

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ-ΑΓΡΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
"ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ"

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΔΟΣΕΩΝ ΕΙΣΡΟΩΝ ΣΕ
ΟΠΩΡΩΝΕΣ**

Διπλωματική Εργασία

Αδαμάκος Απόστολος



Λάρισα, Ιούλιος 2025

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΔΟΣΕΩΝ ΕΙΣΡΟΩΝ ΣΕ
ΟΠΩΡΩΝΕΣ**

Αδαμάκος Απόστολος

Διπλωματική εργασία

υποβαλλόμενη για τη μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων του
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΤΙΤΛΟΥ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ
ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Επιβλέπων καθηγητής

Λιάκος Βασίλειος

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την/..../....

Λιάκος Βασίλειος

Γράβαλος Ιωάννης

Βύρλας Παναγιώτης

Αδαμάκος Απόστολος

.....

Περίληψη

Η γεωργία ακριβείας είναι μια ολοκληρωμένη γεωργική προσέγγιση που χρησιμοποιεί αποτελεσματικά δεδομένα, τεχνολογία και εξοπλισμό υψηλής τεχνολογίας για τη διαχείριση των γεωργικών πόρων, όπως το νερό, το έδαφος, τα λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα.

Επιτρέπει την ακριβή εφαρμογή των εισροών σε συγκεκριμένες θέσεις, διασφαλίζοντας ότι κάθε τμήμα του αγρού λαμβάνει τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους γεωργίας που αντιμετωπίζουν ομοιόμορφα ολόκληρο τον αγρό.

Η εφαρμογή των τεχνολογιών μεταβλητού ρυθμού περιλαμβάνει τη διεξαγωγή μιας πολυετούς ερευνητικής μελέτης σχετικά με διάφορες παραμέτρους της γεωργικής παραγωγής και στατιστικά στοιχεία απόδοσης της καλλιέργειας-στόχου.

Στην παρούσα διπλωματική διατριβή αναλύεται η σημασία της εφαρμογής μεταβλητών δόσεων εισροών σε οπωρώνες καθώς και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση της εφαρμογής αυτής. Επίσης, γίνεται αξιολόγηση της μεθόδου, καθώς και ανάλυση των αποτελεσμάτων της σε οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο.

Λέξεις κλειδιά: Γεωργία ακριβείας, Αισθητήρες, Πόροι, Αποδοτικότητα Λίπανσης.

Abstract

Precision agriculture is an integrated agricultural approach that effectively uses data, technology and high-tech equipment to manage agricultural resources such as water, soil, fertilizers and pesticides.

It allows for precise application of inputs to specific locations, ensuring that each part of the field receives the necessary nutrients, unlike conventional farming methods that treat the entire field uniformly.

The application of variable rate technologies involves conducting a multi-year research study on various parameters of agricultural production and yield statistics of the target crop.

In this thesis, the importance of applying variable rate inputs to orchards and the methods used to carry out this application are discussed. It also includes an evaluation of the method, as well as an analysis of its results in economic and environmental terms.

Key words: Precision agriculture, Sensors, Resources, Fertilization Efficiency.

Πρόλογος-Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική διατριβή εκπονήθηκε στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας κατά την περίοδο 2024-2025.

Έχοντας ολοκληρώσει την προσπάθεια αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Λιάκο Βασίλειο, τόσο για την ανάθεση του θέματος όσο και για την άψογη συνεργασία, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου διατριβής. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, αλλά και τους φίλους μου, για τη διαρκή στήριξη και βοήθεια στην προσπάθειά μου αυτή.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	ii
Abstract.....	iii
Πρόλογος-Ευχαριστίες.....	iv
Πίνακας Περιεχομένων	v
Κατάλογος εικόνων	vi
Συμβολισμοί.....	viii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Οπωρώνες και εφαρμογή εισροών.....	1
1.1.1 Λίπανση των οπωρώνων και ανάγκες σε νερό.....	2
1.2 Γεωργία ακριβείας	4
1.2.1 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM).....	5
1.2.2 GIS (GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM)	6
1.2.3 Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing).....	7
1.3 Εφαρμογή μεταβλητών δόσεων εισροών	9
1.4 Σκοπός της εργασίας.....	11
2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	12
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	14
3.1 Γενική μεθοδολογία	14
3.2 Μεθοδολογία σε οπωρώνες	20
3.2.1 Γενικές πληροφορίες.....	20
3.2.2 Μοντέλα για τον υπολογισμό των δόσεων	22
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	39
4.1 Αξιολόγηση Αποτελεσματικότητας της Μεθόδου.....	39
4.2 Ανάλυση Οικονομικών Οφελών	39
4.3 Περιβαλλοντικά Οφέλη και Βιωσιμότητα	40
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	41
6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ	43
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	44

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα1- 1 Οι 24 θέσεις των δορυφόρων (https://www.gps.gov/).....	6
Εικόνα1- 2 Κυκλική ροή εργασίας της καλλιέργειας ακριβείας με συλλογή δεδομένων, ανάλυση, εφαρμογή μεταβλητών ποσοτήτων, αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και σχεδιασμός για σταδιακή βελτίωση της διαχείρισης των καλλιεργειών με βάση τα δεδομένα με την πάροδο του χρόνου. (Kumar et al, 2024)	10
Εικόνα 3- 1 Μεταβλητή δόση εισροών με τη χρήση χαρτών (Ess et al., 2001).....	16
Εικόνα 3- 2 Ανάπτυξη των ζωνών διαχείρισης που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή μεταβλητών δόσεων με βάση το χάρτη από (α) δειγματοληψία εδάφους σε πλέγμα με τη χρήση (β) τεχνικών γεωχωρικής παρεμβολής. Οι ζώνες αυτές αναπτύσσονται για έναν (c) χάρτη εφαρμογής. (Sharma et al., 2024).	16
Εικόνα 3- 3 Μεταβλητή δόση εισροών με τη χρήση αισθητήρων (Grisso et al., 2005).	17
Εικόνα 3- 4 Ηλεκτρικό μοντέλο UAS με οκτώ έλικες (Hanif et al., 2023)	18
Εικόνα 3- 5 Δείγμα καρπών (κόκκινες κουκίδες) και δείγματα εδάφους (μαύρες κουκίδες), εντός των τμημάτων των 20 μέτρων όπου το λίπασμα εφαρμόστηκε ομοιόμορφα (πορτοκαλί περιοχές) και σε μεταβλητές δόσεις (μπλε περιοχές) στον οπωρώνα. (Liakos et al. 2020).....	25
Εικόνα 3- 6 Διάταξη της περιοχής μελέτης το 2021 με τα πέντε τυχαιοποιημένα μπλοκ με τις τέσσερις μεταχειρίσεις: SR1 και SR2 με 22 % και 44 % αύξηση σε σχέση με το F.	28
Εικόνα 3- 7 Οι θερμικές εικόνες από την πτήση που πραγματοποιήθηκε το 2023 πάνω από τον εμπορικό οπωρώνα εμφανίζουν τη σχετική κατανομή της θερμοκρασίας. Στην επάνω υποεικόνα, παρουσιάζεται το θερμικό πρότυπο της δοκιμής, όπου τα μπλοκ που αντιστοιχούν στις μεταχειρίσεις ελλειμματικής άρδευσης (D) και υπεράρδευσης (SR1 και SR2) διακρίνονται σαφώς και αντιπροσωπεύονται με χρωματικές μεταβολές. Το κάτω υποσχήμα επιβεβαιώνει τη θέση αυτών των μεταχειρίσεων, με τα μπλοκ χρωματισμένα και επικαλυμμένα στον θερμικό χάρτη: κόκκινο για το D (-33 %), πράσινο για το F (έλεγχος), μπλε για το SR1 (+33 %) και μοβ για το SR2 (+66 %). Η χρωματική κλίμακα αντικατοπτρίζει τις σχετικές θερμοκρασίες, που κυμαίνονται από 25 έως 35 βαθμούς.....	32
Εικόνα 3- 8 α) τρισδιάστατα μοντέλα των δομών των δέντρων στην τοποθεσία 1 και 2, που απεικονίζουν το ύψος και την απόσταση των δέντρων, β) επίγεια άποψη των σειρών δέντρων και γ) ανάπτυξη UAV για έρευνα πεδίου.	35
Εικόνα 3- 9 Χάρτες φασματικών δεικτών, α) NDVI, β) NDWI.	37

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1-1 Μέσες ανάγκες σε ανόργανα στοιχεία μερικών σπουδαίων οπωροφόρων δένδρων (Kg/στρέμμα/έτος)(Βασιλακάκης 2016).	3
---	----------

Συμβολισμοί

1. NOS: Narrow Orchard Systems
2. BMP: Best Management Practice
3. 4R: Nutrient management principle (right source, right rate, right time, right place)
4. VRT: Variable Rate Technologies
5. GPS: Global Positioning System
6. GNSS: Global navigation satellite system
7. IoT: Internet of Things
8. UASs: Unmanned aerial systems
9. GIS: Geographic Information System
10. LIDAR: Light Detection And Ranging
11. NDVI: Normalized Difference Vegetation Index
12. VRF: Variable rate fertilization
13. SSM: Site-specific management
14. BP: Backpropagation
15. UAV: Unmanned aerial vehicles
16. ML: Machine Learning
17. NDWI: Normalized Difference Water Index

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Οπωρώνες και εφαρμογή εισροών

Οι οπωρώνες είναι μια προγραμματισμένη φύτευση δέντρων ή θάμνων που διατηρείται για την παραγωγή φρούτων ή καρπών. Οι οπωρώνες σχεδιάζονται συνήθως για τη βελτιστοποίηση της ανάπτυξης των δέντρων, της ποιότητας των φρούτων και της απόδοσης, ενώ παράλληλα προσαρμόζονται σε πρακτικές διαχείρισης όπως το κλάδεμα, η καταπολέμηση των παρασίτων και η συγκομιδή (Ferree 2003).

Η εγκατάσταση ενός οπωρώνα είναι μέγιστης σημασίας εργασία, διότι απαιτείται διάθεση μικρού-μεγάλου κεφαλαίου, αφενός και αφετέρου, επειδή η ζωή ενός οπωρώνα διαρκεί πολλά έτη οι τυχόν αλλαγές στον οπωρώνα είναι πολύ δύσκολες, αν όχι αδύνατες, και συνήθως οικονομικά ασύμφορες. Πριν από την εγκατάσταση ενός οπωρώνα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής, το έδαφος του μελλοντικού οπωρώνα, η διαθεσιμότητα νερού, το είδος του δένδρου και η ποικιλία(-ες), το υποκείμενο και γνώσεις διαχείρισης του οπωρώνα για να μην αποβεί η επιχείρηση οικονομικά ασύμφορη (Βασιλακάκης 2016).

Τα συστήματα στενών οπωρώνων (NOS) αντιπροσωπεύουν επίσης μια σύγχρονη προσέγγιση στην παραγωγή φρούτων. Σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς οπωρώνες με γραμμές με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, τα NOS έχουν σχεδιαστεί για να βελτιστοποιούν τη χρήση των πόρων (π.χ. γη, φως, νερό, θρεπτικά συστατικά, εργασία) και να μεγιστοποιούν την παραγωγή φρούτων υψηλής ποιότητας (Tustin et al., 2022). Σε αυτά τα συστήματα, τα οπωροφόρα δέντρα φυτεύονται σε σειρές πιο κοντά μεταξύ τους, σχηματίζοντας συχνά ένα φωτοπορώδες επίπεδο θόλο, επιτρέποντας την αποτελεσματική χρήση της γης, διατηρώντας παράλληλα υψηλή παραγωγικότητα.

Τα συστήματα αυτά αναδύονται ως απάντηση στα αντιληπτά οφέλη όσον αφορά την κερδοφορία, την υψηλή ποιότητα των φρούτων, την αποτελεσματική διαχείριση της παραγωγής φρούτων, την έλλειψη δεξιοτήτων και την ασφάλεια των εργαζομένων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης των πόρων. (Scalisi et al., 2024).

1.1.1 Λίπανση των οπωρώνων και ανάγκες σε νερό

Πριν την εγκατάσταση του οπωρώνα επιβάλλεται ανάλυση του εδάφους, προσθήκη και ενσωμάτωση χωνεμένης κοπριάς (1-3 τόνοι / στρέμμα) καθώς και φωσφορικού λιπάσματος (εφόσον η συγκέντρωση είναι χαμηλή), διότι ο φωσφόρος είναι δυσκίνητος και ο εμπλουτισμός του εδάφους δύσκολος με επιφανειακή εφαρμογή λιπασμάτων. Τα υπόλοιπα βασικά στοιχεία, άζωτο και κάλιο εφαρμόζονται με υδατοδιαλυτά λιπάσματα στον οπωρώνα ανάλογα με τις ανάγκες των δένδρων μετά από ανάλυση φύλλων και εδάφους.

Κάθε χρόνο και μέχρι τα δένδρα να φτάσουν στο στάδιο της πλήρους καρποφορίας χορηγείται μόνον άζωτο, εκτός απροόπτου. Η χορηγούμενη ποσότητα αζώτου αυξάνεται προοδευτικά κάθε χρόνο και όταν το δένδρο μπει στην πλήρη καρποφορία τότε συνιστώνται οι ποσότητες που απεικονίζονται στον Πίνακα 1.1.

Οι ποσότητες των λιπασμάτων που θα εφαρμοστούν στον οπωρώνα μπορεί να κυμαίνονται μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης ποσότητας που αναφέρονται στον πίνακα 1.1, ανάλογα με τη σύσταση του εδάφους και την κατάσταση των δένδρων.

Τα υπόλοιπα στοιχεία, όπως σίδηρος, μαγνήσιο, μαγγάνιο και άλλα χορηγούνται εφόσον υπάρξει ανάγκη είτε από το έδαφος είτε με ψεκασμό στο φύλλωμα.

Το λίπασμα μπορεί να εφαρμοστεί ατομικά στο κάθε δένδρο, επί της γραμμής των δένδρων και γενικά επί όλης της έκτασης του οπωρώνα.

Με το νερό μεταφέρονται τα ανόργανα στοιχεία στην κόμη του δένδρου. Το νερό διατηρεί τα κύτταρα σε σπαργή, τα στόματα παραμένουν ανοιχτά και έτσι επιτυγχάνεται η εναλλαγή αερίων (CO_2 , O_2). Πέραν τούτου όλες οι βιοχημικές αντιδράσεις στο κύτταρο διενεργούνται εν σπαργή.

Νερό καλής ποιότητας (χαμηλή περιεκτικότητα σε άλατα) για άρδευση πρέπει να είναι διαθέσιμο καθόλη τη διάρκεια που τα δένδρα απαιτούν νερό. Οι περισσότερες καλλιέργειες οπωροφόρων δένδρων απαιτούν περισσότερο από 600 μ^3 νερού συνολικά/στρέμμα/έτος. Μερικές απαιτούν περισσότερο και άλλες λιγότερο. Αν οι βροχοπτώσεις καλύψουν τα 400 μ^3 /έτος τότε η υπόλοιπη ποσότητα πρέπει να δοθεί υπό μορφή αρδεύσεων και μάλιστα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.

Συνθήκες στρες (θερμοκρασία-χαμηλή-υψηλή, περίσσεια ή έλλειψη νερού, περίσσεια αλάτων, ρύποι στο νερό ή τον αέρα) επηρεάζουν αρνητικά την αύξηση και ανάπτυξη των δένδρων και κατά συνέπεια και την απόδοση (Βασιλακάκης 2016).

Πίνακας 1-1 Μέσες ανάγκες σε ανόργανα στοιχεία μερικών σπουδαίων οπωροφόρων δένδρων (Kg/στρέμμα/έτος)(Βασιλακάκης 2016).

Είδος	Αζωτο N	Φωσφόρος P	Κάλιο K	Ασβέστιο Ca	Μαγνήσιο Mg
Ακτινιδιά	13-14	1,5-2	10-12	20-23,5	1,0-1,2
Μηλιά	9-10	1,3-2	11,5-15	12-13,5	1,8-2,1
Αχλαδιά	7-9	0,5-1	6,5-8,5	13,5-14	1,2-1,5
Ροδακινιά	9-15	1-2	10-12,5	11-13	2,1-2,4
Κερασιά	9-10	1-2	8,5-10	9-9,5	1,5-1,8
Εσπεριδοειδή	10-18	2,5-4	9-10		

1.2 Γεωργία ακριβείας

Η ραγδαία εξέλιξη της γεωργίας οδήγησε στην ανάπτυξη της γεωργίας ακριβείας, η οποία ανταποκρίνεται στην παγκόσμια ζήτηση για βιώσιμη και αποτελεσματική παραγωγή τροφίμων (Yaqot et al., 2022). Η θεμελιώδης αρχή της γεωργίας ακριβείας είναι η βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων, η ενίσχυση της υγείας των φυτών και η προώθηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας (Rusmayadi et al., 2023).

Η γεωργία ακριβείας είναι μια ολοκληρωμένη γεωργική προσέγγιση που χρησιμοποιεί αποτελεσματικά δεδομένα, τεχνολογία και εξοπλισμό υψηλής τεχνολογίας για τη διαχείριση των γεωργικών πόρων, όπως το νερό, το έδαφος, τα λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα (Karunathilake et al., 2023). Επιτρέπει την ακριβή εφαρμογή των εισροών σε συγκεκριμένες θέσεις, διασφαλίζοντας ότι κάθε τμήμα του αγρού λαμβάνει τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους γεωργίας που αντιμετωπίζουν ομοιόμορφα ολόκληρο τον αγρό. (Tayari et al., 2015).

Η εμφάνιση της γεωργίας ακριβείας αποδίδεται κυρίως στην ταχεία επέκταση και διαθεσιμότητα της συνδεσιμότητας των δικτύων και της ανάπτυξης αισθητήρων τις τελευταίες δεκαετίες (Wang et al., 2006- Rehman et al., 2014- Toth and Józkow, 2016- King, 2017). Οι τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας μπορούν να ταξινομηθούν σε γενικές γραμμές σε τρεις κατηγορίες: τεχνολογίες καταγραφής (συλλογή δεδομένων), τεχνολογίες μετασχηματισμού (επεξεργασία/ανάλυση δεδομένων) και τεχνολογίες αντίδρασης (καθοδήγηση, λήψη αποφάσεων, εφαρμογή/δράση) (Balafoutis et al., 2017; Mizik, 2023).

Στόχος της γεωργίας ακριβείας είναι η λήψη πιο τεκμηριωμένων αποφάσεων σε σχέση με τις βέλτιστες πρακτικές διαχείρισης (BMP), όπως η αρχή της διαχείρισης θρεπτικών στοιχείων 4R. Υπάρχουν σημαντικές δυνατότητες για τις τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας να βελτιώσουν τόσο τις περιβαλλοντικές όσο και τις οικονομικές πτυχές που σχετίζονται με τη φυτική παραγωγή - ιδίως ο στόχος της μείωσης των εκπομπών που σχετίζονται με την παραγωγή και τη χρήση λιπασμάτων.

Η γεωργία ακριβείας υιοθετείται με διαφορετικούς ρυθμούς παγκοσμίως. Ηγέτες στην τεχνολογική ανάπτυξη και τα ποσοστά υιοθέτησης είναι οι Ηνωμένες Πολιτείες, ο Καναδάς, η Ευρώπη και η Αυστραλία (Lowenberg-DeBoer, 2022).

Η γεωργία ακριβείας συνδέεται συχνά με υψηλό κόστος κεφαλαίου και συνήθως απαιτεί εξειδικευμένες δεξιότητες χειριστών για την κατανόηση της ψηφιακής πλατφόρμας της τεχνολογίας. Επιπλέον, πολλές αγροτικές περιοχές δεν διαθέτουν την κατάλληλη, ή και καθόλου, συνδεσιμότητα δικτύου που απαιτείται για τη λειτουργία της τεχνολογίας. Παρ' όλα αυτά, οι τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας αποτελούν μέρος των στρατηγικών προσαρμογής και μετριασμού που πρέπει να κινητοποιήσει ο γεωργικός τομέας προκειμένου να συνεχίσει να είναι παραγωγικός ενόψει της αβεβαιότητας της κλιματικής αλλαγής. (Mazzi, 2020).

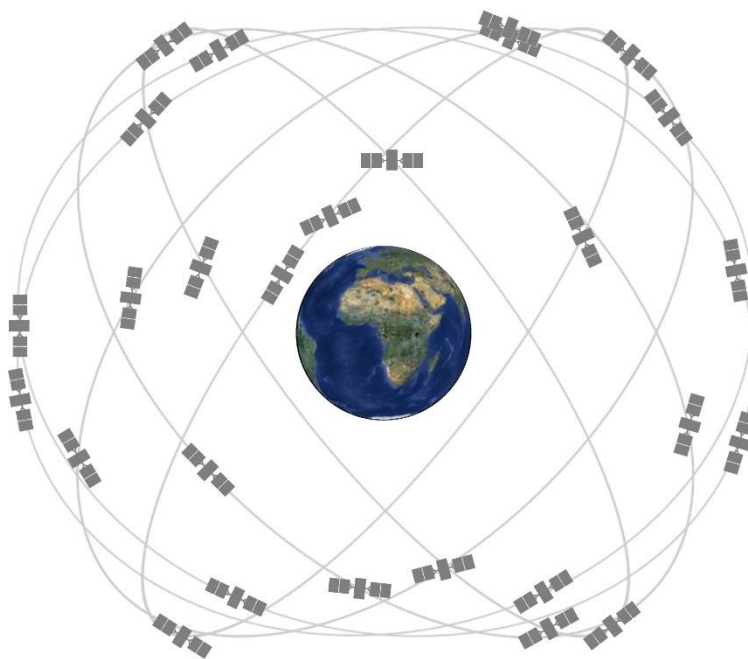
1.2.1 GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

Το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS) είναι ένα δορυφορικό σύστημα ραδιοπλοήγησης που χρησιμοποιείται και συντηρείται από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ. Αποτελείται από τουλάχιστον 24 δορυφόρους που βρίσκονται σε τροχιά γύρω από τη Γη, παρέχοντας παγκοσμίως τρισδιάστατες πληροφορίες θέσης, συμπεριλαμβανομένου του γεωγραφικού πλάτους, του γεωγραφικού μήκους και του υψομέτρου, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες (εικόνα 1-1).

Αυτές οι εξελίξεις είναι ζωτικής σημασίας για τη σύγχρονη γεωργία, καθώς επιτρέπουν ακριβέστερες δειγματοληψίες εδάφους, παρακολούθηση των καλλιεργειών και διαχείριση των αγρών. Η τεχνολογία GPS έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα επωφελής για τους αγρότες, επιτρέποντάς τους να συλλέγουν με ακρίβεια δείγματα εδάφους από συγκεκριμένες θέσεις στα χωράφια τους κάθε χρόνο για την παρακολούθηση των συνθηκών των καλλιεργειών (Belal et al., 2021). Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει την παρατήρηση της χωρικής μεταβλητότητας των εδαφών τόσο σε μακρο- όσο και σε μικροκλίμακα, συμβάλλοντας στη βελτίωση των γεωργικών πρακτικών (Urowicz and Lipiec, 2021- Yu et al., 2021- Fine et al., 2017).

Επιπλέον, το GPS διευκολύνει τη δημιουργία ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής της γεωργικής γης, που περιλαμβάνει τα όρια των αγρών, τις μετρήσεις της έκτασης για διάφορες γεωργικές περιοχές, τους δρόμους, τα συστήματα άρδευσης, τους χρόνους μετακίνησης και τη θέση των περιοχών που έχουν προσβληθεί από ζιζάνια και ασθένειες (Raja et al., 2024).

Παρά το γεγονός ότι απλοί GPS δείκτες μπορούν να δώσουν πληροφορίες (συντεταγμένες) θέσης με ακρίβεια 5-10 μέτρων είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι υπάρχουν πολλές αιτίες σφάλματος. Μερικά σφάλματα είναι τυχαία, ενώ άλλα είναι συστηματικά και μπορούν να διορθωθούν. Σφάλματα μπορούν να προέλθουν από την υποβάθμιση του σήματος λόγω ατμοσφαιρικής επίδρασης, μικρές αποκλίσεις θέσης των δορυφόρων, σφάλματα ρολογιών, σφάλματα δεικτών και αποκλίσεις στην ανάκλαση των σημάτων από τοπικά αντικείμενα. (Συλλαίος 2007).



Εικόνα1- 1 Οι 24 θέσεις των δορυφόρων (<https://www.gps.gov/>)

1.2.2 GIS (GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM)

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) είναι ένα ισχυρό σύνολο εργαλείων που επιτρέπει τη συλλογή, αποθήκευση, ανάκτηση, μετατροπή και οπτικοποίηση χωρικών δεδομένων για συγκεκριμένους σκοπούς (Burrrough and Mcdonnell, 1998). Είναι μια κατηγορία πληροφοριακού συστήματος που αναφέρεται στην προσπάθεια χωρικής ψηφιακής αναπαράστασης του πραγματικού κόσμου. (Syllaios 2007)

Η γεωργική βιομηχανία έχει διαπιστώσει ότι η ικανότητά της να αξιολογεί και να απεικονίζει γεωργικές ρυθμίσεις και ροές εργασίας είναι πολύ χρήσιμη. Τα ΓΣΠ βελτιώνουν την παραγωγικότητα και την επιτυχία μιας γεωργικής

εκμετάλλευσης εξισορροπώντας τις εισροές και τις εκροές. Στα ΓΣΠ, η τοπογραφία και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες απεικονίζονται ως επίπεδα σε χωρικά δεδομένα. Για την κατανόηση των πολύπλοκων φυσικών συστημάτων στις μέρες μας, η τεχνολογία ΓΣΠ είναι ζωτικής σημασίας για τη συνένωση διαφορετικών πηγών χαρτών και δορυφορικών πληροφοριών (Dlamini, 2009).

Τα ΓΣΠ ξεπερνούν τους παραδοσιακούς χάρτες, επιτρέποντας τη δημιουργία εικόνων, σχεδίων, κινούμενων σχεδίων και άλλων χαρτογραφικών προϊόντων. Από τα κινητά ΓΣΠ στο χωράφι έως την επιστημονική ανάλυση δεδομένων στο γραφείο του διαχειριστή του αγροκτήματος, τα ΓΣΠ διαδραματίζουν αυξανόμενο ρόλο στη γεωργία παγκοσμίως, βοηθώντας τους αγρότες να αυξήσουν την παραγωγή, να μειώσουν το κόστος και να διαχειριστούν τη γη τους πιο αποτελεσματικά. (Kane and Ryan, 1998).

Τα ΓΣΠ θεωρούνται συχνά ως το βασικό συστατικό της γεωργίας ακριβείας (Kumar et al., 2017). Διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων που αφορούν συγκεκριμένες τοποθεσίες, καθώς μπορούν να αναλύσουν και να επεξεργαστούν γρήγορα τεράστιες ποσότητες πληροφοριών (Sahu et al., 2019). Η τεχνολογία αυτή προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και κόστους, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μελέτη δεδομένων τηλεπισκόπησης και χαρτών που λαμβάνονται από δορυφορικά συστήματα πληροφοριών για την κάλυψη γης (Mandal and Ghosh, 2000).

1.2.3 Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing)

Η τηλεπισκόπηση ορίζεται ως η διαδικασία καταγραφής της ενέργειας, η οποία ανακλάται ή εκπέμπεται από ένα αντικείμενο (Syllaios 2007). Χρησιμοποιώντας την ανάκλαση ή την εκπομπή του φωτός από αντικείμενα όπως τα φυτά ή το έδαφος, η Τηλεπισκόπηση είναι μια ομάδα μεθόδων που μπορούν να συλλέγουν δεδομένα πεδίου χωρίς να έρχονται σε στενή επαφή με αυτά (Jackson, 1984).

Η Τηλεπισκόπηση αναφέρεται στη χρήση αισθητήρων τοποθετημένων σε δορυφόρους ή αεροσκάφη για τη συλλογή δεδομένων με την ανίχνευση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης (Mulla, 2013). Μπορούν να ταξινομηθούν σε παθητικούς ή ενεργούς αισθητήρες. Η είσοδος για τους παθητικούς αισθητήρες προέρχεται από εξωτερικές πηγές, όπως το ηλιακό φως που

αντανακλάται από την επιφάνεια της Γης, ενώ οι ενεργητικοί αισθητήρες παράγουν τα δικά τους ερεθίσματα για τη συλλογή δεδομένων από τη Γη.

Για να βοηθηθεί η κοινότητα των παραγωγών να λάβει αποφάσεις (Tayari et al., 2015), οι οριοθετήσεις, οι χάρτες και οι ζώνες διαχείρισης γίνονται στο χώρο εργασίας του ΓΣΠ χρησιμοποιώντας τις εισαγόμενες γεωαναφερόμενες και ψηφιοποιημένες καταγεγραμμένες παρατηρήσεις. Ωστόσο, οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι για την επιτυχή χρήση της τηλεπισκόπησης, οι βασικές απαιτήσεις για το σύστημα περιλαμβάνουν συχνή και έγκαιρη κάλυψη, ταχεία παράδοση δεδομένων, χωρική ανάλυση που κυμαίνεται από 5 έως 25 m, καθώς και απρόσκοπτη ενσωμάτωση με μετεωρολογικά και γεωπονικά δεδομένα (Jackson, 1984).

Ένας συχνά χρησιμοποιούμενος υπολογισμός που εφαρμόζεται σε αεροφωτογραφίες που περιέχουν την εγγύς υπέρυθρη NIR και την κόκκινη ζώνη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος είναι ο κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης (**NDVI**). **NDVI= (NIR - RED) / (NIR + RED)**. Ο NDVI είναι χρήσιμος για την ανάδειξη της πράσινης βλάστησης σε αεροφωτογραφίες και μπορεί επίσης να βοηθήσει στη διάκριση υγιών παραγωγικών καλλιεργειών από καταπονημένες μη παραγωγικές καλλιέργειες. Αφού καθοριστούν οι σχέσεις μεταξύ του NDVI και των ιδιοτήτων του εδάφους και της καλλιέργειας σε επιλεγμένα σημεία αλήθειας της καλλιέργειας, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πρόσθετες αεροφωτογραφίες ή δορυφορικές εικόνες για την αξιολόγηση της έκτασης της μεταβλητότητας του εδάφους και της καλλιέργειας σε γειτονικά χωράφια. Οι κλάσεις παραγωγικότητας θα μπορούσαν επίσης να μετατραπούν σε ζώνες θρεπτικής διαχείρισης, μόλις γίνει καλύτερα κατανοητή η φύση της μεταβλητότητας. (Schumann, 2008).

1.3 Εφαρμογή μεταβλητών δόσεων εισροών

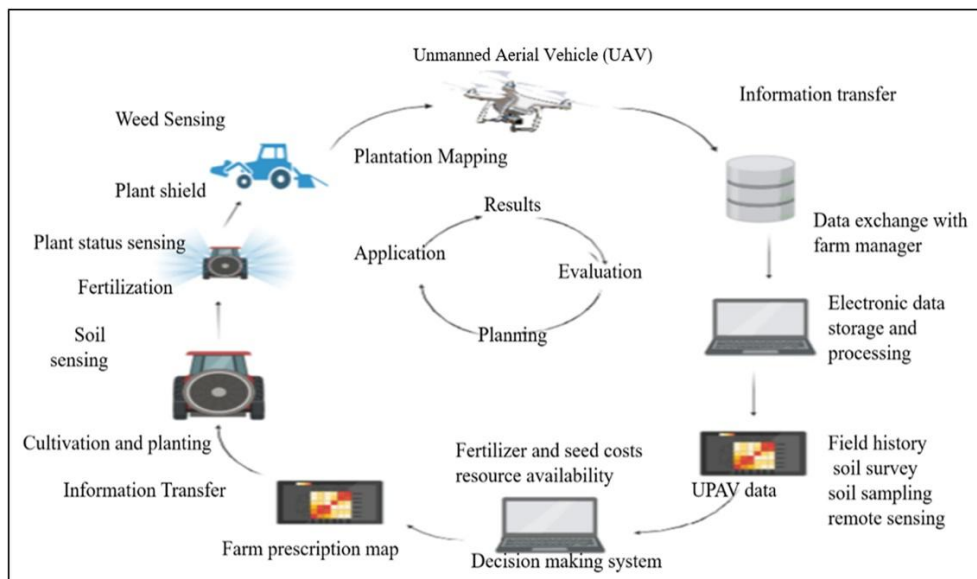
Η εντατικοποίηση της Γεωργίας και η αύξηση της παραγωγής των λιπασμάτων σε συνδυασμό με την προσιτή τιμή τους οδήγησε σε υπερλίπανση των καλλιεργειών. Από την υπερλίπανση δημιουργούνται προβλήματα που οδηγούν σε υποβάθμιση της ποιότητας και σε ρύπανση των υπόγειων υδάτων. Συνήθης είναι η ρύπανση των υπόγειων υδάτων με νιτρικά και φωσφορικά ιόντα. (Θέριος 2005)

Η εφαρμογή των τεχνολογιών μεταβλητού ρυθμού (VRT) περιλαμβάνει τη διεξαγωγή μιας πολυετούς ερευνητικής μελέτης σχετικά με διάφορες παραμέτρους της γεωργικής παραγωγής και στατιστικά στοιχεία απόδοσης της καλλιέργειας-στόχου (Botta et al., 2022).

Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία ζωνών διαχείρισης με διακριτά χαρακτηριστικά και αποτελεσματικές συστάσεις διαχείρισης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν την παραγωγή της καλλιέργειας, είτε σταθμισμένοι είτε μη σταθμισμένοι (He, 2023). Ωστόσο, η έλλειψη ιστορικών δεδομένων ή αρχείων συμβάντων περιορίζει τις δυνατότητες της εφαρμογής VRT και των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων.

Οι εφαρμογές μεταβλητής δόσης περιλαμβάνουν την εφαρμογή των βέλτιστων ποσοτήτων χημικών ουσιών με βάση παράγοντες της εκμετάλλευσης, όπως η φάση ανάπτυξης της καλλιέργειας, η υγεία της καλλιέργειας και οι πληροφορίες που έχουν συγκεντρωθεί προηγουμένως σχετικά με την ανάπτυξη της καλλιέργειας (Pawase et al., 2023).

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω προγραμματισμένων ψεκαστήρων που συνδέονται με μηχανήματα. Με την αποτελεσματική χρήση των χημικών ουσιών, ο κλάδος αυτός συμβάλλει στη μείωση του κόστους και ελαχιστοποιεί την περιβαλλοντική ζημία (Sahu et al., 2019).



Εικόνα1- 2 Κυκλική ροή εργασίας της καλλιέργειας ακριβείας με συλλογή δεδομένων, ανάλυση, εφαρμογή μεταβλητών ποσοτήτων, αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και σχεδιασμός για σταδιακή βελτίωση της διαχείρισης των καλλιεργειών με βάση τα δεδομένα με την πάροδο του χρόνου. (Kumar et al, 2024)

Οι τεχνολογίες μεταβλητού ρυθμού (VRT) - ένα από τα κύρια εργαλεία στην κατηγορία των τεχνολογιών αντίδρασης της γεωργίας ακριβείας. Περιλαμβάνουν εργαλεία/πρακτικές που επιτρέπουν τη χωρικά και χρονικά μεταβλητή εφαρμογή χημικών ουσιών σε μια καλλιέργεια σε συνάρτηση με τη ζήτηση της καλλιέργειας σε μικροκλίμακα, σε αντίθεση με έναν ενιαίο, ομοιόμορφο ρυθμό εφαρμογής.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η εφαρμογή τεχνικών VRT μειώνει σημαντικά τις συνολικές εισροές χημικών λιπασμάτων και φυτοπροστασίας, διατηρώντας παράλληλα παρόμοιες αποδόσεις και μειώνοντας τις εκπομπές N₂O από το έδαφος. (Zaman et al., 2005; Aggelopoulou et al., 2010; Li et al., 2016; Colaço and Molin, 2017; Vatsanidou et al., 2017; Colaço and Bramley, 2018; Bacenetti et al., 2020; Chen et al., 2020; Liakos et al., 2020; Nackley et al., 2021; Román et al., 2021).

1.4 Σκοπός της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική διατριβή αναλύεται η σημασία της εφαρμογής μεταβλητών δόσεων εισροών σε οπωρώνες καθώς και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση της εφαρμογής αυτής.

Η εργασία αποσκοπεί στο να συμβάλει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι εφαρμογές μεταβλητών δόσεων εισροών μπορούν να υποστηρίξουν τη βιώσιμη γεωργία, να ενισχύσουν την αποδοτικότητα των καλλιεργειών και να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Αναλύοντας τη σχετική βιβλιογραφία για την παρούσα διατριβή προκύπτει το συμπέρασμα πως οι μεταβλητές δόσεις εισροών στους οπωρώνες είναι ένα θέμα για το οποίο έχουν γίνει αρκετές μελέτες και αποτελεί βασικό πυλώνα της γεωργίας ακριβείας.

Πρόκειται για ένα θέμα που θα απασχολήσει αρκετά την επιστημονική και όχι μόνο κοινότητα στο μέλλον και υπάρχει η δυνατότητα για εξέλιξη και για βελτιωμένες τεχνικές που θα συμβάλλουν στην αξιοποίηση των εισροών με τον βέλτιστο τρόπο.

Μελέτες περιπτώσεων από οπωρώνες έχουν δείξει πως η εφαρμογή μεταβλητών δόσεων εισροών μπορεί να αυξήσει την απόδοση και να μειώσει την κατανάλωση εισροών.

Στη βιβλιογραφία, η εφαρμογή μεταβλητών δόσεων εισροών στους οπωρώνες περιγράφεται συχνά με τη χρήση συνδυαστικών τεχνολογιών που σχετίζονται με τη χρήση αισθητήρων, drones και συστημάτων GIS.

Επίσης, προκύπτει ότι η εφαρμογή μεταβλητών δόσεων εισροών σε οπωρώνες είναι μια πολλά υποσχόμενη πρακτική που μπορεί να φέρει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίησή της εξαρτάται από την πρόοδο της τεχνολογίας, τη μείωση του κόστους και την εκπαίδευση των παραγωγών.

Η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας (ΓΑ) που βοηθούν τους παραγωγούς δενδρωδών καλλιεργειών να διαχειρίζονται βέλτιστα τις εισροές (π.χ. νερό, λιπάσματα και φυτοφάρμακα) και να μεγιστοποιούν τις εκροές παραγωγής (π.χ. απόδοση και ποιότητα φρούτων) είναι ζωτικής σημασίας για τη μελλοντική οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα της βιομηχανίας δενδρωδών καλλιεργειών. Ενώ έχει υπάρξει εκτεταμένη εφαρμογή της ΓΑ σε αροτραίες καλλιέργειες, όπως το καλαμπόκι, το σιτάρι και η σόγια (Cisternas et al., 2020), δεν υπάρχουν παρόμοιες προσπάθειες στους οπωρώνες.

Μια πρόκληση για την υιοθέτηση της μεθόδου είναι η μεγάλη ποικιλομορφία στους τύπους δέντρων και στα σχέδια οπωρώνων. Μια άλλη πρόκληση είναι ότι ο κλάδος των δενδρωδών οπωροφόρων εξακολουθεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εργασία, οπότε οι πρακτικές ΓΑ που απαιτούν

πρόσθετες ανθρώπινες διαχειριστικές παρεμβάσεις σε σύγκριση με τις συμβατικές πρακτικές αυξάνουν τις απαιτήσεις σε εργασία σε έναν κλάδο που ήδη αγωνίζεται με τη διαθεσιμότητα εργατικού δυναμικού.

Μια πιθανή πορεία προς τα εμπρός για την εφαρμογή πρακτικών ΓΑ σε οπωρώνες χωρίς να επιδεινωθεί η υπάρχουσα έλλειψη εργατικού δυναμικού είναι η χρήση αυτόνομων ρομπότ εδάφους (Brown et al. 2024). Η μελλοντική έρευνα καλό θα είναι να εστιάσει στη βελτίωση της τεχνολογίας αισθητήρων, καθώς και στην ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης, με σκοπό τις πιο ακριβείς προβλέψεις και εφαρμογές.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Γενική μεθοδολογία

Η Γεωργία ακριβείας, μαζί με άλλες σημαντικές προσεγγίσεις, είναι ένα κρίσιμο σύστημα γεωργικής διαχείρισης που απαιτεί τη συνδυασμένη χρήση ρομποτικής και αισθητήρων, μη επανδρωμένων αεροσκαφών, προηγμένων συστημάτων GPS και GNSS, IoT, μοντελοποίησης του καιρού και προσαρμοσμένης χρήσης των εισροών, που επιτρέπουν στους αγρότες να μειώσουν τη χρήση σημαντικών στοιχείων όπως το νερό και τα λιπάσματα. (Loures et al., 2020).

Η γεωργία ακριβείας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον ψεκασμό με μεταβλητές δόσεις και η σημασία τους δεν μπορεί να υπο

τιμηθεί. Οι συμβατικές γεωργικές τεχνικές έχουν ως αποτέλεσμα την υπερβολική χρήση φυτοφαρμάκων λόγω του ανεξέλεγκτου ψεκασμού, ενώ η μεταβλητή δόση εισροών προσαρμόζει τον ψεκασμό των φυτοφαρμάκων ώστε να ανταποκρίνεται στις ακριβείς απαιτήσεις των διαφόρων θέσεων εντός ενός οπωρώνα (Alam et al., 2020).

Για την εφαρμογή των ψεκασμών απαιτείται η δημιουργία ζωνών διαχείρισης. Μια ζώνη διαχείρισης, περιγράφει ένα τμήμα ενός γεωργικού αγρού που χαρακτηρίζεται από ομοιογενείς παράγοντες και δείκτες. Ως εκ τούτου, η βάση για την ανάπτυξη των τεχνικών γεωργίας ακριβείας είναι η κατάτμηση των γεωργικών εκτάσεων σε διάφορες ζώνες διαχείρισης με βάση τη χαρτογράφηση του εδάφους, την ανάπτυξη των καλλιεργειών και την απόδοση. (Peterson and Wallenhaupt, 1996, Lan et al., 2008, El Nahry et al., 2011).

Η μεταβλητή δόση εισροών βασίζεται σε χάρτες που ρυθμίζουν τη δόση εφαρμογής με βάση έναν δέκτη GPS και έναν χάρτη εφαρμογών (Prescription map) της επιθυμητής δόσης στον αγρό. Σε αυτά τα συστήματα, οι πληροφορίες για το έδαφος και την καλλιέργεια χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία ενός χάρτη εφαρμογών, ο οποίος με τη σειρά του χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με έναν δέκτη GPS για τον έλεγχο της δόσης εφαρμογής καθώς ο εφαρμογέας κινείται στον αγρό. Οι διεργασίες που απαιτούνται στα συστήματα μεταβλητών δόσεων εισροών με βάση το χάρτη απεικονίζονται στην εικόνα 3-1 (Ess et al., 2001).

Η VRT με βάση τους χάρτες απαιτεί συλλογή χωρικών δεδομένων και επεξεργασία με στόχο τη δημιουργία χαρτών εφαρμογής χρησιμοποιώντας δεδομένα από αισθητήρες (όπως αισθητήρες εδαφικής υγρασίας, αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας [EC] του εδάφους ή αισθητήρες drone/δορυφόρου) ως υποκατάστατα της χωρικής μεταβλητότητας της παραμέτρου ενδιαφέροντος. Οι χάρτες εφαρμογής μετατρέπονται στη συνέχεια σε ένα σύνολο οδηγιών που

ελέγχουν το πραγματικό σύστημα εφαρμογής μεταβλητών δόσεων. Τα βασικά βήματα που εμπλέκονται στο VRT με βάση τους χάρτες περιλαμβάνουν:

1. Διαδικασία διερεύνησης των συνθηκών του αγρού - τοπογραφία εδάφους, τύποι εδάφους, ιδιότητες εδάφους, μεταβολή της εδαφικής υγρασίας, υφιστάμενα δεδομένα καλλιεργειών, απόδοση, μεταβολή βιομάζας με τη χρήση δειγματοληψίας εδάφους, τηλεπισκοπικών εικόνων ή ιστορικών δεδομένων απόδοσης/βιομάζας.
2. Δημιουργία των ειδικών χαρτών για την περιοχή για την ιδιότητα ενδιαφέροντος.
3. Χρήση ενός αλγορίθμου υπολογιστή για την ανάπτυξη του χάρτη εφαρμογής για συγκεκριμένη τοποθεσία, γνωστού και ως prescription map.
4. Ανέβασμα του χάρτη εφαρμογής στον εφαρμοστή μεταβλητών δόσεων για τον έλεγχο της εφαρμογής των εισροών με μεταβλητές δόσεις.

Οι καλλιεργητές και οι σύμβουλοι καλλιέργειας μπορούν να υιοθετήσουν διάφορες τεχνικές, όπως η απλή χρήση εδαφολογικών χαρτών, η δειγματοληψία εδάφους σε πλέγμα, η χαρτογράφηση EC ή η τηλεπισκόπηση, για την αξιολόγηση της μεταβλητότητας του αγρού.

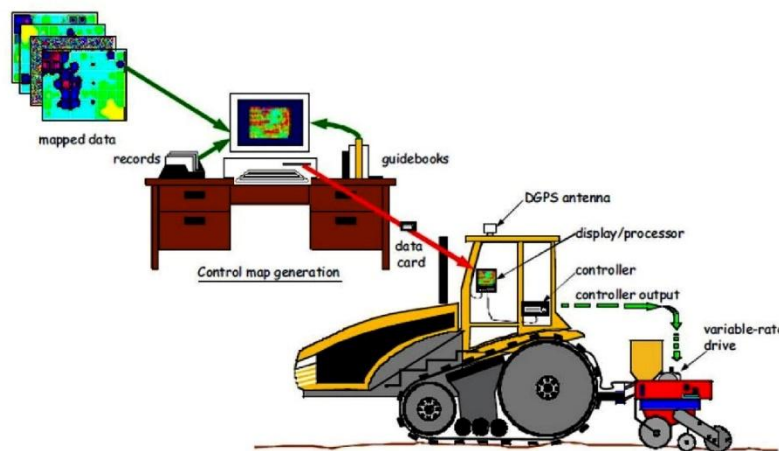
Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και ποικίλλει ως προς το κόστος. Στη δειγματοληψία εδάφους με πλέγμα, ο αγρός χωρίζεται σε διαφορετικά πλέγματα και συλλέγονται δείγματα εδάφους από κάθε πλέγμα και αναλύονται για την επιθυμητή εδαφική ιδιότητα. Για λόγους απλότητας, σε κάθε περιοχή δειγματοληψίας ή πλέγμα αποδίδονται σταθερές τιμές της μετρούμενης ιδιότητας (όπως η EC του εδάφους) για την εφαρμογή γεωργικών εισροών με μεταβλητό ρυθμό.

Η ακριβής εφαρμογή των γεωργικών εισροών απαιτεί έναν συνεχή, μεταβαλλόμενο χάρτη υψηλής ανάλυσης. Οι τεχνικές παρεμβολής του συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη του χάρτη συνεχούς μεταβλητότητας (εικόνα 3-2). Ωστόσο, απαιτείται κατάλληλη κατάρτιση για την ανάπτυξη αυτών των χαρτών μέσω τέτοιων τεχνικών. Εναλλακτικά, πολυφασματικές εικόνες που συλλέγονται με τη χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών ή δορυφόρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατα των παραμέτρων ενδιαφέροντος, π.χ. κανονικοποιημένος δείκτης διαφοράς βλάστησης [NDVI] για την αποτύπωση της χωρικής μεταβλητότητας εντός του πεδίου.

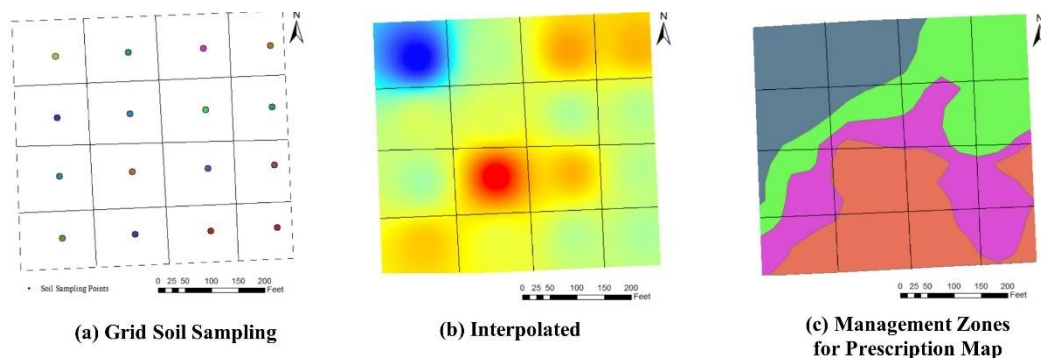
Μόλις δημιουργηθούν χάρτες μεταβλητότητας εντός του αγρού, μετατρέπονται σε χάρτες εφαρμογής (prescription maps) που θα διαβαστούν από τα μηχανήματα εφαρμογής μεταβλητών δόσεων που χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγορίθμους. Αυτοί οι αλγόριθμοι βασίζονται σε τυποποιημένους τύπους σύστασης άρδευσης και λίπανσης, όπως η προσέγγιση του ισοζυγίου νερού, ο

προγραμματισμός άρδευσης με βάση τη θερμοκρασία της κόμης, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους (EC) και η διαχείριση του αζώτου με βάση τον NDVI.

Αυτοί οι χάρτες εφαρμογής περιέχουν γενικά το ποσοστό εφαρμογής με βάση τη χωρική μεταβλητότητα στον αγρό. Τέλος, αυτοί οι χάρτες εφαρμογής μεταφέρονται στο σύστημα πίνακα ελέγχου μεταβλητού ποσοστού για να παρέχουν το κατάλληλο ποσοστό γεωργικών εισροών σε διάφορες θέσεις στον αγρό. Σε όλη αυτή τη διαδικασία, ένα σύστημα εντοπισμού θέσης (π.χ. το διαφορικό παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης [DGPS], το οποίο παρέχει πληροφορίες γεωγραφικού πλάτους και γεωγραφικού μήκους) χρησιμοποιείται συνεχώς για τον εντοπισμό των θέσεων του οχήματος στον αγρό. (Sharma et al., 2024).



Εικόνα 3- 1 Μεταβλητή δόση εισροών με τη χρήση χαρτών (Ess et al., 2001).



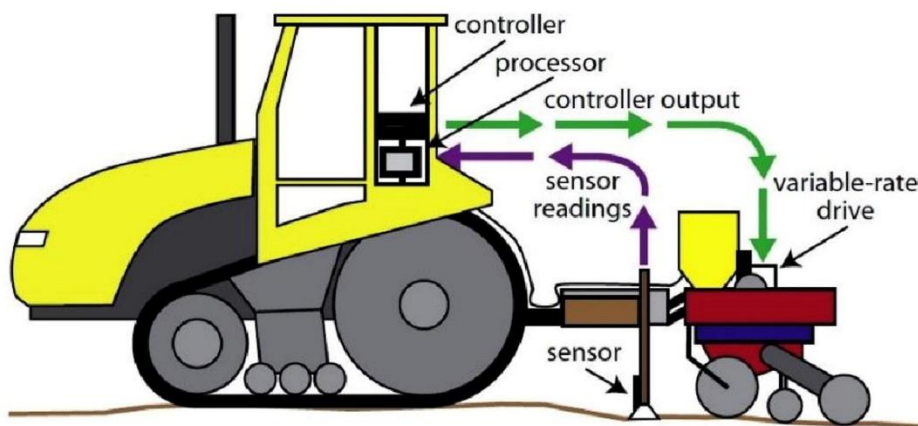
Εικόνα 3- 2 Ανάπτυξη των ζωνών διαχείρισης που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή μεταβλητών δόσεων με βάση το χάρτη από (a) δειγματοληψία εδάφους σε πλέγμα με τη χρήση (b) τεχνικών γεωχωρικής παρεμβολής. Οι ζώνες αυτές αναπτύσσονται για έναν (c) χάρτη εφαρμογής. (Sharma et al., 2024).

Εκτός από την τεχνολογία που βασίζεται σε χάρτες, υπάρχουν συστήματα που βασίζονται σε αισθητήρες που δεν απαιτούν ούτε δέκτη GPS ούτε χάρτη εφαρμογών, αλλά εξαρτώνται κυρίως από τα δεδομένα πεδίου σε πραγματικό χρόνο από το έδαφος/καλλιέργεια με τη χρήση αισθητήρων (εικόνα 3-3) (Grisso et

al., 2005). Για τα συγκεκριμένα συστήματα έχει καθιερωθεί η ονομασία συστήματα “on the go”.

Σε αντίθεση με την τεχνολογία που βασίζεται σε χάρτες, η τεχνολογία που βασίζεται σε αισθητήρες δεν απαιτεί προηγούμενη συλλογή των συνθηκών του πεδίου- αντίθετα, καθώς το σύστημα εξελίσσεται, οι αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι σε αυτό αποφασίζουν πόση εισροή πρέπει να εφαρμοστεί στο πεδίο. Ταυτόχρονα, η τεχνολογία VRT που βασίζεται σε αισθητήρες επιτρέπει υψηλή πυκνότητα δειγματοληψίας (π.χ. σε υψηλή ανάλυση της κλίμακας των φυτών), η οποία μπορεί να βοηθήσει στην ακριβή ποσοτικοποίηση της διακύμανσης εντός του αγρού.

Στην εφαρμογή VRT με αισθητήρες, οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο των ιδιοτήτων του εδάφους και των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας πραγματοποιούνται, επεξεργάζονται και χρησιμοποιούνται ως πηγή εισροών στον εφαρμοστή μεταβλητής δόσης σε πραγματικό χρόνο. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές ζιζανιοκτόνων, φυτοφαρμάκων, μυκητοκτόνων και λιπασμάτων. (Sharma et al., 2024).



Εικόνα 3- 3 Μεταβλητή δόση εισροών με τη χρήση αισθητήρων (Grisso et al., 2005).

Υιοθετώντας εργαλεία γεωργίας ακριβείας, όπως ο εξοπλισμός που καθοδηγείται με GPS και η ανάλυση δεδομένων, τα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα (UASs) χρησιμοποιούνται επίσης σε περίοπτη θέση για τον ψεκασμό φυτοφαρμάκων (Frankelius et al., 2017, Wang et al., 2022).

Τα UASs αποτελούνται από πολλαπλούς έλικες (multi-rotor) ή ένα drone σταθερής πτέρυγας και είναι εξοπλισμένα με διάφορα εξαρτήματα, όπως δεξαμενές φυτοφαρμάκων, αντλίες και ακροφύσια για την αποτελεσματική διανομή φυτοφαρμάκων ή λιπασμάτων. Είναι επίσης εξοπλισμένα με τεχνολογία GPS και πλοήγησης για την ακριβή χαρτογράφηση του χωραφίου και την παρακολούθηση

προκαθορισμένων διαδρομών πτήσης και τη διατήρηση του απαιτούμενου ύψους και της απαιτούμενης ταχύτητας.

Ο χειριστής μπορεί να ελέγξει χειροκίνητα τα UASs χρησιμοποιώντας τηλεχειριστήριο ή να ορίσει το σχέδιο πτήσης χρησιμοποιώντας λογισμικό όπως το precision flight ή το drone deploy, επιτρέποντας αυτόνομες λειτουργίες. Τα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα έχουν γίνει βασικά όργανα στη γεωργία ακριβείας λόγω των δυνατοτήτων τους για ακριβή ψεκασμό. (Hassler and Baysal-Gurel, 2019, Mukherjee et al., 2019)

Τα UASs αυτοματοποιούν και βελτιώνουν τον ψεκασμό των καλλιεργειών, εξαλείφοντας την ανάγκη για χειρωνακτική εργασία και μειώνοντας την έκθεση του ανθρώπου σε επικίνδυνες χημικές ουσίες. Για την αποτελεσματική διαχείριση παρασίτων και ασθενειών, τα UASs είναι επίσης εξοπλισμένα με διάφορους αισθητήρες και τεχνολογίες, όπως GPS υψηλής ακρίβειας και κινηματική σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτρέπει στα UASs να ακολουθούν ακριβείς διαδρομές πτήσης, εξασφαλίζοντας ακριβή κάλυψη κατά τον ψεκασμό. Η κινηματική σε πραγματικό χρόνο παρέχει ακρίβεια σε επίπεδο εκατοστού, ζωτικής σημασίας για ψεκασμούς ακριβείας. (Ekaso et al., 2020, Hassler and Baysal-Gurel, 2019).



Εικόνα 3- 4 Ηλεκτρικό μοντέλο UAS με οκτώ έλικες (Hanif et al., 2023)

Λειτουργούν σε χαμηλά υψόμετρα με ακριβή έλεγχο, ελαχιστοποιώντας την παρέκκλιση του ψεκασμού που προκαλείται από την πίεση του ανέμου και μειώνοντας τον κίνδυνο μόλυνσης του περιβάλλοντος και ακούσιας βλάβης των γειτονικών καλλιεργειών. (Chen et al., 2022).

Επιπλέον, τα UASs διασκορπίζουν αποτελεσματικά και γρήγορα τα λιπάσματα, διασφαλίζοντας ότι οι καλλιέργειες λαμβάνουν τα απαραίτητα μέταλλα για υγιέστερη ανάπτυξη και αυξημένες αποδόσεις συγκομιδής. (Rahman et al., 2021).

Τα UASs τέλος, παρέχουν ποικίλα γεωργικά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της βελτιωμένης διαχείρισης των πόρων, της ελαχιστοποιημένης χρήσης φυτοφαρμάκων, της αυξημένης παραγωγικότητας και της έγκαιρης ανίχνευσης προβλημάτων των καλλιεργειών. Τα φυτοφάρμακα, τα ζιζανιοκτόνα και τα λιπάσματα μπορούν να ψεκάζονται με ακρίβεια ρυθμίζοντας πρωτίστως τον ρυθμό ροής για τη διανομή των κατάλληλων ποσοτήτων εισροών, εξασφαλίζοντας γεωργία υψηλής απόδοσης, με περιβαλλοντική συνείδηση (Rahman et al., 2021).

Στην Ελλάδα ωστόσο, δεν υπάρχει νομικό πλαίσιο που να επιτρέπει τις περισσότερες εφαρμογές αγροχημικών με UASs. Επιπλέον, δεν υπάρχουν επίσημα πρωτόκολλα εφαρμογής αγροχημικών για την ασφαλέστερη εφαρμογή τους.

3.2 Μεθοδολογία σε οπωρώνες

3.2.1 Γενικές πληροφορίες

Το πρώτο βήμα στην εφαρμογή της VRT περιλαμβάνει τη συλλογή χωρικών και χρονικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης σχετικά με τη μεταβλητότητα του οπωρώνα.

Αρχικά πρέπει να γίνει χαρακτηρισμός της κόμης. Οι αισθητήρες υπερήχων και τα συστήματα LIDAR χρησιμοποιούνται συνήθως για την αξιολόγηση του όγκου της κόμης των δέντρων και της πυκνότητας του φυλλώματος, τα οποία καθοδηγούν τις εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας (Llorens et al., 2010). Ο χαρακτηρισμός της κόμης είναι απαραίτητος για την προσαρμογή των δόσεων ψεκασμού φυτοφαρμάκων και τη βελτιστοποίηση της κατανομής των εισροών (Wei et al., 2023).

Στη συνέχεια πρέπει να γίνει παρακολούθηση της υγείας του εδάφους και των φυτών. Οι εγγύς αισθητήρες μετρούν την υγρασία του εδάφους, το pH και τα επίπεδα θρεπτικών συστατικών για τον εντοπισμό περιοχών που απαιτούν διαφοροποιημένη επεξεργασία (Jeon & Zhu, 2012). Οι δείκτες ανάκλασης της κόμης, όπως ο NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της υγείας των φυτών και την καθοδήγηση των αποφάσεων για θρεπτικά στοιχεία και άρδευση (Zhu et al., 2011).

Τέλος γίνεται παρακολούθηση της απόδοσης. Τα ιστορικά δεδομένα απόδοσης και η χαρτογράφηση της απόδοσης σε πραγματικό χρόνο επιτρέπουν τη δημιουργία ζωνών διαχείρισης με διακριτά επίπεδα παραγωγικότητας (Giles & Delwiche, 1993). Οι προηγμένες αναλύσεις δεδομένων ενσωματώνουν τις καιρικές συνθήκες και την ιστορική απόδοση για την τελειοποίηση των συνταγών μεταβλητού ποσοστού (Wei et al., 2023).

Το δεύτερο βήμα περιλαμβάνει την ανάλυση δεδομένων και τη δημιουργία χαρτών εφαρμογών. Αρχικά γίνεται γεωχωρική ανάλυση. Τα δεδομένα που συλλέγονται επεξεργάζονται με τη χρήση γεωχωρικών και στατιστικών τεχνικών για την ανάπτυξη χαρτών εφαρμογών, οι οποίοι καθορίζουν τα ποσοστά εφαρμογής μεταβλητών εισροών.

Τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) και οι πλατφόρμες τηλεπισκόπησης αναλύουν τη χωρική μεταβλητότητα σε ολόκληρο τον οπωρώνα, επιτρέποντας τον προσδιορισμό διακριτών ζωνών διαχείρισης (Wei et al., 2023). Οι χάρτες ύψους και πυκνότητας της κόμης που παράγονται με τη χρήση LIDAR συμβάλλουν σε ακριβείς εφαρμογές για συγκεκριμένα δέντρα (Llorens et al., 2010).

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου. Τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) χρησιμοποιούν μηχανική μάθηση και στατιστικά μοντέλα για τη βελτιστοποίηση της κατανομής των εισροών (Zhu et al.,

2011). Οι αλγόριθμοι ψεκασμού μεταβλητού ρυθμού αναλύουν δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο για τη δυναμική προσαρμογή των ρυθμών ροής των ακροφυσίων (Jeon & Zhu, 2012).

Το τρίτο βήμα περιλαμβάνει την εφαρμογή των μεταβλητών δόσεων εισροών. Αφού οριστικοποιηθούν οι χάρτες εφαρμογής, αναπτύσσονται εφαρμογές μεταβλητών δόσεων για κάθε θέση με τη χρήση γεωργικού εξοπλισμού ακριβείας.

Α) Λίπανση μεταβλητού ποσοστού: Οι λιπασματοδιανομείς που είναι εξοπλισμένοι με αυτοματοποιημένους ελεγκτές προσαρμόζουν τις δόσεις εφαρμογής θρεπτικών ουσιών με βάση τα επίπεδα γονιμότητας του εδάφους (Giles & Delwiche, 1993). Η ενσωμάτωση δεδομένων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της χρήσης θρεπτικών ουσιών και μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Wei et al., 2023).

Β) Άρδευση με μεταβλητό ρυθμό: Τα έξυπνα συστήματα άρδευσης χρησιμοποιούν αισθητήρες εδαφικής υγρασίας και μοντέλα εξατμισοδιαπνοής για να παρέχουν νερό μόνο όπου είναι απαραίτητο, μειώνοντας τη σπατάλη νερού (Jeon & Zhu, 2012). Τα δεδομένα τηλεπισκόπησης βελτιώνουν περαιτέρω τα προγράμματα άρδευσης, ανιχνεύοντας την υδατική καταπόνηση των φυτών (Zhu et al., 2011).

Γ) Ψεκασμός φυτοφαρμάκων με μεταβλητό ρυθμό: Ψεκαστήρες εξοπλισμένοι με ηλεκτροστατική τεχνολογία και αισθητήρες θόλου σε πραγματικό χρόνο προσαρμόζουν δυναμικά τις δόσεις εφαρμογής φυτοφαρμάκων (Wei et al., 2023). Οι αισθητήρες υπερήχων και σάρωσης με λέιζερ ενισχύουν την ακρίβεια ανίχνευσης του στόχου, εξασφαλίζοντας ακριβή εναπόθεση ψεκασμού (Llorens et al., 2010).

Τα συστήματα διπλού ακροφυσίου διακρίνονται στην εφαρμογή μεταβλητών δόσεων εισροών, επειδή διαθέτουν δύο ακροφύσια με διαφορετικές ταχύτητες ροής, επιτρέποντας τον στοχευμένο και συγχρονισμένο ψεκασμό. Τα συστήματα διπλού ακροφυσίου που χρησιμοποιούνται σε οπωρώνες μήλων διαθέτουν εξειδικευμένα ακροφύσια με διακριτά σχέδια ψεκασμού και μεγέθη σταγονιδίων (Lu et al., 2022).

Υπάρχουν δύο τύποι ακροφυσίων: το ένα είναι σχεδιασμένο για ψεκασμό φύλλων και το άλλο για φυτοφάρμακα που εφαρμόζονται στο έδαφος. Αυτά τα ακροφύσια είναι στρατηγικά τοποθετημένα ώστε να διασφαλίζεται ότι οι εισροές παραδίδονται με ακρίβεια στις περιοχές του θόλου των δέντρων. Τα συστήματα αυτά βελτιώνουν τη διανομή των φυτοφαρμάκων και μειώνουν την επικάλυψη των ψεκασμών φυτοφαρμάκων (Lyle et al., 1986).

Η συνεχής παρακολούθηση διασφαλίζει ότι η εφαρμογή της VRT είναι αποτελεσματική και ότι γίνονται προσαρμογές για τη βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας.

Τέλος πρέπει να γίνει αξιολόγηση απόδοσης και αποδοτικότητας της μεθόδου. Οι χάρτες απόδοσης μετά τη συγκομιδή και η ανάλυση χημικών υπολειμμάτων αξιολογούν τον αντίκτυπο των εφαρμογών μεταβλητής δόσης (Giles & Delwiche, 1993). Η οικονομική ανάλυση αξιολογεί την εξοικονόμηση κόστους και την απόδοση της επένδυσης από τη μειωμένη χρήση εισροών (Jeon & Zhu, 2012).

Παράλληλα, γίνεται παρακολούθηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αναλύονται δείγματα εδάφους και νερού για να διασφαλιστεί η ελάχιστη έκπλυση θρεπτικών ουσιών και η απορροή φυτοφαρμάκων (Zhu et al., 2011). Η τακτική βαθμονόμηση των αισθητήρων και των συστημάτων ψεκασμού διατηρεί τη μακροπρόθεσμη ακρίβεια στις εφαρμογές μεταβλητών δόσεων (Wei et al., 2023).

3.2.2 Μοντέλα για τον υπολογισμό των δόσεων

A) Εφαρμογή μεταβλητής λίπανσης

Σύμφωνα με τη μέθοδο υπολογισμού της ποσότητας λίπανσης, η λίπανση με μεταβλητό ποσοστό μπορεί να χωριστεί στους ακόλουθους δύο τύπους.

Ο πρώτος υπολογίζει την ποσότητα λίπανσης σύμφωνα με το διάγραμμα λίπανσης μεταβλητού ποσοστού. Οι Meng, Z.J. et al. ανέπτυξαν ένα σύστημα λειτουργίας λίπανσης μεταβλητού ποσοστού με βάση το διάγραμμα συνταγογράφησης. Το σύστημα πραγματοποίησε έλεγχο κλειστού βρόχου του υδραυλικού κινητήρα λαμβάνοντας το σήμα ελέγχου της ποσότητας λίπανσης από το τερματικό ελέγχου στον αέρα σε πραγματικό χρόνο, συνδυάζοντας με την τρέχουσα ταχύτητα λειτουργίας και το πλάτος για να επιτύχει τον σκοπό της λίπανσης με μεταβλητό ρυθμό.

Ο δεύτερος υπολογίζει την ποσότητα λίπανσης με βάση τις πληροφορίες σχετικά με τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους ή τις καλλιέργειες που λαμβάνονται από αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο. Οι Yang, S. et al. πρότειναν τη μέθοδο λίπανσης στόχου για τον οπωρώνα *Lycium barbarum* στην Κίνα με βάση τους υπέρυθρους φωτοηλεκτρικούς αισθητήρες και πραγματοποίησαν τη λίπανση στόχου.

Σύμφωνα με την αρχή του μηχανισμού εφαρμογής λιπάσματος του εξωτερικού αυλακωτού τροχού εφαρμογής λιπάσματος, υπό την προϋπόθεση ενός συγκεκριμένου ανοίγματος, η ποσότητα του λιπάσματος που απορρίπτεται καθορίζεται από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα εφαρμογής λιπάσματος. Ο τύπος για τον υπολογισμό της ταχύτητας περιστροφής του μηχανισμού απόρριψης λιπάσματος παρουσιάζεται στην εξίσωση (1).

$$(1) \ n = \frac{125Qu}{27qN},$$

όπου Q είναι η στοχευόμενη ποσότητα λίπανσης,

g/m - n είναι η στοχευόμενη ταχύτητα του κινητήρα,

r/min - v είναι η ταχύτητα λειτουργίας,

m/s - q είναι η ποσότητα λιπάσματος που εφαρμόζεται από τον εκτοξευτή λιπάσματος ανά στροφή

g/r - N είναι ο αριθμός των εκτοξευτών λιπάσματος.

Στο πείραμα των Wan et al. (2022) πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση της ουρίας, του σύνθετου λιπάσματος και σωματιδίων πολυαιθυλενίου (προσομοιωμένο λίπασμα) σε διαφορετικές στροφές περιστροφής. Καταγράφηκε η ποσότητα λιπάσματος που αποβαλλόταν ανά περιστροφή σε κάθε ταχύτητα, αυξάνοντας την ταχύτητα κατά 500 στροφές/λεπτό από 0 έως 3500 στροφές ανά λεπτό, και διατηρώντας τη για ένα λεπτό. Μετρήθηκε το βάρος του λιπάσματος που αποβλήθηκε, ώστε να υπολογιστεί η πραγματική ποσότητα που εκκρίνεται.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, παρατηρήθηκε ότι το λίπασμα τείνει να μειώνεται όταν εκτεθεί στον αέρα, γεγονός που επηρεάζει τη ζύγιση. Γι' αυτό, εκτός από τη δοκιμή βαθμονόμησης, χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια πολυαιθυλενίου στις υπόλοιπες δοκιμές. Η ανάλυση της διμεταβλητής συσχέτισης μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής και της εκκρινόμενης ποσότητας λιπάσματος έγινε με το λογισμικό SPSS, εξάγοντας τιμές p (συντελεστής σημαντικότητας) και R (συντελεστής Pearson). Τέλος, πραγματοποιήθηκε γραμμική προσαρμογή και προέκυψε ο συντελεστής προσαρμογής q από την Εξίσωση (2):

$$(2) \quad M = qn$$

όπου M είναι η πραγματική ποσότητα λιπάσματος που εκκρίνεται (g/min)

q η ποσότητα ανά περιστροφή (g/r),

n η ταχύτητα περιστροφής (r/min).

Για τη διευκόλυνση των προσομοιώσεων, κατασκευάζεται η συνάρτηση μεταφοράς του ελέγχου ταχύτητας του κινητήρα εκφόρτωσης λιπάσματος στο σύστημα μεταβλητού ρυθμού λίπανσης. Στο μοντέλο ελέγχου, η θεωρητική ποσότητα λίπανσης αποτελεί την είσοδο του ελεγκτή, ο οποίος, μετά από υπολογισμούς, στέλνει σήμα στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC). Ο κινητήρας αυτός ρυθμίζει την ταχύτητα του άξονα εκφόρτωσης λιπάσματος και η ταχύτητα περιστροφής επιστρέφει μέσω αισθητήρα (encoder) στον ελεγκτή για να ολοκληρωθεί ο βρόχος ελέγχου.

Ο κινητήρας εκφόρτωσης είναι brushless DC και η συνάρτηση μεταφοράς του βασίζεται στη θεωρία λειτουργίας DC κινητήρων. Η είσοδος είναι η τάση, ενώ η έξοδος είναι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα. Το σύστημα περιλαμβάνει

εξισώσεις για την ισορροπία κυκλώματος αγωγού, ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, και ροπή κινητήρα. Μετασχηματίζοντας με Laplace, προκύπτει η ανοιχτού βρόχου συνάρτηση μεταφοράς.

Η χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος (εξίσωση 3) είναι:

$$(3) D(s) = s^2 + 32.33s + 237.3 = 0$$

Σύμφωνα με το κριτήριο Routh–Hurwitz, επειδή οι συντελεστές είναι θετικοί, το σύστημα είναι σταθερό.

Για την προσομοίωση, το μοντέλο του κινητήρα χρησιμοποιείται στο Simulink, όπου εφαρμόζονται τρεις τύποι ελεγκτών: PID, ασαφής PID (fuzzy PID) και βελτιωμένος προσαρμοστικός PID με νευρωνικό δίκτυο τύπου BP (backpropagation).

Το νευρωνικό δίκτυο BP είναι ένα νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο backpropagation. Συνδυάζοντας τον αλγόριθμο του νευρωνικού δικτύου BP με τον έλεγχο PID, μπορεί να σχεδιαστεί ένας προσαρμοστικός ελεγκτής PID με βάση το νευρωνικό δίκτυο BP, ο οποίος βελτιώνει το κακό αποτέλεσμα ελέγχου του PID σε μη γραμμικά συστήματα. Τα αρχικά βάρη του παραδοσιακού νευρωνικού δικτύου BP παράγονται γενικά με τη χρήση τυχαίων αριθμών. Μετά την προσαρμογή των βαρών σύνδεσης του δικτύου μέσω της backpropagation, είναι εύκολο να πέσει στην τοπική βέλτιστη λύση, η οποία δεν μπορεί να επιτύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα ελέγχου. Ωστόσο, το νευρωνικό δίκτυο BP που βελτιστοποιείται με τον αλγόριθμο PSO μπορεί να αναζητήσει σε μεγαλύτερο χώρο, αποφεύγοντας σε κάποιο βαθμό το πρόβλημα της τοπικής βέλτιστης λύσης (Chang et al. 2022).

Σε μια άλλη μελέτη σε οπωρώνες μήλων των Liakos et al. (2020) Οι μεταχειρίσεις λίπανσης εφαρμόστηκαν σε έναν οπωρώνα μηλιάς που βρίσκεται στην Αγία της Θεσσαλίας, Κεντρική Ελλάδα. Ο οπωρώνας φυτεύτηκε το 2004 με «Granny Smith» χρησιμοποιώντας ως επικονιαστή το «Red Delicious», όλοι οι βλαστοί εμβολιάστηκαν στο υποκείμενο MM106.

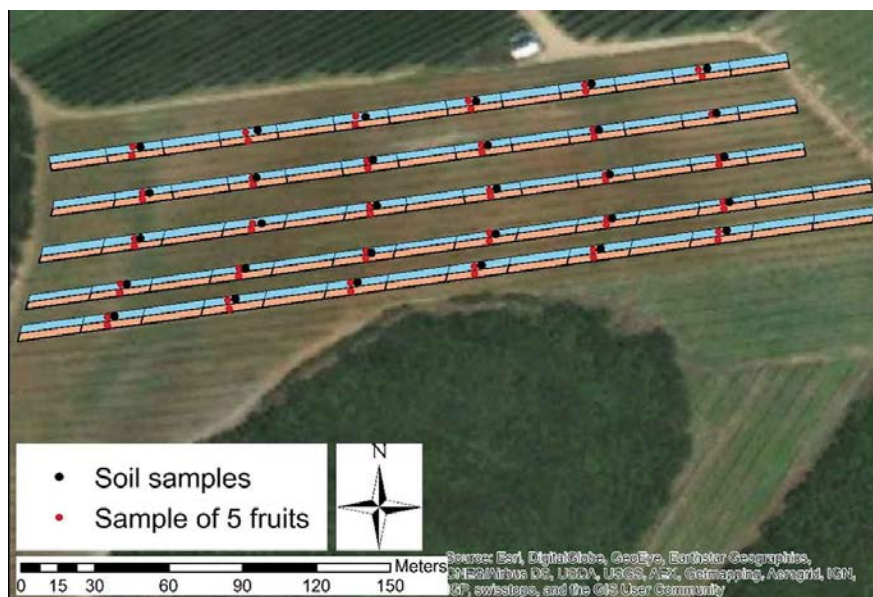
Αρχικά, καταγράφηκαν μετεωρολογικά δεδομένα, όπως η ημερήσια σχετική υγρασία (RH), η θερμοκρασία (T) και η βροχόπτωση για τα 3 έτη έρευνας υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο σε πενήνήμερη βάση από την 1η Απριλίου έως τις 15 Μαΐου για να αποτυπωθούν οι συνθήκες κατά τη διάρκεια της άνθησης και της καρπόδεσης.

Στη συνέχεια έγινε χαρτογράφηση της απόδοσης. Η συγκομιδή έγινε με το χέρι. Στον οπωρώνα, οι σειρές οριοθετήθηκαν σε τμήματα 20 μέτρων με σημάνσεις και οι εργάτες τοποθέτησαν τα μήλα σε κάδους των 20 κιλών που ήταν

σημειωμένοι για κάθε τμήμα. Συλλέχθηκε το βάρος των καρπών που συγκομίστηκαν σε κάθε τμήμα. Οι γεωγραφικές θέσεις καταγράφηκαν από το μέσο κάθε τμήματος με τη χρήση φορητού δέκτη παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης.

Τα δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό ArcGIS. Χρησιμοποιώντας το ArcGIS, σχεδιάστηκαν πλέγματα $20\text{ m} \times 4\text{ m}$ σε στρώματα για τη χαρτογράφηση των δεδομένων. Οι συγκομιδές πραγματοποιήθηκαν στις 12 Οκτωβρίου 2010, 7 Νοεμβρίου 2011 και 4 Νοεμβρίου 2012. Η συγκομιδή του 2010 χρησιμοποιήθηκε για να καθοριστεί μια μεταβλητή δόση λίπανσης, ενώ οι συγκομιδές του 2011 και του 2012 ήταν για να συγκριθεί η μεταβλητή δόση με ομοιόμορφες εφαρμογές λίπανσης.

Ακολούθησε η ανάλυση των ιδιοτήτων του εδάφους. Ο προσδιορισμός της μεταβλητότητας στον οπωρώνα και η συσχέτιση αυτής της μεταβλητότητας με την απόδοση είναι σημαντικός για τον καθορισμό μιας συνταγής SSM. Έτσι, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους (EC), η υφή (% άμμος, % ιλύς και % άργιλος) και η χημική σύνθεση (φώσφορος: P, κάλιο: K- ανθρακικό ασβέστιο: CaCO_3 , pH και οργανική ουσία) αναλύθηκαν. Τα δεδομένα εισήχθησαν αργότερα στο λογισμικό ArcGIS για την ανάπτυξη γεωχωρικών επιπέδων, όπως και όλες οι αναλύσεις εδάφους.



Εικόνα 3- 5 Δείγμα καρπών (κόκκινες κουκίδες) και δείγματα εδάφους (μαύρες κουκίδες), εντός των τμημάτων των 20 μέτρων όπου το λίπασμα εφαρμόστηκε

ομοιόμορφα (πορτοκαλί περιοχές) και σε μεταβλητές δόσεις (μπλε περιοχές) στον οπωρώνα. (Liakos et al. 2020)

Η μεταβλητή λίπανση υπολογίστηκε από την απόδοση που συλλέχθηκε το προηγούμενο έτος. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Λιπασμάτων, 110,5 kg ha⁻¹ N πρέπει να εφαρμόζονται για κάθε 44,8 t ha⁻¹ απόδοσης, ώστε να ληφθούν υπόψη οι απώλειες κλαδέματος, καρπών και ιστών φύλλων, καθώς και ένα ποσοστό 20% για την απορροή και την έκπλυση. Αναπτύχθηκαν εξισώσεις για τον προσδιορισμό του VRF με βάση την κατάλληλη ποσότητα N. Οι VRF εξισώσεις (4) και (5) αναλύονται παρακάτω:

$$F1=(51*Y)/44,8 \text{ (4)}$$

όπου F1: λίπασμα σε kg ha⁻¹,

Y: καταγεγραμμένη απόδοση σε t ha⁻¹ το προηγούμενο έτος.

$$F2=F1+(F1*0,2) \text{ (5)}$$

όπου F1 = λίπασμα σε kg ha⁻¹,

F2 = η τελική ποσότητα λιπάσματος (συμπεριλαμβανομένου του 20% του προστιθέμενου λιπάσματος) σε kg ha⁻¹.

Ακολούθως, έγινε χαρτογράφηση της ποιότητας των φρούτων. Πριν από τη συγκομιδή της παραγωγής, συλλέχθηκαν εμπορικά ώριμα μήλα «Granny Smith» από 60 γεωγραφικά προσδιορισμένες θέσεις (πλέγμα 20 m × 24 m) εντός των μεταχειρίσεων λίπανσης (30 ομοιόμορφες και 30 μεταχειρίσεις VRF). Από κάθε θέση συλλέχθηκαν πέντε καρποί. Οι συγκομισθέντες καρποί επιλέχθηκαν τυχαία εντός της μεταχείρισης- ωστόσο, επιλέχθηκαν με γνώμονα τη νωπή ποιότητα της αγοράς. Οι κατεστραμμένοι, άρρωστοι, μικροί και παραμορφωμένοι καρποί παραλείφθηκαν. Συνολικά συγκομίστηκαν 300 καρποί για τη χαρτογράφηση της ποιότητας των καρπών. Στην Εικόνα 3-5, οι κόκκινες κουκκίδες δείχνουν πού συλλέχθηκαν οι καρποί για την ανάλυση της ποιότητας.

Οι καρποί αναλύθηκαν ως προς το βάρος (g), την περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά (SSC; °Brix), τη σκληρότητα της σάρκας (kg) και το υγρό εκχύλισμα εξετάστηκε ως προς το pH και την οξύτητα.

Πραγματοποιήθηκε λεπτομερής ανάλυση των δεδομένων για την απόκτηση βασικών περιγραφικών στατιστικών στοιχείων για τις ιδιότητες που μελετήθηκαν. Εφαρμόστηκε η συσχέτιση Pearson μεταξύ των μελετώμενων ιδιοτήτων για την αξιολόγηση της σχέσης τους και ο συντελεστής γραμμικής

παλινδρόμησης για την παροχή της ποιότητας της σχέσης τους. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SPSS.

Η λίπανση με μεταβλητό ρυθμό, όπως εφαρμόστηκε στον οπωρώνα μήλων, έδειξε ότι μια πρακτική SSM (site-specific management) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για τη γεωργία ακριβείας. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι κανένα από τα εδαφικά χαρακτηριστικά που εξετάστηκαν δεν θα αποτελούσε καλό δείκτη για την ανάπτυξη μιας πρακτικής SSM. Επειδή η απόδοση και η ποιότητα των φρούτων δεν επηρεάστηκαν αρνητικά από την μεταβλητή δόση εισροών, η ανάπτυξη μιας πρακτικής SSM με τη συλλογή της απόδοσης από οριοθετημένα τμήματα του οπωρώνα και τον υπολογισμό των ποσοτήτων N με βάση τους τύπους που χρησιμοποιήθηκαν εδώ θα μπορούσε να μειώσει το κόστος λίπανσης (Liakos et al. 2020).

B) Εφαρμογή μεταβλητής άρδευσης

Όσον αφορά την εφαρμογή της μεθόδου για την κάλυψη των αναγκών άρδευσης σε οπωρώνες, πραγματοποιήθηκε μία μελέτη των Orozco-Moran et al., 2025 υποδηλώνοντας τη δυνατότητα συνδυασμού νέων τεχνολογιών τηλεπισκόπησης, όπως το LiDAR, και της προσέγγισης του υδατικού ισοζυγίου για τη βελτίωση του προγραμματισμού της άρδευσης.

Ο ακριβής προγραμματισμός της άρδευσης είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική χρήση του νερού, ιδίως σε δενδρώδεις καλλιέργειες υψηλής αξίας με περιορισμένη παροχή άρδευσης

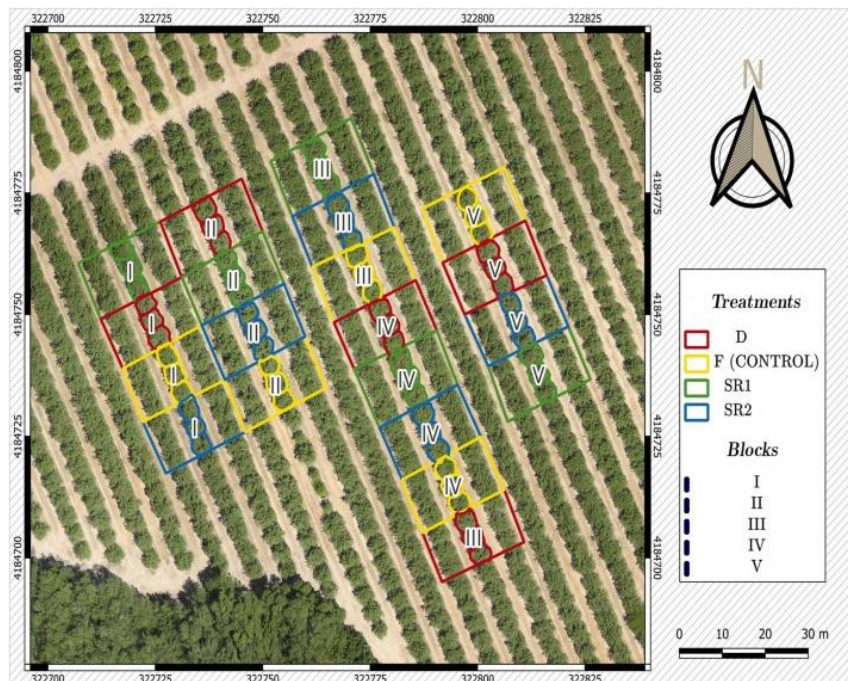
Η μελέτη των Orozco-Moran et al., 2025 αξιολόγησε μια μεθοδολογία προγραμματισμού άρδευσης για οπωρώνες αμυγδάλου, η οποία είχε μελετηθεί προηγουμένως σε πειραματικούς αγρούς και εφαρμόστηκε σε έναν εμπορικό οπωρώνα (cv. Lauranne) για μια περίοδο τεσσάρων ετών, ενσωματώνοντας νέες τεχνολογίες για τον χαρακτηρισμό του θόλου και την αξιολόγηση της υδατικής καταπόνησης.

Μελετήθηκαν τέσσερις αρδευτικές μεταχειρίσεις: μια μεταχείριση ελέγχου (F) με βάση την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας που εκτιμήθηκε με τη χρήση του συντελεστή καλλιέργειας που προέκυψε από το LiDAR, δύο μεταχειρίσεις υπεραντλήσεως (SR1, SR2) με 22 % και 44 % αύξηση της αρδεύσεως, και μια ελλειμματική (D) με 30 % μείωση σε σχέση με την F. Παρά την αύξηση της ποσότητας του νερού κατά 22 % και 44 % στις μεταχειρίσεις υπεραντλήσεως, δεν παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της απόδοσης σε σύγκριση

με τη μεταχείριση ελέγχου (2800 kg/ha), γεγονός που υποδηλώνει ότι η F αντιπροσωπεύει ένα βέλτιστο επίπεδο αρδύσεως. Αντίθετα, η μεταχείριση με έλλειμμα παρουσίασε σωρευτική μείωση της απόδοσης κατά 20 % κατά τη διάρκεια των τεσσάρων ετών, γεγονός που υπογραμμίζει τον αντίκτυπο της μείωσης της παροχής νερού κάτω από το επίπεδο F στη σωρευτική απόδοση.

Οι προηγμένες τεχνολογίες, όπως το LiDAR για την καταγραφή πληροφοριών για τον θόλο και η τηλεθερμογραφία για την παρακολούθηση της υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας, ήταν απαραίτητες για τη βελτίωση των αποφάσεων προγραμματισμού της άρδευσης.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε έναν αμυγδαλέονα 68,7 εκταρίων που βρίσκεται σε ένα εμπορικό αγρόκτημα (Cortijo La Reina), στο Almodóvar del Río, Córdoba, Ισπανία (37,79°N, 5,71°W) (Εικ. 1). Το κλίμα χαρακτηρίζεται ως τυπικά μεσογειακό, με ζεστά, ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες. Η μέση ετήσια βροχόπτωση ήταν 594 χιλιοστά, κυρίως μεταξύ Οκτωβρίου και Απριλίου. Το έδαφος είναι με αργιλώδη υφή και βάθος περίπου 1,5 m. Η χωρητικότητα και το μόνιμο σημείο μάρανσης για την αποθήκευση νερού στο έδαφος είναι 0,30 cm³ /cm³ και 0,12 cm³ /cm³ , αντίστοιχα.



Εικόνα 3- 6 Διάταξη της περιοχής μελέτης το 2021 με τα πέντε τυχαιοποιημένα μπλοκ με τις τέσσερις μεταχειρίσεις: SR1 και SR2 με 22 % και 44 % αύξηση σε σχέση με το F.

Το πείραμα ξεκίνησε το 2021 επιλέγοντας μια ομοιόμορφη περιοχή εντός του οπωρώνα χωρίς να λείπουν δέντρα. Η απόσταση των δέντρων στον αγρό ήταν 7×4 m (357 δέντρα/στρέμμα) και φυτεύτηκαν το 2018 με την ποικιλία Lauranne, εμβολιασμένη σε υποκείμενο GF-677 (*Prunus persica* x *Prunus amygdalus*). Η καταπολέμηση των παρασίτων και των ασθενειών γινόταν σύμφωνα με ένα ημερολόγιο θεραπείας που προσαρμοζόταν στις καιρικές συνθήκες και στην εμφάνιση των παρασίτων. Τα ζιζάνια ελέγχθηκαν μηχανικά με κούρεμα την άνοιξη και η παρατεταμένη ξηρασία του καλοκαιριού απέτρεψε την περαιτέρω ανάπτυξη.

Το σύστημα άρδευσης περιελάμβανε δύο γραμμές στάγδην άρδευσης που εγκαταστάθηκαν εκατέρωθεν κάθε δέντρου. Κατά μήκος αυτών των γραμμών, οι εκτοξευτήρες με αντιστάθμιση πίεσης τοποθετήθηκαν ανά 0,75 m και ο καθένας παρείχε 2,3 l/h. Συνολικά, κάθε δέντρο αρδεύονταν από 12 πομπούς.

Η περίοδος άρδευσης για τα τέσσερα έτη μελέτης άρχισε με την έναρξη της άνοιξης στις αρχές Απριλίου, υποθέτοντας ότι το έδαφος ήταν κοντά στη χωρητικότητα του χωραφιού και ολοκληρώθηκε με την άφιξη των πρώτων φθινοπωρινών βροχών μετά το καλοκαίρι. Ο προγραμματισμός της άρδευσης για τη μεταχείριση ελέγχου (F) σχεδιάστηκε έτσι ώστε να ταιριάζει με τις ανάγκες εξατμισοδιαπνοής (ETc) της καλλιέργειας, με βάση τους συντελεστές καλλιέργειας (Kc) που έχουν ήδη δημοσιευτεί.

Αυτό περιελάμβανε τον υπολογισμό των αναγκών άρδευσης με βάση τη συνδυασμένη διαπνοή της καλλιέργειας και την εξάτμιση από τη διαβρεγμένη επιφάνεια του εδάφους και λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική βροχύπτωση κατά τη διάρκεια της περιόδου άρδευσης. Επίσης, το απόθεμα εδαφικού νερού αξιοποιείται κατά την εκτέλεση ενός εποχιακού προγραμματισμού, με στόχο τη χρήση ενός κλάσματος του διαθέσιμου εδαφικού νερού στην αρχή της περιόδου αναλογικά κατά τη διάρκεια της αρδευτικής εκστρατείας.

Η ποσότητα άρδευσης υπολογίστηκε σε εβδομαδιαία βάση, από την αρχή της αρδευτικής περιόδου, ευθυγραμμισμένη με τις επιχειρησιακές πρακτικές της υπό μελέτη εμπορικής εκμετάλλευσης. Έτσι, η εβδομαδιαία ποσότητα άρδευσης προσδιορίζεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$IR = ET - P_{eff} - R_i \quad (6)$$

Όπου IR αντιπροσωπεύει την εβδομαδιαία απαιτούμενη άρδευση, ET είναι η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας της προηγούμενης εβδομάδας, P_{eff} είναι η πραγματική βροχύπτωση της προηγούμενης εβδομάδας και R_i είναι το εβδομαδιαίο κλάσμα του εποχιακού αποθέματος εδαφικού νερού, το οποίο υπολογίζεται εκ των προτέρων αλλά προσαρμόζεται εβδομαδιαία με βάση το υδατικό ισοζύγιο ώστε να διασφαλίζεται η χρήση από την καλλιέργεια χωρίς να φτάνει στο επιτρεπτό επίπεδο εξάντλησης.

Η ET υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας:

$$ET = ET_0 * K_c \quad (7)$$

Όπου ET_0 είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και K_c είναι ο συντελεστής καλλιέργειας που υπολογίστηκε σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία. Η IR μετατράπηκε σε χρόνο άρδευσης με βάση τον αριθμό των εκτοξευτών ανά δέντρο, τη ροή τους και την πυκνότητα των δέντρων.

Με βάση μια μελέτη λυσιμέτρου, ο υπολογισμός του συντελεστή καλλιέργειας μπορεί να βασιστεί στην εδαφοκάλυψη, η οποία οδηγεί σε ένα μέγιστο που μπορεί να προσαρμοστεί με βάση τα εποχιακά στάδια ανάπτυξης. Αυτό μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$K_c = b K_{cmax} \quad (8)$$

όπου b είναι ένας συντελεστής που μεταβάλλεται ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, αντικατοπτρίζοντας την αυξανόμενη ζήτηση νερού καθώς προχωρά η εποχή. Ως εκ τούτου, το b αυξάνεται σταδιακά από τις αρχές της Άνοιξης έως το Καλοκαίρι (Απρίλιος έως Ιούνιος στο βόρειο ημισφαίριο), φθάνοντας σε μέγιστες τιμές στα μέσα του καλοκαιριού (Ιούλιος, Αύγουστος και Σεπτέμβριος στην περιοχή μελέτης).

Η εδαφοκάλυψη υπολογίστηκε εδώ με βάση την επιφάνεια της κόμης των δέντρων και την απόσταση μεταξύ τους. Η έκταση της κόμης των δέντρων προσδιορίστηκε με τη χρήση ενός LiDAR (Zeanmuse L1, DJI Enterprise, Κίνα) τοποθετημένου σε ένα πολυρότορο UAV (M3000 RTK, DJI Enterprise, Κίνα). Η πτήση πραγματοποιήθηκε σε ύψος 80 m πάνω από το έδαφος για τη λήψη πληροφοριών από ολόκληρο τον εμπορικό οπωρώνα. Για να διασφαλιστεί η ακριβής οριοθέτηση των θόλων, η πτήση σχεδιάστηκε με μετωπική επικάλυψη 70 % και πλευρική επικάλυψη 50 %, η οποία επιτρέπει την ακριβή οριοθέτηση των θόλων με τη λήψη της τρισδιάστατης αναπαράστασης του οπωρώνα.

Τα δεδομένα LiDAR επεξεργάστηκαν με το λογισμικό DJI Terra (v1.4.0, DJI Technology Co., Ltd, Κίνα) και το νέφος σημείων εξήχθη σε μορφή LAS. Για τον εντοπισμό και την οριοθέτηση των μεμονωμένων δέντρων από το νέφος σημείων LiDAR, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ύψους θόλου (CHM) μετά την ταξινόμηση των επίγειων και μη επίγειων σημείων και την κανονικοποίηση του νέφους σημείων, το οποίο εκτιμά την απόσταση των σημείων από το έδαφος (Zhang et al., 2003). Η οριοθέτηση των δέντρων υπολογίστηκε με τη χρήση

εσωτερικών σεναρίων Python (v3.11, Python Software Foundation, ΗΠΑ). Το εμβαδόν κάθε πολυγώνου κόμης δέντρου υπολογίστηκε και το μέσο ύψος του δέντρου εκτιμήθηκε επίσης από το CHM.

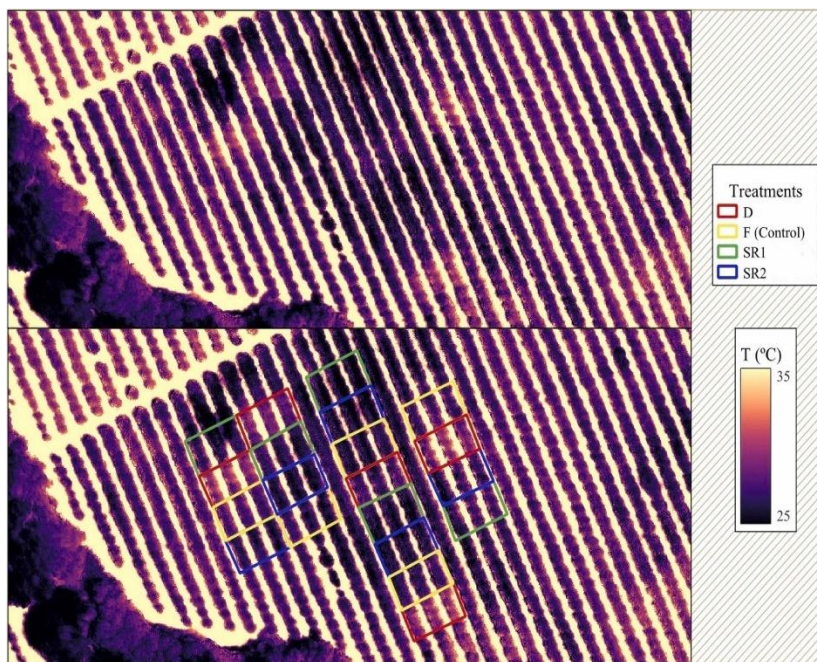
Μια πτήση με μη επανδρωμένο αεροσκάφος πάνω από τον οπωρώνα πραγματοποιήθηκε κάθε χρόνο γύρω στα μέσα Αυγούστου με τη χρήση ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους σταθερής πτέρυγας (eBee-X RTK, SenseFly, Ελβετία), εξοπλισμένου με ένα διπλό σύστημα απεικόνισης RGB-θερμικής ακτινοβολίας (Duet-T, SenseFly, Ελβετία). Η πτήση εκτελέστηκε σε ύψος 120 m πάνω από το έδαφος, επιτυγχάνοντας χωρική ανάλυση 15 cm στη θερμική ζώνη.

Στη συνέχεια, οι εικόνες που αποκτήθηκαν υποβλήθηκαν σε επεξεργασία μέσω του λογισμικού Pix4D (Pix4D SA, Ελβετία) για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου χάρτη της θερμοκρασίας του θόλου. Η διαδικασία οριοθέτησης των δέντρων συνδυάστηκε με τον θερμικό χάρτη για την εξαγωγή τμηματικών στατιστικών στοιχείων για τη μέση θερμοκρασία κάθε δέντρου. Η προσέγγιση αυτή παρείχε υψηλή ακρίβεια στις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις, καθώς τόσο οι πτήσεις LiDAR όσο και οι θερμικές πτήσεις πραγματοποιήθηκαν με κινηματικό εντοπισμό σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας ακρίβεια σε επίπεδο εκατοστού. Αυτή η ακρίβεια εξασφάλισε ότι τα δεδομένα θερμοκρασίας μπορούσαν να χαρτογραφηθούν αξιόπιστα σε μεμονωμένα δέντρα, ενισχύοντας τη συνέπεια και την αξιοπιστία των θερμικών μετρήσεων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

Η άρδευση προγραμματιζόταν εβδομαδιαία από τον υπεύθυνο του αγροκτήματος σύμφωνα με το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για τα δέντρα ελέγχου, λαμβάνοντας υπόψη τις προβλέψεις της εξατμισοδιαπνοής για να εξασφαλιστεί η βέλτιστη εφαρμογή νερού για τα δέντρα. Για την ακριβή παρακολούθηση της διαδικασίας άρδευσης, εγκαταστάθηκε ένας υδρομετρητής σε έναν από τους πλευρικούς αγωγούς άρδευσης στην έξοδο της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας στον τομέα άρδευσης όπου διεξήχθη η μελέτη. Ο μετρητής αυτός έχει σχεδιαστεί για να εκπέμπει έναν παλμό για κάθε καθορισμένο όγκο νερού που εφαρμόζεται, παρέχοντας ακριβείς μετρήσεις των συμβάντων άρδευσης. Η ενσωμάτωση του υδρομετρητή στο υπάρχον δίκτυο αισθητήρων επιτεύχθηκε με τη χρήση ενός κόμβου LoRaWAN που μετρά παλμούς (CPL01, Dragino, Κίνα). Αυτή η ρύθμιση επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, με τις μετρήσεις παλμών να αποστέλλονται κάθε 10 λεπτά.

Αναλύοντας αυτές τις μετρήσεις παλμών, μπορεί να υπολογιστεί η διάρκεια κάθε συμβάντος άρδευσης, επιτρέποντας στον διαχειριστή να

αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα του προγράμματος άρδευσης. Για τον προσδιορισμό του συνολικού όγκου νερού που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια κάθε συμβάντος άρδευσης, οι υπολογισμοί βασίστηκαν στον αριθμό των εγκατεστημένων σταλακτήρων και στις αντίστοιχες παροχές τους για κάθε επεξεργασία.



Εικόνα 3- 7 Οι θερμικές εικόνες από την πτήση που πραγματοποιήθηκε το 2023 πάνω από τον εμπορικό οπωρώνα εμφανίζουν τη σχετική κατανομή της θερμοκρασίας. Στην επάνω υποεικόνα, παρουσιάζεται το θερμικό πρότυπο της δοκιμής, όπου τα μπλοκ που αντιστοιχούν στις μεταχειρίσεις ελλειμματικής άρδευσης (D) και υπεράρδευσης (SR1 και SR2) διακρίνονται σαφώς και αντιπροσωπεύονται με χρωματικές μεταβολές. Το κάτω υποσχήμα επιβεβαιώνει τη θέση αυτών των μεταχειρίσεων, με τα μπλοκ χρωματισμένα και επικαλυμμένα στον θερμικό χάρτη: κόκκινο για το D (-33 %), πράσινο για το F (έλεγχος), μπλε για το SR1 (+33 %) και μοβ για το SR2 (+66 %). Η χρωματική κλίμακα αντικατοπτρίζει τις σχετικές θερμοκρασίες, που κυμαίνονται από 25 έως 35 βαθμούς.

Παρά την εφαρμογή καθεστώτων άρδευσης που εφάρμοζαν 22 % και 44 % περισσότερο νερό από το F, δεν παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της απόδοσης κατά τα τέσσερα έτη μελέτης σε σύγκριση με το αρχικό καθεστώς άρδευσης (F). Αντίθετα, όταν η άρδευση μειώθηκε κάτω από το εκτιμώμενο πρόγραμμα (D), οι αποδόσεις μειώθηκαν, ιδίως κατά το τέταρτο έτος, συσσωρεύοντας απώλεια 20 % κατά τα τέσσερα έτη σε σύγκριση με τη μεταχείριση ελέγχου. Τα ευρήματα αυτά καταδεικνύουν ότι η μεταχείριση F ανταποκρινόταν στις πραγματικές απαιτήσεις της καλλιέργειας, καθώς παρά τη σημαντική αύξηση του εφαρμοζόμενου νερού για

τα SR1 και SR2, αυτό δεν μεταφράστηκε σε βελτίωση της απόδοσης. Αυτό υποδηλώνει ότι ο συνδυασμός του νερού άρδευσης μαζί με τη χρήση του αποθηκευμένου εδαφικού νερού από τους χειμερινούς μήνες ήταν επαρκής για την κάλυψη των πραγματικών απαιτήσεων της καλλιέργειας στη μεταχείριση F.

Κατά τη διερεύνηση των επιδράσεων των καθεστώτων άρδευσης στις διάφορες συνιστώσες της απόδοσης και στις παραμέτρους που μπορούν να καθορίσουν την πραγματική απόδοση, είναι προφανές ότι η άρδευση έχει σαφή επίδραση στον όγκο των δέντρων. Παρατηρώντας ότι ο όγκος και το μοναδιαίο βάρος των καρπών είναι ευθέως ανάλογα με την ποσότητα άρδευσης που εφαρμόζεται, γίνεται σαφές ότι η σωστή διαχείριση του νερού είναι κρίσιμη όχι μόνο για την απόδοση αλλά και για την ποιότητα των καρπών.

Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας του θόλου των δέντρων σε πραγματικό χρόνο αποδείχθηκαν αποτελεσματικές για την παρακολούθηση της κατάστασης του νερού των καλλιεργειών, γεγονός που υποδηλώνει ότι η χρήση τους σε συνδυασμό με το υδατικό ισοζύγιο θα μπορούσε να αυξήσει την ακρίβεια του προγραμματισμού της άρδευσης σε εμπορικές συνθήκες. Η μελέτη αξιολόγησε μια απλή μέθοδο προγραμματισμού άρδευσης με βάση το υδατικό ισοζύγιο εδάφους, η οποία συνδυάζει την εφαρμοζόμενη άρδευση με τη χρήση του αποθηκευμένου εδαφικού νερού, ως πρακτική προσέγγιση για τους γεωργούς. Για να ενισχυθεί η ακρίβειά της, συμπληρώθηκε με δεδομένα τηλεπισκόπησης και θερμογραφικούς αισθητήρες για την ανίχνευση της υδατικής καταπόνησης.

Γ) Εφαρμογή ελέγχου ζιζανίων και μεταβλητής εφαρμογής ζιζανιοκτόνων

Τα ζιζάνια αναφέρονται γενικά σε ανεπιθύμητη βλάστηση που αναπτύσσεται σε κήπους, λιβάδια ή γεωργικές εκτάσεις. Τα φυτά αυτά συχνά ανταγωνίζονται τα επιθυμητά φυτά για θρεπτικά συστατικά, νερό και ηλιακό φως, τα οποία επηρεάζουν αρνητικά την υγεία των καλλιεργειών και μειώνουν την παγκόσμια παραγωγή αποδόσεων κατά 34 %. Επομένως, ο έλεγχος αυτών των ζιζανίων είναι πολύ σημαντικός στη γεωργική πρακτική για τη διατήρηση της παραγωγικότητας των καλλιεργούμενων εκτάσεων. Κατά συνέπεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι για τον έλεγχο αυτών των ζιζανίων, όπως η χειρωνακτική απομάκρυνση, η εφαρμογή ζιζανιοκτόνων και οι καλλιεργητικές πρακτικές (El Hafyani et al., 2025).

Στη μελέτη των El Hafyani et al. (2025), χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα UAV για τη χαρτογράφηση ζιζανίων, παρέχοντας μια υψηλής ανάλυσης και

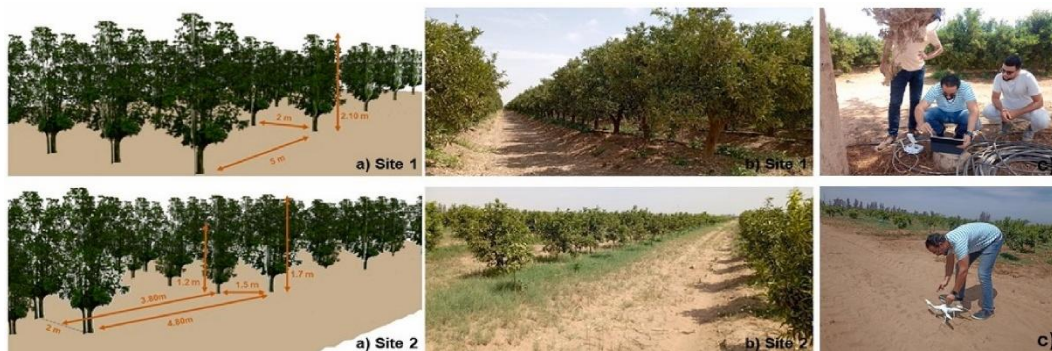
αποτελεσματική μέθοδο για την παρακολούθηση της κατανομής των ζιζανίων σε γεωργικούς αγρούς. Η χρήση UAVs επέτρεψε τη συλλογή λεπτομερών αεροφωτογραφιών, οι οποίες αποτυπώνουν τη χωρική μεταβλητότητα και την έκταση των προσβολών από ζιζάνια σε μεγάλες εκτάσεις.

Ως αποτέλεσμα, τα δεδομένα πεδίου που συλλέχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν όχι μόνο ως δεδομένα εισόδου αλλά και για την επικύρωση αλγορίθμων ταξινόμησης μηχανικής μάθησης. Αυτοί οι αλγόριθμοι εκπαιδεύτηκαν για τη διάκριση μεταξύ ζιζανίων και καλλιεργειών, αξιοποιώντας τις υψηλής ποιότητας εικόνες για τον ακριβή εντοπισμό και την ταξινόμηση διαφόρων ειδών ζιζανίων. Τα δεδομένα που προέκυψαν από UAV παρείχαν ένα πλούσιο σύνολο δεδομένων που ενίσχυσε την ευρωστία και την ακρίβεια των μοντέλων μηχανικής μάθησης.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη λεκάνη Σους-Μάσα, η οποία είναι γνωστή για τη γεωργική της δραστηριότητα και την ποικιλία των καλλιεργειών της. Κλιματολογικά, η περιοχή χαρακτηρίζεται από ημίξηρο κλίμα με επιρροή της Σαχάρας, με χαμηλές και ακανόνιστες ετήσιες βροχοπτώσεις με μέσο όρο 200 mm/έτος.

Η εφαρμογή αυτή πραγματοποιήθηκε σε έναν αγροτικό οπωρώνα εσπεριδοειδών στην περιοχή Sebt El Guerdane, περίπου 54 χλμ. ανατολικά της πόλης Αγκαντίρ. Η περιοχή αυτή είναι φυτεμένη με εσπεριδοειδή ηλικίας 12 ετών και 1,5 ετών, οργανωμένα με απόσταση 2 m μεταξύ κάθε φυτού, με πυκνότητα των δέντρων περίπου 1000 και 1500 δέντρα/ha για τις περιοχές 1 και 2, αντίστοιχα. Η περιοχή ποτίζεται καθημερινά με σύστημα στάγδην άρδευσης με διαφορετική ποσότητα νερού που κυμαίνεται από 1 mm/ημέρα έως 3,5 mm/ημέρα, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, το στάδιο της καλλιέργειας και τη διαθεσιμότητα του νερού. Αυτή η συγκεκριμένη διάταξη επιτρέπει τη δημιουργία βέλτιστων συνθηκών ανάπτυξης, εξασφαλίζοντας ότι κάθε δέντρο έχει επαρκή χώρο για την επέκταση των ριζών και του θόλου, που είναι ζωτικής σημασίας για την υγιή ανάπτυξη και την υψηλή απόδοση.

Η διάταξη του χώρου έχει σχεδιαστεί για να διευκολύνει τις αποτελεσματικές γεωργικές πρακτικές, συμπεριλαμβανομένης της άρδευσης, της λίπανσης και της διαχείρισης των παρασίτων. Οι αποστάσεις των 2 μέτρων όχι μόνο βοηθούν στη διατήρηση της υγείας των φυτών, αλλά επιτρέπουν επίσης την εύκολη πρόσβαση για τις δραστηριότητες συντήρησης και συγκομιδής. Αυτή η συστηματική οργάνωση είναι απαραίτητη για τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας του οπωρώνα εσπεριδοειδών.



Εικόνα 3- 8 α) τρισδιάστατα μοντέλα των δομών των δέντρων στην τοποθεσία 1 και 2, που απεικονίζουν το ύψος και την απόσταση των δέντρων, β) επίγεια άποψη των σειρών δέντρων και γ) ανάπτυξη UAV για έρευνα πεδίου.

Η αποστολή πεδίου πραγματοποιήθηκε στις 15 Φεβρουαρίου 2024 για τη συλλογή των δεδομένων του UAV και των επίγειων δεδομένων. Για την εξαγωγή του ορθομωσαϊκού σε RGB και πολυφασματικές ζώνες πραγματοποιήθηκε μια διαδοχή των βημάτων φωτογραμμετρικής επεξεργασίας με τη χρήση του προγράμματος Agisoft Metashape. Ξεκινώντας από την ευθυγράμμιση της εικόνας η οποία παράγει ένα αραιό νέφος σημείων. Περνώντας από τη γεωαναφορά με τη χρήση των GCPs και τη δημιουργία του πυκνού νέφους που αυξάνει τον αριθμό των σημείων, ενισχύοντας την ακρίβεια και τη λεπτομέρεια.

Μετά την εξαγωγή των εικόνων διαφορών, υπολογίστηκαν δύο φασματικοί δείκτες, όπως ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (NDVI) και ο κανονικοποιημένος δείκτης νερού (NDWI). Αυτοί οι δείκτες υπολογίζονται από τις τιμές ανάκλασης των ζωνών και έχουν σχεδιαστεί για την κατανόηση συγκεκριμένων συνθηκών στην επιφάνεια. Στην προκειμένη περίπτωση οι δείκτες αυτοί υπολογίστηκαν για την κατανόηση του φασματικού προφίλ των διαφόρων κλάσεων και τη διάκριση των κλάσεων με φασματική ομοιότητα, όπως οι κλάσεις των εσπεριδοειδών και των ζιζανίων. Στη συνέχεια, η ταξινόμηση πραγματοποιήθηκε για κάθε τοποθεσία ανεξάρτητα, χρησιμοποιώντας διάφορους αλγόριθμους.

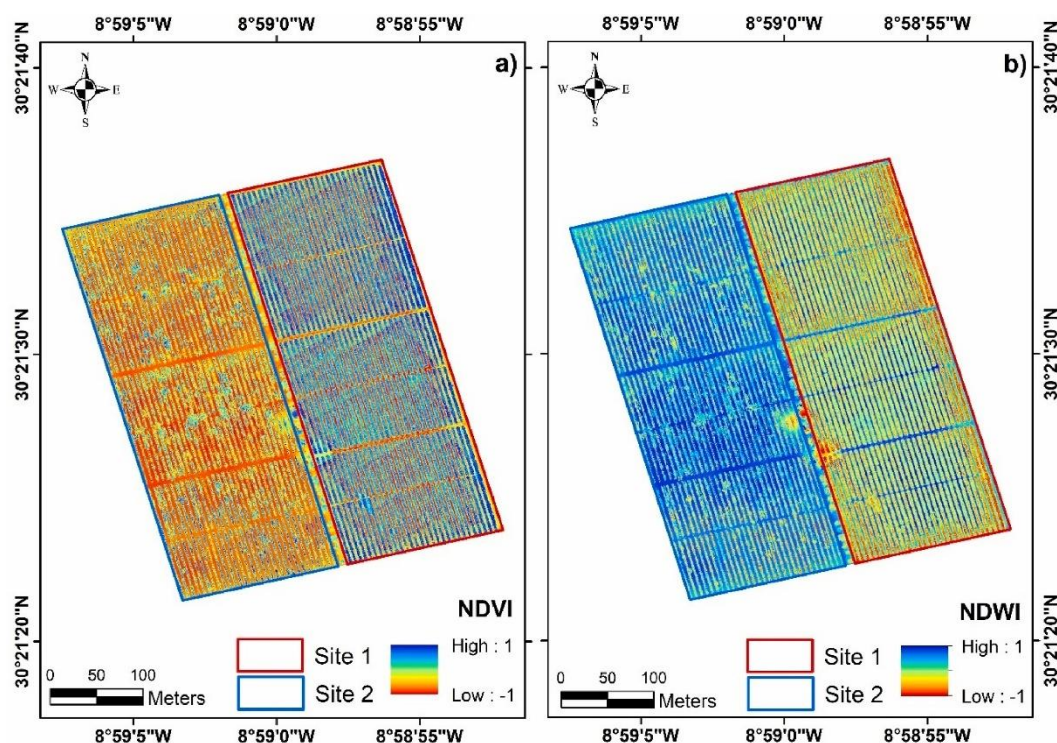
Η ανάλυση αποκάλυψε μια υψηλή φασματική ομοιότητα μεταξύ των εσπεριδοειδών και των ζιζανίων, με μια μικρή αύξηση στις τιμές ανάκλασης για την κατηγορία των εσπεριδοειδών. Τόσο τα εσπεριδοειδή όσο και τα ζιζάνια παρουσίασαν υψηλή ανακλαστικότητα στις ζώνες εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR) και RedEdge, γεγονός που αποτέλεσε πρόκληση για τη διάκριση αυτών των κλάσεων κατά τη διαδικασία ταξινόμησης λόγω της φασματικής τους επικάλυψης.

Το φασματικό προφίλ του εδάφους, από την άλλη πλευρά, επέδειξε υψηλές τιμές στις μπλε, πράσινες και κόκκινες ζώνες, οι οποίες αποκλίνουν από το τυπικό φασματικό προφίλ που αναμένεται για το έδαφος. Αυτή η ασυνήθιστη φασματική συμπεριφορά υποδήλωνε πιθανή επίδραση εξωτερικών παραγόντων, όπως η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, η οργανική ύλη ή η παρουσία υπολειμμάτων.

Για να αντιμετωπιστεί το ζήτημα της φασματικής ομοιότητας και να ενισχυθεί ο διαχωρισμός μεταξύ των κλάσεων, υπολογίστηκαν ο NDVI και ο NDWI. Ο NDVI βοήθησε στη διαφοροποίηση της βλάστησης από τις περιοχές χωρίς βλάστηση, δίνοντας έμφαση στην αντίθεση μεταξύ της υψηλής ανακλαστικότητας στη ζώνη NIR και της χαμηλής ανακλαστικότητας στην κόκκινη ζώνη, χαρακτηριστικό της υγιούς βλάστησης. Το NDWI, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της περιεκτικότητας σε νερό εντός της βλάστησης και του εδάφους, παρέχοντας πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τη φασματική συμπεριφορά των διαφόρων κατηγοριών.

Αυτοί οι δείκτες συνέβαλαν καθοριστικά στη βελτίωση της ακρίβειας ταξινόμησης, αναδεικνύοντας τις μοναδικές φασματικές υπογραφές κάθε κλάσης. Οι υπολογιζόμενες τιμές NDVI και NDWI παρείχαν σαφέστερη διάκριση μεταξύ εσπεριδοειδών, εδάφους και ζιζανίων, διευκολύνοντας μια πιο αξιόπιστη διαδικασία ταξινόμησης. Αυτή η ολοκληρωμένη ανάλυση υπογράμμισε τη σημασία της χρήσης φασματικών δεικτών για τον μετριασμό των προκλήσεων που θέτουν οι φασματικές ομοιότητες και τη βελτίωση της συνολικής ακρίβειας της ταξινόμησης χρήσεων γης με τη χρήση δεδομένων UAV.

Οι κλάσεις εσπεριδοειδών και ζιζανίων έχουν πολύ υψηλές τιμές για τον NDVI, ενώ η κλάση εδάφους παρουσιάζει χαμηλές τιμές για τον δείκτη αυτό. Για τον NDWI, τα εσπεριδοειδή και τα ζιζάνια παρουσιάζουν χαμηλή τιμή, ενώ το έδαφος παρουσιάζει υψηλή τιμή του δείκτη αυτού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το έδαφος είναι υγρό και οι εικόνες λήφθηκαν μετά από ένα βροχερό γεγονός. Αυτό μπορεί επίσης να εξηγήσει τα φασματικά προφίλ του εδάφους που εμφάνισαν υψηλή τιμή στις μπλε, πράσινες και κόκκινες ζώνες.



Εικόνα 3- 9 Χάρτες φασματικών δεικτών, α) NDVI, β) NDWI.

Συγκρίνοντας τους δύο χάρτες, μπορούν να εντοπιστούν συσχετίσεις μεταξύ της υγείας της βλάστησης (NDVI) και της περιεκτικότητας σε νερό (NDWI). Για παράδειγμα, οι περιοχές με υψηλό NDVI θα πρέπει θεωρητικά να έχουν και υψηλό NDWI, υποδεικνύοντας ότι η υγιής βλάστηση συνδέεται συχνά με καλή διαθεσιμότητα νερού. Οι διαφορές μεταξύ των δύο δεικτών μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό ανωμαλιών, όπως περιοχές όπου υπάρχει βλάστηση αλλά παρουσιάζει σημάδια υδατικής καταπόνησης (υψηλός NDVI αλλά χαμηλός NDWI) ή περιοχές όπου υπάρχει υγρασία αλλά η βλάστηση είναι αραιή (υψηλός NDWI αλλά χαμηλός NDVI).

Τα αποτελέσματα της ταξινόμησης που εξήχθησαν από τους αλγορίθμους αξιολογήθηκαν και αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας τα δεδομένα επικύρωσης των συλλεχθέντων δεδομένων βασικής αλήθειας και υπολογίζοντας τη συνολική ακρίβεια, τον συντελεστή kappa του Cohen και τον πίνακα σύγχυσης. Η συνολική ακρίβεια είναι το ποσοστό των σωστά ταξινομημένων δεδομένων επί του συνόλου των περιπτώσεων στο σύνολο των δεδομένων. Παρέχει ένα απλό μέτρο απόδοσης, υποδεικνύοντας πόσα σημεία δεδομένων αναγνωρίστηκαν σωστά από τον αλγόριθμο ταξινόμησης. Από την άλλη πλευρά, ο συντελεστής kappa του Cohen χρησιμεύει ως δείκτης της συμφωνίας μεταξύ των κλάσεων που προκύπτουν από τον ταξινομητή και των πραγματικών δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα η συμφωνία να προκύψει τυχαία. Ο συντελεστής αυτός κυμαίνεται από -1 έως 1, όπου το 1 υποδηλώνει τέλεια συμφωνία, το 0 υποδηλώνει καμία συμφωνία πέραν της τύχης και οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν διαφωνία. Η

αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έδειξε σημαντικές διαφορές στις επιδόσεις των διαφόρων αλγορίθμων. Ο αλγόριθμος ταξινόμησης μέγιστης πιθανοφάνειας (MLC) πέτυχε συνολική ακρίβεια 90,00 % και 97,05 % και συντελεστή Cohen's kappa 0,81 και 0,95 για την περιοχή 1 και την περιοχή 2 αντίστοιχα, γεγονός που υποδηλώνει υψηλό επίπεδο συμφωνίας και αξιοπιστίας.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, εφαρμόστηκε μια συνδυασμένη προσέγγιση δεδομένων UAV και αλγορίθμων ML (machine learning) για την ανίχνευση των ζιζανίων σε κλίμακα αγροτεμαχίου. Τα αποτελέσματα έδειξαν την απόδοση των δεδομένων UAV στην ανίχνευση ζιζανίων με τη χρήση αλγορίθμων ML με υψηλή ακρίβεια. Αυτό επιτεύχθηκε χάρη στην υψηλή χωρική ανάλυση των δεδομένων UAV. Αυτή η εντός της εποχής, ακριβής ανίχνευση μπορεί να μειώσει την ανίχνευση ζιζανίων στο έδαφος και να επιτρέψει την αυτόματη και τη βελτιστοποίηση του ψεκασμού ζιζανιοκτόνων.

Οι εικόνες UAV για την ανίχνευση ζιζανίων αντιπροσωπεύουν σημαντικές ευκαιρίες όσον αφορά την ακρίβεια και τη χωρική και χρονική ανάλυση. Βασίζεται σε έναν συνδυασμό εξοπλισμού υψηλής ποιότητας, προηγμένου λογισμικού επεξεργασίας εικόνας. Κατά συνέπεια, ο προσεκτικός σχεδιασμός και η τακτική επικύρωση είναι ουσιώδεις για την επίτευξη αξιόπιστων, αξιοποιήσιμων αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την ακρίβεια, την αποτελεσματικότητα, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και τη βελτίωση της απόδοσης των καλλιεργειών.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Αξιολόγηση Αποτελεσματικότητας της Μεθόδου

Η εφαρμογή μεταβλητών δόσεων εισροών αποτελεί μία από τις πιο καινοτόμες πρακτικές της γεωργίας ακριβείας, με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας της παραγωγής, τη μείωση του κόστους και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στους οπωρώνες, η υιοθέτηση των μεταβλητών δόσεων εισροών περιλαμβάνει τη χρήση αισθητήρων, δορυφορικών εικόνων και συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), που επιτρέπουν την προσαρμογή της εφαρμογής εισροών στις συγκεκριμένες ανάγκες κάθε σημείου της καλλιέργειας.

Η τεχνολογία αυτή επιτυγχάνει τον εντοπισμό της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας της παραγωγής και ενσωματώνει εργαλεία όπως αισθητήρες εδάφους για την ανάλυση της υγρασίας και της οργανικής ύλης, δορυφορικές εικόνες για τη μέτρηση του δείκτη υγείας της βλάστησης (NDVI) και συστήματα GPS για ακρίβεια στη χαρτογράφηση και την εφαρμογή εισροών (Mulla 2013).

4.2 Ανάλυση Οικονομικών Οφελών

Η οικονομική διάσταση της εφαρμογής της εφαρμογής μεταβλητών δόσεων εισροών είναι σημαντική, καθώς μειώνεται το κόστος εισροών κατά 15%-30%, ενώ η βελτίωση της παραγωγής οδηγεί σε αύξηση των καθαρών κερδών. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή της αντιμετωπίζει ορισμένες προκλήσεις, όπως το υψηλό αρχικό κόστος εξοπλισμού, η ανάγκη εξειδικευμένης τεχνογνωσίας και οι δυσκολίες σε περιοχές με έντονη εδαφική ή κλιματική ανομοιομορφία (Sadler et al., 2005).

Συγκεκριμένα, μειώνεται η κατανάλωση λιπασμάτων κατά 20%-40%, περιορίζοντας τη διαρροή νιτρικών στα υπόγεια ύδατα, καθώς και η κατανάλωση νερού έως και 50%, χάρη στην ακριβή διαχείριση άρδευσης (Fountas et al., 2015). Επιπλέον, μειώνεται η χρήση φυτοφαρμάκων στις περιοχές που δεν παρατηρούνται προσβολές, συμβάλλοντας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη βιωσιμότητα της παραγωγής.

4.3 Περιβαλλοντικά Οφέλη και Βιωσιμότητα

Η χρήση VRT ενσωματώνει τεχνολογίες που υποστηρίζουν τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση των επιπτώσεων στο περιβάλλον και την προσαρμογή των πρακτικών όπου χρειάζεται. Αυτή η προσαρμοστική διαχείριση καθιστά τη μέθοδο έναν κρίσιμο παράγοντα για τη μετάβαση στη βιώσιμη γεωργία, ενώ υποστηρίζει την επίτευξη διεθνών στόχων για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την προστασία των φυσικών οικοσυστημάτων (Mulla, 2013).

Η υπερβολική χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων στις συμβατικές πρακτικές γεωργίας συχνά οδηγεί σε έκπλυση νιτρικών και άλλων ρυπογόνων ουσιών, που καταλήγουν σε υπόγεια και επιφανειακά ύδατα. Η VRT μειώνει σημαντικά αυτόν τον κίνδυνο μέσω της στοχευμένης εφαρμογής εισροών, με βάση τις πραγματικές ανάγκες των φυτών (Fountas et al., 2015).

Η άρδευση είναι επίσης μία από τις πιο ενεργοβόρες και υδατοβόρες διαδικασίες στη γεωργία. Με τη χρήση συστημάτων VRT για τη διαχείριση άρδευσης, οι παραγωγοί μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση νερού κατά 30%-50% (Sadler et al., 2005). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω αισθητήρων εδάφους και χαρτογράφησης, που εντοπίζουν τις ζώνες με διαφορετικές ανάγκες υγρασίας, αποτρέποντας την υπερβολική άρδευση και την αλάτωση των εδαφών.

Η στοχευμένη διαχείριση εισροών βελτιώνει τη συνολική υγεία του εδάφους, καθώς αποφεύγεται η υπερβολική χρήση χημικών που μπορεί να προκαλέσει αποσταθεροποίηση της οργανικής ύλης και μείωση της βιοποικιλότητας του εδάφους (Robertson et al., 2016). Η μείωση αυτών των πιέσεων συμβάλλει στη διατήρηση της παραγωγικής ικανότητας των αγρών σε βάθος χρόνου, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα.

Τέλος, η στοχευμένη εφαρμογή φυτοφαρμάκων μειώνει την έκθεση μη στοχευμένων οργανισμών, όπως επικονιαστών και αρπακτικών εντόμων, σε τοξικές ουσίες (Zhang et al., 2017). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση της ισορροπίας των οικοσυστημάτων γύρω από τους οπωρώνες.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η εφαρμογή της μεθόδου μεταβλητών δόσεων εισροών σε οπωρώνες παρουσιάζει αποτελέσματα που αναδεικνύουν τα πολλαπλά οφέλη της τόσο σε παραγωγικό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου καταδεικνύουν σαφή βελτίωση στην απόδοση των οπωρώνων. Μελέτες έχουν δείξει ότι η στοχευμένη εφαρμογή εισροών μπορεί να αυξήσει την παραγωγή έως και 25%, ενώ παράλληλα βελτιώνει την ποιότητα των καρπών, καθιστώντας τους πιο ομοιογενείς σε μέγεθος, χρώμα και γεύση (Zhang et al., 2017). Αυτό προσφέρει σημαντικά εμπορικά πλεονεκτήματα, ιδιαίτερα για προϊόντα υψηλής αξίας. Επιπλέον, η μείωση των εισροών συμβάλλει στην εξοικονόμηση πόρων, με τη χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων να μειώνεται κατά 15%-30%, ενώ η κατανάλωση νερού μπορεί να μειωθεί έως και 50% σε περιοχές με έντονη ξηρασία (Sadler et al., 2005). Αυτές οι μειώσεις στις εισροές οδηγούν σε χαμηλότερο κόστος παραγωγής και βελτιώνουν τη συνολική οικονομική βιωσιμότητα των οπωρώνων.

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, η μέθοδος αποδεικνύεται εξαιρετικά αποτελεσματική στη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων της γεωργικής δραστηριότητας. Επιπλέον, η εξοικονόμηση υδάτινων πόρων και η καλύτερη διαχείριση του εδάφους ενισχύουν τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των οπωρώνων, καθιστώντας τους ανθεκτικότερους στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Παρά τα εντυπωσιακά οφέλη, η εφαρμογή της μεθόδου συνοδεύεται και από ορισμένες προκλήσεις. Το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης του εξοπλισμού και της τεχνολογίας VRT, καθώς και η ανάγκη για εξειδικευμένη εκπαίδευση των παραγωγών, αποτελούν σημαντικά εμπόδια για την ευρεία υιοθέτησή της. Επιπλέον, η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από την ποιότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων που συλλέγονται, κάτι που απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και συντήρηση των συστημάτων (Fountas et al., 2015).

Ωστόσο, η σταδιακή μείωση του κόστους των τεχνολογιών και η ανάπτυξη πολιτικών υποστήριξης, όπως επιδοτήσεις και προγράμματα κατάρτισης, μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην επίλυση αυτών των ζητημάτων.

Τα εμπόδια για την υιοθέτηση της μεθόδου περιλαμβάνουν:

- Το κόστος κεφαλαίου
- Η οικονομική ανάλυση υποδεικνύει μια ευνοϊκή σχέση κόστους-οφέλους για την υιοθέτηση όταν επιτυγχάνονται μικρές βελτιώσεις στην ποιότητα των καρπών (1% στο packout) ή βελτιώσεις στο μέγεθος των καρπών.
- Το μέγεθος του οπωρώνα
- Την τεχνολογία και τις δεξιότητες δεδομένων
- Για τη λειτουργία του εφαρμογέα απαιτήθηκαν ένας υπολογιστής και ένα smartphone και η χρήση τους μπορεί να αποτελέσει πρόκληση για ορισμένους καλλιεργητές. Ωστόσο, η δυνατότητα ενός κεντρικού ατόμου (όπως ένας γεωπόνος) να προετοιμάζει χάρτες και να τους "σπρώχνει" στο smartphone του χρήστη μπορεί να δώσει τη δυνατότητα σε μια ευρύτερη ομάδα να χρησιμοποιήσει αυτή την τεχνολογία.

Ορισμένα σύγχρονα εργαλεία ελέγχονται πλέον μέσω παρόμοιων οθονών αφής, με τις οποίες η ρύθμιση μπορεί να γίνει από έναν προχωρημένο χρήστη με έναν χειριστή που ουσιαστικά πατάει κουμπιά έναρξης/παύσης και αποδέχεται εργασίες. (Finger, 2024).

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα της εφαρμογής μεταβλητών δόσεων εισροών στους οπωρώνες αποδεικνύουν τη δυναμική της μεθόδου για την επίτευξη υψηλών αποδόσεων, την προστασία του περιβάλλοντος και τη διασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας. Με τη συνεχή εξέλιξη των τεχνολογιών και τη στήριξη από πολιτικές που προωθούν τη βιώσιμη γεωργία, η μέθοδος αυτή μπορεί να αποτελέσει το πρότυπο για την ανάπτυξη του αγροτικού τομέα, ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα και την ανθεκτικότητα των οπωρώνων στο μέλλον.

6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η εφαρμογή της τεχνολογίας μεταβλητών δόσεων εισροών σε οπωρώνες αποτελεί ένα σημαντικό βήμα προς την κατεύθυνση της αειφόρου γεωργίας, συνδυάζοντας την καινοτομία με την περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητα. Μέσα από την αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών, όπως οι αισθητήρες, η δορυφορική χαρτογράφηση και τα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα, η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ακριβή και στοχευμένη διαχείριση των εισροών, προσφέροντας πολλαπλά οφέλη σε παραγωγικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο.

Η εστιασμένη κάλυψη των αναγκών των φυτών, η εξοικονόμηση κρίσιμων πόρων και η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποτελούν τις κύριες αρχές που διέπουν τη μέθοδο, συμβάλλοντας στη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας και στη βιωσιμότητα των οπωρώνων σε βάθος χρόνου. Ωστόσο, ζητήματα όπως η ανάγκη εκπαίδευσης των παραγωγών, η προσαρμογή τους στις νέες τεχνολογίες και το αρχικό κόστος επένδυσης συνιστούν προκλήσεις που απαιτούν άμεση αντιμετώπιση και υποστήριξη από τους εμπλεκόμενους φορείς.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναδείχθηκαν τα οφέλη αλλά και οι δυσκολίες της εφαρμογής της μεθόδου μεταβλητών δόσεων εισροών στους οπωρώνες, παρέχοντας πολύτιμες γνώσεις για την προώθηση αυτής της πρακτικής. Η ενίσχυση της έρευνας, η συνεργασία μεταξύ επιστημόνων και παραγωγών, καθώς και η στήριξη μέσω κατάλληλων πολιτικών εργαλείων είναι κρίσιμοι παράγοντες για την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου.

Με αυτόν τον τρόπο, οι οπωρώνες μπορούν να αποτελέσουν πρότυπο εφαρμογής της γεωργίας ακριβείας, ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα του αγροτικού τομέα, ενώ παράλληλα προστατεύεται το περιβάλλον και εξασφαλίζεται μια πιο βιώσιμη παραγωγική διαδικασία για τις μελλοντικές γενιές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

1. Βασιλακάκης, Μ. Δ. (2016). Γενική και Ειδική Δενδροκομία. Εκδόσεις Γαρταγάνη.
2. Θέριος, Ι. Ν. (2005). Ανόργανη θρέψη και λιπάσματα. Εκδόσεις Γαρταγάνη.
3. Συλλαίος, Ν. (2007). Εισαγωγή στα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και στην τηλεπισκόπηση. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

1. Aggelopoulou, K. D., Pateras, D., Fountas, S., Gemtos, T. A., & Nanos, G. D. (2010). Soil spatial variability and site-specific fertilization maps in an apple orchard. *Precision Agriculture*, 12(1), 118–129.
2. Alam, M., Alam, M. S., Roman, M., Tufail, M., Khan, M. U., & Khan, M. T. (2020). Real-time machine-learning based crop/weed detection and classification for variable-rate spraying in precision agriculture. In *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)* (pp. 273–280). Antalya, Turkey. <https://doi.org/10.1109/ICEEE49618.2020.9102505>
3. Bacenetti, J., Paleari, L., Tartarini, S., Vesely, F. M., Foi, M., Movedi, E., Ravasi, R. A., Bellopede, V., Durello, S., Ceravolo, C., Amicizia, F., & Confalonieri, R. (2020). May smart technologies reduce the environmental impact of nitrogen fertilization? A case study for paddy rice. *Science of The Total Environment*, 715, 136956. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136956>
4. Balafoutis, B., Beck, S., Fountas, J., Vangeyte, T., Van Der Wal, I., Soto, M., Gómez-Barbero, A., Barnes, V., & Eory, V. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity, and economics. *Sustainability*, 9(11), 1339. <https://doi.org/10.3390/su9111339>
5. Belal, A. A., El-Ramady, H., Jalhoum, M., Gad, A., & Mohamed, E. S. (2021). Precision farming technologies to increase soil and crop productivity. In M. Abu-Hashim, F. Khebour Allouche, & A. Negm (Eds.),

- Agro-environmental sustainability in MENA regions (pp. 117–154). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78574-1_6
6. Botta, P., Cavallone, L., Baglieri, G., Colucci, L., Tagliavini, G., & Quaglia, A. (2022). A review of robots, perception, and tasks in precision agriculture. *Applied Mechanics*, 3(4), 830–854. <https://doi.org/10.3390/applmech3040054>
 7. Brown, J., Paudel, A., Biehler, D., Thompson, A., Karkee, M., Grimm, C., & Davidson, J. R. (2024). Tree detection and in-row localization for autonomous precision orchard management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 211, 109454. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109454>
 8. Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
 9. Chang, W., Yang, J., Zhou, L., Wang, S., Peng, J., & Tan, Y. (2022). Fertilization control system research in orchard based on the PSO-BP-PID control algorithm. *Machines*, 10(11), 982. [doi:https://doi.org/10.3390/machines10110982](https://doi.org/10.3390/machines10110982)
 10. Chen, L., Wallhead, M., Reding, M., Horst, L., & Zhu, H. (2020). Control of insect pests and diseases in an Ohio fruit farm with a laser-guided intelligent sprayer. *HortTechnology*, 30, 168–175.
 11. Chen, P., Douzals, J. P., Lan, Y., Cotteux, E., Delpuech, X., Pouxviel, G., & Zhan, Y. (2022). Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 870956. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.870956>
 12. Cisternas, I., Velásquez, I., Caro, A., & Rodríguez, A. (2020). Systematic literature review of implementations of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 176, Article 105626. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626>
 13. Colaço, A. F., & Bramley, R. G. V. (2018). Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *Field Crops Research*, 218, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.022>
 14. Colaço, A. F., & Molin, J. P. (2017). Variable rate fertilization in citrus: A long-term study. *Precision Agriculture*, 18(2), 169–191. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9485-4>
 15. Dlamini, W. M. (2009). Characterization of the July 2007 Swaziland fire disaster using satellite remote sensing and GIS. *Applied Geography*, 29(2), 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.10.007>

16. Ekaso, F., Nex, N., & Kerle, N. (2020). Accuracy assessment of real-time kinematics (RTK) measurements on unmanned aerial vehicles (UAV) for direct geo-referencing. *Geo-Spatial Information Science*, 23(2), 165–181. <https://doi.org/10.1080/10095020.2019.1710437>
17. El Hafyani, M., Saddik, A., Hssaisoune, M., Labbaci, A., ... & [7th Author's Last Name], [Initials]. (2025). Weeds detection in a citrus orchard using multispectral UAV data and machine learning algorithms: A case study from Souss-Massa basin, Morocco. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, XX, Article 101553. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101553>
18. El Nahry, R., Ali, A., & El Baroudy, A. (2011). An approach for precision farming under pivot irrigation system using remote sensing and GIS techniques. *Agricultural Water Management*, 98, 517–531.
19. Ess, D. R., Morgan, M. T., & Parson, S. (2001). Implementing site-specific management: Map-versus sensor-based variable rate application (Pub. No. SSM-2-W). Site-Specific Management Center, Purdue University, West Lafayette, IN.
20. Ferree, D. C., & Warrington, I. J. (Eds.). (2003). *Apples: Botany, Production and Uses*. CABI Publishing.
21. Fine, A. K., Van Es, H. M., & Schindelbeck, R. R. (2017). Statistics, scoring functions, and regional analysis of a comprehensive soil health database. *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 589–601. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.09.0286>
22. Finger, N. (2024, November 6). Variable rate fertiliser applications in orchards: Costs, benefits and return on investment. Apple and Pear Australia Limited (APAL). <https://apal.org.au/variable-rate-fertiliser-applications-in-orchards-costs-benefits-and-return-on-investment/>
23. Fountas, S., et al. (2015). Precision agriculture: A technology that is just arriving. *Journal of Agricultural Engineering*, 46(2), 89-102.
24. Frankelius, P., Norrman, C., & Johansen, K. (2017). Agricultural innovation and the role of institutions: Lessons from the game of drones. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 32(5–6), 681–707. <https://doi.org/10.1007/s10806-017-9703-6>
25. Giles, D. K., & Delwiche, M. J. (1993). Control of orchard spraying based on electronic sensing of target characteristics. *Transactions of the ASAE*, 36(4), 1191–1200.
26. Grisso, R. D., Alley, M. M., Holshouser, D. L., & Thomason, W. E. (2005). Precision farming tools: Soil electrical conductivity.

27. Hanif, A. S., Han, X., Yu, S. H., Han, C., Baek, S. W., Lee, C. G., Lee, D. H., & Kang, Y. H. (2023). Modeling of the control logic of a UASS based on coefficient of variation spraying distribution analysis in an indoor flight simulator. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1235548. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1235548>
28. Hassler, S. C., & Baysal-Gurel, F. (2019). Unmanned aircraft system (UAS) technology and applications in agriculture. *Agronomy*, 9(10), 618. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100618>
29. He, L. (2023). Variable rate technologies for precision agriculture. In Q. Zhang (Ed.), *Encyclopedia of Digital Agricultural Technologies* (pp. 1533–1542). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24861-0_34
30. Higuti, V. A. H., Velasquez, A. E. B., Magalhaes, D. V., Becker, M., & Chowdhary, G. (2019). Under canopy light detection and ranging-based autonomous navigation. *Journal of Field Robotics*, 36(3), 547–567. <https://doi.org/10.1002/rob.21852>
31. Jackson, R. D. (1984). Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. *Remote Sensing: Critical Reviews in Technology*, 0475, 81. <https://doi.org/10.1117/12.966243>
32. Jeon, H. Y., & Zhu, H. (2012). Development of a variable-rate sprayer for nursery and orchard applications. *Transactions of the ASABE*, 55(1), 303–312.
33. Kane, H. D. P., & Ryan, R. (1998). Locating trees using a geographic information system and the global positioning system. *Journal of Arboriculture*, 24(3), 135–142. <https://doi.org/10.48044/jauf.1998.017>
34. Karunathilake, E. M. B. M., Le, A. T., Heo, S., Chung, Y. S., & Mansoor, S. (2023). The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture. *Agriculture*, 13, 1593. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081593>
35. King. (2017). Technology: The future of agriculture. *Nature*, 544(7648), S21–S23. <https://doi.org/10.1038/544S21a>
36. Kumar, P. S., & Dutt, V. S. I. (2020). The global positioning system: Popular accuracy measures. *Materials Today: Proceedings*, 33, 4797–4801.
37. Kumar, S., Karaliya, S. K., & Chaudhary, S. (2017). Precision farming technologies towards enhancing productivity and sustainability of rice-wheat cropping system. *International Journal of Current Microbiology and*

- Applied Sciences, 6(3), 142-151.
<https://doi.org/10.20546/ijemas.2017.603.016>
38. Kumar, S., Wani, A. W., Kaushik, R., Kaur, H., Djajadi, D., Khamidah, A., Saidah, S., Alasbali, N., Alreshidi, M. A., Alam, M. W., Yadav, K. K., & Wani, A. K. (2024). Navigating the landscape of precision horticulture: Sustainable agriculture in the digital age. *Scientia Horticulturae*. Elsevier.
 39. Lan, Y., Zhang, S., Li, W., Hoffmann, W. C., & Ma, C. (2008). Variable rate fertilization for maize and its effects based on the site-specific soil fertility and yield. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, X, 1–10.
 40. Li, B. D., Duval, R., Anex, P., Scharf, J. M., Ashtekar, P. R., Owens, C., & Ellis, C. (2016). A case study of environmental benefits of sensor-based nitrogen application in corn. *Journal of Environmental Quality*, 45(3), 675–683. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.09.0459>
 41. Liakos, V., Smith, E., Fountas, S., Nanos, G., Kalfountzos, D., & Gemtos, T. A. (2020). On-farm evaluation of variable rate fertilizer applications using yield-based mathematical formulae in a Greek apple orchard. *International Journal of Fruit Science*, 20(sup1), S122–S137. <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1702135>
 42. Llorens, J., Gil, E., Llop, J., & Escolà, A. (2010). Ultrasonic and LIDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: Advances to improve pesticide application methods. *Sensors*, 11(2), 2177–2194. <https://doi.org/10.3390/s110202177>
 43. Loures, L., Chamizo, A., Ferreira, P., Loures, A., Castanho, R., & Panagopoulos, T. (2020). Assessing the effectiveness of precision agriculture management systems in Mediterranean small farms. *Sustainability*, 12(11), 3765. <https://doi.org/10.3390/su12113765>
 44. Lowenberg-DeBoer, J. (2022). Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture (ESA Working Paper No. 330794). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Agricultural Development Economics Division (ESA).
 45. Lu, Y., Liu, M., Li, C., Liu, X., Cao, C., Li, X., & Kan, Z. (2022). Precision fertilization and irrigation: Progress and applications. *Agriculture Engineering*, 4(3), 626–656. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4030041>
 46. Lyle, W. M., & Bordovsky, J. P. (1986). Multifunction irrigation system development. *Transactions of the ASAE*, 29(2), 512–516. <https://doi.org/10.13031/2013.30182>

47. Mandal, D., & Ghosh, S. K. (2000). Precision farming – The emerging concept of agriculture for today and tomorrow.
48. Mazzi, A. (2020). Chapter 1 – Introduction. In J. Ren & S. Toniolo (Eds.), Life cycle sustainability assessment for decision-making: Methodologies and case studies (pp. 1–19). Elsevier.
49. Mizik, T. (2023). How can proximal sensors help decision-making in grape production? *Heliyon*, 9, Article e16322. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16322>
50. Mukherjee, S., Misra, N. S., & Raghuwanshi, A. (2019). A survey of unmanned aerial sensing solutions in precision agriculture. *Journal of Network and Computer Applications*, 148, 102461. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.102461>
51. Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114, 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
52. Nackley, L. L., Warneke, B., Fessler, L., Pscheidt, J. W., Lockwood, D., Wright, W. C., Sun, X., & Fulcher, A. (2021). Variable-rate spray technology optimizes pesticide application by adjusting for seasonal shifts in deciduous perennial crops. *HortTechnology*, 31(5), 1–11. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04702-21>
53. Orozco-Moran, R., Jimenez-Berni, J. A., Fereres, E., & Orgaz, F. (2025). Irrigation scheduling of an almond orchard using the water balance and remote and proximal sensing. *Agricultural Water Management*, 313, Article 109455. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109455>
54. Pawase, P. P., Nalawade, S. M., Bhanage, G. B., Walunj, A. A., Kadam, P. B., Durgude, A. G., & Patil, M. G. (2023). Variable rate fertilizer application technology for nutrient management: A review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 16, 11–19.
55. Peterson, T., & Wallenhaupt, N. (1996). Considerations in mapping soil properties or what about this grid sampling. *Crop Insights*, 6, 1–10.
56. Rahman, M. F. F., Fan, S., Zhang, Y., & Chen, L. (2021). A comparative study on application of unmanned aerial vehicle systems in agriculture. *Agriculture*, 11(1), 22. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010022>
57. Raja, A. T., Arunachalam, A. S., & Gobinath, R. (2024). Machine learning in smart agriculture. In *Advanced Technologies for Smart Agriculture* (pp. 129-151). River Publishers.

58. Rehman, A.Z. Abbasi, N. Islam, Z.A. Shaikh A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture Comput. Stand. Interfaces, 36 (2014), pp. 263-270
59. Robertson, M. J., Carberry, P. S., & Wong, M. T. F. (2016). Testing the effectiveness of variable rate technology in addressing spatial variability in Australian cropping systems. *Agricultural Systems*, 142, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.11.003>
60. Román, J., Arnó, S., & Planas, S. (2021). Map-based zonal dosage strategy to control yellow spider mite (*Eotetranychus carpini*) and leafhoppers (*Empoasca vitis* & *Jacobiasca lybica*) in vineyards. *Crop Protection*, 147, Article 105690. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105690>
61. Rusmayadi, G., Mulyanti, D. R., & Alaydrus, Z. A. A. (2023). Revolutionizing agrotechnology: Meeting global food demand through sustainable and precision farming innovations. *West Science Interdisciplinary Studies*, 600-609.
62. Sadler, E. J., et al. (2005). Opportunities for conservation with precision irrigation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60(6), 371-378.
63. Sahu, S. Chatterjee, S. Mukherjee, C. Sharma, C. Author Tools of precision agriculture: a review. 2692 *Int. J. Chem. Stud.*, 7 (2019), pp. 2692-2697
64. Scalisi, A., O'Connell, M. G., Stefanelli, D., Zhou, S., Pitt, T., Graetz, D., Dodds, K., Han, L., De Bei, R., Stanley, J., Breen, K., & Goodwin, I. (2024). Narrow orchard systems for pome and stone fruit—a review. *Scientia Horticulturae*, 338, 113815. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113815>
65. Schumann, A. (2008). Using precision agriculture technology for precise placement and variable rate fertilizer application. South Florida Water Management District. Retrieved from https://www.sfwmd.gov/sites/default/files/documents/2008_bmp_workshop_using_precision_agriculture_technology.pdf
66. Sharma, V., Vaddevolu, U. B. P., Bhambota, S., Ampatzidis, Y., Bayabil, H., & Singh, A. (2024). Variable rate technology and its application in precision agriculture (AE607). University of Florida IFAS Extension. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/AE607>
67. Taseer, A., & Han, X. (2024). Advancements in variable rate spraying for precise spray requirements in precision agriculture using unmanned aerial spraying systems: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 214, 2–18.

68. Tayari, A. R., Jamshid, H. R., & Goodarzi, R. (2015). Role of GPS and GIS in precision agriculture. *Journal of Scientific Research and Development*, 2(3), 157–162.
69. Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>
70. Tustin, D. S., Breen, K. C., & van Hooijdonk, B. M. (2022). Light utilisation, leaf canopy properties and fruiting responses of narrow-row, planar cordon apple orchard planting systems—A study of the productivity of apple. *Scientia Horticulturae*, 294, Article 110778. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110778>
71. Usowicz, J., & Lipiec, J. (2021). Spatial variability of saturated hydraulic conductivity and its links with other soil properties at the regional scale. *Scientific Reports*, 11, 8293. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86862-3>
72. Vatsanidou, G. D., Nanos, G., Fountas, S., Baras, J., Castrignano, A., & Gemtos, T. A. (2017). Nitrogen replenishment using variable rate application technique in a small hand-harvested pear orchard. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15, Article e0209. <https://doi.org/10.5424/sjar/2017151-9988>
73. Wang, S. S., Liu, D. Y., Wang, X. Y., & Liu, J. (2006). Spatial reasoning based spatial data mining for precision agriculture. In H. T. Shen, J. Li, M. Li, J. Ni, & W. Wang (Eds.), *Advanced Web and Network Technologies, and Applications: APWeb 2006* (Vol. 3842, pp. 143-153). Springer. https://doi.org/10.1007/11768278_17
74. Wang, Y., Liu, Z., Zhang, L., Han, Y., Li, H., Zhang, S., Wongsuk, Y., Li, X., Wu, X., & He, X. (2022). Spray performance evaluation of a six-rotor unmanned aerial vehicle sprayer for pesticide application using an orchard operation mode in apple orchards. *Pest Management Science*, 78(6), 2449–2466. <https://doi.org/10.1002/ps.6875>
75. Wei, Z., Xue, X., Salcedo, R., Zhang, Z., Gil, E., Sun, Y., Li, Q., Shen, J., He, Q., Dou, Q., & Zhang, Y. (2023). Key technologies for an orchard variable-rate sprayer: Current status and future prospects. *Agronomy*, 13(1), 59. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010059>
76. Yaqot, M., Menezes, B. C., & Al-Ansari, T. (2022). Roadmap to precision agriculture under circular economy constraints. *Journal of Information & Knowledge Management*, 22(5), 2250092. <https://doi.org/10.1142/s0219649222500927>

77. Yu, Q., Yan, X., Wang, Q., Yang, T., Lu, W., Yao, M., Dong, J., Zhan, J., Huang, X., & Niu, C. (2021). A spatial-scale evaluation of soil consolidation concerning land subsidence and integrated mechanism analysis at macro- and micro-scale: A case study in Chongming East Shoal Reclamation Area, Shanghai, China. *Remote Sensing*, 13(12), 2418. <https://doi.org/10.3390/rs13122418>
78. Zaman, Q. U., Schumann, A. W., & Miller, W. M. (2005). Variable rate nitrogen application in Florida citrus based on ultrasonically-sensed tree size. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(3), 331-335.
79. Zhang, Q., et al. (2017). *Precision agriculture technology for crop farming*. Springer Science & Business Media.
80. Zhu, H., Salyani, M., & Fox, R. D. (2011). A review of air-assisted sprayers for orchard application. *Transactions of the ASABE*, 54(1), 261–271.