



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Βιομηχανική πρωτοτυποποίηση συστήματος διαφοροποιημένης  
λίπανσης**

**Διπλωματική Εργασία**

**Δημήτριος Ακρίδας**

**Επιβλέπων: Χρήστος Αντωνόπουλος**

**Ιούλιος 2024**





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Βιομηχανική πρωτοτυποποίηση συστήματος διαφοροποιημένης  
λίπανσης**

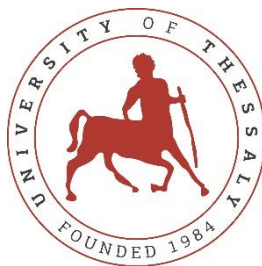
**Διπλωματική Εργασία**

**Δημήτριος Ακρίδας**

**Επιβλέπων: Χρήστος Αντωνόπουλος**

**Ιούλιος 2024**





**UNIVERSITY OF THESSALY**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING**

**Industrial prototyping of variable rate fertilization system**

Diploma Thesis

Dimitrios Akridas

Supervisor: Christos Antonopoulos

July 2024



Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

|           |                                                                                                                             |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Επιβλέπων | Χρήστος Αντωνόπουλος<br>Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών<br>Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας        |
| Μέλος     | Σπυρίδων Λάλης<br>Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών<br>Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας              |
| Μέλος     | Χρήστος Καβαλάρης<br>Μέλος Ε.Δι.Π., Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής &<br>Αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας |



## **ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. 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. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Δημήτριος Ακρίδας



## **DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS**

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Dimitrios Akridas



## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική αποτελεί μέρος μια μεγάλης και πολυετούς προσπάθειας που έγινε σε συνεργασία με τους Γιώργο Βαρβαρέλη, Δημήτρη Ευαγγελόπουλο και Κατερίνα Καράκουλα. Κατά τη συγγραφή δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να διακριθούν τα σημεία που αφορούσαν την προσωπική μου εργασία και τα σημεία που αφορούσαν εργασία των συνεργατών μου (ηλεκτρονικός και μηχανολογικός σχεδιασμός και υλοποίηση, απόφαση αντικατάστασης των αισθητήρων με κάμερες και αλγόριθμοι που υλοποιούν βέλτιστα τον υπολογισμό της θρεπτικής κατάστασης, αλγόριθμος γεωμετρικής αποτύπωσης της πορείας του ελκυστήρα στον βοηθό πορείας, σχεδίαση γραφικού περιβάλλοντος, εγκατάσταση και δοκιμή του συστήματος στο πεδίο). Είναι πάντως ξεκάθαρο ότι χωρίς τη συνεισφορά των παραπάνω συνεργατών, τους οποίους και ευχαριστώ θερμά, δε θα ήταν δυνατό να ολοκληρωθεί το βιομηχανικό πρωτότυπο και η παρούσα διπλωματική. Ευχαριστώ επίσης τον καθηγητή μας Χρήστο Αντωνόπουλο για την αμέριστη στήριξη και καθοδήγησή του και την οικογένειά μου που στάθηκε δίπλα μου σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



## **Βιομηχανική πρωτοτυποποίηση συστήματος διαφοροποιημένης λίπανσης**

Δημήτριος Ακρίδας

### **Περίληψη**

Στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε πειραματικό πρωτότυπο συστήματος εφαρμογής διαφοροποιημένης λίπανσης για καλλιέργειες σίτου, βασιζόμενο σε αισθητήρα για την εκτίμηση των θρεπτικών αναγκών της καλλιέργειας. Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εξέλιξη του εν λόγω πειραματικού πρωτοτύπου σε βιομηχανικό πρωτότυπο, το οποίο θα βρίσκεται σημαντικά πιο κοντά σε τελικό σύστημα, ικανό να εισαχθεί στην αγορά ως προϊόν και να χρησιμοποιηθεί από τους καλλιεργητές που επιθυμούν να αξιοποιήσουν την τεχνολογία της διαφοροποιημένης λίπανσης ακριβείας.

Η ανάπτυξη του συστήματος ξεκινά με την ενσωμάτωση ενός δεύτερου Raspberry Pi 3 στο αρχικό πρωτότυπο, για να φιλοξενήσει το γραφικό περιβάλλον. Στη συνέχεια αφαιρέθηκε ο προηγούμενος ενεργός οπτικός αισθητήρας και αντικαταστάθηκε από δύο κάμερες, στην οπτική και την εγγύς-υπέρυθρη (NIR) περιοχή του φάσματος. Ακόμα, για να γίνει εφικτός ο χειρισμός του συστήματος από τον χειριστή του γεωργικού ελκυστήρα, ενσωματώθηκε οθόνη 10.1 ιντσών και αναπτύχθηκε γραφικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη. Εκτός από τις βασικές λειτουργίες ελέγχου του συστήματος και οπτικοποίησης της κατάστασής του, ενσωματώθηκε βοηθός πορείας βασισμένος σε συσκευή GPS, που καθοδηγεί τον χειριστή ώστε να ακολουθεί με ακρίβεια τις διαδρομές στο χωράφι κατά την εφαρμογή της λίπανσης και να αποφεύγονται υπερκαλύψεις ή κενά. Τέλος ενσωματώθηκε δυνατότητα GPRS για την σύνδεση του συστήματος στο internet ώστε να υποστηριχθεί η δυνατότητα απομακρυσμένης ενημέρωσης του συστήματος και μεταφόρτωσης δεδομένων.

### **Λέξεις-κλειδιά**

Γεωργία ακριβείας, αυτοματισμοί, διαφοροποιημένη λίπανση, κάμερες, εφαρμογές Linux, πολυνηματικές εφαρμογές, γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη, Raspberry Pi, Qt framework, C++.

## **Industrial prototyping of variable rate fertilization system**

Dimitrios Akridas

### **Abstract**

In the context of a previous Thesis, an experimental prototype system for variable rate fertilization application in wheat crops was developed, based on a sensor for measuring plant nutrient demands. The aim of this Thesis is to evolve the experimental prototype into an industrial prototype, which will be significantly closer to a final system capable of entering the market as a product and being used by growers who wish to utilize precision, variable rate fertilization technology.

The development of the system begins with the integration of a second Raspberry Pi 3 into the initial prototype to host the graphical interface. Subsequently, the previous active optical sensor was removed and replaced with two cameras, one in the optical and one in the near-infrared (NIR) spectrum. Additionally, to enable the system to be operated by the tractor operator, we introduced a 10.1-inch screen, and we developed a graphical user interface. Apart from the basic control and monitoring functions of the system, a path assistant based on a GPS device was integrated, guiding the operator on field traffic to avoid overlaps or gaps during the operation. Finally, GPRS capability was incorporated to connect the system to the internet, supporting the possibility remote system updates and data uploading.

### **Keywords:**

Precision farming; automation; variable rate application; cameras; Linux applications; multi-threading programming; graphical user interface; Raspberry Pi; Qt framework, C++.



## Πίνακας περιεχομένων

|                                                                          |              |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <i>Ευχαριστίες</i> .....                                                 | <i>xiii</i>  |
| <i>Περίληψη</i> .....                                                    | <i>xv</i>    |
| <i>Abstract</i> .....                                                    | <i>xvii</i>  |
| <i>Πίνακας περιεχομένων</i> .....                                        | <i>xix</i>   |
| <i>Κατάλογος εικόνων</i> .....                                           | <i>xxi</i>   |
| <i>Κατάλογος σχημάτων</i> .....                                          | <i>xxiii</i> |
| <i>Κατάλογος πινάκων</i> .....                                           | <i>xxv</i>   |
| <i>Συντομογραφίες</i> .....                                              | <i>xxvii</i> |
| <b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</b> .....                                         | <b>1</b>     |
| 1.1 Γεωργία ακριβείας .....                                              | 1            |
| 1.2 Διαφοροποιημένη εφαρμογή.....                                        | 3            |
| 1.3 Αποτέλεσμα της διπλωματικής.....                                     | 5            |
| 1.4 Οργάνωση του τόμου .....                                             | 6            |
| <b>Κεφάλαιο 2 Υπόβαθρο</b> .....                                         | <b>9</b>     |
| 2.1 Συστήματα μέτρησης NDVI .....                                        | 9            |
| 2.1.1 Εισαγωγή.....                                                      | 9            |
| 2.1.2 Συστήματα ενεργών οπτικών αισθητήρων .....                         | 10           |
| 2.1.3 Συστήματα παθητικών οπτικών αισθητήρων .....                       | 10           |
| 2.1.4 Υπάρχουσες βιομηχανικές υλοποιήσεις συστημάτων μέτρησης NDVI ..... | 11           |
| 2.2 Ο μικροϋπολογιστής Raspberry PI 3 .....                              | 13           |
| 2.2.1 Εισαγωγή.....                                                      | 13           |
| 2.2.2 GPIO και 40-pin header .....                                       | 13           |
| 2.3 Η βιβλιοθήκη QT .....                                                | 14           |
| 2.3.1 Qt Framework .....                                                 | 14           |
| 2.3.2 Qt Creator .....                                                   | 14           |
| 2.4 Το σύστημα ελέγχου διαφοροποιημένης λίπανσης .....                   | 16           |

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>Κεφάλαιο 3 Υλοποίηση .....</b>               | <b>18</b> |
| <b>3.1 Αρχιτεκτονική συστήματος .....</b>       | <b>18</b> |
| 3.1.1 Εισαγωγή.....                             | 18        |
| 3.1.2 Αρχιτεκτονική υλικού .....                | 18        |
| 3.1.3 Αρχιτεκτονική λογισμικού.....             | 19        |
| 3.1.4 Υποδομή δικτύου .....                     | 24        |
| 3.1.5 Ενημέρωση λογισμικού.....                 | 25        |
| 3.1.6 Κόστος συστήματος .....                   | 27        |
| <b>3.2 Σύστημα μέτρησης .....</b>               | <b>28</b> |
| 3.2.1 Επισκόπηση λογισμικού.....                | 28        |
| 3.2.2 Υπολογισμός δείκτη NDVI .....             | 32        |
| 3.2.3 Καταγραφή και μεταφόρτωση δεδομένων ..... | 36        |
| <b>3.3 Γραφικό περιβάλλον .....</b>             | <b>37</b> |
| 3.3.1 Επισκόπηση λογισμικού.....                | 37        |
| 3.3.2 Οθόνες .....                              | 40        |
| 3.3.3 Βοηθός πορείας .....                      | 44        |
| <b>3.4 Δοκιμή συστήματος.....</b>               | <b>46</b> |
| 3.4.1 Εγκατάσταση πρωτοτύπου για δοκιμή .....   | 46        |
| 3.4.2 Αποτελέσματα δοκιμής.....                 | 47        |
| <b>Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα.....</b>             | <b>51</b> |
| <b>4.1 Σύνοψη και συμπεράσματα .....</b>        | <b>51</b> |
| <b>4.2 Μελλοντικές επεκτάσεις.....</b>          | <b>52</b> |
| <b>Βιβλιογραφία .....</b>                       | <b>53</b> |

## Κατάλογος εικόνων

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1-1 Εξέλιξη παγκόσμιου πληθυσμού [1] .....                                                                  | 1  |
| Εικόνα 1-2 Χωράφι με σημαντική διαφοροποίηση στην ανάπτυξη της καλλιέργειας [2]... 2                               |    |
| Εικόνα 1-3 Χάρτης βλάστησης [3] .....                                                                              | 4  |
| Εικόνα 1-4 Χάρτης εφαρμογής μυκητοκτόνων [3] .....                                                                 | 4  |
| Εικόνα 2-1 Σύστημα ενεργών αισθητήρων Yara N-Sensor .....                                                          | 12 |
| Εικόνα 2-2 Σύστημα παθητικών αισθητήρων Sentara DJI Phantom 4 .....                                                | 12 |
| Εικόνα 2-3 Ο Qt Creator κατά την ανάπτυξη του πρωτοτύπου .....                                                     | 15 |
| Εικόνα 2-4 Ο Qt Designer κατά την ανάπτυξη του πρωτοτύπου .....                                                    | 15 |
| Εικόνα 2-5 Συνδεσμολογία Raspberry Pi 3 με Actuator [4] .....                                                      | 16 |
| Εικόνα 2-6 Συνδεσμολογία Reed switch με Raspberry [4] .....                                                        | 17 |
| Εικόνα 2-7 Εφαρμογή Reed Switch μαζί με μαγνήτες στον τροχό του γεωργικού<br>ελκυστήρα [4] .....                   | 17 |
| Εικόνα 3-1 Εικόνα απο την Agrocarn NIR κάμερα .....                                                                | 33 |
| Εικόνα 3-2 Εικόνα απο την Logitech C920 κάμερα .....                                                               | 33 |
| Εικόνα 3-3 Απόκριση ενός τυπικού CMOS αισθητήρα [30] .....                                                         | 34 |
| Εικόνα 3-4 Διάγραμμα απόκρισης κάμερας Agrocarn Pro NIR [17] .....                                                 | 34 |
| Εικόνα 3-5 Grayscale εικόνα με το red κανάλι της Agrocarn NIR κάμερας .....                                        | 35 |
| Εικόνα 3-6 Grayscale εικόνα με το red κανάλι της Logitech C920 κάμερας .....                                       | 35 |
| Εικόνα 3-7 Οθόνη ελέγχου παραμέτρων εργασίας .....                                                                 | 41 |
| Εικόνα 3-8 Οθόνη ελέγχου παραμέτρων λίπανσης .....                                                                 | 42 |
| Εικόνα 3-9 Οθόνη βοηθού πορείας .....                                                                              | 43 |
| Εικόνα 3-10 Η οθόνη βοηθού πορείας μέσα από τον Qt Designer .....                                                  | 45 |
| Εικόνα 3-11 Ολοκληρωμένο πρωτότυπο .....                                                                           | 47 |
| Εικόνα 3-12 Εγκατάσταση συστήματος σε ελκυστήρα για δοκιμή .....                                                   | 47 |
| Εικόνα 3-13 Πορεία ελκυστήρα σε δοκιμαστική χρήση του συστήματος .....                                             | 48 |
| Εικόνα 3-14 Πορεία ελκυστήρα και δείκτης NDVI σε πειραματικό αγρό, όπως<br>σχεδιάστηκε από τον βοηθό πορείας ..... | 49 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 3-15 Χάρτης NDVI του πειραματικού αγρού μέσω του δορυφόρου Sentinel II και της πλατφόρμας OneSoil [37] ..... | 50 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## Κατάλογος σχημάτων

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 2-1 Τυπική απόκριση υγιών και στρεσαρισμένων φυτών στο ορατό και στο υπέρυθρο φάσμα [7] ..... | 9  |
| Σχήμα 2-2 Παράδειγμα ενεργού αισθητήρα [9] .....                                                    | 10 |
| Σχήμα 2-3 Παράδειγμα παθητικού αισθητήρα [9] .....                                                  | 11 |
| Σχήμα 2-4 Raspberry Pi 3 – GPIO [14] .....                                                          | 13 |
| Σχήμα 3-1 Δομικού διάγραμμα συστήματος .....                                                        | 19 |
| Σχήμα 3-2 Τεχνολογική στοίβα .....                                                                  | 20 |
| Σχήμα 3-3 Διάγραμμα καταστάσεων συστήματος.....                                                     | 22 |
| Σχήμα 3-4 Δίκτυο πρόσβασης internet .....                                                           | 25 |
| Σχήμα 3-5 Διαδικασία ενημέρωσης λογισμικού .....                                                    | 27 |
| Σχήμα 3-6 Δομικό διάγραμμα λογισμικού συστήματος μέτρησης.....                                      | 29 |
| Σχήμα 3-7 Διάγραμμα κλάσεων λογισμικού συστήματος μέτρησης.....                                     | 31 |
| Σχήμα 3-8 Η κλάση Actuator και τα παράγωγά της ManualActuator και VRFACTOR ....                     | 32 |
| Σχήμα 3-9 Αρχιτεκτονική λογισμικού γραφικού περιβάλλοντος.....                                      | 38 |
| Σχήμα 3-10 Διάγραμμα κλάσεων λογισμικού γραφικού περιβάλλοντος .....                                | 40 |
| Σχήμα 3-11 Διάγραμμα κλάσεων βοηθού πορείας .....                                                   | 46 |



## Κατάλογος πινάκων

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| Πίνακας 3-1 Το interface της κλάσης Thread.....         | 21 |
| Πίνακας 3-2 Εντολές ελέγχου συστήματος.....             | 23 |
| Πίνακας 3-3 Τηλεμετρία συστήματος.....                  | 24 |
| Πίνακας 3-4 Αρχείο ενημέρωσης.....                      | 25 |
| Πίνακας 3-5 Ανάλυση κόστους κατασκευής πρωτοτύπου ..... | 28 |
| Πίνακας 3-6 Ανάλυση δεδομένων καταγραφής .....          | 36 |



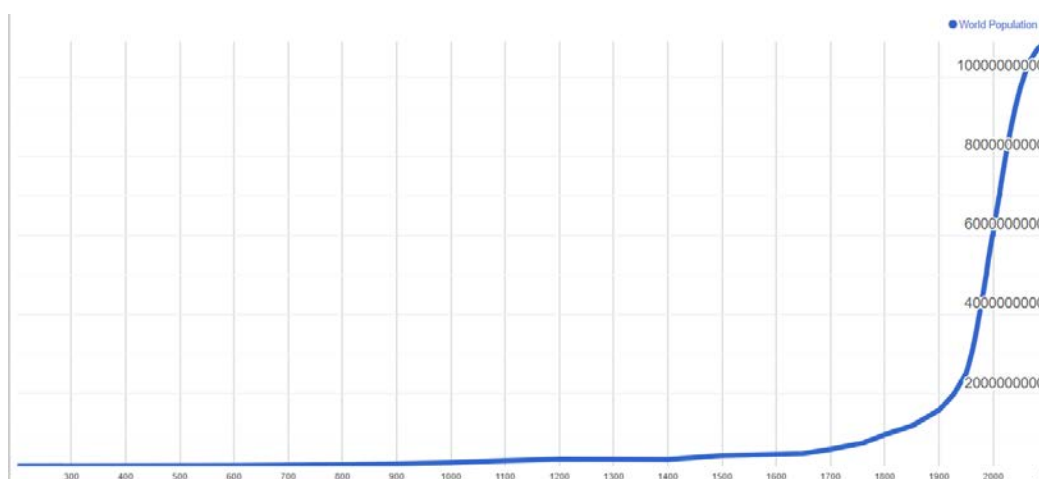
## Συντομογραφίες

|      |                                             |
|------|---------------------------------------------|
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index      |
| GPIO | General Purpose Input Output                |
| GPRS | General Packet Radio Service                |
| UART | Universal Asynchronous Receiver Transmitter |
| PPP  | Point to Point Protocol                     |
| DHCP | Dynamic Host Configuration Protocol         |
| XML  | eXtensible Markup Language                  |
| DEB  | Debian Software Packages                    |
| APT  | Advanced Package Tool                       |
| UML  | Unified Modeling Language                   |

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γεωργία ακριβείας

Η γεωργία διαχρονικά αποτελεί έναν από τους βασικούς πυλώνες της κοινωνίας και είναι απαραίτητη για την επιβίωση του ανθρώπου και την εξέλιξη του. Τα τελευταία χρόνια ο πληθυσμός έχει αυξηθεί ραγδαία, αγγίζοντας σήμερα τα 8 δισεκατομμύρια, όταν τον περασμένο αιώνα αποτελούνταν από 1.5 δισεκατομμύρια. Στην Εικόνα 1-1 παρουσιάζεται η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού σε βάθος δύο χιλιετιών.



Εικόνα 1-1 Εξέλιξη παγκόσμιου πληθυσμού [1]

Αυτή η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού έχει πιέσει τη γεωργία να αυξήσει την αποδοτικότητά της ώστε να ικανοποιήσει τις ανάγκες για τροφή. Ως αποτέλεσμα, η σύγχρονη κοινωνία καλείται να αντιμετωπίσει τις επιπτώσεις, όπως ο κορεσμός της διαθέσιμης καλλιεργήσιμης γης και η αλόγιστη χρήση λιπασμάτων και φαρμάκων που είναι επιβλαβή για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Η παράλληλη εξέλιξη της τεχνολογίας επιτρέπει σήμερα την δημιουργία καινοτόμων συστημάτων που επιτρέπουν την καλύτερη διαχείριση της καλλιεργήσιμης γης με τελικό σκοπό τη μεγιστοποίηση της απόδοσής της και την προστασία του περιβάλλοντος.

Η γεωργία ακριβείας [2] αποτελεί ένα πρόσφατο τομέα μελέτης που αναπτύσσεται βασιζόμενος σε τεχνολογικά μέσα και που ποσοτικοποιεί τις ανάγκες της εκάστοτε καλλιέργειας, κατευθύνοντας τον σύγχρονο παραγωγό ώστε να επιτύχει τη μέγιστη απόδοση. Η μέθοδος έχει στόχο τη μείωση του χρόνου εργασίας, την μεγιστοποίηση της απόδοσης της καλλιέργειας και την αποτελεσματικότερη χρήση των απαραίτητων εισροών για την ανάπτυξη της. Στηρίζεται σε δεδομένα που εξάγονται από το σύνολο του αγρού μέσω αισθητήρων και περιγράφουν πληθώρα παραμέτρων, όπως η κατάσταση του εδάφους (σύσταση, θερμοκρασία, υγρασία), το μικρόκλιμα που περιβάλλει την καλλιέργεια, και την κατάσταση της ίδιας της καλλιέργειας (στάδιο ανάπτυξης, χημική σύσταση, κ.α.). Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια είτε από μοντέλα πρόβλεψης που βοηθούν τον αγρότη στη λήψη χρονικών αποφάσεων για την έγκυρη επέμβαση στην καλλιέργεια, είτε από συστήματα ελέγχου για την βέλτιστη χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και νερού, απαραίτητα για την ανάπτυξη και την προστασία των φυτών.

Βασική υπόθεση της, που τη διαχωρίζει από την παραδοσιακή γεωργία είναι ότι ένα χωράφι δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται σαν μονάδα καθώς οι παράμετροί του διαφοροποιούνται σημαντικά από σημείο σε σημείο. Στην Εικόνα 1-2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα χωραφιού στο κεντρικό Μιζούρι με χειμερινό σιτάρι, όπου το επίπεδο ανάπτυξης είναι καλύτερο στις περιοχές του χωραφιού κοντά στα σημεία που διατρέχονται από νερό και χειρότερο στα πιο απομακρυσμένα σημεία. Η κατάσταση αυτή θα έχει άμεσο αντίκτυπο στην τελική απόδοση του χωραφιού, καθώς στα φυτά με μειωμένη ανάπτυξη η σοδειά θα είναι μικρότερη.



Εικόνα 1-2 Χωράφι με σημαντική διαφοροποίηση στην ανάπτυξη της καλλιέργειας [2]

Το παράδειγμα αυτό αφενός στηρίζει την υπόθεση της διαφοροποίησης και αφετέρου εγείρει το ερώτημα για την κατάλληλη διαχείριση της καλλιέργειας ώστε να διορθωθεί το πρόβλημα στις ασθενείς περιοχές και να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση σε όλη την έκτασή της. Κάτι τέτοιο φυσικά δεν είναι απλό, καθώς δεν υπάρχει πάντα βιώσιμη οικονομική λύση για την επιδιόρθωση της καλλιέργειας. Αντ' αυτού, βασικός στόχος μιας μεθόδου διαχείρισης, θα ήταν η βέλτιστη χρήση των εισροών στις περιοχές εντός του χωραφίου με διαφορετικές παραγωγικές δυνατότητες μέσω διαφοροποιημένης εφαρμογής των απαιτούμενων προϊόντων.

Είναι φανερό από την παραπάνω ανάλυση ότι ένας καλλιεργητής θα χρειαζόνταν αρκετά χρόνια εμπειρικής παρακολούθησης και δοκιμών για να επιτύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Το πρόβλημα γίνεται μάλιστα πρακτικά μη επιλύσιμο αν αναλογιστούμε το γεγονός ότι παραγωγοί συχνά δεν διαχειρίζονται μόνο ένα χωράφι αλλά καλλιέργειες που εκτείνονται σε τεράστιες εκτάσεις. Επιπλέον, ακόμα και αν γνώριζε την καλύτερη αντιμετώπιση για την καλλιέργεια του σε κάθε σημείο της, ο παραγωγός θα έπρεπε να έχει στη διάθεση του συστήματα ικανά να εκτελέσουν τις οδηγίες του.

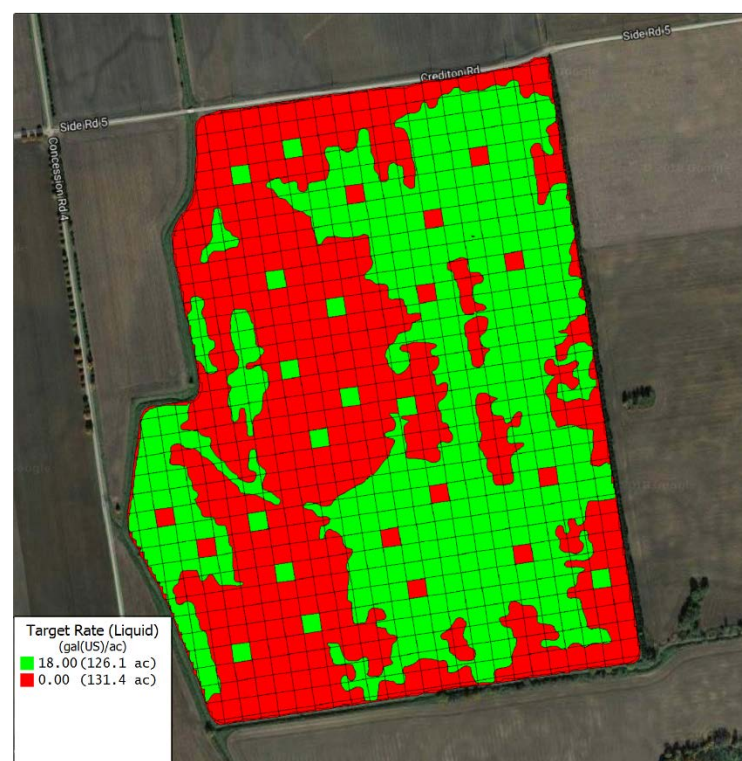
## **1.2 Διαφοροποιημένη εφαρμογή**

Η διαφοροποιημένη εφαρμογή επιτρέπει την εφαρμογή προϊόντων (λιπασμάτων, μυκητοκτόνων κτλ.) σε διαφορετική ποσότητα κατά μήκος του χωραφίου. Η μέθοδος βασίζεται στην παρατήρηση και ποσοτικοποίηση της χωρικής παραλλακτικότητας της καλλιέργειας για την καθοδήγηση της απόφασης της ποσότητας εφαρμογής του εκάστοτε προϊόντος. Η χωρική παραλλακτικότητα γίνεται αντιληπτή ως μεταβολή των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών του αγροτεμαχίου με την αλλαγή θέσης μέσα σε αυτό.

Στην Εικόνα 1-3 παρουσιάζεται ο δείκτης βλάστησης NDVI ενός χωραφίου στον οποίο είναι εμφανής η παραλλακτικότητα, ενώ στην Εικόνα 1-4 παρουσιάζεται ένας χάρτης εφαρμογής μυκητοκτόνων που λαμβάνει υπόψιν του την παραλλακτικότητα για να διαφοροποιήσει την εφαρμογή του προϊόντος.



Εικόνα 1-3 Χάρτης βλάστησης [3]



Εικόνα 1-4 Χάρτης εφαρμογής μυκητοκτόνων [3]

Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να κατασκευάσουμε συστήματα διαφοροποιημένης εφαρμογής και να αυτοματοποιήσουμε τη διαδικασία.

Ένα τυπικό σύστημα διαφοροποιημένης εφαρμογής αποτελείται από τρία βασικά μέρη: (α) Το σύστημα μέτρησης που είναι υπεύθυνο για την ποσοτικοποίηση της χωρικής παραλλακτικότητας μίας ή και πολλών ιδιοτήτων της καλλιέργειας, (β) το σύστημα της απόφασης της ποσότητας εφαρμογής του εκάστοτε προϊόντος, και (γ) το σύστημα της εκτέλεσης της παραπάνω απόφασης. Τα τρία αυτά στάδια είτε λειτουργούν ανεξάρτητα, εισάγοντας συνήθως καθυστέρηση και σφάλματα στη διαδικασία, είτε συνυπάρχουν σε ένα ενιαίο σύστημα, επιτυγχάνοντας έτσι τη διαφοροποιημένη εφαρμογή εισροών σε πραγματικό χρόνο. Η λίπανση είναι σημαντική εφαρμογή για αυτούς τους λόγους, και από εδώ και πέρα στη διπλωματική θα επικεντρωθούμε κατά κανόνα σε αυτή.

Τα συστήματα λίπανσης πραγματικού χρόνου σχεδιάζονται με βάση το παραπάνω παράδειγμα και βασίζουν την απόφαση λίπανσης σε εκτιμήσεις της θρεπτικής κατάστασης της καλλιέργειας. Τα συστήματα μέτρησης σε αυτή την περίπτωση είναι οπτικοί αισθητήρες που εκμεταλλεύονται την απόκριση του φυτού σε συγκεκριμένες περιοχές του ορατού και υπέρυθρου φάσματος και υπολογίζουν δείκτες βλάστησης που προσδιορίζουν την θρεπτική τους κατάσταση. Τα τελευταία χρόνια η βιομηχανία έχει κάνει προσπάθειες για την κατασκευή συστημάτων μέτρησης της θρεπτικής κατάστασης της καλλιέργειας, τα οποία όμως δεν είναι ευρύτερα διαδεδομένα λόγω της χαμηλής ακρίβειας και του υψηλού κόστους τους. Κατά συνέπεια, η μέθοδος της διαφοροποιημένης λίπανση πραγματικού χρόνου παραμένει μη εκμεταλλεύσιμη από τον τελικό χρήστη.

### **1.3 Αποτέλεσμα της διπλωματικής**

Στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας από τους Γ. Βαρβαρέλη και Δ. Ευαγγελόπουλο [4], αναπτύχθηκε πειραματικό πρωτότυπο συστήματος εφαρμογής διαφοροποιημένης λίπανσης για καλλιέργειες σίτου, βασιζόμενο στον αισθητήρα Crop Circle [5] για την μέτρηση της θρεπτικής κατάστασης των φυτών. Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εξέλιξη του εν λόγω πειραματικού πρωτοτύπου σε βιομηχανικό πρωτότυπο, το οποίο θα βρίσκεται σημαντικά πιο κοντά σε τελικό σύστημα

ικανό να εισαχθεί στην αγορά ως προϊόν και να χρησιμοποιηθεί από τους καλλιεργητές που επιθυμούν να αξιοποιήσουν την τεχνολογία της διαφοροποιημένης λίπανσης ακριβείας.

Η ανάπτυξη του συστήματος ξεκινά με την ενσωμάτωση ενός δεύτερου Raspberry Pi 3 στο αρχικό πρωτότυπο, για να φιλοξενήσει το γραφικό περιβάλλον. Η επιλογή αυτή έχει σκοπό να αυξήσει την υπολογιστική δυνατότητα του συστήματος καθώς η ενσωμάτωση βοηθού πορείας στο γραφικό περιβάλλον θα αύξανε σημαντικά τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Ακόμα κρίθηκε σημαντικό να απομονωθεί το σύστημα μέτρησης και ελέγχου του λιπασματοδιανομέα, μιας και πρόκειται για ένα αρκετά ευαίσθητο μέρος του συστήματος που έχει πρόσβαση σε μηχανικά μέρη.

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε ο ενεργός οπτικός αισθητήρας Crop Circle και αντικαταστάθηκε από δύο κάμερες, την Logitech HD Pro Webcam και την NIR Agrocarn. Οι εικόνες των δύο καμερών θα συνδυαστούν στη συνέχεια για τον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης NDVI. Για να γίνει εφικτός ο χειρισμός του συστήματος από το χειριστή του γεωργικού ελκυστήρα, ενσωματώθηκε οθόνη 10.1 ιντσών και αναπτύχθηκε γραφικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη. Εκτός από τις βασικές λειτουργίες ελέγχου του συστήματος και οπτικοποίησης της κατάστασής του, ενσωματώθηκε βοηθός πορείας βασισμένος σε συσκευή GPS, που καθοδηγεί τον χειριστή ώστε να ακολουθεί με ακρίβεια τις διαδρομές στο χωράφι κατά την εφαρμογή της λίπανσης και να αποφεύγονται υπερκαλύψεις ή κενά. Τέλος ενσωματώθηκε δυνατότητα GPRS για την σύνδεση του συστήματος στο internet, ώστε να υποστηριχθεί η δυνατότητα απομακρυσμένης ενημέρωσης του συστήματος και μεταφόρτωσης δεδομένων.

Η λειτουργία του συστήματος αξιολογήθηκε σε πειραματικό αγρό αξιοποιώντας ως συγκριτικά στοιχεία δεδομένα από το δορυφόρο Sentinel II [6] της Ευρωπαϊκής διαστημικής υπηρεσίας (ESA).

## **1.4 Οργάνωση του τόμου**

Η διπλωματική χωρίζεται σε 5 κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το επιστημονικό καθώς και το τεχνικό υπόβαθρο στο οποίο βασίστηκε η παρούσα εργασία. Αναλύεται η βασική μέθοδος υπολογισμού των θρεπτικών αναγκών, υπάρχουσες υλοποιήσεις καθώς και τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του βιομηχανικού

πρωτοτύπου. Ακόμα παρουσιάζεται το πειραματικό πρωτότυπο στο οποίο βασίζεται η εργασία. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται αναλυτικά η υλοποίηση του συστήματος, ξεκινώντας από το σύστημα μέτρησης και συνεχίζοντας με το γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη. Στο 3.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη δοκιμή του συστήματος σε πειραματικό αγρό και αξιολογούνται με δεδομένα από το δορυφόρο Sentinel II. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής καθώς και τα σημεία του συστήματος που χρήζουν βελτιστοποίησης.

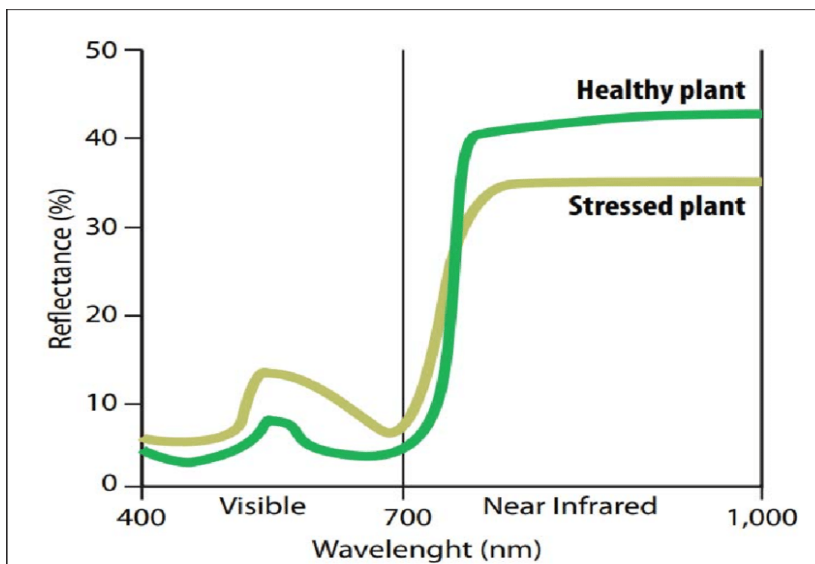


## Κεφάλαιο 2 Υπόβαθρο

### 2.1 Συστήματα μέτρησης NDVI

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία πέφτει πάνω σε αντικείμενα, ένα μέρος της απορροφάτε και το υπόλοιπο ανακλάτε. Η ίδια αρχή ισχύει και για τα φυτά. Η χλωροφύλλη στα φύλλα των φυτών απορροφά το ορατό φως (400nm – 450 nm & 620nm - 680nm) για τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, η δομή των φυτικών κυττάρων ανακλά στο πράσινο φάσμα (500nm – 540 nm) ενώ τα υγιή φυτά ανακλούν πολύ έντονα στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα (700nm – 1100nm) για να μην υπερθερμανθούν. Γίνεται αμέσως αντιληπτό πως τα υγιή φυτά παρουσιάζουν μια αρκετά διαφορετική εικόνα στο φάσμα του ανακλώμενου φωτός από τα λιγότερο υγιή φυτά. Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται η τυπική απόκριση υγείων και στρεσαρισμένων φυτών στο ορατό και στο υπέρυθρο φάσμα.



Σχήμα 2-1 Τυπική απόκριση υγίων και στρεσαρισμένων φυτών στο ορατό και στο υπέρυθρο φάσμα [7]

Ο δείκτης βλάστησης NDVI [8] (Normalized Difference Vegetation Index), ο πλέον καθιερωμένος δείκτης για την ποσοτικοποίηση της θρεπτικής κατάστασης των φυτών υπολογίζεται ως ακολούθως

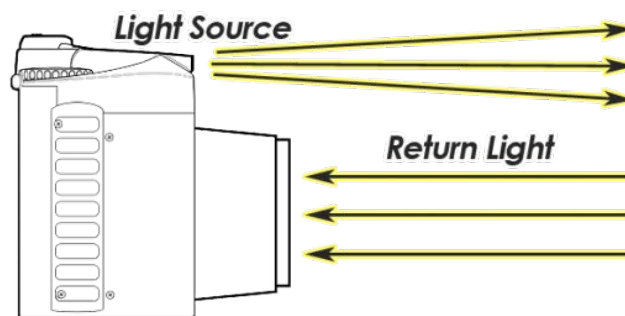
$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED)$$

Όπου NIR η ισχύς της ανακλώμενης ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα, και RED η ισχύς της ανακλώμενης ακτινοβολίας στο ορατό κόκκινο φάσμα.

Οι οπτικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία, όπως αυτοί των κινητών τηλεφώνων, είναι στην πλειοψηφία τους ευαίσθητοι στα παραπάνω φάσματα. Είναι λοιπόν εφικτός ο υπολογισμός του δείκτη NDVI χρησιμοποιώντας αισθητήρες χαμηλού κόστους.

### 2.1.2 Συστήματα ενεργών οπτικών αισθητήρων

Τα συστήματα ενεργών οπτικών αισθητήρων ενσωματώνουν έναν οπτικό αισθητήρα και μια ελεγχόμενη πηγή φωτός, με την οποία στέλνουν παλμούς ακτινοβολίας συγκεκριμένου φάσματος στο προς μελέτη αντικείμενο και μετράνε το ανακλώμενο μέρος του φωτός με τον οπτικό αισθητήρα τους. Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ενεργού οπτικού αισθητήρα, αυτό της συμβατικής φωτογραφικής κάμερας με φλας.



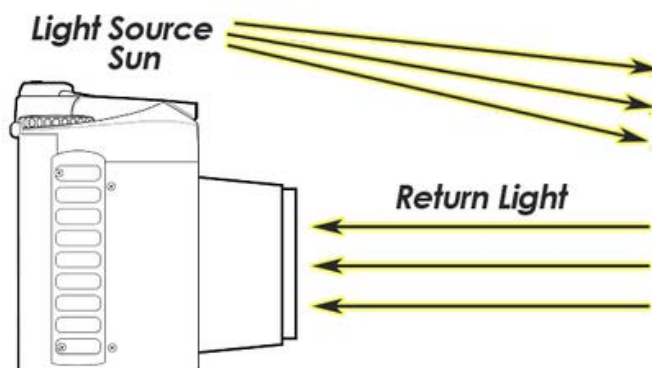
Σχήμα 2-2 Παράδειγμα ενεργού αισθητήρα [9]

Αυτή τους η δυνατότητα για έλεγχο της πηγής φωτός, δίνει στα συστήματα αυτά την ιδιότητα της επαναληψιμότητας της μέτρησης υπό την προϋπόθεση μη ακραίων περιβαλλοντικών συνθηκών, καθώς σε συνθήκες έντονου ηλιακού φωτισμού η ακτινοβολία του ηλίου προστίθεται στη συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία. Παράλληλα το κόστος αυτών των συστημάτων τείνει να είναι αρκετά μεγάλο.

### 2.1.3 Συστήματα παθητικών οπτικών αισθητήρων

Τα συστήματα παθητικών οπτικών αισθητήρων ενσωματώνουν μόνο τον οπτικό αισθητήρα. Η πηγή φωτός είναι ο ίδιος ο ήλιος. Στο Σχήμα 2-3 παρουσιάζεται το

αντίστοιχο παράδειγμα παθητικού οπτικού αισθητήρα, της συμβατικής φωτογραφικής κάμερας χωρίς φλας.



Σχήμα 2-3 Παράδειγμα παθητικού αισθητήρα [9]

Η μη ύπαρξη ελεγχόμενης πηγής φωτός προσθέτει σε αυτά τα συστήματα το πρόβλημα του παθητικού ελέγχου της πηγής ρυθμίζοντας τον οπτικό αισθητήρα κατάλληλα, ώστε να απορροφήσει αλλαγές στον περιβαλλοντικό φωτισμό και να διατηρήσει σταθερή τη μέτρηση του. Σε αντίθεση με τα συστήματα ενεργών οπτικών αισθητήρων, τα συστήματα παθητικών οπτικών αισθητήρων έχουν χαμηλότερο κόστος.

#### 2.1.4 Υπάρχουσες βιομηχανικές υλοποιήσεις συστημάτων μέτρησης NDVI

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα ενεργών οπτικών αισθητήρων είναι αυτά του νορβηγικού N-Sensor [10], και των αμερικάνικων GreenSeeker [11], OptRx Crop System [12], και Crop Circle [5]. Ο τελευταίος χρησιμοποιήθηκε από το ερευνητικό πρωτότυπο διαφοροποιημένης λίπανσης στο οποίο η παρούσα εργασία βασίζεται. Τα παραπάνω συστήματα, που χρησιμοποιούνται κυρίως στο γεωγραφικό χώρο της Ευρώπης, ενσωματώνονται συνήθως σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαφοροποιημένης λίπανσης πραγματικού χρόνου εγκατεστημένο στον γεωργικό ελκυστήρα. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το κύριο μειονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι το υψηλό κόστος τους. Η απόδοση τους όμως είναι αμφιλεγόμενη αφού η χρήση τους είναι περιορισμένη και δεν έχουν καταφέρει να διεισδύσουν σε πολύ μεγάλες αγορές όπως η αμερικανική. Στην Εικόνα 2-1 παρουσιάζεται το σύστημα ενεργών αισθητήρων Yara N-Sensor.



Εικόνα 2-1 Σύστημα ενεργών αισθητήρων Yara N-Sensor

Τα συστήματα παθητικών οπτικών αισθητήρων, που συναντάμε κυρίως της Ηνωμένες Πολιτείες, χρησιμοποιούνται από εταιρίες παροχής χαρτών NDVI, και ενσωματώνονται σε δορυφόρους, αεροπλάνα και drones. Πρόκειται ουσιαστικά για πολυφασματικές κάμερες υψηλής ανάλυσης που φωτογραφίζουν το αγροτεμάχιο από μεγάλο ύψος και παράγουν χάρτες βλάστησης. Οι χάρτες αυτοί, εισάγονται σε δεύτερο χρόνο, σε συστήματα ελέγχου που έχουν τη δυνατότητα εκτέλεσης διαφοροποιημένης λίπανσης. Τα μειονεκτήματα της διαδικασίας είναι αφενός η χαμηλή ποιότητα της μέτρησης λόγω του μεγάλου ύψους που τα συστήματα μέτρησης επιχειρούν, και αφετέρου η αδυναμία εκτεταμένης χρήσης τους καθώς η λειτουργία τους είναι αδύνατη σε συνθήκες υψηλού ανέμου όταν πρόκειται για drones, και έντονης νέφωσης όταν πρόκειται για αεροπλάνα και δορυφόρους.

Στην Εικόνα 2-2 παρουσιάζεται το σύστημα παθητικών αισθητήρων Sentara DJI Phantom 4.



Εικόνα 2-2 Σύστημα παθητικών αισθητήρων Sentara DJI Phantom 4

## 2.2 Ο μικροϋπολογιστής Raspberry Pi 3

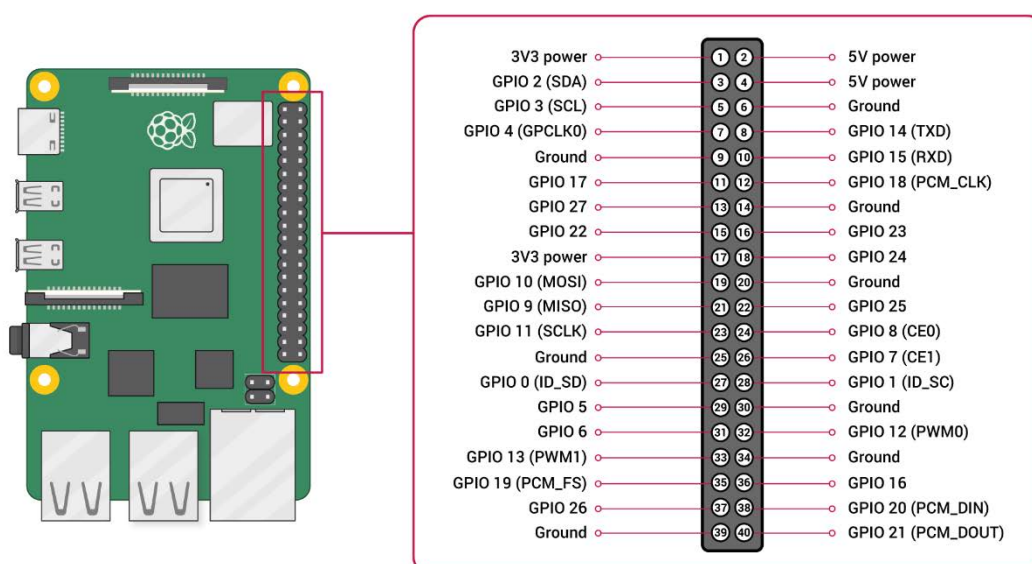
### 2.2.1 Εισαγωγή

Το Raspberry Pi 3 [13] είναι ένα single board computer (SBC) με ενσωματωμένο SoC της Broadcom που περιέχει μεταξύ άλλων έναν τετραπύρρηνο 64-bit ARM Cortex-A53 επεξεργαστή στα 1.2GHz, 1GB RAM, WiFi και Bluetooth. Το board περιέχει ακόμα περιφερειακά όπως Ethernet, USB, HDMI και έναν προσαρμογέα (header) 40-pin με για πρόσβαση σε πολλά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Αποτελεί έτσι έναν ολοκληρωμένο μικρο-υπολογιστή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές και να επιταχύνει την ανάπτυξη πρωτοτύπων.

Το λειτουργικό που συνηθίζεται να χρησιμοποιείται είναι το Raspbian, που είναι βασισμένο στη Linux διανομή Debian και εγκαθίσταται στην κάρτα microSD. Το Raspbian παρέχει και lite έκδοση, η οποία είναι ιδανική για συστήματα στα οποία δεν είναι απαραίτητο το γραφικό περιβάλλον.

### 2.2.2 GPIO και 40-pin header

Το 40-pin header που βρίσκεται στην κορυφή του Raspberry Pi 3 δίνει πρόσβαση στα GPIO όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-4 Raspberry Pi 3 – GPIO [14]

Τα pins αυτά ενσωματώνουν μια πληθώρα λειτουργιών όπως PWM, SPI, I2C και Serial, που επιτρέπουν την ανάπτυξη πολύπλοκων εφαρμογών. Τα pins GPIO14 και GPIO15 χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση σειριακής επικοινωνίας, για τη μετάδοση και την ανάγνωση δεδομένων αντίστοιχα. Η λειτουργία αυτή είναι προσβάσιμη στο επίπεδο του λειτουργικού μέσω της ενσωματωμένης UART στο /dev/ttyS0.

## 2.3 Η βιβλιοθήκη QT

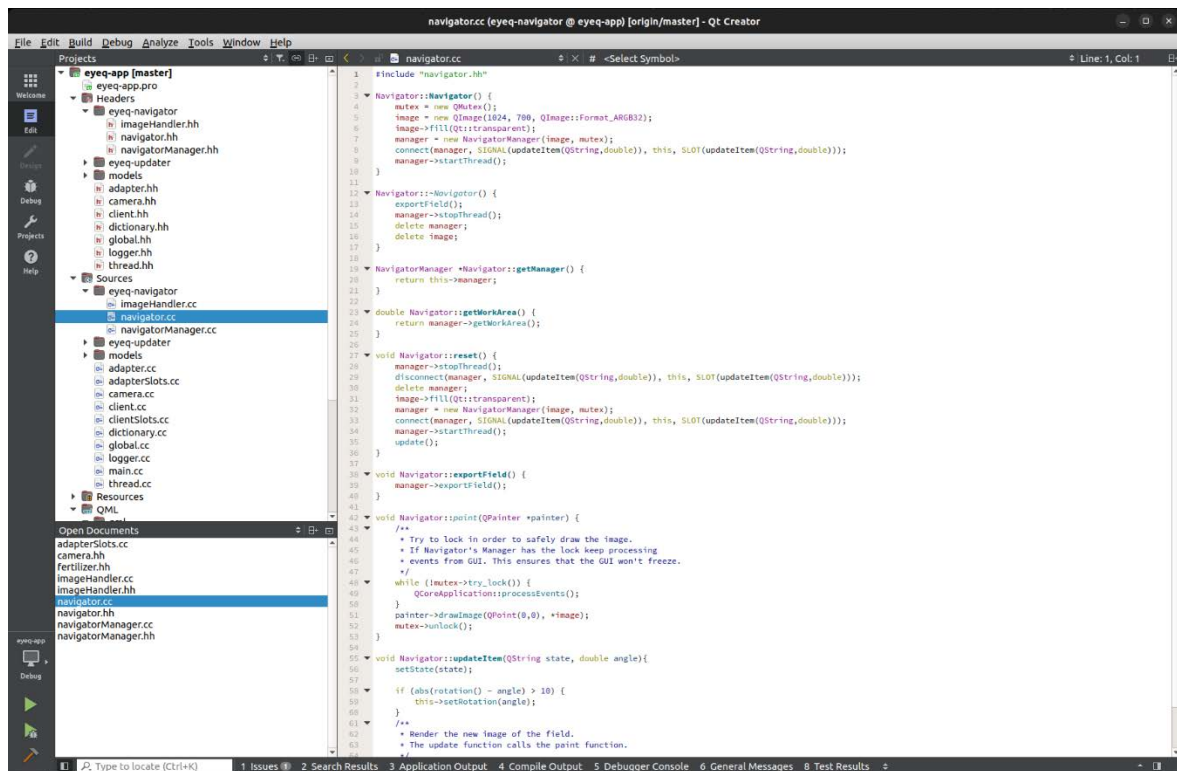
### 2.3.1 Qt Framework

Το Qt framework [15] είναι μια συλλογή C++ βιβλιοθηκών που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη λογισμικού και εφαρμογών γραφικού περιβάλλοντος. Τα πιο σημαντικά modules που περιέχονται είναι τα

- Qt Core για multi-threading, object communication, inter-process communication κ.α.
- Qt Network για low-level network communication όπως TCP και UDP, υλοποιήσεις client-server , υλοποιήσεις πρωτοκόλλων υψηλού επιπέδου όπως HTTP και FTP, host name resolving, κ.α
- Qt GUI για windowing system integration, event handling, OpenGL, 2D graphics κ.α.
- Qt Quick για συγγραφή QML εφαρμογών και integration με C++ κώδικα, που επιταχύνουν την ανάπτυξη εφαρμογών γραφικού περιβάλλοντος.

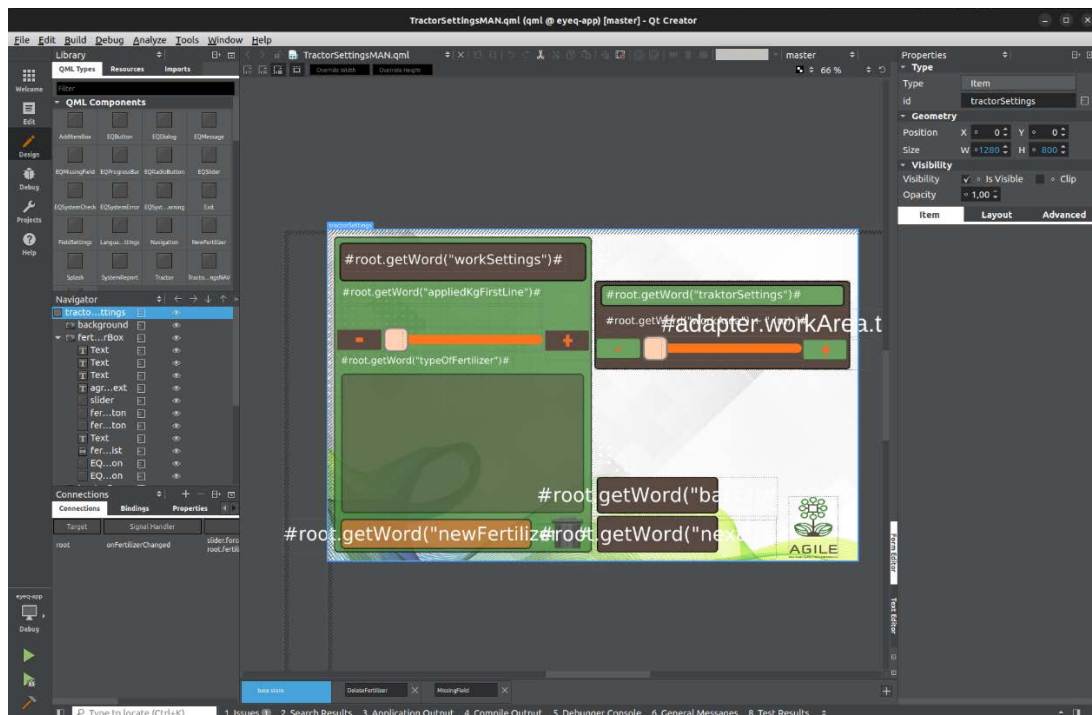
### 2.3.2 Qt Creator

Ο Qt Creator είναι ένα integrated development environment (IDE) για την ανάπτυξη κώδικα C++, Python, QML κ.α. Παρέχεται μεταξύ άλλων code editor, version control και code debugging. Στην Εικόνα 2-3 παρουσιάζεται ο Qt Creator κατά την ανάπτυξη του πρωτοτύπου.



Εικόνα 2-3 Ο Qt Creator κατά την ανάπτυξη του πρωτοτύπου

Μια ακόμα σημαντική λειτουργία του Qt Creator είναι και ο ενσωματωμένος Qt Designer ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 2-4 και ο οποίος αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη του βασικού σκελετού μιας εφαρμογής γραφικού περιβάλλοντος.

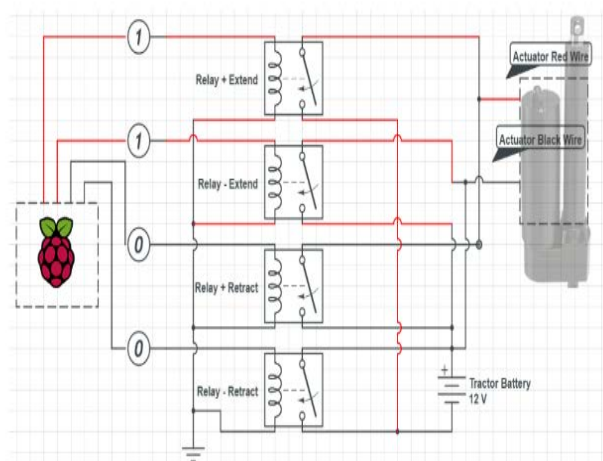


Εικόνα 2-4 Ο Qt Designer κατά την ανάπτυξη του πρωτοτύπου

## 2.4 Το σύστημα ελέγχου διαφοροποιημένης λίπανσης

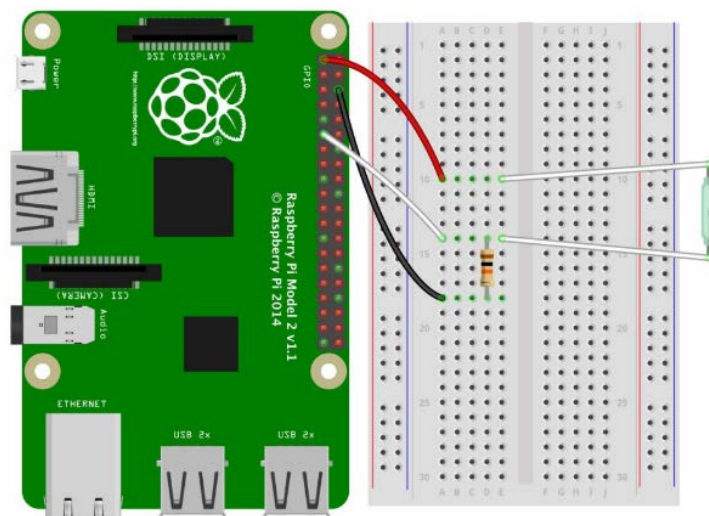
Το σύστημα ελέγχου διαφοροποιημένης λίπανσης (VRA Control System) είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της λίπανσης σε πραγματικό χρόνο. Τα βασικά του στοιχεία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι τα στοιχεία υλικού που είναι υπεύθυνα για τον μηχανικό έλεγχο του λιπασματοδιανομέα και αποτελούνται από τον ηλεκτρικό βραχίονα και τον μαγνητικό αισθητήρα ταχύτητας. Ο πρώτος εγκαθίσταται στον λιπασματοδιανομέα και ελέγχει τις θυρίδες από τις οποίες εξέρχεται το λίπασμα ενώ ο δεύτερος εγκαθίσταται σε μία από τις μπροστινές ρόδες του γεωργικού ελκυστήρα. Η δεύτερη κατηγορία είναι τα στοιχεία λογισμικού που αποτελούνται από τον αλγόριθμο απόφασης των μονάδων αζώτου που πρόκειται να εφαρμοστούν καθώς και τον αλγόριθμο εκτέλεσης της απόφασης αυτής.

Το Raspberry Pi 3, ο επεξεργαστής που είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της κίνησης του βραχίονα, ελέγχει την πολικότητα του μοτέρ μέσω τεσσάρων ρελέ και της εξόδου 3.3V, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-5.



Εικόνα 2-5 Συνδεσμολογία Raspberry Pi 3 με Actuator [4]

Στην Εικόνα 2-6 παρουσιάζεται ο αισθητήρας ταχύτητας και η σύνδεση του με το Raspberry Pi 3 ενώ στην Εικόνα 2-7 η εγκατάσταση του στον τροχό του ελκυστήρα. Πρόκειται ουσιαστικά για έναν Reed switch που ενεργοποιεί τη έξοδο 3.3 V με το πέρασμα κάποιου μαγνητικού υλικού.



Εικόνα 2-6 Συνδεσμολογία Reed switch με Raspberry [4]



Εικόνα 2-7 Εφαρμογή Reed Switch μαζί με μαγνήτες στον τροχό του γεωργικού ελκυστήρα [4]

## Κεφάλαιο 3 Υλοποίηση

### 3.1 Αρχιτεκτονική συστήματος

#### 3.1.1 Εισαγωγή

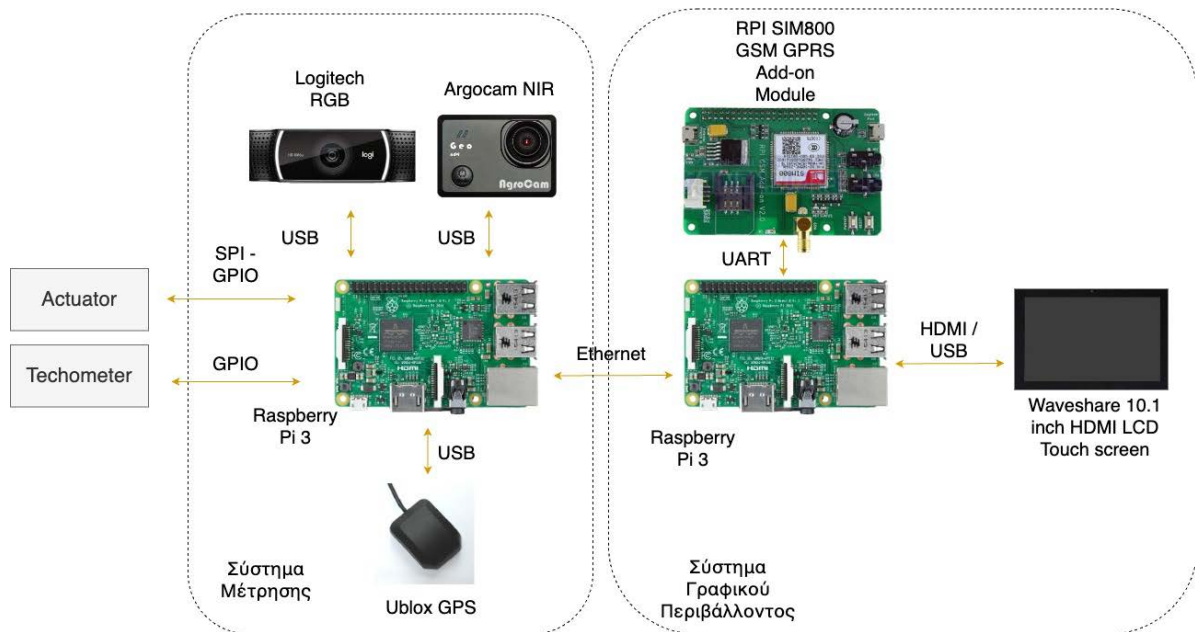
Η πρώτη σημαντική επέκταση στο αρχικό σύστημα είναι η ενσωμάτωση του γραφικού περιβάλλοντος για τον έλεγχο του συστήματος από τον χρήστη. Η επέκταση αυτή αυξάνει σημαντικά τις απαιτήσεις του συστήματος για υπολογιστική ισχύ και συνακόλουθα εισάγει ρίσκο για πιθανές αστάθειες στο σύστημα μέτρησης που μεταξύ άλλων ελέγχει το λιπασματοδιανομέα. Έτσι κρίθηκε απαραίτητη η ενσωμάτωση ενός δεύτερου Raspberry Pi 3 που θα αναλάβει να φιλοξενήσει την εφαρμογή του γραφικού περιβάλλοντος.

Στη συνέχεια αφαιρέθηκε ο ενεργός οπτικός αισθητήρας Crop Circle και αντικαταστάθηκε από δύο κάμερες, την Logitech HD C920 Pro Webcam [16] και την Agrocarn Pro NIR [17]. Οι εικόνες των δύο καμερών θα συνδυαστούν στη συνέχεια για τον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης NDVI.

Για να γίνει εφικτός ο χειρισμός του συστήματος από το χειριστή του γεωργικού ελκυστήρα, ενσωματώθηκε οθόνη 10.1 ιντσών και αναπτύχθηκε γραφικό περιβάλλον διεπαφής με τον χρήστη. Εκτός από τις βασικές λειτουργίες ελέγχου του συστήματος και οπτικοποίησης της κατάστασής του, ενσωματώθηκε βοηθός πορείας βασισμένος σε συσκευή GPS, που καθοδηγεί τον χειριστή ώστε να ακολουθεί με ακρίβεια τις διαδρομές στο χωράφι κατά την εφαρμογή της λίπανσης και να αποφεύγονται υπερκαλύψεις ή κενά. Τέλος ενσωματώθηκε δυνατότητα GPRS για την σύνδεση του συστήματος στο internet ώστε να υποστηριχθεί η δυνατότητα απομακρυσμένης ενημέρωσης του συστήματος και μεταφόρτωσης δεδομένων.

#### 3.1.2 Αρχιτεκτονική υλικού

Στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζεται το διάγραμμα των δομικών στοιχείων του συστήματος.



Σχήμα 3-1 Δομικού διάγραμμα συστήματος

Το σύστημα μπορεί να διακριθεί σε δύο υποσυστήματα: το σύστημα μέτρησης και το σύστημα γραφικού περιβάλλοντος. Και τα δύο συστήματα βασίζονται στο μικροπολογιστή Raspberry Pi 3 και επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω σύνδεσης ethernet. Στο σύστημα μέτρησης συνδέθηκαν μέσω USB οι δύο κάμερες και το GPS. Η σύνδεση με τους ηλεκτρικούς βραχίονες και τον αισθητήρα κίνησης, παρέμειναν ως είχαν. Στο σύστημα γραφικού περιβάλλοντος η οθόνη Waveshark LCD [18] συνδέθηκε μέσω δύο διεπαφών, HDMI για την προβολή του γραφικού περιβάλλοντος και USB για την χειρισμό του αισθητήρα αφής της οθόνης.

### 3.1.3 Αρχιτεκτονική λογισμικού

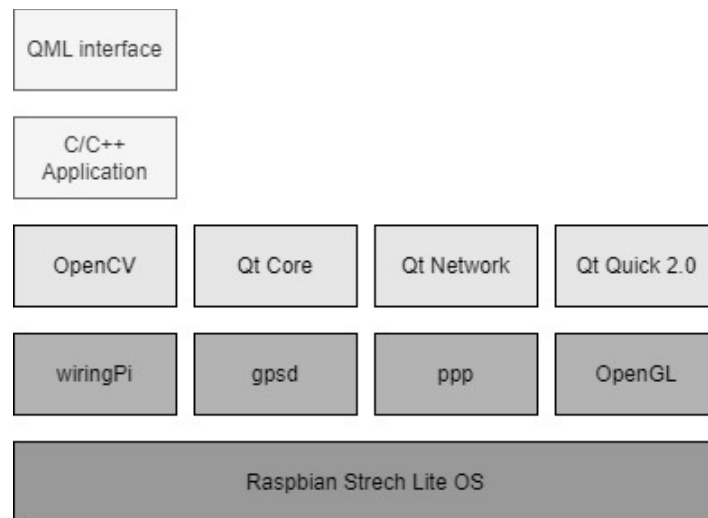
#### Εισαγωγή

Για την ανάπτυξη του λογισμικού τόσο στο σύστημα μέτρησης όσο και στο σύστημα γραφικού περιβάλλοντος, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού C++. Η επιλογή αυτή έγινε γιατί αφενός είναι μια γλώσσα χαμηλού επιπέδου που δίνει τη δυνατότητα αυξημένου ελέγχου στους πεπερασμένους πόρους (π.χ. μνήμη) ενός ενσωματωμένου συστήματος όπως το Raspberry, και αφετέρου είναι μια γλώσσα που προσφέρει τη δυνατότητα του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού, διευκολύνοντας την οργάνωση

του λογισμικού. Ακόμα παρέχει πρόσβαση σε βιβλιοθήκες υψηλού επιπέδου όπως η QT, επιταχύνοντας σημαντικά την ανάπτυξη του λογισμικού.

#### Τεχνολογική στοίβα

Τα πακέτα λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του συστήματος παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-2.



Σχήμα 3-2 Τεχνολογική στοίβα

Το λειτουργικό σύστημα που επιλέχθηκε είναι το Raspbian Lite OS στη διανομή Stretch, μια συρρικνωμένη έκδοση του Raspberry PI OS χωρίς πολλά προαιρετικά πακέτα λογισμικού που έρχονται με την κανονική έκδοση.

Ακόμα εγκαταστάθηκαν μια σειρά βιβλιοθηκών, με τις σημαντικότερες να είναι

- Η **wiringPi** [19] για τον χειρισμό των GPIO.
- Η **gpsd** [20] για τον ανάγνωση των δεδομένων του Ublox GPS [21].
- Η **ppp** [22] για την επικοινωνία του συστήματος με το SIM800 GSM [23] μέσω PPP.
- Η **OpenCV** [24] για την επικοινωνία και τον χειρισμό των καμερών.
- Η **QtQuick 2.0** [25] για την ανάπτυξη του γραφικού περιβάλλοντος στη γλώσσα QML.
- Η **Qt Core** [26] για την ενσωμάτωση στη C++ του μηχανισμού signal-slot για την επικοινωνία μεταξύ των αντικειμένων κ.α.
- Η **Qt Network** [27] για την επικοινωνία μεταξύ των υποσυστημάτων μέσω TCP server και για την ενημέρωση του συστήματος και την μεταφόρτωση δεδομένων μέσω HTTP.

Όπως προαναφέρθηκε, ο κώδικας οργανώθηκε με βάση τις αρχές του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού. Έτσι, κάθε σύνολο κώδικα που θα μπορούσε να θεωρηθεί αυτόνομο, π.χ. ο χειρισμός των καμερών και ο υπολογισμός του δείκτη NDVI, οργανώθηκε ως μια κλάση (class) που αργότερα θα υλοποιηθεί μέσω ενός αντικειμένου (object), και που ενσωματώνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία, όπως μνήμη, εσωτερικοί μέθοδοι (private functions) και εξωτερικοί μέθοδοι (public functions).

Σε πολλές περιπτώσεις κατά την εκτέλεση της εφαρμογής, υπάρχει η ανάγκη επικοινωνίας μεταξύ των αντικειμένων. Για την ανάγκη αυτή, ο ορισμός κάθε κλάσης κληρονομεί την κλάση **QObject** και κατ' επέκταση το μηχανισμό signal slot που πλαισιώνει την επικοινωνία μεταξύ των αντικειμένων σύμφωνα με το μοντέλο publish/subscribe.

Για την ασύγχρονη εκτέλεση αντικειμένων αναπτύχθηκε μια abstract υλοποίηση που θα χρησιμοποιηθεί ως κλάση βάσης, η κλάση **Thread**, η οποία βασίζεται στην υλοποίηση της **QThread** για την δημιουργία του νήματος εκτέλεσης που θα εκτελέσει ασύγχρονα τον κώδικα που θα οριστεί από της derived κλάσεις. Ο Πίνακας 3-1 περιγράφει το interface της κλάσης Thread.

Πίνακας 3-1 Το interface της κλάσης Thread

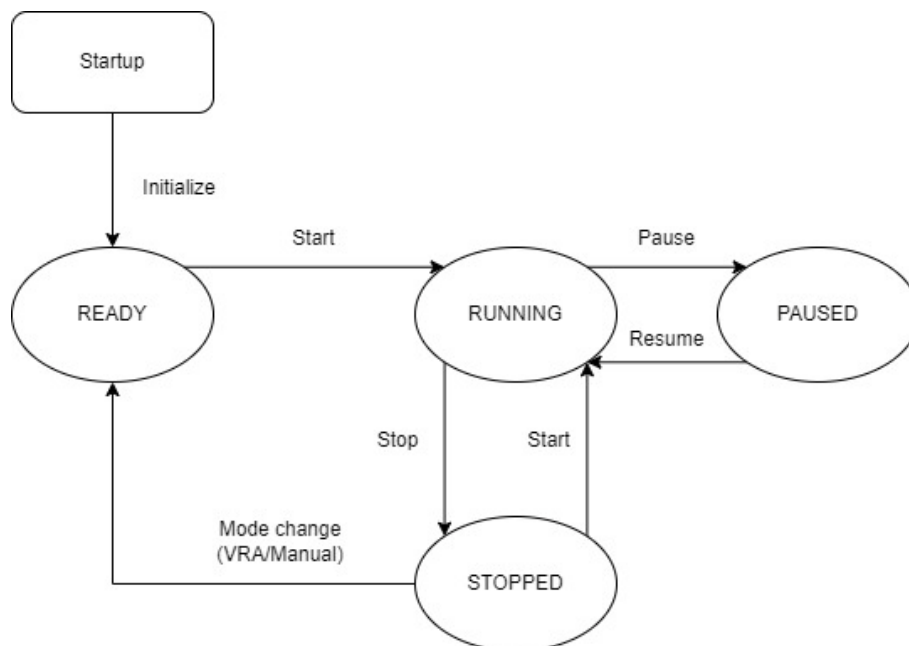
| Μέθοδος                    | Περιγραφή                                                                                                                                                                       |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| virtual void processTask() | Μέθοδος που ενσωματώνει το κύριο σώμα επεξεργασίας. Η μέθοδος αυτή ορίζεται ως virtual. Έτσι κάθε derived κλάση θα αναγκαστεί να ορίσει τον κώδικα που θα εκτελεστεί ασύγχρονα. |
| bool startThread()         | Μέθοδος για την εκκίνηση του νήματος εκτέλεσης.                                                                                                                                 |
| bool stopThread()          | Μέθοδος για τον τερματισμό του νήματος εκτέλεσης.                                                                                                                               |
| bool pauseThread()         | Μέθοδος για την παύση του νήματος εκτέλεσης.                                                                                                                                    |

|                                       |                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <code>bool resumeThread()</code>      | Μέθοδος για τη συνέχιση του νήματος εκτέλεσης.                                                                                                       |
| <code>void finished()</code>          | Signal που ενεργοποιείται όταν το νήμα εκτέλεσης τερματίζει την εκτέλεσή του και ειδοποιεί όλους τους subscribers.                                   |
| <code>void error (QString str)</code> | Signal που ενεργοποιείται σε περίπτωση σφάλματος και ειδοποιεί όλους τους subscribers. Στην παράμετρο <b>str</b> περιγράφεται η αιτία του σφάλματος. |

### Καταστάσεις συστήματος

Για να διευκολυνθεί ο συγχρονισμός μεταξύ των δύο υποσυστημάτων, αναπτύχθηκε μια μηχανή καταστάσεων με την οποία ελέγχονται τα διαφορετικά μέρη του συστήματος μέτρησης όπως η διαδικασία υπολογισμού του NDVI, η διαδικασία ελέγχου του ηλεκτρικού βραχίονα κτλ.

Στο Σχήμα 3-3 παρουσιάζεται το διάγραμμα καταστάσεων του συστήματος



Σχήμα 3-3 Διάγραμμα καταστάσεων συστήματος

Όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, οι μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων προκαλούνται από τις εντολές που λαμβάνονται από το υποσύστημα γραφικού περιβάλλοντος και ουσιαστικά ενεργοποιούν ή απενεργοποιούν τις διαδικασίες που συνθέτουν το υποσύστημα μέτρησης.

#### *Πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ υποσυστημάτων*

Για την επικοινωνία μεταξύ του υποσυστήματος μέτρησης και του υποσυστήματος γραφικού περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκε η σύνδεση ethernet. Στο υποσύστημα μέτρησης εγκαταστάθηκε ένας TCP server και από την πλευρά του υποσυστήματος γραφικού περιβάλλοντος ένας client, ο οποίος θα συνδεθεί στον server για να ξεκινήσει η επικοινωνία. Ο client μπορεί να παραμετροποιήσει και να ελέγχει την λειτουργία του υποσυστήματος μέτρησης μέσω των εντολών τις οποίες συνοψίζει ο Πίνακας 3-2.

Πίνακας 3-2 Εντολές ελέγχου συστήματος

| Εντολή                | Περιγραφή                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <mode:\$TYPE>         | Το <b>\$TYPE</b> μπορεί να πάρει τις τιμές <b>VRF</b> ή <b>Manual</b> για επιλογή διαφοροποιημένης λίπανσης ή λίπανσης σταθερής δόσης. Η κατάσταση του συστήματος θα αλλάξει σε <b>READY</b> . |
| <fertilizer:\$NUMBER> | Ρύθμιση δόσης σε kg/ha για λίπανση σταθερής δόσης.                                                                                                                                             |
| <max_yield:\$NUMBER>  | Ρύθμιση της μέγιστης εφικτής παραγωγής του χωραφιού [4]                                                                                                                                        |
| <rich_ndvi:\$NUMBER>  | Ρύθμιση της μέγιστης τιμής NDVI που έχει παρατηρηθεί στο χωράφι [4]                                                                                                                            |
| <nue:\$NUMBER>        | Ρύθμιση του συντελεστή αξιοποίησης αζώτου (Nitrogen Use Efficiency – NUE) [4].                                                                                                                 |
| <start>               | Το σύστημα μέτρησης θα ξεκινήσει την εκτέλεση της κύριας διαδικασίας εκτέλεσης (όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.2). Η κατάσταση του συστήματος θα αλλάξει σε <b>RUNNING</b> .                 |
| <stop>                | Το σύστημα μέτρησης θα σταματήσει την εκτέλεση της κύριας διαδικασίας. Η κατάσταση του συστήματος θα αλλάξει σε <b>STOPPED</b> .                                                               |

|          |                                                                                                                                           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <pause>  | Το σύστημα μέτρησης θα σταματήσει προσωρινά την εκτέλεση της κύριας διαδικασίας. Η κατάσταση του συστήματος θα αλλάξει σε <b>PAUSED</b> . |
| <resume> | Το σύστημα θα συνεχίσει την εκτέλεση της κύριας διαδικασίας. Η κατάσταση του συστήματος θα αλλάξει σε <b>RUNNING</b> .                    |

Ο server του συστήματος μέτρησης αναφέρει στον συνδεδεμένο client την κατάσταση του σε συχνότητα 1Hz, σύμφωνα με το παρακάτω πρωτόκολλο:

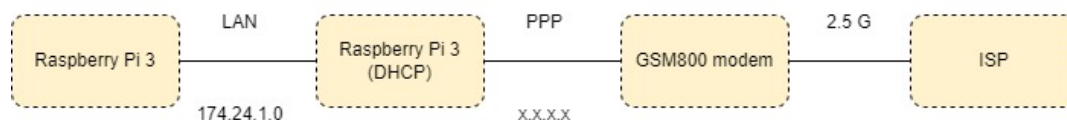
Πίνακας 3-3 Τηλεμετρία συστήματος

| Εντολή                       | Περιγραφή                                                                                                                                |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <gps:\$STATUS>               | Η κατάσταση του GPS. Το <b>\$STATUS</b> μπορεί να πάρει τις τιμές <b>CONNECTED</b> , <b>DISCONNECTED</b> και <b>SIGNALLOST</b> .         |
| <position:\$NUMBER>          | Η θέση του ηλεκτρικού βραχίονα.                                                                                                          |
| <removal:\$NUMBER>           | Η συνολική μετατόπιση του ελκυστήρα από την αρχή της λειτουργίας του συστήματος που υπολογίζεται με βάση τον αισθητήρα ταχύτητας.        |
| <location:\$NUMBER,\$NUMBER> | Οι συντεταγμένες GPS της θέσης του ελκυστήρα.                                                                                            |
| <status:\$STATE>             | Η κατάσταση του συστήματος. Το <b>\$STATUS</b> μπορεί να πάρει τιμές <b>READY</b> , <b>RUNNING</b> , <b>STOPPED</b> και <b>PAUSED</b> .  |
| <error:\$ERROR>              | Η αιτία σφάλματος. Το <b>\$ERROR</b> μπορεί να πάρει τιμές <b>CameraUnConnected</b> , <b>CameraFrameError</b> και <b>ActuatorError</b> . |

#### 3.1.4 Υποδομή δικτύου

Η ανάγκη για απομακρυσμένο έλεγχο του συστήματος, για ενέργειες όπως η ενημέρωση λογισμικού ή η μεταφόρτωση δεδομένων έκανε αναγκαία την υλοποίηση μιας

αρχιτεκτονικής δικτύου που θα επιτρέπει στα δύο υποσυστήματα την πρόσβαση στο internet. Η υλοποίηση αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-4.



Σχήμα 3-4 Δίκτυο πρόσβασης internet

Όπως προαναφέρθηκε, για τη σύνδεση GPRS του συστήματος χρησιμοποιήθηκε το SIM8000 GSM board [23]. Η συσκευή αυτή συνδέθηκε στο 40-pin header του Raspberry Pi 3 του υποσυστήματος γραφικού περιβάλλοντος. Η επικοινωνία πραγματοποιείται μέσω των δύο σειριακών GPIO του Raspberry Pi 3, του GPIO 14 (TX) και GPIO 15 (RX).

Για να εγκαθιδρυθεί η σύνδεση GPRS εγκαταστάθηκε το πακέτο λογισμικού που υλοποιεί το πρωτόκολλο PPP και ρυθμίστηκε το APN του παρόχου της SIM, που στη δικιά μας περίπτωση ήταν **internet.vodafone.gr**. Στη συνέχεια εγκαταστάθηκε ένας DHCP server στο υποσύστημα γραφικού περιβάλλοντος που χρησιμοποιεί το interface eth0 με IP δικτύου 174.24.1.0. Έτσι, επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός εσωτερικού δικτύου μεταξύ των δυο υποσυστημάτων. Τέλος για να μπορέσει το Raspberry Pi 3 του υποσυστήματος μέτρησης να αποκτήσει πρόσβαση στο δίκτυο, γίνεται ρύθμιση IP forwarding στο υποσύστημα γραφικού περιβάλλοντος.

### 3.1.5 Ενημέρωση λογισμικού

Για την απομακρυσμένη ενημέρωση του λογισμικού του συστήματος, αναπτύχθηκε διαδικασία που επικοινωνεί τακτικά με απομακρυσμένο server μέσω του πρωτοκόλλου HTTP για τον έλεγχο διαθέσιμων ενημερώσεων, την λήψη τους και την εγκατάστασή τους. Όλες οι απαραίτητες πληροφορίες (π.χ. τοποθεσία ενημέρωσης) για την εκτέλεση αυτής της λειτουργίας ενσωματώνονται σε ένα αρχείο τύπου XML το οποίο συνοψίζει ο Πίνακας 3-4.

Πίνακας 3-4 Αρχείο ενημέρωσης

| Tag           | Description                                  |
|---------------|----------------------------------------------|
| CheckInterval | Χρονικό διάστημα για έλεγχο νέων ενημερώσεων |

| Tag             | Description                                                   |
|-----------------|---------------------------------------------------------------|
| RemoteConfigUrl | URL τοποθεσίας αρχείου ενημέρωσης                             |
| SecurityToken   | Κλειδί ασφαλείας για την επαλήθευση του απομακρυσμένου server |
| BaseUrl         | URL τοποθεσίας πακέτων ενημέρωσης λογισμικού                  |
| Payload         | Όνομα αρχείου ενημέρωσης λογισμικού σε μορφή DEB              |

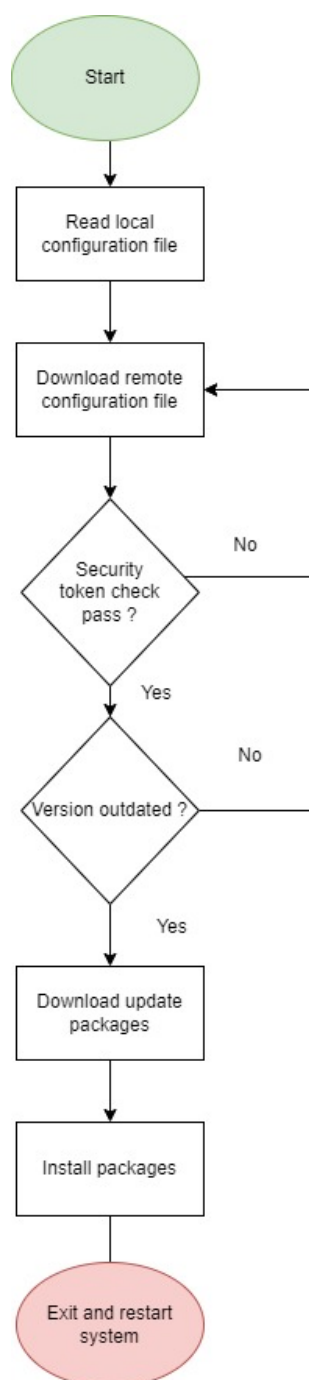
Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα του αρχείου ενημέρωσης σε μορφή XML

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<!-- Increment the version for each update. -->
<Manifest version="1.0.0">
  <CheckInterval>900</CheckInterval>
  <RemoteConfigUrl>http://127.0.0.1:8000/api/eyeq/update.xml</RemoteConfigUrl>
  <SecurityToken>D68EF3A7-E787-4CC4-B020-878BA649B4CD</SecurityToken>
  <BaseUrl>http://127.0.0.1:8000/api/eyeq</BaseUrl>
  <Payload>eyeq-app-v1.0.0.deb</Payload>
</Manifest>
```

Η διαδικασία ξεκίνα με την ανάγνωση του τοπικού αρχείου ρυθμίσεων ενημέρωσης και στη συνέχεια του αρχείου ενημέρωσης που βρίσκεται στον απομακρυσμένο server, η τοποθεσία του οποίου εξάγεται από το πεδίο RemoteConfigUrl. Αφού ταυτοποιηθεί ο απομακρυσμένος server μέσω του SecurityToken, θα ελεγχθεί η έκδοση του λογισμικού που βρίσκεται διαθέσιμη μέσω του πεδίου Payload και, εφόσον αυτή είναι νεότερη της έκδοσης λογισμικού που βρίσκεται εγκατεστημένη στο σύστημα, η διαδικασία θα προχωρήσει στη λήψη της. Με τα παραπάνω βήματα επιτυγχάνεται η ασφαλής και γρήγορη επικοινωνία με τον απομακρυσμένο server και αποφεύγεται η λήψη της ενημέρωσης λογισμικού αν αυτή δεν είναι απαραίτητη.

Στην συνέχεια θα γίνει λήψη του αρχείου ενημέρωσης που είναι της μορφής DEB. Η τοποθεσία του αρχείου θα εξαχθεί συνδυάζοντας τα πεδία BaseUrl και Payload και αφού ολοκληρωθεί η λήψη του θα εγκατασταθεί στο σύστημα μέσω του package manager APT. Η εκτέλεσης διαδικασίας θα επαναληφθεί με βάση το χρόνο που ορίζεται στο πεδίο CheckInterval.

Στο Σχήμα 3-5 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας αυτής.



Σχήμα 3-5 Διαδικασία ενημέρωσης λογισμικού

### 3.1.6 Κόστος συστήματος

Συνολικά, η κατασκευή του πρωτοτύπου κόστισε 708 ευρώ. Ο Πίνακας 3-5 περιλαμβάνει ανάλυση του κόστους.

Πίνακας 3-5 Ανάλυση κόστους κατασκευής πρωτοτύπου

| Μονάδα                                 | Τιμή (€) |
|----------------------------------------|----------|
| 2 x Raspberry Pi 3 Model B [28]        | 128      |
| 1 x Ublox USB GPS [21]                 | 12       |
| 1 x SIM800 GSM GPRS Add-on Module [23] | 38       |
| 1 x Waveshark 10.1 inch HDMI LCD [18]  | 150      |
| 1 x Agrocarn                           | 300      |
| 1 x Logitech HR pro                    | 80       |

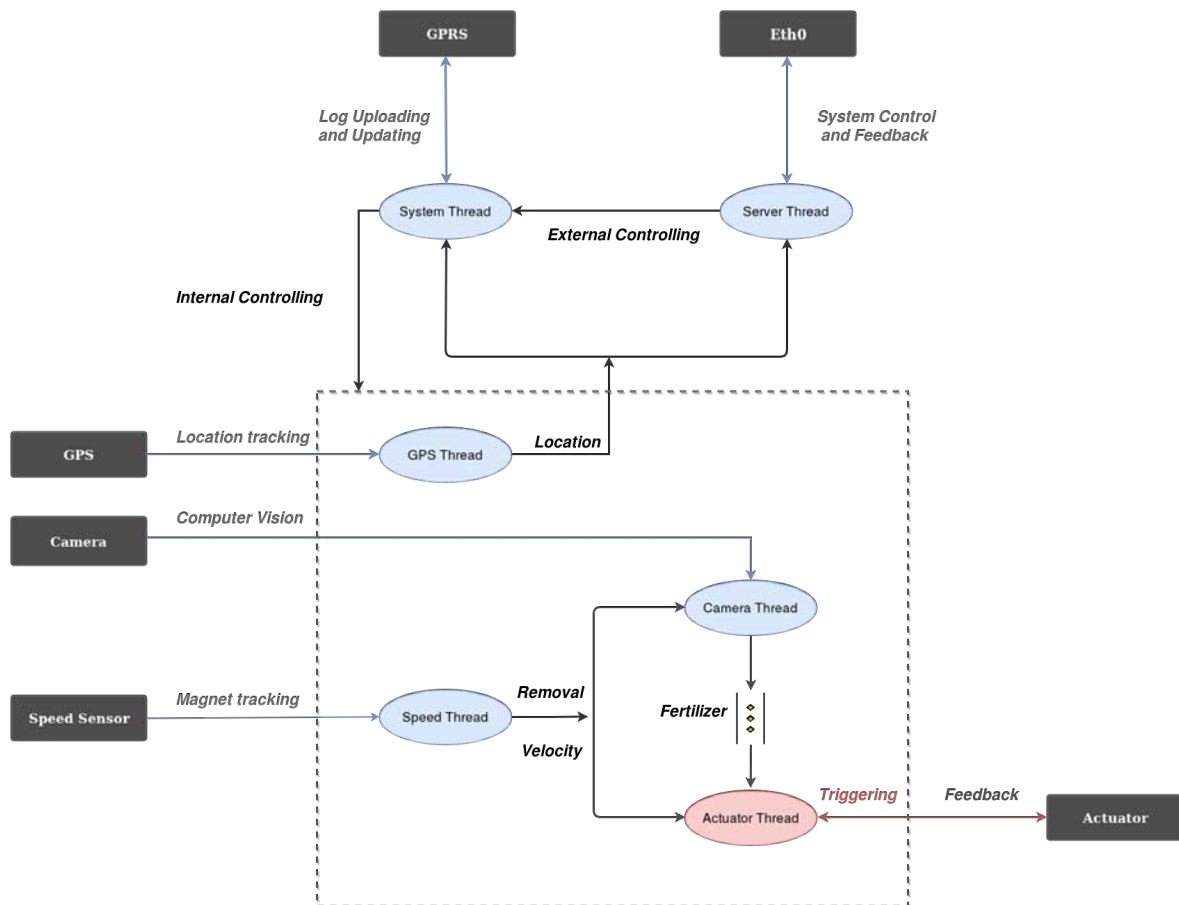
### 3.2 Σύστημα μέτρησης

#### 3.2.1 Επισκόπηση λογισμικού

Οι σημαντικότερες λειτουργίες του συστήματος μέτρησης συνοψίζονται ως εξής:

- 1) Υπολογισμός του δείκτη NDVI.
- 2) Υπολογισμός της ταχύτητας του ελκυστήρα μέσω του reed switch.
- 3) Υπολογισμός της δόσης εφαρμογής.
- 4) Έλεγχος του βραχίονα του λιπασματοδιανομέα για την εφαρμογή της υπολογισμένης δόσης.
- 5) Επικοινωνία με το σύστημα γραφικού περιβάλλοντος
- 6) Καταγραφή και μετάδοση δεδομένων για την οπτικοποίηση

Οι λειτουργίες αυτές απαιτούν την ανάπτυξη μιας multi-threaded εφαρμογής όπου κάθε μία ανατίθεται σε ένα νήμα εκτέλεσης που είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση της. Στο Σχήμα 3-6 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του συστήματος μέτρησης και διακρίνονται τα βασικά νήματα εκτέλεσης που συνθέτουν την εφαρμογή και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση.



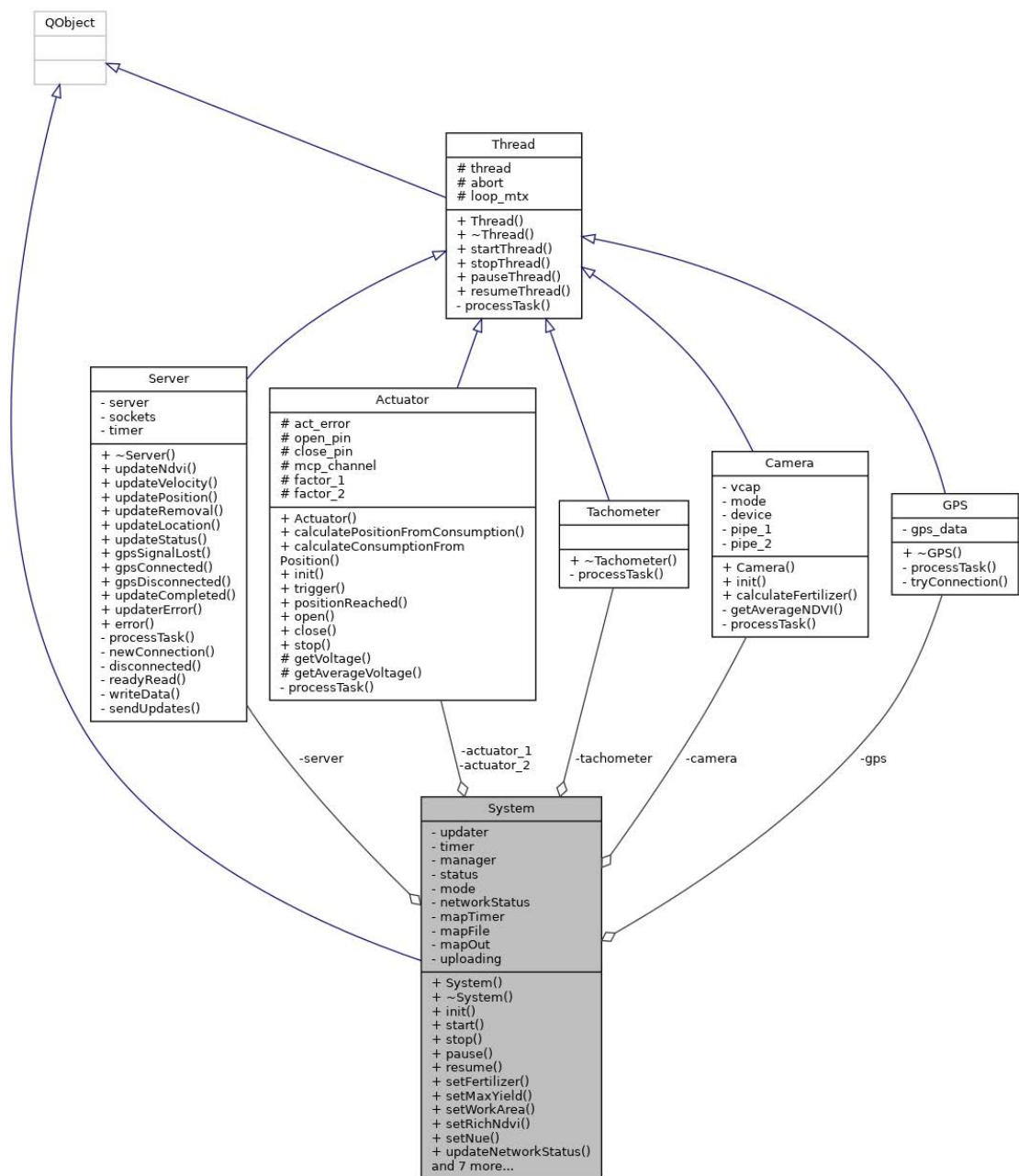
Σχήμα 3-6 Δομικό διάγραμμα λογισμικού συστήματος μέτρησης

Όπως προαναφέρθηκε, το λογισμικό αναπτύχθηκε με βάση τις αρχές του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού. Οι βασικές κλάσεις που αναπτύχθηκαν συνοψίζονται ως εξής:

1. Η κλάση **System** είναι υπεύθυνη για την κατάσταση του συστήματος και ειδικότερα:
  - a. Την αρχικοποίηση του νήματος εκτέλεσης **System Thread** που εκτελεί παράλληλα τις λειτουργίες της κλάσης.
  - b. Την αρχικοποίηση και διαχείριση των αντικειμένων κλάσης που συνθέτουν το λογισμικό καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης της εφαρμογής.
  - c. Την εγκαθίδρυση της επικοινωνίας των αντικειμένων μέσω του μηχανισμού signal-slot.
  - d. Την εκτέλεση των εντολών ελέγχου που ελέγχουν την κατάσταση του συστήματος.
  - e. Την δημιουργία του αρχείου καταγραφής κατάστασης και της μεταφόρτωσής του στο cloud.
2. Η κλάση **Server** είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία με το γραφικό περιβάλλον και ειδικότερα:

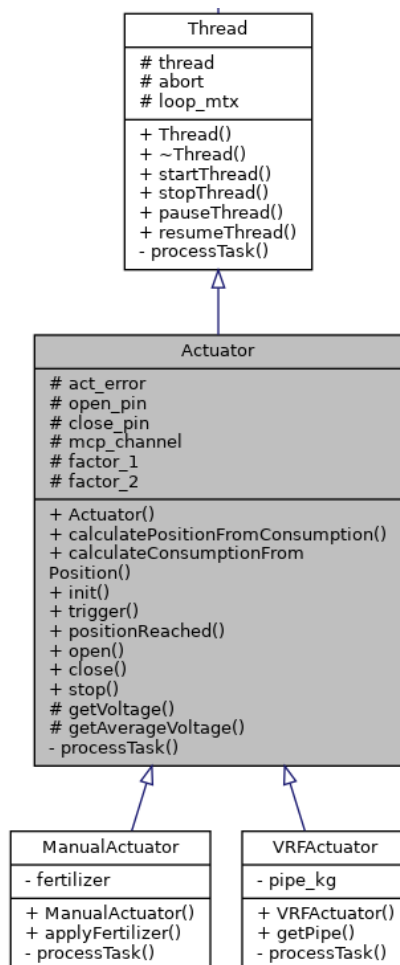
- a. Την αρχικοποίηση του νήματος εκτέλεσης **Server Thread** που εκτελεί παράλληλα τις λειτουργίες της κλάσης.
  - b. Την παραμετροποίηση και αρχικοποίηση του TCP server, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία με το σύστημα γραφικού περιβάλλοντος.
  - c. Την διαχείριση των εντολών ελέγχου του συστήματος που έρχονται από τους συνδεδεμένους clients.
  - d. Την τακτική ενημέρωση των συνδεδεμένων clients για την κατάσταση του συστήματος.
3. Η κλάση **GPS** είναι υπεύθυνη για την ανάγνωση της κατάστασης της μονάδας GPS και της τοποθεσίας του συστήματος. Η κλάση αυτή αρχικοποιεί και το νήμα εκτέλεσης **GPS Thread** που εκτελεί την παραπάνω λειτουργία παράλληλα.
  4. Η κλάση **Tachometer** είναι υπεύθυνη για τον υπολογισμό της ταχύτητας μέσω του αισθητήρα κίνησης.
  5. Η κλάση **Camera** είναι υπεύθυνη για την κύρια μονάδα επεξεργασίας του συστήματος μέτρησης και ειδικότερα
    - a. Την αρχικοποίηση του νήματος εκτέλεσης **Camera Thread** που εκτελεί παράλληλα τις λειτουργίες της κλάσης.
    - b. Την παραμετροποίηση και τον έλεγχο λήψης εικόνων.
    - c. Τον υπολογισμό του δείκτη NDVI.
  6. Η κλάση **Actuator** είναι μια abstract υλοποίηση που ορίζει τη βασική διεπαφή ελέγχου του ηλεκτρικού βραχίονα και ειδικότερα:
    - a. Την αρχικοποίηση του νήματος εκτέλεσης **Actuator Thread** που εκτελεί παράλληλα τις λειτουργίες της κλάσης.
    - b. Τον υπολογισμό της κατανάλωσης λιπάσματος με βάση τη θέση του βραχίονα και ταχύτητα του ελκυστήρα.
    - c. Τον υπολογισμό της θέσης του βραχίονα με βάση την κατανάλωση λιπάσματος και την ταχύτητα του ελκυστήρα.
    - d. Τον έλεγχο της κίνησης του βραχίονα.
  7. Η κλάση **Actuator** κληρονομείται και επεκτείνεται από τις κλάσεις
    - a. **VRFActuator** που υλοποιεί τον νήμα εκτέλεσης διαφοροποιημένης λίπανσης με βάση την μέτρηση NDVI.
    - b. **ManualActuator** που υλοποιεί το νήμα εκτέλεσης χειροκίνητης λίπανσης με βάση την επιθυμητή δόση που ρυθμίζεται από το χρήστη.

Στο Σχήμα 3-7 αναλύεται η οργάνωση του λογισμικού μέσω ενός διαγράμματος κλάσεων σε μορφή UML, το οποίο που παράχθηκε μέσω του λογισμικού Doxygen [29].



Σχήμα 3-7 Διάγραμμα κλάσεων λογισμικού συστήματος μέτρησης

Στο Σχήμα 3-8 παρουσιάζεται το διάγραμμα κλάσεων της κλάσης Actuator και των παραγώγων της.



Σχήμα 3-8 Η κλάση Actuator και τα παράγωγά της ManualActuator και VRFACTOR

Κοινό χαρακτηριστικό κάθε κλάσης είναι ότι κληρονομεί τα χαρακτηριστικά της κλάσης QObject και της κλάσης Thread, που όπως εξηγήθηκε στην 3.1.3 επιτρέπουν να χρησιμοποιηθούν οι μηχανισμοί παράλληλης εκτέλεσης και συγχρονισμού.

### 3.2.2 Υπολογισμός δείκτη NDVI

#### Χειρισμός καμερών

Οι δύο κάμερες που χρησιμοποιήθηκαν στο σύστημα είναι, όπως προαναφέρθηκε, η Logitech C920 HD Pro [16] και η Agrocarn Pro NIR [17]. Και οι δύο κάμερες παρέχουν ανάλυση 1080P@30FPS και είναι αυτή που επιλέχθηκε για τη λήψη εικόνων.

Οι δύο κάμερες θα αρχικοποιούνται μέσω της κλάσης cv::VideoCapture της βιβλιοθήκης OpenCV [24]. Στην Εικόνα 3-1 και στην Εικόνα 3-2 παρουσιάζονται οι εικόνες που λαμβάνονται σε μορφή RGB από την Agrocarn IR και την Logitech C920 αντίστοιχα,

χρησιμοποιώντας τη μέθοδο `cv::VideoCapture::read` και τη μέθοδο `cv::imwrite` της OpenCV.



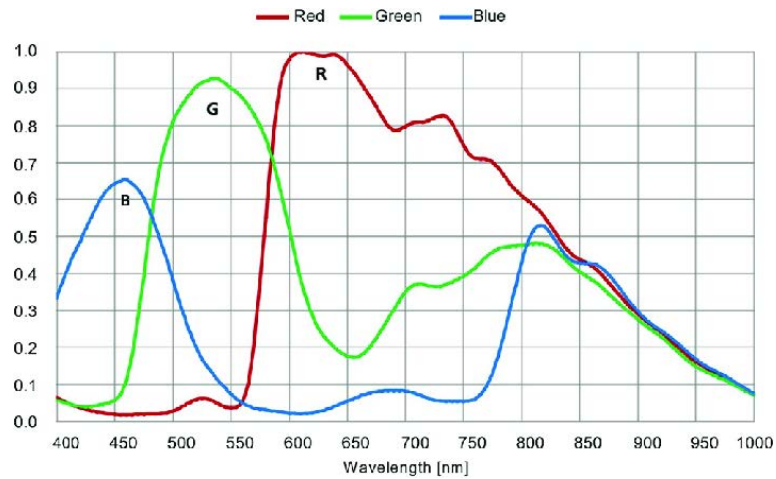
Εικόνα 3-1 Εικόνα απο την Agrosam NIR κάμερα



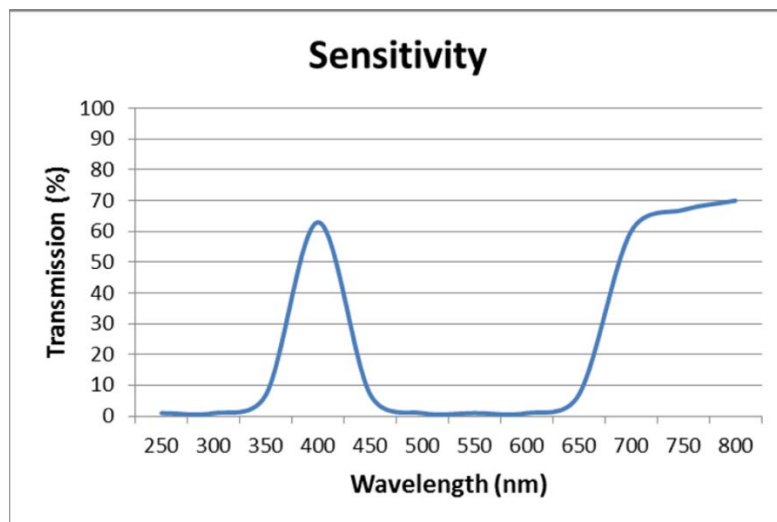
Εικόνα 3-2 Εικόνα απο την Logitech C920 κάμερα

Στη συνέχεια στόχος είναι να απομονωθούν τα κανάλια των δύο εικόνων που θα μας δώσουν πρόσβαση στο κόκκινο ορατό (630nm) και στο εγγύς υπέρυθρο (740nm) ώστε σύμφωνα με το 2.1.1 να προχωρήσουμε στον υπολογισμό του δείκτη NDVI.

Και οι δύο κάμερες φέρουν αισθητήρα CMOS. Η τυπική απόκριση ενός τέτοιου αισθητήρα φαίνεται στην Εικόνα 3-3. Στο σύνολό τους οι κάμερες του εμπορίου φέρουν ένα low-pass φίλτρο (η αλλιώς cut-off filter) που μπλοκάρει την υπέρυθρη ακτινοβολία να φτάσει τον αισθητήρα. Το ίδιο ισχύει και για την κάμερα Logitech C920. Από την άλλη πλευρά, η Agrosam Pro NIR, διαθέτει band pass και high-pass φίλτρα που όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-4 επιτρέπουν τη διέλευση μόνο του πράσινου και του υπέρυθρου φάσματος.



Εικόνα 3-3 Απόκριση ενός τυπικού CMOS αισθητήρα [30]



Εικόνα 3-4 Διάγραμμα απόκρισης κάμερας Agrocarn Pro NIR [17]

Έτσι, κρατώντας τα red κανάλια από τις δύο εικόνες τύπου RGB που παίρνουμε από τις κάμερες έχουμε πρόσβαση στο κόκκινο και στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα. Η μέθοδος `cn::VideoCapture::read` αποθηκεύει τα δεδομένα της εικόνας σε μια δομή `cn::Mat`, με την οποία μπορούμε να προσπελάσουμε μεμονωμένα τα κανάλια της RGB εικόνας. Τα μεμονωμένα κανάλια μπορούν να αποθηκευτούν στη συνέχεια σαν grayscale εικόνες με την `cn::imwrite` όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-5 και την Εικόνα 3-6.



Εικόνα 3-5 Grayscale εικόνα με το red κανάλι της Agrocarn NIR κάμερας



Εικόνα 3-6 Grayscale εικόνα με το red κανάλι της Logitech C920 κάμερας

#### Υπολογισμός δείκτη NDVI

Όπως αναφέρθηκε στο 2.12.1 ο δείκτης NDVI υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

Βασικό ζητούμενο λοιπόν είναι να προσδιοριστούν η συνολική ανακλώμενη ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα (NIR) και στο ερυθρό φάσμα (RED). Η απόκριση της κάθε κάμερας στο κανάλι του κόκκινου χρώματος, στο οποίο απομονώνονται τα δύο ζητούμενα φάσματα, αντιστοιχεί σε μια τιμή εύρους [0 – 255] για κάθε pixel. Υπολογίζοντας το μέσο όρο του κάθε καναλιού υπολογίζουμε το δείκτη NDVI.

### 3.2.3 Καταγραφή και μεταφόρτωση δεδομένων

Τα δεδομένα που καταγράφονται από το σύστημα έχουν στόχο να προσφέρουν μια εποπτική ματιά στα σημαντικότερα μέρη του αλλά και να δώσουν τη δυνατότητα εξαγωγής χαρτών βλάστησης για την αξιολόγηση της απόδοσής του. Πρόκειται για επαναληπτική αποτύπωση της κατάστασης του συστήματος σε συχνότητα 1Hz.

Η καταγραφή θα ξεκινήσει τη στιγμή που το σύστημα θα εισέλθει στην κατάσταση RUNNING. Στην κατάσταση PAUSE η καταγραφή θα παύσει και θα επανέλθει όταν το σύστημα εισέλθει ξανά στην κατάσταση RUNNING. Στην κατάσταση STOPPED η καταγραφή θα ολοκληρωθεί και θα ξεκινήσει η μεταφόρτωση του αρχείου στο cloud.

Το αρχείο καταγραφής είναι τύπου CSV και ο Πίνακας 3-6 παρουσιάζει τα σχετικά δεδομένα.

Πίνακας 3-6 Ανάλυση δεδομένων καταγραφής

| Πεδίο             | Περιγραφή                                                                                                                         |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Timestamp         | Η χρονική στιγμή καταγραφής σε μορφή yyyyMMdd-hhmmss.                                                                             |
| Longitude         | Το γεωγραφικό μήκος που βρίσκεται ο ελκυστήρας.                                                                                   |
| Latitude          | Το γεωγραφικό πλάτος που βρίσκεται ο ελκυστήρας.                                                                                  |
| NDVI              | Ο δείκτης NDVI του χωραφίου.                                                                                                      |
| Actuator_position | Η θέση του ηλεκτρικού βραχίονα.                                                                                                   |
| Tractor_removal   | Η συνολική μετατόπιση του ελκυστήρα από την αρχή της λειτουργίας του συστήματος που υπολογίζεται με βάση τον αισθητήρα ταχύτητας. |
| Target_fertilizer | Η δόση λίπανσης σε kg/ha που έχει δοθεί στο σύστημα ελέγχου λίπανσης                                                              |
| Actual_fertilizer | Η πραγματική δόση λίπανσης σε kg/ha που εκτελεί το σύστημα ελέγχου λίπανσης με βάση τη θέση του ηλεκτρικού βραχίονα.              |

Για τη μεταφόρτωση του αρχείου χρησιμοποιήθηκε η κλάση `QNetworkAccessManager` της βιβλιοθήκης `Qt Network` [27] με την οποία κατασκευάζεται και εκτελείται ένα `POST HTTP request` μέσω της μεθόδου `QNetworkAccessManager::post` κάθε φορά που το σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση `STOPPED`.

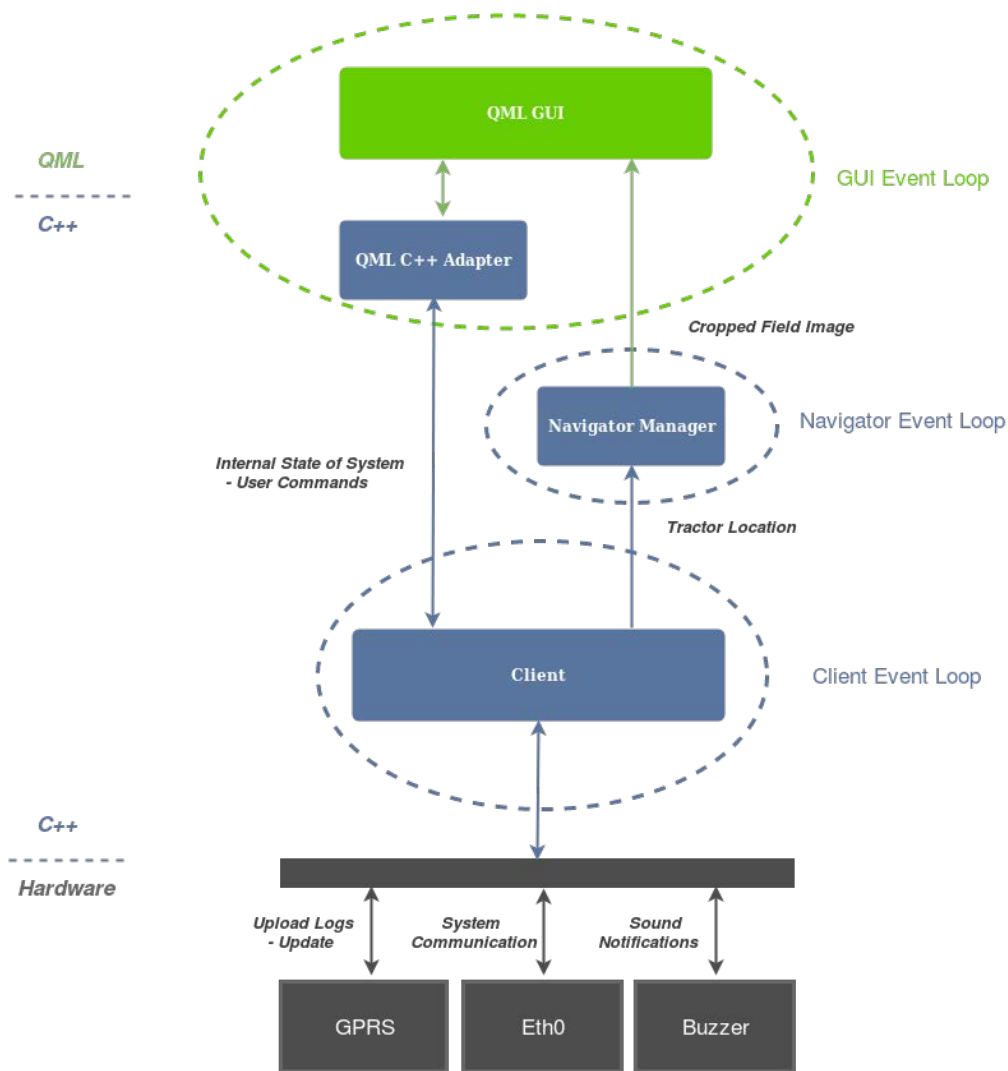
### **3.3 Γραφικό περιβάλλον**

#### **3.3.1 Επισκόπηση λογισμικού**

Οι σημαντικότερες λειτουργίες του συστήματος γραφικού περιβάλλοντος συνοψίζονται ως εξής:

- 1) Γραφική διεπαφή ελέγχου του συστήματος από το χρήστη
- 2) Σύνδεση GPRS όπως περιεγράφηκε στην 3.1.4
- 3) Επικοινωνία με το σύστημα μέτρησης
- 4) Βοηθός πορείας

Όπως και στο σύστημα μέτρησης, αναπτύχθηκε `multi-threaded` εφαρμογή για την ασύγχρονη εκτέλεση των παραπάνω λειτουργιών. Στο Σχήμα 3-9 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα, όπου διακρίνονται τα βασικά νήματα εκτέλεσης που συνθέτουν την εφαρμογή και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση.



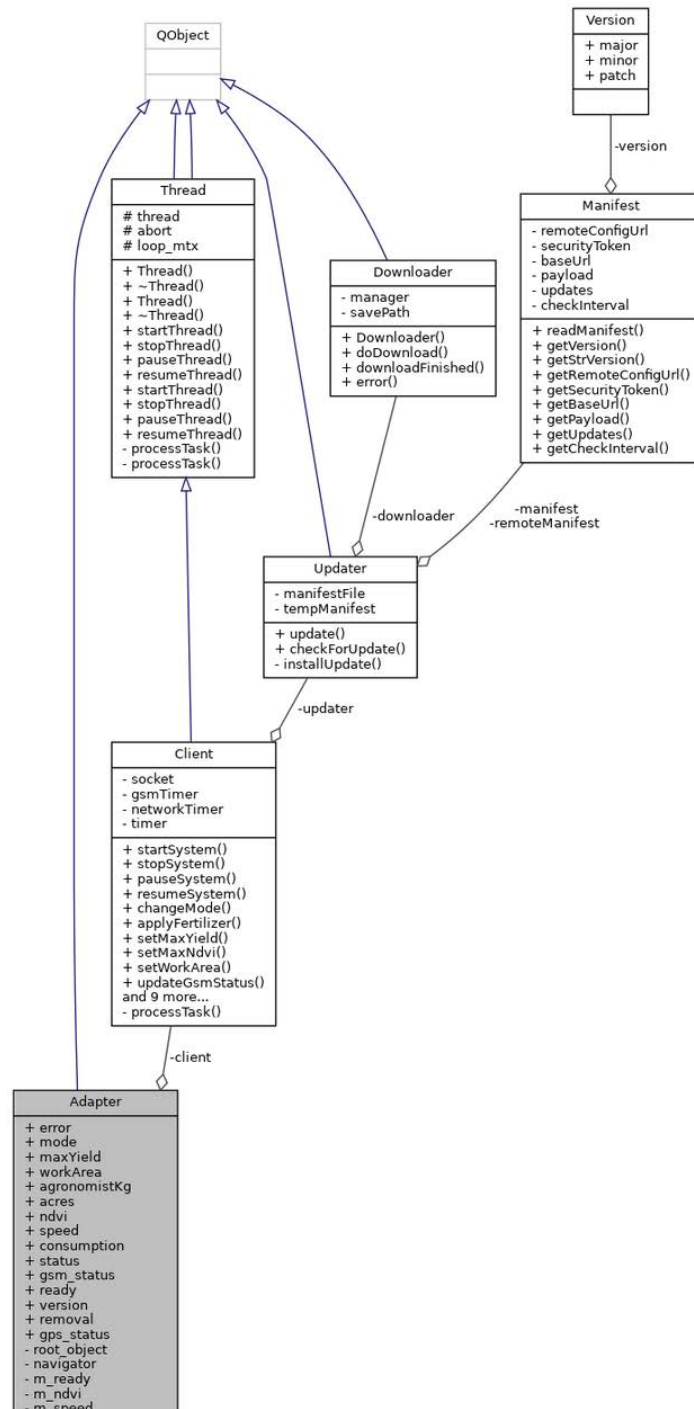
Σχήμα 3-9 Αρχιτεκτονική λογισμικού γραφικού περιβάλλοντος

Οι βασικές κλάσεις που αναπτύχθηκαν συνοψίζονται ως εξής:

1. Η κλάση **Client** είναι κυρίως υπεύθυνη για την επικοινωνία μεταξύ του γραφικού περιβάλλοντος και του συστήματος μέτρησης όπως αυτή αναλύθηκε στο 3.1.3. Ειδικότερα αναλαμβάνει
  - a. Την αρχικοποίηση του νήματος εκτέλεσης **Client Thread** που εκτελεί παράλληλα τις λειτουργίες της κλάσης.
  - b. Την αρχικοποίηση του TCP client μέσω της κλάσης QTcpSocket της βιβλιοθήκης Qt Network [27] για την επικοινωνία με το σύστημα μέτρησης.
  - c. Τον χειρισμό των μηνυμάτων που φτάνουν μέσω της σύνδεσης TCP από το σύστημα μέτρησης και την μετάδοσή τους στις ανώτερες μονάδες του λογισμικού (π.χ. GPS συντεταγμένες στην κλάση Navigator)

- d. Τη κωδικοποίηση μηνυμάτων που λαμβάνονται από τις ανώτερες κλάσεις και την αποστολή τους μέσω της σύνδεσης TCP στο σύστημα μέτρησης (π.χ. αλλαγή του mode του συστήματος μέτρησης όπως αναλύεται στον Πίνακα 3-2.
  - e. Τον έλεγχο της κατάστασης της σύνδεσης GSM.
2. Η κλάση **Adapter** κατασκευάζει ένα ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ της γλώσσας C++ και της γλώσσας QML [31], δίνοντας τη δυνατότητα ελέγχου βασικών παραμέτρων και εντολών από το χρήστη (π.χ. έναρξη εργασίας) καθώς και την εμφάνιση σε αυτόν πληροφοριών τηλεμετρίας (π.χ. δείκτης NDVI).
    - a. Όλες οι παράμετροι και οι πληροφορίες θα δηλωθούν ως Q\_PROPERTY [32]. Για κάθε παράμετρο ορίζονται call-backs μέσω του μηχανισμού signal slot όπου ελέγχεται η ενημέρωσή τους είτε από την πλευρά της QML είτε από την πλευρά της C++.
    - b. Η κλάση θα γίνει register στο QML Content [31] μέσω της μεθόδου QQmlContext::setContextProperty ώστε να γίνει προσβάσιμη από την QML.
  3. Η κλάση **Updater** είναι υπεύθυνη για την εκτέλεση της διαδικασίας ενημέρωσης λογισμικού που αναλύθηκε στο 3.1.5.
  4. Η κλάση **Manifest** είναι υπεύθυνη για το χειρισμό του αρχείου ενημέρωσης.
  5. Η κλάση **Downloader** είναι υπεύθυνη για την λήψη της ενημέρωσης λογισμικού.

Στο Σχήμα 3-10 παρουσιάζεται το διάγραμμα κλάσεων UML:



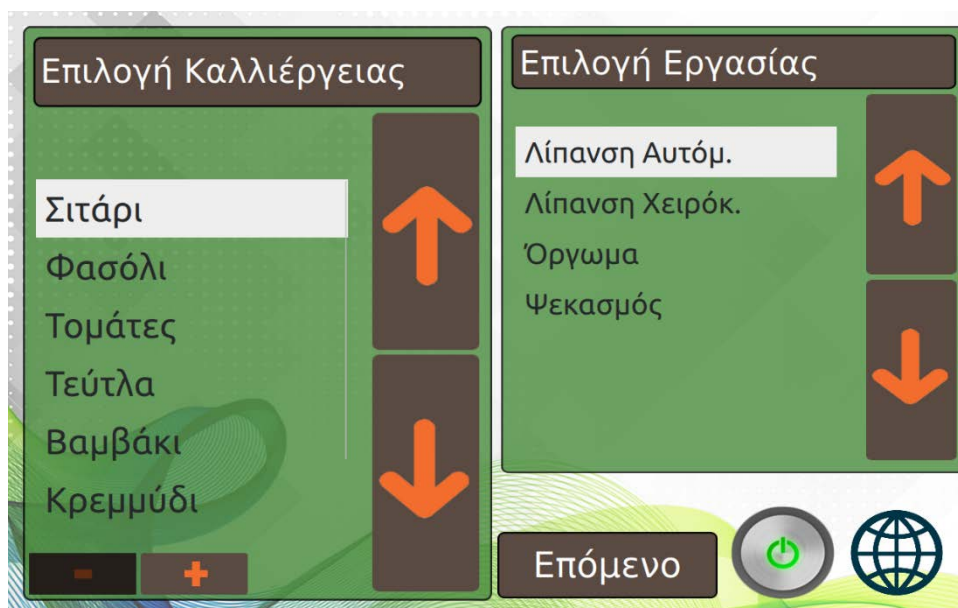
Σχήμα 3-10 Διάγραμμα κλάσεων λογισμικού γραφικού περιβάλλοντος

### 3.3.2 Οθόνες

Για το γραφικό περιβάλλον σχεδιάστηκαν και ενσωματώθηκαν δυο οθόνες για την παραμετροποίηση του συστήματος και μία για την κύρια λειτουργία. Στην τελευταία ενσωματώθηκε και ο βοηθός πορείας.

### Οθόνη ελέγχου παραμέτρων εργασίας

Στην Εικόνα 3-7 φαίνεται η οθόνη ελέγχου παραμέτρων εργασίας.



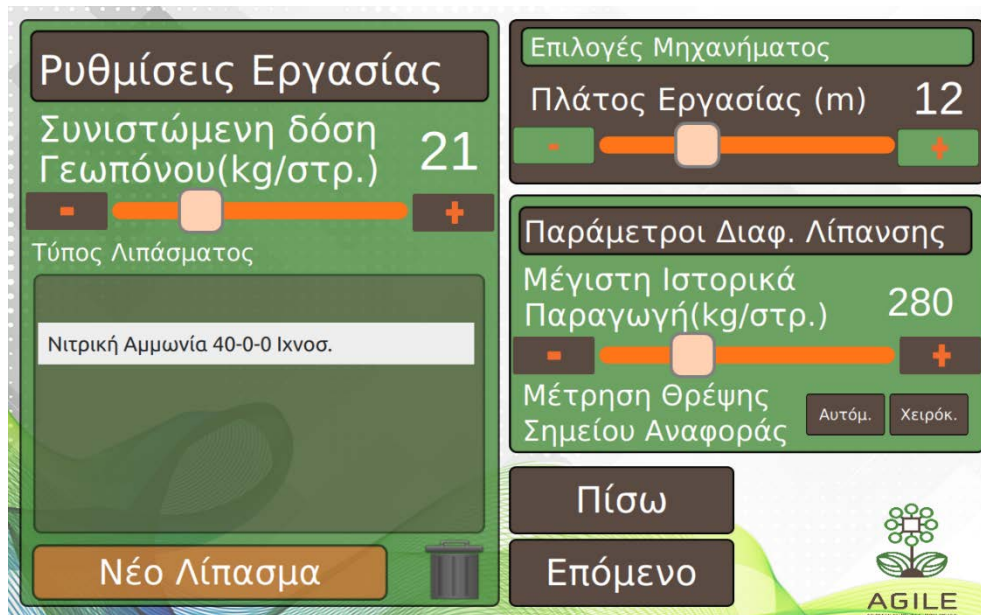
Εικόνα 3-7 Οθόνη ελέγχου παραμέτρων εργασίας

Ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει:

- **Επιλογή Καλλιέργειας.** Η επιλογή αυτή δεν έχει κάποια επίδραση στην λειτουργία του συστήματος. Θα αποθηκευτεί όμως από το σύστημα στο αρχείο καταγραφής καθώς είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για μια μελλοντική οργάνωση των εργασιών του χρήστη.
- **Επιλογή Εργασίας.** Η επιλογή αυτή καθορίζει τον τρόπο ελέγχου του συστήματος λίπανσης, και τις εντολές που θα σταλούν σε αυτό. Περιλαμβάνονται:
  - ο **Λίπανση Αυτόματη.** Το σύστημα θα μεταβάλλει τη δόση λίπανσης σύμφωνα με το δείκτη βλάστησης NDVI.
  - ο **Λίπανση Χειροκίνητη.** Το σύστημα θα διατηρήσει σταθερή τη δόση λίπανσης στην τιμή που ορίζεται από την παράμετρο συνιστώμενη δόση γεωπόνου που θα δούμε σε επόμενη οθόνη.
  - ο **Όργωμα, Ψεκασμός.** Στις επιλογές αυτές το σύστημα δε θα μπει σε λειτουργία λίπανσης αλλά ο χρήστης θα μπορεί να χρησιμοποιήσει το βοηθό πορείας.

### Οθόνη ελέγχου παραμέτρων λίπανσης

Στην Εικόνα 3-8 φαίνεται η οθόνη ελέγχου παραμέτρων εργασίας και λίπανσης.



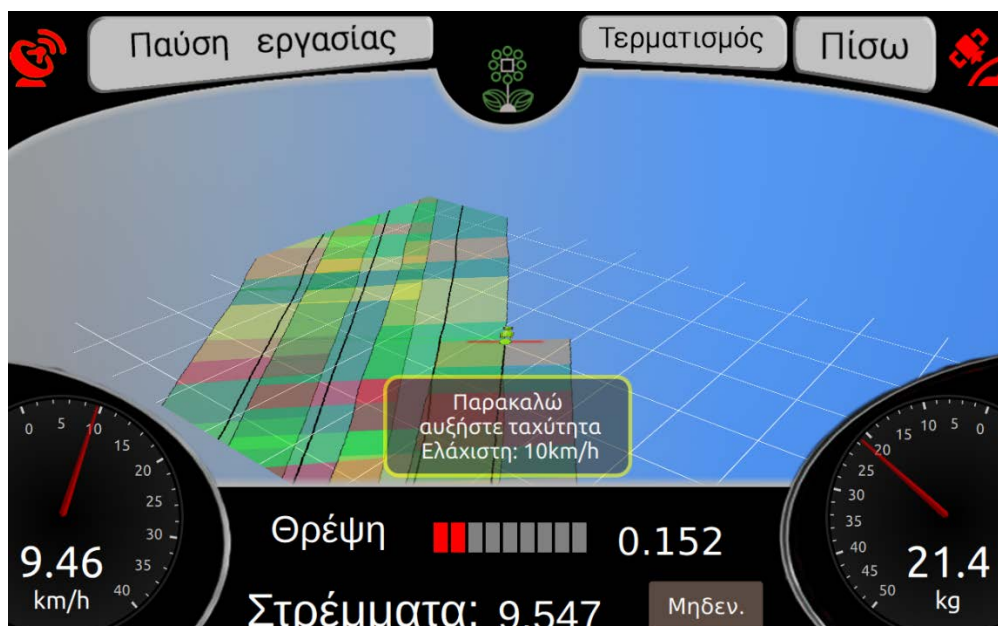
Εικόνα 3-8 Οθόνη ελέγχου παραμέτρων λίπανσης

Ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει:

- **Συνιστώμενη δόση γεωπόνου.** Αυτή η παράμετρος εισάγεται σε μονάδα μέτρησης kg/στρέμμα και χρησιμοποιείται από την εργασία «Λίπανση Χειροκίνητη» ως δόση εφαρμογής. Επιπλέον, πρόκειται να αξιοποιηθεί στο μέλλον για την μέτρηση της απόδοσης του συστήματος κατά τη διαφοροποιημένη λίπανση σε σχέση με την παραδοσιακή λίπανση.
- **Πλάτος εργασίας.** Η παράμετρος αυτή εισάγεται σε μονάδα μέτρησης μέτρα και χρησιμοποιείται από α) το σύστημα ελέγχου λίπανσης για το γεωμετρικό χαρακτηρισμό του διανομέα και β) από το βοηθό πορείας για τη σωστή οπτικοποίηση του πλάτους εργασίας του ελκυστήρα. Το πλάτος εργασίας είναι επίσης είναι αναγκαίο για τη σωστή οπτικοποίηση των δεδομένων κατά την κατασκευή χαρτών εφαρμογής λίπανσης.
- **Μέγιστη Ιστορικά Παραγωγή.** Ρύθμιση της μέγιστης εφικτής παραγωγής του χωραφιού με βάση το ιστορικό της καλλιέργειας. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται στη συνέχεια από τον αλγόριθμο λήψης απόφασης.
- **Τύπος λιπάσματος.** Στην επιλογή αυτή ο χρήστης ορίζει το λίπασμα που θα χρησιμοποιηθεί κατά τη λίπανση. Η πληροφορία αυτή έχει σκοπό να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για τη βελτιστοποίηση της λίπανσης ή από κάποιο cloud σύστημα διαχείρισης της καλλιέργειας και δεν λαμβάνεται υπόψιν προς το παρόν από το σύστημα για τη λίπανση.

*Οθόνη βοηθού πορείας*

Στην Εικόνα 3-9 φαίνεται η οθόνη βοηθού πορείας.



Εικόνα 3-9 Οθόνη βοηθού πορείας

Ο χρήστης έχει τις εξής επιλογές

- **Παύση εργασίας.** Το σύστημα θα εισέλθει στην κατάσταση PAUSED.
- **Τερματισμός.** Το σύστημα θα εισέλθει στην κατάσταση STOPPED.
- **Πίσω.** Με αυτή την επιλογή ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάξει κάποιες από τις ρυθμίσεις του συστήματος ενώ αυτό βρίσκεται σε κατάσταση RUNNING και μόνο σε συγκεκριμένη εργασία, χωρίς να χρειαστεί να τερματίσει τη λειτουργία.  
Πιο συγκεκριμένα:
  - ο Στις εργασίες Όργωμα και Ψεκασμός, ο χρήστης μπορεί να αλλάξει το πλάτος εργασίας.
  - ο Στην εργασία «Λίπανση Χειροκίνητη» ο χρήστης μπορεί να αλλάξει την δόση εφαρμογής, μέσω της επιλογής «Συνιστώμενη δόση γεωπόνου»
- **Μηδέν.** Επαναφορά μετρητή καλυπτόμενων στρεμμάτων στο μηδέν.

Ακόμα, ο χρήστης ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση της λειτουργίας του συστήματος μέσω των εξής ενδείξεων

- Ένδειξη δικτύου (πάνω αριστερά)
- Εικονίδιο σύνδεσης GPS (πάνω δεξιά)
- Ένδειξη ταχύτητας ελκυστήρα (κάτω αριστερά)
- Ένδειξη εφαρμογής λιπάσματος (κάτω δεξιά)
- Ένδειξη θρέψης

- Ένδειξη καλυπτόμενων στρεμμάτων

Σο κέντρο της οθόνης τοποθετήθηκε ο βοηθός πορείας που δείχνει σε πραγματικό χρόνο την κίνηση του ελκυστήρα, τη θρέψη του χωραφιού και την καλυπτόμενη έκταση. Σε περίπτωση που υπάρχει επικάλυψη στην πορεία του ελκυστήρα, αυτή θα τονιστεί με έντονο χρώμα ώστε να βοηθήσει το χρήστη να την αντιληφθεί και να διορθώσει την πορεία του.

### 3.3.3 Βοηθός πορείας

Ο βοηθός πορείας σχεδιάστηκε ώστε να καθοδηγεί τον χειριστή κατά την εφαρμογή της λίπανσης με βάση το σύστημα εντοπισμού GPS, παρέχοντάς του μια τρισδιάστατη άποψη του χωραφιού, χαράσσοντας την προηγούμενη πορεία του ελκυστήρα και τονίζοντας τις επικαλύψεις με πιο έντονο χρώμα. Με αυτόν τον τρόπο ο χειριστής μπορεί ευκολότερα να διατηρήσει σταθερή και ευθεία πορεία, αποφεύγοντας υπερκαλύψεις και σπατάλη λιπάσματος. Ακόμα, παρέχεται μια ποιοτική άποψη του χωραφιού, χαράσσοντας επί της πορείας του ελκυστήρα το δείκτη NDVI που υπολογίζεται από το σύστημα.

Η ανάπτυξη ξεκινά με την κατασκευή της κλάσης **ImageHandler**. Η κλάση αυτή, θα αρχικοποιήσει ένα αντικείμενο της κλάσης QImage [33] στις επιθυμητές αρχικές διαστάσεις, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως ο χώρος σχεδίασης της πορείας του τρακτέρ. Στη συνέχεια θα αρχικοποιηθεί ένα αντικείμενο της κλάσης QPainter [34] το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για γεωμετρική σχεδίαση (σημεία, γραμμές, κτλ.) με στόχο το αντικείμενο QImage. Η κλάση ImageHandler θα επεκταθεί περαιτέρω με την υλοποίηση μεθόδων επέκτασης της αρχικής εικόνας (π.χ. addTopMargin() για την επέκταση της πάνω πλευράς) οι οποίες θα εκτελεστούν όταν ο ελκυστήρας θα προσεγγίζει τα όρια της εικόνας. Τέλος μέσω της μεθόδου QImage::save() η κλάση ImageHandler θα μπορεί να εξάγει την τελική εικόνα του βοηθού πορείας.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε η κλάση **NavigatorManager** που αρχικοποιεί ένα αντικείμενο της κλάσης ImageHandler με αρχικές διαστάσεις 2048x1400 και αναλαμβάνει να σχεδιάσει πάνω του την πορεία του ελκυστήρα και το δείκτη NDVI του χωραφιού. Για το σκοπό αυτό, επικοινωνεί με την κλάση **Client** μέσω του μηχανισμού signal-slot και σε κάθε ενημέρωση των συντεταγμένων GPS και του δείκτη βλάστησης NDVI εκτελεί σε επανάληψη τα παρακάτω σχεδιαστικά βήματα:

1. Μετατροπή των συντεταγμένων GPS σε συντεταγμένες του 2D image.
2. Ανάθεση χρώματος σχεδιασμού πορείας με βάση το δείκτη βλάστησης NDVI.
3. Σχεδιασμός ενός πολυγώνου για κάθε βήμα που εκτελεί ο ελκυστήρας.
4. Δημιουργία της εικόνας που θα εμφανιστεί στον χρήστη με αντιγραφή ενός κομματιού 1024x700 με κέντρο τον ελκυστήρα από την αρχική εικόνα σε ξεχωριστή θέση μνήμης και περιστροφή της σύμφωνα με την κατεύθυνση του.
5. Ενημέρωση του νήματος γραφικού περιβάλλοντος για να ανανεώσει την εικόνα που προβάλλει στο χρήστη.

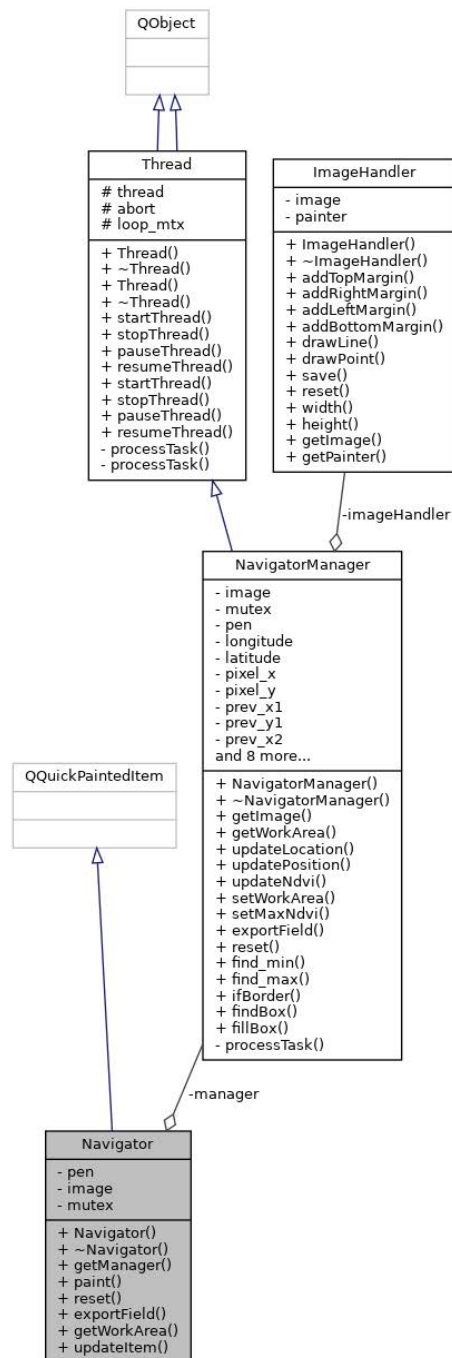
Τέλος αναπτύχθηκε η κλάση **Navigator** που θα γίνει register στο QML Content [31] μέσω της μεθόδου `QQmlContext::setContextProperty`, ώστε να εκτελεστεί από το νήμα γραφικού περιβάλλοντος. Η κλάση αναλαμβάνει να εμφανίσει στο χρήστη μέρος της εικόνας που κατασκευάζει η κλάση **NavigatorManager**.

Στο σημείο αυτό ο κύριος κορμός του βοηθού πορείας έχει ολοκληρωθεί και μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί από τη γλώσσα QML σαν ένα γραφικό component. Στην Εικόνα 3-10 παρουσιάζεται η οθόνη βοηθού πορείας μέσα από τον Qt Designer [35] που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των γραφικών. Τα υπόλοιπα στοιχεία του βοηθού πορείας όπως κουμπιά, ενδείξεις, και **CircularGauges** [36], θα συμπληρώσουν την οθόνη και θα συνδεθούν με το back-end μέσω της κλάσης **Adapter**.



Εικόνα 3-10 Η οθόνη βοηθού πορείας μέσα από τον Qt Designer

Στο Σχήμα 3-11 παρουσιάζεται το διάγραμμα κλάσεων UML του βοηθού πορείας.



Σχήμα 3-11 Διάγραμμα κλάσεων βοηθού πορείας

### 3.4 Δοκιμή συστήματος

#### 3.4.1 Εγκατάσταση πρωτοτύπου για δοκιμή

Το τελικό πρωτότυπο παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-11. Το μηχανολογικό και το ηλεκτρονικό μέρος δεν είναι αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, συνεπώς παραλείπουμε την περιγραφή τους.



Εικόνα 3-11 Ολοκληρωμένο πρωτότυπο

Στην Εικόνα 3-12 παρουσιάζεται το πρωτότυπο εγκατεστημένο σε γεωργικό ελκυστήρα.



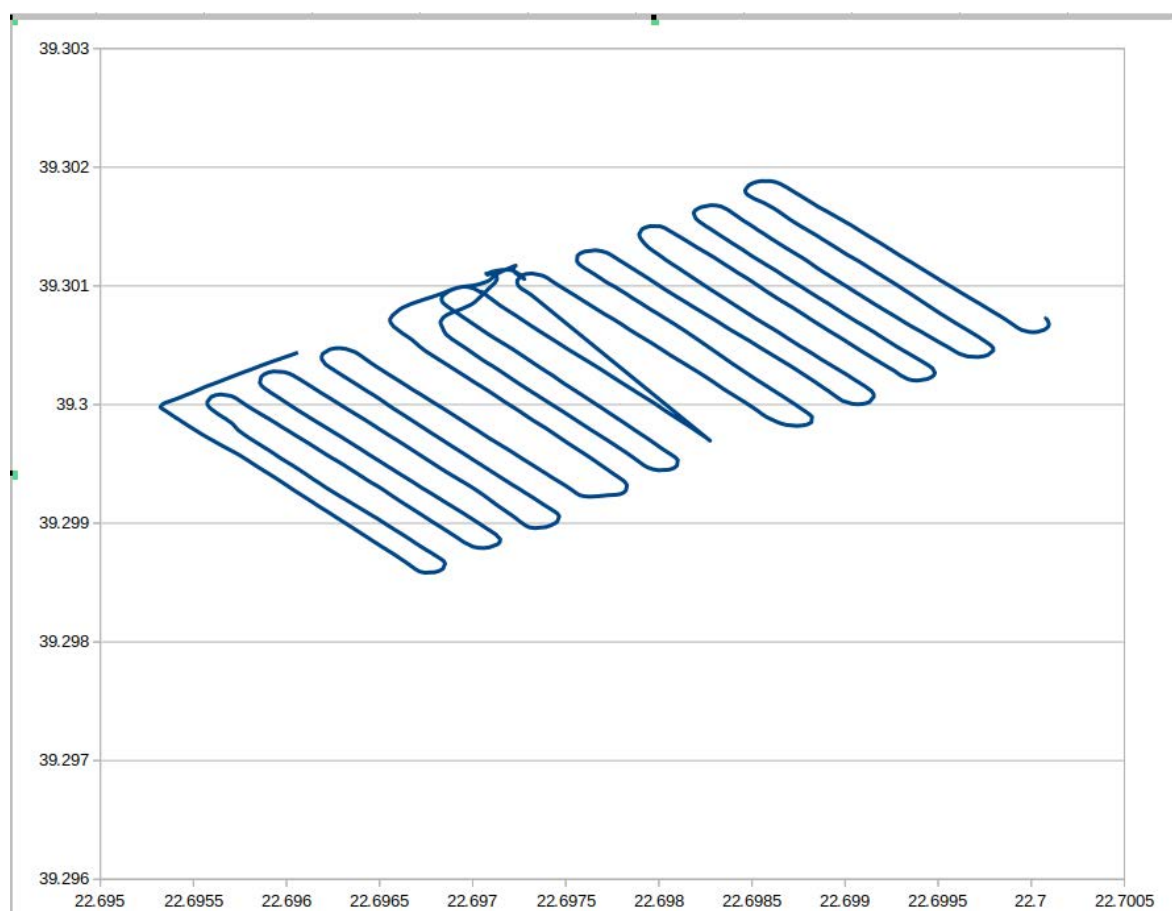
Εικόνα 3-12 Εγκατάσταση συστήματος σε ελκυστήρα για δοκιμή

### 3.4.2 Αποτελέσματα δοκιμής

Το σύστημα δοκιμάστηκε σε πειραματικό αγρό με σκοπό την αξιολόγηση της σταθερότητας του και τελικώς την σύγκριση της απόδοσης του συστήματος μέτρησης /

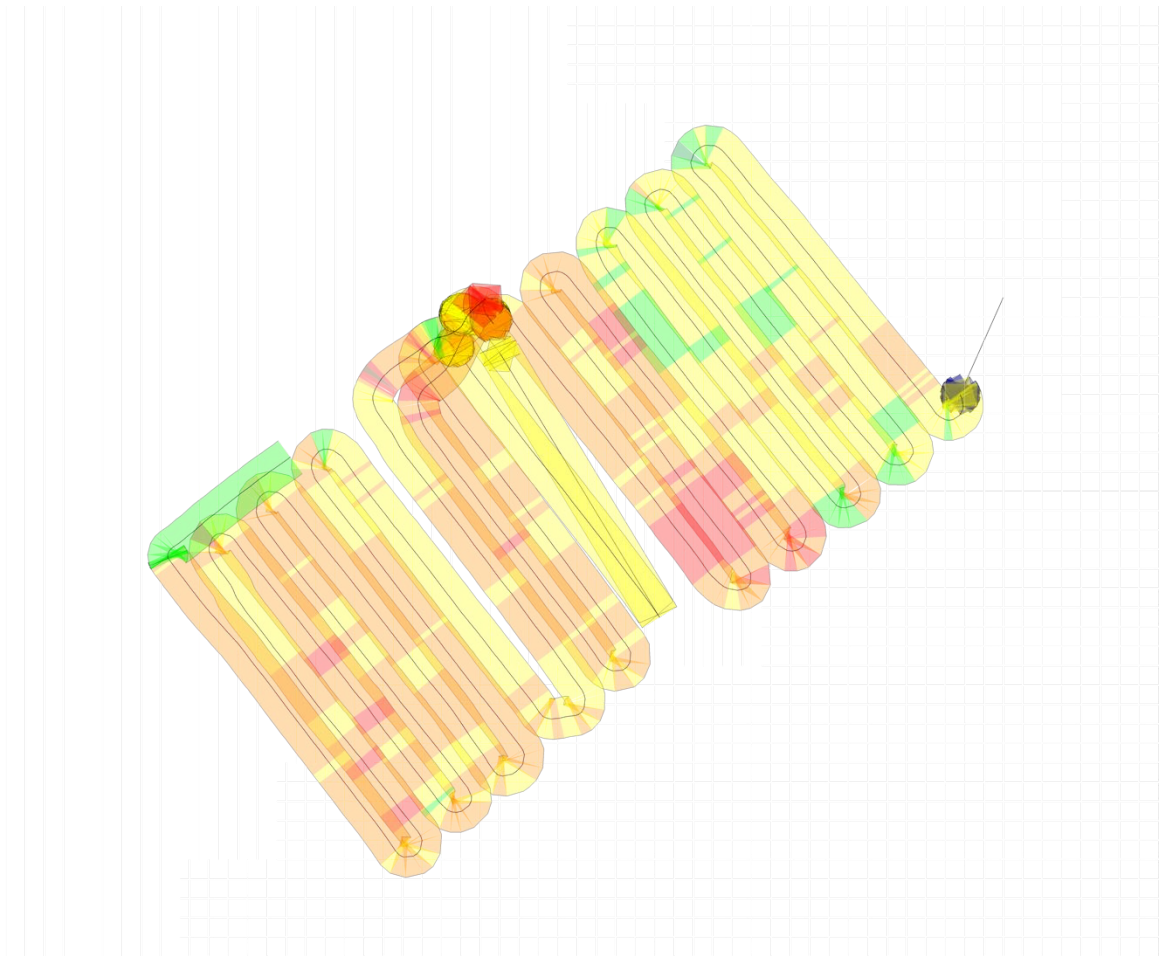
εκτίμησης της θρεπτικής κατάστασης έναντι δορυφορικών δεδομένων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως για τον υπολογισμό της θρεπτικής κατάστασης δοκιμάστηκαν διάφορες προσεγγίσεις και επιλέχθηκαν αλγόριθμοι που απέχουν σημαντικά από την απλή προσέγγιση που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2. Οι αλγόριθμοι αυτοί δεν είναι αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής, τα αποτελέσματά τους όμως παρουσιάζονται ως μέρος της τελικής δοκιμής του συστήματος για να επιβεβαιώσουν μεταξύ άλλων και την σταθερότητα του συστήματος.

Στην Εικόνα 3-13 παρουσιάζεται η πορεία του ελκυστήρα όπως αυτή καταγράφηκε από τη συσκευή GPS του συστήματος.



Εικόνα 3-13 Πορεία ελκυστήρα σε δοκιμαστική χρήση του συστήματος

Στην Εικόνα 3-14 παρουσιάζεται η πορεία του ελκυστήρα όπως σχεδιάστηκε από το βοηθό πορείας. Η εικόνα αυτή αποτελεί και έναν πρώτο χάρτη της θρεπτικής κατάστασης του πειραματικού αγρού.



Εικόνα 3-14 Πορεία ελκυστήρα και δείκτης NDVI σε πειραματικό αγρό, όπως σχεδιάστηκε από τον βοηθό πορείας

Στην Εικόνα 3-15 παρουσιάζεται ο χάρτης NDVI του χωραφιού όπως αυτός αποτυπώθηκε από το δορυφόρο Sentinel II [6] της ESA και της πλατφόρμας OneSoil [37]. Μπορούμε να διακρίνουμε μια ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δορυφορικών δεδομένων και των μετρήσεων του συστήματος. Συγκεκριμένα η καλλιέργεια και στους δύο χάρτες οι οποίοι είναι ευθυγραμμισμένοι με τον βορρά, παρουσιάζει μια περιοχή με καλή θρέψη στο βορειό-ανατολικό κομμάτι τους που εμφανίζεται με κίτρινο χρώμα ενώ παρουσιάζουν μια περιοχή με λιγότερο καλή θρέψη στο νότιο-δυτικό κομμάτι τους που εμφανίζεται με κόκκινο ή πορτοκαλί χρώμα. Η συσχέτιση αυτή επιβεβαιώνει την σταθερή λειτουργία του συστήματος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.



Εικόνα 3-15 Χάρτης NDVI του πειραματικού αγρού μέσω του δορυφόρου Sentinel II και της πλατφόρμας OneSoil [37]

## Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα

### 4.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στη διάρκεια αυτής της διπλωματικής έγιναν κάποια σημαντικά βήματα για τη βελτίωση του αρχικού πρωτοτύπου που στοχεύει στην διαφοροποιημένη λίπανση πραγματικού χρόνου και την κατασκευή ενός βιομηχανικού πρωτοτύπου. Το σύστημα αναβαθμίστηκε υπολογιστικά με την προσθήκη ενός δεύτερου μικρο-υπολογιστή στον οποίο και ανατέθηκε το γραφικό περιβάλλον. Στη συνέχεια έγιναν τα πρώτα βήματα για τη δημιουργία ενός παθητικού αισθητήρα εκτίμησης της θρεπτικής κατάστασης των φυτών με την ενσωμάτωση δύο καμερών στο εγγύς υπέρυθρο και στο ορατό φάσμα. Ακόμη αναπτύχθηκε γραφικό περιβάλλον που έδωσε τη δυνατότητα για παραμετροποίηση και έλεγχο του συστήματος καθώς και την πρόσβαση σε βοηθό πορείας βασιζόμενο σε GPS. Τέλος η ενσωμάτωση GPRS έδωσε τη δυνατότητα της απομακρυσμένης επιτήρησης του συστήματος και την συλλογή των δεδομένων.

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, δόθηκε κατά κύριο λόγο βαρύτητα στον λειτουργικό έλεγχο του συστήματος και επιβεβαιώθηκε η σωστή λειτουργία όλων των μερών του. Το σύστημα εγκαταστάθηκε σε γεωργικό ελκυστήρα και έγιναν διάφορες δοκιμές σε πειραματικό αγρό για την προσομοίωση της εργασίας. Τα προβλήματα που αποτελούσαν εμπόδιο στη συνέχιση των δοκιμών επιλύθηκαν κατά προτεραιότητα ενώ αυτά που συνεπάγονταν αρχιτεκτονικές αλλαγές στην κατασκευή του συστήματος καταγράφηκαν για μελλοντική αναβάθμιση.

Με το πέρας των δοκιμών διαπιστώθηκε η σταθερότητα του συστήματος σε συνεχόμενη διάρκεια λειτουργίας τριών ωρών και σε καλυπτόμενη έκταση 50 στρεμμάτων. Το γραφικό περιβάλλον και ο βοηθός πορείας συμπεριφέρθηκαν ικανοποιητικά στο να βοηθήσουν το χρήστη να ελέγξει και να εκτελέσει την εργασία του. Ακόμη το σύστημα καταγραφής δεδομένων μεταφόρτωσε επιτυχώς στο cloud τα αποτελέσματα ενώ από την ανάλυση τους διαπιστώθηκε πως αποτύπωσε με καλή ακρίβεια την πορεία του γεωργικού ελκυστήρα όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 3-13. Τέλος ο υπολογισμός του NDVI εμφάνισε ισχυρή συσχέτιση με τα δορυφορικά δεδομένα όπως παρουσιάστηκε στις Εικόνα 3-14 και Εικόνα 3-15 και επιβεβαίωσε την καλή λειτουργία του συστήματος των καμερών.

## 4.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Μετά τη δοκιμή του συστήματος στον πειραματικό αγρό, παρατηρήθηκαν διάφορα σημεία που χρήζουν βελτίωσης και δεν ήταν εφικτό να υλοποιηθούν στο χρόνο που ήταν διαθέσιμος για την παρούσα εργασία. Οι σημαντικότερες βελτιώσεις είναι οι εξής:

- Συμπίεση αρχείων καταγραφής για εξοικονόμηση κόστους και βελτίωση του χρόνου περάτωσης της μεταφόρτωσης δεδομένων.
- Ενσωμάτωση της δυνατότητας ενημέρωσης λογισμικού και στο σύστημα μέτρησης, καθώς τώρα είναι διαθέσιμη μόνο στο σύστημα γραφικού περιβάλλοντος.
- Βελτίωση αρχιτεκτονικής του βοηθού πορείας με ενσωμάτωση δομής χωρικής αποθήκευσης και πρόσβασης των δεδομένων καθώς η παρούσα υλοποίηση που η βασική της δομή είναι μια εικόνα, θα οδηγήσει γρήγορα σε υποβάθμιση της απόδοσης όταν η εργασία πραγματοποιηθεί σε μεγάλες εκτάσεις.
- Ενσωμάτωση εντολών διόρθωσης στο βοηθό πορείας που θα ειδοποιούν τον χρήστη να διορθώσει την πορεία του καθώς είναι αρκετά δύσκολο να αντιληφθεί υπερκαλύψεις κοιτώντας τον χάρτη κατά τη διάρκεια της εργασίας.
- Σχεδίαση χάρτη βοηθού πορείας βασιζόμενοι στην εφαρμογή λιπάσματος και όχι στη θρέψη καθώς αυτή είναι η πληροφορία που ενδιαφέρει περισσότερο τον χρήστη κατά την εργασία του. Ο χάρτης NDVI θα μπορούσε να κατασκευαστεί και να παρουσιαστεί στο χρήστη μετά το πέρας της εργασίας.

## Βιβλιογραφία

- [1] «Wordometer,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.worldometers.info/>.
- [2] «Precision Agriculture: An Introduction - University of Missouri,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://extension.missouri.edu/publications/wq450#:~:text=Precision%20agriculture%20gives%20farmers%20the,quality%2C%20without%20polluting%20the%20environment..>
- [3] «Optimizing the ROI of fungicides with NDVI imagery,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://www.pix4d.com/blog/pix4dmapper-optimizing-the-ROI-of-fungicides-with-NDVI>.
- [4] Γ. Ν. Βαρβαρέλης και Δ. Α. Ευαγγελόπουλος, «Σχεδίαση και υλοποίηση συστήματος διαφοροποιημένης εφαρμογής αζώτου σε καλλιέργεια σίτου με χρήση οπτικών αισθητήρων NDVI,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://ir.lib.uth.gr/xmlui/handle/11615/48903>.
- [5] «Crop Circle ACS-430 active crop canopy sensor,» Holland Scientific, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://hollandscientific.com/portfolio/crop-circle-ac-430/>.
- [6] «ESA Sentinel,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>.
- [7] «SALT ACCUMULATION AND WATERLOGGING MONITORING SYSTEM (SAWMS) DEVELOPMENT - Scientific Figure on ResearchGate.,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
[https://www.researchgate.net/figure/Typical-reflectance-spectrum-of-a-healthy-and-stressed-plant\\_fig1\\_336870715](https://www.researchgate.net/figure/Typical-reflectance-spectrum-of-a-healthy-and-stressed-plant_fig1_336870715).
- [8] «Measuring Vegetation (NDVI & EVI) - Normalized Difference Vegetation Index (NDVI),» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation>.
- [9] «Passive and active sensors - Remote sensing,» [Ηλεκτρονικό]. Available:  
<https://gisgeography.com/passive-active-sensors-remote-sensing/>.

- [10] «N-Sensor - to variably apply nitrogen,» Yara, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.yara.co.uk/crop-nutrition/farmers-toolbox/n-sensor/>.
- [11] «GreenSeeker Crop Sensing System,» Trimble, [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://agriculture.trimble.com/precision-ag/products/greenseeker/>.
- [12] «OptRx Crop Sensors - Ag Leader Technology,» Ag Leader, [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.agleader.com/products/directcommand/optrx-crop-sensors/>.
- [13] «Raspberry Pi,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi).
- [14] «Raspberry Pi GPIO and 40-pin Header,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/images/GPIO-Pinout-Diagram-2.png>.
- [15] «Qt framework,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.qt.io/product/framework>.
- [16] «Logitech C920 HD Pro Webcam,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.logitech.com/el-gr/products/webcams/c920-pro-hd-webcam.960-001055.html>.
- [17] «Agrocam Pro NIR,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.agrocam.eu/specification-agrocam-pro-nir>.
- [18] «Waveshark 10.1 inch HDMI LCD,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.waveshare.com/10.1inch-hdmi-lcd.htm>.
- [19] «WiringPi,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://github.com/WiringPi/WiringPi>.
- [20] «gpsd,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://gpsd.gitlab.io/gpsd/>.
- [21] «VK-162 USB GPS Engine Module Laptop Board G-Mouse Receiver G-Mouse Support,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.aliexpress.com/i/1005005365283570.html#nav-specification>.
- [22] «pppd - Point-to-Point Protocol Daemon,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://linux.die.net/man/8/pppd>.
- [23] «RPI SIM800 GSM/GPRS ADD-ON V2.0,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://wiki.iteadstudio.com/RPI\\_SIM800\\_GSM/GPRS\\_ADD-ON\\_V2.0](https://wiki.iteadstudio.com/RPI_SIM800_GSM/GPRS_ADD-ON_V2.0).
- [24] «OpenCV,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://docs.opencv.org/4.x/index.html>.

- [25] «Qt Quick 2.0,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doc.qt.io/qt-5/qtquick-qmlmodule.html>.
- [26] «QT Core,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doc.qt.io/qt-5/qtcore-module.html>.
- [27] «Qt Network,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doc.qt.io/qt-5/qtnetwork-module.html>.
- [28] O. μ. R. P. 3. [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi).
- [29] «Doxygen,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.doxygen.nl/index.html>.
- [30] «Spectral sensitivity for a typical CMOS sensor,» [Ηλεκτρονικό]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Spectral-sensitivity-for-a-typical-CMOS-sensor-37\\_fig1\\_371432862](https://www.researchgate.net/figure/Spectral-sensitivity-for-a-typical-CMOS-sensor-37_fig1_371432862).
- [31] «Qt QML,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doc.qt.io/qt-6/qtqml-index.html>.
- [32] «The QT Property System,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doc.qt.io/qt-6/properties.html>.
- [33] «QImage,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doc.qt.io/qt-5/qimage.html>.
- [34] «QPainter,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doc.qt.io/qt-5/qpainter.html>.
- [35] Q. Designer. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doc.qt.io/qt-5/qt designer-manual.html>.
- [36] Q. C. Gauge. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://doc.qt.io/qt-5/qml-qtquick-extras-circulargauge.html>.
- [37] «One Soil,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://onesoil.ai/en>.
- [38] «Jetson TX1 Module - NVIDIA Developer,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://developer.nvidia.com/embedded/buy/jetson-tx1>.
- [39] «Βιβλιοθήκη γραφικών Qt,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.qt.io/>.



