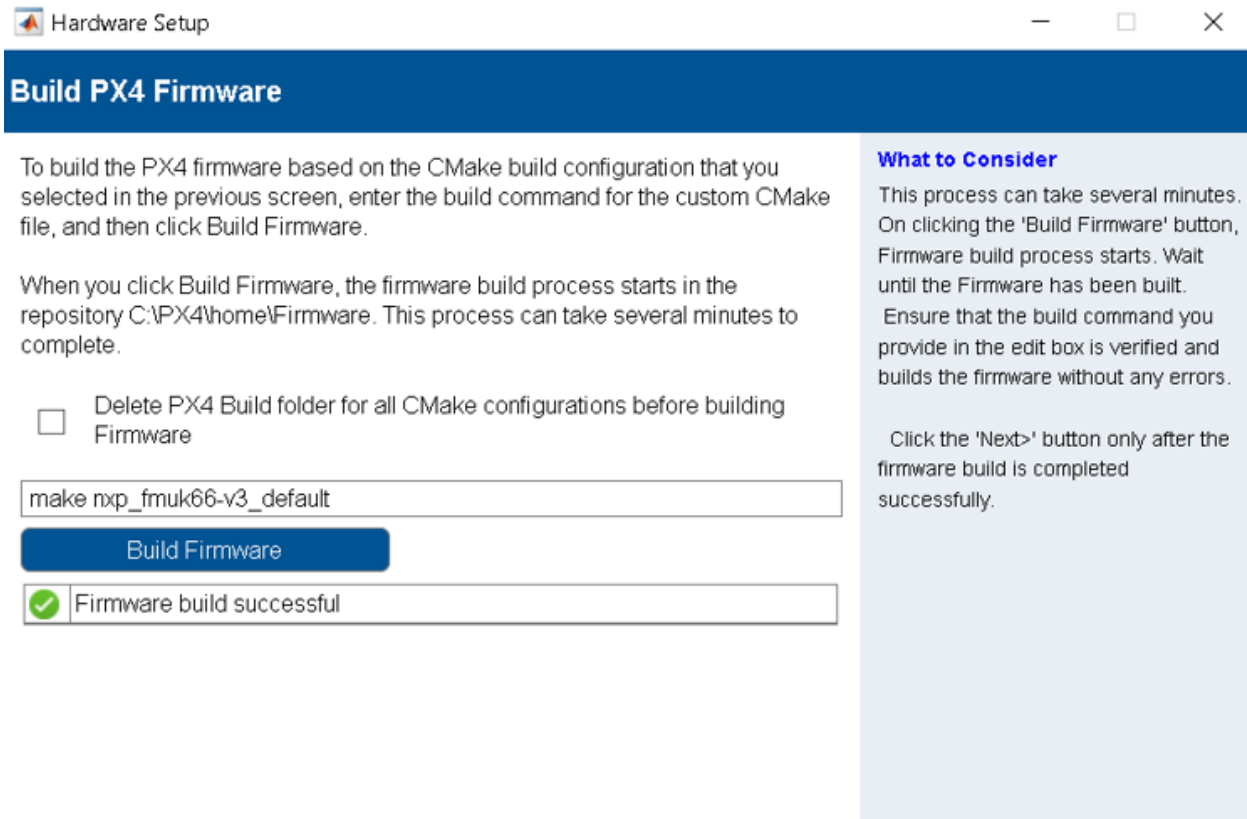
Εικόνα 8.1.3.1 Οθόνη επιλογής σχεδιασμού στο Simulink

Μετά από αυτό το βήμα ακολούθησε η επιλογή του ελεγκτή πτήσης. Η επιλογή **My board is not listed here** μας οδηγεί σε φακέλους οι οποίοι έχουν διάφορους ελεγκτές, και επιλέξαμε npx και FMUK66-v3 γιατί αυτό είναι το λογισμικό που τρέχει ο FMUK66 Rev. B.



Εικόνα 8.1.3.2 Επιλογή φακέλου του FMUK66-v3

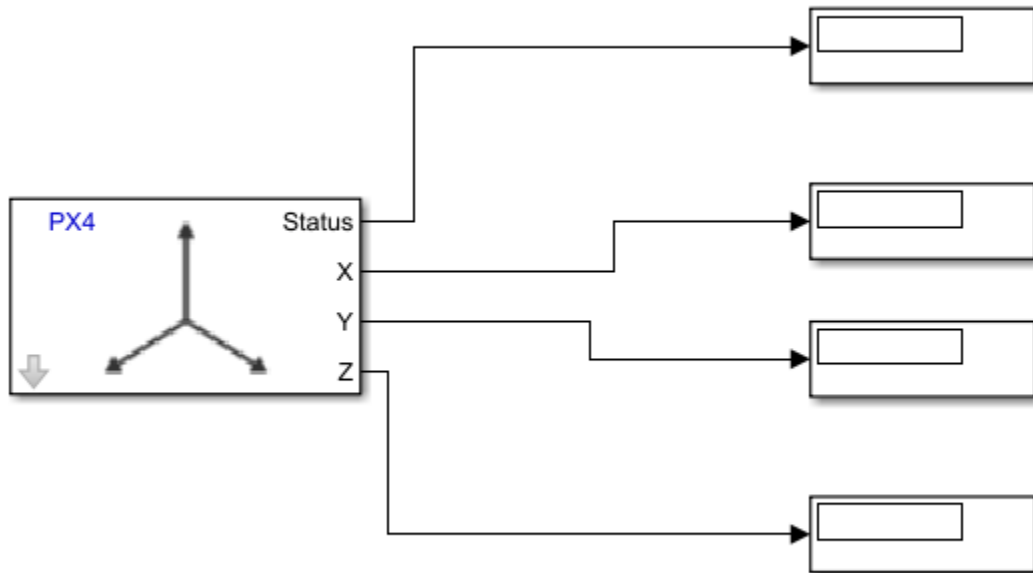
Μια άλλη επιλογή είναι εάν θέλουμε να ξεκινήσουμε με το standard script (rcS) ή με custom script (rc). Στην πρώτη επιλογή, διάφορα modules του ελεγκτή είναι απενεργοποιημένα ενώ στην δεύτερη υπάρχει η επιλογή για απενεργοποίηση τους. Επιλέχθηκε το standard script διότι δεν υπήρχε ανάγκη για ενεργοποίηση των modules. Το επόμενο βήμα είναι η παραγωγή κώδικα, η οποία ολοκληρώθηκε επιτυχώς.



Εικόνα 8.1.3.3 Επιτυχής παραγωγή κώδικα υλικολογισμικού από το MATLAB

Τέλος, ο κώδικας ανέβηκε επιτυχώς στον ελεγκτή πτήσης. Πρέπει να σημειωθεί πως το τελευταίο βήμα, το οποίο είναι το ανέβασμα του κώδικα στον ελεγκτή πτήσης και η λήψη τιμών από το επιταχυνσιόμετρο κολλάνε πάρα πολύ, ασχέτως της επεξεργαστικής ισχύος ή της διαθέσιμης μνήμης RAM του υπολογιστικού συστήματος που είναι διαθέσιμο. Το τελευταίο βήμα, το οποίο ήταν η λήψη τιμών από το επιταχυνσιόμετρο δεν πραγματοποιήθηκε, αλλά ήταν δυνατή η επιβεβαίωση του ανεβάσματος του κώδικα μέσω του QGroundControl, το οποίο εμφανίζει το περασμένο υλικολογισμικό του ελεγκτή ως 1.12.3dev. Αυτά τα βήματα φαίνονται εδώ [78].

Ακολούθησε η προσπάθεια να δουλέψει ο ελεγκτής πτήσης με ένα απλό προτεινόμενο παράδειγμα της Mathworks στο Simulink, μέσω της προσομοίωσης Connected I/O. Συγκεκριμένα το παράδειγμα που δοκιμάστηκε ήταν αυτό [79], το οποίο είναι ένα επιταχυνσιόμετρο και οι τιμές που βγάζει σε μερικές οθόνες όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 8.1.3.4 Επιταχυνσιόμετρο στο Simulink

Κάνοντας την προσομοίωση εμφανίστηκε το εξής σφάλμα:

```
In file included from ../../src/modules/px4_simulink_app/customFunction.h:19:0,
```

```
from ../../src/modules/px4_simulink_app/customFunction.c:2:
```

```
../../src/modules/px4_simulink_app/MW_PX4_CAN.h:40:10: fatal error: stm32_can.h: No such file or directory
```

```
#include "stm32_can.h"
```

```
^~~~~~
```

```
compilation terminated.
```

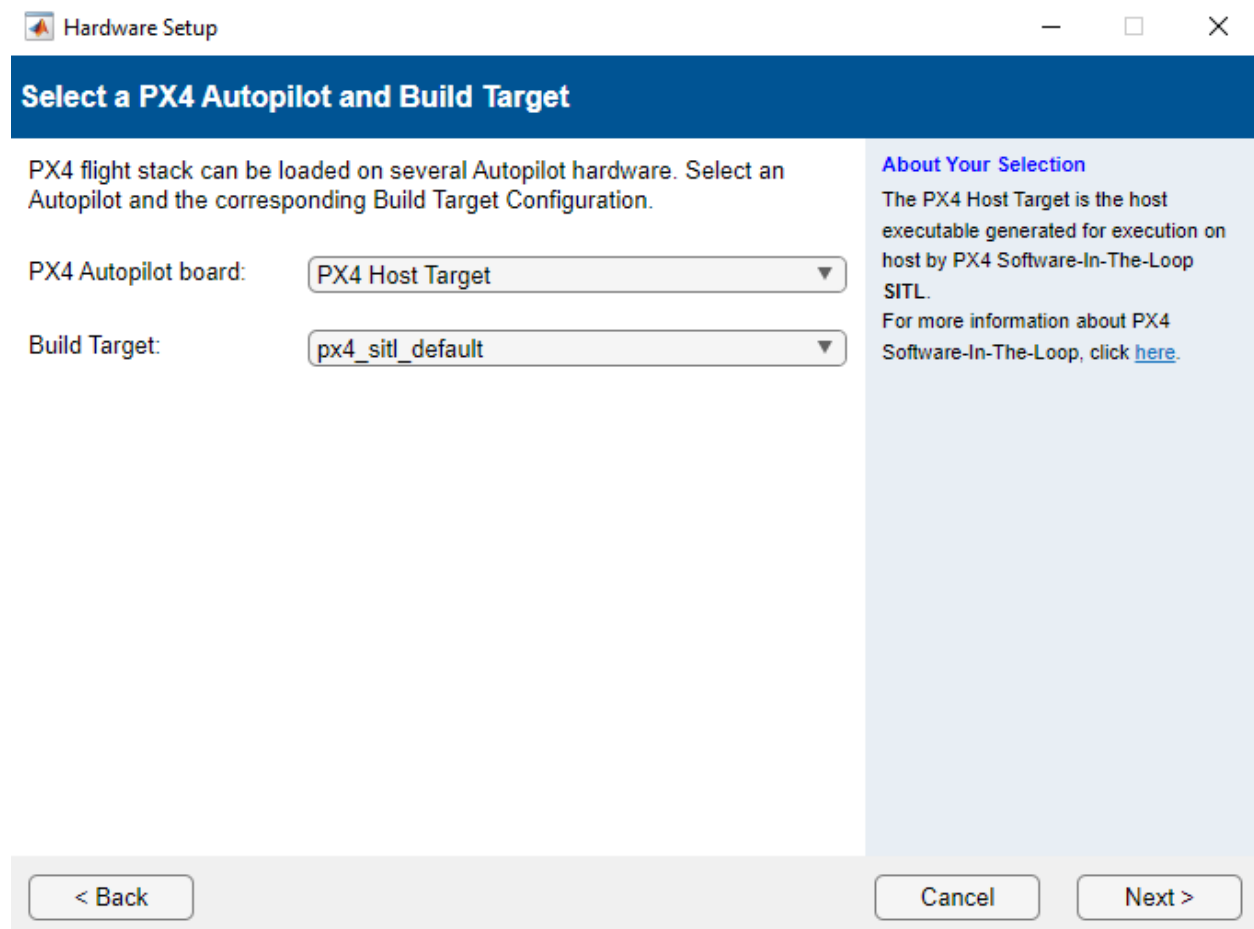
Φαίνεται πως το αρχείο `stm32_can.h` λείπει από αυτόν τον φάκελο, το οποίο επιβεβαιώθηκε. Αυτό είναι ένα αρχείο στον παραγόμενο κώδικα το οποίο έχει να κάνει με την επικοινωνία μέσω COMs του ελεγκτή πτήσης με το Simulink και είναι στον φάκελο `px4_simulink_app`. Εφόσον δεν είναι στον βασικό κώδικα PX4 αλλά στον παραγόμενο η διαδικασία του debugging κρίθηκε υπερβολικά χρονοβόρα για τον χρόνο που απέμενε και η προσομοίωση προχώρησε με την χρήση του `px4_host_target`. Σημειώνεται πως χωρίς την χρήση ενός φυσικού ελεγκτή πτήσης δεν είναι δυνατή η πραγματοποίηση HITL προσομοίωσης.

Το σφάλμα αυτό οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στον παραχθέντα κώδικα καθώς η Mathworks προειδοποιεί πως δεν έχει ελεγχθεί η πλήρης λειτουργικότητα του toolbox σε όλους του ελεγκτές πτήσης [80] αλλά και ότι οι ελεγκτές οι οποίοι υποστηρίζονται από εταιρίες, όπως ο FMUK66 [81], δεν συνιστώνται για χρήση στο συγκεκριμένο toolbox.

#### 8.1.4 Πορεία εργασίας με τον PX4 Host Target

Το MATLAB μας δίνει τη δυνατότητα να τρέξουμε τον κώδικα στον υπολογιστή μας (Host Target) αντί για την πλακέτα κάποιου ελεγκτή πτήσης PX4. Αφού δεν ήταν δυνατή η σύνδεση του FMUK66 με το Simulink, αποφασίστηκε η χρήση του μοντέλου αυτού. Προφανώς χρησιμοποιώντας το μοντέλο αυτό είναι αδύνατη η HITL προσομοίωση.

Ακολουθώντας τα ίδια βήματα τα οποία αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, επιλέγουμε για board το PX4 Host Target.



Εικόνα 8.1.4.1 Επιλογή του PX4\_Host\_Target



Όταν η παραγωγή κώδικα τελειώσει, ξεκινάει αυτόματα μια προσομοίωση στο πρόγραμμα jMAVSim. Αυτό γίνεται επίσης με κάθε μοντέλο Simulink το οποίο χρησιμοποιεί το PX4 Host Target.

### 8.1.5 Είδη Προσομοιώσεων

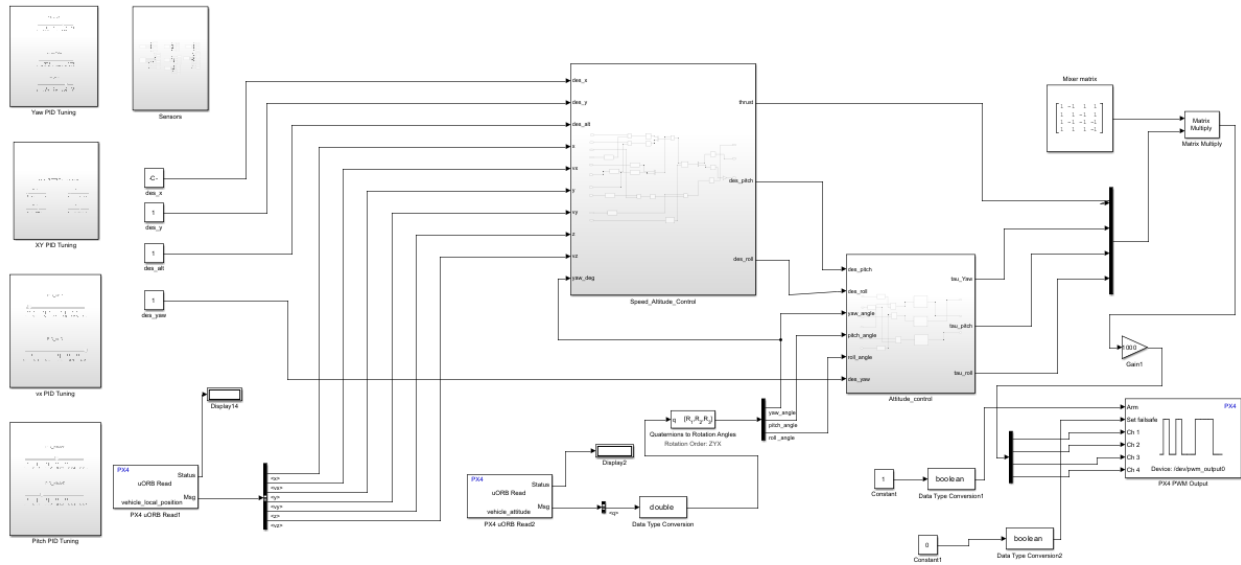
Η προσομοίωση στο Simulink όταν χρησιμοποιείται η τεχνική του Model-based Design μπορεί να περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- 1) Προσομοίωση του συστήματος με blocks του Simulink: σε αυτό το στάδιο μοντελοποιείται ο ελεγκτής και το υπόλοιπο σύστημα σε απλό περιβάλλον Simulink. Το μοντέλο δεν έχει επαφή με υλισμικό ή λογισμικό που χρησιμοποιείται στο τελικό προϊόν, χρησιμοποιούνται μόνο οι μαθηματικές εξισώσεις του.
- 2) Software-in-the-loop simulation (SITL): Ο κώδικας που θα χρησιμοποιηθεί στο τελικό προϊόν, ο οποίος συνήθως έχει παραχθεί μηχανικά, τρέχει στον υπολογιστή μέσω μιας προσομοίωσης του υλισμικού του.
- 3) Processor-in-the-loop (PITL) simulation: Ο κύριος επεξεργαστής του συστήματος χρησιμοποιείται για να τρέξει τον κώδικα που έχει παραχθεί. Δεν συμμετέχουν άλλα κομμάτια του συστήματος που πιθανόν θα έπαιζαν ρόλο στο τελικό προϊόν.
- 4) Hardware-in-the-loop (HIL) simulation: Το υλισμικό χρησιμοποιείται ως κομμάτι του κλειστού βρόχου προσομοίωσης με όποια από τα επιπλέον κομμάτια του συστήματος κρίνεται σκόπιμο (π.χ. για έναν ελεγκτή πτήσης αυτό θα σήμαινε αισθητήρες, GPS)

Μετά από αυτό το κομμάτι μπορούμε να προχωρήσουμε στην ολοκλήρωση του συστήματος ψηφιακού διδύμου ενσωματώνοντας την προσομοίωση μας σε ένα περιβάλλον όπως το Gazebo. Σε αυτήν την εργασία φτάσαμε μέχρι το κομμάτι του Software-in-the-Loop.

### 8.1.5 Μοντέλο Ελεγκτή

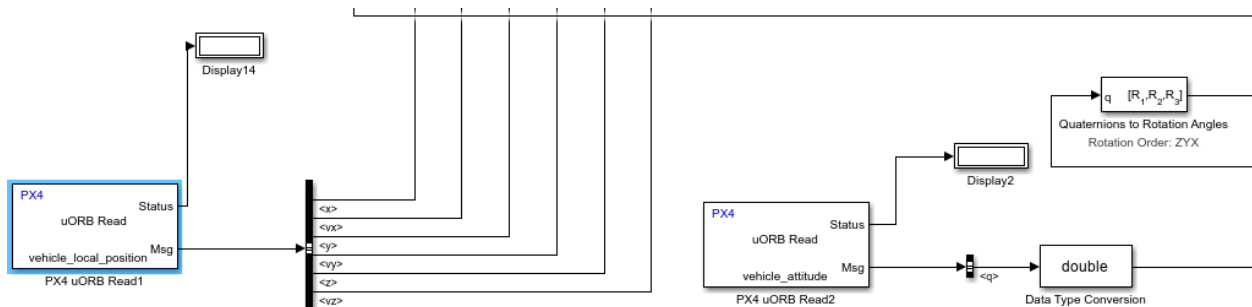
Ως κομμάτι της εργασίας, μοντελοποιήθηκε ένας ελεγκτής πτήσης PX4 με sliders. Το μοντέλο του Simulink ήταν αυτό:



Εικόνα 8.1.5.1 Ελεγκτής που σχεδιάστηκε στο Simulink βασισμένος στο PX4 toolbox

Περιλαμβάνει uORB Read Blocks, PWM Outputs, αισθητήρες και PID ελεγκτές. Ο σκοπός του μοντέλου αυτού δεν είναι η απλή προσομοίωση του ελεγκτή πτήσης, αλλά η παρατήρηση των αποτελεσμάτων που έχει η αλλαγή τιμών στις μεταβλητές P και D των ελεγκτών στην πτήση του τετρακόπτερου. Για αυτό δεν έχουμε οθόνες που μελετούμε τα σήματα του εκάστοτε ελεγκτή αλλά παρατηρούμε το τελικό αποτέλεσμα στο jMAVSIM. Επιπλέον, θα παρατηρήσει κανείς πως δεν υπάρχει slider για την I συνιστώσα. Αυτό δεν είναι κάποια παράληψη στον σχεδιασμό, αλλά σκοπίμως δεν έχει δοθεί η δυνατότητα αλλαγής τιμών σε αυτή τη συνιστώσα, καθώς μια πολύ μικρή αλλαγή της μπορεί να οδηγήσει σε τεράστιες αλλαγές στην συμπεριφορά του μοντέλου.

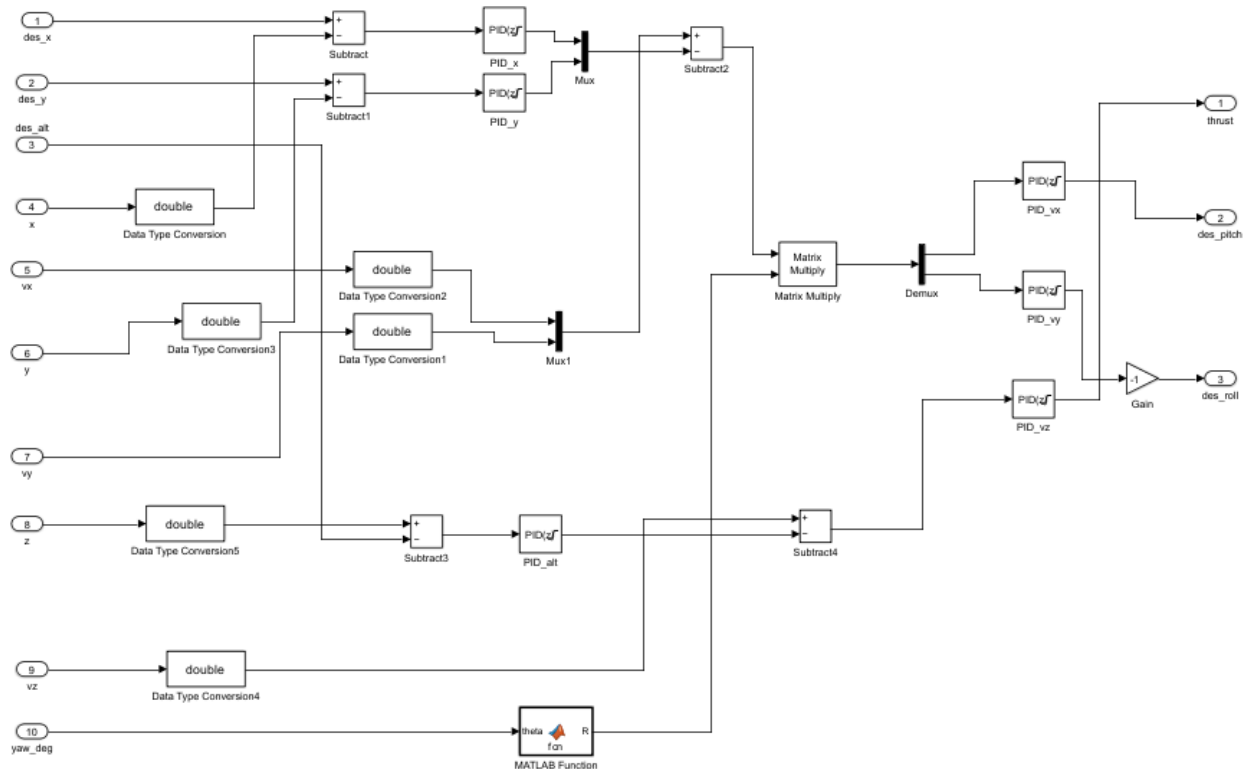
### 8.1.6 Τα uORB Blocks



Εικόνα 8.1.6.1 uORB Blocks

Το uORB είναι ένα ασύγχρονο API Publish/Subscribe που χρησιμοποιείται για επικοινωνία μέσα στο νήμα ή μέσα στη διεργασία [82] και χρησιμοποιείται από τους ελεγκτές PX4. Τα δυο uORB Blocks που χρησιμοποιήθηκαν, λαμβάνουν δεδομένα για την τοπική θέση του οχήματος και για το attitude, δηλαδή την κλίση των αξόνων του ΣμηΕΑ. Η έξοδος του είναι Simulink Bus οπότε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ειδικά blocks για να διαβάσουμε τα δεδομένα που βγάζουν. Ειδικά για το attitude, η έξοδος του block είναι σε τετραδόνια, τα οποία πρέπει να μετατραπούν σε γωνίες.

### 8.1.7 Υποσύστημα Ελέγχου Ύψους και Ταχύτητας



Εικόνα 8.1.7.1 Το υποσύστημα ελέγχου ύψους και ταχύτητας

Αυτό το υποσύστημα δέχεται ως εισόδους τις επιθυμητές τιμές  $x$ ,  $y$  και  $yaw$  καθώς και τις τρέχουσες τιμές τους μέσα από το uORB Read για την θέση.

Όλες οι τιμές που προέρχονται από το uORB Read γίνονται double μεταβλητές και οι τρέχουσες τιμές αφαιρούνται από τις ζητούμενες. Είναι απαραίτητο να αλλάξουμε τον τύπο μεταβλητών γιατί

η έξοδος των uORB Blocks είναι ένα Simulink Bus. Οι μεταβλητές γίνονται double για μεγαλύτερη ακρίβεια.

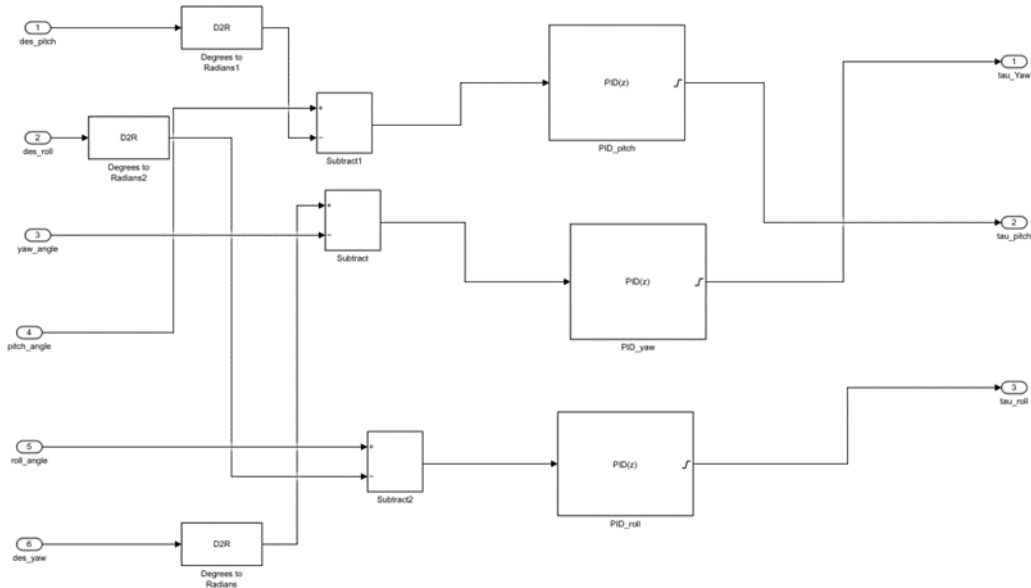
Τα αποτελέσματα των αφαιρέσεων περνούν από τους PID ελεγκτές για το x, y και ύψος. Έπειτα για τους ελεγκτές της ταχύτητας vx, vy παίρνουμε τα αποτελέσματα των ελεγκτών θέσης και πολλαπλασιάζουμε με τα vx και vy που έχουμε διαβάσει. Ο ελεγκτής για το vz βρίσκεται από την αφαίρεση του yaw σε μοίρες από το vz. Οι ελεγκτές λειτουργούν σε διακριτό χρόνο διότι εργαζόμαστε με ψηφιακά σήματα. Επίσης έχουν ενεργοποιημένα φίλτρα ώστε να μην ενισχύουν τυχόν θόρυβο.

Ο λόγος που δεν έχουμε το yaw ως z (όπως τα x, y για τα roll και pitch αντίστοιχα) είναι διότι δουλεύουμε με το σύστημα αναφοράς NED. Σε αυτό το σύστημα ο ένας άξονας αναφοράς (το yaw) είναι σταθερός σύμφωνα με ένα προεπιλεγμένο σημείο στο έδαφος. Αντιθέτως τα roll και pitch μετριούνται σε σχέση με ένα κινούμενο πλαίσιο αναφοράς το οποίο είναι επάνω στο σκάφος του τετρακόπτερου. Η αλλαγή του yaw λοιπόν, οδηγεί σε αλλαγή του άξονα που χρησιμοποιούμε ως πλαίσιο αναφοράς. Το γεγονός αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ότι για διαφορετικές τιμές του yaw, οι ίδιες τιμές των roll και pitch δίνουν διαφορετικό αποτέλεσμα. Για αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας πίνακας (το block MATLAB Function) με τον εξής κώδικα:

```
function R = fcn(theta)
R = [cos(theta) -sin(theta); sin(theta) cos(theta)];
```

Ωστε το μοντέλο να λαμβάνει υπόψιν του το μη-μηδενικό yaw όταν παράγει εντολές για τα pitch και roll από το σφάλμα θέσης.

### 8.1.8 Υποσύστημα Attitude Control



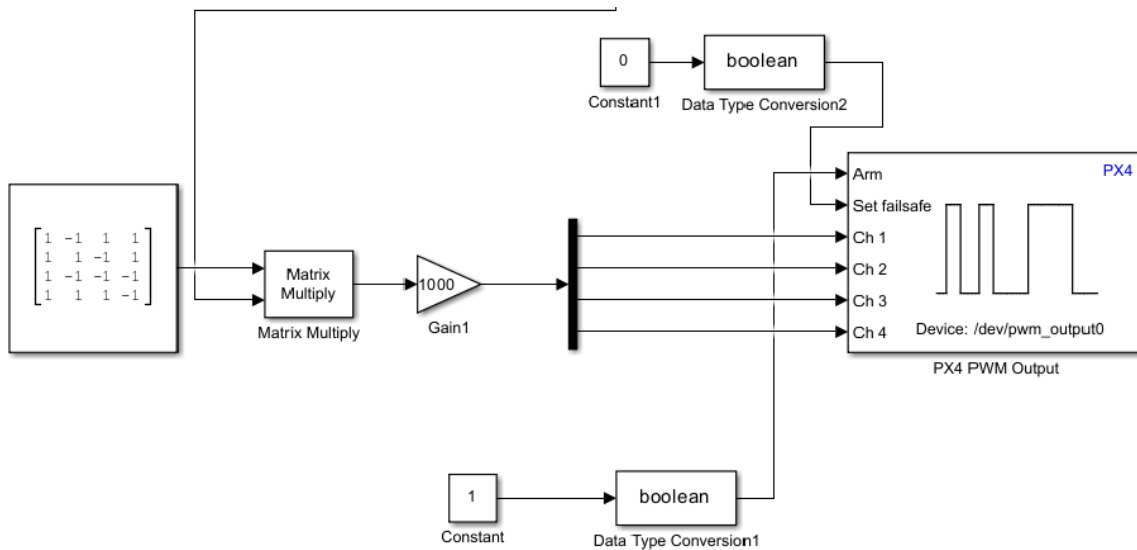
Εικόνα 8.1.8.1 Το υποσύστημα Attitude Control

Όταν αναφερόμαστε στο “attitude” σε ένα ιπτάμενο όχημα, εννοούμε τον προσανατολισμό του σε σχέση με τον ορίζοντα. Το yaw κατά κανόνα παραλείπεται και μιλάμε μόνο για τα pitch και roll.

Σε αυτό το υποσύστημα οι τρέχουσες τιμές για τα pitch, yaw και roll αφαιρούνται από τις επιθυμητές τιμές τους και το αποτέλεσμα της αφαίρεσης περνάει μέσα από τον PID ελεγκτή. Οι τιμές αυτές έπειτα περνούν σε έναν πολυπλέκτη μαζί με την τιμή για την ώθηση που έχει βγάλει ο πρώτος ελεγκτής και στη συνέχεια στο PWM Output.

Αυτός ο ελεγκτής αποτελεί διαφορετικό υποσύστημα διότι σε αντίθεση με το πρώτο υποσύστημα, εδώ εργαζόμαστε με ακτίνια. Οι τελικές τιμές αυτού του υποσυστήματος είναι που καθορίζουν το πόσο γρήγορα θα στραφεί κάθε κινητήρας του συστήματος.

### 8.1.9 PX4 PWM Output

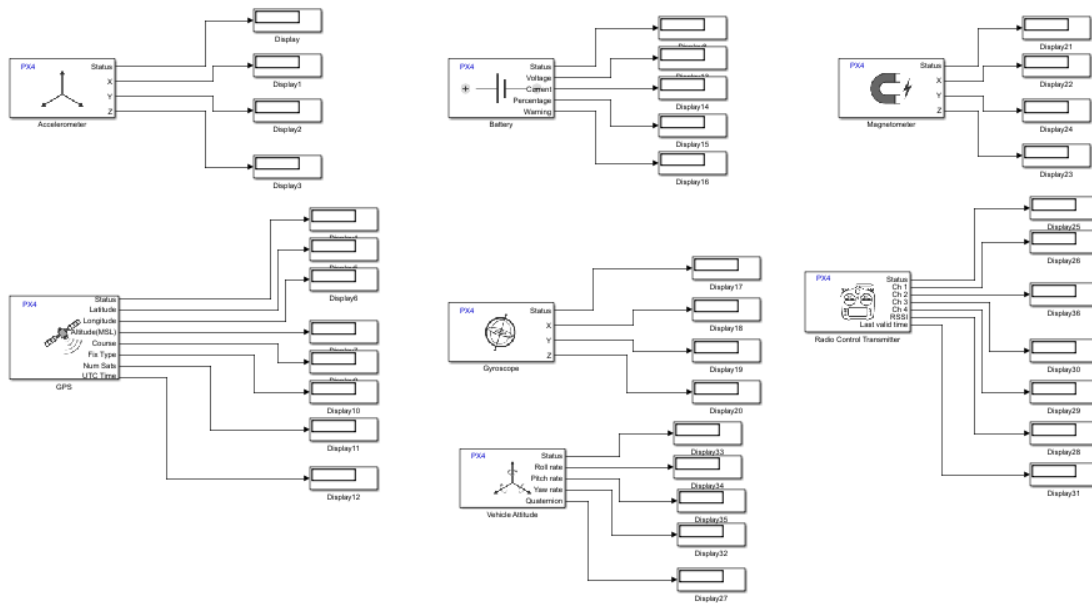


Εικόνα 8.1.9.1 Το υποσύστημα PWM Output

Οι τιμές που λαμβάνουμε από το υποσύστημα ελέγχου Attitude περνούν μετά από ένα μπλοκ πολλαπλασιασμού πινάκων και πολλαπλασιάζονται με έναν πίνακα ο οποίος έχει να κάνει με την περιστροφή του κάθε κινητήρα ώστε να λάβει σωστό πρόσημο η τελική τιμή του. Αυτός ο πίνακας βγαίνει από την εικόνα 7.5.1 (έχουμε υποθέσει πως η περιστροφή των κινητήρων είναι η ίδια. Έπειτα, περνώντας από έναν αποπολυπλέκτη οι τιμές αυτές περνούν στους κινητήρες και καθορίζουν την ταχύτητα και την διεύθυνση του τετρακόπτερου.

Ο διακόπτης Arm είναι κάτι που διαθέτουν οι περισσότεροι ελεγκτές πτήσης PX4 και το κανάλι failsafe είναι κάτι που πρέπει υποχρεωτικά να ορίζεται βάση των κανονισμών ασφαλείας. Στο Simulink δέχονται μόνο λογική είσοδο, για αυτό έχουμε βάλει ένα μπλοκ μετατροπής των constant εισόδων σε Boolean.

### 8.1.10 Αισθητήρες



Εικόνα 8.1.10.1 Μπλοκ Αισθητήρων

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνουν: μαγνητόμετρο, γυροσκόπιο, GPS, μπαταρία, αισθητήρα attitude και επιταχυνσιόμετρο. Κάθε αισθητήρας έχει τα δικά του outputs:

Επιταχυνσιόμετρο: X, Y, Z που είναι η επιτάχυνση στον κάθε άξονα και Status, που ανάλογα αν είναι 0 ή 1 δείχνει αν κρατάει νέο ή το τελευταίο μήνυμα που έλαβε

GPS: Πορεία του οχήματος, γεωγραφικό πλάτος και μήκος, είδος κλειδώματος (fix), ύψος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και ταχύτητα εδάφους

Γυροσκόπιο: Τα X, Y, Z δείχνουν τον γωνιακό ρυθμό σε rad/s, ενώ το status το ίδιο με το επιταχυνσιόμετρο.

Μπαταρία: Το status δείχνει το ίδιο με τους υπόλοιπους αισθητήρες. Μπορούμε να δούμε το ρεύμα, την τάση, το ποσοστό που αυτή είναι φορτισμένη και εάν υπάρχει προειδοποίηση ότι η στάθμη είναι πολύ χαμηλά.

Μαγνητόμετρο: Τα X, Y, Z βγάζουν τιμές μαγνητικού πεδίου σε Gauss. Το status είναι ίδιο με τους άλλους αισθητήρες.

Vehicle Attitude: Βγάζει τον ρυθμό μεταβολής των pitch, yaw και roll σε rad/s καθώς και το τετραδόνιο τους.

Τρέχοντας την προσομοίωση, μπορούμε να παρατηρήσουμε στο jMAVSim την πτήση ενός τετρακόπτερου, την οποία μπορούμε να ελέγξουμε μέσα από τα sliders τα οποία ελέγχουν τόσο τις επιθυμητές τιμές αλλά και ορισμένες τιμές των ελεγκτών PID.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα**

Η πρόοδος της επιστήμης της μηχανικής όσον αφορά τον τομέα των προσομοιώσεων τα τελευταία χρόνια είναι πραγματικά εντυπωσιακή. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις στην ενσωμάτωση διαφορετικών μεταξύ τους συστημάτων όπως το PX4 με το λογισμικό MATLAB σε ορισμένες περιπτώσεις. Πρέπει να σημειωθεί πως ο αρχικός σκοπός αυτής της εργασίας δεν ήταν μόνο η προσομοίωση με software-in-the-loop, αλλά η πλήρης δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου του διαθέσιμου τετρακόπτερου μέσω του προγράμματος Gazebo αλλά και να δούμε την hardware-in-the-loop προσομοίωση του ελεγκτή πτήσης μέσω του QGroundControl τα οποία δεν πραγματοποιήθηκαν λόγω του ελεγκτή πτήσης. Εν κατακλείδι, είδαμε ένα σχετικά μικρό μέρος των όσων μπορούν να γίνουν με το toolbox για τους ελεγκτές PX4, καθώς μπορεί να συνεργαστεί με προγράμματα όπως τα Gazebo και Unity και υλισμικό όπως τα Raspberry Pi και Jetson Nano.

## **Βιβλιογραφία – Αναφορές**



- [1] The Dawn of the Drone, Steve Mills
- [2] Unmanned Aerial Vehicles, Robotic Air Warfare 1917-2017, Steven J. Zaloga
- [3] Drone Market Report 2020 (c) by Drone Industry Insight
- [4] Defence Horizons 22, The Emergence of Mini UAVs for Military Applications, Timothy Coffey and John A. Montgomery
- [5] <https://edition.cnn.com/2013/11/07/us/faa-drones-over-us/index.html>
- [6] <https://eu.usatoday.com/story/news/nation/2014/09/25/faa-drones-movie-making/16164439/>
- [7] <http://www.aeryon.com/news/pressreleases/256-uafbpjuly2011.html>
- [8] FROM TOYS TO TOOLS: THE CO-EVOLUTION OF TECHNOLOGICAL AND ENTREPRENEURIAL DEVELOPMENTS IN THE DRONE INDUSTRY - Ferran Giones, Alexander Brem
- [9] Drone Industry Barometer 2020 (c) by Drone Industry Insight
- [10] Grant R. Flight. The Complete History of Aviation (2016)
- [11] <https://en.wikipedia.org/wiki/Aerodynamics>
- [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil>
- [13] [https://labs.phys.utk.edu/mbreinig/phys221core/modules/m8/what\\_does\\_bernoulli.html](https://labs.phys.utk.edu/mbreinig/phys221core/modules/m8/what_does_bernoulli.html)
- [14] [https://en.wikipedia.org/wiki/Bernoulli%27s\\_principle](https://en.wikipedia.org/wiki/Bernoulli%27s_principle)
- [15] [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gyroscopic\\_motion](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gyroscopic_motion)
- [16] <https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>
- [17] <https://howthingsfly.si.edu/forces-flight/four-forces>
- [18] [https://en.wikipedia.org/wiki/Steady\\_flight#Steady\\_Flight\\_Maneuvers](https://en.wikipedia.org/wiki/Steady_flight#Steady_Flight_Maneuvers)
- [19] <https://en.wikipedia.org/wiki/Thrust>
- [20] Introduction to Embedded Systems Second Edition, Edward Ashford Lee and Sanjit Arunkumar Seshia, p.20
- [21] [https://www.researchgate.net/figure/Drones-pitch-roll-and-yaw\\_fig2\\_329521700](https://www.researchgate.net/figure/Drones-pitch-roll-and-yaw_fig2_329521700)
- [22] [https://en.wikipedia.org/wiki/Torque\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Torque_effect)
- [23] <https://learntoflyblog.com/cfi-brief-torque/>
- [24] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tandem-rotor\\_aircraft](https://en.wikipedia.org/wiki/Tandem-rotor_aircraft)
- [25] [https://en.wikipedia.org/wiki/Coaxial-rotor\\_aircraft](https://en.wikipedia.org/wiki/Coaxial-rotor_aircraft)
- [26] [https://en.wikipedia.org/wiki/Ground\\_effect\\_\(aerodynamics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_effect_(aerodynamics))

- [27] WIG Craft and Ekranoplan, Liang Yun, Allan Bliault & Johny Doo
- [28] [https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/Ground\\_effect](https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/Ground_effect)
- [29] [http://www.aviation-history.com/theory/ground\\_effect.htm](http://www.aviation-history.com/theory/ground_effect.htm)
- [30] <https://www.flyingship.co/technology>
- [31] Flow Visualization Studies of VTOL Aircraft Models During Hover In Ground Effect, Nikos J. Mourtos, Stephane Couillaud, and Dale Carter, San Jose State University, San Jose, California / Craig Hange, Doug Wardwell, and Richard J. Margason, Ames Research Center, Moffett Field, California
- [32], [35] Model-Based Design for Embedded Software, Infochips
- [33] Introduction to Model-Based Design for Marine Applications, C. Kleijn, Controllab
- [34], [37] <https://www.mathworks.com/help/simscape/ug/what-is-hardware-in-the-loop-simulation.html>
- [36] Model-Based Design: Design with Simulation in Simulink - Ruth-Anne Marchant, Application Engineer, MathWorks
- [38] A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications, BARBARA RITA BARRICELLI , (Member, IEEE), ELENA CASIRAGHI , (Member, IEEE), AND DANIELA FOGLI
- [39] Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt), Dr. Michael Grieves and John Vickers
- [40], [43], [45] Design, Modeling and Implementation of Digital Twins, Mariana Segovia and Joaquin Garcia-Alfaro
- [41], [42], [44] Digital Twin Whitepaper, Luigi Manca, Roberto Grugni, Ramin Mirzazadeh
- [46] Readytosky. S500 Quadcopter Frame Stretch X FPV Drone Frame Kit PCB Version with CarbonFiber Landing Gear. n.d. April 25, 2023]; Available from: <https://www.amazon.com/ReadytoskyQuadcopter-Stretch-Version-Landing/dp/B01N0AX1M>
- [47] robomart.com - PRODUCT NAME : DJI 2212 920KV Brushless Motor for Quadcopter/Multirotor/Drone
- [48] <https://nxp.gitbook.io/hovergames/rddrone-fmuk66/connectors/fmu-power-input/fmu-power-module>
- [49] Flysky FS-i6S User Manual
- [50] User Manual of 3A UBEC
- [51] <https://genstattu.com/tattu-rline-95c-750mah-3s1p-xt30.html>
- [52] <https://nxp.gitbook.io/hovergames/rddrone-fmuk66/connectors>

- [53] <https://nxp.gitbook.io/hovergames/userguide/programming>
- [54] <https://nxp.gitbook.io/hovergames/rddrone-fmuk66/schematics>
- [55] <https://holybro.com/products/m8n-gps>
- [56] <https://quadcopterproject.wordpress.com/static-thrust-calculation/>
- [57] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/liftco.html>
- [58] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/drageq.html>
- [59] <https://andrew.gibiansky.com/downloads/pdf/Quadcopter%20Dynamics,%20Simulation,%20and%20Control.pdf>
- [60] Γ. Γεωργίου, Χ. Ξενοφάντος – Εισαγωγή στη MATLAB <https://www.csd.uoc.gr/~hy215/tutorials/MATLABbook.pdf>
- [61] <http://qgroundcontrol.com/>
- [62] Hardware-in-the-Loop Simulation Platform for UAV Based on dSPACE, Zhang Hong-Mei, Zhou Qiang, Xu Guang-Yan (2015)
- [63], [66] Software- and Hardware-in-the-Loop Verification of Flight Dynamics Model and Flight Control Simulation of a Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle, Calvin Coopmans, Michal Podhradsky, Nathan V. Hoffer
- [64] <https://wiki.paparazziuav.org/wiki/HITL>
- [65] <https://uk.mathworks.com/help/ecoder/software-in-the-loop-sil-simulation.html>
- [67] <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/15/2462#B3-electronics-11-02462>
- Hardware-in-the-Loop Simulations: A Historical Overview of Engineering Challenges, Franc Mihalič, Mitja Truntič and Alenka Hren (2022)
- [68] <https://nxp.gitbook.io/hovergames/rddrone-fmuk66/connectors/debug-interface-dcd-lz>
- [69] <https://nxp.gitbook.io/hovergames/rddrone-fmuk66/connectors/arming-switch>
- [70] <https://nxp.gitbook.io/hovergames/userguide/programming#programming-the-bootloader>
- [71] [https://nxp.gitbook.io/hovergames/userguide/radio-controller-setup?fbclid=IwAR0m0sJLY9Q2\\_PVRYEJYAdC9DjEJLOJlAge1wk7IP1VA9iIbKSEVIMPK4](https://nxp.gitbook.io/hovergames/userguide/radio-controller-setup?fbclid=IwAR0m0sJLY9Q2_PVRYEJYAdC9DjEJLOJlAge1wk7IP1VA9iIbKSEVIMPK4)
- [72] [https://www.youtube.com/watch?v=BNzeVGD8IZI&ab\\_channel=AlexFache](https://www.youtube.com/watch?v=BNzeVGD8IZI&ab_channel=AlexFache)
- [73] <https://nxp.gitbook.io/hovergames/userguide/assembly/connecting-all-fmu-wires>
- [74] <https://uk.mathworks.com/help/supportpkg/px4/ug/px4-capabilities-integration.html>
- [75] <https://uk.mathworks.com/help/supportpkg/px4/ug/setup-cygwin-toolchain.html>

- [76] <https://uk.mathworks.com/help/supportpkg/px4/ug/setting-px4-toolchain-windows.html>
- [77] <https://uk.mathworks.com/help/supportpkg/px4/ug/selecting-px4-autopilot-application.html>
- [78] [https://uk.mathworks.com/help/supportpkg/px4/index.html?s\\_tid=CRUX\\_lftnav](https://uk.mathworks.com/help/supportpkg/px4/index.html?s_tid=CRUX_lftnav)
- [79] <https://uk.mathworks.com/help/supportpkg/px4/ref/connected-io-px4autopilot.html>
- [80] <https://uk.mathworks.com/help/supportpkg/px4/ug/supported-flight-controllers.html>
- [81] [https://docs.px4.io/v1.12/en/flight\\_controller/autopilot\\_manufacturer\\_supported.html](https://docs.px4.io/v1.12/en/flight_controller/autopilot_manufacturer_supported.html)
- [82] <https://docs.px4.io/main/en/middleware/uorb.html>
- [83] <https://www.mdpi.com/2504-446X/6/6/147> Towards the Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Comprehensive Review, Syed Agha Hassnain Mohsan, Muhammad Asghar Khan, Fazal Noor, Insaf Ullah, Mohammed H. Alsharif
- [84] [https://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/denny\\_mariotti.html](https://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/denny_mariotti.html)
- [85] [https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Northrop\\_Ventura\\_Radioplane\\_RP-71\\_%22Falconer%22\\_-\\_AN-USD-1B\\_-\\_MQM-57B.jpg](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Northrop_Ventura_Radioplane_RP-71_%22Falconer%22_-_AN-USD-1B_-_MQM-57B.jpg)
- [86] <https://military-blog.com/mq-9-reaper/>
- [87] <https://kaspex.kz/en/ministry-of-national-defense-of-poland-signed-a-contract-on-purchase-of-fly-eye-uav-for-territorial-defense-forces/>
- [88] [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Black\\_Hornet\\_Nano\\_Helicopter\\_UAV.jpg](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Black_Hornet_Nano_Helicopter_UAV.jpg)
- [89] <https://fireaviation.com/2020/12/06/droneseed-receives-faa-approval-to-operate-drone-swarms-beyond-visual-line-of-sight/>
- [90] <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1709/1709.05628.pdf>
- Design, Development and Evaluation of a UAV to Study Air Quality in Qatar, Khalid Al-Hajjaji, Mouadh Ezzin, Husain Khamdan, Abdelhakim El Hassani, Supervisor: Dr. Nizar Zorba
- [91] [https://www.researchgate.net/figure/a-Pitch-yaw-and-roll-angles-of-an-aircraft-with-body-orientation-O-u-v-original\\_fig7\\_348803228](https://www.researchgate.net/figure/a-Pitch-yaw-and-roll-angles-of-an-aircraft-with-body-orientation-O-u-v-original_fig7_348803228)