



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδιασμός και υλοποίηση ενός αυτόνομου θαλάσσιου οχήματος με χρήση arduino

Δώδας Στέφανος

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Μηνάς Δασυγένης

Εργαστήριο Ρομποτικής, Ενσωματωμένων και Ολοκληρωμένων Συστημάτων

Κοζάνη, Ιούνιος 2022



UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA

FACULTY OF ENGINEERING

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMPUTER ENGINEERING**

THESIS

Design and implementation of an autonomous water boat vehicle using arduino

Dodas Stefanos

Supervisor: Dr. Minas Dasygenis

Laboratory of Robotics, Embedded and Integrated Systems

Kozani, June 2022

Περίληψη

Το επίπεδο της τεχνολογίας σήμερα φέρνει τα αυτόνομα οχήματα όλο και πιο κοντά στην πραγματικότητα. Ένα όχημα με δική του νοημοσύνη φαντάζει ειδυλλιακό, ωστόσο υπάρχουν εμπόδια που καθιστούν την χρήση του αδύνατη. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατασκευή ενός θαλάσσιου οχήματος με δυνατότητες αυτόνομης πλοήγησης και καταγραφής του εξωτερικού περιβάλλοντός του, με σκοπό να συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των αυτόνομων οχημάτων και να παρουσιάσει τις ικανότητες ενός τέτοιου οχήματος αλλά και τους περιορισμούς της εφαρμόζουσας τεχνολογίας.

Το όχημα βασίζεται στον μικροελεγκτή Arduino mega, ο οποίος σε συνδυασμό με μια μονάδα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης (GPS), μια ηλεκτρονική πυξίδα, έναν μικροκινητήρα DC, ένα servo κινητήρα και έναν πομποδέκτη, ο οποίος επικοινωνεί ασύρματα με έναν δεύτερο πομποδέκτη τοποθετημένο στον σταθμό βάσης, επιτυγχάνει αυτόνομη κίνηση από ένα σημείο σε ένα άλλο, καθορισμένο από ένα χρήστη ή κίνηση υπακούοντας σε χειροκίνητες εντολές κατεύθυνσης. Επίσης έχει την δυνατότητα καταγραφής της πορείας σε πραγματικό χρόνο μέσω μίας αναλογικής κάμερας και ενός πομπού βίντεο αλλά και καταγραφής σε βάθος χρόνου με την χρήση ψηφιακής κάμερας. Το σύστημα ενσωματώνεται στο εσωτερικό σκάφους μικρής κλίμακας. Για την τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται μια μπαταρία λιθίου στην οποία γίνεται καταγραφή της τάσης ενώ για την αποστολή μηνυμάτων από τον σταθμό βάσης, χρησιμοποιείται η οθόνη σειριακών μηνυμάτων της εφαρμογής Arduino IDE. Τέλος η απομακρυσμένη επικοινωνία με το σύστημα επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Lora.

Σκοπός αυτού του συστήματος είναι η αξιοποίησή του σε επιχειρήσεις ελέγχου υδάτων, υπηρεσίες μεταφοράς εμπορεύματος, στην αποτροπή ναυτικών ατυχημάτων και η συμβολή του σε συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, απομακρυσμένα.

Λέξεις κλειδιά: Arduino, GPS, heading, πηδάλιο, PID, μαγνητόμετρο, αυτονομία, ηλεκτρικός κινητήρας

Abstract

The level of technology today brings autonomous vehicles closer and closer to reality. A vehicle with its own intelligence seems idyllic, however there are obstacles that make its use impossible. In this diploma, an marine vehicle is constructed with possibilities of autonomous navigation and recording of its external environment in order to contribute to the better understanding of the operation of autonomous vehicles and to present the capabilities of such a vehicle but also the limitations of the applied technology.

The vehicle is based on the Arduino mega microcontroller, which in combination with a geolocation unit (GPS), an electronic compass, a DC motor, a servo motor and a transceiver that communicates wirelessly with a second transceiver located at the base station, achieves autonomous move from one point to another, user-defined or move by obeying manual directional commands. It also has the ability to record the course in real time through an analog camera and a video transmitter but also long-term recording using a digital camera. The system is integrated into the interior of a small-scale vessel. For the power supply a lithium battery is used in which the voltage is recorded while for the sending of messages from the base station, the serial message screen of the Arduino IDE application is used. Finally, remote communication with the system is achieved using Lora technology.

The purpose of this system is to use it in water control operations, freight services, to prevent maritime accidents and to contribute to the collection of data from various sensors, remotely.

Keywords: Arduino, GPS, heading, rudder, PID, magnetometer, autonomy, electrical motor

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Δασυγένη Μηνά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας καθώς και τον Χατζισάββα Αντώνη, τον Γίτσα Νίκο και τον Βατούση Άρη για την σημαντική συμβολή τους στην διεκπεραίωση της διπλωματικής. Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την ατελείωτη υποστήριξη.

Δήλωση πνευματικών δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ.3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Σχεδιασμός και υλοποίηση ενός αυτόνομου θαλάσσιου οχήματος με χρήση arduino» καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Δασυγένης Μηνάς, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Δώδας Στέφανος, Δασυγένης Μηνάς, 2022, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή

Κατάλογος Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	- 1 -
1.1 Η αυτονομία θαλάσσιων οχημάτων	- 1 -
1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	- 2 -
1.3 Κίνητρα και στόχοι υλοποίησης	- 4 -
1.4 Παρόμοιες υλοποιήσεις	- 4 -
1.5 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας.....	- 5 -
Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό υπόβαθρο	- 7 -
2.1 Δυνάμεις στην θαλάσσια κίνηση	- 7 -
2.2 Τομέας μηχανικών εξαρτημάτων.....	- 8 -
2.2.1 Η γάστρα του θαλάσσιου οχήματος.....	- 9 -
2.2.2 Σύστημα πρόωσης.....	- 11 -
2.2.3 Κινητήρας του οχήματος	- 11 -
2.2.4 Πηδάλιο.....	- 13 -
2.3 Τομέας ηλεκτρονικών εξαρτημάτων	- 13 -
2.3.1 Arduino Mega R3	- 14 -
2.3.2 Πλακέτα GPS.....	- 15 -
2.3.3 Διασύνδεση σταθμού βάσης και συστήματος.....	- 16 -
2.4 Πλατφόρμες ανάπτυξης λογισμικού	- 17 -
2.4.1 Arduino IDE	- 18 -
2.4.2 Fusion 360.....	- 18 -
2.4.3 Fritzing.....	- 18 -
2.4.4 Visual Studio Code	- 19 -
2.4.5 Code::Blocks.....	- 19 -
2.4.6 Βιβλιοθήκη RadioHead Packet Radio	- 19 -
2.5 Σύστημα κλειστού βρόγχου PID.....	- 19 -

2.6	Τρισδιάστατη εκτύπωση	- 20 -
2.7	Σύνοψη κεφαλαίου.....	- 21 -
Κεφάλαιο 3 – Κατασκευή του υλικού μέρους.....		- 22 -
3.1	Το θαλάσσιο όχημα	- 22 -
3.2	Το ηλεκτρικό κύκλωμα του συστήματος.....	- 23 -
3.3	Κινητήρια εξαρτήματα σκάφους	- 25 -
3.4	Τροφοδότηση συστήματος	- 26 -
3.5	Μαγνητόμετρο	- 28 -
3.6	Σύστημα GPS.....	- 29 -
3.7	Απομακρυσμένη επικοινωνία	- 29 -
3.8	Εποπτεία εξωτερικού περιβάλλοντος	- 30 -
3.9	Μέτρα ασφαλείας.....	- 30 -
3.10	Ανάλυση SWOT.....	- 31 -
3.10.1	Δυνάμεις και αδυναμίες	- 31 -
3.10.2	Ευκαιρίες και απειλές	- 32 -
3.11	Use cases	- 33 -
3.12	Σύνοψη κεφαλαίου	- 33 -
Κεφάλαιο 4 - Ανάπτυξη Λογισμικού.....		- 35 -
4.1	Λογική ελέγχου.....	- 35 -
4.2	Επικοινωνία διεπαφή χρήστη με το σύστημα	- 36 -
4.3	Λήψη και επεξεργασία δεδομένων GPS.....	- 37 -
4.4	Υπολογισμός κατεύθυνσης.....	- 39 -
4.5	Ελεγκτής PID.....	- 42 -
4.5.1	Ελεγκτής κατεύθυνσης	- 42 -
4.5.2	Ελεγκτής πορείας.....	- 44 -
4.6	Σύνοψη κεφαλαίου.....	- 44 -

Κεφάλαιο 5 - Διαδικασία δοκιμών	- 45 -
5.1 Προετοιμασία πειραμάτων.....	- 45 -
5.2 Εκτέλεση πειραμάτων.....	- 45 -
Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	- 50 -

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 Σκάφη τα οποία ανήκουν στην κατηγορία γάστρα εκτοπίσματος.....	- 9 -
Εικόνα 2.2 Σκάφη τα οποία ανήκουν στην κατηγορία γάστρα ημικτοπίσματος	- 9 -
Εικόνα 2.3 Σχέδιο γάστρας ολισθάκατου	- 10 -
Εικόνα 2.4 Σχέδιο προπέλας. Δ: διάμετρος, Β: βήμα.....	- 11 -
Εικόνα 2.5 Ηλεκτροκινητήρας σε σύνδεση με μεταλλικό σύνδεσμο και τον άξονα προπέλας-	13 -
Εικόνα 2.6 Το πηδάλιο με τον άξονα και τα πλαστικά περικόχλια.....	- 13 -
Εικόνα 2.7 Η πλακέτα Arduino Mega 2560 με αναγραφόμενες τις ονομασίες των pin.....	- 14 -
Εικόνα 2.8 Σήμα Lora διαμορφωμένο με την τεχνολογία CSS.....	- 17 -
Εικόνα 3.1 Το μοντέλο του ρυμουλκού πλοίου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία	- 22
-	
Εικόνα 3.2 Σχεδιάγραμμα κυκλώματος του συστήματος στο σκάφος.....	- 24 -
Εικόνα 3.3 Θέση ενός σερβομηχανισμού ανάλογα με το πλάτος παλμού του σήματος PWM-	26 -
Εικόνα 3.4 Στιγμιότυπο της προβολής βίντεο σε πραγματικό χρόνο στο σταθμό βάσης.....	- 30 -
Εικόνα 3.5 Διάγραμμα χρήσης συστήματος.....	- 33 -
Εικόνα 3.6 Φυσικό πρωτότυπο μοντέλο σκάφους	- 34 -
Εικόνα 4.1 Η σειριακή οθόνη του Arduino IDE	- 37 -
Εικόνα 4.2 Παράδειγμα αλλαγής κατεύθυνσης κατά την μακρινή πλεύση.....	- 38 -
Εικόνα 4.3 Το λογισμικό magneto	- 40 -
Εικόνα 4.4 Τιμές των μετρήσεων της ηλεκτρονικής πυξίδας σε τρισδιάστατο επίπεδο.....	- 40 -
Εικόνα 4.5 Τιμές των μετρήσεων της ηλεκτρονικής πυξίδας επαναπροσδιορισμένες γύρω από το σημείο [0,0]	- 41 -
Εικόνα 5.1 Σχέδιο διαδρομής στην τοποθεσία λίμνη Πρεσπών.....	- 46 -
Εικόνα 5.2 Καταγεγραμμένες τοποθεσίες του σκάφους κατά την διάρκεια αυτόνομης πλεύσης σε σύγκριση με την επιθυμητή πορεία στην δεύτερη δοκιμή.....	- 47 -
Εικόνα 5.3 Τιμές της πορείας σε σύγκριση με την επιθυμητή	- 47 -
Εικόνα 5.4 Τιμές της κατεύθυνσης σε σύγκριση με την επιθυμητή.....	- 48 -
Εικόνα 5.5 Σχέδιο διαδρομής στην τοποθεσία λίμνη Καστοριάς.....	- 48 -
Εικόνα 5.6 Καταγεγραμμένες τοποθεσίες του σκάφους κατά την διάρκεια αυτόνομης πλεύσης σε σύγκριση με την επιθυμητή πορεία στην τρίτη δοκιμή.....	- 49 -

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 1.1 Επίπεδα αυτονομίας σύμφωνα με τον Thomas Sheridan.....</i>	<i>- 2 -</i>
<i>Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου εκτυπωτή Prusa I3.....</i>	<i>- 23 -</i>
<i>Πίνακας 3.2 Αντιστοίχιση διάρκειας σήματος PWM με την ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα</i>	<i>- 25 -</i>
<i>Πίνακας 3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων του συστήματος.....</i>	<i>- 28 -</i>

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Σήμερα, ένα θέμα που απασχολεί μεγάλος μέρος της επιστημονικής κοινότητας της πληροφορικής είναι ο αυτοματισμός και πως αυτός εφαρμόζεται αποτελεσματικά σε καθημερινά συστήματα τεχνολογίας, με σκοπό την υποβοήθηση ή την ολοκλήρωση μιας εργασίας (4.200.000 επιστημονικά άρθρα που περιλαμβάνουν τον όρο αυτονομία scholar.google.gr). Σε πολλές περιπτώσεις βρισκόμαστε αντιμέτωποι με μια εργασία την οποία είναι δύσκολο ή αδύνατο να ολοκληρώσουμε εξαιτίας διαφόρων παραγόντων και αναζητούμε ένα εργαλείο το οποίο θα μας βοηθήσει ή θα ολοκληρώσει το ίδιο την εργασία. Τον ρόλο του εργαλείου αυτού, παίρνουν συσκευές και συστήματα καθημερινής χρήσης στις οποίες ενσωματώνονται μικροελεγκτές, αισθητήρες και κινητήρες ώστε να επιτευχθεί μια μορφή αυτονομίας.

1.1 Η αυτονομία θαλάσσιων οχημάτων

Τα τελευταία χρόνια λαμβάνει μέρος ένας μαραθώνιος με στόχο την επίτευξη αυτονομίας οχημάτων μεταξύ των εταιρειών, οι οποίες και είναι υπεύθυνες για την κατασκευή τους. Η εξέλιξη της τεχνολογίας συντελεί στην έρευνα νέων δυνατοτήτων των οχημάτων τις οποίες αξιοποιούμε για την βελτίωση της ζωής μας. Ωστόσο, αν και έχουν γίνει μεγάλα βήματα για την επίτευξη πλήρους αυτονομίας, δεν έχουμε φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο επιτυχίας. Οι τεχνολογίες που απαιτούνται για να γίνουν τα αυτόνομα πλοία πραγματικότητα υπάρχουν. Η πρόκληση είναι να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος για να συνδυαστούν αξιόπιστα και οικονομικά. Η ανάπτυξη συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων για αυτόνομα πλοία είναι μια σταδιακή και επαναληπτική διαδικασία και υπόκειται σε εκτεταμένες δοκιμές και προσομοίωση [1].

Η κατάσταση είναι καλύτερη στα μη επανδρωμένα οχήματα μικρών διαστάσεων, καθώς υπάρχουν λιγότεροι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την κίνηση. Οι τομείς που απαιτούν προσοχή στην αυτόνομη μετακίνηση μέσω θαλάσσης είναι: Α) η διατήρηση ευθύγραμμης πορείας από ένα σημείο στον προορισμό αντιμετωπίζοντας επιτυχημένα την αλλαγή κατεύθυνσης από την ορμή των κυμάτων ή την δύναμη του ανέμου, Β) η γρήγορη και με ελάχιστες απώλειες επικοινωνία μεταξύ των πλοίων ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση μεταξύ τους, Γ) η παροχή λογισμικού στους λιμένες για την σωστή καθοδήγηση των πλοίων, η εγκατάσταση κατάλληλων αισθητήρων, η οποία επιτυγχάνει την ομαλή λειτουργία των

μηχανημάτων και την καταγραφή του εξωτερικού περιβάλλοντος και τέλος Ε) η ασφάλεια από επιθέσεις κακόβουλου λογισμικού [2].

Ωστόσο δεν είναι όλα τα σκάφη κατάλληλα για την εγκατάσταση εξοπλισμού, ο οποίος είναι απαραίτητος για την απομακρυσμένη επικοινωνία με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν πληροφορίες για την τοποθεσία τους. Σε πλοία μεγαλύτερου μεγέθους όπως φορτηγά πλοία, έχει εγκατασταθεί σύστημα ανίχνευσης απόστασης από ένα άλλο όχημα μέσω ραδιοκυμάτων (ραντάρ) ως μέτρο αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος. Διαφορετικοί τύποι σκαφών διαθέτουν και διαφορετικό επίπεδο αυτονομίας ανάλογα με την υποεργασία που πρόκειται να εκτελέσουν, αλλά και την κατάσταση του. Η αυτονομία είναι μια προσαρμόσιμη και δυναμική έννοια που σημαίνει ότι κάποιες εργασίες είναι δυνατόν να εκτελεστούν χωρίς την βοήθεια ενός χειριστή όμως στις πιο περίπλοκες εργασίες απαιτείται αυξημένη αλληλεπίδραση με τον άνθρωπο [1]. Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τα επίπεδα αυτονομίας σε σκάφη σύμφωνα με τον Thomas Sheridan [3].

Επίπεδο	Περιγραφή
10	Ο υπολογιστής κάνει τα πάντα αυτόνομα, αγνοεί τον άνθρωπο
9	Ο υπολογιστής ενημερώνει τον άνθρωπο μόνο εάν αυτός (ο υπολογιστής) το αποφασίσει
8	Ο υπολογιστής ενημερώνει τον άνθρωπο μόνο εάν του ζητηθεί
7	Ο υπολογιστής εκτελεί αυτόματα, όταν χρειάζεται ενημερώνοντας τον άνθρωπο
6	Ο υπολογιστής δίνει στον άνθρωπο περιορισμένο χρόνο για να τον εμποδίσει πριν από την αυτόματη εκτέλεση
5	Ο υπολογιστής εκτελεί την προτεινόμενη ενέργεια εάν το εγκρίνει ο άνθρωπος
4	Ο υπολογιστής προτείνει μία μόνο εναλλακτική λύση
3	Ο υπολογιστής περιορίζει τις εναλλακτικές σε λίγες
2	Ο υπολογιστής προσφέρει ένα πλήρες σύνολο εναλλακτικών αποφάσεων
1	Ο υπολογιστής δεν προσφέρει καμία βοήθεια, ο άνθρωπος είναι υπεύθυνος για όλες τις αποφάσεις και τις ενέργειες

Πίνακας 1.1 Επίπεδα αυτονομίας σύμφωνα με τον Thomas Sheridan

1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά την ανάπτυξη ενός θαλάσσιου οχήματος (σκάφους) μικρής κλίμακας βασισμένο σε μοντέλο ρυμουλκού πλοίου, επανδρωμένο με όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό ώστε να επιτυγχάνει αυτόνομη κίνηση κατά την διάρκεια πλεύσης

από ένα σημείο σε ένα άλλο. Μόνη προϋπόθεση είναι η παρουσία ενός χειριστή σε έναν σταθμό βάσης ο οποίος διαθέτει έναν πομποδέκτη, με την αρμοδιότητα να αποστέλλει στο σκάφος από απόσταση τις συντεταγμένες του προορισμού.

Το σύστημα στο σκάφος αποτελείται από μια μονάδα GPS, η οποία λαμβάνει από δορυφόρο την γεωγραφική του τοποθεσία και σε συνδυασμό με μία ηλεκτρονική πυξίδα, η οποία αξιοποιώντας το μαγνητικό πεδίο της γης μας επιστρέφει σε μοίρες την διαφορά από τον βορρά, θέτει σε λειτουργία τον βασικό αλγόριθμο στον μικροελεγκτή του Arduino Mega. Το Arduino Mega αποτελεί τον εγκέφαλο του συστήματος και συνδέει όλες τις υπόλοιπες μονάδες μεταξύ τους.

Ο αλγόριθμος, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την σωστή πορεία του πλοίου χρησιμοποιεί τα δεδομένα που λαμβάνει από το GPS σε μορφή προτάσεων NMEA στην εφαρμογή ενός ελεγκτή PID. Συγκρίνει την προηγούμενη θέση του πλοίου με την επόμενη και αν το πλοίο αποκλίνει της πορείας του αποστέλλει σήματα χειρισμού στα μηχανικά μέρη του με αποτέλεσμα την αλλαγή της κατεύθυνσής του προς τον επιθυμητό στόχο. Με τον όρο μηχανικά μέρη αναφερόμαστε στον ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος περιστρέφει τον άξονα της προπέλας και τον σερβοκινητήρα, σκοπός του οποίου είναι να μετακινεί το πηδάλιο με σκοπό την αλλαγή πορείας. Το σημείο προορισμού λαμβάνεται μέσω ενός πομποδέκτη ο οποίος είναι ρυθμισμένος να λαμβάνει ραδιοκύματα σε μια συγκεκριμένη συχνότητα.

Το σύστημα έχει επιπλέον την δυνατότητα να καταγράφει και να προβάλλει σε ζωντανή σύνδεση με τον σταθμό βάσης την πορεία του με την χρήση ενός πομπού AV (κάμερας), εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση. Ο σταθμός βάσης αποτελείται από έναν προσωπικό υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα Windows και έναν πομποδέκτη ίδιου μοντέλου με αυτόν που βρίσκεται στο σκάφος, από τον οποίο ο χρήστης με κατάλληλο λογισμικό στέλνει το επιθυμητό σημείο για να κατευθυνθεί το όχημα και επιβλέπει την πορεία του. Παράλληλα ο χρήστης έχει την δυνατότητα να στείλει σήματα χειρισμού στο όχημα ώστε να υπακούει μόνο σε αυτά, στην περίπτωση σφάλματος του συστήματος αυτονομίας.

Αν και οι επιστημονικές έρευνες για αποτελεσματική αυτονομία σε σκάφη λαμβάνουν χώρα αρκετά χρόνια τώρα και έχουν φτάσει σχεδόν στο τελικό στάδιο με ελάχιστο σφάλμα των εφαρμοζόμενων μεθόδων, η αρχιτεκτονική που εφαρμόστηκε στην υλοποίηση του ολικού συστήματος διαφέρει από τις υπόλοιπες υλοποιήσεις παρόμοιων εργασιών και θα

βοηθήσει στο να κατανοήσουμε καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να αυτοματοποιηθούν οι λειτουργίες ενός θαλάσσιου οχήματος.

1.3 Κίνητρα και στόχοι υλοποίησης

Κατά την διάρκεια του 2019 σημειώθηκαν συνολικά πάνω από 2500 ναυτικά ατυχήματα [4]. Το 70% αυτών προκλήθηκαν από ανθρώπινο λάθος και οδήγησαν σε οικονομικές ζημιές αλλά και μόλυνση του περιβάλλοντος. Έχει σημασία να επισημάνουμε ότι το μεγαλύτερο ποσό των ατυχημάτων έλαβαν μέρος στους λιμένες, δηλαδή στους χώρους που υπάρχει συνωστισμός σκαφών. Δημιουργείται λοιπόν η ανάγκη για ανάπτυξη λογισμικού και υλικών με σκοπό την αποτροπή ναυτικών ατυχημάτων τόσο για την ασφάλεια του προσωπικού όσο και για την προφύλαξη του περιβάλλοντός μας.

Ένα ακόμη σημαντικό έναυσμα για την εφαρμογή αυτονομίας στα πλοία είναι η μείωση εξόδων σε ναυτιλιακές εταιρείες εμπορικών πλοίων. Αυτές οι ανάγκες σε συνδυασμό με άλλες εφαρμογές του αυτοματισμού σε σκάφη όπως η ανάλυση υδάτων αποτέλεσαν το κίνητρο για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής. Στόχος της υλοποίησης είναι κυρίως η απόκτηση γνώσεων πάνω στον αυτοματισμό και στην ηλεκτρονική αλλά και η έρευνα για καινοτομία στον σχεδιασμό του συστήματος αυτονομίας.

1.4 Παρόμοιες υλοποιήσεις

Αρκετά σχετικά έργα έχουν υλοποιηθεί και δημοσιευθεί σε επιστημονικά περιοδικά. Η επίτευξη αυτονομίας σε πλοία αποτελεί στόχος πολλών ερευνών λόγω του πλήθους εφαρμογών που έχουν τα αυτόνομα θαλάσσια οχήματα. Χαρακτηριστική είναι η δημοσίευση με τίτλο «AUTONOMOUS SHIP MODEL TO PERFORM MANOEUVRING TESTS» από τους L. Moreira και C. Guedes Soares, η οποία χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Light of Sight (LOS). Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε στα λογισμικά Matlab και Simulink και εφαρμόζεται σε ένα υπολογιστή σε μοντέλο φορτηγού πλοίου και σε συνδυασμό με το εξάρτημα DAQ (National Instruments DAQCARD) υπολογίζει την επιθυμητή γωνία κατεύθυνσης [5].

Άλλη μία αρκετά ενδιαφέρουσα δημοσίευση είναι του Giorgos A. Demetriou με τίτλο «ERON: A PID Controlled Autonomous Surface Vessel» [6]. Η υλοποίηση της έχει ομοιότητες με την αρχιτεκτονική της υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής. Στο εσωτερικό φιλοξενεί τρεις μικροελεγκτές Arduino Uno, ένα εξάρτημα GPS και μιας ηλεκτρονικής πυξίδας. Ο κύριος μικροελεγκτής Arduino χρησιμοποιεί τα δεδομένα από τους

αισθητήρες του GPS και της πυξίδας για την λήψη σωστών αποφάσεων πλοήγησης μέσω ενός βρόχου PID με αποτέλεσμα αυτόνομης πλοήγησης του σκάφους και σταθερής ευθύγραμμης πορείας με μέγιστη απόκλιση ενός μέτρου.

Άξια αναφοράς είναι και η δημοσίευση με τίτλο «Autonomous Navigation of a Small Boat Using IMU/GPS/Digital Compass Integration» των Douglas Soares dos Santos, Cairo Lúcio Nascimento Júnior, Wagner Chiera Cunha στην οποία αναλύουν με λεπτομέρεια πως οι καταγραφές από τους αισθητήρες ενός χαμηλού κόστους Inertial measurement unit (IMU) επιφέρουν ακριβείς εκτιμήσεις για την τοποθεσία και την γωνία κατεύθυνσης του σκάφους [7].

1.5 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας

Το κείμενο που ακολουθεί διαιρείται σε πέντε κεφάλαια. Στο καθένα αντιστοιχεί μια αναλυτική περιγραφή των στοιχείων που σχετίζονται με την υλοποίηση του συνολικού έργου.

Το δεύτερο κεφάλαιο πραγματεύεται του ορισμούς και την προέλευση των υλικών που απαρτίζουν το σύστημα. Γίνεται αναφορά στην σύστασή τους και τον τρόπο λειτουργίας τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται από το αρχικό στάδιο, βήμα βήμα, πως κατασκευάστηκε το υλικό που φιλοξενεί το σύστημά μας αλλά και τα εξαρτήματα που επιλέξαμε και το απαρτίζουν. Εξηγείται ο λόγος που επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες μονάδες και πως συντελούν στο να επιτευχθεί η αυτόνομη κίνηση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που εκτελείται στο σκάφος και είναι υπεύθυνος για την διατήρηση της σωστής κατεύθυνσης του. Αναλύεται η λειτουργία του και πως επεξεργάζεται τα δεδομένα των αισθητήρων ώστε να επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Επιπρόσθετα αναφέρεται το λογισμικό που χρησιμοποιεί ο σταθμός βάσης ώστε να επικοινωνεί με το σύστημα στο σκάφος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα πειράματα που έλαβαν χώρα μετά την ολοκλήρωση του συστήματος πλοήγησης και γίνεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Αναφέρεται η διαδικασία πραγματοποίησης του και γίνεται παρουσίαση των μετρικών των αισθητήρων και η απόκλιση τους από τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Τέλος, το έκτο και τελευταίο κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη σύνοψη των αποτελεσμάτων αυτής της διατριβής. Γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση των αποτελεσμάτων της αναπτυγμένης διαδικασίας και προτείνονται πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις και αναβαθμίσεις.

Κεφάλαιο 2 – Θεωρητικό υπόβαθρο

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά τα επιμέρους υλικά που απαρτίζουν το σύστημα, εσωτερικά και εξωτερικά, όπως επίσης και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία του προγράμματος που είναι υπεύθυνο για την ομαλή λειτουργία του. Συγκεκριμένα στο παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται η σύνδεση και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διάφορων ηλεκτρονικών και μηχανικών εξαρτημάτων, η χρήση τους, οι προδιαγραφές τους και οι βασικές λειτουργίες τους. Το υλικό του συστήματος χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες: το μηχανικό και το ηλεκτρονικό. Στο μηχανικό ενσωματώνονται ο σκελετός της βάρκας και τα κινητικά της μέρη, ενώ το ηλεκτρονικό απαρτίζεται από δύο κύριες μονάδες: από αυτές που επεξεργάζονται τα δεδομένα και εκτελούν το πρόγραμμα, και από αυτές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική.

2.1 Δυνάμεις στην θαλάσσια κίνηση

Η κίνηση επί του υγρού στοιχείου διαφέρει από την κίνηση επί του εδάφους. Οι δυνάμεις αντιστάσεων στο στερεό αντικαθίσταται με τις δυνάμεις αδράνειας (inertia forces). Στην μετακίνηση μέσω θαλάσσης είναι δύο οι αριθμοί που υπολογίζουν την αντίσταση στην κίνηση. Ο αριθμός Reynolds και ο αριθμός Froude [8]. Οι παράμετροι που διαμορφώνουν τους τύπους αυτών των αριθμών παίζουν σημαντικό ρόλο στην αντίσταση της κίνησης. Διακρίνονται στο μήκος του πλοίου L , την βαρύτητα g , την ταχύτητα του πλοίου V , την συνεκτικότητα του ρευστού ν^1 και την πυκνότητα του ρ . Ο αριθμός Reynolds σχετίζεται με τις επιδράσεις της συνεκτικότητας και είναι ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις συνεκτικές δυνάμεις (Εξίσωση 2.1) ενώ ο αριθμός Froude σχετίζεται με την δημιουργία κυματισμών και είναι ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις βαρυτικές (Εξίσωση 2.2).

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

Εξίσωση 2.1

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * L}}$$

Εξίσωση 2.2

¹ Συνεκτική ροή ονομάζεται η πίεση του ρευστού πάνω σε άλλη επιφάνεια υλικού καθώς προκαλείται διάτμηση από τα σωματίδια που κινούνται στα αμέσως επόμενα στρώματα ρευστού.

Οι δυνάμεις που δημιουργούν την αντίσταση στην θάλασσα είναι γνωστές ως αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας (viscous pressure drag), αντίσταση τριβής² και αντίσταση κυματισμού. Η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας και η αντίσταση τριβής συνθέτουν την αντίσταση συνεκτικότητας του σώματος (Εξίσωση 2.3). Επιπλέον η αντίσταση συνεκτικότητας και η αντίσταση κυματισμού συνθέτουν την συνολική αντίσταση πλοίου (Εξίσωση 2.4) [9].

C_v = αντίσταση συνεκτικότητας,

$C_{F_{cb}}$ = αντίσταση τριβής,

C_{VP} = αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας.

$$C_v = C_{F_{cb}} + C_{VP}$$

Εξίσωση 2.3

C_T = αντίσταση πλοίου,

C_W = αντίσταση κυματισμού.

$$C_T = C_V + C_W$$

Εξίσωση 2.4

2.2 Τομέας μηχανικών εξαρτημάτων

Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στα βασικά μηχανικά κομμάτια που συνθέτουν το θαλάσσιο όχημα. Χάρη σε αυτά η βάρκα έχει την δυνατότητα να επιπλέει και να κινείται στο νερό διατηρώντας την ισορροπία της, ακόμα και υπό ακραίες καιρικές συνθήκες. Παρακάτω αναλύονται κάθε ένα διεξοδικά.

² Αντίσταση τριβής εννοούμε την αντίσταση που προκαλείται λόγω της επαφής των στρωμάτων του υγρού με άλλο τύπο υγρού αλλά και μεταξύ τους.

2.2.1 Η γάστρα του θαλάσσιου οχήματος

Το κυριότερο μέρος μιας βάρκας είναι η γάστρα της³ ή αλλιώς ο σκελετός της. Υπάρχουν τέσσερις μεγάλες κατηγορίες γάστρες, με τις δικές τους υποκατηγορίες, το οποίο συνεπάγεται και διαφορετικά είδη σκάφους [10]. Οι γάστρες ταξινομούνται σε αυτές ανάλογα με τον λόγο ταχύτητας – μήκους (αριθμός Froude⁴) και το σχήμα τους. Η πιο διαδεδομένη κατηγορία είναι τα μονόγαστρα (monohulls), στα οποία περιλαμβάνονται τα σκάφη εκτοπίσματος (displacement craft), ημικτοπίσματος (semi-displacement craft) και οι ολισθάκατοι (planning crafts). Οι γάστρες εκτοπίσματος (Εικόνα 2.1) εκτοπίζουν το βάρος του σε νερό. Σε αυτή την κατηγορία το σκάφος δεν αλλάζει το εκτόπισμα του με την ταχύτητα. Χαρακτηριστικά σκάφη εκτοπίσματος είναι τα κανό, οι κωπήλατες βάρκες, τα αργοκίνητα αλιευτικά, τα ιστιοπλοϊκά κρουαζιέρας και τα παραδοσιακά σκάφη των διαφόρων εθνών.



Εικόνα 2.1 Σκάφη τα οποία ανήκουν στην κατηγορία γάστρα εκτοπίσματος

Τα σκάφη ημικτοπίσματος ή ημιπλαναρίσματος (Εικόνα 2.2) καταφέρνουν να ξεπεράσουν το θεωρητικό φράγμα της αντίστασης λόγω της δυνατότητας τους να ανασηκώνουν την πλώρη τους με αποτέλεσμα μικρότερων τριβών και αντιστάσεων. Το σχήμα της γάστρας παραπέμπει στο αγγλικό γράμμα “V”.



Εικόνα 2.2 Σκάφη τα οποία ανήκουν στην κατηγορία γάστρα ημικτοπίσματος

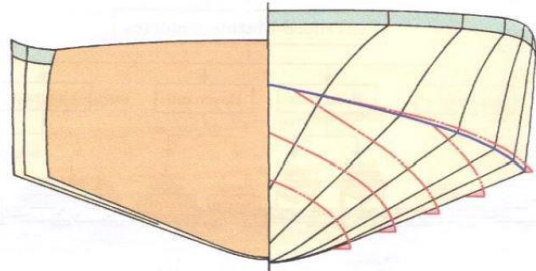
³ Γάστρα ονομάζεται το συμπαγές υλικό από το οποίο αποτελείται η βάρκα και έχει την δυνατότητα να επιπλέει στο νερό.

⁴ Ο αριθμός Froude είναι ο λόγος δυνάμεων αδρανείας προς δυνάμεις βαρύτητας.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της κατηγορίας είναι:

- μεγαλύτερη αντοχή στο βάρος
- καλύτερη αντίσταση στο νερό
- ικανοποιητικές ταχύτητες σε μεγάλες διαδρομές
- μεγάλος εσωτερικός χώρος

Οι ολισθάκατοι καταφέρνουν να διατηρήσουν ακόμα μεγαλύτερες ταχύτητες λόγω μιας ιδιομορφίας της γάστρας, η οποία φέρει ακμές και αντιδιαβροχικές λωρίδες. Στην εικόνα 2.3 παρουσιάζεται το συγκεκριμένο είδος γάστρας, στην οποία είναι εμφανές οι ακμές και οι λωρίδες.



Εικόνα 2.3 Σχέδιο γάστρας ολισθάκατου

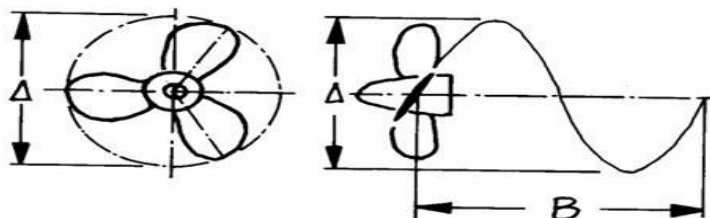
Η δεύτερη κατηγορία είναι τα λεγόμενα δίγαστρα σκάφη. Όπως υποδηλώνει και η ονομασία τους τα σκάφη αυτά αποτελούνται από δύο γάστρες, οι οποίες προσφέρουν περισσότερο χώρο στο κατάστρωμα και καλύτερη ευστάθεια. Μπορεί να ανήκουν σε οποιαδήποτε από τις προαναφερθέντες υποκατηγορίες των μονόγαστρων σκαφών. Η τρίτη κατηγορία αναφέρεται στα υδροπτερύγια σκάφη. Το υδροπτερύγιο σκάφος (hydrofoil craft) χρησιμοποιεί δύο ομάδες πτερύγων, οι οποίες αναπτύσσουν επαρκή άνωση ώστε να κρατηθεί η γάστρα πάνω από την επιφάνεια του νερού με αποτέλεσμα να αρθεί ο περιορισμός στην ταχύτητα και να βελτιωθεί η συμπεριφορά σε κυματισμούς. Στην τελευταία κατηγορία ανήκουν τα αερόστρωμα σκάφη. Τα αερόστρωμα σκάφη δημιουργούν ένα στρώμα αέρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, πάνω στο οποίο ολισθαίνουν.

Όσο αφορά το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται οι γάστρες, υπάρχουν τέσσερις επιλογές. Ο χάλυβας, το αλουμίνιο, το ξύλο και πλαστικό ενισχυμένο με ίνες. Ο χάλυβας είναι κυρίαρχος στις κατασκευές πλοίων λόγω του χαμηλού κόστους, της διαθεσιμότητάς του και της ευκολίας συγκόλλησης [10]. Και το αλουμίνιο ωστόσο έχει βρει αυξημένη εφαρμογή ως μέταλλο στη ναυπηγική ως αποτέλεσμα της υψηλής αναλογίας της αντοχής προς το βάρος

σε σύγκριση με το χάλυβα. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αλλαγή στο υλικό κατασκευής μικρών σκαφών. Η ναυπηγική τεχνολογία οδηγείται στην εφαρμογή των σύνθετων υλικών και ειδικότερα των ενισχυμένων με ίνες πλαστικών με το κωδικό όνομα Fiber Reinforced Plastics (FRP). Πρόκειται για ένα βασικό υλικό, τη λεγόμενη μήτρα (matrix), στην οποία βρίσκονται ίνες ενός άλλου υλικού είτε άτακτα διανεμημένες είτε με κάποιο συγκεκριμένο προσανατολισμό.

2.2.2 Σύστημα πρόωσης

Η έλικα η αλλιώς προπέλα αποτελεί το πιο διαδεδομένο σύστημα πρόωσης. Ενώνεται με την προωστήρια μηχανή μέσω ενός άξονα. Οι προπέλες των πλοίων διαφοροποιούνται ανάλογα με τον αριθμό των λεπίδων που έχουν, τη διάμετρό τους⁵, το βήμα τους⁶, την πλευρική απόκλιση⁷ και το υλικό κατασκευής τους και είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την σταθερότητα, τον χρόνο πλαναρίσματος, την οικονομία στο καύσιμο και την ταχύτητα του σκάφους [11]. Στην εικόνα 2.4 παρουσιάζεται ένα σχέδιο προπέλας. Εάν ο κινητήρας δεν λειτουργεί στις προβλεπόμενες στροφές τότε έχει γίνει λάθος επιλογή προπέλας. Επιπλέον, μια προπέλα που προκαλεί περισσότερη αντίσταση στον κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου.



Εικόνα 2.4 Σχέδιο προπέλας. Δ: διάμετρος, Β: βήμα

2.2.3 Κινητήρας του οχήματος

Η ισχύς του κινητήρα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του. Ο κινητήρας ενός πλοίου διακρίνεται σε κινητήρα εσωτερικής καύσης και σε ηλεκτροκινητήρα. Ο ηλεκτροκινητήρας είναι αυτός που θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία. Αποτελείται από μαγνήτες στον πυρήνα του και πηνία στην περιφέρεια του πυρήνα ή το ανάποδο. Η μεταφορά ρεύματος μέσω των πηνίων αναγκάζει την κίνηση των μαγνητών σε συγκεκριμένη

⁵ Η διάμετρος της προπέλας είναι η διάμετρος της περιφέρειας, που διαγράφουν τα φτερά της.

⁶ Το βήμα είναι η απόσταση, που διανύει η προπέλα σε στέρεο έδαφος, διαγράφοντας μια πλήρη περιστροφή.

⁷ Με τον όρο πλευρική απόκλιση εννοούμε το ποσό σε μοίρες που είναι διπλωμένο ένα φτερό της προπέλας.

φορά και ταχύτητα ρυθμιζόμενη από φάσεις. Οι ηλεκτροκινητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στους κινητήρες χωρίς ψήκτρες (brushes) και στους κινητήρες με ψήκτρες. Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες είναι πιο αποδοτικοί, πιο ακριβοί και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής λόγω του ότι δεν αποτελούνται από ψήκτρες που φθείρονται. Οι προδιαγραφές τους διακρίνονται σε:

- Βαθμολογία Κν που ορίζεται ως οι στροφές ανά βολτ
- Το φάρδος
- Το ύψος
- Αριθμός περιελίξεων των πηνίων

Αναλυτικότερα υψηλός αριθμός στροφών ισοδυναμούν με μεγάλες ταχύτητες αλλά χαμηλή ιπποδύναμη. Το φάρδος και το ύψος επίσης επηρεάζουν την περιστροφική δύναμη ανάλογα. Μεγάλο φάρδος του κινητήρα ισοδυναμεί με εφαρμογή της ροπής περιμετρικά με αποτέλεσμα μεγαλύτερη δύναμη περιστροφής. Τέλος ο αριθμός περιελίξεων στο πηνίο προκαλεί μεγαλύτερη ώθηση και απόθεση των μαγνητών στο εσωτερικό του κινητήρα το οποίο επιφέρει μεγαλύτερο ποσό ιπποδύναμης.

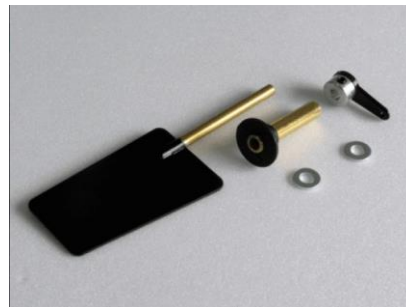
Ο κινητήρας συνδέεται με την προπέλα μέσω ενός άκαμπτου άξονα. Ο άξονας διέρχεται μέσα από μία τρύπα στην πρύμνη και έχει στις δύο πλευρές του περικόχλια και λάστιχο για αδιαβροχοποίηση του εξωτερικού σωλήνα. Είναι σημαντικό να βρίσκεται σε ευθεία με τον άξονα του ηλεκτροκινητήρα ώστε να υπάρχουν ελάχιστες απώλειες στην ροπή. Η διάμετρός του αντιστοιχεί στη διάμετρο του άξονα της μηχανής. Συνδέεται με τον ηλεκτροκινητήρα μέσω ενός μεταλλικού συνδέσμου, ο οποίος μπορεί να είναι σταθερός (solid coupler) ή εύκαμπος (flex coupler) ή να έχει την δυνατότητα περιστροφής (coupler joint) (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5 Ηλεκτροκινητήρας σε σύνδεση με μεταλλικό σύνδεσμο και τον άξονα προπέλας

2.2.4 Πηδάλιο

Προκειμένου να επιτευχθεί η ικανότητα του σκάφους να περιστρέφεται, εγκαταστάθηκε στην πρύμνη του το πηδάλιο. Καθώς το νερό εκτοπίζεται προς τα πίσω από την προπέλα, το πηδάλιο του δίνει φορά είτε προς τα δεξιά είτε προς τα αριστερά με αποτέλεσμα την στροφή του πλεούμενου. Για την μετακίνηση του πηδαλίου χρησιμοποιείται ένας σερβοκινητήρας. Τέλος για να επιτευχθεί αδιαβροχοποίηση εισάγονται πλαστικά περικόχλια στο πάνω και κάτω μέρος του άξονα (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6 Το πηδάλιο με τον άξονα και τα πλαστικά περικόχλια

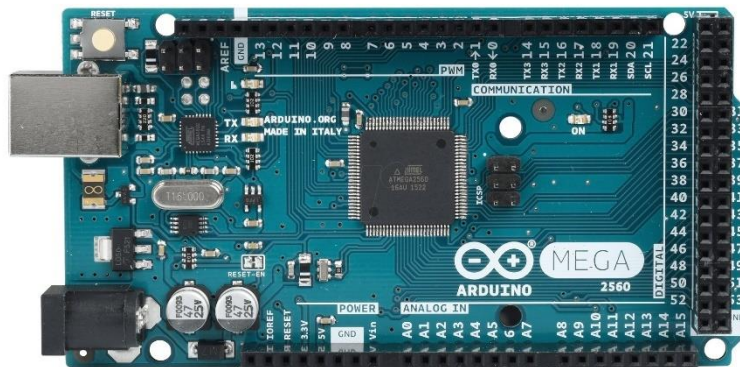
2.3 Τομέας ηλεκτρονικών εξαρτημάτων

Τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα είναι υπεύθυνα για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Αντιλαμβάνονται το εξωτερικό περιβάλλον μέσω αισθητήρων, εκτελούν τους απαραίτητους υπολογισμούς και μεταφέρουν τα σήματα απαραίτητα για την κίνηση των μηχανικών μονάδων.

2.3.1 Arduino Mega R3

Το Arduino mega είναι μια πλακέτα μικροεπεξεργαστή η οποία έχει την δυνατότητα εκτέλεσης προγραμμάτων μέγιστου μεγέθους 256 KB. Βασίζεται στον επεξεργαστή ATmega2560 με κύκλο ρολογιού 16 MHz, οποίος σε συνδυασμό με έναν κρυσταλλικό ταλαντωτή μπορεί να φτάσει περίπου τους 117.000 υπολογισμούς το δευτερόλεπτο [12]. Διαθέτει μνήμη SRAM (static random access memory) 2k bytes για την αποθήκευση των μεταβλητών του προγράμματος και μνήμη EEPROM 1k byte, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον χρήστη για αποθήκευση μακροχρόνιας πληροφορίας.

Δίνεται η επιλογή τριών τρόπων επικοινωνίας με άλλες πλακέτες. Η σύνδεση μπορεί να επιτευχθεί σειριακά χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε από τις τρεις διαθέσιμες σειριακές θύρες ή με το I2C (Inter-Integrated Circuit) πρωτόκολλο ή με το SPI (Serial Peripheral Interface). Διαθέτει 54 ψηφιακά pins, τα οποία έχουν την δυνατότητα να βρεθούν σε κατάσταση είτε εισόδου είτε εξόδου για την αποκωδικοποίηση ή κωδικοποίηση ψηφιακού σήματος, και 16 αναλογικά pins τα οποία υποστηρίζουν μόνο κατάσταση εισόδου για αναλογικό σήμα (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7 Η πλακέτα Arduino Mega 2560 με αναγραφόμενες τις ονομασίες των pin

Τα ψηφιακά pins μπορούν να λειτουργούν και ως ψευδο-αναλογικές έξοδοι χρησιμοποιώντας το PWM (Pulse Width Modulation). Είναι ο τρόπος κατά τον οποίο το ψηφιακό σήμα μεταβάλλει τις τιμές του με πιο γρήγορο ρυθμό ώστε να προσεγγίζει ένα αναλογικό σήμα. Επιπλέον διαθέτει:

- Ένα pin V_{in} για το σκοπό της εξωτερικής τροφοδοσίας ρεύματος για την λειτουργία της πλακέτας με ελάχιστη και μέγιστη τάση τροφοδοσίας 6 και 20 βολτ αντίστοιχα

- Δύο pin 5V και 3V με μέγιστη μεταφορά ρεύματος 500 mA και 50 mA αντίστοιχα, για το σκοπό της τροφοδοσίας άλλων πλακετών
- 5 Ground pins για την γείωση
- 1 θύρα usb για την επικοινωνία με εξωτερική συσκευή

Για τον προγραμματισμό του Arduino χρησιμοποιείται η γλώσσα Wiring, η οποία αφομοιώνει στοιχεία από την C και την C++. Η δομή της είναι ίδια με αυτή της C και υποστηρίζει τις περισσότερες βιβλιοθήκες της. Για την δημιουργία των προγραμμάτων στη γλώσσα wiring, έχει αναπτυχθεί από την κατασκευάστρια εταιρία του Arduino, το λογισμικό Arduino IDE, το οποίο θα αναλυθεί περαιτέρω παρακάτω.

2.3.2 Πλακέτα GPS

Η πλακέτα GPS (Global Positioning System) είναι η μονάδα που παρέχει στο σύστημα τα δεδομένα τοποθεσίας του στην γη σε μορφή γεωγραφικού μήκους και πλάτους. Περιέχει μια κεραία μικροταινίας (patch antenna), η οποία λαμβάνει σήματα μέσω μικροκυμάτων τόσο από επίγεια ραντάρ όσο και από τους δορυφόρους που έρχονται σε τροχιά γύρω από την γη. Οι επίγειοι σταθμοί γνωρίζουν κάθε στιγμή την θέση των δορυφόρων σε τροχιά και την μεταδίδουν στις κεραίες, οι οποίες είναι διαμορφωμένες να αποκωδικοποιούν τα σήματα GPS. Γνωρίζοντας την θέση των δορυφόρων είναι δυνατό να βρεθεί η ακριβής θέση μιας μονάδας GPS συγκρίνοντας την απόσταση αυτής με τουλάχιστον τεσσάρων δορυφόρων με απόκλιση μόνο μερικών μέτρων. Συγκεκριμένα υπολογίζεται ο χρόνος που παρέρχεται μέχρι να φτάσει ένα σήμα από τον κάθε δορυφόρο ξεχωριστά [13].

Ο αλγόριθμος στα συστήματα GPS αποκωδικοποιεί τα σήματα που λαμβάνονται από την κεραία και παράγει τις λεγόμενες προτάσεις NMEA (National Marine Electronics Association) [14]. Πρόκειται για ένα πρότυπο που έχει αναπτύξει η Εθνική Ένωση Ηλεκτρονικών Ναυτιλίας και καθορίζει την διασύνδεση μεταξύ διαφόρων κομματιών ηλεκτρονικού εξοπλισμού ναυτιλίας. Η πλειοψηφία των προγραμμάτων που παρέχουν πληροφορίες θέσης σε πραγματικό χρόνο κατανοούν και αναμένουν ότι τα δεδομένα είναι σε μορφή NMEA. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν το πλήρες πακέτο PVT (θέση, ταχύτητα, χρόνος) που υπολογίζεται από τον δέκτη GPS.

Η λογική του NMEA είναι να στείλει μια γραμμή δεδομένων που ονομάζεται πρόταση και είναι εντελώς αυτοτελής και ανεξάρτητη από άλλες προτάσεις. Κάθε πρόταση αντιστοιχεί σε μια κατηγορία συσκευής και η εταιρεία παρέχει επίσης την δυνατότητα

ορισμού αποκλειστικών προτάσεων για χρήση. Όλες οι τυπικές προτάσεις έχουν ένα πρόθεμα δύο γραμμάτων που ορίζει τη συσκευή που χρησιμοποιεί αυτόν τον τύπο πρότασης. (Για δέκτες gps το πρόθεμα είναι GP), το οποίο ακολουθείται από μια ακολουθία τριών γραμμάτων που ορίζει το περιεχόμενο της πρότασης. Μερικές από τις πληροφορίες που εμπεριέχουν είναι ο αριθμός των συνδεδεμένων δορυφόρων, το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, την ημερομηνία και ώρα αποστολής, το υψόμετρο και την ταχύτητα του δέκτη.

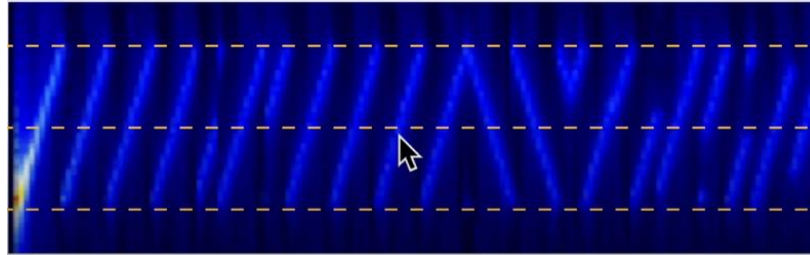
Στην πλακέτα GPS ενσωματώνεται και μια ηλεκτρονική πυξίδα η αλλιώς μια μονάδα IMU (inertial measurement unit). Σκοπός του IMU είναι να μετρήσει την κυκλική κίνηση και τον προσανατολισμό ενός αντικειμένου και το πετυχαίνει αυτό υπολογίζοντας την απόσταση που έχει ένα σημείο σχετικά με ένα σημείο αναφοράς, στο δισδιάστατο ή το τρισδιάστατο πεδίο. Το IMU αποτελείται από δύο έως τρεις αισθητήρες, το μαγνητόμετρο, το επιταχυνσιόμετρο και το γυροσκόπιο. Στο σύστημά μας χρησιμοποιούμε το μαγνητόμετρο, το οποίο αξιοποιεί τους μαγνητικούς πόλους της γης καταγράφοντας την αλλαγή στην τάση ενός φύλλου μετάλλου. Αυτή η μέθοδος καλείται Hall effect και αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τρόπο μέτρησης προσανατολισμού.

2.3.3 Διασύνδεση σταθμού βάσης και συστήματος

Για την απομακρυσμένη επικοινωνία του σταθμού βάσης με το σύστημα στο θαλάσσιο όχημα χρησιμοποιήθηκαν δύο πομποδέκτες με τεχνολογία Lora (Long Range). Το LoRa είναι μια τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης κατά την οποία ο αποστολέας στέλνει μικρά πακέτα δεδομένων (0.3 kbps με 5.5 kbps) σε έναν δέκτη από μεγάλη απόσταση. Βρίσκεται στο φυσικό στρώμα της δικτυακής επικοινωνίας OSI και χρησιμοποιεί έναν διαφορετικό τρόπο διαμόρφωσης της πληροφορίας στο ψηφιακό σήμα προς αποστολή, ο οποίος δίνει την δυνατότητα στο σήμα να διανύσει μεγάλες αποστάσεις μέχρι να εξασθενήσει.

Τρεις είναι οι πιο διαδεδομένες τρόποι διαμόρφωσης ραδιοσημάτων, ο Amplitude shift keying (ASK), ο Frequency shift keying (FSK) και ο Phase shift keying (PSK). Σύμφωνα με τον ASK αλλάζει μόνο το μήκος του κύματος ενώ κατά τον FSK υπόκειται σε διαμόρφωση μόνο η συχνότητα του κύματος. Τέλος στον PSK τα δυαδικά σύμβολα 0 και 1 αναπαριστώνται με αλλαγές στην φάση του σήματος. Από την άλλη, το LoRa διαμορφώνει το σήμα με ένα ξεχωριστό τρόπο που ονομάζεται Chirp spread spectrum (CSS) [15]. Οι τεχνικές εξάπλωσης φάσματος (Chirp spread spectrum) είναι μέθοδοι με τις οποίες ένα σήμα

διαδίδεται σκόπιμα στον τομέα συχνοτήτων. Ένα chirp, που συχνά ονομάζεται σήμα σάρωσης, είναι ένας τόνος στον οποίο η συχνότητα αυξάνεται και μειώνεται με το χρόνο. Για παράδειγμα, ένα σήμα μεταδίδεται σε σύντομες ριπές, αυξομειώνοντας τις συχνότητες σε μια ψευδοτυχαία ακολουθία. Στην εικόνα 2.8 παρουσιάζεται ένα σήμα Lora διαμορφωμένο με την τεχνολογία CSS.



Εικόνα 2.8 Σήμα Lora διαμορφωμένο με την τεχνολογία CSS

Είναι σημαντικό να κατανοηθούν κάποιοι βασικοί όροι, οι οποίοι εξηγούν τον ρυθμό διαμόρφωσης του σήματος με CSS. Το σύμβολο αναπαριστά ένα η περισσότερα bits δεδομένων. Ο ορισμός του παράγοντα διάδοσης (spreading factor) χρησιμοποιείται για να περιγράψει πόσα bits δεδομένων πρόκειται να μεταφερθούν ανά σύμβολο. Για παράδειγμα ένας παράγοντας διάδοσης των 7 bit διαιρεί το σύμβολο σε $2^{SF} = 2^7$ chips. Το εύρος ζώνης χρησιμοποιείται εναλλακτικά με το ρυθμό chip. Για παράδειγμα εύρος ζώνης 125 kHz σημαίνει 125.000 chips/s. Ο ρυθμός δεδομένων υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

Rb = ρυθμός bit,

CR = ρυθμός code,

SF = spreading factor,

BW = εύρος ζώνης.

$$Rb \left(\frac{bits}{sec} \right) = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * \frac{4}{(4 + CR)}$$

Εξίσωση 2.5

2.4 Πλατφόρμες ανάπτυξης λογισμικού

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι πλατφόρμες που χρησιμοποιήθηκαν για τον προγραμματισμό των ηλεκτρονικών μονάδων του συστήματος και την σχεδίαση του πλάνου και των υλικών που απαιτήθηκαν για την ολοκλήρωση του έργου. Πρόκειται για γνώριμες

πλατφόρμες δωρεάν διανομής ή επιλογή εγγραφής μέσω ιδρύματος πανεπιστημίου και εύκολες στην χρήση και κατανόηση.

2.4.1 Arduino IDE

Πρόκειται για το μοναδικό λογισμικό ανοιχτού κώδικα που ανέπτυξε η ομάδα του Arduino και επικεντρώνεται στον προγραμματισμό των συσκευών Arduino. Διαθέτει ειδικές βιβλιοθήκες και εντολές που γραφούν στους καταχωρητές των ειδικά διαμορφωμένων μικροεπεξεργαστών που συνθέτουν τις μονάδες Arduino. Χρησιμοποιεί την γλώσσα Wiring, η οποία αφομοιώνει στοιχεία από την C και C++ και αξιοποιεί όλες τις γνωστές βιβλιοθήκες από τις δύο προγραμματιστικές γλώσσες. Βασική εργασία είναι να θέσει σε λειτουργία έναν βρόχο κατά τον οποίο κάθε επανάληψη του είναι ένας κύκλος ρολογιού του επεξεργαστή του Arduino. Το εν λόγω λογισμικό λειτουργεί σε περιβάλλοντα Windows, Mac OS X, και Linux, ενώ η κατασκευή του βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Παράλληλα διαθέτει δυνατότητα εκτύπωσης και αποστολής μηνυμάτων μέσω μια σειριακής οθόνης σε ζωντανή ροή καθώς λειτουργεί ο βρόχος.

2.4.2 Fusion 360

Το Fusion 360 είναι λογισμικό σχεδίασης δισδιάστατων ή τρισδιάστατων ψηφιακών μοντέλων βασισμένο στην αποθήκευση στο Cloud με σκοπό την κατασκευή ή την εκτύπωση αυτών των προϊόντων. Το Fusion 360 συνδυάζει τη μοντελοποίηση οργανικών σχημάτων, τον μηχανικό σχεδιασμό και την κατασκευή σε ένα ολοκληρωμένο πακέτο. Δίνει την δυνατότητα υπολογισμού μετρικών όπως τον όγκο, το εμβαδόν, την κλίση, την πυκνότητα κ.α. χρησιμοποιώντας ενσωματωμένους πολύπλοκους αλγόριθμους και μια ογκώδη βάση δεδομένων με χαρακτηριστικά διαφόρων υλικών.

2.4.3 Fritzing

Το Fritzing είναι λογισμικό ανοιχτού κώδικα, το οποίο επιτρέπει την σχεδίαση κυκλωμάτων και ηλεκτρονικών πλακετών και την εξαγωγή αυτών σε μορφή εικόνας ή μορφής κατάλληλης για εκτύπωση πλακέτας. Η διεπαφή του είναι ευκολόχρηστη και επιτρέπει στον χρήστη να κατανοήσει με σαφήνεια τις συνδέσεις μεταξύ των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στο σύστημα. Επιπλέον διαθέτει ολοκληρωμένα μοντέλα των μικροεπεξεργαστών Arduino και άλλων ηλεκτρονικών για την τοποθέτησή τους στο πλάνο του κυκλώματος.

2.4.4 Visual Studio Code

Το Visual Studio Code είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας πηγαίου κώδικα που και είναι διαθέσιμο για Windows, macOS και Linux. Περιέχει ενσωματωμένη υποστήριξη για JavaScript, TypeScript και Node.js και διαθέτει επεκτάσεις για άλλες γλώσσες (όπως C++, C#, Java, Python, PHP, Go). Μειώνει σημαντικά τους χρόνους ανάπτυξης κώδικα συμπληρώνοντας αυτόματα κομμάτια με το πάτημα ενός κουμπιού ή οργανώνοντας την διάταξη του κώδικα με την βοήθεια ενσωματωμένων αλγορίθμων.

2.4.5 Code::Blocks

Το Code::Blocks είναι ένα δωρεάν λογισμικό προγραμματισμού ανοιχτού κώδικα στις γλώσσες C/C++ και Fortran IDE. Παρέχει πληθώρα βασικών συναρτήσεων και μεταγλωττιστές με αποτέλεσμα την εύκολη και γρήγορα σύνθεση και εκτέλεση κώδικα. Έχει σχεδιαστεί για να είναι επεκτάσιμο και πλήρως διαμορφώσιμο. Οποιοδήποτε είδος λειτουργικότητας μπορεί να προστεθεί εγκαθιστώντας ή κωδικοποιώντας ένα πρόσθετο. Για παράδειγμα, η λειτουργία μεταγλώττισης και εντοπισμού σφαλμάτων παρέχεται από πρόσθετα.

2.4.6 Βιβλιοθήκη RadioHead Packet Radio

Η βιβλιοθήκη RadioHead Packet Radio ή αλλιώς RF95 παρέχει μια πλήρη αντικειμενοστραφή βιβλιοθήκη για την αποστολή και λήψη πακετοποιημένων μηνυμάτων μέσω μιας ποικιλίας κοινών μονάδων ραδιοεπικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένου του LoRa. Πρόκειται για μια βιβλιοθήκη της γλώσσας C++, η οποία προσφέρει έτοιμες μεθόδους για αποκωδικοποίηση και κωδικοποίηση των ραδιοσημάτων LoRa.

2.5 Σύστημα κλειστού βρόγχου PID

Ένα σύστημα κλειστού βρόγχου PID είναι η μαθηματική μοντελοποίηση ενός φυσικού συστήματος με σκοπό την έξοδο μιας επιθυμητής απόκρισης. Δέχεται ένα σήμα στο πεδίο του χρόνου ως είσοδο, το οποίο μετατρέπεται στο πεδίο του Laplace. Στην συνέχεια σχηματίζεται η έξοδος από το άθροισμα τριών παραμέτρων, ενός όρου P (Proportional) ανάλογου του σφάλματος, ενός όρου I (Integral) ανάλογου του ολοκληρώματος του σφάλματος και ενός όρου D (Derivative) ανάλογου της παραγώγου του σφάλματος. Ο αναλογικός όρος P βοηθά στην βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος τόσο στην μεταβατική όσο και στην μόνιμη κατάσταση, αλλά αδυνατεί να εξαλείψει πλήρως το μόνιμο σφάλμα. Ο ολοκληρωτικός όρος I χρησιμοποιείται σε συστήματα που παρουσιάζουν σφάλμα

στην μόνιμη κατάσταση, αφού για όσο χρόνο υπάρχει σφάλμα, η έξοδος του ελεγκτή λόγω ολοκληρώματος αυξάνεται με αποτέλεσμα την εξάλειψη του σφάλματος. Ο διαφορικός όρος D αυξάνει την ευστάθεια του συστήματος και βελτιώνει τη συμπεριφορά του κατά την μεταβατική κατάσταση. Κάθε ελεγκτής έχει σαν στόχο τη συνεχή ταύτιση της πραγματικής τιμής της εξόδου της διαδικασίας με την επιθυμητή τιμή, ανεξαρτήτως των όποιων διαταραχών προκύψουν κατά την διαδικασία.

2.6 Τρισδιάστατη εκτύπωση

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια αυτοματοποιημένη διαδικασία κατασκευής υλικών, όπου ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής δημιουργεί ένα φυσικό μοντέλο που βασίζεται σε ψηφιακά δεδομένα (ένα τρισδιάστατο αντικείμενο). Υπάρχει μια σειρά από διάφορες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, αλλά η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη που ονομάζεται fused deposition modeling (FDM) είναι απλή: ένα αντικείμενο δημιουργείται στρώμα-στρώμα λιώνοντας ένα σκέλος πλαστικού [16]. Αναλυτικότερα, το πλαστικό εισάγεται σε μορφή σωληνάριου και λιώνεται σε ένα θερμαινόμενο δοχείο αποτελούμενο από θερμοαγωγά υλικά. Ύστερα αποβάλλεται από ένα μικρής διαμέτρου στόμιο (nozzle). Το εξάρτημα που εκτελεί όλη αυτή την διαδικασία ονομάζεται εξωθητήρας (extruder). Ο εξωθητήρας κινείται με ακρίβεια με την χρήση βηματικών κινητήρων (stepper motor) και εξωθεί το υλικό μέσω του nozzle σε μία θερμαινόμενη βάση (heatbed). Σκοπός της θερμαινόμενης βάσης είναι να κρατάει σταθερό το εκτυπωμένο υλικό. Οι θερμοκρασίες στην βάση και στον εξωθητήρα καθορίζονται από το μοντέλο του εκτυπωτή. Ακολουθούν οι βασικότερες ρυθμίσεις για την εκτύπωση ενός ψηφιακού μοντέλου.

Το ύψος του στρώματος (Layer height) έχει σημαντικό αντίκτυπο τόσο στους χρόνους εκτύπωσης όσο και στο συνολικό φινίρισμα της επιφάνειας του εκτυπωμένου αντικειμένου. Οι υψηλότερες τιμές οδηγούν σε πιο γρήγορες εκτυπώσεις και πιο ορατά στρώματα στην επιφάνεια του αντικειμένου. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα εμφανές σε επιφάνειες που είναι σχεδόν παράλληλες με την βάση εκτύπωσης. Τις περισσότερες φορές, προτιμώνται ύψη στρώσης 0,15 mm - 0,20 mm. Το χαμηλότερο ύψος στρώσης οδηγεί σε πιο λεπτομερείς εκτυπώσεις (λιγότερο αισθητές στρώσεις), ωστόσο, ο χρόνος εκτύπωσης παρατείνεται. Μια ακόμη παρεμφερή βασική ρύθμιση είναι τα κάθετα στρώματα. Ορίζουν το πάχος των εξωτερικών τοιχωμάτων του μοντέλου.

Η πλήρωση (Infill) επηρεάζει τον χρόνο εκτύπωσης, την ανθεκτικότητα του εκτυπωμένου αντικειμένου και του νήματος που καταναλώνεται. Το Infill ορίζει το ποσό του υλικού που θα καταναλωθεί στο εσωτερικό του σκελετού του μοντέλου. Αναγράφεται ως ποσοστό, από 0 % που σημαίνει ένα εντελώς κοίλο αντικείμενο, μέχρι 100%. Συνήθως χρησιμοποιείται 10-20%.

Το Brim είναι μια ρύθμιση του εκτυπωτή, η οποία αυξάνει την πρόσφυση του εκτυπωμένου υλικού στην βάση εκτύπωσης. Είναι μια πρόσθετη επίπεδη επιφάνεια που θα εμποδίσει το αντικείμενο να παραμορφωθεί ή να αποσπαστεί στη μέση της εκτύπωσης. Μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα όταν τελειώσει η εργασία εκτύπωσης.

2.7 Σύνοψη κεφαλαίου

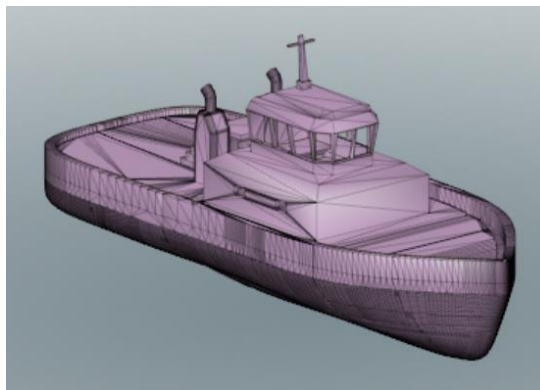
Η θεωρία αποτελεί το θεμέλιο σε μία κατασκευή συστήματος και η κατανόηση της για την εφαρμογή της μεθοδολογίας αναπόσπαστο κομμάτι. Την ανάλυση της θεωρίας πίσω από την υλοποίηση διαδέχεται το κεφάλαιο 3, στο οποίο αναφέρονται και περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των φυσικών υλικών και ηλεκτρονικών μονάδων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Το κεφάλαιο 3 χωρίζεται σε υποενότητες. Σε κάθε μια αντιστοιχεί και η επεξήγηση ενός μέρους της υλοποίησης του σκάφους.

Κεφάλαιο 3 – Κατασκευή του υλικού μέρους

Ως υλικό μέρος αναφερόμαστε στα φυσικά εξαρτήματα που απαρτίζουν το σύστημά μας. Σε αυτή την ενότητα γίνεται αναφορά στην διαδικασία που ακολούθησε για την συναρμολόγηση και κατασκευή του θαλάσσιου οχήματος, στον λόγο που επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα υλικά καθώς και τον λόγο ύπαρξής τους στο τελικό αποτέλεσμα.

3.1 Το θαλάσσιο όχημα

Βασικός πυρήνας του εγχειρήματός μας είναι το θαλάσσιο όχημα. Πρόκειται για ένα μοντέλο ρυμουλκού πλοίου με διαστάσεις: μήκος 421,91 mm, πλάτος 200,05 mm και ύψος 207,75 mm. Ζυγίζει 2,2 kg χωρίς φορτίο ενώ μπορεί να φτάσει πάνω από 3 kg το μεικτό βάρος. Η γάστρα του ανήκει στην κατηγορία των σκαφών ημικτοπίσματος. Το μοντέλο της σχεδιάστηκε στο λογισμικό Fusion 360 βασισμένο στο μοντέλο του Justin Hinnen από την πλατφόρμα Thingiverse και το αρχείο έγινε εξαγωγή σε μορφή κατάλληλη για τρισδιάστατη εκτύπωση. Το μοντέλο ρυμουλκού επιλέχθηκε γιατί διαθέτει επαρκή χωρητικότητα για τα απαραίτητα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση αλλά και γιατί είναι πιο σταθερό κατά την πλεύση. Διαθέτει μια διαμορφωμένη εισαγωγή για τον άξονα του κινητήρα, μια υποδοχή για τον σερβοκινητήρα και μια θέση στην οποία μπορεί να εισαχθεί ο άξονας του πηδαλίου. Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται το μοντέλο του σκάφους στην τελική του μορφή.



Εικόνα 3.1 Το μοντέλο του ρυμουλκού πλοίου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία

Η τρισδιάστατη εκτύπωση πραγματοποιήθηκε από εκτυπωτή μοντέλου Prusa I3. Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μοντέλου παραθέτονται στον παρακάτω πίνακα 3.1:

Μέγεθος εκτύπωσης	250*210*210mm
Πλάτος layer	0.1 – 0.4mm
Διάμετρος μύτης (nozzle)	0.4mm
Ακρίβεια	0.1mm
Μέγιστη θερμοκρασία μύτης	300°C
Μέγιστη θερμοκρασία κρεβατιού	120°C
Μέγιστη ταχύτητα εκτύπωσης	200mm/s
Πάχος νήματος	1.75mm
Τύπος νήματος	Οποιοδήποτε θερμοπλαστικό, συμπεριλαμβανομένων Nylon και Πολυκαρβονικό

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά του τρισδιάστατου εκτυπωτή Prusa I3

Η ύλη που χρησιμοποιήθηκε για την εκτύπωση είναι πλαστικό τύπου PLA (πολυγαλακτικό οξύ). Πρόκειται για βιοδιασπώμενο και βιοδραστικό θερμοπλαστικό αλειφατικό πολυεστέρα που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως το άμυλο καλαμποκιού (στις Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά), τις ρίζες ταπιόκα σε φλούδες ή το ζαχαροκάλαμο. Το PLA προσφέρει αδιαβροχοποίηση, είναι ανθεκτικό και κατάλληλο για κόλληση.

Η γάστρα τυπώθηκε με τις ακόλουθες ρυθμίσεις εκτύπωσης. Χρησιμοποιήθηκε 15% infill, 0,2 layer στο ύψος και 4 layers περιμετρικά ώστε να επιτευχθεί η αδιαβροχοποίηση. Επίσης, το συμπαγές στρώμα στην κορυφή ρυθμίστηκε στο 5 ενώ το κάτω στρώμα στο 4. Σε όλα τα κομμάτια χρησιμοποιήθηκε brim στα 8 χιλιοστά και ύψος 1 Layer. Ο συνολικός χρόνος εκτύπωσης ήταν 142 ώρες και 7 λεπτά . Τα συνολικά γραμμάρια εκτύπωσης ήταν 1920. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν PLA με διάμετρο σωληνάριου 1.75m. Τέλος, η θερμοκρασία του στομίου του εκτυπωτή ήταν 215 βαθμούς κελσίου και της βάση ήταν 70 βαθμούς κελσίου.

3.2 Το ηλεκτρικό κύκλωμα του συστήματος

Στο εσωτερικό της γάστρας τοποθετήθηκε το ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο εκτελεί την διαδικασία διατήρησης της σταθερής πορείας του σκάφους. Στην πλώρη βρίσκεται η βασικότερη μονάδα του κυκλώματος, το Arduino Mega. Ο μικροεπεξεργαστής του ATmega2560 υπολογίζει την γωνία κατεύθυνσης (heading angle) του πλοίου, την τοποθεσία του και την πορεία του μέσω ενός GPS και μιας ηλεκτρονικής πυξίδας που περιγράφεται

Για την ανάγκη προβολής στον σταθμό βάσης και καταγραφής σε πραγματικό χρόνο της πορείας του σκάφους προστέθηκε στο κύκλωμα ένας πομποδέκτης AV (audio/video) και μια αναλογική κάμερα με 700 TVL (television lines) και έξοδο μορφή βίντεο NTSC.

Τέλος για την κίνηση και την αλλαγή κατεύθυνσης του σκάφους τοποθετήθηκε ένας σέρβο κινητήρας με εμβέλεια στροφής 180 μοιρών ενώ για την εφαρμογή ώθησης χρησιμοποιήθηκε ένας brushless ηλεκτρικός κινητήρας των 750 κιλοβάτ σε σύνδεση με τον οδηγό του κινητήρα.

3.3 Κινητήρια εξαρτήματα σκάφους

Για την κίνηση του σκάφους επιλέχθηκε ένας brushless ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος εξωτερικής στροφής των 750 κιλοβάτ. Έχει διάμετρο 28 mm και ύψος 36 mm ενώ οι περιελίξεις του πηνίου είναι 11. Απαιτεί 7.4 με 11.1 βολτ για την ομαλή λειτουργία του και δύναται να καταναλώσει από 0.8 έως 20 αμπέρ. Η διάμετρος του άξονα περιστροφής του είναι 4 mm. Για τον έλεγχο του είναι υποχρεωτική η σύνδεση με την έξοδο του κυκλώματος ενός οδηγού ηλεκτροκινητήρα ή αλλιώς electronic speed controller (ESC). Ο ρόλος του ESC είναι η εναλλαγή των φάσεων στα εσωτερικά πηνία του κινητήρα ώστε να περιστρέψει τον άξονά του. Όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 3.2, το Arduino Mega στέλνει ένα σήμα PWM στο κύκλωμα του οδηγού, το οποίο το διανέμει στις 3 φάσεις του ηλεκτροκινητήρα. Όσο μεγαλύτερη διάρκεια έχει το σήμα, τόσο πιο γρήγορα περιστρέφεται ο άξονας.

Διάρκεια σήματος PWM	Ποσοστό ταχύτητας ηλεκτροκινητήρα (%)
1ms	0
1.5ms	50
2ms	100

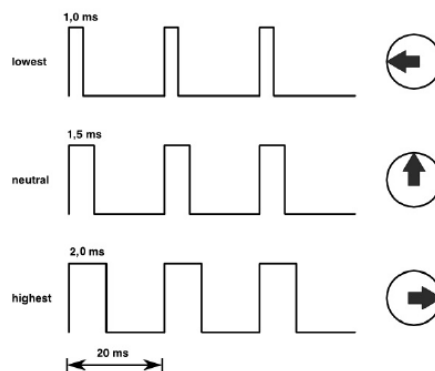
Πίνακας 3.2 Αντιστοίχιση διάρκειας σήματος PWM με την ταχύτητα του ηλεκτροκινητήρα

Το ESC που επιλέχθηκε υποστηρίζει την αρχιτεκτονική του ηλεκτροκινητήρα και ένταση ρεύματος έως 20 αμπέρ. Ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι επαρκής για την ταχύτητα κίνησης που επιθυμούμε κατά την εκτέλεση των δοκιμών. Ο χαμηλός αριθμός κιλοβάτ επιφέρει χαμηλό αριθμό στροφών και μεγαλύτερη δύναμη ώθησης, η οποία είναι ικανή να ξεπεράσει την αντίσταση των κυβικών νερού που εκτοπίζει το σκάφος κατά την πλεύση.

Ο ψηφιακός σερβομηχανισμός, που χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση του πηδαλίου, έχει εμβέλεια 180° όπου η ελάχιστη είναι 0° και η μέγιστη στις 180°. Για αυτή τη διατριβή η μέγιστη και η ελάχιστη θέση του πηδαλίου περιορίζονται στις τιμές από 70° έως 110°. Αυτό

είναι σημαντικό για να αποφευχθεί η υπέρβαση των ορίων στροφής. Ο σερβομηχανισμός πηδαλίου ελέγχεται και συνδέεται απευθείας σε μια ψηφιακή έξοδο του Arduino Mega.

Οι σερβομηχανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διατριβή είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο, αναλογικοί και ψηφιακοί σερβομηχανισμοί που χρησιμοποιούνται συνήθως σε τηλεκατευθυνόμενα οχήματα. Η ενεργοποίηση αυτών των σερβομηχανισμών πραγματοποιείται με ένα σήμα PWM. Ένα σήμα PWM είναι μια σειρά επαναλαμβανόμενων παλμών ρυθμιζόμενου πλάτους. Η περίοδος του παλμού είναι σταθερή στα 20 ms. Το πλάτος του παλμού καθορίζει τη θέση του σερβομηχανισμού. Για να μετακινηθεί ο σερβομηχανισμός στην ουδέτερη θέση, το πλάτος παλμού πρέπει να είναι 1,5ms. Για να γυρίσει στην ελάχιστη θέση του, το πλάτος παλμού πρέπει να είναι 1ms και για να τον γυρίσει στη μέγιστη θέση το πλάτος παλμού πρέπει να είναι 2ms. Στην εικόνα 3.3 φαίνεται η τοποθέτηση ενός σερβομηχανισμού χρησιμοποιώντας ένα σήμα PWM.



Εικόνα 3.3 Θέση ενός σερβομηχανισμού ανάλογα με το πλάτος παλμού του σήματος PWM

3.4 Τροφοδότηση συστήματος

Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής τροφοδοσία ρεύματος επί του σκάφους, είναι απαραίτητο να παρέχεται επαρκής ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από την μπαταρία. Η ποσότητα αυτή διαμορφώνεται από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μονάδων που απαρτίζουν το κύκλωμα του συστήματος. Οι υπολογισμοί πρέπει να γίνονται για κάθε μεμονωμένο καταναλωτή ενέργειας στο σκάφος. Η λεπτομερής ανάλυση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών καθενός ξεχωριστά βρίσκονται στον πίνακα 3.3. Ο πίνακας παρουσιάζει όλες τις ηλεκτρονικές μονάδες πάνω στο σκάφος και περιέχει λεπτομέρειες σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας. Κάθε σειρά εμφανίζει τη χρησιμοποιούμενη τάση σε βολτ, το μέγιστο ρεύμα σε αμπέρ και την προκύπτουσα ισχύ σε βατ. Όπως περιγράφεται στον πίνακα 3.3, η

μέγιστη κατανάλωση ενέργειας που δίνεται από τα φύλλα δεδομένων για κάθε εξάρτημα είναι 229,5466 W και η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι 20,879 A.

Για την τροφοδοσία του κυκλώματός του σκάφους χρησιμοποιήθηκε μια μπαταρία πολυμερών λιθίου (Li-Po, Lithium Polymer) με 8.4 βολτ στην πλήρη φόρτιση και 5.500 mAh χωρητικότητα. Ουσιαστικά είναι δύο μπαταρίες ενωμένες σε μια, ωστόσο η συγκεκριμένη τεχνική μεταφράζεται ως μία μπαταρία των 2S (series). Με την υπάρχουσα ποσότητα ενέργειας των 5.500 mAh, η μέγιστη χρήση μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.1.

$$\frac{\text{ενέργεια}}{\text{ένταση ρεύματος}} = \text{χρόνος χρήσης}$$

Εξίσωση 3.1

$$\frac{5500}{20879} = 0,26 \text{ h}$$

Λόγω του ότι κατά την φάση των δοκιμών λειτουργήσαμε τον κινητήρα στο 50% των δυνατοτήτων του η συνολική ένταση ρεύματος μειώνεται στο 10879 mAh και στις 0.50 h. Άρα η μπαταρία είναι σε θέση να διατηρήσει σε λειτουργία το σκάφος για μισή ώρα.

Εξάρτημα	Ισχύς [V]	Ένταση Ρεύματος [A]	Ενέργεια [W]
NEO-M8N GPS	3,6	0,023	0,0828
Arduino Mega	12	0,035	0,42
LORA32U4 II	3,3	0,12	0,396
KS-3518 Servo	6	0,2	0,72
Brushless DC Motor, ESC	11,1	20	222
Μετατροπέας UBEC DC/DC Step-Down	5	0,015	0,075
TS832 VTX (πομποδέκτης βίντεο)	15	0,22	3,3
RunCam Owl Plus Mini FPV Camera	10	0,25	2,5
Αμφίδρομος μετατροπέας με 8	-	-	-

κανάλια Logic Level			
Adafruit Μετατροπέας DC-DC Step-Down	3,3	0,016	0,0528
Αμφίδρομος μετατροπέας με 4 κανάλια Level Converter	-	-	-
Σύνολο:		20,879	229,5466

Πίνακας 3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων του συστήματος

Επιπρόσθετα στο σκάφος εγκαταστάθηκε διακόπτης ώστε να σταματάει την κυκλοφορία του ρεύματος όταν δεν το χρησιμοποιούμε και μια μονάδα μέτρησης τάσης σε συνδυασμό με ένα ρελέ. Σκοπός τους είναι να απενεργοποιήσουν το κύκλωμα στην περίπτωση που η τάση της μπαταρίας ξεπεράσει το κατώτατο όριο.

3.5 Μαγνητόμετρο

Για την πλοήγηση σε ένα σκάφος, είναι σημαντικό να γνωστοποιείται η τρέχουσα γωνία κατεύθυνσης του. Ο τρόπος υπολογισμού της απαιτεί μια μαγνητική πυξίδα. Οι πυξίδες είναι πολύ παλιά εργαλεία πλοήγησης καθώς αναφέρθηκαν για πρώτη φορά το 1040 μ.χ. Σήμερα, οι μαγνητικές πυξίδες έχουν αντικατασταθεί από ηλεκτρονικές πυξίδες, οι οποίες μπορούν να μετρήσουν το μαγνητικό πεδίο της γης και να υπολογίσουν την τρέχουσα κατεύθυνση (heading). Τα δεδομένα που παρέχονται από την ηλεκτρονική πυξίδα δύναται να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα αυτοματισμού. Αυτές οι μονάδες πυξίδας είναι ουσιαστικά αισθητήρες επιτάχυνσης με δύο ή τρεις άξονες.

Οι μονάδες ηλεκτρονικής πυξίδας που διατίθενται στο εμπόριο, όπως η HMC635210 ή η AK8975, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην υλοποίηση, έχουν ακρίβεια 1° - 2° , εάν δεν έχουν κίνηση βήματος (pitch) ή κύλισης (roll) ενώ μετρούν. Ενώ αν μεταβληθεί το βήμα ή η κύλιση κατά τη μέτρηση, δεν αντισταθμίζουν τη μεταβαλλόμενη γωνία του μαγνητικού πεδίου.

Η θέση του αισθητήρα στο σκάφος είναι πολύ σημαντική επειδή οι ηλεκτρονικές συσκευές προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές (ΗΜ) παρεμβολές. Οι ηλεκτρονικές συσκευές, όπως ο κινητήρας ή οι σερβομηχανισμοί, παράγουν ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο αποπροσανατολίζει τον αισθητήρα της πυξίδας. Αυτός είναι ο λόγος που ο αισθητήρας τοποθετείται στο μπροστινό τμήμα του πρωτοτύπου, όπου δεν επηρεάζεται η μέτρησή του.

3.6 Σύστημα GPS

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία το GPS χρησιμοποιείται για τη λήψη της τρέχουσας θέσης και την τρέχουσα ταχύτητα του σκάφους. Για να υπολογιστεί μια επιθυμητή πορεία είναι απαραίτητο να λαμβάνεται ως δεδομένο η τρέχουσα θέση GPS. Αυτός ο υπολογισμός περιγράφεται στην ενότητα 4.2.2.

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο GPS u-blox NEO M8N. Στο φύλλο δεδομένων αναφέρεται πως το NEO M8N έχει ακρίβεια τα 2 μέτρα. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο National Marine Electronics Association (NMEA) και έχει κατασκευαστεί για να λαμβάνει τα μηνύματα της προτεινόμενης ελάχιστης πρότασης C (RMC). Το RMC είναι η προτεινόμενη ελάχιστη πρόταση, η οποία λαμβάνει μόνο τα απαραίτητα δεδομένα GPS και μειώνει τη χρήση μνήμης στο Arduino MEGA. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από το RMC είναι η ώρα, η ημερομηνία, η θέση, η ταχύτητα σε κόμβους και η πορεία σε μοίρες. Για να ανακτηθούν τα δεδομένα GPS από τα ληφθέντα δεδομένα NMEA, η ληφθείσα πρόταση πρέπει να αναλυθεί και να μεταφραστεί. Τα δεδομένα GPS γράφονται σε μία πρόταση και χωρίζονται με ερωτηματικό. Η μονάδα GPS έχει ρυθμιστεί να λαμβάνει προτάσεις RMC με αναλογία 1 Hz ενώ το Arduino MEGA είναι προγραμματισμένο να προκαλεί διακοπή όταν υπάρχει διαθέσιμο νέο σήμα GPS.

3.7 Απομακρυσμένη επικοινωνία

Για την επικοινωνία του σταθμού βάσης με το σύστημα του σκάφους εγκαταστάθηκαν πομποδέκτες με τεχνολογία Lora. Πρόκειται για το μοντέλο lora32u4 II, το οποίο αποτελείται από έναν μικροελεγκτή Atmega 32u4 και έναν ρυθμιστή (chipset) σήματος Lora Semtech SX1276. Η συγκεκριμένη μονάδα επιλέχθηκε λόγω του χαμηλού κόστους, χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και μεγάλης εμβέλειας. Λειτουργεί στα 3.3 βολτ και έχει ρυθμιστεί να εκπέμπει και να λαμβάνει σήματα στην συχνότητα 868 Mhz με ενέργεια εκπομπής στα +13dBm.

Λόγω του ότι η σειριακή επικοινωνία με το Arduino πραγματοποιείται στα 5 βολτ, ανάμεσα στον σειριακό πομπό και δέκτη του Arduino και του lora32u4 τοποθετήθηκε ένας μετατροπέας στάθμης τάσης διπλής κατεύθυνσης 4 bit των 3.3 βολτ. Συνεπώς διασφαλίζεται η ακεραιότητα της μονάδας.

Η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να μεταφερθεί σε μία επικοινωνία Lora είναι 37.5 Kbps. Αυτό το όριο δεν αποτελεί εμπόδιο στην υλοποίηση μας διότι τα δεδομένα των αισθητήρων και οι συντεταγμένες που μεταφέρονται προς και από τον σταθμό βάσης είναι χαρακτηριστές μικρού μεγέθους και η περίοδος αποστολής είναι τα 5 δευτερόλεπτα.

3.8 Εποπτεία εξωτερικού περιβάλλοντος

Για το σκοπό καταγραφής του εξωτερικού περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο, εγκαταστάθηκε ένας πομπός βίντεο και ήχου. Ο πομπός TS832 της eachine ταίριαξε απόλυτα στο έργο μας καθώς είναι επαρκής για την εμβέλεια και τα δεδομένα που επιθυμούμε να στείλουμε. Εκπέμπει στην συχνότητα των 5.8 GHz και υποστηρίζει 32 κανάλια για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας βίντεο. Τα δεδομένα προέρχονται από μια κάμερα τύπου First-person view (FPV). Πρόκειται για το μοντέλο RunCam Owl Plus, μια αναλογική κάμερα των 700 τηλεοπτικών γραμμών (TVL), γωνία θέασης 150 μοιρών και διαμόρφωση σήματος στην μορφή NTSC. Η κάμερα προσφέρει αξιοπρεπής ανάλυση βίντεο, αρκετή ώστε ο παρατηρητής να μπορεί να διακρίνει τα στοιχεία του περιβάλλοντος μπροστά από το σκάφος. Στην εικόνα 3.4 φαίνεται ένα στιγμιότυπο της προβολής βίντεο στο σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας το λογισμικό VLC media player. Ο σταθμός βάσης εξοπλίστηκε με έναν δέκτη βίντεο ROTG02, ο οποίος έχει την ικανότητα να σαρώνει κανάλια στην συχνότητα 5.8 GHz ώσπου να πετύχει το υψηλότερο σήμα.



Εικόνα 3.4 Στιγμιότυπο της προβολής βίντεο σε πραγματικό χρόνο στο σταθμό βάσης

3.9 Μέτρα ασφαλείας

Για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα της υλοποίησης πάρθηκαν ορισμένα μέτρα. Τα μέτρα διακρίνονται σε αυτά που εφαρμόστηκαν στο υλικό και σε αυτά που εφαρμόστηκαν στο λογισμικό. Στον υλικό τομέα υπάρχει μεγάλος κίνδυνος βραχυκυκλώματος. Για αυτό τον

λόγο διασφαλίσαμε πως όλες οι συνδέσεις είναι κατάλληλα μονωμένες. Παράλληλα τα κυκλώματα των ηλεκτρικών μονάδων δέχονται το αναμενόμενο ποσό τάσης σύμφωνα με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους. Ανάμεσα στην σύνδεση μονάδων με διαφορά τάσης όπως 5 V με 3 V τοποθετήθηκε μετατροπέας τάσης. Επιπρόσθετα υφίσταται η ανάγκη προστασίας της μπαταρίας από την ενδεχόμενη κένωση. Η τάση της μπαταρίας δεν επιτρέπεται να μειωθεί παρακάτω από μία συγκεκριμένη τιμή (στην περίπτωση μας 7,4 V). Για τον λόγο αυτό εγκαταστήσαμε έναν αισθητήρα τάσης, ο οποίος ελέγχει την τάση της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή. Στην περίπτωση που η τάση περάσει το κατώτατο όριο, η τροφοδοσία αποκόπτεται με την χρήση ενός διακόπτη ρελέ.

Στο λογισμικό διασφαλίσαμε την ακεραιότητα των δεδομένων της ασύρματης επικοινωνίας χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη κρυπτογράφησης CryptoLW-RK, η οποία συνδυάζεται μαζί με την RF95. Βασίζεται στην μέθοδο κρυπτογράφησης block cipher, η οποία αποτελείται από δύο αλγόριθμους, έναν κρυπτογράφησης και έναν απόκρυπτογράφησης. Και οι δύο αλγόριθμοι δέχονται δύο ορίσματα. Ένα μπλοκ⁸ μεγέθους n bit και ένα κλειδί μεγέθους k bits και παράγουν ένα μπλοκ εξόδου n -bit. Με αυτό τον τρόπο εξαλείφουμε την πιθανότητα υποκλοπής δεδομένων ή χειρισμού του σκάφους από αγνώστους.

3.10 Ανάλυση SWOT

Η ανάλυση SWOT αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της στρατηγικής σχεδιασμού ενός συστήματος. Όπως προκύπτουν από τα αρχικά του αρκτικόλεξου, παραθέτουμε τα δυνατά και τα αδύναμα σημεία του συστήματος, τις ευκαιρίες που προκύπτουν από την ολοκλήρωσή του αλλά και του κινδύνους που εγκυμονεί ένα τέτοιο εγχείρημα. Μέσα από αυτές τις πληροφορίες ο δημιουργός κατανοεί καλύτερα το έργο, το οποίο έχει αναλάβει και παίρνει πιο σωστές αποφάσεις σχετικά με τον σχεδιασμό του.

3.10.1 Δυνάμεις και αδυναμίες

Οι δυνάμεις η αλλιώς τα πλεονεκτήματα της παρούσας υλοποίησης είναι πολλά και προβλέπεται να επηρεάσουν θετικά τον τρόπο με τον οποίο διεξάγονται ορισμένες διαδικασίες. Αρχικά το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε βασίζεται σε απλές εντολές και θεωρίες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από την επιστημονική κοινότητα με σκοπό

⁸ Ομάδες bit σταθερού μήκους.

την ανάπτυξη πιο περίπλοκων και μεγαλύτερης ακρίβειας αλγορίθμων. Ακόμα το σκάφος έχει την δυνατότητα να κινηθεί εν μέσω κακοκαιρίας με μικρή απόκλιση. Ο σχεδιασμός και το υλικό κατασκευής του, του επιτρέπει καταναλώνοντας μικρό ποσό ηλεκτρικής ενέργειας να κινείται σε αξιοπρεπής ταχύτητα. Επιπλέον η κάμερα επί του σκάφους προσφέρει στον χειρίστη την ικανότητα επίβλεψης του εξωτερικού περιβάλλοντος. Τέλος το κόστος του σκάφους είναι χαμηλό. Συγκρίνοντας το κόστος με την ακρίβεια της αυτόνομης πορείας που επιτεύχθηκε συμπεραίνουμε πως είναι στο συμφέρον του χειρίστη να επιλέξει την παρούσα υλοποίηση.

Λόγω απειρίας εμφανίστηκαν λάθη και προβλήματα που θα μπορούσαν να αποφευχθούν. Αρχικά η εμβέλεια της ασύρματης επικοινωνίας δεν είναι η αναμενομένη, όπως προβλέπεται από την τεχνολογία Lora. Ενώ η μέγιστη εμβέλεια της τεχνολογίας, συμπεριλαμβάνοντας το μοντέλο της ηλεκτρονικής μονάδας που χρησιμοποιήθηκε είναι περίπου 1 km, το σκάφος κατάφερε να φτάσει στα 100 m μέχρι να χάσει επαφή με τον σταθμό βάσης. Επιπρόσθετα η ακρίβεια της ηλεκτρονικής πυξίδας θα μπορούσε να βελτιωθεί περαιτέρω. Δοκιμάστηκαν δύο μοντέλα ηλεκτρονικής πυξίδας, τα οποία μετά από την βαθμονόμηση συνέχισαν να έχουν απόκλιση 5 ή και παραπάνω μοίρες.

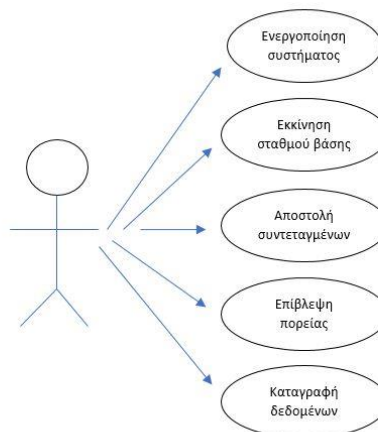
3.10.2 Ευκαιρίες και απειλές

Το σκάφος μπορεί να αξιοποιηθεί με πολλούς τρόπους δίνοντας ευκαιρίες στο καταναλωτικό κοινό αλλά και στην επιστημονική κοινότητα. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε μπορεί να ενσωματωθεί με την προσθήκη περισσότερων λειτουργιών στα εμπορικά πλοία με σκοπό την ασφαλέστερη και οικονομικότερη μεταφορά εμπορευμάτων. Παράλληλα το χαμηλό κόστος και η ακρίβεια του σκάφους το καθιστούν μια από τις καλύτερες επιλογές για την διεξαγωγή έρευνας των υδάτων και του θαλάσσιου οικοσυστήματος.

Ωστόσο συγχρόνως με τις ευκαιρίες πρέπει να αναλυθούν και οι απειλές της υλοποίησης. Εταιρείες και ερευνητές με μεγάλη εμπειρία στο χώρο της αυτονομίας και της ρομποτικής κατέχουν περισσότερη εμπειρία. Επιπλέον οι εν δυνάμει χρήστες ενός αυτόνομου σκάφους δεν εμπιστεύονται πλήρως τις δυνατότητες του. Τέλος υφίσταται αυξημένη δυσκολία σε περίπτωση βλάβης και απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό για την επιδιόρθωση ή τη συντήρηση.

3.11 Use cases

Στην παρούσα ενότητα αναλύουμε μια περίπτωση χρήσης, δηλαδή μια περιγραφή των τρόπων με τους οποίους ένας χρήστης αλληλοεπιδρά με το σύστημα. Μια περίπτωση χρήσης μπορεί να καθορίσει τα σενάρια επιτυχίας, αποτυχίας και τυχόν κρίσιμες παραλλαγές ή εξαιρέσεις. Στην παρούσα υλοποίηση δεν αντιστοιχούν πολλές περιπτώσεις χρήσης. Το σκάφος έχει σχεδιαστεί να εκτελέσει μια συγκεκριμένη λειτουργία με μόνη προσθήκη την καταγραφή του εξωτερικού περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα ένας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει το σταθμό βάσης για να στείλει συντεταγμένες στο σύστημα επί του σκάφους με σκοπό την μετακίνηση του στην επιθυμητή τοποθεσία. Παράλληλα μέσω λογισμικού επιβλέπει σε πραγματικό χρόνο την πορεία του μέσω της εγκατεστημένης κάμερας. Στην εικόνα 3.5 που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα χρήσης του συστήματος, στο οποίο φαίνονται όλες οι λειτουργίες που μπορεί να υλοποιήσει ο χειριστής του.



Εικόνα 3.5 Διάγραμμα χρήσης συστήματος

3.12 Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάσαμε τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που συνθέτουν το σύστημα στο σκάφος και παρείχαμε εκτενής αναφορά στα χαρακτηριστικά τους. Στην αρχική ενότητα έγινε μια επισκόπηση ολόκληρου του κυκλώματος και παρουσιάστηκε επίσης πώς όλα τα εξαρτήματα επικοινωνούν μεταξύ τους. Επιπλέον καταγράψαμε την κατανάλωση ρεύματος όλων των ηλεκτρικών συσκευών και εισήγαμε την έννοια του ελέγχου των σερβομηχανισμών με την χρήση σήματος PWM. Η εικόνα 3.6 δείχνει το τελικό φυσικό μοντέλο του σκάφους. Φαίνεται ότι ο αισθητήρας της ηλεκτρονικής πυξίδας είναι τοποθετημένος στο μπροστινό μέρος του σκάφους και η μονάδα GPS είναι τοποθετημένη στο κατάστρωμα του σκάφους.



Εικόνα 3.6 Φυσικό πρωτότυπο μοντέλο σκάφους

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται πως συλλέγουμε τα δεδομένα από τους αισθητήρες και πως ο αλγόριθμος στο Arduino δίνει εντολή στις κινητήριες μονάδες για την πραγματοποίηση ευθύγραμμής πορείας από το σημείο εκκίνησης στο σημείο προορισμού.

Κεφάλαιο 4 - Ανάπτυξη Λογισμικού

Στο παρόν κεφάλαιο θα διεισδύσουμε στην καρδιά του συστήματος μας, δηλαδή στο λογισμικό χάρη στο οποίο τίθεται σε εφαρμογή η διαδικασία συλλογής και αποστολής των δεδομένων των αισθητήρων και η επεξεργασία αυτών ώστε να επιτευχθεί ο στόχος του συγκεκριμένου έργου. Πραγματοποιείται επεξήγηση των λειτουργιών του λογισμικού και πως εκμεταλλευόμαστε τις δυνατότητες των ηλεκτρονικών μονάδων μέσω προγραμματισμού, ώστε να διαμορφώσουμε ένα κλειστό κύκλωμα, κατάλληλο να διατηρεί επικοινωνία με τον ανθρώπινο παράγοντα και να προσαρμόζει τις κινήσεις των μηχανικών μονάδων με σκοπό την επίτευξη ευθύγραμμης πορείας του σκάφους.

4.1 Λογική ελέγχου

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε στην παρούσα υλοποίηση δεν βασίστηκε σε ήδη υπάρχον αλγόριθμο. Η λογική είναι πολύ απλή και κατανοητή ακόμα και σε κάποιον που δεν κατέχει την απαραίτητη γνώση ανώτερων μαθηματικών. Στο παρουσιαζόμενο έργο χρησιμοποιήθηκε ένα κλειστό κύκλωμα ελεγκτή PD αντί μόνο ενός proportional ελεγκτή για την πλεύση στην επιθυμητή πορεία. Ο ελεγκτής PD έχει το πλεονέκτημα ότι ο παράγωγος όρος εξαλείφει την υπέρβαση του ελεγκτή. Συγκρίνει μια προηγούμενη κατάσταση με την τωρινή και προσπαθεί να μειώσει την διαφορά μεταξύ τους.

Το σύστημα ελέγχου για αυτή τη διατριβή χρησιμοποιεί δύο ελεγκτές, έναν για την απόκλιση του προσανατολισμού από την επιθυμητό στόχο και έναν για την απόκλιση από την πορεία που έχει υπολογιστεί από το σημείο εκκίνησης του σκάφους. Με αυτό τον τρόπο το σκάφος είναι ικανό να αντιδράσει έγκαιρα σε αλλαγή κατεύθυνσης εξαιτίας της δύναμης του ανέμου και των υδάτων.

Το σκάφος έχει δύο διαφορετικούς τύπους λειτουργιών: Πλήρως αυτόνομη οδήγηση και χειροκίνητη οδήγηση. Η χειροκίνητη οδήγηση είναι προεπιλεγμένη και αλλάζει μόνο όταν ο χρήστης στείλει στο σύστημα την λέξη “auto”. Κατά την χειροκίνητη οδήγηση ο χρήστης αποκτά έλεγχο του σκάφους και στέλνοντας την κατάλληλη φράση, ο μικροελεγκτής δύναται να κατανοήσει προς ποια κατεύθυνση πρέπει να κινηθεί το πηδάλιο και να ρυθμίσει την ταχύτητα.

Στην αυτόνομη οδήγηση αρχικά είναι απαραίτητη η αποστολή των συντεταγμένων του σημείου προορισμού από τον σταθμό βάσης, η γνώση της θέσης του σκάφους σε μορφή

γεωγραφικού μήκους και πλάτους και του προσανατολισμού του σκάφους σε μορφή μοιρών. Στην συνέχεια υπολογίζεται η πορεία του σκάφους από το σημείο εκκίνησης στο σημείο προορισμού, σε μοίρες. Παράλληλα ο χειριστής έχει την επιλογή να ακυρώσει το πλάνο της πορείας του σκάφους ολόκληρο ή κάθε επόμενη τοποθεσία ξεχωριστά, με τις εντολές “del” και “del1” αντίστοιχα. Στην υποενότητα 4.5.1 εξηγείται η μέθοδος που ακολουθήσαμε για να συγκρίνουμε την μεταγενέστερη πορεία του σκάφους με την αρχική και να υπολογίσουμε την απόκλιση heading του σκάφους ώστε να μειώνουμε την διαφορά.

4.2 Επικοινωνία διεπαφή χρήστη με το σύστημα

Για την επικοινωνία του χρήστη με το σύστημα στο σκάφος εκμεταλλευτήκαμε το λογισμικό Arduino IDE. Ο χρήστης χρησιμοποιεί την σειριακή οθόνη που διαθέτει το λογισμικό για να προβάλλει τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον πομποδέκτη σε ζωντανή ροή. Παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα αποστολής του γεωγραφικού μήκους και πλάτους στο σύστημα στο σκάφος.

Ο πομποδέκτης lora32u4 συνδέεται με τον σταθμό βάσης⁹ με καλώδιο USB. Παρέχει την σειριακή επικοινωνία μεταξύ τους με ρυθμό 9600 bits το δευτερόλεπτο. Καλώντας την συνάρτηση Serial.available() ελέγχουμε αν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα στην σειριακή θύρα του πομποδέκτη. Καθώς διαβάζει τα εισερχόμενα bytes αναμένει τον χαρακτήρα “<”, με τον οποίο έχει προγραμματιστεί να καταχωρεί τα δεδομένα στην μνήμη SRAM. Αντίστοιχα με τον χαρακτήρα “>” δίνεται η εντολή να σταματήσει η καταχώρηση. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζουμε πως δεν θα χαθούν δεδομένα κατά την μεταφορά. Προσομοιώνεται η αρχή και το τέλος μιας πρότασης. Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η σειριακή οθόνη και ένα μήνυμα έτοιμο προς αποστολή.

⁹ Ο σταθμός βάσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι φορητός υπολογιστής με λογισμικό windows 10 x64



```

COM6
<40.792140 21.074245>
Got: Compass Heading: 245.74
RSSI: -69
Received:
43 6F 75 72 73 65 20 6F 66 66 20 74 61 72 67 65
74 3A 20 30 2E 30 30 0 0 0 0 0 0 0 0
Got: Course off target: 0.00
RSSI: -67
Received:
20 74 75 72 6E 3A 20 30 2E 30 30 D A 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Got: turn: 0.00
RSSI: -67
 Αυτόματη κύλιση  Επίδειξη χρονοσήμανσης
Αλλαγή γραμμής 38400 baud Εικασθάρση εξόδου

```

Εικόνα 4.1 Η σειριακή οθόνη του Arduino IDE

Για την ασύρματη μετάδοση των σημάτων μεταξύ του πομποδέκτη στον σταθμό βάσης προς το πομποδέκτη του σκάφους και αντίστροφα κάναμε χρήση της βιβλιοθήκης RH_RF95. Συγκεκριμένα μόλις έχουμε έτοιμο μήνυμα προς αποστολή, ενεργοποιούμε τον πομπό ραδιοσημάτων με την μέθοδο `rf95.send` και στέλνουμε τον πίνακα με τα αποθηκευμένα byte του μηνύματος. Στην συνέχεια καλούμε την μέθοδο `rf95.waitPacketSent`, η οποία κάνει παύση της εκτέλεσης του προγράμματος μέχρι να τελειώσει ο πομπός την εκπομπή του μηνύματος. Αντίστοιχα για την λήψη μηνύματος από τον δέκτη, καλούμε σε κάθε επανάληψη του βρόχου την μέθοδο `rf95.available`, η οποία ελέγχει αν υπάρχει διαθέσιμο σήμα προς λήψη.

4.3 Λήψη και επεξεργασία δεδομένων GPS

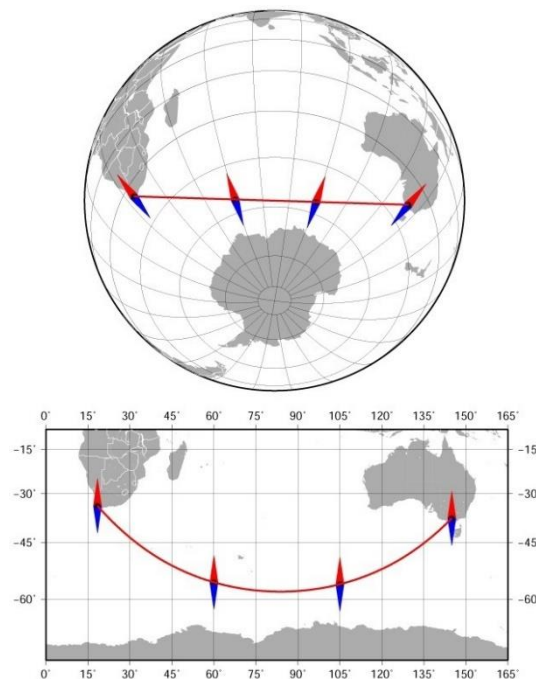
Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.6 η μονάδα GPS λαμβάνει σήματα από τους δορυφόρους και δημιουργεί τις λεγόμενες NMEA προτάσεις. Το GPS απαιτείται να συνδεθεί σε τουλάχιστον 3 με 4 δορυφόρους ώστε να ξεκινήσει να παράγει τις προτάσεις NMEA με ρυθμό 1 Hz^{10} τις οποίες αποστέλλει στην σειριακή θύρα του Arduino. Για την αποκωδικοποίηση των προτάσεων NMEA χρησιμοποιούμε την βιβλιοθήκη `tinypgps++`. Διαθέτει την μέθοδο `gps.encode`, η οποία αποσπά και αποθηκεύει τις πληροφορίες που περιέχουν οι προτάσεις. Στην συνέχεια με την μέθοδο `gps.location.isUpdated` λαμβάνουμε απάντηση για τον αν έχουμε λάβει επιτυχώς νέες συντεταγμένες. Στην περίπτωση που λάβαμε, ξεκινάει η κύρια διαδικασία ελέγχου PID.

Επιπρόσθετα το GPS σε συνδυασμό με την βιβλιοθήκη `tinypgps++` παρέχει στο σύστημα σημαντικές πληροφορίες όπως την ταχύτητα του σκάφους, την απόσταση και την διαμορφωμένη πορεία από το σημείο εκκίνησης στο σημείο προορισμού. Η συνάρτηση

¹⁰ Ένα σήμα το δευτερόλεπτο.

υπολογισμού της απόστασης και της πορείας δέχονται ως ορίσματα το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του αρχικού σημείου $[\varphi_1, \lambda_1]$ και του τελικού σημείου $[\varphi_2, \lambda_2]$.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι η γη δεν είναι επίπεδη, μια ευθεία πορεία στον χάρτη δεν μπορεί να αντιστοιχιστεί σε μια ευθεία γραμμή στην πραγματική πλοήγηση. Για παράδειγμα, εάν ένα σκάφος ξεκινήσει το ταξίδι του από το Κέιπ Τάουν ($33^\circ 55' 21,6''$ N, $18^\circ 25' 0,08''$ A) στη Μελβούρνη ($37^\circ 48' 0''$ N, $144^\circ 57' 0''$ A), η επιθυμητή κατεύθυνση στην αρχή θα ήταν 141° και στην πορεία θα μεταβαλλόταν στις 42° . Με αυτό συμπεραίνουμε ότι, για να ληφθεί η επιθυμητή κατεύθυνση πρέπει να υπολογίζεται εκ νέου σε κάθε νέα θέση του σκάφους. Η αρχή της αλλαγής πορείας απεικονίζεται στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2 Παράδειγμα αλλαγής κατεύθυνσης κατά την μακρινή πλεύση

Για τον υπολογισμό μιας πορείας από καρτεσιανές συντεταγμένες, η εξίσωση 4.1 χρησιμοποιεί τη συνάρτηση Arctangent2 , η οποία είναι η συνάρτηση Arctangent με δύο ορίσματα. Η έξοδος της Arctangent2 είναι μια τιμή μεταξύ -180° και $+180^\circ$. Για αυτό τον λόγο πρέπει να μετατραπεί σε γωνία κατεύθυνσης. Εάν η γωνία εξόδου από τη συνάρτηση Arctangent2 είναι αρνητική, προστίθενται 360° στην τιμή. Η εξίσωση 4.3 και η εξίσωση 4.4 υπολογίζουν τις τιμές για τη συνάρτηση Arctangent2 , χρησιμοποιώντας την τρέχουσα θέση και τη θέση στόχου. Η εξίσωση 4.2 υπολογίζει τη διαμήκη διαφορά μεταξύ της τρέχουσας και της θέσης στόχου [17].

Δηλώσεις μεταβλητών:

φ_1 - γεωγραφικό πλάτος θέσης 1,

φ_2 - γεωγραφικό πλάτος θέσης 2,

λ_1 - γεωγραφικό μήκος θέσης 1,

λ_2 - γεωγραφικό μήκος θέσης 2,

$\Delta\lambda$ – διαφορά γεωγραφικού μήκους.

$$\theta = \arctan2(y, x)$$

Εξίσωση 4.1

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$$

Εξίσωση 4.2

$$x = \cos(\varphi_1) * \sin(\varphi_2) - \sin(\varphi_1) * \cos(\varphi_2) * \cos(\Delta\lambda)$$

Εξίσωση 4.3

$$y = \sin(\Delta\lambda) * \cos(\varphi_2)$$

Εξίσωση 4.4

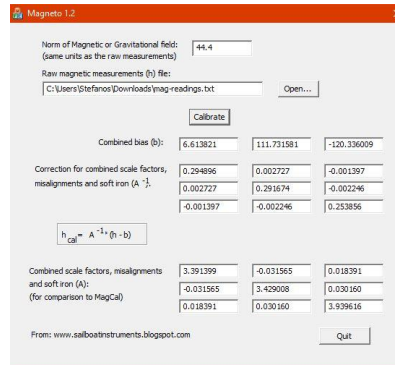
Για τον σωστό χειρισμό του σκάφους από την αυτοματοποιημένη διαδικασία απαιτείται ο υπολογισμός της απόστασης από το σημείο εκκίνησης στο σημείο προορισμού. Η Συνάρτηση υπολογισμού βασίζεται στην γνωστή φόρμουλα Haversine. Σύμφωνα με αυτή, υπολογίζεται η απόσταση μεγάλου κύκλου (great-circle) μεταξύ δύο σημείων δηλαδή η μικρότερη απόσταση πάνω από την επιφάνεια της γης¹¹. Επειδή η Γη δεν είναι ακριβής σφαίρα, τα σφάλματα στρογγυλοποίησης μπορεί να είναι έως και 0,5%.

4.4 Υπολογισμός κατεύθυνσης

Ένας ακόμη πολύ σημαντικός παράγοντας στην διαδικασία αυτοματοποίησης της πορείας του σκάφους είναι η κατεύθυνση. Η ηλεκτρονική πυξίδα στέλνει μέσω σειριακής σύνδεσης με το Arduino το μαγνητικό πεδίο για τους τρεις φυσικούς άξονες (x, y, z) σε μT (micro Tesla) με ρυθμό 100 kHz. Ωστόσο εξαιτίας παρεμβολών στο μαγνητικό πεδίο της γης από διαφορετικά παραγόμενα μαγνητικά πεδία ή στοιχεία που επηρεάζουν την ένταση του μαγνητικού πεδίου όπως τα μεταλλικά στοιχεία, είναι σχεδόν απαραίτητο να γίνει βαθμονόμηση της ηλεκτρονικής πυξίδας. Για τον σκοπό αυτό έγινε χρήση του λογισμικού magneto (εικόνα). Το magneto δέχεται ως είσοδο την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε

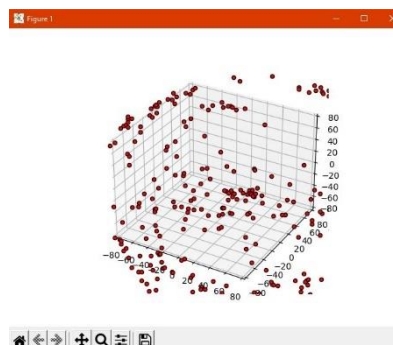
¹¹ Υπολογισμός απόστασης για υποθετική σφαίρα ακτίνας 6372795 μέτρων.

συγκεκριμένη θέση και υψόμετρο και ένα αρχείο κειμένου με μετρήσεις της ηλεκτρονικής πυξίδας.



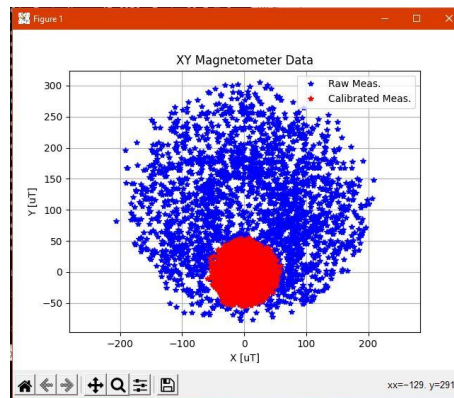
Εικόνα 4.3 Το λογισμικό magneto

Για την απόκτηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος που υλοποιεί το Παγκόσμιο Μαγνητικό Μοντέλο (WMM) και είναι εγκατεστημένος στην ιστοσελίδα των εθνικών κέντρων περιβαλλοντικής πληροφόρησης (NOAA). Ως ορίσματα δέχεται το γεωγραφικό μήκος και πλάτος και το υψόμετρο και ως έξοδο τυπώνει την ένταση του μαγνητικού πεδίο σε nT. Για την δημιουργία του αρχείου κειμένου με τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ένα πρόγραμμα σε python το οποίο δέχεται ως είσοδο την έξοδο της σειριακής θύρας του Arduino IDE. Στην συνέχεια καταγράφει τις μετρήσεις και παράγει ένα τρισδιάστατο διάγραμμα, στο οποίο παρουσιάζονται οι διαφορές μαγνητικές εντάσεις στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο. Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζεται το διάγραμμα με τις μετρήσεις πριν την βαθμονόμηση.



Εικόνα 4.4 Τιμές των μετρήσεων της ηλεκτρονικής πυξίδας σε τρισδιάστατο επίπεδο

Όπως φαίνεται στην εικόνα οι μετρήσεις είναι διάσπαρτες στο επίπεδο. Το magneto χρησιμοποιεί την μέθοδο Ελλειψοειδής εφαρμογή (Ellipsoidal Fitting) ώστε να υπολογίσει τα σφάλματα στις μετρήσεις και να δημιουργήσει 9 παράγοντες που ονομάζονται παράγοντες κλίμακας soft iron και 3 παράγοντες που ονομάζονται παράγοντες κλίσης hard iron. Καθώς οι λάθος μετρήσεις σχηματίζουν μια έλλειψη στο διάγραμμα, το magneto τις επαναπροσδιορίζει, σχηματίζοντας έναν κύκλο γύρω από το σημείο [0,0]. Στην εικόνα 4.5 παρουσιάζονται οι μετρήσεις στο διάγραμμα μετά την βαθμονόμηση.



Εικόνα 4.5 Τιμές των μετρήσεων της ηλεκτρονικής πυξίδας επαναπροσδιορισμένες γύρω από το σημείο [0,0]

Στον αλγόριθμο που υλοποιήσαμε καταχωρούμε τους παράγοντες soft iron και hard iron σε δύο πίνακες. Η εξίσωση 4.5 υπολογίζει τις τιμές των μετρήσεων λαμβάνοντας υπόψιν και τους δύο πίνακες με τους παράγοντες βελτιστοποίησης.

\vec{m}_{calib} = βελτιστοποιημένες μετρήσεις,

\vec{m}_{meas} = αρχικές μετρήσεις,

A = πίνακας παραγόντων soft iron,

\vec{b} = πίνακας παραγόντων hard iron.

$$\vec{m}_{calib} = A(\vec{m}_{meas} - \vec{b})$$

Εξίσωση 4.5

Το τελευταίο βήμα είναι να υπολογιστεί η μαγνητική απόκλιση. Με αυτό τον όρο εννοούμε την μετακίνηση των πόλων της γης από το αρχική τους θέση. Η μαγνητική απόκλιση ποικίλλει από σημείο σε σημείο. Το Παγκόσμιο Μαγνητικό Μοντέλο διαθέτει αλγόριθμο που υπολογίζει την μαγνητική απόκλιση για κάθε σημείο πάνω στη γη.

Έχοντας συγκεντρώσει όλες τις απαιτούμενες μετρήσεις μπορούμε να υπολογίσουμε την απαιτούμενη τιμή κατεύθυνσης (heading). Η διαδικασία παρουσιάζεται στην εξίσωση 4.6.

h = τιμή κατεύθυνσης,

y = μέτρηση έντασης μαγνητικού πεδίου άξονα y ,

x = μέτρηση έντασης μαγνητικού πεδίου άξονα x ,

da = μαγνητική απόκλιση

$$h = \text{atan2}(y, x) * \frac{180}{\pi} + 180 + da$$

Εξίσωση 4.6

4.5 Ελεγκτής PID

Το PID αποτελεί την κύρια εργασία του συστήματος αυτονομίας. Χάρη σε αυτό το σύστημα είναι ικανό να κατανοήσει το σφάλμα στην λανθασμένη πορεία του και να εφαρμόσει τα κατάλληλα αντίμετρα. Ένας ελεγκτής PD αποτελείται από δύο διαφορετικά στάδια. Το πρώτο ονομάζεται proportional και υπολογίζει το σφάλμα που είναι ανάλογο της διαφοράς μιας τρέχουσας μέτρησης από την επιθυμητή. Το δεύτερο ονομάζεται derivative και υπολογίζει το ρυθμό μείωσης ή αύξησης αυτού του σφάλματος σε σχέση με τον χρόνο εκτέλεσης του βρόχου. Τα δύο στάδια προϋποθέτουν την δήλωση δύο παραγόντων που ονομάζονται παράγοντες κέρδους. Συνήθως ακολουθείται μια μεθοδολογία για τον ορισμό αυτών των παραγόντων. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση εφαρμόστηκαν δύο συστήματα PID. Το ένα υπολογίζει το σφάλμα στην κατεύθυνση με χρήση ελεγκτή PD και το δεύτερο το σφάλμα στην πορεία του σκάφους με χρήση ελεγκτή P. Για αυτό τον λόγο δεν χρειάστηκε η εφαρμογή Integrator στο σύστημα υπολογισμού απόκλισης της κατεύθυνσης. Τον ρόλο του παίρνει ο δεύτερος κλειστός βρόχος proportional, ο οποίος δέχεται ως είσοδο την μεταβολή της πορείας του σκάφους σε σύγκριση με την αρχική.

4.5.1 Ελεγκτής κατεύθυνσης

Αρχικά, ο υπολογισμός της απόκλισης της κατεύθυνσης και της πορείας προϋποθέτει να γνωρίζουμε σε ποιο ημικύκλιο βρίσκεται κάθε μέτρηση ξεχωριστά και αν η τρέχουσα μέτρηση είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της επιθυμητής τιμής. Αυτό συμβαίνει διότι για κάθε περίπτωση αντιστοιχεί και μια διαφορετική εξίσωση υπολογισμού του σφάλματος. Επιπλέον με αυτό τον τρόπο ο αλγόριθμος είναι ικανός να λάβει απόφαση για αλλαγή κατεύθυνσης του

πηδαλίου. Για παράδειγμα εάν η σωστή κατεύθυνση του σκάφους είναι στις 340° και η τρέχουσα κατεύθυνση είναι στις 20° τότε για την διαφορά τους θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση 4.7 και το πηδάλιο να στραφεί προς τα αριστερά, ενώ αν η σωστή κατεύθυνση είναι στις 60° και η τρέχουσα κατεύθυνση μετρήθηκε στις 20° τότε ο υπολογισμός της διαφοράς θα πραγματοποιηθεί με την εξίσωση 4.8 και το πηδάλιο πρέπει να στραφεί εκ των δεξιών. Ως σωστή κατεύθυνση ορίζουμε την πορεία σε μοίρες που υπολογίστηκε από την θέση εκκίνησης στην θέση προορισμού. Στον αλγόριθμο, αυτό επιτυγχάνεται με πολλά εμφωλευμένα if σκοπός των οποίων είναι να υποβάλουν τους παραπάνω όρους.

Heading_error = διαφορά τιμής στόχου από την τρέχουσα μέτρηση,

headingDegrees = τρέχουσα μέτρηση κατεύθυνσης,

targetcourse = αρχική τιμή πορείας.

$$heading_error = headingDegrees + (360 - targetcourse)$$

Εξίσωση 4.7

$$heading_error = targetcourse - headingDegrees$$

Εξίσωση 4.8

Με δεδομένο την διαφορά της τιμής στόχου από την τρέχουσα μέτρηση μπορεί να υπολογιστεί ο proportional και ο derivative όρος όπως φαίνονται στην εξίσωση 4.9 και στην εξίσωση 4.10 αντίστοιχα. Οι τιμές των παραγόντων k_p και k_d καθορίστηκαν εμπειρικά. Για τον συντονισμό του ελεγκτή PD, χρησιμοποιείται η μέθοδος Ziegler Nichols [18]. Η μέθοδος Ziegler Nichols είναι μια εμπειρική μέθοδος καθορισμού των παραμέτρων για τον ελεγκτή PD μέσω δοκιμών. Ο παραγόμενοι όροι proportional και derivative προστίθενται και στην συνέχεια προστίθενται ή αφαιρούνται στην ουδέτερη τιμή του σερβομηχανισμού ώστε να μετακινήσει το πηδάλιο στην κατάλληλη φορά.

θ = τιμή κατεύθυνσης

$$\theta_e(t) = \theta(t) - \vec{\theta}(t)$$

Εξίσωση 4.9

k_d = παράγοντας κέρδους derivative,

$e(t)$ = σφάλμα τιμής κατεύθυνσης.

$$D = kd * \frac{d}{dt} e(t)$$

Εξίσωση 4.10

4.5.2 Ελεγκτής πορείας

Με ίδιο τρόπο λειτουργεί ο ελεγκτής της πορείας. Αρχικά υπολογίζεται η πορεία σε μοίρες από το σημείο εκκίνησης στο σημείο προορισμού. Κατά την πλεύση το σκάφος αναμένεται να ξεφύγει της πορείας του. Σε κάθε επανάληψη του βρόχου ξαναυπολογίζεται η τιμή μιας νέας πορείας με είσοδο την τρέχουσα θέση του σκάφους με αποτέλεσμα την εκτίμηση της απόκλισης από την αρχική πορεία. Ο ελεγκτής της πορείας χρησιμοποιεί μόνο τον παράγοντα proportional. Η έξοδος του εκλεκτή προστίθεται ή αφαιρείται στο αποτέλεσμα του ελεγκτή της κατεύθυνσης ώστε να διαμορφώσει την τελική τιμή του σερβομηχανισμού.

4.6 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύσαμε τον τρόπο σκέψης του αλγορίθμου που εκτελεί την κύρια εργασία στο σύστημα αυτονομίας. Περιγράψαμε πως αξιοποιούμε τους αισθητήρες επί του σκάφους ώστε να λαμβάνουμε τα παραγόμενα δεδομένα και πως χρησιμοποιούμε αυτά τα δεδομένα ως ορίσματα στις συναρτήσεις του αλγορίθμου. Τέλος εξηγήσαμε πως το σύστημα κλειστού βρόχου PD επηρεάζει την πορεία του σκάφους και επιφέρει την αυτόνομη κίνηση. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα πειράματα που ακολούθησαν την κατασκευή του αυτόνομου συστήματος και αξιολογούμε τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Κεφάλαιο 5 - Διαδικασία δοκιμών

Σε αυτό το κεφάλαιο η τελική μορφή της υλοποίησης δοκιμάζεται σε πραγματικό περιβάλλον. Εξετάζεται η λειτουργικότητα, αποτελεσματικότητα και ακρίβεια του συστήματος αυτονομίας και αποδίδονται εξηγήσεις και λύσεις για τα προβλήματα και τα λάθη που εντοπίστηκαν. Παρουσιάζονται τα σχέδια διαδρομής του σκάφους, οι παράμετροι των πειραμάτων και αναλύονται οι μετρήσεις που λάβαμε και τα αποτελέσματα που εξήγαμε.

5.1 Προετοιμασία πειραμάτων

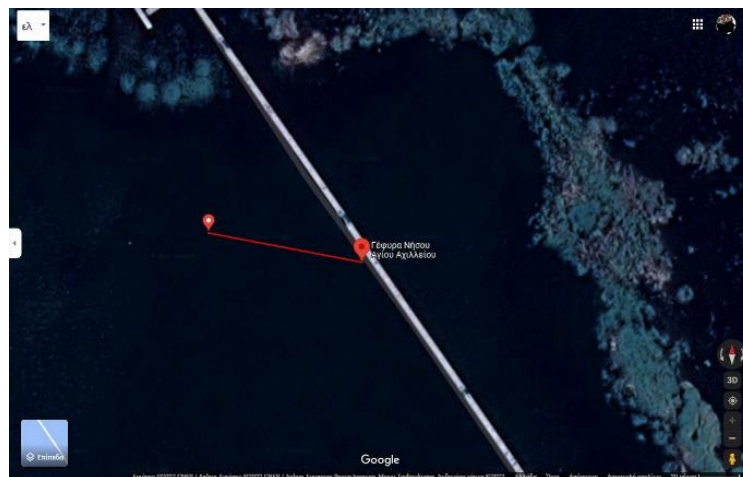
Οι δοκιμές χωρίστηκαν σε δύο στάδια. Στο πρώτο, το σκάφος τοποθετήθηκε σε μια πισίνα με σκοπό να ελεγχθεί αν ο αλγόριθμος έδινε σωστές εντολές κατεύθυνσης και πόσο έπρεπε να περιορίσουμε το σύνολο τιμών του σερβομηχανισμού ώστε το σκάφος να μην παρεκτρέπεται της πορείας του. Στην συνέχεια, μέσω διάνυσης μικρών διαδρομών και καταγραφής της απόκλισης κατεύθυνσης του σκάφους, ορίσαμε τις τιμές των παραγόντων κέρδους του συστήματος PD.

Στο δεύτερο στάδιο το σκάφος ήταν ικανό να καλύψει μεγαλύτερες αποστάσεις και να μεταβεί από την πρώτη καταχωρημένη τοποθεσία στόχου, στην επόμενη. Οι δοκιμές έλαβαν χώρα σε 3 τοποθεσίες. Σε κάθε τοποθεσία χρειάστηκε να γίνει εξ ολοκλήρου βαθμονόμηση της ηλεκτρονικής πυξίδας για την λήψη καλύτερων αποτελεσμάτων. Για το σκοπό του σταθμού βάσης χρησιμοποιήθηκε ένας φορητός υπολογιστής με μπαταρία διάρκειας 90 λεπτών. Στο σταθμό βάσης συνδέθηκε ο πομποδέκτης Lora32u4 και ο πομπός βίντεο ROTG02 με καλώδια USB.

5.2 Εκτέλεση πειραμάτων

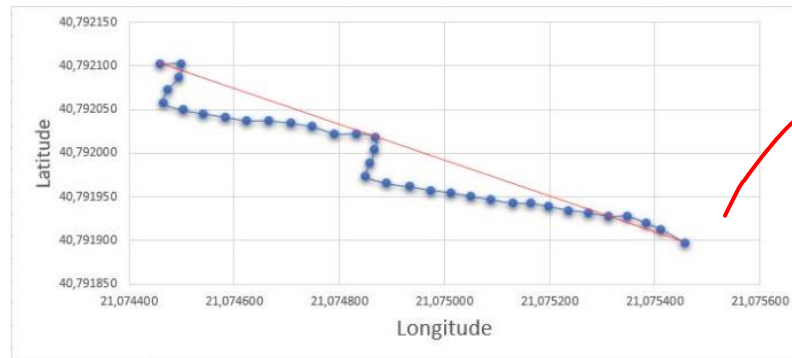
Η πρώτη δοκιμή πραγματοποιήθηκε στον κορινθιακό κόλπο. Το σκάφος δεν κατάφερε να μεταβεί στην δεύτερη τοποθεσία που το ανατέθηκε λόγω ανέμου κλίμακας 4 μποφόρ και κυματισμών. Τα κύματα ανέδειξαν ένα λάθος στην κατασκευή του σκάφους. Το νερό εισχώρησε στο εσωτερικό μέσω κενών ανάμεσα στο κατάστρωμα και την γάστρα και το σκάφος κλήθηκε να επιστρέψει ακυρώνοντας την πορεία με την εντολή “del”.

Αφού διορθώθηκε το πρόβλημα τοποθετώντας κομμάτι σαμπρέλας στα κενά, πραγματοποιήθηκε η δεύτερη δοκιμή στην μικρή λίμνη Πρεσπών. Το μέγεθος της λίμνης είναι επαρκής για να λάβουμε τις απαραίτητες πληροφορίες και η ορμή των υδάτων διαχειρίσιμη από το σκάφος. Θέτοντας ένα σημείο για προορισμό, το σκάφος διάνυσε απόσταση 100 μέτρων και επέστρεψε πίσω στην βάση επιτυχώς. Να σημειωθεί ότι επικρατούσαν και αυτή την φορά άνεμοι 3 με 4 μποφόρ, προκαλώντας ένα δύσφορο περιβάλλον για ένα σκάφος τέτοιου μεγέθους. Το σκάφος ξεκίνησε από τις συντεταγμένες 40°47'30.8" N 21°04'31.7" E με προορισμό τις συντεταγμένες 40°47'31.6" N 21°04'28.1" E. Η αρχική τιμή της πορείας ήταν 284.87° και της κατεύθυνσης πυξίδας 253.06° (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1 Σχέδιο διαδρομής στην τοποθεσία λίμνη Πρεσπών

Το πρόγραμμα του συστήματος έχει ρυθμιστεί να στέλνει κάθε 5 δευτερόλεπτα βασικές πληροφορίες της πορείας του σκάφους, όπως το τρέχων γεωγραφικό μήκος και πλάτος, το πλήθος των συνδεδεμένων δορυφόρων GPS, την τιμή του heading και της πορείας σε μοίρες. Καταγράφοντας τα δεδομένα από την σειριακή οθόνη του Arduino IDE στο λογισμικό Microsoft excel, εξήγαμε και αναλύσαμε την διαδρομή του σκάφους. Στην εικόνα 5.2 φαίνονται οι θέσεις του σκάφους κάθε 5 δευτερόλεπτα σε σύγκριση με την υπολογισμένη αρχική διαδρομή. Η μπλε γραμμή είναι η διαδρομή που ακολούθησε το σκάφος σηματοδοτώντας τις θέσεις που λήφθηκαν από το GPS και η κόκκινη η επιθυμητή διαδρομή.

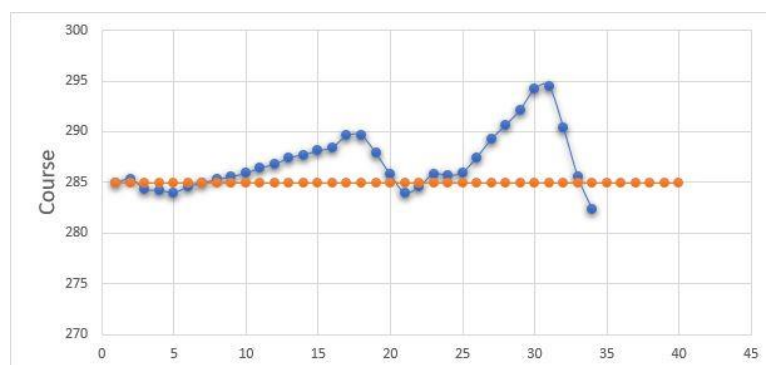


Εικόνα 5.2 Καταγεγραμμένες τοποθεσίες του σκάφους κατά την διάρκεια αυτόνομης πλεύσης σε σύγκριση με την επιθυμητή πορεία στην δεύτερη δοκιμή

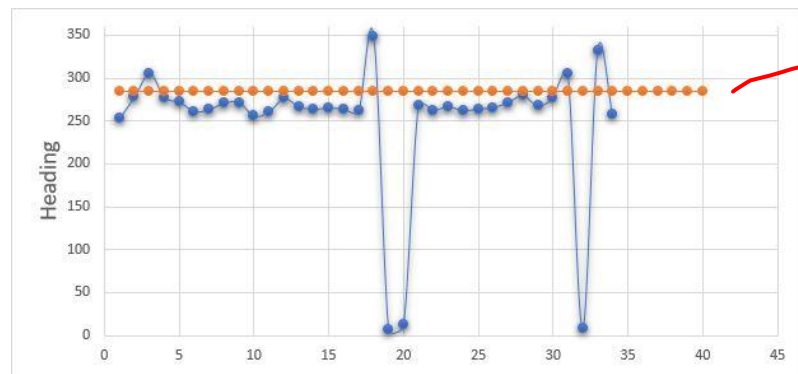
Παρατηρούμε αρκετά μεγάλη απόκλιση σε δύο σημεία της διαδρομής. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο θέματα. Πρώτον ότι ο άνεμος είχε κατεύθυνση νοτιοανατολικά και το σκάφος δυσκολευόταν να επαναπροσδιορίσει την πορεία του και δεύτερον ότι στις μετρήσεις του γεωγραφικού μήκους και πλάτους αναγκάζομαστε να μειώσουμε τον αριθμό στα 6 δεκαδικά ψηφία λόγω των περιορισμών του Arduino Mega. Αυτό το τελευταίο δεκαδικό ψηφίο και κάθε δεκαδικό ψηφίο στον αριθμό γεωγραφικού μήκους ή πλάτους παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των μετρήσεων του δέκτη GPS.

Επιπλέον ο σταθμός βάσης άρχισε να χάνει την επαφή με το σκάφος περίπου στα 100 μέτρα. Η τιμή του RSSI που λαμβάναμε μαζί με κάθε μήνυμα έφτασε στο -87 και χρειαζόταν επανάληψη εντολών για να ληφθούν από το σύστημα στο σκάφος. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε παρεμβολές στο σήμα ή από το μέγεθος των μηνυμάτων.

Οι τιμές της πορείας (~~course~~) και της κατεύθυνσης (~~heading~~) διαφέρουν αρκετά σε δύο σημεία από την αρχική μέτρηση, γεγονός που εξηγεί την απόκλιση του σκάφους από την αρχική διαδρομή. Στις εικόνες η πορτοκαλί γραμμή είναι η τιμή $284,87^\circ$ πορείας που έπρεπε να σταθεροποιηθεί το σκάφος.



Εικόνα 5.3 Τιμές της πορείας σε σύγκριση με την επιθυμητή



Legend ?

Εικόνα 5.4 Τιμές της κατεύθυνσης σε σύγκριση με την επιθυμητή

Η τρίτη και τελευταία δοκιμή πραγματοποιήθηκε στην βόρεια πλευρά της λίμνης Καστοριάς. Την ημέρα της δοκιμής το νερό ήταν σχετικά σταθερό και υπήρχε αρκετός χώρος για πλεύση. Το πλάνο διαδρομής διέθετε διέλευση από δύο σημεία και επιστροφή στο σημείο εκκίνησης. Το σημείο εκκίνησης ήταν το $40^{\circ}31'24.6''$ N $21^{\circ}16'29.0''$ E, το δεύτερο το $40^{\circ}31'24.7''$ N $21^{\circ}16'27.5''$ E, το τρίτο το $40^{\circ}31'25.4''$ N $21^{\circ}16'28.3''$ E και τερματισμού το $40^{\circ}31'24.8''$ N $21^{\circ}16'29.2''$ E (Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5 Σχέδιο διαδρομής στην τοποθεσία λίμνη Καστοριάς

Το σκάφος παρεκτράπει της πορείας του λόγω μικρής απόκλισης της ηλεκτρονικής πυξίδας αλλά κατάφερε να ακολουθήσει την διαδρομή που του ανατέθηκε (Εικόνα 5.6). Η μηχανή λειτουργούσε στο 40% των δυνατοτήτων της. Η ταχύτητα του σκάφους ήταν σταθερή και αργή ώστε να μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τις μετρήσεις. Η συνολική απόσταση που διένυσε το σκάφος είναι 95 μέτρα με διάρκεια περίπου 5 λεπτά και η μπαταρία μειώθηκε από τα 8.3 V στα 8.2 V. ω

Λείπει το legend
το τι είναι
κάθε γραμμή
από τις 4



20.70

μεγαλύτερη γραμματοσειρά

Εικόνα 5.6 Καταγεγραμμένες τοποθεσίες του σκάφους κατά την διάρκεια αυτόνομης πλεύσης σε σύγκριση με την επιθυμητή πορεία στην τρίτη δοκιμή

Οι δοκιμές που ολοκληρώθηκαν παρήγαγαν πολλά αποτελέσματα για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας. Στο επόμενο και τελευταίο κεφάλαιο αναλύουμε τα συμπεράσματα που εξήγαμε από τα αποτελέσματα και αξιολογούμε την ολική απόδοση του συστήματος.

- Επιπλέον αναφέρουμε περεταίρω αλλαγές και διαθέσιμες επεκτάσεις με σκοπό την αύξηση της δυναμικής του σκάφους.

Συμπεράσματα
παρατήρησης!

Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Το σκάφος και το σύστημα αυτονομίας μπορεί να μην έφτασε τα επίπεδα επιτυχίας άλλων κατασκευών αλλά κατάφερε να πετύχει τον αρχικό του στόχο. Το τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζει την εργασία που υλοποιήθηκε και δίνει μια επισκόπηση των αποτελεσμάτων αυτής της διατριβής καθώς και μια προοπτική για πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις.

Το συνολικό κόστος της κατασκευής υπολογίζεται στα 490€. Όλες οι ηλεκτρονικές μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν ωστόσο επιδέχονται αλλαγή. Για παράδειγμα η μπαταρία μπορεί να αντικατασταθεί με μια μεγαλύτερης ισχύος και ενέργειας για αύξηση της περιόδου λειτουργίας. Το Arduino mega και το Lora32u4 II προτρέπεται να αντικατασταθούν με μοντέλα μεγαλύτερων δυνατοτήτων. Με τις δύο αυτές αλλαγές παρέχουμε λύσεις σε δύο προβλήματα που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Πρώτον θα αυξήσουμε την ακρίβεια του δέκτη GPS επιτρέποντας την καταχώρηση double αριθμών στην μνήμη¹² και δεύτερων θα αυξήσουμε την εμβέλεια και την αξιοπιστία της ασύρματης σύνδεσης ανάμεσα στο σταθμό βάσης και το σύστημα επί του σκάφους.

Αν θεωρήσουμε ως αποδεκτή απόκλιση της πορείας του σκάφους από την αρχική σχεδιασμένη διαδρομή μια εμβέλεια μήκους 2 μέτρων, το σκάφος παρέμεινε κατά ποσοστό 75% μέσα στο όριο καθ' όλη την διάρκεια της πορείας του. Συμπεραίνουμε πως ο αλγόριθμος, ο οποίος αναπτύχθηκε με σκοπό την επίτευξη αυτονομίας ανταπεξήλθε στο δύσκολο έργο του. Ωστόσο ο αλγόριθμος επιδέχεται επεκτάσεις. Με την πραγματοποίηση μαθηματικής μοντελοποίησης του συνολικού κυκλώματος στο σκάφος, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας της συνάρτησης μεταφοράς του συστήματος. Η συνάρτηση αυτή θα μας βοηθήσει να υπολογίσουμε με ακρίβεια τους παράγοντες κέρδους του ελεγκτή PD.

Η τελική υλοποίηση θα μπορούσε να επωφεληθεί από την ανάπτυξη ενός λογισμικού, το οποίο θα προσφέρει μια διεπαφή χρήστη στο σταθμό βάσης για την ευκολότερη διαχείριση του σκάφους. Επιπλέον το σκάφος διαθέτει την απαραίτητη τεχνολογία για την προσθήκη περισσότερων αισθητήρων με σκοπό την αύξηση των δυνατοτήτων του, όπως ραντάρ, αισθητήρας θερμοκρασίας κ.α. Επιπλέον η εγκατάσταση ενεργειακών πάνελ (φωτοβολταϊκών) θα μπορούσε να εξαλείψει την ανάγκη μπαταρίας για την τροφοδοσία του κυκλώματος στο σκάφος.

¹² Αριθμοί με περισσότερα από 6 δεκαδικά ψηφία.

Βιβλιογραφία

1. **Rolls-Royce.** *Remote and autonomous ship – the next steps.* 2016.
2. **Yewen Gu, Julio Cesar Goetz, Mario Guajardo, Stein W. Wallace.** Autonomous vessels: state of the art and potential opportunities in logistics. *Transportation and Logistics with Autonomous Technologies.* 4, Ιούλιος 2021, Τόμ. 28.
3. **Sheridan, Thomas B.** *Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control.* Λονδίνο : MIT.
4. *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2019.* s.l. : **European Maritime Safety Agency, 2019.**
5. **Soares, L. Moreira και C. Guedes.** **AYTONOMOUS SHIP MODEL TO PERFORM MANOEUVRING TESTS.** *Journal of Maritime Research.* 2011, Τόμ. VIII, 2.
6. **ERON: A PID Controlled Autonomous Surface.** **Giorgos A. Demetriou (Author), Andreas Hadjipieri, Stelios Ioannou.** Limassol, Cyprus : Frederick University, 2016. 978-1-5090-0058-6.
7. **Douglas Soares dos Santos, Cairo Lúcio Nascimento Júnior, Wagner Chiepa Cunha.** *Autonomous Navigation of a Small Boat Using IMU/GPS/Digital Compass Integration.* Campos-SP, Brazil : Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
8. **Πολίτη, Γερασίμου Κ.** **ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΩΣΗ ΠΛΟΙΟΥ.** Αθήνα : s.n., 2018. Τόμ. 5η Έκδοση.
9. —. *Αντίσταση και πρόωση πλοίου.* Αθήνα : **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ,** 2018.
10. **Άρτεμις, Παππάς Γιάγκος Σιβρικόζης Αλέξιος Τοκατλιάν.** *Υλικά Γάστρας Πλοίου.* 2014.
11. **Πως θα επιλέξουμε την σωστή προπέλα.** [Ηλεκτρονικό] 17 06 2011. <https://www.miloslife.gr/kinigi-psarema/268-%CF%80%CF%89%CF%82->

%CE%B8%CE%B1-

%CE%B5%CF%80%CE%B9%CE%BB%CE%AD%CE%BE%CE%BF%CF%85%
CE%BC%CE%B5-%CF%84%CE%B7%CE%BD-

%CF%83%CF%89%CF%83%CF%84%CE%AE-

%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%AD%CE%BB%CE%B1.

12. Robotshop. www.robotshop.com. *Arduino Mega 2560 Datasheet*.
[Ηλεκτρονικό]

<http://eprints.polsri.ac.id/4598/8/File%20VIII%20%28Lampiran%29.pdf>.

13. Nasa. [spaceplace](http://spaceplace.nasa.gov/gps/en/). [Ηλεκτρονικό] 27 Ιούλιος 2019.
<https://spaceplace.nasa.gov/gps/en/>.

14. DePriest, Dale. campar.in.tum.de. [Ηλεκτρονικό]
<https://campar.in.tum.de/twiki/pub/Chair/NaviGpsDemon/nmea.html>.

15. *Interference Analysis for LoRa Chirp Spread Spectrum Signals*. Brody Dunlop, Ha H. Nguyen, R. Barton, J. Henry. Edmonton, AB, Canada : IEEE, 2019. 978-1-7281-0319-8.

16. Fonda, Carlo. *A Practical Guide to Your First 3D Print*. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy : s.n.

17. Calculate distance, bearing and more between latitude/longitude.
[Ηλεκτρονικό] 2 5 2017. <http://www.movable-type.co.uk/scripts/>.

18. Gene F Franklin, J David Powell, και Michael L Workman. *Digital control of dynamic systems*. Menlo Park : Addison-wesley, 1998.