



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
AGRICULTURAL UNIVERSITY OF ATHENS
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Ανάπτυξη ενός πρωτότυπου συστήματος
μεταβλητής λίπανσης σε μαρούλια**

Σοφία Χ. Μουσέτη

Επιβλέπων καθηγητής:

Σπυρίδων Φουντάς, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ

**ΑΘΗΝΑ
2021**

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη ενός πρωτότυπου συστήματος
μεταβλητής λίπανσης σε μαρούλια

“Development of a prototype variable rate
fertilization system for lettuce”

Σοφία Χ. Μουσέτη

Εξεταστική Επιτροπή:

Σπυρίδων Φουντάς, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ (επιβλέπων)

Διονύσιος Καλύβας, Καθηγητής ΓΠΑ

Κωνσταντίνος Αρβανίτης, Καθηγητής ΓΠΑ

Ανάπτυξη ενός πρωτότυπου συστήματος μεταβλητής λίπανσης σε μαρούλια

*ΠΜΣ Γεωπληροφορικής και Χωρικής Ανάλυσης
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη γρήγορων, οικονομικά αποδοτικών και αξιόπιστων μεθόδων για τη διάγνωση της κατάστασης της καλλιέργειας σε άζωτο κατά τη διάρκεια μιας σεζόν, είναι καθοριστική για την επιτυχία ευρύτερων εφαρμογών στρατηγικών διαχείρισης της λίπανσης, τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας χρήσης αζώτου και τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι περισσότεροι αγρότες έχουν κάποια στιγμή ασκήσει μια μορφή εφαρμογής μεταβλητού ποσοστού ακόμα και με ένα συμβατικό σύστημα ψεκασμού. Ωστόσο, φαίνεται ότι η μεταβλητή λίπανση είναι μια αργή προς υιοθέτηση τεχνολογία για διάφορους λόγους, με πιο σημαντικούς αυτούς που έχουν σχέση α) με τους περιορισμούς που θέτουν οι εξοπλισμοί, και β) τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει η κάθε καλλιέργεια. Οι συμβατικοί εξοπλισμοί μεταβλητής λίπανσης, παρουσιάζουν αρκετή πολυπλοκότητα και συνήθως κοστολογούνται σε χιλιάδες ευρώ. Στην παρούσα πτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκε ανάπτυξη ενός πρωτότυπου συστήματος μεταβλητής λίπανσης, με ελάχιστα έξοδα, α) σε επίπεδο λογισμικού με την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για τον υπολογισμό της βέλτιστης δόσης λιπάσματος και έναν αλγόριθμο για την εφαρμογή του λιπάσματος και β) σε επίπεδο υλικού με την ανάπτυξη ενός οικονομικού μικρού συστήματος μεταβλητής λίπανσης σε γραμμικές καλλιέργειες. Η μελέτη περιλαμβάνει μετρήσεις που ελήφθησαν την άνοιξη του 2019 σε πειραματικό αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Επιστημονική περιοχή: Γεωργία ακριβείας

Λέξεις κλειδιά: μεταβλητή λίπανση, μαρούλι, ηλεκτρική αγωγιμότητα, λίπανση αζώτου

Development of a prototype variable rate fertilization system for lettuce

MSc Geoinformatics and spatial analysis

Department of Natural Resources Utilization & Agricultural Engineering

ABSTRACT

The development of rapid, cost-effective and reliable methods for diagnosing the state of nitrogen cultivation during a season is crucial for the success of wider applications of fertilizer management strategies, the improvement of nitrogen utilization efficiency and the reduction of adverse environmental impacts. Most farmers have at some point practiced some form of variable rate application even with a conventional spray system. However, variable fertilization seems to be a slow technology to adopt for a number of reasons, the most important of which are related to a) the limitations of the equipment, and b) the specifics of each crop. Conventional variable fertilization equipment is quite complex and usually costs thousands of euros. In the present dissertation a prototype variable fertilization system was developed, with minimal costs, a) at the software level with the development of an algorithm for calculating the optimal fertilizer dose and an algorithm for the application of fertilizer and b) at the material level with the development an economical small variable fertilization system in linear crops. The study includes measurements taken in the spring of 2019 in an experimental field of the Agricultural University of Athens.

Scientific area: Precision agriculture

Keywords: variable fertilization, lettuce, electrical conductivity, nitrogen fertilization

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την διενέργεια και την συγγραφή της διατριβής αυτής, θα ήθελα να εκφράσω της ευγνωμοσύνη μου στους ανθρώπους που βρέθηκαν δίπλα μου κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών και αποτέλεσαν έμπνευση για τη συνέχιση της έρευνας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω στον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Σπ. Φουντά για την πολύτιμη καθοδήγηση του κατά την διάρκεια των σπουδών μου, όπως και για την επίβλεψη και διόρθωση της παρούσας μελέτης. Επίσης, ευχαριστώ πολύ τα δύο άλλα μέλη της τριμελούς επιτροπής της διατριβής μου, τους Καθηγητές του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κο Καλύβα και Δημήτριο Αρβανίτη, όπως επίσης και τον Δημήτριο Λουκάτο για την συμβολή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ευχαριστώ ιδιαίτερω τον Κωνσταντίνο Δαγρέ, τελειόφοιτο του Τμήματος Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων, για τον βοήθεια στην διενέργεια του πειράματος, τους συνάδελφους Λουκά Αθανασάκο και τον Μιχάλη Γεράσιμο Κουτσιαρά, για την συμβολή και την υποστήριξη στο μηχανολογικό εξοπλισμό που απαιτήθηκε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την συνάδελφο Νικολέτα Δάρρα για τις συμβουλές στο σχεδιασμό της μεθοδολογίας και τον Κωνσταντίνο Γριβάκη για την βοήθεια στις πτήσεις με το drone. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους συναδέλφους που βοήθησαν στην συγκομιδή των 1900 μαρουλιών μετά το πέρας του πειράματος, προκειμένου να μην καταστραφούν, αλλά να διατεθούν σε υπηρεσίες σίτισης του Δήμου Αθηναίων και στην κοινωνική κουζίνα «Ο άλλος άνθρωπος».

Περιεχόμενα

Κατάλογος εικόνων.....	9
Κατάλογος σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων	10
Συντομογραφίες.....	11
1 Γεωργία ακριβείας	12
1.1 Εισαγωγή.....	12
1.1.1 Ορισμός και στόχος της γεωργίας ακριβείας	12
1.1.2 Έξυπνη γεωργία	15
1.1.3 Η γεωργία στην Ελλάδα.....	16
1.1.4 Δυσκολίες υιοθέτησης της γεωργίας ακριβείας στην Ελλάδα.....	17
1.2 Τεχνολογίες της Γεωργίας Ακριβείας	18
1.2.1 Παγκόσμια συστήματα εντοπισμού θέσης (GNSS)	18
1.2.1.1 Ανάγκη για μεγαλύτερη ακρίβεια στις εφαρμογές μεταβλητών δόσεων ..	20
1.2.1.2 Διαφορικό GPS (Differential GPS - DGPS).....	20
1.2.1.3 Real Time Kinematic (RTK) GPS.....	21
1.2.2 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographic Information System)....	21
1.2.2.1 Χρήση GIS για Γεωργία Ακριβείας	24
1.2.3 Τηλεπισκόπηση.....	24
1.2.3.1 Εφαρμογές τηλεπισκόπησης στην γεωργία ακριβείας	30
1.2.4 Εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις	31
2 Εφαρμογή λίπανσης μεταβλητής δόσης	34
2.1 Βαθμονόμηση λιπασματοδιανομέα.....	34
2.2 Μέθοδοι εφαρμογής λιπάσματος μεταβλητού ρυθμού.....	36
2.2.1 Ζώνες διαχείρισης (Management Zones).....	36
2.2.2 Μεταβλητές μεταχειρίσεις βάσει χάρτη	39
2.2.2.1 Τι είναι ο χάρτης εφαρμογής.....	39
2.2.2.2 Δημιουργία του χάρτη εφαρμογής.....	41
2.2.3 Μεταβλητές μεταχειρίσεις βάσει αισθητήρων.....	43
2.2.4 Παραδείγματα συστημάτων εφαρμογής μεταβλητών δόσεων με βάση αισθητήρες.....	46
2.2.4.1 Greenseeker.....	47
2.2.4.2 Yara N-Sensor.....	48
2.2.4.3 OptRx	49

2.2.4.4	Augmenta.....	50
2.3	Συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή μεταβλητού ρυθμού λιπάσματος αζώτου	51
2.4	Το μαρούλι ως μελέτη περίπτωσης για τη μεταβλητή λίπανση	54
2.4.1	Βοτανικοί Χαρακτήρες	56
2.4.2	Συνθήκες Καλλιέργειας.....	57
2.4.3	Βασική Λίπανση	58
2.4.4	Ανόργανη λίπανση	59
2.4.5	Επιφανειακή λίπανση	59
2.4.6	Συγκομιδή – Αποδόσεις	60
3	Σκοπός της παρούσας μελέτης.....	61
4	Υλικά και μέθοδοι	63
4.1	Περίληψη	63
4.2	Προετοιμασία του αγρού	64
4.2.1	Δειγματοληψία του εδάφους.....	64
4.2.2	Ανάλυση του εδάφους.....	65
4.3	Μεθοδολογία προσδιορισμού του απαιτούμενου αζώτου	67
4.3.1	Υπολογισμός δόσεων για την καλλιέργεια του μαρουλιού	69
4.4	Εγκατάσταση του πειραματικού αγρού και του αρδευτικού συστήματος.....	70
4.5	Πορεία της καλλιέργειας και μετρήσεις.....	72
4.5.1	Πολυκαναλική φασματική μέτρηση με το RapidSCAN CS-45	75
4.5.2	Πολυφασματικές εικόνες με κάμερα Sequioa τοποθετημένη σε drone	78
4.5.3	Λοιπές μετρήσεις	79
4.5.3.1	Μετρήσεις με μετρητή χλωροφύλλης AtLEAF (13 και 20 Μαΐου 2019)	79
4.5.3.2	Μέγεθος των φυτών μαρουλιού ανά επεξεργασία	80
4.5.3.3	Βάρος φυτών μαρουλιού ανά επεξεργασία.....	80
4.6	Το πρωτότυπο σύστημα που αναπτύχθηκε	80
4.6.1	Το υλικό.....	80
4.6.1.1	Μικροϋπολογιστής - Raspberry Pi 3B+.....	80
4.6.1.2	GPS δέκτης και NMEA.....	83
4.6.1.3	Δομή μηνυμάτων NMEA.....	86
4.6.1.4	Λιπασματοδιανομέας και βαθμονόμηση.....	88
4.6.1.5	Ο ενεργοποιητής.....	89
4.6.2	Λογισμικό	91
4.6.2.1	Η γλώσσα Python.....	91
4.6.3	Ο αλγόριθμος για την κίνηση και την εφαρμογή του λιπάσματος.....	93

4.7	Μελέτη περίπτωσης για τη δοκιμή του συστήματος.....	98
4.7.1	Ανάλυση των μετρήσεων και δημιουργία του χάρτη εφαρμογής.....	98
5	Αποτελέσματα και συζήτηση.....	103
5.1	Η τελική δοκιμή στον αγρό.....	103
5.2	Συζήτηση και προτάσεις βελτίωσης του συστήματος.....	106
	Βιβλιογραφία.....	110
	Ξενόγλωσση.....	110
	Ελληνόγλωσση.....	113

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. Αναρτώμενος λιπασματοδιανομέας στον οποίο η ποσότητα του λιπάσματος που εφαρμόζεται αλλάζει με επέμβαση στο χειρομοχλό 1.	35
Εικόνα 2 Αισθητήρας που χρησιμοποιεί το Greenseeker (αριστερά) και ενσωμάτωσή του σε εφαρμογέα μεταβλητής ροής (δεξιά)	47
Εικόνα 3. Αισθητήρας που χρησιμοποιεί το Yara N-sensor (πάνω) και τρόπος λειτουργίας του (κάτω).....	49
Εικόνα 4. Αισθητήρας που χρησιμοποιεί το OptRx.....	50
Εικόνα 5. Αισθητήρας που χρησιμοποιεί το σύστημα της Augmenta	51
Εικόνα 6. Ποικιλία μαρουλιού τύπου Cos ή Romana.....	56
Εικόνα 7. Οι τελικές δόσεις ζυγίστηκαν με ζυγό ακριβείας πριν εφαρμοστούν με βάση το πειραματικό σχέδιο	70
Εικόνα 8. Εγκατάσταση του αρδευτικού συστήματος	73
Εικόνα 9. Φύτευση των 1700 ριζών μαρουλιού μετά την εγκατάσταση του αρδευτικού συστήματος.....	73
Εικόνα 10. Η φύτευση έγινε σύμφωνα με το πειραματικό σχέδιο	74
Εικόνα 11. Φύτευση επιπλέον 200 ριζών μαρουλιού μέσα στο θερμοκήπιο	74
Εικόνα 12. Η κατάσταση της καλλιέργειας 2 εβδομάδες μετά την φύτευση	75
Εικόνα 13. Ο αισθητήρας RapidSCAN CS-45.....	77
Εικόνα 14. Η πολυφασματική κάμερα Parrot Sequoia	78
Εικόνα 15. Πτήση με drone πάνω από τα μαρούλια και ορθομωσαϊκός χάρτης.....	79
Εικόνα 16. Ο μετρητής χλωροφύλλης AtLEAF	80
Εικόνα 17. Raspberry Pi 3 Model B, ο μικροεπεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε	81
Εικόνα 18. Ένας απλός δέκτης GPS, που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα	84
Εικόνα 19. Λιπασματοδιανομέας περιστρεφόμενου δίσκου, ιδανικός για κοκκώδες λίπασμα	88
Εικόνα 20. Γραμμικός ενεργοποιητής ip54, 12V, 250mm.....	90
Εικόνα 21. Τα επιπλέον βοηθητικά μέρη του συστήματος.....	90
Εικόνα 22. Οι βασικές βιβλιοθήκες της Python που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάγνωση των δεδομένων, τον υπολογισμό των θέσεων και την προβολή των αποτελεσμάτων την οθόνη	93
Εικόνα 23. Μια γενική επισκόπηση του αλγορίθμου γραμμένου σε Python3 με τα βασικά του συστατικά μέρη α) ανάγνωση της συμβολοσειράς NMEA από τον δέκτη GPS και β) ανάγνωση του χάρτη εφαρμογής σε μορφή shapefile	95
Εικόνα 24. Μια γενική επισκόπηση του αλγορίθμου γραμμένου σε Python3, για την κίνηση του ενεργοποιητή και τις αλλαγές θέσης.....	96
Εικόνα 25. Φυτά μαρουλιού στον ανοιχτό πειραματικό αγρό (Ημερ: 12 Μαΐου 2019)	98
Εικόνα 26. Φυτά μαρουλιού στον ανοιχτό πειραματικό αγρό (Ημερ: 12 Μαΐου 2019)	99
Εικόνα 27. Το επίπεδο που προκύπτει στο QGIS, μετά την είσοδο των τιμών που προέκυψαν από το Rapidscan στις 12 Μαΐου	101
Εικόνα 28. Interpolation με την μέθοδο IDW (Inverse Distance Weighted).....	101
Εικόνα 29. Τελική μορφή του χάρτη εφαρμογής	102
Εικόνα 30. Τα βασικά συστατικά του υλικού του πρωτότυπου συστήματος.....	103
Εικόνα 31. Ο λιπασματοδιανομέας μαζί με το υπόλοιπο υλικό προσαρτημένο στην γουρούνα μέσα στον αγρό με τα μαρούλια.....	104

Εικόνα 32. Δοκιμή όλου του συστήματος ανάμεσα στις γραμμές φύτευσης (22 Μαΐου 2019)	105
---	-----

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1. Η δομή μιας βασικής πλατφόρμας έξυπνων αντικειμένων	16
Σχήμα 2. Απεικόνιση των 3 βασικών συστατικών μερών του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού θέσης (Global Positioning System).	20
Σχήμα 3. Τεχνικές προσδιορισμού θέσης (i) Differential GPS και (ii) RTK GPS	22
Σχήμα 4. Τα βασικά συστατικά από τα οποία αποτελείται ένα Γεωπληροφοριακό Σύστημα (GIS)	23
Σχήμα 5. Οι πιθανές αλληλεπιδράσεις της ηλιακής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα, το έδαφος και τα φυτά	26
Σχήμα 6.: Η φασματική απόκριση ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας	27
Σχήμα 7. Ένας χάρτης συνταγών με επτά καθορισμένες ζώνες. Το υπολογιστικό φύλλο περιέχει δεδομένα δοκιμών εδάφους που δείχνουν πώς συνδέονται οι ζώνες με τα αποτελέσματα δοκιμών εδάφους	41
Σχήμα 8. Χάρτης εφαρμογής αζωτούχου λιπάσματος για μια καλλιέργεια βαμβακιού. Τα διαφορετικά χρώματα αντιπροσωπεύουν διαφορετικές δόσεις λιπάσματος.	43
Σχήμα 9. Παράδειγμα ενός συστήματος εφαρμογής μεταβλητών δόσεων υγρού λιπάσματος με βάση αισθητήρες	44
Σχήμα 10. Πλέγμα δειγματοληψίας και θέσεις μετέπειτα φύτευσης των φυτών	65
Σχήμα 11. Ατομικές μάζες των στοιχείων που αποτελούν το μόριο NH ₄ NO ₃ .	69
Σχήμα 12. Η διάταξη των φυτών και οι αποστάσεις μέσα σε ένα κελί φύτευσης	71
Σχήμα 13. Το σχέδιο για το αρδευτικό σύστημα που εγκαταστάθηκε στον αγρό	72
Σχήμα 14. Οι ακροδέκτες GPIO του Raspberry Pi 3.	83
Σχήμα 15. Παράδειγμα μια συμβολοσειράς NMEA	86
Σχήμα 16. Παράδειγμα των αποτελεσμάτων που παράγει ο αλγόριθμος ανάγνωσης του χάρτη εφαρμογής	97
Σχήμα 17. Η πορεία του δείκτη NDVI	99
Σχήμα 18. Η πορεία του δείκτη NDRE	100

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Βασικοί δείκτες βλάστησης, χρήσιμοι στην μεταβλητή λίπανση	28
Πίνακας 2. Βασικές διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων μεταβλητών μεταχειρίσεων	45
Πίνακας 3. Ανάλυση χημικής σύστασης του εδάφους	66
Πίνακας 4. Πειραματικό σχέδιο	71
Πίνακας 5. Τα βασικά χαρακτηριστικά του Raspberry Pi συνοπτικά	82
Πίνακας 6. Βαθμονόμηση λιπασματοδιανομέα σε 10 βαθμίδες, με 3 επαναλήψεις για κάθε μια από τις 2 επιλεγμένες ταχύτητες	89
Πίνακας 7. Οι 4 ζώνες λίπανσης και η αντιστοίχιση τους με τις απαιτούμενες δόσεις λιπάσματος	102
Πίνακας 8. Τα αποτελέσματα μετά την δοκιμαστική εφαρμογή στον αγρό	105

Συντομογραφίες

- ΓΑ – Γεωργία Ακριβείας
- DGPS – Differential Global Positioning System
- ESA – European Space Agency
- FAO – Food and Agriculture Organization
- GIS – Geographic Information System
- GNSS – Global Navigation Satellite System
- GPS – Global Positioning System
- IoT – Internet of Things
- MVP – Minimum Viable Product
- MZ – Management Zone
- NMEA – National Marine Electronics Association
- PA – Precision Agriculture
- PNM – Precision Nitrogen Management
- RPi – Raspberry Pi
- RTK – Real Time Kinematic
- TIR – Thermal Infra Red
- UAV – Unmanned Aerial Vehicle
- VHR – Very High Resolution
- VI – Vegetation Index
- VIS-NIR – Visual-Near Infra Red
- VRA – Variable Rate Application

1 Γεωργία ακριβείας

1.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με την πρόσφατη έκθεση του FAO, ο παγκόσμιος πληθυσμός θα ξεπεράσει τα 9,0 δισεκατομμύρια άτομα έως το έτος 2050 (FAO, 2009). Θα πρέπει να ξεπεραστούν σημαντικές προκλήσεις προκειμένου να επιτευχθεί το επίπεδο γεωργικής παραγωγικότητας που απαιτείται για την κάλυψη της προβλεπόμενης παγκόσμιας ζήτησης για τρόφιμα, ζωοτροφές, ίνες και καύσιμα το 2050. Αν και η γεωργία έχει αντιμετωπίσει σημαντικές προκλήσεις στο παρελθόν, θα πρέπει να επιτευχθούν στοχευμένες αυξήσεις της παραγωγικότητας μέχρι το 2050, ενόψει των αυστηρών περιορισμών που περιλαμβάνουν περιορισμένους πόρους, λιγότερη εξειδικευμένη εργασία, περιορισμένη ποσότητα αρόσιμης γης αλλά και το μεταβαλλόμενο κλίμα, μεταξύ άλλων.

Για το μεγαλύτερο μέρος του 20ού αιώνα, πολλοί βασικοί παράγοντες επηρέασαν τις αυξήσεις του ρυθμού παραγωγής των καλλιεργειών, κυρίως η μηχανοποίηση, η βελτιωμένη γενετική και η αυξημένη χρήση εισροών. Ωστόσο, μια τέτοια αύξηση της παραγωγής των καλλιεργειών προκάλεσε το κόστος της υπερπροσφοράς διαφόρων γεωργικών εισροών, δηλαδή άρδευσης, θρεπτικών ουσιών και φυτοφαρμάκων. Η χρήση υψηλής έντασης πόρων γεωργίας σε όλο τον κόσμο οδήγησε σε εξάντληση των εδαφών, λειψυδρία, εκτεταμένη αποψίλωση των δασών και υψηλά επίπεδα εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (FAO, 2017). Επί του παρόντος, η γεωργική παραγωγή αντιπροσωπεύει πάνω από το 70% της κατανάλωσης γλυκού νερού και μη βιώσιμα επίπεδα χημικής κατανάλωσης για την παραγωγή καλλιεργειών. Ως εκ τούτου, η βιωσιμότητα στη γεωργία είναι απαραίτητη που καθίσταται ανάγκη όχι μόνο λόγω της έλλειψης φυσικών πόρων και της αύξησης του πληθυσμού, αλλά και για την αυξανόμενη προσοχή που αξίζει στην ευημερία και τον πράσινο τρόπο ζωής. Η γεωργία πρέπει να παρέχει αποτελεσματικές λύσεις σε παλιές και νέες προκλήσεις για να αγκαλιάσει τις γνώσεις άλλων κλάδων και να τις χρησιμοποιήσει με ολοκληρωμένο τρόπο.

1.1.1 Ορισμός και στόχος της γεωργίας ακριβείας

Με τον όρο Γεωργία Ακριβείας - ΓΑ (Precision Agriculture - PA) ορίζουμε τη διαχείριση της χωρικής και χρονικής διαφοροποίησης των αγρών προκειμένου να βελτιωθεί η αποδοτικότητα των αγροκτημάτων και/ή να επιτευχθεί μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον από την μη ορθολογική χρήση των εισροών (Γέμτος κ.ά., 2002). Η Γεωργία Ακριβείας εμφανίζεται ως μία από τις πολλές λύσεις στις μεγάλες προκλήσεις που αντιμετωπίζει σήμερα η γεωργία και ο κόσμος μας. Στη

Η Γεωργία Ακριβείας βασίζεται σε τεχνολογίες και μέσα ικανά να καταγράψουν με ακρίβεια την υπάρχουσα κατάσταση στον αγρό, στη συνέχεια να διαχειριστούν τη συγκεντρωμένη πληροφορία και τα διάφορα δεδομένα και τέλος να εφαρμόσουν τις εισροές, έτσι ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες κάθε σημείου και χρονικής στιγμής ξεχωριστά (Καρυδάς και Συλλαίος, 2000). Σκοπός της είναι (Τσελές, 2011; Τάνος, 2007):

1. Να οδηγήσει σε καλύτερη επιλογή των γεωργικών πρακτικών, σε συνάρτηση με τις ανάγκες των καλλιεργειών σε μέρη του αγρού (ζώνες διαχείρισης).
2. Να μειώσει την υπερβολική χρήση χημικών και την υπέρμετρη χρήση γεωργικών μηχανημάτων.
3. Να ελαχιστοποιήσει τις αρνητικές επιπτώσεις της γεωργίας στο περιβάλλον.
4. Να εξοικονομηθεί ενέργεια.
5. Να μπορέσει να δώσει αυξημένη παραγωγή καλύτερης ποιότητας, αυξάνοντας το εισόδημα του καλλιεργητή.

Η πρώτη δεκαετία της ΓΑ είχε μεγάλη έμφαση στις Παγκόσμιες Δορυφορικές Υπηρεσίες Πλοήγησης (Global Navigation Satellite System - GNSS) και στην ικανότητά της να εντοπίζει και να ποσοτικοποιεί τη χωρική μεταβλητότητα στα εδάφη. Η δεύτερη δεκαετία επικεντρώθηκε στην αυτοματοποίηση των τρακτέρ και των μηχανημάτων και στην ανάπτυξη τεχνολογιών που θα επέτρεπαν την ακριβή διαχείριση των εισροών, όπως τα θρεπτικά συστατικά των καλλιεργειών. Τώρα, στην τρίτη δεκαετία, υπάρχει μια εκθετική αύξηση της συλλογής γεωργικών δεδομένων βάσει τοποθεσίας μέσω μιας σειράς αισθητήρων και συσκευών ανίχνευσης που δημιουργήσαν ένα νέο παράδειγμα λήψης αποφάσεων διαχείρισης βάσει στοιχείων για υψηλότερο βαθμό διαχείρισης ακρίβειας. Ως εκ τούτου, η επιτυχία των μελλοντικών γεωργικών πρακτικών, δηλαδή της παραγωγής, της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας, θα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην «καλλιέργεια των δεδομένων» όπως και στην «καλλιέργεια της γης».

Η γεωργία ακριβείας χρειάζεται όλα τα στάδια πληροφοριών στο σύστημα γεωργικής παραγωγής και απαιτεί επίσης καλή σύνδεση μεταξύ των διάφορων σταδίων. Ειδικότερα, η τεχνολογία των πληροφοριών πρέπει να συνδέεται άρρηκτα με τον αγροτικό κόσμο προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της γεωργίας ακριβείας. Η ποικιλία φυτών, τα μεταβλητά χαρακτηριστικά του αγρού, οι διάφορες τεχνολογικές λύσεις, οι περιφερειακές υποδομές και τα κίνητρα και οι προθέσεις του γεωργού μπορεί να είναι βασικοί παράγοντες για τη διαχείριση της ακρίβειας σε μια αγροτική εκμετάλλευση. Η καλύτερη ενσωμάτωση αυτών των πέντε παραγόντων μπορεί να δημιουργήσει ένα ανταγωνιστικό γεωργικό σύστημα που να ταιριάζει στις τοπικές συνθήκες.

Το κατά πόσον η γεωργία ακριβείας είναι εφικτή για τις εκμεταλλεύσεις μικρής κλίμακας είναι το κύριο ζήτημα για γεωργούς, επιστήμονες και πολιτικούς ανά τον κόσμο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η γεωργία ακριβείας χαρακτηρίζεται από μεταβλητή διαχείριση. Ένα βασικό σημείο στη γεωργία ακριβείας είναι η κατανόηση της μεταβλητότητας στον τομέα. Υπάρχουν τουλάχιστον δύο τύποι μεταβλητότητας. Το ένα είναι μεταβλητότητα εντός πεδίου και το άλλο είναι μεταβλητότητα μεταξύ πεδίου ή περιοχής. Η μεταβλητότητα εντός του πεδίου επικεντρώνεται σε ένα μόνο χωράφι και στην ποικιλία μιας φυτικής καλλιέργειας. Η μεταβλητότητα μεταξύ πεδίων θεωρεί κάθε πεδίο ως ενότητα στον χάρτη. Πρέπει να εξετάσουμε τι είδους μεταβλητότητα συνεπάγεται όταν εξετάζουμε την γεωργία ακριβείας για μικρές εκμεταλλεύσεις. Είτε οι εκμεταλλεύσεις είναι μεγάλες ή μικρές, η γεωργία ακριβείας πρέπει να σημαίνει βελτιωμένη διαχείριση των εκμεταλλεύσεων. Θα πρέπει να προσφέρει υψηλότερη οικονομική απόδοση με μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Σε ένα μόνο μικρό αγρόκτημα, ο αγρότης μπορεί να καταλάβει αρκετά καλά τι συμβαίνει σε κάθε πεδίο. Αυτό καθιστά πιθανές εφαρμογές μεταβλητών δόσεων για την κάλυψη συγκεκριμένων θέσεων, χρησιμοποιώντας τις γνώσεις και τις δεξιότητες του γεωργού. Όταν πρόκειται για μια περιοχή μερικών δεκάδων εκταρίων, που περιέχει πολλά μικρά χωράφια, η γεωργία ακριβείας πρέπει να συντονίζει διαφορετικούς τύπους χρήσης γης και πολλούς αγρότες με διαφορετικά κίνητρα. Η περιφερειακή γεωργία ακριβείας πρέπει να διαχειρίζεται μια ιεραρχία μεταβλητότητας: εντός αγρού, μεταξύ χωραφιού και μεταξύ αγροτών. Οι προσεγγίσεις υψηλής τεχνολογίας, όπως ένας μετρητής απόδοσης με GPS, είναι διαθέσιμες για περιφερειακή καλλιέργεια ακριβείας που καλύπτει πολλές μικρές εκμεταλλεύσεις. Επιπλέον, μέτρα για τη διατήρηση ή τη βελτίωση του περιβάλλοντος πρέπει να ληφθούν σε παρόμοια κλίμακα. Από την άποψη της ανάπτυξης σε μια αγροτική περιοχή που περιλαμβάνει μικρές εκμεταλλεύσεις και τοπικές εταιρείες, η γεωργία ακριβείας προσφέρει τη δυνατότητα ανάπτυξης ενός νέου είδους βιομηχανίας, με τη συγχώνευση της γεωργίας σε διάφορα είδη βιομηχανικής δραστηριότητας (Shibusawa, 2002).

Σε γενικές γραμμές, η γεωργία ακριβείας χρησιμοποιεί συνήθως χάρτες πεδίου ή χάρτες εφαρμογής, τεχνολογίες μεταβλητού ρυθμού και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων. Η δημιουργία των χαρτών πεδίου είναι από μόνη της μια σημαντική πηγή πληροφοριών. Η τεχνολογία μεταβλητού ρυθμού όχι μόνο αυξάνει την παραγωγικότητα με την αναδιοργάνωση των τριών παραγόντων της τεχνολογίας, των εγκαταστάσεων και των πεδίων, αλλά επίσης δημιουργεί μια καλύτερη σύνδεση με την περιφερειακή υποδομή, π.χ. ακολουθώντας τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων παρέχει την καλύτερη τεχνολογία, λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους και τα κίνητρα των αγροτών καθώς και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Με άλλα λόγια, η γεωργία ακριβείας φέρνει μια καινοτομία σε ολόκληρο το σύστημα της γεωργίας.

1.1.2 Έξυπνη γεωργία

Η έξυπνη γεωργία είναι η εξέλιξη της γεωργίας ακριβείας και βασίζεται στο Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT¹). Αυτός ο όρος επινοήθηκε από τον Kevin Ashton² το 1999 και αντιπροσωπεύει δεδομένα που συλλέγονται από αντικείμενα ή «πράγματα» (π.χ. συσκευές, εργαλεία, αισθητήρες) και υποβάλλονται σε επεξεργασία μεμονωμένα ή μαζί με αλγόριθμους που συσχετίζουν τις πληροφορίες για να βοηθήσουν τους χρήστες να λάβουν αποφάσεις όχι μόνο με βάση τη θέση, όπως είναι στη γεωργία ακριβείας, αλλά και σε δεδομένα που έχουν ενισχυθεί από την αντίληψη του περιβάλλοντος και την μεταβολή των διαφόρων καταστάσεων, οι οποίες ενεργοποιούνται από γεγονότα σε πραγματικό χρόνο (Wolfert et al., 2017).

Η τεχνολογική πρόοδος στη γεωργία είναι αρκετά ετερογενής (Pivoto et al., 2017), κι επίσης πολύ μεταβλητή στην ίδια χώρα, με συνέπεια σε ορισμένες περιοχές να είναι δυνατόν να ξεκινήσουμε αμέσως με την εισαγωγή μιας έξυπνης γεωργικής προσέγγισης επειδή οι αγρότες εργάζονται ήδη με θεμελιώδεις τεχνολογίες, όπως συστήματα αυτόματης δορυφορικής καθοδήγησης, τμήματα ελέγχου και συστήματα μεταβλητών δόσεων ή έχουν ήδη αισθητήρες για την παρακολούθηση ορισμένων σημαντικών μεταβλητών καλλιέργειας. Αντίθετα, η πλειοψηφία των αγροτών πρέπει να εισαγάγει την καινοτομία στα μηχανήματά τους, διαδικασία η οποία απαιτεί χρόνο γιατί πρώτα απ' όλα πρέπει να ξεκινήσουν εισάγοντας όλες τις βασικές τεχνολογίες και πάνω απ' όλα επειδή αλλάζει ριζικά τον τρόπο εργασίας. Σε μια κουλτούρα που βασίζεται στην παράδοση, είναι δύσκολο να εισαχθεί μια αλλαγή, επομένως είναι απαραίτητο όχι μόνο οι εταιρείες να μιλούν για έξυπνη γεωργία στους αγρότες αλλά και σε όλους τους δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς, τις ενώσεις αγροτών, στα πανεπιστήμια και στους συμβούλους, να τους προβάλλουν τα πλεονεκτήματα των νέων τεχνολογιών και να το παρουσιάζουν ως τον καλύτερο τρόπο για τη μείωση του κόστους και της ρύπανσης και την αύξηση της ποιότητας της παραγωγής.

Η προσέγγιση της έξυπνης καλλιέργειας βασίζεται στη συλλογή δεδομένων από διαφορετικές πηγές με όσο το δυνατόν πιο αυτόματο τρόπο, διότι είναι δυνατή η απόκτηση τεράστιου όγκου δεδομένων (τα λεγόμενα Big Data³) χωρίς μεγάλες προσπάθειες από τον αγρότη (Wolfert et al., 2018). Τα δεδομένα που συλλέγονται σε αυτό το πλαίσιο συνήθως εξάγονται σε κάποια υποδομή υπολογιστικού σύννεφου (cloud⁴) από κάποιον υπολογιστή που είναι ενσωματωμένος στο τρακτέρ, αλλά και από διάφορα είδη αισθητήρων εγκατεστημένων στον αγρό, είτε σε μικρή απόσταση ή από απομακρυσμένες πολυφασματικές κάμερες,

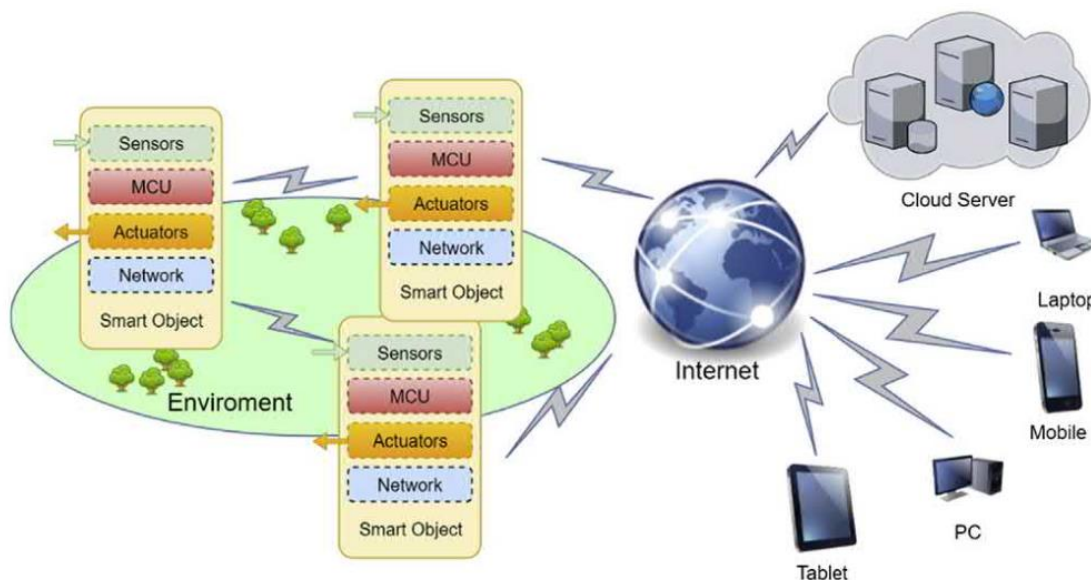
1 https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things

2 <https://blog.avast.com/kevin-ashton-named-the-internet-of-things>

3 https://www.sas.com/en_us/insights/big-data/what-is-big-data.html

4 <https://www.ibm.com/cloud/learn/cloud-computing>

μετεωρολογικούς σταθμούς κ.λπ. Μετά από την αυτόματη συλλογή δεδομένων, εκτελείται μια προεπεξεργασία και κάποιες βασικές προσαρμογές πριν τα δεδομένα παραδοθούν στις προαναφερθείσες πλατφόρμες υποδομής cloud. Σε αυτό το στάδιο, κάποιοι έμπειροι σύμβουλοι μπορούν να αναλύσουν την παραγωγή και να δώσουν πολύτιμα αποτελέσματα στους αγρότες. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Ahmad και Mahdi. 2018), αλλά κάθε πλατφόρμα IoT, ακόμα κι αν είναι εξαιρετικά ακριβής, δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει αυτόματα χωρίς την επίβλεψη των γεωπόνων και την τελική έγκριση και αναθεώρηση του αγρότη. Η έξυπνη γεωργία, για πρώτη φορά, επιτρέπει τη συμμετοχή όλων των παραγόντων: αγρότη, γεωπόνο, σύμβουλο παρόχους υλικών και μηχανικών ή τεχνολογικών λύσεων, όσο και λοιπούς εμπλεκόμενους φορείς, για τη συλλογή όλων των πιθανών δεδομένων από το χωράφι και για να βοηθήσει τον αγρότη να λάβει τις σωστές αποφάσεις.



Σχήμα 1. Η δομή μιας βασικής πλατφόρμας έξυπνων αντικειμένων

Πλέον στις μέρες μας, υπάρχουν αμέτρητες περιπτώσεις χρήσης των λύσεων που προφέρει η έξυπνη γεωργία, πχ χρήση δορυφορικών εικόνων για χαρτογράφηση καλλιέργειας, στρατηγική χαρτών εφαρμογής λίπανσης, έξυπνες προσεγγίσεις στην άρδευση και τη χρήση διαφόρων αισθητήρων. Καθώς η απόκτηση δεδομένων μέσω εγγύτητας αλλά και μέσω τηλεπισκόπησης έχει γίνει πιο προσιτή, έχει παρατηρηθεί αύξηση της λίπανσης μεταβλητού ρυθμού, της ζιζανιοκτονίας και της σποράς με ακριβείς μεθόδους, καθώς και της άρδευσης ακριβείας. Ειδικά για την έξυπνη άρδευση πρόκειται για μια αναπτυσσόμενη στρατηγική για τη βιωσιμότητα της γεωργίας και υπάρχει τεράστιο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας στο εμπόριο.

1.1.3 Η γεωργία στην Ελλάδα

Σήμερα, σχεδόν 5 εκατομμύρια εκτάρια χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα για γεωργικούς σκοπούς, ενώ υπάρχουν σχεδόν 700.000 εκμεταλλεύσεις που απασχολούν περισσότερα από 460.000 άτομα (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2018α). Ο πρωτογενής τομέας απασχολεί περισσότερο από το 10% του ελληνικού εργατικού δυναμικού και η σημασία αυτού του τομέα αυξάνεται σε σύγκριση με τις άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2018β). Η μέση καλλιεργητική μονάδα είναι 6,8 εκτάρια με περισσότερο από 76% να εκτείνεται σε λιγότερο από 5 εκτάρια. Οι περισσότερες από τις ελληνικές εκμεταλλεύσεις (80%) έχουν οικονομικό προϋπολογισμό μικρότερο από 15.000€, το 80% των κατόχων είναι άνω των 45 ετών και σχεδόν το 55% των εκμεταλλεύσεων έχουν πρόσβαση σε ευρυζωνική σύνδεση στο Διαδίκτυο. Επιπλέον, περισσότερο από το 60% του ενεργού πληθυσμού στον ελληνικό γεωργικό τομέα είναι χαμηλού εκπαιδευτικού επιπέδου (Ευρωπαϊκή Ένωση, 2017, 2018γ). Το 2016, το 53% της καλλιεργούμενης έκτασης χρησιμοποιήθηκε για αροτραίες καλλιέργειες, 34,2% για πολυετείς καλλιέργειες και 2% για λαχανικά με σχεδόν το 30% της καλλιεργούμενης γεωργικής έκτασης να αρδεύεται. Οι σημαντικότερες καλλιέργειες για τον ελληνικό γεωργικό τομέα είναι το σιτάρι, τα αμύγδαλα, οι πορτοκαλιές, οι ελιές, τα σταφύλια και το βαμβάκι (Ελληνική Δημοκρατία, 2018).

1.1.4 Δυσκολίες υιοθέτησης της γεωργίας ακριβείας στην Ελλάδα

Πολλές μελέτες έχουν δείξει τους παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση τεχνολογιών και μεθόδων γεωργίας ακριβείας. Συγκεκριμένα, οι Daberkow και McBride (2003) διαπίστωσαν ότι η εκπαίδευση των χειριστών, η γνώση των υπολογιστών και το μέγεθος της εκμετάλλευσης συμβάλλουν θετικά στην υιοθέτηση της γεωργίας ακριβείας μετά από έρευνα σε περισσότερες από 8400 εκμεταλλεύσεις στις Ηνωμένες Πολιτείες, εκπροσωπώντας 2 εκατομμύρια ανθρώπους. Ωστόσο, υπάρχει διαφορετικό ποσοστό υιοθέτησης μεταξύ των χωρών. Επιπλέον, οι Aubert et al. (2012) διαπίστωσαν ότι το επίπεδο εκπαίδευσης και η καινοτομία του αγρότη είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την υιοθέτηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας στον Καναδά. Αυτοί οι περιοριστικοί παράγοντες εντοπίστηκαν επίσης σε μια έρευνα για την υιοθέτηση τεχνολογιών έξυπνης γεωργίας για το κλίμα μεταξύ αγροτών από την Ολλανδία, τη Γαλλία, την Ελβετία και την Ιταλία (Long et al., 2016). Στην ίδια μελέτη, επισημάνθηκαν επίσης περισσότεροι παράγοντες όπως η μακρά περίοδος αποπληρωμής, το χαμηλό επίπεδο τεχνικής υποστήριξης και εξυπηρέτησης και τα αναντιστοιχικά κόστη και οφέλη που επηρεάζουν την υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών. Με βάση αυτά που προαναφέρθηκαν, ο γεωργικός τομέας στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από πολλούς παράγοντες που καθιστούν δύσκολη την υιοθέτηση της γεωργίας ακριβείας. Αυτοί οι παράγοντες είναι (α) το χαμηλό εκπαιδευτικό επίπεδο των αγροτών, (β) το υψηλό ποσοστό των πολύ ηλικιωμένων κατόχων γεωργικών εκμεταλλεύσεων, (γ) η χαμηλή χρήση

ευρυζωνικών συνδέσεων σε αγροτικές περιοχές και (δ) η περιορισμένη υποστήριξη από τους παρόχους τεχνολογίας.

Η εφαρμογή μεθόδων και τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας στην Ελλάδα ωστόσο, είναι απαραίτητη. Οι αρχικές μελέτες παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό εφαρμογής τεχνολογιών και μεθόδων γεωργίας ακριβείας σε μεγάλο αριθμό καλλιεργειών λόγω της υψηλής χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας του εδάφους, του καιρού, της απόδοσης και των παραμέτρων ποιότητας στις ελληνικές περιοχές. Όλο και περισσότεροι Έλληνες αγρότες μαθαίνουν για τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει η γεωργία ακριβείας σε σχέση με την εξοικονόμηση κόστους, την απόδοση των καλλιεργειών, την ποιότητα και τα περιβαλλοντικά οφέλη (Balafoutis et al., 2017b) και έτσι πολλοί από αυτούς σκέφτονται να χρησιμοποιήσουν τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας (Anastasiou et al., 2017b). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι Barnes et al. (2019) διαπίστωσαν ότι μόνο το 13,5% σε ένα δείγμα 200 Ελλήνων αγροτών δήλωσε ότι χρησιμοποιούν εξοπλισμό μεταβλητού ρυθμού, ενώ το 51% δεν χρησιμοποιεί εξοπλισμό γεωργίας ακριβείας και το υπόλοιπο (35,5%) δήλωσε ότι χρησιμοποιεί μόνο συστήματα καθοδήγησης μηχανών. Ωστόσο, απαιτούνται περαιτέρω ενέργειες για την υιοθέτηση της γεωργίας ακριβείας από τους αγρότες στην Ελλάδα, για τη μείωση του κόστους παραγωγής των καλλιεργειών και την υποστήριξη της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

1.2 Τεχνολογίες της Γεωργίας Ακριβείας

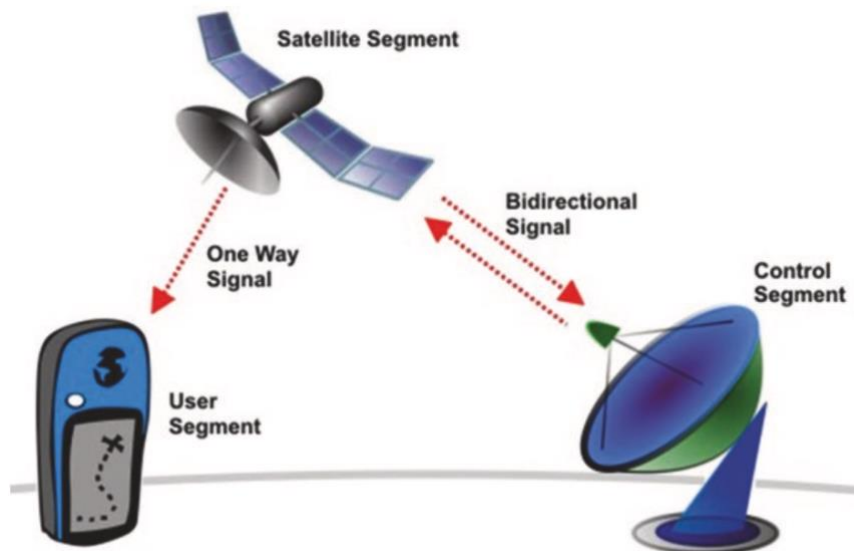
1.2.1 Παγκόσμια συστήματα εντοπισμού θέσης (GNSS)

Με τον όρο δορυφορικός εντοπισμός θέσης εννοείται ο προσδιορισμός των απολύτων και σχετικών συντεταγμένων σημείων με την επεξεργασία μετρήσεων προς ή από τεχνητούς δορυφόρους (Παντέλης και άλλοι, 2004). Οι πρώτες εφαρμογές εμφανίστηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1960 με προβλήματα λόγω του εξαιρετικά μεγάλου χρόνου παρατηρήσεων και της χαμηλής ακρίβειας. Το 1964 το ναυτικό των ΗΠΑ εγκαινίασε το διαστημικό σύστημα πλοήγησης Transit, που λειτουργεί ακόμη και σήμερα. Οι δορυφόροι βρίσκονται σε χαμηλή τροχιά και το σύστημα δεν είναι πάντα διαθέσιμο. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη μέτρηση της συχνότητας του σήματος με το φαινόμενο Doppler (Παντέλης και άλλοι, 2004). Κατά τη δεκαετία του 1960 αναπτύχθηκε ένα άλλο πρόγραμμα του Αμερικανικού ναυτικού, το Timation, στόχος του οποίου ήταν να παρέχει δυσδιάστατα δεδομένα πλοήγησης και προσανατολισμού. Ταυτόχρονα, η αεροπορία των ΗΠΑ διεξήγαγε μελέτες για την ανάπτυξη ενός τρισδιάστατου συστήματος προσανατολισμού ονομαζόμενου 621B. Το 1975 τα δύο παραπάνω προγράμματα ενοποιήθηκαν υπό την αιγίδα της αεροπορίας των ΗΠΑ, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σύστημα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για στρατιωτικούς σκοπούς, το GPS. Τα πρώτα δοκιμαστικά σήματα μεταδόθηκαν από τον

Navigation Test Satellite 8, τον Ιούνιο του 1977. Στη συνέχεια εκτοξεύθηκαν μια ομάδα δορυφόρων, προκειμένου να υπάρξει καλύτερη και πυκνότερη κάλυψη.

Συνολικά σήμερα υπάρχουν τέσσερα GNSS, εκ των οποίων τα δύο είναι πλήρους επιχειρησιακής ικανότητας (Full Operational Capability – FOC), ενώ τα άλλα δύο βρίσκονται ακόμα στο αρχικό τους στάδιο. Τα τέσσερα GNSS αποτελούνται από το Αμερικάνικο GPS, το Ρωσικό GLONASS, το Κινεζικό GOMPASS/BEIDOU και το Ευρωπαϊκό GALILEO.

Το Παγκόσμιο Σύστημα Καθορισμού Θέσης (Global Positioning System - GPS), το οποίο απαρτίζεται από 24 συνολικά δορυφόρους αναπτύχθηκε από το Αμερικάνικο Υπουργείο Άμυνας το 1970 και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του γεωγραφικού στίγματος οποιουδήποτε σημείου πάνω στην επιφάνεια της Γης. Οι δορυφόροι αυτοί βρίσκονται σε σταθερή τροχιά σε ύψος είκοσι χιλιάδων χιλιομέτρων από την επιφάνεια της γης, σε συγκεκριμένα γνωστά σημεία. Κάθε ένας από αυτούς τους δορυφόρους διαθέτει ατομικό ρολόι ακρίβειας και εκπέμπει ένα κωδικοποιημένο ηλεκτρομαγνητικό σήμα, το οποίο λαμβάνεται από τους δέκτες GPS που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης και χρησιμοποιείται για τον ακριβή υπολογισμό της γεωγραφικής θέσης του δέκτη. Το σήμα που εκπέμπεται από κάθε δορυφόρο περιέχει πληροφορίες για την ταυτότητα του δορυφόρου και την ακριβή χρονική στιγμή που έγινε εκπομπή. Αυτά τα σήματα ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός και μπορούν να προσληφθούν από οποιονδήποτε δέκτη GPS. Ο δέκτης GPS λαμβάνει τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα των δορυφόρων και υπολογίζει τη χρονική υστέρηση στο σήμα που δέχεται, την οποία και χρησιμοποιεί για να μετρήσει την απόσταση του από κάθε δορυφόρο. Όταν δέχεται σήματα από τρεις δορυφόρους τουλάχιστον, ο δέκτης χρησιμοποιεί την γεωμετρική ανάλυση για να καθορίσει τη γεωγραφική του θέση (στίγμα) στην επιφάνεια της γης, που εκφράζεται σε γεωγραφικό μήκος (longitude) και γεωγραφικό πλάτος (latitude). Όταν λαμβάνει σήματα και από τέταρτο δορυφόρο μπορεί να υπολογίσει και το υψόμετρο (altitude, elevation) θέσης που βρίσκεται. Η θέση που αναφέρεται από μια κεραία GPS δεν είναι απόλυτη επειδή πολλοί παράγοντες επηρεάζουν το σήμα GPS. Τα σφάλματα δορυφορικού ρολογιού, οι ατμοσφαιρικές παρεμβολές και η καθυστέρηση διάδοσης είναι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια της θέσης. Υπάρχουν αρκετές κεραίες GPS στην αγορά, από 30 \$ έως αρκετές χιλιάδες δολάρια, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται και την ακρίβεια του σήματος.



Σχήμα 2. Απεικόνιση των 3 βασικών συστατικών μερών του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System).

1.2.1.1 Ανάγκη για μεγαλύτερη ακρίβεια στις εφαρμογές μεταβλητών δόσεων

Ενας σημαντικός παράγοντας που δύναται να προκαλέσει προβλήματα στην ακρίβεια του συστήματος είναι η θέση του δέκτη. Ο δέκτης πρέπει να βρίσκεται σε μια θέση όπου δε θα επηρεάζεται από ψηλά κτίρια από άλλα αντικείμενα που προκαλούν ανάκλαση του σήματος του δορυφόρου πάνω σε αυτά και να μειώνει την ακρίβειά του. Επίσης, παρεμβολές στα δορυφορικά σήματα μπορεί να δημιουργηθούν από τμήματα του κινητήρα, όπως το ηλεκτρονικό σύστημα ανάφλεξης και το δυναμό, καθώς και από ηλεκτρομαγνητικά πεδία ασύρματων και κινητών τηλεφώνων, όταν η κεραία βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτές τις πηγές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Ωστόσο, τα προβλήματα αυτά μπορούν να προληφθούν με τη σωστή εγκατάσταση της κεραίας και τη σταθερή σύνδεση των καλωδίων. Ενώ οι κεραίες GPS αναφέρουν την τρέχουσα θέση βάσει άμεσων δορυφορικών σημάτων που είναι ως επί το πλείστον ακριβή σε απόσταση 10 μέτρων, αυτό το περιθώριο σφάλματος είναι μη αποδεκτό για εφαρμογές μεταβλητών δόσεων (Variable Rate Applications - VRA) και άλλες δραστηριότητες γεωργίας ακριβείας.

1.2.1.2 Διαφορικό GPS (Differential GPS - DGPS)

Για μεγαλύτερη ακρίβεια (περίπου 15 cm), η VRA απαιτεί διαφορικό GPS (DGPS), το οποίο είναι ουσιαστικά βελτιωμένο GPS. Διαφορικό σύστημα DGPS, τύπος GPS που χρησιμοποιεί ένα σήμα από επίγειους δέκτες για να διορθώσει το σφάλμα που υπάρχει. Το σήμα αυτό προέρχεται από επίγειους σταθμούς των οποίων η θέση είναι γνωστή και λαμβάνοντας οι ίδιοι το σήμα από τους δορυφόρους κάνουν τη διόρθωση και εκπέμπουν το σφάλμα. Διορθώνει σήματα GPS χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο από επίγειες αναφορές επακριβώς γνωστών θέσεων. Η ακρίβεια του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 30cm-1m. Υπάρχουν πολλά διαθέσιμα

δίκτυα για τη διόρθωση σημάτων GPS: WAAS, EGNOS, GAGAN και MSAS. Οι κεραιές DGPS χρησιμοποιούν ένα από αυτά τα δίκτυα για να μεταδώσουν τη διαφορά μεταξύ των συντεταγμένων που μετρώνται από το GPS των σταθερών θέσεων. Υπάρχουν παρόμοια συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν δορυφόρους για εκπομπή διόρθωσης του σφάλματος αντί για σταθμούς εδάφους, με τα πιο γνωστά από αυτά να είναι τα: EGNOS (Ευρώπη), WAAS (USA), SDMC (Ρωσία), και για γεωργικές εφαρμογές το Starfire (JohnDeere). Παρά την τιμή τους, περίπου 1.500\$, οι κεραιές DGPS χρησιμοποιούνται ευρέως στην γεωργία ακριβείας.

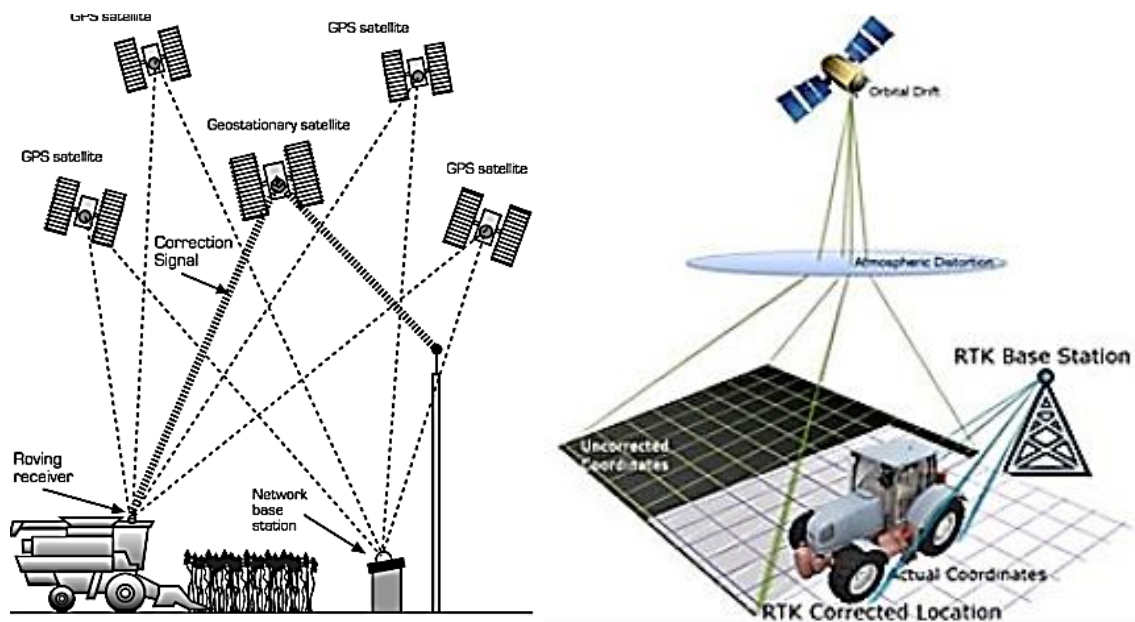
1.2.1.3 Real Time Kinematic (RTK) GPS

Μερικές φορές, εργασίες όπως VRA ή ο σχεδιασμός ψηφιακών μοντέλων ανύψωσης απαιτούν ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια. Υπό αυτές τις συνθήκες, η τεχνολογία κινηματικού σε πραγματικό χρόνο (RTK) είναι απαραίτητη. Τα συστήματα RTK είναι ακριβή σε απόσταση 1 cm, επιτυγχάνονται με τη χρήση δύο κεραιών. Η μία κεραία χρησιμεύει ως σταθμός βάσης (στατικός σταθμός βάσης) και η δεύτερη κεραία (rover) τοποθετείται σε ένα όχημα. Αυτές οι δύο κεραιές συνδέονται ασύρματα και ο σταθμός βάσης μεταδίδει τη φάση του σήματος που παρατηρεί και στέλνει τις πληροφορίες στο rover, το οποίο με τη σειρά του συγκρίνει τις πληροφορίες με τη φάση που παρατηρεί. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα συστήματα RTK είναι τα πιο ακριβή, υψηλής τεχνολογίας και πιο ακριβά συστήματα GPS. Οι τιμές ξεκινούν από 3000\$. Ωστόσο, σε ορισμένες περιοχές της Ευρώπης και των Ηνωμένων Πολιτειών, η υπηρεσία RTK είναι δωρεάν.

1.2.2 Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographic Information System)

Σε ένα σύστημα Γεωργίας Ακριβείας οι διάφορες πληροφορίες που αφορούν στον αγρό, αντιπροσωπεύονται από αριθμούς οι οποίοι περιγράφουν μετρήσεις κάποιων παραμέτρων, επιτόπιες παρατηρήσεις, εφαρμογή κάποιας εισροής με διαφοροποιούμενη δόση κλπ. Οι πληροφορίες αυτές με τη βοήθεια του GPS, συνοδεύονται με το γεωγραφικό στίγμα των αντίστοιχων σημείων του αγρού όπου αναφέρονται. Κατά τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών μεγάλης ακρίβειας, ο όγκος των πληροφοριών είναι τεράστιος, έτσι ώστε η χρήση κάποιου λογισμικού για την επεξεργασία τους, είναι απαραίτητη. Το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών είναι ένα λογισμικό με τη βοήθεια του οποίου οι πληροφορίες οργανώνονται, αναλύονται και επεξεργάζονται. Οι πληροφορίες σε ένα GIS απεικονίζονται πάντοτε ως ψηφιακοί χάρτες του υπό εξέταση αγρού γιατί όλες οι πληροφορίες είναι προσδιορισμένες στο χώρο με τη βοήθεια του GPS. Πρόσθετα εργαλεία όπως στατιστικές αναλύσεις, προσομοιώσεις και άλλες αναλυτικές μέθοδοι, χρησιμοποιούνται από το GIS και βοηθούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων και στη λήψη αποφάσεων (Westervelt and Reetz, 2000). Πέρα από την χαρτογράφηση, οι βάσεις δεδομένων που συνδέονται με το GIS και τα εργαλεία του

για το χειρισμό τους, καθιστούν το GIS πολύτιμο εργαλείο σε ένα σύστημα Γεωργίας Ακριβείας.



Σχήμα 3. Τεχνικές προσδιορισμού θέσης (i) Differential GPS και (ii) RTK GPS

Αριστερά: Σύστημα διαφορικού καθολικού εντοπισμού θέσης (GPS). Οι δορυφόροι GPS στέλνουν σήματα συγκεκριμένης θέσης και ώρας σε κεραιές GPS και σταθμούς ελέγχου. Οι σταθμοί ελέγχου διορθώνουν τα σήματα και μετά εκπέμπουν εκ νέου το σήμα με τα πιο ακριβή δεδομένα στις κεραιές GPS. **Δεξιά:** Κινηματικό σύστημα σε πραγματικό χρόνο. Οι συντεταγμένες του σταθμού βάσης είναι γνωστές. Οι δορυφόροι GPS στέλνουν σήματα στο σταθμό βάσης και στο rover. Ο σταθμός βάσης διορθώνει συνεχώς το σήμα GPS και το στέλνει στο rover.

Σε ένα σύστημα GIS εισάγονται πληροφορίες όπως η παραγωγή, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους, η περιεκτικότητα του εδάφους σε θρεπτικά συστατικά. Επίσης είναι δυνατόν να εισαχθούν παρατηρήσεις (πχ προσβολές από έντομα, ζιζάνια στον αγρό), ή άλλες πληροφορίες όπως ένας χάρτης των σημείων δειγματοληψίας του εδάφους. Με τη συστηματική συλλογή δεδομένων δημιουργείται ένας αριθμός χαρτών, που απεικονίζουν τη μεταβολή διαφόρων παραμέτρων του αγρού ή της καλλιέργειας. Η ανάλυση των παραπάνω δεδομένων οδηγεί στην εξεύρεση των εντοπισμένων παραγόντων περιοριστικών της παραγωγής και με βάση τα στοιχεία αυτά γίνεται προσπάθεια διόρθωσής τους. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί πχ με μια εφαρμογή λιπάσματος με μεταβλητή δόση.

Ένα GIS λογισμικό αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

1. Ένα σύστημα εισαγωγής (data input) χωρικών δεδομένων το οποίο εισάγει και καταχωρεί πληροφορίες που προέρχονται από χάρτες, δορυφορικές εικόνες, πολυφασματικές φωτογραφίες κ.α.
2. Ένα σύστημα αποθήκευσης (data storage) και οργάνωσης βάσης δεδομένων
3. Ένα σύστημα εμφάνισης δεδομένων (data output) που περιλαμβάνει αποτελέσματα ανάλυσης που εμφανίζονται ή καταχωρούνται όπως πίνακες, χάρτες και σχήματα που εμφανίζονται στην οθόνη ή καταχωρούνται στη μνήμη του Η/Υ.
4. Ένα σύστημα ανάλυσης δεδομένων που περιλαμβάνει όλα τα εργαλεία για την απομάκρυνση λαθών από τα δεδομένα, τον υπολογισμό επιφανειών, περιμέτρων,
5. την αλλαγή κλίμακας χαρτών, τη γεωστατιστική ανάλυση των δεδομένων.
6. Ένα σύστημα αλληλεπίδρασης (user interface) με το χρήστη που περιλαμβάνει μενού και εντολές που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία του χρήστη με το πρόγραμμα.



Σχήμα 4. . Τα βασικά συστατικά από τα οποία αποτελείται ένα Γεωπληροφοριακό Σύστημα (GIS)

Υπάρχουν δύο μορφές απεικόνισης και αποθήκευσης των δεδομένων σε ένα σύστημα GIS: με διανυσματική μορφή (vector) και με μορφή κυψελίδων (raster). Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα σημεία, οι γραμμές και τα πολύγωνα, ενώ στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα συνεχή δεδομένα αλλά σε κυψελώδη μορφή (grid). Τα δεδομένα που συγκεντρώνονται με τη μέθοδο της δειγματοληψίας είναι διανυσματικά, ενώ όσα συλλέγονται με αισθητήρες (π.χ. παραγωγής) είναι δεδομένα κυψελίδων.

1.2.2.1 Χρήση GIS για Γεωργία Ακριβείας

Οι χάρτες δείχνουν την παραλλακτικότητα ενός μετρούμενου μεγέθους στον αγρό. Για τη δημιουργία των χαρτών ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Εισαγωγή του περιγράμματος του αγρού (field boundary)
- Εισαγωγή δεδομένων πχ δεδομένα παραγωγής
- Δημιουργία συνεχούς επιφάνειας με τη διαδικασία της εσωεκτίμησης
- Επιλογή χρωμάτων και λεζάντας για το χάρτη
- Εκτύπωση του χάρτη

Για ένα αγρό μπορούν να προστεθούν διάφορες πληροφορίες σε επίπεδα (data layers) που στη συνέχεια συνδυάζονται και λαμβάνονται αποφάσεις για τον ορθότερο τρόπο διαχείρισης του αγρού. Τέτοιες πληροφορίες μπορεί να είναι οι εξής:

- Περίγραμμα του αγρού
- Χάρτης εδαφικών τύπων
- Σημεία δειγματοληψίας
- Χάρτες θρεπτικών στοιχείων
- Πληθυσμός ζιζανίων
- Χάρτης στράγγισης
- Χάρτης παραγωγής

Τα GIS στη Γεωργία Ακριβείας χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση αγροτεμαχίων, που συλλέγονται από ποικίλες πηγές, από επίγειους αισθητήρες έως δορυφορικές εικόνες. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Την ικανότητα πρόβλεψης της παραγωγής.
- Την αποτελεσματικότερη χρήση των εισροών (λιπάσματα, άρδευση) που οδηγεί σε μείωση του κόστους παραγωγής και σε αειφορία.
- Την δυνατότητα συγκομιδής ανάλογα με τις ποιοτικές προδιαγραφές, βελτιώνοντας το εισόδημα του παραγωγού.
- Να βοηθήσει στην εξασφάλιση της ποιότητας σύμφωνα με διάφορα πρωτόκολλα (ISO, HACCP).
- Τη διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων εύκολα και γρήγορα.

1.2.3 Τηλεπισκόπηση

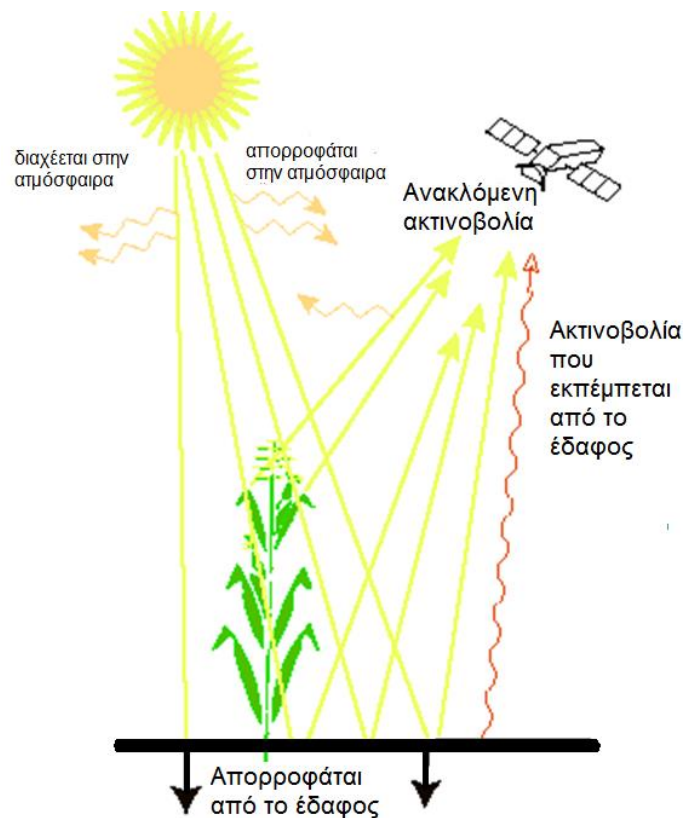
Οι εφαρμογές τηλεπισκόπησης στη γεωργία βασίζονται στην αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με το έδαφος ή το φυτικό υλικό. Η τηλεπισκόπηση

αναφέρεται σε μετρήσεις μη επαφής της ακτινοβολίας που ανακλάται ή εκπέμπεται από γεωργικά πεδία (Mulla, 2013). Η τηλεπισκόπηση ορίζεται ως η τεχνολογία που επιτρέπει τη μέτρηση των χαρακτηριστικών του εδάφους ή της καλλιέργειας, από UAV, πτήσεις αεροπλάνων ή δορυφόρους από αποστάσεις που κυμαίνονται από λίγα μέτρα έως μερικές εκατοντάδες μέτρα έως πολλά χιλιόμετρα από τον στόχο. Εκτός από την ανάκλαση, τη μετάδοση και την απορρόφηση, τα φύλλα των φυτών μπορούν να εκπέμπουν ενέργεια με φθορισμό (Apostol et al., 2003) ή θερμικές εκπομπές. Η χρήση στοιχείων τηλεπισκόπησης αναφέρεται κυρίως για τον χαρακτηρισμό της καλλιέργειας, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει την ανάπτυξη της καλλιέργειας που υποδεικνύεται ως δείκτης βλάστησης ομαλοποιημένης διαφοράς (NDVI), δείκτης εμβαδού φυλλώματος (LAI), βιομάζα, πυκνότητα καλλιέργειας, εκτίμηση δυνητικής απόδοσης, ανίχνευση και χαρτογράφηση βιοτικών (έντομα, ζιζάνια και ασθένειες) και αβιοτικές καταπονήσεις (π.χ. πίεση νερού, άζωτο (N), φωσφόρος (P) και κάλιο (K) και έλλειψη οργανικής ύλης (OM) και αλατότητα).

Μερικά από τα χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας που μπορούν να μελετηθούν με την τηλεπισκόπηση είναι:

- Η χωρική θέση ενός αντικειμένου.
- Το υψόμετρο.
- Το χρώμα.
- Η φασματική συμπεριφορά της χλωροφύλλης.
- Η βιομάζα.
- Το ποσοστό υγρασίας της βλάστησης.
- Το ποσοστό υγρασίας του εδάφους.
- Η θερμοκρασία.
- Το μέγεθος και το σχήμα διαφόρων στοιχείων.

Η απόκτηση των δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί από πλατφόρμες όπως αεροσκάφη, δορυφόρους, μπαλόνια, διαστημικά λεωφορεία, κ.λπ. εντός ή επί αυτών, όπου χρησιμοποιούνται αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων. Αισθητήρες περιλαμβάνουν εναέριες φωτογραφικές μηχανές και μη φωτογραφικά μέσα, όπως ραδιόμετρα, ηλεκτροοπτικοί σαρωτές, συστήματα ραντάρ, κ.λπ. Πιο χαρακτηριστικά και διαδεδομένα είναι τα στοιχεία που προέρχονται από ανιχνευτές που βρίσκονται εγκατεστημένοι πάνω σε δορυφόρους (Δορυφορική Τηλεπισκόπηση).



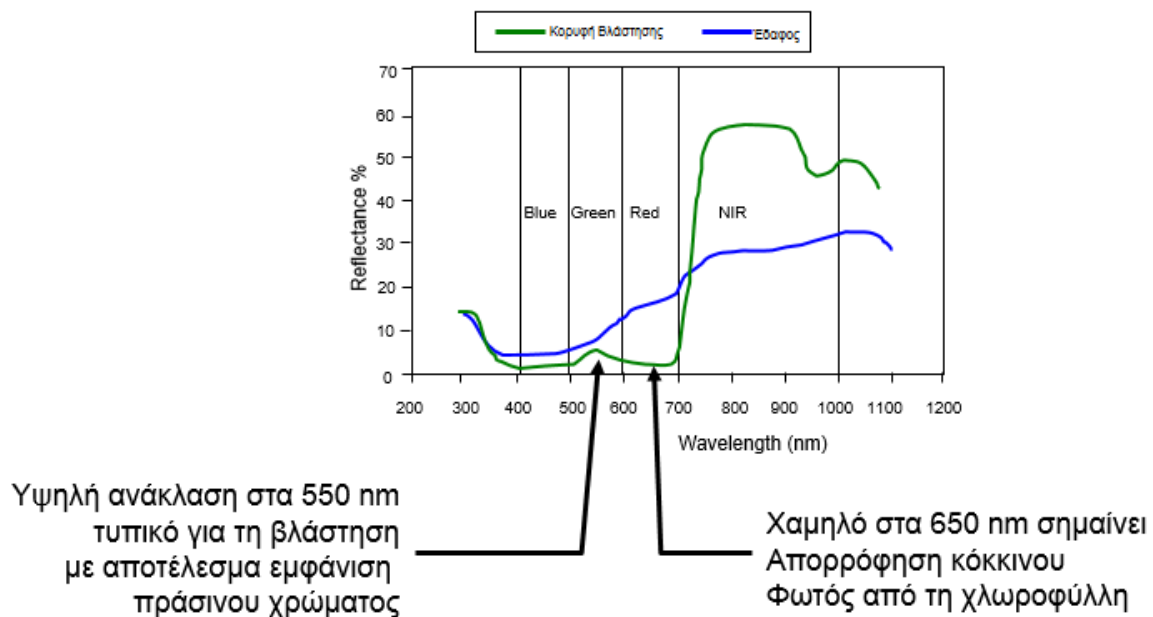
Σχήμα 5. Οι πιθανές αλληλεπιδράσεις της ηλιακής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα, το έδαφος και τα φυτά

Η τηλεπισκόπηση προσφέρει τη δυνατότητα απόκτησης πληροφοριών σχετικά με μια περιοχή παρατηρώντας την από απόσταση. Αρκετοί αισθητήρες απεικόνισης χρησιμοποιούνται για την απόκτηση δεδομένων ενώ βρίσκονται σε διάφορες πλατφόρμες, όπως δορυφόροι, αεροπλάνα ή UAV. Τα UAV συλλαμβάνουν δεδομένα από απόσταση 2 έως 100 m (ανάλογα με τους τοπικούς κανονισμούς πτήσης), ενώ η δορυφορική ανίχνευση συλλέγει δεδομένα από αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα πάνω από την καλλιέργεια. Οι αισθητήρες απεικόνισης καλύπτουν τα ορατά (VIS), υπέρυθρα (IR), θερμικά και μικροκυματικά μέρη του φάσματος. Έχουν σχεδιαστεί για την απόκτηση εικόνων μιας ζώνης (π.χ. θερμικών ή μικροκυμάτων), πολυφασματικών εικόνων με πολλές ζώνες στο ορατό και σχεδόν υπέρυθρο (VIS-NIR) ή υπερφασματικές εικόνες με δεκάδες ή εκατοντάδες ζώνες στο VIS-NIR.

Η χρήση τηλεπισκόπησης έχει και κάποιους περιορισμούς όπως για παράδειγμα ότι η συλλογή δεδομένων στο έδαφος περιορίζεται στα άνω στρώματα του εδάφους και η παρουσία κάλυψης καλλιέργειας ενδεχομένως να εμποδίζει τη σωστή συλλογή σαφών εικόνων ή φασματικών δεδομένων στο έδαφος. Επιπλέον, η χωρική ανάλυση επηρεάζει την περιοχή του μικρότερου εικονοστοιχείου (pixel) που μπορεί να αναγνωριστεί (Mulla, 2013). Καθώς η χωρική ανάλυση βελτιώνεται, η περιοχή του μικρότερου εικονοστοιχείου μειώνεται και η ομοιογένεια των χαρακτηριστικών του εδάφους ή της καλλιέργειας μέσα σε αυτό το εικονοστοιχείο αυξάνεται. Η κακή χωρική ανάλυση συνεπάγεται μεγάλα εικονοστοιχεία με

αυξημένη ετερογένεια στα χαρακτηριστικά του εδάφους ή του φυτού. Η συχνότητα επιστροφής είναι επίσης πολύ σημαντική για την αξιολόγηση των χρονικών προτύπων στο έδαφος ή τα χαρακτηριστικά των φυτών χρησιμοποιώντας δορυφόρους. Τέλος, η διαθεσιμότητα εικόνων τηλεπισκόπησης από δορυφορικές και εναέριες πλατφόρμες συχνά περιορίζεται σοβαρά από την κάλυψη από τα σύννεφα.

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες χωρικές αναλύσεις (χωρική λεπτομέρεια) σε εφαρμογές PA είναι αυτές που προσφέρονται από δορυφόρους πολύ υψηλής ανάλυσης (Very High Resolution - VHR) ή UAV (Unmanned Aerial Vehicle), που επιτρέπουν τη χαρτογράφηση της χωρικής μεταβλητότητας σε ένα πεδίο. Από την εκτόξευση του δορυφόρου IKONOS⁵ το 1999, δεδομένα σε χωρική ανάλυση καλύτερη από 1m διατίθενται από διάφορους δορυφόρους VHR, όπως Quickbird⁶, GeoEye-1⁷, WorldView⁸ 1, 2 και 3, μεταξύ άλλων. Οι σειρές δορυφόρων της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (ESA⁹) Sentinel¹⁰ προσφέρουν πιο χονδροειδείς εικόνες ανάλυσης ξεκινώντας από 10 μέτρα, οι οποίες μπορεί να μην είναι χρήσιμες για την καταγραφή της χωρικής μεταβλητότητας των περισσότερων πεδίων. Η χαρτογράφηση με αεροπλάνα δεν είναι επίσης συνηθισμένη στις εφαρμογές PA επειδή δεν είναι τόσο οικονομικά αποδοτικές, ευέλικτες και διαθέσιμες όσο οι δορυφόροι VHR και UAV.



Σχήμα 6.: Η φασματική απόκριση ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας

⁵ <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/ikonos/>

⁶ <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/quickbird/>

⁷ <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/geoeeye-1/>

⁸ <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

⁹ <https://www.esa.int/>

¹⁰ <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>

Μέσα στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, τα πιο κοινά μήκη κύματος που χρησιμοποιούνται για εφαρμογές παρακολούθησης καλλιεργειών είναι το πράσινο, το κόκκινο και το NIR. Οι φυτικές χρωστικές κυριαρχούν στην ανάκλαση της βλάστησης στα μήκη κύματος VIS. Η χλωροφύλλη απορροφά την κόκκινη και μπλε ενέργεια και αντανακλά το πράσινο. Η κυτταρική δομή των φύλλων και η δομή του θόλου κυριαρχούν στην ανακλαστικότητα του NIR, με την υγιή άφθονη βλάστηση να παράγει υψηλή ανακλαστικότητα. Θεωρητικά, το NIR και η κόκκινη ανακλώμενη ενέργεια θα μπορούσαν να ποσοτικοποιηθούν για να εκτιμηθεί η ανάπτυξη των φυτών, η ποσότητα της βιομάζας της βλάστησης ή ακόμη και η κατάσταση της υγείας τους. Ωστόσο, λόγω διαφόρων παραγόντων (π.χ. ατμοσφαιρικών συνθηκών, της δομής ή του υποστρώματος, της ετερογένειας της βλάστησης κ.λπ.), ένας τέτοιος ποσοτικός προσδιορισμός δεν είναι αρκετά ακριβής για την παρακολούθηση της κατάστασης της βλάστησης.

Η χρήση δεικτών βλάστησης (Vegetation Indices - VIs), όπως το NDVI και ο βελτιωμένος δείκτης βλάστησης (EVI) θα μπορούσε να είναι μια λύση σε αυτό το πρόβλημα, συνδυάζοντας δύο ή περισσότερες ζώνες σε μία μόνο εξίσωση για την ακριβή περιγραφή, παρακολούθηση και ποσοτικοποίηση της κατάστασης της βλάστησης. Η υπερφασματική τηλεπισκόπηση προσφέρει λεπτή φασματική ανάλυση σε διάφορα μήκη κύματος της σειράς VIS-NIR και μπορεί να προσφέρει βελτιωμένη εκτίμηση για ένα ευρύ φάσμα φυτικών βιοφυσικών ιδιοτήτων. Η θερμική υπέρυθη ακτινοβολία (TIR) είναι επίσης χρήσιμη για τον εντοπισμό διακύμανσης λόγω αβιοτικού στρες (π.χ. έλλειμμα νερού) ή βιοτικού στρες (π.χ. μυκητιασικών παθήσεων). Σε ορισμένες περιοχές με επίμονο κάλυμμα νέφους, δεν είναι δυνατή η χρήση οπτικών και θερμικών αισθητήρων. Το ραντάρ συνθετικού διαφράγματος δεν επηρεάζεται από τον ήλιο, το νέφος, την ομίχλη και τη βροχή και επομένως θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύτερο φάσμα συνθηκών και μπορεί να λάβει δεδομένα κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας.

Κάποιοι βασικοί δείκτες βλάστησης που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην γεωργία ακριβείας, όπως και κάποιοι πιο ειδικοί σχετικοί με την μεταβλητή λίπανση, παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Βασικοί δείκτες βλάστησης, χρήσιμοι στην μεταβλητή λίπανση

<p>Enhanced Vegetation Index (EVI)</p> $EVI = 2.5 * \frac{(NIR - Red)}{(NIR + 6 * Red - 7.5 * Blue + 1)}$	<p>Αυτός ο δείκτης αναπτύχθηκε αρχικά για χρήση με δεδομένα MODIS¹¹ ως βελτίωση έναντι του NDVI βελτιστοποιώντας το σήμα βλάστησης σε περιοχές με υψηλό δείκτη περιοχής φύλλων (LAI). Είναι πιο χρήσιμο σε περιοχές με υψηλό LAI όπου το NDVI μπορεί να κορεστεί. Χρησιμοποιεί την περιοχή μπλε</p>
---	--

¹¹ <https://eos.com/find-satellite/modis-mcd43a4/>

	<p>ανάκλασης για διόρθωση σημάτων φόντου εδάφους και για τη μείωση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων, συμπεριλαμβανομένης της σκέδασης αερολύματος. Οι τιμές EVI πρέπει να κυμαίνονται από 0 έως 1 για ριχελ βλάστησης. Φωτεινά χαρακτηριστικά όπως σύννεφα και λευκά κτίρια, καθώς και σκοτεινά χαρακτηριστικά όπως το νερό, μπορούν να οδηγήσουν σε ανώμαλες τιμές ριχελ σε μια εικόνα EVI.</p>
<p>Leaf Area Index (LAI) $LAI = (3.618 * EVI - 0.118)$</p>	<p>Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κάλυψης φυλλώματος και για την πρόβλεψη της ανάπτυξης και της απόδοσης των καλλιεργειών. Οι υψηλές τιμές LAI κυμαίνονται συνήθως από περίπου 0 έως 3,5. Ωστόσο, όταν η εικόνα περιέχει σύννεφα και άλλα φωτεινά χαρακτηριστικά που παράγουν κορεσμένα ριχελ, οι τιμές LAI μπορούν να ξεπεράσουν το 3,5. Θα πρέπει ιδανικά να αποκοπούν τα σύννεφα και τα φωτεινά χαρακτηριστικά από την εικόνα πριν τη δημιουργία μια εικόνας LAI.</p>
<p>Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) $NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$</p>	<p>Αυτός ο δείκτης είναι ένα μέτρο υγιούς, πράσινης βλάστησης. Ο συνδυασμός της κανονικοποιημένης διαφοράς της διαμόρφωσης και της χρήσης των υψηλότερων περιοχών απορρόφησης και ανάκλασης της χλωροφύλλης, το καθιστά ισχυρό σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών. Μπορεί, ωστόσο, να κορεστεί σε συνθήκες πυκνής βλάστησης ειδικά όταν το LAI αυξάνεται. Η τιμή αυτού του δείκτη κυμαίνεται από -1 έως 1. Το κοινό εύρος για την πράσινη βλάστηση είναι 0,2 έως 0,8.</p>
<p>Normalized Difference Red Edge index (NDRE) $NDRE = \frac{R_{NIR} - R_{EDGE}}{R_{NIR} + R_{EDGE}}$</p>	<p>Το NDRE είναι ένας δείκτης που μπορεί να διατυπωθεί μόνο όταν η κόκκινη ζώνη είναι διαθέσιμη σε έναν αισθητήρα. Είναι ευαίσθητο στην περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη στα φύλλα (πόσο πράσινο εμφανίζεται ένα φύλλο), τη μεταβλητότητα στην περιοχή των φύλλων και τις επιπτώσεις στο έδαφος. Οι υψηλές τιμές του NDRE αντιπροσωπεύουν υψηλότερα επίπεδα περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη φύλλων από τις χαμηλότερες τιμές. Το έδαφος έχει συνήθως τις χαμηλότερες τιμές, τα ανθυγιεινά φυτά έχουν ενδιάμεσες τιμές και τα υγιή φυτά έχουν τις υψηλότερες τιμές. Ενδείκνυται η χρήση του NDRE εάν ενδιαφέρει η χαρτογράφηση της μεταβλητότητας</p>

	στις απαιτήσεις λιπασμάτων ή στο η περιεκτικότητα αζώτου στο φύλλωμα, και όχι απαραίτητα η διαθεσιμότητα αζώτου στο έδαφος.
<p>Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI)</p> $NDNI = \frac{\log\left(\frac{1}{\rho_{1510}}\right) - \log\left(\frac{1}{\rho_{1680}}\right)}{\log\left(\frac{1}{\rho_{1510}}\right) + \log\left(\frac{1}{\rho_{1680}}\right)}$	<p>Αυτός ο δείκτης έχει σχεδιαστεί για να εκτιμήσει τις σχετικές ποσότητες αζώτου που περιέχονται σε στο φύλλωμα. Η ανάκλαση στα 1510 nm καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη συγκέντρωση αζώτου στα φύλλα, καθώς και από τη συνολική βιομάζα φυλλώματος. Μαζί, η συγκέντρωση αζώτου φύλλων και η βιομάζα φυλλώματος συνδυάζονται στην περιοχή 1510 nm για την πρόβλεψη της συνολικής περιεκτικότητας σε άζωτο του φυλλώματος. Αυτό συγκρίνεται με μια ανακλαστικότητα αναφοράς στα 1680 nm, η οποία θα πρέπει να περιέχει ένα παρόμοιο σήμα λόγω της βιομάζας φυλλώματος, αλλά χωρίς την επίδραση της απορρόφησης αζώτου. Το NDNI είναι πειραματικό, αλλά δείχνει έντονη ευαισθησία στην αλλαγή της κατάστασης του αζώτου όταν το φύλλωμα είναι πράσινο (όχι γηρασμένος) και κλειστό στην αρχιτεκτονική. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν γεωργία ακριβείας, ανάλυση οικοσυστήματος και διαχείριση δασών.</p>

1.2.3.1 Εφαρμογές τηλεπισκόπησης στην γεωργία ακριβείας

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν οδηγήσει σε αυξημένη υιοθέτηση των UAV στις γεωργικές εφαρμογές. Προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της (1) απεικόνισης με πρωτοφανείς χωρικές λεπτομέρειες. (συνήθως λίγα εκατοστά), (2) διαθεσιμότητα κατ 'απαίτηση και (3) δυνατότητα λήψης δεδομένων σε συννεφιά (σε χαμηλή ραδιομετρική ποιότητα, ωστόσο). Οι πιο συνηθισμένες πλατφόρμες που χρησιμοποιούνται είναι πολυτροχικά ελικόπτερα ικανά για κάθετη απογείωση και προσγείωση και αιωρούνται πάνω από έναν στόχο, το οποίο είναι χρήσιμο για την ελαχιστοποίηση του θολώματος. Επίσης, μικρά αεροσκάφη σταθερής πτέρυγας χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο, έχοντας παρακάμψει την απαίτηση για απογείωση και προσγείωση, η οποία ήταν δύσκολο να ξεπεραστεί σε πολλές αγροτικές περιοχές. Προσφέρουν το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης διάρκειας πτήσης και κατά συνέπεια μεγαλύτερη κάλυψη σε μία μόνο πτήση, καθώς είναι πιο ενεργειακά αποδοτικά από τα ελικόπτερα πολλαπλών τροχών. Τα μειονεκτήματα των UAV, σε σύγκριση με τις δορυφορικές εικόνες VHR, είναι (1) περιορισμένη γεωγραφική κάλυψη, (2) μικρό ωφέλιμο φορτίο που περιορίζει την ποιότητα των αισθητήρων που μεταφέρονται επί του σκάφους και (3) νομοθεσίες που ενδέχεται να εμποδίσουν την πτήση σε ορισμένες περιοχές πέρα από εξοχή.

Αρκετοί αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε πλατφόρμες UAV, δηλαδή κάμερες RedGreenBlue (RGB), πολυφασματικοί αισθητήρες, υπερφασματικοί αισθητήρες και LiDAR¹². Οι πολυφασματικές κάμερες διατίθενται σε ένα ευρύ φάσμα χωρικών διαστάσεων και συνδυασμών ζωνών, ως έτοιμες λύσεις και με χαμηλό κόστος. Αυτοί οι αισθητήρες καλύπτουν κυρίως τα μέρη του φάσματος VIS-NIR σε ευρείες και συχνά επικαλυπτόμενες ζώνες. Μικροσκοπικοί υπερφασματικοί σαρωτές ή αισθητήρες απεικόνισης στιγμιότυπων έχουν αναπτυχθεί για UAV. Ωστόσο, το κόστος τους είναι ακόμα υψηλό. Ελαφροί σαρωτές λέιζερ ή LiDAR έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα για UAV και είναι σε θέση να ανακατασκευάσουν τον τρισδιάστατο (3D) χώρο για διάφορες αστικές μελέτες, εκτιμήσεις μεταλλείας και δασικά περιβάλλοντα. Η βασική αρχή της λειτουργίας LiDAR είναι η μέτρηση της απόστασης μεταξύ του αισθητήρα και του στόχου, μέσω του προσδιορισμού του χρόνου που έχει παρέλθει μεταξύ της εκπομπής παλμών λέιζερ και της επιστροφής στον δέκτη των αισθητήρων. Πολλαπλασιάζοντας αυτή τη φορά με την ταχύτητα του φωτός και διαιρώντας με δύο για να υπολογίσουμε τη διπλή απόσταση που διανύουμε, παρέχουμε μια ακριβή εκτίμηση της απόστασης μεταξύ του αισθητήρα και του στόχου.

1.2.4 Εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις

Σήμερα, οι αγρότες προσπαθούν συνεχώς να βρουν εναλλακτικούς τρόπους για να μειώσουν το κόστος παραγωγής τους και εφαρμογή μεταβλητής δόσης (Variable Rate Application - VRA) είναι μια ελκυστική τεχνολογία που έχει αποδειχθεί ότι το κάνει αυτό. Ταυτόχρονα, η τεχνολογία VRA έχει αναπτυχθεί ταχύτατα, συνειδητοποιώντας τον απαραίτητο εξοπλισμό για την εφαρμογή του (κεραίες GPS, ελεγκτές, ηλεκτρονικά και εργαλεία). Η υπόσχεση του VRA είναι πολύ ελκυστική και η ανάπτυξή της είναι πιθανό να συνεχιστεί. Παρ'όλα αυτά, η υιοθέτηση της τεχνολογίας VRA περιορίστηκε από το υψηλό κόστος εξοπλισμού, καθιστώντας την τεχνολογία που μόνο οι μεγάλοι γεωργοί μπορούν να επωφεληθούν βραχυπρόθεσμα. Για τους μικρούς και μεσαίους αγρότες, θα μπορούσε να διατίθεται ευρύτερα από προγράμματα επιδότησης και / ή πολιτικές επιδότησης απόκτησης εξοπλισμού VRA. Με αυτόν τον τρόπο, η εκπαίδευση των αγροτών θα γινόταν αναγκαστικά ώστε να εξοικειωθούν με τα πολλών συστήματα VRA που εισέρχονται στην αγορά συχνά χωρίς κατάλληλη τεχνική υποστήριξη.

Επί του παρόντος, η τεχνολογία VRA στη γεωργία δεν είναι μόνο δημοφιλής αλλά και κοινή στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες. Προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα τόσο στους αγρότες όσο και στο περιβάλλον. Οι αγρότες που χρησιμοποιούν VRA τείνουν να αυξάνουν την αποδοτικότητα της χρήσης εισροών επειδή εφαρμόζουν μόνο την ποσότητα που απαιτείται για τις καλλιέργειες (πού και πότε χρειάζεται). Η βελτιστοποίηση των ποσών

¹² <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>

εισροών έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει τις αποδόσεις των καλλιεργειών και τα γεωργικά κέρδη. Τέλος, οι ενεργοί οπτικοί αισθητήρες καλλιέργειας και εδάφους που χρησιμοποιούνται για διαφορετικές γεωργικές δραστηριότητες έχουν επιτρέψει στους αγρότες να λειτουργούν κατά τη διάρκεια της νύχτας, εξοικονομώντας χρόνο και εφαρμόζοντας εισροές στο σωστό μέρος και ώρα των απαιτήσεων της καλλιέργειας. Τα περιβαλλοντικά οφέλη του VRA επικεντρώνονται στις μειώσεις χημικών ουσιών που απελευθερώνονται στον αέρα και στα υπόγεια ύδατα, στις λίμνες και στα ποτάμια με έκπλυση και απορροή. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας VRA και της αυτόνομης διεύθυνσης οχημάτων μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη συμπίεση του εδάφους μέσα σε ένα πεδίο καθώς οι ελκυστήρες μπορούν να χρησιμοποιούν την ίδια τροχιά κάθε χρόνο (δηλαδή, σύστημα ελεγχόμενης κυκλοφορίας).

Οι περισσότεροι αγρότες έχουν κάποια στιγμή ασκήσει μια μορφή εφαρμογής μεταβλητής δόσης VRA ακόμα και με ένα συμβατικό ψεκαστήρα. Ένας συμβατικός ψεκαστήρας εφαρμόζει μια χημική ουσία που αναμιγνύεται με δεξαμενή με ένα φορέα (συνήθως νερό) χρησιμοποιώντας ακροφύσια ψεκασμού και μια βαλβίδα ρύθμισης της πίεσης για να παρέχει την επιθυμητή ογκομετρική εφαρμογή του μίγματος ψεκασμού σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα οχήματος. Οποιαδήποτε αλλαγή στην πίεση έκρηξης ή στην ταχύτητα του οχήματος από αυτήν της βαθμονόμησης έχει ως αποτέλεσμα ρυθμό εφαρμογής διαφορετικό από τον προγραμματισμένο ρυθμό. Για παράδειγμα, όταν παρατηρείται μια περιοχή προσβολής από ζιζάνια, ο εφαρμοστής μπορεί να αυξήσει χειροκίνητα την πίεση ή να μειώσει την ταχύτητα εφαρμογής υψηλότερου (αλλά κάπως άγνωστου) ποσοστού ζιζανιοκτόνου.

Τα συστήματα εφαρμογής εισροών με μεταβλητές δόσεις αποτελούνται από τρία βασικά μέρη:

- Τους αισθητήρες (sensors)
- Τους ελεγκτές (controllers)
- Τους ενεργοποιητές (actuators)

Οι αισθητήρες που έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις μετρούν τις παρακάτω ιδιότητες των φυτών και του εδάφους:

- Περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία
- Περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό
- Ανάκλαση φωτός από καλλιέργειες και ζιζάνια
- Θρεπτικά στοιχεία στο έδαφος

Οι ελεγκτές είναι συσκευές που αλλάζουν τον ρυθμό εφαρμογής των εισροών που εφαρμόζονται καθώς το μηχάνημα κινείται στον αγρό (on-the-go). Οι ελεγκτές χρησιμοποιούν μικροεπεξεργαστές για να διαβάσουν τα δεδομένα που παίρνουν από τους αισθητήρες και να υπολογίσουν την δόση εφαρμογής με βάση αποθηκευμένους αλγόριθμους.

Οι ενεργοποιητές είναι συσκευές που αντιδρούν σε σήματα που λαμβάνουν από τους ελεγκτές για να ρυθμίσουν την ποσότητα του προϊόντος που εφαρμόζεται στον αγρό. Η αντίδραση του ενεργοποιητή μπορεί να προκαλεί κινήσεις αξόνων ή κινητήρων που στη συνέχεια μετατρέπονται σε άνοιγμα ή κλείσιμο μιας θύρας, ή να προκαλέσει αλλαγή ταχύτητας ροής κλπ. Οι ενεργοποιητές έχουν σχεδιαστεί να αντιδρούν σε ηλεκτρικά, πνευματικά ή υδραυλικά σήματα που προέρχονται από τους ελεγκτές. Ένας ενεργοποιητής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αλλάξει τη θέση μιας βαλβίδας που ρυθμίζει τον ρυθμό ροής ενός υγρού ή την πίεση του. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να αλλάξει την θέση μιας συρόμενης θυρίδας για να ρυθμίσει τη ροή ενός κοκκώδους υλικού σε μια ταινία μεταφοράς.

Τα συστήματα εφαρμογής εισροών με μεταβλητές δόσεις μπορούν να διακριθούν σε τρεις τύπους ανάλογα με το προϊόν που εφαρμόζεται:

- Σπόρος
- Στερεά χημικά (κοκκώδη λιπάσματα, κοκκώδη εντομοκτόνα, ασβέστη)
- Υγρά χημικά (υγρά λιπάσματα, υγρά παρασιτοκτόνα)

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται διεξοδικά η περίπτωση της τεχνολογίας VRA που σχετίζεται με τη λίπανση κι εστιάζει στην βελτιστοποίηση της αζωτούχου λίπανσης συγκεκριμένα, μιας και είναι από τις πλέον κρίσιμες και γι' αυτό το λόγο την εξετάζουμε στην παρούσα μελέτη.

2 Εφαρμογή λίπανσης μεταβλητής δόσης

Τόσο τα ψεκαστικά όσο και οι σπαρτικές και οι λιπασματοδιανομείς σχεδιάζονται για να διανέμουν το υλικό σε συγκεκριμένη ποσότητα ή να εφαρμόζουν ταυτόχρονα κάποια αναλογία ενός ή περισσοτέρων υλικών. Η εφαρμογή ανεπαρκούς ποσότητας υλικού οδηγεί σε μη επιθυμητά αποτελέσματα και χαμηλή παραγωγή λόγω ανεπαρκούς φυτρώματος κ.λπ. Η υπερβολική δόση στην εφαρμοζόμενη ποσότητα οδηγεί σε κατασπατάληση πόρων, ενδεχόμενη ζημιά της παραγωγής, ενώ δεν αποκλείεται και ενδεχόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος. Δηλαδή, η εφαρμογή λανθασμένης δοσολογίας είτε δημιουργεί κενά στην επιφάνεια του εδάφους (χωρίς φυτά) ή, αντίθετα, μπορεί να δημιουργήσει περιοχές με υπερφύτευση, στις οποίες η ανάπτυξη των φυτών δεν είναι η επιθυμητή. Και οι 2 περιπτώσεις είναι ανεπιθύμητες και απευκαίεις. Για το λόγο αυτό ο κατασκευαστής ενός τέτοιου γεωργικού μηχανήματος φροντίζει να εφοδιάσει τον ιδιοκτήτη του με διαγράμματα ή πίνακες, να επιλέξει τη σωστή σχέση για να πετύχει τη σωστή εφαρμογή.

Η εφαρμογή των λιπασμάτων γίνεται με διάφορους τύπους λιπασματοδιανομών. Για τα στερεά λιπάσματα υπάρχουν οι φυγοκεντρικοί λιπασματοδιανομείς με έναν ή δύο δίσκους, οι λιπασματοδιανομείς με παλινδρομικό σωλήνα, οι λιπασματοδιανομείς που διανέμουν το λίπασμα στο πλάτος του μηχανήματος, οι γραμμικοί λιπασματοδιανομείς, οι πνευματικοί και για τα υγρά, τα ψεκαστικά και τα μηχανήματα έκχυσης αμμωνίας στο έδαφος. Σε πολλά από αυτά τα μηχανήματα έχουν αναπτυχθεί ελεγκτές και μηχανισμοί που μπορούν να αλλάξουν τη ρύθμιση και επομένως, την εφαρμοζόμενη δόση κατά τη λειτουργία στο χωράφι. Ένας ελεγκτής λαμβάνει το σήμα από το λογισμικό του συστήματος που μετατρέπει το σήμα από χάρτες εφαρμογής ή από αισθητήρες και αλλάζει άμεσα τη ρύθμιση. Οι λιπασματοδιανομείς έχουν συνήθως θυρίδα από όπου εξέρχεται το λίπασμα, που καθώς ανοίγει περισσότερο ή λιγότερο, αλλάζει την εφαρμοζόμενη δόση. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούνται φυγοκεντρικοί λιπασματοδιανομείς, ενώ τα συστήματα που ελέγχουν τη ρύθμιση είναι πολλά.

2.1 Βαθμονόμηση λιπασματοδιανομέα

Τα λιπάσματα αποτελούν βασικό θέμα της σύγχρονης γεωργίας. Εφαρμόζονται σε υγρή, αέρια ή κοκκώδη μορφή. Εξετάζεται παρακάτω η βαθμονόμηση του λιπασματοδιανομέα ο οποίος εφαρμόζει λίπασμα σε κοκκώδη μορφή, επειδή αυτός είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος λιπασματοδιανομέα και στην ελληνική ύπαιθρο. Η λίπανση με εφαρμογή υγρών λιπασμάτων ακολουθεί τις ίδιες αρχές με τα ψεκαστικά φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων, ενώ οι λιπασματοδιανομείς που διαχειρίζονται λιπάσματα σε αέρια μορφή απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό και συνήθως είναι πολύ επικίνδυνοι στη χρήση.



Εικόνα 1. Αναρτώμενος λιπασματοδιανομέας στον οποίο η ποσότητα του λιπάσματος που εφαρμόζεται αλλάζει με επέμβαση στο χειρομοχλό 1.

Οι περισσότεροι λιπασματοδιανομείς κοκκωδών λιπασμάτων είναι είτε ελεύθερης, είτε εξαναγκασμένης ροής. Όπως σε οποιοδήποτε άλλο γεωργικό μηχάνημα, έτσι και στην περίπτωση του λιπασματοδιανομέα μπορεί οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες μεταξύ των διαφόρων μηχανημάτων να ποικίλλουν. Ωστόσο, υπάρχουν κάποια βασικά και θεμελιώδη εξαρτήματα που πρέπει να υπάρχουν οπωσδήποτε σε κάθε λιπασματοδιανομέα. Αυτά είναι τα εξής:

- ο τρόπος ισχυοδότησης από το γεωργικό ελκυστήρα,
- η δεξαμενή αποθήκευσης του υλικού (λιπάσματος),
- ο μετρητικός μηχανισμός,
- ο μηχανισμός διανομής του λιπάσματος.

Η χωρητικότητα της δεξαμενής ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος του λιπασματοδιανομέα, ενώ η ποσότητα εφαρμογής ρυθμίζεται από το μετρητικό μηχανισμό που βρίσκεται στη βάση του δοχείου αποθήκευσης και μπορεί να μετακινείται αλλάζοντας την ποσότητα του λιπάσματος που εφαρμόζεται. Είναι φυσικό και επόμενο αν η μηχανική μετάδοση της κίνησης του μετρητικού μηχανισμού γίνεται μέσω του τροχού εδάφους, με κάθε αλλαγή ταχύτητας του μηχανήματος να αλλάζει άμεσα και η εφαρμοζόμενη ποσότητα λιπάσματος. Αυτό ξεπερνιέται

με την ισχυροδότηση του μηχανήματος από το δυναμοδότη και με κίνηση σε περίπου ίδιο αριθμό στροφών, ώστε ο λιπασματοδιανομέας να εφαρμόζει όσο το δυνατόν πιο σταθερή δόση, η οποία θα επηρεάζεται όσο το δυνατό λιγότερο από την ταχύτητα κίνησής του.

Η ποσότητα εφαρμογής εξαρτάται από τη σχέση μετάδοσης της κίνησης στον μετρητικό μηχανισμό και από το άνοιγμα της θυρίδας του μετρητικού μηχανισμού (χύμα μέτρηση ή bulk metering), οπότε μετριέται ο όγκος του υλικού εφαρμογής. Το υλικό στη συνέχεια ωθείται σε έναν ή περισσότερους περιστρεφόμενους δίσκους ή στροφεία (impellers) (1, Εικόνα 8.4), τα οποία το φυγοκεντρίζουν και το ωθούν προς τα έξω.

2.2 Μέθοδοι εφαρμογής λιπάσματος μεταβλητού ρυθμού

Υπάρχει μια ποικιλία τεχνολογιών VRA που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ή χωρίς σύστημα GPS. Οι δύο βασικές τεχνολογίες για τη VRA είναι: με βάση χάρτες και με βάση αισθητήρες:

1. **Η VRA βάσει χάρτη** προσαρμόζει το ρυθμό εφαρμογής βάσει ενός ηλεκτρονικού χάρτη, που ονομάζεται επίσης χάρτης συνταγών. Χρησιμοποιώντας τη θέση πεδίου από έναν δέκτη GPS και έναν χάρτη συνταγογράφησης του επιθυμητού ρυθμού, η συγκέντρωση της εισόδου αλλάζει καθώς ο εφαρμοστής κινείται μέσω του πεδίου.
2. **Η VRA που βασίζεται σε αισθητήρες** δεν απαιτεί χάρτη ή σύστημα εντοπισμού θέσης. Οι αισθητήρες στο εφαρμογέα μετρούν τις ιδιότητες του εδάφους ή τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας "εν κινήσει." Με βάση αυτήν τη συνεχή ροή πληροφοριών, ένα σύστημα ελέγχου υπολογίζει τις ανάγκες εισόδου του εδάφους ή των φυτών και μεταφέρει τις πληροφορίες σε έναν ελεγκτή, ο οποίος παραδίδει την είσοδο στη θέση που μετριέται από τον αισθητήρα.

Επειδή η κάθε μέθοδος ξεχωριστά έχει μοναδικά οφέλη αλλά και περιορισμούς, ορισμένα συστήματα έχουν αναπτυχθεί για να επωφεληθούν από τα οφέλη και των δύο μεθόδων.

2.2.1 Ζώνες διαχείρισης (Management Zones)

Η βάση ενός συστήματος Γεωργίας Ακριβείας είναι η διαμόρφωση στον αγρό ζωνών διαχείρισης που έχουν στόχο την εφαρμογή των εισροών με μεταβλητές δόσεις. Μια ζώνη διαχείρισης (Management Zone - MZ) μπορεί να οριστεί ως μια επιμέρους υποπεριοχή ενός πεδίου που έχει σχετικά ομοιογενείς παράγοντες περιορισμού της απόδοσης, χαρακτηριστικά εδάφους, τοπία και μπορεί να διαχειριστεί ομοιόμορφα. Μία ιδιότητα ή ένας συνδυασμός ιδιοτήτων πεδίου συνήθως επιτρέπει την οριοθέτηση των MZs, που ορίζονται ως τμήματα του πεδίου με ομοιογενείς ιδιότητες που μπορούν να αντιμετωπιστούν ομοιόμορφα. Η δημιουργία ζωνών διαχείρισης με βάση τοπογραφικά στοιχεία και εδαφικές ιδιότητες συχνά συλλαμβάνει

την παραλλακτικότητα στην παραγωγή λόγω της διαφοροποίησης σε διαθέσιμο για τα φυτά νερό και επομένως στο δυναμικό παραγωγής. Ο κατάλληλος αριθμός ζωνών παραγωγής διαφέρει από έτος σε έτος και σχετίζεται με τις καιρικές συνθήκες και το είδος της καλλιέργειας. Οι ζώνες διαχείρισης χρησιμοποιούνται συχνά για να δείξουν περιοχές του αγρού με όμοιο δυναμικό παραγωγής.

Η δημιουργία των ζωνών διαχείρισης γίνεται αξιολογώντας όλες τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες για τον αγρό όπως είναι:

- Φυσικές ιδιότητες του εδάφους
- Δυνατότητες διαχείρισης του παραγωγού
- Πιθανό κέρδος του παραγωγού

Ζώνες που βασίζονται στη γονιμότητα του εδάφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία χαρτών εφαρμογής λιπασμάτων με μεταβλητές δόσεις. Οι ζώνες διαχείρισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή θέσεων για λήψη δειγμάτων εδάφους. Επίσης περιοχές του αγρού με όμοιες ιδιότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση της παραγωγής με εδαφικούς και τοπογραφικούς παράγοντες για τη δημιουργία προτύπων ανάπτυξης καλλιεργειών. Πιο συγκεκριμένα, για τη δημιουργία των ζωνών διαχείρισης χρησιμοποιούνται διάφορες πληροφορίες όπως φαίνεται παρακάτω:

- Αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες του αγρού χωρίς βλάστηση
- Περίγραμμα του αγρού
- Τοπογραφικοί χάρτες
- Εδαφικοί χάρτες
- Χάρτες παραγωγής
- Αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες του αγρού με βλάστηση
- Δείκτες βλάστησης
- Δεδομένα από εδαφολογικές αναλύσεις
- Ελάχιστο μέγεθος ζώνης (εξαρτάται από τον εξοπλισμό)
- Ανωμαλίες του αγρού
- Προσβολές από έντομα
- Περιοχές στράγγισης

Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθούν στοιχεία της ιστορίας του αγρού όπως:

- Θέσεις παλαιών δρόμων, κτισμάτων
- Χάρτες που δείχνουν τη διέλευση των οχημάτων στο παρελθόν
- Λίπανση προηγούμενων ετών
- Καλλιέργειες των προηγούμενων ετών

- Κάλυψη άρδευσης
- Περιοχές του αγρού που συγκρατούν μεγάλη υγρασία
- Περιοχές του αγρού που έχουν υποστεί διάβρωση

Σχετικά με το μέγεθος των ζωνών διαχείρισης, το ελάχιστο μέγεθος καθορίζεται από την δυνατότητα του παραγωγού να διαφοροποιήσει τις εισροές σε ένα αγρό. Αυτό είναι συνάρτηση του μεγέθους του εξοπλισμού που χρησιμοποιεί. Το μέγιστο μέγεθος των ζωνών διαχείρισης καθορίζεται από τα περιθώρια του αγρού.

Ο αριθμός των ζωνών διαχείρισης εξαρτάται από

- Το μέγεθος του αγρού
- Την παραλλακτικότητα του αγρού
- Τη δυνατότητα του παραγωγού να διαφοροποιήσει τις εισροές

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η διαχείριση των ζωνών, αρκεί η χωρική πληροφορία να εισαχθεί σε κάποιο πακέτο GIS και να προσαρμοστεί στα όρια του αγρού. Οι γνώσεις των γεωργών και τα δεδομένα απόδοσης είναι επίσης εξαιρετικά εργαλεία για τη δημιουργία ζωνών διαχείρισης. Όταν δημιουργούνται χάρτες ζώνης, σε κάθε ζώνη εντός του πεδίου εκχωρείται αντίστοιχα ένας κωδικός αυτόματα ένας αριθμός οποίος αντιστοιχεί σε κάθε ζώνη.

Βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν οι ζώνες διαχείρισης είναι τα εξής:

- Σταθερότητα στο χρόνο
- Ευκολία στην οριοθέτηση
- Συσχέτιση με την παραγωγή
- Χαμηλό κόστος δημιουργίας

Υπάρχουν διάφορα κριτήρια για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της οριοθέτησης του MZ. Αυτά περιλαμβάνουν το μέτρο της μείωσης της διακύμανσης σε κάθε MZ, ή αναφορικά με την μεταβαλλόμενη δόση λιπάσματος, η αποδοτικότητα που υπολογίζεται με ανάλυση κόστους-οφέλους με βάση το χρησιμοποιούμενο λίπασμα εισόδου και την αποκτηθείσα απόδοση. Σύμφωνα με την τρέχουσα πρακτική, οι MZ δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου. Ωστόσο, ενώ οι περισσότερες ιδιότητες του εδάφους είναι αρκετά σταθερές με την πάροδο του χρόνου, υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι καλλιέργειες μπορεί να είναι περιορισμένες με διαφορετικούς τρόπους στην ίδια τοποθεσία. Παροδικοί παράγοντες, όπως μετεωρολογικά περιστατικά και αγρονομική διαχείριση, είναι παραδείγματα τέτοιων επιρροών. Η πρόσφατη έρευνα υποδηλώνει ότι πρέπει να εφαρμοστεί μια δυναμική προσέγγιση για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας τόσο εντός όσο και μεταξύ των εποχών.

2.2.2 Μεταβλητές μεταχειρίσεις βάσει χάρτη

Η εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις με χρήση χαρτών προσαρμόζει τη δόση της εισροής με βάση την πληροφορία που παίρνει από ένα χάρτη. Αυτά τα συστήματα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να καθορίσουν τη θέση της μηχανής στον αγρό και να τη συσχετίσουν με την επιθυμητή δόση διαβάζοντας ένα χάρτη. Η δόση εφαρμογής μπορεί να είναι ο όγκος στη μονάδα της επιφάνειας ή το βάρος στη μονάδα της επιφάνειας της εισροής.

Παρόλο που η VRA που βασίζεται στο χάρτη και η VRA που βασίζονται σε αισθητήρες είναι παρόμοιες μέθοδοι, η απόφαση σχετικά με τους ρυθμούς εισόδου για το πρώτο λαμβάνεται πριν από την εκτέλεση του VRA, βάσει συνταγογραφούμενων χαρτών. Χρησιμοποιώντας έναν δέκτη GPS, ο ρυθμός εισόδου αλλάζει καθώς ο εφαρμοστής κινείται μέσω του πεδίου, συγχρονίζοντας τη θέση των χαρτών συνταγών με την πραγματική θέση του εφαρμοστή. Αντίθετα, η VRA που βασίζεται σε αισθητήρες χρησιμοποιεί αισθητήρες και η απόφαση για τους ρυθμούς εισόδου λαμβάνεται σε πραγματικό χρόνο βάσει των μετρήσεων του αισθητήρα. Οι χάρτες εφαρμογής που απαιτούνται για VRA βάσει χάρτη είναι αρχεία ψηφιακών δεδομένων που καθορίζουν το ποσό εισόδου που θα εφαρμοστεί σε κάθε τοποθεσία στο πεδίο. Οι ρυθμοί εισόδου καθορίζονται από διάφορες ιδιότητες του εδάφους και της καλλιέργειας μετρούμενες με παραδοσιακή ανάλυση ή με αισθητήρες για τον προσδιορισμό α) του τύπου εδάφους, β) του χρώματος και της υφής του εδάφους, γ) της ποικιλίας εδάφους, δ) της φαινομενικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (ECa), ε) των δεικτών βλάστησης, ζ) του δείκτη φυλλώματος (Leaf Area Index), ε) την απόδοση της σοδειάς και πολλές άλλες πληροφορίες που επηρεάζουν τις καλλιέργειες και είναι συγκεκριμένες για την τοποθεσία (Ansari and Mahey, 2003; Saleem et al., 2010; Vellidis et al., 2011; Liakos et al., 2013α).

2.2.2.1 Τι είναι ο χάρτης εφαρμογής

Ο όρος χάρτης εφαρμογής (prescription map) αναφέρεται σε ηλεκτρονικούς χάρτες του αγρού που καθορίζουν περιοχές - ζώνες του χωραφιού και τη δόση της εφαρμογής σε κάθε περιοχή. Χρησιμοποιείται προκειμένου να καθοδηγήσει τον ελεγκτή του μηχανήματος εφαρμογής μεταβλητών δόσεων να εφαρμόσει τις επιθυμητές δόσεις στο χωράφι. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα αρχείο το οποίο έχει τις συντεταγμένες των σημείων του χωραφιού και ποσότητες της εισροής που πρέπει να εφαρμοστούν.

Ο καθορισμός των ζωνών για την εφαρμογή των μεταβλητών δόσεων μπορεί να βασιστεί σε ένα στοιχείο ή σε περισσότερα. Είναι προφανές ότι χρειαζόμαστε μια πολύ καλή γνώση του αγρού και της καλλιέργειας, καθώς και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, αλλά και τις καιρικές συνθήκες της κάθε χρονιάς και τις εφαρμοζόμενες καλλιεργητικές φροντίδες. Αναμφίβολα για κάθε καλλιεργητική πρακτική μπορούμε να ακολουθήσουμε διάφορους δρόμους για να επιτύχουμε το άριστο αποτέλεσμα που θα κριθεί τελικά από την επίδραση στην παραγωγή

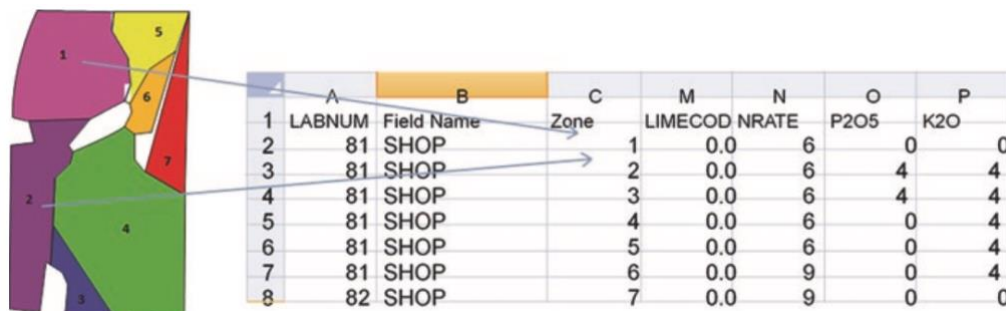
(ποσότητα, ποιότητα), αλλά και στο κόστος παραγωγής και στο κέρδος του παραγωγού. Οι χάρτες εφαρμογής μπορεί να βασίζονται σε δεδομένα προηγούμενων μετρήσεων και αναλύσεων, όπως:

1. Ο τύπος του εδάφους και άλλα στοιχεία του, όπως το χρώμα του, η δομή του, η τοπογραφία του χωραφιού (χάρτες αναγλύφου – elevation maps), η φαινομενική ηλεκτρική αγωγιμότητα.
2. Χάρτες του αγρού με την περιεκτικότητα σε θρεπτικά στοιχεία που προκύπτουν από αναλύσεις εδάφους σε δίκτυο σημείων ή κατευθυνόμενες.
3. Αισθητήρες που μετρούν χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως την υγρασία του, ή φασματική ανάλυση ανακλώμενου φωτός ή αντίσταση στην κατεργασία του εδάφους.
4. Εικόνες τηλεπισκόπησης ή χάρτες με δείκτες βλάστησης της φυτείας ή ακόμα και του εδάφους στη διάρκεια της βλαστικής περιόδου.
5. Χάρτες με παρατηρήσεις του γεωργού ή του συμβούλου του αγρότη στο προηγούμενο διάστημα της βλαστικής περιόδου ή των προηγούμενων ετών (πχ περιοχές με ζιζάνια, περιοχές που δεν φυτρώνει καλά η καλλιέργεια).
6. Χάρτες της παραγωγής του προηγούμενου ή των προηγούμενων ετών και επομένως, των στοιχείων που έχουν αφαιρεθεί από το έδαφος από την καλλιέργεια ή άλλα στοιχεία, όπως τα φυτικά υπολείμματα, κλαδιά δένδρων κλπ και
7. Κάθε άλλη πληροφορία που μπορεί να συγκεντρωθεί και να συνδεθεί με τις περιοχές του αγρού.

Ένας χάρτης εφαρμογής ενημερώνει τον ελεγκτή πόσα προϊόντα πρέπει να εφαρμόσει με βάση την τοποθεσία του εξοπλισμού στο πεδίο. Οι συνταγές δεν είναι εικόνες, αλλά αρχεία. Οι τιμές επιλέγονται για κάθε ζώνη. Αυτά τα ποσοστά είναι ενσωματωμένα σε ένα αρχείο συνταγών, βασικά μια συντεταγμένη GPS με λίπασμα ή/και ρυθμό σποράς που σχετίζεται με αυτό.

Το αρχείο που περιέχει τα στοιχεία του χάρτη πρέπει να είναι σε μορφή (format) που να συνεργάζεται με τον Η/Υ και τον ελεγκτή του μηχανήματος εφαρμογής της μεταβλητής δόσης, Όπως επίσης πρέπει να υπάρχει η πληροφορία για το ποιος υπολογιστής ή / και ελεγκτής θα χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός χάρτη συνταγών στην κατάλληλη μορφή καθώς τα αρχεία συνταγών είναι ειδικά για τον τύπο του ελεγκτή που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα αν ο ελεγκτής είναι της Ag Leader PF3000 Pro, θέλει αρχείο σε *.tgformat, ενώ σε έναν ελεγκτή Raven Viper μπορεί να διαβάσει *.shp format. Αυτό το αρχείο φορτώνεται στον ελεγκτή και οι τιμές αλλάζουν καθώς ο εφαρμογέας μετακινείται στο πεδίο. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι περιορισμοί του εξοπλισμού (ελάχιστες και μέγιστες

τιμές) και το πλάτος της εφαρμογής. Ορισμένοι ελεγκτές, όπως οι ελεγκτές John Deere¹³, απαιτούν να συμπεριληφθεί ένα αρχείο ορίου του πεδίου εκτός από τον χάρτη συνταγών. Η συνταγή είναι γραμμένη σε συμπαγές φλας (CF), κάρτα PCMCIA (ανάλογα με τις επιλογές εξοπλισμού) ή άλλο τύπο κάρτας δεδομένων, το οποίο στη συνέχεια φορτώνεται στον υπολογιστή μέσα στην καμπίνα του μηχανήματος.



Σχήμα 7. Ένας χάρτης συνταγών με επτά καθορισμένες ζώνες. Το υπολογιστικό φύλλο περιέχει δεδομένα δοκιμών εδάφους που δείχνουν πώς συνδέονται οι ζώνες με τα αποτελέσματα δοκιμών εδάφους

2.2.2.2 Δημιουργία του χάρτη εφαρμογής

Τα περισσότερα πακέτα γεωργικών GIS μπορούν να δημιουργήσουν χάρτες εφαρμογής σε πολλές μορφές. Για να βασίζονται οι συνταγές σε ζώνες, το πρώτο βήμα είναι να οριοθετηθούν οι ζώνες. Αυτό το βήμα μπορεί να ολοκληρωθεί χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους. Η χωρική φόρμα μπορεί να εισαχθεί στα πακέτα GIS και να περικυβεί στα όρια πεδίου. Οι γνώσεις των γεωργών και τα δεδομένα απόδοσης είναι επίσης εξαιρετικά εργαλεία για τη δημιουργία ζωνών διαχείρισης.

Όταν δημιουργούνται χάρτες ζώνης, σε κάθε ζώνη εντός του πεδίου εκχωρείται αυτόματα ένας αριθμός, μερικές φορές αναφέρεται ως χαρακτηριστικό ID. Ακολουθεί τη δειγματοληψία πλέγματος, όπου ο αγρός χωρίζεται συνήθως σε πλέγματα, χρησιμοποιώντας GIS επιτραπέζιου υπολογιστή ή PDA (φορητός υπολογιστής) φορτωμένος με πακέτο λογισμικού γεωργικών GIS. Τα πλέγματα είναι συνήθως αυθαίρετα και δεν αντιπροσωπεύουν καμία προηγούμενη ή τρέχουσα γνώση του πεδίου. Σε κάθε πλέγμα εκχωρείται ένας αριθμός,. Το χαρακτηριστικό ID είναι συγκρίσιμο με τη στήλη «ζώνη» στην Σχήμα 7. Έτσι το πακέτο GIS συνδέει τα αποτελέσματα των δοκιμών εδάφους με τη γεωγραφική θέση. Το δείγμα εδάφους ονομάζεται συνήθως με την ακόλουθη μορφή: Όνομα αγροτεμαχίου - Όνομα πεδίου - Όνομα ζώνης. Όταν τα δεδομένα ανάλυσης εδάφους επιστρέφονται από το εργαστήριο, χρησιμοποιείται η ίδια σύμβαση ονομασίας, η οποία επιτρέπει στο GIS να ταιριάζει με τα δεδομένα στην κατάλληλη ζώνη. Ένα σύστημα εντοπισμού θέσης χρησιμοποιείται κατά τη

¹³ <https://www.deere.com/en/index.html>

διάρκεια της δειγματοληψίας για την καταγραφή της θέσης των σημείων δειγματοληψίας στο χωράφι, το οποίο πρέπει να συμφωνεί ή να είναι ίδιο με το σύστημα που θα χρησιμοποιηθεί κατά την εφαρμογή των καθορισμένων ποσοστών θρεπτικών ουσιών στις κατάλληλες περιοχές του αγρού.

Η γεωργική τεχνολογική ανάπτυξη έχει προσφέρει πολλούς έξυπνους αισθητήρες στους αγρότες σήμερα, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων υγρασίας του εδάφους, εκτός από τους αισθητήρες που καταγράφουν την αλατότητα του εδάφους, την ανύψωση του τοπίου και τη σφριγηλότητα των φυτών. Αυτή η ευρεία γκάμα αισθητήρων, που διατίθεται σε προσιτές τιμές, βοήθησε τους αγρότες να κατανοήσουν την πιθανή μεταβλητότητα των ιδιοτήτων πεδίου. Μόλις συλλεχθούν, τα δεδομένα μπορούν να διαχειριστούν με γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) και στατιστικό λογισμικό για να οριοθετήσουν τις ΜΖ. Για τη διαχείριση της πολυπαραγοντικής φύσης των δεδομένων, διάφορες στατιστικές τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν όπως η ανάλυση των βασικών συστατικών, η μέθοδος ομαδοποίησης (π.χ., k-means clustering) και οι πολυπαραγοντικές γεωστατιστικές τεχνικές.

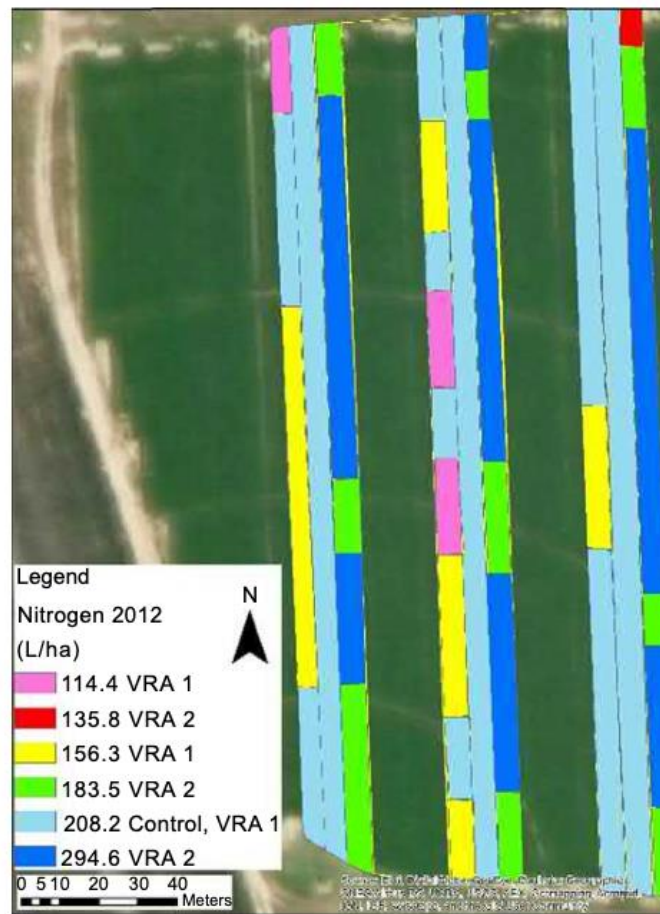
Η μέθοδος που βασίζεται στο χάρτη χρησιμοποιεί χάρτες αντικειμένων που έχουν μετρηθεί προηγουμένως και μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας διάφορες στρατηγικές. Οι παραγωγοί και οι σύμβουλοι καλλιεργειών έχουν επεξεργαστεί στρατηγικές για ποικίλες εισροές με βάση (1) τύπο εδάφους, (2) χρώμα και υφή εδάφους, (3) τοπογραφικό (υψηλό έδαφος, χαμηλό έδαφος), (4) απόδοση καλλιέργειας, (5) δεδομένα εντοπισμού πεδίου, (5) απομακρυσμένες ανιχνευμένες εικόνες και (6) πολλές άλλες πηγές πληροφοριών που μπορεί να είναι συγκεκριμένες για κάθε καλλιέργεια και τοποθεσία. Ορισμένες στρατηγικές βασίζονται σε μία μόνο πηγή πληροφοριών, ενώ άλλες περιλαμβάνουν συνδυασμό πηγών.

Για παράδειγμα, για την ανάπτυξη ενός χάρτη εφαρμογής μεταβλητής δόσης λιπάσματος σε έναν συγκεκριμένο αγρό, η μέθοδος που βασίζεται στον χάρτη θα μπορούσε να περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Πραγματοποίηση συστηματικής δειγματοληψίας εδάφους (και εργαστηριακή ανάλυση) για το αγρό.
- Δημιουργία συγκεκριμένων χαρτών για τις θρεπτικές ιδιότητες του εδάφους που ενδιαφέρουν τον παραγωγό για την εκάστοτε καλλιέργεια.
- Χρήση ενός αλγορίθμου για την ανάπτυξη ενός χάρτη συνταγών θρεπτικών συστατικών για συγκεκριμένη τοποθεσία
- Χρήση του χάρτη εφαρμογής για τον έλεγχο ενός εφαρμογέα μεταβλητού ρυθμού λιπάσματος.

Ανεξάρτητα από την πραγματική στρατηγική, ο χρήστης έχει τελικά τον έλεγχο του ποσοστού εφαρμογής. Αυτά τα συστήματα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να προσδιορίζουν τη θέση

του μηχανήματος στο πεδίο και να συσχετίζουν τη θέση με τον επιθυμητό ρυθμό εφαρμογής «διαβάζοντας» τον χάρτη συνταγών.



Σχήμα 8. Χάρτης εφαρμογής αζωτούχου λιπάσματος για μια καλλιέργεια βαμβακιού. Τα διαφορετικά χρώματα αντιπροσωπεύουν διαφορετικές δόσεις λιπάσματος.

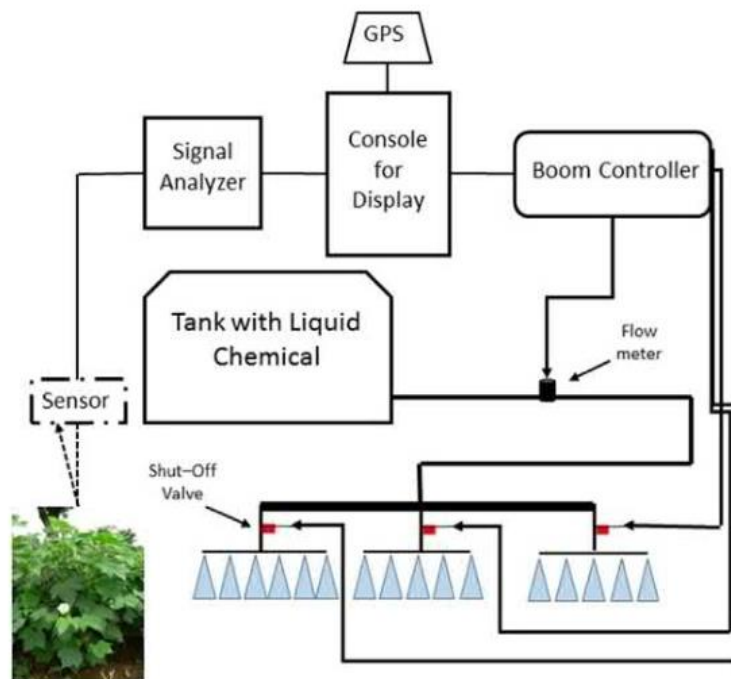
2.2.3 Μεταβλητές μεταχειρίσεις βάσει αισθητήρων

Η μέθοδος που βασίζεται σε αισθητήρες παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής του ρυθμού εφαρμογής των εισόδων χωρίς προηγούμενη χαρτογράφηση ή συλλογή δεδομένων. Η εφαρμογή εισροών με μεταβλητές δόσεις με χρήση αισθητήρων χρησιμοποιεί δεδομένα από αισθητήρες που δουλεύουν σε πραγματικό χρόνο (real time). Οι αισθητήρες πραγματικού χρόνου μετρούν τις επιθυμητές ιδιότητες παίρνουν δεδομένα - συνήθως ιδιότητες εδάφους ή χαρακτηριστικά καλλιέργειας - ενώ το σύστημα βρίσκεται εν κινήσει στον αγρό (on-the-go).

Στη συνέχεια, οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται από ένα τέτοιο σύστημα υποβάλλονται σε επεξεργασία για να προσαρμόσουν τις εισροές (πχ λιπάσματα, φυτοφάρμακα) στις ανάγκες του εδάφους και των καλλιεργειών και χρησιμοποιούνται αμέσως για τον έλεγχο ενός εφαρμοστή μεταβλητού ρυθμού. Οι αισθητήρες πρέπει να παρέχουν συνεχώς δεδομένα στον ελεγκτή έτσι ώστε οι εισροές να διαφοροποιούνται σε μικρές επιφάνειες του αγρού.

Το πλεονέκτημα του VRA που βασίζεται σε αισθητήρες έναντι του παραδοσιακού VRA είναι ότι δεν απαιτεί τη δημιουργία, χάρτη ούτε χρήση κεραιών Global Positioning System (GPS), ούτε απαιτεί εκτεταμένη ανάλυση πριν από την εφαρμογή δόσεων μεταβλητού ρυθμού. Ωστόσο, εάν τα δεδομένα των αισθητήρων καταγράφονται και κωδικοποιούνται γεωγραφικά, τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παραγωγή χαρτών. Έτσι, οι αγρότες που μπορούν να ενσωματώσουν VRA που βασίζεται σε αισθητήρες σε συνδυασμό με τεχνολογία GPS μπορούν να επωφεληθούν από την προσωρινή μνήμη των αποθηκευμένων δεδομένων εφαρμογής και των φυσικών συντεταγμένων. Τα δεδομένα είναι πολύτιμα, όχι μόνο για χρήση σε μελλοντικές δραστηριότητες διαχείρισης καλλιέργειας για συγκεκριμένους ιστότοπους, αλλά και για τη δημιουργία χαρτών συνταγών για άλλες λειτουργίες.

Το Σχήμα 9 παρουσιάζει ένα παράδειγμα εφαρμογής εισόδου υγρού με βάση έναν αισθητήρα. Ο αισθητήρας διαβάζει την ανάκλαση και στέλνει το σήμα στην κονσόλα. Η κονσόλα χειρίζεται συνεχώς το σήμα του αισθητήρα και στέλνει τις πληροφορίες στον ελεγκτή της μπούμας. Ο ελεγκτής της μπούμας ρυθμίζει τους κατάλληλους ρυθμούς χρησιμοποιώντας μια αντλία, έναν μετρητή ροής, έναν ελεγκτή ροής και βαλβίδες απενεργοποίησης.



Σχήμα 9. Παράδειγμα ενός συστήματος εφαρμογής μεταβλητών δόσεων υγρού λιπάσματος με βάση αισθητήρες

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα VRA που βασίζονται σε αισθητήρες, το πιο συνηθισμένο πρόβλημα είναι η ρύθμιση των λειτουργιών απόκρισης, δηλαδή λειτουργιών που σχετίζονται με το δείκτη αισθητήρα και το ρυθμό εισόδου. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι οι εφαρμοστές πρέπει να αλλάζουν τους ρυθμούς πολύ γρήγορα, επειδή ο ρυθμός εισόδου ποικίλλει σε

πραγματικό χρόνο. Η απαιτούμενη χρονική περίοδος για την αλλαγή των ποσοστών των εφαρμογών, που ονομάζεται χρόνος καθυστέρησης, είναι συνήθως μεγαλύτερη από 3 δευτερόλεπτα. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του ενεργοποιητή, με ταχύτητα 10 km/h, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 8 m. Ωστόσο, αυτή η απόσταση σύνδεσης μεταξύ αισθητήρα και ενεργοποιητή είναι πολύ μεγάλη. Τέλος, ένα άλλο μειονέκτημα είναι η περίπλοκη φύση των εργασιών που σχετίζονται με VRA που βασίζεται σε αισθητήρες όπως η αυτόματη ανίχνευση, η μοντελοποίηση και ο έλεγχος.

Σε σύγκριση με τη VRA που βασίζεται σε αισθητήρες, η VRA που βασίζεται σε χάρτη επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργούν προοδευτικά βάσεις δεδομένων χρήσιμες για μια σειρά αποφάσεων διαχείρισης και να χρησιμοποιούν πολλές πηγές πληροφοριών στη διαδικασία διαμόρφωσης σχεδίων VRA. Από την άλλη πλευρά, η VRA βάσει χάρτη είναι μια χρονοβόρα διαδικασία, τόσο για τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων όσο και για τη δημιουργία συνταγών χαρτών. Αντίθετα, η VRA που βασίζεται σε αισθητήρες εξαλείφει την ανάλυση δεδομένων πριν την εφαρμογή, καθιστώντας την πολύ γρήγορη, ενώ οι αισθητήρες παράγουν υψηλότερη ανάλυση δεδομένων από τις παραδοσιακές μεθόδους δειγματοληψίας. Ωστόσο, η ακρίβεια της εφαρμογής εξαρτάται από τις επιδόσεις και τις λειτουργίες του αισθητήρα που προβλέπουν την επίδραση μιας ή περισσότερων ιδιοτήτων πεδίου στην απόδοση και την ποιότητα της καλλιέργειας.

Πίνακας 2. Βασικές διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων μεταβλητών μεταχειρίσεων

Παράμετρος	Βάσει χάρτη	Βάσει αισθητήρων
Μεθοδολογία	Δειγματοληψία εδάφους > εργαστηριακές αναλύσεις > εξειδικευμένοι χάρτες > εφαρμογή με διανομέα μεταβλητού ρυθμού	Αισθητήρες πραγματικού χρόνου > υπολογισμός με βάση την ανάδραση > εφαρμογή με διανομέα μεταβλητού ρυθμού
GPS/DGPS	Απαιτείται	Όχι απαραίτητο
Εργαστηριακή ανάλυση (χώμα και φύτα)	Απαιτείται	Όχι απαραίτητη
Χαρτογράφηση	Απαιτείται	Όχι απαραίτητη
Απαιτήση χρόνου	Μεγάλη	Μικρή
Εφαρμογή	Δύσκολη	Εύκολη
Σχετικότητα	Σε αναπτυσσομένες χώρες	Σε αναπτυγμένες χώρες

2.2.4 Παραδείγματα συστημάτων εφαρμογής μεταβλητών δόσεων με βάση αισθητήρες

Οι εφαρμογές λιπασμάτων μπορούν να καλύψουν μια ευρεία περιοχή συσκευών εφαρμογής. Πολλές από τις τεχνολογίες VRA για εφαρμογές λιπασμάτων είναι παρόμοιες με τον έλεγχο ζιζανίων (εφαρμογές υγρού-υγρού) και την εφαρμογή περιορισμού (ξηρά χημικά). Η αποτελεσματικότητά τους μπορεί να είναι περίπλοκη βάσει των καιρικών επιπτώσεων και της διαθεσιμότητας των θρεπτικών συστατικών και των θαλάσσιων ηχητικών κύκλων.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, πολλοί ερευνητές ανέμεναν ότι η ανάπτυξη ακριβών συστάσεων αζώτου για υποπεριοχές πεδίων θα ήταν βεβαιότητα. Μέρος αυτής της αισιοδοξίας προήλθε από την ανάπτυξη πολλών νέων εργαλείων για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών της τοποθεσίας που επηρέασαν άμεσα την κατάσταση του αζώτου των καλλιεργειών, την παροχή εδάφους-αζώτου και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Αυτές περιλάμβαναν δοκιμές νιτρικού εδάφους πριν από την περίοδο και αργά την άνοιξη, δοκιμές νιτρικών μίσχων στα τέλη της σεζόν, τηλεπισκόπηση ιδιοτήτων καλλιέργειας και εδάφους, δεδομένα για συγκεκριμένες τοποθεσίες από συσκευές παρακολούθησης απόδοσης και χάρτες ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους. Ωστόσο, για να είναι αποτελεσματικά αυτά τα νέα χωρικά εργαλεία, οι καθορισμένοι χάρτες αζώτου που βοήθησαν να παράγουν έπρεπε να είναι ακριβείς και εφαρμόσιμοι από έτος σε έτος.

Η δυνατότητα εφαρμογής της VRA αζώτου, όπως η τεχνολογία καθοδήγησης / αυτόματης αποστολής, είναι διαθέσιμη στους καλλιεργητές για παραπάνω από 20 χρόνια. Είναι ιδιαίτερα επιθυμητή, καθώς η ικανότητα βελτιστοποίησης ή βελτίωσης της αποδοτικότητας χρήσης αζώτου είναι γνωστό ότι έχει μεγάλη επίδραση στην κερδοφορία. Ωστόσο, η υιοθέτηση της VRA αζώτου ήταν πολύ χαμηλότερη από αυτή των συστημάτων autosteer στην αροτραία καλλιέργεια (Miller et al., 2019). Η τεχνολογία πλέον είναι αρκετά ώριμη. Η οπτική ανίχνευση, από δορυφορικές, εναέριες ή επίγειες πλατφόρμες, είναι σε θέση να προσδιορίσει την «πρασινάδα» στις καλλιέργειες και αυτό μπορεί να συνδεθεί με το στάδιο ανάπτυξης των καλλιεργειών για να προσδιορίσει εάν η καλλιέργεια είναι χαμηλότερη ή υπεραπόδοση (N ανεπαρκής ή επαρκής). Αυτή η πορεία αποφάσεων είναι σαφής, ωστόσο, η πραγματική απόφαση είναι η ποσότητα N που χρειάζεται πραγματικά.

Η VRA του φωσφόρου (P) είναι πιθανώς η δεύτερη πιο κερδοφόρα δραστηριότητα VRA. Ο φώσφορος του εδάφους δεν είναι τόσο παροδικός όσο το άζωτο του εδάφους (N), πράγμα που σημαίνει ότι οι δοκιμές εδάφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αρκετά χρόνια. Επίσης, υπάρχουν ενδείξεις ότι μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη μπορεί να προκύψουν από τη δημιουργία ζώνης αναφοράς για τον φώσφορο.

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά πολύ έγκυρα και πολύ συχνά χρησιμοποιούμενα εμπορικά συστήματα μεταβλητής λίπανσης.

2.2.4.1 Greenseeker

Οι ενεργοί αισθητήρες φυλλώματος καλλιέργειας με τις δικές τους πηγές φωτός δεν περιορίζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες φωτός, επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας για μη καταστροφική διάγνωση της κατάστασης μιας καλλιέργειας αναφορικά με το Ν. Ο ενεργός αισθητήρας φυλλώματος GreenSeeker με κόκκινες ζώνες (R) και κοντά υπέρυθρες (NIR) έχει χρησιμοποιηθεί συνήθως για διάγνωση της κατάστασης του Ν. Ο αισθητήρας αυτός έχει δύο προεπιλεγμένους δείκτες βλάστησης (VIs): δείκτη βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDVI) και δείκτη βλάστησης αναλογίας (RVI). Μία πρόκληση για τη χρήση του αισθητήρα GreenSeeker είναι ότι το NDVI έχει βρεθεί να δείχνει κορεσμό σε συνθήκες μέσης έως υψηλής βιομάζας και επομένως μπορεί να μην είναι κατάλληλο για συστήματα καλλιέργειας υψηλής απόδοσης.

Το Greenseeker είναι ένα μηχάνημα το οποίο μετράει τις ανάγκες του φυτού για άζωτο καθώς προχωράει στον αγρό και εφαρμόζει αζωτούχο λίπασμα, ανάλογα με τις ανάγκες της καλλιέργειας. Δουλεύει με τον εξής τρόπο:

- Ο αισθητήρας σαρώνει την καλλιέργεια χρησιμοποιώντας LED
- Εκτιμά την υγεία της καλλιέργειας χρησιμοποιώντας το δείκτη NDVI
- (Normalized Difference Vegetation Index)
- Προβλέπει το δυναμικό παραγωγής της καλλιέργειας
- Καθορίζει την άριστη δόση αζώτου ανά ζώνη
- Εφαρμόζει το άζωτο σε μεταβλητές δόσεις ανάλογα με τις ανάγκες κάθε ζώνης



Εικόνα 2 Αισθητήρας που χρησιμοποιεί το Greenseeker (αριστερά) και ενσωμάτωσή του σε εφαρμογέα μεταβλητής ροής (δεξιά)

Για εφαρμογές αζώτου που χρησιμοποιούν το GreenSeeker, η ιδέα είναι ότι η ποσότητα λιπάσματος που απαιτείται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία εντός του χωραφιού μπορεί να προσδιοριστεί εφαρμόζοντας μια λωρίδα αναφοράς πλούσια σε άζωτο κατά τη φύτευση ή λίγο μετά και συγκρίνοντας τη χωρική μεταβλητότητα της ανάπτυξης των καλλιεργειών σε όλο το πεδίο σε ανάπτυξη των καλλιεργειών από την λωρίδα αζώτου. Η πλούσια σε άζωτο λωρίδα παρέχει μια περιοχή στην οποία το άζωτο δεν είναι ο παράγοντας περιορισμού της απόδοσης. Μια λωρίδα πλούσια σε άζωτο υλοποιείται επιλέγοντας μία λωρίδα που διασχίζει το χωράφι (συνήθως ένα πέρασμα του εξοπλισμού εφαρμογής λιπάσματος) για να λάβει μια πλήρη εφαρμογή αζώτου κατά τη φύτευση. Στη συνέχεια, οι ενδείξεις NDVI συλλέγονται από τη λωρίδα πλούσια σε άζωτο για τη βαθμονόμηση του συστήματος αισθητήρων καλλιέργειας. Καθώς ο εφαρμοστής λιπάσματος καλύπτει το χωράφι, οι αισθητήρες διαβάζουν τις τιμές NDVI, τις συγκρίνουν με τις τιμές NDVI από τη λωρίδα πλούσια σε άζωτο και εφαρμόζουν μια προσαρμοσμένη ποσότητα αζώτου.

Για παράδειγμα, εάν η τιμή NDVI στη λωρίδα πλούσια σε άζωτο ήταν 0,5 αλλά ήταν 0,6 σε μια συγκεκριμένη θέση εντός του πεδίου, δεν θα εφαρμοζόταν άζωτο επειδή ο αισθητήρας καθόρισε ότι υπάρχει ήδη αρκετό άζωτο. Αντιστρόφως, εάν η πλούσια σε άζωτο ταινία είχε ένδειξη 0,5 NDVI αλλά μια άλλη θέση εντός του πεδίου είχε 0,4 NDVI, τότε το άζωτο θα εφαρμοζόταν σε αυτήν την περιοχή.

2.2.4.2 Yara N-Sensor

Η τεχνολογία ανίχνευσης που εφαρμόζεται στη γεωργία βασίζεται στην τυπική καμπύλη ανάκλασης του φωτός για τη βλάστηση (NDVI). Ο N-Sensor μετρά την ανάκλαση του φωτός σε συγκεκριμένες ζώνες κυμάτων που σχετίζονται με την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη και τη βιομάζα. Η αρχή λειτουργίας του Yara N-Sensor βασίζεται σε έναν αισθητήρα ο οποίος καθορίζει την ανάγκη αζώτου μετρώντας την ανακλαστικότητα φωτός της καλλιέργειας που καλύπτει συνολική έκταση περίπου 50m²/sec.

Οι μετρήσεις λαμβάνονται κάθε δευτερόλεπτο με το σύστημα σχεδιασμένο να λειτουργεί σε κανονικές ταχύτητες εργασίας και σε όλα τα πλάτη της περιόδου. Οι βέλτιστοι ρυθμοί εφαρμογής προέρχονται από τα δεδομένα πρόσληψης N και αποστέλλονται στον ελεγκτή του διασκορπιστή μεταβλητού ρυθμού ή του ψεκαστήρα, ο οποίος θα προσαρμόζει ανάλογα τους ρυθμούς λιπασμάτων.



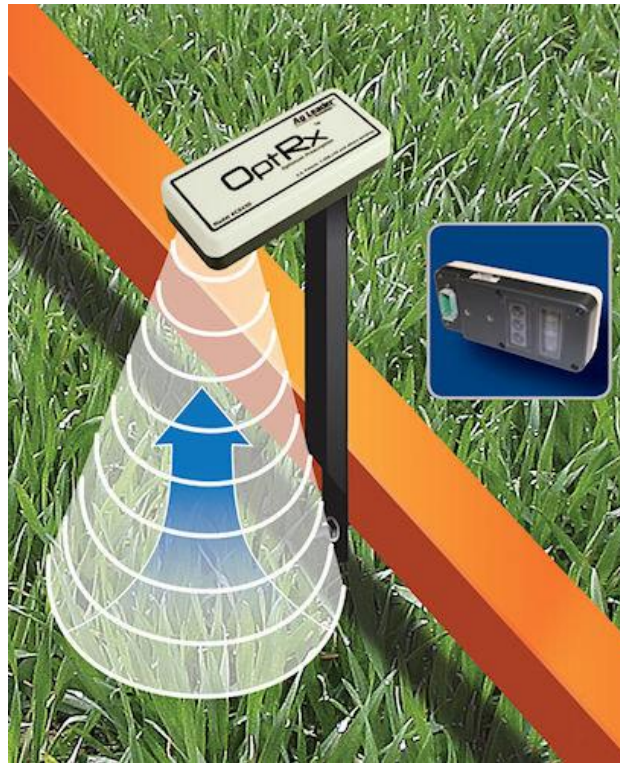
Εικόνα 3. Αισθητήρας που χρησιμοποιεί το Yara N-sensor (πάνω) και τρόπος λειτουργίας του (κάτω)

2.2.4.3 OptRx

Οι αισθητήρες OptRx εκπέμπουν φως και μετρούν την ανάκλαση μερικών συγκεκριμένων μηκών κύματος φωτός. Η μετρούμενη ανάκλαση φωτός υποδεικνύει την περιεκτικότητα της φυτικής βιομάζας και χλωροφύλλης στα φυτά. Αυτό επιτρέπει στους αισθητήρες να υπολογίζουν το φυτικό δείκτη. Ο φυτικός δείκτης (Vegetation Index - VI) είναι ένας αριθμός μεταξύ 0 και 1 που χρησιμοποιεί το σύστημα OptRx για να ποσοτικοποιήσει τη ζωνή καλλιέργεια. Μια υψηλότερη τιμή VI υποδηλώνει καλύτερη δύναμη καλλιέργειας, ενώ μια χαμηλότερη τιμή VI υποδηλώνει χαμηλότερη δύναμη καλλιέργειας. Αυτό δίνει στον καλλιεργητή ένα στιγμιότυπο της συνολικής ποιότητας περικοπής κατά τη σάρωση με τους αισθητήρες OptRx.

Το σύστημα OptRx επιτρέπει στον χρήστη να έχει τον έλεγχο των συστάσεων N. Πρώτον, υπάρχει ένα ελάχιστο και μέγιστο ποσοστό, το οποίο ορίζεται από τον χρήστη. Αυτές οι ρυθμίσεις εμποδίζουν το σύστημα να εφαρμόσει πάρα πολύ ή πολύ μικρό ποσό λιπάσματος. Το σύστημα διαθέτει επίσης μετατόπιση ρυθμού, το οποίο επιτρέπει στο χρήστη να προσθέσει ή να αφαιρέσει κιλά λιπάσματος από αυτό που προτείνει το ίδιο. Το OptRx εξασφαλίζει την βαθμονόμηση του συστήματος χωρίς να απαιτεί την μέγιστη δόση αζωτούχου λιπάσματος. Χρησιμοποιεί μια ταινία εικονικής αναφοράς για τον προσδιορισμό της καλύτερης δυναμικής

περικοπής στο πεδίο. Ο τρόπος δημιουργίας μιας εικονικής ταινίας αναφοράς είναι να διασχίσει ο αγρότης ένα μέρος του χωραφιού όπου γνωρίζει ότι είναι πιθανό να έχει καλλιέργεια στην καλύτερη κατάσταση για τουλάχιστον πέντε λεπτά. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, το OptRx καθορίζει την καλύτερη δυνατή καλλιέργεια. Στη συνέχεια, υπολογίζει τις συστάσεις αζωτούχου λιπάσματος και εφαρμόζει περισσότερο σε περιοχές με χαμηλή ένταση καλλιέργειας και λιγότερο σε περιοχές με υψηλή ένταση καλλιέργειας.



Εικόνα 4. Αισθητήρας που χρησιμοποιεί το OptRx

2.2.4.4 Augmenta

Η Augmenta παρουσιάζει έναν παθητικό αισθητήρα νέας γενιάς και συνδυάζει ένα σύστημα κάμερας 4K, πολλαπλούς αισθητήρες περιβάλλοντος / φωτός και ένα προηγμένο Α.Ι. κινητήρα (λειτουργεί σε ενσωματωμένο υπολογιστή), παρέχοντας έναν γενικό δείκτη υγείας καλλιέργειας για την εφαρμογή της υπολογισμένης δόσης λιπάσματος. Στόχος είναι να μεγιστοποιήσει τις δυνατότητες κάθε ζώνης του αγρού. Ο αναλυτής πεδίου σαρώνει την υγεία των καλλιεργειών ανά ίντσα. Υπολογίζει την απαιτούμενη δόση λιπάσματος και την εφαρμόζει χρησιμοποιώντας διασκορπιστές / ψεκαστήρες - σε πραγματικό χρόνο. Η εγκατάσταση είναι απλή και το σύστημα είναι πλήρως αυτοματοποιημένο σύστημα απαιτεί μόνο ελάχιστη επιχειρησιακή προσπάθεια.



Εικόνα 5. Αισθητήρας που χρησιμοποιεί το σύστημα της Augmenta

2.3 Συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή μεταβλητού ρυθμού λιπάσματος αζώτου

Η μετάβαση από τη συμβατική γεωργία σε ΓΑ απαιτεί επενδύσεις από την μεριά των αγροτών: στην τεχνολογία (αισθητήρες, λογισμικό, εφαρμογές), στη γνώση (για τη λειτουργία του νέου μηχανήματος) και στο χρόνο (για να μάθετε έναν διαφορετικό τρόπο εργασίας, για να δημιουργήσετε σχέσεις με ένα νέο σύνολο παρόχων υπηρεσιών). Η απόδοση της επένδυσης μπορεί να προέλθει από διάφορες κατευθύνσεις. Συνήθως, η ΓΑ έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χρήσης εισόδου. Για ακριβά προϊόντα όπως ορισμένα φυτοφάρμακα, η σχετική εξοικονόμηση κόστους μπορεί να προσφέρει επαρκή απόδοση της επένδυσης. Αυτό δεν θα ισχύει για φθηνές εισροές όπως το λίπασμα αζώτου (N). Εδώ, η ΓΑ μπορεί να είναι χρήσιμη για έναν αγρότη επειδή διευκολύνει τη συμμόρφωση με τους νόμους που ρυθμίζουν τη χρήση λιπασμάτων. Εναλλακτικά η ΓΑ μπορεί να αυξήσει τα έσοδα μέσω της αύξησης της ποιότητας, για παράδειγμα όταν η φύτευση με μεταβλητό ρυθμό ή η εφαρμογή N με μεταβλητό ρυθμό μπορεί να οδηγήσει σε πιο ομοιόμορφη κατανομή μεγέθους του τελικού προϊόντος ή για παράδειγμα υψηλότερο ειδικό βάρος καρπών που συγκομίζονται. Γίνεται λοιπόν προφανές ότι η υιοθέτηση ΓΑ μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει εκείνες τις τεχνολογίες ΓΑ των οποίων τα οικονομικά κέρδη είναι αρκετά εύκολα αντιληπτά. Για τέτοιες τεχνολογίες, μια γρήγορη «δοκιμαστική κίνηση», ένας γρήγορος υπολογισμός των αναμενόμενων κερδών ή μια σχετική σύγκριση κόστους με το πλησιέστερο υποκατάστατο αρκεί συχνά για να προσελκύσει τον αγρότη να συμμετάσχει. Σίγουρα, δεν απαιτούνται χρόνια συλλογής δεδομένων για τη λήψη της απόφασης υιοθέτησης τέτοιων τεχνολογιών. Πράγματι, οι αγρότες που σκέφτονται πολύ για τέτοιες τεχνολογίες θα διαπιστώσουν ότι έχουν χάσει την περίοδο κερδοφορίας.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει εκείνες τις τεχνολογίες ΓΑ των οποίων τα οικονομικά οφέλη είναι δύσκολο να οριοθετηθούν, και που πιθανώς απαιτούν τη δημιουργία βάσης δεδομένων σε επίπεδο αγροκτήματος για να βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων μακροπρόθεσμα. Και πάλι, η VRA των εισροών και ειδικά της λίπανσης με N, είναι ένα καλό παράδειγμα. Επειδή τέτοιες τεχνολογίες ΓΑ είναι εγγενώς μακροχρόνιες, πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη στο πλαίσιο άλλων μακροχρόνιων γεωργικών τεχνολογιών, για παράδειγμα εκείνων που σχετίζονται με μακροπρόθεσμους στόχους γονιμότητας του εδάφους, πρακτικές άρωσης και στρατηγικές εναλλαγής καλλιεργειών. Κάτι τέτοιο μπορεί να σημαίνει ότι το κόστος της υιοθέτησης ΓΑ μπορεί να κατανέμεται στα κέρδη από πολλές τεχνολογικές αλλαγές, ενισχύοντας την κερδοφορία της υιοθέτησης.

Η εφαρμογή μεταβλητού ρυθμού (VRA) είναι η βασική τεχνική της ΓΑ, με στόχο την εκτέλεση συγκεκριμένης τοποθεσίας διαχείρισης εισόδου. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η VRA του λιπάσματος έχει αποδειχθεί ότι είναι μια από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για την επίτευξη σχετικά υψηλών αποδόσεων ή τη διατήρηση των αποδόσεων, ενώ χρησιμοποιεί μειωμένη ποσότητα λιπάσματος, λόγω της καλύτερης απόδοσης χρήσης λιπασμάτων διαφορετικών καλλιεργειών. Η χωρική μεταβλητότητα των αποδόσεων έχει θεωρηθεί χρήσιμος δείκτης για τον προσδιορισμό της διαχείρισης θρεπτικών ουσιών με μεταβλητό ρυθμό. Σύμφωνα με τον Heege (2013), εάν οι αποδόσεις καταγράφονται κατά τη συγκομιδή σε μικρές περιοχές και αναφέρονται γεωγραφικά σε πολύ λεπτή χωρική ανάλυση, τότε μπορεί να προσδιοριστεί η απομάκρυνση των θρεπτικών συστατικών για αυτές τις μικρές περιοχές και τα θρεπτικά συστατικά μπορούν να εφαρμοστούν με συγκεκριμένο τρόπο τοποθεσίας χρησιμοποιώντας την τεχνική VRA.

Το λίπασμα αζώτου (N) είναι ένα βασικό θρεπτικό συστατικό του εδάφους για την παραγωγή τροφίμων. Ωστόσο, οι ανάγκες των καλλιεργειών N και η διαθεσιμότητα του εδάφους N ποικίλλουν χωρικά και εποχιακά και ο βέλτιστος ρυθμός λίπανσης N διαφέρει εντός και μεταξύ χωραφιών. Όταν χρησιμοποιούνται σταθερές τιμές N, μπορεί να προκύψει είτε τροφοπενία αζώτου στις καλλιέργειες (ανεπαρκής τροφοδοσία N), είτε περιβαλλοντική ρύπανση (υπερβολική προσφορά N). Για τον προσδιορισμό του βέλτιστου N πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η χωρική μεταβλητότητα του διαθέσιμου N (με μετρήσεις εδάφους) και των αναγκών καλλιέργειας N (με παρατήρηση της κατάστασης του φυτού). Η τρέχουσα τεχνολογία προσφέρει πολλές λύσεις για την αποτελεσματική μέτρηση (από πλευράς χρόνου και κόστους) των ιδιοτήτων του εδάφους και της κατάστασης της καλλιέργειας N και για την εφαρμογή χωρικά μεταβλητών ποσοστών N της σεζόν σύμφωνα με τις τοπικές ανάγκες. Αυτό οδηγεί σε έλεγχο των υπερβολικών εφαρμογών αλλά και υπο-εφαρμογών του N και σε βελτιώσεις της αποδοτικότητας χρήσης N

Επί του παρόντος, οι περισσότερες από τις τεχνολογίες VRA είναι διαθέσιμες στο εμπόριο, αλλά χρειάζονται μια επένδυση χρόνου και σκέφτονται πώς να εφαρμόσουν τους χάρτες συνταγών. Η απόφαση για χρήση της VRA και οι συνταγές για διάφορες εισόδους είναι πραγματικά συγκεκριμένες για τον κάθε αγρό. Δεν είναι βέβαιο ότι κάθε αγρόκτημα ή χωράφι θα παρουσιάσει οικονομικό όφελος από τη VRA, αλλά αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν ευκαιρίες στους καλλιεργητές να αυξήσουν τόσο την παραγωγή όσο και την περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα της παραγωγής των καλλιεργειών και πρέπει να αξιολογηθούν προσεκτικά.

Τα μοτίβα απόκρισης σε άζωτο είναι συχνά χωροταξικά και μπορούν να ποικίλουν ευρέως εντός του ίδιου πεδίου, περιπλέκοντας περαιτέρω την ανάπτυξη συνταγών χαρτών. Οι παράλληλες συγκρίσεις της ομοιόμορφης διαχείρισης και της διαχείρισης VRA αζώτου δεν αποκάλυψαν σταθερά πλεονεκτήματα για οποιαδήποτε στρατηγική όσον αφορά τις αποδόσεις που επιτεύχθηκαν, την αποδοτικότητα, τη χρήση αζώτου σε ολόκληρο το πεδίο ή την αποδοτικότητα χρήσης αζώτου από τα φυτά. Στο μέλλον, μια καλύτερη κατανόηση της χρονικής διακύμανσης στα επίπεδα δοκιμής εδάφους αζώτου, καλύτερα μοντέλα προσομοίωσης καλλιεργειών και βελτιωμένος εξοπλισμός ανίχνευσης αζώτου και εφαρμογής μπορεί να βοηθήσει τους παραγωγούς να αποκομίσουν τα οφέλη της διαχείρισης VRA αζώτου. Οι αισθητήρες καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο προσφέρουν τις περισσότερες δυνατότητες για τη VRA αζώτου, καθώς αυτά τα συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να «ανιχνεύουν» τις ανάγκες σε άζωτο της καλλιέργειας κατά τη στιγμή της εφαρμογής. Αυτά τα συστήματα απαιτούν καλά γονιμοποιημένες περιοχές στο πεδίο για τη βαθμονόμηση του αισθητήρα. Η τρέχουσα έρευνα θα καθορίσει εάν αυτά τα συστήματα θα χρησιμοποιηθούν ευρέως στο μέλλον.

Χωρίς πολύ καλές (εντατικές) πληροφορίες, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα μια νέα και μεταβλητή απόφαση να είναι πιθανώς εσφαλμένη. Οι αλληλεπιδράσεις με άζωτο είναι πολύ περίπλοκες και υπάρχει μεγάλος κίνδυνος να συμβούν λάθη. Ως εκ τούτου, οι καλλιεργητές συνήθως χρησιμοποιούν τα μέσα και/ή ιστορικά ποσοστά εφαρμογής N, η οποία ενδεχομένως είναι και η πιο επικίνδυνη στρατηγική για να ακολουθήσουν. Η διαχείριση του αζώτου χρειάζεται πολλή γνώση του αγρού και πειραματισμό για να φτάσει σε μια καλή διαδικασία λήψης αποφάσεων με την οποία κατευθύνει την τεχνολογία λιπασμάτων ανίχνευσης N και μεταβλητού ρυθμού Σε γενικές γραμμές, οι περισσότεροι καλλιεργητές δεν έχουν αυτή την ικανότητα ή δεν ξοδεύουν αρκετό χρόνο συλλέγοντας αυτές τις πληροφορίες. Επομένως περιορίζονται σε πιο απλοποιημένες γενικές προσεγγίσεις που είναι δυνητικά ωφέλιμες, αλλά σίγουρα όχι βέλτιστες. Ο κίνδυνος και το ασαφές σύστημα αποφάσεων σημαίνει ότι παρά τα 20 χρόνια προώθησης και τα σαφή πιθανά οφέλη, το VRA αζώτου εξακολουθεί να παραμένει

μια τεχνολογία ΓΑ και όχι μια «κανονική» γεωργική πρακτική στα περισσότερα γεωργικά συστήματα.

Ανεξάρτητα από το επίπεδο χρήσης της τεχνολογίας σήμερα, είναι πολύτιμο να ενημερώνονται οι αγρότες σχετικά με τις αλλαγές που συμβαίνουν στη γεωργική παραγωγή. Δεν προσφέρουν όλες οι νέες τεχνολογίες σαφή και επαρκή οικονομικά οφέλη σε όλους τους παραγωγούς. Ωστόσο, η εξοικείωση με την τεχνολογία θα επιτρέψει να αποφασίσουν ποια κομμάτια του παζλ ακριβείας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να τους βοηθήσουν να επιβιώσουν και να ευδοκιμήσουν. Η υιοθέτηση της διαχείρισης αζώτου VRA (N) από τους παραγωγούς θεωρείται χαμηλή, παρά τα πιθανά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη αυτής της πρακτικής. Ένα σημαντικό εμπόδιο είναι οι συνιστώμενοι ρυθμοί λιπασμάτων αζώτου βάσει του στόχου απόδοσης, οι οποίοι σπάνια συσχετίζονται με τους πραγματικούς οικονομικά βέλτιστους ρυθμούς αζώτου.

Κάθε νέα υπηρεσία πρέπει να περιέχει όσο το δυνατόν περισσότερες ενσωματωμένες γνώσεις για την απλοποίηση της παράδοσης και της εφαρμογής της υπηρεσίας. Οι υπηρεσίες που χρησιμοποιούν τα λεγόμενα μοντέλα «μαύρου κουτιού» είναι επαρκείς για τη βιομηχανία, αρκεί να λαμβάνονται καλές χωρικές αποφάσεις. Οι καλλιεργητές γενικά δεν χρειάζεται να γνωρίζουν τους μηχανισμούς των υπηρεσιών δεδομένων / πληροφοριών / αποφάσεων, αλλά να είναι σε θέση αξιολογούν την ποιότητα του τελικού προϊόντος μιας υπηρεσίας. Η επανάσταση της πληροφορίας που σχετίζεται με την «ψηφιακή γεωργία» έχει τη δυνατότητα να παρέχει τρόπους για την καλύτερη υποστήριξη των τρεχουσών τεχνολογιών έντασης πληροφοριών και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να τις μετατρέψει σε ενσωματωμένες τεχνολογίες γνώσης.

2.4 Το μαρούλι ως μελέτη περίπτωσης για τη μεταβλητή λίπανση

Το μαρούλι τύπου Cos πιστεύεται ότι έχει διαδοθεί από την Ελλάδα και το όνομα του τύπου προέρχεται από το νησί Κω, που βρίσκεται στο Αιγαίο Πέλαγος. Επίσης, χώροι προέλευσης του μαρουλιού θεωρούνται οι περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου, Μικράς Ασίας, Καυκάσου, Περσίας και Τουρκιστάν. Υπάρχουν ζωγραφίες μαρουλιού τύπου Cos σε επιτύμβιες πλάκες στην Αίγυπτο από το 4500 π.Χ. και είναι γνωστό ότι χρησιμοποιείται ευρέως στη διατροφή του ανθρώπου για πάνω από 2000 χρόνια. Πριν από τη χρήση του ως τροφή, το μαρούλι χρησιμοποιείται για τις φαρμακευτικές του ιδιότητες, ως τονωτικό, διουρητικό, παυσίπονο και αποχρεμτικό.

Το μαρούλι *Lactuca sativa* L. είναι το δημοφιλέστερο και πιο διαδεδομένο κηπευτικό της οικογένειας των Asteraceae. Χρησιμοποιείται ως νωπό λαχανικό σε σαλάτες, τόσο στην Ελλάδα όσο και σε διάφορες χώρες ανά την υφήλιο (Η.Π.Α., Ιαπωνία, Κεντρική Ευρώπη, κ.ά.).

Σήμερα το μαρούλι, σε αντίθεση με πολλά άλλα λαχανικά που καλλιεργούνται σε εξειδικευμένες περιοχές, έχει διαδοθεί και καλλιεργείται σχεδόν σε όλα τα γεωγραφικά πλάτη και μήκη της υφελίου ως ετήσιο λαχανικό. Στην Ασία παράγεται το 50% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής, ενώ το 27% και 20% στη Β. & Κ. Αμερική και Ευρώπη αντίστοιχα. Η Κίνα και οι Η.Π.Α. είναι οι κυριότερες χώρες παραγωγής σε διεθνές επίπεδο, ενώ η Ισπανία, η Γερμανία, η Ιταλία και η Γαλλία σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Η καλλιέργειά του γίνεται κυρίως σε περιοχές και εποχές όπου επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες.

Στη χώρα μας, το μαρούλι καλλιεργείται το Σεπτέμβριο και συνεχίζεται με τις πιο όψιμες σπορές έως και τον Απρίλιο. Η καλλιέργεια του μαρουλιού είναι κυρίως υπαίθρια αλλά σε περιοχές όπου ο χειμώνας είναι πολύ ψυχρός καλλιεργείται και σε θερμοκήπια. Το καλοκαίρι η παραγωγή περιορίζεται σημαντικά, λόγω των προβλημάτων που δημιουργούνται (σχηματισμός ανθικών στελεχών) από τις υψηλές θερμοκρασίες και το μεγάλο μήκος ημέρας, πρόβλημα που γίνονται προσπάθειες να ξεπεραστεί με την επιλογή ποικιλιών ανθεκτικών στον πρώιμο σχηματισμό ανθικών στελεχών. Η ζήτηση μαρουλιού είναι πάρα πολύ μεγάλη και το καλοκαίρι. Εκτός από τις υπαίθριες καλλιέργειες τα τελευταία χρόνια καλλιεργείται μαρούλι και στα θερμοκήπια κατά τη διάρκεια του χειμώνα, γιατί η ανάπτυξη γίνεται πιο γρήγορα, παράγεται προϊόν πολύ καλής ποιότητας και εκτός από την καλλιέργεια στο έδαφος του θερμοκηπίου παρέχεται η δυνατότητα της ανάπτυξης των φυτών σε υδροπονικές καλλιέργειες και κυρίως στο θρεπτικό διάλυμα λεπτής στοιβάδας. Στην Ελλάδα το παραγόμενο μαρούλι καταναίσκεται αποκλειστικά στη ντόπια αγορά. Εξαγωγές δεν γίνονται, θα μπορούσε όμως να καλλιεργηθεί (οι τύποι που προτιμώνται) και για εξαγωγές στις χώρες τη Β. Ευρώπης κατά τον χειμώνα, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η χώρα μας λόγω κλίματος.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μαρουλιού οι οποίοι διαφέρουν ως προς τη μορφή και τη διάταξη των φύλλων τους στον κοντό βλαστό καθώς και στον σχηματισμό ή απουσία κεφαλής. Ανάλογα με αυτά τα χαρακτηριστικά χωρίζονται σε διάφορες ομάδες. Έτσι έχουμε τον τύπο Cos ή Ρωμάνο (*Lactuca sativa* var. *Romana* D.C.) (Εικόνα 6), ο πιο διαδεδομένος τύπος στην ελληνική αγορά, καθώς και στη Μέση Ανατολή και Βόρεια Αφρική, με μικρή χαλαρή κεφαλή στο εσωτερικό και λεπτά μακριά φύλλα στο εξωτερικό. Επίσης, ένας αρκετά διαδεδομένος τύπος μαρουλιού που καλλιεργείται στην Κεντρική και Βόρεια Ευρώπη είναι το λείο, κεφαλωτό (*Lactuca sativa* var. *Capitata* D.C.) με σφαιρική περίπου κεφαλή και λεία, μαλακά και τρυφερά φύλλα και το οποίο έχει μικρότερη αντοχή στη μετακίνηση. Το μαρούλι τύπου Cos ή Romaine είναι πιο θρεπτικό από τους κεφαλωτούς τύπους μαρουλιού, γιατί έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε βιταμίνες Α και C. Το μαρούλι επίσης είναι μια καλή πηγή Ca και P.



Εικόνα 6. Ποικιλία μαρουλιού τύπου Cos ή Romana.

2.4.1 Βοτανικοί Χαρακτήρες

Το καλλιεργούμενο μαρούλι ή μαρούλι εδώδιμο ή ήμερο είναι διπλοειδές και έχει 18 χρωμοσώματα $2n=18$. Σε κανονικές συνθήκες είναι φυτό “μακράς ημέρας”, που σημαίνει ότι δεν θα παράγει ανθικό στέλεχος και άνθη, εφόσον η διάρκεια της ημέρας δεν ξεπεράσει κατά πολύ τις 12 ώρες φωτός. Το φυτό είναι μονοετές, ποώδες και οι τύποι και οι ποικιλίες που καλλιεργούνται σήμερα χωρίζονται ανάλογα με το σχήμα και μέγεθος των φύλλων καθώς και με την παρουσία ή απουσία της κεφαλής.

Ο βλαστός είναι αρκετά κοντός κατά τη διάρκεια της βλαστικής φάσης και τα φύλλα είναι πολύ πυκνά (μορφή ροζέτας). Καθώς προχωράει το φυτό στη φάση της αναπαραγωγής, ο ανθοφόρος βλαστός αναπτύσσεται σημαντικά. Τα φύλλα είναι λεία, πλατειά, διαφόρου μεγέθους και σχήματος, ωσειδή, καρδιοειδή, επιμήκη, εμφανίζονται πάνω στον κοντό βλαστό κατά σπειροειδή διάταξη, είναι ακέραια ή κυματοειδή ή ακανόνιστα οδοντωτά. Τα πρώτα φύλλα είναι σχεδόν επίπεδα, ενώ τα επόμενα φύλλα εμφανίζουν διαφόρου βαθμού κύρτωση, ανάλογα με τον τύπο και την ποικιλία, και καλύπτει το ένα το άλλο σχηματίζοντας κεφάλι. Το χρώμα, ανάλογα με τον τύπο και την ποικιλία, κυμαίνεται από βαθύ πράσινο ή πρασινοκίτρινο ως με κοκκινωπή απόχρωση.

Κατά την εποχή της αναπαραγωγής σχηματίζεται ανθικό στέλεχος (ανθοφόρος βλαστός) ύψους 60-120 εκ., όρθιο, λείο, χωρίς άκανθες, διακλαδιζόμενο και πολύφυλλο. Ο καρπός (σπόρος) είναι αχαίνιο, έχει μικρό μέγεθος, είναι επιμήκης (3-4 χλστ.), χρώματος πρασινωπού ή λευκωπού ή γκριζωπού, είναι λείος με 5-7 ραβδώσεις και φέρει πάππο από λεπτές λευκές τρίχες, το χαρακτηριστικό των συνθέτων. Σε σύγκριση με άλλα λαχανικά οι σπόροι του μαρουλιού διατηρούν τη βλαστική τους ικανότητα σχετικά λίγα χρόνια. Το μαρούλι σχηματίζει πασσαλώδη ρίζα. Τα φυτά μαρουλιού έχουν ένα ριζικό σύστημα που περιλαμβάνει μια

κύρια ρίζα και μικρότερες δευτερεύουσες ρίζες. καθώς και πλάγιες ρίζες οι περισσότερες εκ των οποίων αναπτύσσονται επιφανειακά στα 30 εκ. του εδάφους, όμως με τη διαδικασία της μιας ή περισσότερων μεταφυτεύσεων που ακολουθούνται, η κεντρική ρίζα του φυτού καταστρέφεται και αναπτύσσει θυσσανώδες επιφανειακό ριζικό σύστημα.

Γενικά, το μαρούλι πολλαπλασιάζεται με σπόρο και είτε γίνεται απευθείας σπορά στο χωράφι – μέθοδος που σπάνια ακολουθείται στην Ελλάδα- ή, συνηθέστερα, αναπτύσσονται φυτάρια σε σπορεία και ακολουθεί μεταφύτευση. Για καλλιέργειες στα θερμοκήπια εφαρμόζεται αποκλειστικά η μέθοδος της μεταφύτευσης. Υποστηρίζεται από πολλούς ότι η επιτυχία ή αποτυχία μια καλλιέργειας μαρουλιού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιτυχία στην παραγωγή των φυταρίων στο φυτώριο, γεγονός που επισημαίνει την μεγάλη σημασία που έχει η εξασφάλιση δυνατών και υγιών φυταρίων.

2.4.2 Συνθήκες Καλλιέργειας

Το μαρούλι λόγω του ότι είναι πολύ ευαίσθητο φυτό όσον αφορά τις εδαφικές συνθήκες που απαιτεί, χρειάζεται ένα έδαφος, το οποίο να στραγγίζει καλά, να είναι πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία και γόνιμο με υψηλό βαθμό υδατοϊκανότητας. Τα αμμοπηλώδη εδάφη, τα οποία είναι πλούσια σε οργανική ουσία, είναι από τα πιο κατάλληλα. Για πρώιμη παραγωγή προτιμώνται τα ελαφρά αμμώδη εδάφη. Το άριστο pH κυμαίνεται από 6,0-7,0. Για να διατηρείται το έδαφος αφράτο και να στραγγίζει ικανοποιητικά, πρέπει να προστίθεται οργανική ουσία, όπως καλά χωνεμένη κοπριά, ψιλοκομμένα άχυρα ή άλλη μορφή οργανικής ουσίας, μια φορά το χρόνο. Επιπλέον το μαρούλι είναι ευαίσθητο στην παρουσία υψηλής συγκέντρωσης αλάτων στο έδαφος, τα οποία προκαλούν καθυστέρηση στην ανάπτυξη, ενώ και τα φύλλα αποκτούνε σκούρο πράσινο χρώμα με δερματώδη εμφάνιση. Μέτρα για τον περιορισμό των αλάτων στο έδαφος είναι η έκπλυση του εδάφους, η μη χρησιμοποίηση χλωριούχων λιπασμάτων, κ.ά.

Το μαρούλι είναι φυτό ψυχρής εποχής και αναπτύσσεται ικανοποιητικά σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (αντέχει μέχρι -5°C). Γενικά συνιστάται, η θερμοκρασία κατά την διάρκεια της νύκτας να κυμαίνεται 5-7 πιο χαμηλά από την αντίστοιχη θερμοκρασία της ημέρας και η θερμοκρασία στο σπορείο όπου τα φυτάρια είναι μικρά να κυμαίνεται 2-3 $^{\circ}\text{C}$ πιο υψηλά από την θερμοκρασία στον κύριο χώρο ανάπτυξης όπου τα φυτά είναι μεγαλύτερα. Το φως είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα όταν η καλλιέργεια γίνεται στο θερμοκήπιο. Ακόμη και όταν το υλικό κάλυψης έχει τα καλύτερα χαρακτηριστικά περατότητας στο φως, μόνο το 70% της συνολικής ποσότητας που φτάνει στην επιφάνεια του υλικού το διαπερνά και από την ποσότητα που έχει περάσει μόνο το 70% αξιοποιείται από τα φυτά.

Η απόφαση πότε θα εφαρμοστεί άρδευση και πόσο νερό θα δοθεί αποτελεί ένα από τα διαρκή προβλήματα της καλλιέργειας μαρουλιού. Το έδαφος θα πρέπει να θεωρηθεί σαν μια αποθήκη νερού από την οποία το φυτό απορροφά νερό, το οποίο αναπληρώνεται κατά καιρούς με την άρδευση. Πριν την μεταφύτευση το έδαφος πρέπει να ποτιστεί και να φτάσει στο σημείο της υδατοϊκανότητάς του. Στη συνέχεια σε αμμώδη εδάφη η φύτευση μπορεί να γίνεται την επόμενη ημέρα, ενώ σε πιο βαριά εδάφη πιθανόν να χρειαστεί να περάσουν 3-4 ημέρες ώστε το επιφανειακό στρώμα να χάσει υγρασία. Μετά τη μεταφύτευση ακολουθεί πότισμα, κατά προτίμηση με καταιονισμό, ώστε το επιφανειακό στρώμα του εδάφους να φθάσει και πάλι στο σημείο υδατοϊκανότητάς του. Αυτό θα σημαίνει περιορισμένη άρδευση μερικών μόνο λεπτών. Μετά τη μεταφύτευση το φυτό απορροφά νερό μόνο από τα επιφανειακά 3-4 εκ. έτσι, είναι σημαντικό το επιφανειακό στρώμα να διατηρείται υγρό. Εάν για οποιοδήποτε λόγο ξηραθεί το επιφανειακό γόνιμο έδαφος ή ο κύβος εδάφους ή η «μπάλα» υποστρώματος, τότε η ανάπτυξη του φυτού είναι προβληματική. Το μαρούλι αναπτύσσει θυσσανώδες επιφανειακό ριζικό σύστημα. Για το λόγο αυτό είναι προτιμότερο να ποτίζεται πολλές φορές και με λίγο νερό. Όταν το φυτό πλησιάζει την περίοδο συγκομιδής, το ριζικό του σύστημα θα έχει αναπτυχθεί σε όλο τον επιφανειακό όγκο του εδάφους σε βάθος 20-30 εκ., οπότε το πότισμα στο μαρούλι καλό είναι να γίνεται με καταιονισμό από ψηλά, για να γίνεται ομοιόμορφη κατανομή του νερού. Η ύπαρξη του συστήματος καταιονισμού στο θερμοκήπιο μπορεί να εξυπηρετήσει και στην αύξηση της υγρασίας (μείωση διαπνοής) καθώς και στην μείωση της θερμοκρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου. Αύξηση της υγρασίας στην ατμόσφαιρα όταν πλησιάζει η συγκομιδή μπορεί να βοηθήσει και στη μείωση της πιθανότητας εμφάνισης στα φύλλα, του φυσιολογικού καψίματος και του περιφερειακού εγκαύματος που προκαλούνται από υπερβολική ένταση της ακτινοβολίας και με χαμηλά επίπεδα ατμοσφαιρικής υγρασίας καθώς και την αποφυγή τους.

2.4.3 Βασική Λίπανση

Το μαρούλι αναπτύσσεται ικανοποιητικά σε γόνιμο έδαφος, πλούσιο σε οργανική ουσία, γι' αυτό απαιτείται γενναιόδωρη λίπανση με καλά χωνεμένη κοπριά, η οποία πρέπει να προστεθεί στο έδαφος αρκετά νωρίς, πριν από την απολύμανση και πριν από τη μεταφύτευση, ώστε να ενσωματωθεί στο έδαφος και να αποκτήσει μια ομοιόμορφη δομή. Ποσότητες κοπριάς μέχρι 10 τον/στρ. θεωρούνται ικανοποιητικές. Ακόμη μεγαλύτερες ποσότητες μπορεί να εφαρμοστούν σε ελαφρά αμμώδη εδάφη όταν επιδιώκεται η βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Η χρήση της κοπριάς και γενικά της οργανικής ουσίας βοηθά σημαντικά στη βελτίωση της υδατοϊκανότητας του εδάφους και ιδιαίτερα το ποσό του νερού που συγκρατείται χαλαρά και επομένως άμεσα διαθέσιμο για τα φυτά.

Τη βασικότερη θέση στην οργανική λίπανση, όχι μόνο της καλλιέργειας μαρουλιού αλλά όλων των φυτικών ειδών, κατέχει η χρήση κομπόστ, τόσο σε επίπεδο προετοιμασίας εδάφους όσο

και βασικής λίπανσης. Κομπόστ ονομάζεται το σταθεροποιημένο οργανικό υλικό που παράγεται από την ελεγχόμενη αερόβια αποικοδόμηση διαφόρων φυτικών ή ζωικών υπολειμμάτων με τη βοήθεια μικροοργανισμών. Χαρακτηριστικό του γνώρισμα είναι ότι έχει σκούρο χρώμα, είναι ομοιογενές και μυρίζει όπως το χώμα μετά τη βροχή.

2.4.4 Ανόργανη λίπανση

Η βασική ανόργανη λίπανση πρέπει να γίνεται με βάση τη διαθεσιμότητα των στοιχείων που υπάρχουν στο έδαφος και που προσδιορίζονται μετά από χημική ανάλυση. Έχει προσδιοριστεί ότι μια καλλιέργεια μαρουλιού αφαιρεί από το έδαφος 8-10 κιλά N, 3 κιλά P και 9-10 κιλά K ανά στρέμμα (Lorenz & Maynard, 1988 και Zing & Yamaguchi, 1962). Στην Αγγλία ο ADAS¹⁴ συνιστά να εφαρμόζεται πρόγραμμα λίπανσης σύμφωνα με τη χημική ανάλυση του εδάφους. Όσον αφορά το άζωτο, παρά το γεγονός ότι τα φυλλώδη λαχανικά, όπως το μαρούλι, χρησιμοποιούν μεγάλες ποσότητες, η υπερβολική χρήση του δημιουργεί υδαρή φυτά, ευπαθή στις ασθένειες και τα κεφαλωτά μαρούλια μπορεί να συμπεριφέρονται όπως τα μαρούλια τύπου Cos, δηλ. να μην σχηματίζουν κεφαλή. Εάν δεν έχει προηγηθεί χημική ανάλυση του εδάφους, γεγονός πολύ συνηθισμένο στην Ελλάδα, τότε συνιστάται σαν βασική λίπανση η προσθήκη 50-100 κιλά/στρ. σύνθετου λιπάσματος 11-15-15 ή 14-22-9 ή 15-5-7 ή αντίστοιχες περίπου ποσότητες απλών λιπασμάτων.

Το μαρούλι είναι ευαίσθητο φυτό σε αυξημένη συγκέντρωση αλάτων (υψηλή αγωγιμότητα), έχει όμως αυξημένες ανάγκες σε ασβέστιο. Είναι πολύ ευαίσθητο σε όξινο έδαφος δηλ. χαμηλό pH < 6,0, γεγονός που, εάν συμβαίνει, συνιστάται η προσθήκη ασβεστίου, ώστε το pH να φθάσει στο 6,0-7,0, επίπεδο που δεν πρέπει να ξεπεράσει γιατί προκαλούνται τροφοπενίες Mn (τα φύλλα κιτρινίζουν και εμφανίζονται καφέ στίγματα στην περιφέρεια. Συνιστάται ψεκασμός $MnSO_4$). Ασβέστιο μπορεί να προστεθεί υπό μορφή ένυδρου ασβεστίου, καμινευμένης ασβεστόπετρας ή κοινής ασβεστόπετρας. Η καμινευμένη ασβεστόπετρα δίνει αποτελέσματα γρήγορα, ενώ η κοινή πολύ αργά. Αύξηση του pH του εδάφους κατά 0,5 μονάδα σε βάθος 20 εκ. απαιτεί να προστεθεί στο έδαφος ποσότητα ασβεστίου 250 κιλών ανά στρέμμα σε ελαφρύ έδαφος και 500 κιλά/στρ. σε βαθύ έδαφος.

2.4.5 Επιφανειακή λίπανση

Όταν η βασική λίπανση εφαρμόζεται σωστά ίσως δεν θα χρειαστεί να προστεθεί επιφανειακή λίπανση κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του φυτού, γιατί η ολοκλήρωση της ανάπτυξης του φυτού γίνεται σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, αλλά επίσης, και επειδή το έδαφος του θερμοκηπίου συνήθως είναι πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία. Εάν χρειαστεί να γίνει επιφανειακή

¹⁴ <https://www.adas.uk/>

λίπανση τότε συνιστάται η προσθήκη νιτρικής αμμωνίας (NH_4NO_3) σε ποσότητα 2 κιλά/στρ, σε σύνολο 3 επιφανειακών λιπάνσεων πριν τη συγκομιδή. Το θέμα της περιεκτικότητας των φύλλων του μαρουλιού σε νιτρικά άλατα θα πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα. Στις επιφανειακές λιπάνσεις μπορεί να δοθούν τα κύρια θρεπτικά στοιχεία N,P,K μαζί με το νερό ποτίσματος σε συγκεντρώσεις 100 ppm N, 30-50 ppm P και 150-200 ppm K, καθ' όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης του φυτού στο θερμοκήπιο, μέχρι τουλάχιστον μια εβδομάδα πριν από τη συγκομιδή (Ολύμπιος, 2001).

2.4.6 Συγκομιδή – Αποδόσεις

Η συγκομιδή γίνεται όταν τα φυτά αποκτήσουν εμπορεύσιμο μέγεθος, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της αγοράς και ανάλογα με τον τύπο του μαρουλιού και της ποικιλίας. Επίσης, η τιμή του προϊόντος στην αγορά καθορίζει και το στάδιο συγκομιδής. Στο μαρούλι τύπου «Ρωμάνο», η συγκομιδή γίνεται όταν εμφανιστεί η μικρή κεφαλή στο κέντρο του φυτού, ενώ στα «Κεφαλωτά» μαρούλια γίνεται όταν η κεφαλή αποκτήσει το χαρακτηριστικό μέγεθος της ποικιλίας και ταυτόχρονα καλή συνεκτικότητα (Ολύμπιος, 2001).

3 Σκοπός της παρούσας μελέτης

Η πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι περισσότεροι παραγωγοί στο εσωτερικό και στο εξωτερικό είναι πώς να βελτιστοποιήσουν την κερδοφορία στις δραστηριότητές τους, βελτιώνοντας παράλληλα τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών τους. Η αποτελεσματικότητα χρήσης θρεπτικών συστατικών και η περιβαλλοντική μόλυνση αποτελούν μακροχρόνιες ανησυχίες τόσο των αγροτών όσο και των καταναλωτών. Η χρήση αζωτούχου λίπανσης (N) συνέβαλε σημαντικά στην παγκόσμια παραγωγή τροφίμων. Ωστόσο, η υπερβολική εφαρμογή λιπασμάτων N δεν απέδωσε επιπλέον αποδόσεις αλλά είχε ως αποτέλεσμα σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα σε εντατικές γεωργικές, εκβολές και παράκτιες περιοχές της.

Είναι σημαντικό να αναπτυχθούν στρατηγικές ακριβείας διαχείρισης της αζωτούχου λίπανσης N (Precision Nitrogen Management- PNM) με στόχο να προσαρμόσουν την εφαρμογή N στις χωρικές και χρονικές ιδιαιτερότητες της κάθε καλλιέργειας. Η ανάπτυξη γρήγορων, οικονομικά αποδοτικών και αξιόπιστων μεθόδων για τη διάγνωση της κατάστασης της καλλιέργειας σε N κατά τη διάρκεια της σεζόν, είναι καθοριστική για την επιτυχία ευρύτερων εφαρμογών στρατηγικών διαχείρισης για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας χρήσης N και τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η ανάπτυξη φυκών σε λίμνες και λίμνες και η ύπαρξη υποξικών συνθηκών σε όρμους και ωκεανούς που δέχονται νερό από δημοτικές και γεωργικές πηγές χρησιμεύουν στην ευαισθητοποίηση για αυτά τα προβλήματα. Όχι μόνο αυτή η μόλυνση δημιουργεί δυνητικό κόστος για την κοινωνία και τις επιχειρήσεις που σχετίζονται με την αλιεία, αλλά και οι απώλειες θρεπτικών συστατικών αντιπροσωπεύουν πραγματικό κόστος για τους παραγωγούς. Δυστυχώς, οι τεχνολογίες και οι επιλογές διαχείρισης δεν είναι εξίσου διαθέσιμες σε όλους τους παραγωγούς. Όσοι μπορούν να διανείμουν το πρόσθετο κόστος βελτιωμένης διαχείρισης και νέων τεχνολογιών σε μια μεγαλύτερη λειτουργία μπορούν να απορροφήσουν καλύτερα αυτά τα κόστη και ακόμη και να αυξήσουν την κερδοφορία. Ως εκ τούτου, οι τεχνολογίες που διατίθενται στους μεγάλους παραγωγούς για την εκτίμηση της κατάστασης των καλλιεργειών δεν προορίζονται για εργαλεία που χρησιμοποιούνται από μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις, κυρίως λόγω κλίμακας και κόστους.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι πάνω από το 70% των αζωτούχων λιπασμάτων που εφαρμόζεται στις καλλιέργειες γίνεται από μικρές και μεσαίες γεωργικές εκμεταλλεύσεις και εκμεταλλεύσεις, είναι σκόπιμο αυτές οι ομάδες παραγωγών να έχουν πρόσβαση σε παρόμοιες τεχνολογίες με τους μεγάλους παραγωγούς, αλλά με κλιμακωτό τρόπο ώστε να προσαρμόζονται τα διαθέσιμα εργαλεία στο μέγεθος της εκάστοτε εκμετάλλευσης. Νέες τεχνολογίες, (όπως πχ ο αισθητήρας καλλιέργειας RapidSCAN CS-45 της Holland Scientific¹⁵) μπορούν να προσφέρουν στους μικρούς και μεσαίους παραγωγούς πρόσβαση σε αυτά τα γεωργικά

¹⁵ <https://hollandscientific.com/>

εργαλεία ακριβείας. Εργαλεία όπως αυτά μπορούν να παρέχουν στους μικρούς και μεσαίους αγρότες πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των θρεπτικών συστατικών και της υγείας των φυτών που απαιτούνται για τη λήψη ενημερωμένων αποφάσεων στη διαχείριση της γεωργικής τους λειτουργίας. Ωστόσο, τα δεδομένα που παράγονται από αυτά τα όργανα έχουν συνήθως έναν γενικευμένο χαρακτήρα, με τη μορφή απλών δεικτών βλάστησης και απαιτούν μετεπεξεργασία δεδομένων προκειμένου να πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση ή/και ανάπτυξη ως διαγνωστικό εργαλείο για το φύλλωμα μιας καλλιέργειας. Οι χρήστες αυτών των τεχνολογιών συχνά εκφράζουν σαν πραγματικές ανάγκες τους τα εξής: τα ενεργά όργανα οπτικού αισθητήρα να παρέχουν κατά προσέγγιση δεδομένα βαθμονομημένα σε αγρονομικές μονάδες, για παράδειγμα βιομάζα σε τόνους ανά εκτάριο, kg N ανά εκτάριο, κατά προσέγγιση απόδοση μονάδες δείκτη εμβαδού φύλλων (LAI) κ.λπ. συν μερικούς βασικούς στατιστικούς υπολογισμούς που σχετίζονται με τη δομή του φυλλώματος.

Επί του παρόντος, οι προγραμματιστές και οι κατασκευαστές επιστημονικών οργάνων παρέχουν όργανα μέτρησης καλλιεργειών και θόλων φυτών που πραγματοποιούν σταθερές ή ειδικές μετρήσεις (π.χ. μετρητές LAI, μετρητές NDVI, μετρητές χλωροφύλλης κ.λπ.). Ενώ αυτά τα όργανα εκτελούν γενικά ακριβείς μετρήσεις σε σχέση με τον επιδιωκόμενο σκοπό τους, οι χρήστες ανακαλύπτουν γρήγορα ότι καθώς ο αριθμός και ο τύπος των μετρήσεων που απαιτούνται αυξάνονται κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου, απαιτείται ένα ξεχωριστό όργανο για την εκτέλεση κάθε νέας μέτρησης. Το κόστος, οι καμπύλες μάθησης και ο χρόνος συντήρησης αυξάνονται επίσης. Συχνά, τα δεδομένα που συλλέγονται από αυτά τα όργανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό άλλων παραμέτρων βιοφυσικής καλλιέργειας χωρίς την ανάγκη αγοράς επιπλέον οργάνων. Ωστόσο, οι κατασκευαστές αυτών των οργάνων δεν παρέχουν έναν βολικό τρόπο με τον οποίο ο τελικός χρήστης μπορεί εύκολα να χρησιμοποιήσει αυτά τα δεδομένα.

Η πρόθεση για την εκπόνηση αυτής της μελέτης ήταν να παρουσιάσει ένα πρωτότυπο απλό σύστημα, εύκολα παραμετροποιήσιμο, το οποίο να μπορεί να αναδιαμορφωθεί μέσω λογισμικού και να παρέχει μια σειρά χρήσιμων μετρήσεων κι αποφάσεων για την οικονομικότερη και αποδοτικότερη εφαρμογή λιπάσματος. Ήταν σημαντικό εξ αρχής να υπάρχει όσο δυνατό η μικρότερη απαίτηση απ' τον χρήστη, όσον αφορά την ανάγκη προμήθειας ή απόκτησης πρόσθετου υλικού ή της εκπαίδευσής του προκειμένου ν' αποκτήσει πολύ εξειδικευμένη γνώση σε αντίστοιχα ζητήματα. Ένας σημαντικός πρωταρχικό στόχος επίσης, ήταν να αναπτυχθεί το σύστημα με χαμηλό κόστος ώστε να διαπιστωθεί αν είναι εφικτή η ευρύτερη υιοθέτηση ενός τέτοιου συστήματος, σε αντίθεση με τις επιλογές που υπάρχουν ήδη στο εμπόριο και είναι αρκετά κοστοβόρες. Τέλος, υπήρχε η πρόθεση για τη δημιουργία ενός συστήματος, το οποίο θα μπορούσε ενδεχομένως να παραμετροποιηθεί εύκολα ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας.

4 Υλικά και μέθοδοι

4.1 Περίληψη

Ο σκοπός της πειραματικής διαδικασίας ήταν να διερευνήσει την δυνατότητα ανάπτυξης ενός ολοκληρωμένου συστήματος μεταβλητής λίπανσης με χαμηλό κόστος προσαρμοσμένο σε γραμμικές καλλιέργειες. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκε το σύστημα από πλευράς υλικού και λογισμικού, κατόπιν δοκιμάστηκε σε συνθήκες εργαστηρίου αλλά και σε πραγματικές συνθήκες αγρού και αξιολογήθηκε ως προς την αποτελεσματικότητά του.

Τα βασικά μέρη του συστήματος, τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια, ήταν τα εξής:

Το Υλικό:

- Μικρουπολογιστής Raspberry Pi 3B+
- Ενεργοποιητής (Actuator)
- GPS δέκτης
- Πλαστικός λιπασματοδιανομέας όγκου 10L
- Τετράτροχη μοτοσυκλέτα τύπου ATV

Το Λογισμικό:

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε αφορούσε τα εξής δύο βασικά μέρη, συν ένα:

1. Ένας αλγόριθμος για την σύγκριση μεταξύ των τιμών γεωγραφικής θέσης όπως δινόταν από τον χάρτη εφαρμογής, και των συντεταμένων που δέχεται από τον δέκτη GPS
2. Ένας αλγόριθμος για την ενεργοποίηση του βραχίονα-ενεργοποιητή ο οποίος διευκόλυνε την μηχανική κίνηση που για το άνοιγμα και το κλείσιμο της διατομής του διανομέα ώστε να αποθεθεί η κατάλληλη ποσότητα λιπάσματος
3. Επιπλέον έγινε μια προσπάθεια, προαιρετικά να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την καλλιέργεια του μαρουλιού, με τον οποίο να καθορίζεται η ποσότητα του απαιτούμενου λιπάσματος με βάση φασματικούς δείκτες

Η γραμμική καλλιέργεια που επιλέχθηκε ήταν το μαρούλι, καθώς αποτελεί ένα λαχανικό που απαντάται συχνά στη χώρα μας, η καλλιέργεια του είναι εύκολη και όχι ιδιαίτερα δαπανηρή, και η εποχικότητά του συνέπιπτε χρονικά με τη διεξαγωγή του πειράματος. Προηγήθηκε η προετοιμασία και εγκατάσταση της καλλιέργειας και κατόπιν ξεκίνησαν οι μετρήσεις των επιλεγμένων μεγεθών. Παράλληλα με τις μετρήσεις αναπτύχθηκαν τα μέρη του λογισμικού και

λίγο πριν την συγκομιδή εκτελέστηκε και η δοκιμή με την ενσωμάτωση του υλικού του συστήματος.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κατά τη διάρκεια 2,5 μηνών, από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο του 2019. Για την ακρίβεια, πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα:

- α) στον ανοιχτό αγρό που διατέθηκε στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών με διαστάσεις 10mx30m, δηλαδή συνολικής επιφάνειας 300μ². Ο αγρός αυτός μοιράστηκε σε 4 ζώνες προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή διαδικασία της δειγματοληψίας αλλά και για να επιτευχθούν 4 επαναλήψεις για κάθε μία διαφορετική μεταχείριση, σύμφωνα με το πειραματικό σχέδιο όπως θα αναλυθεί στις επόμενες ενότητες.
- β) σε θερμοκήπιο πλησίον του επιλεγμένου αγρού, όπου χρησιμοποιήθηκαν 200 γλάστρες μικρού μεγέθους, στις οποίες θα καλλιεργούνταν τα μεμονωμένα φυτά όπως θα παρουσιάζεται επίσης στη συνέχεια.

4.2 Προετοιμασία του αγρού

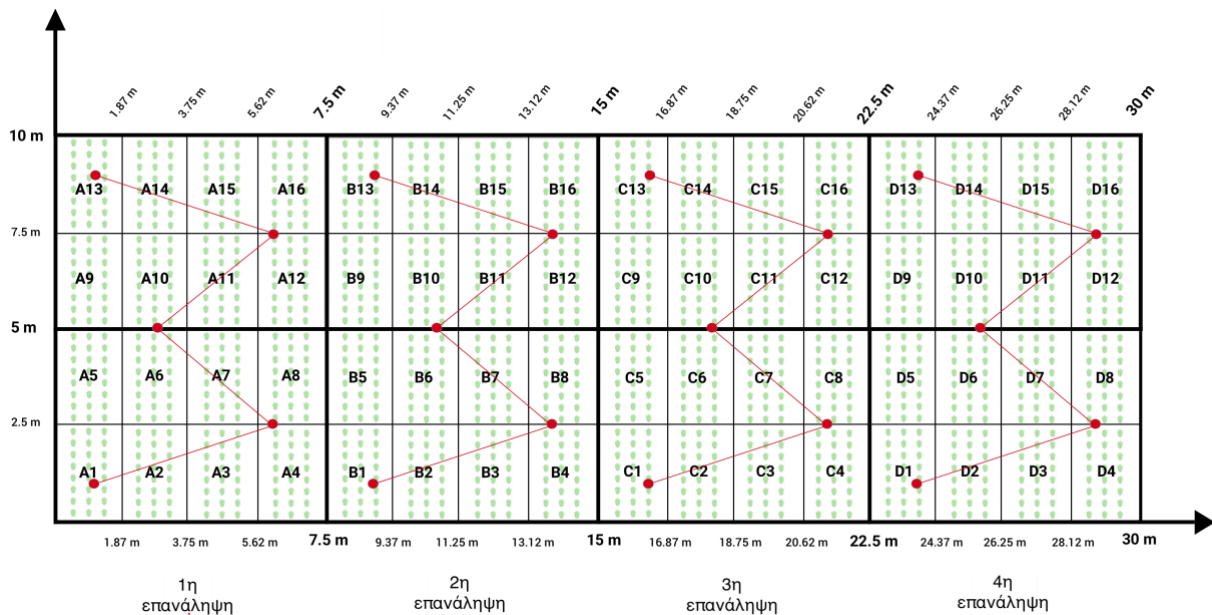
4.2.1 Δειγματοληψία του εδάφους

Το μοτίβο δειγματοληψίας θα πρέπει να επιλεγεί για να αντιπροσωπεύει καλύτερα το πεδίο, λαμβάνοντας υπόψη γνωστές πηγές μεταβλητότητας (σημαντικές αλλαγές τύπου εδάφους, προηγούμενα μοτίβα καλλιέργειας κ.λπ.). Ένα μοτίβο πλέγματος είναι συνήθως ο καλύτερος τρόπος για να βεβαιωθούμε ότι αντιπροσωπεύουμε ολόκληρο το πεδίο, αλλά με τη δυνατότητα ανάπτυξης μοτίβων από προηγούμενες εφαρμογές θρεπτικών ουσιών, φαινόμενα καλλιέργειας και άλλα ομοιόμορφα μοτίβα, συνιστάται να χρησιμοποιούμε ένα σχήμα δειγματοληψίας που αποφεύγει να τακτοποιούμε σημεία δειγματοληψίας σε ευθεία γραμμή.

Η κοινή προσέγγιση για την επίτευξη συστηματικής δειγματοληψίας εδάφους είναι η επικάλυψη ενός τετραγωνικού ή ορθογώνιου πλέγματος σε έναν χάρτη ή μια φωτογραφία του χωραφιού, την αναγνώριση και την οδήγηση στο μέσο κάθε κυψελίδας πλέγματος και τη συλλογή δείγματος εδάφους σε αυτό το σημείο). Το δείγμα εδάφους αποτελείται από αρκετούς πυρήνες του εδάφους που συλλέγονται σε μια μικρή ακτίνα του κέντρου των κυττάρων. Οι πυρήνες του εδάφους συντίθενται και συσκευάζονται ως ένα δείγμα εδάφους για ανάλυση σε εργαστήριο δοκιμών εδάφους.

Η δειγματοληψία κυψελών πλέγματος μπορεί να διεξαχθεί αποτελεσματικά μετρώντας σειρές καλλιέργειών και χρησιμοποιώντας συσκευές μέτρησης απόστασης για τον εντοπισμό σημείων δειγματοληψίας. Αν και είναι εύκολο να εφαρμοστεί στο πεδίο, αυτή η πρακτική μπορεί να οδηγήσει σε προκατάληψη. Έλλειψη όργωσης, εφαρμογή λιπασμάτων,

αποστράγγιση, παλιά όρια χωραφιού και μοτίβα καλλιέργειας τείνουν να εμφανίζονται σε κανονικά μοτίβα σε χωράφια. Εάν το μοτίβο δειγματοληψίας πλέγματος είναι πολλαπλάσιο ή κλάσμα άλλων μοτίβων, τα δείγματα εδάφους ενδέχεται να μην αντιπροσωπεύουν σωστά τη μεταβλητότητα δοκιμής εδάφους εντός του πεδίου. Η πιθανότητα μεροληψίας μπορεί να ελαχιστοποιηθεί μετατοπίζοντας τις θέσεις δειγματοληψίας προς τα δεξιά ή αριστερά του κελιού του κέντρου σε εναλλασσόμενες σειρές κάθετες στο σχέδιο διαχείρισης (π.χ., κατεύθυνση σειράς). Για τη διεξαγωγή του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε το πλέγμα δειγματοληψίας που φαίνεται στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10. Πλέγμα δειγματοληψίας και θέσεις μετέπειτα φύτευσης των φυτών

4.2.2 Ανάλυση του εδάφους

Πριν από την επιλογή του αγρού, δείγματα εδάφους στάλθηκαν σε εξωτερικό πιστοποιημένο εργαστήριο και αναλύθηκαν προκειμένου να διευκρινιστεί το προφίλ του εδάφους, τόσο για το χωράφι όσο και για το χώμα που χρησιμοποιήθηκε για τις γλάστρες στο θερμοκήπιο. Η φυσικοχημική ανάλυση του εδάφους παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την ποιοτική και θρεπτική κατάσταση του εδάφους. Προκειμένου να διασφαλίσουμε ότι τα εργαστηριακά αποτελέσματα ήταν ακριβή, και συνεπώς αξιόπιστα, φροντίσαμε ώστε η συλλογή και η συντήρηση των εδαφικών δειγμάτων να γίνει με τρόπο που διασφαλίζει ότι ελήφθησαν αντιπροσωπευτικά, κατά το δυνατόν, δείγματα, από τα βάθη ενδιαφέροντος, ότι ελήφθησαν υπόψη όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν το έδαφος της περιοχής δειγματοληψίας (π.χ. καλλιέργεια, πιθανή ρύπανση, κλπ) και ότι ακολουθήθηκαν οι κανόνες συντήρησης και σωστής μεταφοράς των δειγμάτων στο εργαστήριο.

Για την επιλογή των σωστών σημείων δειγματοληψίας και προκειμένου το δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό του αγρού, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της ομοιομορφίας του εδάφους βάσει χαρακτηριστικών του, όπως είναι το χρώμα, η υφή του, το ανάγλυφο της περιοχής και τη φυσική αυτοφυής βλάστηση και με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά διαιρέσαμε τον αγρό σε 4 ομοιόμορφες ζώνες (A, B, C, D). Για κάθε ζώνη λάβαμε ένα σύνθετο δείγμα εδάφους όπως φαίνεται στο Σχήμα 10. Το κάθε σύνθετο δείγμα προέκυψε από ανάμιξη 5 υπο-δειγμάτων που ελήφθησαν από διάφορα σημεία της κάθε ζώνης ακολουθώντας τη διάταξη του Σχήματος 10.

Εκτός από τα 4 δείγματα (A, B, C, D) που συλλέχθηκαν αντίστοιχα από τις 4 διαφορετικές ζώνες του αγρού, ένα 5^ο δείγμα (E) συλλέχθηκε από το χώμα που χρησιμοποιήθηκε για να γεμίσουν τα γλαστράκια που θα τοποθετούνταν στο θερμοκήπιο. Η χημική ανάλυση έγινε από το πιστοποιημένο με ISO 9001:2015 εργαστήριο HELLASCHEM που βρίσκεται στο Μαρούσι Αττικής. Η ανάλυση της κοκκομετρικής σύστασης έγινε από τον προπτυχιακό φοιτητή Ανδρέα Γιακουμάτο στα εργαστήρια του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Στους Πίνακες 3 και 4 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Πίνακας 3. Ανάλυση χημικής σύστασης του εδάφους

	ΔΕΙΓ- ΜΑ	pH	EC (mS/cm)	Οργανι κή ύλη (%w/w)	Ανθρακ ικό ασβέστ ιο ολικό (%w/w)	Άζωτο ολικό (mg/kg)	Άζωτο νιτρικό (N - NO3) (mg/kg)	Φώσ- φορος (mg/kg)	Κάλιο (mg/kg)	Μαγνή σιο (mg/kg)
χώμα από αγρό	A	7.48 / 20.5 C	0.1	5.4	23.9	3810	14.4	210.7	546.4	246.9
	B	7.52 / 20.5 C	0.11	5.5	23.6	3880	14.9	231.1	609.0	280.3
	C	7.57 / 20.5 C	0.12	5.5	23.4	3690	16.6	197.0	669.2	280.3
	D	7.62 / 20.5 C	0.14	4.8	23.3	2940	14.9	130.0	189.2	311.2
χώμα από εκακαφή (για γλάστρες)	E	7.78 / 20.5 C	0.1	2.1	16.5	1088	10.4	61.2	381.9	186.2

Πίνακας 4: Ανάλυση κοκκομετρικής σύστασης του εδάφους

ΔΕΙΓΜΑ	Δ1	Θ1	Δ2	Θ2	T1	T2	ΙΛΥΣ+ ΑΡΓΙΛΟΣ(%)	ΑΜΜΟΣ(%)	ΑΡΓΙΛΟΣ(%)	ΙΛΥΣ(%)
A	27	18	10	19.2	- 0.6	-0.24	52.8	47.2	19.52	33.28
B	31	18	9.5	19	- 0.6	-0.3	60.8	39.2	18.4	42.4
C	26	18	10	19	- 0.6	-0.3	50.8	49.2	19.4	31.4

D	32	18	10	20	- 0.6	0	62.8	37.2	20	42.8
E	25	18	12.5	19	- 0.6	-0.3	48.8	51.2	24.4	24.4

4.3 Μεθοδολογία προσδιορισμού του απαιτούμενου αζώτου

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για τον υπολογισμό και τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ποσότητας λιπάσματος. Η φαινομενική ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους (ECa) αναγνωρίζεται ως χρήσιμη τεχνολογία για την έμμεση μέτρηση σημαντικών χαρακτηριστικών του εδάφους, όπως η υφή, η περιεκτικότητα σε νερό, αλατότητα και γενική γονιμότητα. Επιπλέον υπάρχουν οι ενεργοί οπτικοί αισθητήρες εγγύτητας (proximal), όπως οι GreenSeeker (Trimble LLC, Sunnyvale, California, USA), CropCircle (Holland Scientific, Inc., Lincoln, NE, USA), OptRx (AgLeader Technology, Inc., Ames, Iowa, USA), ή CropSpec (Topcon Corporation Τόκιο, Ιαπωνία), μερικοί απ' τους οποίους αναφέρθηκαν ήδη και οι οποίοι μετρούν την πρασινάδα και τη βιομάζα του φυλλώματος και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των απαιτήσεων της καλλιέργειας N που είναι ένας σημαντικός καθοριστικός παράγοντας της παραγωγικότητας των καλλιεργειών. Λειτουργικά, αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν σε εφαρμοστές λιπασμάτων N που είναι εξοπλισμένοι με επεξεργασία υπολογιστή και ελεγκτές μεταβλητού ρυθμού για να επιτρέψουν την ανίχνευση και την λίπανση η οποία γίνεται σε ένα πέρασμα. Ωστόσο, οι μετρήσεις από αυτούς τους αισθητήρες επηρεάζονται από πολλές παραμέτρους όπως οι ιδιότητες αισθητήρα, ο τύπος εδάφους, οι εποχιακές συνθήκες, το στάδιο ανάπτυξης και η ειδικότητα της κάθε καλλιέργειας οπότε και δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αβίαστα για την αξιολόγηση κάθε κατάστασης σχετικής με την έλλειψη N για την εφαρμογή της αντίστοιχης ποσότητας αζωτούχου λίπανσης.

Πολύ συχνά χρησιμοποιείται ένα πλούσιο σε N τμήμα, ή λωρίδα αναφοράς που έχει δημιουργηθεί λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε N που εντοπίζεται στο συγκεκριμένο κομμάτι του αγρού. Κατόπιν μπορεί να δημιουργηθεί ένας δείκτης παίρνοντας μετρήσεις από την κάθε περιοχή και συγκρίνοντας κάθε φορά με βάση την λωρίδα αναφοράς. Η γενική προϋπόθεση για αυτά τα μοντέλα είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στις μετρήσεις αισθητήρων μεταξύ της ανιχνευμένης καλλιέργειας και της πλούσιας σε N περιοχής, τόσο περισσότερο χρειάζεται λίπασμα N. Το πρόβλημα με αυτήν την προσέγγιση είναι ότι απαιτεί περιοχές πλούσιες σε N, αντιπροσωπευτικές διαφορετικών συνθηκών πεδίου, κάτι που δεν είναι πάντα ρεαλιστικό για εμπορικούς τομείς.

Στην παρούσα μελέτη, σχεδιάστηκε εξ αρχής μια μεθοδολογία προκειμένου να δημιουργηθεί ένας αλγόριθμος σύμφωνα με τον οποίο θα μπορούσε να προσδιοριστεί η απαιτούμενη

ποσότητα λιπάσματος με βάση κάποιον φασματικό δείκτη, συγκεκριμένα για το μαρούλι. Δεδομένου ότι το μαρούλι είναι μια καλλιέργεια που χαρακτηρίζεται από ρηχές ρίζες, υψηλή ευαισθησία στην ανεπάρκεια N, χαμηλή απόδοση πρόσληψης N και υψηλή ικανότητα συσσώρευσης νιτρικών αλάτων, ακόμη και προσωρινή έλλειψη N στη ρίζα ζώνη είναι ικανή να θέσει σε κίνδυνο μόνιμα την τελική απόδοση. Η εφαρμογή αζώτου σύμφωνα με τις πραγματικές απαιτήσεις των καλλιεργειών με την εφαρμογή συγκεκριμένης τοποθεσίας διαχείρισης είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποιημένη παραγωγή μαρουλιού.

Η ζήτηση αζώτου στις καλλιέργειες μαρουλιού είναι ιδιαίτερα υψηλή στο τελευταίο τρίτο του κύκλου ανάπτυξης (Gioia et al., 2017). Το μαρούλι απορροφά περίπου το 80% του συνολικού N του κατά τις τελευταίες 4 εβδομάδες πριν από τη συγκομιδή. Σαν, μια εφαρμογή επιφανείας N μεταβλητού ρυθμού συνιστάται περίπου 4 εβδομάδες πριν από τη συγκομιδή με μορφή νιτρικού. Από την άλλη πλευρά, η ΕΕ και πολλά κράτη μέλη έχουν καθιερώσει πρότυπα μέγιστης συγκέντρωσης NO₃ στα φύλλα μαρουλιού κατά τη συγκομιδή προκειμένου να διασφαλιστεί η δημόσια υγεία. Αυτά τα πρότυπα μπορεί να διαφέρουν μεταξύ των κρατών μελών, των εμπόρων και επίσης ανάλογα με την περίοδο ανάπτυξης. Για παράδειγμα, το όριο της ΕΕ για τη συγκέντρωση νιτρικών στο μαρούλι κατά τη συγκομιδή είναι 2500 mg NO₃ kg⁻¹ νωπού βάρους (Tei et al., 2003). Σαν, η σύσταση αζώτου θα πρέπει επίσης να λαμβάνει υπόψη τη δυνατότητα αύξησης της περιεκτικότητας σε άζωτο των φύλλων στα φύλλα, ειδικά όταν δεν επιτυγχάνονται οι αποδόσεις στόχου, οδηγώντας σε αυξημένη συγκέντρωση μειωμένου N στα φύλλα.

Η αρχική πρόβλεψη για το τελικό μοντέλο βασίστηκε στην εύρεση λωρίδων αναφοράς πλούσιων σε άζωτο που έχουν δημιουργηθεί στο χωράφι. Οι ταινίες θα πρέπει να λαμβάνουν μια γενναιόδωρη εφαρμογή βασικού αζώτου, καθώς και μία ή δύο συμπληρωματικές επιφανειακές εφαρμογές κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης, εξασφαλίζοντας επαρκή παροχή N για βέλτιστη παραγωγή. Γι' αυτόν τον σκοπό προβλέφθηκε να γίνουν 2 εφαρμογές λιπάσματος στο χωράφι, μία στην αρχή και μία μετά από 1 μήνα και ακριβώς 1 μήνα πριν από την συγκομιδή. Στην 2^η εφαρμογή οι μετρήσεις από τους φασματικούς δείκτες θα ήταν αυτές που θα συντελούσαν στον προσδιορισμό της 2^{ης} δόσης αζωτούχου λιπάσματος. Επίσης επιλέχθηκε να γίνουν μετρήσεις και στο θερμοκήπιο αλλά και στον ανοιχτό αγρό, προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και μεταβλητότητα στις συνθήκες, προκειμένου το μοντέλο που θα πρόκυπτε να ήταν όσο το δυνατό αξιόπιστο. Οι μετρήσεις έγιναν με διάφορα όργανα όπως περιγράφεται αναλυτικά στις παρακάτω ενότητες, αν και η αρχική πρόβλεψη ήταν να βασιστεί ο αλγόριθμος σε κάποιον φασματικό δείκτη, όπως ο NDVI ή ο NDRE.

4.3.1 Υπολογισμός δόσεων για την καλλιέργεια του μαρουλιού

Το λίπασμα που επιλέξαμε να τοποθετήσουμε ήταν κοκκώδες λίπασμα νιτρικής αμμωνίας περιεκτικότητας (34,5-0-0). Για τον υπολογισμό των δόσεων του λιπάσματος της νιτρικής αμμωνίας πήραμε υπόψιν μας την μοριακή μάζα του μορίου NH_4NO_3 , χρησιμοποιώντας τις ατομικές μάζες των στοιχείων που το αποτελούν (Σχήμα 11) και στη συνέχεια έγινε ο υπολογισμός δόσεων σε $\text{gNH}_4\text{NO}_3/\text{δοχείο}$.

Element	Symbol	Atomic Mass	# of Atoms	Mass Percent
Hydrogen	H	1.00794	4	5.037%
Nitrogen	N	14.0067	2	34.998%
Oxygen	O	15.9994	3	59.965%

Σχήμα 11. Ατομικές μάζες των στοιχείων που αποτελούν το μόριο NH_4NO_3 .

Μοριακή μάζα NH_4NO_3 :

$$4 * H + 2 * N + 3 * O = 4 * 1,00794 + 2 * 14,0067 + 3 * 15,9994 = 80,04336 \frac{g}{mol}$$

Η ποσότητα αζώτου (N) που μας δίνει το μόριο νιτρικής αμμωνίας υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{Ποσότητα αζώτου}^* (gN) = \frac{2 * \text{ατομική μάζα N}}{\text{μοριακή μάζα NH}_4\text{NO}_3} = 0,3499gN$$

*η ποσότητα αζώτου που περιέχεται στο μόριο NH_4NO_3

Το λίπασμα της νιτρικής αμμωνίας που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα ήταν (34,5-0-0), δηλαδή στα 100 κιλά του λιπάσματος έχουμε 34,5 μονάδες νιτρικής αμμωνίας. Οπότε ο τύπος υπολογισμού της δόσης του λιπάσματος (34,5-0-0) για κάθε επιθυμητή δόση αζώτου είναι:

$$\text{Δόση λιπάσματος (g/δοχείο)} = \frac{\text{ποσότητα αζώτου (επιθυμητή)} \left(\frac{gN}{\text{δοχείο}}\right)}{\text{Ποσότητα αζώτου}^* gN * \frac{34,5g}{100g\text{λιπάσματος}}}$$

Η λίπανση των φυτών με το λίπασμα της νιτρικής αμμωνίας έγινε σε δύο εφαρμογές, οπότε σε κάθε εφαρμογή δόθηκε το 50% της δόσης λιπάσματος (g/δοχείο), όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 12, για τα φυτά που ήταν σε γλαστράκια μέσα στο θερμοκήπιο.

Πίνακας 5. Δόσεις λιπάσματος νιτρικής αμμωνίας ανά εφαρμογή.

Ποσότητα αζώτου (g/δοχείο)	Ποσότητα λιπάσματος (g/δοχείο)
0,25	1,04

0,5	2,07
1	4,14
2	8,28
4	16,56



Εικόνα 7. Οι τελικές δόσεις ζυγίστηκαν με ζυγό ακριβείας πριν εφαρμοστούν με βάση το πειραματικό σχέδιο

Για τον υπολογισμό των δόσεων στον αγρό, λήφθηκε υπόψιν το εμβαδόν της κάθε ζώνης, σύμφωνα με το πειραματικό σχέδιο και φαίνεται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Υπολογισμός της ποσότητας λιπάσματος για τις 4 ζώνες με μέγιστη ποσότητα αζώτου 12 μονάδες ανά 0.1 ha.

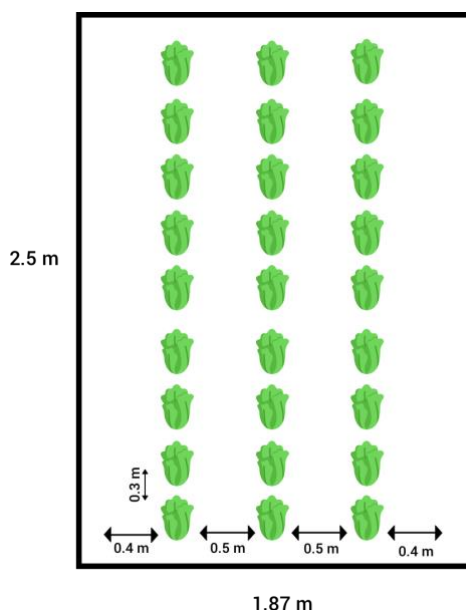
		4 Μεταχειρίσεις (αντίστοιχα για 4 ζώνες)			
		100%	66%	33%	0
Απαιτούμενη ποσότητα αζώτου	kg/0.1 ha	12	8	4	0
Τύπος λιπάσματος	NH ₄ NO ₃	34.5-0-0	34.5-0-0	34.5-0-0	34.5-0-0
Λίπασμα εμπεριέχει	%	34.5	34.5	34.5	34.5
Δόση λιπάσματος	kg/0.1ha	34.78	23.19	11.59	0.00
Εμβαδόν γραμμής καλλιέργειας	m ²	30	30	30	30
Δόση λιπάσματος / γραμμή καλλιέργειας	g	1043	695	347	0

*Ατομικά βάρη: N: 14.0067, O: 15.994, H: 1.00794, Μοριακό βάρος NH₄NO₃: 80.04336

4.4 Εγκατάσταση του πειραματικού αγρού και του αρδευτικού συστήματος

Όπως περιγράφηκε παραπάνω στο Σχήμα 10, αλλά και στον Πίνακα 7 που ακολουθεί, το πείραμα εκτελέστηκε με τρόπο ώστε να εφαρμοστούν τέσσερις διαφορετικές μεταχειρίσεις στις διάφορες ζώνες στον αγρό. Η ίδια προσέγγιση εφαρμόστηκε επίσης στις 200 γλάστρες που εγκαταστάθηκαν στο θερμοκήπιο. Για το πείραμα αγοράστηκαν περίπου 1900 φυτά μαρουλιού 2 μέρες πριν την φύτευσή τους, κατά 50% ποικιλίας Linoγ και κατά 50% ποικιλίας

Gem. Στο Σχήμα 12 φαίνεται πως διαμορφώθηκε το κελί που αντιστοιχούσε στην κάθε μεταχείριση:



Σχήμα 12. Η διάταξη των φυτών και οι αποστάσεις μέσα σε ένα κελί φύτευσης

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, η προτεινόμενη ποσότητα αζώτου για το μαρούλι είναι περίπου 10 Kg / 0.1ha. Αποφασίστηκε να γίνουν 4 διαφορετικές μεταχειρίσεις με ποσοότητες αζώτου: 0%, 33%, 66% και 100% της προτεινόμενης από τη βιβλιογραφία. Το λίπασμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ήταν νιτρικό αμμώνιο 34,5% - 0-0, και οι προτεινόμενες ποσοότητες εφαρμόστηκαν σε 2 δόσεις. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης δύο διαφορετικές ποικιλίες μαρουλιού, Var1.: Cos Romaine Linoy και Var2: Cos Romaine Gem. Όλοι οι παραπάνω συνδυασμοί είχαν ως αποτέλεσμα 16 διαφορετικές μεταχειρίσεις που επαναλήφθηκαν 4 φορές στις 4 διαδοχικές ζώνες του αγρού.

Πίνακας 4. Πειραματικό σχέδιο

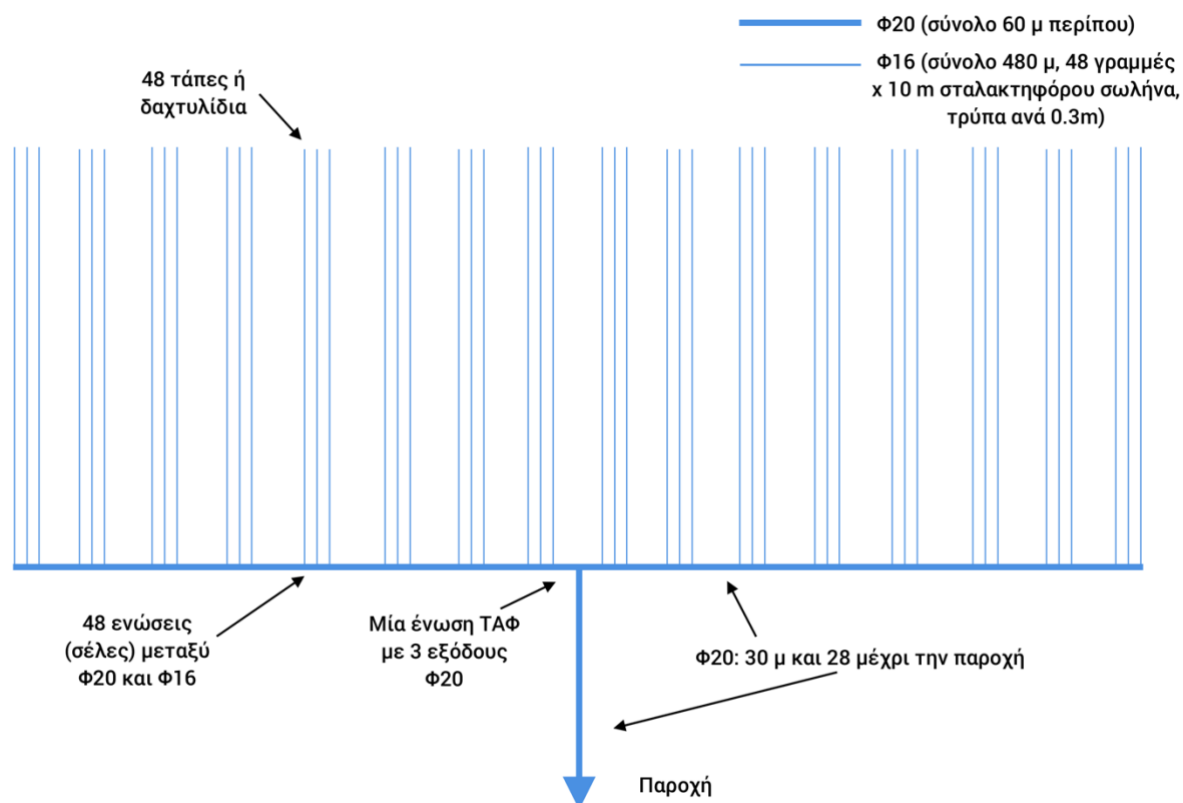
No	Ποικιλία μαρουλιού	Υπολογισμός λιπάσματος	Απόφαση	Αριθμός κελιών/επανάληψη				Αριθμός γλαστρών στο θερμ.
1	Linoy	0%	Προειλημμένη	A1	B3	C9	D11	
2	Linoy	0%	Αλγόριθμος	A5	B7	C13	D15	
3	Linoy	33%	Προειλημμένη	A11	B9	C3	D1	
4	Linoy	33%	Αλγόριθμος	A15	B13	C7	D5	
5	Linoy	66%	Προειλημμένη	A9	B1	C10	D4	
6	Linoy	66%	Αλγόριθμος	A13	B5	C14	D8	
7	Linoy	100%	Προειλημμένη	A3	B12	C2	D9	
8	Linoy	100%	Αλγόριθμος	A7	B16	C6	D13	
9	Gem	0%	Προειλημμένη	A12	B11	C11	D2	

10	Gem	0%	Αλγόριθμος	A16	B15	C15	D6
11	Gem	33%	Προειλημμένη	A2	B4	C1	D10
12	Gem	33%	Αλγόριθμος	A6	B8	C5	D14
13	Gem	66%	Προειλημμένη	A4	B10	C4	D12
14	Gem	66%	Προειλημμένη	A8	B14	C8	D16
15	Gem	100%	Προειλημμένη	A10	B2	C12	D3
16	Gem	100%	Αλγόριθμος	A14	B6	C16	D7

Τόσο στο χωράφι όσο και στο θερμοκήπιο, εγκαταστάθηκε και διαμορφώθηκε σύστημα αυτόματης άρδευσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.

4.5 Πορεία της καλλιέργειας και μετρήσεις

Τα φυτά φυτεύτηκαν από τις 4 έως τις 6 Απριλίου 2019. Δεδομένου του ζεστού κλίματος της Αθήνας, ο ρυθμός ανάπτυξης ήταν πολύ γρήγορος για το μαρούλι στο ανοιχτό χωράφι και πιο λίγο πιο αργός στο θερμοκήπιο λόγω της υψηλής θερμοκρασίας. Η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε στις 23-24 Μαΐου 2019. Κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με διάφορους εξοπλισμούς οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω, ενώ οι μετρήσεις αναλύονται στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 13. Το σχέδιο για το αρδευτικό σύστημα που εγκαταστάθηκε στον αγρό



Εικόνα 8. Εγκατάσταση του αρδευτικού συστήματος



Εικόνα 9. Φύτευση των 1700 ριζών μαρουλιού μετά την εγκατάσταση του αρδευτικού συστήματος



Εικόνα 10. Η φύτευση έγινε σύμφωνα με το πειραματικό σχέδιο



Εικόνα 11. Φύτευση επιπλέον 200 ριζών μαρουλιού μέσα στο θερμοκήπιο



Εικόνα 12. Η κατάσταση της καλλιέργειας 2 εβδομάδες μετά την φύτευση

4.5.1 Πολυκαναλική φασματική μέτρηση με το RapidSCAN CS-45

Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τον φορητό αισθητήρα RapidsCAN CS-45. Οι μετρήσεις άρχισαν μετά από 20 ημέρες ανάπτυξης και πραγματοποιήθηκαν σχεδόν ανά 10 ημέρες, τόσο στο χωράφι όσο και στο θερμοκήπιο.

Το RapidSCAN CS-45 αντιπροσωπεύει την τελευταία πρόοδο στις ενεργές λύσεις ανίχνευσης θόλων καλλιέργειας. Ο αισθητήρας είναι εργονομικά σχεδιασμένος για ευκολία στη χρήση και έχει ελαφριά μάζα, ονομαστικά 0,7 kg. Ο αισθητήρας αποτελείται από έναν μικροελεγκτή που συντονίζει τη συλλογή και αποθήκευση δεδομένων οπτικής ανίχνευσης, έναν ελεγκτή διαχείρισης ισχύος που εκτελεί φόρτιση και παρακολούθηση μπαταρίας καθώς και μετατροπή τάσης συστήματος, έναν αισθητήρα GPS για γεωχωρική τοποθεσία δεδομένων και ένα περιβάλλον εργασίας χρήστη (οθόνη και πληκτρολόγιο). Το RapidSCAN συλλέγει ταυτόχρονα δεδομένα φασματικής ανάκλασης για τις φασματικές ζώνες κόκκινου (670nm), red-edge (730nm) και NIR (780nm). Η πηγή φωτός είναι ένας πολυχρωματικός λαμπτήρας που εκπέμπει ταυτόχρονα φως σε καθεμία από αυτές τις φασματικές ζώνες. Η ανίχνευση πραγματοποιείται συγχρόνως σύμφωνα με τη διαμόρφωση της φωτεινής πηγής και οι μετρημένες τιμές ακτινοβολίας μετατρέπονται σε τιμές ανάκλασης που κυμαίνονται από 0 έως 100%. Οι δείκτες βλάστησης NDVI και NDRE υπολογίζονται από αυτές τις τιμές ανάκλασης. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μνήμη 32Mb. Το RapidSCAN CS-45 περιέχει επαρκή μνήμη για να αποθηκεύσει πάνω από 15.000 σαρώσεις βλάστησης (NDRE, NDVI και

ανακλαστικότητα) συμπεριλαμβανομένων γεωχωρικών δεδομένων και περιγραφικών στατιστικών για κάθε σάρωση.

Ο δέκτης GPS του RapidSCAN χρησιμοποιεί έναν πυρήνα SiRFStar IV με ενισχυτή χαμηλού θορύβου υψηλής ευαισθησίας (LNA). -160dB. Μια κεραία (RHCP) συνδέεται στο LNA του πυρήνα του GPS και παρέχει ~ 5dBic κέρδους στο ζενίθ με κεντρική συχνότητα 1581 MHz και εύρος ζώνης 15 MHz. Ο πυρήνας GPS έχει δυνατότητα σύνδεσης με τα συστήματα EGNOS, WAAS, GAGAN και MSAS, με διόρθωση σφαλμάτων θέσης λόγω ιονοσφαιρικών και τροχιακών διαταραχών. Η συνολική χωρική ακρίβεια είναι συνήθως μικρότερη από 2,0 μέτρα. Η πηγή ισχύος του RapidSCAN είναι ένα πολυμερές κελί λιθίου 4,2 volt. Το κελί μπορεί να τροφοδοτήσει το όργανο για πάνω από 20 ώρες λειτουργίας. Ένας ελεγκτής διαχείρισης ισχύος εποπτεύει τη φόρτιση των κυττάρων και τον τερματισμό φόρτισης. Η επαναφόρτιση του οργάνου πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας είτε έναν φορτιστή τοίχου USB 5 τάσεων είτε μια θύρα USB από μια ενεργή (ενεργοποιημένη ON) θύρα USB υπολογιστή. Ένας τυπικός κύκλος φόρτισης μπορεί να διαρκέσει έως και 5 ώρες ανάλογα με την κατάσταση εκφόρτισης της κυψέλης λιθίου.

Όπως προαναφέρθηκε, το RapidSCAN CS-45 ενσωματώνει τρία οπτικά κανάλια μέτρησης. Ο αισθητήρας μετρά ταυτόχρονα την ανάκλαση καλλιέργειας / εδάφους στα 670 nm, 730 nm και 780 nm. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του αισθητήρα RapidSCAN CS-45 είναι η ικανότητά του να κάνει ανεξάρτητες από το ύψος μετρήσεις φασματικής ανάκλασης. Η Holland Scientific αναφέρεται σε αυτές τις μετρήσεις ανάκλασης ως μετρήσεις Pseudo Solar Reflectance (PSR). Ως εκ τούτου, οι ζώνες φασματικής ανάκλασης κλιμακώνονται ως ποσοστά και δεν ποικίλουν ανάλογα με το ύψος του αισθητήρα πάνω από έναν στόχο. Αυτό ανοίγει τη δυνατότητα χρήσης κυριολεκτικά δεκάδων ευρετηρίων βλάστησης που έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογές τηλεανίχνευσης εναέριας και δορυφορικής που δεν χρησιμοποιούν υπολογισμούς βάσει αναλογίας. Ο αισθητήρας δεν επηρεάζεται από τον φωτισμό περιβάλλοντος που του επιτρέπει να λαμβάνει ακριβείς μετρήσεις βιομάζας μέρα ή νύχτα λόγω της εσωτερικής του πηγής πολυχρωματικού φωτός. Ο αισθητήρας είναι σε θέση να συλλέγει δεδομένα από τη βλάστηση σε αποστάσεις αισθητήρα σε θόλο που κυμαίνονται από 0,3 μέτρα έως πάνω από 3 μέτρα. Οι πληροφορίες που παράγονται από τον αισθητήρα περιλαμβάνουν δείκτες βλάστησης NDVI/NDRE, γεωγραφικό πλάτος/μήκος και δείγματα στατιστικών καθώς και βασικές πληροφορίες ανάκλασης.



Εικόνα 13. Ο αισθητήρας RapidSCAN CS-45

Τα δεδομένα συλλέγονται εύκολα πατώντας απλώς το διακόπτη σκανδάλης του RapidSCAN και στη συνέχεια σάρωση μιας εγκατάστασης στόχου. Τα σαρωμένα δεδομένα αποθηκεύονται στο αρχείο flash 3 MB του οργάνου για μεταγενέστερη μεταφορά σε υπολογιστή χρησιμοποιώντας το λογισμικό τερματικού RapidTALK. Τα δεδομένα που συλλέγονται από το RapidSCAN μπορούν να αναλυθούν σε λογισμικό τρίτων κατασκευαστών ή λογιστικών φύλλων.

Τα χαρακτηριστικά του συνοπτικά:

- Εσωτερικό διαφορικό GPS για γεωμετρικές μετρήσεις φυλλώματος
- Πολυχρωμική πηγή φωτός για μετρήσεις ανεξάρτητες από το φως του ήλιου - σάρωση μέρα ή νύχτα
- Τρεις φασματικές ζώνες (670 nm, 730 nm και 780 nm) για ταυτόχρονη απόκτηση μετρήσεων NDRE και NDVI
- Εσωτερική μπαταρία ιόντων λιθίου για έως και 40 ώρες λειτουργίας μεταξύ των φορτίων
- Εργονομικός σχεδιασμός για εύκολη χρήση χαμηλής κόπωσης
- Υποδοχή Micro USB για ανάκτηση δεδομένων και αισθητήρα φόρτισης

- Ολοκληρωμένο καταγραφικό δεδομένων για καταγραφή της απόδοσης του θόλου, στατιστικά μέτρησης, δείκτες θέσης GPS και βλάστησης

4.5.2 Πολυφασματικές εικόνες με κάμερα Sequoia τοποθετημένη σε drone

Η Parrot Sequoia είναι μια πολυφασματική κάμερα σχεδιασμένη για χρήση με όλους τους τύπους drone. Η Parrot Sequoia είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τη γεωργία ακριβείας. Με τους δύο αισθητήρες, τον πολυφασματικό και τον ήλιο, η Sequoia μπορεί να συμβάλλει στην ανάλυση της ζωτικότητας των φυτών συλλαμβάνοντας την ποσότητα φωτός που απορροφούν και αντανακλούν. Αυτά τα έξυπνα δεδομένα επιτρέπουν στους αγρότες να βελτιστοποιήσουν τις πρακτικές που εφαρμόζουν στις καλλιέργειές τους, συμπεριλαμβανομένου της ακρίβειας στην εφαρμογή λιπασμάτων.



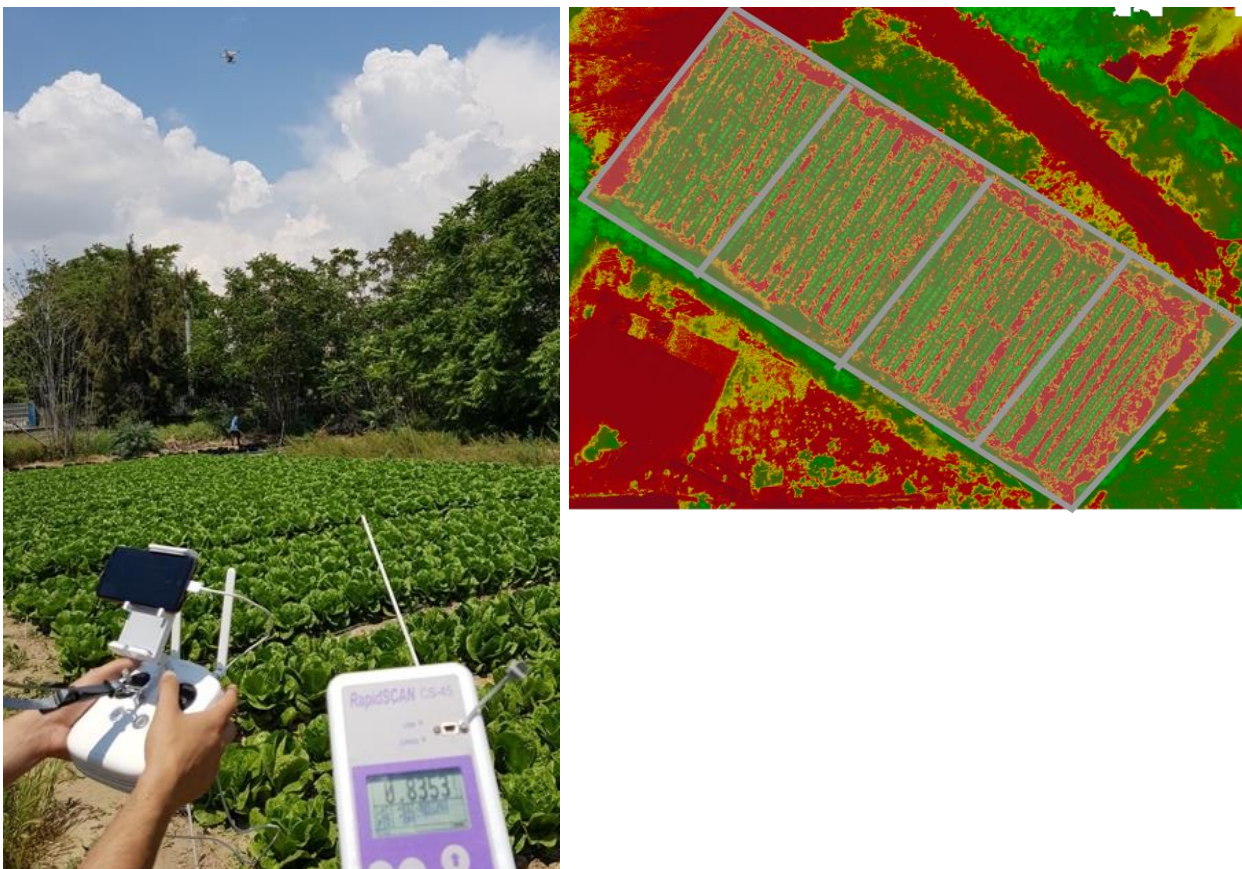
Εικόνα 14. Η πολυφασματική κάμερα Parrot Sequoia

Παρέχοντας πληροφορίες για την υγεία των φυτών, η Sequoia δίνει τη δυνατότητα στους αγρότες να αναλάβουν δράση σε επίπεδο μικρο-φάρμας. Η βελτιστοποίηση της χρήσης λιπάσματος μεταβάλλοντας τις ποσότητες ανάλογα με τις ανάγκες, μειώνοντας τη χρήση φυτοφαρμάκου μόνο στα οικόπεδα που το απαιτούν και η ανάλυση της συμπεριφοράς των φυτών μετά την άρδευση είναι όλα τα οφέλη που λαμβάνονται μέσω του αισθητήρα Parrot Sequoia.

Με τη μορφή της μίνι-κάμερας, ο πολυφασματικός αισθητήρας Parrot Sequoia μπορεί να ενσωματωθεί σε όλα τα drones, τόσο multi-rotor όσο και σταθερά πτερύγια. Είτε σε

υπολογιστή, smartphone ή tablet, οι συνδέσεις Wi-Fi και USB καθιστούν τα δεδομένα του προσβάσιμα σε όλες τις συσκευές.

Μια πτήση πραγματοποιήθηκε, στις 18 Μαΐου, στο ανοιχτό πεδίο, προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι μετρήσεις σχετικά με τους δείκτες ζωηρότητας της καλλιέργειας συγκεκριμένα. Ωστόσο, ο δείκτης NDVI έδειξε έναν κορεσμό καθότι η καλλιέργεια ήταν σε πολύ μεγάλη ανάπτυξη λίγο πριν τη συγκομιδή, οπότε τα δεδομένα από την κάμερα δεν λήφθησαν υπόψιν για την δημιουργία του χάρτη εφαρμογής που τελικά χρησιμοποιήθηκε στην πιλοτική δοκιμή του συστήματος στις 22 Μαΐου



Εικόνα 15. Πτήση με drone πάνω από τα μαρούλια και ορθομοσαϊκός χάρτης

4.5.3 Λοιπές μετρήσεις

4.5.3.1 Μετρήσεις με μετρητή χλωροφύλλης AtLEAF (13 και 20 Μαΐου 2019)

Το atLEAF CHL BLUE είναι μια φορητή, εύχρηστη συσκευή με συνδέσεις USB και Bluetooth για την μη επιθετική μέτρηση της σχετικής περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη των φυτών πράσινων φύλλων. Η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη μπορεί να αποτελεί ένδειξη της κατάστασης του φυτού.

Η σχετική συγκέντρωση χλωροφύλλης φυτού μετρείται εισάγοντας ένα φύλλο στο άνοιγμα της συσκευής. Μπορούν να μετρηθούν πράσινα φύλλα πάχους έως 0,1 ιντσών (3 mm). Χρειάζεται μόνο ένα πάτημα του πλήκτρου για την εκτέλεση μιας βασικής μέτρησης.

4.5.3.2 Μέγεθος των φυτών μαρουλιού ανά επεξεργασία

Διαστάσεις των φυτών μετρήθηκαν, η διάμετρος και το ύψος, σε 3 ξεχωριστές ημέρες: 8η, 14η Μαΐου

4.5.3.3 Βάρος φυτών μαρουλιού ανά επεξεργασία

Κατά τη διάρκεια των 2 ημερών συγκομιδής, τα φυτά ζυγίστηκαν ανά επεξεργασία, σε κλίμακα ζύγισης.



Εικόνα 16. Ο μετρητής χλωροφύλλης AtLEAF

4.6 Το πρωτότυπο σύστημα που αναπτύχθηκε

Κατά τη διάρκεια της παρούσας πτυχιακής μελέτης ένα πρωτότυπο σύστημα αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες τον Ιούνιο του 2019, στο χώρο του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

4.6.1 Το υλικό

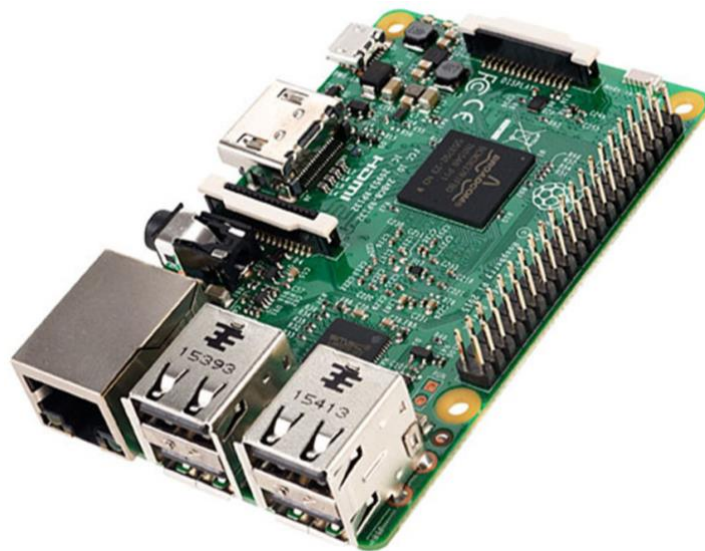
Το υλικό (hardware) του συστήματος αποτελούνταν από τα παρακάτω διακριτά μέρη:

4.6.1.1 Μικροϋπολογιστής - Raspberry Pi 3B+

Το Raspberry Pi είναι ένα πλήρες υπολογιστικό σύστημα, σε μία απλή πλακέτα, με μικρές διαστάσεις και χαμηλό κόστος (περίπου 45€). Οι δυνατότητές του στον έλεγχο ρομποτικών συσκευών είναι πολλές και ενδιαφέρουσες και η εκμάθησή του είναι σχετικά απλή, ακόμη και για τον μη ειδικό χρήστη. Είναι ένας υπολογιστής "κάρτας" (singleboard computer - SBC),

αποτελείται από ένα ενιαίο κύκλωμα που περιλαμβάνει όλες τις βασικές μονάδες ενός υπολογιστικού συστήματος σε μία κάρτα, όπως μικροεπεξεργαστή, μνήμη, κυκλώματα εισόδου/εξόδου (I/O). Τέτοια συστήματα λειτουργούν τόσο ως ενσωματωμένα συστήματα όσο και ως συστήματα αυτοτελών υπολογιστών. Σε αντίθεση με αυτά, οι κλασικοί προσωπικοί ή οι μικροϋπολογιστές αποτελούνται από πολλές ανεξάρτητες διασυνδεδεμένες μονάδες, αρχιτεκτονική με πολλά πλεονεκτήματα, όπως η επεκτασιμότητα, αλλά και μειονεκτήματα, όπως οι βλάβες, ο όγκος και πιθανά το κόστος σε συνάρτηση βέβαια με την υπολογιστική ισχύ.

Το RPi εμφανίστηκε το 2012, ενώ το 2021 βρίσκεται στην έκδοση 4, Raspberry Pi 4 Model B. Πρόκειται για πλήρες υπολογιστικό σύστημα και όχι για έναν απλό ελεγκτή, όπως άλλα συστήματα, για παράδειγμα το Arduino, γεγονός που του δίνει πληθώρα δυνατοτήτων και άρα δυνατών χρήσεων στην εκπαιδευτική διαδικασία. Έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με οθόνη (διαθέτει συνδετήρα HDMI) και πληκτρολόγιο. Εάν υπάρχει ασύρματη σύνδεση, μπορεί να συνδεθεί με desktop υπολογιστή, μέσω σύνδεσης SSH ή VNC.



Εικόνα 17. Raspberry Pi 3 Model B, ο μικροεπεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε

Διαθέτει κάρτα μνήμης τύπου microSD, όπου αποθηκεύονται λειτουργικό σύστημα, εφαρμογές και αρχεία δεδομένων. Διαθέτει τέσσερις θύρες USB για σύνδεση συσκευών (πληκτρολόγιο, ποντίκι, Arduino, web κάμερα κλπ). Επίσης, διαθέτει συνδετήρα Ethernet για σύνδεση στο διαδίκτυο ή σε τοπικό δίκτυο, bluetooth για ασύρματη διασύνδεση συσκευών και wifi (ή έκδοση B+ διαθέτει dual band wifi). Στην κάρτα SD που δέχεται το RPi, είναι δυνατόν να εγκατασταθούν διάφορα Λειτουργικά Συστήματα, ενώ είναι επίσης δυνατή και με ελάχιστες εξαιρέσεις, η ταυτόχρονη ύπαρξή τους, με δυνατότητα επιλογής ενός από αυτά κατά την εκκίνηση. Συνηθέστερη επιλογή αποτελεί ίσως το λειτουργικό σύστημα Raspbian (Raspbian,


2016), μια διανομή βασισμένη στο Debian Linux. Μπορεί πολύ εύκολα να προγραμματιστεί σε γλώσσα Python.

Πίνακας 5. Τα βασικά χαρακτηριστικά του Raspberry Pi συνοπτικά

802.11n Wireless LAN Bluetooth 4.1 1 GB RAM 4 USB ports 40 GPIO pins Full HDMI port Ethernet port	Combined 3.5mm audio jack and composite video Camera interface (CSI) Display interface (DSI) Micro SD card slot (now push-pull rather than push- push) VideoCore IV 3D graphics core 1.2 GHz 64-bit quad-core ARMv8 CPU
--	--

Αυτό που δίνει στο Raspberry Pi προστιθέμενη αξία ως μικρό υπολογιστή, είναι η διεπαφή GPIO, δηλαδή, ένα σύνολο ακροδεκτών γενικού σκοπού, που είναι διαθέσιμοι στον χρήστη, προκειμένου να οδηγήσει κυκλώματα και συσκευές. Επίσης, μπορεί να συνδέσει αισθητήρες ή να στείλει δεδομένα μέσω τυπικών διαύλων, όπως σειριακή θύρα, δίαυλος I2C, δίαυλος SPI κ. ά. Συνεπώς το RPi μπορεί να λειτουργήσει ως ελεγκτής άλλων συσκευών ή αισθητήρων και να υποστηρίξει εφαρμογές PhC, με έναν τρόπο διαφορετικό από τους απλούστερους ελεγκτές, όπως είναι ο μικροελεγκτής Arduino. Το Σχήμα 14 παρουσιάζει τους ακροδέκτες GPIO του Raspberry Pi 3. Διακρίνονται η φυσική αρίθμηση των ακροδεκτών πάνω στην πλακέτα, και η λεγόμενη αρίθμηση BCM, που εμφανίζεται με το με το πρόθεμα GPIO.

Η δυνατότητά του για ασύρματη επικοινωνία wifi και bluetooth, του προσδίδει ισχυρό πλεονέκτημα στην υλοποίηση δικτυακών και διαδικτυακών εφαρμογών. Το RPi, ως υπολογιστής με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως ανεξάρτητη μονάδα (stand-alone) όσο και να ενταχθεί σε μια αρχιτεκτονική δικτύου τύπου client-server. Τέτοια υπολογιστικά συστήματα, έχουν πολλά προτερήματα, όπως είναι η αξιοπιστία λειτουργίας, η σχεδόν ανυπαρξία βλαβών, το χαμηλότερο κόστος σε σχέση με ένα τυπικό σύστημα άλλης αρχιτεκτονικής, η φορητότητα, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που προσδίνει δυνατότητες αυτονομίας, η καταλληλότητα ορισμένων, όπως το RPi, να υποκαταστήσουν σε πολλές περιπτώσεις έναν προσωπικό υπολογιστή.



GPIO#	2nd func	Physical Pins		2nd func	GPIO#
		pin#	pin#		
N/A	+3V3	1	2	+5V	N/A
GPIO2	SDA1 (I2C)	3	4	+5V	N/A
GPIO3	SCL1 (I2C)	5	6	GND	N/A
GPIO4	GCLK	7	8	TXD0 (UART)	GPIO14
N/A	GND	9	10	RXD0 (UART)	GPIO15
GPIO17	GEN0	11	12	GEN1	GPIO18
GPIO27	GEN2	13	14	GND	N/A
GPIO22	GEN3	15	16	GEN4	GPIO23
N/A	+3V3	17	18	GEN5	GPIO24
GPIO10	MOSI (SPI)	19	20	GND	N/A
GPIO9	MISO (SPI)	21	22	GEN6	GPIO25
GPIO11	SCLK (SPI)	23	24	CE0_N (SPI)	GPIO8
N/A	GND	25	26	CE1_N (SPI)	GPIO7
EEPROM	ID_SD	27	28	ID_SC	EEPROM
GPIO5	N/A	29	30	GND	N/A
GPIO6	N/A	31	32	-	GPIO12
GPIO13	N/A	33	34	GND	N/A
GPIO19	N/A	35	36	N/A	GPIO16
GPIO26	N/A	37	38	N/A	GPIO20
N/A	GND	39	40	N/A	GPIO21

Σχήμα 14. Οι ακροδέκτες GPIO του Raspberry Pi 3.

Από την εμφάνισή του Raspberry Pi, το 2012, ήταν ήδη σαφής ο εκπαιδευτικός προσανατολισμός του. Το μικρό μέγεθος και η φορητότητά του το καθιστούν κατάλληλο για ενσωμάτωση σε κάθε είδους ρομποτικές ή γενικότερα διαδραστικές προγραμματιζόμενες κατασκευές. Η χρήση του στην εκπαίδευση υποστηρίχθηκε και συνεχίζει με αυξανόμενο ρυθμό, με πολλές έρευνες και προτάσεις, τη δημιουργία εφαρμογών για σχολεία, ερευνητικά ιδρύματα, ή και την μεταφορά-υλοποίηση σε RPi υπαρχουσών προτάσεων άλλων συστημάτων, αλλά και με την σύσταση ενεργών κοινοτήτων και εκπαιδευτικών ομάδων γύρω από αυτό.

4.6.1.2 GPS δέκτης και NMEA

Οι GPS δέκτες είναι το πιο σημαντικό υλικό σε μια λειτουργία παρακολούθησης GPS. Τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητές τους επηρεάζουν τις τεχνικές που διαθέτει ο χρήστης καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί δέκτες GPS στην αγορά. Μερικοί από αυτούς είναι κατάλληλοι για έρευνα και μοιράζονται ορισμένα θεμελιώδη στοιχεία. Αν και δεν υπάρχει ποτέ εγγυημένο επίπεδο ακρίβειας, με τις σωστές διαδικασίες και τον χειρισμό δεδομένων, είναι γενικά ικανοί για ακρίβεια από υπομέτρο έως εκατοστά. Οι δέκτες GPS διατίθενται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη. Ορισμένοι έχουν εξωτερικές μπαταρίες, συλλέκτες δεδομένων. Ορισμένα είναι τοποθετημένα σε τρίποδο. Ορισμένοι είναι φορητοί και

διαθέτουν όλα τα εξαρτήματα ενσωματωμένα και μερικοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με τους δύο τρόπους, με εξωτερικά και χωρίς.

Ένας δέκτης GPS¹⁶ πρέπει να συλλέγει και, στη συνέχεια, να μετατρέπει σήματα από δορυφόρους GPS σε μετρήσεις θέσης, ταχύτητας και χρόνου. Υπάρχει μια πρόκληση στο ότι το σήμα GPS έχει χαμηλή ισχύ. Ένας δορυφόρος GPS σε τροχιά μεταδίδει το σήμα του σε έναν κώνο περίπου 28° τόξου. Από την άποψη του δορυφόρου, περίπου 11.000 μίλια πάνω, αυτός ο κώνος καλύπτει ένα σημαντικό μέρος ολόκληρου του πλανήτη. Είναι σημαντικό να συγκρίνουμε αυτήν τη διάταξη με έναν τυπικό δορυφόρο επικοινωνίας που όχι μόνο έχει πολύ περισσότερη ισχύ, αλλά επίσης μεταδίδει ένα πολύ κατευθυντικό σήμα. Τα σήματά του συλλέγονται συνήθως από μια μεγάλη κεραία πιάτου, αλλά ο τυπικός δέκτης GPS έχει μια μικρή, σχετικά μη κατευθυντική κεραία. Με άλλο λόγια, ένας δορυφόρος GPS διαδίδει ένα σήμα χαμηλής ισχύος σε μια μεγάλη περιοχή αντί να κατευθύνει ένα σήμα υψηλής ισχύος σε μια πολύ συγκεκριμένη περιοχή. Ευτυχώς, οι κεραίες που χρησιμοποιούνται για δέκτες GPS δεν χρειάζεται να κατευθύνονται απευθείας στην πηγή σήματος.



Εικόνα 18. Ένας απλός δέκτης GPS, που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα

Το σήμα GPS καταλαμβάνει επίσης σκόπιμα ένα ευρύτερο εύρος ζώνης από αυτό που πρέπει να μεταφέρει τις πληροφορίες του. Αυτό το χαρακτηριστικό χρησιμοποιείται για την αποτροπή της παρεμβολής και τον μετρίασμό των πολλαπλών διαδρομών, αλλά το πιο σημαντικό, το ίδιο το σήμα GPS θα αποκρύπτεται εντελώς από την ποικιλία του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου που μας περιβάλλει, εάν δεν ήταν κωδικοποιημένο σήμα φάσματος. Στην πραγματικότητα, όταν ένα σήμα GPS φτάνει σε έναν δέκτη, η ισχύς του είναι στην πραγματικότητα μικρότερη από το επίπεδο θορύβου του δέκτη. Ευτυχώς, ο δέκτης μπορεί ακόμα να εξαγάγει το σήμα και να επιτύχει σαφή δορυφορική παρακολούθηση χρησιμοποιώντας τις τεχνικές συσχέτισης

¹⁶ <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1781>

που περιγράφηκαν προηγουμένως. Για να γίνει αυτή η εργασία, τα στοιχεία ενός δέκτη GPS λειτουργούν συνεργατικά και επαναληπτικά. Αυτό σημαίνει ότι η ροή δεδομένων βελτιώνεται επανειλημμένα από τα διάφορα στοιχεία της συσκευής που συνεργάζονται καθώς περνά μέσα από τον δέκτη.

Το NMEA¹⁷ είναι αρκτικόλεξο για την Εθνική Ένωση Ηλεκτρονικών Ναυτικών. Το NMEA υπήρχε πολύ πριν επινοηθεί το GPS. Σύμφωνα με τον ιστότοπο της NMEA, η ένωση ιδρύθηκε το 1957 από μια ομάδα ηλεκτρονικών αντιπροσώπων για τη δημιουργία καλύτερων επικοινωνιών με τους κατασκευαστές. Η μορφή NMEA χρησιμοποιείται από πολλές θαλάσσιες συσκευές GPS για τη μετάδοση δεδομένων από θαλάσσια ηλεκτρονικά σε υπολογιστές και άλλους θαλάσσιους εξοπλισμούς. Διατηρεί δεδομένα σε δομή πρότασης, με κάθε πρώτη λέξη, γνωστή ως τύπος δεδομένων, που καθορίζει την ερμηνεία της υπόλοιπης πρότασης.

Σήμερα στον κόσμο του GPS, το NMEA είναι μια τυπική μορφή δεδομένων που υποστηρίζεται από όλους τους κατασκευαστές GPS, όπως το ASCII¹⁸ είναι το πρότυπο για χαρακτήρες ψηφιακών υπολογιστών στον κόσμο των υπολογιστών. Ο σκοπός του NMEA είναι να δώσει στους χρήστες εξοπλισμού τη δυνατότητα να συνδυάζουν και να συνδυάζουν υλικό και λογισμικό. Τα δεδομένα GPS με μορφοποίηση NMEA διευκολύνουν τη ζωή των προγραμματιστών λογισμικού να γράφουν λογισμικό για μια μεγάλη ποικιλία δεκτών GPS αντί να χρειάζεται να γράψουν μια προσαρμοσμένη διεπαφή για κάθε δέκτη GPS. Για παράδειγμα, το λογισμικό VisualGPS¹⁹ (δωρεάν), δέχεται δεδομένα με μορφή NMEA από οποιονδήποτε δέκτη GPS και τα εμφανίζει γραφικά. Χωρίς ένα πρότυπο όπως το NMEA, θα ήταν χρονοβόρα και δαπανηρή η σύνταξη και η συντήρηση ενός τέτοιου λογισμικού.

Αυτό που αυξάνει την πολυπλοκότητα του NMEA είναι ότι υπάρχουν αρκετά μηνύματα "NMEA", όχι μόνο ένα. Έτσι, όπως υπάρχουν όλα τα είδη δεκτών GPS με διαφορετικές δυνατότητες, υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι μηνυμάτων NMEA με διαφορετικές δυνατότητες. Επιπλέον, τα δεδομένα NMEA μπορούν να μεταδοθούν μέσω διαφορετικών τύπων διεπαφών επικοινωνίας όπως RS-232²⁰, USB²¹, Bluetooth²², Wi-Fi²³, UHF²⁴ και πολλά άλλα.

¹⁷ <https://www.nmea.org/>

¹⁸ <https://www.ascii-code.com/>

¹⁹ <https://www.visualgps.net/>

²⁰ <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-232>

²¹ <https://www.usb.org/>

²² <https://www.bluetooth.com/>

²³ <https://www.wi-fi.org/>

²⁴ <https://www.britannica.com/technology/UHF>

Το πρότυπο NMEA 0183²⁵ χρησιμοποιεί ένα απλό πρωτόκολλο σειριακών επικοινωνιών ASCII που καθορίζει τον τρόπο μετάδοσης των δεδομένων σε μια «πρόταση» από έναν «ομιλητή» σε πολλούς «ακροατές» κάθε φορά. Μέσω της χρήσης ενδιάμεσων επεκτατών, ένας ομιλητής μπορεί να έχει μια μονοκατευθυντική συνομιλία με έναν σχεδόν απεριόριστο αριθμό ακροατών, και χρησιμοποιώντας πολυπλέκτες, πολλοί αισθητήρες μπορούν να μιλήσουν σε μία μόνο θύρα υπολογιστή.

Στο επίπεδο εφαρμογής, το πρότυπο ορίζει επίσης τα περιεχόμενα κάθε τύπου φράσης (μήνυμα), έτσι ώστε όλοι οι ακροατές να μπορούν να αναλύουν με ακρίβεια τα μηνύματα. Ενώ το NMEA0183 ορίζει μόνο μια μεταφορά RS422, υπάρχει επίσης ένα de facto πρότυπο στο οποίο οι προτάσεις από το NMEA0183 τοποθετούνται σε UDP datagrams (μία πρόταση ανά πακέτο) και αποστέλλονται μέσω ενός δικτύου IP.

```
$GPRMC,183729,A,3907.356,N,12102.482,W,000.0,360.0,080301,015.5,E*6F
$GPRMB,A,,,,,,,,,V*71
$GPGGA,183730,3907.356,N,12102.482,W,1,05,1.6,646.4,M,-24.1,M,,*75
$GPGSA,A,3,02,,,07,,09,24,26,,,,,1.6,1.6,1.0*3D
$GPGSV,2,1,08,02,43,088,38,04,42,145,00,05,11,291,00,07,60,043,35*71
$GPGSV,2,2,08,08,02,145,00,09,46,303,47,24,16,178,32,26,18,231,43*77
$PGRME,22.0,M,52.9,M,51.0,M*14
$GPGLL,3907.360,N,12102.481,W,183730,A*33
$PGRMZ,2062,f,3*2D
$PGRMM,WGS 84*06
$GPBOD,,T,,M,,*47
$GPRTE,1,1,c,0*07
$GPRMC,183731,A,3907.482,N,12102.436,W,000.0,360.0,080301,015.5,E*67
$GPRMB,A,,,,,,,,,V*71
```

Σχήμα 15. Παράδειγμα μια συμβολοσειράς NMEA

4.6.1.3 Δομή μηνυμάτων NMEA

Τα δεδομένα που μεταδίδονται από κεραίες GPS σε άλλες συσκευές χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο NMEA έχουν μορφή αίσθησης συγκεκριμένων πληροφοριών: ταχύτητα, συντεταγμένες και ποιότητα σήματος. Οι περισσότερες κεραίες GPS μεταδίδουν δεδομένα στα 4800 bps (ρυθμός baud), 8 bit δεδομένων, χωρίς ισοτιμία και ένα bit διακοπής (8N1). Ο ρυθμός Baud²⁶ καθορίζει πόσα bit ανά δευτερόλεπτο μπορούν να μεταδοθούν από την κεραία GPS στην άλλη συσκευή. Κάθε πρόταση NMEA αποτελείται από οκτώ bits δεδομένων, με ένα bit να προστίθεται για να υποδεικνύει κάθε τέλος της πρότασης στη συσκευή. Το πρωτόκολλο RTCM λειτουργεί παρόμοια αλλά αναπτύχθηκε για μετάδοση δεδομένων μεταξύ κεραιών GPS.

²⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/NMEA_0183

²⁶ http://www.ece.northwestern.edu/local-apps/matlabhelp/techdoc/matlab_external/baudrate.html

Για να κατανοήσουμε τη δομή μηνυμάτων NMEA, παραθέτουμε το δημοφιλές μήνυμα \$ GPGGA. Αυτό το συγκεκριμένο μήνυμα προέκυψε από έναν δέκτη GPS RTK:

GPGGA \$, 181908.00,3404.7041778, N, 07044.3966270,
W, 4,13,1,00,495.144, M, 29.200, M, 0,10,0000 * 40

Όλα τα μηνύματα NMEA ξεκινούν με το χαρακτήρα \$ και κάθε πεδίο δεδομένων διαχωρίζεται με κόμμα.

- Το **GP** αντιπροσωπεύει ότι είναι μια θέση GPS (το GL σημαίνει GLONASS).
- **181908.00** είναι η χρονική σήμανση: ώρα UTC σε ώρες, λεπτά και δευτερόλεπτα.
- Το **3404.7041778** είναι το γεωγραφικό πλάτος σε μορφή DDMM.MMMMM. Τα δεκαδικά ψηφία είναι μεταβλητά.
- **N** σημαίνει βόρειο γεωγραφικό πλάτος.
- **07044.3966270** είναι το γεωγραφικό μήκος σε μορφή DDDMM.MMMMM. Τα δεκαδικά ψηφία είναι μεταβλητά.
- **W** σημαίνει δυτικό γεωγραφικό μήκος.
- **4** υποδηλώνει τον δείκτη ποιότητας:
 - 1 = Μη διορθωμένη συντεταγμένη
 - 2 = Διαφορετικά σωστή συντεταγμένη (π.χ. WAAS, DGPS)
 - = RTK Fix συντεταγμένη (ακρίβεια εκατοστόμετρου)
 - = RTK Float (ακρίβεια δεκαμέτρου).
- 13 δηλώνει τον αριθμό των δορυφόρων που χρησιμοποιούνται στη συντεταγμένη.
- **1.0** σημαίνει το HDOP (οριζόντια αραίωση ακρίβειας).
- **495.144** σημαίνει υψόμετρο της κεραίας.
- **M** σημαίνει μονάδες υψομέτρου (π.χ. μέτρα ή πόδια)
- **29.200** υποδηλώνει το γεωϊδικό διαχωρισμό (αφαιρέστε το από το ύψος της κεραίας για να φτάσετε στο ύψος πάνω από το ελλειψοειδές (HAE)).
- Το **M** δηλώνει τις μονάδες που χρησιμοποιούνται από τον γεωϊδικό διαχωρισμό.
- **1.0** σημαίνει την ηλικία της διόρθωσης (εάν υπάρχει).
- Το **0000** δηλώνει το αναγνωριστικό σταθμού διόρθωσης (εάν υπάρχει).
- *** 40** δηλώνει το άθροισμα ελέγχου.

Το \$ GPGGA είναι ένα βασικό μήνυμα GPS NMEA. Υπάρχουν εναλλακτικά και συνοδευτικά μηνύματα NMEA που παρέχουν παρόμοιες ή πρόσθετες πληροφορίες.

4.6.1.4 Λιπασματοδιανομέας και βαθμονόμηση

Για το σύστημα χρησιμοποιήθηκε ένας πλαστικός λιπασματοδιανομέας περιστρεφόμενου δίσκου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 19. Η χωρητικότητα του έφτανε το μέγιστο των 40 κιλών και ο ίδιος ζυγίζει 8 kg. Η ακτίνα διανομής φτάνει τα 2 μ και οι διαστάσεις του είναι (Μ / Π / Υ): 67.3 / 67.3 / 36.8



Εικόνα 19. Λιπασματοδιανομέας περιστρεφόμενου δίσκου, ιδανικός για κοκκώδες λίπασμα

Η διαδικασία βαθμονόμησης γενικά εξαρτάται από την αρχιτεκτονική σχεδιασμού του λιπασματοδιανομέα. Για αυτόν το συγκεκριμένο λιπασματοδιανομέα, η εναπόθεση λιπάσματος συνδέεται άμεσα με την ταχύτητα κίνησης του διασκορπιστή, καθώς υπάρχει ένας μεταλλικός πείρος συνδεδεμένος με τον άξονα του τροχού και περιστρέφεται μέσα στο δοχείο. Αυτός ο πείρος περιστρέφεται, αναταράσσεται το λίπασμα και αναγκάζεται να περάσει από το άνοιγμα εναπόθεσης. Κατά συνέπεια, όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα περιστροφής του πείρου, τόσο περισσότερο ωθείται το λίπασμα μέσω του ανοίγματος.

Για τη διαδικασία βαθμονόμησης, υποθέσαμε δύο σταθερές ταχύτητες εργασίας (**3χμ/ώρα και 5 χμ/ώρα**), και ένα γεμάτο δοχείο με **30Κ λιπάσματος**. Στη συνέχεια, σταθμίσαμε ολόκληρο το σύστημα και διαιρέσαμε το άνοιγμα εναπόθεσης σε **10 ξεχωριστές κλίμακες**, από πλήρως κλειστές έως πλήρως ανοιχτές. Διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα κίνησης* (3χμ/ώρα και 5 χμ/ώρα) και για κάθε κλίμακα εναπόθεσης, λειτουργήσαμε το σύστημα για χρονική διάρκεια ενός λεπτού, και υπολογίσαμε το βάρος του λιπάσματος που εναποτέθηκε μετρώντας τη διαφορά στις απώλειες βάρους.

Μετά από κάθε μέτρηση, το δοχείο επαναγεμίστηκε σύμφωνα με το λίπασμα που είχε αφαιρεθεί από την εναπόθεση. Η διαδικασία επαναλήφθηκε 3 φορές για κάθε κλίμακα και στο σύνολό της για κάθε ταχύτητα. Από τις μετρήσεις προέκυψε ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 6. Βαθμονόμηση λιπασματοδιανομέα σε 10 βαθμίδες, με 3 επαναλήψεις για κάθε μια από τις 2 επιλεγμένες ταχύτητες

Απόθεση λιπάσματος								
	Ταχύτητα κίνησης							
	3χμ/ώρα				5 χμ/ώρα			
	Επανάληψη νο (βάρος σε γρ.)				Επανάληψη νο (βάρος σε γρ.)			
Βαθμίδα	1η	2η	3η	Μ.Ο.	1η	2η	3η	Μ.Ο.
1	240	220	234	231	496	454	432	460
2	340	410	400	383	587	596	630	604
3	627	687	665	659	772	834	860	822
4	822	842	865	843	1100	1076	1200	1125
5	1124	1190	1220	1178	1320	1100	1430	1283
6	1334	1258	1200	1264	1550	1562	1600	1570
7	1700	1698	1374	1590	1840	1794	1720	1784
8	1802	1800	1798	1800	2030	1890	2100	2000
9	2081	2000	1706	1929	2320	2250	2298	2289
10	2300	1980	2030	2100	2450	2520	2320	2430

4.6.1.5 Ο ενεργοποιητής

Ο γραμμικός ενεργοποιητής 12 V ελαφρού τύπου (LD) με μείωση ταχύτητας 10: 1 μπορεί να ανυψώσει φορτία έως 25 kgf [55 lbs ή 250 N] και να αντέξει στατικά φορτία έως 250 kgf [550 lbs ή 2500 N]. Έχει μέγιστη ταχύτητα 28 mm / s [1,1 " / s] χωρίς φορτίο και 23 mm / s [0,9 " / s] στο μέγιστο φορτίο. Οι διακόπτες ορίου σε κάθε άκρο καθιστούν τον ενεργοποιητή εύκολο να ελεγχθεί σε όλο το εύρος κίνησης. Ο άξονας διατηρεί τη θέση του όταν δεν είναι τροφοδοτημένος.

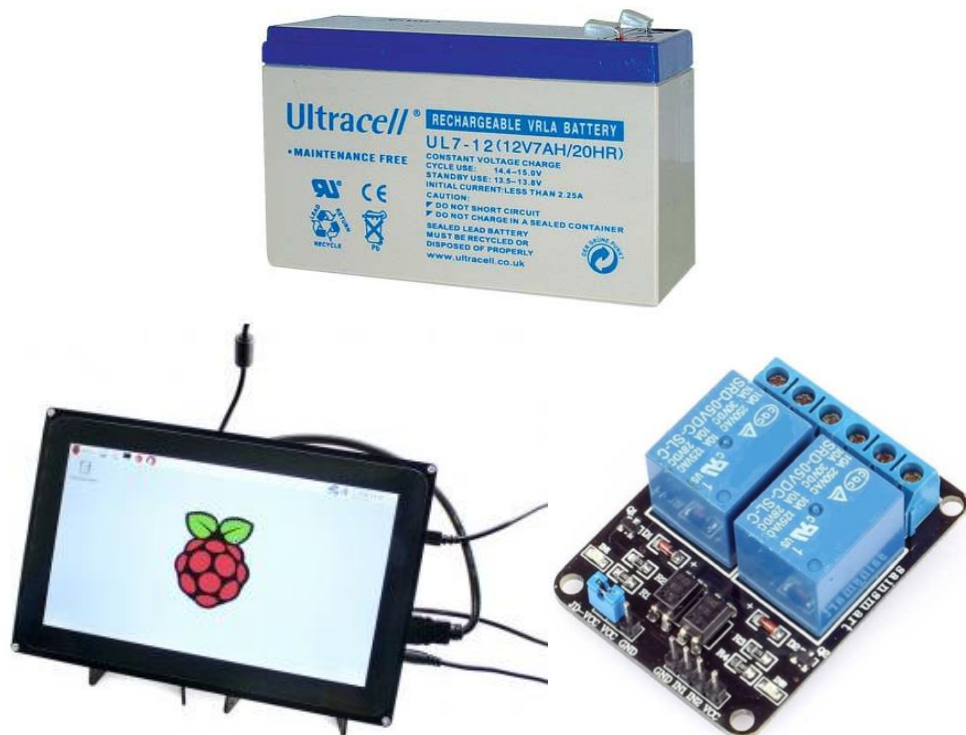
Είναι κατά βάση μεταλλικός και ολόκληρο το περίβλημα είναι σφραγισμένο ώστε να παρέχει προστασία από τη σκόνη και τους υδρατμούς: ο κατασκευαστής παρέχει ένα βαθμό προστασίας IP54. Χρησιμοποιούν μια συρόμενη κίνηση για να μετακινήσουν έναν άξονα μπρος-πίσω κατά μήκος του. Ο συρόμενος οδηγός εξασφαλίζει ότι ο άξονας θα διατηρήσει τη θέση του ακόμη και όταν δεν είναι τροφοδοτημένος. Δύο οριακοί διακόπτες σταματούν με ασφάλεια τον κινητήρα σε κάθε άκρο του εύρους του, ενώ οι δίοδοι του επιτρέπουν να αντιστρέψει την κατεύθυνση αφού φτάσει σε ένα οριακό σημείο.



Εικόνα 20. Γραμμικός ενεργοποιητής ip54, 12V, 250mm

Επιπλέον μέρη του υλικού που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του συστήματος είναι τα παρακάτω:

- Relay Board
- Μπαταρία για τον ενεργοποιητή
- Οθόνη LCD για το Raspberry Pi
- 2 power banks
- Bluetooth Mouse & Keyboard
- Cables



Εικόνα 21. Τα επιπλέον βοηθητικά μέρη του συστήματος

4.6.2 Λογισμικό

4.6.2.1 Η γλώσσα Python

Η γλώσσα προγραμματισμού Python, παρόλο που χρησιμοποιείται εδώ και δυο δεκαετίες περίπου, έχει αποκτήσει, τα τελευταία χρόνια τεράστια απήχηση και αποδοχή, όχι μόνο στον χώρο της επιστήμης των υπολογιστών, αλλά και σε άλλους εμπορικούς και επιστημονικούς τομείς. Χαρακτηριστική είναι η ταχύτατη διείσδυση της γλώσσας τόσο σε πρακτικές εφαρμογές (σε επιχειρήσεις και οργανισμούς), όσο και στον τομέα της διδασκαλίας και εκμάθησης προγραμματισμού σε διάφορα επίπεδα εκπαίδευσης (από τη μέση μέχρι την ανώτατη εκπαίδευση).

Δεν είναι τυχαίο το ότι χρησιμοποιείται σε πάρα πολλούς και διαφορετικούς τομείς δραστηριοτήτων και αυτό είναι κάτι που την κάνει μοναδική στο είδος της. Η ιδιαίτερη ευκολία εκμάθησης είναι ένα από τα χαρακτηριστικά της. Για αυτό τον λόγο πλέον αποτελεί, για πολλούς και πολλές, την πρώτη γλώσσα προγραμματισμού που θα μάθουν. Υπάρχουν όμως και άλλοι ακόμα πολλοί λόγοι που θα οδηγήσουν κάποιον να στραφεί στην εκμάθηση της γλώσσας και να επιλέξει την Python ως τη γλώσσα προγραμματισμού που θα χρησιμοποιεί για τη δημιουργία προγραμμάτων.

Πιο αναλυτικά, η γλώσσα προγραμματισμού Python είναι:

1. **Δυναμική (Dynamic)**. Κάθε *δομή δεδομένων (data structure)* που υποστηρίζει μπορεί να δημιουργηθεί και να αλλάξει δυναμικά κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Δεν χρειάζεται να είναι προκαθορισμένη, κατασκευάζεται και τροποποιείται πλήρως σύμφωνα με τις ανάγκες του προγράμματος, την ώρα που αυτό τρέχει. Τα δεδομένα που υπάρχουν στη μνήμη του υπολογιστή υφίστανται δυναμική διαχείριση από την ίδια τη γλώσσα.
2. **Δωρεάν**. Είναι δωρεάν για κάθε χρήση (προσωπική και εμπορική) και διανέμεται ελεύθερα. Είναι *ανοιχτού κώδικα (open-source)* και χρησιμοποιεί την άδεια OSI .
3. **Υψηλού επιπέδου (High-level)**. Αυτό σημαίνει ότι παρέχει απλούς και εύκολα κατανοητούς κανόνες (συντακτικούς και γραμματικούς) για τη σύνταξη προγραμμάτων που είναι πολύ κοντά στην ανθρώπινη γλώσσα.
4. **Διερμηνευόμενη (Interpreted)**. Η εκτέλεση ενός προγράμματος γραμμένου στη γλώσσα Python γίνεται με τη βοήθεια ενός ειδικού προγράμματος, του *διερμηνευτή (interpreter)*, που αναλαμβάνει να ελέγξει την ορθότητά του και να πραγματοποιήσει την εκτέλεσή του.
5. **Αντικειμενοστραφής (Object-oriented)**. Η Python είναι μια γλώσσα προσανατολισμένη στα *αντικείμενα (objects)*. Έχει τα χαρακτηριστικά μιας αντικειμενοστραφούς γλώσσας, ωστόσο, υπάρχουν αρκετές διαφωνίες για το αν

υλοποιεί πλήρως αυτό το μοντέλο προγραμματισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εφαρμόζει μια χαλαρή πολιτική σε ένα από τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μοντέλου, το χαρακτηριστικό της *ενθυλάκωσης (encapsulation)*. Παρέχει έναν υποτυπώδη και έμμεσο τρόπο προστασίας της ιδιωτικότητας των αντικειμένων. Αυτό όμως είναι μια λειτουργία που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 11.

6. **Γενικού σκοπού (General-purpose)**. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν για κάθε πρόβλημα και να καλύψει τις απαιτήσεις και τις ανάγκες για μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Αυτός άλλωστε είναι και ένας από τους βασικούς λόγους που χρησιμοποιείται σε τόσο πολλές και διαφορετικές περιπτώσεις.
7. **Διαθέσιμη για διάφορα συστήματα**. Ένα πρόγραμμα σε Python, που έχει γραφτεί σε περιβάλλον Windows, μπορεί, τις περισσότερες φορές, να χρησιμοποιηθεί χωρίς αλλαγές και σε άλλα λειτουργικά συστήματα. Εξαιρούνται ορισμένες περιπτώσεις όπου κάποιες βιβλιοθήκες κώδικα λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο από το ένα σύστημα στο άλλο.
8. **Κατάλληλη για πολλαπλά προγραμματιστικά υποδείγματα (Multi-Paradigm)**. Αυτό το χαρακτηριστικό περιγράφεται στην επόμενη ενότητα. Εν συντομία θα αναφέρουμε μόνο ότι ενσωματώνει διαφορετικές λειτουργίες και δίνει απόλυτη ελευθερία στον δημιουργό ενός προγράμματος για το ποια χαρακτηριστικά θα χρησιμοποιήσει κάθε φορά.
9. **Ικανή να ενσωματώνει υπηρεσίες (Frameworks)**. Αρκετά διαδεδομένα είναι η χρήση έτοιμων συστημάτων υπηρεσιών, που υλοποιούνται σε Python. Κυρίως αφορούν την εγκατάσταση και λειτουργία διαδικτυακών υπηρεσιών, όπως *διακομιστές ιστοσελίδων (web servers)*, *υπηρεσίες νέφους (cloud services)* κ.λπ. Τα πιο γνωστά από αυτά είναι το Flask και το Django
10. **Υλοποίησιμη σε πολλές εκδοχές**. Υπάρχουν αρκετές διανομές της Python, με διαφορετικές υλοποιήσεις (*implementations*). Η επίσημη έκδοση είναι γνωστή με το όνομα CPython, αφού χρησιμοποιεί τη γλώσσα C σε διάφορες λειτουργίες και σε ενσωματωμένες βιβλιοθήκες της. Εκτός όμως από αυτήν υπάρχουν και άλλες εκδόσεις της γλώσσας, η καθεμία με τα δικά της χαρακτηριστικά και ιδιότητες, που κυρίως αφορούν τη συνεργασία και την επικοινωνία της με άλλα συστήματα γλωσσών προγραμματισμού. Ακολουθούν οι πιο γνωστές από αυτές:
11. **Επεκτάσιμη (Extendable)**. Μπορεί εύκολα να συνεργαστεί με άλλες γλώσσες προγραμματισμού. Σε αυτή τη λειτουργία βοηθούν και οι διάφορες υλοποιήσεις της Python.

4.6.3 Ο αλγόριθμος για την κίνηση και την εφαρμογή του λιπάσματος

Αναφορικά με τον αλγόριθμο που γράφτηκε για τους σκοπούς του πειράματος, γράφτηκε στην γλώσσα προγραμματισμού Python (έκδοση νο3) κι έχει δύο βασικές λειτουργίες:

- α) Ανάγνωση του χάρτη εφαρμογής που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες του πειράματος για τον συγκεκριμένο αγρό, ανάγνωση των τιμών γεωγραφικής θέσης που λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο από τον δέκτη GPS που είναι ενσωματωμένος στο σύστημα και σύγκριση των τιμών των 2 πηγών αυτών προκειμένου να δοθεί η σωστή απόφαση στον ενεργοποιητή να ανοιγοκλείσει ανάλογα με την συνιστώμενη δόση που διαβάζεται από τον χάρτη εφαρμογής.
- β) Ανάγνωση των τιμών που δίνονται από τον από το Raspberry Pi στον ενεργοποιητή μέσω ενός relay board προκειμένου να μετακινήσει ανάλογα τον ενεργοποιητή και να μετακινήσει τον βραχίονα που ανοιγοκλείνει ανάλογα τον δίσκο από τον οποίο εναποτίθεται το λίπασμα.

```
import sys
import time
import csv

import geopandas as gp
from geopandas import GeoSeries, GeoDataFrame
from shapely.geometry import shape, mapping, Point, Polygon, LineString, MultiPolygon
import pandas as pd
import fiona

import numpy
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.animation as animation
from matplotlib import style
```

Εικόνα 22. Οι βασικές βιβλιοθήκες της Python που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάγνωση των δεδομένων, τον υπολογισμό των θέσεων και την προβολή των αποτελεσμάτων την οθόνη

Οι βασικές βιβλιοθήκες της Python που εισήχθησαν και χρησιμοποιήθηκαν για τα 2 βασικά κομμάτια του κώδικα είναι οι παρακάτω:

- Numpy²⁷

Το NumPy είναι το βασικό πακέτο για την επιστημονική πληροφορική στην Python. Πρόκειται για μια βιβλιοθήκη Python που παρέχει πολυδιάστατο array objects, διάφορα παράγωγα objects (όπως συγκαλυμμένες συστοιχίες και πίνακες) και μια σειρά από ρουτίνες για γρήγορες λειτουργίες σε συστοιχίες, συμπεριλαμβανομένων μαθηματικών, λογικών,

²⁷ <https://numpy.org/>

χειρισμού σχήματος, ταξινόμησης, επιλογής, I/O, διακριτοί μετασχηματισμοί Fourier, βασική γραμμική άλγεβρα, βασικές στατιστικές λειτουργίες, τυχαία προσομοίωση και πολλά άλλα.

- GeoPandas²⁸

Το GeoPandas είναι ένα έργο ανοιχτού κώδικα που διευκολύνει την εργασία με γεωχωρικά δεδομένα στην python. Το GeoPandas επεκτείνει τους τύπους δεδομένων που χρησιμοποιούνται από τα pandas²⁹ για να επιτρέψει χωρικές λειτουργίες σε γεωμετρικούς τύπους. Οι γεωμετρικές λειτουργίες εκτελούνται με καλές μορφές. Η βιβλιοθήκη Geopandas εξαρτάται περαιτέρω από τη βιβλιοθήκη fiona³⁰ για πρόσβαση στο αρχείο και το matplotlib για το νσχεδιασμό.

- Shapely³¹

Το Shapely είναι ένα πακέτο Python με άδεια BSD για χειρισμό και ανάλυση επίπεδων γεωμετρικών αντικειμένων. Βασίζεται στις βιβλιοθήκες GEOS³² (η μηχανή του PostGIS³³) και JTS³⁴ (από την οποία μεταφέρεται το GEOS). Το Shapely δεν ασχολείται με μορφές δεδομένων ή συστήματα συντεταγμένων, αλλά μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε πακέτα.

- Matplotlib³⁵

Το matplotlib.pyplot είναι μια συλλογή λειτουργιών που κάνουν το matplotlib να λειτουργεί όπως το MATLAB. Κάθε συνάρτηση pyplot κάνει κάποια αλλαγή σε μια εικόνα: π.χ. δημιουργεί μια εικόνα, δημιουργεί μια περιοχή σχεδίασης σε μια εικόνα, σχεδιάζει μερικές γραμμές σε μια περιοχή σχεδίασης, διακοσμεί την πλοκή με ετικέτες κ.λπ. Στο matplotlib.pyplot διατηρούνται διάφορες καταστάσεις σε όλες τις κλήσεις λειτουργιών, έτσι ώστε να παρακολουθεί πράγματα όπως το τρέχον σχήμα και την περιοχή σχεδίασης, και οι συναρτήσεις σχεδίασης κατευθύνονται στους τρέχοντες άξονες (σημειώστε ότι οι "άξονες" εδώ και στα περισσότερα μέρη στο η τεκμηρίωση αναφέρεται στους άξονες ενός σχήματος και όχι στον αυστηρό μαθηματικό όρο για περισσότερους από έναν άξονες).

- RPi.GPIO³⁶

²⁸ <https://geopandas.org/>

²⁹ <https://pandas.pydata.org/>

³⁰ <https://fiona.readthedocs.io/>

³¹ <https://pypi.org/project/Shapely/>

³² <https://trac.osgeo.org/geos/>

³³ <http://postgis.org/>

³⁴ <https://locationtech.github.io/jts/>

³⁵ <https://matplotlib.org/>

³⁶ <https://pypi.org/project/RPi.GPIO/>

Για οποιονδήποτε χρησιμοποιεί την γλώσσα Python για προγραμματισμό, η βιβλιοθήκη `gri.grio` (περιλαμβάνεται στο Raspbian) μας επιτρέπει να διαμορφώσουμε, να διαβάσουμε και να γράψουμε σε ακροδέκτες GPIO.

Ο αλγόριθμος αποθηκεύτηκε στην μονάδα του μικροεπεξεργαστή Raspberry Pi, όπου έγινε και η σύνδεση με τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος.

```
# Figure setup
fig, ax = plt.subplots(1,1, figsize=(10,7))
base = zones.plot(ax=ax, column='GRIDCODE', cmap='Spectral', legend=True) # Plots GRIDCODE co
fig.canvas.set_window_title('PLOT AREA')
#gps_points.plot(ax=base)
base.set_title('YIELD MAP', fontsize=16, pad=20, fontweight='bold')
base.set_xlabel('Easting', fontsize=12, fontweight='bold')
base.set_ylabel('Northing', fontsize=12, fontweight='bold')
ax.set_axisbelow(True)
ax.yaxis.grid(color='gray', linestyle='dashed')
ax.xaxis.grid(color='gray', linestyle='dashed')

gpgga_info = "$GPGGA,"
ser = serial.Serial ("/dev/ttyS0") #Open port with baud rate
GPGGA_buffer = 0
NMEA_buff = 0
lat_in_degrees = 0
long_in_degrees = 0

try:
    while True:
        received_data = (str)(ser.readline()) #read NMEA string received
        GPGGA_data_available = received_data.find(gpgga_info) #check for NMEA GPGGA string
        if (GPGGA_data_available>0):
            GPGGA_buffer = received_data.split("$GPGGA,",1)[1] #store data coming after "$GPGG
            NMEA_buff = (GPGGA_buffer.split(',')) #store comma separated data in
            GPS_Info()
            for j in range(len(zones)): # Loops through all zones
                if ((zones.geometry[j]).contains(gps_points.geometry[i]) == 1):
                    print("tru", gps_points.geometry[i]) # prints GRIDCODE of polygon / OUTPUT TO.
                    xs.append(gps_points.geometry[i].x)
                    ys.append(gps_points.geometry[i].y)
                    plt.pause(0.8)
            p lt.plot(xs, ys) #get time, latitude, longitue

plt.show()
```

Εικόνα 23. Μια γενική επισκόπηση του αλγορίθμου γραμμένου σε Python3 με τα βασικά του συστατικά μέρη α) ανάγνωση της συμβολοσειράς NMEA από τον δέκτη GPS και β) ανάγνωση του χάρτη εφαρμογής σε μορφή `shapefile`

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 23, πιο αναλυτικά οι βασικές λειτουργίες του αλγορίθμου είναι:

- Ρύθμιση της προβολής των γραφημάτων που προκύπτουν με χρήση της βιβλιοθήκης `matplotlib`: άξονας συντεταγμένων, χρωματικοί κώδικες, υπόμνημα κλπ.

- Διαβάσμα των συμβολοσειρών NMEA από τη σειριακή θύρα όπου είναι συνδεδεμένη η μονάδα GPS.
- Διαβάσμα ενός αρχείου (sharefile, json, ή πιθανά άλλη μορφή) που περιέχει συνδυασμένες πληροφορίες για το οριοθετημένο χωράφι σε ζώνες και τον ρυθμό απόθεσης του λιπάσματος για την κάθε ζώνη.
- Σύγκριση των συντεταγμένων GPS που αντιστοιχούν στη θέση της γουρούνας η οποία κινείται, με αυτές που είναι αποθηκευμένες στο χάρτη εφαρμογής (αρχείο με γεωγραφική αναφορά).

Αντίστοιχα στο 2^ο μέρος του αλγορίθμου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 24 δίνονται οδηγίες στον ενεργοποιητή να κινηθεί ανάλογα, καθώς το σύστημα κινείται και διαβάζει τις τιμές από τον χάρτη εφαρμογής. Οι τιμές που διαβάζονται αντιστοιχούν σε προκαθορισμένη θέση στο άνοιγμα της διατομής του δίσκου του διανομέα, οπότε ο ενεργοποιητής κινείται αντίστοιχα από θέση σε θέση ώστε να ανοίγει τη διατομή περισσότερο εάν χρειάζεται περισσότερο λίπασμα ή να την κλείνει σε αντίθετη περίπτωση, όσο μετακινείται από ζώνη σε ζώνη.

```
import time
import RPi.GPIO as GPIO
Enable = True
Zone_Value = 0
Actuator_Position = 0
GPIO.setmode (GPIO.BOARD)
GPIO.setup (channel, GPIO.OUT)

#input(Enable)
#This can only be true or false

while Enable == True:
    Zone_Value = input ('input new zone value', )
    Difference = Zone_Value - Actuator_Position
    if Difference == 0:
        # pass
        print('There is no need for actuation')
    elif Difference < 0:
        Abs_Diff = abs(Difference)
        # Retract = 1
        GPIO.output (13, GPIO.HIGH)
        print('Retract')
        #where 1 is GPIO high for retraction
        time.sleep(Abs_Diff)
        GPIO.output (13, GPIO.LOW)
        #Retract = 0
        GPIO.cleanup ()
        Actuator_Position = Zone_Value
        print('Actuator Position is', Actuator_Position)
    else:
        Abs_Diff = abs(Difference)
        GPIO.output (16, GPIO.HIGH)
        #Extend = 1
        print('Extend')
        #where 1 is GPIO high for extention
        time.sleep(Abs_Diff)
        GPIO.output (16, GPIO.LOW)
        #Extend = 0
        GPIO.cleanup ()
        Actuator_Position = Zone_Value
        print('Actuator Position is', Actuator_Position)
```

Εικόνα 24. Μια γενική επισκόπηση του αλγορίθμου γραμμένου σε Python3, για την κίνηση του ενεργοποιητή και τις αλλαγές θέσης

Το γράφημα που προκύπτει από το 1^ο μέρος του αλγορίθμου μπορεί να εμφανιστεί στην οθόνη που έχει προσαρτηθεί στο σύστημα, εάν είναι διαθέσιμη, ώστε να διευκολύνει τον χειριστή του συστήματος και μπορεί να υποδεικνύει χρήσιμες πληροφορίες όπως:

- τα όρια του επιλεγμένου αγρού
- τις προκαθορισμένες ζώνες όπως διαβάζονται από τον χάρτη εφαρμογής που έχει επίσης εισαχθεί στο σύστημα
- αλλά και την τρέχουσα θέση, και την τροχιά του λιπασματοδιανομέα ή και τις συντεταγμένες του συστήματος ενώ κινείται

Στο Σχήμα 16 φαίνεται μια δοκιμαστική προβολή του γραφήματος στην LCD οθόνη, που τοποθετήθηκε δοκιμαστικά και απεικονίζει τις χρήσιμες πληροφορίες που αναφέρθηκαν για έναν δοκιμαστικό αγρό, διαφορετικό από αυτόν που εγκαταστάθηκε η καλλιέργεια της παρούσας μελέτης. Αυτός ο αγρός έχει μια πιο πολύπλοκη διάταξη και περισσότερο ακανόνιστες ζώνες διαχείρισης, οπότε ήταν αποτέλεσμα μια δοκιμαστική μελέτη περίπτωσης προκειμένου να διαπιστωθεί ότι το σύστημα δουλεύει αποτελεσματικά και περισσότερες περιπτώσεις πριν δοκιμαστεί στις πραγματικές συνθήκες της καλλιέργειας μαρουλιού στο Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Στην εικόνα φαίνονται οι συντεταγμένες όπως διαβάζονται από τον δέκτη GPS και ταυτόχρονα προβάλλεται στην οθόνη η τροχιά κίνησης του συστήματος, με φόντο τα επίπεδα του χάρτη εφαρμογής και του περιγράμματος του αγρού.



Σχήμα 16. Παράδειγμα των αποτελεσμάτων που παράγει ο αλγόριθμος ανάγνωσης του χάρτη εφαρμογής

4.7 Μελέτη περίπτωσης για τη δοκιμή του συστήματος

Το σύστημα του οποίου τα επιμέρους συστατικά μέρη που περιεγράφηκε παραπάνω, είναι φαινομενικά απλό, αλλά για να είναι ακριβές και να επιτευχθούν οι πρωταρχικοί του στόχοι, πρέπει να ξεπεραστούν ορισμένοι περιορισμοί όσον αφορά τον εξοπλισμό και την πολυπλοκότητα ορισμένων υπολογισμών.

Ο χάρτης εφαρμογής για το νιτρικό λίπασμα μπορεί να είναι πολύ περίπλοκος, με πολλαπλές ζώνες διαφορετικών ποσοστών νιτρικών, και συνήθως προϋποθέτει α) ακριβή μονάδα GPS β) μονάδα γρήγορης επεξεργασίας και γ) γρήγορο ενεργοποιητή. Δεδομένου ότι ο σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν να δημιουργηθεί ένα ένα Ελάχιστο Βιώσιμο Προϊόν (Minimum Viable Product - MVP), οι ζώνες του πεδίου (που σημαίνει ότι οι θέσεις στις οποίες ο ενεργοποιητής μπορούσε να κινηθεί σύμφωνα με το shapefile ανάγνωσης) περιορίστηκαν σε 4, δίνοντας στο σύστημα χρόνο να εκτελέσει την μεταβολή με πιο διακριτό και ασφαλή τρόπο.

4.7.1 Ανάλυση των μετρήσεων και δημιουργία του χάρτη εφαρμογής

Όπως αναφέρθηκε ήδη, έγιναν διάφορα είδη μετρήσεων κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, με απώτερο στόχο, την χρήση τους για την δημιουργία ενός χάρτη εφαρμογής για την δοκιμή του συστήματος. Η μεγαλύτερη βαρύτητα δόθηκε στους δείκτες βλάστησης NDVI και NDRE οι οποίοι εξάγονται κάθε φορά αυτόματα από το Rapidscan και καταχωρούνταν σε μια βάση δεδομένων. Οι μετρήσεις με το Rapidscan έγιναν 4 φορές από την ημέρα της φύτευσης μέχρι την ημέρα της συγκομιδής, κατά τις ημερομηνίες 24 Απριλίου, 2 Μαΐου, 12 Μαΐου και 22 Μαΐου, πριν την τελική συγκομιδή.

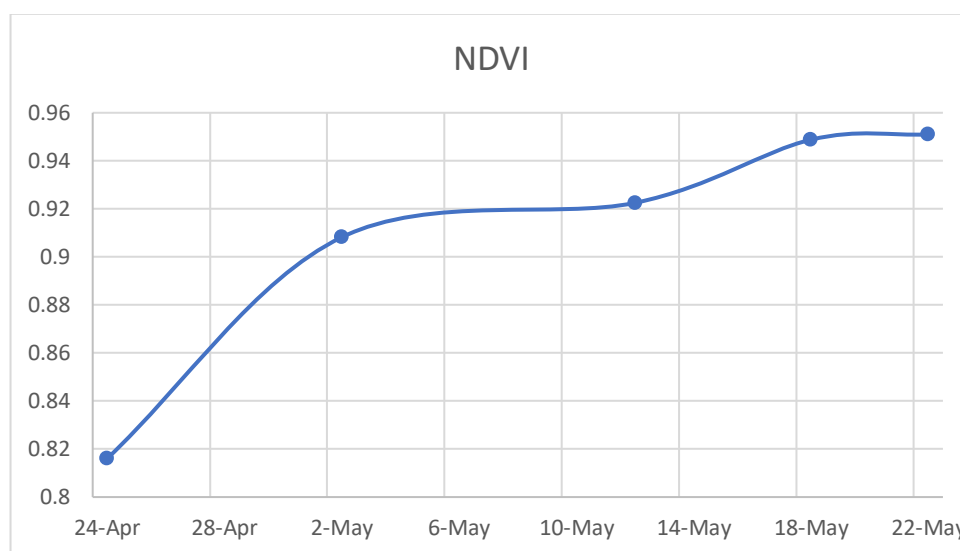


Εικόνα 25. Φυτά μαρουλιού στον ανοιχτό πειραματικό αγρό (Ημερ: 12 Μαΐου 2019)



Εικόνα 26. Φυτά μαρουλιού στον ανοιχτό πειραματικό αγρό (Ημερ: 12 Μαΐου 2019)

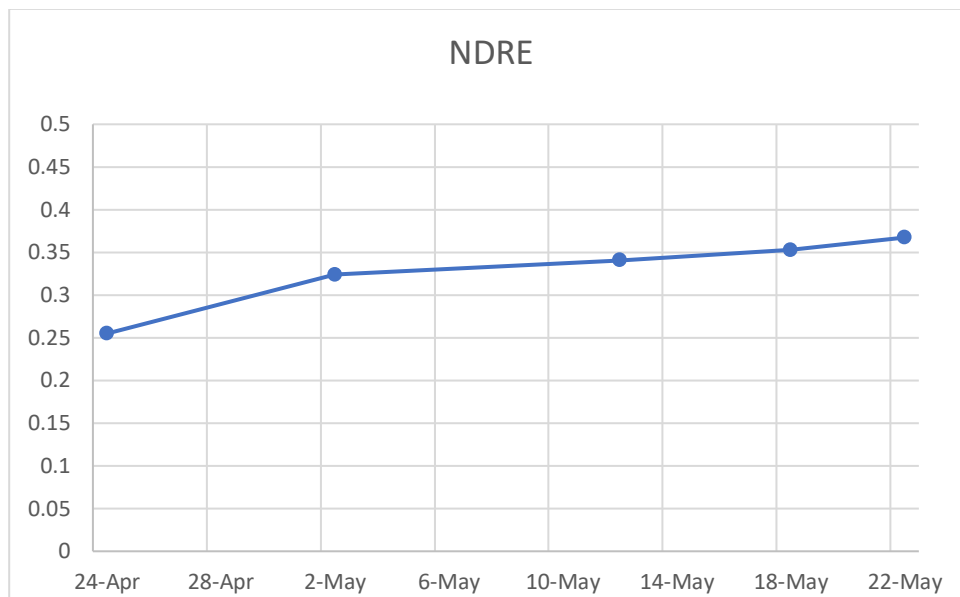
Στα παρακάτω γραφήματα φαίνεται ο μέσος όρος των μετρήσεων για τους δύο δείκτες όπως εξελίχθηκε στον χρόνο. Δυστυχώς λόγω της αρχικής μεγάλης περιεκτικότητας του χώματος σε οργανική ύλη, μετά την λίπανση με την 1^η δόση που έγινε αμέσως πριν τη φύτευση, τα φυτά ακολούθησαν ραγδαία ανάπτυξη όπως φαίνεται από την Εικόνα 25 αλλά και από την πορεία των 2 φασματικών δεικτών στα Σχήματα 17 και 18.



Σχήμα 17. Η πορεία του δείκτη NDVI

Δεδομένου ότι οι δύο δείκτες έχουν την τάση να φτάνουν σε κορεσμό σχετικά εύκολα, κάτι που παρατηρήθηκε και στην συγκεκριμένη καλλιέργεια, δεν έγινε εφαρμογή της 2^{ης} δόσης του λιπάσματος σύμφωνα με τον αλγόριθμο που θα πρόκυπτε. Αντ' αυτού, η επόμενη επιλογή ήταν να επιλεγεί ένας φασματικός δείκτης και οι αντίστοιχες μετρήσεις μιας συγκεκριμένης

ημερομηνίας η οποία θα ήταν όσο το δυνατόν στο μέσο της καλλιεργητικής περιόδου. Επιπλέον έγινε προσπάθεια να επιλεγεί η ημερομηνία και ο δείκτης κατά την οποία θα παρατηρούνταν μεγαλύτερη διασπορά στις τιμές του.



Σχήμα 18. Η πορεία του δείκτη NDRE

Επιλέχθηκε τελικά ο δείκτης NDVI καθώς όπως φαίνεται στο Σχήμα 17, έδειξε τη μεγαλύτερη διασπορά από τον NDRE την ημερομηνία 12 Μαΐου, γεγονός το οποίο προμήνυε καλύτερη διάκριση ζωνών αζωτούχου λίπανσης για τον χάρτη εφαρμογής με βάση τον δείκτη αυτόν.

Αναλυτικά για την δημιουργία του χάρτη εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοιχτού κώδικα QGIS, και συγκεκριμένα η έκδοση 3.4. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν ήταν παρακάτω:

- Είσοδος στο σύστημα του αρχείου csv που περιέχει τις μετρήσεις της επιλεγμένης ημερομηνίας. Με την είσοδο του αρχείου γίνεται η γεωγραφική αναφορά και διαπιστώνεται και η ακρίβεια του γεωγραφικού εντοπισμού, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 27
- Κατόπιν ακολούθησε ανάλυση του ιστογράμματος των τιμών του δείκτη NDVI και η χωρική παρεμβολή με την μέθοδο IDW, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28 με μέγεθος πλέγματος 20x30 και περικοπή (clip by mask layer) του raster αρχείου που προκύπτει στο περίγραμμα του αγρού.
- Τέλος έγινε μια ανα-ταξινόμηση (reclassify by table) των τιμών του πλέγματος ώστε να προκύψουν 4 κλάσεις όσες και οι ζώνες που έχουν επιλεγεί για να αντιστοιχούν στην βαθμονόμηση του συστήματος.



Εικόνα 27. Το επίπεδο που προκύπτει στο QGIS, μετά την είσοδο των τιμών που προέκυψαν από το Rapidscan στις 12 Μαΐου



Εικόνα 28. Interpolation με την μέθοδο IDW (Inverse Distance Weighted)

Για την απλούστευση του παραγόμενου χάρτη εφαρμογής οι τιμές στο παραγόμενο πλέγμα προσαρμόστηκαν όπου χρειαζόταν, δηλαδή όπου υπήρχε μεγάλη ετερογένεια και μεταβλητότητα, προκειμένου να διευκολυνθεί η διαδικασία της λιπασματοδιανομής, καθότι ο δεδομένος εξοπλισμός που διατίθεται δεν εξασφάλιζε την γρήγορη εναλλαγή από ζώνη σε ζώνη. Ο χάρτης εφαρμογής που προέκυψε, τις φαίνεται στην Εικόνα 29 αποθηκεύτηκε σε

μορφή shapefile, format το οποίο τις έχει ήδη ειπωθεί, είναι συνήθως το πλέον συμβατό με αντίστοιχα συστήματα μεταβλητής λίπανσης και το οποίο διαβάζεται και από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο σύστημα και περιεγράφηκε στην Ενότητα 3.7.3.

Τις αναφέρθηκε στην ενότητα 3.7.1.4 και στον Πίνακα 6, ο διανομέας βαθμονομήθηκε σε 10 κλίμακες, αλλά τις έγινε προφανές εν τέλει χρειάστηκαν το πολύ οι 4 πρώτες κλίμακες (έως 1043gr λίπασμα / λεπτό). Αυτό αυτόματα σήμαινε ότι ο διανομέας έπρεπε να ρυθμιστεί σε αυτές τις 4 κλίμακες και δεν υπήρχε η ανάγκη να ανοίξει περισσότερο από το ήμισυ της συνολικής του διαμέτρου, το οποίο αποδείχθηκε εφικτό, δεδομένου του μηχανισμού χαμηλής ποιότητας, ο οποίος θα ήταν πολύ επιρρεπής σε σφάλματα, αν έπρεπε να το μετακινήσουμε ανάμεσα σε περισσότερες κλίμακες.

Πίνακας 7. Οι 4 ζώνες λίπανσης και η αντιστοίχισή τους με τις απαιτούμενες δόσεις λιπάσματος

Ζώνη	1	2	3	4
NDVI	0.4-0.6	0.6-0.75	0.75-0.9	>0.9
Δόση λιπάσματος / γραμμή καλλιέργειας	1043	695	347	0
Επίλεγμένη βαθμίδα για ταχύτητα 3χμ/ώρα	5	3	2	Κλειστό

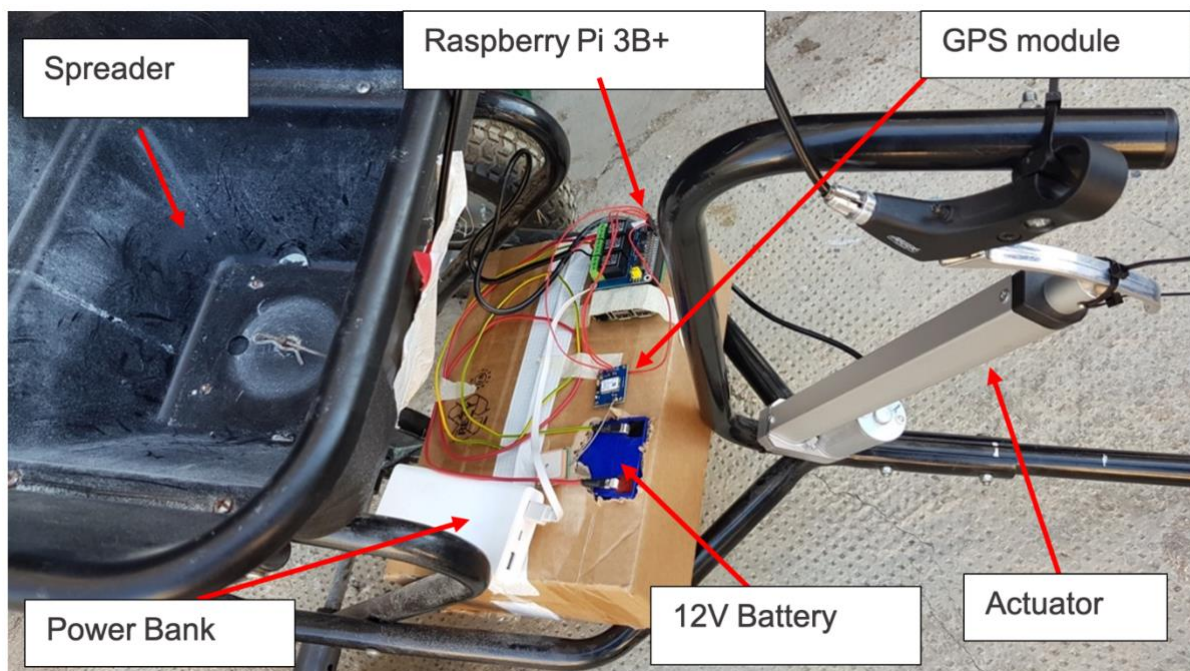


Εικόνα 29. Τελική μορφή του χάρτη εφαρμογής

5 Αποτελέσματα και συζήτηση

5.1 Η τελική δοκιμή στον αγρό

Όλα τα επιμέρους συστατικά που αναφέρθηκαν στην ενότητα XX, συναρμολογήθηκαν προκειμένου να δοκιμαστούν στον αγρό στις 22 Μαΐου, όπως φαίνεται στο Σχήμα XX, όπου και προσαρτήθηκαν στο τετρακίνητο όχημα. Το σύστημα στηρίχθηκε σε μια αυτοσχέδια βάση η οποία προσαρτήθηκε στον λιπασματοδιανομέα ενώ για τον έλεγχο του συστήματος, στο μπροστά μέρος του οχήματος τοποθετήθηκε ένα λάπτοπ μικρού μεγέθους, προκειμένου ο αναβάτης να έχει τη δυνατότητα να εκκινήσει, παύσει ή τερματίσει τον αλγόριθμο, εφόσον δεν είχε υλοποιηθεί κάποιο γραφικό σύστημα διεπαφής (Graphic User Interface-GUI), το οποίο θα διευκόλυνε αυτούς τους χειρισμούς.



Εικόνα 30. Τα βασικά συστατικά του υλικού του πρωτότυπου συστήματος

Για την διέλευση του συστήματος, ήταν απαραίτητο να ξεκινήσει και η συγκομιδή κάποιων φυτών μαρουλιού προκειμένου να ανοίξουν διάδρομοι μέσα από την καλλιέργεια ώστε να διευκολυνθεί η διέλευση του συστήματος. Οι διάδρομοι που ανοίχτηκαν είχαν μήκος αντίστοιχο του οχήματος, ενώ διαπιστώθηκε ότι απαιτούνταν αρκετός χώρος στα άκρα του αγρού, προκειμένου να μπορέσει να στρίψει το όχημα χωρίς να καταστρέψει την καλλιέργεια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα XX.

Κατά την προετοιμασία της δοκιμής, στο σύστημα και συγκεκριμένα στην μονάδα αποθήκευσης του Raspberry Pi, φορτώθηκε ο δοκιμαστικός χάρτης εφαρμογής που προέκυψε από την ανάλυση που προηγήθηκε και παρουσιάστηκε στις προηγούμενες

ενότητες. Κατά τη φάση της δοκιμής, το σύστημα μετακινήθηκε στον επιλεγμένο αγρό στον εξωτερικό χώρο του πανεπιστημίου και τοποθετήθηκε στην έναρξη της καλλιεργητικής γραμμής, που είχε μόλις αφαιρεθεί, μεταξύ δύο γραμμών καλλιέργειας.



Εικόνα 31. Ο λιπασματοδιανομέας μαζί με το υπόλοιπο υλικό προσαρτημένο στην γουρούνα μέσα στον αγρό με τα μαρούλια

Κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της δοκιμής στον αγρό, δόθηκε ένας αρχικός χρόνος μερικών λεπτών ώστε ο ενσωματωμένος δέκτης GPS, να αρχίσει να λαμβάνει σήμα από δορυφόρους, οπότε και άρχισαν να εμφανίζονται οι τιμές της NMEA συμβολοσειράς στην οθόνη του λάπτοπ. Ο βασικός σκοπός ήταν να ελεγχθεί η επικοινωνία των επιμέρους τμημάτων του συστήματος. Το όχημα άρχισε να κινείται προκειμένου να ελεγχθεί ότι οι διαφορετικές θέσεις απεικονίζονταν σωστά. Σύμφωνα με τον χάρτη εφαρμογής, πάνω στην περιοχή προβολής εμφανιζόταν και οι τιμές που διαβαζόταν από τον χάρτη εφαρμογής. Η δοκιμή ήταν επιτυχής καθώς το σύστημα ανίχνευε μέσω του δέκτη GPS την θέση του συστήματος, επικοινωνούσε με το λογισμικό, και έδειχνε σωστά την αλλαγή των θέσεων αλλά και τις διαφορετικές τιμές ανάλογα με τις ζώνες τις οποίες διέσχιζε. Δεδομένου ότι χρησιμοποιήθηκε ένας συμβατικός δέκτης χαμηλού κόστους χωρίς σύστημα διόρθωσης, υπήρχε ένα περιθώριο λάθους στον εντοπισμό της θέσης το οποίο σύμφωνα με βάση τον κατασκευαστή, μπορεί να έφτανε μέχρι και 3 μέτρα. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι στον εντοπισμό της θέσης, το σύστημα ανταποκρίθηκε με σχετική επιτυχία καθώς η ενδεδειγμένη τιμή της κάθε ζώνης εμφανιζόταν σωστά στην οθόνη του συστήματος. Σε αυτό πιθανότατα συνέβαλλε και το γεγονός ότι εξαρχής είχαν επιλεγεί επι τούτου ζώνες μεγάλου εμβαδού η κάθε μια, για τον χάρτη εφαρμογής, προκειμένου ακριβώς να διευκολυνθεί η διαδικασία.



Εικόνα 32. Δοκιμή όλου του συστήματος ανάμεσα στις γραμμές φύτευσης (22 Μαΐου 2019)

Στον λιπασματοδιανομέα τοποθετήθηκε εξαρχής επαρκής ποσότητα λιπάσματος, με την πρόβλεψη να αποθέσει σε κάθε ζώνη την αντίστοιχη ποσότητα που είχε προκαθοριστεί, σύμφωνα με τον Πίνακα ΧΧ, ενώ κάθε φορά που άδειαζε, η δοκιμή σταματούσε ώστε να ξαναγεμίσει. Ο σκοπός ήταν να δοκιμαστούν τουλάχιστον 8 αλλαγές από ζώνη σε ζώνη και κάθε φορά που το σύστημα είχε διασχίσει μια ζώνη και αποθέσει το αντίστοιχο λίπασμα, να μετρήεται η ποσότητα που αποτέθηκε. Προκειμένου να γίνει αυτό στις ζώνες που επιλέχθηκαν για κάθε μεταβολή, προσαρτήθηκε στον λιπασματοδιανομέα μια κλειστή πρόχειρη χάρτινη κατασκευή όπου συγκέντρωνε όλο το λίπασμα ώστε να μην πέφτει κάτω αλλά να ακολουθεί απευθείας ζύγιση του. Όπως φαίνεται στο Σχήμα ΧΧ, επιλέχθηκε να γίνει η ζύγιση του λιπάσματος που έπεφτε σε κάθε ζώνη στην διαδρομή μεταξύ 3^{ης} και 4^{ης} γραμμής φύτευσης, ενώ στον Πίνακα ΧΧ, φαίνονται οι τιμές που προέκυψαν από τη ζύγιση του λιπάσματος για κάθε ζώνη, παρατηρώντας μια σημαντική απόκλιση από το αναμενόμενο.

Πίνακας 8. Τα αποτελέσματα μετά την δοκιμαστική εφαρμογή στον αγρό

Ζώνη	Αναμενόμενη δόση λιπάσματος / γραμμή καλλιέργειας	Πραγματική δόση λιπάσματος / γραμμή καλλιέργειας	Απόκλιση πραγματικής από αναμενόμενη
1	1043	1340	28%
2	695	962	38%
1	1043	1230	18%
1	1043	1310	25%
3	347	468	34%

4	0	83	83%
4	0	44	44%
1	1043	962	8%
Σύνολο	5214	6399	
		ΜΟ:	35%

Η απόκλιση αυτή που παρατηρείται είναι της τάξης του +35%, που σημαίνει ότι στις περισσότερες των περιπτώσεων το λίπασμα που εναποτέθηκε ήταν πάντα περισσότερο από αυτό που αναμενόταν με βάση τους αρχικούς υπολογισμούς. Ιδιαίτερα μεγάλη διαφορά παρατηρείται στις περιπτώσεις που έπρεπε να γίνει μεγάλο άλμα από ζώνη σε ζώνη όπως πχ 1>2, 1>3, 3>4, 4>1. Το συμπέρασμα από αυτή την απόκλιση είναι ότι ο λιπασματοδιανομέας που επιλέχθηκε δεν μπορεί να κριθεί ως αξιόπιστος, δεδομένου του χαμηλού κόστους του που προκύπτει από την πρόχειρη κατασκευή του και τον προορισμό του πιθανότατα για οικιακή χρήση σε ομοιόμορφες καλλιέργειες. Αυτή η απόκλιση ενδεχομένως να μην επηρέαζε την εφαρμογή της μεταβλητής λίπανσης σε έναν αγρό μεγαλύτερης έκτασης, ωστόσο αναφορικά με την έκταση του δοκιμαστικού αγρού που το εφαρμόσαμε, δηλαδή 300μ², ήταν σημαντική σε σχέση με τον επιδιωκόμενο στόχο.

5.2 Συζήτηση και προτάσεις βελτίωσης του συστήματος

Η VRA αζώτου είναι μια πρακτική που μπορεί να προσφέρει σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όταν συνδυάζεται με υψηλή απόδοση. Σε ένα έτος χαμηλής απόδοσης, η τεχνική VRA εξακολουθεί να παρουσιάζει καλύτερη περιβαλλοντική συμπεριφορά σε σύγκριση με την ομοιόμορφη εφαρμογή. Το N VRA είναι μια πρακτική που μπορεί να προσφέρει σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και πρέπει να συνιστάται στους αγρότες ως πρακτική διαχείρισης της περιβαλλοντικής ακρίβειας.

Ωστόσο, φαίνεται ότι η VRA λίπασματος θα είναι μια αργή προς υιοθέτηση τεχνολογία. Πρώτα απ' όλα, παρά την ομοιόμορφη εφαρμογή του λιπάσματος που είναι πλέον αποδεκτή τεχνολογία, τα κέρδη από τη VRA δεν είναι γνωστά. Δηλαδή, οι λεπτομέρειες της απόκρισης απόδοσης στο λίπασμα δεν είναι γνωστές από τους γεωπόνους ή τους αγρότες. Αν και μπορεί γενικά να πιστεύεται ότι «περίπου 10 kg N / στρέμμα» πρέπει να εφαρμοστεί σε κάποιον αγρό, η αναμενόμενη διαφορά απόδοσης που σχετίζεται με την εφαρμογή 10 kg περισσότερο ή 10 kg λιγότερο από τη σύσταση δεν είναι γνωστά.

Περαιτέρω, επειδή οι καμπύλες απόκρισης απόδοσης είναι γενικά αρκετά επίπεδες κοντά στο σημείο των βέλτιστων ποσοστών λιπασμάτων (π.χ. μικρές αλλαγές στην απόδοση για μεγάλες αλλαγές στο λίπασμα), προκειμένου να είναι γενικά κερδοφόρες, οι ρυθμοί εφαρμογής

λιπασμάτων για συγκεκριμένες τοποθεσίες πρέπει τελικά να καθοδηγούνται από συγκεκριμένες τοποθεσίες οι οποίες δεν είναι πολύ αποδοτικές (μετατόπιση της καμπύλης απόκρισης απόδοσης προς τα πάνω ή προς τα κάτω). Ωστόσο, οι μαθηματικοί αλγόριθμοι για τη μετάφραση τέτοιων χαρακτηριστικών μικρής αποδοτικότητας σε συστάσεις για το ποσοστό λιπασμάτων δεν είναι αρκετά ανεπτυγμένοι. Επιπλέον, το κόστος που σχετίζεται με τη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων θεωρείται τακτικά υπερβολικά υψηλό σε σχέση με τις αναμενόμενες αποδόσεις.

Επιπρόσθετα, μέχρι σήμερα, η μέθοδος VRA αζώτου δεν έχει θεωρηθεί τεχνολογία μείωσης της εργασίας. Στην πραγματικότητα, οι αγρότες που επιλέγουν να συμμετάσχουν στις απαιτούμενες δραστηριότητες, πιθανότατα και οι ίδιοι θεωρούν την τεχνολογία ως αύξηση της εργασίας. Με αυτή την μέτρια αξιολόγηση των μεθόδων VRA αζώτου, συχνά ορισμένοι υιοθετούντες την ΓΑ αναρωτιούνται γιατί να επιλέξουν να κινηθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Ακριβώς λόγω του ότι η λίπανση VRA σαφώς δεν είναι τεχνολογία της οποίας τα οφέλη παρουσιάζονται άμεσα, τα κέρδη του δεν θα κεφαλαιοποιηθούν γρήγορα σε τιμές γης και ενοίκια, αλλά θα προκύψουν στον αγρότη μέσα στα επόμενα χρόνια ίσως και δεκαετίες.

Ο σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν να αναπτυχθεί ένα οικονομικό και αποτελεσματικό πρωτότυπο σύστημα εφαρμογής μεταβλητών δόσεων λίπανσης αζώτου σε γραμμική καλλιέργεια. Οι συμβατικοί εξοπλισμοί VRA μερικοί απ' τους οποίους παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, κοστολογούνται σε χιλιάδες ευρώ, ενώ το πρωτότυπο σύστημα της παρούσας μελέτης δημιουργήθηκε με ελάχιστα έξοδα. Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι ότι οι εξοπλισμοί που κυκλοφορούν στην αγορά, συνήθως είναι συμβατοί μόνο με παρελκόμενα εξαρτήματα της ίδιας εταιρίας. Στην περίπτωση του πρωτότυπου συστήματος που αναπτύχθηκε, ο σκοπός ήταν να υπάρχει συνδεσιμότητα με οποιοδήποτε γεωργικό μηχάνημα με τη λειτουργία του ελκυστήρα. Το λογισμικό που δημιουργήθηκε εξολοκλήρου για την επικοινωνία των παρελκόμενων βασίστηκε σε βιβλιοθήκες ανοιχτού κώδικα και είναι απόλυτα παραμετροποιήσιμο. Ο απώτερος στόχος είναι ένα τέτοιο σύστημα να μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα είδη καλλιέργειας αλλά και να δοκιμαστεί σε άλλα συστήματα καλλιέργειας. Ωστόσο και σε επίπεδο υλικού αλλά και σε επίπεδο λογισμικού έγιναν συγκεκριμένες παραδοχές προκειμένου να αποδειχτεί η αρχική υπόθεση της δυνατότητας δημιουργίας ενός τέτοιου συστήματος. Παρακάτω, προτείνεται μια σειρά βελτιώσεων σύμφωνα με τις οποίες το σύστημα θα μπορούσε να γίνει ακόμα περισσότερο επεκτάσιμο και έγκυρο όσον αφορά τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα:

- Από τη δοκιμή του συστήματος γίνεται αντιληπτό ότι, ο υλικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τον λιπασματοδιανομέα χρειάζεται μια αναβάθμιση, και πιο λεπτομερή βαθμονόμηση του συστήματος, προκειμένου οι αποθέσεις λιπάσματος να είναι πιο ακριβείς και έγκυρες όσον αφορά την ποσότητα του λιπάσματος ανά ζώνη.

- Για την ακριβέστερη λειτουργία του, όσον αφορά τον εντοπισμό θέσης, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας δέκτης GPS τύπου RTK-GPS ή D-GPS για να υπάρχει ακριβέστερη αναγνώριση της θέσης του στον αγρό, μιας και οι συμβατικοί δέκτες, περιέχουν σφάλμα στη μέτρηση των γεωγραφικών θέσεων που μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένη εφαρμογή της VRA.
- Πρέπει να αναπτυχθεί ένα σύστημα που θα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να παρέμβει στο λογισμικό, και να το τροποποιήσει σύμφωνα με τις ανάγκες του. Οι επιλογές που θα πρέπει να καλύπτονται αφορούν και διαφορετικά είδη καλλιέργειας, αλλά και παραμετροποίηση των στοιχείων που εμφανίζονται στην οθόνη προβολής.
- Τέλος, όσον αφορά το υλικό, επιπλέον θα πρέπει να διερευνηθεί η ακριβής θέση της απόθεσης του λιπάσματος, δεδομένου ότι σε μια γραμμική καλλιέργεια, η απόσταση μεταξύ καλλιεργητικών γραμμών μπορεί να διαφέρει σημαντικά, οπότε είναι μια επιπλέον παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψιν για την διαμόρφωση του πρωτοτύπου. Επιπρόσθετα, πρέπει να προβλεφθεί μια επιπλέον κατάσταση του συστήματος όταν φτάνει στο τέλος της καλλιεργητικής γραμμής, οπότε και θα πρέπει να σταματά την απόθεση, ωστόσο κάνει την στροφή και αλλάζει γραμμή.
- Στην παρούσα μελέτη, έγινε προσπάθεια να αναπτυχθεί αλγόριθμος πρόβλεψης της ποσότητας λιπάσματος συγκεκριμένα για το μαρούλι. Γι' αυτόν τον σκοπό έγιναν και οι διάφορες μετρήσεις με πολλά διαφορετικά όργανα. Ωστόσο, λόγω της μεγάλης και γρήγορης ανάπτυξης των φυτών, αυτό δεν κατέστη δυνατό καθώς οι επιλεγμένοι δείκτες δεν έδειξαν μεγάλη μεταβλητότητα. Σε μια δεύτερη απόπειρα πειραματισμού, θα έπρεπε να επιλεγεί αγρός με πιο μεγάλη ανάγκη σε θρεπτικά συστατικά, συγκεκριμένα σε άζωτο, κι ενδεχομένως να δοκιμαστεί κι άλλη παρεμφερής γραμμική καλλιέργεια.
- Μία επιπλέον πρόκληση για τους διάφορους αισθητήρες, είναι ότι το NDVI έχει βρεθεί να δείχνει κορεσμό σε συνθήκες μέσης έως υψηλής βιομάζας και επομένως μπορεί να μην είναι κατάλληλο για συστήματα καλλιέργειας υψηλής απόδοσης, όπως διαπιστώθηκε και στην παρούσα μελέτη. Οπότε είναι σημαντικό να διερευνηθούν κι επιπλέον δείκτες, όπως ο NDRE ή ακόμα πιο ειδικοί σχετικά με την ανάγκη σε άζωτο, όπως ο NDNI.
- Είναι σημαντικό να υπάρχει πλήρες ιστορικό του αγρού που δοκιμάζεται το σύστημα. Το σύστημα της παρούσας μελέτης έχει σχεδιαστεί για να μετατρέπει οποιαδήποτε μείωση του δείκτη NDVI σε αύξηση της δόσης αζώτου. Ωστόσο, λιγότερο έντονη βλάστηση, θα μπορούσε επίσης να προειδοποιήσει για διάφορα προβλήματα, όπως στασιμότητα νερού ή υπερβολική αποστράγγιση. Οπότε στο σύστημα λήψης αποφάσεων θα πρέπει να εισαχθούν και άλλες παράμετροι, που θα επηρεάσουν την δημιουργία των τελικών χαρτών εφαρμογής.

- Ως σημαντικό μειονέκτημα για τη χρήση του συστήματος είναι η απειρία των αγροτών κατά τη διάρκεια των πρώτων χρόνων και η απροθυμία μείωσης των ποσοτήτων αζώτου, έως ότου φανούν τα πρώτα αποτελέσματα. Δεδομένου ότι τα καλύτερα αποτελέσματα λαμβάνονται μετά από 2-3 χρόνια λόγω της απόκτησης εμπιστοσύνης με τη χρήση των οργάνων, αλλά και της προσαρμογής του αγρου, είναι σημαντικό η δοκιμή ενός τέτοιου συστήματος να επαναληφθεί ιδανικά τουλάχιστον για 3 καλλιεργητικές περιόδους.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

- Ahmad L., Mahdi S.S. (2018) Decision Support System for Precision Farming. In: Satellite Farming. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03448-1_13
- Ansari, M.S. and Mahey, R.K. (2003) Growth and yield of cotton species as affected by sowing dates and nitrogen levels. *Journal of Research, Punjab Agricultural University*, 40, 8-11.
- Apostol, S., Viau, A.A., Tremblay, N., Briantais, J.-M., Prasher, S., Parent, L.-E., Moya, I., 2003. Laser-induced fluorescence signatures as a tool for remote monitoring of water and nitrogen stresses in plants. *Can. J. Remote Sens.* 29, 57e65.
- Aubert, B.A., Schroeder, A., Grimaudo, J., 2012., IT as enabler of sustainable farming: an empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decis. Support Syst.* 54 (1), 510e520.
- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Tsiropoulos, Z., Vangeyte, J., van der Wal, T., Soto-Embodas, I., Gómez- Barbero, M., Pedersen, S.M., 2017b. Smart farming technologies description, taxonomy and economic impact, precision agriculture, technology and economics perspectives, pp. 21e77. <https://doi: 10.1007/978-3-319-68715-5>.
- Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Wal, T., Soto, I., et al., 2017a. Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability* 9, 1339.
- Barnes A.P., Soto I., Eorya V., Beck B., Balafoutis A., Sánchez B., Vangeyte J., Fountas S., van der Wal T., Gómez-Barberob M.2019, Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers, [Land Use Policy](#), [Volume 80](#), January 2019, Pages 163-174
- Cao, Q. et al. Active canopy sensing of winter wheat nitrogen status: An evaluation of two sensor systems. *Comput. Electron. Agr.* 112, 54–67 (2015).
- Cao, Q. et al. Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor. *Precis. Agric.* 17, 136–154 (2016).
- Chiesa, A., Mayorga, I., & León, A. (2009). Quality of fresh cut lettuce (*Lactuca sativa* L.) as affected by lettuce genotype, nitrogen fertilization and crop season. *Advances in Horticultural Science*, 23(3), 143-149. Retrieved June 20, 2021, from <http://www.jstor.org/stable/42883480>

- Daberkow, S.G., McBride, W.D., 2003. Farm and operator characteristics affecting the awareness and adoption of precision agriculture technologies in the US. *Precis. Agric.* 4 (2), 163e177.
- Diacono, M., Rubino, P. & Montemurro, F. Precision nitrogen management of wheat. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 219–241 (2013).
- Elena A. Mikhailova, Christopher J. Post, Mark A. Schlautman, Gregory C. Post & Hamdi A. Zurqani | Fei Li (Reviewing editor) (2020) Determining farm-scale site-specific monetary values of “soil carbon hotspots” based on avoided social costs of CO2 emissions, *Cogent Environmental Science*, 6:1, DOI: [10.1080/23311843.2020.1817289](https://doi.org/10.1080/23311843.2020.1817289)
- European Union, 2018a. Farm Economy Focus: Greece. https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/food-farming-fisheries/farming/documents/fadn-fef-grc_en.pdf.
- European Union, 2018b. Rural Areas and the Primary Sector in the EU. <https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/statistics/facts-figures/eu-rural-areas-primary-sector.pdf>.
- European Union, 2018c. Statistical Factsheet: Greece. https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/statistics/factsheets/pdf/el_en.pdf.
- European Union, 2017. Agriculture, Forestry and Fishery Statistics: 2017 Edition. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/8538823/KS-FK-17-001-EN-N.pdf>.
- Di Gioia Francesco, Gonnella Maria, Buono Vito, Ayala Osman, Cacchiarelli Josefina, Santamaria Pietro, Calcium Cyanamide Effects on Nitrogen Use Efficiency, Yield, Nitrates, and Dry Matter Content of Lettuce, *Agronomy Journal*, 2017
- Heege, H.J. Precision in Crop Farming: Site Specific Concepts and Sensing Methods: Applications and Results; Springer Science and Business Media: Dordrecht, The Netherlands, 2013. [CrossRef]
- Jabro, Jay & Stevens, W. & Iversen, W.M. & Allen, B. & Sainju, Upendra. (2020). Irrigation Scheduling Based on Wireless Sensors Output and Soil-Water Characteristic Curve in Two Soils. *Sensors*. 20. 1336. 10.3390/s20051336.
- Johnson, C.K.; Mortensen, D.A.; Wienhold, B.J.; Shanahan, J.F.; Doran, J.W. Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. *Agron. J.* 2003, 95, 303–315. [CrossRef]
- Khosla, R., 2010. Precision agriculture: challenges and opportunities in a flat world. In: 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 1e6 August 2010, Brisbane, Australia. Available online at: <https://www.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/0779.pdf>.

- Li, A.; Duval, B.D.; Anex, R.; Scharf, P.; Ashtekar, J.M.; Owens, R.P.; Ellis, C. A Case Study of Environmental Benefits of Sensor-Based Nitrogen Application in Corn. *J. Environ. Qual.* 2016, 45, 675–683. [CrossRef]
- Li, X.Z., Zhao, Q.L., (2003). Recovery of ammonium-nitrogen from landfill leachate as a multi-nutrient fertilizer. *Ecol. Eng.* 20, 171–181.
- Liakos, V.; Smith, E.; Fountas, S.; Nanos, G.; Kalfountzos, D.; Gemtos, T. On-Farm Evaluation of Variable Rate Fertiliser Applications Using Yield-Based Mathematical Formulae in a Greek Apple Orchard. *Int. J.*
- Long, T.B., Blok, V., Coninx, I., 2016. Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate- smart agriculture in Europe: evidence from The Netherlands, France, Switzerland and Italy. *J. Clean. Prod.* 112, 9e21.
- Lorenz, O.A. and Maynard, D.N. (1988) Knott's Handbook for Vegetable Growers. 3rd Edition, Jhon Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 456 p.
- Mulla, D., 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. *Biosyst. Eng.* 114, 358e371.
- Pivoto, D., Waquil, P.D., Talamini, E., Finocchio, C.P.S., Dalla Corte, V.F., de Vargas Mores, G., 2018. Scientific development of smart farming technologies and their application in Brazil. *Inf. Process. Agric.* 5 (1), 21e32.
- Shibusawa, S., 2002. Precision farming approaches to small-farm agriculture. *Agro-Chemica. Rep.* 2 (4), 13e20.
- J.B. Solie, A.D. Monroe, W.R. Raun, M.L. Stone, Generalized algorithm for variable-rate nitrogen application in cereal grains, *Agron. J.*, 104 (2012), pp. 378-387
- Van Evert, F.K.; Gaitán-Cremaschi, D.; Fountas, S.; Kempenaar, C. Can Precision Agriculture Increase the Profitability and Sustainability of the Production of Potatoes and Olives? *Sustainability* 2017, 9, 1863. <https://doi.org/10.3390/su9101863>
- Vatsanidou, A.; Fountas, S.; Liakos, V.; Nanos, G.; Katsoulas, N.; Gemtos, T. Life Cycle Assessment of Variable Rate Fertilizer Application in a Pear Orchard. *Sustainability* 2020, 12, 6893.
- Vatsanidou, A.; Nanos, G.D.; Fountas, S.; Baras, J.; Castrignano, A.; Gemtos, T.A. Nitrogen replenishment using variable rate application technique in a small hand-harvested pear orchard. *Span. J. Agric. Res.* 2017, 15, e0209.
- Westervelt, J. D. and H. F. Reetz. "GIS in Site-Specific Agriculture." Interstate Publishers, Inc. (2000): 64.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M.J., 2017. Big data in smart farming: a review. *Agric. Syst.* 153, 69e80.
- Xia, T. et al. Active optical sensing of spring maize for in-season diagnosis of nitrogen status based on nitrogen nutrition index. *Remote Sens.* 8, 605 (2016).

- Yao, Y. et al. Active canopy sensor-based precision N management strategy for rice. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 925–933 (2012)
- Zaman, Q.U.; Schumann, A.W.; Miller, W.M. Variable rate nitrogen application in Florida citrus based on ultrasonically-sensed tree size. *Appl. Eng. Agric.* 2005, 21, 331–335.
- Zing F.W. and Yamaguchi M., 1962. Studies on the growth rate and nutrient absorption of head lettuce. *Hilgardia*

Ελληνόγλωσση

- Αγγελοπούλου Α., Blackmore S., Φουντάς Σ., Γέμπος Θ. και Νάνος Γ., 2007. Μελέτη χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητας παραγωγής και ποιότητας σε οπωρώνες μηλιάς. 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 18-20 Οκτωβρίου, Λάρισα.
- Καρυδάς, Χ. Γ. (Οκτώβριος 2000). Γεωργία Ακριβείας: Περιγραφή της μεθόδου - Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές. 2ο Ειδικό Συνέδριο Πληροφοριακών Συστημάτων στη Γεωργία. Χανιά.
- Μαναρίτσα Βασιλική Δαυιδούλα, «Εκτίμηση δεικτών βλάστησης σε καλλιέργεια μαρουκιού με χρήση στρουβίτη», Μεταπτυχιακή διατριβή, γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2018
- Ντάκος Γεώργιος, «Εφαρμογή Μεταβλητών Καλλιεργητικών Φροντίδων σε Οπωρώνες», Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2015
- Ολύμπιος, Χ., (2001). Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στο θερμοκήπιο. Εκδόσεις: Σταμούλη, Αθήνα σελ. 667-737.
- Παντέλης, Α. Γ., Σαββαΐδης, Π. Δ., Υφαντής, Ι. Μ. και Δούκας, Ι. Δ., 2004. Γεωδαιτικά όργανα κα
- Συλαίος, Ν., Γήτας, Ι., Συλλαίος, Γ., (2007). Εισαγωγή στα γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και στην Τηλεπισκόπηση. Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.
- Τάνος Α., Αγγελοπούλου Α., Φουντάς Σ., Γέμπος Θ., Νάνος Γ. και Χατζινίκος Α., 2007. Ζώνες διαχείρισης βάση χαρτών παραγωγής, ποιοτικών χαρακτηριστικών και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, 18-20 Οκτωβρίου, Λάρισα.
- Τσίρος, Ε., (2006). Ο Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς (NDVI) και άλλοι Δείκτες στην Παρακολούθηση της Υδρολογικής Ξηρασίας. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος

- Φούντάς Σ. και Γέμτος Θ., 2008. Εφαρμογές Γεωργίας Ακρίβειας σε γεωργικές εκμεταλλεύσεις της Θεσσαλίας. Τεχνολογική πλατφόρμα τροφίμων Θεσσαλίας, τεύχος 2- Ιούνιος 2008.
- Φουντάς, Σ., Γέμτος, Θ., (2015). Γεωργία Ακριβείας. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, Αθήνα