



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μεταφορά υλικών σε Ευέλικτα Συστήματα Κατεργασιών με drone:
μελέτη καταλληλότητας πρωτοτύπου

ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ ΜΑΛΤΕΖΟΣ
Α.Μ. 02114068

Επιβλέπων: Γ.-Χ. ΒΟΣΝΙΑΚΟΣ, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ
Σεπτέμβριος 2020

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Γ. –Χ. Βοσνιάκου.

Η διαδικασία εκπόνησης της διπλωματικής αποτέλεσε μια εξαιρετική μαθησιακή εμπειρία και έδωσε το έναυσμα για την εμβάθυνση σε έναν συγκεκριμένο και πολύ ενδιαφέροντα τομέα. Δόθηκε η ευκαιρία για πολλές συζητήσεις και στοχασμούς πάνω σε θέματα τόσο θεωρητικού όσο και πρακτικού χαρακτήρα, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί και μια πολύ καλή σύνδεση με το είδος της εργασίας που θα απαιτηθεί από έναν απόφοιτο Μηχανικό.

Έχοντας όλα τα παραπάνω κατά νου, θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον κ. Βοσνιάκο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ μαζί του, για την άμεση ανταπόκρισή του σε ό,τι χρειαζόμουν και για τις πολύτιμες συμβουλές και τη στήριξη που μου παρείχε, παρά τις αντίξοες συνθήκες μέσα στις οποίες πραγματοποιήθηκε το μεγαλύτερο μέρος της διπλωματικής. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου και συμφοιτητές μου, με τους οποίους, όχι μόνο πέρασα εξαιρετικές στιγμές, αλλά και συνεργάστηκα εκπληκτικά, με αποτέλεσμα να μου δώσουν δύναμη και ώθηση να ανταπεξέλθω στις υποχρεώσεις της σχολής όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θα ήθελα, μέσα από την καρδιά μου να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθεια που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, αλλά και πριν, χαρίζοντάς μου όλα τα εφόδια για να ανταπεξέλθω σε όλες τις δυσκολίες που προέκυπταν.

Περίληψη

Με τη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, επιδιώκεται η εύρεση μιας αποδοτικής λύσης στη χρήση Drones για τη μεταφορά υλικών και εξαρτημάτων σε Συστήματα Κατεργασιών. Βασικός στόχος είναι η επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων και η προσομοίωση ενός Drone, που θα είναι ικανό να λειτουργήσει αυτόματα σε καθορισμένο περιβάλλον και να μεταφέρει τεμάχια βάρους ως 2 kg μεταξύ των απαραίτητων εργαλειομηχανών.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας γίνεται βιβλιογραφική αναζήτηση πάνω στα θέματα που σχετίζονται με την παρούσα έρευνα. Παρουσιάζεται η εξέλιξη της τεχνολογίας των Drones τα τελευταία χρόνια, χαρτογραφούνται τα διάφορα διαθέσιμα εμπορικά Drones και εξετάζονται οι χρήσεις τους, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία των σύγχρονων συστημάτων κατεργασιών και γίνεται η σύνδεση των δύο αυτών τομέων.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας αποτελεί το βασικό κορμό, καθώς εκεί παρουσιάζεται η κύρια τεχνική μελέτη. Αρχικά γίνεται η επιλογή των εξαρτημάτων που θα απαρτίζουν το Drone που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως μεταφορικό μέσο. Η επιλογή αυτή στηρίζεται στη χρήση του eCalc, ενός διαδικτυακού εργαλείου για τον κατάλληλο συνδυασμό εξαρτημάτων σε τηλεκατευθυνόμενες συσκευές. Στη συνέχεια, καταγράφεται η προσομοίωση πτήσης του Drone που αναπτύχθηκε, με τη βοήθεια λογισμικού Matlab και Simulink. Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας μέσω διαγραμμάτων της απόκρισης του Drone σε συγκεκριμένες δοσμένες τρισδιάστατες τροχιές και διαφαίνεται η επίτευξη του στόχου για την δυνατότητα ομαλής μεταφοράς των αντικειμένων. Τέλος, διερευνάται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει η πρόσδεση και η εναπόθεση των τεμαχίων και σχεδιάζεται μια βασική λύση, με τη χρήση του λογισμικού CAD.

Στο 3^ο μέρος της εργασίας γίνεται η συνολική απογραφή της έρευνας, αναφέρονται τα συμπεράσματα και προτείνονται τρόποι για την περεταίρω εξέλιξη της έρευνας.

Abstract

This dissertation seeks to provide an effective solution for the use of Drones to transfer materials and components inside Processing Systems. The main goal is to select the appropriate components and model a Drone, which will be able to operate automatically in a specified environment and carry a piece of weight up to 2 kg between the necessary machine tools.

The first part of the work deals initially with a bibliographic search on current research topics. The evolution of Drones technology in recent years is presented, the various commercial Drones available are mapped and their uses are examined in general, and more specifically in the industrial environment, while then, specific elements of modern processing systems are being presented, and both these fields are getting connected. This is essentially an introduction to the issues under investigation.

The second part of the work is the main part of the engineering study. Initially, the components that will make up the Drone which will be used as a means of transport are selected. This selection is based on the use of eCalc, an online tool that has an extensive database of remote-controlled devices and has the ability to perform calculations based on specific electrical and mechanical components, with values given by the user and through specific equations, to find the appropriate built for every situation. The flight simulation of the Drone, developed using Matlab and Simulink software, is then recorded. The results of the research are presented through diagrams of the Drone's response to specific given three-dimensional trajectories and the achievement of the goal for the smooth transfer of objects is shown. Finally, the way in which the produced industrial parts can be tied and deposited will be explored and a basic solution will be designed using CAD software.

In the 3rd part of the work, the overall inventory of the research is made, the conclusions are reported and ways are proposed, for the further development of the research.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Περίληψη	ii
Abstract.....	iii
Περιεχόμενα	iv
Ευρετήριο εικόνων.....	vi
Ευρετήριο πινάκων	viii
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	1
1.1 Είδη και χρήσεις Drones	1
1.2 Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής και Drones	1
1.3 Δομή της εργασίας.....	3
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	5
Κεφάλαιο 3: Δόμηση Drone για χρήση σε βιομηχανικό περιβάλλον	8
3.1 Βασική λειτουργία ενός Drone	8
3.2 Επιλογή Εξαρτημάτων	10
3.2.1 Κινητήρες και Έλικες	10
3.2.2 Μπαταρία	11
3.2.3 ESCs	12
3.2.4 Autopilot	12
3.2.5 BECs.....	12
3.2.6 Σώμα	12
3.2.7 Τελική Επιλογή.....	13
Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση και προσομοίωση	17
4.1 Περιγραφή μοντελοποίησης.....	17
4.1.1 Αεροδυναμικό μοντέλο (Airframe).....	18
4.1.2 Σύστημα Ελέγχου Πτήσης (Flight Control System ή FCS)	20
4.1.3 Καθορισμός τροχιάς (Signal Builder)	21
4.1.4 Αισθητήρες (Sensors).....	21
4.1.5 Περιβάλλον (Environment).....	22
4.1.6 Οπτικοποίηση Αποτελεσμάτων (Visualization)	22
4.2 Προσομοίωση και παραγωγή αποτελεσμάτων	22
4.2.1 Προσαρμογή χαρακτηριστικών	22
4.2.2 Εύρεση κερδών	23
4.2.3 Αποτελέσματα.....	24
i. Κατακόρυφη απογείωση	24
ii. Κατακόρυφη προσγείωση.....	26

iii. Πτήση σε σταθερό ύψος κατά μήκος ευθύγραμμης τροχιάς.....	28
iv. Πτήση σε δύο διαφορετικά ύψη για την αποφυγή εμποδίου.....	29
v. Απόκριση σε διαταραχή.....	31
vi. Πτήση με φορτίο σε σύνθετη τροχιά	34
4.3 Κλιμάκωση (Scalability).....	39
4.3.1 Αεροδυναμική Ομοιότητα	39
4.3.2 Δομική Ομοιότητα	41
4.3.3 Ομοιότητα στον έλεγχο	41
4.3.4 Αριθμητική Επεκτασιμότητα.....	41
Κεφάλαιο 5: Πρόσδεση-απόσπαση τεμαχίων	42
5.1 1 ^η Επιλογή: Ενσωμάτωση συστήματος On-Board	42
5.2 2 ^η Επιλογή: Κατασκευή μηχανικής διάταξης.....	43
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία	47
6.1 Συμπεράσματα.....	47
6.2 Μελλοντική εργασία.....	48
Βιβλιογραφία	51
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικες	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Περιγραφή τρόπου εύρεσης κερδών ελέγχου.	

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 1: Διατάξεις κινητήρων (α) Χιαστί, (β) Σταυρός.....	8
Εικόνα 2: Περιστροφές σκάφους (α) Yaw, (β) Pitch, (γ) Roll.	9
Εικόνα 3: Pitch-Βήμα έλικας. Πηγή: https://www.propellerpages.com/?c=articles&f=2006-03-08_what_is_propeller_pitch	10
Εικόνα 4: Αρχή λειτουργίας BLDC κινητήρα. Πηγή https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/	11
Εικόνα 5: Διαμόρφωση drone για τη βιομηχανία.	14
Εικόνα 6: Επιλεγμένα εξαρτήματα για την κατασκευή του Drone: (α) Κινητήρας, (β) Προπέλα, (γ) Μπαταρία, (δ) ESC, (ε) Ελεγκτής. (https://www.banggood.com).....	16
Εικόνα 7: Συνολικό μοντέλο στο Simulink.	17
Εικόνα 8: Συστήματα συντεταγμένων. Πηγή [38]	18
Εικόνα 9: Non-Linear Airframe Block στο Simulink.	19
Εικόνα 10: Λογική ελέγχου. Πηγή: https://www.mathworks.com/videos/drone-simulation-and-control-part-2-how-do-you-get-a-drone-to-hover--1539323448303.html	20
Εικόνα 11: Παράδειγμα προσδιορισμού επιθυμητής τροχιάς, για χρόνο πτήσης 100s.	21
Εικόνα 12: Οπτικοποίηση προσομοίωσης.....	22
Εικόνα 13: Βασική μορφή Quadrotor και υπολογισμένες ροπές αδράνειας μέσω του εργαλείου mass properties του Solidworks.	23
Εικόνα 14: Διαγράμματα απόκρισης για απογείωση ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).....	25
Εικόνα 15: Κατακόρυφη προσγείωση ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).	27
Εικόνα 16: Πτήση κατά μήκος ευθύγραμμης τροχιάς ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).	29
Εικόνα 17: Πτήση σε δύο διαφορετικά ύψη ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).	30
Εικόνα 18: Προσθήκη διαταραχής στον ελεγκτή του ύψους.	31
Εικόνα 19: Απόκριση σε διαταραχή στον κατακόρυφο άξονα ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).....	32
Εικόνα 20: Απόκριση σε διαταραχή στο οριζόντιο επίπεδο ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).....	33
Εικόνα 21: Φορτίο Βάρους 1kg ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).....	35
Εικόνα 22: Πτήση με φορτίο βάρους 2kg ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).	36
Εικόνα 23: Φορτίο 2kg και αντίστοιχη ροπή αδράνειας ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).	37
Εικόνα 24: Απογείωση και προσγείωση με φορτίο ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).....	38
Εικόνα 25: Conceptual Design σύνδεσης παλέτας - Drone.	43
Εικόνα 26: Αρχή λειτουργίας σύνδεσης και αποσύνδεσης με παλέτα μεταφοράς τεμαχίων.	44

Εικόνα 27: Αρχή λειτουργίας σύνδεσης και αποσύνδεσης των μανδάλων.	44
Εικόνα 28: Μέρη ενός Latch.	45
Εικόνα 29: Conceptual Design για τη σύνδεση παλέτας - Drone.	46
Εικόνα 30: Απομόνωση των τριών ελεγκτών για τη μελέτη της κίνησης στον κατακόρυφο άξονα. Παράρτημα Β	
Εικόνα 31: Σύγκριση αποκρίσεων για διάφορους συνδυασμούς κερδών. Παράρτημα Β	
Εικόνα 32: Οι τέσσερις ελεγκτές: (α) gravity feedforward/equilibrium thrust, (β) Yaw, (γ) XY-to-reference-orientation, (δ) Attitude. Παράρτημα Β	

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Αναδρομή στα προτεινόμενα συστήματα πλοήγησης. Πηγή [19].....	6
Πίνακας 2: Αλγόριθμος συσχέτισης κινητήρων.....	10
Πίνακας 3: Στοιχεία προς αγορά.....	15
Πίνακας 4: Κέρδη ελέγχου.....	24
Πίνακας 5: Μεγέθη προς χρήση για τον υπολογισμό των αδιάστατων αεροδυναμικών αριθμών.....	40

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό τίθενται τα πλαίσια στα οποία εντάσσεται η εργασία, γίνεται μια αναφορά στο σκοπό ύπαρξης της μελέτης και διασαφηνίζεται η σημαντικότητά της. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζονται τα είδη και διάφορες χρήσεις των Drones σήμερα, στη συνέχεια αναφέρονται κάποια χαρακτηριστικά των Ευέλικτων Συστημάτων Κατεργασιών και τέλος φαίνεται πως μπορούν οι δύο αυτοί τομείς να αλληλοσυμπληρωθούν, με αποτέλεσμα την εξέλιξη της παραγωγικής διαδικασίας.

1.1 Είδη και χρήσεις Drones

Με τον όρο “*Unmanned Aerial Vehicles*” (UAV’s, η όπως εν γένει λέγονται *Drones*)¹, αναφέρονται τα μη επανδρωμένα σκάφη που είτε κινούνται εντελώς αυτόνομα, μέσω προκαθορισμένων ή εν πτήση παραγόμενων τροχιών, ή ελέγχονται από κάποιον απομακρυσμένο χειριστή [1]. Υπάρχουν επί του παρόντος ποικίλοι εναλλακτικοί τύποι Drones, οι οποίοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους και με βάση πολλά από τα χαρακτηριστικά τους. Παίρνοντας ως παράδειγμα την κατηγοριοποίηση που γίνεται στο [2], ανάλογα με το μέγεθός τους, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε UAVs (> 50kg), μUAVs (5 – 50kg), MUAVs (< 5kg) κ.τ.λ². Υποκατηγορίες, με βάση τον τρόπο πτήσης, περιλαμβάνουν σκάφη σταθερών πτερυγίων (Fixed wing vehicles), σκάφη με πτερύγια που ραπίζουν (Flapping wing vehicles), σκάφη περιστρεφόμενων πτερυγίων (Rotary wing vehicles) κ.τ.λ. Το Drone που καλύτερα ταιριάζει στην εφαρμογή που περιγράφεται εδώ, είναι ένα rotary wing MAV, αποτελούμενο από τέσσερα (τετρακόπτερο ή Quadcopter) ή έξι (εξακόπτερο ή Hexacopter) πτερύγια. Με αυτόν τον τύπο, επιτυγχάνεται υψηλή ικανότητα ελιγμών, κάθετη απογείωση και προσγείωση (VTOL), επιτόπια πλάνηση (hover), χαρακτηριστικά απαραίτητα για πτήση σε περιορισμένους χώρους, όπως μια βιομηχανία.

Οι χρήσεις των Drone σήμερα είναι πάρα πολλές και διαφορετικές μεταξύ τους. Τα Drones μπορούν να κινηθούν σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο, να εξοπλιστούν με πληθώρα αισθητήρων και κάμερες, ώστε να χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη για συστήματα επιτήρησης και παρακολούθησης, να εξοπλιστούν με βραχίονες ή άλλες λαβές, ώστε να χρησιμοποιούνται σε μεταφορές και παραδόσεις πακέτων, μπορούν να επενδυθούν με υλικά ικανά να αντέξουν σε ακραίες συνθήκες, για να φτάνουν σε μέρη που δεν μπορεί ο άνθρωπος και πολλά άλλα. Σήμερα, τα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα Drones, χρησιμοποιούνται κυρίως για την κινηματογράφηση τοπίων από ψηλά, ωστόσο, όπως φάνηκε οι εφαρμογές τους μπορούν να επεκταθούν μέχρι εκεί που φτάνει η ανθρώπινη φαντασία.

1.2 Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής και Drones

Με τον όρο «*Ευέλικτα Συστήματα Παραγωγής*» (*Flexible Manufacturing Systems* ή *FMS*), χαρακτηρίζονται τα συστήματα που εκμεταλλεύονται την ομαδοποίηση συγγενών τεμαχίων, με στόχο την αυτοματοποίηση των διαδικασιών παραγωγής, παρουσιάζοντας και μια ευελιξία που αφορά τις μηχανές (ύπαρξη αναμορφούμενων και αυτόματων CNC μηχανών), τις κατεργασίες (εναλλακτικές κατεργασίες), προϊόντα (δυνατότητα παραγωγής πληθώρας προϊόντων) κ.τ.λ. [3]. Πρόκειται δηλαδή για μονάδες παραγωγής που έχουν σχεδιαστεί για την ταχεία αλλαγή στη δομή τους (από άποψη

¹ Στα ελληνικά αναφέρονται και ως *Συστήματα με Επανδρωμένα Αεροσκάφη* ή *ΣμηΕΑ*.

² Υπάρχουν Drones που φτάνουν και το μέγεθος εντόμων, ενώ στα επόμενα χρόνια τα μεγέθη θα μικρύνουν και άλλο.

λογισμικού-αυτόματων διεργασιών αλλά και υλικών εξαρτημάτων), ώστε να προσαρμόζουν γρήγορα την παραγωγική ικανότητα και τη λειτουργικότητά τους, και να αποκρίνονται άμεσα σε απότομες αλλαγές στην αγορά ή σε εσωτερικές αλλαγές (βλάβη σε κάποια μηχανή, ανάγκη αύξησης παραγωγής ενός συγκεκριμένου κομματιού κ.τ.λ.)[4]. Σε αντίστοιχη λογική κινούνται και τα «Αναμορφούμενα Συστήματα Κατεργασιών» (*Reconfigurable Manufacturing Systems* ή *RMS*), τα οποία βασίζονται κυρίως σε αναδιαμορφούμενες μηχανές, έχουν μεγάλο όγκο παραγωγής, αλλά μπορούν να κατεργαστούν μικρότερο εύρος εξαρτημάτων.

Τα FMS αποτελούνται βασικά από μηχανές CNC και από υπολογιστικά ελεγχόμενα εργαλεία κατεργασίας για την επίτευξη παραγωγής τεμαχίων που ανήκουν σε μια ευρεία οικογένεια τεμαχίων³, καθώς και αναδιαμορφώσιμα συστήματα επιθεώρησης, για την αξιολόγηση της ποιότητας των κατεργασιών. Για την ομαλή λειτουργία των συστημάτων αυτών και την συνεχή παραγωγή τεμαχίων, χρησιμοποιούνται κάποιου είδους αυτοματοποιημένων μεταφορικών μέσων (όπως ταινιόδρομοι, Οχήματα Αυτόματης Πλοήγησης - AGVs, Βραχίονες κ.τ.λ.) καθώς και βοηθητικές διατάξεις για την προσωρινή ή μόνιμη αποθήκευση των τεμαχίων (περιστρεφόμενες πλατφόρμες, τραπέζια με μηχανισμούς κίνησης κ.τ.λ.). Κάθε εξάρτημα προς κατεργασία απαιτεί διαφορετικό συνδυασμό μηχανών κατασκευής. Η μετακίνηση μεταξύ των κόμβων, επιτυγχάνεται με το σύστημα χειρισμού υλικών που περιεγράφηκε προηγουμένως. Στο τέλος της επεξεργασίας εξαρτημάτων, τα ολοκληρωμένα μέρη δρομολογούνται σε έναν κόμβο αυτόματης επιθεώρησης και στη συνέχεια φεύγουν από το Ευέλικτο σύστημα κατασκευής. Για την επικοινωνία όλων αυτών, και την ακριβή παρακολούθηση της θέσης όλων των τεμαχίων κάθε στιγμή, γίνεται χρήση αισθητήρων και διάφορων συστημάτων μέτρησης (φωτοκύτταρα, κάμερες, αναγνώστες bar-code). Κάθε μηχανή, ανάλογα με το είδος του δικτύου και του τρόπου επικοινωνίας, στέλνει σήματα στον κεντρικό υπολογιστή, που αφορούν, την κατάσταση της (αν επεξεργάζεται, αν δέχεται εξάρτημα κ.τ.λ.). Τα μηνύματα αυτά επεξεργάζονται συνήθως από τον κεντρικό υπολογιστή, και έτσι γίνεται ο διαμοιρασμός των λειτουργιών, χωρίς τη συμμετοχή του ανθρώπου σε κάποιο από τα ενδιάμεσα στάδια.

Αυτό που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική, είναι η χρήση των προαναφερθέντων Drones, ως ένα μέσον μεταφοράς μεταξύ των σταθμών αποθήκευσης και των σταθμών κατεργασίας στα συστήματα παραγωγής. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μέσα μεταφοράς εξαρτημάτων στα σύγχρονα συστήματα κατεργασιών είναι οι ταινιόδρομοι και τα AGVs. Οι ταινιόδρομοι αποτελούν μέσα σταθερής τροχιάς, πράγμα που σημαίνει ότι τα μέρη που μπορούν να μεταφέρουν εξαρτήματα είναι σταθερά και προκαθορισμένα, ενώ αποτελούν και αρκετά ογκώδης και ακριβές κατασκευές, με αποτέλεσμα να μειώνεται ο ενεργός χώρος του εργοστασίου. Ωστόσο, μια σωστή σχεδίαση των διαδρομών των ταινιόδρομων εκ των προτέρων, θα μπορούσε να μειώσει πολύ τα προβλήματα μεταφορών και επικοινωνίας μηχανών, ενώ έχουν και τη δυνατότητα να σηκώνουν πολλά, μεγάλα και βαριά εξαρτήματα συγχρόνως. Τα AGVs από την άλλη, δεν αποτελούν μέσα σταθερής τροχιάς. Ανάλογα με τους διαθέσιμους αισθητήρες και τους αλγόριθμους πλοήγησής τους, έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρονται, συνήθως με τη χρήση τροχών, σε όλο το δάπεδο του εργοστασίου, να αποφεύγουν εμπόδια, και να επικοινωνούν με τις μηχανές κατεργασίας και τους βραχίονες, για τη φόρτωση και εκφόρτωση των εξαρτημάτων. Όμως, και πάλι καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος του δαπέδου του εργοστασίου, ενώ η μεγάλη ελευθερία κίνησης, μπορεί να οδηγήσει σε συγκρούσεις μεταξύ τους, με μηχανές και στη χειρότερη περίπτωση με το ανθρώπινο δυναμικό, εφόσον υπάρξει κάποιο λειτουργικό σφάλμα.

³ Με τον όρο οικογένεια τεμαχίων αναφέρεται μια ομαδοποίηση διαφόρων εξαρτημάτων με παρόμοια γεωμετρικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν με μικρές αλλαγές όσον αφορά τα εργαλεία και τις κατεργασίες που απαιτούνται.

Κάνοντας χρήση λοιπόν της τεχνολογίας των ιπτάμενων μη επανδρωμένων σκαφών ως μεταφορικά μέσα, τα οποία μπορούν και εκμεταλλεύονται και την Τρίτη διάσταση για την μετακίνησή τους, μειώνονται οι ανάγκες για χρήση μηχανών που είτε είναι σταθμευμένες ή κινούνται στο δάπεδο του εργοστασίου, με αποτέλεσμα να μειώνουν τη χωρητικότητα του εργοστασίου σε μηχανές παραγωγής αλλά και την ευελιξία των ανθρώπων να κινούνται ελεύθερα μεταξύ των μηχανών. Επιπλέον, η κατασκευή ενός Drone αποτελεί μια αρκετά απλή και φθηνή διαδικασία, σε σχέση με τα επιδαπέδια μεταφορικά μέσα, ενώ η πληθώρα ανταλλακτικών εξαρτημάτων, τα έχει μετατρέψει σε μια πολύ συμβατή και συμφέρουσα λύση για χρήση στα εργοστάσια. Οι μεγάλες εξελίξεις που έχουν επιτευχθεί στις δυνατότητες πλοήγησής τους, και κυρίως αυτόματης πλοήγησης, τα καθιστούν πολύ ασφαλή και αξιόλογα μέσα μεταφοράς.

Η τεχνολογία των Drones όμως, αν και τα τελευταία χρόνια έχει παρουσιάσει πολύ μεγάλη εξέλιξη, παρουσιάζει ακόμα αρκετά μειονεκτήματα. Το βασικότερο εξ αυτών, είναι το μικρό ενεργό φορτίο, σε σχέση με το μέγεθός τους. Η ανάγκη να σηκώνουν τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελούνται, μειώνει πάρα πολύ το επιπλέον φορτίο που μπορούν να σηκώσουν, ιδιαίτερα συγκρινόμενα με τα AGVs και τους ταινιόδρομους. Για τη μεταφορά μεγάλων φορτίων, θα απαιτούνταν πολύ μεγάλα Drones, με ακόμα μεγαλύτερες προπέλες, πράγμα απαγορευτικό για τα στενά περιβάλλοντα των εργοστασίων. Σε αναλογία με αυτό, βρίσκεται και ο μειωμένος χρόνος λειτουργίας τους. Οι μπαταρίες που υπάρχουν σήμερα, όπως θα φανεί και στη συνέχεια του κειμένου, μπορούν να δώσουν την απαραίτητη ισχύ για τη λειτουργία των Drones, για ένα αρκετά περιορισμένο χρονικό διάστημα. Μάλιστα, όταν λαμβάνεται υπόψη και το επιπλέον βάρος κατά τη μεταφορά, ο χρόνος πτήσης μειώνεται και άλλο. Για το λόγο αυτό, γίνονται πολλές προσπάθειες, για την εύρεση τρόπων επαναφόρτισης των μπαταριών με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες σε ενεργό χρόνο πτήσης [5]. Ένα ακόμα μειονέκτημα, έχει να κάνει με τη συνεργασία των Drones με τους ανθρώπους. Αν και υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να αποφευχθεί μια σύγκρουση ή πτώση (μέσω αλγορίθμων αλλά και μηχανικών μέσων), η αίσθηση των ιπτάμενων μηχανών πάνω από τα κεφάλια των εργαζομένων, μπορεί να τους προκαλέσει συναισθήματα φόβου και δυσανεξίας. Για την επίτευξη της συνεργασίας, απαιτείται ένα καλό πλαίσιο κανόνων ασφαλείας, κατάλληλα πρωτόκολλα και χρόνος [6].

Το βασικά ερωτήματα προς απάντηση λοιπόν, από μηχανολογικής πλευράς, είναι το πώς μοντελοποιείται ένα Drone που θα σχεδιαστεί για μεταφορές σε εσωτερικούς χώρους, από τι εξαρτήματα θα αποτελείται και πως θα λειτουργεί η μεταφορά των αντικειμένων. Προσπαθώντας να απαντηθούν αυτά τα ερωτήματα στη συνέχεια, αρχικά παρουσιάζεται το χτίσιμο του Drone που εν δυνάμει θα χρησιμοποιηθεί στην παραγωγική διαδικασία, εν συνεχεία παρουσιάζεται η μοντελοποίησή του σε Matlab και τέλος σχεδιάζεται ο τρόπος με τον οποίον το Drone θα παραλαμβάνει, θα μεταφέρει και θα εναποθέτει τα εξαρτήματα μεταξύ των καθορισμένων σταθμών.

1.3 Δομή της εργασίας

Προσπαθώντας να απαντηθούν τα ερωτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, τα παρόν κείμενο χωρίζεται σε βασικά 6 Κεφάλαια.

Το 1^ο Κεφάλαιο, αυτό που βρισκόμαστε τώρα είναι η εισαγωγή στο πλαίσιο της έρευνας.

Το 2^ο Κεφάλαιο αποτελεί την βιβλιογραφική ανασκόπηση. Πρόκειται ουσιαστικά για την αναφορά σε όλες τις πηγές (διαδικτυακές, περιοδικά, διπλωματικές κ.τ.λ.), πάνω στις οποίες βασίστηκε η έρευνα και μελέτη για τη συγγραφή της διπλωματικής. Αποτελούν τα σκαλιά, πάνω στα οποία χτίστηκε όλο το παρόν περιεχόμενο.

Στο 3^ο Κεφάλαιο, μελετάται η δόμηση ενός Drone ικανού να λειτουργήσει στα πλαίσια ενός εργοστασίου. Αναφέρονται από ποια εξαρτήματα αποτελείται μια ιπτάμενη, μη επανδρωμένη μηχανή, γίνεται μια μικρή περιγραφή του κάθε εξαρτήματος και τελικά επιλέγονται τα εξαρτήματα που θα αποτελούν το πρωτότυπο.

Στο 4^ο Κεφάλαιο, που είναι και το βασικότερο εκ των 6, παρουσιάζονται όλα τα στοιχεία που απαιτούνται για την μοντελοποίηση, την προσομοίωση, και τελικά την οργάνωση για την διεξαγωγή πειραμάτων. Στην αρχή, αναφέρεται η μοντελοποίηση των σύγχρονων ιπτάμενων μηχανών, και συγκεκριμένα αυτή που χρησιμοποιείται στην εργασία, με όλες τις υποθέσεις που έχουν γίνει. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η προσομοίωση, κατά την οποία, προσαρμόζονται τα χαρακτηριστικά του Drone και τα κέρδη ελέγχου, και καταγράφονται τα αποτελέσματα με τη μορφή διαγραμμάτων απόκρισης για διάφορες καθορισμένες τροχιές.

Στο 5^ο Κεφάλαιο, αναπτύσσεται το σχέδιο για τον τρόπο με τον οποίο θα επιτυγχάνεται η μεταφορά εξαρτημάτων. Παρουσιάζονται διάφοροι εναλλακτικοί τρόποι μεταφοράς, και επιλέγεται ο ιδανικότερος από άποψη απλότητας, ευκολίας μεταφοράς και σπατάλης ενέργειας.

Τέλος, στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση στην εργασία. Φαίνεται αν επιτεύχθηκαν οι στόχοι, παρουσιάζονται τα ελαττώματα αλλά και τα πλεονεκτήματα της μελέτης, και εν τέλει προτείνονται τρόποι για την βελτίωση και την περεταίρω ανάπτυξη του θέματος.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται μια σύντομη αναδρομή στην εξέλιξη της μοντελοποίησης των Drones μέχρι σήμερα, στον τρόπο κατασκευής τους και τους τρόπους μεταφοράς που μέχρι τώρα έχουν προταθεί κάνοντας χρήση υπτάμενων συσκευών.

Η τεχνολογία των μη επανδρωμένων υπτάμενων κατασκευών, χρονολογείται από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα με τους αδερφούς Bréguet και τον Καθηγητή Richet να κατασκευάζουν το πρώτο τετρακόπτερο. Εν συνεχεία, η τεχνολογία αυτή εξελίχθηκε πολύ για στρατιωτικές επιχειρήσεις σε περιόδους πολέμου, ενώ τη δεκαετία του '60 με την ανάπτυξη των τρανζίστορ, κατασκευάστηκαν πολλά τηλεκατευθυνόμενα αεροπλάνα και τελικά το 2006 η Federal Aviation Administration, έδωσε τις πρώτες άδειες για τα εμπορικά διαθέσιμα Drones. Περεταίρω πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στο [7].

Τα τελευταία χρόνια, πλήθος εταιρειών έχουν σπεύσει να παράγουν τα δικά τους Drone, με βασικότερη τη γαλλική εταιρεία Parrot (<https://www.parrot.com/global/>), η οποία παρήγαγε το πρώτο Drone ελεγχόμενο αποκλειστικά μέσω WiFi από οποιοδήποτε Smartphone (Parrot AR Drone). Σήμερα, οι δυνατότητες των Drone είναι πολύ εξελιγμένες σε όλους τους τομείς (ποιότητα αισθητήρων και καμερών, ποιότητα μηχανολογικών εξαρτημάτων, αεροδυναμικός σχεδιασμός, αυτόματη πλοήγηση) και οι παραγωγοί έχουν αυξηθεί πολύ και περιλαμβάνουν, τόσο πιο αυτόνομες (συχνά πανεπιστημιακές) ομάδες, όπως το Quanser QDrone (<https://www.quanser.com/products/qdrone/>), όσο και μεγάλες εταιρείες, με σημαντικότερη την DJI (<https://www.dji.com/gr>) με τη σειρά Mavic.

Κοιτώντας το κομμάτι της μοντελοποίησης και του ελέγχου, πολλοί είναι αυτοί που έχουν προσπαθήσει να συνεισφέρουν με τη μελέτη τους στην παραγωγή ακριβέστερων δυναμικών και κινηματικών εξισώσεων, λεπτομερέστερων περιγραφών της αεροδυναμικής και καλύτερων από μηχανολογικής άποψης κατασκευών. Στο [8] μελετάται ο έλεγχος και η μοντελοποίηση ενός Quadrotor, με βάση τους νόμους κίνησης του Νεύτωνα και την προσέγγιση των μεταβλητών κατάστασης για τον έλεγχο. Στο [9] μελετάται ένα Quadrotor με διάταξη χιαστί και γίνεται ο έλεγχος με PID ελεγκτές. Στο [10] προσομοιώνεται η συμπεριφορά του οχήματος σε διαταραχές και συγκρίνονται οι PID ελεγκτές με τους Fuzzy Logic ελεγκτές. Στο [11] ερευνάται η χρήση των Drones στη διανομή πακέτων, τα οποία ελέγχονται ασύρματα από έναν σταθμό στο έδαφος. Στο [12] γίνεται η αναγνώριση των παραμέτρων συστήματος για τον έλεγχο με χρήση Νευρωνικών Δικτύων. Στο [13] πραγματοποιείται η μοντελοποίηση και η πειραματική μελέτη ενός Quadcopter με PID ελεγκτές, και φαίνεται η ευρωστία και η ικανότητα των ελεγκτών να σταθεροποιούν το σύστημα υπό διάφορες συνθήκες. Στη μελέτη του [14], πραγματοποιήθηκε μια έρευνα για τη χρήση Backstepping Control αλγορίθμων, για τον έλεγχο του Drone, αφού πρώτα το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων που περιγράφουν την πτήση των Drones, απλοποιήθηκε και ταίριαξε στις εξισώσεις που περιγράφουν τα ελικόπτερα. Στο [15] δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο πρακτικό κομμάτι του ελέγχου και της μοντελοποίησης, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική του Τόπου Ριζών για την εύρεση των κερδών και πραγματοποιήθηκαν πειράματα με παραμέτρους μελέτης την υπερακόντιση, το χρόνο αποκατάστασης και το χρόνο που φτάνει η απόκριση στη μέγιστη τιμή της. Πέρα από τη χρήση PID ελεγκτών, πολλοί ακόμα ελεγκτές μπορούν και έχουν χρησιμοποιηθεί από διάφορους μελετητές, όπως LQR [16], Fuzzy Logic [17], Slide Mode Control [18] κ.τ.λ.

Όσον αφορά την αυτόματη πλοήγηση, αν και στη συγκεκριμένη εργασία θεωρήθηκε βασικά ως δεδομένη, έχουν πραγματοποιηθεί πάρα πολλές μελέτες για την επίτευξή της τα τελευταία χρόνια, συνδυάζοντας πολλούς αισθητήρες και επιδιώκοντας τη φθηνότερη αλλά και αποτελεσματικότερη

λύση. Εν γένει, η αυτόματη πλοήγηση σε εξωτερικούς χώρους, βασίζεται στη χρήση GPS. Σε εσωτερικούς χώρους όμως, που η ισχύς του σήματος από τους δορυφόρους, ελαττώνεται πολύ, κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατόν. Για αυτό, τα Drones για χρήση σε εσωτερικούς χώρους, εξοπλίζονται με πολλούς αισθητήρες, με κυριότερα τα IMUs για τον καθορισμό της θέσης τους. Από το [19], πάρθηκε και ο παρακάτω πίνακας, που δείχνει μια σύνοψη των προσπαθειών για την επίτευξη πλοήγησης. Στο συγκεκριμένο μάλιστα paper, γίνεται και μια αναφορά στα είδη των αισθητήρων και προτείνεται η χρήση μιας αρχιτεκτονικής βασισμένης στο Robotic Operation System (ROS), για την επίτευξη πλοήγησης και ελέγχου (Guidance Navigation and Control ή GNC).

Πίνακας 1: Αναδρομή στα προτεινόμενα συστήματα πλοήγησης. Πηγή [19].

Team	Institution	Navigation Architecture	Year
Sungsik Huh	KAIST	IMU/Camera/Laser scanner	2013
Nils Gageik	University of Würzburg	IMU/Infrared/Optical flow(ADNS3080)	2013
Korbinian Schmid	DLR	IMU (Analog Devices ADIS16407) /Stereo Camera (PointGrey Firefly FMVU-03MTM)	2014
Jin Q. Cui	National University of Singapore	IMU/Lidar (UTM-30LX&URG-04LX) /Camera	2015
Dong Ki Kim	Cornell University	IMU/Ultrasonic altimeter/Optical flow/Camera (Parrot Bebop)	2015
Shaima Al Habsi	UAE University	IMU/Ultrasonic altimeter/Vicon Mo-cap	2015
Chong Shen	North University of China	IMU (MPU6050) /Optical flow + Ultrasonic (PX4Flow)/Magnetometer (HMC3883L)	2016
Yu Zhang	NUAA, China	IMU/Optical flow + Ultrasonic (PX4Flow) /Camera (UI-1221LE)	2016
Kang Li	Chinese Academy of Sciences	IMU/UBW (DW1000) /laser scanner	2016
Aiden Morrison	Norwegian Defence	IMU (MPU9250/Mti-100) /Optical flow + Ultrasonic (PX4Flow) /Vision (Sony IMX250)	2017
Kimberly McGuire	TU Delft	IMU/Optical flow /Stereo camera	2017
Elena López	Alcalá University	IMU/Scanner/Monocular camera	2017
Zhou Qiang	Shanghai Jiao Tong University	IMU/Ultrasound/Stereo camera/Motion Tracking	2018
Matthew A Copper	Air Force Institute of Technology	IMU/Scanner/motion tracking	2018

Αντίστοιχες μελέτες, υπάρχουν πολλές. Στο [20] παρουσιάζεται μια προσέγγιση για αυτόματη πλοήγηση και προσγείωση σε εσωτερικούς χρόνους, με χρήση αδρανειακών αισθητήρων, περιφερειακών καμερών και ArUco markers. Στο [21] φαίνεται πως μπορεί ένα φθινό εμπορικό Drone να μετακινηθεί σε μια προκαθορισμένη τροχιά. Χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για την εύρεση διαδρομής ελεύθερης εμποδίων, ενώ το Drone διαθέτει αισθητήρες για τη μέτρηση της θέσης του σε πραγματικό χρόνο. Η διπλωματική εργασία του [22] πραγματεύεται ένα πολύ σημαντικό θέμα στην τεχνολογία των Drones, αυτό της παραγωγής μιας επιθυμητής τροχιάς, η οποία ακολουθείται με τις λιγότερες δυνατές αποκλίσεις. Η επιλογή της κάθε λύσης, εξαρτάται από το κόστος, την ακρίβεια και τις δυνατότητες που επιθυμητά θα έχει το κατασκευασμένο Drone.

Ψάχνοντας στη βιβλιογραφία για Drones ως συστήματα μεταφοράς, παρατηρήθηκε μια έλλειψη. Όπως διαπιστώθηκε, μέχρι σήμερα, λόγω των περιορισμών που έχουν τα Drones στο φορτίο που σηκώνουν και στο χρόνο πτήσης, δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ως μεταφορικά μέσα, με αποτέλεσμα και η αντίστοιχη βιβλιογραφία να είναι αρκετά περιορισμένη. Από την αναζήτηση, αυτό που κυρίως βρέθηκε είναι η μελέτη των συστημάτων τα οποία περιλαμβάνουν και μια αρπάγη, για το χειρισμό του φορτίου. Για παράδειγμα, στο [23] αναπτύσσεται ένα σύστημα που συνδυάζει ένα Drone και έναν End-Effector, ενωμένα με έναν αλγόριθμο για τον έλεγχο της θέσης του Drone μαζί με την κίνηση του χεριού. Αντίστοιχες μελέτες φαίνονται στα [24], [25], [26], [27], [28], όπου μελετώνται αρπάγες ενός ή δύο βαθμών ελευθερίας, βραχίονες με περισσότερους άξονες και βαθμούς ελευθερίας, αλλά και οι δυνάμεις τριβής που απαιτούνται για τη συγκράτηση των πακέτων, συνολικά η δυναμική και κινηματική του συστήματος, καθώς και τα είδη και οι τρόποι ελέγχου. Σε λίγο διαφορετική λογική, στο [29] μελετάται ο σχεδιασμός και έλεγχος ενός Drone, αποτελούμενο από τέσσερις συνδέσμους ενός βαθμού ελευθερίας, το οποίο θα μπορεί να λειτουργεί το ίδιο και ως το μέσον για την ανύψωση των αντικειμένων.

.

Κεφάλαιο 3: Δόμηση Drone για χρήση σε βιομηχανικό περιβάλλον

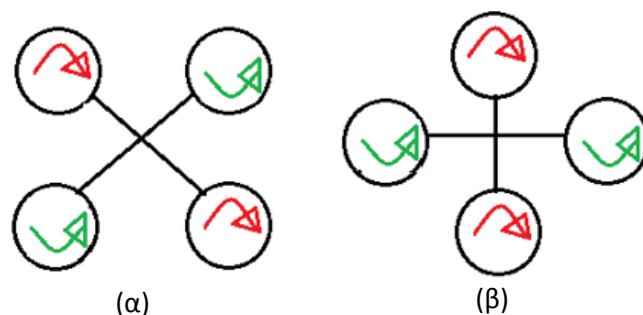
Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μια παρουσίαση των αναγκών ενός Drone όσον αφορά τα εξαρτήματα που αποτελείται και πραγματοποιείται η επιλογή εμπορικά διαθέσιμων εξαρτημάτων, κάνοντας χρήση του eCalc και απλών αεροδυναμικών εξισώσεων.

3.1 Βασική λειτουργία ενός Drone

Προτού επιλεγθούν τα απαραίτητα εξαρτήματα για την κατασκευή του Drone για τη βιομηχανία, θα πρέπει πρώτα να φανεί ποια είναι τα εξαρτήματα αυτά ο συνδυασμός των οποίων συνθέτει μια ι-πτάμενη μηχανή. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να σκιαγραφηθεί ο βασικός τρόπος λειτουργίας ενός Drone.

Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν πολλά είδη μη επανδρωμένων αεροσκαφών, που επιτυγχάνουν την απογείωση και πτήση με διάφορους τρόπους. Το Drone όμως που ταιριάζει καλύτερα σε περιβάλλοντα με μικρούς και στενούς εσωτερικούς χώρους, όπως τα εργοστάσια, είναι τα Quadrotors, και σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερα βάρη, τα Hexadrotors (πτήση με 6 κινητήρες)⁴.

Τα Quadrotors, όπως φαίνεται και από το όνομά τους, αποτελούνται από τέσσερα ζεύγη κινητήρα - προπέλας. Τα εξαρτήματα αυτά, αποτελούν το βασικό μέσον ανύψωσης και πτήσης των αεροσκαφών αυτών. Τα υπόλοιπα στοιχεία είναι κυρίως βοηθητικά, και χρησιμοποιούνται ουσιαστικά για την μηχανική στήριξη αυτών, τον έλεγχο των κινητήρων και την παροχή κατάλληλου ρεύματος προς αυτούς, ανάλογα με τη θέση του σκάφους και την ταχύτητα και τη φορά κίνησης που απαιτείται. Η ώθηση που παράγεται από την περιστροφή των τεσσάρων πτερυγίων αθροιστικά, αντισταθμίζει το βάρος του αεροσκάφους, σε περιπτώσεις σταθερής πτήσης (Hover), ενώ, όταν το σκάφος επιταχύνεται, οι προπέλες λειτουργούν γρηγορότερα για να παράγουν τις επιπλέον απαιτούμενες δυνάμεις. Είναι προφανές, ότι δε θα ήταν δυνατό να περιστρέφονται και οι τέσσερις προπέλες με την ίδια φορά, διότι τότε, το άθροισμα των ροπών δεν θα ήταν μηδενικό, και το σώμα του σκάφους θα εξαναγκαζόταν σε αντίστροφη των ελίκων περιστροφή. Για το λόγο αυτό, οι δύο απέναντι προπέλες περιστρέφονται ωρολογιακά, και οι άλλες ανθρωρολογιακά [30]. Οι συνηθέστερες διατάξεις για την τοποθέτηση των κινητήρων στα Drones, είναι είτε χιαστί, ή σε σταυρό, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1. Για λόγους που θα φανούν στη συνέχεια, η διάταξη που επιλέγεται, είναι η πρώτη.

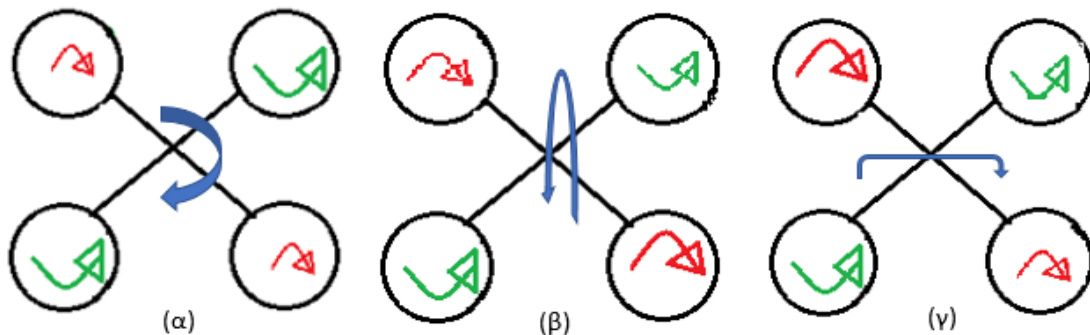


Εικόνα 1: Διατάξεις κινητήρων (α) Χιαστί, (β) Σταυρός

⁴ Τα Hexadrotors, προσφέρουν επιπλέον ασφάλεια κατά την πτήση, διότι λόγω του αυξημένου αριθμού κινητήρων, μπορούν να προσγειωθούν ασφαλώς, ακόμα και αν ένας κινητήρας έχει υποστεί βλάβη.

Μία από τις ιδιαιτερότητες των τετρακόπτερων, είναι ότι η πτήση τους αποτελεί ένα υποεπενεργούμενο πρόβλημα, εφόσον χρησιμοποιούνται 4 κινητήρες στον τρισδιάστατο χώρο των 6 βαθμών ελευθερίας (3 μεταφορές και 3 περιστροφές). Για την επίτευξη λοιπόν όλων των απαραίτητων κινήσεων, θα πρέπει να συνδεθούν η ώθηση και συνεπώς η μεταφορική κίνηση, με τις περιστροφικές κινήσεις. Αυτό γίνεται, περιστρέφοντας κάθε φορά τους κατάλληλους κινητήρες.

Στον τομέα των ιπτάμενων μηχανών και όχι μόνο, χρησιμοποιούνται οι όροι *Yaw*, *Pitch* και *Roll*, για να εκφραστούν οι περιστροφές γύρω από τον κάθετο, τον οριζόντιο εγκάρσιο και τον οριζόντιο διαμήκη άξονα αντίστοιχα (Εικόνα 2). Παίρνοντας για παράδειγμα την κίνηση *Yaw*, το σκεπτικό για την πραγματοποίησή της, είναι να αυξηθεί η ταχύτητα περιστροφής των δύο διαγώνιων κινητήρων και αντίστοιχα να μειωθεί των άλλων δύο, έτσι ώστε να παρουσιαστεί μη μηδενική ροπή προς την κατεύθυνση περιστροφής που επιθυμείται, αλλά συγχρόνως να παραμείνει σταθερό το άθροισμα δυνάμεων στον οριζόντιο άξονα και να μην υπάρξει κατακόρυφη κίνηση. Έτσι, το Drone θα περιστραφεί γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Με παρόμοιο τρόπο, επιτυγχάνονται και οι δύο άλλες περιστροφές. Για να προχωρήσει λοιπόν μπροστά ένα Drone, ο πλοηγός ή ο ελεγκτής, πρέπει να δημιουργήσει και να κρατήσει σταθερή μια γωνία *Pitch*, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την ταχύτητα που επιθυμείται. Εφόσον το Drone έχει κλίση προς τα εμπρός, η συνισταμένη της ώσης έχει δύο συνιστώσες. Μία προς τα πάνω, που πρέπει να αντισταθμίζει τη δύναμη της βαρύτητας, και μία προς τα εμπρός, η οποία εξασφαλίζει και την επιτάχυνση προς την αντίστοιχη κατεύθυνση. Αντίστοιχα, για πλάγιες κινήσεις απαιτείται μια μικρή γωνία *Roll* προς την κατεύθυνση μετακίνησης. Επειδή, στις περιπτώσεις του *Roll* και του *Pitch*, με τη διάταξη σταυρού, ενεργοποιείται μόνο ένας κινητήρας ο οποίος παίρνει και όλο το φορτίο, προτιμάται η διάταξη χιαστί.



Εικόνα 2: Περιστροφές σκάφους (α) *Yaw*, (β) *Pitch*, (γ) *Roll*.

Για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος που δουλεύει η συσχέτιση της ταχύτητας των κινητήρων με την ώση και τις τρεις στροφές, απαραίτητες για την επίτευξη της κίνησης στο χώρο, παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας, όπου σε κάθε κελί φαίνεται ένα πρόσημο που σχετίζεται με την ταχύτητα του κινητήρα για την κάθε κίνηση. Φαίνεται λοιπόν, ότι για να επιτευχθεί απλή ώση, όλοι οι κινητήρες πρέπει να έχουν ίση ταχύτητα. Για το *Yaw*, θα πρέπει να αυξηθεί η ταχύτητα των δύο διαγώνιων κινητήρων και να μειωθεί των άλλων δύο. Για το *Pitch*, θα πρέπει να αυξηθεί η ταχύτητα των δύο μπροστά (ή πίσω) κινητήρων, και να μειωθεί των δύο πίσω (ή μπροστά αντίστοιχα). Και τέλος, για το *Roll* θα πρέπει να αυξηθεί η ταχύτητα των κινητήρων που βρίσκονται από την ίδια μεριά.

Πίνακας 2: Αλγόριθμος συσχέτισης κινητήρων.

	Thrust	Yaw	Pitch	Roll
Motor _{front,right}	=	+	+	+
Motor _{front,left}	=	-	+	-
Motor _{back,right}	=	-	-	+
Motor _{back,left}	=	+	-	-

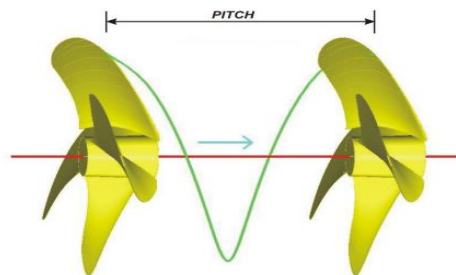
3.2 Επιλογή Εξαρτημάτων

Έχοντας κατανοήσει τη βασική λειτουργία του αεροσκάφους, σειρά έχει η επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων για την κατασκευή. Τα είδη των στοιχείων που θα επιλεγθούν, είναι κινητήρες, προπέλες, μπαταρία, ESCs, Controller, BECs και σώμα.

3.2.1 Κινητήρες και Έλικες

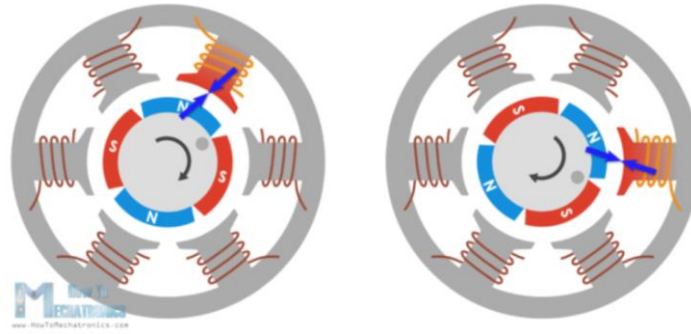
Ο συνδυασμός της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων, με την διάμετρο και το pitch της έλικας, είναι βασικά τα μεγέθη αυτά που καθορίζουν την τιμή της ώσης κάθε στιγμή.

Με τον όρο pitch (ή βήμα), αναφέρεται η απόσταση που θα διένυε μια έλικα σε μια πλήρη περιστροφή της [31]. Όσο αυξάνεται το pitch, τόσο μεγαλύτερα ποσά αέρα μετακινούνται από την έλικα κατά την περιστροφή της, οπότε, εφόσον ο κινητήρας αντέχει την αντίσταση, τόσο αυξάνεται η παραγόμενη δύναμη αλλά και το απαιτούμενο ρεύμα.



Εικόνα 3: Pitch-Βήμα έλικας. Πηγή: https://www.propellerpages.com/?c=articles&f=2006-03-08_what_is_propeller_pitch

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι DC Brushless κινητήρες (συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες ή BLDC) [32]. Η λειτουργία των κινητήρων αυτών, βασίζεται στην ύπαρξη ενός ακίνητου μέρους, του στάτορα, το οποίο αποτελείται από χάλκινα τυλίγματα καταναμεμένα σε ίσες γωνίες, και ενός κινούμενου μέρους, τον ρότορα ή δρομέα, πάνω στον οποίο βρίσκονται οι μόνιμοι μαγνήτες. Παρέχοντας ρεύμα στα τυλίγματα, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο που αλληλοεπιδρά με το μαγνήτη του δρομέα, προκαλώντας την κίνηση του δεύτερου. Με τον τρόπο αυτό παράγεται η απαιτούμενη ροπή και ταχύτητα για την περιστροφή των πτερυγίων [33]. Τα τελευταία χρόνια, προτιμώνται αυτού του είδους κινητήρες, έναντι κινητήρων με ψήκτρες, διότι οι ψήκτρες φθείρονται σχετικά γρήγορα με τη χρήση, αλλά και η παραγόμενη ισχύς ως προς το μέγεθος των κινητήρων είναι καλύτερη. Εν γένει, θεωρούνται πολύ αξιόπιστοι, είναι εξαιρετικά αποτελεσματικοί και η ελεγχιμότητά τους είναι πολύ πιο εύκολη από αυτήν των Brushed κινητήρων.



Εικόνα 4: Αρχή λειτουργίας BLDC κινητήρα. Πηγή <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>

Οι BLDC κινητήρες χαρακτηρίζονται συνήθως με τη σταθερά K_v . Η σταθερά αυτή έχει μονάδες rpm/Volt και περιγράφει την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε σχέση με την επαγόμενη τάση στα τυλίγματα του στάτη. Επειδή η τάση αυτή είναι πολύ κοντά με την προσαγόμενη τάση από την μπαταρία, πρακτικά το K_v δείχνει την ταχύτητα περιστροφής σε rpm , όταν στον κινητήρα παρέχεται τάση 1V. Η γνώση της σταθεράς K_v ενός κινητήρα είναι χρήσιμη για την κατάλληλη επιλογή κινητήρα για το αεροσκάφος. Αεροσκάφη μικρά που απαιτούν μεγάλες ταχύτητες και μικρές ροπές, εξοπλίζονται με κινητήρες με μεγάλα K_v . Αντίθετα, στην περίπτωση αεροσκαφών μεγάλων φορτίων, απαιτείται κινητήρας με μικρό K_v , ώστε να μειωθούν οι στροφές, αλλά να αυξηθεί η ροπή.

Κάθε κινητήρας, ανάλογα με τη φορά περιστροφής του, απαιτεί και την αντίστοιχη έλικα. Υπάρχουν έλικες με ωρολογιακή φορά περιστροφής (αναφέρονται ως Clockwise ή CW) και με ανωρολογιακή φορά περιστροφής (CounterClockwise ή CCW). Όσο μεγαλύτερη είναι μια έλικα και όσο μεγαλύτερο βήμα έχει, τόσο περισσότερη μάζα αέρα μετακινεί, οπότε αυξάνεται και η παραγόμενη ώση. Ωστόσο, αυτά θα πρέπει να συσχετιστούν και με το μέγεθος του Drone, με τις δυνατότητες των κινητήρων, αλλά και όλων των υπόλοιπων μηχανολογικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

3.2.2 Μπαταρία

Το επόμενο σημαντικότερο εξάρτημα ενός Drone, και ίσως το βασικότερο μειονέκτημά του, είναι η μπαταρία του. Η σχέση αποθηκευμένης ενέργειας και μεγέθους των μπαταριών, ακόμα και σήμερα, δεν είναι ικανοποιητική, με αποτέλεσμα να απαιτούνται μεγάλες μπαταρίες, οι οποίες λόγω βάρους, δεν επιτρέπουν τη μεταφορά επιπλέον φορτίου και μειώνουν πολύ το χρόνο πτήσης.

Τα τελευταία χρόνια, η τάση είναι να χρησιμοποιούνται μπαταρίες Λιθίου Πολυμερούς (LiPo), έναντι άλλων τεχνολογιών όπως Νικελίου Μετάλλων Υβριδίου (NiMH), λόγω μικρότερου βάρους, αυξημένης χωρητικότητας και ταχύτητας εκκένωσης. Προβλήματα των μπαταριών αυτών αποτελούν ο μικρός χρόνος ζωής, η ευαισθησία σε αυξημένες θερμοκρασίες και χτυπήματα και η ιδιαίτερη προσοχή που απαιτούν κατά τη φόρτιση, αποφόρτιση και αποθήκευση [34].

Οι LiPo μπαταρίες αποτελούνται από ένα ή περισσότερα κελιά σε σειρά ή παράλληλα, όπου το κάθε κελί έχει ονομαστική τάση 3.7V. Βάζοντας τα κελιά σε σειρά, προστίθεται η τάση τους, ενώ παράλληλα η χωρητικότητά τους. Η χωρητικότητα είναι ένα μέτρο της ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει η μπαταρία και οι μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως τα mAh. Το τρίτο μέγεθος που χαρακτηρίζει μια LiPo μπαταρία είναι η ταχύτητα εκκένωσης της ή “C-Rating” και δείχνει το μέγιστο ρυθμό αποφόρτισης που μπορεί να αντέξει. Πάντα, η τιμή του C-Rating πολλαπλασιάζεται με τη χωρητικότητα, για να βρεθεί το μέγιστο ρεύμα σε A που μπορεί να αποδώσει η μπαταρία.

3.2.3 ESCs

Electronic Speed Controllers ή ESCs είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία μεταφράζουν τις εντολές του πιλότου (ή αυτόματου πιλότου) σε ακριβείς οδηγίες για τους κινητήρες. Όπως προαναφέρθηκε, το Quadrotor μετακινείται χωρίς κάποια βοηθητική προπέλα (όπως τα ελικόπτερα), αλλά μόνο αλλάζοντας κατάλληλα την ταχύτητα περιστροφής των τεσσάρων κινητήρων. Η οδήγηση των BLDC κινητήρων βασίζεται στην τεχνολογία PWM (Pulse Width Modulation). Στην ουσία, αλλάζοντας το πλάτος του ορθογωνικού παλμού ρεύματος που στέλνεται στους κινητήρες, ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής. Τα ESCs λοιπόν, είναι υπεύθυνα να μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα της μπαταρίας σε τριφασικό και να καθορίζουν το πλάτος του παλμού για την οδήγηση των κινητήρων, αλλά και για την αλλαγή της φοράς περιστροφής των κινητήρων. Συνήθως, χαρακτηρίζονται από το μέγιστο ρεύμα που μπορούν να αντέξουν [35].

3.2.4 Autopilot

Στις περιπτώσεις που ο έλεγχος του Drone γίνεται από κάποιον άνθρωπό στο έδαφος, τότε θα πρέπει να υπάρχει ένα σύστημα Πομπού-Δέκτη (Transmitter-Receiver), με τον πομπό να βρίσκεται στα χέρια του ανθρώπου (τηλεχειριστήριο, Smartphone κ.τ.λ.) και τον δέκτη να βρίσκεται πάνω στο Drone για την παραλαβή του σήματος οδήγησης. Τα σήματα αυτά, μεταφέρονται στον Ελεγκτή Πτήσης (Flight Controller), ο οποίος φέρει τους αισθητήρες για τη μέτρηση της θέσης, της ταχύτητας και του προσανατολισμού του οχήματος και είναι υπεύθυνος για την σταθεροποίηση του Drone και τη σωστή διεξαγωγή των δοσμένων εντολών. Έτσι, τα σήματα μετατρέπονται σε εντολές που στέλνονται μέσω των ESCs στους κινητήρες. Όταν υπάρχει η δυνατότητα της αυτόματης πλοήγησης, τότε τα πάντα αναλαμβάνονται από έναν πιο ενισχυμένο μικροϋπολογιστή, τον *Autopilot*. Ο Autopilot, είναι ένα προγραμματιζόμενο ηλεκτρονικό σύστημα που περιλαμβάνει και το Flight Controller, μαζί με διάφορους αισθητήρες, και προσφέρει τη δυνατότητα της αυτόνομης πτήσης του Drone, πραγματοποιώντας το Localization και Mapping (Εντοπισμός θέσης και Χαρτογράφηση Περιβάλλοντος) online, δηλαδή κατά τη διάρκεια πτήσης.

Όσον αφορά τους αισθητήρες που περιέχει ο κάθε ελεγκτής, αυτοί διαφέρουν ανάλογα με την ποιότητα του ελεγκτή και τις απαιτήσεις για ακρίβεια στην πτήση. Επικρατέστεροι αισθητήρες είναι τα IMUs (Inertial Measurement Units), αισθητήρες πίεσης και μαγνητόμετρα. Περισσότερα πάνω σε αυτό, θα αναφερθούν στο κεφάλαιο της μοντελοποίησης.

3.2.5 BECs

Τα Battery Eliminator Circuits ή BECs είναι στην πραγματικότητα ρυθμιστές τάσης. Μπορεί να παρέχονται ως ξεχωριστά κυκλώματα ή να περιλαμβάνονται στους ελεγκτές πτήσης και η δουλειά τους είναι να μετατρέπουν την τάση της μπαταρίας σε μια χαμηλότερη τάση, συνήθως 5V που λειτουργούν οι περισσότερες ηλεκτρονικές συσκευές.

3.2.6 Σώμα

Το σώμα του Drone αποτελεί το εξάρτημα, πάνω στο οποίο στηρίζονται όλα τα υπόλοιπα στοιχεία. Η σωστή και ασφαλής λειτουργία ενός Drone, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός σώματος με μικρό βάρος, για να μην αφαιρεί από το ενεργό φορτίο του Drone, αλλά και με μεγάλη αντοχή, για να αντέχει τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω σε αυτό κατά την πτήση. Σε μικρά Drone, το σώμα μπορεί να φτιάχνεται από κάποιο ελαφρύ πλαστικό. Καθώς μεγαλώνουν οι απαιτήσεις όμως, απαιτούνται λιγότερο ψαθυρά και πιο ανθεκτικά υλικά, όπως σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα (carbon fiber) ή ακόμα και μεταλλικά υλικά, όπως αλουμίνιο [36].

Μαζί με το σώμα, επιπλέον υλικά για την κατασκευή ενός Drone που θεωρούνται απαραίτητα, είναι τα καλώδια για τις συνδέσεις των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, βίδες, παξιμάδια και κόλλες για τη στήριξη των στοιχείων πάνω στο σώμα, επιπλέον βοηθητικά στοιχεία όπως προστατευτικά για τις

προπέλες, πόδια για την προσγείωση, αντικραδασμικές εδράσεις για την προστασία ευαίσθητων στοιχείων και κολλητικό υλικό για τις συνδέσεις των καλωδίων.

3.2.7 Τελική Επιλογή

Έχοντας καταγράψει τα απαραίτητα εξαρτήματα για την επίτευξη της αυτόνομης πτήσης ενός Drone, σειρά έχει η τελική επιλογή των κατάλληλων αυτών στοιχείων. Η διαδικασία αυτή δεν είναι απλή και γραμμική. Υπάρχει μια πολυπλοκότητα που οφείλεται στην περιορισμένη επιλογή στοιχείων από τα εμπορικά διαθέσιμα, από την πολυπλοκότητα των εξισώσεων κίνησης του Drone και από την άγνοια για τα βάρη του κάθε ξεχωριστού εξαρτήματος.

Θέλοντας να πραγματοποιηθεί μια αρχική εκτίμηση των στοιχείων που θα αποτελούν το τη βάση του Drone, λαμβάνοντας υπόψη το είδος των κινητήρων που χρησιμοποιούνται, η ισχύς σε kW που παράγεται από αυτούς, έχει ως ακολούθως:

$$P = IV = (\tau + k_t I_0)(k_t I_0 R_m + \tau R_m + k_t k_v \omega) / k_t^2 \quad (1)$$

όπου I_0 είναι το ονομαστικό ρεύμα άνευ φορτίου κινητήρα, τ είναι η ροπή του κινητήρα, I είναι το προσαγόμενο ρεύμα, R_m είναι η εσωτερική αντίσταση του κινητήρα, ω είναι οι στροφές του κινητήρα, k_t είναι η σταθερά ροπής και k_v η προαναφερθείσα χαρακτηριστική σταθερά. Μέσω της Momentum Theory [37], η ταχύτητα του αέρα κατά την αιώρηση, δίνεται ως:

$$u_h = \sqrt{T/2\rho A} \quad (2)$$

όπου T είναι η παραγόμενη ώση, ρ είναι η πυκνότητα του αέρα και A το εμβαδόν δίσκου της προπέλας. Με αυτές τις δύο εξισώσεις, μια σύνδεση μεταξύ ώσης και χαρακτηριστικών κινητήρα-προπέλας, μπορεί να παρουσιαστεί:

$$T = (k_v k_t \sqrt{2\rho A \omega} / k_t)^2 \quad (3)$$

όπου k_t είναι η σταθερά που συνδέει ροπή με ώση. Μέσω αυτών των εξισώσεων είναι δυνατή, όχι μόνο μια αρχική εκτίμηση των κατάλληλων στοιχείων για μια συγκεκριμένη κατασκευή (μέσω δοκιμών και πιο συστηματικά μέσω παραμετρικής ανάλυσης λόγω πλήθους παραγόντων), αλλά και η προσομοίωση του Drone, χρησιμοποιώντας και άλλες κινηματικές και δυναμικές εξισώσεις, βοηθώντας στην ανάπτυξη αλγορίθμων ελέγχου και εντοπισμού θέσης. Ανάλογα με τις απλουστεύσεις των φαινομένων και των παραδοχών που επιλέγεται να γίνουν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές εξισώσεις, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η ροή αέρα από τις άλλες έλικες, οι διαφορές στην πυκνότητα του αέρα κ.λπ. Βέβαια, η λεπτομερής σχεδίαση και επιλογή εξαρτημάτων βασισμένη σε τέτοιες εξισώσεις, αποτελεί μια πολύ δύσκολη διαδικασία.

Η εναλλακτική λύση που προτιμήθηκε, είναι η χρήση του eCalc⁵, ενός διαδικτυακού εργαλείου που διαθέτει μια εκτεταμένη βάση δεδομένων τηλεχειριζόμενων συσκευών και έχει την δυνατότητα διεξαγωγής υπολογισμών με βάση συγκεκριμένα εξαρτήματα, με τιμές που δίνονται από το χρήστη και μέσω συγκεκριμένων εξισώσεων, για τον κατάλληλο συνδυασμό εξαρτημάτων. Υπάρχουν modules για τη μελέτη διάφορων κατασκευών, όπως ηλεκτρικών αμαξιών, αεροπλάνων και ελικοπτέρων, αλλά αυτό που θα χρησιμοποιηθεί εδώ, είναι αυτό που αναφέρεται στα πολυκόπτερα.

Επιλέγοντας το κατάλληλο module, γίνεται η ανακατεύθυνση στη σελίδα των X-Rotors, όπου και πραγματοποιείται η επιλογή των εξαρτημάτων. Η λογική που ακολουθήθηκε είναι αυτή της δοκιμής-λάθους. Έχοντας υπόψη χονδρικά τα μεγέθη των Drones, που απαιτούνται για τη μεταφορά πακέτων ως 2kg (μέσω της αναζήτησης παρόμοιων εμπορικά διαθέσιμων αεροσκαφών, αλλά και

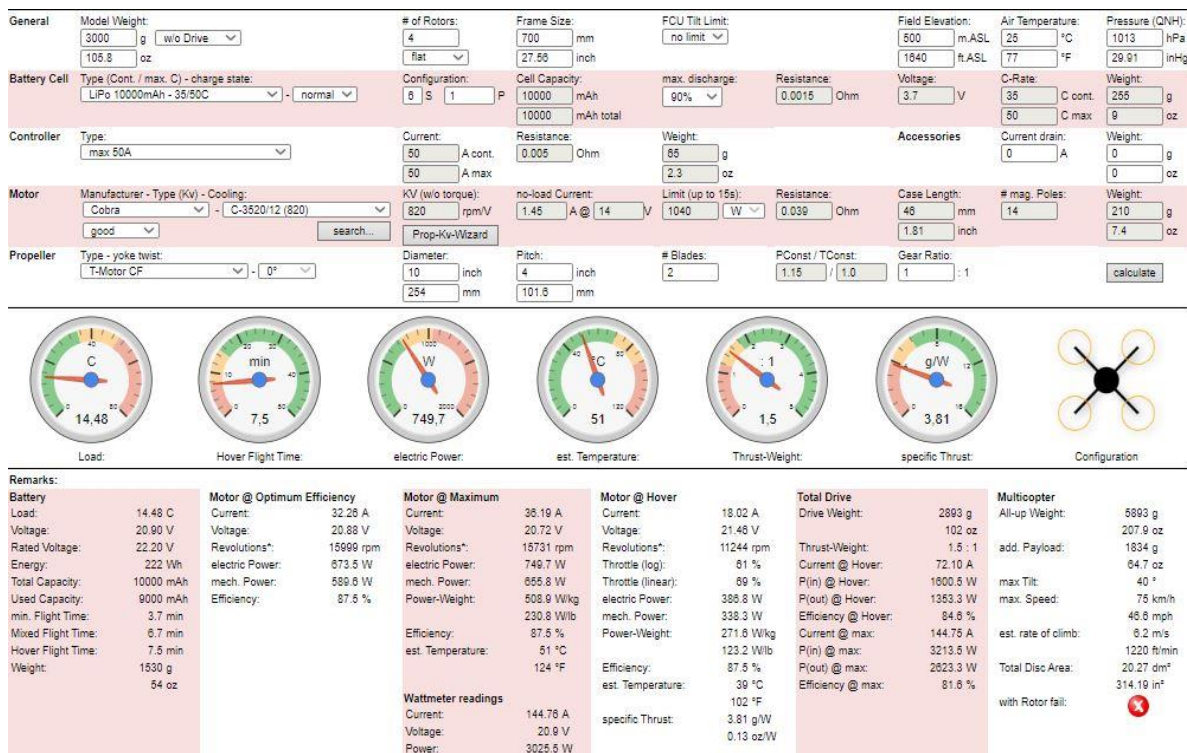
⁵ <https://www.ecalc.ch>

από τις προαναφερθείσες αεροδυναμικές εξισώσεις), συμπληρώνονται τα πεδία που αφορούν 5 κατηγορίες:

- Γενικά Μεγέθη: Συνολικό βάρος, αριθμός κινητήρων, μέγεθος πλαισίου, ποσοστό αποφόρτισης μπαταρίας.
- Μπαταρία: τύπος, αριθμός κελιών σε σειρά και παράλληλα.
- ESC: Τύπος.
- Κινητήρας: Κατασκευαστής, Kv rating.
- Προπέλα: Τύπος, διάμετρος, βήμα, αριθμός λεπίδων.

Κάνοντας μια επιλογή των στοιχείων αυτών και τρέχοντας το πρόγραμμα, εμφανίζονται αποτελέσματα που αφορούν το χρόνο πτήσης, το ενεργό φορτίο, την παραγόμενη ώση και διάφορα χαρακτηριστικά που αφορούν τις στροφές των κινητήρων κατά την αιώρηση, το απαιτούμενο ρεύμα κ.τ.λ. Σε περίπτωση που ο συνδυασμός των εξαρτημάτων δεν είναι ικανός να σηκώσει το βάρος που επιλέγεται, εμφανίζονται μηνύματα με τις συνθήκες του σφάλματος. Έτσι, επιλέγοντας διαφορετικό συνδυασμό εξαρτημάτων, συνεχίζεται η διαδικασία.

Παρακάτω, φαίνεται η εικόνα από το eCalc με το τελικό συνδυασμό εξαρτημάτων.



Εικόνα 5: Διαμόρφωση drone για τη βιομηχανία.

Το κύριο θέμα με το σχεδιασμό, ήταν να επιτευχθεί ικανοποιητική δύναμη ώσης και χρόνος πτήσης, σε συνδυασμό με σχετικά μικρό μέγεθος πλαισίου, κινητήρων και ελίκων, ώστε το σκάφος να μπορεί να διεξάγει ελιγμούς στο εργοστάσιο. Αυτό, επιτεύχθηκε δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή της μπαταρίας και επιλέγοντας υψηλών ταχυτήτων κινητήρες. Όπως παρατηρείται, επιτυγχάνεται χρόνος πτήσης 7.5min σε μέγιστο φορτίο και λόγος Ώσης/Βάρους ίσος με 1.5, επομένως το Drone θα μπορεί να σηκώνει 3 επιπλέον κιλά. Παρακάτω, φαίνονται και σε πίνακα τα στοιχεία που επιλέχθηκαν να αγοραστούν, μαζί με μια ενδεικτική τιμή, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται και κάποιες εικόνες των στοιχείων.

Πίνακας 3: Στοιχεία προς αγορά.

A/A	Είδος	Κατασκευαστής-μοντέλο	Ποσότητα (τμχ)	Κόστος (€/τμχ)
1	Motors	Cobra C-3520/12 (820)	4	50
2	Propellers	APC 10x5 (in)	4	5
3	Battery	URUAV 22.2V 10000mAh 30/60C 6S Lipo XT90	1	118
4	Charger	iMAX B6 80W 6A Lipo Battery Balance Charger	1	25
5	ESCs	Hobbywing Skywalker 2-6S 60A UBEC Brushless ESC	4	22
6	Controller	Pixhawk PX4 2.4.8 Flight Controller 32 Bit ARM	1	61
7	Camera	Eachine E019 RC Drone Quadcopter Spare Parts 480P WiFi FPV	1	9



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Εικόνα 6: Επιλεγμένα εξαρτήματα για την κατασκευή του Drone: (α) Κινητήρας, (β) Προπέλα, (γ) Μπαταρία, (δ) ESC, (ε) Ελεγκτής. (<https://www.banggood.com>)

Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση και προσομοίωση

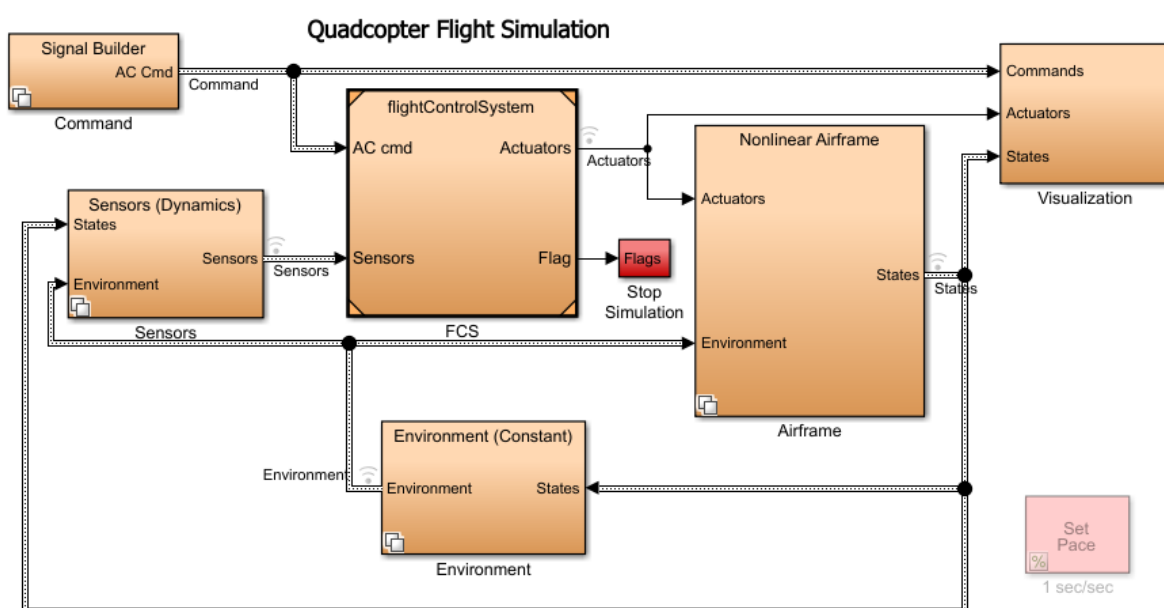
Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η μελέτη και μοντελοποίηση των λειτουργιών του Drone που επιλέχθηκε να κατασκευαστεί, και παρουσιάζεται η απόκριση του σε προκαθορισμένες τρισδιάστατες τροχιές, κάνοντας χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της *Matlab* και του βοηθητικού προγράμματος δυναμικών προσομοιώσεων, *Simulink*.

Η προσομοίωση της λειτουργίας οποιασδήποτε κατασκευής, σε συνθήκες όσο πιο κοντινές γίνεται στην πραγματικότητα, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για τη σχεδίαση, διότι βοηθάει στην αποφυγή λαθών και ανεπιθύμητων συμπεριφορών, οι οποίες σε πειραματικές δοκιμές θα μπορούσαν να αποδειχθούν τουλάχιστον κοστοβόρες, ίσως και επικίνδυνες. Επιπλέον, κατανοείται και από τον ίδιο το σχεδιαστή, αλλά και από τους υπόλοιπους ερευνητές, η λειτουργία της κατασκευής (μέσω γραφικών παραστάσεων, οπτικοποιήσεων με βίντεο και εικόνες), αντιμετωπίζονται γρηγορότερα και φθηνότερα διάφορα προβλήματα, και βελτιώνεται συνολικά η ερευνητική διαδικασία. Βέβαια, η μοντελοποίηση δεν αντικαθιστά σε καμία περίπτωση την πειραματική διαδικασία.

4.1 Περιγραφή μοντελοποίησης

Η μοντελοποίηση του συστήματος στο *Simulink*, βασίστηκε στο ενσωματωμένο Project στη *Matlab*, το οποίο αναπτύχθηκε από μια ομάδα στο MIT με κύριους προγραμματιστές τον Sertac Karaman και Fabian Reither ως ερευνητικό και εκπαιδευτικό εργαλείο, και έχει ως μοντέλο, τα MiniDrones της εταιρείας Parrot (πρόκειται για πολύ μικρά σκάφη, κάτω των 100gr, τα οποία μπορούν εύκολα να αγοραστούν και να χρησιμοποιηθούν). Η Mathworks, παρέχει και τα εργαλεία για τη μετατροπή του μοντέλου από το *Simulink* σε C κώδικα, ικανό να ενσωματωθεί και να διαβαστεί από τους μικροεπεξεργαστές των Drone αυτών.

Είναι προφανές, ότι για τη χρήση του μοντέλου για τη συγκεκριμένη μελέτη, έπρεπε να προσαρμοστεί στα μεγέθη του προς μελέτη Drone. Παρακάτω, γίνεται μια περιγραφή όλων των βασικών συστημάτων που αποτελούν το μοντέλο.

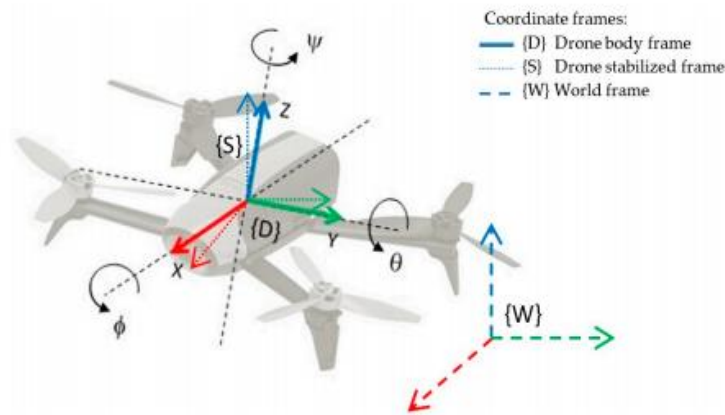


Εικόνα 7: Συνολικό μοντέλο στο *Simulink*.

4.1.1 Αεροδυναμικό μοντέλο (Airframe)

Το υποσύστημα αυτό, περιέχει το σύνολο των αεροδυναμικών εξισώσεων που περιγράφουν το σύστημα πτήσης. Γενικά, πρόκειται για ένα σύνολο πεπλεγμένων εξισώσεων, το οποίο καθιστά το σύστημα μη γραμμικό. Υπάρχει και η επιλογή για γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από ένα σημείο ισορροπίας, για την ευκολότερη μελέτη και την εύρεση κερδών του ελέγχου, αλλά δεν αποτελεί καλή εναλλακτική, διότι απέχει πολύ από την πραγματικότητα.

Θέλοντας να γίνει μια βασική περιγραφή των εξισώσεων που διέπουν το σύστημα, ξεκινώντας από την κινηματική, αρχικά ορίζονται τα συστήματα συντεταγμένων (Εικόνα 8), με το (W) να είναι το σταθερό σύστημα αναφοράς, το (D) το σωματόδετο σύστημα και το (S) να είναι το σωματόδετο σύστημα αλλά πάντα παράλληλο με το δάπεδο.



Εικόνα 8: Συστήματα συντεταγμένων. Πηγή [38]

Ορίζονται η θέση και η ταχύτητα στο σύστημα αναφοράς ως $x = (x, y, z)^T$ και $\dot{x} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T$. Ομοίως, για τις γωνίες roll, pitch και yaw, ισχύει $\theta = (\phi, \theta, \psi)^T$ και $\dot{\theta} = (\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T$. Πρέπει να σημειωθεί, ότι η γωνιακή ταχύτητα ω , διαφέρει από το $\dot{\theta}$. Η γωνιακή ταχύτητα αναφέρεται στο σωματόδετο σύστημα αναφοράς και είναι ένα διάνυσμα που δείχνει προς τον άξονα της περιστροφής, ενώ το δεύτερο είναι απλώς η παράγωγος των γωνιών. Τα δύο αυτά σχετίζονται ως εξής:

$$\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s_\theta \\ 0 & c_\phi & c_\theta s_\phi \\ 0 & -s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (4)$$

Θέλοντας να συσχετιστεί το σωματόδετο σύστημα με το σύστημα αναφοράς, ορίζεται ο πίνακας μετασχηματισμού[39]:

$$R = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\psi s_\phi s_\theta - c_\phi s_\psi & c_\psi s_\theta c_\phi + s_\theta s_\psi \\ c_\theta s_\psi & s_\phi s_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\theta \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

Προσπαθώντας να οριστούν οι εξισώσεις κίνησης με βάση την απεικόνιση Euler-Lagrange, γνωρίζοντας ότι στο σύστημα αναφοράς, η επιτάχυνση οφείλεται στην ώση, τη βαρύτητα και την αεροδυναμική τριβή, ισχύει:

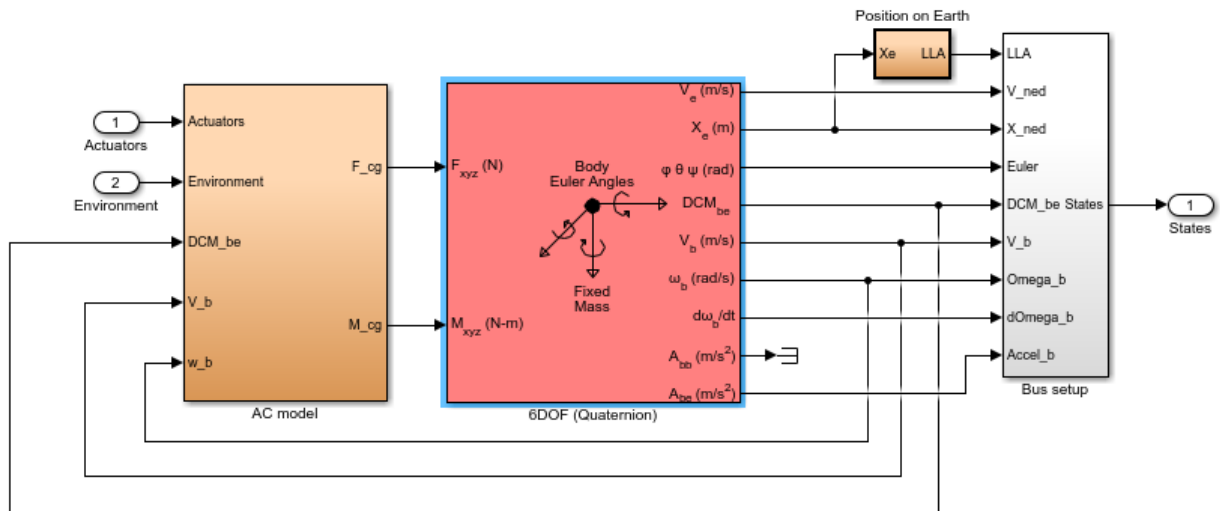
$$m\ddot{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + RT_B + F_D \quad (6)$$

όπου m είναι η μάζα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, F_D είναι η αντίσταση του αέρα και T_b είναι η δύναμη ώσης στο σωματόδετο σύστημα. Όσον αφορά τις εξισώσεις περιστροφής, ισχύει:

$$I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) = \tau \quad \text{ή} \quad \dot{\omega} = \begin{bmatrix} \tau_\phi I_{xx}^{-1} \\ \tau_\theta I_{yy}^{-1} \\ \tau_\psi I_{zz}^{-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{I_{yy}-I_{zz}}{I_{xx}} \omega_y \omega_z \\ \frac{I_{zz}-I_{xx}}{I_{yy}} \omega_x \omega_z \\ \frac{I_{xx}-I_{yy}}{I_{zz}} \omega_x \omega_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

όπου τ_ϕ , τ_θ και τ_ψ είναι οι ροπές Roll, Pitch και Yaw αντίστοιχα και I_{ii} είναι οι ροπές αδράνειας σε καθένα από τους τρεις κύριους άξονες [40].

Για αυτές ακριβώς τις εξισώσεις περιέχει εκφράσεις το υποσύστημα του Airframe και αυτό το πετυχαίνει ουσιαστικά με δύο μπλοκ. Το πρώτο μπλοκ είναι το *AC Model*, το οποίο δέχεται ως εισόδους τις συνθήκες περιβάλλοντος και τις μεταβλητές κατάστασης, και περιέχει τις εκφράσεις για όλες τις προαναφερθείσες δυνάμεις και ροπές που ασκούνται πάνω στο όχημα κατά την πτήση. Το δεύτερο μπλοκ, που είναι και το βασικότερο, ονομάζεται *6DOF Block*, αποτελεί κομμάτι των προκατασκευασμένων μπλοκ από το Simulink και συγκεκριμένα από το Aerospace Blockset, και περιέχει τις δυναμικές και κινηματικές εξισώσεις ενός συστήματος 6 βαθμών ελευθερίας όπως το Quadrotor. Δέχεται ως εισόδους τις δυνάμεις και ροπές που ασκούνται στο σύστημα, και με βάση τα χαρακτηριστικά του Drone (μάζα, ροπές αδράνειας, αρχική θέση κ.τ.λ.) υπολογίζει θέση, ταχύτητες και επιταχύνσεις.



Εικόνα 9: Non-Linear Airframe Block στο Simulink.

Στις παραπάνω εξισώσεις, μπορούν να εισαχθούν και άλλοι όροι, που να προσομοιάζουν αεροδυναμικά φαινόμενα όπως την ελαστικότητα των ελίκων, φαινόμενα επίδρασης στη ροή αέρα από τους τοίχους και το έδαφος κ.τ.λ. Ωστόσο, η επιρροή αυτών στα τελικά αποτελέσματα είναι ελάχιστη, οπότε η επιβάρυνση της προσομοίωσης με αυτά δεν ωφελεί.

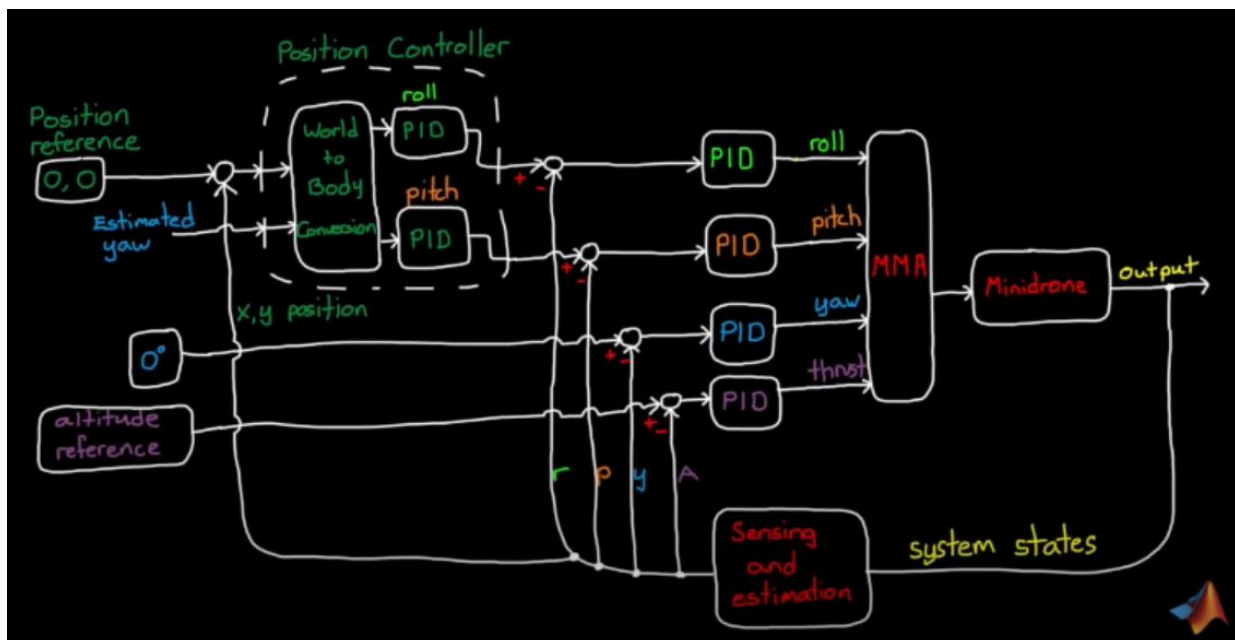
Τα παραπάνω αποτελούν τη βασική περιγραφή των φαινομένων κίνησης του Drone. Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί περεταίρω με τη μοντελοποίηση αυτή, κάποιοι από αυτούς αναφέρονται και στη βιβλιογραφία.

4.1.2 Σύστημα Ελέγχου Πτήσης (Flight Control System ή FCS)

Αποτελεί βασικό κομμάτι του μοντέλου και του Drone και ουσιαστικά προσομοιάζει τον προαναφερθέντα Flight Controller. Αποτελείται κυρίως από δύο δομικά διαγράμματα, τον Estimator και τον Controller.

Ο Estimator ή Εκτιμητής, δέχεται τις τιμές των αισθητηρίων και αποδίδει τις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος, οι οποίες περιγράφουν τη θέση, τον προσανατολισμό και την ταχύτητα, και στέλνονται στο Ελεγκτή για τον έλεγχο. Αποτελείται από επιμέρους δομικά διαγράμματα, τα οποία είναι υπεύθυνα για την επεξεργασία των σημάτων των αισθητηρίων και την προσθήκη φίλτρων (κυρίως low pass filters, για την απομάκρυνση των υψηλών συχνοτήτων θορύβου), και το συνδυασμό των τιμών από τα διάφορα αισθητήρια (πράγμα που επιτυγχάνεται με τη χρήση Φίλτρων Kalman), για την εκτίμηση της θέσης στο χώρο.

Οι έξοδοι από τον Εκτιμητή εισέρχονται στον Ελεγκτή, όπου συγκρίνονται με τις τιμές αναφοράς για την οδήγηση του οχήματος. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τέσσερις διαφορετικούς ελεγκτές, έναν για τον έλεγχο του ύψους, έναν για το yaw, έναν για την μετατόπιση στο επίπεδο XY βάσει του yaw, και έναν για τον προσανατολισμό στο οριζόντιο βάσει της μετατόπισης. Οι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται είναι κατά βάση PD, για γρήγορη απόκριση με μικρό μόνιμο σφάλμα. Η λογική που ακολουθείται, παρουσιάζεται στην Εικόνα 10, στην οποία φαίνεται ξεκάθαρα η λογική των «εμφωλευμένων – διαδοχικών βρόχων ελέγχου» (*Cascaded Loop Control*). Όπως φαίνεται, οι κινήσεις Thrust και Yaw, είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και από τις υπόλοιπες, επομένως απαιτούν τη χρήση ενός μόνο PID ή PD ελεγκτή η κάθε μία. Αυτό δεν ισχύει για το Roll και το Pitch, διότι, από αυτές τις κινήσεις, εξαρτάται και η θέση στο οριζόντιο επίπεδο XY. Για την επίτευξη λοιπόν της κίνησης στο χώρο, υπάρχει πρώτα ένας εξωτερικός ελεγκτής, ο οποίος καθορίζει το σφάλμα που υπάρχει στο επίπεδο XY, και η εντολή από τον ελεγκτή αυτόν, στέλνεται στους εσωτερικούς ελεγκτές του Roll και του Pitch, για την εύρεση της κατάλληλης κλίσης του Drone για τη μείωση του σφάλματος και τη σταθεροποίηση του οχήματος.

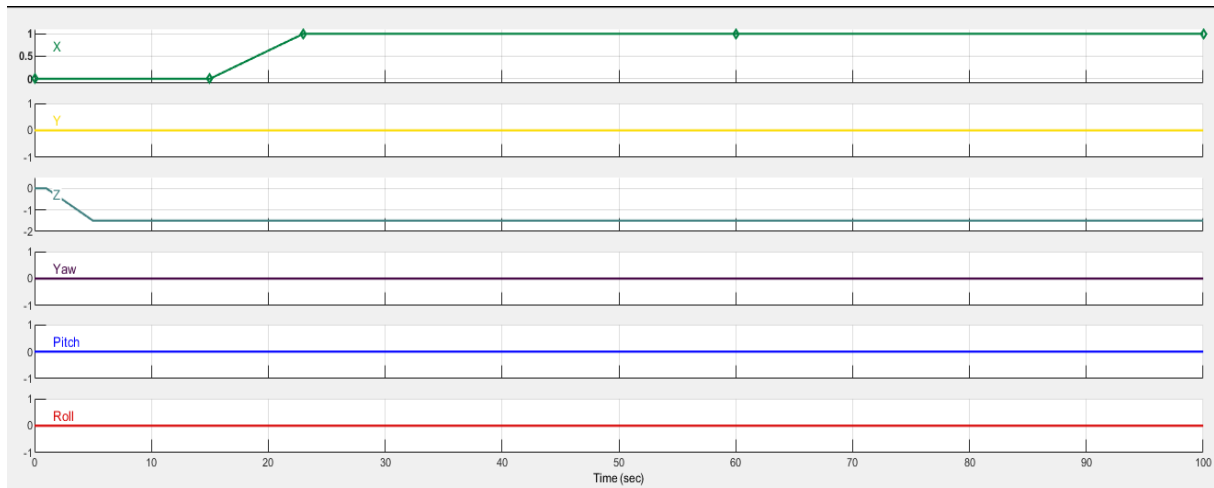


Εικόνα 10: Λογική ελέγχου. Πηγή: <https://www.mathworks.com/videos/drone-simulation-and-control-part-2-how-do-you-get-a-drone-to-hover--1539323448303.html>

Το αποτέλεσμα του ελέγχου είναι οι ταχύτητες των κινητήρων, δηλαδή το σήμα (ρεύμα) που θα δοθεί στους κινητήρες για την παραγωγή της κατάλληλης τιμής ώσης.

4.1.3 Καθορισμός τροχιάς (Signal Builder)

Ο προσδιορισμός της καθορισμένης τροχιάς, επιλέχθηκε να δίνεται μέσω διαγραμμάτων της επιθυμητής θέσης και προσανατολισμού κάθε χρονική στιγμή, χωρισμένη σε συντεταγμένες x , y , z και Yaw, Pitch, Roll αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 11. Επιπλέον επιλογές δίνονται για τον προσδιορισμό της τροχιάς, μέσω συνδεδεμένου Joystick, ή μέσω προκαθορισμένων δεδομένων από .mat αρχείο ή προκαθορισμένων δεδομένων σε Spreadsheet.



Εικόνα 11: Παράδειγμα προσδιορισμού επιθυμητής τροχιάς, για χρόνο πτήσης 100s.

4.1.4 Αισθητήρες (Sensors)

Στο υποσύστημα αυτό, γίνεται μια προσπάθεια να προσομοιωθούν οι αισθητήρες που περιλαμβάνει το Drone για την οδήγηση. Οι αισθητήρες αυτοί είναι οι εξής.

Επιταχυνσιόμετρο – Γυροσκόπιο 6 αξόνων (IMU ή Inertial Measurement Unit)

Πρόκειται για το βασικό αισθητήρα του Drone, ο οποίος περιλαμβάνεται σε κάθε Drone σήμερα και χρησιμοποιείται κυρίως για τη σταθεροποίηση κατά την πτήση. Αποτελείται από ένα επιταχυνσιόμετρο (το οποίο μέσω αλλαγών της δύναμης που ασκείται σε ένα ποτενσιόμετρο, συνήθως από ένα σύστημα μάζας ελατηρίου, γνωρίζοντας την ακριβή μάζα, υπολογίζει την επιτάχυνση) και από ένα γυροσκόπιο (το οποίο υπολογίζει τον προσανατολισμό του αντικειμένου με βάση το μαγνητικό πεδίο της Γης).

Αισθητήριο Υπερήχων (Sonar)

Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της απόστασης του Drone από αντικείμενα στο έδαφος, μέσω της αποστολής υπέρηχων κυμάτων και τον υπολογισμό του χρόνου επιστροφής. Βοηθάει στην αποφυγή συγκρούσεων με αντικείμενα στο έδαφος.

Αισθητήριο Πίεσης (Pressure Sensor)

Προσδιορίζεται το απόλυτο ύψος από την επιφάνεια της Γης, μετρώντας την πίεση του αέρα γύρω από το Drone (αύξηση του ύψους συνεπάγεται μείωση της πυκνότητας του αέρα, άρα και της υπερβάλλουσας πίεσης).

Κάμερα

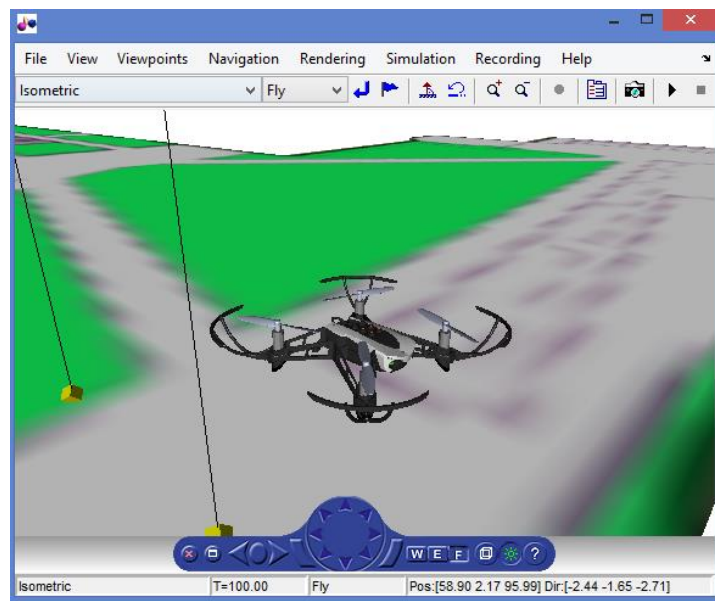
Η κάμερα πάνω σε ένα Drone μπορεί να έχει πληθώρα χρήσεων. Η σημαντικότερη από αυτές είναι η δυνατότητα υπολογισμού της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης του οχήματος, μέσω αλγορίθμων εύρεσης των διαφορών στα pixel διαδοχικών εικόνων (Optical Flow). Επιπλέον χρήσεις, μπορεί να είναι η αναγνώριση συγκεκριμένων αντικειμένων προς μεταφορά, ανίχνευση χρωμάτων και άλλων πληροφοριών, και η ψυχαγωγική φωτογράφιση ή βιντεοσκόπηση.

4.1.5 Περιβάλλον (Environment)

Μέσω του δομικού διαγράμματος αυτού καθορίζονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η τιμή της βαρύτητας, η ατμοσφαιρική πίεση, το μαγνητικό πεδίο και η πυκνότητα του αέρα. Δίνεται και η δυνατότητα για μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος (πιθανότατα για περιπτώσεις όπου τα ύψη πτήσης είναι μεγάλα, ή υπάρχουν έντονα μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία στο χώρο), όμως δεν προσφέρει κάτι στη συγκεκριμένη προσομοίωση.

4.1.6 Οπτικοποίηση Αποτελεσμάτων (Visualization)

Η οπτικοποίηση της προσομοίωσης γίνεται μέσω του Simulink3D, ενός ενσωματωμένου στη Matlab προγράμματος προσομοιώσεων. Υπάρχει και η δυνατότητα αποστολής των αποτελεσμάτων ως μεταβλητές στο Workspace της Matlab, χρήση διαγραμμάτων, ή και χρήση εξωτερικών προγραμμάτων προσομοίωσης, όπως το FlightGear.



Εικόνα 12: Οπτικοποίηση προσομοίωσης.

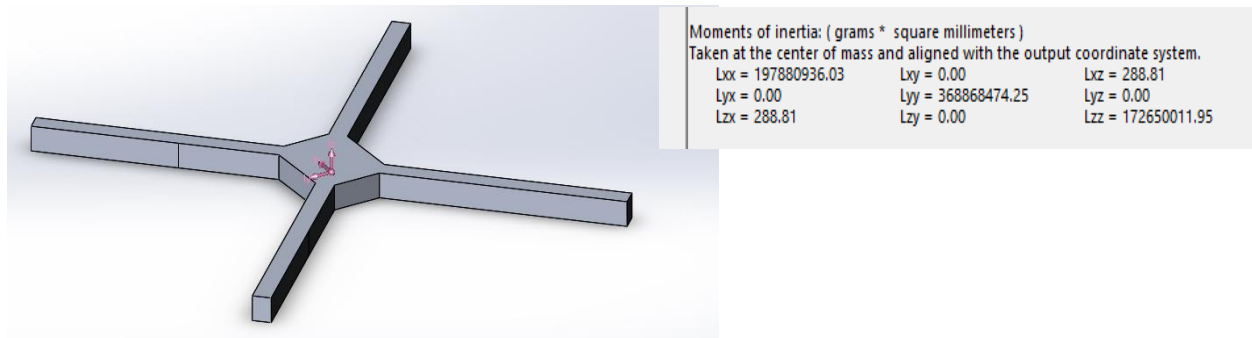
4.2 Προσομοίωση και παραγωγή αποτελεσμάτων

4.2.1 Προσαρμογή χαρακτηριστικών

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η προσομοίωση αυτή δημιουργήθηκε με πρότυπα κάποια μικρά Drones της Parrot. Είναι λοιπόν προφανές, ότι έπρεπε να γίνει μια προσαρμογή για να χρησιμοποιηθεί η μοντελοποίηση στην παρούσα μελέτη⁶.

⁶ Όλοι οι κώδικες που χρησιμοποιούνται, παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Τα πρώτα που έπρεπε να αλλάξουν, ήταν η μάζα και η ροπή αδράνειας του οχήματος. Για τη μάζα, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που λήφθηκαν από το eCalc, το οποίο περιλαμβάνει στους υπολογισμούς όλα τα εξαρτήματα του Drone. Οπότε υπολογίστηκε περίπου 5.89kg. Για τη ροπή αδράνειας δεν υπήρχαν δεδομένα. Για το λόγο αυτό, σχεδιάστηκε στο Solidworks μια πολύ βασική μορφή του οχήματος, με αντίστοιχη μάζα και μέγεθος, και λήφθηκε η ροπή αδράνειας του μοντέλου αυτού (Εικόνα 13). Να σημειωθεί, ότι λόγω πιθανών αποκλίσεων κατά τους υπολογισμούς της μάζας και της ροπής αδράνειας από την πραγματική κατάσταση, αλλά και επειδή, ακόμα και στην κανονική λειτουργία, λόγω φόρτωσης και εκφόρτωσης εξαρτημάτων, τα μεγέθη αυτά είναι μεταβλητά, πραγματοποιούνται δοκιμές και με διαφορετικές τιμές, αλλά αντίστοιχων προφανώς τάξεων μεγέθους, όπως θα δειχθεί στο κομμάτι των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 13: Βασική μορφή Quadrotor και υπολογισμένες ροπές αδράνειας μέσω του εργαλείου mass properties του Solidworks.

Στη συνέχεια, έπρεπε να αλλάξουν κάποια μεγέθη των ελίκων για να ταιριάζουν με τα επιλεγμένα μοντέλα (διάμετρος, μήκος χορδής, μάζα), καθώς και του σώματος του Drone. Δύο ακόμα πολύ σημαντικά μεγέθη που έπρεπε να αλλάξουν, ήταν ένα κέρδος που συσχετίζε την εντολή προς τον κινητήρα με την αποδιδόμενη ταχύτητα περιστροφής και ένα για την ταχύτητα περιστροφής με την παραγόμενη ώση. Αυτό ήταν αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί, διότι η τιμή τους εξαρτάται πολύ από την κατασκευή του κινητήρα και του πτερυγίου. Για τον ικανοποιητικό υπολογισμό τους, χρησιμοποιήθηκε και πάλι το eCalc, στο οποίο καταγράφονται οι στροφές των κινητήρων κατά το Hover. Με βάση αυτό, μέσω δοκιμών, ελεγχόταν η τιμή της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων κατά την προσομοίωση για διάφορα κέρδη, μέχρι να συγκλίνει στην προαπαιτούμενη τιμή, έχοντας πάντα κατά νου να επιτυγχάνεται η απαραίτητη τιμή ώσης. Όταν συνέβη αυτό, πραγματοποιήθηκαν ακόμα μερικές δοκιμές, για να φανεί η συμπεριφορά του Drone και σε άλλες καταστάσεις πτήσεων και αποδείχτηκε καλή. Επομένως, χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που βρέθηκαν.

4.2.2 Εύρεση κερδών

Είναι προφανές ότι, εφόσον άλλαξε η τάξη μεγέθους του Drone προς μοντελοποίηση (από 63gr σε 5kg), έπρεπε να μεταβληθούν και τα κέρδη των PD και PID ελεγκτών για την επίτευξη της ευστάθειας και την καλή απόκριση του αεροσκάφους. Αυτό όμως δεν ήταν μια απλή διαδικασία. Η μοντελοποίηση είναι αρκετά περίπλοκη και η γραμμικοποίηση δεν είναι ακριβής απεικόνιση της πραγματικότητας, ώστε να στηριχτεί η μελέτη σε αυτήν, και να χρησιμοποιηθούν κλασικές μέθοδοι εύρεσης κερδών, όπως οι μέθοδοι Ziegler – Nichols, Cohen – Coon κ.τ.λ. Η μόνη επιλογή λοιπόν ήταν να πραγματοποιηθούν δοκιμές.

Κάτι τέτοιο όμως, θα ήταν αδύνατο να επιτευχθεί, εάν όλοι οι ελεγκτές που αναφέρθηκαν, χρησιμοποιούνταν συγχρόνως, διότι τα προς εκτίμηση κέρδη είναι πάρα πολλά και η τελική απόκριση επηρεάζεται από όλα. Αλλάζοντας οπότε ένα τη φορά, δεν θα ήταν δυνατό να αξιολογηθούν τα αποτελέσματά του στην απόκριση. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε λοιπόν, ήταν η ενασχόληση με

έναν τη φορά ελεγκτή, ενώ τα υπόλοιπα συστήματα αδρανοποιούνταν και θεωρούνταν ότι το Drone ακολουθούσε την ιδανική επιθυμητή τροχιά. Έτσι, αρχικά μελετήθηκε ο έλεγχος του ύψους, δίνοντας μια τροχιά με μετατόπιση στον άξονα Z. Είναι γνωστό ότι, το K_p ορίζει την ταχύτητα απόκρισης, το K_D την υπερακόντιση και τις ταλαντώσεις και το K_i το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Επομένως, παρατηρώντας την απόκριση, ήταν αρκετά φανερό πως έπρεπε να κινηθούν οι τιμές των κερδών. Αφού επιτεύχθηκε η επιθυμητή απόκριση, εισήχθη στη μελέτη και ο ελεγκτής της περιστροφής στον οριζόντιο άξονα, ύστερα της θέσης και τελικά του προσανατολισμού στο οριζόντιο επίπεδο.

Στο Παράρτημα Β περιγράφεται εκτενέστερα η διαδικασία εύρεσης των κερδών. Ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τα κέρδη που υπολογίστηκαν.

Πίνακας 4: Κέρδη ελέγχου.

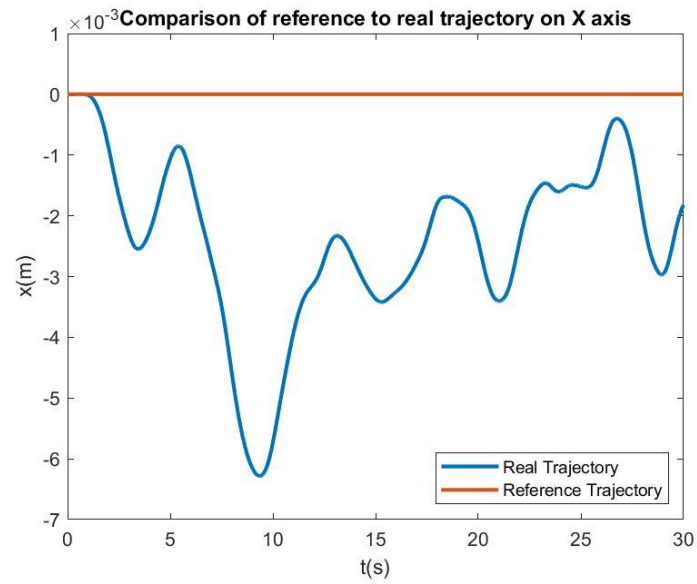
Altitude(Z)	
K_p	13
K_D	8
Yaw	
K_p	9
K_D	3
Attitude(XY)-[pitch roll]	
K_p	[13 20]
K_D	[2 3]
K_i	[10 10]
Orientation (XY)	
K_p	[-0.16 0.16]
K_D	[0.08 -0.08]

4.2.3 Αποτελέσματα

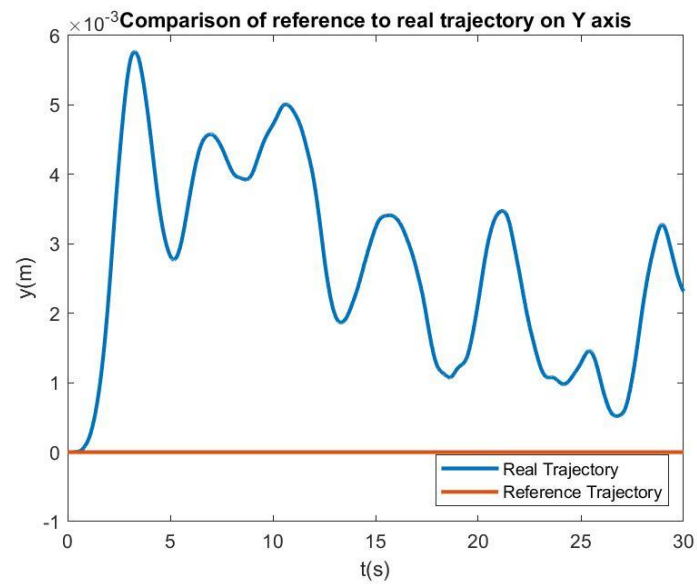
Αφού ολοκληρώθηκε η μοντελοποίηση, σειρά έχει η διεξαγωγή αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά, παρουσιάζονται κυρίως σε μορφή διαγραμμάτων απόκρισης σε καθένα από τους τρεις άξονες του χώρου, τα οποία συμπεριλαμβάνουν και την επιθυμητή τροχιά, για σύγκριση. Για να διευκρινιστεί αν το όχημα μπορεί να ακολουθήσει τις διαδρομές που απαιτούνται στα πλαίσια του εργοστασίου, θα προσομοιωθούν διάφορες καταστάσεις που θα καλείται να αντιμετωπίζει το Drone.

i. Κατακόρυφη απογείωση

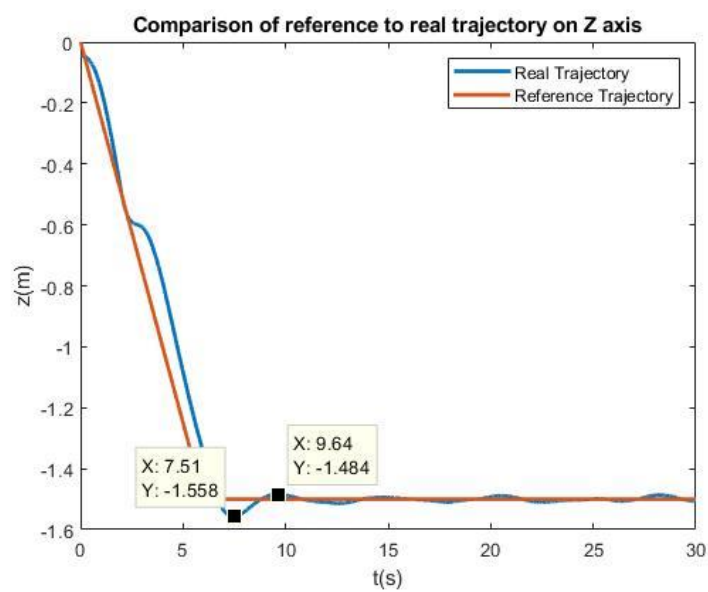
Η πρώτη περίπτωση που παρουσιάζεται, είναι η απογείωση από το δάπεδο μέχρι ένα επίπεδο στα 1.5m και η σταθερή πτήση εκεί – hover (Εικόνα 14).



α



β



γ

Εικόνα 14: Διαγράμματα απόκρισης για απογείωση (α → Χάξονας, β → Υάξονας, γ → Ζάξονας)

Όπως είναι προφανές, εφόσον δεν υπάρχει κίνηση στο οριζόντιο επίπεδο, η απόκριση στους άξονες Χ και Υ θα έπρεπε να είναι μηδενική, όπως και είναι, εφόσον οι αποκλίσεις είναι της τάξης του 10^{-3} . Στον κατακόρυφο άξονα, η απόκριση είναι πολύ καλή. Το σύστημα ακολουθεί αρκετά καλά την εντολή κατά την ανύψωση, έχοντας μια μικρή καθυστέρηση της τάξεως του ενός δευτερολέπτου. Θέλοντας να μειωθεί η καθυστέρηση αυτή (αυξάνοντας τα κέρδη), παρατηρούνταν πιο ασταθής συμπεριφορές με αρκετές ταλαντώσεις, ενώ μειώνοντας τα κέρδη, η καθυστέρηση αυξάνεται. Το μικρό «εξόγκωμα» που παρατηρείται στο 4^ο περίπου δευτερόλεπτο (βλ. Εικόνα 14α, μπλε γραμμή), οφείλεται ακριβώς στην ταχύτητα απόκρισης. Οι κινητήρες αυξάνουν στροφές για να φτάσει το Drone την επιθυμητή θέση, και αφού την φτάσει, πρέπει να μειωθούν λίγο οι στροφές, με αποτέλεσμα να μένει το όχημα για λίγο στάσιμο.

Όταν το σύστημα φτάνει στο τελικό ύψος, παρατηρείται μια υπερακόντιση της τάξεως του

$$M_p \% = \frac{Z_{max} - Z_{ref}}{Z_{ref}} 100\% = \frac{1.557 - 1.5}{1.5} 100\% = 3.8\% \quad (8)$$

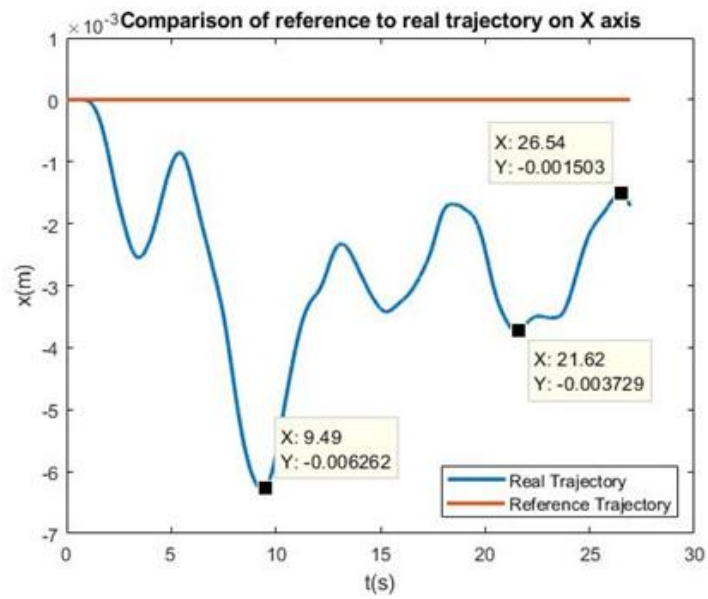
ενώ, ο χρόνος αποκατάστασης είναι περίπου $t_s = 3.475\text{sec}$.⁷ Οι συνεχόμενες ταλαντώσεις που εμφανίζονται στη συνέχεια, όπως και η υπερακόντιση, είναι αναμενόμενες για κάθε σύστημα, και ιδιαίτερα στα ιπτάμενα οχήματα με έλικες, αφού το σταμάτημα και η εκκίνηση του οχήματος εξαρτώνται μόνο από τη σχέση των περιστροφών των τεσσάρων κινητήρων. Για να διατηρηθεί το όχημα σε ένα συγκεκριμένο ύψος, θα πρέπει συνεχώς να γίνεται προσαρμογή της ταχύτητας των κινητήρων, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται αυτές οι αποκλίσεις.

Η ταχύτητα που έχει επιλεγεί για την ανύψωση του οχήματος είναι $u_z = 0.25\text{m/s}$, ενώ στο οριζόντιο επίπεδο είναι $u_{xy} = 0.15\text{m/s}$. Γενικά, προτιμώνται μικρότερες ταχύτητες κατά την μετακίνηση στο οριζόντιο επίπεδο, διότι οι πιθανότητες για την εμφάνιση κάποιου εμποδίου είναι αυξημένες και απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ στο κατακόρυφο άξονα επιλέγονται μεγαλύτερες σχετικά ταχύτητες. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, αυτή η τάξη μεγέθους, θεωρήθηκε ιδανική για το Drone, ώστε να υπάρξει μια ισορροπία μεταξύ της αποδοτικότητας (με την έννοια της επιτυχούς και γρήγορης μεταφοράς τεμαχίων) και της ασφάλειας (με βασικό στόχο την αποφυγή οποιουδήποτε ατυχήματος).

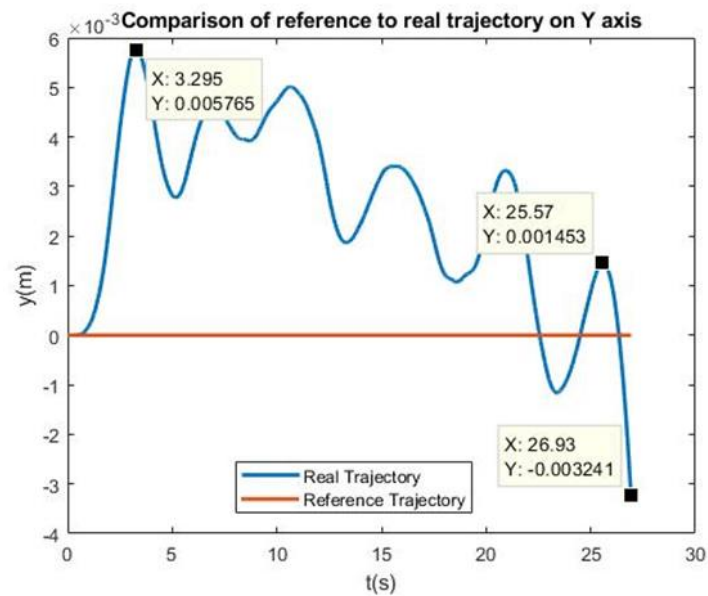
ii. Κατακόρυφη προσγείωση

Η δεύτερη περίπτωση που επιλέγεται να παρουσιασθεί, είναι η κατακόρυφη προσγείωση από ύψος 1.5m (Εικόνα 15).

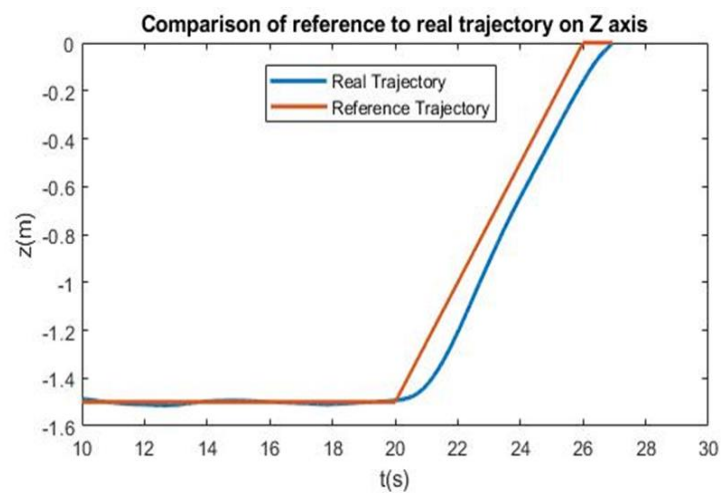
⁷ Ως χρόνος αποκατάστασης ορίζεται ο χρόνος στον οποίο οι ταλαντώσεις του συστήματος πέφτουν κάτω από το 2% της τελικής τιμής.



α



β



γ

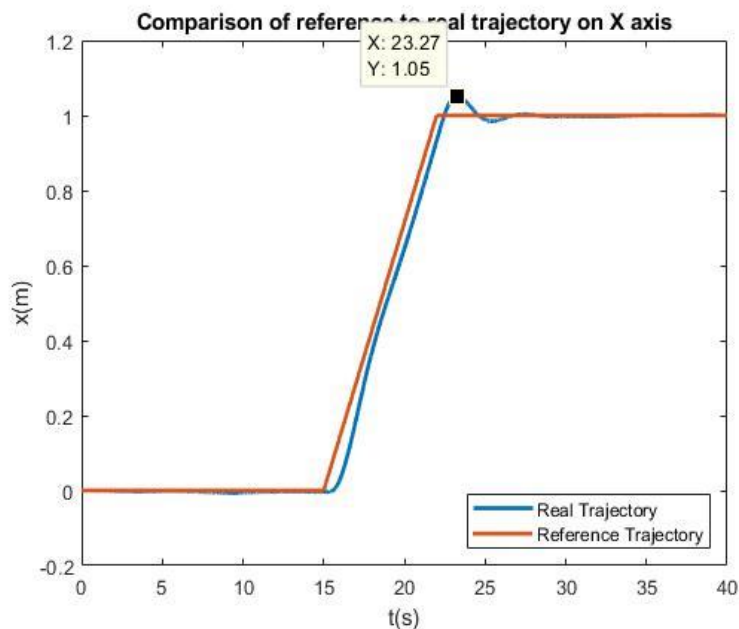
Εικόνα 15: Κατακόρυφη προσγείωση (α → Χάξονας, β → Υάξονας, γ → Ζάξονας).

Τα αποτελέσματα είναι αντίστοιχα με προηγουμένως. Και πάλι υπάρχει μια μικρή καθυστέρηση στην απόκριση και κάποιες μικρές ταλαντώσεις. Οι αποκλίσεις στου άξονες X και Y είναι και πάλι μικρές, ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ σημαντικές, διότι καθορίζουν το μέγεθος που απαιτείται να έχει η είσοδος της σύνδεσης του συστήματος μεταφοράς, που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο. Η σύνδεση αυτή, θα είναι τύπου άξονα – τμήματος, με διάσταση, την μέγιστη απόκλιση στο οριζόντιο επίπεδο, η οποία είναι στον Y άξονα ίση με $\delta Y = 0.006\text{m}$.

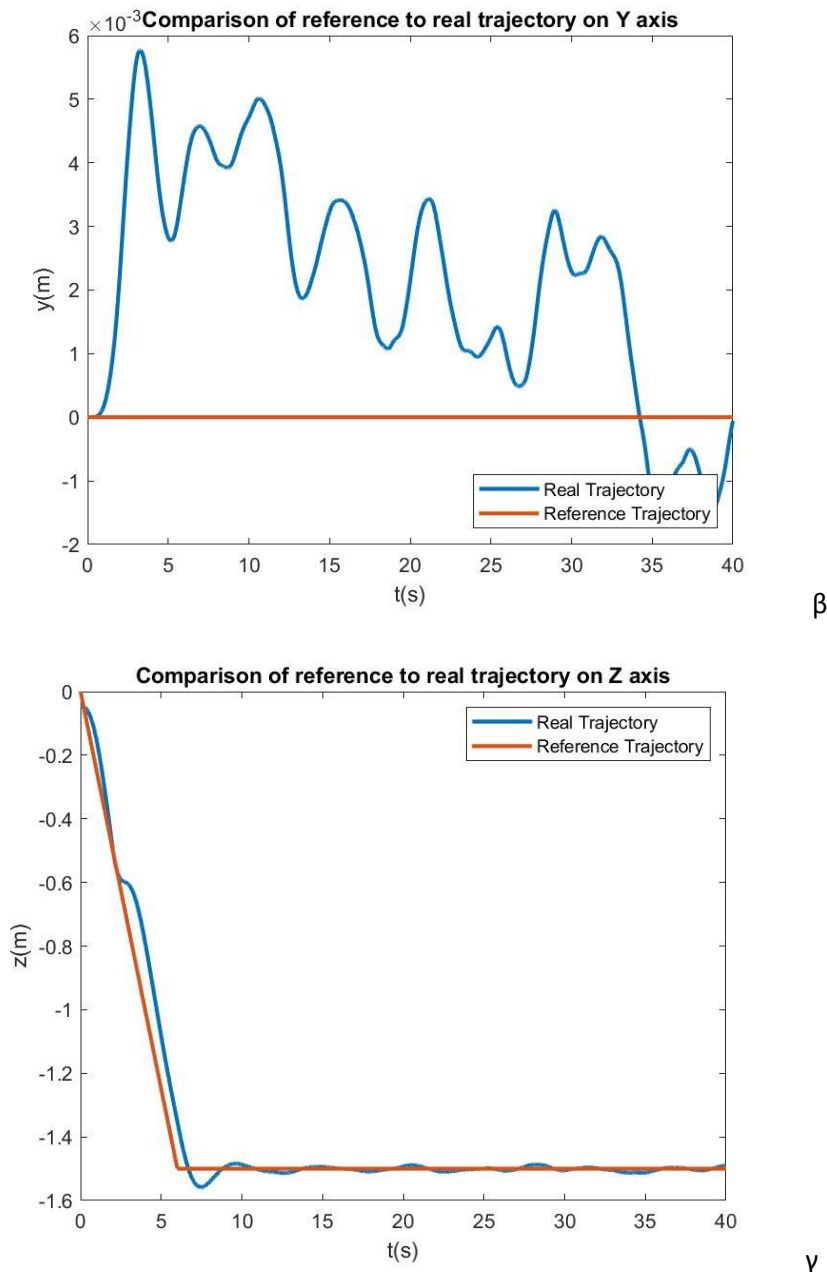
Το βασικό πρόβλημα στην περίπτωση αυτή, έγκειται στο γεγονός ότι, το συγκεκριμένο μοντέλο, δε λαμβάνει υπόψη του το φαινόμενο του εδάφους (*ground effect*). Με τον όρο *ground effect* νοείται η θετική επιρροή στην άνωση που έχουν οι οριζόντιες επιφάνειες. Η γειτνίαση με το έδαφος αλλάζει την ταχύτητα της κατακόρυφης ροής, έτσι ώστε να απαιτείται μειωμένη γωνία προσβολής για να διατηρηθεί η πτήση. Αυτό οδηγεί σε μείωση της επαγόμενης οπισθέλκουσας, που οφείλεται στη μειωμένη γωνία προσβολής και μειώνει την απαιτούμενη ισχύ. Το αποτέλεσμα αυτού, είναι, με την ίδια ταχύτητα κινήτων να δημιουργείται μεγαλύτερη ώση. Λειτουργεί ουσιαστικά σαν μια μικρή διαταραχή στο σύστημα. Ωστόσο, επειδή το *ground effect* αρχίζει να εμφανίζεται όταν το όχημα πετάει σε ύψος αντίστοιχο με τη διάμετρο των πτερυγίων (25cm σε αυτήν την περίπτωση) και επειδή αυτό συμβαίνει για μια πολύ μικρή διάρκεια, η επιρροή δεν είναι μεγάλη [41]. Θέλοντας να ληφθεί και αυτό το φαινόμενο υπόψη στο σχεδιασμό, προστίθεται μια επιπλέον απόκλιση 40% στο οριζόντιο επίπεδο, απαιτώντας μια διάμετρο κυκλικής σύνδεσης, της τάξεως του 1cm.

iii. Πτήση σε σταθερό ύψος κατά μήκος ευθύγραμμης τροχιάς

Η επόμενη περίπτωση που μοντελοποιείται, είναι η πτήση σε σταθερό ύψος, κατά μήκος του άξονα X (Εικόνα 16).



α

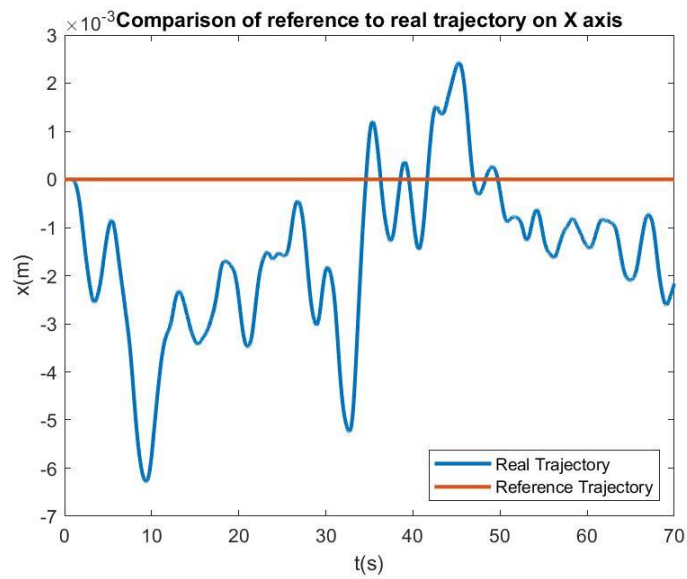


Εικόνα 16: Πτήση κατά μήκος ευθύγραμμης τροχιάς ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).

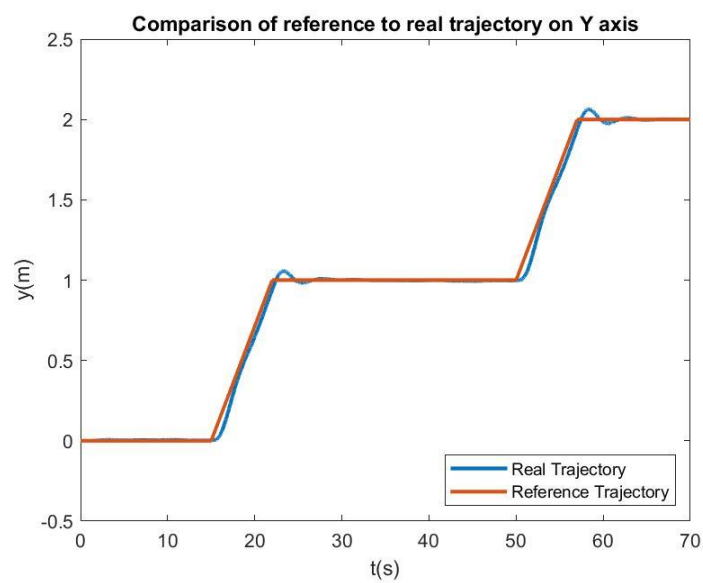
Όπως παρατηρείται, η απόκριση είναι πολύ καλή και πάλι. Η υπερακόντιση στον άξονα X είναι ίση με $M_p\% = 5\%$, και ο χρόνος αποκατάστασης $t_s = 3.27\text{sec}$.

iv. Πτήση σε δύο διαφορετικά ύψη για την αποφυγή εμποδίου

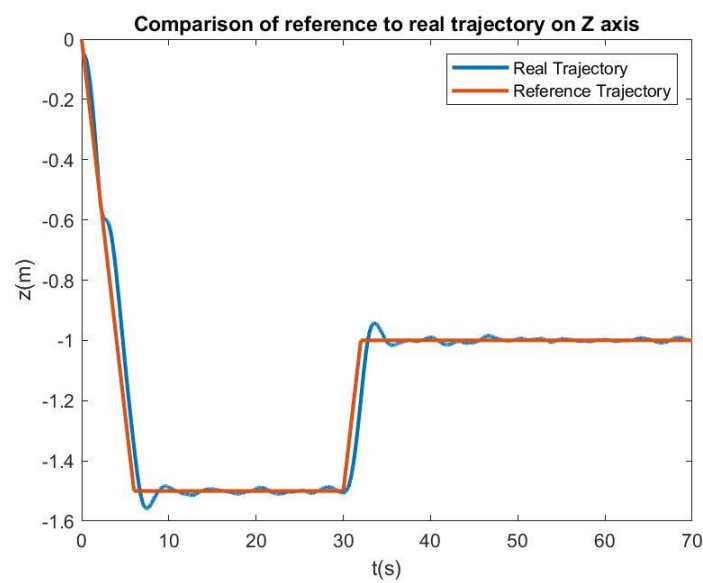
Η δυνατότητα πτήσης σε δύο επίπεδα είναι εξαιρετικά σημαντική για την αποφυγή οποιουδήποτε αντικειμένου εμποδίζει την πορεία του οχήματος. Επιλέχθηκε, η πτήση να λαμβάνει χώρο στον Υ άξονα, ώστε να μελετηθεί και αυτός ο βαθμός ελευθερίας. Όπως φαίνεται και στα επόμενα διαγράμματα, η απόκριση και σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ καλή, με ελάχιστες αποκρίσεις από τις τιμές αναφοράς.



α



β

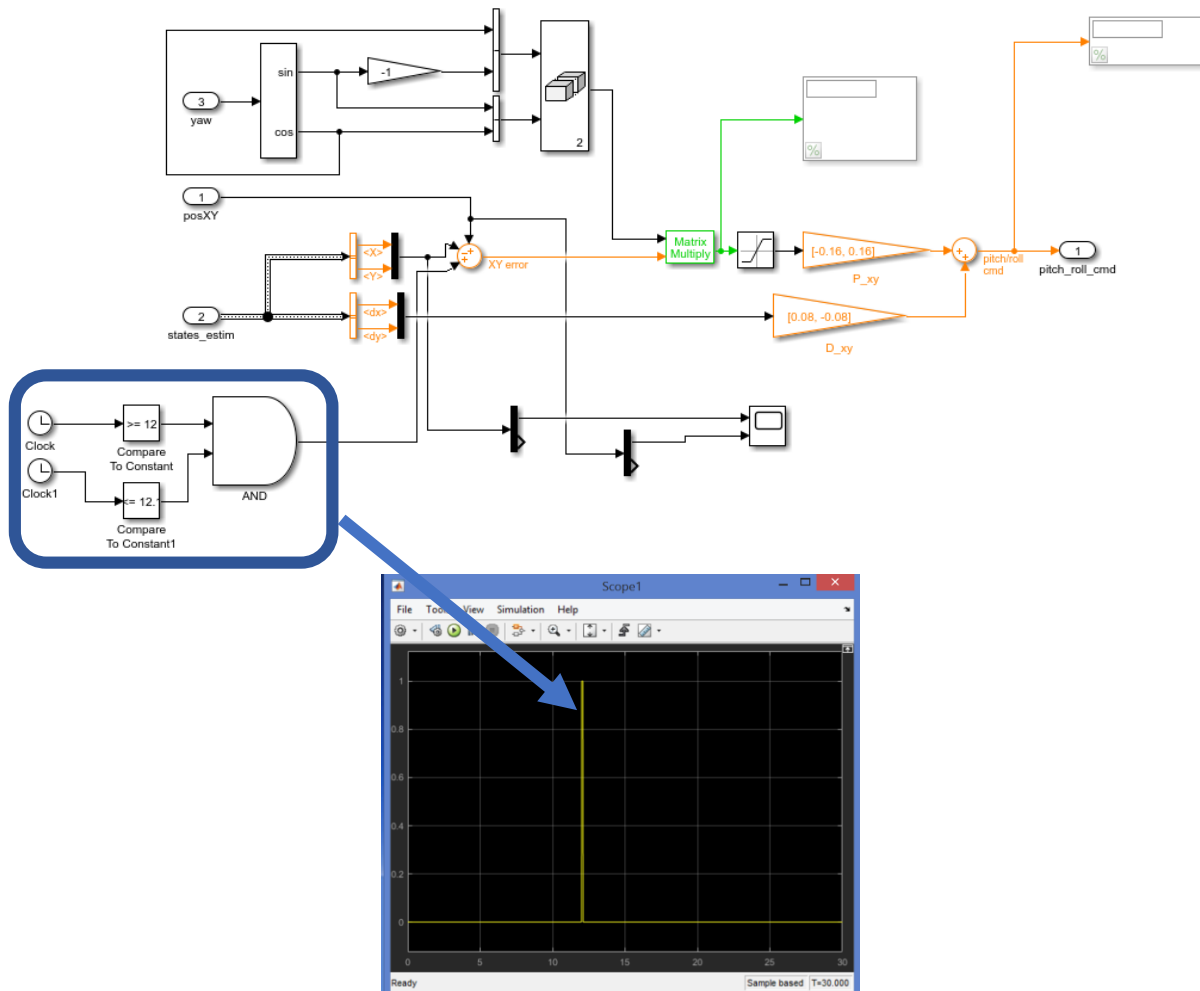


γ

Εικόνα 17: Πτήση σε δύο διαφορετικά ύψη (α → Χάξονας, β → Υάξονας, γ → Ζάξονας).

ν. Απόκριση σε διαταραχή

Η περίπτωση αυτή είναι η πιο ιδιαίτερη. Στόχος είναι η μελέτη μιας κατάστασης, κατά την οποία το όχημα υπόκειται σε μια διαταραχή (π.χ. ρεύμα αέρα) κάποια στιγμή κατά την διάρκεια της πτήσης του. Η συγκεκριμένη διαταραχή, εφόσον δεν υπάρχει ειδικό Block στο Simulink, επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί με τον τρόπο που φαίνεται στην Εικόνα 18.

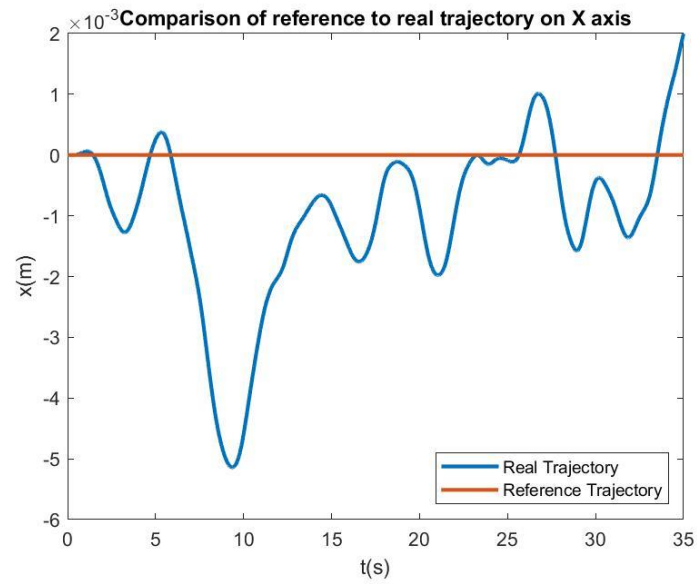


Εικόνα 18: Προσθήκη διαταραχής στον ελεγκτή του ύψους.

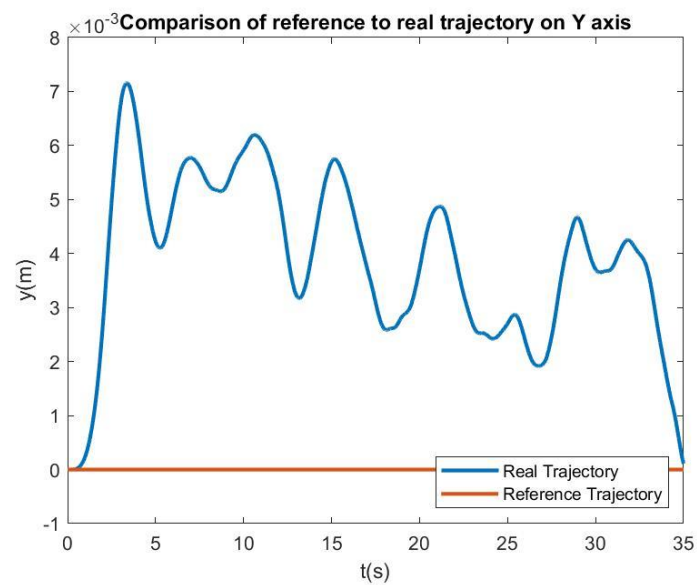
Ουσιαστικά, προστέθηκε ένα επιπλέον υποσύστημα στο Block του ελεγκτή ύψους στο Simulink, το οποίο βρίσκει το διάστημα της προσομοίωσης που επιθυμείται να υπάρξει η διαταραχή, και προσθέτει στο άθροισμα σημάτων της θέσης (αναφορά και πραγματική), μια τιμή που προσομοιάζει τη συνάρτηση Dirac. Επιλέχθηκε να προστεθεί αυτή η τιμή για διάστημα $dt = 0.1\text{sec}$. Έγινε αυτό, με στόχο να μοντελοποιηθεί ένα απότομο κύμα αέρα με κατεύθυνση κατακόρυφη προς τα πάνω, το οποίο θα πνεύσει για dt διάστημα. Έτσι θεωρήθηκε πως προσομοιάζεται όσο καλύτερα γίνεται η πραγματική περίπτωση. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 19).

Όπως φαίνεται, η επίδραση της διαταραχής είναι μικρή, αλλά όχι αμελητέα. Το όχημα αποκλίνει από το ύψος αναφοράς, με μέγιστη απόκλιση τα 0.1m , και επανακτά τη θέση του μετά από 3sec .

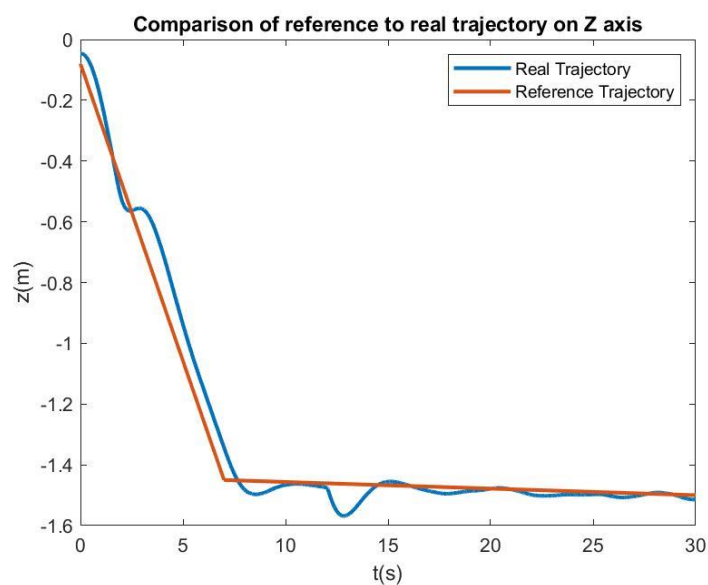
Αντίστοιχη διαταραχή, επιλέχθηκε να δοκιμαστεί και στον ελεγκτή της θέσης στον οριζόντιο άξονα, δηλαδή ένα κύμα αέρα στο οριζόντιο επίπεδο. Όπως φαίνεται παρακάτω, τα αποτελέσματα και σε αυτήν την περίπτωση ήταν αντίστοιχα, με τη διαταραχή και πάλι να επηρεάζει τη θέση του οχήματος, κατά 0.1m για περίπου 3sec .



α

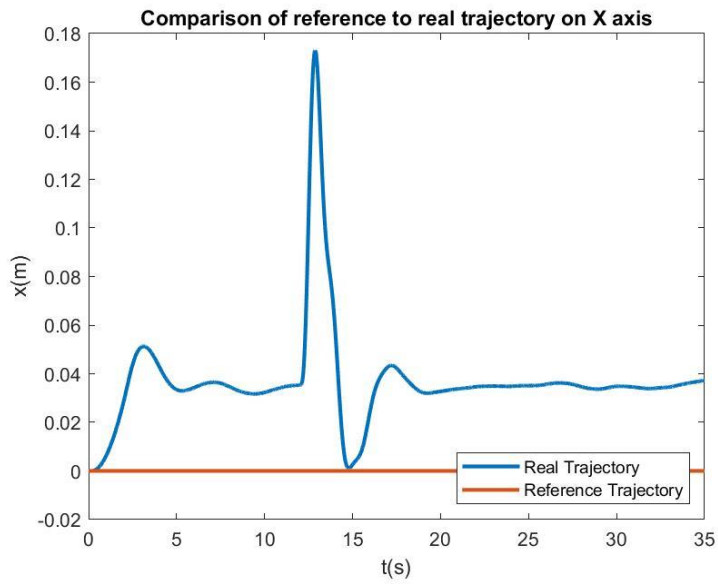
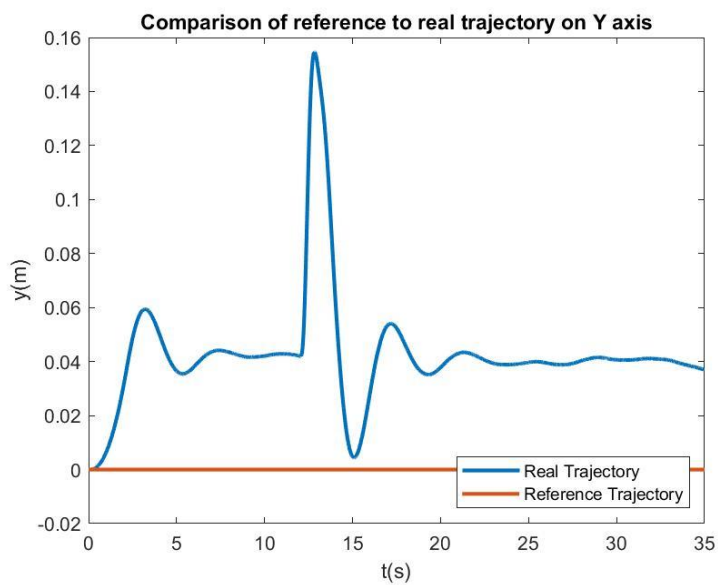
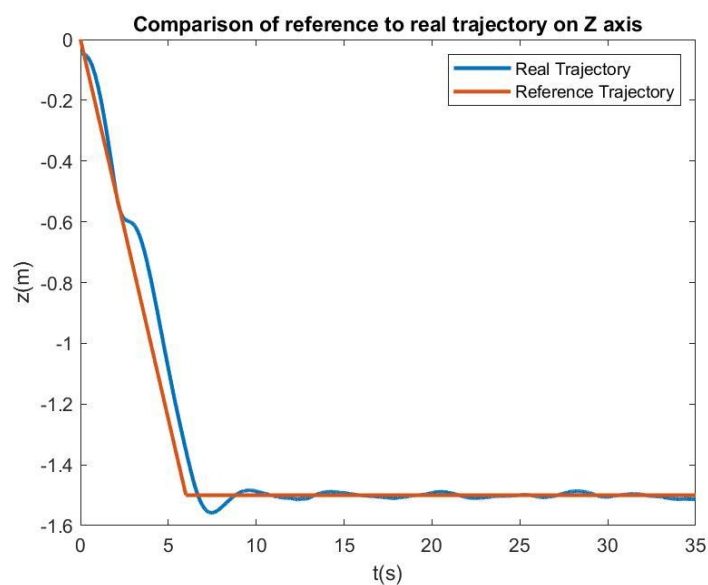


β



γ

Εικόνα 19: Απόκριση σε διαταραχή στον κατακόρυφο άξονα (α → Χάξονας, β → Υάξονας, γ → Ζάξονας).

 α  β  γ

Εικόνα 20: Απόκριση σε διαταραχή στο οριζόντιο επίπεδο ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).

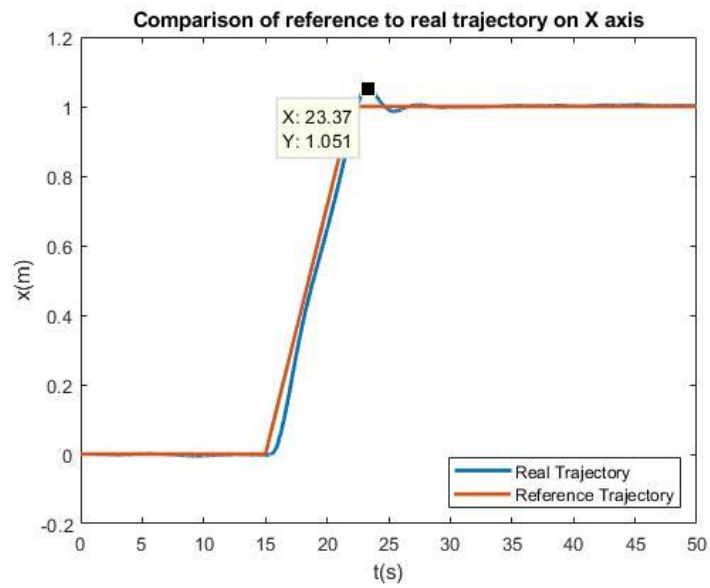
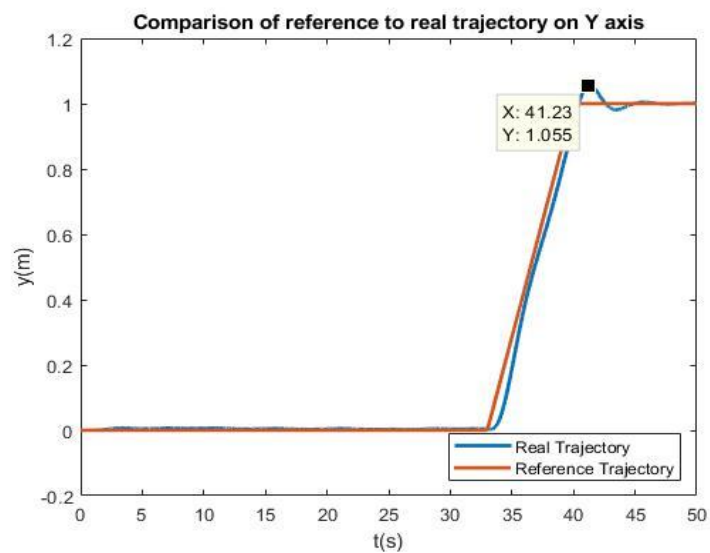
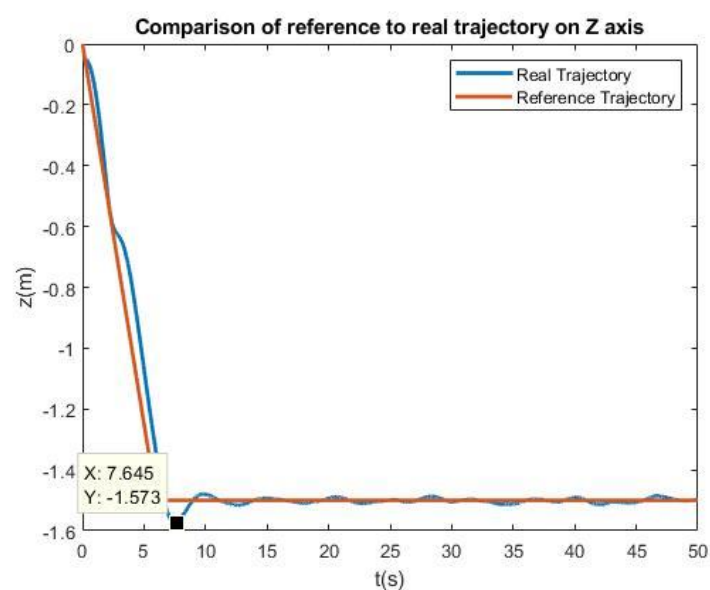
vi. Πτήση με φορτίο σε σύνθετη τροχιά

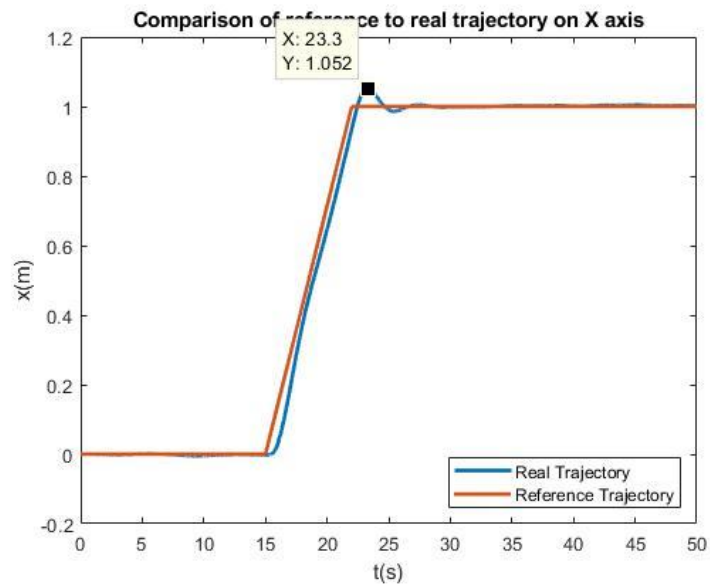
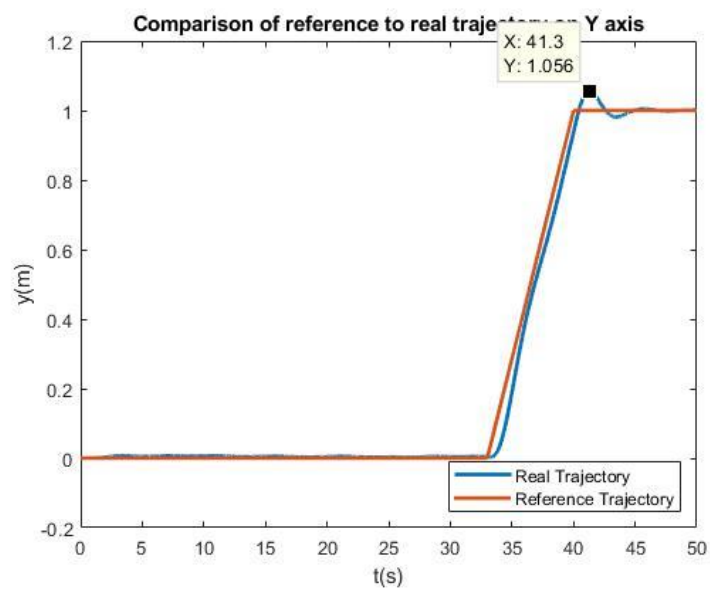
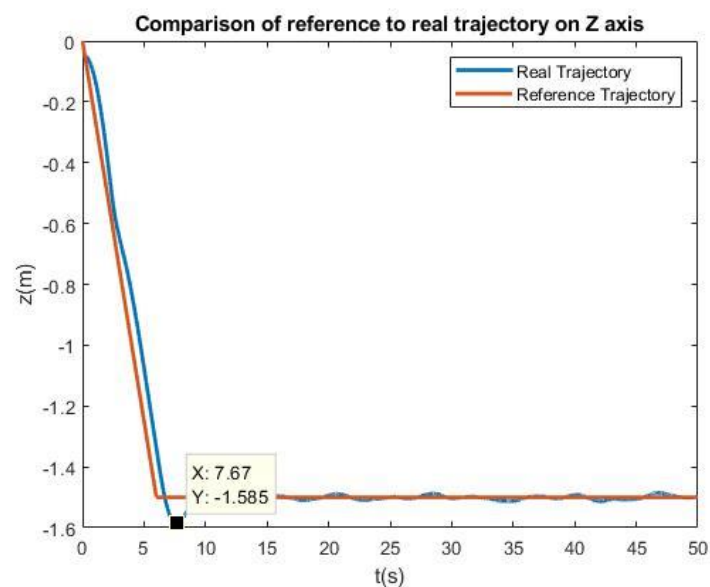
Φάνηκε, λοιπόν, ότι, χωρίς φορτίο, το Drone πετάει ομαλά και λειτουργεί ικανοποιητικά. Όμως, η άνευ φορτίου πτήσης, θα είναι ένα ποσοστό των πτήσεων. Στις υπόλοιπες, το Drone είναι φορτωμένο με τεμάχια διάφορων διαστάσεων και μαζών. Αυτό θα επιδρά και στη μάζα, αλλά και στη ροπή αδράνειας του Drone. Θα πρέπει λοιπόν να φανεί, εάν το σχέδιο του ελέγχου είναι αρκετά εύρωστο για να απορροφήσει αυτού του είδους τις αποκλίσεις. Για το λόγο αυτό, παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα απόκρισης με διάφορες μάζες και ροπές αδράνειας. Επιλέχθηκε να προσομοιωθεί μια σύνθετη τροχιά και στους τρεις άξονες, για μια πλήρη απεικόνιση της κατάστασης κάθε φορά.

Όπως παρατηρείται, οι αποκλίσεις στην απόκριση μεταξύ των περιπτώσεων δεν είναι πολλές. Η καθυστέρηση στην απόκριση είναι αντίστοιχη, ενώ η υπερακόντιση είναι λίγο μεγαλύτερη καθώς αυξάνεται το φορτίο και μεταβάλλεται η ροπή αδράνειας.

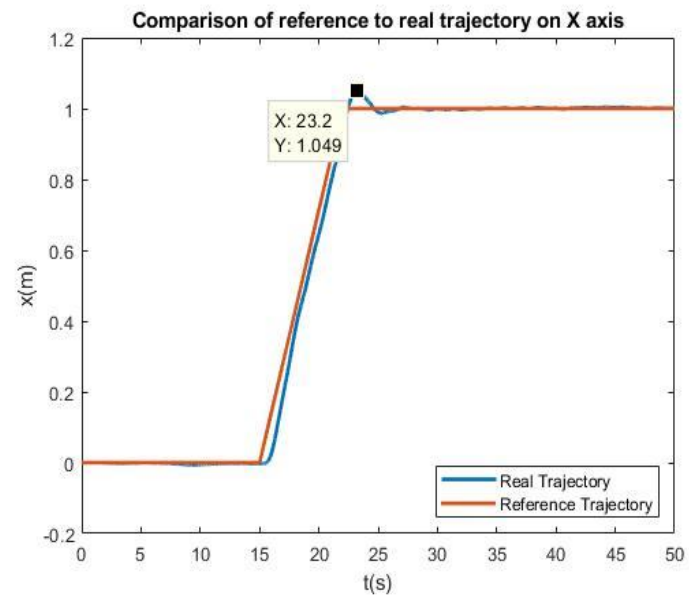
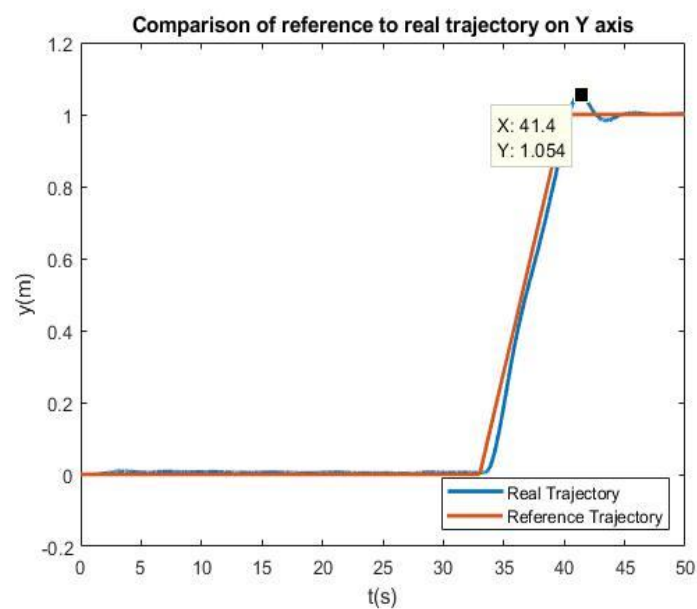
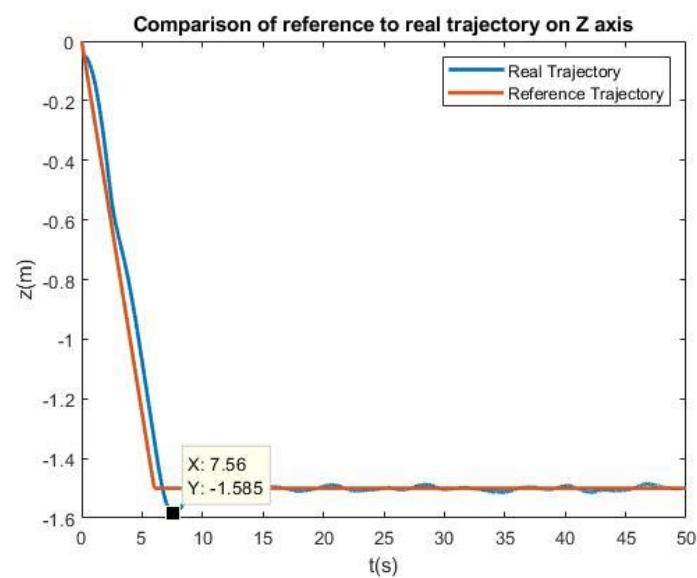
Θέλοντας να δοθεί μια συνολική αποτίμηση, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο σύστημα είναι ικανό να μεταφέρει φορτία βάρους ως 2kg, με ασφάλεια και αρκετά γρήγορα. Οι διαδρομές που εκτελούνται εν γένει, αφενός είναι προκαθορισμένες, αφετέρου δεν απαιτούν ιδιαίτερους ελιγμούς και μεγάλες ταχύτητες. Ο χρόνος πτήσης που έχει επιτευχθεί, είναι επαρκής για τις ανάγκες συστημάτων κατεργασιών σχετικά μικρών τεμαχίων.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια αρχική συζήτηση ως προς τη δυνατότητα εκτέλεσης πειραμάτων με ένα μικρότερο Drone, εφόσον το μοντέλο που αναπτύχθηκε, είναι αρκετά ικανό να προσομοιάσει τη γενική, πραγματική περίπτωση.

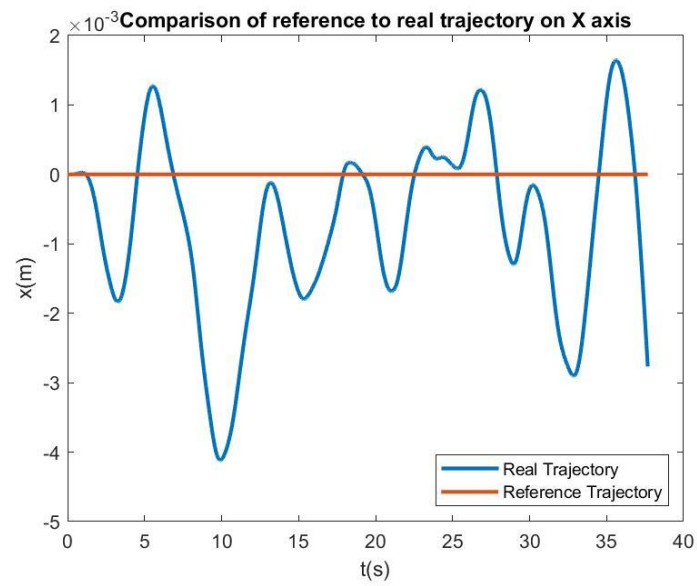
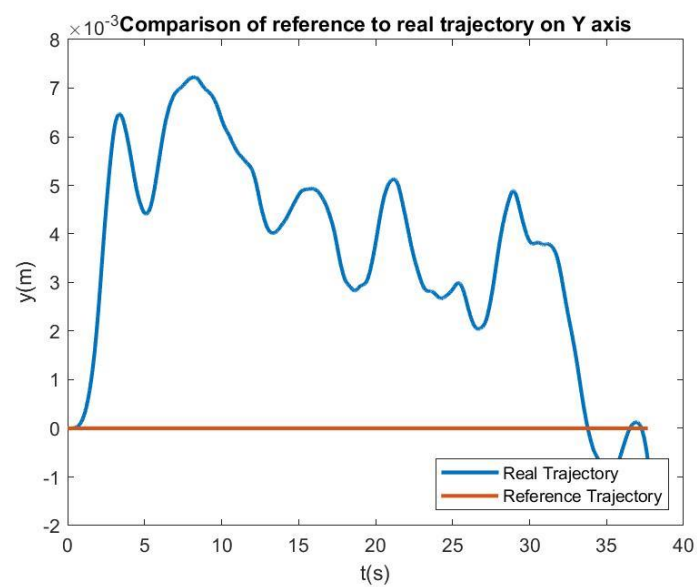
 α  β  γ Εικόνα 21: Φορτίο Βάρους 1kg ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).

 α  β  γ

Εικόνα 22: Πτήση με φορτίο βάρους 2kg ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).

 α  β  γ

Εικόνα 23: Φορτίο 2kg και αντίστοιχη ροπή αδράνειας ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).

 α  β  γ

Εικόνα 24: Απογείωση και προσγείωση με φορτίο ($\alpha \rightarrow$ Χάξονας, $\beta \rightarrow$ Υάξονας, $\gamma \rightarrow$ Ζάξονας).

4.3 Κλιμάκωση (Scalability)

Όπως αναφέρθηκε, η πειραματική διαδικασία αποτελεί, σε συνδυασμό και ως επέκταση της μοντελοποίησης, μια πολύ σημαντική πτυχή της μελέτης για την τελική κατασκευή κάποιου προϊόντος. Υπάρχουν δύο διαφορετικές αντιμετώπισεις στην περίπτωση της συγκεκριμένης κατασκευής. Από τη μία, επειδή το σκάφος που σχεδιάζεται είναι αρκετά μεγάλο και ακριβό, υπάρχει η δυνατότητα της εξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας με ένα μικρότερο εμπορικά διαθέσιμο Drone, που να είναι βιώσιμη λύση για τις δυνατότητες του εργαστηρίου. Η δεύτερη λύση είναι, εφόσον η μοντελοποίηση που έχει πραγματοποιηθεί είναι αντιπροσωπευτική της πραγματικότητας, και δεν έχουν γίνει σοβαρές απλοποιήσεις ή υποθέσεις, να κατασκευαστεί το πραγματικό Drone προς μελέτη, για την επίτευξη δοκιμών με πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στην πρώτη περίπτωση, θα πρέπει να διερευνηθεί, εάν τα αποτελέσματα που θα ληφθούν από την πειραματική διαδικασία θα είναι ικανά να περιγράψουν ικανοποιητικά την πραγματική κατάσταση. Τέτοιες μελέτες, γίνονται συχνά στον τομέα της αεροδυναμικής, ώστε να φανεί, εάν το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στην αεροδυναμική σήραγγα, θα αντιστοιχεί επαρκώς στην πραγματική κατασκευή (αυτό ορίζεται ως ομοιότητα-similitude).

Στην περίπτωση του Drone, θα πρέπει να μελετηθεί η επεκτασιμότητα των πειραμάτων, σε τρεις βασικούς τομείς: την αεροδυναμική, την κατασκευή και τον έλεγχο.

4.3.1 Αεροδυναμική Ομοιότητα

Η αεροδυναμική ομοιότητα έχει μελετηθεί πάρα πολύ, ήδη από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, με την ανάπτυξη της αεροπλοΐας. Για την εύρεση της ομοιότητας χρησιμοποιούνται κάποιοι αδιάστατοι αριθμοί, οι οποίοι περιγράφουν την αεροδυναμική, τόσο του μοντέλου, όσο και του πραγματικού οχήματος, σε μια κοινή κλίμακα. Αυτοί οι αριθμοί είναι βασικά ο αριθμός Mach και ο Reynolds. Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι θα μελετηθεί η ροή γύρω από τα πτερύγια του ρότορα και όχι γύρω από το σώμα του Drone. Οι ταχύτητες που αναπτύσσονται κατά την πτήση είναι πολύ μικρές σε σχέση με την περιστροφή του ρότορα, οπότε δεν έχει νόημα να μελετηθούν (αντίθετα, στα αεροσκάφη με σταθερά πτερύγια, η αεροδυναμική του σώματος παίζει μεγάλο ρόλο στην κίνηση του οχήματος).

Ο αριθμός Mach είναι ο λόγος της ταχύτητας του αντικειμένου προς την ταχύτητα μετάδοσης του ήχου στο μέσον στο οποίο κινείται το όχημα και στις αντίστοιχες περιβαλλοντικές συνθήκες. Στη δική μας περίπτωση, προφανώς έχουμε υποηχητικές ταχύτητες ($M < 1$) και μάλιστα έχουμε ασυμπίεστες ροές, τόσο στο πείραμα όσο και στο πραγματικό ($M < 0.3$), οπότε η σύγκρισή τους είναι δόκιμη.

Ο αριθμός Reynolds είναι μια αδιάστατη ποσότητα και ορίζεται ως ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις ιξώδους. Χαμηλοί Re, σημαίνει ότι οι δυνάμεις ιξώδους υπερτερούν των αδρανειακών, και έχουμε στρωτές ροές. Υψηλοί Re υπολογίζονται όταν υπερτερούν οι αδρανειακές δυνάμεις. Τότε η ροή ονομάζεται τυρβώδης και χαρακτηρίζεται από στροβιλισμούς και έντονες αστάθειες. Στην περίπτωση των Drones, γενικά υπολογίζονται χαμηλοί Re (10^4 - 10^5) οπότε, επικρατούν αρχικά στρωτές ροές. Ωστόσο, πουθενά στη φύση δεν υπάρχουν πλήρως στρωτές ροές. Κάποια στιγμή, θα δημιουργηθεί μια δίνη, η οποία, αν είναι κοντά στα πτερύγια, μπορεί να επηρεάσει την κίνησή τους. Γίνεται προσπάθεια λοιπόν, το μοντέλο και η κανονική κατασκευή, να έχουν ίσους αριθμούς Re. Αυτό, είναι αδύνατον στην περίπτωση των Drone, αλλά πειραματικά φάνηκε, ότι επίπεδα πτερύγια (μικρή γωνία Camber) δεν επηρεάζονται πολύ από τον αριθμό Re [42]. Επομένως, προτείνεται η χρήση επίπεδων πτερυγίων κυρίως για τα πειράματα, όπου ο αριθμός Re είναι πολύ μικρός, η αποκόλληση της ροής γίνεται στην άκρη του πτερυγίου και αυτό μπορεί να επηρεάσει τα υπόλοιπα πτερύγια.

Παρακάτω φαίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των δύο Drone που συγκρίνονται. Το ένα είναι το Drone προς μελέτη, ενώ για σύγκριση επιλέχθηκε το Mambo της Parrot. Πρόκειται για το μικρότερο από τα Drone που υποστηρίζονται από το προαναφερθέν μοντέλο της Matlab, επομένως είναι και η ακραία περίπτωση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και οι υπολογισμοί των αδιάστατων αριθμών. Υπολογίστηκε και ο αριθμός Lock, ο οποίος είναι ο λόγος των αεροδυναμικών δυνάμεων προς τις δυνάμεις αδράνειας, χαρακτηρίζει την ελαστικότητα του πτερυγίου και δείχνει εάν υπάρχει flapping. Στην περίπτωση μας βγήκαν πάρα πολύ μικροί, οπότε δεν έχουν πολύ νόημα [43],[44].

Πίνακας 5: Μεγέθη προς χρήση για τον υπολογισμό των αδιάστατων αεροδυναμικών αριθμών.

	Mambo Mini Drone	Drone από e_calc
Βάρος W(kg)	0.1	6
Μάζα πτερυγίων m(kg)	0.012	0.021
Ακτίνα πτερυγίων R(m)	0.035	0.127
Πυκνότητα αέρα ρ(kg/m ³)	1.204	1.204
Κινηματικό ιξώδες ν(m ² /s)	1.5111·10 ⁻⁵	1.5111·10 ⁻⁵
Ταχύτητα περιστροφής Ω(rpm) σε Hover	15000	11244
Μήκος χορδής c(m)	0.089	0.025

Αριθμός Mach

$$u_{h,mambo} = 2 \sqrt{\frac{Wg}{2\rho\pi R^2}} = 20.75 \text{ m/s} \quad (9)$$

$$M_{mambo} = \frac{u_h}{u_{\eta\chi\omicron\nu}} = \frac{20.75}{343} = 0.06049 \quad (10)$$

$$u_{h,e_calc} = 2 \sqrt{\frac{Wg}{2\rho\pi R^2}} = 22.1 \text{ m/s} \quad (11)$$

$$M_{e_calc} = \frac{u_h}{u_{\eta\chi\omicron\nu}} = \frac{22.1}{343} = 0.06453 \quad (12)$$

Αριθμός Reynolds

$$Re_{mambo} = \frac{\Omega Rc}{\nu} = 14890 \quad (13)$$

$$Re_{e_calc} = \frac{\Omega Rc}{\nu} = 140184 \quad (14)$$

Αριθμός Lock

$$\gamma_{mambo} = \frac{\rho A c R^4}{I_b} = \frac{\rho A c R^4}{\frac{1}{12} m (D^2 + c^2 + 12 R^2)} = 8.57 \cdot 10^{-6} \quad (15)$$

$$\gamma_{e_calc} = \frac{\rho A c R^4}{I_b} = \frac{\rho A c R^4}{\frac{1}{12} m (D^2 + c^2 + 12 R^2)} = 0.012 \quad (16)$$

4.3.2 Δομική Ομοιότητα

Όπως είναι γνωστό, αυξάνοντας το μήκος ενός τετραγώνου n φορές, αυξάνεται το εμβαδόν του n^2 φορές και ο όγκος του αντίστοιχου κύβου, άρα και το βάρος του, n^3 φορές. Ο όγκος και το βάρος έχουν πολύ μεγάλη σημασία προφανώς στη μελέτη αντοχής, αφού χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι τάσεις στην κατασκευή και με βάση ορισμένα κριτήρια, να αποφανθεί αν η κατασκευή θα αντέξει ή όχι. Εφόσον, τόσο το πειραματικό Drone όσο και αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία, αντέχουν τις δυνάμεις που τους ασκούνται, δεν θα υπάρχει κάποιο πρόβλημα με τη δομική ομοιότητα.

Στην μηχανική αντοχή και το μέγεθος όμως, υπάρχει και ο παράγοντας της τυχαιότητας. Τα περισσότερα κριτήρια αντοχής της κλασικής μηχανικής έχουν κατασκευαστεί θεωρώντας τέλεια μικροδομή των υλικών. Όσο μεγαλύτερη είναι μια κατασκευή ωστόσο, τόσο περισσότερες πιθανότητες υπάρχουν να εμφανιστούν αστοχίες, πχ μικρορωγμές που μπορεί να εξελιχθούν σε μη επιτρεπτά όρια. Τέτοιοι παράγοντες βέβαια δεν μπορούν να προβλεφθούν.

4.3.3 Ομοιότητα στον έλεγχο

Όσον αφορά τον έλεγχο, η πιθανότητα των αποτελεσμάτων των πειραμάτων να αντιστοιχούν στην πραγματική περίπτωση, βασίζεται κυρίως στους αισθητήρες, στους κινητήρες και στην επεξεργαστική ισχύ του υπολογιστή. Εφόσον χρησιμοποιηθούν αισθητήρες και κινητήρες με αντίστοιχη ακρίβεια και διακριτική ικανότητα (στους κινητήρες αναφέρομαι στο πόσο αλλάζουν τα rpm, για την ίδια μεταβολή στο ρεύμα) καθώς και υπολογιστής που θα μπορεί να λαμβάνει τις μετρήσεις των αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο χωρίς καθυστερήσεις, να κάνει την απαραίτητη επεξεργασία και να δίνει τις κατάλληλες εντολές, τότε δεν θα υπάρχει πρόβλημα. Συγκεκριμένα στο σύστημα ελέγχου, θα πρέπει να δοθούν οι σωστές τιμές μάζας, αδράνειας και οι σωστές διαστάσεις, όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στο μεγάλο Drone και να ξαναυπολογιστούν τα κέρδη. Αν γίνει αυτό, τότε θα υπάρχει πλήρης αντιστοιχία στις δύο διατάξεις.

4.3.4 Αριθμητική Επεκτασιμότητα

Συγκεκριμένα στην περίπτωση των MAVs υπάρχει και άλλο ένα τμήμα του scalability, το οποίο είναι ο αριθμός των Drones που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχει απαίτηση χρήσης στόλου μικρών Drones, ικανών να ελιχθούν σε στενές περιοχές και να πραγματοποιήσουν διάφορες δράσεις. Αυτό μπορεί να έχει εφαρμογές και στην βιομηχανία, θα πρέπει όμως να μπορεί το σύστημα ελέγχου, χαρτογράφησης και εντοπισμού να υποστηρίξει ποικίλο αριθμό οχημάτων. Αυτό εξαρτάται κυρίως από το σύστημα επικοινωνίας του κεντρικού υπολογιστή με τα Drones, την επεξεργαστική ισχύ του υπολογιστή και το σύστημα χαρτογράφησης και εντοπισμού. Η ύπαρξη πολλών οχημάτων σε κλειστό χώρο, μπορεί να προκαλέσει ακόμα διαταράξεις που οφείλονται σε στροβιλισμούς της ροής από τους πολλούς ρότορες. Όλα αυτά πρέπει να προβλεφθούν στη μελέτη σμήνους [45].

Κεφάλαιο 5: Πρόσδεση-απόσπαση τεμαχίων

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται ο τρόπος με τον οποίο το Drone θα χειρίζεται τα υλικά. Από τον προσδιορισμό του προβλήματος, είναι γνωστό πως τα τεμάχια θα κατεργάζονται και θα τοποθετούνται είτε από βραχίονες ή από ανθρώπους, σε συγκεκριμένα σημεία, των οποίων το Drone θα γνωρίζει τη θέση με ικανοποιητική ακρίβεια. Επομένως, αυτό που απαιτείται είναι ο μηχανισμός παραλαβής των αντικειμένων.

5.1 1^η Επιλογή: Ενσωμάτωση συστήματος On-Board

Σε αυτήν την περίπτωση, η πιο συχνή τεχνολογία που χρησιμοποιείται, όπως φαίνεται και στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, είναι οι αρπάγες. Ανάλογα με τις κινήσεις που απαιτούνται για την επίτευξη της πρόσδεσης του τεμαχίου προς μεταφορά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλές αρπάγες με 1 ή 2 βαθμούς ελευθερίας και με 3 ή 4 «δάχτυλα» ή και πιο σύνθετες κατασκευές, όπως βραχίονες πολλών βαθμών ελευθερίας. Στην εφαρμογή που εξετάζεται, το Drone θα έχει το χώρο να ίπταται ακριβώς πάνω από το τεμάχιο, οπότε μια απλή αρπάγη ενός βαθμού ελευθερίας θα ήταν αρκετή, ενώ τα βάρη δεν είναι μεγάλα, για να απαιτούν σύνθετες συγκρατήσεις.

Για τη σωστή συγκράτηση τεμαχίων πολλών μεγεθών και βαρών, θα μπορούσε να γίνει χρήση αισθητήρων δύναμης, και συγκεκριμένα αισθητήρων FSR (Force Sensitive Resistors). Πρόκειται για αισθητήρες σε μορφή φύλλων, των οποίων η αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με την πίεση που ασκείται πάνω τους [46]. Γνωρίζοντας λοιπόν το εμβαδόν άσκησης δύναμης, καθώς και τη χαρακτηριστική καμπύλη των αισθητήρων (Resistance-Pressure), μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η δρώσα δύναμη. Βάζοντας έναν τέτοιο αισθητήρα στα δάχτυλα της αρπάγης, θα μπορούσε να τερματίζεται η διαδικασία πρόσδεσης, όταν η δύναμη ισούται με 20N προς τον συντελεστή τριβής μεταξύ τεμαχίου με αρπάγη (χάλυβας με χάλυβα $f_{\text{steel}} \approx 0.42$).

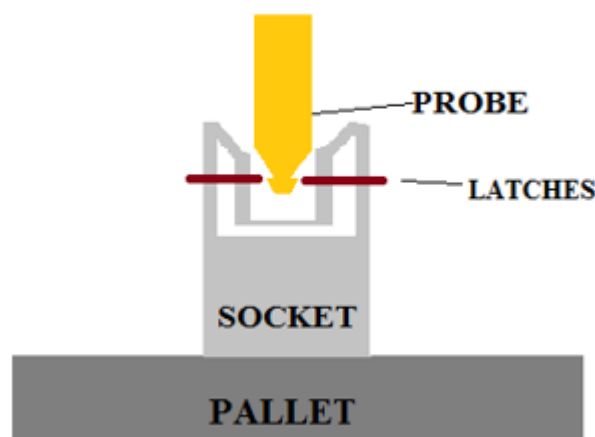
Αν και η λύση αυτή είναι εφικτή έχει βασικά προβλήματα. Το πρώτο είναι το επιπλέον μόνιμο βάρος της αρπάγης. Οι εμπορικά διαθέσιμες αρπάγες με προδιαγραφές συγκράτησης ως δύο κιλά, ζυγίζουν περίπου ένα κιλό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση του ενεργού φορτίου του Drone κατά ένα μεγάλο ποσοστό (περίπου 35%). Ακόμα ένα πρόβλημα είναι η ποικιλομορφία των κατεργαζόμενων τεμαχίων. Στρογγυλά, με πολλές γωνίες ή μεγάλα τεμάχια, θα είναι δύσκολο να μεταφερθούν από το Drone. Η μόνη λύση για αυτό, είναι η κατασκευή μιας πλατφόρμας, πάνω στην οποία θα δένονται όλα τα τεμάχια. Κάτι τέτοιο όμως, θα μείωνε ακόμα περισσότερο το εφικτό φορτίο. Επομένως, η λύση της αρπάγης δεν είναι καλή.

Μια ακόμα επιλογή, θεωρώντας σίγουρη την ύπαρξη της πλατφόρμας, θα ήταν η χρήση ηλεκτρομαγνητών, ενσωματωμένων στο σώμα του Drone ή στην πλατφόρμα, ώστε, η πρόσδεση να γίνεται στέλνοντας ρεύμα στους ηλεκτρομαγνήτες, και η απόθεση κόβοντας την παροχή ρεύματος. Και αυτή είναι μια εφικτή λύση, ωστόσο το βασικό μειονέκτημά της είναι η κατανάλωση πολύτιμης ενέργειας της μπαταρίας, η οποία απαιτείται για την επίτευξη ικανοποιητικών χρόνων πτήσης.

5.2 2^η Επιλογή: Κατασκευή μηχανικής διάταξης

Θέλοντας να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα των προηγούμενων λύσεων, είναι φανερό πως πρέπει να σχεδιαστεί μια κατασκευή μικρού βάρους, οι απαιτήσεις της οποίας σε ρεύμα θα είναι ελάχιστες. Επιπλέον, θα πρέπει να προβλεφθούν οι τυχόν ταλαντώσεις και διαταραχές στην απόκριση του Drone, φαινόμενα που μπορεί να οδηγήσουν σε προσγειώσεις με μικρότερη ακρίβεια από την αναμενόμενη.

Για το σκοπό αυτό, προτείνεται να γίνει χρήση κυλινδρικού άξονα, ο οποίος θα κλειδώνει σε κωνικό άνοιγμα στην πλατφόρμα. Η ιδέα παρουσιάζεται στην Εικόνα 25, στην οποία φαίνεται το probe, που ενσωματώνεται στο Drone κατακόρυφα προς τα κάτω, και το socket, που είναι τμήμα της παλέτας, πάνω στην οποία προσδένεται το κομμάτι προς μεταφορά. Με στόχο να απλοποιηθεί ο σχεδιασμός και να επιτραπεί στο αεροσκάφος να επιτυγχάνει την πρόσδεση με ένα βαθμό ελευθερίας (να επιτρέπεται ουσιαστικά η πρόσδεση, με οποιοδήποτε προσανατολισμό γύρω από τον άξονα Z), οι διεπαφές σύνδεσης έχουν τον άξονα Z ως άξονα συμμετρίας. Επιπλέον, για μείωση της απαιτούμενης ενέργειας, η σύνδεση είναι κατά κάποιον τρόπο παθητική. Αυτό επιτυγχάνεται, διότι τα μάνδαλα που χρησιμοποιούνται έχουν δύο θέσεις ισορροπίας. Στη μία θέση (“ON”), τα μάνδαλα είναι πλήρως ανεπτυγμένα, με αποτέλεσμα να συγκρατούν τον άξονα του Drone στη θέση του. Στην άλλη θέση (“OFF”), τα μάνδαλα είναι αποσυρμένα, δεν υπάρχει σύνδεση, οπότε το Drone είναι ελεύθερο να κινηθεί στον κατακόρυφο άξονα.

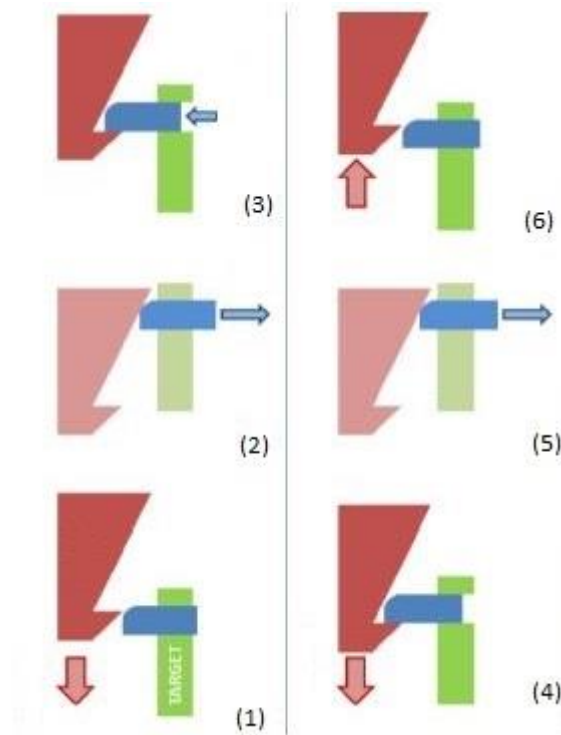


Εικόνα 25: Conceptual Design σύνδεσης παλέτας - Drone.

Παρατηρώντας την Εικόνα 26, φαίνεται ότι η διαδικασία της σύνδεσης και αυτή της αποσύνδεσης, αποτελούνται από 3 στάδια η κάθε μια. Στην αρχή, καθώς το Drone πλησιάζει κατακόρυφα προς την παλέτα, τα μάνδαλα είναι σε θέση OFF, ώστε να μπορεί η κεφαλή του Probe να περάσει ελεύθερα προς το Socket (Στάδιο 1). Στη συνέχεια, καθώς το Drone συνεχίζει να κατεβαίνει, το Probe σπρώχνει τα μάνδαλα προς τα μέσα με αποτέλεσμα αυτά να ελευθερώνονται από τη θέση ισορροπίας, και να ασκούν μια δύναμη προς το κέντρο του Socket, θέλοντας να μετακινηθούν προς τα εκεί (Στάδιο 2). Αφού λοιπόν συμβεί αυτό, το Drone, αρχίζει να σηκώνεται, τα μάνδαλα μετακινούνται προς τα μέσα κινούμενα από ένα συμπιεσμένο ελατήριο που βρίσκεται πακτωμένο στο πίσω μέρος του εξωτερικού κελύφους των μανδάλων, πάνε σε θέση ON, και έτσι δεν επιτρέπουν στο κωνικό κεφάλι του Probe, να βγει προς τα έξω, με αποτέλεσμα το Drone να σηκώνει την παλέτα (Στάδιο 3).

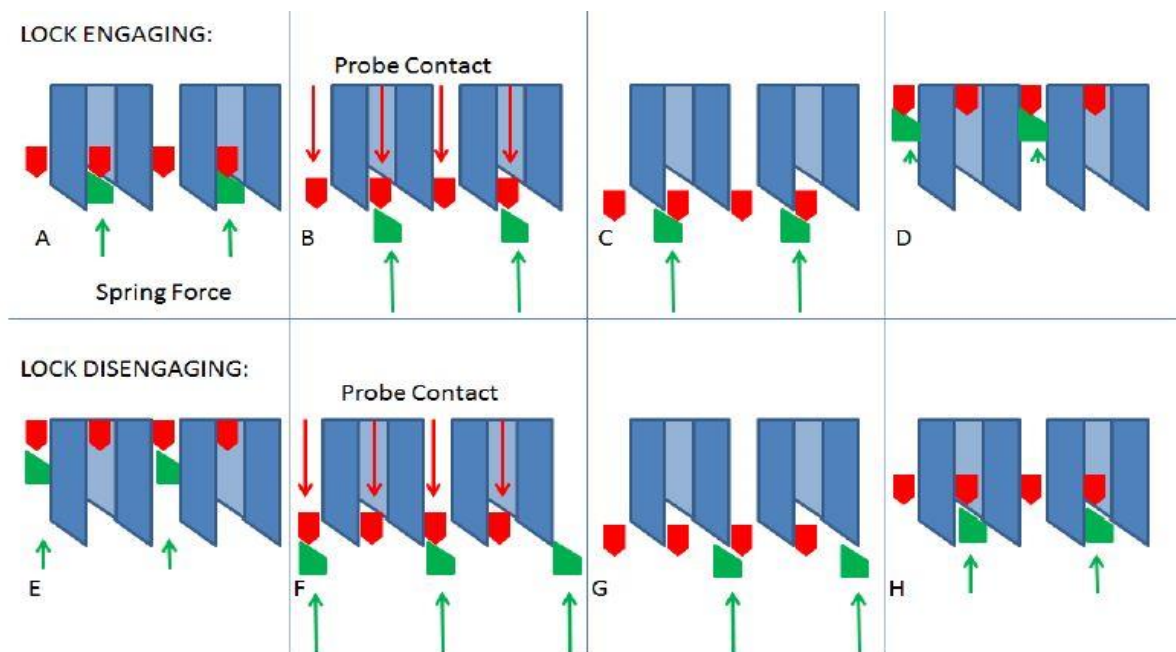
Κατά την εκφόρτωση, η διαδικασία είναι η αντίστροφη. Τα μάνδαλα αρχικά είναι σε θέση ON και σιγά σιγά το Drone κατεβαίνει προς τα κάτω (Στάδιο 4). Όταν φτάσει στη μέγιστη διάμετρο το

Drone, σπρώχνει τα μάνδαλα να φύγουν από τη θέση ισορροπίας ON, και να επιστρέψουν σε αυτή του OFF (Στάδιο 5). Ανεβαίνοντας και πάλι προς τα πάνω το Drone, ελευθερώνει τα μάνδαλα, τα οποία όμως αυτή τη φορά σταματάνε στη θέση OFF βάσει του κινηματικού μηχανισμού που περιγράφεται παρακάτω, επιτρέποντας το κεφάλι του Probe να μετακινηθεί ελεύθερα προς τα πάνω. Έτσι επιτυγχάνεται η αποσύνδεση από τη παλέτα και η εκφόρτωσή της στο επιθυμητό σημείο.



Εικόνα 26: Αρχή λειτουργίας σύνδεσης και αποσύνδεσης με παλέτα μεταφοράς τεμαχίων.

Αυτό που μένει να καθοριστεί, είναι αρχή λειτουργία των μανδάλων (latches), η οποία φαίνεται στην Εικόνα 27.

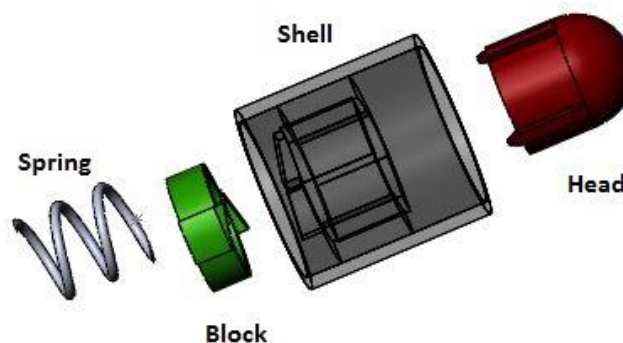


Εικόνα 27: Αρχή λειτουργίας σύνδεσης και αποσύνδεσης των μανδάλων.

Η αρχή λειτουργίας είναι αρκετά απλή, και προσομοιάζει με αυτήν του μηχανισμού των 'στυλό' με κουμπί. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 28, κάθε ένα από τα 4 μάνδαλα αποτελείται από 4 μέρη. Το ελατήριο, το οποίο χρησιμεύει στην επαναφορά στις δύο θέσεις ισορροπίας, το εξωτερικό κέλυφος, το οποίο εσωτερικά αποτελείται από ένα σύνολο ραβδώσεων, οι τέσσερις εκ των οποίων είναι πιο παχιές, καταλαμβάνουν γωνία 45° η κάθε μια, και βρίσκονται σε γωνία 90° μεταξύ τους (σκούρο μπλε στην Εικόνα 27). Ενδιάμεσα από αυτές, εναλλάσσονται ραβδώσεις μικρότερου πάχους (ανοιχτό μπλε) και κενά. Έπειτα, υπάρχει το Block, που αποτελείται από δύο δόντια σε 180° μεταξύ τους, τα οποία μπορούν να περάσουν μόνο από τα κενά του κελύφους, και το κεφάλι, το οποίο εφάπτεται στο Probe κατά την σύνδεση και την αποσύνδεση και το κυλινδρικό του μέρος αποτελείται εξωτερικά από τέσσερις ραβδώσεις, οποίες χωράνε και στα κενά, αλλά και στις ραβδώσεις μικρού πάχους του κελύφους.

Καθώς λυγόν το Probe σπρώχνει το κεφάλι του Latch, οι ραβδώσεις από το κεφάλι, σπρώχνουν τα δόντια του Block (Στάδια A και B), μέχρι αυτά να ξεπεράσουν παχιά ράβδωση του κελύφους (Στάδιο C). Στη συνέχεια, επειδή τα δόντια του Block χωράνε στα κενά του κελύφους, το Block σπρώχνεται από το ελατήριο και με τη σειρά του, σπρώχνει το κεφάλι προς τα έξω, θέτοντας το μάνδαλο σε θέση ON (Στάδιο D).

Αντίθετα, κατά την αποσύνδεση, καθώς το κεφάλι σπρώχνεται προς τα μέσα από το Probe, σπρώχνει και το Block (Στάδια E και F), μέχρι μια ανώτερη θέση, όπου το Block απελευθερώνεται από τις παχιές ραβδώσεις και αρχίζει να γλιστράει πάνω σε αυτές (Στάδιο G). Τελικά, το Block σταματάει, αφού τα δόντια του ακουμπήσουν τις λεπτές ραβδώσεις (Στάδιο H).



Εικόνα 28: Μέρη ενός Latch.

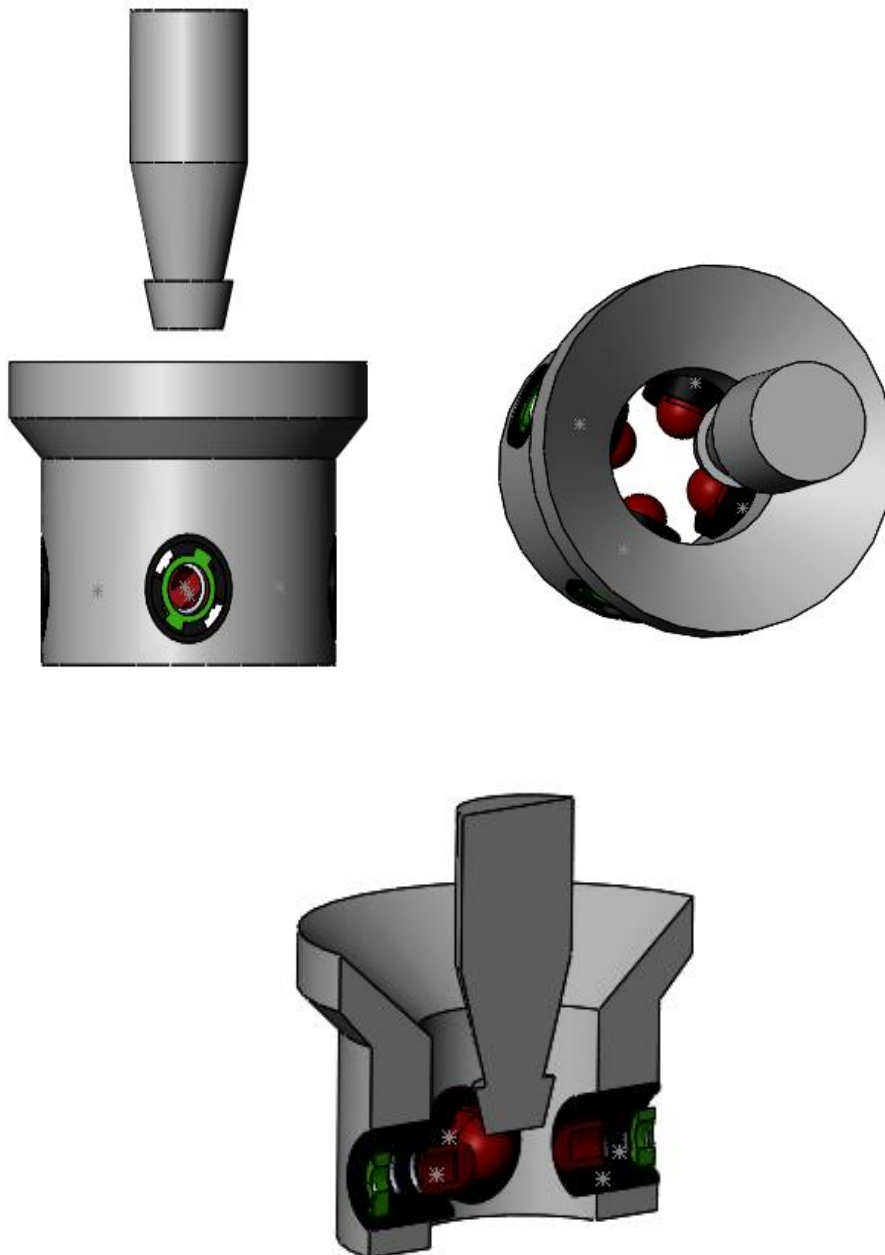
Θα πρέπει να αναφερθεί, ότι όπως βρέθηκε από την προσομοίωση, η ανοχή για την επίτευξη της σύνδεσης, η οποία θα καλύπτεται από το κωνικό κομμάτι, είναι 1cm. Η ανοχή αυτή μπορεί να διαφοροποιηθεί, ανάλογα με το αυτόματο σύστημα πλοήγησης που θα επιλεγεί προς χρήση, τους αισθητήρες και τους αλγορίθμους εύρεσης για *precision landing*. Για το λόγο αυτό, για την τελική εκλογή του μεγέθους των εξαρτημάτων της σύνδεσης, και τον τελικό λεπτομερή σχεδιασμό, θα ήταν καλύτερο, να ληφθούν πρώτα τα αποτελέσματα από εκτέλεση πειραμάτων πτήσης.

Όσον αφορά μια πρώτη εκτίμηση για τις δυνάμεις και το ελατήριο που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί, όπως είναι φανερό, αυτά εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες. Ακολουθώντας μια ενεργειακή προσέγγιση, θεωρώντας ότι όλη η κινητική ενέργεια του Drone αρχικά, μεταφέρεται στα μάνδαλα και ουσιαστικά στα ελατήρια για να συμπιεστεί, για τα τέσσερα μάνδαλα ισχύει:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(4K)\Delta\chi^2 \quad (17)$$

Όπου m η μάζα του Drone (kg), v η ταχύτητα στον κατακόρυφο άξονα (m/s), K η σταθερά ελατηρίου (N/m) και $\Delta\chi$ η μετατόπιση του ελατηρίου (m). Έχοντας αυτήν την πολύ απλή εξίσωση, φαίνεται πως όλα επίκεινται σε είναι κατασκευαστικές επιλογές. Έχοντας ήδη γνωστά το βάρος και την ταχύτητα του Drone κατά την προσγείωση, μπορεί να επιλεγθεί μία εκ των δύο άλλων παραμέτρων. Θεωρώντας, για τη συγκεκριμένη περίπτωση, μια μέγιστη μετατόπιση ελατηρίου ίση με 10^{-2} m, μπορεί να βρεθεί μια τιμή για τη σταθερά $K \approx 337.5$ N/m. Ελατήριο με ακριβώς αυτή τη σταθερά, δεν υπάρχει στο εμπόριο, αλλά μπορούν να βρεθούν πολύ εύκολα, ελατήρια με πολύ κοντινές τιμές.

Η συνολική κατασκευαστική ιδέα, παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 29: Conceptual Design για τη σύνδεση παλέτας - Drone.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

Το κεφάλαιο αυτό είναι αποτελεί μια σύνοψη όλης της δουλειάς, μια αποτίμηση της ερευνητικής διαδικασίας γενικά, και ειδικότερα αυτής της μελέτης, και παρουσιάζει μια σειρά από προτάσεις για τη βελτίωσή της.

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία, είχε ως στόχους τη μελέτη, κατασκευή, μοντελοποίηση και τελική προδιαγραφή ενός Drone ικανού να διαχειριστεί τις μεταφορές που απαιτούνται στα πλαίσια των διεργασιών σε σύγχρονα ευέλικτα συστήματα κατεργασιών.

Κάνοντας μια ανασκόπηση στη διαδικασία επιλογής υλικών για την κατασκευή του αεροσκάφους, φάνηκε ότι, λόγω της μεγάλης ζήτησης και εξέλιξης που έχουν δει τα τελευταία χρόνια οι τομείς της αεροναυτικής, της τεχνολογίας των ασύρματων κατασκευών και της αυτόματης πλοήγησης υπάρχει μια πληθώρα εξαρτημάτων. Πολλές εταιρείες ασχολούνται με τη σχεδίαση και παραγωγή έτοιμων Drones, αλλά και πολλά μαγαζιά ασχολούνται με την κατασκευή και διανομή αυτόνομων εξαρτημάτων. Παρά όμως τη μεγάλη αυτή εξέλιξη που έχει παρατηρηθεί, η επιλογή των κατάλληλων εξαρτημάτων, ιδιαίτερα για αεροσκάφη μεγάλων φορτίων, αποτελεί μια πολύ δύσκολη και περίπλοκη διαδικασία. Χωρίς την ύπαρξη ειδικών βάσεων δεδομένων όπως το eCalc, για το συσχετισμό των χαρακτηριστικών κάθε διαφορετικού εξαρτήματος, η επιλογή θα γινόταν κατά βάση εμπειρικά, ή θα απαιτούσε πολύ σχεδιασμό και διεξαγωγή πολλών, πιθανότατα αποτυχημένων, πειραμάτων, άρα και πολλά χρήματα. Παρόλα αυτά, ο συνδυασμός των εξαρτημάτων έγινε επιτυχώς, και απομένει η πειραματική επιβεβαίωση.

Αυτό που ξεκάθαρα φάνηκε κατά την αναζήτηση των εξαρτημάτων, είναι το που βρίσκονται τα μελανά σημεία στην τεχνολογία των Drones, και τα οποία δεν επιτρέπουν την περαιτέρω εξέλιξη και χρήση των Drones. Το βασικότερο από αυτά, ίσως και ένα από τα βασικά προβλήματα κάθε σύγχρονης τεχνολογίας, είναι η αποθήκευση και παραγωγή ενέργειας. Αν και έχουν γίνει προσπάθειες για να ενσωματωθούν και άλλες τεχνολογίες και είδη μετατροπών ενέργειας για την τροφοδότηση κατά την πτήση (Μηχανές Εσωτερικής Καύσης σε συνδυασμό με δεξαμενή βενζίνης ή άλλου καυσίμου, χρήση κυψελών υδρογόνου, εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας με ηλιακά πάνελ κ.τ.λ.), η λύση που κατά κόρον προτιμάται, είναι οι μπαταρίες, και κυρίως οι LiPo, λόγω μικρού μεγέθους και ασφάλειας. Ωστόσο, τα μειονεκτήματα των μπαταριών είναι τεράστια, με σημαντικότερο το βάρος τους και τη μικρή χωρητικότητά τους. Εάν δεν υπάρξει εξέλιξη στον τομέα αυτό, τότε και η τεχνολογία των Drones δεν θα μπορέσει να αναπτυχθεί. Συγχρόνως με το μικρό χρόνο πτήσης, υφίσταται και το πρόβλημα του μικρού ενεργού φορτίου, κυρίως επειδή μεγάλο τμήμα από το εν δυνάμει μεταφερόμενο βάρος, καταναλώνεται από την μπαταρία.

Ανάλογα, και το κομμάτι της μοντελοποίησης έχει απασχολήσει πολύ τους ερευνητές τα τελευταία χρόνια. Ιδιαίτερα ο τρόπος προσέγγισης των κινηματικών και δυναμικών εξισώσεων, αποτελεί ιδιαίτερα προβληματικό σημείο. Τα αεροδυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την πτήση των Quadrotors είναι πολλά και η προσέγγισή τους είναι πολύ περίπλοκη. Η προσέγγιση της πτήσης με ένα απλό γραμμικό μοντέλο, ακόμα και για Drones εσωτερικών χώρων, δεν αποτελεί συμβατή λύση. Υπάρχει απαίτηση για μελέτη με βάση μη γραμμικά μοντέλα, αλλά με κάποιες απλοποιήσεις. Φαινόμενα όπως το Ground Effect, η επιρροή των ροών αέρα από τις συνεργαζόμενες προπέλες κ.τ.λ., μπορούν να αποφευχθούν να μοντελοποιηθούν, εφόσον έχει προηγηθεί ένας σωστός σχεδιασμός του οχήματος αλλά και του τρόπου χρήσης. Όπως διαπιστώθηκε, ακόμα και ένα μεγάλο σε

μέγεθος και βάρος Drone, είναι ικανό να μοντελοποιηθεί και να προσομοιωθεί αποτελεσματικά χωρίς αυτά τα μεγέθη. Μάλιστα, όταν προστέθηκε και μια τυχαία διαταραχή, φάνηκε ότι η επιρροή της ήταν ελάχιστη.

Παρατηρώντας ενδελεχώς τα διαγράμματα απόκρισης, φάνηκε ότι η πτήση του Drone των διαστάσεων αυτών, είναι πολύ σταθερή και ακολουθεί πολύ ικανοποιητικά την προκαθορισμένη πορεία. Συγκεκριμένα, οι καθυστερήσεις που υπάρχουν στην απόκριση, αν και υπαρκτές, δεν είναι σημαντικές, αφού γίνεται λόγος για ένα μεγάλο, επί το πλείστον φορτωμένο, όχημα, το οποίο δεν απαιτείται να κινείται με μεγάλες ταχύτητες και να εκτελεί μανούβρες. Οποιαδήποτε εμπόδια, μπορεί εύκολα να τα αναγνωρίσει, να δοθεί η εντολή για το σταμάτημα, και να τα ξεπεράσει σε ικανό χρόνο και με αποτελεσματικότητα. Οι ταλαντώσεις και οι τυχόν αποκλίσεις από την αναφορά, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, για τα μεγέθη που μελετώνται και θεωρώντας γενικότερα τον τρόπο πτήσης των Drones. Και η προσομοίωση λοιπόν, θεωρήθηκε επιτυχής.

Το τμήμα που αφορά τις μεταφορές με Drones, διαπιστώθηκε πως δεν είναι τόσο ανεπτυγμένο. Η μικρή διάρκεια ζωής της μπαταρίας, σε συνδυασμό με το μικρές δυνατότητες για ανύψωση φορτίων, καθιστούν τα Drones συχνά, μια μη βιώσιμη λύση. Οι περισσότερες εφαρμογές στον τομέα αυτόν, αφορούν τη χρήση Grippers ή απλούστερων κατασκευών, για μεταφορά μικρών πακέτων. Ωστόσο κάτι τέτοιο, δεν είναι εφικτό για τη συγκεκριμένη κατάσταση που μελετάται εδώ. Για αυτό, η λύση που επιλέχθηκε βασίζεται περισσότερο σε εφαρμογές docking αυτόματων οχημάτων εδάφους, δορυφόρων κ.τ.λ. Με τον τρόπο αυτό, δεν προστίθεται μόνιμο βάρος στο Drone, ενώ η πρόσδεση γίνεται κατά βάση με μηχανικό τρόπο και αποφεύγονται επιπλέον ηλεκτρονικά στοιχεία που θα επιβάρυναν τη λειτουργία του μικροεπεξεργαστή του αεροσκάφους. Με τον τρόπο που επιλέχθηκε, αποφεύγεται επίσης και η ανάγκη για απόλυτη ακρίβεια προσγείωσης, αφού η ύπαρξη κωνικών διατομών επιτρέπει την επέκταση των οριοθετημένων προς προσγείωση περιοχών, που αν και όπως φάνηκε από τις προσομοιώσεις, οι αποκλίσεις από το προκαθορισμένο σημείο προσγείωσης είναι πολύ μικρές, θα ήταν συνετό να επιλεχθεί το ακριβές μέγεθος της κατασκευής αφού διεξαχθούν τα πειράματα με το πρωτότυπο Drone, για να είναι πιο σίγουρος ο σχεδιασμός.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί εν γένει για τη διαδικασία εκπόνησης της διπλωματικής, ότι αποτελεί ένα πολύ σημαντικό τμήμα των σπουδών, ιδιαίτερα στα τεχνολογικά τμήματα. Μέσα από τη διαδικασία αυτή, δίνεται η ευκαιρία στο σπουδαστή να ασχοληθεί με έναν τομέα που τον ενδιαφέρει σε μεγάλο βάθος, να αναπτύξει τις οργανωτικές του ικανότητες, να μάθει να δουλεύει πάνω σε ένα project πρακτικό, πέρα της θεωρίας και των βιβλίων και τελικά να κατανοήσει τις δυνατότητές του αλλά και τις απαιτήσεις στις μελλοντικές δουλειές του.

6.2 Μελλοντική εργασία

Η εργασία αυτή αποτελεί ένα πρώτο βήμα για την ενασχόληση του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ με τη μελέτη των Συστημάτων μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών, με απώτερο στόχο τη χρήση τους στη βιομηχανία. Τέθηκαν οι γνωσιακές βάσεις για την λειτουργία των συστημάτων αυτών και για τον τρόπο που μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά σε περιβάλλοντα κατεργασιών. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε ό,τι πραγματεύεται η διπλωματική αυτή να παρουσιάζεται με όσο δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Είναι όμως προφανές, ότι η παραπάνω μελέτη μπορεί και πρέπει να επεκταθεί προς διάφορες κατευθύνσεις.

Αρχικά, η διεξαγωγή πειραμάτων είναι η φυσική ροή, ώστε να θεωρηθεί η εργασία αυτή μια αξιόπιστη επιστημονική μελέτη. Για να είναι δυνατή η διεξαγωγή των πειραμάτων, απαραίτητη προϋπόθεση είναι είτε η αγορά ή η κατασκευή ενός Drone με αντίστοιχα χαρακτηριστικά με αυτό που

μελετήθηκε. Μια τέτοια αγορά, θα μπορούσε να αποδειχθεί κοστοβόρα αλλά ίσως και αδύνατη στο πλαίσιο των διατιθέμενων στο εμπόριο λύσεων, επομένως μια νέα Διπλωματική Εργασία με στόχο την κατασκευή και την πειραματική μελέτη ενός τέτοιου συστήματος θα αποτελούσε πολύ καλή λύση.

Όσον αφορά τα είδη εξαρτημάτων που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν, περαιτέρω έρευνα για την εύρεση φθηνότερων και καλύτερων επιλογών πάντοτε μπορεί να πραγματοποιηθεί. Μάλιστα, εφόσον με την πάροδο του χρόνου παράγονται νέοι κινητήρες με καλύτερη απόδοση, μπαταρίες με μικρότερο βάρος ανά μονάδα ισχύος, και γενικότερα αποτελεσματικότερα προϊόντα, αυτή η έρευνα κρίνεται απαραίτητη. Μια καλή ιδέα, θα ήταν και η προσπάθεια επιλογής εξαρτημάτων με διαφορετικούς τρόπους, όπως η χρήση εξισώσεων πτήσης και η κατασκευή μιας in house βάσεως δεδομένων για τα εξαρτήματα, για τη διασταύρωση των αποτελεσμάτων του eCalc. Επιπλέον, πολύ σημαντικό ρόλο για την καλή λειτουργία του Drone, έχει και η οργάνωση, σύνδεση και τοποθέτηση όλων των εξαρτημάτων πάνω στο κυρίως σώμα, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στις αξιόπιστες συνδέσεις καλωδίων, στη χρήση όσο το δυνατό μικρότερων καλωδίων για ελαχιστοποίηση βάρους και καλύτερη αεροδυναμική και στη γενική προσπάθεια για επίτευξη καλής αεροδυναμικής. Τέλος, σημαντικό είναι και ο σωστός προγραμματισμός των ηλεκτρονικών μερών, η σωστή βαθμονόμηση των αισθητήρων και η επιλογή κατάλληλων κερδών για τους ελεγκτές.

Προχωρώντας στην προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε, πολλές λεπτομέρειες που αφορούν την αεροδυναμική του αεροσκάφους (φαινόμενο ελαστικών πτερυγίων, ελαστικότητα κελύφους, μελέτη και διεξαγωγή πειραμάτων για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του συντελεστή οπισθέλκουσας κ.τ.λ.) και τη μοντελοποίηση των αισθητήρων, μπορούν να συμπεριληφθούν, ώστε η προσομοίωση να γίνει πληρέστερη.⁸ Επιπλέον, μπορούν να σχεδιαστούν και να προσομοιωθούν άλλοι ελεγκτές, για την ακόμα καλύτερη απόκριση του οχήματος (LQR ελεγκτές, Robust control κ.τ.λ.) και την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και των ταλαντώσεων. Ακόμη, τα αποτελέσματα μπορούν να αναπτυχθούν ακόμη περισσότερα, δοκιμάζοντας πιο πολύπλοκες τροχιές, εξάγοντας διαγράμματα για τις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις του Drone, για τις διαφορές στην περιστροφική ταχύτητα των κινητήρων σε κάθε διαφορετικό είδος κίνησης, για ακόμη μεγαλύτερα φορτία και ροπές αδράνειας κ.τ.λ.

Όσον αφορά την μεταφορά τεμαχίων, ο συγκεκριμένος σχεδιασμός αποτελεί μια πολύ καλή λύση, η οποία όμως βρίσκεται ακόμα στα αρχικά στάδια. Μετά από το Conceptual Design, που έχει πραγματοποιηθεί μέχρι τώρα, σειρά έχει ο λεπτομερής σχεδιασμός. Αφού πραγματοποιηθούν τα πειράματα πτήσεων, για να φανεί η ακρίβεια της κίνησης και της προσγείωσης, θα πρέπει να καθοριστούν τα μεγέθη όλων των επιμέρους εξαρτημάτων, να καθοριστούν οι ανοχές κατασκευής, να επιλεγθούν τα κατάλληλα ελατήρια, και τελικά να κατασκευαστεί η λύση, ώστε να πραγματοποιηθούν και με αυτήν πειράματα. Επιπλέον, νέοι σχεδιασμοί μπορούν να προταθούν για μείωση του επιπλέον βάρους που προστίθεται λόγω του μηχανισμού μεταφοράς.

Τέλος, στη συνέχεια της έρευνας, έμφαση θα πρέπει να δοθεί στον τρόπο με τον οποίο θα πραγματοποιείται η πλοήγηση του σκάφους στον εσωτερικό χώρο των εργοστασίων (Mapping και Localization). Ο τομέας της πλοήγησης, και συγκεκριμένα της δυνατότητας αυτόματης πλοήγησης των UAV's, αποτελεί σημείο έντονου ερευνητικού ενδιαφέροντος για πληθώρα επιστημόνων και μηχανικών. Αν και λοιπόν, στην παρούσα εργασία, η αυτόματη πλοήγηση θεωρήθηκε εν γένει δεδομένη, η ενασχόληση με τους αισθητήρες, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τους επεξεργαστές και την ανά-

⁸ Πρέπει να αναφερθεί ότι η μικρή βελτίωση που θα μπορούσε να επιτευχθεί με τέτοιες προσθήκες, δεν θεωρήθηκε ικανή να αντισταθμίσει τα προβλήματα που θα παρουσιάζονταν, όπως η απαίτηση για επιπλέον υπολογιστική ισχύ και η πολυπλοκότητα της προσομοίωσης, στο συγκεκριμένο στάδιο που βρίσκεται η έρευνα.

πτυξη ικανών αλγορίθμων για την πραγματοποίησή της, μπορεί να αποτελέσει βασικό αντικείμενο έρευνας στη συνέχεια. Με αυτόν τον τρόπο, η δομή του εργοστασίου δε θα είναι απαραίτητο να είναι γνωστή εκ των προτέρων, ενώ και η τροχιά θα μπορούσε να δίνεται και με άλλους τρόπους. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να δίνεται η τροχιά μέσω *Navigational Waypoints*, δηλαδή μέσω προκαθορισμένων σημείων στο χώρο, τα οποία θα επιλέγονται από τον ελεγκτή πτήσης κάθε φορά, και το όχημα θα πηγαίνει σε αυτά με προκαθορισμένη ταχύτητα και ελέγχοντας πάντα για εμπόδια.

Βιβλιογραφία

- [1] Floreano D, Wood RJ. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature* 2015;521:460–6.
- [2] Hassanalain M, Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Prog Aerosp Sci* 2017;91:99–131.
- [3] Βοσνιάκος Γ-Χ. Σημειώσεις μαθήματος Συστημάτα Κατεργασιών Ι 2015.
- [4] Koren Y, Heisel U, Jovane F, Moriwaki T, Pritschow G, Ulsoy G, et al. Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP Ann - Manuf Technol* 1999;48:527–40.
- [5] Fujii K, Higuchi K, Rekimoto J. Endless Flyer: A Continuous Flying Drone with Automatic Battery Replacement. 2013 IEEE 10th Int. Conf. Ubiquitous Intell. Comput. 2013 IEEE 10th Int. Conf. Auton. Trust. Comput., IEEE; 2013, p. 216–23.
- [6] Deja M, Siemiątkowski MS, Vosniakos G, Maltezos G. Opportunities and challenges for exploiting drones in agile manufacturing systems. *Procedia Manuf* 2020;00.
- [7] Καρτσакλή Ν. Ερευνητική Εργασία : « Εναέρια μη επανδρωμένα συστήματα λήψης εικόνων και τα προγράμματα φωτογραμμετρικής παραγωγής τους » 2018.
- [8] Šolc F. Modelling and control of a quadrocopter. *Adv Mil Technol* 2010;5:29–38.
- [9] Prabha ML, Thottungal R, Kaliappan S. Modeling and Simulation of X-Quadcopter Control 2016;8:303–10.
- [10] Wang J, Xin S, Zhang Y. Modeling and Control of a Quadrotor Vehicle Subject to Disturbance Load. *Proc Int Conf Artif Life Robot* 2017;22:350–5.
- [11] Ononiwu G, Onojo O, Ozioko O, Nosiri O. Quadcopter Design for Payload Delivery. *J Comput Commun* 2016;04:1–12.
- [12] Dief TN, Yoshida S. System identification for Quad-rotor parameters using neural network. *Evergreen* 2016;3:6–11.
- [13] Li J, Li Y. Dynamic analysis and PID control for a quadrotor. 2011 IEEE Int Conf Mechatronics Autom ICMA 2011 2011:573–8.
- [14] Das A, Lewis F, Subbarao K. Backstepping approach for controlling a quadrotor using lagrange form dynamics. *J Intell Robot Syst Theory Appl* 2009;56:127–51.
- [15] Silva MF, Ribeiro AC, Santos MF, Carmo MJ, Honório LM, Oliveira EJ, et al. Design of angular PID controllers for quadcopters built with low cost equipment. 2016 20th Int Conf Syst Theory, Control Comput ICSTCC 2016 - Jt Conf SINTES 20, SACCS 16, SIMSIS 20 - Proc 2016:216–21.
- [16] Khatoon S, Gupta D, Das LK. PID & LQR control for a quadrotor: Modeling and simulation. *Proc 2014 Int Conf Adv Comput Commun Informatics, ICACCI 2014* 2014:796–802.
- [17] FNU V, Cohen K. Autonomous Control of a Quadrotor UAV using Fuzzy Logic. *J Unmanned Syst Technol* 2014.
- [18] Besnard L, Shtessel YB, Landrum B. Quadrotor vehicle control via sliding mode controller driven by sliding mode disturbance observer. *J Franklin Inst* 2012;349:658–84.
- [19] Li Y, Scanavino M, Capello E, Dabbene F, Guglieri G, Vilardi A. A novel distributed architecture for UAV indoor navigation. *Transp Res Procedia* 2018;35:13–22.

- [20] Sani MF, Karimian G. Automatic navigation and landing of an indoor AR. Drone quadrotor using ArUco marker and inertial sensors. 1st Int Conf Comput Drone Appl Ethical Integr Comput Drone Technol Humanit Sustain IConDA 2017 2017;2018-Janua:102–7.
- [21] Hussein A, Al-Kaff A, De La Escalera A, Armingol JM. Autonomous indoor navigation of low-cost quadcopters. 10th IEEE Int Conf Serv Oper Logist Informatics, SOLI 2015 - Conjunction with ICT4ALL 2015 2015:133–8.
- [22] Mellinger D. Trajectory Generation and Control for Quadrotors. 2012.
- [23] Varadaramanujan S, Sreenivasa S, Pasupathy P, Calastawad S, Morris M, Tosunoglu S. Design of a drone with a robotic end-effector. 30th Florida Conf Recent Adv Robot 2017.
- [24] Kumar R, Mehta U, Chand P. A Low Cost Linear Force Feedback Control System for a Two-fingered Parallel Configuration Gripper. Procedia Comput Sci 2017;105:264–9.
- [25] Dzitac P. A method to control grip force and slippage for robotic object grasping and manipulation. J Soc Instrum Control Eng 1990;29:206–12.
- [26] Fanni M, Khalifa A. A new 6-DOF quadrotor manipulation system: Design, kinematics, dynamics, and control. IEEE/ASME Trans Mechatronics 2017;22:1315–26.
- [27] Kim S, Choi S, Kim HJ. Aerial manipulation using a quadrotor with a two DOF robotic arm. IEEE Int Conf Intell Robot Syst 2013:4990–5.
- [28] Wopereis HW, Hoekstra JJ, Post TH, Folkertsma GA, Stramigioli S, Fumagalli M. Application of substantial and sustained force to vertical surfaces using a quadrotor. Proc - IEEE Int Conf Robot Autom 2017:2704–9.
- [29] Gabrich B, Saldana D, Kumar V, Yim M. A Flying Gripper Based on Cuboid Modular Robots. Proc - IEEE Int Conf Robot Autom 2018:7024–30.
- [30] Fernando HCTE, De Silva ATA, De Zoysa MDC, Dilshan KADC, Munasinghe SR. Modelling, simulation and implementation of a quadrotor UAV. 2013 IEEE 8th Int Conf Ind Inf Syst ICIIS 2013 - Conf Proc 2013:207–12.
- [31] Pupaza C. Stamate , M . A ., Nicolescu , Fl . A ., Pupaza , C ., Mathematical Model of a Multi-Rotor Drone Prototype and Calculation Algorithm for Motor Selection , Proceedings in Manufacturing Systems ... MATHEMATICAL MODEL OF A MULTI-ROTOR DRONE PROTOTYPE AND 2018.
- [32] Parihar P, Bhawsar P, Hargod P. Design & Development Analysis of Quadcopter. Int J Adv Comput Technol 2016;5:2128–33.
- [33] Τσομπάνης ΧΑ. Οδήγηση ηλεκτρικού brushless DC κινητήρα και μετατροπή του 2017.
- [34] Ma Y, Chiang SW, Chu X, Li J, Gan L, Xu C, et al. Thermal design and optimization of lithium ion batteries for unmanned aerial vehicles. Energy Storage 2019;1:e48.
- [35] Al-zoghy OJ, Khalil OI, Monir A. Design and Manufacturing of Quadcopter 2019.
- [36] Kuantama E, Craciun D, Tarca R. QUADCOPTER BODY FRAME MODEL AND ANALYSIS. Ann Univ ORADEA Fascicle Manag Technol Eng 2016;120:71–4.
- [37] Zlatanov N. Multicopter Aircraft Dynamics , Simulation and Control 2016.
- [38] López E, García S, Barea R, Bergasa LM, Molinos EJ, Arroyo R, et al. A multi-sensorial simultaneous localization and mapping (SLAM) system for low-cost micro aerial vehicles in GPS-denied environments. Sensors (Switzerland) 2017;17.

- [39] Chovancová A, Fico T, Chovanec E, Hubinský P. Mathematical modelling and parameter identification of quadrotor (a survey). *Procedia Eng* 2014;96:172–81.
- [40] Shahid F, Kadri MB, Jumani NA, Pirwani Z, Pakistan PK. Dynamical Modeling and Control of Quadrotor. *Trans Mach Des* 2016;4:50–63.
- [41] Sanchez-Cuevas P, Heredia G, Ollero A. Characterization of the aerodynamic ground effect and its influence in multirotor control. *Int J Aerosp Eng* 2017;2017.
- [42] Winslow J, Otsuka H, Govindarajan B, Chopra I. Basic understanding of airfoil characteristics at low Reynolds numbers (104–105). *J Aircr* 2018;55:1050–61.
- [43] Bangura M, Melega M, Naldi R, Mahony R. *Aerodynamics of Rotor Blades for Quadrotors* 2016.
- [44] Singleton JD, Yeager WT. Important scaling parameters for testing model-scale helicopter rotors. *20th AIAA Adv Meas Gr Test Technol Conf* 1998;37.
- [45] Tiemann J, Wietfeld C. Scalable and precise multi-UAV indoor navigation using TDOA-based UWB localization. *2017 Int Conf Indoor Position Indoor Navig IPIN 2017* 2017;2017-Janua:1–7.
- [46] Sadun AS, Jalani J, Abdul Sukor J, Jamil F. Force control for a 3-Finger Adaptive Robot Gripper by using PID controller. *2016 2nd IEEE Int Symp Robot Manuf Autom ROMA 2016* 2017.

Παράρτημα Α

Στο παράρτημα αυτό, παρουσιάζονται τμήματα κώδικα για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του αεροσκάφους, του ελεγκτή και του παρατηρητή, για την εξαγωγή των διαγραμμάτων των αποτελεσμάτων.

Script 1: Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά αεροσκάφους.

```
%% Vehicle Nonlinear Variables
% 6DOF
Vehicle.SixDOF.initGreenwich = 0;
Vehicle.SixDOF.quatGain = 1;
% Position on Earth
Vehicle.PositionOnEarth.href = -init.posLLA(3);
Vehicle.PositionOnEarth.FlatEarthToLLA.xAxis = 0;
%% Physical properties
% Airframe
switch (model)
    case 'Mambo'
        %Vehicle.Airframe.mass = 0.063;
        Vehicle.Airframe.mass = 7.893;
        %Vehicle.Airframe.inertia = diag([0.0000582857 0.0000716914 0.0001]);
        Vehicle.Airframe.inertia = diag([0.17265001194 0.197880936 0.368868474]);
    case 'RollingSpider'
        Vehicle.Airframe.mass = 0.068;
        Vehicle.Airframe.inertia = diag([0.0686e-3 0.092e-3 0.1366e-3]);
end
%Vehicle.Airframe.d = 0.0624;
Vehicle.Airframe.d = 0.7;
Vehicle.Airframe.xy = Vehicle.Airframe.d*sqrt(2)/2; % For diamond rotor set-up
%Vehicle.Airframe.h = -0.015876;
Vehicle.Airframe.h = -0.04;
Vehicle.Airframe.Cdx = 0;
Vehicle.Airframe.Cdy = 0;
%Vehicle.Airframe.diameter = .01; % For drag calculation purposes
Vehicle.Airframe.diameter = .02; % For drag calculation purposes
% Rotor
Vehicle.Rotor.blades = 2;
%Vehicle.Rotor.radius = 0.033;
Vehicle.Rotor.radius = 0.254/2;
%Vehicle.Rotor.chord = .008;
Vehicle.Rotor.chord = .089;
Vehicle.Rotor.flappingOffset = 0;
%Vehicle.Rotor.bladeMass = 3.75e-04;
Vehicle.Rotor.bladeMass = 1.00e-02;
Vehicle.Rotor.bladeInertia = Vehicle.Rotor.bladeMass*Vehicle.Rotor.radius^2/4;
Vehicle.Rotor.hubMass = 0;
```



```

Vehicle.Rotor.hubInertia = 0;
Vehicle.Rotor.inertia = Vehicle.Rotor.hubInertia + Vehicle.Rotor.bladeInertia;
%Vehicle.Rotor.Ct = .0107;
Vehicle.Rotor.Ct = 0.000106;
Vehicle.Rotor.Cq = Vehicle.Rotor.Ct*sqrt(Vehicle.Rotor.Ct/2);
Vehicle.Rotor.solidity = Vehicle.Rotor.chord*Vehicle.Rotor.blades/(pi*Vehicle.Rotor.radius);
Vehicle.Rotor.theta0 = 14.6*(pi/180);
Vehicle.Rotor.thetaTip = 6.8*(pi/180);
Vehicle.Rotor.theta1 = Vehicle.Rotor.thetaTip-Vehicle.Rotor.theta0;
Vehicle.Rotor.theta34 = Vehicle.Rotor.theta0+0.75*Vehicle.Rotor.theta1;
Vehicle.Rotor.a = 5.5; % Lift slope
Vehicle.Rotor.area = pi*Vehicle.Rotor.radius^2;
Vehicle.Rotor.lock = rho*Vehicle.Rotor.a*Vehicle.Rotor.chord*Vehicle.Rotor.radius^4/...
    (Vehicle.Rotor.hubInertia+Vehicle.Rotor.bladeInertia);
Vehicle.Rotor.b = Vehicle.Rotor.Ct*rho*Vehicle.Rotor.area*Vehicle.Rotor.radius^2;
Vehicle.Rotor.k = Vehicle.Rotor.Cq*rho*Vehicle.Rotor.area*Vehicle.Rotor.radius^3;
Vehicle.Rotor.w2ToThrustGain = Vehicle.Rotor.Ct*rho*Vehicle.Rotor.area*Vehicle.Rotor.radius^2;
% Motors
Vehicle.Motor.maxLimit = 500;
Vehicle.Motor.minLimit = 0;
%Vehicle.Motor.commandToW2Gain = 13840.8; %motor command for Rolling Spider (0-500)
to motorspeed^2
Vehicle.Motor.commandToW2Gain = 1438000.8; %motor command for Rolling Spider (0-
500) to motorspeed^2
Vehicle.Motor.thrustToMotorCommand =
1/(Vehicle.Rotor.w2ToThrustGain*Vehicle.Motor.commandToW2Gain);

```

Script 2: Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων με τη μορφή διαγραμμάτων.

```

%% Plot 1: Response on the vertical Z axis
figure(1)
plot(Zaxis, 'LineWidth',2)
hold on
plot(Zaxis_ref, 'LineWidth',2)
title('Comparison of reference to real trajectory on Z axis')
xlabel('t(s)')
ylabel('z(m)')
legend({'Real Trajectory','Reference Trajectory'},'Location','northeast')
%% Plot 2: Response on the horizontal X axis
figure(2)
plot(Xaxis, 'LineWidth',2)
hold on
plot(Xaxis_ref, 'LineWidth',2)

```

```

title('Comparison of reference to real trajectory on X axis')
xlabel('t(s)')
ylabel('x(m)')
legend({'Real Trajectory','Reference Trajectory'},'Location','southeast')
%% Plot 3: Response on the horizontal Y axis
figure(3)
plot(Yaxis, 'LineWidth',2)
hold on
plot(Yaxis_ref, 'LineWidth',2)
title('Comparison of reference to real trajectory on Y axis')
xlabel('t(s)')
ylabel('y(m)')
legend({'Real Trajectory','Reference Trajectory'},'Location','southeast')

```

Script 3: Flight Controller Variables.

```

% Control Mixer
%Ts2Q transforms thrust [Nm] for motors 1 through 4 to u_mechanical
=[totalThrust;Torqueyaw;pitch;roll]
Controller.Ts2Q = ...
    [1 1 1 1;
     Vehicle.Rotor.Cq/Vehicle.Rotor.Ct*Vehicle.Rotor.radius ....
     -Vehicle.Rotor.Cq/Vehicle.Rotor.Ct*Vehicle.Rotor.radius ...
     Vehicle.Rotor.Cq/Vehicle.Rotor.Ct*Vehicle.Rotor.radius ...
     -Vehicle.Rotor.Cq/Vehicle.Rotor.Ct*Vehicle.Rotor.radius;
     -Vehicle.Airframe.d*sqrt(2)/2 ...
     -Vehicle.Airframe.d*sqrt(2)/2 ...
     Vehicle.Airframe.d*sqrt(2)/2 Vehicle.Airframe.d*sqrt(2)/2;
     -Vehicle.Airframe.d*sqrt(2)/2 ...
     Vehicle.Airframe.d*sqrt(2)/2 ...
     Vehicle.Airframe.d*sqrt(2)/2 -Vehicle.Airframe.d*sqrt(2)/2];

%Q2Ts transform requested Q to thrust per motor
Controller.Q2Ts = inv(Controller.Ts2Q);

% Controllers (generic helpers)
switch model
    case 'RollingSpider'
        Controller.takeoffGain = 0.2;    %drone takes off with constant thrust x% above
hover thrust
    case 'Mambo'
        Controller.takeoffGain = 0.45;    %drone takes off with constant thrust x% above
hover thrust
        %Controller.takeoffGain = 0.7;    %drone takes off with constant thrust x% above
hover thrust

```

```
end
```

```
end
```

```
Controller.totalThrustMaxRelative = 0.92;    %relative maximum total thrust that can  
be used for gaining altitude; rest is buffer for orientation control
```

```
Controller.motorsThrustPerMotorMax = Vehi-
```

```
cle.Motor.maxLimit*Vehicle.Motor.commandToW2Gain*...
```

```
    Vehicle.Rotor.Ct*rho*Vehicle.Rotor.area*Vehicle.Rotor.radius^2;
```

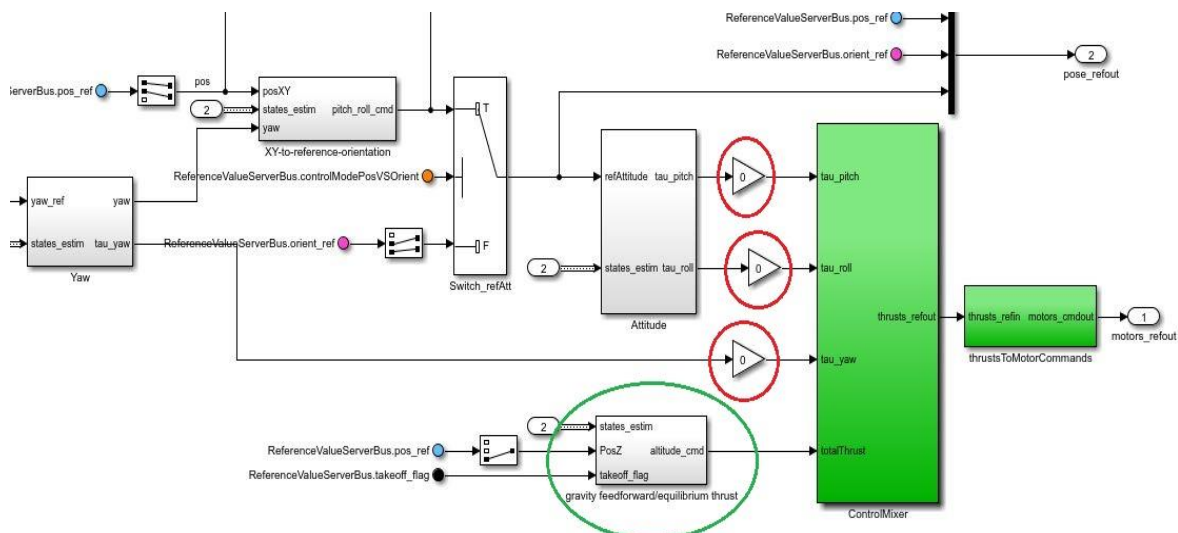
Παράρτημα Β

Στο παράρτημα αυτό γίνεται μια πιο ενδελεχής περιγραφή του τρόπου που βρέθηκαν τα κατάλληλα κέρδη για τον έλεγχο, μέσω εικόνων και διαγραμμάτων από το μοντέλο στο Simulink.

Όπως αναφέρθηκε και στο κυρίως σώμα του κειμένου, η εύρεση των κερδών δεν αποτελεί μια πλήρως ντετερμινιστική διαδικασία. Αφενός, το σύστημα είναι τόσο περίπλοκο, που η εύρεση των κερδών με κλασικούς τρόπους της θεωρίας ελέγχου (Τόπος των Ριζών, Ziegler – Nichols μέθοδος κ.τ.λ.), δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αν και η δυνατότητα γραμμικοποίησης του συστήματος γύρω από σημείο ισορροπίας και η εξαγωγή απλών πινάκων κατάστασης, υπάρχει στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab, το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι πολύ διαφορετικό από την πραγματική κατάσταση, οπότε και τα κέρδη που θα προέκυπταν δεν θα αντιστοιχούσαν στην πραγματικότητα. Αφετέρου, δεν υπάρχει ένας μοναδικός συνδυασμός κερδών, που θα δίνει το «τέλειο» αποτέλεσμα. Ανάλογα με τις προτιμήσεις του σχεδιαστή, διαφορετικές παράμετροι μπορούν να επιλεγούν για την αξιολόγηση της απόκρισης και διαφορετικό βάρος μπορεί να δοθεί στην κάθε μια. Ακόμα όμως και με τις ίδιες παραμέτρους, επειδή μάλιστα στη συγκεκριμένη εφαρμογή υπάρχουν 4 αλληλεξαρτώμενοι ελεγκτές, πολλοί συνδυασμοί κερδών μπορούν να δώσουν αντίστοιχα αποτελέσματα.

Για την αποφυγή όλων αυτών των προβλημάτων, προτιμήθηκε να μη δοθεί έμφαση σε συγκεκριμένες παραμέτρους για την αξιολόγηση, αλλά να γίνει προσπάθεια για την επίτευξη μιας συνολικά καλής απόκρισης, ώστε το Drone να μπορεί να μετακινείται στο χώρο του εργοστασίου χωρίς προβλήματα. Επιπλέον, για την επιλογή των κερδών αποφασίστηκε να πραγματοποιηθούν δοκιμές.

Για να συμβεί αυτό, έπρεπε να απλοποιηθεί το σύστημα. Η ύπαρξη και των τεσσάρων ελεγκτών, με τουλάχιστον 2 κέρδη ο καθένας, θα απαιτούσε τη δοκιμή τεράστιου πλήθους συνδυασμών. Έτσι, αρχικά επιλέχθηκε να βρεθούν τα κέρδη του ελεγκτή για το ύψος (άξονας Z), ενώ οι υπόλοιποι ελεγκτές θεωρήθηκαν τέλειοι, δηλαδή οι αποκρίσεις σε όλους τους άλλους βαθμούς ελευθερίας ακολουθούσαν επακριβώς τις εντολές. Αυτό επιτεύχθηκε, συνδέοντας στην έξοδο των τριών ελεγκτών, μπλόκ μηδενικών κερδών ().

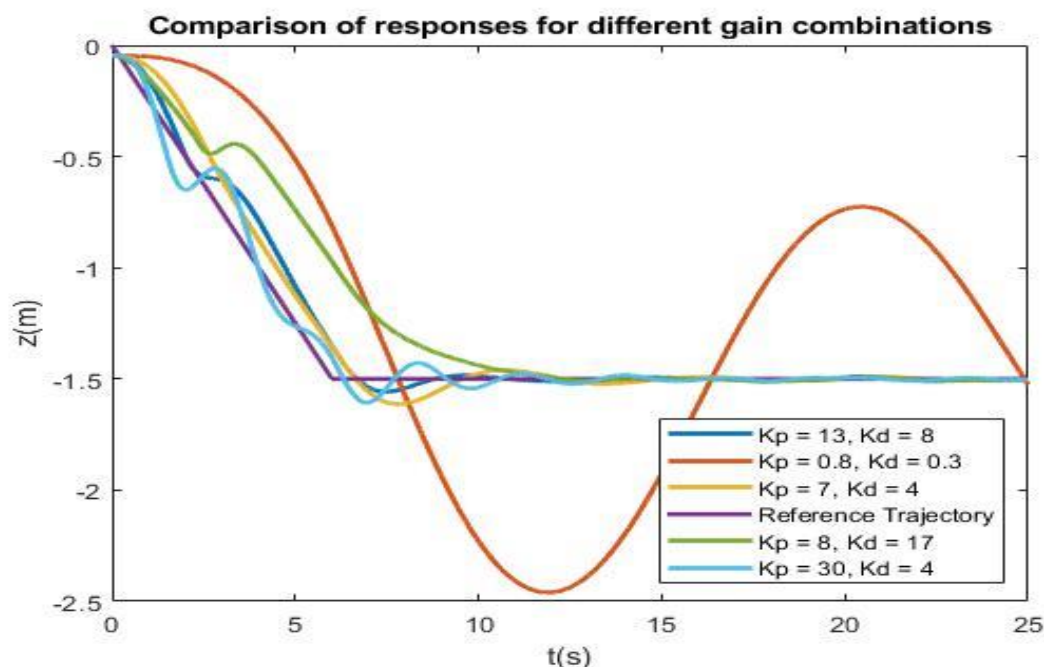


Εικόνα 30: Απομόνωση των τριών ελεγκτών για τη μελέτη της κίνησης στον κατακόρυφο άξονα.

Επόμενο βήμα ήταν να καθοριστεί και η τροχιά που θα μελετηθεί. Προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθεί μια απλή κίνηση στον κατακόρυφο άξονα, για να μελετηθεί μόνο το κομμάτι του συστήματος που μετέχει στην κίνηση αυτή.

Έχοντας καθορίσει το πλαίσιο των δοκιμών, σειρά είχαν οι ίδιες οι δοκιμές. Επειδή, αρχικά το μοντέλο αυτό προοριζόταν για να προσομοιάσει ένα πολύ μικρότερο Drone, οι τιμές των κερδών ήταν αρκετά χαμηλές. Ήταν φανερό λοιπόν, πως έπρεπε να αυξηθούν. Η αύξηση αυτή δεν πραγματοποιήθηκε με κάποιον πολύ συγκεκριμένο τρόπο. Το μέγεθος της αλλαγής, ρυθμιζόταν κάθε φορά με το αποτέλεσμα της προηγούμενης αλλαγής στην απόκριση. Όπως προαναφέρθηκε, το P(Proportional) τμήμα ενός PID ελεγκτή ορίζει την ταχύτητα απόκρισης, το D(Derivative) την υπερακόντιση και τις ταλαντώσεις και το I(Integral) το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Ανάλογα λοιπόν με την απόκριση, αυξανόταν ή μειωνόταν κάποιο από τα κέρδη.

Παρακάτω, στην Εικόνα 31, φαίνονται ορισμένες αποκρίσεις από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν και συγκρίνονται όλες με την ιδανική τροχιά.



Εικόνα 31: Σύγκριση αποκρίσεων για διάφορους συνδυασμούς κερδών.

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, είναι φανερό ότι, κέρδη της τάξεως του 10^{-1} δεν επαρκούν για την οδήγηση των κινητήρων και τη σταθεροποίηση του Drone. Αυξάνοντας πολύ το K_D , αποφεύγεται μεν η υπερακόντιση, αλλά η απόκριση γίνεται πολύ αργή. Από την άλλη, αυξάνοντας πολύ το K_P , η απόκριση γίνεται κάπως ιδιαίτερη, αφού παρατηρούνται πολλές ταλαντώσεις. Αυτό συμβαίνει διότι, η απόκριση των κινητήρων γίνεται πολύ γρήγορη και έντονη, με αποτέλεσμα να αυξάνεται πολύ η ταχύτητα, να τινάζεται προς τα πάνω το Drone και να ξεπερνάει την τιμή αναφοράς. Εφόσον συμβεί αυτό, πέφτει γρήγορα η ταχύτητα περιστροφής των ελικών, ώστε να ξαναφτάσει την τιμή αναφοράς, με αποτέλεσμα πάλι να την ξεπερνάει, προς τα κάτω αυτή τη φορά. Αυτό επαναλαμβάνεται συνεχώς, μέχρι τη μόνιμη κατάσταση.

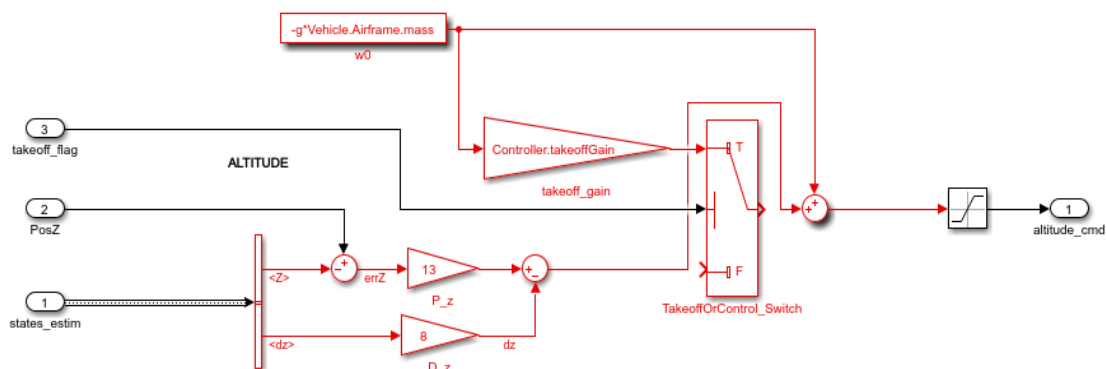
Το ιδανικό προφανώς θα ήταν να επιτευχθεί μεγάλη ταχύτητα απόκρισης, μηδενική υπερακόντιση και μηδενικό μόνιμο σφάλμα. Κάτι τέτοιο όμως είναι αδύνατον. Απαιτείται λοιπόν να βρεθεί μια ισορροπία των τριών αυτών παραμέτρων. Αυτό που παρατηρήθηκε είναι, ότι με κέρδη της τάξεως

του 10 και με μεγαλύτερο το K_P σε σχέση με το K_D , αυτή η ισορροπία επιτυγχάνεται. Έτσι επιλέχθηκε ο συνδυασμός $1(K_P = 13, K_D = 8)$.

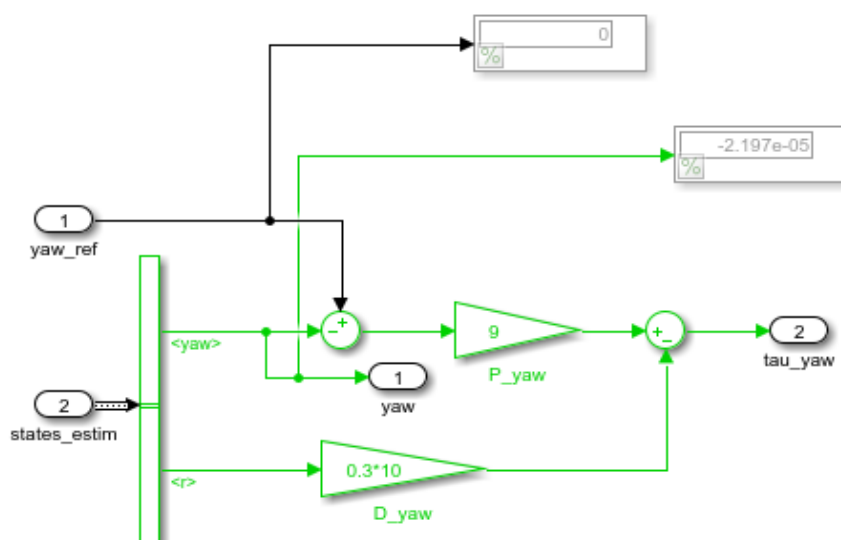
Αφού παγιώθηκαν οι τιμές του ελεγκτή αυτού, σειρά είχε ο έλεγχος της περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (Yaw). Αρχικά λοιπόν, εισήχθηκε και αυτός ο ελεγκτής στη μελέτη και έγινε προσπάθεια για την επίτευξη της προηγούμενης τροχιάς, έχοντας και αυτόν τον ελεγκτή στη μελέτη. Αρχικά, το Drone δεν μπορούσε να σταθεροποιηθεί με αποτέλεσμα να επέρχεται σύγκρουση. Μετά από τη ρύθμιση των κερδών για την σταθεροποίησή του και σε αυτή την περίπτωση, δόθηκε μια τροχιά που περιείχε και περιστροφή, και έγινε Fine Tuning των κερδών.

Αντίστοιχα έγινε και η μελέτη για τους δύο τελευταίους ελεγκτές. Εδώ πρέπει να αναφερθεί, ότι ο ελεγκτής της θέσης στο οριζόντιο άξονα, περιείχε και 1 κέρδος, το οποίο επιτυγχάνει την ελάττωση του μόνιμου σφάλματος της απόκρισης. Αυτό συμβαίνει, διότι ενώ η θέση στον οριζόντιο άξονα και ο γενικός προσανατολισμός του Drone στο χώρο, δεν ενδιαφέρει γενικά να ακολουθούν τέλεια τις εντολές, η σωστή θέση στο επίπεδο είναι εξαιρετικά σημαντική. Συγκεκριμένα, στην έρευνα αυτή, για την επιτυχή μεταφορά και εκφόρτωση αντικειμένων, το μόνιμο σφάλμα θέσης στο επίπεδο, είναι πολύ σημαντικό για το σωστό σχεδιασμό του συστήματος μεταφοράς και την επιλογή των κατάλληλων ανοχών.

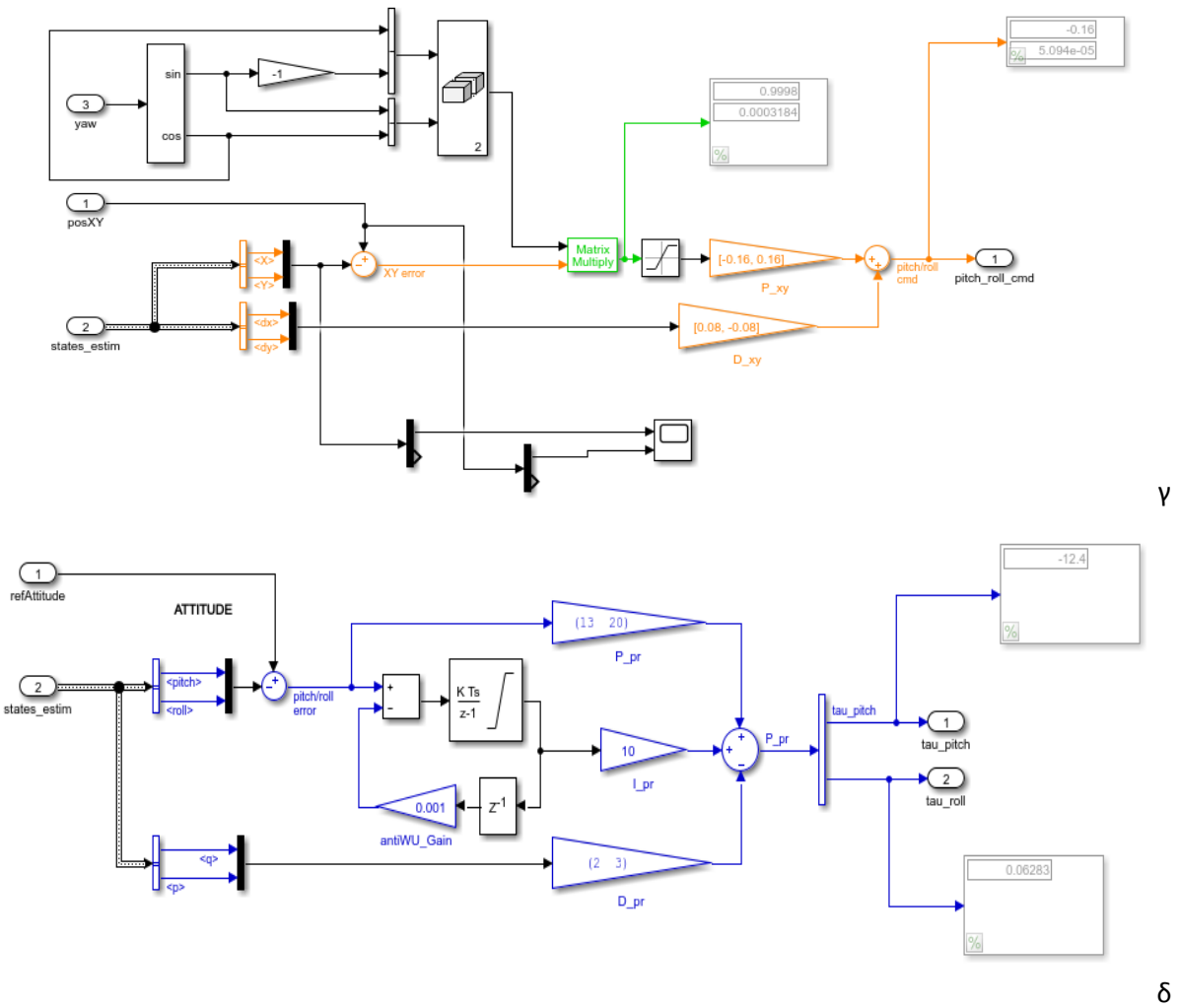
Στην Εικόνα 32 παρουσιάζονται οι τέσσερις ελεγκτές με τα τελικά κέρδη.



α



β



Εικόνα 32: Οι τέσσερις ελεγκτές: (α) gravity feedforward/equilibrium thrust, (β) Yaw, (γ) XY-to-reference-orientation, (δ) Attitude