

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ**

Σχεδίαση και υλοποίηση συστήματος διαφοροποιημένης εφαρμογής αζώτου σε καλλιέργεια σίτου με χρήση οπτικών αισθητήρων NDVI

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Βαρβαρέλης - Δημήτριος Ευαγγελόπουλος

Επιβλέποντες καθηγητές:

Χρήστος Δ. Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ. & Μηχ. Η/Υ

Χρήστος Καβαλάρης
Μέλος Ε.Δ.Ι.Π.
Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος

Βόλος, Ιούλιος 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

...σε όλους όσους με βοήθησαν καθ' όλη την ακαδημαϊκή μου πορεία

Γιώργος Βαρβαρέλης

...στους γονείς μου που δεν πρόλαβαν να με δουν να αποφοιτώ από το πανεπιστήμιο.

Δημήτρης Ευαγγελόπουλος

Ευχαριστίες

Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας, υπήρξαν πάρα πολλοί άνθρωποι που θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε Άνθρωποι που μας άνοιξαν με χαρά την πόρτα του γραφείου τους, πίστεψαν στην ιδέα μας και μας προσέφεραν απλόχερα την πολύτιμη γνώση τους. Ήταν κοντά μας τα σαββατοκύριακα, τα απογεύματα, εκτός του ωραρίου της εργασίας τους και δίπλα μας στο χωράφι. Είτε μέσω skype αργά το βράδυ ή λερώνοντας τα ρούχα τους με λάδια στο γκαράζ και τον αγρό, όταν ο ήλιος έκαιγε το μεσημέρι. Μας εμπιστεύτηκαν για να χρησιμοποιήσουμε εξοπλισμό μεγάλης αξίας χωρίς τον οποίο δεν θα ήταν εφικτή η δημιουργία του συστήματος διαφοροποιημένης λίπανσης. Πάνω απ' όλα αποτέλεσαν πρότυπο και πηγή έμπνευσης για εμάς ως νέοι επιστήμονες μηχανικοί που είμαστε και θα εξέλθουμε πολύ σύντομα στον επαγγελματικό στίβο. Θα θέλαμε όμως να ευχαριστήσουμε και τους παραγωγούς που μας εμπιστεύτηκαν μεγάλες εκτάσεις για να διαχειριστούμε με σκοπό να μετρήσουμε την απόδοση του συστήματος μας, αναγνωρίζοντας το ρίσκο που διατρέχει μια τέτοια ενέργεια για το εισόδημά τους. Είναι άνθρωποι δραστήριοι που δεν το βάζουν κάτω και συνεχώς επενδύουν σε νέες τεχνολογίες, μηχανήματα και τρόπου για να βελτιώσουν την ποιότητα και την ποσότητα των προϊόντων που παράγουν.

Συγκεκριμένα ευχαριστούμε τους: Χρήστος Αντωνόπουλος, Χρήστος Καβαλάρης, Φώτης Πλέσσας, Χρήστος Καραμούτης, Φάνης Γέμτος, Θανάσης Μαρκινός, Μιχάλης Ανατολίτης, Alfa Seeds A.B.E.E. & Δημήτρης Κουκούτσης, Δημήτρης Ακρίδας, Κατερίνα Καρακούλα, Γιώργος Ματσούκας, Στράτος Γιουβανίδης, Γιώργος Φλέγκας, Αγγελής Γιώργος & Νίκος, Γρηγόρης Επίσκοπος, Ηλίας Ιωάννου, Θανάσης & Απόστολος Μαυροειδής, Ross Robertson.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	
1.1 Περιγραφή του προβλήματος και συμβολή της παρούσας εργασίας.....	12
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	12
2. Γεωπονικό υπόβαθρο της καλλιέργειας και λίπανσης του σίτου	
2.1 Το άζωτο και η σημασία του.....	13
2.2 Εφαρμογή διαφοροποιημένης λίπανσης.....	14
2.3 Αλγόριθμος συστήματος	18
3. Έρευνα	
3.1 Υπάρχουσες λύσεις - εμπορικοί αισθητήρες	25
3.2 Προκαταρκτικά πειράματα / proof of concept	27
3.3 Σχεδιασμός συστήματος	28
4. Ανάπτυξη συστήματος	
4.1 Διεπαφές	32
4.1.1 Επικοινωνία μικροελεγκτή με αισθητήρα Crop Circle	32
4.1.2 Επικοινωνία μικροελεγκτή με αισθητήρα NDVI της Meter	42
4.1.2.1 Κατασκευή Hardware	44
4.1.2.2 Ανάπτυξη Λογισμικού	45
4.1.2.3 Σύγκριση Crop Circle και Meter Sensor	48
4.1.3 Επικοινωνία μικροελεγκτή με speed sensor	48
4.1.4 Επικοινωνία μικροελεγκτή με actuator και feedback	51
4.1.4.1 Έλεγχος actuator από raspberry	51
4.1.4.2 Feedback θέσης	52
4.1.4.3 Ανάπτυξη αλγορίθμου θέσης	57
4.1.4.4 Λογισμικό επικοινωνίας Raspberry και actuator	61
4.1.5 Τροφοδοσία συστήματος	64
4.2 Αρχιτεκτονική Λογισμικού	65
4.3 Αρχιτεκτονική Υλικού	68
5. Δοκιμή Συστήματος σε πειραματικούς αγρούς - Μελέτη απόδοσης.....	72
5.1 Αγρόκτημα αδελφών Αγγελή	75
5.2 Αγρόκτημα Δημήτρη Ευαγγελόπουλου	81
5.3 Αγρόκτημα Γρηγόρη Επίσκοπου	85
5.4 Αγρόκτημα Απόστολου Μαυροειδή	89
5.5 Αγρόκτημα Alfa Seeds A.B.E.E.	92
6. Συμπεράσματα	97
7. Αναφορές	99

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.1.1 . Τυπική καμπύλη απορρόφησης του αζώτου από τη καλλιέργεια του σιταριού. *GS* = στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας κατά *Zadocks*.

Σχήμα 2.2.1. Βασική φιλοσοφία των αλγορίθμων προσαρμογής της αζωτούχου λίπανσης των καλλιεργειών

Σχήμα 2.3.1. Γενική απόκριση της προβλεπόμενης παραγωγής των σιτηρών με τη μεταβολή του δείκτη *NDVI*

Σχήμα 2.3.2. Σιγμοειδής καμπύλη πρόβλεψης της παραγωγής του σίτου από το δείκτη *NDVI*

Σχήμα 2.3.3. Μετασχηματισμός της σιγμοειδούς καμπύλης συσχέτισης του *NDVI* με τη παραγωγή του σιταριού για μεταβολή του σημείου καμπής *Inf* της καμπύλης (αριστερά) και του συντελεστή ελέγχου της κλίσης της καμπύλης *K* (δεξιά)

Σχήμα 2.3.4 – Βήματα υλοποίησης διαφοροποιημένης λίπανσης

Σχήμα 3.1.1 - Drone που χαρτογραφεί αγρό καλαμποκιού

Σχήμα 3.2.1 - ρίψη περίσσειας ποσότητας λιπάσματος σε οριοθετημένη περιοχή.

Σχήμα 3.2.2 - το αποτέλεσμα της ρίψης περίσσειας λιπάσματος εντός της οριοθετημένης περιοχής είναι εμφανές

Σχήμα 3.3.1 - Αρχιτεκτονική Συστήματος

Σχήμα 3.3.2 - Η θέση των αισθητήρων(*Crop-Circle*)

Σχήμα 3.3.3 - Αισθητήρας *NDVI Crop Circle*

Σχήμα 3.3.4 - *SRS* της *Meter*

Σχήμα 3.3.5 - *Reed Switch* χαρακτηριστικά

Σχήμα 3.3.6 - Μαγνήτης ενσωματωμένος σε δρόπανο, δίπλα από το *Reed switch*(μέσα στο μαύρο κουτί)

Σχήμα 3.3.7 – Ηλεκτρικός βραχίονας μοντέλο *CAHB-10-A3A-300447-ABBAPF-000*

Σχήμα 3.3.8 - *Raspberry Pi 3 Model B*

Σχήμα 4.1.1 - *Crop Circle Handheld pack*

Σχήμα 4.1.2 – Συνιθισμένη χρήση *Pin* βύσματος *db9*

Σχήμα 4.1.3 – Πραγματική λειτουργία που επιτελείται σε κάθε *Pin*

Σχήμα 4.1.4 - Οθόνη παλμογράφου που απεικονίζει τα σήματα στα *pin8* και *pin9* της σειριακής επικοινωνίας

Σχήμα 4.1.5 - Παράδειγμα ενός πακέτου δεδομένων με την αποκωδικοποίησή του σε *bits* του πρωτοκόλλου *RS485*

Σχήμα 4.1.6 - *Block Diagram* σύνδεσης μετατροπέα *RS485-RS232*

Σχήμα 4.1.7 – Θεωρητικό κύκλωμα μετατροπέα

Σχήμα 4.1.8 - Σχέδιο των *traces* του μετατροπέα *RS485-RS232*

Σχήμα 4.1.9 - Τυπωμένα *traces* πάνω σε γυαλιστερό χαρτί και επιχάλκωμένη πλακέτα

Σχήμα 4.1.10 - Διαδικασία αποχάλκωσης πλακέτας

Σχήμα 4.1.11 - Διάνοιξη τρυπών για τα ηλεκτρονικά στοιχεία

Σχήμα 4.1.12 - Σχεδιάγραμμα τοποθέτησης εξαρτημάτων πάνω στην πλακέτα

Σχήμα 4.1.13 - Τελική κατασκευή με τοποθετημένα ηλεκτρονικά στοιχεία. Επάνω όψη

Σχήμα 4.1.14 - Τελική κατασκευή με τοποθετημένα ηλεκτρονικά στοιχεία. Κάτω όψη

Σχήμα 4.1.15 - *Hyper Terminal H/Y* που αναλύει τη δομή του *RS232* πακέτου δεδομένων που σερβίρει ο μετατροπέας που κατασκευάστηκε

Σχήμα 4.1.16 - Η αντίστοιχη τιμή που εμφανιζόταν στην *LCD* του *data logger* (η μικρή απόκλιση εμφανίζεται γιατί οι φωτογραφίες δεν έχουν ληφθεί για το ίδιο πακέτο δεδομένων).

Σχήμα 4.1.17 - Φυσική διασύνδεση πολλαπλών αισθητήρων στο *sdi-12 interface*

Σχήμα 4.1.18 - Διασύνδεση αισθητήρων στο *sdi bus*

Σχήμα 4.1.19 - παράδειγμα δομής ενός πακέτου δεδομένων και συγκεκριμένα του χαρακτήρα "a"

Σχήμα 4.1.20 - Θεωρητικό κύκλωμα για υλοποίηση του *sdi bus*

Σχήμα 4.1.21 - Υλοποίηση *sdi bus* σε *breadboard*

Σχήμα 4.1.22 - οθόνη παλμογράφου όπου απεικονίζονται οι εντολές του *handshake* και η απάντηση του αισθητήρα.

Σχήμα 4.1.23 - Διάγραμμα ροής λογισμικού

Σχήμα 4.1.24 - Διάγραμμα ροής λογισμικού

Σχήμα 4.1.25 - Συνδεσμολογία *Reed switch* με *Raspberry*

Σχήμα 4.1.26 - Κυματομορφή σήματος ταχύμετρου

Σχήμα 4.1.27 - Διάγραμμα ροής αλγορίθμου υπολογισμού της ταχύτητας πορείας

Σχήμα 4.1.28 - Εφαρμογή *Reed Switch* μαζί με μαγνήτες στον τροχό του γεωργικού ελκυστήρα

Σχήμα 4.1.29 - Συνδεσμολογία για άνοιγμα του *actuator*. Ενεργοποιώντας τα 2 πρώτα *pin* σε *high*, οδηγείται το ρελέ και περνά η σωστή πολικότητα στα καλώδια του *actuator*.

Σχήμα 4.1.30 - Μηχανολογικό σχέδιο ηλεκτρικού βραχίονα και ποτενσιόμετρο μεταβλητής αντίστασης

Σχήμα 4.1.31 - Για το μοντέλο του ηλεκτρικού βραχίονα που χρησιμοποιήθηκε, η ωμική αντίσταση μεταβάλλεται κατά 16,6 Ω m για κάθε χιλιοστό μετατόπισης όπως δείχνει το εγχειρίδιο χρήσης

Σχήμα 4.1.32 - συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για διασύνδεση ολοκληρωμένου με μεταβλητή αντίσταση βραχίονα

Σχήμα 4.1.33 - Οθόνη τερματικού που διαβάζει τη θέση του βραχίονα ως ψηφιακό σήμα

Σχήμα 4.1.34 - επαλήθευση πειράματος για υπολογισμό της θέσης

Σχήμα 4.1.35 - επαλήθευση πειράματος για υπολογισμό της θέσης

Σχήμα 4.1.36 - κόκκοι λιπάσματος

Σχήμα 4.1.37 - Στάδια κατασκευής συστήματος βαθμονόμησης

Σχήμα 4.1.38 - Στάδια κατασκευής συστήματος βαθμονόμησης

Σχήμα 4.1.39 & 4.1.40 - Στάδια κατασκευής συστήματος βαθμονόμησης

Σχήμα 4.1.41 - Η διαδικασία της βαθμονόμησης σε εξέλιξη

Σχήμα 4.1.42 - Η διαδικασία της βαθμονόμησης σε εξέλιξη

Σχήμα 4.1.43 - Διάγραμμα ροής λογισμικού για επικοινωνία *raspberry* με τον *actuator*

Σχήμα 4.1.44 - Σχηματικό κυκλώματος σταθεροποίησης τάσης

Σχήμα 4.2.1 - Διάγραμμα ροής βασικής λειτουργίας του συστήματος

Σχήμα 4.2.2 - Διάγραμμα ροής υλοποίησης της μεθόδου διαφοροποιημένης λίπανσης

Σχήμα 4.3.1 - όλες οι ενώσεις έγιναν με καλώδια *quick release* τα οποία τοποθετήθηκαν οργανωμένα σε σημεία όπου δεν θα μπορούσαν να μετακινούνται άσκοπα. Αυτό μας εξασφάλισε ποιότητα στις συνδέσεις μας

Σχήμα 4.3.2 - τοποθέτηση κυρίως πλακέτας με *raspberry* και ρελέ στο κουτί κατασκευών καθώς και του μετατροπέα *RS485* σε *RS232*

Σχήμα 4.3.3 - Τοποθέτηση του *data logger* του *crop circle* μέσα στο κουτί κατασκευής με σκοπό να ελέγχεται και η λειτουργία του αισθητήρα όταν το τρακτέρ θα βρισκόταν σε κίνηση.

Σχήμα 4.3.4 - ασφάλιση καλωδίων με δελτά και σύρμα ώστε να παραμείνουν στη θέση τους και να αποφευχθεί μια ενδεχόμενη αποσύνδεση λόγω κραδασμών

Σχήμα 4.3.5 - Η μπροστινή όψη του κουτιού της κατασκευής. Αποτελείται από 2 διακόπτες. Ο πρώτος στα αριστερά είναι ο κεντρικός διακόπτης τροφοδοσίας που ενεργοποιεί/απενεργοποιεί το σύστημα. Ο δεύτερος δεξιά είναι ο διακόπτης που απενεργοποιεί χειροκίνητα τον ηλεκτρικό βραχίονα ανεξαρτήτως από την απόφαση του

συστήματος. Ο συγκεκριμένος διακόπτης τοποθετήθηκε για να αποφευχθεί ο κίνδυνος "κολλήματος" του συστήματος σε συνεχές άνοιγμα ή κλείσιμο όπου και θα γινόταν ζημιά στον λιπασματοδιανομέα.

Σχήμα 4.3.6 - τελικές δοκιμές λίγο πριν τη χρήση του συστήματος στον αγρό.

Σχήμα 4.3.7 - Το τελικό σύστημα όπως τοποθετήθηκε στην καμπίνα του γεωργικού ελκυστήρα. Η φωτογραφία λήφθηκε τη στιγμή που το σύστημα βρισκόταν σε πλήρη λειτουργία και πραγματοποιούσε διαφοροποιημένη λίπανση.

Σχήμα 5.1 - Αισθητήρας μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε πειραματικό αγρό

Σχήμα 5.2 - Τηλεμετρικός σταθμός στο Περιβλεπτο Μαγνησίας

Σχήμα 5.3 - Σχεδιάγραμμα αγρού και πειραμάτων (Αφοί Αγγελή)

Σχήμα 5.4 - Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Αφοί Αγγελή)

Σχήμα 5.5 - βροχοπτώσεις από 24/2 έως 4/3 στην περιοχή Περιβλέπτου

Σχήμα 5.6 - φωτογραφία τραβηγμένη από κινητό τηλέφωνο στις 2/3/16 στην οποία παρουσιάζεται η ίδια εικόνα σε σχέση με τις μετρήσεις των δορυφόρων. Το πειραματικό τμήμα παρουσιάζει πιο σκούρο έντονο πράσινο και ομοιόμορφο χρώμα.

Σχήμα 5.7 - Σχεδιάγραμμα αγρού και πειραμάτων (Ευαγγελόπουλος)

Σχήμα 5.8 - Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Ευαγγελόπουλος)

Σχήμα 5.9 - Διαχωρισμός παραδοσιακού και πειραματικού τμήματος (Επίσκοπος)

Σχήμα 5.10 - Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Επίσκοπος)

Σχήμα 5.11 - Διαχωρισμός παραδοσιακού και πειραματικού τμήματος (Μαυροειδής)

Σχήμα 5.12 - Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Μαυροειδής)

Σχήμα 5.13 - Διαχωρισμός παραδοσιακού και πειραματικού τμήματος (Alfa Seeds)

Σχήμα 5.14 - Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Alfa Seeds)

Σχήμα 5.15 - Χάρτης παραγωγής (Alfa Seeds)

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 4.1.1 - Πίνακας λογικών σημάτων sdi-12

Πίνακας 4.2.1 - Πίνακας νημάτων που ελέγχουν όλες τις λειτουργίες του συστήματος

Πίνακας 4.2.2 - Πίνακας μεταβλητών που μοιράζονται τα 3 νήματα

Πίνακας 5.1 - Εφαρμογές παραδοσιακής λίπανσης (ΑΦΟΙ Αγγελή)

Πίνακας 5.2 - Εφαρμογές διαφοροποιημένης λίπανσης (ΑΦΟΙ Αγγελή)

Πίνακας 5.3 - Αποτελέσματα συγκομιδής (ΑΦΟΙ Αγγελή)

Πίνακας 5.4 - Εφαρμογές παραδοσιακής λίπανσης (Ευαγγελόπουλος)

Πίνακας 5.5 - Εφαρμογές διαφοροποιημένης λίπανσης (Ευαγγελόπουλος)

Πίνακας 5.6 - Αποτελέσματα συγκομιδής (Ευαγγελόπουλος)

Πίνακας 5.7 - Εφαρμογές παραδοσιακής λίπανσης (Επίσκοπος)

Πίνακας 5.8 - Εφαρμογές διαφοροποιημένης λίπανσης (Επίσκοπος)

Πίνακας 5.9 - Αποτελέσματα συγκομιδής (Επίσκοπος)

Πίνακας 5.10 - Εφαρμογές παραδοσιακής λίπανσης (Μαυροειδής)

Πίνακας 5.11 - Εφαρμογές διαφοροποιημένης λίπανσης (Μαυροειδής)

Πίνακας 5.12 - Αποτελέσματα συγκομιδής (Μαυροειδής)

Πίνακας 5.13 - Εφαρμογές παραδοσιακής λίπανσης (Alfa Seeds)

Πίνακας 5.14 - Εφαρμογές διαφοροποιημένης λίπανσης (Alfa Seeds)

Πίνακας 5.15 - Αποτελέσματα συγκομιδής (Alfa Seeds)

Περίληψη

Ο σκοπός αυτής της εργασίας, είναι η έρευνα, ανάπτυξη και πειραματική επαλήθευση, ενός ενσωματωμένου συστήματος, το οποίο θα εφαρμόζει λίπανση ακριβείας, σε αγρούς σίτου, σε πραγματικό χρόνο. Το πρόβλημα της ακρίβειας της λίπανσης, υπήρχε από τα πρώτα στάδια της εκμηχάνισης της γεωργίας. Μέχρι πρόσφατα ωστόσο δεν υπήρχαν τα απαραίτητα μέσα και η τεχνολογία για την επίτευξη αυτού του στόχου. Με την εισαγωγή των ηλεκτρονικών και της πληροφορικής στη γεωργία και την ενσωμάτωση τους στα γεωργικά μηχανήματα τα πράγματα φαίνεται ότι έχουν αλλάξει. Σήμερα δίνεται η δυνατότητα για προσαρμογή των καλλιεργητικών εργασιών ανάλογα με τις πραγματικές συνθήκες. Η δυνατότητα αυτή αναμένεται να επιφέρει βελτίωση της αποτελεσματικότητας και αύξηση της παραγωγικότητας των αγροτικών συστημάτων. Και το θέμα της βελτίωσης της παραγωγικότητας της γεωργίας αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα αν αναλογιστεί κανείς ότι ο γεωργικός τομέας καλείται να εξασφαλίσει τρόφιμα για έναν ραγδαία αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό που αναμένεται να αγγίξει τα 9 δισεκατομμύρια μέχρι το 2050.

Σε πρώτο στάδιο έγινε επισκόπηση της υφιστάμενης τεχνολογίας και της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας για την εφαρμογή διαφοροποιημένης λίπανσης στα σιτηρά. Αναγνωρίστηκαν διάφοροι εναλλακτικοί τρόποι στη προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος και επιλέχθηκε η πλέον κατάλληλη προσέγγιση για τις ελληνικές συνθήκες και τα διαθέσιμα μέσα. Η προσέγγιση αυτή περιελάμβανε έναν αλγόριθμο ο οποίος χρησιμοποιεί δεδομένα του NDVI από τη καλλιέργεια και προτείνει, ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και στοιχεία από μάρτυρες λίπανσης, την απαραίτητη δόση του αζώτου.

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε μία αρχιτεκτονική λογισμικού και υλικού, όπου ενσωματώθηκε ο βασικός αλγόριθμος συσχέτισης του NDVI με τη δόση του λιπάσματος. Αναπτύχθηκε ένα πειραματικό πρωτότυπο TRL-5 το οποίο προσαρμόστηκε σε ένα συμβατικό φυγοκεντρικό λιπασματοδιανομέα με μονό δίσκο που αποτελεί τον αντιπροσωπευτικό τύπο μηχανήματος για τους Έλληνες παραγωγούς. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις βαθμονόμησης του λιπασματοδιανομέα και συσχέτισης του ανοίγματος των θυρών με τη ποσότητα του λιπάσματος (για διάφορους τύπους λιπασμάτων).

Με την επιτυχή ολοκλήρωση των παραπάνω προχωρήσαμε σε δοκιμές για την αξιολόγηση του συστήματος. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες πραγματικών παραγωγών. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν 5 παραγωγοί με συνολικές εκτάσεις άνω 300 στρεμμάτων σε διάφορες περιοχές της Θεσσαλίας. Στα αγροτεμάχια που επιλέχθηκαν πραγματοποιήθηκε εφαρμογή του συστήματος της διαφοροποιημένης λίπανσης και σύγκριση αυτού με το παραδοσιακό σύστημα λίπανσης που εφαρμόζουν οι παραγωγοί. Τα αποτελέσματα από το πρώτο έτος των δοκιμών ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά. Σε όλα τα αγροτεμάχια διαπιστώθηκε μια βελτίωση της παραγωγής με μέσο όρο τα 27,7 kg/στρ με την εφαρμογή ίδιας ή μικρότερης ποσότητας λιπάσματος. Οι αναλύσεις του

NDVI από τον αισθητήρα και από δορυφορικές εικόνες αποδεικνύουν μια εμφανή εξομάλυνση της χωρικής παραλλακτικότητας της φυτείας στα τμήματα που εφαρμόστηκε διαφοροποιημένη λίπανση. Τα στοιχεία αυτά οδηγούν στη αύξηση της παραγωγικότητας του σίτου και την βελτίωση του εισοδήματος για τους παραγωγούς. Επιπρόσθετα, αναμένουν να έχουν θετικές επιδράσεις στο περιβάλλον από την βελτίωση της αξιοποίησης των αζωτούχων λιπασμάτων και τον περιορισμό των απωλειών. Τα αισιόδοξα πρώτα αποτελέσματα σηματοδοτούν προοπτικές για μεγαλύτερες περαιτέρω βελτιώσεις στο μέλλον.

Abstract

The purpose of this thesis is to describe the research, development and experimental validation of an embedded system which supplies variable rate fertilizer to wheat fields in real time. The system was devised to address the issue of inaccurate and wasteful fertilization practices which are totally incongruous in the modern world.

Research into the characteristics of wheat, as well as the process of fertilization was conducted on various typical working farms in Greece. An investigation into currently available equipment and its operation was also carried out. Alternative ways of solving the inaccuracy of fertilization in cereal fields were also examined.

Based on these considerations, a system architecture was designed and an algorithm developed. These use the feedback from an optical NDVI sensor to control the amount of fertilizer that is actually required by the crop in any given part of the field. This data is then used to control the amount of fertiliser spread in real time, thereby facilitating optimal growth and therefore productivity.

Finally, by completing successfully all the above, a TRL-5 prototype was developed which was tested in a large scale pilot experiments, scientifically designed, in order to validate the integrity of the results. The pilots were conducted in 200 hectares in total, in various places of the Thessaly region. In a nutshell, the results of these experiments were more than promising and it is believed that with the necessary improvements, this system will add a lot of value to the real cereal markets, in a global scale.

1. Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή του προβλήματος και συμβολή της παρούσας εργασίας

Το πρόβλημα που υπάρχει σε παγκόσμια κλίμακα σήμερα, είναι αυτό της “κακής ή μικρής ακρίβειας” στη διαδικασία της λίπανσης του σίτου. Το πρόβλημα αυτό έχει δύο συνιστώσες, η μία είναι η αδυναμία συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από τον αγρό και η άλλη είναι η μη ικανότητα του εξοπλισμού που κατέχουν οι αγρότες σήμερα, στο να εκτελεσθεί μία εν κινήσει διαφοροποίηση στην ποσότητα του λιπάσματος, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Η παρούσα εργασία, συντελεί ενεργά στη λύση και των 2 ανωτέρω προβλημάτων, καθώς στα πλαίσιά της, αναπτύσσεται εξ’ ολοκλήρου, ένα TRL-5 πρωτότυπο ενός συστήματος διαφοροποιημένης λίπανσης σίτου, το οποίο λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα αυτό, αναγνωρίζει μέσω των οπτικών αισθητήρων του, την κατάσταση της “θρέψης”, του κάθε φυτού, σε ζωντανό χρόνο και δίνει εντολή σε ένα μηχανικό βραχίονα στο πίσω μέρος του γεωργικού ελκυστήρα, επιτρέποντας τη διαφοροποίηση της ροής του λιπάσματος ανά πάσα στιγμή.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας, αναλύεται η σημασία του αζώτου στην ανάπτυξη του σίτου, αναλύεται η έννοια της διαφοροποιημένης λίπανσης καθώς και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα που αναπτύχθηκε. Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται μία επεξήγηση του γεωπονικών στοιχείων που χρειάζεται να γνωρίζει ο αναγνώστης, ώστε να μπορέσει να παρακολουθήσει την έρευνα και ανάπτυξη, όπως επίσης και τη πειραματική επικύρωση του συστήματος.

Στο κεφάλαιο 3, αναλύεται όλη η έρευνα που προηγήθηκε της ανάπτυξης. Περιέχει την έρευνα του εξοπλισμού, που υπάρχει διαθέσιμος στην αγορά, ενώ επίσης αναλύεται και η πειραματική επαλήθευση της βασικής υπόθεσης της διπλωματικής, δηλαδή ότι η διαφοροποιημένη λίπανση έχει σημαντικά οφέλη σε μία καλλιέργεια σίτου. Τέλος, περιγράφεται ο σχεδιασμός του συστήματος και η ανάλυση των δομικών του στοιχείων και για ποιο λόγο αυτά επιλέχθηκαν.

Στο κεφάλαιο 4, περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία ανάπτυξης του ενσωματωμένου συστήματος της διαφοροποιημένης λίπανσης και από πλευράς υλικού, αλλά και από πλευράς λογισμικού.

Στο κεφάλαιο 5, βρίσκεται η πλήρης αναφορά του πειραματικού σχεδιασμού όπως επίσης και των πειραματικών αποτελεσμάτων του συστήματος, χρησιμοποιώντας τη σύγκριση των πειραματικών αγρών, με τους “παραδοσιακούς” αγρούς.

Στο κεφάλαιο 6, έχουμε τα συμπεράσματα που βγήκαν, από την εκπλήρωση της παρούσας εργασίας, καθώς και το πως μπορεί να βελτιωθεί το υπάρχον πρωτότυπο ακόμα περισσότερο.

2 Γεωπονικό υπόβαθρο της καλλιέργειας και λίπανσης του σίτου.

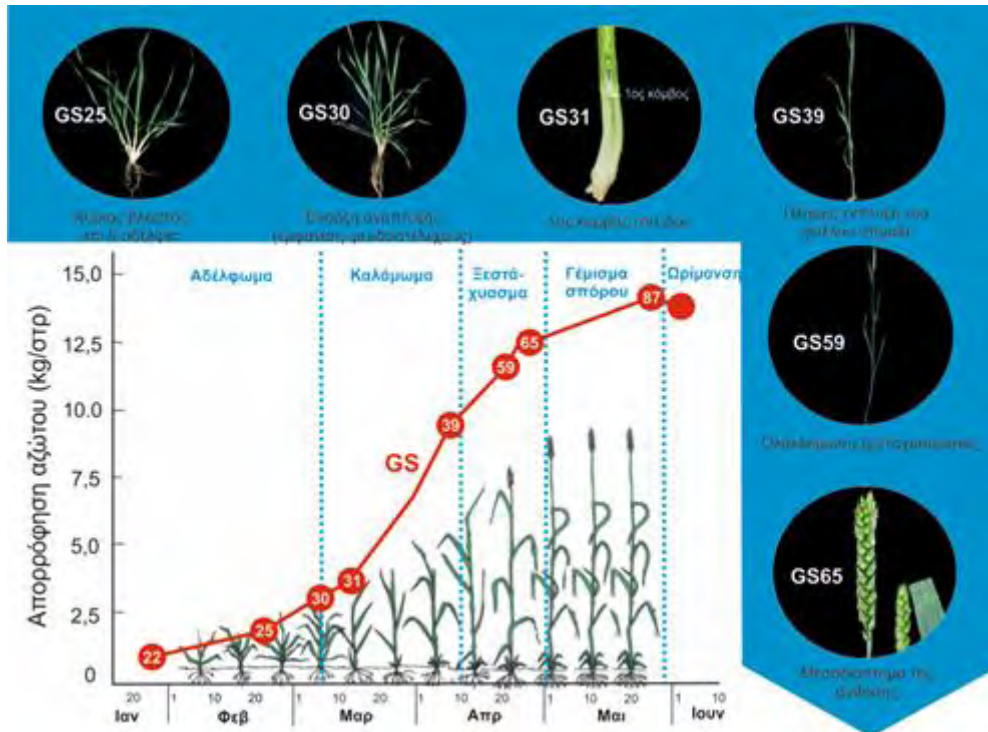
2.1 Το άζωτο και η σημασία του.

Το άζωτο αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο των φυτών και είναι αυτό που προσλαμβάνεται σε μεγαλύτερη ποσότητα από το έδαφος. Ο πιο σημαντικός του ρόλος σχετίζεται με τη σύνθεση των πρωτεϊνών. Επιπροσθέτως, το άζωτο αποτελεί βασικό συστατικό της χλωροφύλλης. Η χλωροφύλλη είναι αυτή που δίνει τη δυνατότητα στα φυτά να προσλαμβάνουν την ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία μέσω της διαδικασίας που ονομάζεται φωτοσύνθεση. Τα φυτά που αναπτύσσονται με επάρκεια σε άζωτο, εμφανίζουν ταχεία ανάπτυξη και παράγουν περισσότερη βιομάζα. Η σύγχρονη γεωργία βασίζεται σε αυτή την ιδιότητα και γι' αυτό προσπαθεί με την προσθήκη χημικών λιπασμάτων να εξασφαλίσει την επάρκεια των φυτών.

Για τα σιτηρά, η ορθολογική διαχείριση της αζωτούχου λίπανσης είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων. Ανεπάρκεια αζώτου, ιδίως κατά την κρίσιμη περίοδο οδηγεί με μαθηματική βεβαιότητα σε μείωση της παραγωγής των σιτηρών. Από την άλλη πλευρά, η υπερέπαρκεια αζώτου μπορεί επίσης να έχει αρνητικές επιπτώσεις προκαλώντας για παράδειγμα υπερβολικά υψηλά φυτά που είναι επιρρεπή στο πλάγιασμα ή φυτά που εμφανίζουν ευπάθεια στις προσβολές από ασθένειες. Κατά συνέπεια προκύπτει και πάλι, με έμμεσο τρόπο, μια μείωση των αποδόσεων η οποία μάλιστα συνοδεύεται από αυξημένο κόστος παραγωγής. Επιπλέον, η υπερβολική αζωτούχος λίπανση συνδέεται με μια σειρά από προβλήματα ρύπανσης του περιβάλλοντος όπως η νιτρορύπανση των υπόγειων και επιφανειακών υδροφορέων.

Το άζωτο είναι ένα ιδιαίτερα ευκίνητο και ασταθές στοιχείο στο έδαφος και για να υπάρξει η μέγιστη αξιοποίηση από τα φυτά πρέπει να εφαρμόζεται τη σωστή εποχή και στη κατάλληλη δόση. Η διαφοροποίηση των ποσοτήτων λίπανσης, ανάλογα με τα επί μέρους χαρακτηριστικά του αγρού και ο χρόνος που θα αποφασίσει να λιπάνει ο παραγωγός είναι ουσιαστικές παράμετροι οι οποίες όμως συνήθως είναι δύσκολο να εκτιμηθούν αντικειμενικά. Στο σχήμα 2.1.1 παριστάνεται ο ρυθμός πρόσληψης του αζώτου από τη καλλιέργεια του σιταριού.

Καθίσταται σαφές επομένως ότι η ορθή λίπανση των σιτηρών αποτελεί μια επιτακτική ανάγκη για τη βιωσιμότητα της καλλιέργειας αλλά και τη προστασία του περιβάλλοντος. Και καθότι η παραλλακτικότητα που εμφανίζουν τα χωράφια σημαίνει διαφοροποιημένες απαιτήσεις, όχι μόνο χρονικά αλλά και χωρικά, αναδεικνύεται η ανάγκη για διαφοροποίηση της αζωτούχου λίπανσης με την αξιοποίηση προηγμένων τεχνικών γεωργίας ακριβείας.



Σχήμα 2.1.1 . Τυπική καμπύλη απορρόφησης του αζώτου από τη καλλιέργεια του σιταριού. GS = στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας κατά Zadocks.

2.2 Εφαρμογή διαφοροποιημένης λίπανσης

Οι πρώτες προσπάθειες για διάγνωση της θρεπτικής κατάστασης των φυτών με σκοπό τον προγραμματισμό της αζωτούχου λίπανσης ξεκίνησαν με τη χρήση των μεθόδων Kjeldahl και την καύση με τη μέθοδο Dumas (Munoz-Huerta et al., 2013). Οι μέθοδοι αυτοί ωστόσο είναι καταστροφικοί με την έννοια ότι κάθε φορά χρειάζεται να αφαιρούνται τμήματα της καλλιέργειας στα οποία πραγματοποιούνται οι αναλύσεις. Επιπλέον είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες. Τα τελευταία έτη, με την ανάπτυξη οπτικών αισθητήρων δόθηκε η δυνατότητα για ανίχνευση της θρεπτικής κατάστασης των φυτών, ιδιαίτερα αυτής που σχετίζεται με το άζωτο, με ταχείς και μη καταστροφικές μεθόδους. Αυτή η προσέγγιση στηρίζεται στην ικανότητα εκτίμησης διαφόρων δεικτών βλάστησης (όπως NDVI, RVI, SAVI κ.α.) μέσω μέτρησης της αντανάκλασης του φωτός σε διάφορα φάσματα. Βασικοί περιορισμοί σε αυτή τη προσέγγιση είναι ότι οι δείκτες βλάστησης μπορεί να επηρεάζονται και από άλλους παράγοντες πέραν της θρέψης. Για παράδειγμα, ένας χαμηλός δείκτης βλάστησης μπορεί να οφείλεται σε

αραιή φυτεία ή στη προσβολή από κάποιο εχθρό ή ασθένεια. Ένας υψηλός δείκτης από την άλλη πλευρά μπορεί να οφείλεται σε πολύ πυκνή φυτεία, στη παρουσία ζιζανίων κ.α. Οι περιορισμοί αυτοί ξεπερνώνονται με την εγκατάσταση σημείων μαρτύρων μέσα στον αγρό όπου εφαρμόζεται ελεγχόμενη λίπανση (μηδενική ή υπερπλήρης). Τα σημεία αυτά ενσωματώνουν όλους τους υπόλοιπους αγρονομικούς παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν το δείκτη βλάστησης (μιας και βρίσκονται στο ίδιο χωράφι) και διαφοροποιούνται μόνο ως προς τη διαθεσιμότητα του αζώτου. Με τη στρατηγική αυτή καθίσταται δυνατή η συσχέτιση της θρεπτικής κατάστασης των φυτών με τιμές του δείκτη βλάστησης. Προς αυτή τη κατεύθυνση έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες και αλγόριθμοι πρόβλεψης με στόχο τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της αζωτούχου λίπανσης των καλλιεργειών [Franzen et al \(2016\)](#). Στοιχεία από δορυφορικές εικόνες και εναέριες φωτογραφίες αξιοποιούνται επίσης για αυτό το σκοπό.

Η ανάπτυξη μεθοδολογιών και αλγορίθμων για προσαρμογή της αζωτούχου λίπανσης θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν το πως ανταποκρίνεται η κάθε καλλιέργεια στη διαθεσιμότητα του αζώτου. Σε γενικές γραμμές, όταν η διαθεσιμότητα του αζώτου είναι πολύ χαμηλή (σε επίπεδα τροφopenίας), η παραγωγή αναμένεται να είναι από μηδενική ως ελάχιστη. Προσθήκη μικρής ποσότητας αζώτου σε αυτή τη περίπτωση δεν αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της παραγωγής καθώς μέχρι ενός ορισμένου επιπέδου δεν εξασφαλίζονται οι βασικές βιολογικές λειτουργίες των φυτών. Από κάποιο σημείο και έπειτα όμως η θρέψη εξασφαλίζει ένα φυσιολογικό στάδιο λειτουργίας των φυτών και αυτά πλέον ανταποκρίνονται άμεσα στην οποιαδήποτε αύξηση του αζώτου παράγοντας περισσότερη βιομάζα. Αυτή η απότομη αύξηση συνεχίζεται μέχρι ένα μέγιστο όπου πλέον η καλλιέργεια δεν έχει τη δυνατότητα να αξιοποιήσει περαιτέρω θρεπτικά στοιχεία και παύει να ανταποκρίνεται στην αζωτούχο λίπανση.

Η βιομάζα μιας καλλιέργειας μπορεί να εκτιμηθεί σε πολύ καλό βαθμό με τη βοήθεια οπτικών δεικτών βλάστησης που αξιοποιούν την αντανάκλαση του φωτός σε διάφορα φάσματα του ορατού και του υπέρυθρου. Ο πλέον διαδεδομένος δείκτης που χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές είναι ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$NDVI = \frac{P_{NIR} - P_{RED}}{P_{NIR} + P_{RED}}$$

Όπου p_{NIR} η αντανάκλαση του φωτός στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα (780-880nm) και p_{RED} η αντανάκλαση στο ερυθρό (650-670nm).

Ο δείκτης NDVI θεωρητικά μπορεί να λάβει τιμές από -1 έως 1. Όταν χρησιμοποιείται σε γεωργικές εφαρμογές οι τιμές κατά μέσο όρο κυμαίνονται από 0,2 (χώμα) – 0,8 (άριστη βλάστηση).

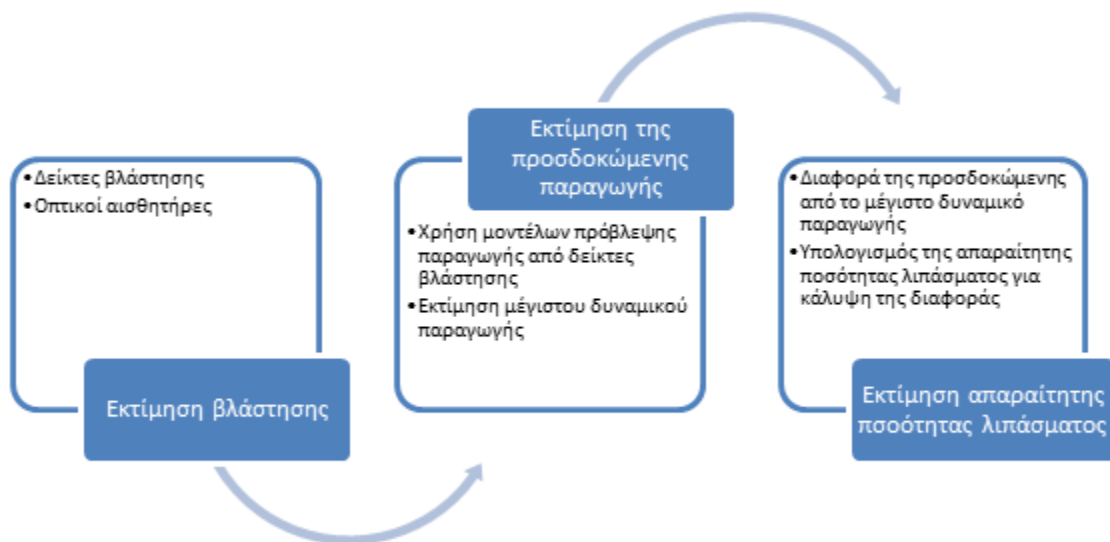
Συμφώνα με όσα αναφέρθηκαν, εφόσον είναι εφικτή η εκτίμηση της βιομάζας με τη βοήθεια δεικτών βλάστησης μπορεί να γίνει εκτίμηση της αναμενόμενης παραγωγής και από εκεί και έπειτα, εκτίμηση της απαραίτητης ποσότητας λιπάσματος για μεγιστοποίηση της παραγωγής.

Αυτή είναι και η φιλοσοφία που γενικά διέπει σήμερα τους περισσότερους αλγόριθμους που έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την προσαρμογή της αζωτούχου λίπανσης των καλλιεργειών (Σχήμα 2.2.1). Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να αναπτύξουν τέτοιου είδους αλγορίθμους χρησιμοποιώντας αρχικά παθητικούς οπτικούς αισθητήρες και αργότερα ενεργούς οπτικούς αισθητήρες με δική τους πηγή ακτινοβολίας για την εκτίμηση δεικτών βλάστησης κυρίως σε καλλιέργειες σιτηρών.

Σύμφωνα με τους [Franzen et al \(2016\)](#), η πρώτη επίσημη αναφορά για τη χρήση ενός παθητικού αισθητήρα για την εκτίμηση του NDVI έγινε το 1974 από τους [Rouse et al](#). Η εργασία αυτή αναγνώρισε ότι η υγιής βλάστηση απορροφά το μεγαλύτερο μέρος του φωτός σε ορισμένες ορατές ζώνες του φάσματος και αντανακλά ένα μεγάλο μέρος στο εγγύς υπέρυθρο.

Από το 1999 ο Raun με διάφορους συνεργάτες προσπαθεί να αναπτύξει μεθοδολογίες για την πρόβλεψη της παραγωγής των σιτηρών με τη χρήση οπτικών παραμέτρων και να αναπτύξει αλγόριθμους για την προσαρμογή της αζωτούχου λίπανσης με σκοπό την βελτίωση της αποδοτικότητας χρήσης του αζώτου ([Raun and Johnson., 1999](#), [Raun et al., 2001](#), [Raun et al., 2005](#)). Άλλοι ερευνητές εργάστηκαν επίσης προς αυτή τη κατεύθυνση παρουσιάζοντας αλγορίθμους για παροχή συστάσεων λίπανσης σύμφωνα με το NDVI ([Lukina et al., 2001](#), [Holland and Scheppers, 2010](#)).

Επιπροσθέτως έγινε προσπάθεια ενσωμάτωσης και άλλων παραμέτρων πέραν του NDVI όπως η ημερομηνία σποράς, η ημερομηνία λήψης παρατηρήσεων, οι βαθμοημέρες της καλλιέργειας, βροχόπτωση κλπ ([Girma et al., 2006](#), [Solarí et al., 2008](#), [Bushong et al., 2015](#)). Με την ανάπτυξη ενεργών οπτικών αισθητήρων δόθηκε νέα ώθηση στη δυνατότητα καθοδόν λήψης μετρήσεων του NDVI και άλλων δεικτών και την ανάπτυξη απλών υπολογιστικών σχημάτων για τη παροχή συστάσεων λίπανσης [1]([Arnall et al., 2006](#)).



Σχήμα 2.2.1. Βασική φιλοσοφία των αλγορίθμων προσαρμογής της αζωτούχου λίπανσης των καλλιεργειών

Σύμφωνα με τους Munoz-Huerta et al. (2013) οι ενεργοί οπτικοί αισθητήρες έχουν τη δική τους πηγή φωτός, οπότε αποφεύγεται η εξάρτηση από το ηλιακό φως. Ο κατάλογος των εμπορικών συστημάτων που βασίζονται σε ενεργούς αισθητήρες, των οποίων η χρήση σε επίπεδο πραγματικού πεδίου αναφέρεται σε πρόσφατες μελέτες, παρουσιάζεται ως εξής: α) ο Yara N-Sensor τοποθετημένος στον ελκυστήρα (Yara International ASA, Όσλο, Νορβηγία), β) Το χειροκίνητο GreenSeeker (NTech Industries Inc., Ukiah, CA, Η.Π.Α.) και (γ) το φορητό Crop Circle (Holland Scientific, Lincoln, NE, ΗΠΑ). Ο αισθητήρας Yara N-Sensor διαθέτει φλας Xenon, ο οποίος παρέχει πολυφασματικό φως υψηλής έντασης, μπορεί να μετρήσει και να καταγράψει την ανάκλαση φωτός καλλιέργειας σε ζώνη κυμάτων μεταξύ 450 και 900 nm. Υπάρχει ένα άλλο φασματόμετρο μέσα σε αυτό το όργανο που συλλαμβάνει το φως του περιβάλλοντος, το οποίο χρησιμοποιείται για μόνιμη διόρθωση του σήματος ανάκλασης της καλλιέργειας. Οι άλλοι ενεργοί αισθητήρες ανάκλασης παράγουν μόνο δύο μήκη κύματος: ένα κόκκινο (660 nm) και ένα NIR (770 nm) που χρησιμοποιείται από το GreenSeeker, ενώ το CropCircle έχει μία γεννήτρια φωτός (590 nm) και μια NIR (880 nm). Η Tremblay & Co ανέφερε ότι η σύγκριση μεταξύ των επιδόσεων των αισθητήρων Yara και GreenSeeker έγινε με ανάλυση των τιμών NDVI που προσδιορίζονται από αυτά τα όργανα σε συγκεκριμένα στάδια ανάπτυξης στα χωράφια καλαμποκιού και σιταριού. Ο αισθητήρας Yara είναι ικανός να μετρά και να καταγράφει φασματικές πληροφορίες σε ένα ευρύτερο εύρος από το GreenSeeker. Ο αισθητήρας N-Sensor της Yara κατέγραψε φασματικές πληροφορίες σε πέντε απλά μήκη κύματος, από τα οποία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που συλλέχθηκαν στα 660 και 740 nm για τον υπολογισμό του NDVI. Για το σιτάρι, οι τιμές NDVI που υπολογίστηκαν από το GreenSeeker και την Yara ήταν σε θέση να περιγράψουν τη

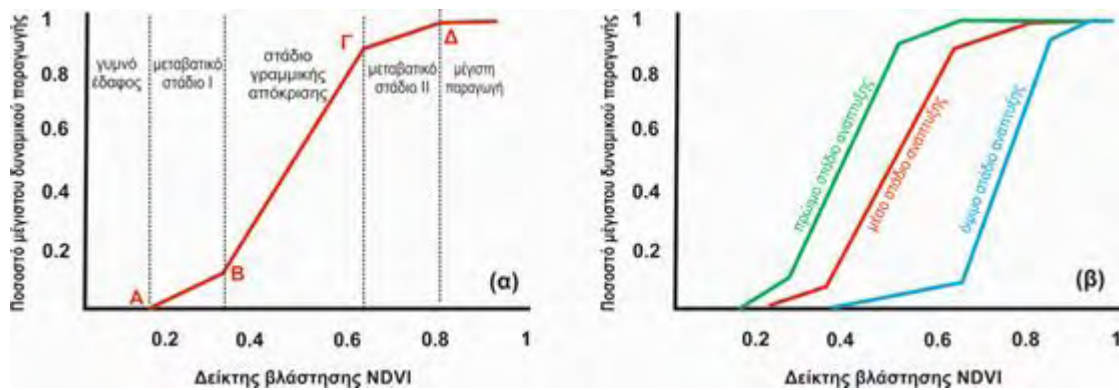
μεταβολή της επιφάνειας μέτρησης μιας καλλιέργειας σύμφωνα με την κατάσταση της καλλιέργειας σε N, αλλά η Yara ήταν λιγότερο ευαίσθητη από την GreenSeeker όταν οι τιμές NDVI πλησίαζαν τα επίπεδα κορεσμού.

Για το καλαμπόκι, η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι και οι δύο αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή των απαιτήσεων καλλιέργειας N πριν από το στάδιο ανάπτυξης V5. Ο αισθητήρας N της Yara συλλαμβάνει περισσότερη βιομάζα ανά μονάδα επιφάνειας του εδάφους από την GreenSeeker και μπορεί να διαμορφωθεί για να υπολογίσει δείκτες όπως ο δείκτης NDVI και άλλοι δείκτες βάσει αναλογίας, αλλά η απόδοσή του βασίζεται σε συνθήκες ηλιακού φωτός, οπότε η χρήση του περιορίστηκε τις ώρες της ημέρας. Παρότι υπολογίστηκε μόνο η NDVI, η GreenSeeker είναι σε θέση να υπολογίσει τα ορατά και NIR δεδομένα ανάκλασης, όπως ο απλός λόγος (NIR / VIS), ο αντίστροφος λόγος (VIS / NIR) και ο δείκτης βλάστησης προσαρμοσμένος στο έδαφος, Παράγοντα.

Ομοίως με την προαναφερθείσα μελέτη, μια σύγκριση αποτελεσματικότητας μεταξύ CropCircle και GreenSeeker αναφέρθηκε από τον Shaver και τους συνεργάτες με βάση το NDVI που υπολογίστηκε από κάθε αισθητήρα χρησιμοποιώντας δεδομένα ανάκλασης που λαμβάνονται από τα πεδία αραβοσίτου. Και οι δύο αισθητήρες διεξήχθησαν καλά στον προσδιορισμό της μεταβλητότητας N σε αρδεύσιμο αραβόσιτο στα στάδια ανάπτυξης V12 και V14. Ωστόσο, προτείνουν ότι το GreenSeeker θα μπορούσε να φτάσει στον κορεσμό νωρίτερα κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου από ό, τι το CropCircle, οπότε το GreenSeeker δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί όταν η βιομάζα φυτών ήταν μεγαλύτερη σε μεταγενέστερα στάδια ανάπτυξης.

2.3 Αλγόριθμος συστήματος

Οι [Solie et al \(2012\)](#) προσπάθησαν να παρουσιάσουν μια γενική μορφή ενός αλγόριθμου που εκτιμά την απαιτούμενη ποσότητα αζώτου από μετρήσεις του δείκτη βλάστησης NDVI σε καλλιέργειες σίτου και αραβόσιτου. Ο γενικός αυτός αλγόριθμος επιλέχθηκε και για τη παρούσα εργασία μιας και στην Ελλάδα δεν έχουν γίνει ακόμη μελέτες για το συγκεκριμένο θέμα. Ο αλγόριθμος που παρουσιάζουν οι [Solie et al \(2012\)](#) λαμβάνει υπόψιν τις σχέσεις του NDVI με τη βιομάζα της καλλιέργειας, την αναμενόμενη παραγωγή και τη διαχείριση του αζώτου. Η σχέση αυτή εκφράζεται με τη μορφή καμπύλης η οποία περιλαμβάνει τα εξής επιμέρους στάδια (Σχήμα 2.3.1 α):



Σχήμα 2.3.1. Γενική απόκριση της προβλεπόμενης παραγωγής των σιτηρών με τη μεταβολή του δείκτη NDVI [44]

1. **Γυμνό έδαφος:** Για τιμές NDVI ίσες με αυτές που προκύπτουν από την αντανάκλαση του εδάφους, η πρόβλεψη της παραγωγής θα πρέπει να είναι μηδενική. Οι τιμές αυτές συνήθως κυμαίνονται από 0,12 έως 0,25.
2. **Μεταβατικό στάδιο I:** Υπάρχει μια περιοχή λίγο μετά από το σημείο A που αρχίζει να εμφανίζεται βλάστηση στο έδαφος και συνεπώς αυξάνει ο δείκτης βλάστησης NDVI και όπου η απόκριση της προβλεπόμενης παραγωγής στην μεταβολή του δείκτη είναι μικρή. Η φυτεία δεν έχει καλύψει ακόμη πλήρως την επιφάνεια και οι τιμές NDVI κυμαίνονται περίπου 0,25-0,35. Σε αυτό το στάδιο η προσθήκη επιπλέον λιπάσματος δεν είναι βέβαιο ότι θα οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγής δεδομένου ότι υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που ελέγχουν το NDVI (όπως η αντανάκλαση από το έδαφος)
3. **Στάδιο γραμμικής απόκρισης:** Σε αυτό το στάδιο το NDVI της καλλιέργειας αυξάνει σχεδόν γραμμικά και απότομα με την αύξηση της βιομάζας κάτι που μεταφράζεται σε αυξημένη πρόβλεψη παραγωγής. Οι τιμές του NDVI σε αυτό το στάδιο κυμαίνονται περίπου από 0,4 έως 0,7
4. **Μεταβατικό στάδιο II.** Σε αυτό το στάδιο υπάρχει μια δεύτερη μεταβατική περιοχή όπου η προβλεπόμενη παραγωγή προσεγγίζει τη μέγιστη παραγωγή και ο ρυθμός αύξησης της παραγωγής μειώνεται με την αύξηση του NDVI. Σε αυτή την περιοχή η προσθήκη επιπλέον αζωτούχου λιπάσματος έχει περιορισμένα περιθώρια για περαιτέρω αύξηση της παραγωγής. Για το σιτάρι το στάδιο αυτό κυμαίνεται σε τιμές NDVI 0.7-0.8.
5. **Στάδιο μέγιστης παραγωγής.** Η καμπύλη της αναμενόμενης παραγωγής καταλήγει σε ένα μέγιστο το οποίο συμπίπτει με το μέγιστο δυναμικό της παραγωγής για τις συγκεκριμένες συνθήκες και τη συγκεκριμένη ποικιλία. Σε αυτή τη περιοχή, το φωτοσυνθετικό δυναμικό της καλλιέργειας είναι μέγιστο και ικανό να αξιοποιήσει όλη την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και επομένως οποιαδήποτε επιπλέον εφαρμογή λιπάσματος δεν αναμένεται να επηρεάσει ουσιαστικά τη παραγωγή. Οι τιμές του NDVI σε αυτό το στάδιο προσεγγίζουν το μέγιστο (για το σιτάρι περίπου 0,8).

Τα προηγούμενα καθορίζουν τη γενική μορφή της καμπύλης. Ο αλγόριθμος ωστόσο θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας τη στιγμή που λαμβάνονται οι μετρήσεις του NDVI. Η καλλιέργεια κατά τα πρώιμα στάδια εμφανίζει πολύ χαμηλές τιμές NDVI

που οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι δεν έχει ακόμη επιτευχθεί πλήρη εδαφοκάλυψη. Και αυτό παρότι τα φυτά ενδεχομένως να έχουν πλήρως εξασφαλισμένες τις θρεπτικές τους ανάγκες. Επομένως η καμπύλη πρόβλεψης της παραγωγής θα πρέπει να μετακινηθεί προς τα αριστερά για να ανταποκρίνεται στις διακυμάνσεις στο χαμηλό εύρος τιμών του NDVI (Σχήμα 2.3.1 β). Από την άλλη πλευρά, στα όψιμα στάδια της καλλιέργειας, η φυτεία εμφανίζει πλήρη εδαφοκάλυψη ακόμη και στα σημεία όπου τα φυτά ενδεχομένως να είναι ποιο καχεκτικά.

Ο αλγόριθμος επομένως θα πρέπει να μπορεί να δίνει τη δυνατότητα στη καμπύλη να μετακινείται προς τα αριστερά για να ανταποκρίνεται στο υψηλό εύρος τιμών του NDVI. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη ενός σιγμοειδούς παραμετρικού μοντέλου πρόβλεψης της παραγωγής από το NDVI το οποίο περιγράφεται από τη σχέση 1.

$$YP_0 = \frac{YP_{max}}{1 + \exp \left[\frac{FP_{NDVI} - Inf}{K} \right]} \quad (1)$$

Όπου YP_0 = η **προσδοκώμενη παραγωγή** σύμφωνα με τη λιπαντική αγωγή που ακολουθεί ο παραγωγός

YP_{max} = το **μέγιστο δυναμικό της παραγωγής** για το συγκεκριμένο αγρό (από την εμπειρία του παραγωγού ή των γεωργικών συμβούλων)

FP_{NDVI} = η τιμή του δείκτη NDVI που μετράται σε κάθε σημείο του αγρού

Inf = το **σημείο καμψής** του μοντέλου. Καθώς το μοντέλο είναι συμμετρικό, το σημείο καμψής βρίσκεται στο ύψος του ήμισυ της μέγιστης παραγωγής

K = συντελεστής ελέγχου της **κλίσης** της σιγμοειδούς καμπύλης. Όσο αυξάνει ο συντελεστής, τόσο μειώνεται η κλίση της καμπύλης στο σημείο καμψής

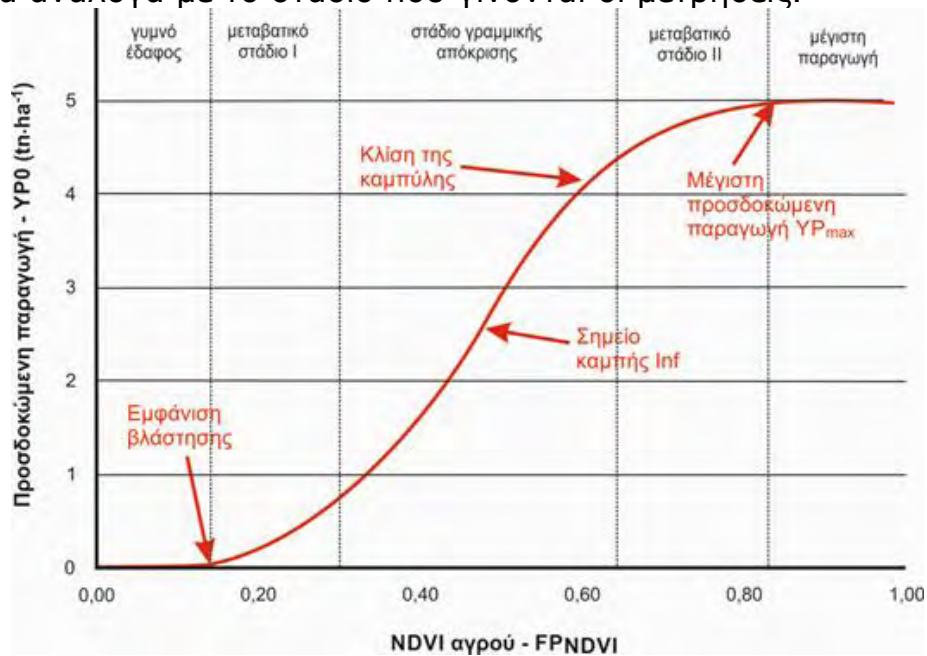
Στο σχήμα 2.3.2 απεικονίζεται η σιγμοειδής καμπύλη του παραμετρικού μοντέλου. Είναι εμφανές ότι η μορφή της καμπύλης ανταποκρίνεται στα πέντε διακριτά στάδια αγρονομικού ενδιαφέροντος που αναφέρθηκαν ποιο πάνω. Για να δοθεί όμως η δυνατότητα στη καμπύλη να μετακινείται και να μετασχηματίζεται ανάλογα με το στάδιο της καλλιέργειας που γίνεται η μέτρηση του NDVI θα πρέπει οι σταθεροί συντελεστές Inf και K να αποτελούν επίσης συνάρτηση του NDVI. Οι [Solie et al \(2012\)](#) συγκέντρωσαν στοιχεία από 86 πειράματα αζωτούχου λίπανσης στις Η.Π.Α και εφάρμοσαν ανάλυση μη γραμμικής συμμεταβολής. Από τα στοιχεία αυτών των αναλύσεων προέκυψαν για το σιτάρι οι σχέσεις 2 & 3 για τους συντελεστές Inf και K αντίστοιχα

$$Inf = 0.808 \cdot NR_{NDVI} - 0.0477 \quad (2)$$

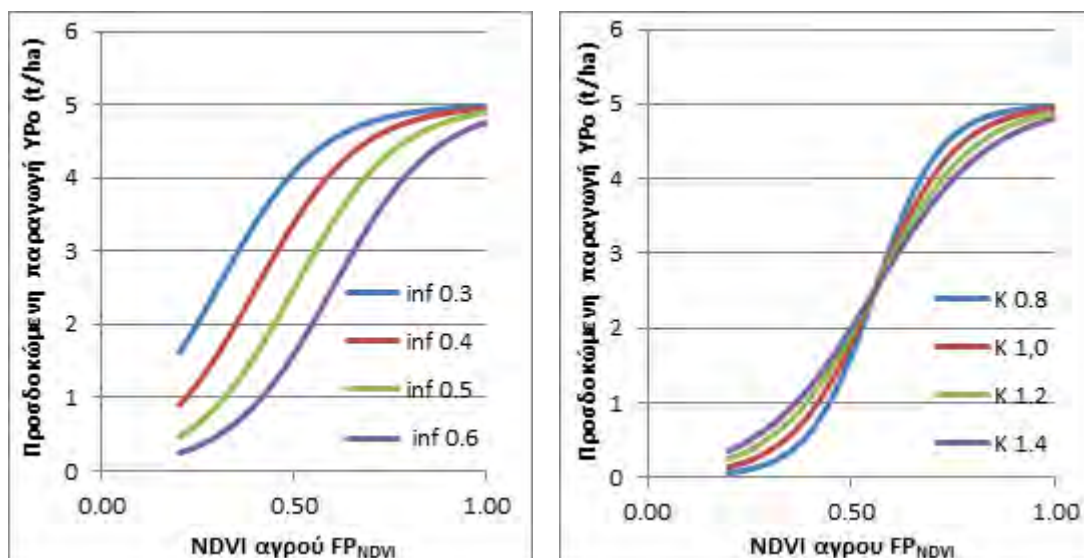
$$K = 0.1923 \cdot NR_{NDVI} - 0.00113 \quad (3)$$

Όπου NR_{NDVI} η τιμή του NDVI που μετράται σε σημεία - μάρτυρες δηλαδή σε σημεία μέσα στον αγρό όπου εφαρμόζεται πλήρης λίπανση με σκοπό να αποτελέσουν τους οδηγούς για την ανίχνευση συμπτωμάτων έλλειψης αζώτου στο υπόλοιπο χωράφι.

Οι σχέσεις 2 & 3 συνδέουν τους συντελεστές Inf και K της καμπύλης του σχήματος 2.3.2 με την τιμή NR_{NDVI} που μετράται κατά την ίδια χρονική περίοδο στα σημεία μάρτυρες όπου έχει εφαρμοστεί πλήρης αζωτούχος λίπανση. Καθώς στα σημεία αυτά θεωρητικά δεν υφίσταται έλλειψη αζώτου, η εξέλιξη του NR_{NDVI} αποτελεί έναν δείκτη της φυσιολογικής εξέλιξης της καλλιέργειας. Στο Σχήμα 2.3.3 απεικονίζονται γραφικά οι επιδράσεις των συναρτήσεων 2 & 3 στη καμπύλη του σχήματος 2.3.2. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στη καμπύλη να προσαρμόζεται αυτόματα ανάλογα με το στάδιο που γίνονται οι μετρήσεις.



Σχήμα 2.3.2. Σιγμοειδής καμπύλη πρόβλεψης της παραγωγής του σίτου από το δείκτη NDVI [44]



Σχήμα 2.3.3. Μετασχηματισμός της σιγμοειδούς καμπύλης συσχέτισης του NDVI με τη παραγωγή του σιταριού για μεταβολή του σημείου καμπής Inf της καμπύλης (αριστερά) και του συντελεστή ελέγχου της κλίσης της καμπύλης K (δεξιά). [44]

Για τη λειτουργία του αλγόριθμου επομένως απαιτείται η εγκατάσταση μαρτύρων πλήρους λίπανσης όπου θα ελέγχεται το NDVI και με αυτό θα συγκρίνονται οι τιμές από τον υπόλοιπο αγρό. Οι μάρτυρες αυτοί εγκαθίστανται εξαρχής στο χωράφι και λιπαίνονται τακτικά με ικανές ποσότητες αζωτούχων λιπασμάτων που εξασφαλίζουν την επάρκεια του αζώτου. Όταν οι τιμές του NDVI στον αγρό υστερούν από αυτές στο/στους μάρτυρες αυτό σημαίνει ότι στο χωράφι υφίσταται έλλειψη αζώτου που θα οδηγήσει σε μια μειωμένη προσδοκώμενη παραγωγή. Αυτό που θα πρέπει να κάνει επομένως ο παραγωγός είναι να προσθέσει επιπλέον άζωτο στα σημεία που εμφανίζουν υστέρηση σε σχέση με τον μάρτυρα και μάλιστα τόσο μεγαλύτερη ποσότητα, όσο μεγαλύτερη είναι η υστέρηση αυτή. Η επακριβής ποσότητα του επιπλέον αζώτου καθορίζεται από τη διαφορά της προσδοκώμενης παραγωγής Y_{P_0} (υπολογίζεται από τη Σχέση 1) από τη **μέγιστη εφικτή παραγωγή** Y_{P_N} η οποία εκτιμάται από τη Σχέση 4.

$$Y_{P_N} = \frac{Y_{P_{max}}}{1 + \exp\left[-\frac{NR_{NDVI} - Inf}{K}\right]} \quad (4)$$

Όπως αναφέρθηκε το μέγιστο δυναμικό της παραγωγής $Y_{P_{max}}$ καθορίζεται από την εμπειρία του παραγωγού ή των γεωργικών συμβούλων. Αυτό αντιστοιχεί στη μέγιστη παραγωγή που έχει καταγραφεί ιστορικά στο συγκεκριμένο αγρό ή τη συγκεκριμένη περιοχή και για τη συγκεκριμένη ποικιλία. Η σχέση 4 ωστόσο προχωρά ένα βήμα παρακάτω και εκτιμά τη μέγιστη παραγωγή που είναι εφικτή για τη τρέχουσα καλλιεργητική περίοδο (με τις επικρατούσες καλλιεργητικές και κλιματικές συνθήκες). Η εκτίμηση αυτή όπως είναι φανερό στηρίζεται στις ενδείξεις των μαρτύρων καθότι τόσο το NR_{NDVI} όσο και οι παράμετροι Inf και K εξαρτώνται από αυτούς (σχέσεις 2 & 3).

Εφόσον είναι γνωστή η προσδοκώμενη παραγωγή Y_{P_0} (σχέση 1) και η μέγιστη παραγωγή που είναι εφικτή υπό τις τρέχουσες συνθήκες Y_{P_N} (σχέση 4), η διαφορά τους αποτελεί την υστέρηση της παραγωγής Y_D που οφείλεται στην ελλιπή αζωτούχο θρέψη των φυτών και η οποία θα πρέπει να καλυφθεί με επιπλέον αζωτούχα λιπάσματα.

$$Y_D = Y_{P_N} - Y_{P_0} \quad (5)$$

Σύμφωνα με τους **Σιμώνη και Κουκουλάκη (1989)** το άζωτο στα ώριμα φυτά του σιταριού κατανέμεται κατά 70% στο σπόρο και 30% στο άχυρο. Η μέση περιεκτικότητα του αζώτου στο σπόρο είναι 2,214%. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για κάθε 100 kg παραγωγής σιταριού η καλλιέργεια θα πρέπει να προσλάβει από το έδαφος 2,214kg αζώτου. Αν το άχυρο δεν επιστρέφει στο έδαφος αλλά συγκομίζεται και αυτό ως ζωοτροφή (και με μια αναλογία άχυρο προς καρπό 1/3) θα πρέπει να υπολογιστούν άλλα 0,2214kg αζώτου ανά 100kg παραγωγής. Θα πρέπει ωστόσο να λάβουμε υπόψη ότι τα φυτά δεν έχουν τη δυνατότητα να προσλαμβάνουν όλη τη ποσότητα των θρεπτικών στοιχείων που προστίθενται στο έδαφος με τη λίπανση. Για το άζωτο π.χ, ανάλογα με τη μορφή που αυτό εφαρμόζεται (νιτρική, αμμωνιακή, ουρία), κάποια ποσότητα επλύνεται στα βαθύτερα στρώματα, κάποια άλλη υφίσταται εξαέρωση και κάποια άλλη δεσμεύεται

στα κολλοειδή του εδάφους. Ο λόγος της απορροφόμενης από τα φυτά ποσότητας των θρεπτικών στοιχείων προς τη συνολικά προστιθέμενη με τη μορφή λιπασμάτων στο έδαφος ονομάζεται συντελεστής αξιοποίησης του αζώτου NUE (Nitrogen Use Efficiency). Ένας μέσος συντελεστής αξιοποίησης για το άζωτο εκτιμάται γύρω στο 60%.

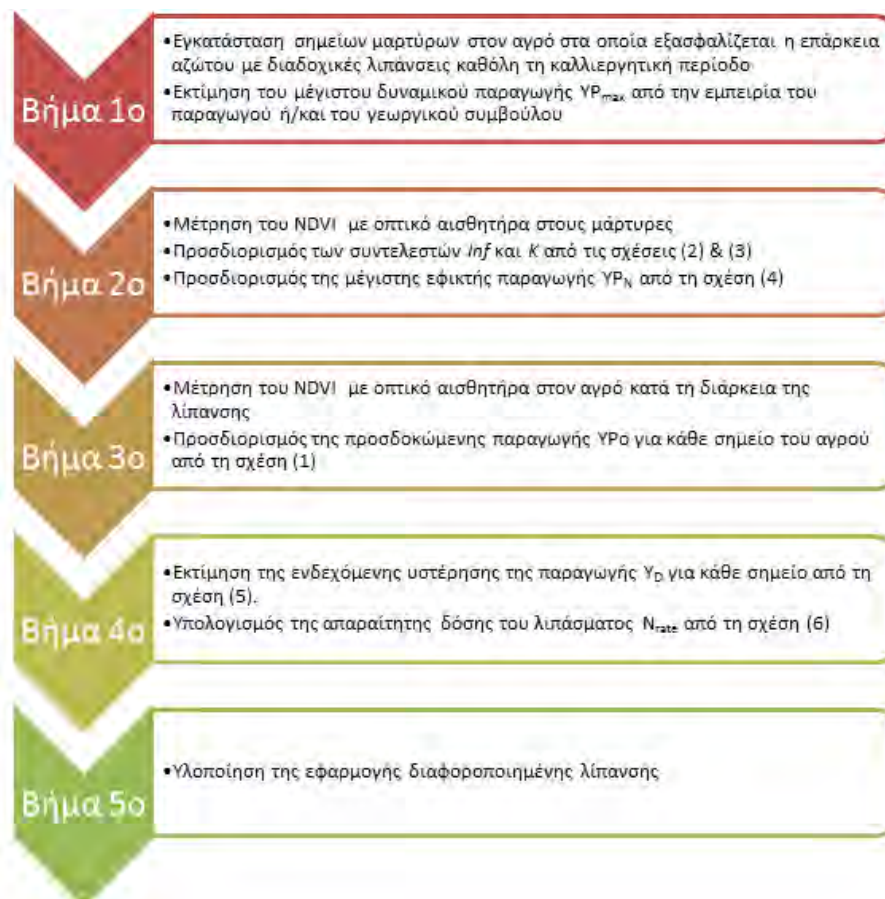
Επομένως, η ποσότητα του επιπλέον λιπάσματος που θα πρέπει να προσθέσουμε για να καλύψουμε τη διάφορα Y_D στη παραγωγή, υπολογίζεται από τη σχέση 6:

$$N_{rate} = \frac{Y_D \cdot \%N}{NUE} \quad (6)$$

Όπου: %N = η συγκέντρωση του αζώτου στο καρπό

NUE = ο συντελεστής αξιοποίησης του αζώτου.

Ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε, δίνει τη δυνατότητα, να εφαρμοστεί διαφοροποιημένη λίπανση στον αγρό αξιοποιώντας στοιχεία του δείκτη βλάστησης NDVI που λαμβάνονται με οπτικούς αισθητήρες. Εν κατακλείδι, η διαδικασία ολοκληρώνεται σε 5 βήματα. Τα δυο πρώτα αφορούν προκαταρκτικές μετρήσεις και εκτιμήσεις που μπορούν να γίνουν αμέσως πριν την έναρξη της λίπανσης ενώ τα τρία τελευταία εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο στο χωράφι. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.3.4



Σχήμα 2.3.4 – Βήματα υλοποίησης διαφοροποιημένης λίπανσης

Σύμφωνα με τους [Franzen et al \(2016\)](#), η βιωσιμότητα συστημάτων που βασίζονται στις εισηγήσεις βάση των επιπέδων N, θα εξαρτηθεί από το εάν οι αγρότες μπορούν να αποκομίσουν κέρδη από την επένδυσή τους, το ύψος της κυβερνητικής υποστήριξης / κίνητρα και την πολυπλοκότητα του συστήματος στο σύνολό του. Οι μελλοντικές πλατφόρμες ενεργής ανίχνευσης πιθανόν να προσφέρουν βελτιωμένη χρηστικότητα σε σχέση με τη βαθμονόμηση και την υποστήριξη αποφάσεων και γενικότερα μεγαλύτερη ευκολία προς τον χειριστή. Ως εκ τούτου, η καλλιεργητική πρακτική του χρήστη θα έχει ελάχιστη επίδραση στην περαιτέρω ελάττωση των φραγμών υιοθεσίας. Οι νέοι αλγόριθμοι N θα ενσωματώσουν πιθανώς συγκεκριμένες γενετικές πληροφορίες για σπόρους και κλιματικές πληροφορίες κλίμακας πεδίου. Επίσης, η τηλεματική στο πραγματικό χρόνο θα επιτρέψει την εύκολη και απρόσκοπτη ενσωμάτωση νέων πληροφοριών μοντέλου (εδάφους, κανονιστικών, οικονομικών, γενετικών κ.λπ.) στο σύστημα τεχνολογίας μεταβλητού ρυθμού (VRT) του παραγωγού, ενώ η χρήση συστημάτων πολυφασματικών αισθητήρων ή συστημάτων πολλαπλών αισθητήρων θα βοηθήσουν να συντονιστεί η εφαρμογή N με ταυτόχρονη ανίχνευση της κατάστασης του νερού και της θρεπτικής αξίας της καλλιέργειας καθώς και της θέσης του τοπίου και της σύνθεσης του εδάφους.

Οι βασικές διαφορές στους αλγόριθμους κατά τη διάρκεια της περιόδου που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τους διαχειριστές αγροκτημάτων, τους συμβούλους και τους παραγωγούς είναι ο τρόπος βαθμονόμησης των μεμονωμένων αισθητήρων (δηλ. Ο καθορισμός τιμών αναφοράς για τις καλλιέργειες) και η ευαισθησία συγκεκριμένων κυματικών ζωνών σε σχέση με το στάδιο ανάπτυξης. Το τελευταίο σημείο είναι κρίσιμο, διότι η έλλειψη ευαισθησίας στη σφριγηλότητα των καλλιεργειών μπορεί να οδηγήσει σε μια ψεύτικη αίσθηση ασφάλειας και χαμένου κέρδους. Ως εκ τούτου, οι παραγωγοί ενθαρρύνονται να επιλέξουν μια προσέγγιση που να ταιριάζει στις χωρικές και χρονικές πτυχές των πεδίων και των συστημάτων παραγωγής τους. Πρέπει να προστεθεί μια προειδοποιητική σημείωση που υπογραμμίζει εκ νέου τη συνεχιζόμενη ανάγκη για ολοκληρωμένες δοκιμές εδάφους. Η κατανόηση των ελλείψεων μακρο-και μικροθρεπτικών συστατικών και των πιθανών αλληλεπιδράσεών τους είναι υποχρεωτική για τη λήψη οποιασδήποτε απόφασης μόνο για το N.

Παρ' όλα αυτά, αυτή η εργασία αναφέρει βιώσιμες επιλογές για μεθόδους N βασισμένες σε αισθητήρες κατά τη διάρκεια της περιόδου, όλες οι οποίες έχουν τεκμηριωθεί για να δουλέψουν με παραγωγούς αραβοσίτου και σίτου και που μπορούν να μειώσουν τα ποσοστά φόρτωσης N στην παραγωγή σιτηρών. Η υιοθέτηση σε μεγάλη κλίμακα αναμένεται κάποια στιγμή, καθώς οι ομάδες αισθητήρων συναντώνται με περισσότερους ενοποιημένους αλγόριθμους οι οποίοι μπορούν να υποστηριχθούν, από κρατικά και κυβερνητικά προγράμματα.

3 Έρευνα

3.1 Υπάρχουσες λύσεις - εμπορικοί αισθητήρες

Πριν την εκμηχάνιση της γεωργίας, οι γεωργοί εκτελούσαν τις καλλιεργητικές εργασίες στον αγρό είτε με τα χέρια τους είτε με τη βοήθεια των ζώων. Αυτό τους έδινε της δυνατότητα να γνωρίζουν σπιθαμή προς σπιθαμή το χωράφι και προσαρμόζαν ανάλογα τις εργασίες. Για παράδειγμα, έριχναν περισσότερο σπόρο στα «πτωχά» τμήματα του αγρού και σκάλιζαν ποιο εντατικά στα σημεία που υπήρχαν πολλά ζιζάνια. Εκτελούσαν δηλαδή μια μορφή διαφοροποιημένης εφαρμογής των εισροών με βάση την εμπειρική τους αλληλεπίδραση με το περιβάλλον του αγρού. Με την εκμηχάνιση της γεωργίας, η δυνατότητα αυτή χάθηκε. Η εισαγωγή μεγάλων γεωργικών μηχανημάτων προσέδωσε μεν τη δυνατότητα της ταχύτερης και ευχερέστερης εκτέλεσης των εργασιών, εις βάρος ωστόσο της ακρίβειας. Οι καλλιεργητικές εργασίες σήμερα αποφασίζονται με βάση τις μέσες συνθήκες του αγρού. Αυτό ισχύει για τη σπορά, τη φυτοπροστασία, τη ζιζανιοκτονία και βεβαίως για τη λίπανση. Από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα η κατάσταση φαίνεται να αλλάζει ξανά. Με την εισαγωγή της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών και τη πληροφορικής στα αγροτικά μηχανήματα τους προσφέρεται πλέον η δυνατότητα να συμπεριφέρονται «έξυπνα» και να ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες διαφοροποιώντας ανάλογα τη ποιότητα και την ένταση της εργασίας που προσφέρουν, όπως ακριβώς έκαναν και οι άνθρωποι πριν την υποκατάστασή τους από τα μηχανήματα. Η νέα αυτή προσέγγιση περιγράφεται από τον γενικό όρο της «γεωργίας ακριβείας» η οποία στην ουσία στοχεύει στην προσαρμογή των εισροών στον αγρό χρονικά και χωρικά ανάλογα με τις ανάγκες. Προσπάθειες γίνονται για όλες τις καλλιεργητικές εργασίες από τη σπορά μέχρι και τη συγκομιδή περιλαμβάνοντας βέβαια και τη λίπανση[15].

Τα τελευταία 10 χρόνια, έχουν αναπτυχθεί “λιπασματοδιανομείς ακριβείας”, οι οποίοι έχουν 2 βασικές λειτουργίες. Η πρώτη είναι, ότι επιτρέπουν για πρώτη φορά, τη χειροκίνητη διαφοροποίηση της ποσότητας του λιπάσματος, από την καμπίνα του τρακτέρ, χωρίς δηλαδή ο παραγωγός να πρέπει να σταματήσει την πορεία, να κατέβει και να αλλάξει τη ροή της λίπανσης χειροκίνητα. Η δεύτερη που είναι πιο ειδική λειτουργία, είναι ότι οι λιπασματοδιανομείς αυτοί, μπορούν να δεχθούν σαν είσοδο, ειδικούς χάρτες δείκτη NDVI του αγρού τους οποίους θα έχει εισάγει ο παραγωγός με ένα USB και υλοποιούν διαφοροποιημένη λίπανση αυτόματα, βάση των χαρτών αυτών συνδυαζόμενους με στοιχεία GPS [16][17]. Αυτά τα συστήματα, είναι μονόδρομος για κάποιον που θέλει να κάνει

διαφοροποιημένη λίπανση, έτσι όπως είναι φυσικό, ανοίχθηκε ολόκληρη κατηγορία επιχειρήσεων, που θα παρέχει αυτούς του χάρτες NDVI στους παραγωγούς[18].

Επιπροσθέτως, αναπτύχθηκαν και οι μέθοδοι λήψης της πληροφορίας NDVI, με σκοπό τη γρήγορη συλλογή δεδομένων, καθώς πλέον αναφερόμαστε σε μεγάλες εκτάσεις. Τέτοιοι αισθητήρες, είναι αυτοί που μετρούν NIR + Red φάσμα, όπως το crop-circle που χρησιμοποιήθηκε και στο παρόν σύστημα της εργασίας. Ένας άλλος τρόπος, είναι η χρήση καμερών[7] που αναγνωρίζουν τα συγκεκριμένα φάσματα και τέλος, φυσικά είναι και η εκτέλεση εδαφοαναλύσεων σε ειδικά εργαστήρια[19].

Σήμερα λοιπόν, το πρόβλημα λύνεται από κάποιους, με χειροκίνητη μέτρηση των αναγκών του αγρού, η οποία μάλιστα υλοποιείται και από εταιρείες σχεδιασμένες για αυτή και μόνο την υπηρεσία. Αυτό πρακτικά σημαίνει, ότι απαιτείται δείγμα εδάφους, από όλο τον αγρό, σε κοντινά σημεία, με σκοπό τη δημιουργία χαρτών θρέψης, οι οποίοι θα δίνονται σε δεύτερο χρόνο στον παραγωγό για υλοποίηση της λίπανσης, είτε χειροκίνητα, είτε αυτόματα. Θεωρείται πάρα πολύ ακριβής μέθοδος, καθώς τα δεδομένα είναι αδιάσειστα, παρόλα αυτά είναι προφανές ότι το κόστος της είναι αστρονομικό, καθώς απαιτεί πάρα πολύ μεγάλο αριθμό εργατικού δυναμικού, όπως επίσης και απαιτεί και πολύ χρόνο για να δώσει αποτέλεσμα, χρόνος ο οποίος αλλοιώνει πολλές φορές το τελικό στόχο, αυτόν της “τέλειας” λίπανσης[8].

Στις υπηρεσίες παροχής χαρτών NDVI, εισήλθαν εταιρείες μικρών αεροπλάνων, όπου πετούσαν πάνω από τους αγρούς και παρείχαν φωτογραφίες εγγύς υπέρυθρου φάσματος, συνδυασμένες με το ορατό φάσμα και επεξεργαζόμενες από ειδικό λογισμικό. Ακριβώς την ίδια υπηρεσία αργότερα, προσέφεραν εταιρείες που είχαν δορυφορικές εικόνες στην κατοχή τους. Τέλος, η πιο πρόσφατη εξέλιξη εταιρειών συλλογής πληροφορίας NDVI από αγρούς, είναι αυτή των εταιριών drone [9] [20].



Σχήμα 3.1.1 - Drone που χαρτογραφεί αγρό καλαμποκιού[21]

3.2 Προκαταρκτικά πειράματα (proof of concept)

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της υλοποίησης του συστήματος, ελέγχθηκε η γενική υπόθεση της παρούσας εργασίας. Ότι δηλαδή η λίπανση επηρεάζει το χρώμα των φυτών. Έτσι λοιπόν εφαρμόστηκε σε οριοθετημένη περιοχή περίσσεια ποσότητα λιπάσματος και με την πάροδο 15 ημερών ελέγχθηκε το αποτέλεσμα ως προς την οπτική διαφοροποίηση αλλά και τη διαφοροποίηση του ndvi.



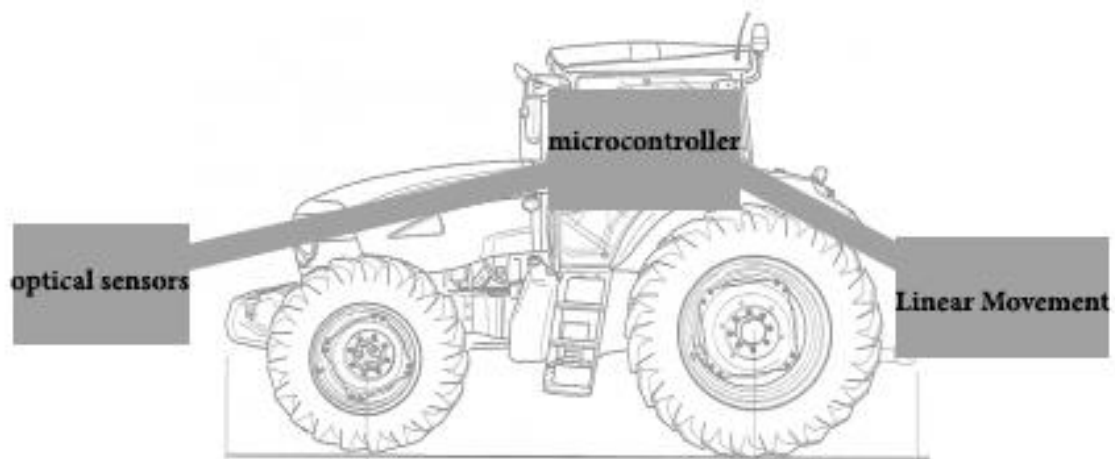
Σχήμα 3.2.1 - ρίψη περίσσειας ποσότητας λιπάσματος σε οριοθετημένη περιοχή.



Σχήμα 3.2.2 - το αποτέλεσμα της ρίψης περίσσειας λιπάσματος εντός της οριοθετημένης περιοχής είναι εμφανές.

3.3 Σχεδιασμός συστήματος

Το σύστημα σχεδιάστηκε, βασιζόμενο σε δύο βασικούς πυλώνες. Ο πρώτος ήταν, να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και ο δεύτερος ήταν η υψηλή ακρίβεια του αλγορίθμου. Το σύστημα αποτελείται από 3 διακριτά μέρη, το μέρος του αισθητήρα, το μέρος του μικρο-ελεγκτή και τέλος, το μέρος του ηλεκτρικού βραχίονα.



Σχήμα 3.3.1 - Αρχιτεκτονική Συστήματος

Για την απόφαση αυτής της αρχιτεκτονικής, δοκιμάστηκαν πειραματικά πολλοί διαφορετικοί τρόποι τοποθέτησης των επί μέρους μερών του συστήματος, όπως για παράδειγμα οι αισθητήρες στο πίσω μέρος, όπως επίσης και τύποι διαφορετικών αισθητήρων.



Σχήμα 3.3.2 - Η θέση των αισθητήρων (Crop-Circle) [10], να είναι στο πίσω μέρος του γεωργικού ελκυστήρα, κάτι το οποίο αργότερα αποδείχθηκε προβληματικό, καθώς η διασπορά του λιπάσματος, "εμπόδιζε", την ακριβή μέτρηση του αισθητήρα.



Σχήμα 3.3.3 - Αισθητήρας NDVI Crop Circle [22]

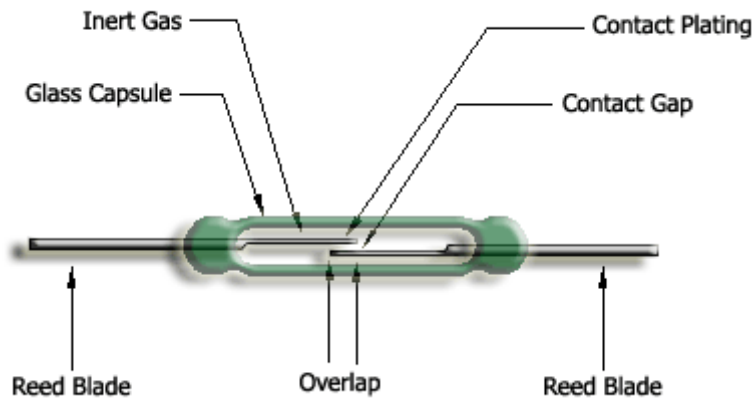
Δοκιμάστηκαν και αισθητήρες μέτρησης ηλιακής ακτινοβολίας που ονομάζονται SRS και είναι της εταιρείας DECAGON [11], που αποδείχθηκε στη συνέχεια ότι ήταν λιγότερο ακριβείς



Σχήμα 3.3.4 - SRS της Meter[23]

Για να δουλέψει ένα τέτοιο σύστημα χρειαζόμασταν ζωντανή και μεγάλης ακρίβειας μέτρηση της ταχύτητας του γεωργικού ελκυστήρα, ώστε να μπορούμε να υπολογίσουμε ακριβώς σε ποιο σημείο είναι η κάθε επί μέρους μέτρηση του αισθητήρα και να μπορούμε να εφαρμόσουμε τη λίπανση σε αυτό ακριβώς το σημείο. Για να υλοποιηθεί λοιπόν ένα τέτοιο ταχύμετρο, υπήρχαν διάφορες επιλογές, αλλά επιλέχθηκε αυτή ενός Reed Switch σε συνδυασμό με ισχυρούς μαγνήτες που τοποθετήθηκαν στην εσωτερική μεριά του μπροστινού τροχού του τρακτέρ. Για την τελική του επιλογή, υλοποιήθηκε ένα πείραμα, μέτρησης της μέγιστης συχνότητας δειγματοληψίας, χρησιμοποιώντας ένα δράπανο, στη μύτη του οποίου είχε τοποθετηθεί ένας μαγνήτης. Με την ενεργοποίηση του δραπενου λοιπόν, κάθε φορά που ο μαγνήτης περνούσε από το Reed switch[24], παίρναμε μία μέτρηση. Δοκιμάζοντας τη μέγιστη ταχύτητα, οι μετρήσεις μας, ήταν σε

κλίμακα μικρό-δευτερολέπτων, άρα θα ήταν και υπερ-αρκετή για τις περιστροφές της ρόδας του τρακτέρ. Η λύση αυτή, έδωσε πολύ μεγάλη ακρίβεια μέτρησης, η οποία μάλιστα και καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, ήταν πολύ αξιόπιστη.



Σχήμα 3.3.5 - Reed Switch χαρακτηριστικά [25]



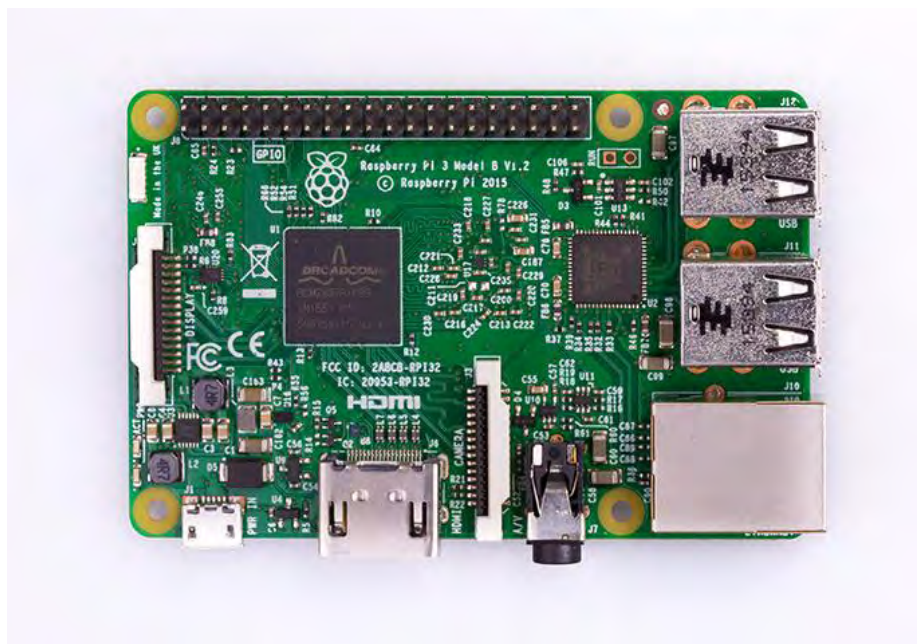
Σχήμα 3.3.6 - Μαγνήτης ενσωματωμένος σε δράπανο, δίπλα από το Reed switch(μέσα στο μαύρο κουτί)

Για την επιλογή του ηλεκτρικού βραχίονα, έγινε έρευνα απαιτήσεων του συστήματος, μετρώντας τα Neuton που ασκούνται στη χειρότερη περίπτωση, κατά τη διαδικασία της λίπανσης, στο μέρος το οποίο θα ελέγχαμε μηχανικά. Η έρευνα απαιτήσεων, υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ζυγό ακριβείας τον οποίο παρεμβάλαμε μεταξύ του μοχλού του λιπασματοδιανομέα και του χεριού που ασκούσε δύναμη για να αλλάξει τη θέση. Κατά αυτό τον τρόπο αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν γραμμικοί actuators σειράς CAHB-10 [12], με δύναμη 500N προς δύο κατευθύνσεις.



Σχήμα 3.3.7 – Ηλεκτρικός βραχίονας μοντέλο CAHB-10-A3A-300447-ABBAPF-000 [26]

Αναλύοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω στοιχεία του συστήματος, καθώς και υπολογίζοντας σε υψηλό επίπεδο, τις απαιτήσεις του λογισμικού για μία τέτοια εφαρμογή, αποφασίστηκε ο μικρο-ελεγκτής του συστήματός μας, να είναι ένα Raspberry Pi 3 Model B[28]. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής, διευκόλυνε αρκετά τη διαδικασία υλοποίησης διεπαφών μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του συστήματος λόγω της δυνατότητας GPIO συνδεσιμότητας που παρέχει και φυσικά λόγω των ήδη υλοποιημένων βιβλιοθηκών ανοιχτού κώδικα.



Σχήμα 3.3.8 - Raspberry Pi 3 Model B [27]

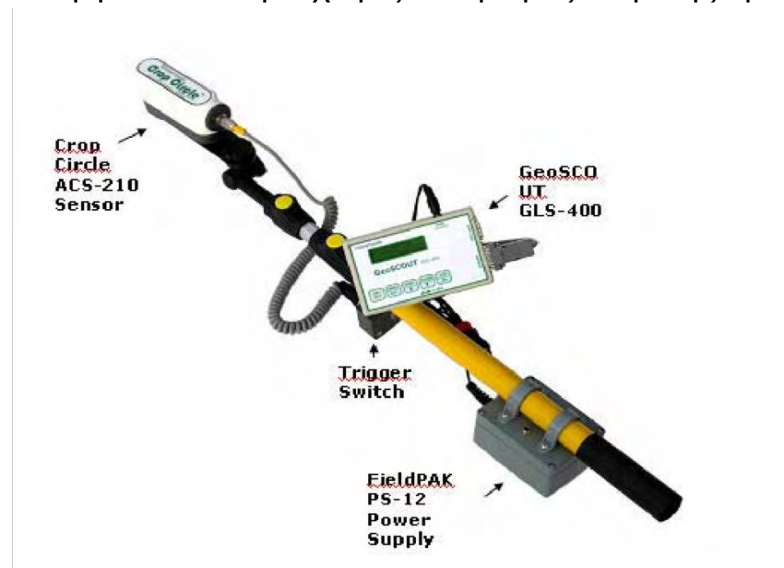
Για την υλοποίηση του τελικού αποτελέσματος, χρειάστηκαν και αρκετές ακόμα κατασκευές και κυκλωματικά στοιχεία, όπως σταθεροποιητές τάσης, ρελέ και πολλά άλλα, τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

4. Ανάπτυξη συστήματος για διαφοροποιημένη εφαρμογή αζώτου σε καλλιέργεια σίτου

4.1 Interfacing

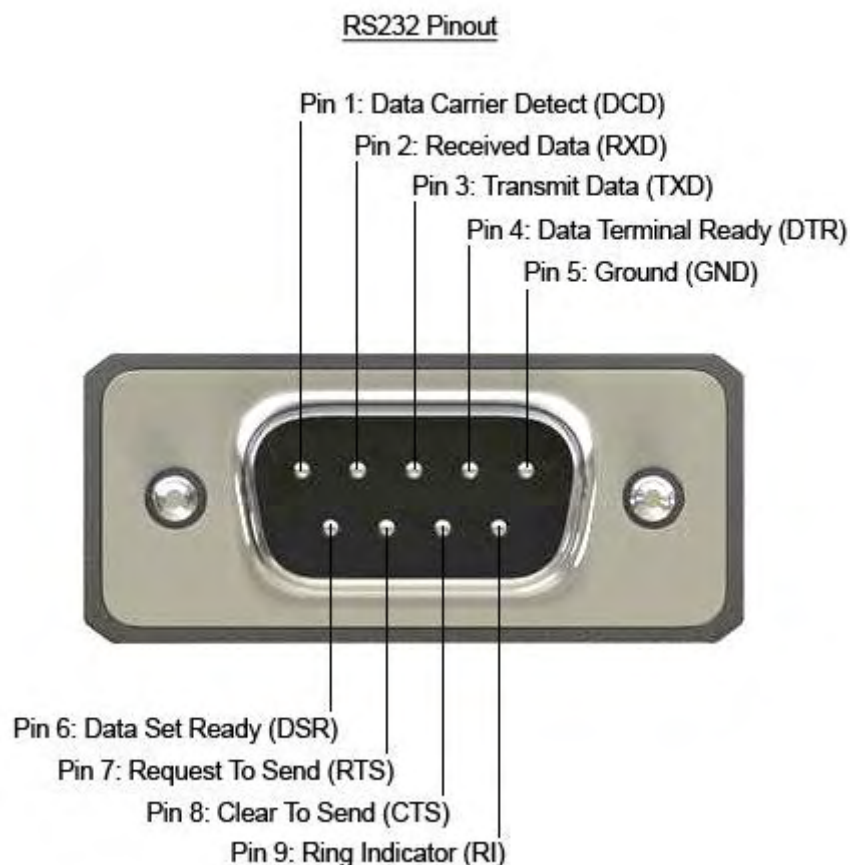
4.1.1 Επικοινωνία μικροελεγκτή με αισθητήρα Crop Circle

Ο αισθητήρας Crop Circle κατασκευάζεται από την εταιρεία Holland Scientific με έδρα τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Αποτελείται από 3 βασικά μέρη. Το πρώτο και πιο σημαντικό μέρος είναι ο κυρίως αισθητήρας, ο οποίος μετρά την ανάκλαση της ακτινοβολίας από τα φυτά. Τα δεδομένα που λαμβάνονται, στέλνονται σε μια συσκευή data logger με σκοπό την καταγραφή και αποθήκευσή τους σε μια κάρτα μνήμης για μελλοντική επεξεργασία και εκμετάλλευση. Ο data logger, ομαδοποιεί τα δεδομένα από τις μετρήσεις για κάθε μήκος κύματος χωριστά, εκτελεί την πράξη για υπολογισμό του NDVI και συνδέει το αποτέλεσμα με το στίγμα του GPS ώστε να μπορεί μελλοντικά να παραχθεί ο κατάλληλος χάρτης μέσω χρήσης προγραμμάτων GIS. Παράλληλα, εμφανίζει τη στιγμιαία τιμή NDVI που λαμβάνεται σε μια οθόνη LCD. Τέλος έχει και μια μπαταρία ώστε να μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα χωρίς ανάγκη εξωτερικής τροφοδοσίας.



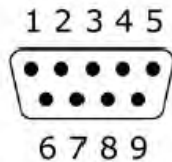
Σχήμα 4.1.1 - Crop Circle Handheld pack [46]

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε ήταν ότι η λειτουργία και τα δομικά συστατικά του Crop Circle ήταν τέτοια ώστε δεν επέτρεπαν τη χρήση του σε εφαρμογή πραγματικού χρόνου όπως αυτή που σκοπεύαμε να κατασκευάσουμε Σε επικοινωνία με την εταιρεία μάλιστα, δεν μας δόθηκε τρόπος για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος. Ήταν απαραίτητο να διαβάσουμε το σήμα του αισθητήρα λοιπόν, χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργία του. Για το σκοπό αυτό έγιναν όλες οι απαραίτητες ενέργειες για κατανόηση του τρόπου επικοινωνίας και του πρωτοκόλλου επικοινωνίας του αισθητήρα ξεκινώντας από το βύσμα που συνέδεε τον αισθητήρα με το data logger. Πρόκειται για ένα συνηθισμένο db9 βύσμα[29] με 9 pin το οποίο όμως δεν χρησιμοποιεί την συνηθισμένη σύμβαση των pin όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.1.2 - Συνηθισμένη χρήση Pin βύσματος db9 [47]

Αντίθετα, τα μοναδικά Pin που βρίσκονται σε χρήση είναι το Pin 5 που αποτελεί τη γείωση καθώς και τα Pin 8 και 9 στα οποία υπήρχε ψηφιακό σήμα. Τα pin 1, 2 και 3 δεν πειράχτηκαν καθώς δεν έπρεπε να επηρεαστεί η λειτουργία του κυκλώματος.



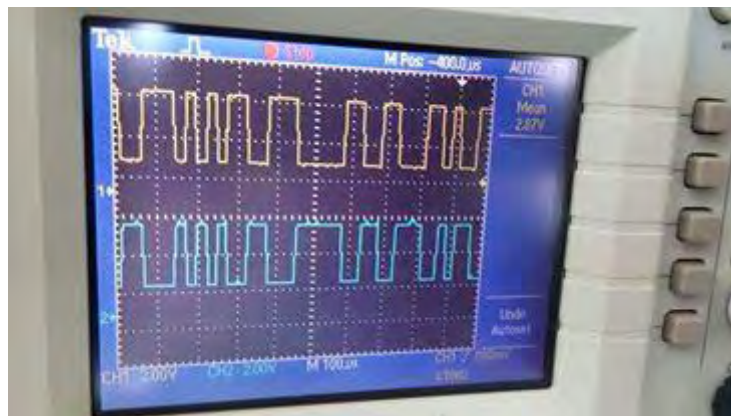
9-pin DB connector - front view.

Sensor Serial Port

Pin Number	Mode	Pin Description
1	I	Trigger Input
2	I	RS-232 Receive
3	O	RS-232 Transmit
4	PWR	Sensor Power (DTR)
5	PWR/GND	Signal Ground
6	-	Not Used (Reserved)
7	-	Not Used (Reserved)
8	I/O	RS-485 B Signal Pin
9	I/O	RS-485 A Signal Pin

Σχήμα 4.1.3 - Πραγματική λειτουργία που επιτελείται σε κάθε Pin

Χρησιμοποιώντας τα 2 κανάλια του παλμογράφου ταυτόχρονα, ήταν εύκολα κατανοητό πως το πρωτόκολλο σειριακής επικοινωνίας ήταν το RS485 καθώς τα 2 κανάλια είχαν differential και balanced σήμα.

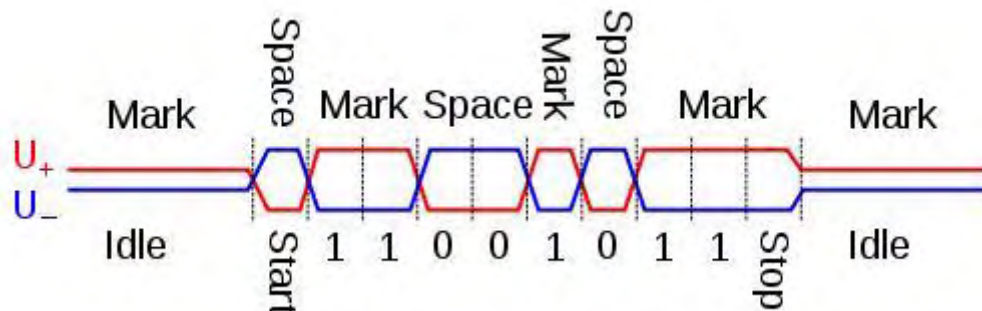


Σχήμα 4.1.4 - Οθόνη παλμογράφου που απεικονίζει τα σήματα στα pin8 και pin9 της σειριακής επικοινωνίας

Αυτό το πρότυπο (RS485)[30] είναι ένας καθορισμός ηλεκτρικών σημάτων του φυσικού επιπέδου του μοντέλου OSI (Open Systems Interconnection) με δύο αγωγούς που επιτυγχάνουν μονόδρομη (half-duplex), πολλαπλών σημείων (multi-point) σειριακή διασύνδεση. Η πολλαπλών σημείων διασύνδεση σημαίνει ότι πολλαπλοί πομποί μπορούν να συνδεθούν σε πολλαπλούς δέκτες. Όπως και το RS422, το πρότυπο

RS485 χρησιμοποιεί διαφορική σηματοδότηση, δηλαδή η διαφορά των τάσεων στα δύο καλώδια είναι αυτή που μεταφέρει τα δεδομένα.

Τα λογικά επίπεδα ξεχωρίζονται με σήματα μεταξύ -7 V και $+12\text{ V}$, η μία πολικότητα αναπαριστά το ένα λογικό επίπεδο και η άλλη πολικότητα το δεύτερο λογικό επίπεδο.



Σχήμα 4.1.5 - Παράδειγμα ενός πακέτου δεδομένων με την αποκωδικοποίησή του σε bits του πρωτοκόλλου RS485 [48]

Στην ουσία, το πρότυπο αυτό το μόνο που κάνει είναι να καθορίζει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πομπού (driver) και του δέκτη (receiver). Η διασύνδεση RS485 επιτρέπει τον σχηματισμό φθηνών τοπικών δικτύων και συνδέσεων πολλαπλών σημείων.

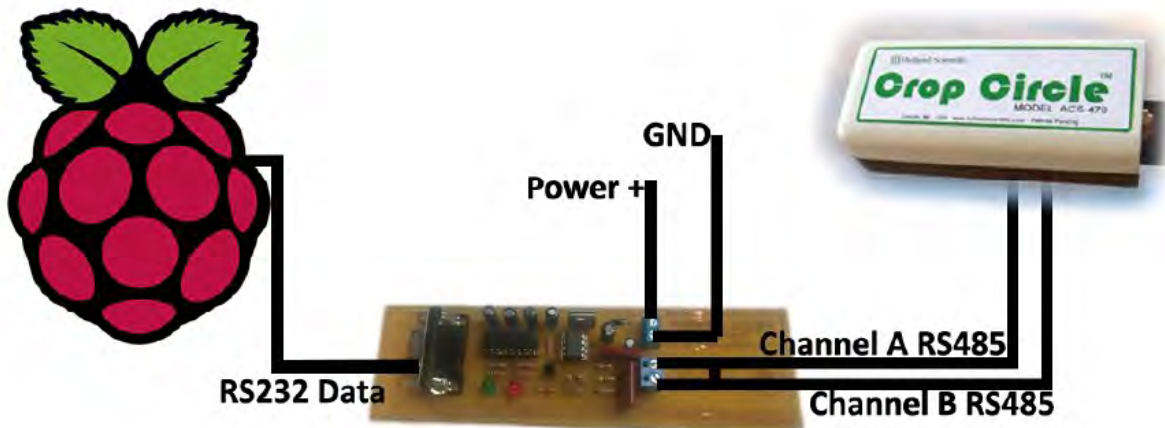
Προσφέρει υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων (35 Mbit/s για μέχρι 10m και 100 Kbit/s για έως 1200m).

Σε αντίθεση με το RS422, οι συσκευές που συνδέονται με RS485 πρέπει να τοποθετούνται σε λειτουργία μετάδοσης, στέλνοντας ένα ειδικό σήμα στη συσκευή. Αυτό επιτρέπει στο RS485 να υλοποιεί γραμμικές τοπολογίες χρησιμοποιώντας μόνο 2 καλώδια. Οι προτεινόμενες τοπολογίες είναι ως μία διασυνδεδεμένη σειρά point-to-point κόμβων ή bus τοπολογία και όχι τοπολογίες αστέρα ή δακτυλίου. Η χρήση αυτού του προτύπου απαιτεί την χρήση αντιστάσεων τερματισμού μεταξύ των δύο καλωδίων προκειμένου να μην υπάρξει απώλεια δεδομένων. Οι αντιστάσεις αυτές, επίσης, μειώνουν την ευαισθησία στο θόρυβο.

Το ότι είναι πολύ ανθεκτικό σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και γενικά σε θόρυβο, εξαιτίας της διαφορικής σηματοδότησης που χρησιμοποιεί, το κάνει ιδανικό για χρήση σε βιομηχανικούς χώρους.

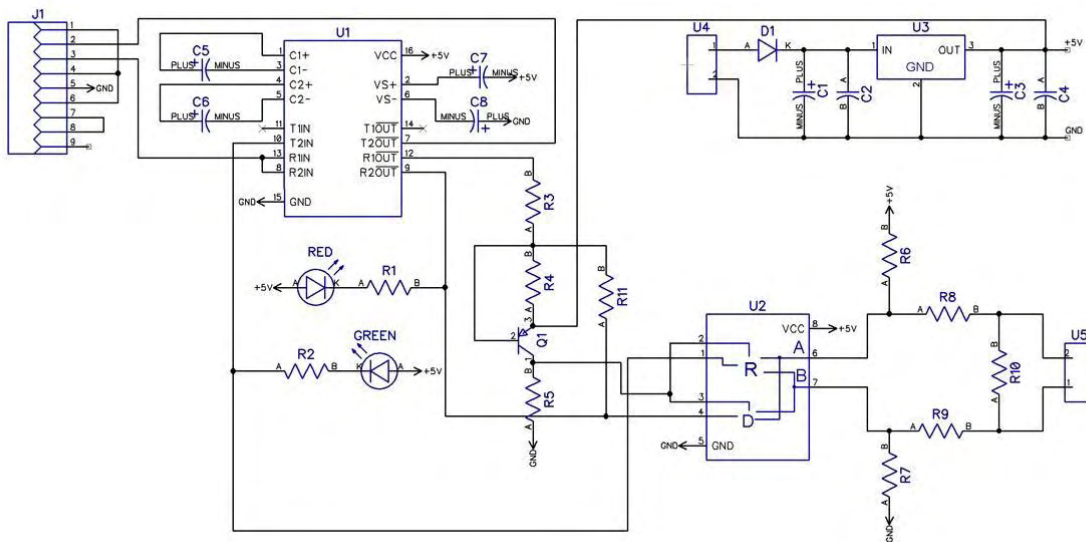
Το μειονέκτημα του τρόπου με τον οποίο επικοινωνεί το crop circle με το data logger είναι ότι το σήμα του RS485 δεν είναι σε μορφή που μπορεί ο κάθε υπολογιστής, ή στην περίπτωση της παρούσας εργασίας το raspberry, μπορεί να αναγνώσει/διαχειριστεί. Ήταν απαραίτητο να κατασκευαστεί ένας μετατροπέας από RS485 στο πολύ απλό RS232.

Ο μετατροπέας[31] θα συνδεόταν σε σειρά με τον αισθητήρα και τον μικρο-ελεγκτή "σερβίροντας" το σήμα σε RS232 όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω block-diagram



Σχήμα 4.1.6 - Block Diagram σύνδεσης μετατροπέα RS485-RS232

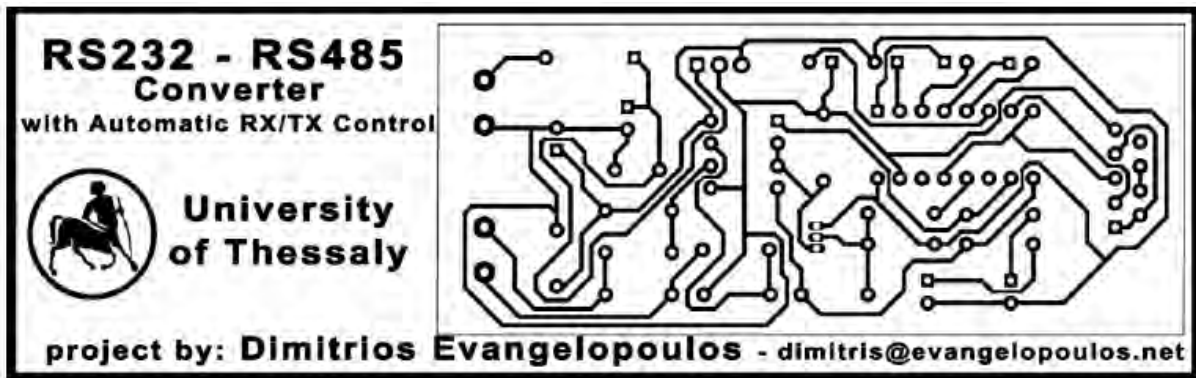
Το κύκλωμα του μετατροπέα που σχεδιάστηκε είναι το παρακάτω.



Σχήμα 4.1.7 - Θεωρητικό κύκλωμα μετατροπέα

Πρόκειται για ένα απλό κύκλωμα υπό την έννοια ότι το πλήθος των εργασιών επιτελείται στα 2 ολοκληρωμένα κυκλώματα U1 και U2. Τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος λειτουργούν ως φίλτρα, σταθεροποιητές τάσης και LED για επισκόπηση αν το κύκλωμα βρίσκεται σε λειτουργία Read ή Write.

Το θεωρητικό κύκλωμα σχεδιάστηκε στη σουίτα σχεδίασης pcb πλακετών Orcad της Cadence και στη συνέχεια παράχθηκε η κάρτα με τα traces για μετέπειτα τύπωμα. Από τη διαδικασία αυτή το αποτέλεσμα παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 4.1.8 - Σχέδιο των traces του μετατροπέα RS485-RS232

Με το σχέδιο των διαδρόμων της πλακέτας έτοιμο, θα μπορούσε να δοθεί παραγγελία σε εργοστάσιο τυπώματος πλακετών ή εναλλακτικά να ακολουθηθεί μια πιο απλή διαδικασία τυπώματος σε πλακέτα από χαλκό. Επιλέχθηκε το δεύτερο για λόγους εξοικονόμησης χρόνου και πιο άμεσης δοκιμής της λειτουργικότητας της πλακέτας.

Διαδικασία κατασκευής πλακέτας μετατροπέα RS485 σε RS232

Για την κατασκευή, χρησιμοποιήθηκε μια πλακέτα με επικάλυψη χαλκού σε όλο το εμβαδόν της. Τυπώθηκε το σχέδιο των καλωδίων ανεστραμμένο στον οριζόντιο άξονα ώστε να βγει σαν καθρέφτης πάνω στην χάλκινη επιφάνεια. Η εκτύπωση έγινε σε γυαλιστερό χαρτί μέσω χρήσης laser εκτυπωτή. Ο στόχος ήταν να τοποθετηθεί το χαρτί με τους διαδρόμους πάνω στην χάλκινη επιφάνεια και να σιδερωθεί με σίδερο ρούχων ώστε να ξεκολλήσει η τυπωμένη επιφάνεια του χαρτιού πάνω στην χάλκινη επιφάνεια



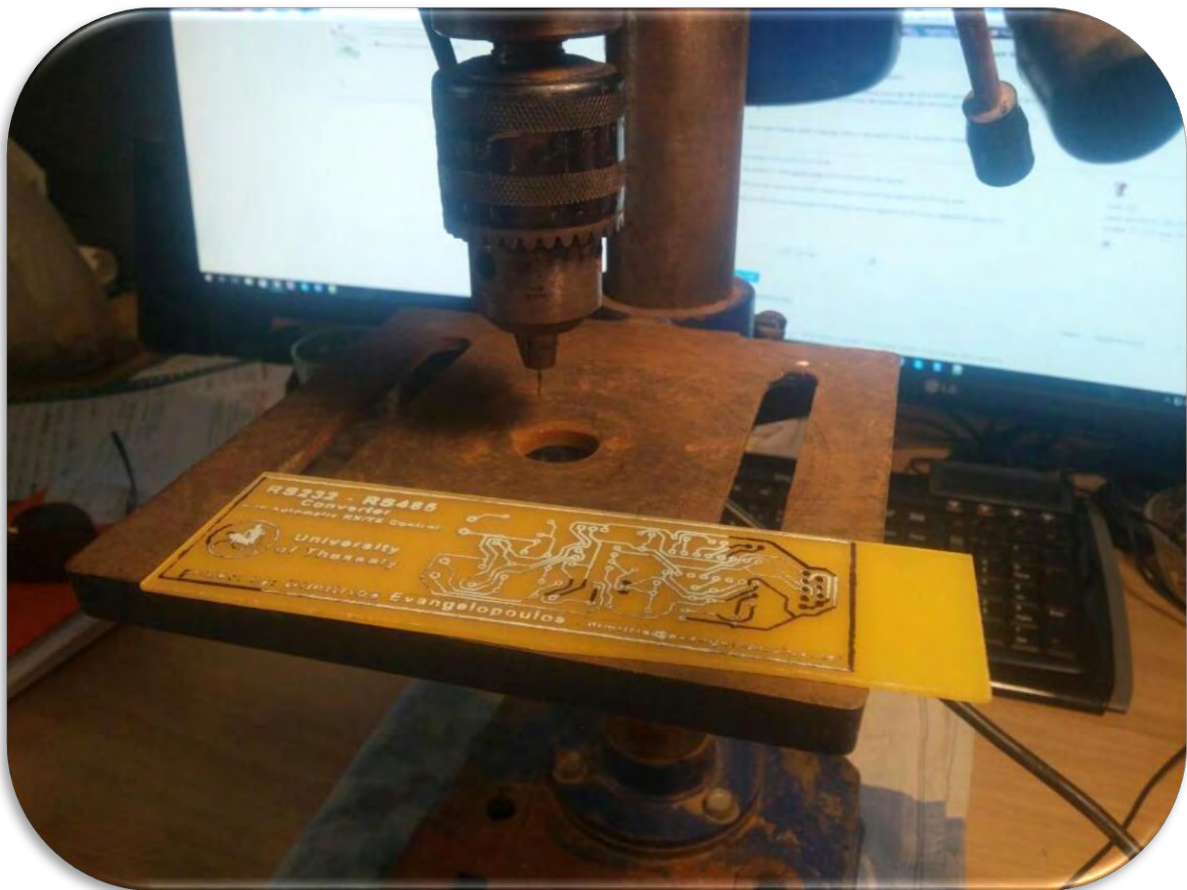
Σχήμα 4.1.9 - Τυπωμένα traces πάνω σε γυαλιστερό χαρτί και επιχαλκωμένη πλακέτα

Αφού "σιδερώθηκε" και η αποκόλληση των διαδρόμων επετεύχθη, η πλακέτα εισήχθη σε σκάφη που περιείχε Υπερθειικό νάτριο διαλυμένο σε νερό. Το Υπερθειικό νάτριο αντιδρά με το στρώμα χαλκού που υπάρχει στην επιφάνεια της πλακέτας και τον καταστρέφει. Στα σημεία όμως που υπήρχαν οι διάδρομοι, δεν μπόρεσε να έρθει σε επαφή το Υπερθειικό νάτριο με τον χαλκό οπότε ο δεύτερος, έμεινε ανεπηρέαστος. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η διαδικασία της αποχάλκωσης. Ως προϊόν της αντίδρασης είναι ένα πράσινο ίζημα που φαίνεται στην εικόνα να αιωρείται πάνω από την πλακέτα.



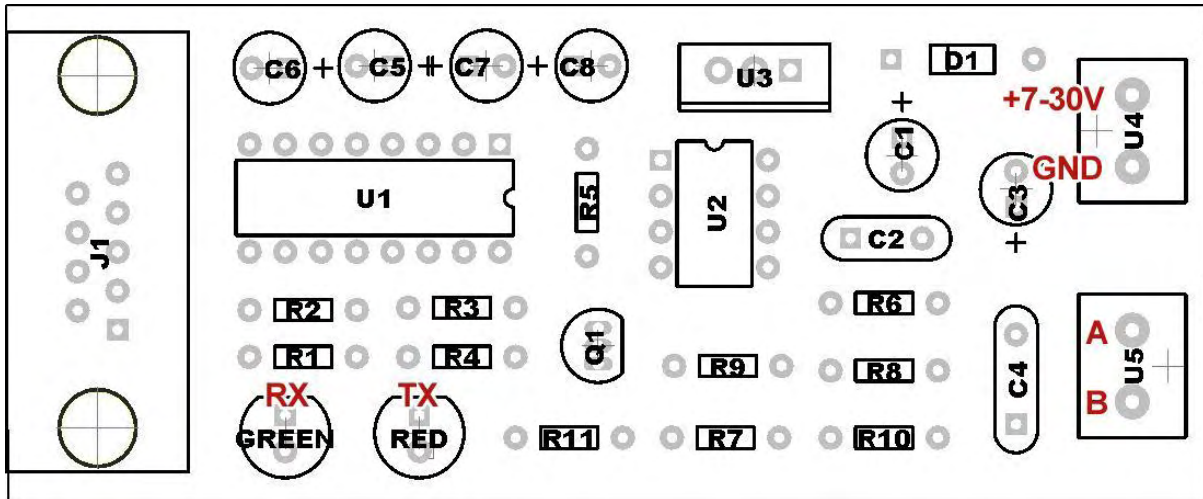
Σχήμα 4.1.10 - Διαδικασία αποχάλκωσης πλακέτας

Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε ένα σταθερό τρυπάνι πάγκου ώστε να διανοιχτούν οι απαραίτητες τρύπες από όπου σε επόμενο βήμα θα περνούσαν τα ηλεκτρονικά στοιχεία.



Σχήμα 4.1.11 - Διάνοιξη τρυπών για τα ηλεκτρονικά στοιχεία

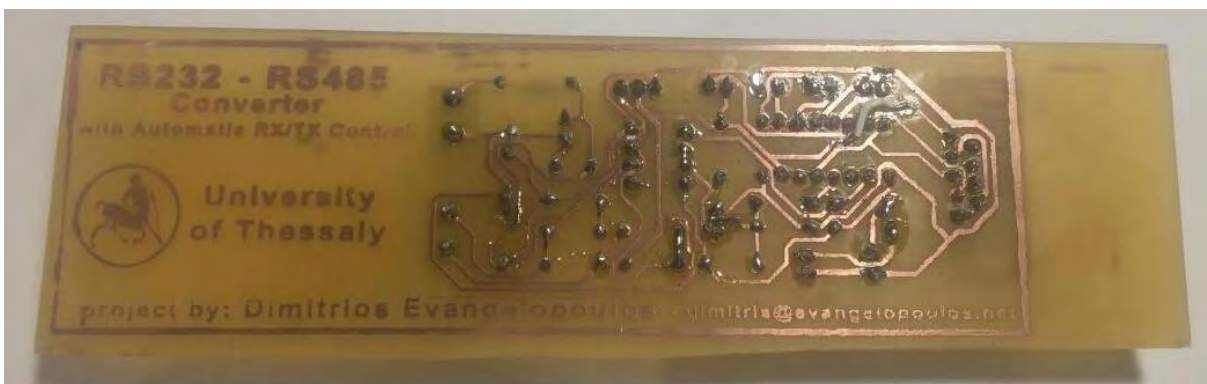
Με την ολοκλήρωση της διάνοιξης τρυπών, ακολούθησε έκπλυση της πλακέτας με νερό και σαπούνι ώστε να απομακρυνθεί κάθε ίχνος χαρτιού και μελάνι που υπήρχε πάνω στα traces από την εκτύπωση. Το αποτέλεσμα ήταν να μείνουν οι χάλκινοι διάδρομοι που θα λειτουργούν ως καλώδια για τη διασύνδεση των ηλεκτρονικών στην πλακέτα.



Σχήμα 4.1.12 - Σχεδιάγραμμα τοποθέτησης εξαρτημάτων πάνω στην πλακέτα

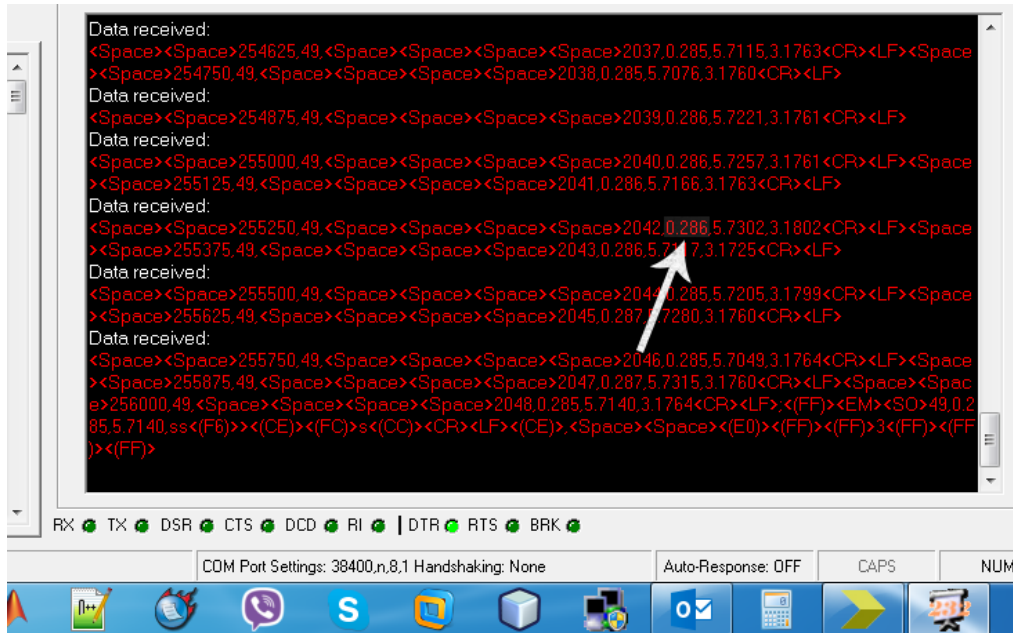


Σχήμα 4.1.13 - Τελική κατασκευή με τοποθετημένα ηλεκτρονικά στοιχεία. Επάνω όψη



Σχήμα 4.1.14 - Τελική κατασκευή με τοποθετημένα ηλεκτρονικά στοιχεία. Κάτω όψη

Με τη δοκιμή της λειτουργίας του κυκλώματος, επετεύχθη η ανάγνωση του σήματος σε εφαρμογή hyper terminal του υπολογιστή.



Σχήμα 4.1.15 - Hyper Terminal H/Y που αναλύει τη δομή του RS232 πακέτου δεδομένων που σερβίρει ο μετατροπέας που κατασκευάστηκε



Σχήμα 4.1.16 - Η αντίστοιχη τιμή που εμφανιζόταν στην LCD του data logger (η μικρή απόκλιση εμφανίζεται γιατί οι φωτογραφίες δεν έχουν ληφθεί για το ίδιο πακέτο δεδομένων).

Η συνάρτηση που γράφτηκε για να διαβαστεί το NDVI απευθείας στο τερματικό του μικρο-ελεγκτή, βασίστηκε στη μορφή που έστειλε τα δεδομένα ο αισθητήρας γενικά (βλ. σχήμα 4.1.12).

Ουσιαστικά, γράφτηκε μία συνάρτηση, η getNDVI η οποία είναι υπεύθυνη για το άνοιγμα του καναλιού επικοινωνίας μικρο-ελεγκτή και αισθητήρα, όπως επίσης και για την απόσπαση του αριθμού NDVI σε μορφή float.

Ένα σημαντικό σημείο της getNDVI είναι το :

```
memcpy( subbuf, &buf[21], 5 ); //copy 5 bits from buff to subbuf starting from position 21
subbuf[5] = '\0'; //6th position should be NULL
```

όπου γίνεται η απόσπαση μόνο της τιμής NDVI, από την ASCII ακολουθία που δίνει το Crop Circle (σχ 4.1.12).

Ένα άλλο σημείο που πρέπει να επισημανθεί είναι το άνοιγμα του καναλιού επικοινωνίας, το διάβασμα των σημάτων του καναλιού αυτού και γενικά όλες τις λειτουργίες του πρωτοκόλλου RS232, χρησιμοποιήθηκε ανοιχτή βιβλιοθήκη [13]

Όλες οι παράμετροι που πάρθηκαν ως ορίσματα για τον crop circle, όπως το baud rate, το parity και το stop bit, πάρθηκαν από το datasheet του εν λόγω αισθητήρα.

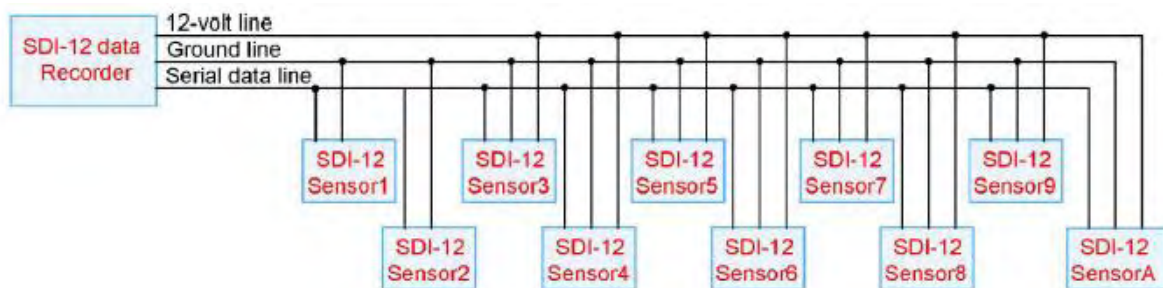
4.1.2 Επικοινωνία μικροελεγκτή με αισθητήρα NDVI της Meter

Για τις ανάγκες μέτρησης του NDVI δοκιμάστηκε και ο αισθητήρας NDVI της εταιρείας Meter ως εναλλακτική λύση του Crop circle. Για να επιτευχθεί η επικοινωνία και λήψη των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο έπρεπε να κατασκευαστεί hardware και να δημιουργηθεί και το απαραίτητο λογισμικό.

Για την καλύτερη κατανόηση της υλοποίησης παραθέτονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις του sdi-12 [32]

Το sdi παίρνει το όνομά του από τα αρχικά του Serial Digital Interface. Είναι ένα σειριακό πρωτόκολλο ασύγχρονης επικοινωνίας και έχει αναπτυχθεί με σκοπό οι αισθητήρες που το χρησιμοποιούν, να έχουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούνται σε απομακρυσμένες περιοχές. Χρησιμοποιεί καλώδιο 3 κλώνων για τη λειτουργία του. Χρησιμοποιείται κυρίως για περιβαλλοντικό sensing και χρονίζεται σε rate 1200 baud. Όπως συνέβη και με τον crop circle, οι συγκεκριμένοι αισθητήρες συνδέονται σε ένα data logger το οποίο έπρεπε να παρακαμφθεί ώστε να διαβάζονται οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο

από το σύστημα διαφοροποιημένης λίπανσης. Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί τη συνεργασία σε δομή master-slave και για να επιτευχθεί η επικοινωνία πρέπει να στέλνονται συγκεκριμένες εντολές ώστε να πραγματοποιείται handshake μεταξύ των αισθητήρων και του δέκτη των δεδομένων. Μόνο ο κόμβος δεδομένων μπορεί να ξεκινήσει την επικοινωνία για μετάδοση δεδομένων. Είναι πρωτόκολλο multi-drop που σημαίνει ότι ένας ή περισσότεροι αισθητήρες μπορούν να συνδεθούν πάνω στο ίδιο καλώδιο για ανταλλαγή δεδομένων το οποίο συχνά καλείται και bus. Είναι multi-parameter που σημαίνει ότι οι αισθητήρες χρησιμοποιώντας τους μικροεπεξεργαστές τους, μπορούν να λαμβάνουν μία ή περισσότερες μετρήσεις και να τις στέλνουν στον κόμβο δεδομένων. Κάθε αισθητήρας έχει μια δική του μοναδική διεύθυνση με μέγιστο τις 62 διευθύνσεις. Η κωδικοποίηση των λογικών bit γίνεται σε ascii χαρακτήρες.



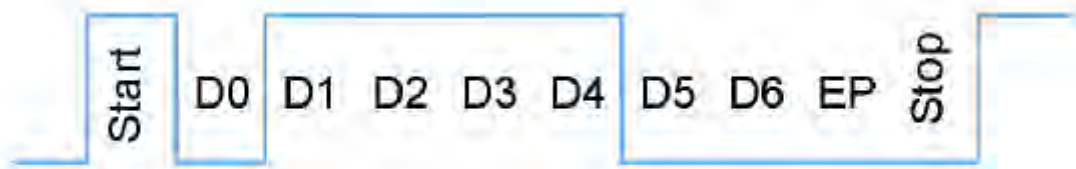
Σχήμα 4.1.17 - Φυσική διασύνδεση πολλαπλών αισθητήρων στο sdi-12 interface



Σχήμα 4.1.18 - Διασύνδεση αισθητήρων στο sdi bus [49]

Condition	Binary State	Voltage range
marking	1	-0.5 to 1.0 volts
spacing	0	3.5 to 5.5 volts
conditioning	undefined	1.0 to 3.5 volts

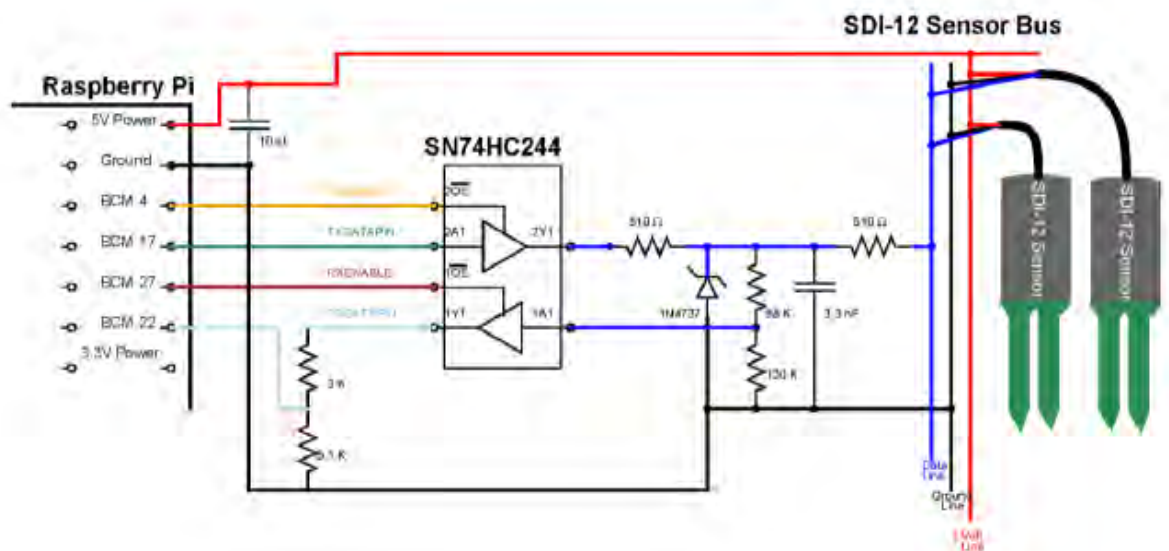
Πίνακας 4.1.1 - Πίνακας λογικών σημάτων sdi-12



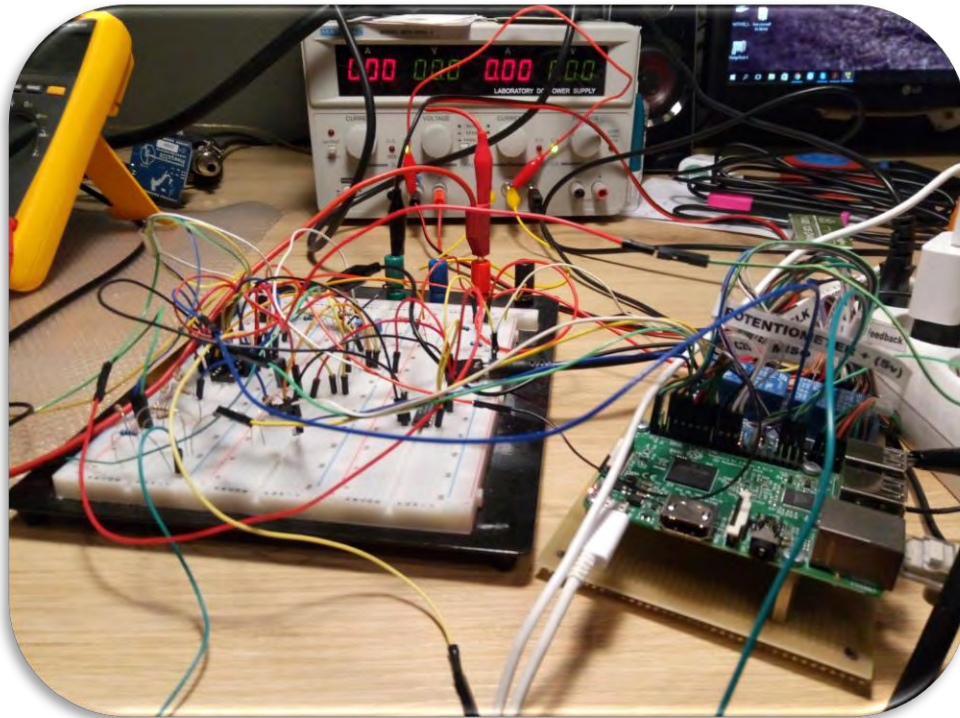
Σχήμα 4.1.19 - παράδειγμα δομής ενός πακέτου δεδομένων και συγκεκριμένα του χαρακτήρα "a" [49]

4.1.2.1 Κατασκευή Hardware

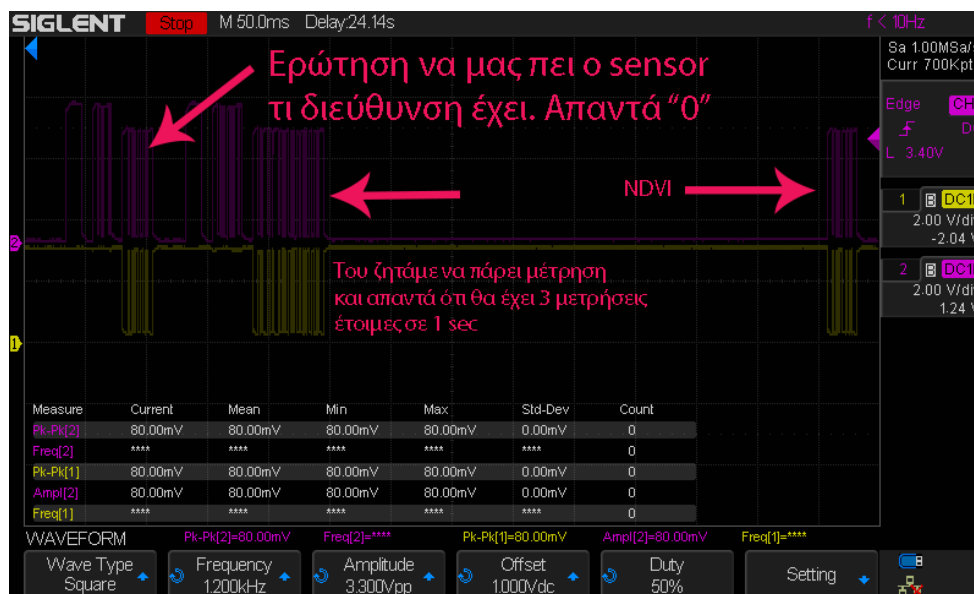
Για την επίτευξη της επικοινωνίας ήταν απαραίτητο να κατασκευαστεί hardware που θα αναλαμβάνει την αντιστροφή των λογικών σημάτων από High σε Low και αντίστροφα αλλά και να εκτελεί το απαραίτητο αμφίδρομο level shifting ώστε τα σήματα να είναι σε μορφή κατάλληλη προς ανάγνωση από τον αισθητήρα και το raspberry pi [33].



Σχήμα 4.1.20 - Θεωρητικό κύκλωμα για υλοποίηση του sdi bus [33]



Σχήμα 4.1.21 - Υλοποίηση sdi bus σε breadboard

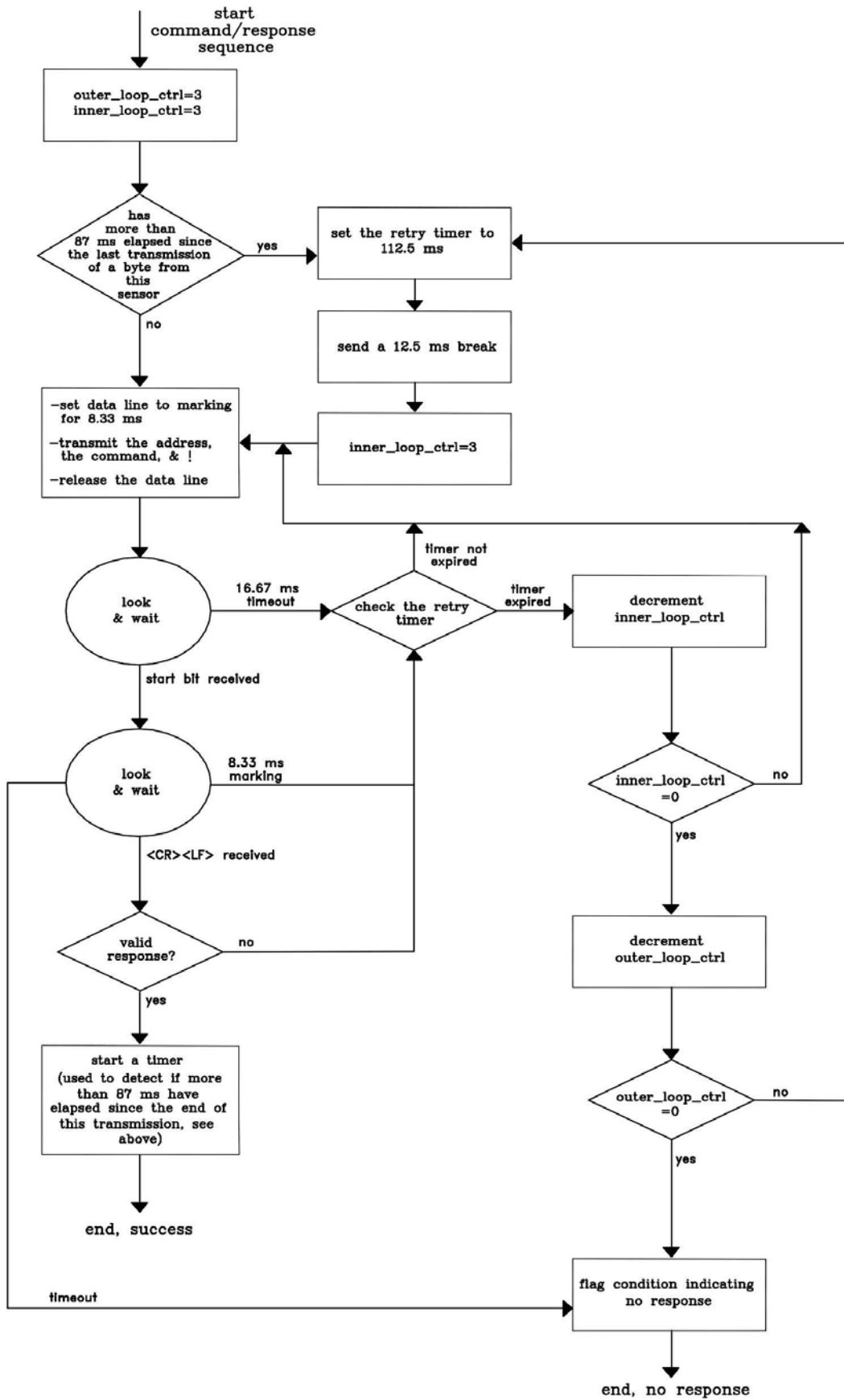


Σχήμα 4.1.22 - οθόνη παλμογράφου όπου απεικονίζονται οι εντολές του handshake και η απάντηση του αισθητήρα.

4.1.2.2 Ανάπτυξη Λογισμικού

Εκτός από το απαραίτητο υλικό, αναπτύχθηκε και το κατάλληλο λογισμικό για να κάνει εφικτή την επικοινωνία με τον αισθητήρα.

Το λογισμικό υλοποιεί τα βήματα που ορίζει το sdi-12 για την ομαλή επικοινωνία όπως φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα ροής



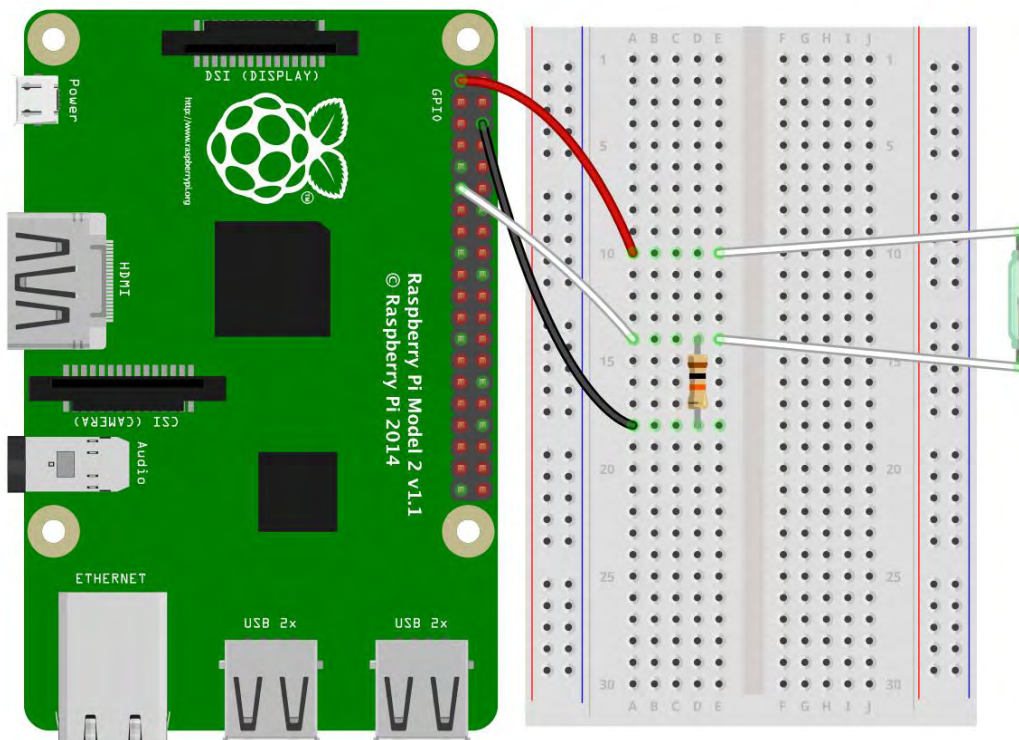
Σχήμα 4.1.23 – Διάγραμμα ροής λογισμικού [32].

4.1.2.3 Σύγκριση Crop Circle και NDVI της Meter

Όπως εξηγήθηκε, έγινε όλη η υλοποίηση τόσο σε λογισμικό όσο και σε υλικό για να διαβαστεί μέτρηση του NDVI από τον αισθητήρα της Meter. Όπως αποδείχτηκε όμως οι μετρήσεις δεν ήταν τόσο σταθερές όσο αυτές του Crop circle. Το ίδιο το πρωτόκολλο sdi-12 αποδέχεται ένα σφάλμα της τάξης του 10%. Χρησιμοποιεί δε baud rate 1200 που είναι αρκετά χαμηλό. Με μετρήσεις που έγιναν με χρήση παλμογράφου, η μέγιστη ταχύτητα λήψης μιας μέτρησης ήταν 1,2 δευτερόλεπτα σε αντίθεση με τον crop circle που μπορεί να στείλει μέχρι 10 μετρήσεις/δευτερόλεπτο. Τέλος, ο αισθητήρας της Meter έδειχνε να επηρεάζεται από τις αλλαγές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας του ηλίου. Όταν για παράδειγμα ένα σύννεφο έμπαινε ανάμεσα στον ήλιο και τον αγρό, άλλαζε ριζικά το ndvi χωρίς όμως να έχει αλλάξει η θέση του αισθητήρα. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να διορθωθεί χρησιμοποιώντας έναν επιπλέον αισθητήρα μέτρησης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αλλά κάτι τέτοιο θα αύξανε την πολυπλοκότητα. Για όλους τους παραπάνω λόγους, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ο Crop Circle.

4.1.3 Επικοινωνία μικροελεγκτή με speed sensor

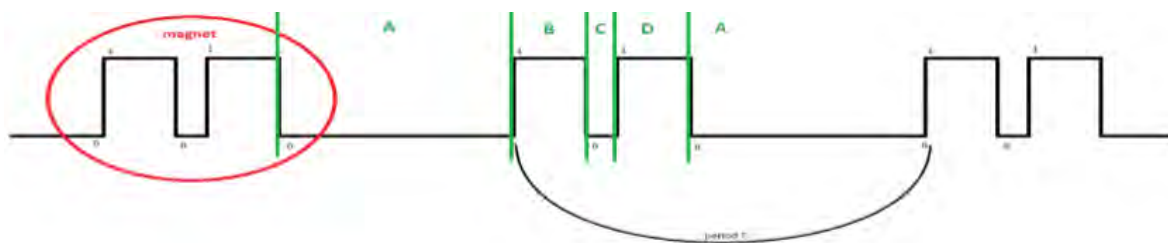
Για να επικοινωνήσει το Raspberry Pi Model B, με τον Reed switch, ή επικοινωνία σε επίπεδο υλικού έγινε ως εξής :



Σχήμα 4.1.25 - Συνδεσμολογία Reed switch με Raspberry

Από τα πειράματα που είχαν διεξαχθεί, είχαμε διακρίνει ένα πρόβλημα, όσον αφορά την ανάγνωση του σήματος του αισθητήρα ταχύτητας. Αυτό το πρόβλημα, ήταν ότι η συχνότητα του μικρο-ελεγκτή, ήταν κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή της δειγματοληψίας του Reed switch, με αποτέλεσμα, κάθε φορά που διαβάζονταν "1" του Reed switch, αυτό προκαλούσε και πολλά ακόμα "1", λόγω του επεξεργαστή του Raspberry Pi.

Αναλύθηκε ο αλγόριθμος υπολογισμού του περάσματος 1 μαγνήτη και βγήκε το συμπέρασμα, ότι για να έχει περάσει ένας μαγνήτης, αρκεί να υπάρξει η ακολουθία 1 0 1 από το reed switch. Για να ξεπεράσουμε λοιπόν, το "θόρυβο" του raspberry, υλοποιήσαμε έναν αλγόριθμο, ο οποίος αγνοεί όλα τα πρόσθετα "0" και "1", περιμένοντας την εναλλαγή από 0 σε 1 ή από 1 σε 0 και μόνο τότε τα λαμβάνει υπόψιν.

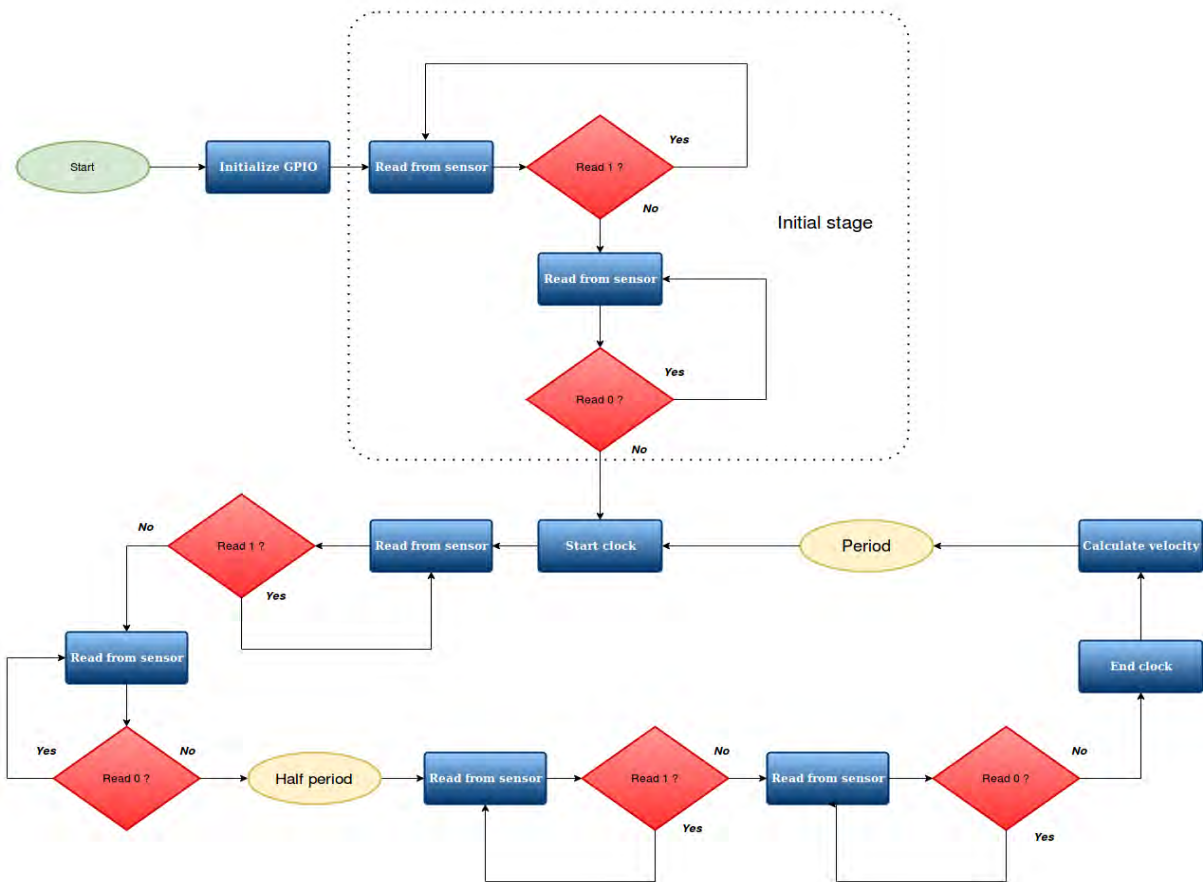


Σχήμα 4.1.26 - Κυματομορφή σήματος ταχύμετρου

Ο κόκκινος κύκλος του παραπάνω σχήματος, αφορά τα σήματα που δίνει το αισθητήριο, στο πέρασμα ενός μαγνήτη, ενώ η περίοδος T, είναι ο χρόνος που μεσολαβεί από το πέρασμα ενός μαγνήτη στον επόμενο και χρειάζεται για να υπολογιστεί η ταχύτητα.

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου είναι:

Tachometer Thread - Work Flow



Σχήμα 4.1.27 - Διάγραμμα ροής αλγορίθμου υπολογισμού της ταχύτητας πορείας

Επίσης, λόγω των απαιτήσεων του πεδίου των πειραμάτων, χρειάστηκε να τοποθετηθεί ειδική θήκη που να περικλείει το Reed switch. Η τελική μορφή, επάνω στη ρόδα του γεωργικού ελκυστήρα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 4.1.28 - Εφαρμογή Reed Switch μαζί με μαγνήτες στον τροχό του γεωργικού ελκυστήρα

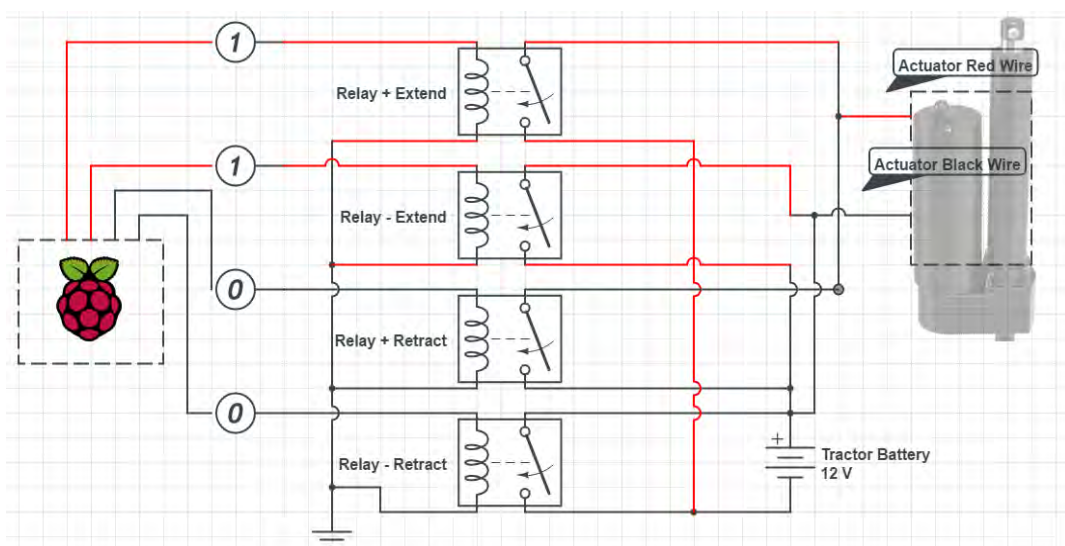
Τελικά η μέτρηση της ταχύτητας και μάλιστα στο πεδίο και σε πλαίσιο 2 ετών, έγινε με πολύ μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της υλοποίησής μας είναι, ότι έδινε πολύ καλύτερες και γρήγορες μετρήσεις (ακρίβεια 3 δεκαδικών), από το αντίστοιχο ψηφιακό ταχύμετρο του γεωργικού ελκυστήρα, που είχε ακρίβεια 0,5 χιλιομέτρων/ώρα.

4.1.4 Επικοινωνία μικροελεγκτή με actuator + feedback

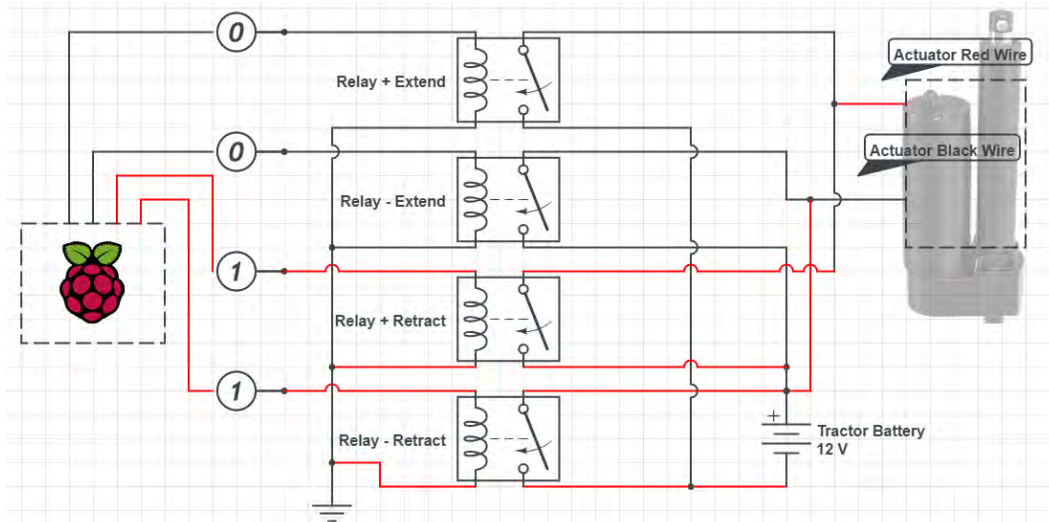
Η υλοποίηση της επικοινωνίας του μηχανικού βραχίονα με το Raspberry Pi, χωρίζεται σε 2 μεγάλες κατηγορίες. Η πρώτη είναι ο έλεγχος του βραχίονα από το Raspberry, που απαιτεί ειδικό σχεδιασμό υλικού, όπως επίσης και κώδικα, ενώ η δεύτερη είναι το σήμα της ανατροφοδότησης του ίδιου του μηχανικού βραχίονα, όσον αφορά τη θέση του, πίσω στον μικροελεγκτή. Και αυτή η κατηγορία απαιτεί δικό της σχεδιασμό υλικού και λογισμικού.

4.1.4.1 Έλεγχος actuator από raspberry

Για να μπορέσει να δοθεί εντολή από την πλακέτα του raspberry και να οδηγηθεί ο ηλεκτρικός βραχίονας απαιτούνταν η χρήση ρελέ. Και αυτό γιατί το raspberry χρησιμοποιεί σήματα ελέγχου στάθμης 3.3Volt από τα Pin του, ενώ ο actuator χρησιμοποιεί 12V. Ένα ακόμη πρόβλημα ήταν πως για να πετύχει κανείς το άνοιγμα ή το κλείσιμο του actuator έπρεπε να αντιστρέψει την πολικότητα στο μοτέρ. Για να λυθούν τα παραπάνω κατασκευάστηκε μια συνδεσμολογία ρελέ όπως παρουσιάζεται παρακάτω.



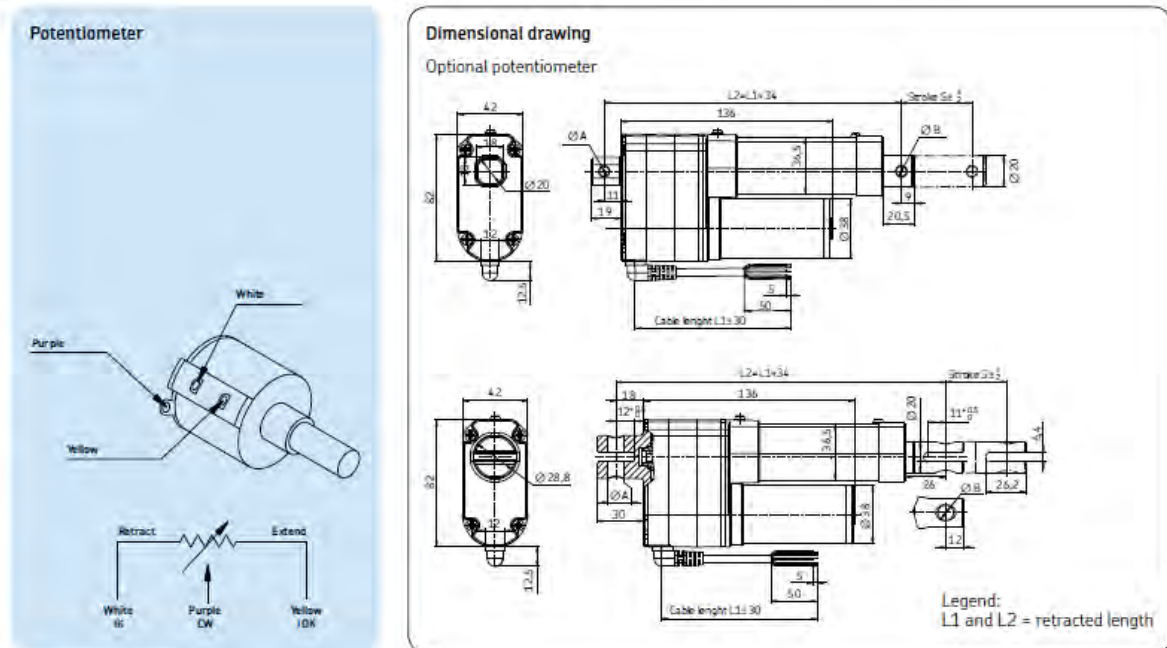
Σχήμα 4.1.29 - Συνδεσμολογία για άνοιγμα του actuator. Ενεργοποιώντας τα 2 πρώτα pin σε high, οδηγείται το ρελέ και περνά η σωστή πολικότητα στα καλώδια του actuator.



Σχήμα 4.1.25 - με αντίστοιχη ενεργοποίηση των 2 επόμενων pin, περνά η αντίθετη πολικότητα στον actuator με αποτέλεσμα να κλείσει.

4.1.4.2 Feedback **Θέσης**

Το σύστημα για να μπορέσει να λειτουργήσει με ακρίβεια, ήταν απαραίτητο να γνωρίζει κάθε στιγμή την τρέχουσα μετατόπιση του ηλεκτρικού βραχίονα από την αρχική θέση. Ο ίδιος ο βραχίονας διαθέτει μια μεταβλητή αντίσταση που δίνοντάς του μια τάση ως σημείο αναφοράς, μεταβάλλει την τάση εξόδου ανάλογα με τη θέση στην οποία βρίσκεται.

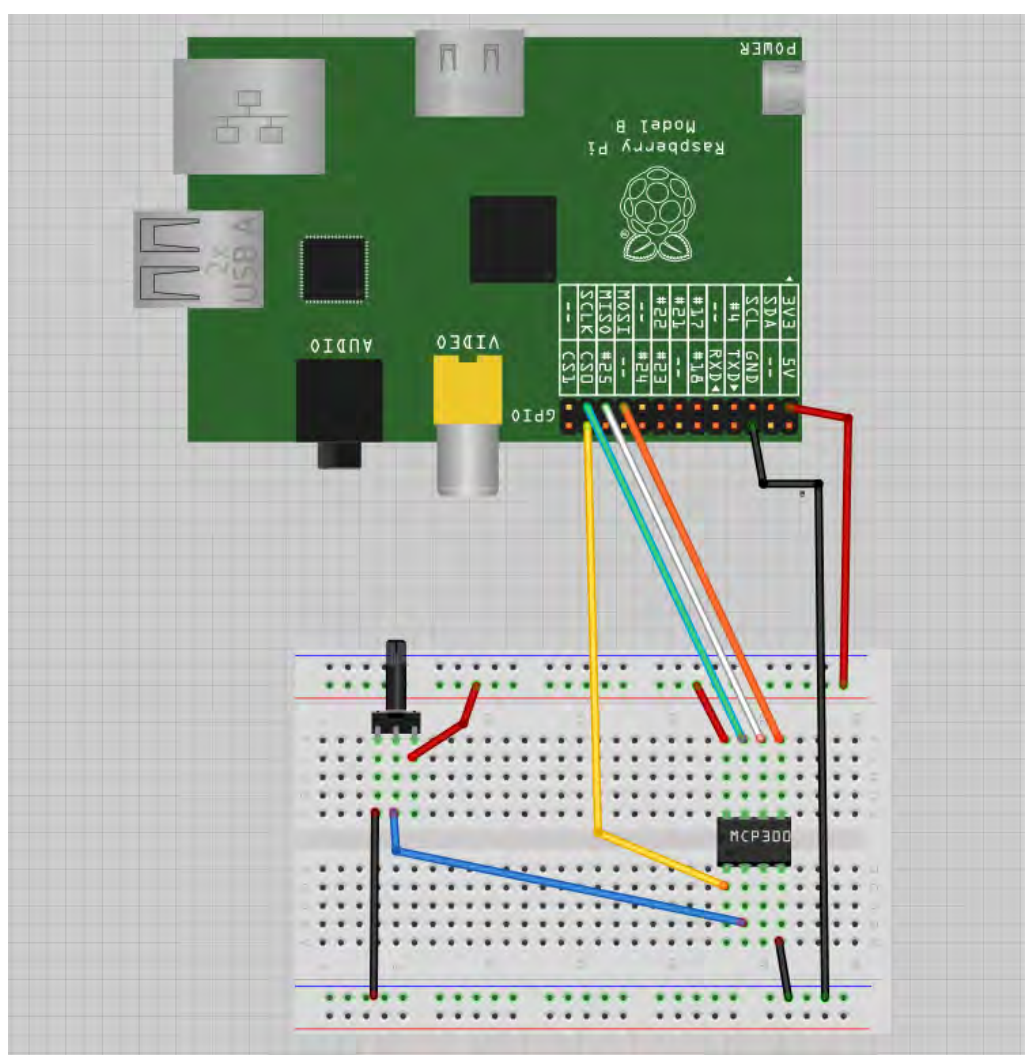


Σχήμα 4.1.30 - Μηχανολογικό σχέδιο ηλεκτρικού βραχίονα και ποτενσιόμετρο μεταβλητής αντίστασης [12]

Potentiometer resolution	50-80	80-160	160-300
Stroke (mm)	50-80	80-160	160-300
Minimum resistance value of potentiometer	700-1300 Ω	700-1300 Ω	700-1300 Ω
Potentiometer resolution	100 Ω/mm	50 Ω/mm	16,6 Ω/mm

Σχήμα 4.1.31 - Για το μοντέλο του ηλεκτρικού βραχίονα που χρησιμοποιήθηκε, η ωμική αντίσταση μεταβάλλεται κατά 16,6 Ohm για κάθε χιλιοστό μετατόπισης όπως δείχνει το εγχειρίδιο χρήσης[12]

Το πρόβλημα που εμφανίστηκε είναι ότι το raspberry δεν είναι σε θέση να διαβάσει αναλογικό σήμα για να αναγνωρίσει την τρέχουσα θέση. Η λύση δόθηκε χρησιμοποιώντας το ολοκληρωμένο κύκλωμα [MCP3002\[34\]](#) το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή του αναλογικού σε ψηφιακό σήμα ώστε το δεύτερο να οδηγηθεί σε input pin του μικροελεγκτή.



Σχήμα 4.1.32 - συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για διασύνδεση ολοκληρωμένου με μεταβλητή αντίσταση βραχίονα

Το ολοκληρωμένο έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό με ανάλυση 10bit. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να καταλάβει 1024 διαφορετικές θέσεις από εντελώς κλειστό έως εντελώς ανοιχτό.

Η μέγιστη τάση που εφαρμόστηκε στα άκρα του ποτενσιόμετρου του βραχίονα ήταν 3.3 Volt. Αυτό σημαίνει πως ο μετατροπέας καταλάβαινε αλλαγή θέσης για αλλαγή στην τάση $3,3/1024 = 0,003222V$, δηλαδή 3mVolt (με στρογγυλοποίηση). Δυστυχώς η μεταβλητή αντίσταση του βραχίονα δεν λάμβανε ποτέ τις ακραίες τιμές 0V και 3.3Volt λόγω κατασκευής αλλά τιμή 2,98V για θέση όπου είναι εντελώς κλειστό και τιμή 1,32Volt για θέση όπου είναι εντελώς ανοιχτό. Αυτό μας δίνει ένα εύρος 1,66V προς μετατροπή και ανάγνωση από το σύστημά μας. (σχεδόν οι μισές τιμές του A/D δεν αξιοποιούνται).

Η εξίσωση που περιγράφει τη μεταβολή της τάσης (άρα και των τιμών που διαβάζονται) σε συνάρτηση με την μετατόπιση είναι γραμμική και είναι της μορφής $Y=a*x+b$

Έτσι έγινε η σύμβαση για το σχεδιασμό και υλοποίηση του λογισμικού πως όλες οι μετατοπίσεις θα υπολογίζονται σε mm με 0 mm για εντελώς κλειστό βραχίονα και 300 mm για εντελώς ανοιχτό.

Ένα δευτερεύον πρόβλημα που λύθηκε αρκετά γρήγορα ήταν ότι οι μετρήσεις που διαβάζονται, μεταβάλλονται ελαφρώς κατά 7 μονάδες όπως παρατηρήθηκε Για παράδειγμα 450, 452, 457, 451, 456, 451, 450. Αυτό φυσικά ήταν αναμενόμενο καθώς όπως αναφέρθηκε για 3 mV μεταβολή, το ολοκληρωμένο διαβάζει διαφορετική τιμή. Όσο σταθεροποιημένη και να είναι η τάση τροφοδοσίας του raspberry μεταβάλλεται περισσότερο από 3 mV και ο ισχυρισμός αυτός μετρήθηκε και στην πράξη με τη χρήση εργαστηριακού παλμογράφου.



```
pi@raspberrypi:~/Desktop/system_library$ cat /dev/adc0
sample=572
sample=579
sample=574
sample=575
sample=572
sample=581
sample=576
sample=579
sample=575
sample=579
sample=580
sample=579
sample=584
sample=580
sample=577
sample=576
sample=577
sample=583
sample=577
sample=578
sample=576
sample=583
^C
pi@raspberrypi:~/Desktop/system_library$
```

Σχήμα 4.1.33 - Οθόνη τερματικού που διαβάζει τη θέση του βραχίονα ως ψηφιακό σήμα.

Αποφασίστηκε να λαμβάνεται μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε 10 τιμές δεδομένου ότι η συχνότητα ανανέωσης ήταν πολύ γρήγορη.

Το επόμενο βήμα ήταν να βρεθεί η γραμμική εξίσωση όπου δίνοντας μια μέτρηση που επιστρέφει ο μετατροπέας, να βγάζει την πραγματική θέση του βραχίονα σε mm.

- Για σημείο όπου είναι εντελώς κλειστός, διαβάζεται τιμή από τον A/D min: 920 και max 927. Άρα μέσος όρος: 923,5. Υπολογίζοντας $3,3V/1024*923,5 = 2,97 V$. Για επαλήθευση μετρήθηκε με το πολύμετρο η τάση στα άκρα της μεταβλητής αντίστασης και έβγαλε πραγματικά 2,98 V.
- Για σημείο όπου ο βραχίονας είναι εντελώς ανοιχτός, διαβάζεται μέσος όρος τιμών (ακολουθώντας την ίδια μέθοδο) 405 που αντιστοιχεί σε θεωρητικό 1,3051V και η πραγματική μέτρηση με πολύμετρο έδειξε 1,30 V.

Η εξίσωση που ψάχνουμε είναι της μορφής $Y=a*X+\beta$, με $Y=$ (μέτρηση A/D) και X (απομάκρυνση από την εντελώς κλειστή θέση σε mm)

$$923,5 = a*0+\beta \quad \beta = 923,5$$

Για σημείο που είναι εντελώς ανοιχτό:

$$405=a*300+923,5 \quad a = - 1,7283$$

Συνεπώς η εξίσωση που ζητείται είναι η:

$$Y = - 1,7283*X + 923,5$$

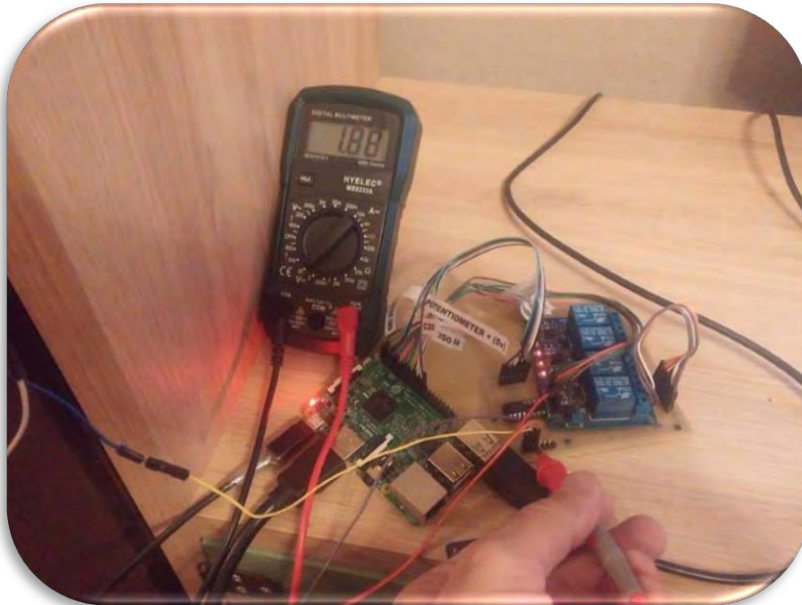
Λύνοντας ως προς X $X = (923,5 - Y) / 1,7283$

Στη συνέχεια διεξήχθη ένα πείραμα για να επαληθευτεί η λογική που χρησιμοποιήθηκε. Μετατοπίστηκε ο βραχίονας σε τυχαία θέση. Εκεί λήφθηκε μέτρηση στο τερματικό του μικροελεγκτή:

- Ελάχιστο 572
- Μέγιστο 583
- άρα μέσος όρος: 577,5

Αυτό αντιστοιχεί θεωρητικά σε $577,5*0,003222 = 1,86V$.

Μετρήθηκε με πολύμετρο η τάση και βρέθηκε 1,88V (μικρό σφάλμα αποδεκτό λόγω σφάλματος οργάνου):



Σχήμα 4.1.34 - επαλήθευση πειράματος για υπολογισμό της θέσης

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση τον μέσο όρο των μετρήσεων 577,5, η εξίσωση βγάζει ως αποτέλεσμα ότι η θέση του βραχίονα θα πρέπει να είναι 200,19mm. Η δοκιμή επαληθεύει την υπόθεση.



Σχήμα 4.1.35 - επαλήθευση πειράματος για υπολογισμό της θέσης

4.1.4.3 Ανάπτυξη αλγορίθμου θέσης actuator

Η ανάπτυξη του κατάλληλου αλγορίθμου για το συσχετισμό της πραγματικής θέσης του βραχίονα, άρα και του ανοίγματος της θυρίδας του λιπασματοδιανομέα με τα κιλά του λιπάσματος που διασπείρονται στον αγρό ήταν το επόμενο σημαντικό βήμα της κατασκευής που ακολουθήθηκε.

Εδώ υπήρχαν αρκετοί περιορισμοί που θα έπρεπε να ληφθούν υπόψη. Ο πρώτος και σημαντικότερος είναι αυτός του μεγέθους και του ειδικού βάρους των κόκκων του λιπάσματος. Και αυτό γιατί κάθε εταιρεία παραγωγής λιπασμάτων έχει προϊόντα με διαφορετικό μέγεθος κόκκων και διαφορετικό ειδικό βάρος.



Σχήμα 4.1.36 - κόκκοι λιπάσματος

Συνεπώς για ένα δεδομένο άνοιγμα της θυρίδας του λιπασματοδιανομέα για ίδιο χρονικό διάστημα, με δοκιμή δύο διαφορετικών λιπασμάτων, το αποτέλεσμα ήταν ότι είχαμε διαφορετική ροή του λιπάσματος μέχρι και 30%. Για τις ανάγκες της εργασίας, ρωτήθηκαν οι παραγωγοί τι λίπασμα πρόκειται να χρησιμοποιήσουν, και η βαθμονόμηση έγινε με βάση αυτό που θα χρησιμοποιούνταν από την πλειοψηφία. Αναπτύχθηκε και μια μέθοδος για μικρή διόρθωση της εξίσωσης ροής για εκείνους που θα χρησιμοποιούσαν διαφορετικού τύπου λίπασμα. Ένας άλλος παράγοντας

που επηρεάζει τη ροή του λιπάσματος είναι και η ατμοσφαιρική υγρασία. Και αυτό γιατί ο κάθε κόκκος λιπάσματος είναι ευδιάλυτος στο νερό ώστε να μπορεί να τον εκμεταλλευτεί γρήγορα το φυτό. Σε μέρες όπου η ατμοσφαιρική υγρασία είναι υψηλή, αρχίζει και λιώνει η εξωτερική πλευρά του κάθε κόκκου και το γεγονός αυτό μειώνει την ροή από δεδομένο άνοιγμα της θυρίδας του λιπασματοδιανομέα. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε μέρα για να εκτελεστεί το πείραμα της βαθμονόμησης της ροής με ατμοσφαιρική υγρασία 75%. Αυτό έγινε λόγω της παραδοχής ότι οι παραγωγοί θα κάνουν εφαρμογή του λιπάσματος πριν από ενδεχόμενη βροχή ώστε το λίπασμα να έχει τη μέγιστη απορρόφηση άρα και αποτελεσματικότητα.

Για τις ανάγκες της βαθμονόμησης κατασκευάστηκε ένα μεταλλικό πλαίσιο που θα περιβάλλει την φτερωτή διασποράς του λιπασματοδιανομέα. Έχει κωνικό σχήμα με αποτέλεσμα, όταν τίθεται σε λειτουργία το μηχάνημα και αρχίζει να ρίχνει λίπασμα, αυτό συγκεντρώνεται σε ένα δοχείο στη βάση, το οποίο με τη σειρά του βρίσκεται τοποθετημένο πάνω σε μια ζυγαριά.



Σχήμα 4.1.37 – Στάδια κατασκευής συστήματος βαθμονόμησης



Σχήμα 4.1.38 – Στάδια κατασκευής συστήματος βαθμονόμησης



Σχήμα 4.1.39 & 4.1.40 – Στάδια κατασκευής συστήματος βαθμονόμησης



Σχήμα 4.1.41 – Η διαδικασία της βαθμονόμησης σε εξέλιξη

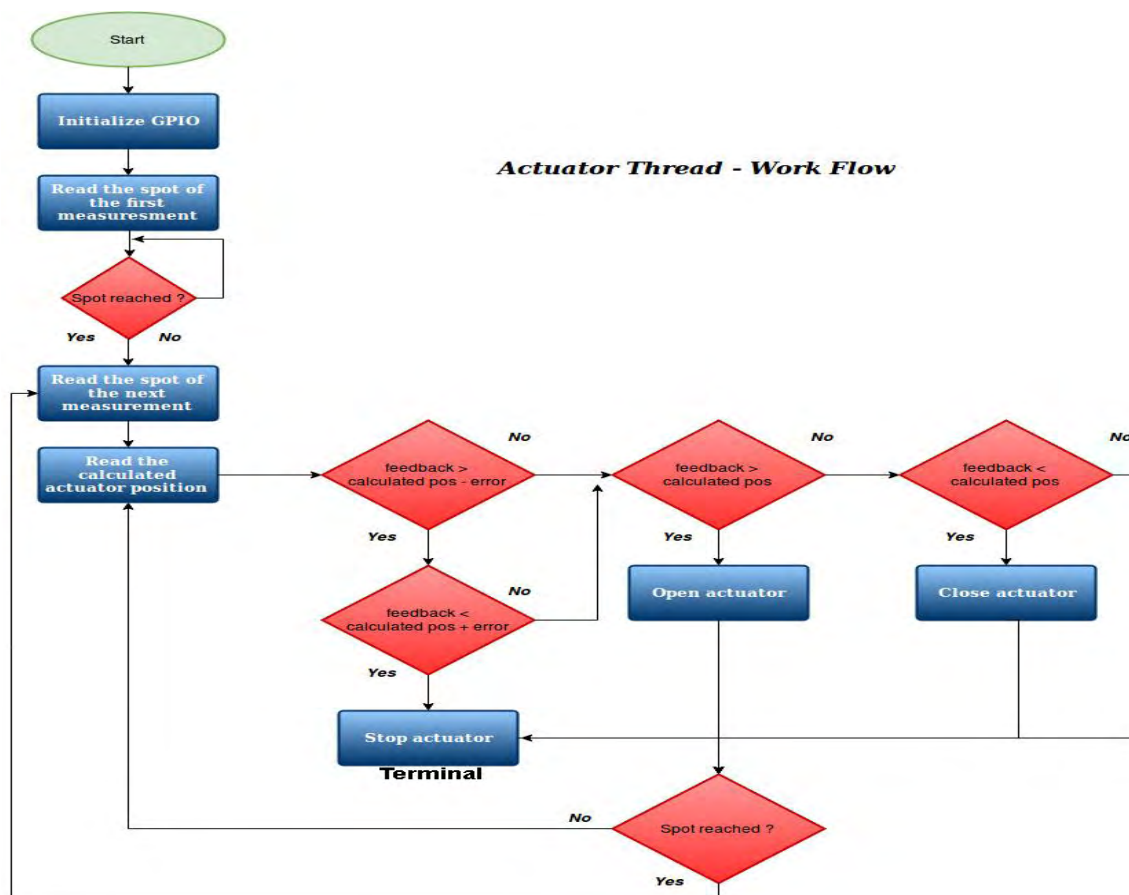


Σχήμα 4.1.42 – Η διαδικασία της βαθμονόμησης σε εξέλιξη

Η δειγματοληψία έγινε τραβώντας βίντεο. Στο βίντεο εικονιζόταν η ένδειξη της ζυγαριάς καθώς και ένα χρονόμετρο. Για διάφορα ανοίγματα της θυρίδας, ο λιπασματοδιανομέας έμπαινε σε λειτουργία και άρχιζε να ρίχνει λίπασμα. Σε μεταγενέστερη αναπαραγωγή του βίντεο, αφήνοντας λίγο χρόνο στην αρχή όπου η ομαλή ροή δεν έχει αποκατασταθεί, το βίντεο σταματούσε σε τυχαία σημεία. Σε κάθε σημείο όπου και να σταματούσε, εικονιζόταν εύκολα η τιμή της ζυγαριάς καθώς και ο χρόνος σε δευτερόλεπτα και δέκατα του δευτερολέπτου. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία πολλές φορές για κάθε άνοιγμα, καταλήξαμε σε ένα πίνακα από τιμές X (χρόνος) και Y (κιλά) από τα οποία προέκυψαν και οι εξισώσεις κιλών ανά μονάδα χρόνου. Η κλίση αυτών των ευθειών δίνει ένα συντελεστή ροής. Βάζοντας τα σημεία (χ,ψ) των συντελεστών ροής σε ένα σύστημα αξόνων, έγινε γραμμική και τετραγωνική παρεμβολή ώστε να βρεθούν οι εξισώσεις της ροής σε kg/s για κάθε άνοιγμα της θυρίδας σε mm.

4.1.4.4 Λογισμικό επικοινωνίας Raspberry και actuator

Το διάγραμμα ροής του λογισμικού που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 4.1.43 – Διάγραμμα ροής λογισμικού για επικοινωνία raspberry με τον actuator

Μία γρήγορη και απλή περιγραφή του κώδικα που αφορά τη λειτουργία του βραχίονα

Καλώντας τη συνάρτηση `actuatorSetup()`, αρχικοποιούμε τα απαραίτητα pins τα οποία χρησιμοποιεί ο μηχανικός βραχίονας και τα pipes για την επικοινωνία με το κύριο νήμα.

```
actuatorSetup();
```

Διαβάζουμε τη καθυστέρηση της μετατόπισης λόγω της πρώτης μέτρησης. Αυτή τη φορά, κρατούμε το μηχανικό βραχίονα κλειστό. Το νήμα περιμένει, μέχρι ο λιπασματοδιανομέας(η μετατόπισή του δηλαδή), φτάσει το σωστό σημείο. Όταν αυτό επιτευχθεί, ξεκινά η διαδικασία της λίπανσης.

```
res = read(pipe_rem[0], &rem_ndvi_diff, sizeof(rem_ndvi_diff));
if ((res != -1) && (res > 0)) {
    printf("read: %lf\n", rem_ndvi_diff);
}
while (track_removal >= rem_ndvi_past + rem_ndvi_diff) {
}
```

Ο λιπασματοδιανομέας, βρίσκεται πλέον στη θέση της πρώτης μέτρησης. Τώρα το νήμα, υπολογίζει τη θέση που θα έπρεπε να είναι ο μηχανικός βραχίονας, βάσης της μέτρησης NDVI.

```
res = read(pipe_pos[0], &slot, sizeof(slot));
if ((res != -1) && (res > 0)) {
    actuator_pos = slot.position;
    printf("read: %lf:%lf\n", slot.ndvi, slot.position);
}
```

και την απόσταση που πρέπει να περιμένει το σύστημα, μέχρι την επόμενη μέτρηση

```
res = read(pipe_rem[0], &rem_ndvi_diff, sizeof(rem_ndvi_diff));
if ((res != -1) && (res > 0)) {
    print("read: %lf\n", rem_ndvi_diff);
}
```

Κρατείται η μετατόπιση που έχει διανυθεί από την “εκτέλεση” της πρώτης μέτρησης, καθώς και γίνεται μία “εγγραφή”, της κατάστασης του μηχανικού βραχίονα.

```
actuator_removal = track_removal;
rem_ndvi_past = actuator_removal;
fprintf(file, "%lf,%lf,%lf,", slot.ndvi, actuator_removal, velocity);
```


Τώρα το νήμα, βάση της ανατροφοδότησης της θέσης του, που δίνει συνεχώς, ενεργοποιεί τον μηχανικό βραχίονα ανάλογα, με σκοπό να φτάσει τη θέση που του υπέδειξε το σύστημα ανάλογα με τη μέτρηση NDVI.

- Οι συναρτήσεις [actuatorOpen\(\)](#) και [actuatorClose\(\)](#) είναι συνεχείς.
- Όταν καλείται η συνάρτηση [actuatorOpen\(\)](#) ο μηχανικός βραχίονας “ανοίγει”, μέχρι να καλέσουμε την [actuatorStop\(\)](#).
- Όταν η διαφορά μεταξύ 2 συνεχόμενων θέσεων του μηχανικού βραχίονα είναι πολύ μικρή, αποφασίστηκε να εισηχθεί στον αλγόριθμο ένας αριθμός “σφάλματος”, ο οποίος θα εξασφαλίζει, όσο είναι δυνατόν, τις άσκοπες μετακινήσεις του μηχανικού βραχίονα. Το σφάλμα στην περίπτωση του συγκεκριμένου συστήματος, είναι της τάξεως των 0.3mV (15 βαθμούς NDVI).

```
while(1) {  
    position = actuatorAverageVoltage();  
    if ((position > (actuator_pos - error)) &&  
        (position < (actuator_pos + error))) {  
        actuatorStop();  
    }  
    else if (position < actuator_pos) {  
        actuatorClose();  
    } else if (position > actuator_pos) {  
        actuatorOpen();  
    }  
}
```

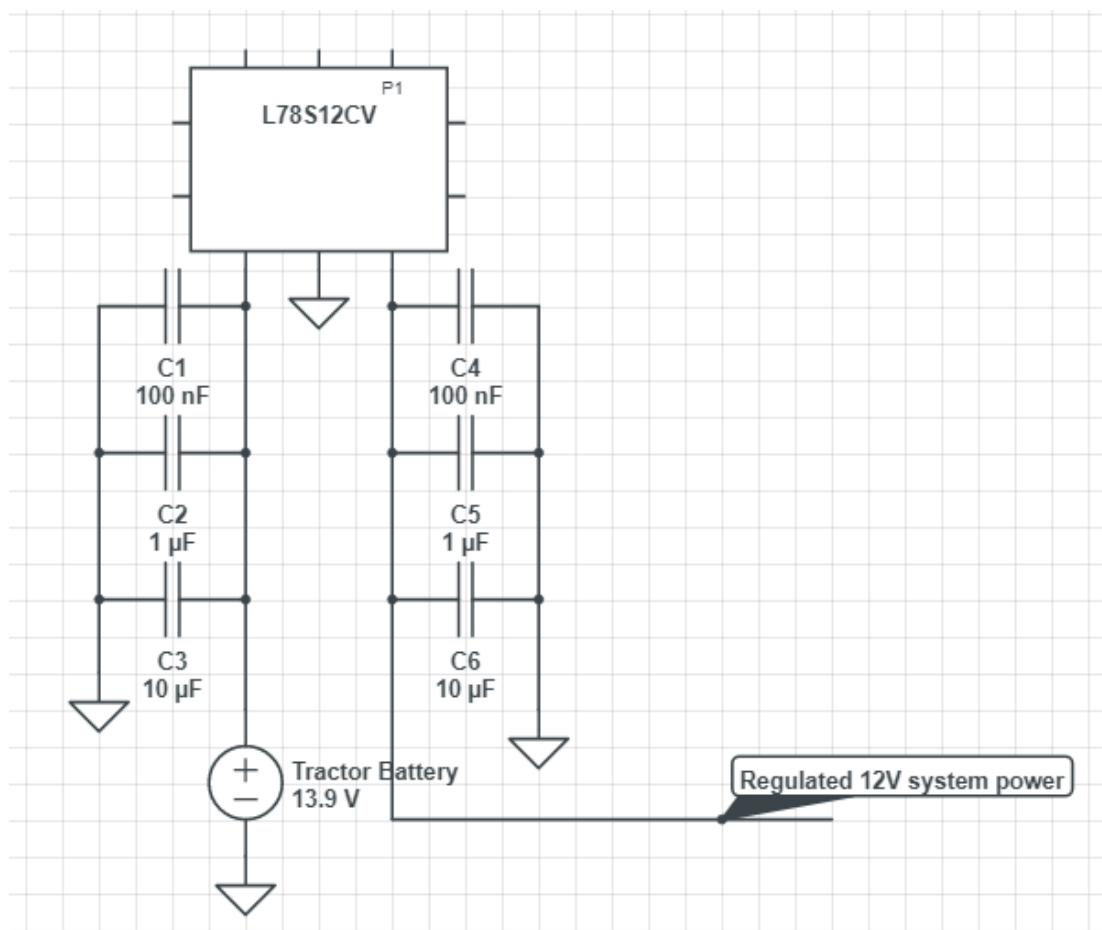
Το νήμα, ενεργοποιεί το μηχανικό βραχίονα για κάθε μέτρηση, μέχρι ο λιπασματοδιανομέας να φτάσει τη θέση της επόμενης μέτρησης. Εκείνη τη στιγμή, ένα νέο ζεύγος τιμών αποσπώνται από τα δύο pipe, ενώ συνεχώς, ανανεώνεται η καταγραφή με τη παρούσα θέση του μηχανικού βραχίονα.

```
if (actuator_removal >= rem_ndvi_past + rem_ndvi_diff) {  
    fprintf(file, "%lf\n", position);  
    res = read(pipe_pos[0], &slot, sizeof(slot));  
    if ((res != -1) && (res > 0)) {  
        actuator_pos = slot.position;  
    }  
    res = read(pipe_rem[0], &rem_ndvi_diff, sizeof(rem_ndvi_diff));  
    if ((res != -1) && (res > 0)) {  
    }  
    rem_ndvi_past = actuator_removal;  
    printf("act: ndvi %lf, IDEAL_pos %lf, REAL_pos %lf\n"  
        , slot.ndvi, slot.position, position);  
    fprintf(file, "%lf,%lf,%lf,",  
        slot.ndvi, actuator_removal, velocity);  
}
```

4.1.5 Τροφοδοσία συστήματος

Για την τροφοδοσία του συστήματος αντιμετωπίστηκαν αρκετές δυσκολίες. Η τροφοδοσία έρχεται από την μπαταρία του γεωργικού ελκυστήρα που σε κατάσταση λειτουργίας δεν δίνει σταθερή τάση τροφοδοσίας. Στην πράξη μετρήθηκε ότι η διαφορά δυναμικού στους πόλους της μπαταρίας του τρακτέρ ενώ αυτό βρίσκεται σε λειτουργία, κυμαίνεται μεταξύ των 13 και 13,9 Volt. Και αυτό γιατί η γεννήτρια του τρακτέρ λειτουργεί διαφορετικά ανάλογα με τις στροφές του κινητήρα. Κάτι τέτοιο φυσικά θα ήταν καταστροφικό για τους αισθητήρες και τα ηλεκτρονικά στοιχεία του συστήματος.

Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε ένα κύκλωμα σταθεροποίησης τάσης βασισμένο στο ολοκληρωμένο στοιχείο L78S12CV[35]. Το συγκεκριμένο κύκλωμα είχε συνδεδεμένους και τρεις πυκνωτές μεταξύ των Pin εισόδου/εξόδου και της γείωσης ώστε να μπορεί να κόβει και τις AC συνιστώσες της εισόδου εκτός από την σταθεροποίηση του DC στα 12 Volt στην έξοδο. Παρουσιάζεται το σχηματικό του κυκλώματος παρακάτω:

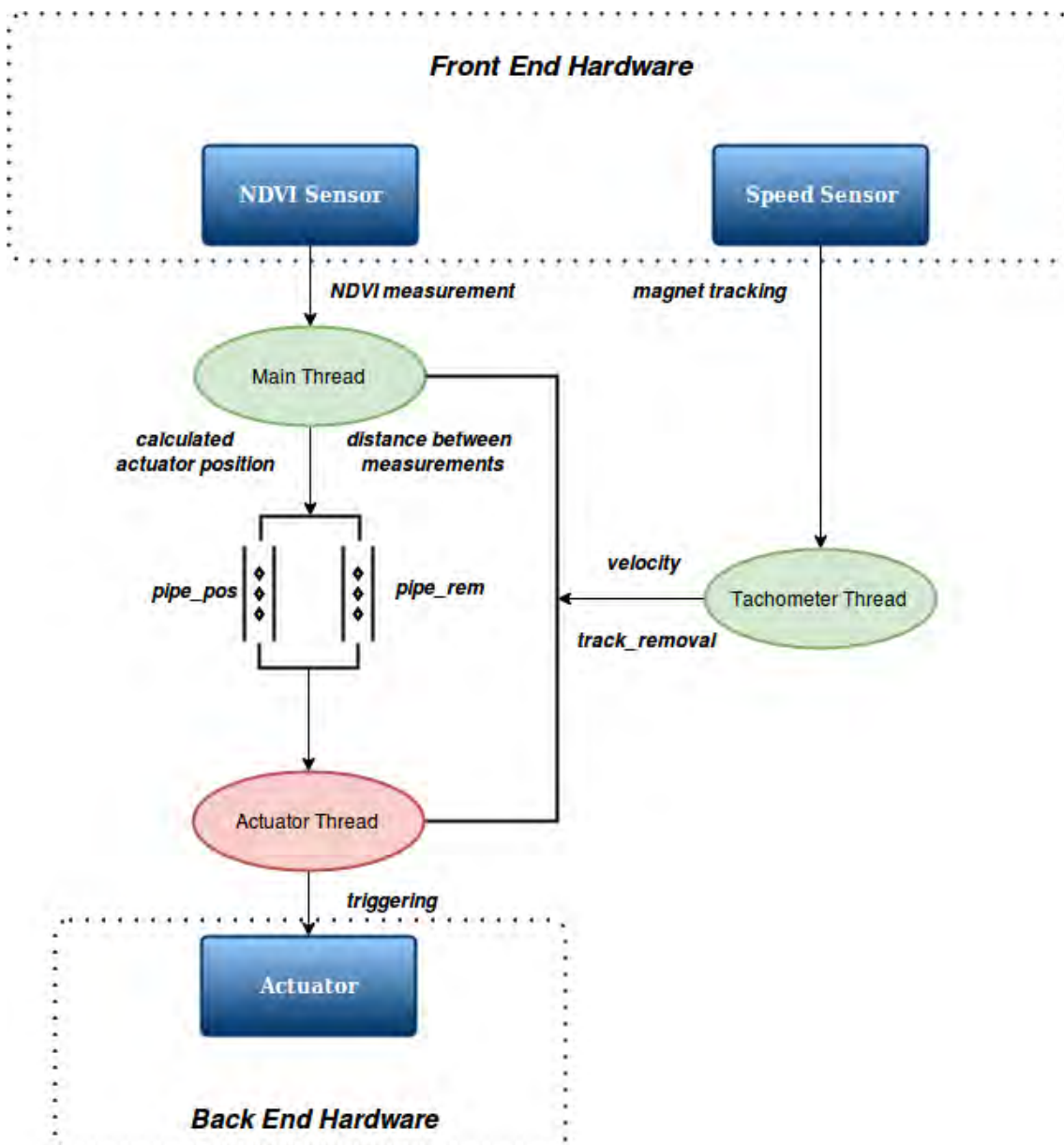


Σχήμα 4.1.44 - Σχηματικό κυκλώματος σταθεροποίησης τάσης

4.2 Αρχιτεκτονική Λογισμικού

Ενώ εξηγήθηκε παραπάνω η λειτουργία όλων των επί μέρους στοιχείων του συστήματος, από πλευράς λογισμικού, τώρα θα εξηγηθεί το βασικό νήμα της λειτουργίας, καθώς και η αρχιτεκτονική του όλου λογισμικού του μικρο-ελεγκτή του συστήματος διαφοροποιημένης λίπανσης.

Παρακάτω, μία εικόνα του διαγράμματος ροής της βασικής αρχιτεκτονικής του συστήματος



Σχήμα 4.2.1 – Διάγραμμα ροής βασικής λειτουργίας του συστήματος

Τα 3 νήματα ελέγχουν το σύνολο των λειτουργιών του συστήματος

Νήμα	Λειτουργία
Main	Διάβασμα της μέτρησης NDVI και υπολογισμός της ιδανικής θέσης του μηχανικού βραχίονα
Actuator	Ενεργοποίηση του μηχανικού βραχίονα ώστε να φτάσει στην ιδανική θέση, για κάθε μέτρηση
Tachometer	Υπολογισμός ταχύτητας και μετατόπισης

Πίνακας 4.2.1 – Πίνακας νημάτων που ελέγχουν όλες τις λειτουργίες του συστήματος

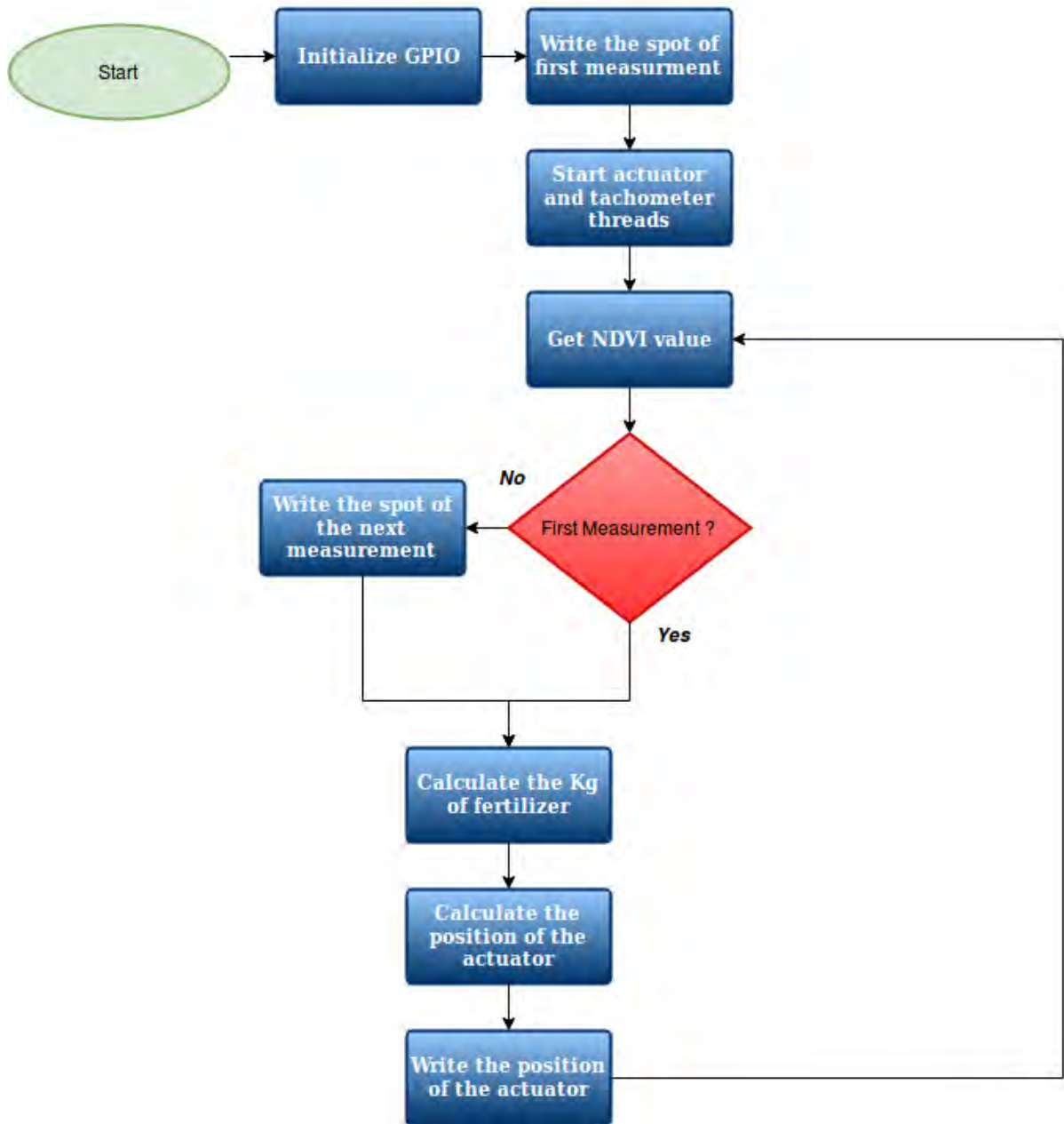
Τα 3 νήματα, μοιράζονται 4 μεταβλητές σε σύνολο. Αυτή η αρχιτεκτονική περιγράφεται στον παρακάτω πίνακα.

Νήμα	velocity	track_removal	pipe_pos	pipe_rem
Main	Διαβάζει	Διαβάζει	Γράφει	Γράφει
Actuator	Διαβάζει	Διαβάζει	Διαβάζει	Διαβάζει
Tachometer	Γράφει	Γράφει	-	-

Πίνακας 4.2.2 – Πίνακας μεταβλητών που μοιράζονται τα 3 νήματα

Παρακάτω, η εικόνα του διαγράμματος ροής του βασικού νήματος λειτουργίας του συστήματος.

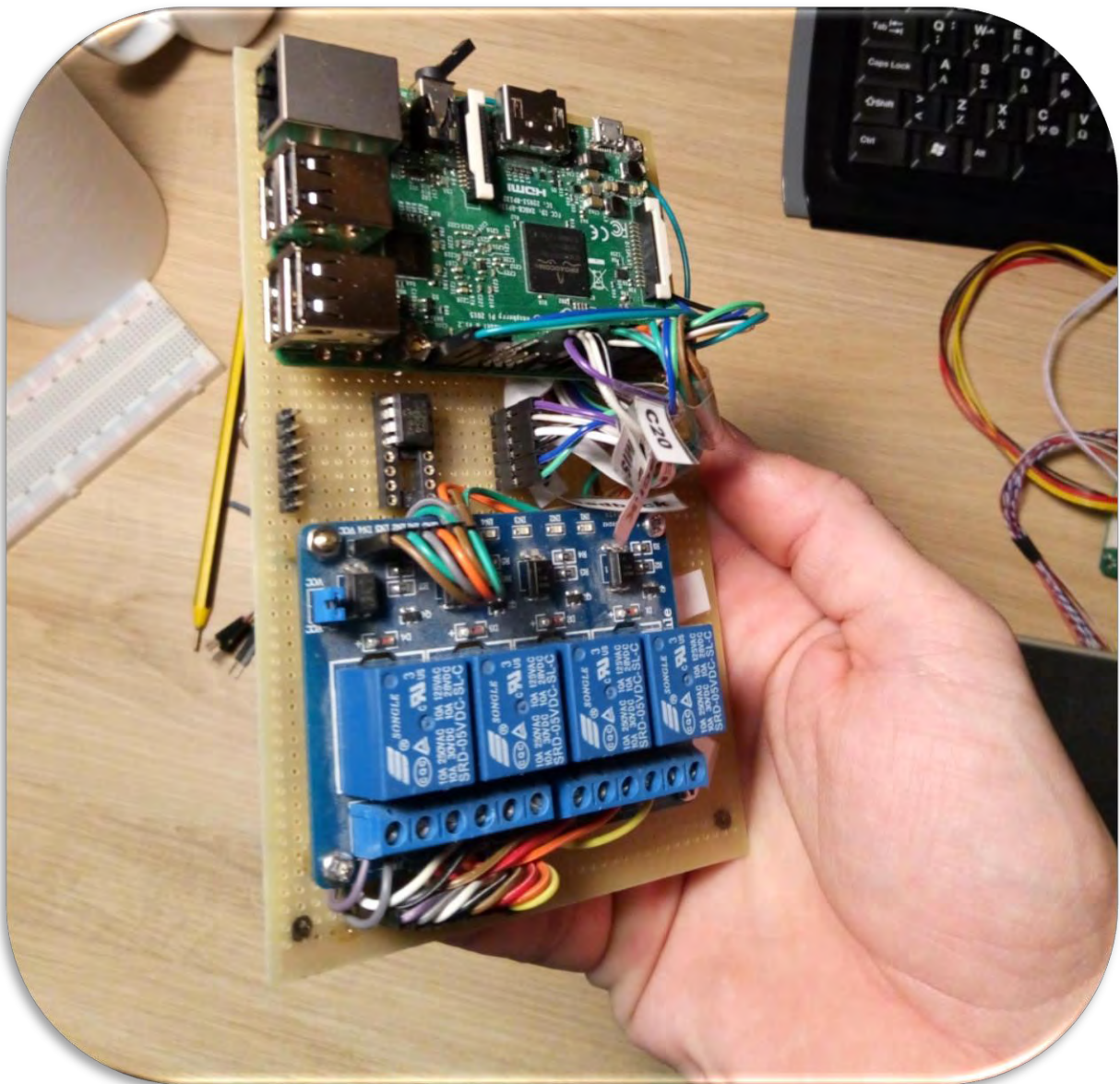
Main Thread - Work Flow



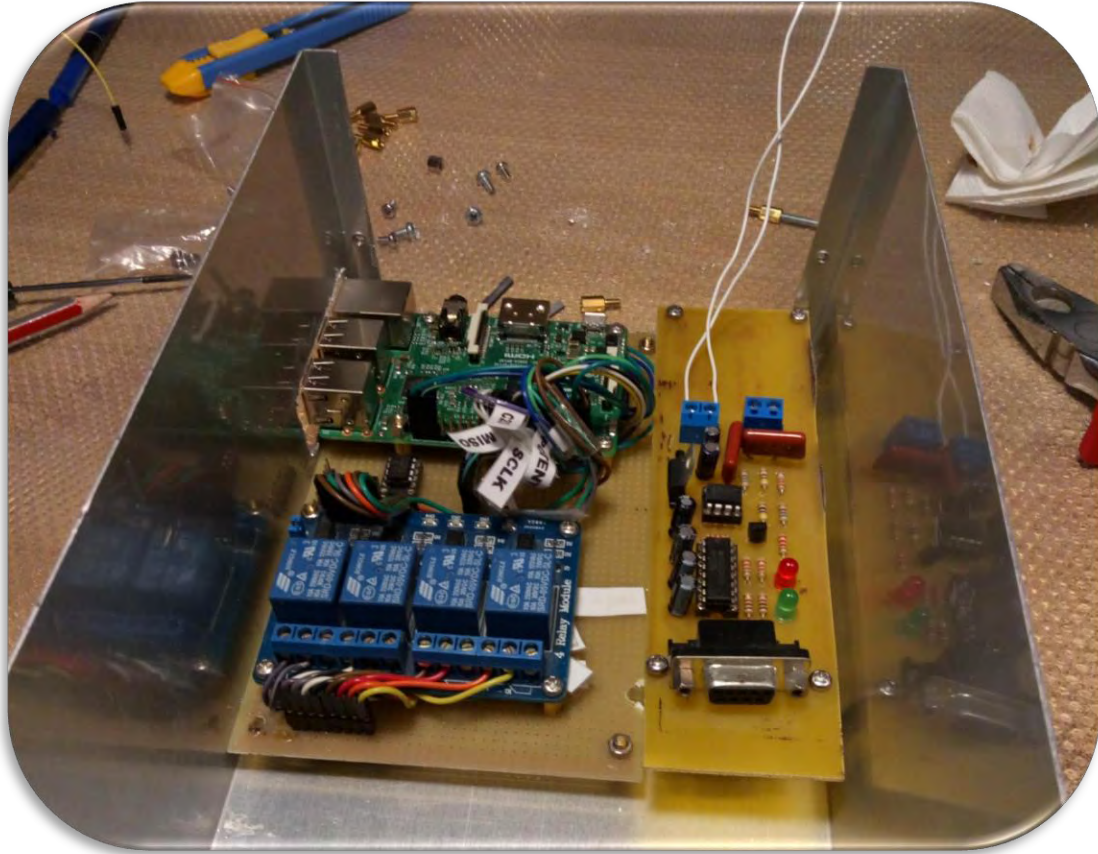
Σχήμα 4.2.2 – Διάγραμμα ροής υλοποίησης της μεθόδου διαφοροποιημένης λίπανσης

4.3 Αρχιτεκτονική υλικού

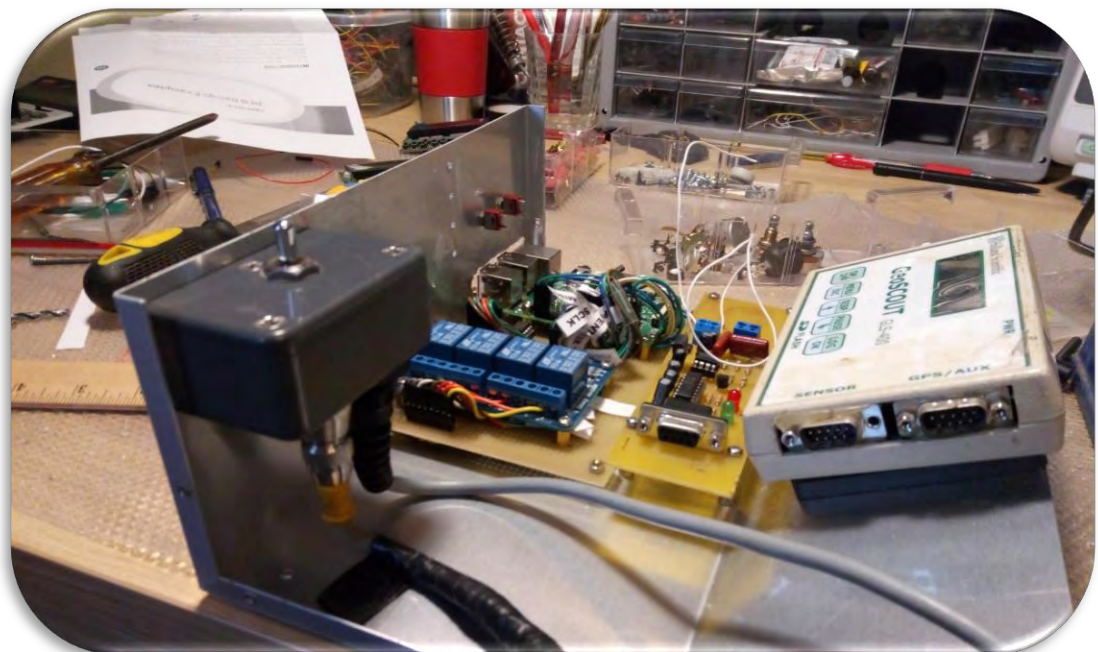
Όταν όλα τα διαφορετικά μέρη του συστήματος δοκιμάστηκαν ξεχωριστά και δούλεψαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις, έγινε στη συνέχεια μια κατασκευή που θα "στέγαζε" στο εσωτερικό της όλο το hardware ώστε να μπορεί να βγει από το τραπέζι του εργαστηρίου και να εγκατασταθεί σε ένα τρακτέρ. Αυτή είναι μια δύσκολη εργασία καθώς το περιβάλλον της καμπίνας του τρακτέρ και αυτό της λίπανσης έχει πολλούς κραδασμούς και έτσι θα έπρεπε όλες οι συνδέσεις να έχουν γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να αντέξουν και να φέρουν την εργασία της λίπανσης σε πέρας χωρίς πρόβλημα.



Σχήμα 4.3.1 - όλες οι ενώσεις έγιναν με καλώδια quick release τα οποία τοποθετήθηκαν οργανωμένα σε σημεία όπου δεν θα μπορούσαν να μετακινούνται άσκοπα. Αυτό μας εξασφάλισε ποιότητα στις συνδέσεις μας



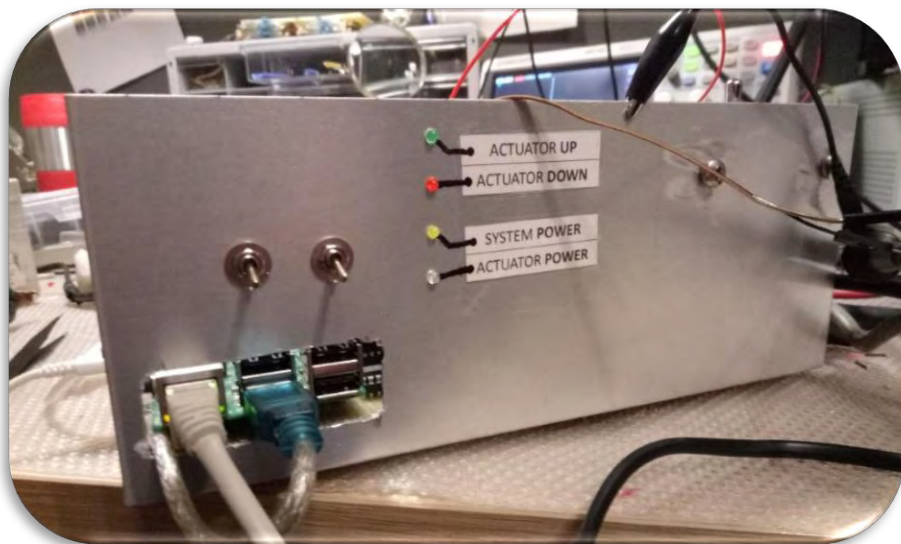
Σχήμα 4.3.2 - τοποθέτηση κυρίως πλακέτας με raspberry και ρελέ στο κουτί κατασκευών καθώς και του μετατροπέα RS485 σε RS232



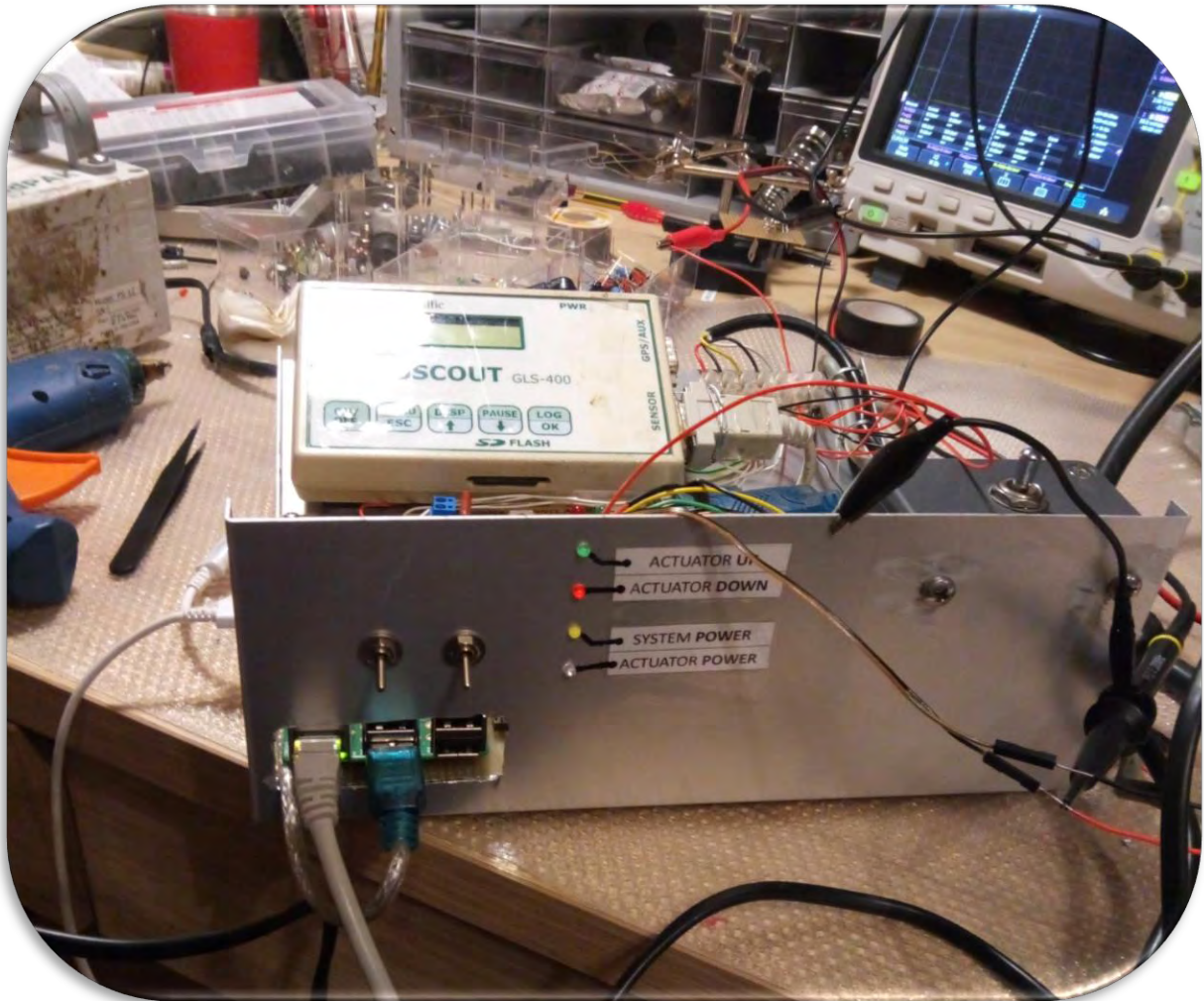
Σχήμα 4.3.3 - Τοποθέτηση του data logger του crop circle μέσα στο κουτί κατασκευής με σκοπό να ελέγχεται και η λειτουργία του αισθητήρα όταν το τρακτέρ θα βρισκόταν σε κίνηση.



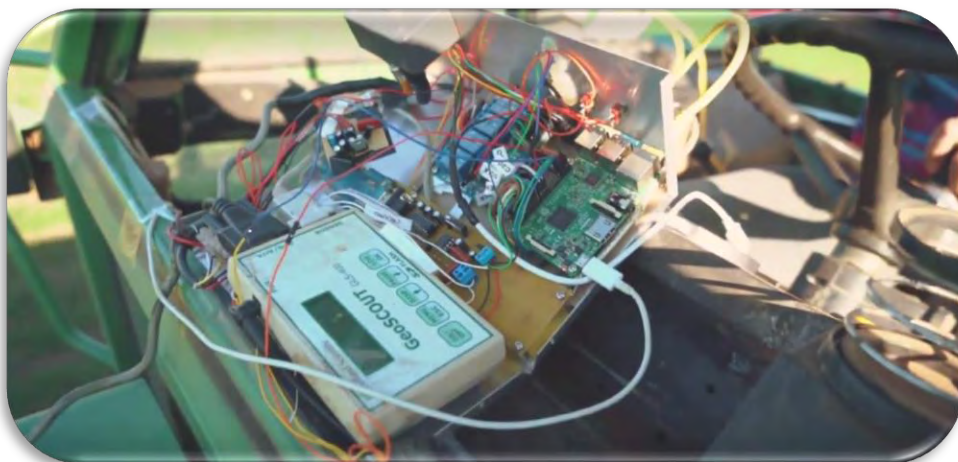
Σχήμα 4.3.4 - ασφάλιση καλωδίων με δετικά και σύρμα ώστε να παραμείνουν στη θέση τους και να αποφευχθεί μια ενδεχόμενη αποσύνδεση λόγω κραδασμών



Σχήμα 4.3.5 - Η μπροστινή όψη του κουτιού της κατασκευής. Αποτελείται από 2 διακόπτες. Ο πρώτος στα αριστερά είναι ο κεντρικός διακόπτης τροφοδοσίας που ενεργοποιεί/απενεργοποιεί το σύστημα. Ο δεύτερος δεξιά είναι ο διακόπτης που απενεργοποιεί χειροκίνητα τον ηλεκτρικό βραχίονα ανεξαρτήτως από την απόφαση του συστήματος. Ο συγκεκριμένος διακόπτης τοποθετήθηκε για να αποφευχθεί ο κίνδυνος "κολλήματος" του συστήματος σε συνεχές άνοιγμα ή κλείσιμο όπου και θα γινόταν ζημιά στον λιπασματοδιανομέα.



Σχήμα 4.3.6 - τελικές δοκιμές λίγο πριν τη χρήση του συστήματος στον αγρό.



Σχήμα 4.3.7 - Το τελικό σύστημα όπως τοποθετήθηκε στην καμπίνα του γεωργικού ελκυστήρα. Η φωτογραφία λήφθηκε τη στιγμή που το σύστημα βρισκόταν σε πλήρη λειτουργία και πραγματοποιούσε διαφοροποιημένη λίπανση.

5. Δοκιμή Συστήματος σε πειραματικούς αγρούς - Μελέτη απόδοσης

Έχοντας ολοκληρώσει την κατασκευή του συστήματος διαφοροποιημένης λίπανσης ξεκίνησε ο σχεδιασμός των πειραμάτων σε επιλεγμένους αγρούς ώστε να μετρηθεί η απόδοση του συστήματος. Οι παραγωγοί που δέχτηκαν να παρέχουν τους πειραματικούς αγρούς, επιλέχτηκαν με μεγάλη προσοχή ώστε να τηρήσουν τις οδηγίες που θα τους δινόταν. Στους πειραματικούς αγρούς θα εκτελούνταν ομοιόμορφη σπορά σίτου και στη συνέχεια ο αγρός θα χωριζόταν σε 2 τμήματα. Οι παραγωγοί συμφώνησαν να εκτελέσουν όμοιες καλλιεργητικές φροντίδες (ψεκασμοί, άρδευση κλπ) και στα 2 τμήματα με μόνη διαφορά τη λίπανση. Όσον αφορά τη λίπανση, στο πρώτο μισό τμήμα θα εκτελούσε ο παραγωγός/ιδιοκτήτης την λίπανση με τον παραδοσιακό τρόπο, όπως έκανε και τα προηγούμενα χρόνια, ενώ στο δεύτερο μισό, θα εφαρμοζόταν διαφοροποιημένη λίπανση με τη χρήση του συστήματος της παρούσας εργασίας. Κρατώντας όλες τις φροντίδες σταθερές και διαφοροποιώντας μόνο τη λίπανση, στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου θα έπρεπε τα δύο τμήματα να συγκομιστούν και ζυγιστούν χωριστά ώστε να εκτιμηθεί το ποσοστό του οφέλους ή απώλειας που προέκυψε από τη χρήση του συστήματος διαφοροποιημένης λίπανσης.

Για να χωριστούν οι πειραματικοί αγροί με δίκαιο τρόπο, προηγήθηκε χαρτογράφηση της ηλεκτραγωγιμότητας κατά μήκος του εμβαδού τους [36]. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μεταξύ των άλλων, συνδέεται άμεσα με τη μηχανική σύσταση του εδάφους. Η σύσταση του εδάφους με τη σειρά της συνδέεται και αυτή άμεσα με την διάρκεια που θα παραμείνει το λίπασμα στον αγρό. Λόγω της μεγάλης κινητικότητας που έχει το άζωτο, είναι πιο εύκολο να χαθεί όταν βρίσκεται σε έδαφος με αμμώδη σύσταση παρά σε έδαφος με αργιλώδη σύσταση. Τέτοια παραλλακτικότητα εμφανίζεται έντονα εντός των αγρών με αποτέλεσμα, αν κανείς αγνοήσει αυτό τον τόσο σημαντικό παράγοντα, μπορεί να ευνοηθεί έχοντας στο πειραματικό τμήμα του αγρού έδαφος το οποίο συγκρατεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα το άζωτο και μπορεί να εφοδιάζει την φυτεία και κατά αυτό τον τρόπο να εμφανίσει καλύτερα αποτελέσματα απόδοσης που να μην οφείλονται απαραίτητα στη χρήση του συστήματος διαφοροποιημένης λίπανσης. Το ίδιο θα μπορούσε φυσικά να συμβεί και αντίστροφα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για όλες τις μετρήσεις και τις χαρτογραφήσεις, χρησιμοποιήθηκε gps ώστε να ταυτίζονται οι συντεταγμένες της τρέχουσας θέσης με τις μετρήσεις ώστε στη συνέχεια να μπορούν να οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα με χρήση προγραμμάτων gis.



Σχήμα 5.1 - Αισθητήρας μέτρησης ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε πειραματικό αγρό

Στους χάρτες που παράχθηκαν έγινε ανάλυση του συνολικού εμβαδού των ζωνών με ίδιες ιδιότητες και διασφαλίστηκε διαχωρισμός των αγροτεμαχίων με δίκαιο τρόπο.

Για την επαρκή μελέτη της απόδοσης του συστήματος διαφοροποιημένης λίπανσης λήφθηκαν και χάρτες που έδειχναν την κατάσταση της φυτείας από την σκοπιά της επάρκειας λιπάσματος, σε πολλές στιγμές κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Οι συγκεκριμένοι χάρτες έχουν ληφθεί τόσο από τους αισθητήρες NDVI κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής των λιπάνσεων, όσο και από τους δορυφόρους sentinel της Ευρωπαϊκής

Υπηρεσίας Διαστήματος που εκτοξεύτηκαν στα πλαίσια του προγράμματος περιβαλλοντικής επιτήρησης «Κοπέρνικος» της ΕΕ.

Παρακάτω παρουσιάζεται το σύνολο των μετρήσεων που λήφθηκαν σε κάθε πειραματικό αγρό και η ανάλυσή τους. Στους χάρτες που παρουσιάζονται, εμφανίζεται το χώρισμα των δύο τμημάτων, οι περιοχές που δεν συμπεριλήφθηκαν στο πείραμα, οι ζώνες που χρησιμοποιήθηκαν ως μάρτυρες υπερ-λίπανσης καθώς και τα σημεία από όπου λάβαμε δείγματα χώματος για εργαστηριακή ανάλυση και προσδιορισμό της πραγματικής μηχανικής σύστασης του χώματος. Μετά την παράθεση όλων των σχετικών χαρτών, ακολουθούν τα συμπεράσματα

Για την καλύτερη μελέτη της αποτελεσματικότητας των λιπάνσεων, χρησιμοποιήθηκαν και κλιματικά δεδομένα τηλεμετρικού σταθμού που είχε εγκατασταθεί στην περιοχή του Περιβλέπτου Μαγνησίας. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να θεωρηθούν έγκυρα σε ακτίνα 10 χιλιομέτρων από τον σταθμό (σύμφωνα με τη βιβλιογραφία), συνεπώς καλύπτουν τους αγρούς των αδελφών Αγγελή, Δ.Ευαγγελόπουλου, Γρ.Επίσκοπου και Απ.Μαυροειδή.



Σχήμα 5.2 - Τηλεμετρικός σταθμός στο Περιβλέπτο Μαγνησίας

Αγρόκτημα αδελφών Αγγελή

Παραγωγός	Περιοχή	Συντεταγμένες αγρού	Συνολικά στρέμματα	Στρ. πειράματος	Στρ. παραδοσιακής διαχείρισης
-----------	---------	---------------------	--------------------	-----------------	-------------------------------

Γιώργος & Νίκος Αγγελής	Περίβλεπτο Μαγνησίας	39.296444, 22.698709	56,8	27,6	29,2
-------------------------	----------------------	-------------------------	------	------	------

Πληροφορίες Καλλιέργειας

Ημερομηνία σποράς: 18/11/16

Ποικιλία σίτου: Maestrale

Πίνακας 5.1 - Εφαρμογές παραδοσιακής λίπανσης:

	Α' Δόση	Β' Δόση	Γ' Δόση
Ημερομηνία εφαρμογής	25/2/17	26/3/17	δεν έγινε
Τύπος λιπάσματος	Ουροθειική αμμωνία 40%	Νιτρική αμμωνία 36,5%	-
Τιμή λιπάσματος/kg	0,45 € / kg	0,36 € / kg	
Ποσότητα εφαρμογής	20 kg /στρ	15 kg/στρ	
Σύνολο κόστους εφαρμογής / στρ	9 € / στρ	5,4 € / στρ	

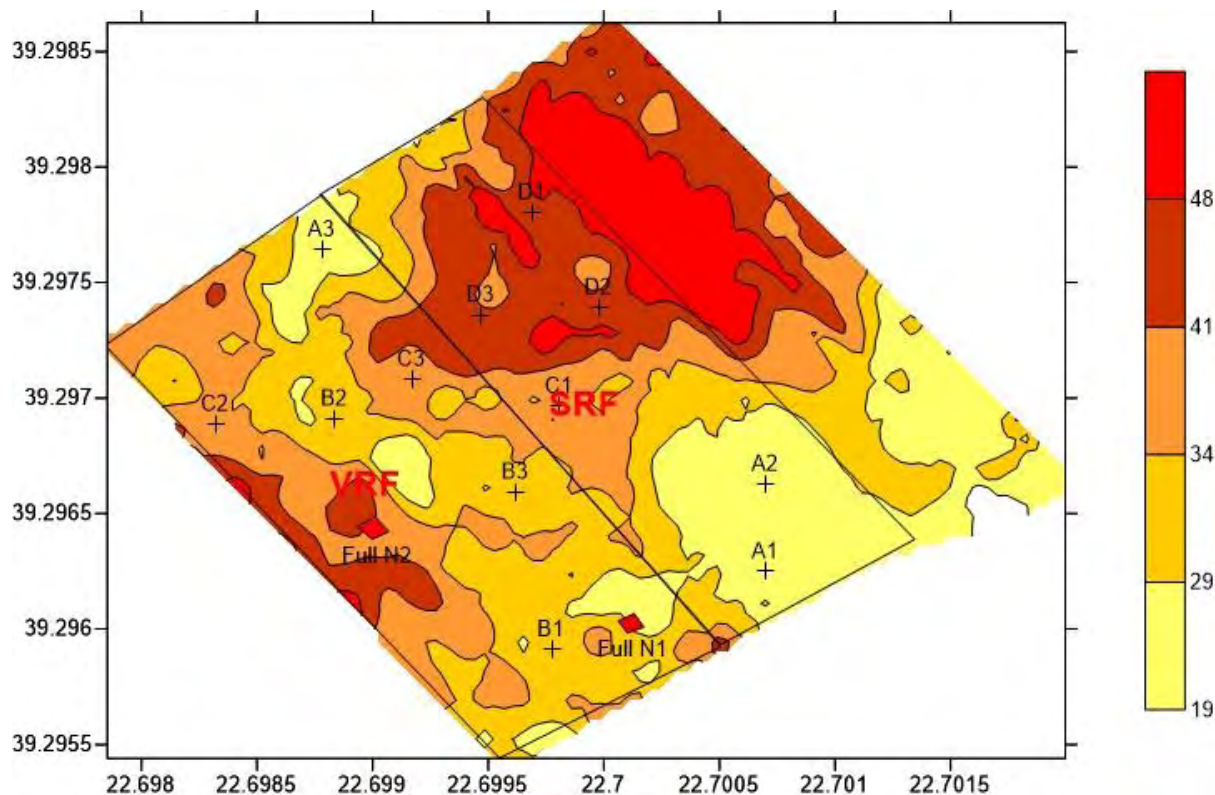
Πίνακας 5.2 - Εφαρμογές διαφοροποιημένης λίπανσης:

	Α' Δόση	Β' Δόση	Γ' Δόση
Ημερομηνία εφαρμογής	25/2/17	26/3/17	δεν έγινε
Τύπος λιπάσματος	Ουροθειική αμμωνία 40%	Νιτρική αμμωνία 36,5%	-
Τιμή λιπάσματος/kg	0,45 € / kg	0,36 € / kg	

Ποσότητα εφαρμογής	17,39 kg/στρ	10 kg/στρ	
Σύνολο κόστους εφαρμογής	7,8 € / στρ	3,6 € / στρ	



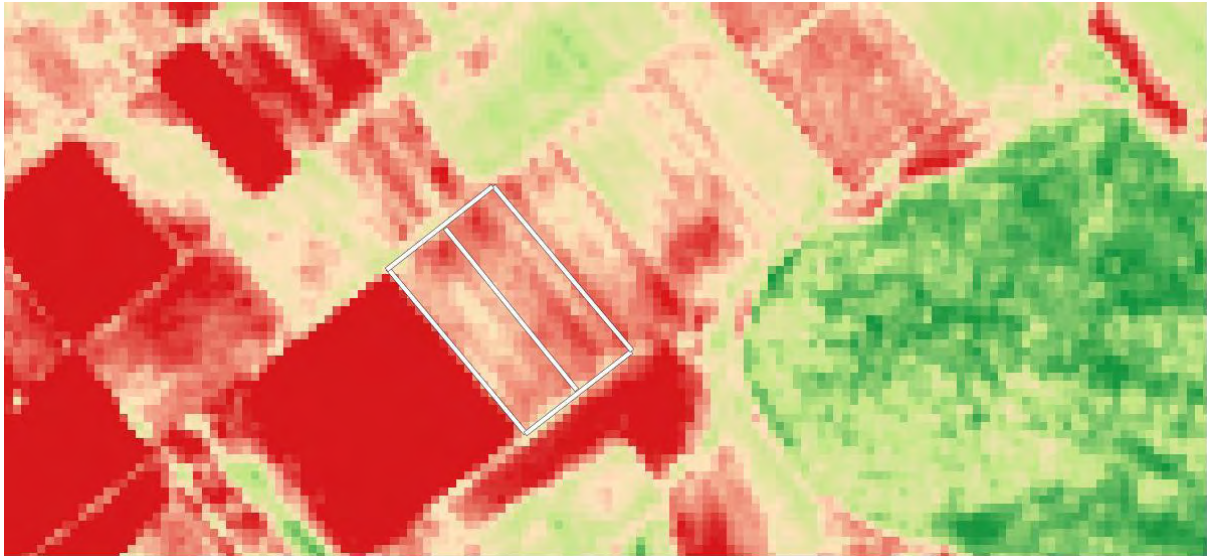
Σχήμα 5.3 - Σχεδιάγραμμα αγρού και πειραμάτων



Σχήμα 5.4 - Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας

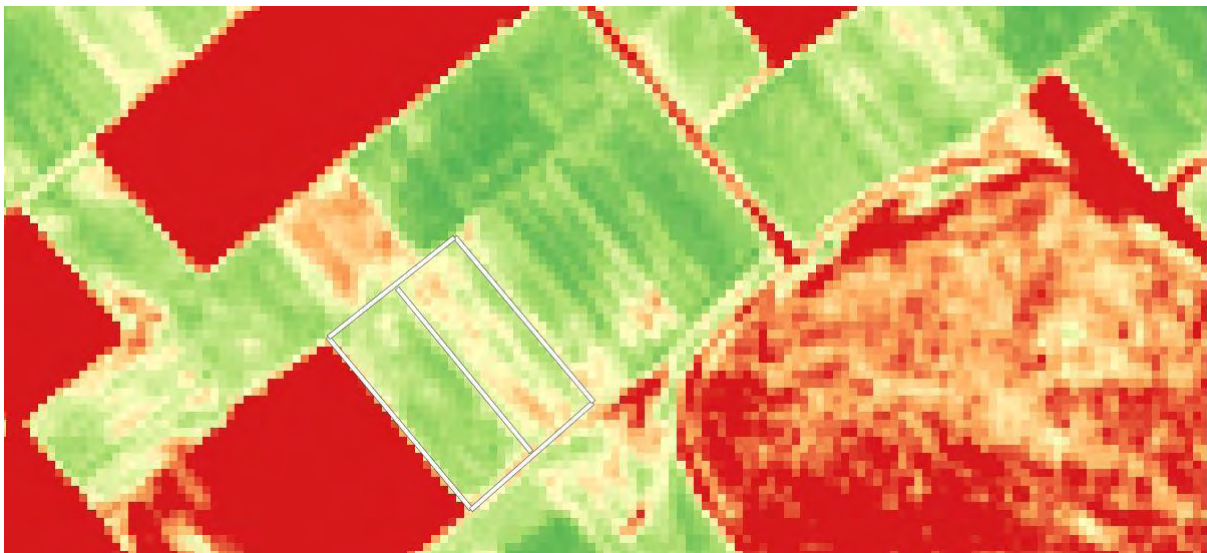
Χάρτες Θρέψης από δορυφόρο Sentinel

18/2/17



Σχόλια: Η μέτρηση έγινε λίγες μέρες πριν την πρώτη εφαρμογή της λίπανσης. Η κατάσταση της θρέψης εμφανίζεται να είναι παρόμοια και στα δύο τμήματα του αγρού.

3/3/17

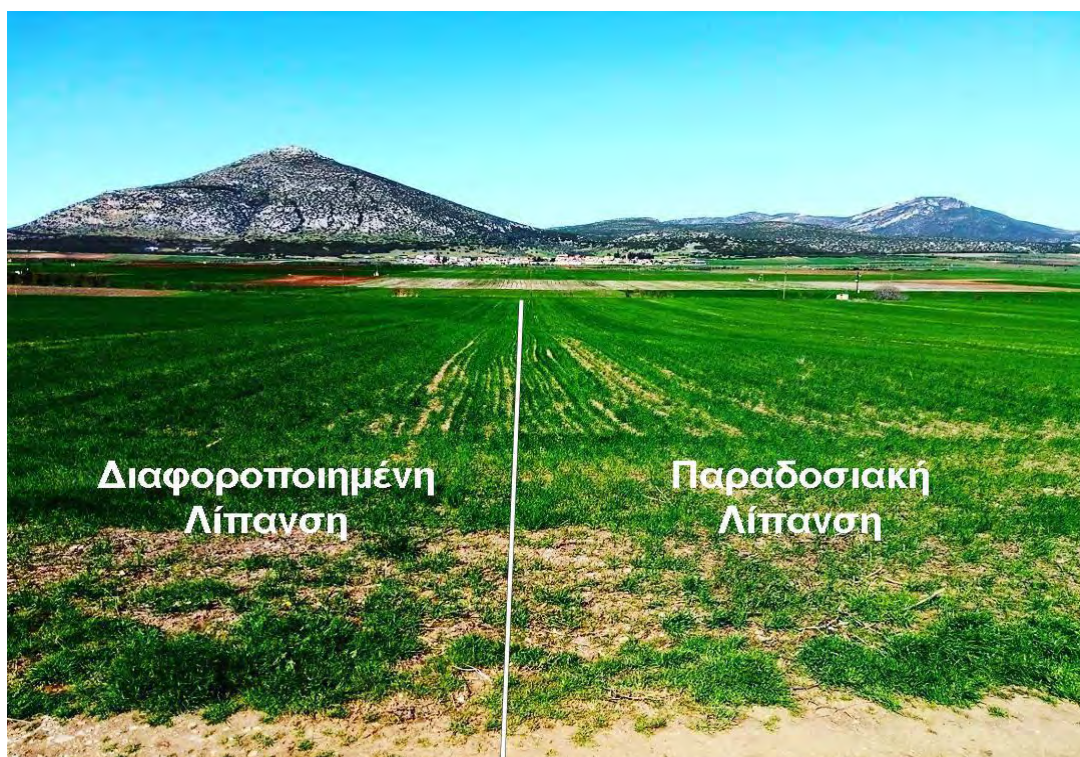


Σχόλια: Η πρώτη εφαρμογή της λίπανσης τόσο στο παραδοσιακό όσο και το πειραματικό κομμάτι έγινε στις 25/2/17. Μετά την εφαρμογή ακολούθησε βροχή καθημερινά από τις 26 Φεβρουαρίου έως και την 3η του μήνα Μάρτιου όπου λήφθηκε και η συγκεκριμένη φωτογραφία θρέψης από τον δορυφόρο sentinel. Το συνολικό ύψος της βροχής ήταν 4,6 χιλιοστά. Το ύψος αυτό θεωρείται ικανό για να διαλύσει τους κόκκους του λιπάσματος ώστε αυτό να εισχωρήσει στο ριζικό σύστημα των φυτών. Παράλληλα, η πάροδος αυτών των ημερών είναι αρκετή ώστε τα

αποτελέσματα της λίπανσης να αρχίσουν να είναι ορατά. Είναι ξεκάθαρο πως το πειραματικό τμήμα του αγρού (αριστερά) βρίσκεται σε πολύ καλύτερη κατάσταση θρέψης σε σύγκριση με το παραδοσιακό (δεξιά)

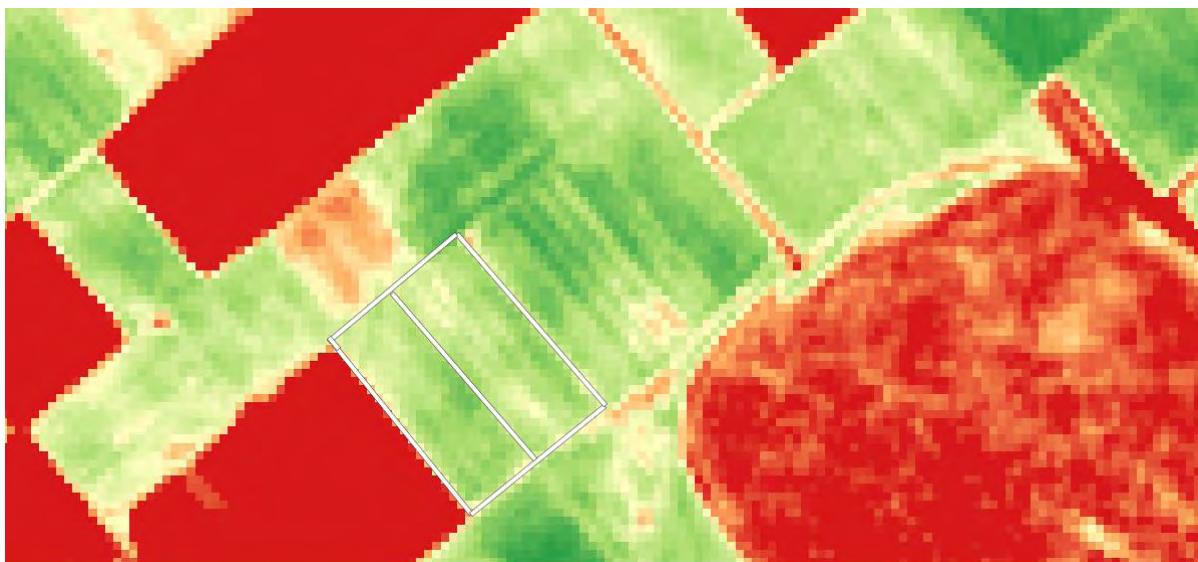


Σχήμα 5.5 - βροχοπτώσεις από 24/2 έως 4/3 στην περιοχή Περιβλέπτου



Σχήμα 5.6 - φωτογραφία τραβηγμένη από κινητό τηλέφωνο στις 2/3/16 στην οποία παρουσιάζεται η ίδια εικόνα σε σχέση με τις μετρήσεις των δορυφόρων. Το πειραματικό τμήμα παρουσιάζει πιο σκούρο έντονο πράσινο και ομοιόμορφο χρώμα.

19/4/17



Σχόλια: Δυστυχώς δεν μπόρεσαν να ληφθούν περισσότερες εικόνες από τον δορυφόρο σε ημερομηνίες κοντά σε αυτή της δεύτερης εφαρμογής, καθότι υπήρχαν σύννεφα που εμπόδιζαν τη λήψη μετρήσεων. Αρκετές μέρες μετά τη δεύτερη εφαρμογή όμως, παρατηρούμε για ακόμη μια φορά ξεκάθαρο πλεονέκτημα έναντι του δεξιού τμήματος όπου έχει εφαρμοστεί λίπανση με τον παραδοσιακό τρόπο. Στο τμήμα της διαφοροποιημένης λίπανσης, παρουσιάζεται μεγαλύτερη ομοιομορφία στη θρέψη και τα πιο σκούρα χρώματα υποδηλώνουν την καλύτερη κατάσταση της θρέψης.

Την ίδια εικόνα έδειξε και η ζυγαριά στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Όλες οι παρατηρήσεις που έγιναν στα διάφορα στάδια της καλλιέργειας συμφωνούν με το αποτέλεσμα της συγκομιδής.

Πίνακας 5.3 - **Αποτελέσματα συγκομιδής**

	Πειραματικό	Παραδοσιακό	Διαφορά Παραγωγής	Ποσοστό κέρδους/απώλειας
Μικτό βάρος	24.050 kg	31.950 kg		
Απόβαρο φορτηγού	10.500 kg	18.380 kg		
Καθαρό βάρος	13.550 kg	13.570 kg		
Παραγωγή kg/στρ	490,94 kg/στρ	464,72 kg/στρ	+26,21kg/στρ	+5,6%

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο αγρό, ο παραγωγός κατάφερε να πετύχει επιπλέον παραγωγή 26,21 kg/ στρ. Η τιμή πώλησης στην αγορά που ισχύει τη στιγμή που συντάσσεται η παρούσα εργασία είναι 0,21 Ευρώ / κιλό σίτου.

Συνεπώς το οικονομικό όφελος που προσκόμισαν οι παραγωγοί ήταν 5,5 Ευρώ για κάθε στρέμμα καλλιέργειας. Αν σε αυτό προστεθεί και το οικονομικό όφελος από την εξοικονόμηση λιπάσματος, θα έχουμε ένα αντίστοιχο κέρδος 3 Ευρώ για κάθε στρέμμα. Το συνολικό όφελος του παραγωγού στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν 8,5 Ευρώ το στρέμμα.

Αγρόκτημα Δημήτρη Ευαγγελόπουλου

Παραγωγός

Περιοχή

Συντεταγμέ
νες αγρού

Συνολικά
στρέμματα

Στρ.
πειράματος

Στρ. παραδοσιακής
διαχείρισης

Δημήτρης Ευαγγελόπουλος	Περίβλεπτο Μαγνησίας	39.298474, 22.711423	47	23,4	23,6
----------------------------	-------------------------	-------------------------	----	------	------

Πληροφορίες Καλλιέργειας

Ημερομηνία σποράς: 11/11/16

Ποικιλία σίτου: Sveno

Πίνακας 5.4 - Εφαρμογές παραδοσιακής λίπανσης:

	Α' Δόση	Β' Δόση	Γ' Δόση
Ημερομηνία εφαρμογής	24/2/17	26/3/17	21/4/17
Τύπος λιπάσματος	Ουροθειική αμμωνία 40%	Νιτρική αμμωνία 36,5%	Νιτρική αμμωνία 36,5%
Τιμή λιπάσματος/kg	0,45 € / kg	0,36 € / kg	0,36 € / kg
Ποσότητα εφαρμογής	20 kg/στρ	10 kg/στρ	10 kg/στρ
Σύνολο κόστους εφαρμογής / στρ	9 € / στρ	3,6 € / στρ	3,6 € / στρ

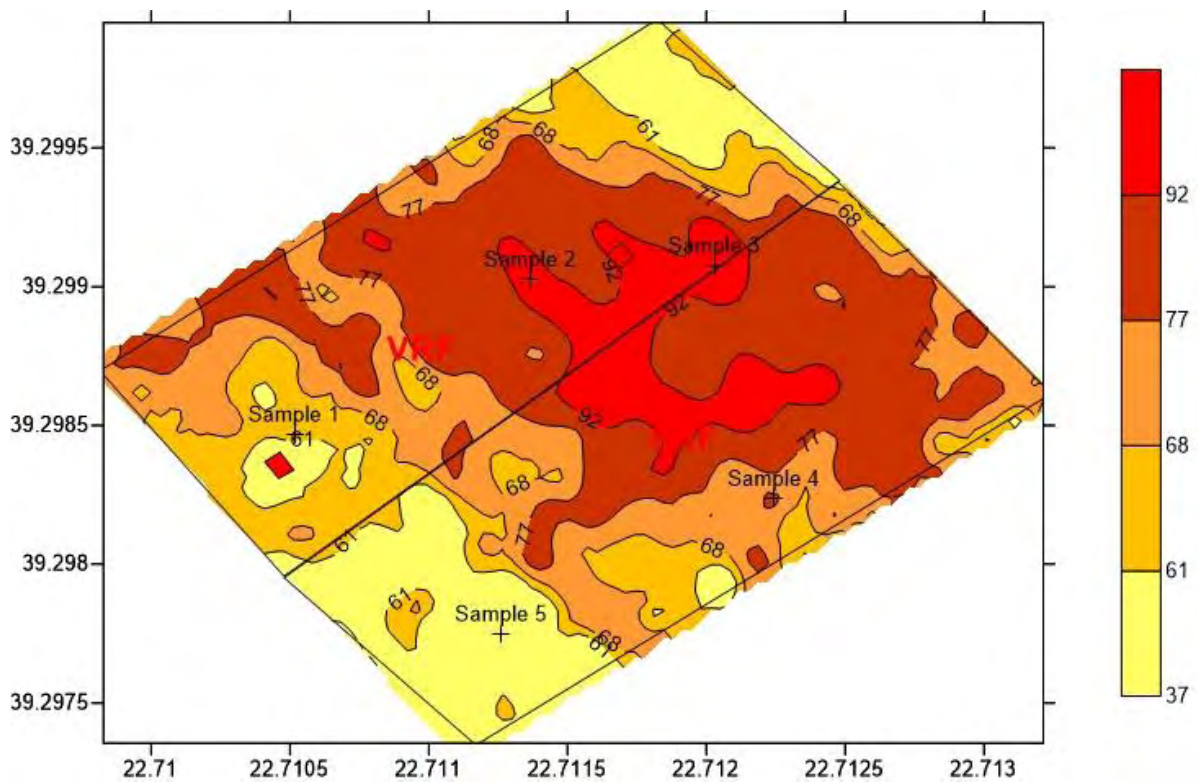
Πίνακας 5.5 - Εφαρμογές διαφοροποιημένης λίπανσης:

	Α' Δόση	Β' Δόση	Γ' Δόση
Ημερομηνία εφαρμογής	25/2/17	26/3/17	21/4/17
Τύπος λιπάσματος	Ουροθειική αμμωνία 40%	Νιτρική αμμωνία 36,5%	Νιτρική αμμωνία 36,5%
Τιμή λιπάσματος/kg	0,45 € / kg	0,36 € / kg	0,36 € / kg
Ποσότητα εφαρμογής	18 kg/στρ	8 kg/στρ	10 kg/στρ
Σύνολο κόστους εφαρμογής	8,1 € / στρ	2,88 € / στρ	3,6 € / στρ

Σχεδιάγραμμα αγρού και πειραμάτων



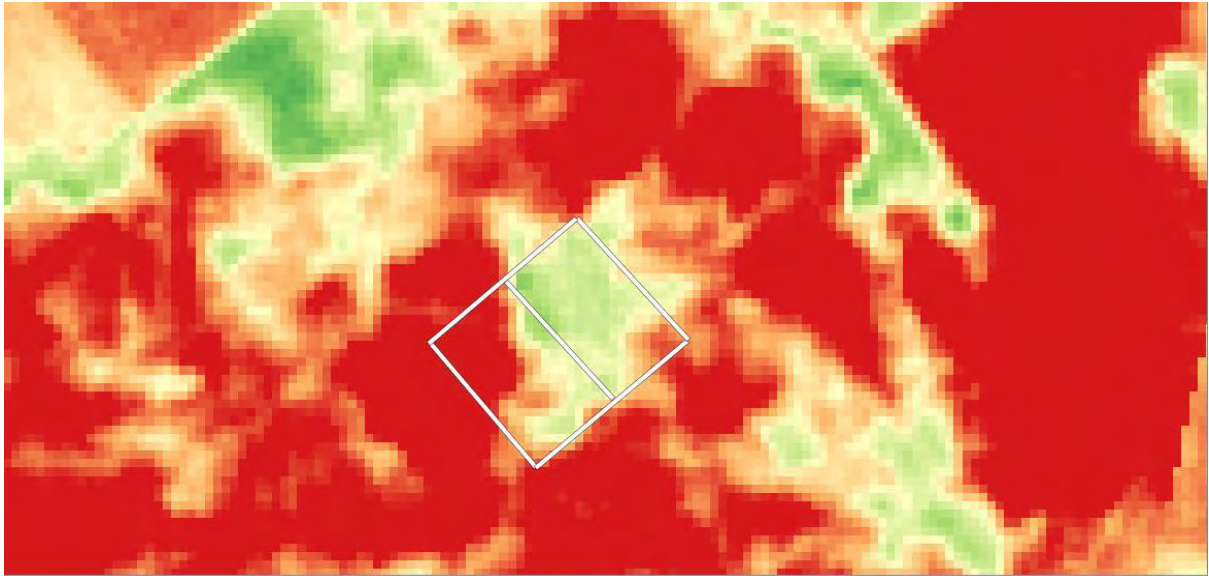
Σχήμα 5.7 - Σχεδιάγραμμα αγρού και πειραμάτων



Σχήμα 5.8 - Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας

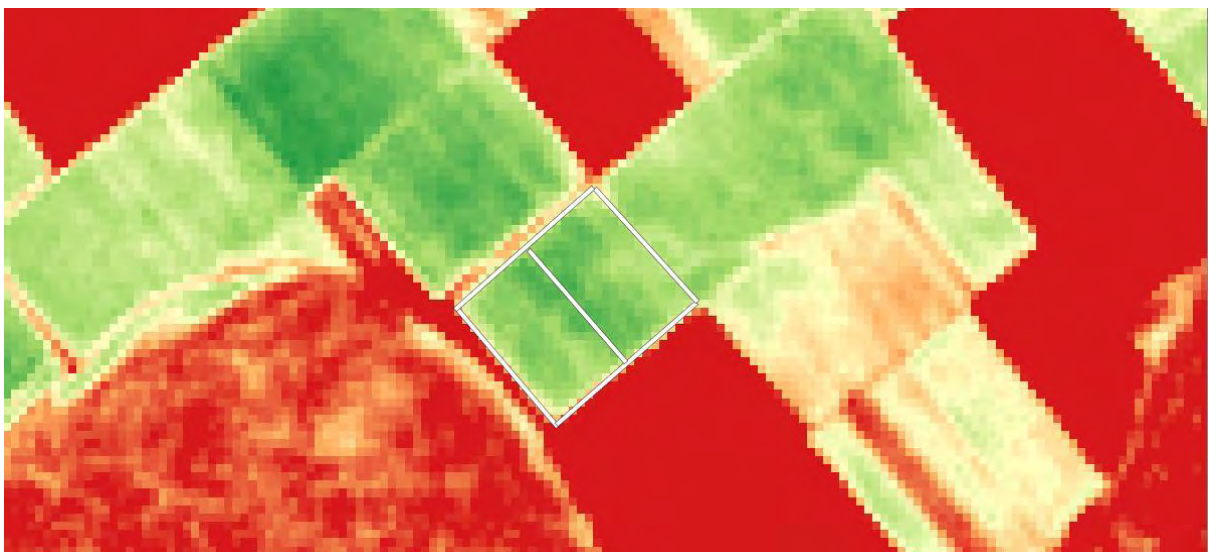
Χάρτες Θρέψης από δορυφόρο Sentinel

Δυστυχώς στον συγκεκριμένο αγρό μόνο μία μέτρηση του δορυφόρου έγινε με επιτυχία χωρίς την ύπαρξη σύννεφου πάνω από τον αγρό. Η μέτρηση αυτή έγινε στις 19/4. Αρκετά μετά τη δεύτερη λίπανση που έγινε στις 26/3 και λίγο πριν την τρίτη λίπανση στις 21/4. Οπότε θεωρείται ότι δεν είναι χρήσιμη για εξαγωγή συμπερασμάτων καθώς οι διαφορές έχουν την τάση να εξομαλύνονται όσο περνούν οι μέρες από μία λίπανση.



Σχήμα 5.8 - παράδειγμα μέτρησης δορυφόρου όπου τα σύννεφα δεν επιτρέπουν τη λήψη μετρήσεων. Ο αγρός έχει επισημανθεί

19/4/17



Σχόλια: Δεν εμφανίζεται ιδιαίτερη διαφορά στη θρέψη μεταξύ των δύο τμημάτων για το λόγο ότι η συγκεκριμένη μέτρηση έχει ληφθεί αρκετές μέρες μετά τη λίπανση και οι διαφορές στη θρέψη έχουν εξομαλυνθεί.

Πίνακας 5.6 - **Αποτελέσματα συγκομιδής**

	Πειραματικό	Παραδοσιακό	Διαφορά Παραγωγής	Ποσοστό κέρδους/απώλειας
Μικτό βάρος	30.080 kg	43.940 kg		
Απόβαρο φορτηγού	16.870 kg	30.080 kg		
Καθαρό βάρος	14.320 kg	13.860 kg		
Παραγωγή kg/στρ	611,96 kg/στρ	587,28 kg/στρ	+24,68 kg/στρ	+ 4,2%

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

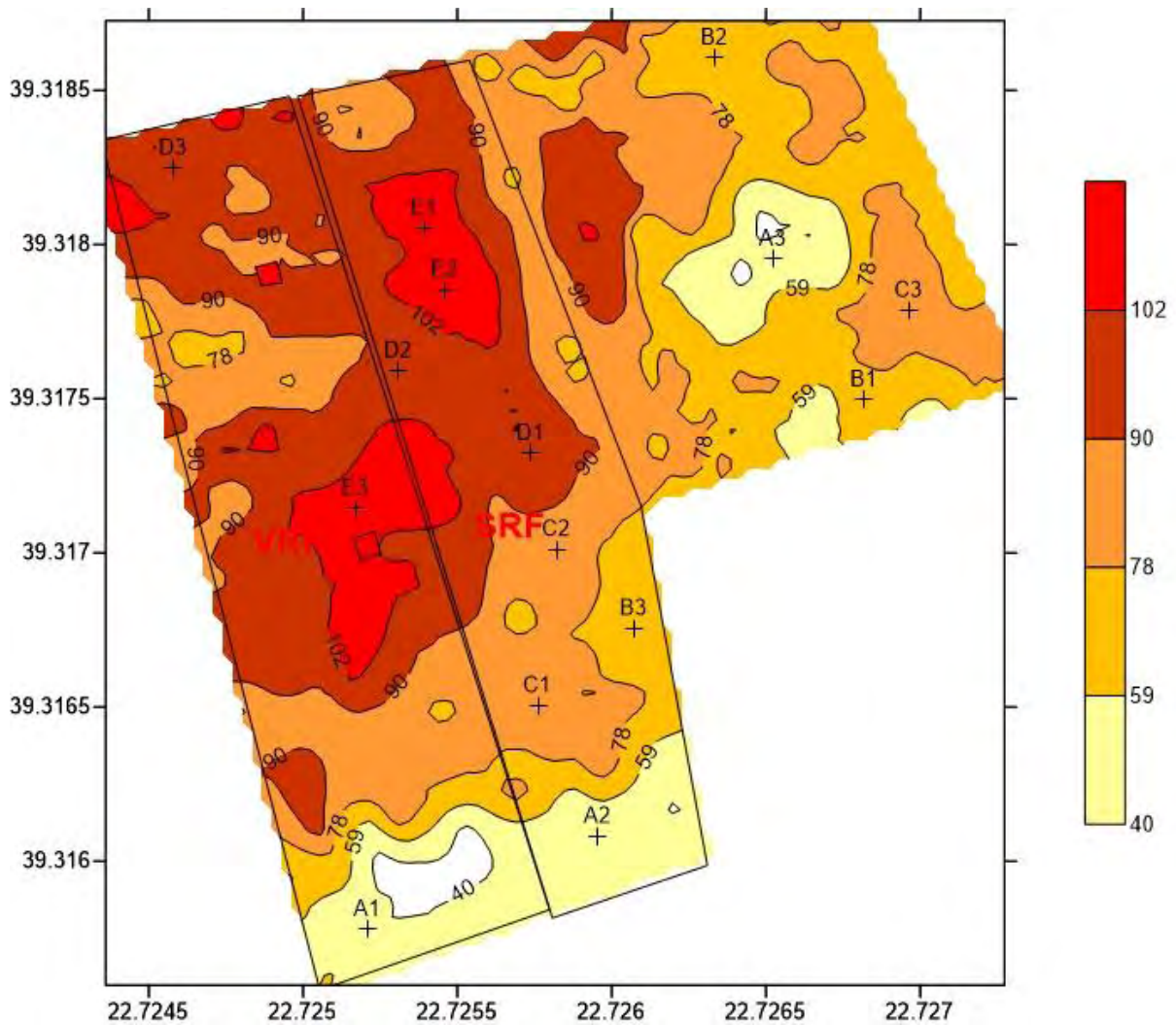
Στο συγκεκριμένο αγρό, ο παραγωγός κατάφερε να πετύχει επιπλέον παραγωγή 24,68 kg/ στρ. Η τιμή πώλησης στην αγορά που ισχύει τη στιγμή που συντάσσεται η παρούσα εργασία είναι 0,21 Ευρώ / κιλό σίτου.

Συνεπώς το οικονομικό όφελος που προσκόμισε ο παραγωγός ήταν 5,18 Ευρώ για κάθε στρέμμα καλλιέργειας. Αν σε αυτό προστεθεί και το οικονομικό όφελος από την εξοικονόμηση λιπάσματος, θα έχουμε ένα αντίστοιχο κέρδος 1,62 Ευρώ για κάθε στρέμμα. Το συνολικό όφελος του παραγωγού στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν 6,8 Ευρώ το στρέμμα.

Σχεδιάγραμμα αγρού και πειραμάτων



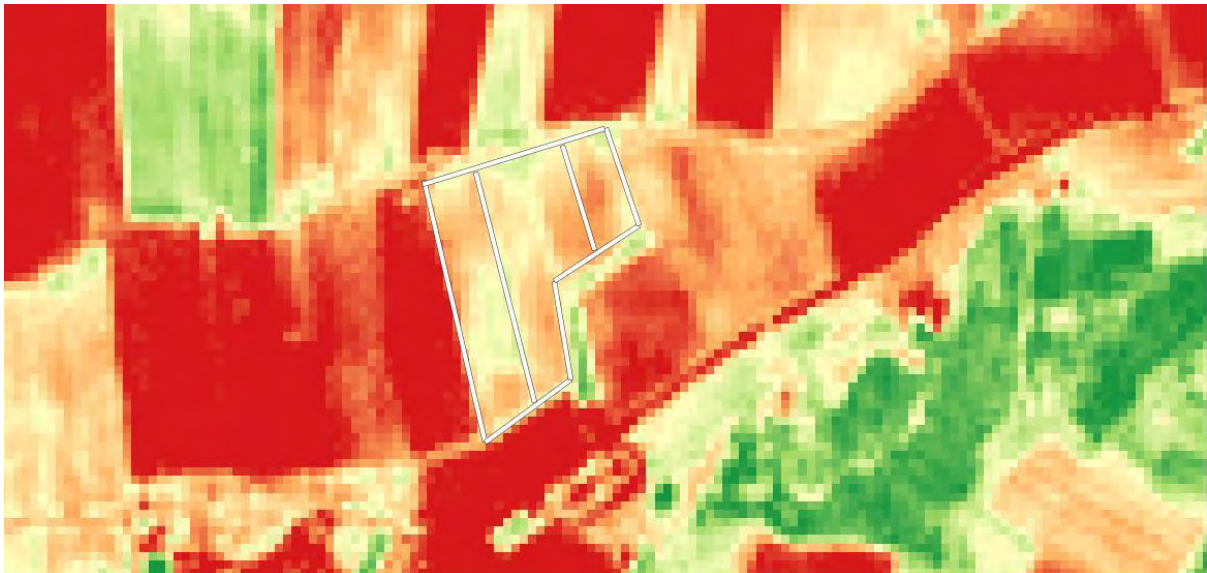
Σχήμα 5.9 – Διαχωρισμός παραδοσιακού και πειραματικού τμήματος



Σχήμα 5.10 - Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας

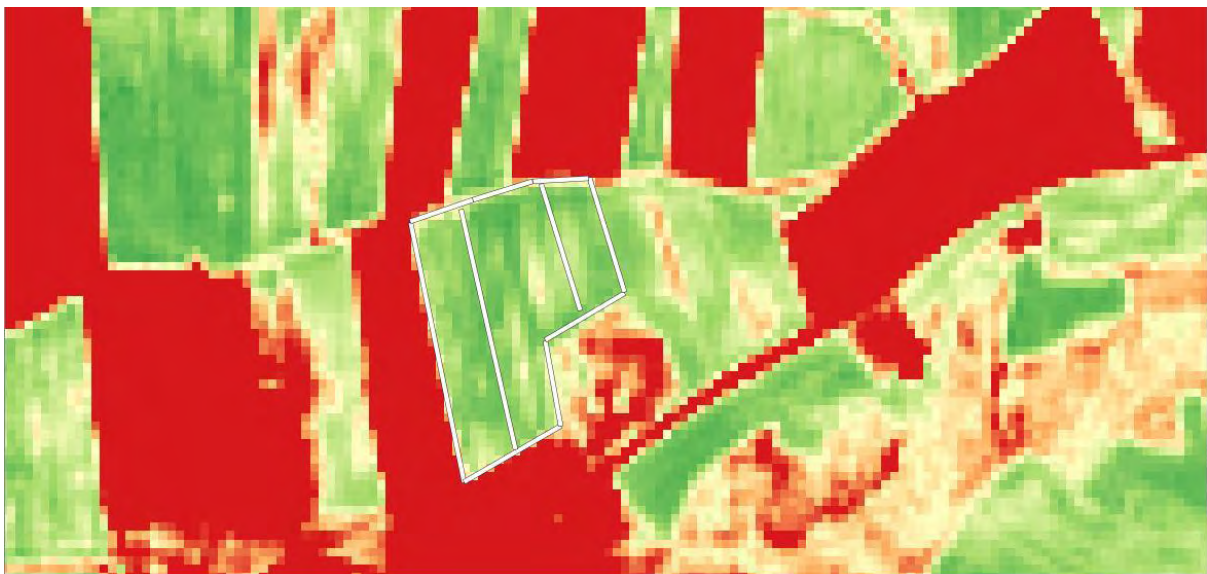
Χάρτες Θρέψης από δορυφόρο Sentinel

18/2/17



Σχόλια: Η συγκεκριμένη μέτρηση έλαβε χώρα λίγες μέρες πριν την πρώτη λίπανση. υπάρχουν κάποιες κακές εστίες και κάποιες καλύτερες και στα 2 τμήματα. Όπως θα δείξει ο χάρτης της επόμενης μέτρησης στις 3/3 δηλαδή μετά τη λίπανση, αποδεικνύεται πως στο πειραματικό τμήμα, οι κακές περιοχές περιορίστηκαν ή εξαλείφθηκαν εντελώς ενώ στο παραδοσιακό, παραμένουν.

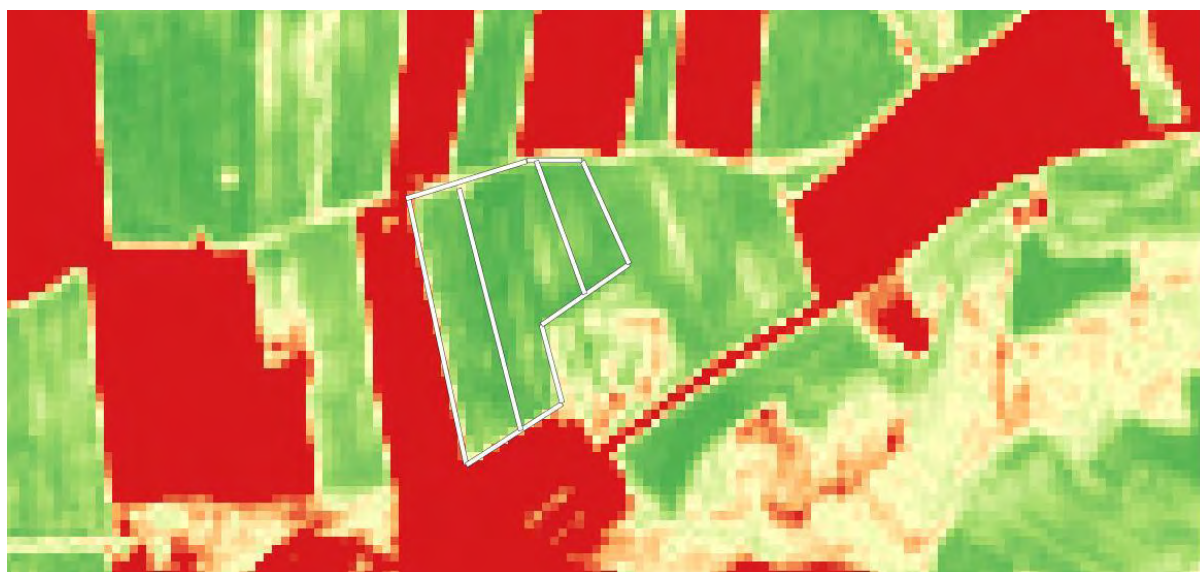
3/3/17



Σχόλια: Πρόκειται για μέτρηση που έγινε λίγες μέρες μετά τη λίπανση αφού ακολούθησε βροχή. Ομοίως με το αγροτεμάχιο των αδελφών Αγγελή, στην παρούσα μέτρηση εμφανίζονται έντονα τα πολύ καλά

αποτελέσματα της διαφοροποιημένης λίπανσης στα εξωτερικά τμήματα του αγρού, ενώ στο κεντρικό έχουμε δύο εστίες με πολύ κακή θρέψη.

9/4/17



Σχόλια: Φαίνεται ότι το κεντρικό τμήμα του αγροτεμαχίου που αποτελεί το τμήμα στο οποίο εφαρμόστηκε παραδοσιακή λίπανση, υπάρχουν δυο εστίες πολύ κακής θρέψης σε αντίθεση με το τμήμα όπου εφαρμόστηκε διαφοροποιημένη λίπανση.

Πίνακας 5.9 - **Αποτελέσματα συγκομιδής**

	Πειραματικό	Παραδοσιακό	Διαφορά Παραγωγής	Ποσοστό κέρδους/απώλειας
Καθαρό βάρος	14.730 kg	13.980 kg		
Παραγωγή kg/στρ	541,5 kg	521,6 kg	+19,9 kg/στρ	+3,8%

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο αγρό, ο παραγωγός κατάφερε να πετύχει επιπλέον παραγωγή 19,9 kg/ στρ. Η τιμή πώλησης στην αγορά που ισχύει τη στιγμή που συντάσσεται η παρούσα εργασία είναι 0,21 Ευρώ / κιλό σίτου.

Συνεπώς το οικονομικό όφελος που προσκόμισε ο παραγωγός ήταν 4,18 Ευρώ για κάθε στρέμμα καλλιέργειας. Αν σε αυτό προστεθεί και το οικονομικό όφελος από την εξοικονόμηση λιπάσματος, θα έχουμε ένα αντίστοιχο κέρδος 1,25 Ευρώ για κάθε στρέμμα. Το συνολικό όφελος του παραγωγού στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν 5,43 Ευρώ το στρέμμα.

Αγρόκτημα Απόστολου Μαυροειδή

Παραγωγός	Περιοχή	Συντεταγμένες αγρού	Συνολικά στρέμματα	Στρ. πειράματος	Στρ. παραδοσιακής διαχείρισης
-----------	---------	---------------------	--------------------	-----------------	-------------------------------

Απόστολος Μαυροειδής	Αερινό Μαγνησίας	39.332410, 22.746866	35,4	15,7	19,7
----------------------	------------------	-------------------------	------	------	------

Πληροφορίες Καλλιέργειας

Ημερομηνία σποράς: 17/11/16

Ποικιλία σίτου: Calori

Πίνακας 5.10 - Εφαρμογές παραδοσιακής λίπανσης:

	Α΄ Δόση	Β΄ Δόση	Γ΄ Δόση
Ημερομηνία εφαρμογής	24/2/17	28/3/17	Δεν έγινε
Τύπος λιπάσματος	Ουροθειική αμμωνία 40%	Νιτρική Αμμωνία 36,5%	
Τιμή λιπάσματος/kg	0,45 € / kg	0,36 € / kg	
Ποσότητα εφαρμογής	18 kg/στρ	19 kg/στρ	
Σύνολο κόστους εφαρμογής / στρ	8,1 € / στρ	6,84 / στρ	

Πίνακας 5.11 - Εφαρμογές διαφοροποιημένης λίπανσης

	Α΄ Δόση	Β΄ Δόση	Γ΄ Δόση
Ημερομηνία εφαρμογής	25/2/16 - έγινε σύμφωνα με παραδοσιακό τρόπο	28/3/17	Δεν έγινε
Τύπος λιπάσματος	Ουροθειική αμμωνία 40%	Νιτρική Αμμωνία 36,5%	

Τιμή λιπάσματος/kg	0,45 € / kg	0,36 € / kg	
Ποσότητα εφαρμογής	18 kg/στρ	21 kg/στρ	
Σύνολο κόστους εφαρμογής	8,1 € / στρ	7,56 € / στρ	

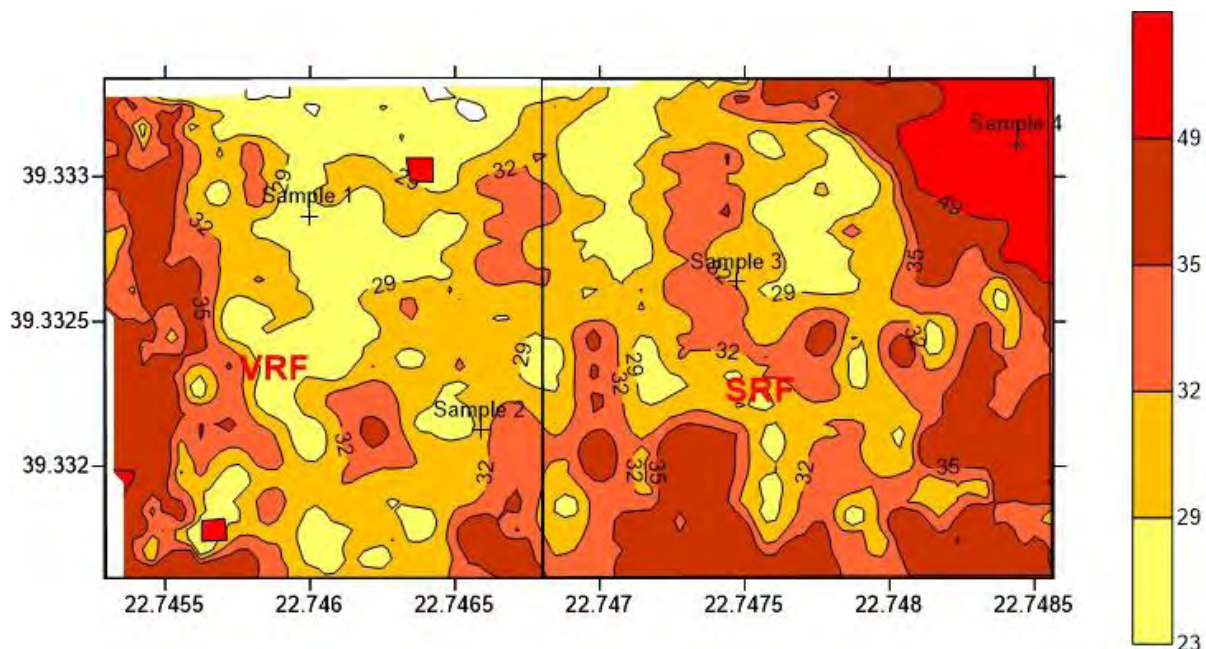
Σχεδιάγραμμα αγρού και πειραμάτων



Σχήμα 5.11 – Διαχωρισμός παραδοσιακού και πειραματικού τμήματος

Χάρτες Θρέψης από δορυφόρο Sentinel

Στον συγκεκριμένο αγρό εφαρμόστηκε διαφοροποιημένη λίπανση μόνο κατά τη δεύτερη εφαρμογή. Η πρώτη εφαρμογή έγινε από τον παραγωγό κατά τον παραδοσιακό τρόπο. Όλες οι μετρήσεις πριν και μετά τη δεύτερη λίπανση δεν είναι αξιοποιήσιμες καθώς τα σύννεφα δες μας επιτρέπουν να πάρουμε καθαρή εικόνα. Για τον συγκεκριμένο αγρό θα βασιστούμε μόνο στο ζύγισμα της παραγωγής.



Σχήμα 5.12 - Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας

Πίνακας 5.12 - Αποτελέσματα συγκομιδής

	Πειραματικό	Παραδοσιακό	Διαφορά Παραγωγής	Ποσοστό κέρδους/απώλειας
Μικτό βάρος	21.240 kg	18.280 kg		
Απόβαρο φορτηγού	13.160 kg	8900 kg		
Καθαρό βάρος	8080 kg	9380 kg		
Παραγωγή kg/στρ	514,65 kg/στρ	476,14 kg/στρ	+38,51 kg/στρ	+8%

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο αγρό, ο παραγωγός κατάφερε να πετύχει επιπλέον παραγωγή 38,51 kg/ στρ. Η τιμή πώλησης στην αγορά που ισχύει τη στιγμή που συντάσσεται η παρούσα εργασία είναι 0,21 Ευρώ / κιλό σίτου.

Συνεπώς το οικονομικό όφελος που προσκόμισε ο παραγωγός ήταν 8,08 Ευρώ για κάθε στρέμμα καλλιέργειας. Από την άποψη της λίπανσης, ο αλγόριθμος αποφάσισε να ρίξει λίγο περισσότερο λίπασμα σε σχέση με τον παραγωγό. Έτσι είχαμε 0,72 Ευρώ για κάθε στρέμμα. Το συνολικό όφελος του παραγωγού στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν 7,36 Ευρώ το στρέμμα.

Αγρόκτημα Alfa Seeds A.B.E.E.

Παραγωγός Περιοχή Συντεταγμένες Συνολικά Στρ. Στρ.
αγρού αγρού στρέμματα πειράματος παραδοσιακής
 διαχείρισης

ALFA SEEDS	Μεσοράχη	39.546112,	124,4	68,1	56,3
A.B.E.E.	Λάρισας	22.373471			

Πληροφορίες Καλλιέργειας

Ημερομηνία σποράς: 17/11/16

Ποικιλία σίτου: Normanno

Πίνακας 5.13 - Εφαρμογές παραδοσιακής λίπανσης:

	Α' Δόση	Β' Δόση	Γ' Δόση
Ημερομηνία εφαρμογής	24/2/16	Δεν έγινε	
Τύπος λιπάσματος	Ουροθειική αμμωνία 40%		
Τιμή λιπάσματος/kg	0,45 € / kg		
Ποσότητα εφαρμογής	20 kg/στρ		
Σύνολο κόστους εφαρμογής / στρ	9 € / στρ		

Πίνακας 5.14 - Εφαρμογές διαφοροποιημένης λίπανσης:

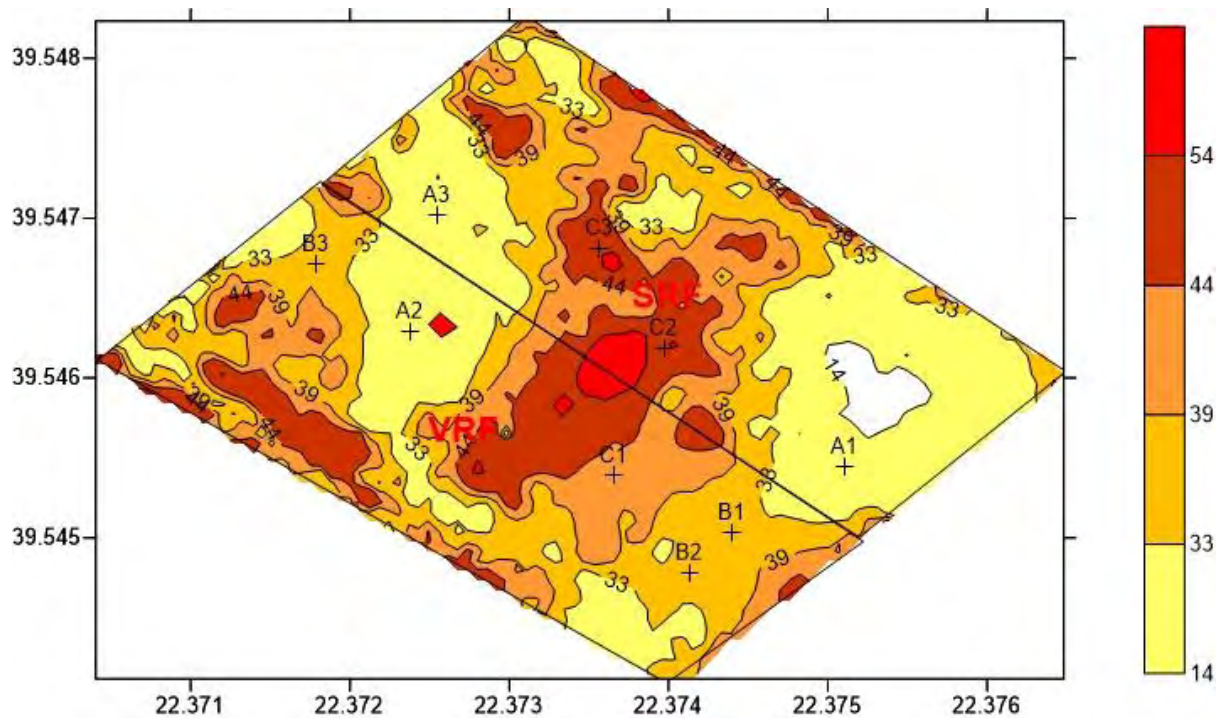
	Α' Δόση	Β' Δόση	Γ' Δόση
Ημερομηνία εφαρμογής	25/2/16	Δεν έγινε	Δεν έγινε
Τύπος λιπάσματος	Ουροθειική αμμωνία 40%		
Τιμή λιπάσματος/kg	0,45 € / kg		

Ποσότητα εφαρμογής	12,3 kg/στρ		
Σύνολο κόστους εφαρμογής	5,5 € / στρ		

Σχεδιάγραμμα αγρού και πειραμάτων



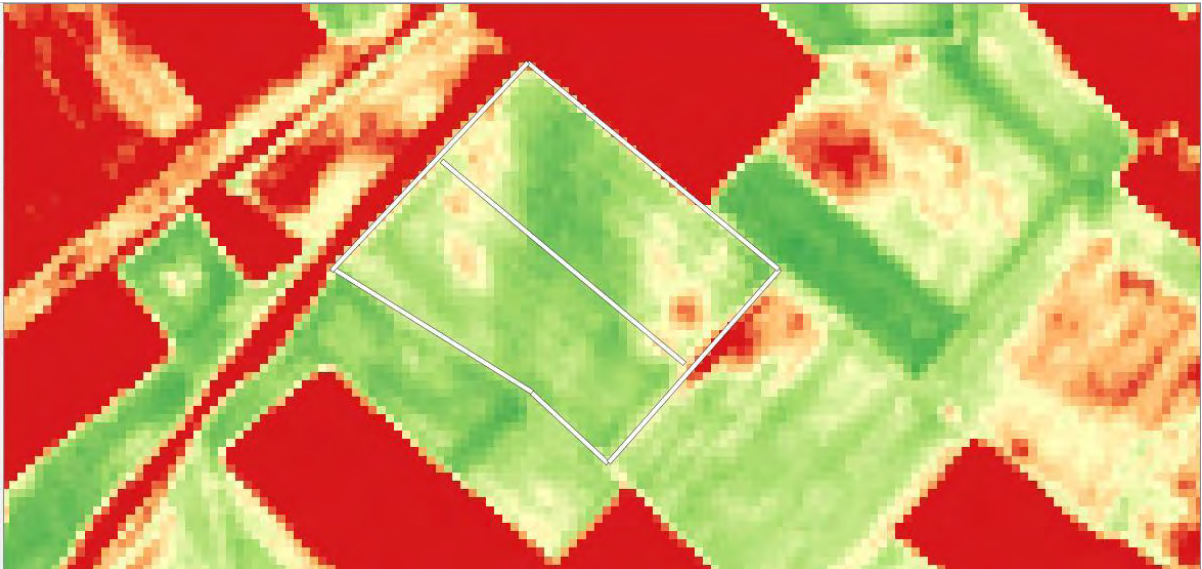
Σχήμα 5.13 – Διαχωρισμός παραδοσιακού και πειραματικού τμήματος



Σχήμα 5.14 – Χάρτης ηλεκτρικής αγωγιμότητας

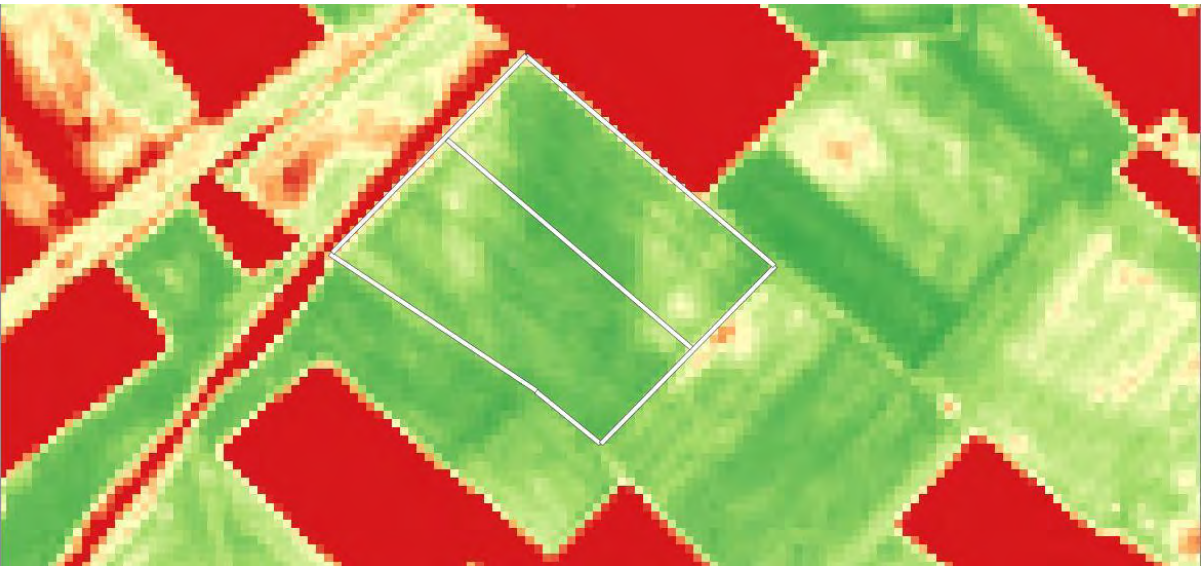
Χάρτες Θρέψης από δορυφόρο Sentinel

3/3/17



Σχόλια: Η μέτρηση έχει ληφθεί λίγες μέρες μετά την εφαρμογή της λίπανσης. Υπάρχουν κάποιες κακές εστίες που ακολουθούν τον χάρτη ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Δηλαδή στις περιοχές όπου το έδαφος ήταν πιο αμμώδες, παρατηρούμε και χειρότερη κατάσταση θρέψης. Δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της λίπανσης.

9/4/17



Σχόλιο: Και στα δύο τμήματα υπάρχουν εστίες με κακή θρέψη. Δεν μπορεί εύκολα να εξαχθεί συμπέρασμα για την αποτελεσματικότητα της λίπανσης. Το συμπέρασμα θα βασιστεί στο ζύγισμα της παραγωγής.

Χαρτογράφηση συγκομιδής

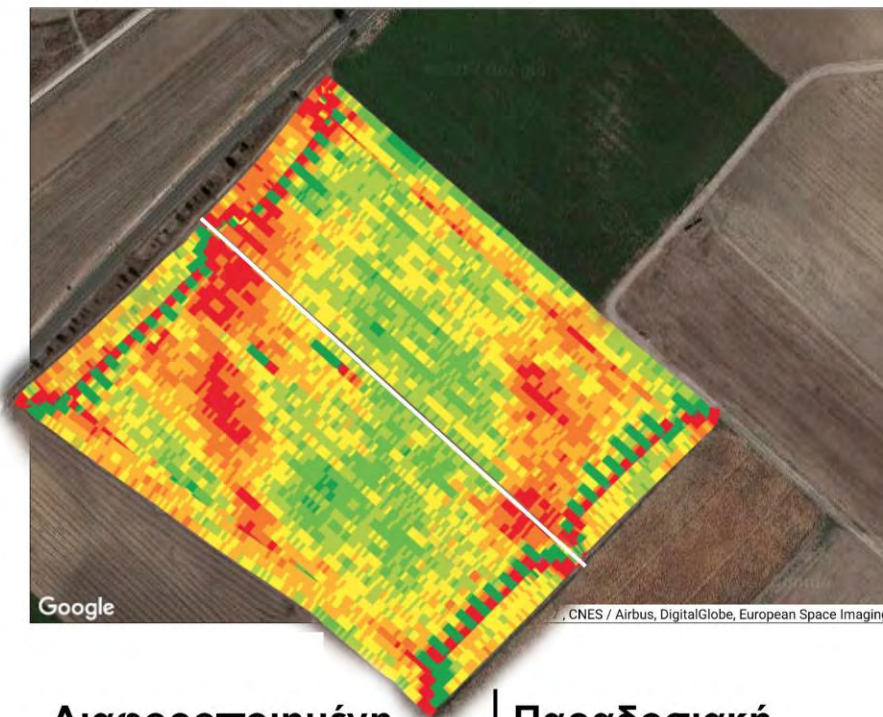
Το συγκεκριμένο αγροτεμάχιο συγκομίστηκε από μια σύγχρονη αλωνιστική μηχανή με δυνατότητα χαρτογράφησης της παραγωγής. Στον χάρτη που δημιουργήθηκε βλέπουμε πως υπάρχει εμφανώς η διαφορά της παραγωγής μεταξύ των 2 τμημάτων. Μεγαλύτερη στο αριστερό τμήμα όπου και χρησιμοποιήθηκε μέθοδος διαφοροποιημένης λίπανσης. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαίωσε και το πραγματικό ζύγισμα της παραγωγής. Σημείωση: Τα κιλά που παρουσιάζονται δεν είναι τα πραγματικά. Έπρεπε να ακολουθηθεί διαδικασία calibration του μηχανήματος χαρτογράφησης από τον χειριστή, κάτι που δεν έγινε. Όμως τα δεδομένα αν εξεταστούν αναλογικά, είναι σωστά.



Operations Center

2017 Wheat (Europe Winter): Harvest

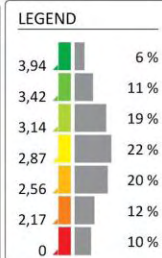
Layer: Dry Yield



Διαφοροποιημένη Λίπανση

Operation Dates: 06/15/2017 - 06/15/2017

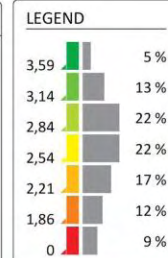
AGRONOMIC DATA	
DRY WEIGHT	AVG. WET WEIGHT
20,12 t	2,9 t/ha
AVG. DRY WEIGHT	
2,9 t/ha	
AVG. MSTR	
8,22 %	
AVG. SPEED	
9,01 km/h	
AREA WORKED	
6,93 ha	
WET WEIGHT	
20,12 t	



Παραδοσιακή Λίπανση

Operation Dates: 06/15/2017 - 06/15/2017

AGRONOMIC DATA	
DRY WEIGHT	AVG. WET WEIGHT
14,78 t	2,63 t/ha
AVG. DRY WEIGHT	
2,63 t/ha	
AVG. MSTR	
7,6 %	
AVG. SPEED	
8,66 km/h	
AREA WORKED	
5,62 ha	
WET WEIGHT	
14,78 t	



Σχήμα 5.15 – Χάρτης παραγωγής

Πίνακας 5.15 - **Αποτελέσματα συγκομιδής**

	Πειραματικό	Παραδοσιακό	Διαφορά Παραγωγής	Ποσοστό κέρδους/απώλειας
Μικτό βάρος	54.020 kg	34.230 kg		
Απόβαρο φορτηγού	30.570 kg	16.830 kg		
Καθαρό βάρος	23.450 kg	17.400 kg		
Παραγωγή kg/στρ	338,38 kg/στρ	309,06 kg/στρ	+29,32 kg/στρ	+9,4%

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο αγρό, ο παραγωγός κατάφερε να πετύχει επιπλέον παραγωγή 29,32 kg/ στρ. Η τιμή πώλησης στην αγορά που ισχύει τη στιγμή που συντάσσεται η παρούσα εργασία είναι 0,21 Ευρώ / κιλό σίτου.

Συνεπώς το οικονομικό όφελος που προσκόμισε ο παραγωγός ήταν 6,15 Ευρώ για κάθε στρέμμα καλλιέργειας. Αν σε αυτό προστεθεί και το οικονομικό όφελος από την εξοικονόμηση λιπάσματος, θα έχουμε ένα αντίστοιχο κέρδος 3,5 Ευρώ για κάθε στρέμμα. Το συνολικό όφελος του παραγωγού στο συγκεκριμένο πείραμα ήταν 9,65 Ευρώ το στρέμμα.

6. Συμπεράσματα

Το συγκεκριμένο έργο για να υλοποιηθεί, έπρεπε να ξεπεραστούν αρκετές δυσκολίες σε πολλά επίπεδα. Εκτός από τις τεχνικές δυσκολίες, κληθήκαμε να αντιμετωπίσουμε θέματα πολυπλοκότητας του γεωργικού πειραματισμού. Η φύση των εφαρμογών σε συνθήκες πραγματικών παραγωγών και το περιορισμένο διάστημα των δοκιμών (μια καλλιεργητική περίοδος) δεν επέτρεψε την τήρηση της κλασικής οδού του γεωργικού πειραματισμού η οποία προϋποθέτει επαναλήψεις στο χώρο και στο χρόνο. Αντί αυτού ακολουθήθηκε η προσέγγιση των πιλοτικών εφαρμογών, χωρίζοντας τα αγροτεμάχια σε δύο τμήματα στα οποία έγινε η εφαρμογή των δύο συγκρινόμενων τεχνικών, της παραδοσιακής με την εφαρμογή διαφοροποιημένης λίπανσης. Ο διαχωρισμός ωστόσο δεν έγινε τυχαία αλλά βασίστηκε τόσο στη προϊστορία των αγρών όσο και σε πρότερη χαρτογράφηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και τη λήψη δειγμάτων για την αναγνώριση της σύστασης του εδάφους. Σε κάθε αγρό, οι δύο υπό σύγκριση τεχνικές κατανεμήθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να καταλαμβάνουν περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά.

Ενθαρρυντικό είναι το γεγονός ότι τα αποτελέσματα αυτών των πρώτων δοκιμών παρουσιάζουν συνέχεια σε όλους τους υπό δοκιμή αγρούς συνηγορώντας στην αποτελεσματικότητα της νέας καλλιεργητικής τεχνικής. Το σύστημα διαφοροποιημένης λίπανσης απέδωσε σε όλους τους αγρούς που δοκιμάστηκε προσδίδοντας επιπλέον παραγωγή και στις περισσότερες περιπτώσεις εξοικονόμησε και λίπασμα.

Να σημειωθεί ότι στη παρούσα εργασία δεν μελετήθηκε η επίδραση στη ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος πλην μιας μόνο περίπτωσης, του αγροκτήματος Ευαγγελόπουλου. Τα στοιχεία από αυτό το τεμάχιο εμφανίζουν ένα επιπλέον όφελος για τον παραγωγό αλλά ιδίως για τη βιομηχανία τροφίμων. Συγκεκριμένα, τα επίπεδα πρωτεϊνών στο σπόρο για το τμήμα όπου εφαρμόστηκε διαφοροποιημένη λίπανση, ήταν 15,4% σε σύγκριση με το παραδοσιακό τμήμα όπου μετρήθηκε πρωτεΐνη 13,2%. Τα υψηλά επίπεδα πρωτεΐνης σημαίνουν υψηλή ποιότητα προϊόντος και επομένως προσδίδεται ένα επιπλέον όφελος για τους παραγωγούς που κάνουν χρήση του συστήματος διαφοροποιημένης λίπανσης για επίτευξη μιας καλύτερης τιμής πώλησης του προϊόντος και μιας αναβαθμισμένης διαπραγματευτικής ισχύος.

Πέρα από τα οφέλη, κατά τη διάρκεια των δοκιμών διαπιστώθηκαν και μια σειρά από ελλείψεις και προβλήματα που χρήζουν περαιτέρω βελτίωσης. Για παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε ένας μόνο αισθητήρας crop circle ο οποίος σάρωνε μια περιοχή πλάτους περίπου μισό μέτρο ενώ το πλάτος εργασίας στον συγκεκριμένο λιπασματοδιανομέα ήταν 10 μέτρα και σε άλλους λιπασματοδιανομείς μπορεί να φθάνει και τα 24 μέτρα. Ο αλγόριθμος επομένως που αναπτύχθηκε στηρίζεται σε δειγματοληψία μιας πολύ περιορισμένης έκτασης σε σχέση με την έκταση που γίνεται η εφαρμογή. Το πρόβλημα θα μπορούσε να επιλυθεί μελλοντικά εγκαθιστώντας περισσότερους από έναν αισθητήρες στον γεωργικό ελκυστήρα. Αυτό αυξάνοντας θα είχε ως συνέπεια την υπερβολική αύξηση του κόστους κατασκευής. Εναλλακτικά θα μπορούσε να γίνει χρήση μιας

υπερφασματικής ή πολυφασματικής κάμερας που θα μπορεί να λαμβάνει μέτρηση από όλη την επιφάνεια εργασίας και να παίρνει ακριβή μέσο όρο. Μεγάλη βελτίωση εκτιμάται ότι θα εμφανιστεί και στην περίπτωση χρησιμοποίησης ενός σύγχρονου λιπασματοδιανομέα σε σύγκριση με έναν παλαιότερης τεχνολογίας.

7. Αναφορές

- [1] Arnall, D.B., W.R. Raun, J.B. Solie, M.L. Stone, G.V. Johnson, K. Desta et al. 2006. Relationship between coefficient of variation measured by spectral reflectance and plant density at early growth stages in winter wheat. *J. Plant Nutr.* 29:1983–1997. doi:10.1080/01904160600927997
- [2] Bushong, J.T., J.L. Mullock, E.C. Miller, W.R. Raun, A.R. Klatt, and D. B. Arnall. 2015. Development of an in-season estimate of yield potential utilizing optical crop sensors and soil moisture data for winter wheat. *Prec. Agric.* doi:10.1007/s11119-016-9430-4
- [3] Franzen, D., Kitchen, N., Holland, K., Schepers, J., Raun, W., 2016. Algorithms for in-season nutrient management in cereals. *Agron. J.* 108, 1775–1781. doi:10.2134/agronj2016.01.0041
- [4] Girma, K., K.L. Martin, R.H. Anderson, D.B. Arnall, K.D. Brixey, M.A. Casillas et al. 2006. Mid-Season Prediction of Wheat Grain Yield Potential Using Plant, Soil, and Sensor Measurements. *J. Plant Nutr.* 29:873–897. doi:10.1080/01904160600649187
- [5] Holland, K.H., and J.S. Schepers. 2010. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. *Agron. J.* 102:1415–1424. doi:10.2134/agronj2010.0015
- [6] Lukina, E.V., K.W. Freeman, K.J. Wynn, W.E. Thomason, R.W. Mullen, A.R. Klatt et al. 2001. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. *J. Plant Nutr.* 24:885–898. doi:10.1081/PLN-100103780
- [7] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00648439/document>
- [8] https://www.ndsu.edu/fileadmin/soils/pdfs/Field_Soil_Sampling_Density.pdf
- [9] <http://www.mdpi.org/sensors/papers/s8053557.pdf>
- [10] <http://hollandscientific.com/portfolio/crop-circle-acs-470>
- [11] <https://www.decagon.com/en/canopy/canopy-measurements/spectral-reflectance-sensor-srs/>
- [12] <http://www.skf.com/binary/12-30013/CAHB-10Operatingmanual.pdf>
- [13] <http://www.teuniz.net/RS-232/>
- [14] <http://precisionag.com.au/files/2014/05/EM38-Mapping.pdf>
- [15] https://repository.kallipos.gr/pdfviewer/web/viewer.html?file=/bitstream/11419/2670/2/Master_Document_PrecisionAgriculture-%CE%9A%CE%9F%CE%A5.pdf

- [16] <http://www.bogballe.com/fertiliser-spreaders/l1-plus/general-info.html>
- [17] <http://www.bogballe.com/headland-management/gps-controlled-spreading.html>
- [18] <https://www.farmscanag.com/spreader-controller-7300/>
- [19] <https://www.soyl.com/services/variable-rate-nitrogen>
- [20] <http://www.dronesolutions.gr/georgia-anaptiksi.php>
- [21] <http://www.themitchellbrothers.co.uk/wp-content/uploads/2016/02/aerial-crop-mapping-dji.jpg>
- [22] <http://agreng.agr.uth.gr/system/files/imagepicker/1/CropCircle.jpg>
- [23] http://www.ums-muc.de/typo3temp/_processed_/csm_00CWC_9554df43d3.jpg
- [24] http://grobotronics.com/images/datasheets/Reed_Switch_1A66.pdf
- [25] http://3.bp.blogspot.com/_91PbzfW5648/TFN_c5cuy-I/AAAAAAAAArA/NiwUsEc8Afk/s1600/u2s5I3_01.gif
- [26] <http://www.skf.com/binary/21-138012/width150/CAHB-10.jpg>
- [27] http://raspi.tv/wp-content/uploads/2016/02/Pi3_1500.jpg
- [28] https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/computemodule/RPI-CM-DATASHEET-V1_0.pdf
- [29] <https://www.db9-pinout.com/>
- [30] *"RS485 serial information". Lammert Bies. August 2012. Retrieved 12 November 2012. – Practical information about implementing RS485*
- [31] <http://evangelopoulos.net/Report-RS485toRS232.pdf>
- [32] http://www.sdi-12.org/current_specification/SDI-12_version-1_4-May-1-2017.pdf
- [33] https://eprints.usq.edu.au/29188/1/Coppock_J_Bowtell_Hills.pdf
- [34] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21294E.pdf>
- [35] <http://www.mouser.com/ds/2/389/l78s-974158.pdf>
- [36] <https://www.pubs.ext.vt.edu/442/442-508/442-508.html>
- [37] Spyros Fountas¹, Katerina Aggelopoulou², Theofanis A. GEMTOS² Precision Agriculture: crop management for improved productivity and reduced environmental impact or improved sustainability.

- [38] Muñoz-Huerta, R.F., Guevara-Gonzalez, R.G., Contreras-Medina, L.M., Torres-Pacheco, I., Prado-Olivarez, J., Ocampo-Velazquez, R. V., 2013. A review of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. *Sensors (Basel)*. 13, 10823–10843. doi:10.3390/s130810823
- [39] Raun, W.R., and G.V. Johnson. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.* 91:357–363. doi:10.2134/agronj1999.00021962009100030001x
- [40] Raun, W.R., G.V. Johnson, M.L. Stone, J.B. Solie, E.V. Lukina, W.E. Thomason, and J.S.
- [41] Schepers. 2001. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agron. J.* 93:131–138. doi:10.2134/agronj2001.931131x
- [42] Raun, W.R., J.B. Solie, M.L. Stone, K.L. Martin, K.W. Freeman, R.W. Mullen et al. 2005. Optical sensor based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36:2759–2781. doi:10.1080/00103620500303988
- [43] Solari, F., J. Shanahan, R. Ferguson, J. Schepers, and A. Gitelson. 2008. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agron. J.* 100:571–579. doi:10.2134/agronj2007.0244
- [44] Solie, J.B., Dean Monroe, A., Raun, W.R., Stone, M.L., 2012. Generalized algorithm for variable-rate nitrogen application in cereal grains. *Agron. J.* 104, 378–387. doi:10.2134/agronj2011.0249
- [45] Σιμώνης, Α. και Κουκουλάκης, Π. (1989) «Το πρόβλημα της ορθολογικής λίπανσης των καλλιεργειών στην Ελλάδα, Τα χημικά λιπάσματα παρόν και μέλλον», Θεσσαλονίκη, Πρακτικά Ελληνικής Εδαφολογικής Εταιρίας
- [46] https://www.researchgate.net/profile/Katrine_Raundrup/publication/281554701/figure/fig2/AS:391511767306242@1470355087365/Figure-16-Equipment-for-measuring-NDVI-the-Crop-Circle-Handheld-System.png
- [47] <http://www.tronicore.com/images/rs232-pinout.jpg>
- [48] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f2/RS-485_waveform.svg/487px-RS-485_waveform.svg.png
- [49] SRS Spectral Reflectance Sensor - Operator's Manual, Decagon Devices, Inc. Version: July 17, 2014