

Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας
«ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ο ρόλος της Γεωργίας Ακριβείας στη φυτοπροστασία των
δενδρωδών καλλιεργειών και η επίδραση της κλιματικής αλλαγής.



Χριστίνα Κώτση

Επιβλέπων καθηγητής: Χρήστος Καρυδάς

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Κώτση Χριστίνας που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης η συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας της συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση της συγγραφέα/δημιουργού. Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Ο ρόλος της Γεωργίας Ακριβείας στη φυτοπροστασία των
δενδρωδών καλλιεργειών και η επίδραση της κλιματικής αλλαγής.

Κώτση Χριστίνα

Επιτροπή Επίβλεψης Πτυχιακής / Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Χρήστος Καρυδάς

Νικόλαος Παπαδόπουλος

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Πάτρα, Ιούνιος 2026

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Χρήστο Καρυδά, για την καθοδήγηση, τις παρατηρήσεις και την υποστήριξή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τους διδάσκοντες του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας» του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου για τις γνώσεις και τα ερεθίσματα που μου προσέφεραν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους ανθρώπους που με στήριξαν σε όλη αυτή την προσπάθεια.

*Ο ρόλος της Γεωργίας Ακριβείας στη φυτοπροστασία των δενδρωδών
καλλιεργειών και η επίδραση της κλιματικής αλλαγής.*

Στη μνήμη του πατέρα μου.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάζει τον ρόλο της Γεωργίας Ακριβείας στη φυτοπροστασία των δενδρωδών καλλιιεργειών, καθώς και τη συμβολή της στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που προκύπτουν από την κλιματική αλλαγή. Οι δενδρώδεις καλλιιεργείες, όπως η ελιά, τα εσπεριδοειδή και το ακτινίδιο, αποτελούν σημαντικό τμήμα της ελληνικής γεωργικής παραγωγής και επηρεάζονται άμεσα από μεταβολές στη θερμοκρασία, την υγρασία, τη διαθεσιμότητα νερού και την αυξημένη πίεση από εχθρούς και ασθένειες.

Στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη φυτοπροστασία, τους περιορισμούς της συμβατικής χημικής καταπολέμησης και τις δυνατότητες αξιοποίησης σύγχρονων τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε σε τεχνολογίες όπως η τηλεπισκόπηση, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, τα UAVs, οι αισθητήρες αγρού, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, η μεταβλητή δόση ψεκασμού, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, η βαθιά μάθηση, η ρομποτική και η Τεχνητή Νοημοσύνη.

Από την ανάλυση προκύπτει ότι οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να συμβάλουν στην έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων φυτοπροστασίας, στην παρακολούθηση της υγείας των καλλιιεργειών, στην πρόβλεψη κινδύνων και στη στοχευμένη εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Παράλληλα, μπορούν να περιορίσουν τις άσκοπες επεμβάσεις, να μειώσουν τη χρήση εισροών και να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα των γεωργικών πρακτικών. Συμπερασματικά, η Γεωργία Ακριβείας μπορεί να λειτουργήσει ως σημαντικό εργαλείο προσαρμογής των δενδρωδών καλλιιεργειών στις νέες κλιματικές συνθήκες, υπό την προϋπόθεση ότι οι τεχνολογικές εφαρμογές συνδυάζονται με γεωπονική γνώση, σωστή ερμηνεία των δεδομένων και διεπιστημονική συνεργασία.

Λέξεις – Κλειδιά: Γεωργία Ακριβείας, Φυτοπροστασία, Δενδρώδεις Καλλιιεργείες, Κλιματική Αλλαγή, Τηλεπισκόπηση, UAVs, IoT, Τεχνητή Νοημοσύνη.

The role of Precision Agriculture in the plant protection of tree crops and the impact of climate change.

Christina Kotsi

Abstract

This postgraduate thesis examines the role of Precision Agriculture in the plant protection of tree crops and its contribution to addressing the challenges caused by climate change. Tree crops, such as olive trees, citrus crops and kiwifruit, represent an important part of agricultural production, particularly in Mediterranean countries such as Greece. These crops are increasingly affected by changes in temperature, humidity, water availability and the growing pressure of pests and diseases.

The study is based on a literature review concerning the effects of climate change on plant protection, the limitations of conventional chemical control and the potential use of modern Precision Agriculture technologies. Particular emphasis is placed on remote sensing, Geographic Information Systems, unmanned aerial vehicles, field sensors, decision support systems, variable rate application, Internet of Things technologies, deep learning, robotics and Artificial Intelligence.

The analysis indicates that these technologies can support the early detection of plant protection problems, the monitoring of crop health, the prediction of pest and disease risks and the site-specific application of plant protection products. At the same time, they can contribute to reducing unnecessary interventions, limiting the use of agricultural inputs and improving the environmental sustainability of crop management practices. Overall, Precision Agriculture can be considered an important tool for adapting tree crop protection to new climatic conditions. However, its effective implementation requires the combination of technological tools with agronomic knowledge, reliable data interpretation and interdisciplinary cooperation among agronomists, engineers and data specialists.

Keywords: Precision Agriculture, Plant Protection, Tree Crops, Climate Change, Remote Sensing, UAVs, IoT, Artificial Intelligence.

Περιεχόμενα

Περίληψη	vi
Abstract.....	viii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	xi
Κατάλογος Πινάκων	xii
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	xiii
1. Εισαγωγή.....	1
2. Κλιματική αλλαγή και φυτοπροστασία στις δενδρώδεις καλλιέργειες.....	3
2.1. Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στους παθογόνους οργανισμούς.....	5
2.2. Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στους εντομολογικούς εχθρούς	7
2.3. Χωροκατακτητικά είδη και κλιματική αλλαγή	9
3. Περιορισμοί της χημικής καταπολέμησης: προβλήματα από τη συχνή χρήση φυτοφαρμάκων 13	
3.1. Ορισμοί και διακρίσεις.....	14
3.2. Νομοθετικό πλαίσιο και ανώτατα όρια υπολειμμάτων (MRLs)	14
3.3. Στατιστικά στοιχεία και συμμόρφωση στην Ελλάδα (2024).....	15
4. Τεχνολογίες Γεωργίας Ακριβείας στη φυτοπροστασία των δενδρωδών καλλιιεργειών.....	16
4.1. Η τηλεπισκόπηση στη Γεωργία Ακριβείας.....	18
4.2. Δορυφόροι και κλίμακες παρατήρησης.....	20
4.3. Τηλεπισκόπηση και γεωργία	22
4.4. Αισθητήρες, Τηλεπισκόπηση και μοντέλα πρόβλεψης για τη διαχείριση μυκητολογικών ασθενειών	25
4.5. Αξιοποίηση τεχνικών Βαθιάς Μάθησης (DL) στη φυτοπροστασία.....	28
4.6. IoT, έξυπνοι αισθητήρες και μοντέλα πρόβλεψης στη φυτοπροστασία.....	30
4.7. Ρομποτική και αυτοματισμός στη γεωργία ακριβείας.....	32

4.8. Τεχνητή νοημοσύνη και φυτοπροστασία	35
5. Τηλεπισκόπηση και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support Systems - DSS) στη φυτοπροστασία	37
6. Τεχνολογίες και Εφαρμογές Μεταβλητού Ρυθμού στη Φυτοπροστασία (VRT/VRA): Ψεκασμός μόνο όπου υπάρχει ανάγκη	39
7. UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) και Τηλεπισκόπηση.....	43
7.1. Εκπαιδευτική επίδειξη UAV στο πλαίσιο πρακτικής άσκησης.....	48
8. Εφαρμογή σε συγκεκριμένες καλλιέργειες	50
8.1. 1 ^ο Case Study: Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας στη Φυτοπροστασία Ελαιώνων (Νομός Χανίων)	50
8.2. 2 ^ο Case Study: Σύστημα gaisense στην Καλλιέργεια Πράσινης Ελιάς Χαλκιδικής.....	51
9. Οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας.....	54
10. Ποσοτικά δεδομένα μείωσης εισροών	58
11. Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές.....	60
12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	64

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1 Σύνθεση συστήματος ελέγχου ψεκασμού μεταβλητού ρυθμού βασισμένου σε αισθητήρες LiDAR. Πηγή: Zhang et al. (2025).	41
Εικόνα 2 Κατηγορίες UAV που χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας. Πηγή: Liu et al. (2021).	44
Εικόνα 3 Μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV, εξακόπτερο drone) που αξιοποιήθηκε σε ελαιώνα για εναέρια δολωματική εφαρμογή στο πλαίσιο της διαχείρισης του δάκου της ελιάς (<i>Bactrocera oleae</i>).	46
Εικόνα 4 Βασική αρχιτεκτονική συστήματος ψεκασμού με UAV, με μικροελεγκτή, οδηγό κινητήρα, αντλία και ακροφύσιο. Πηγή: Rahman et al. (2026).	47
Εικόνα 5 UAV με μονάδα ακριβούς εντοπισμού, στο πλαίσιο εκπαιδευτικής επίδειξης κατά την πρακτική άσκηση στο Αγρίνιο (διά ζώσης εκπαίδευση, ΕΑΠ). Πηγή: ίδια λήψη, 2026.	49
Εικόνα 6 UAV με θερμική κάμερα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε εκπαιδευτική επίδειξη πεδίου στο Αγρίνιο (διά ζώσης εκπαίδευση, ΕΑΠ). Πηγή: ίδια λήψη, 2026.	49

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών VRT-RSSM-DSS ως προς την εφαρμογή τους και τον αντίκτυπό τους στην κλιματική αλλαγή	56
Πίνακας 2 Ενδεικτικά ποσοτικά δεδομένα μείωσης εισροών από την εφαρμογή τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας.....	59

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΓΑ	Γεωργία Ακριβείας
AI	Artificial Intelligence
RS	Remote sensing Τηλεπισκόπηση
DL	Deep Learning Βαθιά μάθηση
UAVs	Unmanned Aerial Vehicles μη επανδρωμένα αεροσκάφη
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index
GPS	Global Positioning Systems
IoT	Internet of Things
WSNs	Wireless Sensor Networks
GIS	Geographic Information Systems
LoRa	Long Range
LiDAR	Light Detection and Ranging
CNNs	Convolutional Neural Networks (Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα)
DSS	Decision Support Systems (Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων)
VRT/VRA	Variable Rate Technology/Application (Τεχνολογία/Εφαρμογή Μεταβλητού Ρυθμού)
FMIS	Farm Management Information Systems (Συστήματα Πληροφοριών Διαχείρισης Αγροκτήματος)
MRL/MRLs	Maximum Residue Level(s) (Ανώτατο/α Όριο/α Υπολειμμάτων)
ESA	European Space Agency (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος)
GHG	Greenhouse Gases (Αέρια του Θερμοκηπίου)
PHI	Pre-Harvest Interval (Χρονικό διάστημα πριν από τη συγκομιδή)

1. Εισαγωγή

Ο αγροτικός τομέας αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κλάδους της οικονομίας, ο οποίος αντιμετωπίζει αυξανόμενες προκλήσεις τα τελευταία χρόνια. Έχει παρατηρηθεί ότι πολλά προβλήματα στην αποτελεσματική φυτοπροστασία των δενδρωδών καλλιιεργειών οφείλονται τόσο στη μη έγκαιρη διάγνωση των φυτοπαρασίτων, όσο και στη μη ορθολογική εφαρμογή των μεθόδων φυτοπροστασίας. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, η παραγωγή και οι συνθήκες διαβίωσης μπορούν να βελτιστοποιηθούν, επιτυγχάνοντας μείωση των εισροών, περιορισμό της ρύπανσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα από την αλόγιστη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων και ταυτόχρονη αύξηση της παραγωγής. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών επέτρεψε την εκτίμηση της παραλλακτικότητας των αγρών, οδηγώντας στην ανάδυση της Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ).

Μέσω της ΓΑ επιτυγχάνεται η διαχείριση της χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητας, με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας των εκμεταλλεύσεων και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Φουντάς, 2015).

Η τεχνολογία υποστηρίζει τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων σε επίπεδο εκμετάλλευσης και επιχειρησιακών δράσεων σε επίπεδο φυτού. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ακριβούς καταγραφής της κατάστασης του αγρού, της επεξεργασίας των δεδομένων και της εφαρμογής εισροών με τρόπο που να καλύπτει τις εξειδικευμένες ανάγκες κάθε σημείου και χρονικής στιγμής ξεχωριστά.

Η ΓΑ αξιοποιεί εργαλεία όπως το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης (GPS), το οποίο επιτρέπει την ακριβή χαρτογράφηση και παρακολούθηση των αγροτεμαχίων. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται αισθητήρες πεδίου για την καταγραφή παραμέτρων (υγρασία, θερμοκρασία, pH), καθώς και τεχνολογίες τηλεπισκόπησης μέσω δορυφόρων και μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV/drones). Επιπλέον, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) συμβάλλουν στην επεξεργασία των χωρικών δεδομένων, ενώ με τα συστήματα μεταβλητής εφαρμογής (VRA) επιτρέπουν τη διαφοροποιημένη παροχή εισροών ανάλογα με τις τοπικές ανάγκες. Τέλος, η αξιοποίηση του Διαδίκτυου των Πραγμάτων (IoT) και τα συστήματα παρακολούθησης αποδόσεων ενισχύουν την αποδοτική διαχείριση της παραγωγής σε πραγματικό χρόνο (Χορταριάς, 2023).

Οι δενδρώδεις καλλιέργειες αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικό τομέα της γεωργικής παραγωγής, ειδικά σε μεσογειακές χώρες όπως η Ελλάδα. Είδη όπως η ελιά, τα εσπεριδοειδή και το ακτινίδιο έχουν υψηλή οικονομική και κοινωνική αξία συνεπώς, είναι αναγκαία η λήψη μέτρων προσαρμογής και μετριασμού, ώστε να περιοριστούν οι αρνητικές επιπτώσεις στην παραγωγή και να διασφαλιστεί η αειφόρος ανάπτυξή τους.

Σύμφωνα με τις πηγές, οι δενδρώδεις καλλιέργειες στην Ελλάδα έχουν καθοριστικό ρόλο, αντιπροσωπεύοντας το μεγαλύτερο μέρος της αξίας της φυτικής παραγωγής, η οποία αγγίζει το 69% της συνολικής γεωργικής αξίας (ΓΓΕΚ, 2021).

Με βάση την Απογραφή Γεωργίας ΕΛΣΤΑΤ, οι μόνιμες καλλιέργειες καλύπτουν το 28,2% της γεωργικής γης, ενώ το 52,4% των εκμεταλλεύσεων δραστηριοποιείται σε αυτές. Η διασφάλιση της παραγωγής απέναντι στην κλιματική κρίση αποτελεί σύγχρονη πρόκληση, καθώς απειλείται όχι μόνο η ποσότητα αλλά και η γενετική ταυτότητα των προϊόντων (Ecovariety, 2022; ΕΛΣΤΑΤ, 2023).

Επιπλέον, παρουσιάζουν έντονο εξαγωγικό προσανατολισμό κατέχοντας ηγετική θέση στις εξαγωγές ακτινιδίου, ροδάκινου και ελαιολάδου ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο την επαγγελματική απασχόληση, την κοινωνική συνοχή και τροφοδοτώντας την εγχώρια βιομηχανία μεταποίησης.

Στο πλαίσιο αυτό, η υιοθέτηση τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας καθίσταται οικονομική και περιβαλλοντική αναγκαιότητα. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση του ρόλου της Γεωργίας Ακριβείας στη φυτοπροστασία των δενδρωδών καλλιεργειών, καθώς και η αξιολόγηση της συμβολής της στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που προκύπτουν από την κλιματική αλλαγή.

2. Κλιματική αλλαγή και φυτοπροστασία στις δενδρώδεις καλλιιεργειες

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει σημαντικά τον γεωργικό τομέα, κυρίως μέσω των αρνητικών συνεπειών της, όπως η αύξηση της συχνότητας και της έντασης των ακραίων καιρικών φαινομένων. Μεταξύ των σημαντικότερων επιπτώσεων συγκαταλέγονται οι ξηρασίες, οι αυξημένες θερμοκρασίες, η αλατότητα των εδαφών, καθώς και η ενίσχυση της πίεσης από βιοτικούς παράγοντες, όπως εχθροί και ασθένειες. Οι μεταβολές αυτές συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με την αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, η οποία οφείλεται κυρίως σε ανθρώπινες δραστηριότητες.

Σύμφωνα με την Έκτη Έκθεση Αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή, η ανθρωπογενής επίδραση στο κλίμα είναι πλέον αδιαμφισβήτητη. Η μέση παγκόσμια θερμοκρασία έχει ήδη αυξηθεί κατά περίπου 1,1°C σε σχέση με την περίοδο 1850–1900 και αναμένεται να φτάσει ή να υπερβεί τους 1,5°C τις επόμενες δεκαετίες (2021–2040). Οι μεταβολές αυτές προβλέπεται να επηρεάσουν το σύνολο των γεωγραφικών περιοχών, μεταβάλλοντας σημαντικά τις συνθήκες ανάπτυξης των καλλιιεργειών. Οι κυριότερες πηγές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου περιλαμβάνουν την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας, καθώς και δραστηριότητες όπως η γεωργία, η κτηνοτροφία και η βιομηχανική παραγωγή. Μεταξύ αυτών, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αποτελεί το κυριότερο αέριο που σχετίζεται με την ανθρώπινη δραστηριότητα (IPCC, 2021).

Η Μεσόγειος συγκαταλέγεται στις περιοχές που πλήττονται εντονότερα από την κλιματική αλλαγή, ενώ οι προβλέψεις κάνουν λόγο για περαιτέρω επιβάρυνση από την έντονη μείωση των βροχοπτώσεων και την έντονη αύξηση της θερμοκρασίας. Πολλές από τις περιοχές της Μεσογείου σήμερα αντιμετωπίζουν βαρύτατη τόσο μείωση όσο και υποβάθμιση των υδάτινων πόρων τους και μαστίζονται πλέον από φαινόμενα που προκαλούνται τόσο από κλιματικούς, όσο και ανθρώπινους παράγοντες.

Μια σημαντική επίδραση της κλιματικής αλλαγής στους μικροοργανισμούς είναι η γεωγραφική εξάπλωση των ζωικών και φυτικών παθογόνων, που διευκολύνεται από την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Χαρακτηριστικές εκδηλώσεις είναι οι περίοδοι παρατεταμένης ξηρασίας, οι καύσωνες, οι πυρκαγιές και οι πλημμύρες. Η ένταση των μεταβολών στη Μεσόγειο επηρεάζει ήδη καλλιέργειες όπως το αμπέλι, η ελιά και τα οπωροκηπευτικά, με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγής και την αύξηση της ευπάθειάς τους σε ακραία καιρικά φαινόμενα.

Σύμφωνα με τις διαθέσιμες παρατηρήσεις, η κλιματική αλλαγή επηρεάζει αρνητικά τη νότια Ευρώπη, μειώνοντας την παραγωγικότητα των καλλιεργειών και αυξάνοντας τους κινδύνους για τη ζωική παραγωγή. Αντίθετα, σε ορισμένες βόρειες ευρωπαϊκές περιοχές η άνοδος της θερμοκρασίας μπορεί, υπό προϋποθέσεις, να έχει πρόσκαιρα ευνοϊκές επιδράσεις (EEA, 2021).

Η κλιματική αλλαγή μεταβάλλει περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τόσο την ευαισθησία των φυτών όσο και την εξέλιξη και επιβίωση των παθογόνων, όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα. Η κατανόηση αυτών των επιδράσεων είναι κρίσιμη για την πρόβλεψη της εμφάνισης και της σοβαρότητας των φυτικών ασθενειών και για τον σχεδιασμό κατάλληλων μέτρων αντιμετώπισης (Harrington et al., 2001; Elad & Pertot, 2014).

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η κλιματική αλλαγή ευθύνεται για διασπορά νέων ειδών ασθενειών και παθογόνων, ενώ επηρεάζει και τη ζωή των ήδη υπαρχόντων παθογόνων μικροοργανισμών.

Οι υψηλές θερμοκρασίες, συνθήκες αυξημένης υγρασίας και αέρα αυξάνουν ραγδαία τα ποσοστά προσβολής των φυτών από παθογόνα, επιταχύνοντας συνάμα τη διασπορά αυτών στους εντόπιους φυτικούς πληθυσμούς και εμποδίζοντας την ευδοκμία τους. Αυτό έχει ως επιπλέον αποτέλεσμα την αναποτελεσματικότητα τυχόν χρησιμοποιούμενων φυτοπροστατευτικών μέσων και την ανάγκη για αύξηση της χρήσης τους (Elad & Pertot, 2014).

Οι παραπάνω μεταβολές επηρεάζουν άμεσα το μικροκλίμα των δενδρωδών καλλιεργειών, καθιστώντας τις παραδοσιακές μεθόδους φυτοπροστασίας λιγότερο αποτελεσματικές και αναδεικνύοντας την ανάγκη υιοθέτησης σύγχρονων λύσεων, όπως αυτές που προσφέρει η Γεωργία Ακριβείας.

2.1. Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στους παθογόνους οργανισμούς

Για τα φυτά, με τον όρο ασθένεια, σύμφωνα με τον Τζάμο (2017) εννοούμε την «απόκλιση από την κανονικότητα στην εκδήλωση φυσιολογικών βιοχημικών και μοριακών διεργασιών του φυτού» και είναι αποτέλεσμα προσβολής από ένα παθογόνο (όπως μύκητες, βακτήρια, ιούς κ.α.) ή επίδρασης ενός αβιοτικού παράγοντα (θερμοκρασία, υγρασία, ανωμαλίες στην τροφοδοσία θρεπτικών στοιχείων κ.α.) (Agris, 2005; Τζάμος, 2017).

Για την εκδήλωση της ασθένειας τρεις παράγοντες είναι απαραίτητοι: ξενιστής, παθογόνο και περιβάλλον (τρίγωνο της ασθένειας). Για να πραγματοποιηθεί μόλυνση θα πρέπει φυτό και παθογόνο να έρθουν σε επαφή, αλλά για την εκδήλωση της ασθένειας είναι απαραίτητο οι περιβαλλοντικές συνθήκες να είναι οι κατάλληλες (Agris, 2005).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μικροοργανισμών και της κλιματικής αλλαγής είναι αμφίδρομη. Οι μικροοργανισμοί επηρεάζουν την κλιματική αλλαγή μέσω του ρόλου τους στην παραγωγή και κατανάλωση αερίων θερμοκηπίου (GHG) και μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως παράγοντες μετριασμού. Η βιοποικιλότητά τους επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές αλλαγές, υπογραμμίζοντας τον κρίσιμο ρόλο τους τόσο στην επιδείνωση όσο και στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής (Cavicchioli et al., 2019).

Οι αλλαγές θερμοκρασίας, ειδικότερα, μπορούν να επηρεάσουν τη μικροβιακή βιοποικιλότητα σε πολλαπλά επίπεδα, συμπεριλαμβανομένου του γεωγραφικού εύρους, της φαινολογίας, της κατανομής και της αφθονίας. Καθώς οι θερμοκρασίες αυξάνονται, ο μικροβιακός μεταβολισμός, οι ρυθμοί αύξησης του πληθυσμού και ο αριθμός των ειδών

γενικά αυξάνονται. Για παράδειγμα, η ποικιλότητα των βακτηρίων και των μυκήτων τείνει να μειώνεται με μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη καθώς πέφτουν οι θερμοκρασίες (Zhou et al., 2016).

Η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στον κύκλο της ασθένειας. Η ανάπτυξη των παθογόνων γίνεται εντός ενός εύρους θερμοκρασιών πέραν των οποίων η ανάπτυξη αναστέλλεται. Η αύξηση της θερμοκρασίας και η υψηλότερη συγκέντρωση υδρατμών στην ατμόσφαιρα που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια θα μπορούσε να έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση προσβολών από μύκητες που προσβάλλουν τα εναέρια τμήματα των φυτών καθώς και από εδαφογενείς μύκητες (Das et al., 2016).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι της ασθένειας της κερκόσπορας σε ελαιώνες που προκαλείται από τον μύκητα *Pseudocercospora cladosporioides* (Sacc.) U. Braun (συν. *Cercospora c.*, *Mycocentrospora c.*) και τις νέες μολύνσεις, οι οποίες ευνοούνται από την βροχή όπου είναι η βασική υπεύθυνη για την διασπορά των κονιδίων, την ελεύθερη υγρασία ή την υψηλή σχετική υγρασία, σε θερμοκρασίες μεταξύ 12-28°C και σε νεαρά φύλλα.

Άλλο ένα παράδειγμα αποτελεί την πιο καταστρεπτική ασθένεια για τους καρπούς της ελιάς παγκοσμίως και οφείλεται σε ασκομύκητες των δύο συγκροτημάτων ειδών, *Colletotrichum acutatum* και *Colletotrichum gloeosporioides* (Moral et al., 2017). Η μολυσματικότητα των ειδών του παθογόνου διαφέρει και εξαρτάται από την ποικιλία της ελιάς. Στην Ελλάδα η ασθένεια είναι ευρέως διαδεδομένη, με τα σοβαρότερα κρούσματα να εντοπίζονται στις περιοχές υψηλής υγρασίας, όπου προκαλούν μεγάλες ποσοτικές και ποιοτικές απώλειες στην παραγωγή καρπών και ελαιολάδου (Παναγόπουλος, 2007; Παπλωματάς και Αντωνίου, 2017).

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι ο λόγος που αυξάνονται οι προσβολές πολλών παθογόνων, είναι λόγω της εξέλιξης τους μαζί με τους ξενιστές τους. Όταν επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών αναπτύσσονται και αυτά (Crimmins et al., 2016).

2.2. Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στους εντομολογικούς εχθρούς

Έχει παρατηρηθεί ότι τα φυτοφάγα έντομα προκειμένου να ολοκληρώσουν το βιολογικό τους κύκλο και να προσαρμοστούν σε διαφοροποιήσεις που μπορεί να οφείλονται στον ξενιστή ή στο περιβάλλον χρησιμοποιούν μία σειρά από «στρατηγικές» όπως η επιμήκυνση βιολογικού κύκλου σε περισσότερα από ένα έτη, προσαρμογή του βιολογικού κύκλου ανάλογα με τις αλλαγές στις εποχές αλλά και με τον βιολογικό κύκλο των ξενιστών (διαθεσιμότητα τροφής), που συνήθως σημαίνει μία γενιά ανά έτος αλλά μπορεί περισσότερες εφ' όσον υπάρχουν κατάλληλοι ξενιστές, εναλλαγή ξενιστών (πολυφάγα έντομα) κ.ά (Bale et al., 2002).

Επομένως μεταβολές στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αναμένεται να έχουν επίδραση στο ρυθμό ανάπτυξης, στη διάρκεια του βιολογικού κύκλου, στον αριθμό των γενεών ανά έτος και στον πληθυσμό που διαχειμάζει, στη γεωγραφική του εξάπλωση, στα είδη των φυτών που προσβάλλουν και στον κίνδυνο εισβολής από μεταναστευτικά είδη (Porter et al., 1991; Bale et al., 2002).

Οι μεταβολές αυτές έχουν συνέπειες τόσο στα έντομα που προσβάλλουν τα καλλιεργούμενα φυτά (και κυρίως τα έντομα που ζουν πάνω από το έδαφος λόγω της άμεσης επίδρασης σε αυτά), στους φυσικούς τους εχθρούς, οι οποίοι βοηθούν στον έλεγχο των πληθυσμών, αλλά και σε ασθένειες όπου τα παθογόνα έχουν ως φορείς έντομα (Bale et al., 2002; Cornelissen, 2011; DeLucia et al., 2012; Ahanger et al., 2013).

Σε είδη εντόμων που δε μπαίνουν σε διάπαυση κατά τη διάρκεια του χειμώνα, η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του χειμώνα μπορεί να έχει ως συνέπεια την επιβίωση μεγαλύτερου αριθμού ατόμων και να οδηγήσει σε αυξημένους πληθυσμούς κατά την έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου (Harrington et al., 2001). Υπό την επίδραση της υψηλότερης θερμοκρασίας λόγω της κλιματικής αλλαγής, οι αυξημένοι πληθυσμοί εντόμων έχουν εντονότερο μεταβολισμό (που συνεπάγεται μεγαλύτερη ανάγκη για τροφή), που θεωρείται από τους Deutsch et al. (2018) η αιτία για πιο έντονες προσβολές σε σιτάρι, αραβόσιτο και ρύζι τα επόμενα χρόνια, με μεγάλες επιπτώσεις στην παραγωγή.

Ενδεικτικά παραδείγματα εντομολογικών εχθρών που επηρεάζονται από τις μεταβολές των κλιματικών συνθηκών αποτελούν η φυλλοξήρα της αμπέλου και ο δάκος της ελιάς. Οι παράγοντες της θερμοκρασίας και της υγρασίας επηρεάζουν άμεσα τη βιολογία, την επιβίωση, την αναπαραγωγή και τη δυναμική των πληθυσμών τους, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στην ένταση και στη γεωγραφική κατανομή των προσβολών.

Στην περίπτωση της φυλλοξήρας (*Daktulosphaira vitifoliae*), η θερμοκρασία και η υγρασία επηρεάζουν καθοριστικά την εξάπλωση του εντόμου, καθώς μεταβάλλουν τις συνθήκες επιβίωσης και ανάπτυξής του. Με τον τρόπο αυτό, η κλιματική αλλαγή μπορεί να λειτουργήσει ως παράγοντας που ευνοεί την επέκταση της δράσης του και την αύξηση των προσβολών στους αμπελώνες.

Αντίστοιχα, η δυναμική των πληθυσμών του δάκου της ελιάς (*Bactrocera oleae*) επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Η θερμοκρασία παίζει σημαντικό ρόλο στον βιολογικό κύκλο του εντόμου, καθώς επηρεάζει την εκκόλαψη των αυγών, την ανάπτυξη των προνυμφών και την εμφάνιση των ακμαίων. Σε ευνοϊκές θερμοκρασίες, ο κύκλος ανάπτυξης μπορεί να επιταχυνθεί, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο ταχύτερης αύξησης των πληθυσμών και εντονότερων προσβολών. Αντίθετα, οι χαμηλές ή δυσμενείς θερμοκρασίες μπορούν να περιορίσουν την ανάπτυξη και τη δραστηριότητα του εντόμου.

Για τον λόγο αυτό, η παρακολούθηση παραμέτρων όπως η θερμοκρασία και η υγρασία είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εκτίμηση του κινδύνου προσβολής και την έγκαιρη εφαρμογή μέτρων φυτοπροστασίας (Stavrianakis et al., 2025).

Επειδή τόσο τα παθογόνα όσο και τα φυτά ξενιστές θα επηρεαστούν από το μεταβαλλόμενο κλίμα, τις δραματικές αλλαγές στο μέγεθος της έκφρασης της νόσου σε ένα δεδομένο σύστημα και τη γεωγραφική κατανομή συγκεκριμένων φυτικών ασθενειών, αναμένονται ασθένειες από κάθε καλλιέργεια. Αυτές οι αλλαγές θα επηρεάσουν τα μέτρα που χρησιμοποιούν οι αγρότες για την αποτελεσματική διαχείριση ασθενειών, καθώς και τη σκοπιμότητα συγκεκριμένων συστημάτων καλλιέργειας σε συγκεκριμένες περιοχές (Paterson & Lima, 2010).

Στον αντίποδα, μεταβολές στη θερμοκρασία θα μπορούσαν να έχουν και θετικό αντίκτυπο στην αντιμετώπιση εχθρών. Ταχύτερος ρυθμός ανάπτυξης του εντόμου μπορεί να σημαίνει προσβολή του ξενιστή σε στάδιο ανάπτυξης κατά το οποίο το φυτό μπορεί να ανταπεξέλθει καλύτερα σε πιθανή προσβολή (DeLucia et al., 2012).

2.3. Χωροκατακτητικά είδη και κλιματική αλλαγή

Ως χωροκατακτητικό είδος χαρακτηρίζεται ένα είδος που δεν είναι ιθαγενές σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία (εισερχόμενο είδος) και έχει τάση να εξαπλώνεται σε βαθμό που πιστεύεται ότι προκαλεί βλάβη στο περιβάλλον, στην ανθρώπινη οικονομία ή στην ανθρώπινη υγεία.

Τα ξενικά χωροκατακτητικά είδη, όπως ζιζάνια, παράσιτα και ασθένειες, είναι εξαιρετικά προσαρμόσιμα στην κλιματική μεταβλητότητα και μπορούν να κυριαρχήσουν υπό μεταβαλλόμενες κλιματολογικές συνθήκες (Ehrenfeld, 2010).

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει σημαντικά τη γεωγραφική κατανομή πολλών ειδών και μπορεί να ευνοήσει την εξάπλωση χωροκατακτητικών οργανισμών σε νέες περιοχές. Τα εισαγόμενα είδη συχνά εμφανίζουν μεγάλη προσαρμοστικότητα, γεγονός που τους επιτρέπει να εγκαθίστανται ευκολότερα σε νέα οικοσυστήματα και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να αποκτούν χωροκατακτητικό χαρακτήρα.

Η ανάπτυξη των χωροκατακτητικών ειδών περιλαμβάνει συνήθως μία αρχική φάση περιορισμένης εξάπλωσης και μία δεύτερη φάση ταχείας ανάπτυξης και εξάπλωσης. Οι μεταβολές των κλιματικών συνθηκών μπορούν να επηρεάσουν τη μετάβαση μεταξύ αυτών των φάσεων, τροποποιώντας τις συνθήκες επιβίωσης, ανάπτυξης και αναπαραγωγής των ειδών.

Επιπλέον, η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας, οι ηπιότεροι χειμώνες και η συχνότερη εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων ενδέχεται να διευκολύνουν τη διασπορά ξένων παθογόνων οργανισμών και εντόμων. Ιδιαίτερα τα είδη με μικρό βιολογικό κύκλο μπορούν

να προσαρμοστούν ταχύτερα στις νέες περιβαλλοντικές συνθήκες και να επεκταθούν σε περιοχές όπου παλαιότερα δεν μπορούσαν να επιβιώσουν.

Ορισμένα χωροκατακτητικά είδη, τα οποία μέχρι σήμερα δεν προκαλούσαν σημαντικά προβλήματα στις καλλιέργειες, ενδέχεται στο μέλλον να εξελιχθούν σε σοβαρούς εχθρούς της γεωργικής παραγωγής για τον λόγο ότι είναι εξαιρετικά προσαρμόσιμα στην κλιματική μεταβλητότητα (Scott et al., 2014; Λιολιοπούλου, 2019).

Παράλληλα, τα ιθαγενή είδη μπορεί είτε να ευνοηθούν είτε να περιοριστούν, άμεσα από τις κλιματικές μεταβολές ή έμμεσα μέσω αλλαγών στις σχέσεις ανταγωνισμού με άλλα είδη. Στο πλαίσιο αυτό, θα αναφερθούν κάποια χωροκατακτητικά είδη που βρέθηκαν και δημιουργούν σοβαρές καταστροφές στις καλλιέργειες..

Το βακτήριο *Xylella fastidiosa* (Well et Raju), προκαλεί καταστροφές σε ιδιαίτερα σε αμπέλια (ασθένεια Pierce), εσπεριδοειδή (ποικιλοχρωματική χλώρωση, citrus variegated chlorosis,) στα πυρηνόκαρπα (αδροβακτηρίωση), ενώ προσβάλλει και πολλά άλλα καλλιεργούμενα φυτά, διάφορα καλλωπιστικά (ιδιαίτερα την πικροδάφνη), δασικά και ζιζάνια. Οι χαμηλές χειμερινές θερμοκρασίες περιορίζουν τον πολλαπλασιασμό του Xf, γεγονός που οδηγεί σε εντονότερη εκδήλωση συμπτωμάτων σε περιοχές όπου επικρατούν ηπιότερες κλιματικές συνθήκες (μία αύξηση των 3 βαθμών Κελσίου) κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Όμως σε συνθήκες παρατεταμένης θερμικής καταπόνησης ο Xf μπορεί να δυσκολευτεί να ευδοκιμήσει.

Σε επίπεδο χημικής αντιμετώπισης όσον αφορά τα εντομοκτόνα, τα πυρεθροειδή και τα νεονικοτινοειδή έχουν αποδειχθεί, μακράν, οι πιο αποτελεσματικές και ανθεκτικές χημικές ουσίες μεταξύ των διαφόρων σκευασμάτων που δοκιμάστηκαν για την XF. Επίσης μία ακόμα τεχνική περιορισμού αποτελεί η διαχείριση της βλάστησης του εδάφους και ο σωστός χρόνος καλλιεργητικών παρεμβάσεων που μπορούν να περιορίσουν την ανάπτυξη των νυμφών και να μειώσουν τους πληθυσμούς των ενήλικων εντόμων του *Philaenus spumarius* (σημαντικός έντομο-φορέας του *Xylella fastidiosa*), συμβάλλοντας στον περιορισμό της εξάπλωσης του παθογόνου (Saponari et al., 2019).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα χωροκατακτητικού εχθρού που απειλεί τις ευρωπαϊκές δενδρώδεις καλλιέργειες είναι ο Μαύρος Αλευρώδης (*Aleurocanthus spiniferus*) των εσπεριδοειδών. Σύμφωνα με τους Nugnes et al. (2020) η εξάπλωση του συγκεκριμένου εντόμου σε ευρωπαϊκές χώρες υπογραμμίζει την ανάγκη για αυστηρή παρακολούθηση και μοριακό χαρακτηρισμό των πληθυσμών, προκειμένου να περιοριστεί η διάχυσή του σε νέους ξενιστές. Η παρουσία του είδους αυτού συνδέεται άμεσα με την ανάγκη για εξελιγμένες μεθόδους φυτοπροστασίας, καθώς οι φυσικοί του εχθροί συχνά δεν επαρκούν για τον έλεγχο των πληθυσμών του στις νέες περιοχές εγκατάστασης.

Επιπλέον τα αποτελέσματα της έρευνας των Papanastasiou et al. (2020) για το έντομο της Μύγας της Ασίας (*Drosophila suzukii*) ενός ακόμα χωροκατακτητικού εντόμου το οποίο έχει προσαρμοστεί τόσο στις παράκτιες όσο και στις ηπειρωτικές περιοχές της Ελλάδας σε καλλιέργειες με κεράσια μειώνοντας την παραγωγή. Η δυναμική των πληθυσμών του επηρεάζεται από τις επικρατούσες θερμοκρασίες κάθε περιοχής, καθώς και από την παρουσία άγριων ξενιστών κοντά στους οπωρώνες, οι οποίοι συμβάλλουν στην επιβίωση και εξάπλωση του εντόμου.

Βασιζόμενη στην μελέτη των Bjeliš et al. (2024), άλλο ένα παράδειγμα το οποίο υπάρχει χρόνια εδώ στην Ελλάδα είναι η μύγα της Μεσογείου (*Ceratitis capitata*), η οποία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους εντομολογικούς εχθρούς των οπωροφόρων καλλιεργειών, παρουσιάζοντας έντονη ικανότητα εξάπλωσης και προσαρμογής σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Η αύξηση της θερμοκρασίας και οι ηπιότεροι χειμώνες ευνοούν την επιβίωση και την ανάπτυξη των πληθυσμών του, αυξάνοντας τον κίνδυνο προσβολών στις δενδρώδεις καλλιέργειες. Στην Ελλάδα, οι κύριοι διαχειμάζοντες ξενιστές είναι τα μήλα ή οι λωτοί.

Παρότι ο δάκος της ελιάς (*Bactrocera oleae*) αποτελεί ενδημικό και ήδη γνωστό εχθρό της ελαιοκαλλιέργειας, η δυναμική των πληθυσμών του επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές των κλιματικών συνθηκών. Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά τη φθινοπωρινή περίοδο μπορεί να παρατείνει τη δραστηριότητά του, αυξάνοντας τον κίνδυνο προσβολών σε περίοδο που ο ελαιόκαρπος παραμένει ευαίσθητος. Αντίθετα, οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού μπορεί να περιορίσουν την επιβίωση ορισμένων σταδίων

του εντόμου, κυρίως των προνυμφών. Παράλληλα, οι ηπιότεροι χειμώνες ενδέχεται να ευνοούν την επιβίωση των ακμαίων, συμβάλλοντας στη διατήρηση υψηλότερων πληθυσμών από τη μία καλλιεργητική περίοδο στην επόμενη.

Οι παραπάνω μεταβολές καθιστούν αναγκαία τη συστηματική παρακολούθηση του δάκου μέσω παγίδων, μετεωρολογικών δεδομένων και συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, ώστε οι επεμβάσεις φυτοπροστασίας να πραγματοποιούνται πιο στοχευμένα και στον κατάλληλο χρόνο (Abd El-Salam et al., 2019).

3. Περιορισμοί της χημικής καταπολέμησης: προβλήματα από τη συχνή χρήση φυτοφαρμάκων

Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας (Food and Agriculture Organization, FAO) ορίζει ως φυτοφάρμακο κάθε ουσία ή μείγμα ουσιών, χημικών ή βιολογικών, που προορίζεται για την πρόληψη, την καταστροφή ή τον έλεγχο επιβλαβών οργανισμών ή ανεπιθύμητων φυτικών ή ζωικών ειδών που προκαλούν ζημιές ή παρεμβαίνουν στην παραγωγή, την επεξεργασία, την αποθήκευση, τη μεταφορά ή την εμπορία τροφίμων και γεωργικών προϊόντων (FAO & WHO, 2014).

Ανάλογα με τον στόχο δράσης τους, διακρίνονται σε εντομοκτόνα για την καταπολέμηση των εντόμων, ζιζανιοκτόνα για τα ζιζάνια, μυκητοκτόνα για τους μύκητες, ακαρεοκτόνα για ακάρεα και αράχνες, καθώς και μαλακιοκτόνα για την αντιμετώπιση γυμνοσαλιάγκων και άλλων μαλακίων. Ο Ruberti (2021) στην επισκόπηση που έκανε για τα προβλήματα που προκύπτουν από την χρήση φυτοφαρμάκων μας αναφέρει ότι επί του παρόντος, παγκοσμίως έχουν καταγραφεί περίπου 2000 δραστικά συστατικά, κατηγοριοποιημένα σε περίπου 60 κατηγορίες χημικών ουσιών. Στον κόσμο, τα συνολικά φυτοφάρμακα που χρησιμοποιούνται στη γεωργία είναι περίπου 4,1 εκατομμύρια τόνοι/έτος.

Η χρήση φυτοφαρμάκων αυξάνεται παγκοσμίως με χιλιάδες προϊόντα διαθέσιμα που εφαρμόζονται σε εκατομμύρια τόνους ετησίως. Η γεωργία είναι ο τομέας με την υψηλότερη χρήση φυτοφαρμάκων, με την παραγωγή φρούτων ή την αμπελουργία να είναι πολύ πιο εντατική σε φυτοφάρμακα από τις αροτραίες καλλιέργειες. Εκτιμάται ότι μόνο περίπου το 10% των φυτοφαρμάκων που εφαρμόζονται είναι στην πραγματικότητα αποτελεσματικά έναντι των παρασίτων ή των ασθενειών που προορίζονται να ελέγξουν (Khan et al., 2023).

Η επαγγελματική έκθεση των αγροτικών εργαζομένων σε φυτοπροστατευτικά προϊόντα συνδέεται με ποικίλα προβλήματα υγείας, τόσο οξέα όσο και χρόνια. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες, η έκθεση σε φυτοφάρμακα μπορεί να προκαλέσει δερματικούς και οφθαλμικούς ερεθισμούς, αναπνευστικά προβλήματα, νευρολογικές διαταραχές και άλλες επιπτώσεις

στην υγεία των εργαζομένων. Παράλληλα, η μη ορθή χρήση μέσων ατομικής προστασίας και η ελλιπής εκπαίδευση αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο έκθεσης σε τοξικές ουσίες. Τα δεδομένα αυτά αναδεικνύουν την ανάγκη εφαρμογής πιο στοχευμένων και βιώσιμων πρακτικών φυτοπροστασίας, όπως αυτές που προσφέρει η Γεωργία Ακριβείας (de Assis et al., 2020).

3.1. Ορισμοί και διακρίσεις

Η χρήση των φυτοπροστατευτικών προϊόντων διέπεται από συγκεκριμένο ευρωπαϊκό και εθνικό νομοθετικό πλαίσιο. Σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΚ) αριθ. 1107/2009, τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα είναι προϊόντα που περιέχουν ή αποτελούνται από δραστικές ουσίες και χρησιμοποιούνται, μεταξύ άλλων, για την προστασία των φυτών ή των φυτικών προϊόντων από επιβλαβείς οργανισμούς, για την επίδραση στις ζωτικές λειτουργίες των φυτών, εξαιρουμένων των λιπασμάτων, καθώς και για την καταστροφή ανεπιθύμητων φυτών. Ο όρος «γεωργικό φάρμακο» χρησιμοποιείται συχνά ευρύτερα και μπορεί να περιλαμβάνει τόσο τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα όσο και άλλες κατηγορίες προϊόντων, όπως τα βιοκτόνα.

Σημαντική έννοια στο πλαίσιο της χρήσης φυτοπροστατευτικών προϊόντων είναι τα υπολείμματα φυτοφαρμάκων, δηλαδή ουσίες που παραμένουν μέσα ή πάνω σε φυτικά προϊόντα, τρόφιμα ή ζωοτροφές μετά την εφαρμογή ενός φυτοπροστατευτικού προϊόντος. Η παρουσία των υπολειμμάτων αυτών ελέγχεται νομοθετικά, ώστε να διασφαλίζεται η προστασία της υγείας των καταναλωτών και η ορθή χρήση των γεωργικών φαρμάκων.

3.2. Νομοθετικό πλαίσιο και ανώτατα όρια υπολειμμάτων (MRLs)

Η ορθολογική χρήση των φυτοπροστατευτικών προϊόντων συνδέεται άμεσα με την τήρηση των ανώτατων ορίων υπολειμμάτων. Το Ανώτατο Όριο Υπολειμμάτων (Maximum Residue Level – MRL) ορίζεται ως το υψηλότερο νομικά επιτρεπόμενο επίπεδο υπολείμματος

φυτοφαρμάκου μέσα ή πάνω σε τρόφιμα και ζωοτροφές, όταν το φυτοπροστατευτικό προϊόν έχει εφαρμοστεί σύμφωνα με την Ορθή Γεωργική Πρακτική.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, τα ανώτατα όρια υπολειμμάτων εναρμονίζονται μέσω του Κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 396/2005, ο οποίος καθορίζει κοινό πλαίσιο για όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Όταν δεν έχει καθοριστεί ειδικό MRL για συγκεκριμένο συνδυασμό δραστικής ουσίας και προϊόντος, εφαρμόζεται κατά κανόνα το προκαθορισμένο όριο των 0,01 mg/kg (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, 2005). Η αναζήτηση των ισχυόντων MRLs μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της επίσημης βάσης δεδομένων της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, ανά δραστική ουσία και προϊόν (European Commission, χ.χ.).

3.3. Στατιστικά στοιχεία και συμμόρφωση στην Ελλάδα (2024)

Σύμφωνα με την Εθνική Έκθεση του 2024 (*National Summary Report on Pesticide Residues in Greece*), για τα υπολείμματα φυτοφαρμάκων στην Ελλάδα, το 53,12% των δειγμάτων δεν παρουσίασε ανιχνεύσιμα υπολείμματα, ενώ το 41,52% περιείχε υπολείμματα εντός των νόμιμων ορίων. Αντίθετα, το 5,36% των δειγμάτων υπερέβη τα ανώτατα όρια υπολειμμάτων (MRLs). Ωστόσο, μετά τον υπολογισμό της αβεβαιότητας μέτρησης, το τελικό ποσοστό μη συμμόρφωσης ανήλθε σε 2,96% (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, 2024).

Στην Ελλάδα, ο έλεγχος και η ενημέρωση για τις εγκεκριμένες δραστικές ουσίες πραγματοποιούνται μέσω των επίσημων βάσεων δεδομένων του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (ΥΠΑΑΤ). Κομβικό εργαλείο σε αυτή τη διαδικασία αποτελεί η ψηφιακή πλατφόρμα «Με ένα Κλικ» (One Click UI), η οποία επιτρέπει στους παραγωγούς και τους γεωπόνους την άμεση αναζήτηση του Καταλόγου Φυτοπροστατευτικών Προϊόντων. Μέσω της πλατφόρμας αυτής προσδιορίζονται με ακρίβεια οι εγκεκριμένες χρήσεις, οι δόσεις εφαρμογής, καθώς και το απαιτούμενο χρονικό διάστημα από την τελευταία επέμβαση έως τη συγκομιδή (PHI), παράγοντες που καθορίζουν άμεσα τα επίπεδα υπολειμματικότητας των προϊόντων.

Έτσι, με αυτόν τον τρόπο το Υπουργείο, βοηθάει ώστε να ληφθούν όλα τα αναγκαία μέτρα για την προώθηση της διαχείρισης επιβλαβών οργανισμών με χαμηλή εισροή γεωργικών φαρμάκων, με προτεραιότητα, όπου αυτό είναι δυνατόν, της χρήσης μη χημικών μεθόδων, ούτως ώστε οι επαγγελματίες χρήστες γεωργικών φαρμάκων να στραφούν σε πρακτικές και προϊόντα με το χαμηλότερο δυνατό κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου και το περιβάλλον μεταξύ εκείνων που είναι διαθέσιμα για την αντιμετώπιση του ίδιου προβλήματος επιβλαβών οργανισμών.

Η διαχείριση επιβλαβών οργανισμών με μειωμένη χρήση γεωργικών φαρμάκων περιλαμβάνει τόσο την ολοκληρωμένη φυτοπροστασία όσο και τη βιολογική καλλιέργεια. Η βιολογική παραγωγή ρυθμιζόταν από τον Κανονισμό (ΕΚ) αριθ. 834/2007 (Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, 2007). Σήμερα, το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο αποτελεί ο Κανονισμός (ΕΕ) 2018/848 (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο & Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, 2018).

Με αυτόν τον τρόπο και μαζί με την εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας στη φυτοπροστασία, αποφεύγεται η ανάπτυξη ανθεκτικότητας από την συχνή και αδιάκριτη χρήση των ίδιων δραστικών ουσιών στους εχθρούς και της μείωσης της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων στην καλλιέργεια.

4. Τεχνολογίες Γεωργίας Ακριβείας στη φυτοπροστασία των δενδρωδών καλλιιεργειών

Η σύγχρονη γεωργία επηρεάζεται όλο και περισσότερο από την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών, οι οποίες συμβάλλουν στη βελτίωση της παραγωγικότητας και της βιωσιμότητας των καλλιιεργειών. Στο πλαίσιο της Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ), τεχνολογίες όπως η τηλεπισκόπηση, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), τα συστήματα GPS, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η ανάλυση μεγάλων δεδομένων και η Τεχνητή

Νοημοσύνη αξιοποιούνται ολοένα και περισσότερο για τη συλλογή, επεξεργασία και αξιοποίηση γεωργικών δεδομένων (Adewusi et al., 2024).

Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει την παρακολούθηση των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο και υποστηρίζει τη λήψη πιο στοχευμένων και τεκμηριωμένων αποφάσεων. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSNs), τα οποία μπορούν να εγκατασταθούν σε καλλιεργούμενες εκτάσεις για τη συνεχή καταγραφή περιβαλλοντικών και εδαφικών παραμέτρων, συμβάλλοντας στην έγκαιρη ανίχνευση συνθηκών που ενδέχεται να ευνοήσουν την εμφάνιση ασθενειών ή άλλων προβλημάτων στις καλλιέργειες.

Η μετάδοση των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες αγρού πραγματοποιείται μέσω τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας και συστημάτων IoT. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να αφορούν παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η υγρασία εδάφους, η υγρασία φυλλώματος, η βροχόπτωση, η ηλιακή ακτινοβολία και η φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία (PAR), οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την ανάπτυξη των φυτών και μπορούν να ευνοήσουν την εμφάνιση ασθενειών ή άλλων προβλημάτων στις καλλιέργειες.

Οι Soussi et al. (2024), σε μια ανασκόπηση παρουσιάζουν τα δίκτυα LPWA, όπως τα LoRa και NB-IoT, τα οποία χαρακτηρίζονται από χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, μεγάλη εμβέλεια και δυνατότητα υποστήριξης πολλών συνδεδεμένων συσκευών στον αγρό. Μέσω αυτών των τεχνολογιών, τα δεδομένα μπορούν να μεταδίδονται σε πλατφόρμες παρακολούθησης ή συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, συμβάλλοντας στην έγκαιρη αναγνώριση κινδύνων και στη στοχευμένη διαχείριση της φυτοπροστασίας.

Παράλληλα, οι τεχνολογίες αισθητήρων περιλαμβάνουν τόσο συστήματα τηλεπισκόπησης, όπως δορυφορικές εικόνες, αεροφωτογραφίες και μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs/drones), όσο και επίγειους αισθητήρες, όπως μετεωρολογικούς σταθμούς, αισθητήρες υγρασίας εδάφους και αισθητήρες θρεπτικών στοιχείων. Επιπλέον, η αξιοποίηση τεχνολογιών GPS και GIS ενισχύει τη χαρτογράφηση και την παρακολούθηση των αγροτεμαχίων, υποστηρίζοντας την αποδοτικότερη διαχείριση των εισροών και των καλλιεργητικών πρακτικών (Adewusi et al., 2024).

Οι επίγειοι ή εγγύς αισθητήρες, όπως κάμερες, φασματόμετρα, φθορόμετρα και αισθητήρες απόστασης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη Γεωργία Ακριβείας για την έγκαιρη αναγνώριση ζιζανίων και την εκτίμηση της έντασης της προσβολής τους. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν στοχευμένες εφαρμογές ζιζανιοκτόνων ή μηχανικής καταπολέμησης, μειώνοντας την άσκοπη χρήση εισροών (Sharma, 2023).

Οι δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης αποτελούν σημαντικό εργαλείο της ΓΑ, καθώς επιτρέπουν την αποτελεσματική παρακολούθηση μεγάλων γεωργικών εκτάσεων και τον έγκαιρο εντοπισμό περιοχών που παρουσιάζουν προβλήματα, όπως προσβολές από εχθρούς και ασθένειες ή ελλείψεις θρεπτικών στοιχείων. Οι συνεχείς εξελίξεις στη δορυφορική τεχνολογία έχουν βελτιώσει σημαντικά τη χωρική και χρονική ανάλυση των δεδομένων, ενισχύοντας τη συμβολή της τηλεπισκόπησης στη σύγχρονη γεωργία ακριβείας (Fotso Kamga et al., 2021).

Μέσω της δορυφορικής τεχνολογίας καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση των γεωργικών τοπίων σε μεγάλη κλίμακα, προσφέροντας πολύτιμα δεδομένα για την ανάπτυξη, την κατάσταση και τη συνολική υγεία των καλλιεργειών (Segarra et al., 2020).

Παρακάτω θα αναφερθούν τεχνολογίες και εργαλεία που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια (2020-2025) μετά από μία βιβλιογραφική έρευνα.

4.1. Η τηλεπισκόπηση στη Γεωργία Ακριβείας

Η τηλεπισκόπηση αποτελεί βασική τεχνολογία της Γεωργίας Ακριβείας και αναφέρεται στη συλλογή πληροφοριών για αντικείμενα ή φαινόμενα της γήινης επιφάνειας χωρίς να υπάρχει άμεση φυσική επαφή με αυτά. Η απόκτηση των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω αισθητήρων που είναι τοποθετημένοι σε δορυφόρους, αεροσκάφη ή μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs/drones), οι οποίοι καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται από τα αντικείμενα.

Η ανάλυση των δεδομένων αυτών επιτρέπει την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση και τα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών, τις ιδιότητες του εδάφους και

τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για τον λόγο αυτό, η τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται ευρέως στη γεωργία ακριβείας για την παρακολούθηση της υγείας των φυτών, την ανίχνευση καταπονήσεων και την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων στη διαχείριση των καλλιεργειών.

Η τηλεπισκόπηση βασίζεται στη συλλογή και ανάλυση δεδομένων από απόσταση, μέσω αισθητήρων που καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης. Η διαδικασία περιλαμβάνει την εκπομπή ενέργειας, την αλληλεπίδρασή της με τα αντικείμενα της γήινης επιφάνειας και την καταγραφή των δεδομένων από απομακρυσμένους αισθητήρες, τα οποία στη συνέχεια επεξεργάζονται και αναλύονται με τη χρήση εξειδικευμένων λογισμικών.

Τα φυτά αλληλεπιδρούν με την ηλιακή ακτινοβολία με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται, μέρος ανακλάται και μέρος διαπερνά τα φυτικά όργανα. Η ανακλώμενη ακτινοβολία περιέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη φυσιολογική κατάσταση και τα βιοφυσικά χαρακτηριστικά των φυτών και μπορεί να καταγραφεί μέσω αισθητήρων τηλεπισκόπησης.

Στην περιοχή του ορατού φάσματος (VIS, 400–700 nm), η χλωροφύλλη απορροφά κυρίως την μπλε και την κόκκινη ακτινοβολία για τις ανάγκες της φωτοσύνθεσης. Αντίθετα, στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου (NIR, 700–1300 nm), τα φύλλα παρουσιάζουν υψηλή ανακλαστικότητα, η οποία σχετίζεται με τη δομή των φύλλων και τη βιομάζα των φυτών. Οι διαφορές αυτές αξιοποιούνται στη γεωργία ακριβείας για την εκτίμηση της υγείας και της κατάστασης των καλλιεργειών μέσω δεικτών βλάστησης, όπως ο NDVI (Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς)¹.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

¹ Ο **NDVI** (Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς) αξιολογεί τη ζωτικότητα της βλάστησης βασιζόμενος στο πώς τα φυτά απορροφούν το κόκκινο φως και αντανακλούν το εγγύς υπέρυθρο (πυκνή και υγιή βλάστηση, γυμνό έδαφος, νερό, νεκρά φυτά).

Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων τηλεπισκόπησης εξαρτάται από βασικές παραμέτρους ανάλυσης, όπως η χωρική ανάλυση (μέγεθος pixel), η χρονική ανάλυση (συχνότητα επανάλυσης λήψεων), η φασματική ανάλυση (αριθμός και εύρος φασματικών ζωνών) και η ραδιομετρική ανάλυση, οι οποίες καθορίζουν την ακρίβεια και τη λεπτομέρεια των δεδομένων που συλλέγονται.

Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος τηλεπισκόπησης είναι η πλατφόρμα παρατήρησης (δορυφόρος, αεροσκάφος ή UAV), ο αισθητήρας, το αντικείμενο παρατήρησης και τα δεδομένα που συλλέγονται και αξιοποιούνται για την εξαγωγή πληροφοριών. Στη γεωργία ακριβείας, η τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται ευρέως για την παρακολούθηση της κατάστασης των καλλιεργειών, την εκτίμηση της υγείας των φυτών και την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων όπως οι ασθένειες και οι καταπονήσεις (European Space Agency, χ.χ.).

Η χρήση δορυφορικών δεδομένων για την παρακολούθηση των καλλιεργειών και την υποστήριξη της διαχείρισής τους παρουσιάζει αυξανόμενο ενδιαφέρον στη γεωργία ακριβείας. Η αποστολή Sentinel-2A και Sentinel-2B του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA), λόγω της βελτιωμένης χρονικής, χωρικής και φασματικής ανάλυσης που προσφέρει, έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες παρακολούθησης της βλάστησης, της υγείας των φυτών και της χωρικής παραλλακτικότητας των αγρών (Segarra et al., 2020).

4.2. Δορυφόροι και κλίμακες παρατήρησης

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη δορυφορικών συστημάτων με πολυφασματικούς αισθητήρες έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες της γεωργικής τηλεπισκόπησης. Ένα από τα σημαντικότερα προγράμματα παρατήρησης της Γης είναι το Copernicus του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA), στο πλαίσιο του οποίου αναπτύχθηκαν οι δορυφόροι Sentinel.

Ιδιαίτερα οι Sentinel-2A και Sentinel-2B παρέχουν πολυφασματικά δεδομένα υψηλής χωρικής, χρονικής και φασματικής ανάλυσης, επιτρέποντας την παρακολούθηση της

ανάπτυξης και της υγείας των καλλιιεργειών. Παράλληλα, άλλοι δορυφόροι του προγράμματος, όπως ο Sentinel-1 και ο Sentinel-3, αξιοποιούνται για εφαρμογές γεωργικής παρακολούθησης μέσω δεδομένων ραντάρ και θερμικής τηλεπισκόπησης.

Η αποτελεσματικότητα των δορυφορικών συστημάτων εξαρτάται από βασικές παραμέτρους ανάλυσης, όπως η φασματική, η χωρική, η χρονική και η ραδιομετρική ανάλυση. Οι παράμετροι αυτές καθορίζουν την ακρίβεια και τη λεπτομέρεια των δεδομένων που συλλέγονται και επηρεάζουν τη δυνατότητα παρακολούθησης φυσιολογικών διεργασιών των φυτών, όπως η φωτοσύνθεση, η εξατμισοδιαπνοή και η συνολική κατάσταση της καλλιιεργείας.

4.3. Τηλεπισκόπηση και γεωργία

Σύμφωνα με τους Segarra et al. (2020), οι δορυφόροι Sentinel-2 παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες εφαρμογής στην Γεωργία Ακρίβειας, καθώς παρέχουν χωρικές, χρονικές και φασματικές πληροφορίες υψηλής ακρίβειας που μπορούν να υποστηρίξουν τη λήψη αποφάσεων στη διαχείριση των καλλιεργειών.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτέλεσε το ανοικτού κώδικα σύστημα ESA Sen2-Agri, το οποίο αξιοποιούσε χρονοσειρές δεδομένων Sentinel-2 και Landsat 8 για την παραγωγή σύνθετων εικόνων χωρίς νεφοκάλυψη, χαρτών καλλιεργήσιμων εκτάσεων και τύπων καλλιεργειών, καθώς και δεικτών της κατάστασης της βλάστησης, όπως ο NDVI και ο LAI (Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας)², συμβάλλοντας στην παρακολούθηση της κατάστασης και της ανάπτυξης των φυτών. Παρότι το Sen2-Agri δεν συντηρείται πλέον, η λειτουργική του συνέχεια παρέχεται μέσω του έργου Sen4Stat, στο οποίο εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται τα εργαλεία επεξεργασίας του ή επικαιροποιημένες εκδόσεις τους (ESA SEN4STAT, χ.χ.).

Παράλληλα, οι τεχνολογίες τηλεπισκόπησης μέσω αερομεταφερόμενων και δορυφορικών εικόνων, χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανίχνευση και χαρτογράφηση των ασθενειών και της ακριβούς τοποθεσίας των ζιζανίων εντός των χωραφιών, επιτρέποντας στοχευμένες εφαρμογές ζιζανιοκτόνων ελαχιστοποιώντας την περιβαλλοντική μόλυνση. Τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου μπορούν να συμβάλουν τόσο στην έγκαιρη αναγνώριση προβλημάτων φυτοπροστασίας όσο και στη διαχείριση επαναλαμβανόμενων ασθενειών σε μελλοντικές καλλιεργητικές περιόδους (Sharma, 2023; Bale et al., 2002).

² Ο **LAI** (Δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας) μετρά τη συνολική μονόπλευρη επιφάνεια των φύλλων ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους. Πρόκειται για έναν απόλυτο φυσικό/βιοφυσικό δείκτη που καθορίζει το μέγεθος του φυλλώματος και τη δυνατότητα φωτοσύνθεσης

Τα συστήματα αερομεταφερόμενης και δορυφορικής απεικόνισης με πολυφασματικούς, υπερφασματικούς και θερμικούς αισθητήρες χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας για την ανίχνευση και χαρτογράφηση φυτοπαθολογικών προβλημάτων. Τεχνικές όπως η έγχρωμη υπέρυθρη απεικόνιση (Color Infrared – CIR), η πολυφασματική και υπερφασματική απεικόνιση, καθώς και η θερμική υπέρυθρη απεικόνιση (Thermal Infrared – TIR), μπορούν να συμβάλουν στον εντοπισμό περιοχών όπου τα φυτά παρουσιάζουν συμπτώματα στρες ή πιθανής προσβολής.

Οι τεχνολογίες αυτές έχουν αξιοποιηθεί για την ανίχνευση και χαρτογράφηση ασθενειών σε διάφορες καλλιέργειες, όπως η σήψη ρίζας στο βαμβάκι, η όψιμη σήψη στην τομάτα, η κίτρινη σκουριά στο σιτάρι και το πρασίνισμα των εσπεριδοειδών. Με τον τρόπο αυτό, υποστηρίζεται η έγκαιρη αναγνώριση των προσβολών, η εκτίμηση της χωρικής εξάπλωσης των ασθενειών και η λήψη πιο στοχευμένων μέτρων φυτοπροστασίας (Yang, 2020).

Ωστόσο, παρά τη σημαντική πρόοδο των τεχνολογιών τηλεπισκόπησης, η έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση. Σε αρκετές περιπτώσεις, τα συμπτώματα γίνονται ορατά στις εικόνες όταν η προσβολή έχει ήδη επηρεάσει την καλλιέργεια. Για τον λόγο αυτό, η τηλεπισκόπηση χρησιμοποιείται συχνά όχι μόνο για την ανίχνευση, αλλά και για την εκτίμηση της έκτασης και της σοβαρότητας των ζημιών που προκαλούνται από ασθένειες των φυτών.

Τηλεπισκόπηση και στρες απο βιοτικούς παράγοντες

Όσον αφορά τις βιοτικές καταπονήσεις, έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις τηλεπισκόπησης για την ανίχνευση ασθενειών και προσβολών στις καλλιέργειες. Παρότι η χωρική ανάλυση των δορυφόρων Sentinel-2, η οποία κυμαίνεται στα 10–20 m ανάλογα με τη φασματική ζώνη, δεν επιτρέπει λεπτομερή παρακολούθηση σε επίπεδο μεμονωμένων φύλλων ή φυτών, οι πολυφασματικές τους δυνατότητες μπορούν να αξιοποιηθούν για την παρακολούθηση προβλημάτων σε επίπεδο κόμης ή αγρού.

Η χρήση δεικτών βλάστησης (Vegetation Indices – VI) έχει εφαρμοστεί για την εκτίμηση των επιπτώσεων παρασίτων και ασθενειών σε καλλιέργειες όπως ο καφές και το σιτάρι.

Παράλληλα, έχουν προταθεί εξειδικευμένοι δείκτες, όπως ο Δείκτης Στρες από τη Νόσο Κόκκινης Άκρης (Red-Edge Disease Stress Index – REDSI), ο οποίος αξιοποιεί τις φασματικές ζώνες 4, 5 και 7 του Sentinel-2 για την ανίχνευση της κίτρινης σκουριάς στο σιτάρι. Επιπλέον, αλγόριθμοι ταξινόμησης που βασίζονται σε πολυφασματικά δεδομένα έχουν παρουσιάσει ικανοποιητική αποτελεσματικότητα στον εντοπισμό περιοχών που έχουν προσβληθεί από ασθένειες, όπως η σήψη ρίζας στο βαμβάκι (Segarra et al., 2020).

Ο συνδυασμός δεδομένων από UAVs και δορυφόρους Sentinel-2 έχει δείξει σημαντικές δυνατότητες στην παρακολούθηση προσβολών και βιοτικών καταπονήσεων στις καλλιέργειες. Η ανίχνευση των προσβεβλημένων περιοχών μπορεί να υποστηρίξει την ακριβή και στοχευμένη εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων τόσο σε επίπεδο αγρού όσο και σε ευρύτερη κλίμακα (Segarra et al., 2020).

Παράλληλα, οι πληροφορίες που προέρχονται από δορυφορικά, αερομεταφερόμενα ή UAV δεδομένα μπορούν να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία χαρτών προσβολής και χαρτών συνταγογράφησης, οι οποίοι καθοδηγούν στοχευμένες εφαρμογές φυτοπροστασίας. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις ασθενειών που εμφανίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές του αγρού ή παρουσιάζουν επαναλαμβανόμενη χωρική κατανομή, καθώς επιτρέπει πιο ορθολογική χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων (Yang, 2020).

Σύμφωνα με τους Segarra et al. (2020), παρότι τα δορυφορικά δεδομένα Sentinel-2 παρουσιάζουν σημαντικές δυνατότητες για την παρακολούθηση βιοτικών καταπονήσεων, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στην έγκαιρη ανίχνευση παρασίτων και ασθενειών. Η χωρική ανάλυση των εικόνων δεν επαρκεί πάντα για τον εντοπισμό προσβολών μικρής έκτασης ή αρχικού σταδίου, ενώ η διάκριση μεταξύ διαφορετικών αιτιών στρες παραμένει δύσκολη, καθώς παρόμοιες φασματικές μεταβολές μπορεί να προκύπτουν από διαφορετικούς παράγοντες. Για τον λόγο αυτό, ο συνδυασμός δορυφορικών δεδομένων με UAVs και επίγειους αισθητήρες μπορεί να προσφέρει πιο ολοκληρωμένη και αξιόπιστη παρακολούθηση των καλλιιεργειών.

4.4. Αισθητήρες, Τηλεπισκόπηση και μοντέλα πρόβλεψης για τη διαχείριση μυκητολογικών ασθενειών

Στη γεωργία ακριβείας χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι αισθητήρων για την παρακολούθηση εδαφικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Οι αισθητήρες αυτοί περιλαμβάνουν αισθητήρες θέσης, οπτικούς αισθητήρες, ηλεκτροχημικούς αισθητήρες, αισθητήρες υγρασίας εδάφους και αισθητήρες μικροκλίματος, συμβάλλοντας στη συλλογή δεδομένων για τη διαχείριση των καλλιεργειών.

Ιδιαίτερα στη φυτοπροστασία, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι αισθητήρες θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, φυλλικής υγρασίας και υγρασίας εδάφους, καθώς επιτρέπουν την παρακολούθηση συνθηκών που ευνοούν την ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν σε συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και λήψης αποφάσεων για πιο στοχευμένη διαχείριση των ασθενειών.

Τα συστήματα αυτά αξιοποιούν τεχνικές όπως η αναγνώριση εικόνας, η φασματοσκοπία και η ανάλυση δεδομένων για την ανίχνευση ενδείξεων προσβολής από παθογόνους οργανισμούς ή έντομα. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να υποστηρίξουν την έγκαιρη λήψη αποφάσεων και την εφαρμογή στοχευμένων μέτρων φυτοπροστασίας πριν η προσβολή επεκταθεί σημαντικά (Soussi et al., 2024).

Εκτός από τα δεδομένα μικροκλίματος που συλλέγονται από αισθητήρες εδάφους και φυλλώματος, η έγκαιρη ανίχνευση μυκητολογικών προσβολών μπορεί να υποστηριχθεί συμπληρωματικά και από τεχνικές τηλεπισκόπησης, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο, για την πρόβλεψη εμφάνισης μυκήτων ιδιαίτερη σημασία έχουν παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η υγρασία φυλλώματος και η βροχόπτωση (Yang, 2020).

Η αντιμετώπιση των μυκητολογικών ασθενειών αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη φυτοπροστασία των δενδρωδών καλλιεργειών, καθώς οι παθογόνοι μύκητες χαρακτηρίζονται από ραγδαία διασπορά και ικανότητα πρόκλησης καθολικών ζημιών στην παραγωγή. Στη συμβατική γεωργία, η διαχείρισή τους βασίζεται κυρίως σε ημερολογιακούς, προληπτικούς ψεκασμούς, γεγονός που οδηγεί σε υπερβολική χρήση

χημικών μυκητοκτόνων, επιβάρυνση του περιβάλλοντος και ανάπτυξη ανθεκτικότητας στα παθογόνα.

Όπως επισημαίνουν οι Traversari et al. (2021) στη διεθνή βιβλιογραφία, οι ψηφιακές τεχνολογίες της Γεωργίας Ακριβείας μεταβάλλουν τον τρόπο διαχείρισης των μυκητολογικών ασθενειών, προσφέροντας σύγχρονα εργαλεία για τη βιώσιμη διαχείριση των μυκητολογικών παθογόνων. Οι μεθοδολογίες αυτές, αν και εφαρμόζονται ευρέως σε δυναμικές καλλιέργειες, παρουσιάζουν απόλυτη αναλογική εφαρμογή και στον άξονα των δενδρωδών καλλιιεργειών μέσα από τρεις βασικούς πυλώνες:

α) Πρώιμος Φασματικός Εντοπισμός (Early Detection)

Το κύριο πρόβλημα με τις μυκητολογικές προσβολές (όπως το ωίδιο, ο περονόσπορος, η μονίλια ή οι ασθένειες ξύλου) είναι ότι όταν τα συμπτώματα γίνουν ορατά με γυμνό μάτι, η μόλυνση έχει ήδη εδραιωθεί στους φυτικούς ιστούς. Η χρήση Τηλεπισκόπησης μέσω μη επανδρωμένων αεροσκαφών (Drones/UAVs) εφοδιασμένων με πολυφασματικές κάμερες δίνει τη λύση, καθώς επιτρέπει την καταγραφή αλλαγών στη φασματική ανάκλαση του φυλλώματος. Δείκτες βλάστησης, με κυριότερο τον NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), μπορούν να ανιχνεύσουν το κυτταρικό και φυσιολογικό στρες που προκαλεί ο μύκητας στο δέντρο ημέρες πριν εμφανιστούν οι πρώτες ορατές κηλίδες ή νεκρώσεις.

β) Δίκτυα IoT και Επιδημιολογικά Μοντέλα Πρόβλεψης

Οι βιολογικοί κύκλοι των μυκήτων (βλάστηση σπορίων, μόλυνση, επώαση) εξαρτώνται απόλυτα από συγκεκριμένες μικροκλιματικές συνθήκες, με κρισιμότερους παράγοντες τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία και τη διάρκεια διαβροχής των φύλλων. Η εγκατάσταση δικτύων αισθητήρων του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) εντός του οπωρώνα επιτρέπει τη συλλογή αυτών των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα στοιχεία αυτά τροφοδοτούν Συστήματα Υποστήριξης Απόφασης (DSS) και μαθηματικά επιδημιολογικά μοντέλα. Ο παραγωγός ειδοποιείται με ακρίβεια για το πότε οι συνθήκες καθίστανται ευνοϊκές για μια μόλυνση, επιτρέποντας τη διενέργεια στοχευμένων προληπτικών επεμβάσεων μόνο όταν υπάρχει πραγματικός κίνδυνος.

γ) Εφαρμογή Μεταβλητής Δόσης (VRA) και Στοχευμένος Ψεκασμός

Η αρχιτεκτονική του θόλου των δενδρωδών καλλιεργειών δεν είναι ομοιόμορφη. Σημεία με αυξημένη φυλλική επιφάνεια ή πυκνή βλάστηση εμποδίζουν τον σωστό αερισμό, δημιουργώντας μικροκλίμα υψηλής υγρασίας που ευνοεί την ανάπτυξη μυκήτων (hotspots). Μέσω της τεχνολογίας Εφαρμογής Μεταβλητής Δόσης (Variable Rate Application - VRA), οι ψεκαστήρες που καθοδηγούνται από χάρτες και αισθητήρες μπορούν να διαφοροποιήσουν τον όγκο του μυκητοκτόνου υγρού σε πραγματικό χρόνο. Το σκεύασμα εφαρμόζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια στα τμήματα του οπωρώνα που παρουσιάζουν υψηλότερο δείκτη κινδύνου ή πυκνότητας βλάστησης, αποφεύγοντας την καθολική επιβάρυνση του αγροκτήματος.

Συμπερασματικά, από τη βιβλιογραφία προκύπτει ότι η αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών, όπως η τηλεπισκόπηση, οι αισθητήρες μικροκλίματος, τα μοντέλα πρόβλεψης και τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, μπορούν να συμβάλουν στην πιο ορθολογική διαχείριση των μυκητολογικών ασθενειών. Η έγκαιρη ανίχνευση ενδείξεων προσβολής και η παρακολούθηση συνθηκών που ευνοούν τη μόλυνση μπορούν να υποστηρίξουν τον καλύτερο χρονισμό των επεμβάσεων φυτοπροστασίας, περιορίζοντας τις άσκοπες εφαρμογές μυκητοκτόνων και μειώνοντας πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τον κίνδυνο υπολειμμάτων στους καρπούς (Traversari et al., 2021).

4.5. Αξιοποίηση τεχνικών Βαθιάς Μάθησης (DL) στη φυτοπροστασία

Επιπλέον, οι τεχνικές βαθιάς μάθησης (Deep Learning – DL) αξιοποιούνται ολοένα και περισσότερο στη γεωργία ακριβείας για εφαρμογές που σχετίζονται με την ανίχνευση ζιζανίων, εχθρών και ασθενειών των καλλιεργειών. Τα συστήματα αυτά μπορούν να αναλύουν εικόνες και δεδομένα που συλλέγονται από UAVs, αισθητήρες και τεχνολογίες τηλεπισκόπησης, συμβάλλοντας στην αυτοματοποιημένη αναγνώριση προβλημάτων φυτοπροστασίας και στη λήψη αποφάσεων (Liu et al., 2021).

Η βαθιά μάθηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην ανάλυση εικόνων, καθώς μπορεί να αναγνωρίζει πρότυπα και χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την κατάσταση των φυτών. Στη φυτοπροστασία, αυτό μπορεί να αφορά την αναγνώριση συμπτωμάτων ασθενειών, όπως κηλίδες, αποχρωματισμούς ή νεκρώσεις στα φύλλα, αλλά και τον εντοπισμό ζιζανίων ή περιοχών με μειωμένη φυτική ζωτικότητα. Με τη χρήση RGB, πολυφασματικών ή θερμικών εικόνων, τα μοντέλα βαθιάς μάθησης μπορούν να συμβάλουν στον εντοπισμό περιοχών του αγρού που χρειάζονται περαιτέρω έλεγχο ή πιθανή επέμβαση.

Ιδιαίτερη σημασία έχουν τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks – CNNs), τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στην επεξεργασία και ταξινόμηση εικόνων. Τα CNNs μπορούν να εκπαιδευτούν ώστε να διακρίνουν υγιή από προσβεβλημένα φυτά ή να αναγνωρίζουν συγκεκριμένα οπτικά συμπτώματα, υποστηρίζοντας έτσι την έγκαιρη διάγνωση προβλημάτων φυτοπροστασίας. Η δυνατότητα αυτή είναι σημαντική, καθώς η έγκαιρη αναγνώριση εστιών προσβολής μπορεί να συμβάλει στη λήψη πιο στοχευμένων αποφάσεων και στον περιορισμό των άσκοπων επεμβάσεων.

Παράλληλα, η αξιοποίηση τεχνολογιών cloud computing και συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπει την ταχύτερη επεξεργασία και ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη ευφυών συστημάτων παρακολούθησης καλλιεργειών και εφαρμογών γεωργίας ακριβείας. Με αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα που συλλέγονται από UAVs και αισθητήρες μπορούν να μετατρέπονται σε χρήσιμες πληροφορίες για τον παραγωγό ή τον γεωπόνο.

Ωστόσο, η χρήση τεχνικών βαθιάς μάθησης στη φυτοπροστασία παρουσιάζει και περιορισμούς. Η ακρίβεια των μοντέλων εξαρτάται από την ποιότητα και την ποσότητα των δεδομένων εκπαίδευσης, τη σωστή σήμανση των εικόνων και τις συνθήκες λήψης των δεδομένων. Επιπλέον, διαφορετικά προβλήματα μπορεί να εμφανίζουν παρόμοια συμπτώματα στο φυτό, γεγονός που δυσκολεύει την ακριβή διάγνωση μόνο από την εικόνα. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα των μοντέλων DL πρέπει να συνδυάζονται με επιτόπιο έλεγχο και γεωπονική αξιολόγηση.

Συνολικά, η βαθιά μάθηση αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη σύγχρονη φυτοπροστασία, καθώς μπορεί να υποστηρίξει την αυτοματοποιημένη ανίχνευση εχθρών, ασθενειών και ζιζανίων, την αξιολόγηση της υγείας των φυτών και τη δημιουργία δεδομένων που μπορούν να αξιοποιηθούν σε συστήματα υποστήριξης αποφάσεων. Σε συνδυασμό με UAVs, αισθητήρες και τηλεπισκόπηση, μπορεί να συμβάλει στη μετάβαση προς πιο ακριβείς και στοχευμένες πρακτικές φυτοπροστασίας.

4.6. IoT, έξυπνοι αισθητήρες και μοντέλα πρόβλεψης στη φυτοπροστασία

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) αναφέρεται σε ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων αισθητήρων, συσκευών και συστημάτων που μπορούν να συλλέγουν, να ανταλλάσσουν και να επεξεργάζονται δεδομένα μέσω του διαδικτύου. Στη γεωργία ακριβείας, οι τεχνολογίες IoT αξιοποιούνται για την παρακολούθηση των καλλιεργειών σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο και για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων στη φυτοπροστασία.

Η έγκαιρη ανίχνευση εχθρών και ασθενειών αποτελεί βασικό παράγοντα για τη μείωση των απωλειών παραγωγής και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων. Τα συστήματα IoT και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSNs) μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από τον αγρό, όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η υγρασία εδάφους, οι βροχοπτώσεις, η ηλιακή ακτινοβολία και άλλες μικροκλιματικές συνθήκες. Οι παράμετροι αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές στη φυτοπροστασία, καθώς επηρεάζουν την ανάπτυξη παθογόνων οργανισμών, την εμφάνιση ασθενειών και τη δραστηριότητα ορισμένων εχθρών των καλλιεργειών (Soussi et al., 2024).

Σύγχρονοι έξυπνοι αισθητήρες, όπως οι φορετοί αισθητήρες φυτών (wearable plant sensors), μπορούν να τοποθετούνται απευθείας πάνω σε φύλλα ή βλαστούς και να καταγράφουν παραμέτρους που σχετίζονται με τη φυσιολογική κατάσταση των φυτών και το μικροκλίμα. Η συνεχής συλλογή και ανάλυση των δεδομένων αυτών μπορεί να συμβάλει στην έγκαιρη αναγνώριση καταπονήσεων που προκαλούνται από παθογόνα, έντομα ή δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, ο παραγωγός ή ο γεωπόνος μπορεί να εντοπίζει γρηγορότερα πιθανές αλλαγές στην κατάσταση της καλλιέργειας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης οι βιομιμητικοί αισθητήρες νέας γενιάς, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή ευαισθησία και χαμηλό κόστος κατασκευής. Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να παρακολουθούν συνεχώς την ανάπτυξη των φυτών και να μεταδίδουν ασύρματα δεδομένα, συμβάλλοντας στην αυτοματοποιημένη διαχείριση των καλλιεργειών και στην ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης. Παράλληλα,

τεχνολογίες επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης, όπως το LoRa, επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση αγροτικών εκτάσεων, ακόμη και σε περιοχές όπου η πρόσβαση στο διαδίκτυο ή στην ηλεκτρική ενέργεια είναι περιορισμένη.

Τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες και IoT συστήματα μπορούν να ενσωματωθούν σε μοντέλα πρόβλεψης, αλγορίθμους λήψης αποφάσεων ή συστήματα ασαφούς λογικής (fuzzy logic). Μέσω αυτών των τεχνολογιών είναι δυνατή η εκτίμηση περιόδων αυξημένου κινδύνου για την εμφάνιση εχθρών και ασθενειών, καθώς και ο εντοπισμός συνθηκών που ευνοούν την ανάπτυξη προσβολών. Έτσι, η φυτοπροστασία μπορεί να βασίζεται περισσότερο σε δεδομένα πραγματικού χρόνου και λιγότερο σε εμπειρικές ή ημερολογιακές εφαρμογές (Soussi et al., 2024).

Σε έξυπνα θερμοκήπια και συστήματα γεωργίας ακριβείας, τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω IoT μπορούν να αξιοποιηθούν για την αυτοματοποιημένη ενεργοποίηση παρεμβάσεων, όπως ο αερισμός, η άρδευση ή η εφαρμογή μέτρων φυτοπροστασίας. Αντίστοιχα, σε υπαίθριες καλλιέργειες, η συνεχής παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών μπορεί να υποστηρίξει την αποστολή ειδοποιήσεων σε πραγματικό χρόνο προς τον παραγωγό ή τον γεωπόνο, ώστε να λαμβάνονται έγκαιρα προληπτικά ή στοχευμένα μέτρα.

Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί ευφυή συστήματα παρακολούθησης για την έγκαιρη ανίχνευση συγκεκριμένων εχθρών, όπως το κόκκινο σκαθάρι των φοινικοειδών (red palm weevil). Σε τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιούνται αισθητήρες δονήσεων, ήχου ή επιταχυνσιόμετρα, τα οποία μπορούν να αναγνωρίζουν χαρακτηριστικά πρότυπα δραστηριότητας του εντόμου και να αποστέλλουν ειδοποιήσεις μέσω διαδικτυακών εφαρμογών. Το παράδειγμα αυτό δείχνει ότι τα IoT συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν όχι μόνο ως εργαλεία καταγραφής δεδομένων, αλλά και ως μηχανισμοί έγκαιρης προειδοποίησης για τη φυτοπροστασία (Soussi et al., 2024).

Ο συνδυασμός IoT, τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης ενισχύει ακόμη περισσότερο τη λειτουργία των μοντέλων πρόβλεψης, καθώς επιτρέπει τη μετατροπή των δεδομένων που συλλέγονται από αισθητήρες σε πρακτικές συστάσεις. Με αυτόν τον τρόπο, τα συστήματα μπορούν να υποστηρίξουν αποφάσεις σχετικά με τον κατάλληλο χρόνο

επέμβασης, την ανάγκη εφαρμογής φυτοπροστατευτικών προϊόντων και τη χωρική στόχευση των επεμβάσεων. Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στη μείωση των άσκοπων ψεκασμών και στην πιο ορθολογική χρήση των εισροών.

Συνολικά, τα IoT συστήματα, οι έξυπνοι αισθητήρες και τα μοντέλα πρόβλεψης αποτελούν σημαντικά εργαλεία για τη σύγχρονη φυτοπροστασία. Η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης των καλλιεργειών, ανάλυσης δεδομένων και αποστολής έγκαιρων προειδοποιήσεων μπορεί να συμβάλει στη μείωση των απωλειών παραγωγής, στον καλύτερο χρονισμό των επεμβάσεων και στη βιώσιμη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων.

4.7. Ρομποτική και αυτοματισμός στη γεωργία ακριβείας

Ο αυτοματισμός και η ρομποτική έχουν εξελιχθεί σε σημαντικά στοιχεία της σύγχρονης γεωργίας, συμβάλλοντας στη βελτίωση της αποδοτικότητας, της παραγωγικότητας και της βιωσιμότητας των γεωργικών πρακτικών (Mahmud et al., 2020). Στο πλαίσιο της Γεωργίας Ακριβείας, τα ρομποτικά και αυτοματοποιημένα συστήματα μπορούν να αξιοποιηθούν σε διάφορες γεωργικές εργασίες, όπως η φύτευση, η επιθεώρηση των καλλιεργειών, η φυτοπροστασία, ο ψεκασμός και η συγκομιδή (Papadopoulos et al., 2024).

Στη φυτοπροστασία, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αυτόνομα ή ημι-αυτόνομα οχήματα που είναι εξοπλισμένα με ρομποτικά συστήματα, αισθητήρες, κάμερες και αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης (Cheng et al., 2022). Τα συστήματα αυτά μπορούν να κινούνται στον αγρό, να συλλέγουν δεδομένα και να αναγνωρίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια ζιζάνια, προσβεβλημένα φυτά ή περιοχές όπου απαιτείται επέμβαση. Με αυτόν τον τρόπο, η φυτοπροστασία μπορεί να γίνει πιο στοχευμένη, καθώς οι εφαρμογές πραγματοποιούνται μόνο στα σημεία όπου υπάρχει πραγματική ανάγκη.

Η ρομποτική, σε συνδυασμό με τεχνολογίες υπολογιστικής όρασης και μηχανικής μάθησης, μπορεί επίσης να υποστηρίξει αυτοματοποιημένες εφαρμογές διαχείρισης ζιζανίων. Μέσω της διάκρισης μεταξύ καλλιεργούμενων φυτών και ζιζανίων, τα ρομποτικά συστήματα

μπορούν να συμβάλουν σε πιο ακριβείς επεμβάσεις, είτε με μηχανική απομάκρυνση είτε με στοχευμένη εφαρμογή ζιζανιοκτόνων (Laursen et al., 2016). Η προσέγγιση αυτή μπορεί να μειώσει την ανάγκη για ομοιόμορφη χρήση ζιζανιοκτόνων σε όλο τον αγρό, περιορίζοντας το κόστος παραγωγής και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Σημαντική εφαρμογή αποτελούν και οι αυτοματοποιημένοι ή ρομποτικοί ψεκαστήρες, οι οποίοι μπορούν να συνδυαστούν με αισθητήρες, χάρτες επέμβασης και τεχνολογίες μεταβλητού ρυθμού (Papadopoulos et al., 2024). Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων με μεγαλύτερη ακρίβεια, προσαρμόζοντας την ποσότητα ή το σημείο εφαρμογής ανάλογα με τις ανάγκες της καλλιέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, η χρήση φυτοφαρμάκων μπορεί να περιοριστεί, ενώ παράλληλα βελτιώνεται η αποτελεσματικότητα των επεμβάσεων.

Τα UAVs μπορούν επίσης να ενταχθούν στο πλαίσιο του αυτοματισμού στη φυτοπροστασία. Χρησιμοποιούνται τόσο για την επιτήρηση των καλλιεργειών όσο και για εφαρμογές ψεκασμού φυτοπροστατευτικών προϊόντων (Castaldi et al., 2017). Μέσω προκαθορισμένων διαδρομών πτήσης, αισθητήρων και χαρτών επέμβασης, τα UAVs μπορούν να υποστηρίξουν πιο στοχευμένες εφαρμογές, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η πρόσβαση με συμβατικά μηχανήματα είναι δύσκολη ή απαιτητική (Papadopoulos et al., 2024).

Τα γεωργικά ρομπότ μπορούν να διαφοροποιηθούν ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους και να περιλαμβάνουν ρομπότ αγρού, ρομπότ για καλλιέργειες φρούτων και λαχανικών, καθώς και ρομποτικά συστήματα για άλλες γεωργικές δραστηριότητες. Τα ρομπότ αγρού μπορούν να εκτελούν εργασίες όπως η σπορά, η συλλογή δεδομένων, η φυτοπροστασία και η συγκομιδή, ενώ τα UAVs αξιοποιούνται κυρίως για επιτήρηση, χαρτογράφηση και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ψεκασμό.

Παρά τα πλεονεκτήματα, η εφαρμογή ρομποτικών και αυτοματοποιημένων συστημάτων στη γεωργία ακριβείας παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Το υψηλό κόστος αγοράς και συντήρησης, η ανάγκη εξειδικευμένης γνώσης, η αξιοπιστία των συστημάτων

σε διαφορετικές συνθήκες αγρού και η ανάγκη σωστής βαθμονόμησης αποτελούν βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτησή τους. Επιπλέον, σε εφαρμογές ψεκασμού απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ώστε η επέμβαση να είναι ακριβής, αποτελεσματική και ασφαλής για το περιβάλλον.

Συνολικά, η ρομποτική και ο αυτοματισμός μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της φυτοπροστασίας στη Γεωργία Ακριβείας. Ο συνδυασμός ρομποτικών συστημάτων, UAVs, αισθητήρων, τεχνητής νοημοσύνης και τεχνολογιών μεταβλητού ρυθμού μπορεί να οδηγήσει σε πιο στοχευμένες επεμβάσεις, μείωση της χρήσης φυτοπροστατευτικών προϊόντων και καλύτερη προστασία του περιβάλλοντος.

4.8. Τεχνητή νοημοσύνη και φυτοπροστασία

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) στη Γεωργία Ακριβείας έχει μεταβάλει σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η διαχείριση των καλλιεργειών. Οι εφαρμογές TN μπορούν να υποστηρίξουν τη βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων, όπως το νερό, τα λιπάσματα και τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα, συμβάλλοντας σε πιο αποδοτικές και βιώσιμες γεωργικές πρακτικές (Adewusi et al., 2024).

Στη φυτοπροστασία, η Τεχνητή Νοημοσύνη αξιοποιείται κυρίως για την ανάλυση δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές πηγές, όπως δορυφόρους, UAVs, επίγειους αισθητήρες, παγίδες εντόμων και συστήματα IoT.

Μέσω της επεξεργασίας αυτών των δεδομένων, οι αλγόριθμοι μπορούν να υποστηρίξουν την αξιολόγηση της υγείας των καλλιεργειών, την αναγνώριση περιοχών με πιθανό φυτικό στρες και την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων που σχετίζονται με ασθένειες, ζιζάνια ή προσβολές από εχθρούς.

Η συμβολή της TN είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή επιτρέπει τη σύνδεση της παρακολούθησης με τη λήψη αποφάσεων. Τα δεδομένα που συλλέγονται από συστήματα τηλεπισκόπησης, αισθητήρες και έξυπνες πλατφόρμες μπορούν να αναλυθούν με αλγορίθμους μηχανικής ή βαθιάς μάθησης, ώστε να εντοπιστούν πρότυπα που δεν είναι πάντα εύκολα αντιληπτά με συμβατικές μεθόδους παρακολούθησης. Με αυτόν τον τρόπο, ο παραγωγός ή ο γεωπόνος μπορεί να λαμβάνει πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με το αν απαιτείται επέμβαση, πότε πρέπει να πραγματοποιηθεί και σε ποιο σημείο του αγρού.

Παράλληλα, τα συστήματα Τεχνητής Νοημοσύνης μπορούν να ενσωματωθούν σε Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, παρέχοντας συστάσεις σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, μπορούν να συνδυάζουν πληροφορίες για τις καιρικές συνθήκες, την υγρασία, την κατάσταση της βλάστησης και την παρουσία εχθρών ή ασθενειών, ώστε να εκτιμούν τον κίνδυνο προσβολής και να προτείνουν κατάλληλες ενέργειες φυτοπροστασίας. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να περιορίσει τις προληπτικές ή ημερολογιακές εφαρμογές φυτοπροστατευτικών προϊόντων και να ενισχύσει τη χρήση στοχευμένων επεμβάσεων.

Η αξιοποίηση της ΤΝ στη φυτοπροστασία συνδέεται επίσης με τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της γεωργικής παραγωγής. Η ακριβέστερη αναγνώριση προβλημάτων και η καλύτερη πρόβλεψη του κινδύνου εμφάνισης εχθρών και ασθενειών μπορούν να συμβάλουν στη μείωση των άσκοπων ψεκασμών, στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων και στην πιο ορθολογική χρήση των εισροών. Έτσι, η Τεχνητή Νοημοσύνη λειτουργεί ως εργαλείο που ενισχύει τόσο την παραγωγικότητα όσο και τη βιωσιμότητα των γεωργικών πρακτικών.

Ωστόσο, η εφαρμογή της ΤΝ στη φυτοπροστασία παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων, την επάρκεια των δεδομένων εκπαίδευσης, τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την προσαρμογή των μοντέλων στις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε καλλιέργειας και περιοχής. Επιπλέον, η ΤΝ δεν αντικαθιστά τη γεωπονική κρίση, αλλά λειτουργεί υποστηρικτικά, παρέχοντας πρόσθετες πληροφορίες για πιο ορθολογική λήψη αποφάσεων.

Συνολικά, η Τεχνητή Νοημοσύνη αποτελεί βασικό εργαλείο για τη σύγχρονη φυτοπροστασία στη Γεωργία Ακριβείας. Σε συνδυασμό με την τηλεπισκόπηση, τα UAVs, τους αισθητήρες, τα IoT συστήματα και τα DSS, μπορεί να υποστηρίξει την έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων, την πρόβλεψη κινδύνων και την εφαρμογή πιο στοχευμένων και βιώσιμων πρακτικών φυτοπροστασίας.

5. Τηλεπισκόπηση και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support Systems - DSS) στη φυτοπροστασία

Οι τεχνολογίες GPS και τα συστήματα δορυφορικής τηλεπισκόπησης αποτελούν βασικά εργαλεία της Γεωργίας Ακριβείας, καθώς παρέχουν χωρικά δεδομένα που συμβάλλουν στην παρακολούθηση της κατάστασης των καλλιεργειών και στην υποστήριξη της λήψης αποφάσεων. Η αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων, όπως του Sentinel-2, σε συνδυασμό με εργαλεία ανοιχτού λογισμικού τηλεπισκόπησης, επιτρέπει την εκτίμηση σημαντικών παραμέτρων που σχετίζονται με την κατάσταση των φυτών, όπως η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η θρεπτική κατάσταση, οι ανάγκες άρδευσης, καθώς και πιθανές ενδείξεις προσβολών από εχθρούς και ασθένειες (Soussi et al., 2024).

Τα δεδομένα που προκύπτουν από την τηλεπισκόπηση αποκτούν μεγαλύτερη αξία όταν συνδυάζονται με πληροφορίες από άλλες πηγές και ενσωματώνονται σε Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων. Τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, γνωστά ως Decision Support Systems ή DSS, αξιοποιούν δεδομένα από διαφορετικές πηγές, όπως τηλεπισκόπηση, αισθητήρες αγρού, μετεωρολογικούς σταθμούς, παγίδες εντόμων, ιστορικά δεδομένα και μοντέλα πρόβλεψης. Στη φυτοπροστασία, τα συστήματα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν τον παραγωγό ή τον γεωπόνο στην εκτίμηση του κινδύνου εμφάνισης εχθρών και ασθενειών, στον κατάλληλο χρονισμό των επεμβάσεων και στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ανάγκη εφαρμογής φυτοπροστατευτικών προϊόντων (Adewusi et al., 2024).

Η ενσωμάτωση της Μηχανικής Μάθησης στα DSS ενισχύει ακόμη περισσότερο τη δυνατότητα ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων και βελτιώνει την ακρίβεια των προβλέψεων. Μέσω της αξιοποίησης ιστορικών δεδομένων, τρεχουσών μετεωρολογικών συνθηκών, δορυφορικών εικόνων και δεδομένων από αισθητήρες, τα μοντέλα μηχανικής μάθησης μπορούν να συμβάλουν στην πρόβλεψη πιθανών προβλημάτων, όπως η εμφάνιση ασθενειών ή η αύξηση πληθυσμών επιβλαβών εντόμων. Με τον τρόπο αυτό, η

φυτοπροστασία μπορεί να βασίζεται περισσότερο σε πραγματικά δεδομένα και λιγότερο σε εμπειρικές ή ημερολογιακές εφαρμογές (Adewusi et al., 2024).

Η συνδεσιμότητα στη Γεωργία Ακριβείας, μέσω τεχνολογιών IoT (Internet of Things) και cloud computing, επιτρέπει τη συγκέντρωση δεδομένων από UAVs, δορυφόρους, αισθητήρες και άλλες τεχνολογίες παρακολούθησης σε κεντρικές πλατφόρμες ανάλυσης. Έτσι, οι παραγωγοί και οι γεωπόνοι μπορούν να παρακολουθούν την κατάσταση της καλλιέργειας σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο και να λαμβάνουν πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τη φυτοπροστασία και τη διαχείριση των εισροών (Adewusi et al., 2024).

Συνολικά, η αξιοποίηση της τηλεπισκόπησης, των αισθητήρων και των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων, στον καλύτερο χρονισμό των επεμβάσεων και στην εφαρμογή πιο στοχευμένων και βιώσιμων πρακτικών φυτοπροστασίας. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών αποτελεί βασικό βήμα για τη μετάβαση από την ομοιόμορφη και προληπτική εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων σε μια πιο ακριβή προσέγγιση.

Τα δεδομένα που προκύπτουν από την τηλεπισκόπηση και τα DSS μπορούν, στη συνέχεια, να αξιοποιηθούν για τη δημιουργία χαρτών επέμβασης, οι οποίοι υποστηρίζουν τη στοχευμένη εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων μέσω τεχνολογιών μεταβλητού ρυθμού ή UAVs.

6. Τεχνολογίες και Εφαρμογές Μεταβλητού Ρυθμού στη Φυτοπροστασία (VRT/VRA): Ψεκασμός μόνο όπου υπάρχει ανάγκη

Οι τεχνολογίες μεταβλητού ρυθμού εφαρμογής (Variable Rate Technology – VRT) υποστηρίζουν την εφαρμογή εισροών με μεταβλητή δόση, διαδικασία που αναφέρεται ως Variable Rate Application – VRA. Οι VRT, αποτελούν βασικό στοιχείο της Γεωργίας Ακριβείας, καθώς επιτρέπουν την εφαρμογή εισροών, όπως λιπάσματα, φυτοπροστατευτικά προϊόντα, σπόροι και νερό άρδευσης, ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες κάθε περιοχής του αγρού. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη χωρική μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του εδάφους, της κατάστασης της καλλιέργειας και της έντασης των προσβολών, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των εισροών.

Στη φυτοπροστασία, η αξιοποίηση τεχνολογιών μεταβλητού ρυθμού επιτρέπει την εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων μόνο στις περιοχές όπου εντοπίζεται προσβολή ή αυξημένος κίνδυνος εμφάνισης ασθένειας. Η διαδικασία αυτή μπορεί να βασιστεί σε χάρτες προσβολής και χάρτες συνταγογράφησης, οι οποίοι παράγονται από δεδομένα τηλεπισκόπησης, UAVs, δορυφορικές εικόνες ή αισθητήρες πεδίου. Με τον τρόπο αυτό, οι επεμβάσεις φυτοπροστασίας γίνονται πιο στοχευμένα, μειώνοντας την άσκοπη χρήση φυτοφαρμάκων, το κόστος παραγωγής και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

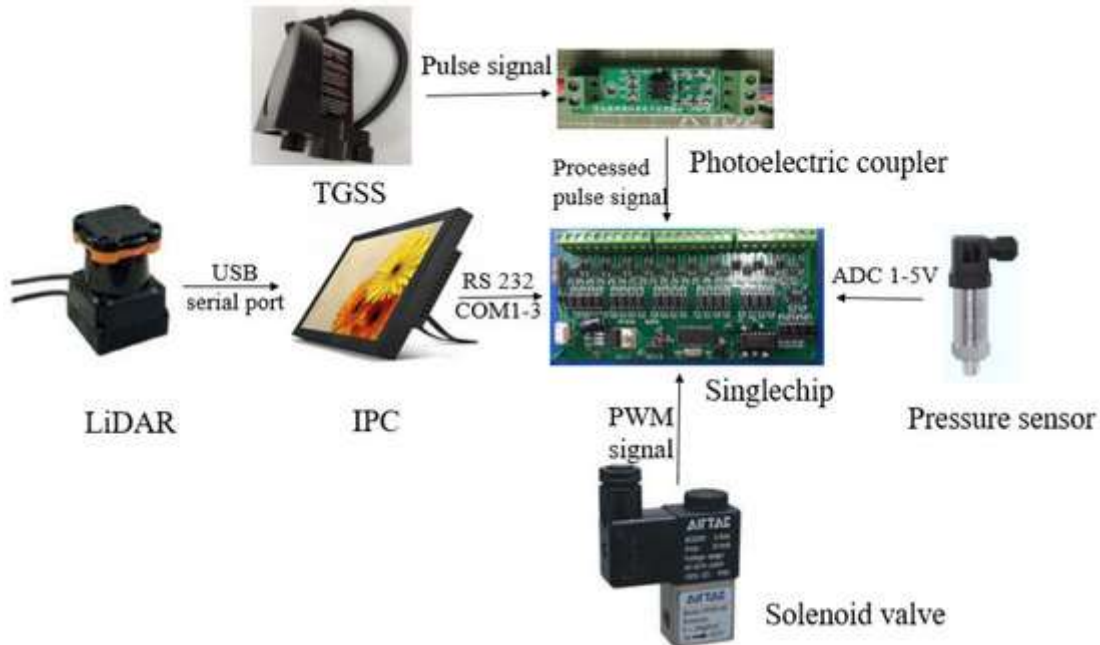
Η εφαρμογή μεταβλητού ρυθμού πραγματοποιείται με τη χρήση εξοπλισμού που μπορεί να μεταβάλλει την ποσότητα της εισροής κατά την κίνηση του μηχανήματος στον αγρό. Στην πράξη, το τρακτέρ ή το ψεκαστικό μηχάνημα είναι εξοπλισμένο με σύστημα GPS/GNSS, ελεγκτή εφαρμογής, αισθητήρες και ηλεκτρονικές βαλβίδες ή ακροφύσια που ρυθμίζουν την παροχή του ψεκαστικού υγρού. Η εφαρμογή μπορεί να βασίζεται είτε σε χάρτες συνταγογράφησης, οι οποίοι έχουν δημιουργηθεί προηγουμένως από δεδομένα τηλεπισκόπησης, UAVs, αισθητήρες ή χαρτογράφηση προσβολών, είτε σε αισθητήρες

πραγματικού χρόνου που ανιχνεύουν την κατάσταση της καλλιέργειας κατά τη διάρκεια της εφαρμογής.

Καθώς το μηχάνημα κινείται μέσα στον αγρό, το σύστημα εντοπίζει τη θέση του μέσω GPS/GNSS και προσαρμόζει αυτόματα τη δόση εφαρμογής ανάλογα με τις ανάγκες κάθε ζώνης. Έτσι, σε περιοχές με αυξημένη προσβολή ή μεγαλύτερο όγκο βλάστησης μπορεί να εφαρμόζεται μεγαλύτερη ποσότητα φυτοπροστατευτικού προϊόντος, ενώ σε περιοχές χαμηλού κινδύνου ή μικρότερης βλάστησης η εφαρμογή μπορεί να μειώνεται ή να αποφεύγεται.

Σημαντική εφαρμογή αποτελούν οι αισθητήρες LiDAR σε συστήματα ψεκασμού μεταβλητού ρυθμού, ιδιαίτερα σε δενδρώδεις καλλιέργειες. Οι αισθητήρες αυτοί επιτρέπουν την τρισδιάστατη αποτύπωση της κόμης των δέντρων και την εκτίμηση του όγκου της βλάστησης σε πραγματικό χρόνο, ώστε η ποσότητα του ψεκαστικού υγρού να προσαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες κάθε δέντρου. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε οπωρώνες, όπου παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις στη δομή, στην πυκνότητα και στον όγκο της κόμης (Wei et al., 2023).

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η διαμόρφωση ενός συστήματος ψεκασμού μεταβλητού ρυθμού που βασίζεται σε αισθητήρες LiDAR. Το σύστημα περιλαμβάνει αισθητήρα LiDAR για την εκτίμηση της κόμης, αισθητήρα πραγματικής ταχύτητας εδάφους (TGSS), μικροελεγκτή, αισθητήρα πίεσης και ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες για τον έλεγχο της παροχής ψεκαστικού υγρού.



Εικόνα 1 Σύνθεση συστήματος ελέγχου ψεκασμού μεταβλητού ρυθμού βασισμένου σε αισθητήρες LiDAR. Πηγή: Zhang et al. (2025).

Η προσέγγιση αυτή μπορεί να συμβάλει στη μείωση της κατανάλωσης φυτοπροστατευτικών προϊόντων, στον περιορισμό των απωλειών λόγω drift και στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των εφαρμογών φυτοπροστασίας.

Επιπλέον, σύγχρονα συστήματα υπολογιστικής όρασης χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ζιζανίων και την υποστήριξη εφαρμογών ψεκασμού μεταβλητού ρυθμού. Μέσω αλγορίθμων ταξινόμησης και συστημάτων ελέγχου της παροχής του ψεκαστικού υγρού, επιτυγχάνεται ακριβέστερη εφαρμογή αγροχημικών, μειώνοντας τη σπατάλη εισροών και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Soussi et al., 2024).

Σύμφωνα με τους Mooney et al. (2009), η εφαρμογή τεχνολογιών μεταβλητού ρυθμού στην καλλιέργεια βαμβακιού μπορεί να συμβάλει στη μείωση της χρήσης εισροών, όπως στην περίπτωση των ψεκαστικών εφαρμογών, επιτρέποντας πιο ακριβή και στοχευμένη εφαρμογή, καθώς η ποσότητα της εισροής προσαρμόζεται στις ανάγκες κάθε ζώνης του αγρού.

Ωστόσο, η εφαρμογή μεταβλητού ρυθμού δεν είναι εξίσου κατάλληλη για όλες τις περιπτώσεις φυτοπαθολογικών προβλημάτων. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε ασθένειες ή προσβολές που εμφανίζονται επαναλαμβανόμενα στις ίδιες περιοχές του αγρού, καθώς οι χάρτες προσβολής μπορούν να αξιοποιηθούν για τον στοχευμένο ψεκασμό των ζωνών υψηλού κινδύνου. Αντίθετα, σε ασθένειες που εξαπλώνονται γρήγορα και ομοιόμορφα σε όλη την καλλιέργεια, η καθολική εφαρμογή μπορεί να παραμένει πιο κατάλληλη, καθώς απαιτείται άμεση κάλυψη μεγαλύτερης έκτασης (Yang, 2020).

Συνολικά, η εφαρμογή εισροών με τεχνολογία μεταβλητού ρυθμού μπορεί να συμβάλει τόσο στη βελτίωση της κερδοφορίας των καλλιιεργειών όσο και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, μέσω της πιο ορθολογικής χρήσης των πόρων (Zhang et al., 2025).

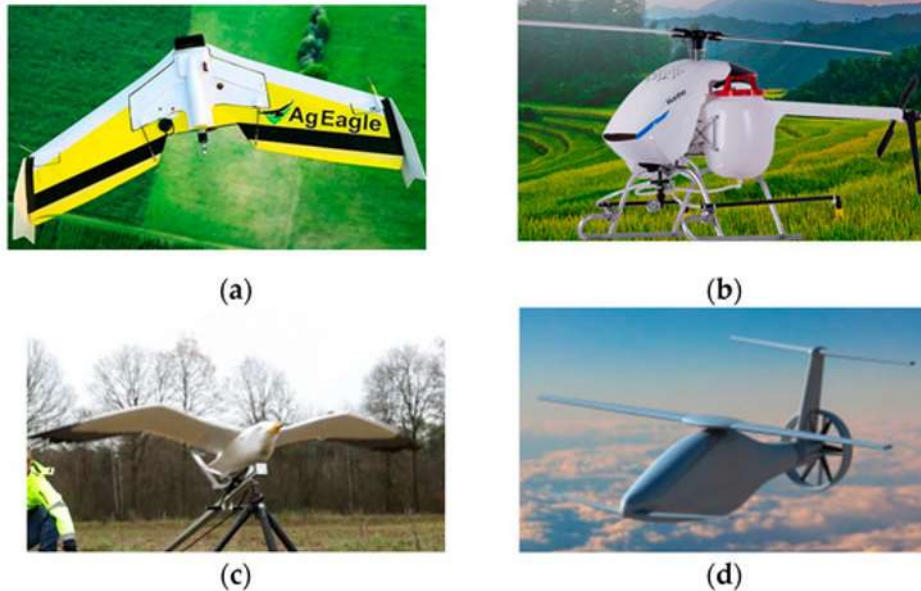
7. UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) και Τηλεπισκόπηση

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, γνωστά ως UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*), έχουν αναδειχθεί σημαντικό εργαλείο τηλεπισκόπησης στη γεωργία ακριβείας, καθώς επιτρέπουν τη συλλογή εικόνων υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρακολούθηση της κατάστασης των καλλιεργειών, την αναγνώριση χωρικής παραλλακτικότητας και τον εντοπισμό προβλημάτων που σχετίζονται με ζιζάνια, εχθρούς και ασθένειες.

Τα UAVs διαφέρουν ως προς το μέγεθος, το βάρος, την ικανότητα μεταφοράς φορτίου, τον χρόνο πτήσης, τον τύπο αισθητήρων που μπορούν να φέρουν και τον σκοπό χρήσης τους. Ανάλογα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις επιχειρησιακές δυνατότητές τους, μπορούν να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης, χαρτογράφησης, παρακολούθησης της υγείας των καλλιεργειών και στοχευμένων εφαρμογών φυτοπροστασίας (Liu et al., 2021).

Συνήθως αυτά που χρησιμοποιούνται στην ΓΑ είναι μικρού μεγέθους και επιχειρούν σε χαμηλά υψόμετρα, επιτρέποντας έτσι τη συλλογή δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα UAV's με περιστροφικούς έλικες δεξιά, όπως και τις σταθερής πτέρυγας αριστερά, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.

Επιτρέπουν στους αγρότες να παρακολουθούν τις καλλιέργειες σε λεπτομερή χωρική κλίμακα, παρέχοντας πληροφορίες για την υγεία των φυτών, τις διακυμάνσεις ανάπτυξης και την εμφάνιση πιθανών προβλημάτων. Η ευελιξία και η προσβασιμότητά τους τα καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την έγκαιρη ανίχνευση καταπονήσεων και την εφαρμογή στοχευμένων παρεμβάσεων φυτοπροστασίας (Adewusi et al., 2024).



Εικόνα 2 Κατηγορίες UAV που χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας. Πηγή: Liu et al. (2021).

Τα περιστροφικά UAV's προτιμώνται για μικρότερες εκτάσεις και λεπτομερείς επιθεωρήσεις, λόγω της ευκολίας ελιγμών και της δυνατότητας αιώρησης. Αντίθετα, τα σταθερής πτέρυγας είναι πιο κατάλληλα για μεγαλύτερες εκτάσεις, καθώς προσφέρουν μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης και ταχύτερη κάλυψη.

Τα UAVs μπορούν να εξοπλιστούν με διαφορετικούς αισθητήρες τηλεπισκόπησης, όπως κάμερες RGB, θερμικές ή υπέρυθρες κάμερες, πολυφασματικούς και υπερφασματικούς αισθητήρες, LiDAR (Light Detection and Ranging)³ και SAR (Synthetic Aperture Radar)⁴. Οι αισθητήρες αυτοί επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων υψηλής ανάλυσης για την παρακολούθηση της υγείας των φυτών, την ανίχνευση καταπονήσεων και τη λήψη αποφάσεων για πιο στοχευμένες εφαρμογές φυτοπροστασίας και διαχείρισης εισροών (Liu et al., 2021). Ειδικότερα, οι θερμικές και υπέρυθρες κάμερες μπορούν να συμβάλουν στον

³ Σύστημα μέτρησης απόστασης που εκπέμπει παλμούς λέιζερ και καταγράφει τον χρόνο που χρειάζονται για να επιστρέψουν. Δημιουργεί εξαιρετικά ακριβή 3D μοντέλα (νέφη σημείων - point clouds) του εδάφους και των αντικειμένων.

⁴ □ Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος. Πρόκειται για ένα σύστημα ραντάρ τοποθετημένο συνήθως σε δορυφόρους ή αεροσκάφη, το οποίο εκπέμπει μικροκύματα και επεξεργάζεται τις ανακλάσεις τους για να σχηματίσει εικόνες υψηλής ανάλυσης.

εντοπισμό υδατικής καταπόνησης, αναγκών άρδευσης και πιθανών προσβολών στο φύλλωμα, υποστηρίζοντας πιο έγκαιρες και αποτελεσματικές παρεμβάσεις στον αγρό (Sharma, 2023).

Μέσω των πολυφασματικών αισθητήρων, τα UAVs μπορούν να υπολογίζουν δείκτες βλάστησης (Vegetation Indices – VI), όπως ο NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την αξιολόγηση της υγείας και της ζωτικότητας των φυτών.

Οι δείκτες βλάστησης και οι αισθητήρες υγείας καλλιιεργειών συμβάλλουν στην έγκαιρη ανίχνευση καταπονήσεων, θρεπτικών ελλείψεων και ασθενειών, μέσω της αξιολόγησης παραμέτρων όπως η περιεκτικότητα χλωροφύλλης, η θερμοκρασία της φυτοκόμης και η ζωηρότητα των φυτών.

Μελέτες έχουν δείξει ότι η αξιοποίηση δεικτών βλάστησης, όπως ο NDVI και ο GNDVI, σε συνδυασμό με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, όπως ο Random Forest, μπορεί να συμβάλει στην εκτίμηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη και της ζωηρότητας των καλλιιεργειών. Ενδεικτικά, σε καλλιέργειες όπως ο αραβόσιτος, ο συνδυασμός πολυφασματικών δεδομένων και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της φυτικής κατάστασης και την υποστήριξη αποφάσεων διαχείρισης (Soussi et al., 2024).

Η αξιοποίηση UAVs εξοπλισμένων με αισθητήρες και εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης συμβάλλει σημαντικά στην παρακολούθηση της υγείας των καλλιιεργειών και στην έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων φυτοπροστασίας. Τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω τηλεπισκόπησης μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία με τεχνολογίες cloud και αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης, επιτρέποντας τη δημιουργία χαρτών υγείας των φυτών και τη λήψη πιο τεκμηριωμένων αποφάσεων στη γεωργία ακριβείας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή UAVs στη διαχείριση εντομολογικών εχθρών σε δενδρώδεις καλλιέργειες, όπως η ελιά. Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε ελληνικούς ελαιώνες, συγκρίθηκε η αποτελεσματικότητα δολωματικών εφαρμογών με μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα με τις συμβατικές επίγειες εφαρμογές για την

καταπολέμηση του δάκου της ελιάς (*Bactrocera oleae*). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εφαρμογές με UAVs μείωσαν σημαντικά τα επίπεδα προσβολής σε σχέση με τους ανέκαστους μάρτυρες και παρουσίασαν αποτελεσματικότητα αντίστοιχη ή και ανώτερη των επίγειων ψεκασμών, ιδιαίτερα σε περιοχές με δύσκολη πρόσβαση. Η συγκεκριμένη μελέτη αναδεικνύει τη δυνατότητα ένταξης των UAVs σε προγράμματα ολοκληρωμένης φυτοπροστασίας, προσφέροντας μια πιο ευέλικτη και στοχευμένη προσέγγιση στη διαχείριση εχθρών των καλλιεργειών (Papadogiorgou et al., 2025).



Εικόνα 3 Μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (UAV, εξακόπτερο drone) που αξιοποιήθηκε σε ελαιώνα για εναέρια δολωματική εφαρμογή στο πλαίσιο της διαχείρισης του δάκου της ελιάς (*Bactrocera oleae*).

Τα ψεκαστικά UAVs βασίζονται και σε επιμέρους μηχανικά και ηλεκτρονικά υποσυστήματα, τα οποία επιτρέπουν τη μεταφορά και εφαρμογή του ψεκαστικού υγρού. Ένα τυπικό σύστημα περιλαμβάνει μικροελεγκτή, οδηγό κινητήρα, αντλία και ακροφύσιο, τα οποία συνεργάζονται για την ενεργοποίηση και τον έλεγχο του ψεκασμού όπως φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4 Βασική αρχιτεκτονική συστήματος ψεκασμού με UAV, με μικροελεγκτή, οδηγό κινητήρα, αντλία και ακροφύσιο. Πηγή: Rahman et al. (2026).

Η παραπάνω διάταξη δείχνει ότι ο ψεκασμός με UAV δεν αποτελεί απλή μηχανική εφαρμογή, αλλά βασίζεται σε αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου. Σε πιο εξελιγμένες εφαρμογές, η λειτουργία αυτή μπορεί να συνδυαστεί με δεδομένα τηλεπισκόπησης, χάρτες προσβολών ή αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης, ώστε η επέμβαση να γίνεται πιο στοχευμένα και μόνο στις περιοχές όπου υπάρχει ανάγκη.

Ωστόσο, η τεχνολογική δυνατότητα εφαρμογής ψεκασμών με UAVs δεν συνεπάγεται αυτόματα και την ελεύθερη χρήση τους στο πεδίο. Η πρακτική αξιοποίησή τους στη φυτοπροστασία πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο, καθώς η από αέρος εφαρμογή γεωργικών φαρμάκων υπόκειται σε αυστηρούς περιορισμούς.

Στην Ελλάδα, η από αέρος εφαρμογή γεωργικών φαρμάκων απαγορεύεται ως γενικός κανόνας, ενώ μπορεί να επιτραπεί μόνο κατά παρέκκλιση και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Τέτοιες προϋποθέσεις αφορούν, μεταξύ άλλων, την έλλειψη βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων, την ύπαρξη σαφών πλεονεκτημάτων ως προς την προστασία της υγείας και του περιβάλλοντος, καθώς και τη χρήση εξοπλισμού που περιορίζει τη μετακίνηση του ψεκαστικού νέφους. Επομένως, η αξιοποίηση UAVs για εφαρμογές φυτοπροστασίας δεν πρέπει να προσεγγίζεται μόνο ως τεχνολογική καινοτομία, αλλά και ως πρακτική που οφείλει να συμμορφώνεται με τους ισχύοντες νομικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς.

7.1. Εκπαιδευτική επίδειξη UAV στο πλαίσιο πρακτικής άσκησης

Στο πλαίσιο της πρακτικής άσκησης που πραγματοποιήθηκε στο Αγρίνιο (διά ζώσης εκπαίδευση, ΕΑΠ), έγινε παρουσίαση και εκπαιδευτική χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV)(Εικόνα 5 και Εικόνα 6), τα οποία αξιοποιούνται σε εφαρμογές γεωργίας ακριβείας. Η επίδειξη περιλάμβανε την παρουσίαση διαφορετικών τύπων UAV, καθώς και τη χρήση αισθητήρων απεικόνισης για τη συλλογή δεδομένων πεδίου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε η χρήση UAV με θερμική κάμερα, καθώς η θερμική απεικόνιση μπορεί να συμβάλει στον εντοπισμό διαφοροποιήσεων στη θερμοκρασία της φυτικής κόμης. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μπορεί να σχετίζονται με υδατικό στρες, μειωμένη φυσιολογική δραστηριότητα ή άλλες καταστάσεις που επηρεάζουν την υγεία των φυτών. Παρόλο που η συγκεκριμένη εφαρμογή είχε εκπαιδευτικό χαρακτήρα και δεν αποτέλεσε πειραματική διαδικασία με ανάλυση δεδομένων, ανέδειξε τη δυνατότητα των UAV να λειτουργούν ως εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων στη γεωργία ακριβείας.

Η χρήση τέτοιων συστημάτων μπορεί να συνδεθεί με τη φυτοπροστασία, καθώς η έγκαιρη ανίχνευση προβληματικών ζωνών μέσα στον αγρό μπορεί να βοηθήσει στον σχεδιασμό στοχευμένων επεμβάσεων. Με τον τρόπο αυτό, τα UAV δεν χρησιμοποιούνται μόνο για την παρατήρηση της καλλιέργειας, αλλά και για την υποστήριξη πιο ορθολογικών εφαρμογών, όπως ο στοχευμένος ψεκασμός σε περιοχές όπου εντοπίζεται αυξημένη πιθανότητα προσβολής ή στρες.

Στην περίπτωση της φυτοπροστασίας, τα δεδομένα που συλλέγονται από UAV μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχικό στάδιο εντοπισμού ζωνών ενδιαφέροντος. Οι ζώνες αυτές μπορούν στη συνέχεια να αξιοποιηθούν για την εφαρμογή στοχευμένων ψεκασμών, περιορίζοντας την άσκοπη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων σε ολόκληρη την έκταση του αγρού. Επομένως, τα UAV με θερμικούς ή πολυφασματικούς αισθητήρες μπορούν να υποστηρίξουν τη μετάβαση από τον ομοιόμορφο ψεκασμό σε πιο ακριβείς και χωρικά διαφοροποιημένες επεμβάσεις.



Εικόνα 5 UAV με μονάδα ακριβούς εντοπισμού, στο πλαίσιο εκπαιδευτικής επίδειξης κατά την πρακτική άσκηση στο Αγρίνιο (διά ζώσης εκπαίδευση, ΕΑΠ). Πηγή: ίδια λήψη, 2026.



Εικόνα 6 UAV με θερμική κάμερα, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε εκπαιδευτική επίδειξη πεδίου στο Αγρίνιο (διά ζώσης εκπαίδευση, ΕΑΠ). Πηγή: ίδια λήψη, 2026.

8. Εφαρμογή σε συγκεκριμένες καλλιέργειες

Η εφαρμογή των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας στη φυτοπροστασία αποκτά ιδιαίτερη σημασία στις δενδρώδεις καλλιέργειες, καθώς οι καλλιέργειες αυτές παρουσιάζουν μεγάλη οικονομική αξία και επηρεάζονται έντονα από εχθρούς, ασθένειες και μεταβολές του μικροκλίματος. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ενδεικτικές εφαρμογές σε καλλιέργειες της ελιάς, με έμφαση στη χρήση έξυπνων παγίδων, μετεωρολογικών δεδομένων, μοντέλων πρόβλεψης και συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης για τη βελτίωση της φυτοπροστασίας.

8.1. 1^ο Case Study: Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας στη Φυτοπροστασία Ελαιώνων (Νομός Χανίων)

Η πρακτική εφαρμογή των τεχνολογιών ΓΑ στην ελληνική πραγματικότητα αποτυπώνεται ανάγλυφα σε πρόσφατη μελέτη του Μπρεδάκη (2025) που πραγματοποιήθηκε σε πειραματικό ελαιώνα στην περιοχή Τραχάλα του Δήμου Κισσάμου, στον Νομό Χανίων Κρήτης, με αντικείμενο την αντιμετώπιση του κυριότερου εχθρού της ελαιοκαλλιέργειας, του Δάκου (*Bactrocera oleae*).

Στο συγκεκριμένο πεδίο δοκιμών αναπτύχθηκε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση φυτοπροστασίας με τη συνδυαστική χρήση τεχνολογιών αιχμής:

Παγίδες Τεχνητής Νοημοσύνης (Smart AI Traps): Εγκαταστάθηκαν έξυπνες παγίδες ψηφιακής καταγραφής, οι οποίες μέσω ενσωματωμένης κάμερας και αλγορίθμων αναγνώρισης προτύπων πραγματοποιούσαν αυτόματη καταμέτρηση των συλληφθέντων εντόμων σε πραγματικό χρόνο, αποστέλλοντας τα δεδομένα ασύρματα.

Αισθητήρες Μικροκλίματος & Τηλεπισκόπηση: Χρησιμοποιήθηκαν επίγειοι αισθητήρες για την καταγραφή κλιματικών παραμέτρων, σε συνδυασμό με λήψεις από μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Drones/UAVs) για την πολυφασματική χαρτογράφηση της ζωνρότητας των δέντρων.

Ψεκασμοί Μεταβλητής Δόσης (VRA - Variable Rate Application): Η τροφοδοσία των παραπάνω δεδομένων σε ένα Σύστημα Υποστήριξης Απόφασης (DSS) επέτρεψε τη δημιουργία δυναμικών χαρτών εφαρμογής. Οι ψεκασμοί δεν έγιναν καθολικά, αλλά εφαρμόστηκαν στοχευμένα (timing και spot-spraying) μόνο στα σημεία και τις περιόδους με διαπιστωμένη έξαρση.

Ποσοτικά Αποτελέσματα και Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα

Τα αποτελέσματα της μελέτης τεκμηριώνουν την ανωτερότητα των τεχνολογιών ακριβείας έναντι των συμβατικών πρακτικών:

Ποσοστό Προσβολής: Στον πειραματικό αγρό της Γεωργίας Ακριβείας, το ποσοστό προσβολής του ελαιοκάρπου από τον δάκο περιορίστηκε στο 11%.

Σύγκριση με τον Αγρό Μάρτυρα: Στον παρακείμενο αγρό μάρτυρα, όπου εφαρμόστηκε η συμβατική, ημερολογιακή μέθοδος καθολικών ψεκασμών, η προσβολή ανήλθε στο 18%.

Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποδεικνύει ότι η ΓΑ όχι μόνο πέτυχε καλύτερα αποτελέσματα προστασίας του καρπού, αλλά περιορίσε δραστικά τον όγκο των χρησιμοποιούμενων χημικών σκευασμάτων. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται άμεσα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της καλλιέργειας, προστατεύεται η ωφέλιμη πανίδα (επίγειοι εχθροί, μέλισσες) και αποφεύγεται η άσκοπη επιβάρυνση του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα. Επιπλέον, αναδεικνύει τη σημασία των έξυπνων παγίδων ως εργαλείων παρακολούθησης πληθυσμών εντόμων σε πραγματικό χρόνο, ιδιαίτερα σε καλλιέργειες υψηλής οικονομικής σημασίας όπως η ελιά.

8.2. 2^ο Case Study: Σύστημα gaiasense στην Καλλιέργεια Πράσινης Ελιάς Χαλκιδικής

Η πρακτική εφαρμογή των συστημάτων Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ) σε επίπεδο οργανωμένων ομάδων παραγωγών στην Ελλάδα αναλύεται υποδειγματικά στη μελέτη του

Τιμοσίδη (2026). Η έρευνα εστιάζει στην καλλιέργεια της επιτραπέζιας πράσινης ελιάς ποικιλίας Χαλκιδικής στη Δημοτική Ενότητα Ορφανού του **Δήμου Παγγαίου (Π.Ε. Καβάλας)**.

Στη συγκεκριμένη εμπορική εφαρμογή συμμετείχαν **15 ελαιοπαραγωγοί** με συνολική έκταση περίπου **600 στρεμμάτων**, χρησιμοποιώντας την ελληνική ψηφιακή πλατφόρμα **gaiasense** (της εταιρείας *Neuropublic*).

Τεχνολογική Δομή του Συστήματος

Το σύστημα βασίστηκε σε μια ολιστική αρχιτεκτονική που συνδυάζει επίγεια και δορυφορικά δεδομένα:

- **Τηλεμετρικοί Αγρομετεωρολογικοί Σταθμοί:** Εγκαταστάθηκαν στο πεδίο τρεις αγρομετεωρολογικοί σταθμοί για τη συνεχή καταγραφή ατμοσφαιρικών και εδαφικών παραμέτρων (θερμοκρασία/υγρασία αέρα και εδάφους, κατεύθυνση και ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία), μέσω των αισθητήρων που διέθεταν.
- **Δορυφορική Τηλεπισκόπηση:** Αξιοποιήθηκαν δεδομένα από τους δορυφόρους Sentinel για την αποτύπωση της χωρικής παραλλακτικότητας και την παρακολούθηση της ζωνρότητας της βλάστησης.
- **Αισθητήρες υγρασίας εδάφους τύπου EnviroSCAN** για μετρήσεις εδάφους.
- **Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας και διύγρανσης των φύλλων.**
- **Εγκατάσταση παγίδων McPhail** για την παρακολούθηση του δάκου της ελιάς.

Διαχείριση Φυτοπροστασίας και Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα

Στον τομέα της φυτοπροστασίας, η πλατφόρμα επεξεργαζόταν τα μικροκλιματικά δεδομένα σε συνδυασμό με επιστημονικά μοντέλα πρόβλεψης εχθρών και ασθενειών. Τα κύρια οφέλη που προέκυψαν ήταν:

1. **Στοχευμένες Προειδοποιήσεις (Site-specific Recommendations):** Αντί για καθολικούς, ημερολογιακούς ψεκασμούς, το σύστημα παρήγαγε εξατομικευμένες ειδοποιήσεις ανά αγροτεμάχιο. Οι παραγωγοί ενημερώνονταν για το πότε οι συνθήκες ήταν πραγματικά ευνοϊκές για την ανάπτυξη παθογόνων, πραγματοποιώντας επεμβάσεις μόνο σε περιπτώσεις πραγματικού κινδύνου.
2. **Μείωση Χημικών Εισροών:** Η ακριβής γνώση του timing των επεμβάσεων οδήγησε σε σημαντική μείωση του όγκου των χρησιμοποιούμενων φυτοφαρμάκων. Αυτό μείωσε άμεσα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των 600 στρεμμάτων, περιορίζοντας τα υπολείμματα στους καρπούς της επιτραπέζιας ελιάς και προστατεύοντας τον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής.
3. **Ορθολογική Λίπανση και Άρδευση:** Πέρα από τη φυτοπροστασία, οι εδαφολογικές αναλύσεις και οι αισθητήρες υγρασίας επέτρεψαν τη βελτιστοποίηση της θρέψης και του ποτίσματος, εξοικονομώντας πολύτιμους φυσικούς πόρους.

Συμπέρασμα Μελέτης

Η εργασία του Τιμοσίδη (2026) αναδεικνύει τη σημασία της Γεωργίας Ακριβείας ως βασικό πυλώνα για τη **βιώσιμη εντατικοποίηση** της ελληνικής ελαιοκαλλιέργειας. Παράλληλα, επισημαίνει ότι η επιτυχία τέτοιων τεχνολογικών συστημάτων εξαρτάται άμεσα από την **εκπαίδευση των αγροτών** και τη στενή συνεργασία τους με γεωτεχνικούς συμβούλους, ώστε να μπορούν να ερμηνεύουν και να εφαρμόζουν σωστά τα ψηφιακά δεδομένα στην καθημερινή πρακτική του αγρού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η παρακολούθηση του δάκου της ελιάς, καθώς στο πλαίσιο της εφαρμογής εγκαταστάθηκαν παγίδες McPhail σε επιλεγμένα αγροτεμάχια της περιοχής. Η παρακολούθηση των πληθυσμών του δάκου αποτελεί σημαντικό στοιχείο της ολοκληρωμένης φυτοπροστασίας, καθώς επιτρέπει την καλύτερη εκτίμηση του κινδύνου προσβολής και την πιο στοχευμένη εφαρμογή μέτρων αντιμετώπισης.

9. Οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας

Η οικονομική και περιβαλλοντική αξιολόγηση των τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας πρέπει να συνυπολογίζει τόσο το αρχικό κόστος εξοπλισμού και επεξεργασίας δεδομένων όσο και τα οφέλη από τη στοχευμένη χρήση εισροών. Εφαρμογές μεταβλητού ρυθμού, αισθητήρες, UAVs και πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης μπορούν να βελτιώσουν την κερδοφορία και να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όταν προσαρμόζονται στις ανάγκες της εκμετάλλευσης (Soussi et al., 2024).

Μέσα από τη συστηματική ανασκόπηση των Papadopoulos et al. (2024), αναδεικνύεται η άρρηκτη σύνδεση μεταξύ της μείωσης του λειτουργικού κόστους και της προστασίας του αγροοικοσυστήματος, όπως αυτή προκύπτει από την εφαρμογή των τεχνολογιών μεταβλητής δόσης, των ρομποτικών συστημάτων και των πληροφοριακών συστημάτων διαχείρισης όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί η πληροφορία των συγγραφέων ότι τα Συστήματα Πληροφοριών Διαχείρισης Αγροκτήματος (Farm Management Information Systems - FMIS) αποτελούν ουσιαστικά το «ψηφιακό στρατηγείο» ή την κεντρική πλατφόρμα λογισμικού (software) μιας έξυπνης γεωργικής εκμετάλλευσης. Η τεχνολογία αυτή λειτουργεί ως ένας κεντρικός κόμβος που συλλέγει, αποθηκεύει και αναλύει τον τεράστιο όγκο δεδομένων που παράγονται στον αγρό. Μέσω ενσωματωμένων Συστημάτων Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων (Decision Support Systems - DSS), το FMIS μετατρέπει τα πρωτογενή αυτά δεδομένα σε έγκυρες γεωπονικές συμβουλές, καθοδηγώντας τον παραγωγό στο πότε και πού ακριβώς πρέπει να εφαρμόσει μια καλλιεργητική φροντίδα ή έναν ψεκασμό.

Σε **οικονομικό επίπεδο**, η ολιστική διαχείριση μέσω ενός FMIS επιφέρει άμεση μείωση του συνολικού κόστους των εισροών έως και 20%. Η εξοικονόμηση αυτή οφείλεται κυρίως

στην αποφυγή άσκοπων επεμβάσεων, καθώς η πλατφόρμα επιτρέπει τη μείωση της χρήσης φυτοφαρμάκων κατά 61,6% (βάσει των ορίων οικονομικής ζημιάς που υπολογίζει το σύστημα) και τον περιορισμό της υπερλίπανσης κατά 12% έως 22%. Παράλληλα, η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων οδηγεί σε εξοικονόμηση νερού άρδευσης που κυμαίνεται από 20% έως 60%, μειώνοντας δραστικά το κόστος άντλησης και ενέργειας.

Σε **περιβαλλοντικό επίπεδο**, η βελτιστοποίηση των εφαρμογών μέσω FMIS μειώνει το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της εκμετάλλευσης κατά 15%. Το γεγονός αυτό καθιστά τα συστήματα αυτά ένα ισχυρό όπλο απέναντι στην κλιματική αλλαγή, καθώς προστατεύουν τον υδροφόρο ορίζοντα από τη νιτρορύπανση και τα υπολείμματα φυτοφαρμάκων, ενώ παράλληλα ενισχύουν την ανθεκτικότητα των δέντρων σε περιόδους έντονης ξηρασίας.

Η εφαρμογή των Τεχνολογιών Μεταβλητής Δόσης (Variable Rate Technologies - VRT) προσφέρει σημαντικά **οικονομικά οφέλη** μέσω της ακριβούς χωρικής κατανομής των εισροών. Αντί για την καθολική εφαρμογή (flat-rate) χημικών σκευασμάτων σε όλο τον οπωρώνα, η VRT προσαρμόζει τη δόση του ψεκαστικού υγρού ανάλογα με τον όγκο της φυλλικής επιφάνειας ή την πίεση του εχθρού-στόχου σε συγκεκριμένες ζώνες. Η πρακτική αυτή μεταφράζεται σε μείωση των εφαρμογών φυτοφαρμάκων έως και 80%, μειώνοντας κατακόρυφα το κόστος αγοράς αγροχημικών για τον παραγωγό. Επιπλέον, η εφαρμογή μεταβλητού ρυθμού άρδευσης σε πολυετείς δενδρώδεις καλλιέργειες υψηλής αξίας και αμπελώνες εξασφαλίζει εξοικονόμηση νερού από 20% έως 50%.

Από περιβαλλοντική άποψη, η VRT συμβάλλει άμεσα στον μετριασμό των αερίων του θερμοκηπίου. Η στοχευμένη εφαρμογή αζωτούχων λιπασμάτων και ο περιορισμός της άσκοπης χρήσης νερού μέσω της άρδευσης ακριβείας οδηγούν σε μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) κατά 22,6%. Με τον τρόπο αυτό, η τεχνολογία VRT υποστηρίζει ενεργά τη βιώσιμη φυτοπροστασία, περιορίζοντας τη συσσώρευση χημικών υπολειμμάτων στο έδαφος και τον καρπό.

Η εισαγωγή αυτόνομων οχημάτων και έξυπνων ψεκαστικών μέσων επιτρέπει τη βελτιστοποιημένη πλοήγηση εντός των γραμμών φύτευσης των δενδροκομείων, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμων των ελκυστήρων κατά 50%. Ταυτόχρονα, σε εξειδικευμένες και χρονοβόρες εργασίες φυτοπροστασίας (όπως ο υποκαπνισμός ή οι στοχευμένοι ψεκασμοί σε αμπελώνες), η ρομποτική τεχνολογία επιφέρει δραστική μείωση του εργατικού κόστους, μειώνοντας τις απαιτήσεις σε ανθρώπινη εργασία στο πεδίο έως και 97%.

Πίνακας 1 Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών VRT-RSSM-DSS ως προς την εφαρμογή τους και τον αντίκτυπό τους στην κλιματική αλλαγή

Τεχνολογία	Εφαρμογή στην καλλιέργεια	Περιβαλλοντικό αντίκτυπο & Κλιματική αλλαγή
Τεχνολογίες Μεταβλητής Δόσης (VRT)	• Μείωση των εφαρμογών φυτοφαρμάκων έως και 80%. • Εξοικονόμηση νερού κατά 20% έως 50% σε οπωρώνες (π.χ. αχλαδιές) και αμπελώνες.	• Μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) έως και 22,6% λόγω της άρδευσης ακριβείας και της ορθής αζωτούχου λίπανσης.
Ρομποτικά Συστήματα & Έξυπνα Μηχανήματα (RSSM)	• Έξυπνοι ψεκαστήρες και ρομπότ με UVC ακτινοβολία μειώνουν τη χρήση μυκητοκτόνων και φυτοφαρμάκων κατά 90% έως 95%. • Μείωση εργασίας έως 97% σε εξειδικευμένους ψεκασμούς (fumigation) σε αμπελώνες. • Μείωση της μετακίνησης του ψεκαστικού υγρού κατά 48%.	• Μείωση της κατανάλωσης καυσίμων των μηχανημάτων κατά 50% μέσω βελτιστοποιημένης πλοήγησης στο χωράφι.
Συστήματα Πληροφοριών Διαχείρισης (FMIS / DSS)	• Μείωση της χρήσης φυτοφαρμάκων κατά 61,6% μέσω συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων. • Εξοικονόμηση νερού άρδευσης κατά 20% έως 60%.	• Συνολική μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της εκμετάλλευσης έως και 15%.

Στον **περιβαλλοντικό τομέα**, τα έξυπνα μηχανήματα και οι αυτόνομοι ψεκαστήρες, που συχνά ενσωματώνουν τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης (AI) για την αναγνώριση των φύλλων ή εναλλακτικές μεθόδους (όπως ρομπότ επιλεκτικής θεραπείας ασθενειών με UVC ακτινοβολία), επιτυγχάνουν μείωση της χρήσης μυκητοκτόνων και φυτοφαρμάκων κατά 90% έως 95%. Η εξαιρετικά υψηλή αυτή ακρίβεια συνοδεύεται από μείωση της αερομεταφοράς του ψεκαστικού νέφους (spray drift) κατά 48%, περιορίζοντας στο

ελάχιστο τη μόλυνση των γειτονικών, μη-στόχων ζωνών και προστατεύοντας την ωφέλιμη πανίδα του οικοσυστήματος (Papadopoulos et al., 2024).

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της συμβατικής δενδροκομίας είναι βεβαρημένο λόγω της απορροής (runoff) αγροχημικών, η οποία προκαλεί ευτροφισμό στα επιφανειακά ύδατα και τοξικότητα στα υπόγεια. Η Γεωργία Ακριβείας, εφαρμόζοντας τον κανόνα των "4R" (Right source, Right rate, Right time, Right place), μειώνει κατακόρυφα τον όγκο των εκλυόμενων χημικών. Προστατεύεται η βιοποικιλότητα του εδάφους και μειώνονται οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG) εξαιτίας της μικρότερης κατανάλωσης καυσίμων από τα γεωργικά μηχανήματα.

10. Ποσοτικά δεδομένα μείωσης εισροών

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η εφαρμογή τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας μπορεί να συμβάλει στη μείωση των εισροών και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της γεωργικής παραγωγής. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται ενδεικτικά ποσοτικά δεδομένα από μελέτες και εκθέσεις που αφορούν τη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων, ζιζανιοκτόνων, λιπασμάτων, καυσίμων και νερού. Τα αποτελέσματα δεν πρέπει να θεωρούνται καθολικά για όλες τις καλλιέργειες, καθώς εξαρτώνται από το είδος της τεχνολογίας, την καλλιέργεια, τις εδαφοκλιματικές συνθήκες, την ακρίβεια των δεδομένων και τον τρόπο εφαρμογής.

Τα παρακάτω δεδομένα δείχνουν ότι η Γεωργία Ακριβείας δεν οδηγεί σε μία ενιαία και σταθερή μείωση εισροών σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτιστοποίηση της χρήσης φυτοπροστατευτικών προϊόντων, ζιζανιοκτόνων, λιπασμάτων, καυσίμων και νερού, όταν εφαρμόζεται με κατάλληλα δεδομένα, εξοπλισμό και γεωπονική ερμηνεία.

Πίνακας 2 Ενδεικτικά ποσοτικά δεδομένα μείωσης εισροών από την εφαρμογή τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας.

Πεδίο εφαρμογής	Τεχνολογία / πρακτική Γεωργίας Ακριβείας	Ποσοτικό αποτέλεσμα	Ερμηνεία	Πηγή
Συνολική εφαρμογή Γεωργίας Ακριβείας	Συνδυασμός τεχνολογιών ΓΑ	9% μείωση χρήσης ζιζανιοκτόνων/φυτοφαρμάκων, 6% μείωση καυσίμων και 4% μείωση νερού	Η συστηματική χρήση τεχνολογιών ΓΑ μπορεί να περιορίσει τις εισροές και να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής.	AEM (2024)
Διαχείριση ζιζανίων	Site-specific weed management / τοπικός στοχευμένος ψεκασμός ζιζανίων (patch spraying).	23–89% εξοικονόμηση ζιζανιοκτόνων σε 58 πειράματα πεδίου	Η χαρτογράφηση ζιζανίων και ο στοχευμένος ψεκασμός επιτρέπουν την εφαρμογή ζιζανιοκτόνου μόνο στα σημεία όπου υπάρχει πραγματική ανάγκη.	Gerhards et al. (2022)
Διαχείριση ζιζανίων	Site-specific weed management / τοπικός στοχευμένος ψεκασμός ζιζανίων (patch spraying).	Τουλάχιστον 50% εξοικονόμηση ζιζανιοκτόνων σε διάφορες καλλιέργειες	Η εφαρμογή ζιζανιοκτόνου πραγματοποιείται μόνο στα σημεία όπου έχει εντοπιστεί παρουσία ζιζανίων, μειώνοντας την άσκοπη εφαρμογή σε ολόκληρο τον αγρό.	Gerhards et al. (2022)
Ψεκασμός φυτοπροστατευτικών προϊόντων	Profile variable-rate spraying με ultrasonic detection	32,1% μείωση της ροής ψεκασμού σε σχέση με τον συμβατικό ψεκασμό	Ο ψεκασμός προσαρμόζεται στο προφίλ της κόμης, περιορίζοντας την ποσότητα του ψεκαστικού υγρού.	Nan et al. (2023)
Παραγωγή πατάτας	Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας	23% μείωση χρήσης φυτοφαρμάκων, εκφρασμένη ως EIQ, και 15% μείωση αζωτούχων λιπασμάτων	Η ΓΑ μπορεί να μειώσει τόσο τη χημική φυτοπροστασία όσο και τη χρήση λιπασμάτων, περιορίζοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.	van Evert et al. (2017)
Ελαιώνες	Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας στη λίπανση	31% μείωση καλιούχου λιπάσματος, 59% φωσφορικού λιπάσματος και 86% ασβεστικών διορθώσεων	Η εφαρμογή ακριβείας σε ελαιώνες μπορεί να μειώσει σημαντικά ορισμένες εισροές χωρίς αρνητική επίδραση στην παραγωγή.	van Evert et al. (2017)

Πηγή: Ίδια επεξεργασία, βασισμένη σε βιβλιογραφικά δεδομένα των AEM (2024), van Evert et al. (2017), Gerhards et al. (2022), Nan et al. (2023).

Σημείωση: Τα ποσοτικά δεδομένα παρουσιάζονται ως ενδεικτικά αποτελέσματα από συγκεκριμένες μελέτες και εφαρμογές. Δεν αποτελούν καθολικές τιμές για όλες τις καλλιέργειες ή όλες τις συνθήκες εφαρμογής, καθώς η αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας εξαρτάται από την καλλιέργεια, την τεχνολογία, τις εδαφοκλιματικές συνθήκες, την ποιότητα των δεδομένων και τη γεωπονική ερμηνεία.

11. Συμπεράσματα και μελλοντικές προοπτικές

Η σύγχρονη γεωργία βρίσκεται σε ένα κρίσιμο στάδιο μετάβασης, καθώς δέχεται ταυτόχρονα την πίεση της κλιματικής αλλαγής και την ανάγκη συμμόρφωσης με αυστηρότερες περιβαλλοντικές πολιτικές, όπως η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και οι κατευθύνσεις της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής. Η αύξηση της συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων, η μεταβολή των συνθηκών εμφάνισης εχθρών και ασθενειών, καθώς και η ανάγκη περιορισμού των χημικών εισροών καθιστούν αναγκαία την υιοθέτηση πιο στοχευμένων και τεκμηριωμένων συστημάτων διαχείρισης.

Η παρούσα μελέτη ανέδειξε ότι η Γεωργία Ακριβείας δεν αποτελεί απλώς μια τεχνολογική αναβάθμιση της γεωργικής παραγωγής, αλλά ένα βασικό εργαλείο προσαρμογής (adaptation) στις νέες κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Μέσω της αξιοποίησης τεχνολογιών όπως τα UAVs, οι αισθητήρες, η τηλεπισκόπηση, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, η τεχνητή νοημοσύνη και οι εφαρμογές μεταβλητού ρυθμού, καθίσταται δυνατή η πιο ακριβής παρακολούθηση των καλλιεργειών και η έγκαιρη λήψη αποφάσεων φυτοπροστασίας.

Ιδιαίτερα στον τομέα της φυτοπροστασίας, η Γεωργία Ακριβείας συμβάλλει στον εντοπισμό περιοχών υψηλού κινδύνου, στην έγκαιρη διάγνωση προσβολών και στην εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων μόνο όπου και όταν υπάρχει πραγματική ανάγκη. Με τον τρόπο αυτό, περιορίζεται η άσκοπη χρήση χημικών εισροών, μειώνονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ενισχύεται η βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων.

Τα τελευταία χρόνια, τα UAVs έχουν αναδειχθεί ως μία ιδιαίτερα σημαντική τεχνολογία στη Γεωργία Ακριβείας. Η χρήση τους επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων τηλεπισκόπησης υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης, παρέχοντας λεπτομερείς πληροφορίες για την κατάσταση των καλλιεργειών. Μέσω των δεδομένων αυτών, οι παραγωγοί και οι γεωπόνοι μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις καλλιεργητικές πρακτικές και τις εφαρμογές φυτοπροστασίας, συμβάλλοντας τόσο στη μείωση του κόστους παραγωγής όσο και στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Liu et al., 2021).

Παράλληλα, η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στα συστήματα UAVs διευρύνει ακόμη περισσότερο τις δυνατότητες της γεωργίας ακριβείας. Τα συστήματα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν την ανίχνευση ασθενειών, την αναγνώριση εστιών προσβολής και τη λήψη πιο στοχευμένων αποφάσεων φυτοπροστασίας. Ωστόσο, η εφαρμογή AI-based UAV συστημάτων εξακολουθεί να συνοδεύεται από προκλήσεις, όπως η ανάγκη για αξιόπιστη επιτόπια επικύρωση, η προσαρμογή των μοντέλων σε διαφορετικές καλλιέργειες και περιβάλλοντα, καθώς και ζητήματα κόστους, κανονισμών και επιχειρησιακής εφαρμογής (Rahman et al., 2026).

Στους παραπάνω περιορισμούς εντάσσεται και το θεσμικό πλαίσιο που διέπει την από αέρος εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Στην Ελλάδα, η από αέρος εφαρμογή γεωργικών φαρμάκων απαγορεύεται ως γενικός κανόνας, ενώ μπορεί να επιτραπεί μόνο κατά παρέκκλιση και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις, όπως η έλλειψη βιώσιμων εναλλακτικών λύσεων, η ύπαρξη σαφών πλεονεκτημάτων ως προς την προστασία της υγείας και του περιβάλλοντος, καθώς και η χρήση εξοπλισμού που περιορίζει τη μετακίνηση του ψεκαστικού νέφους. Επομένως, η αξιοποίηση UAVs για εφαρμογές φυτοπροστασίας πρέπει να εξετάζεται όχι μόνο ως τεχνολογική δυνατότητα, αλλά και σε σχέση με τους ισχύοντες νομικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς (Ελληνική Δημοκρατία, 2012).

Η αποτελεσματική αξιοποίηση της Γεωργίας Ακριβείας στη φυτοπροστασία δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθεσιμότητα τεχνολογικού εξοπλισμού, αλλά και από τη συνεργασία διαφορετικών επιστημονικών πεδίων. Η μετάβαση σε πιο έξυπνα και βιώσιμα συστήματα φυτοπροστασίας απαιτεί τη συνεργασία γεωπόνων, μηχανικών, ειδικών πληροφορικής και αναλυτών δεδομένων. Οι γεωπόνοι διαθέτουν τη γνώση της καλλιέργειας, των εχθρών, των ασθενειών και των καλλιεργητικών πρακτικών, ενώ οι μηχανικοί και οι αναλυτές δεδομένων συμβάλλουν στην ανάπτυξη, επεξεργασία και ερμηνεία των τεχνολογικών συστημάτων.

Παρότι η Γεωργία Ακριβείας προσφέρει σημαντικά οφέλη, η εφαρμογή της συνοδεύεται από προκλήσεις που σχετίζονται με το κόστος, την προσβασιμότητα, τη διαχείριση δεδομένων και την εκπαίδευση των χρηστών. Η αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων είναι

απαραίτητη, ώστε να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό της για βιώσιμη και αποτελεσματική παραγωγή τροφίμων. Η ευρύτερη υιοθέτηση των τεχνολογιών αυτών μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη παραγωγικότητα, αποτελεσματικότερη διαχείριση πόρων και μεγαλύτερη περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Sharma, 2023).

Ειδικότερα σε περιοχές με μικρές ή μεσαίες γεωργικές εκμεταλλεύσεις, όπως η Ήπειρος, η υιοθέτηση τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας μπορεί να συναντήσει πρόσθετα εμπόδια. Το υψηλό αρχικό κόστος εξοπλισμού, όπως αισθητήρες, drones, μετεωρολογικοί σταθμοί, συστήματα GPS και λογισμικά ανάλυσης δεδομένων, ενδέχεται να δυσκολεύει την εφαρμογή τους από μικρούς παραγωγούς. Επιπλέον, η περιορισμένη πρόσβαση σε αξιόπιστη σύνδεση στο διαδίκτυο, ηλεκτρική ενέργεια και τεχνική υποστήριξη αποτελεί σημαντικό περιορισμό για την αξιοποίηση συστημάτων IoT, τηλεπισκόπησης και λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Αντίστοιχες προκλήσεις αναφέρονται και από τους Getahun et al. (2024), οι οποίοι επισημαίνουν ότι η περιορισμένη πρόσβαση στην τεχνολογία, το υψηλό κόστος και οι ανεπαρκείς υποδομές μπορούν να επηρεάσουν την εφαρμογή της Γεωργίας Ακριβείας.

Για τον λόγο αυτό, η επιτυχής εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών προϋποθέτει όχι μόνο την ύπαρξη κατάλληλου εξοπλισμού, αλλά και την εκπαίδευση των παραγωγών, την τεχνική υποστήριξη και την προσαρμογή των συστημάτων στις πραγματικές ανάγκες κάθε καλλιέργειας. Η τεχνολογία από μόνη της δεν επαρκεί, εάν δεν συνοδεύεται από επιστημονική καθοδήγηση, σωστή ερμηνεία των δεδομένων και πρακτική εφαρμογή στο πεδίο.

Η σημασία της στοχευμένης φυτοπροστασίας αναδεικνύεται ιδιαίτερα στην περίπτωση των μυκητοκτόνων. Τα μυκητοκτόνα χρησιμοποιούνται ευρέως για τον έλεγχο φυτοπαθολογικών ασθενειών και τη μείωση των απωλειών στην παραγωγή και την ποιότητα των καλλιεργειών. Παρότι η ομοιόμορφη εφαρμογή τους εξακολουθεί να εφαρμόζεται συχνά, λόγω της ταχείας εξάπλωσης πολλών ασθενειών, σε ορισμένες περιπτώσεις η εφαρμογή μεταβλητού ρυθμού και σε συγκεκριμένες θέσεις μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική. Η αξιοποίηση δεδομένων τηλεπισκόπησης και χαρτών προσβολής επιτρέπει τον εντοπισμό περιοχών υψηλού κινδύνου και την εφαρμογή πιο στοχευμένων

παρεμβάσεων, ιδιαίτερα σε ασθένειες που εμφανίζονται επαναλαμβανόμενα στις ίδιες περιοχές του αγρού.

Με τον τρόπο αυτό, οι τεχνολογικές εξελίξεις στη Γεωργία Ακριβείας συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση των εισροών, στη βελτίωση της παραγωγικότητας και στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Soussi et al., 2024). Η χρήση UAVs, αισθητήρων, τηλεπισκόπησης, τεχνητής νοημοσύνης, εφαρμογών μεταβλητού ρυθμού και συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων μπορεί να ενισχύσει την έγκαιρη διάγνωση προσβολών, να μειώσει την άσκοπη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων και να συμβάλει στη μετάβαση προς πιο βιώσιμα συστήματα παραγωγής.

Συμπερασματικά, η εφαρμογή της Γεωργίας Ακριβείας στη φυτοπροστασία δεν αποτελεί απλώς τεχνολογική επιλογή, αλλά αναγκαία κατεύθυνση για την προσαρμογή της γεωργίας στις σύγχρονες περιβαλλοντικές, οικονομικές και κλιματικές προκλήσεις. Η αποτελεσματική εφαρμογή της προϋποθέτει εκπαίδευση των παραγωγών, πρόσβαση σε τεχνική υποστήριξη, διεπιστημονική συνεργασία και σύνδεση των τεχνολογικών εργαλείων με τις απαιτήσεις της ΚΑΠ και της ολοκληρωμένης φυτοπροστασίας. Με περαιτέρω έρευνα, συνεργασία και κατάλληλη υποστήριξη, η Γεωργία Ακριβείας μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στη διατήρηση της παραγωγικότητας, στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη δημιουργία ενός πιο ανθεκτικού και βιώσιμου γεωργικού μοντέλου.

12. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1 Abd El-Salam, A. S.-R.-B. (2019). Effects of climatic changes on olive fly, *Bactrocera oleae* (Rossi) population dynamic with respect to the efficacy of its larval parasitoid in Egyptian olive trees. *Bulletin of the National Research Centre*, 43, σ. 173. doi:<https://doi.org/10.1186/s42269-019-0220-9>
- 2 Adebunmi Okechukwu Adewusi, O. F. (2024). AI in precision agriculture: A review of technologies for sustainable farming practices. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(1), σσ. 2276-2285. doi: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.1.0314>
- 3 Agrios, G. (2005). *PLANT PATHOLOGY* (Τόμ. 5). Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- 4 Ahanger, R. B. (2013). Impact of Climate Change on Plant Diseases. *International Journal of Modern Plant & Animal Sciences*, 1(3), pp. 105-115. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Shamsul-Haq/publication/304675646_Impact_of_Climate_Change_on_Plant_Diseases/links/5776b9ca08aead7ba071d118/Impact-of-Climate-Change-on-Plant-Diseases.pdf
- 5 Alqahtani, M. E. (2025). Projecting the global spread of xylella fastidiosa under climate change using maxent modeling. *Scientific reports*, 15(1), p. 32460. doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-025-18286-2>
- 6 Association of Equipment Manufacturers. (2024, March 21). *The environmental benefits of precision agriculture quantified*. Retrieved from AEM: <https://www.aem.org/news/the-environmental-benefits-of-precision-agriculture-quantified>
- 7 Australian Academy of Science. (2015). The Science of Climate Change. Retrieved from <https://science.org.au/our-focus/science-everyone/science-climate-change>
- 8 Bale, J. R. (2002). Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8(1), pp. 1-16. doi:<https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00451.x>
- 9 Bjeliš, M. R. (2024). Invasion History and Dispersion Dynamics of the Mediterranean Fruit Fly in the Balkan Peninsula. *Insects*, 15(12), p. Article 975. doi:<https://doi.org/10.3390/insects15120975>
- 10 Castaldi, F. P. (2017). Assessing the potential of images from unmanned aerial vehicles (UAV) to support herbicide patch spraying in maize. *Precision Agric*, 18, pp. 76–94. doi:<https://doi.org/10.1007/s11119-016-9468-3>
- 11 Cavicchioli, R., Ripple, W. J., Timmis, K. N., Azam, F., Bakken, L. R., Baylis, M., Behrenfeld, M. J., Boetius, A., Boyd, P. W., Classen, A. T., Crowther, T. W., Danovaro, R., Foreman, C. M., Huisman, J., Hutchins, D. A., Jansson, J. K., Karl, D. M., Koskella, B., Mark Welch, D. B., . . . Webster, N. S. (2019). Scientists' warning to humanity: Microorganisms and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 17, 569–586. doi:<https://doi.org/10.1038/s41579-019-0222-5>

- 12 Cheng, C. F. (2022). Recent Advancements in Agriculture Robots: Benefits and Challenges. *Machines. Journal of Agricultural Engineering*, 53(2), σσ. 115-128.
- 13 Cornelissen T. (2011). Climate change and its effects on terrestrial insects and herbivory patterns. *Neotrop. entomol.*, 40(2). doi:<https://doi.org/10.1590/S1519-566X2011000200001>
- 14 Crimmins, A., Balbus, J., Gamble, J. L., Beard, C. B., Bell, J. E., Dodgen, D., . . . Ziska, L. (2016). Ch. 7: Food Safety, Nutrition, and Distribution. (R. E. Basu, Επιμ.) *The Impacts of Climate Change on Human Health in the United States: A Scientific Assessment.*, σσ. 189–216. Ανάκτηση από https://www.publicjustice.net/wp-content/uploads/2017/01/ClimateHealth2016_FullReport-ilovepdf-compressed.pdf#page=43
- 15 Das, T. M. (2016). *Climate change impacts on plant diseases* (Τόμ. 14). SAARC Journal of Agriculture. doi:<https://doi.org/10.3329/sja.v14i2.31259>
- 16 de-Assis, M. P. (2020). Health problems in agricultural workers occupationally exposed to pesticides. *Rev Bras Med Trab.*, 18(3), pp. 352–363. doi:10.47626/1679-4435-2020-532
- 17 DeLucia, E. N. (2012). Climate Change: Resetting Plant-Insect Interactions. *Plant Physiology*, 160(4), σσ. 1677–1685. doi:<https://doi.org/10.1104/pp.112.900450>
- 18 Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2018). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science.*, 361(6405), pp. 916–919. doi:<https://doi.org/10.1126/science.aat3466>
- 19 Ecovariety. (2022). Ανάδειξη τοπικών παραδοσιακών ποικιλιών και αυτοφυών καρποφόρων δένδρων και θάμνων. Πρόγραμμα Αγροτικής Ανάπτυξης 2014-2020. Ανάκτηση από https://ecovariety.gr/wp-content/uploads/2022/05/%CE%A019_Ecovariety%20%CE%A3%CF%85%CF%83%CF%84%CE%AC%CE%B4%CE%B1.pdf
- 20 EEA. (2021). *Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe*. Report 04/2019. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/cc-adaptation-agriculture>
- 21 Ehrenfeld, J. G. (2010). Ecosystem Consequences of Biological Invasions. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*(41), σσ. 59-80. doi:<https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144650>
- 22 Elad Y. & Pertot I. (2014). Climate Change Impacts on Plant Pathogens and Plant Diseases. *Journal of Crop Improvement*, 28(1), pp. 99-139. doi:<https://doi.org/10.1080/15427528.2014.865412>
- 23 ESA SEN4STAT. (n.d.). *Sen2-Agri General Overview*. Retrieved from <https://www.esa-sen4stat.org/sen2agri/>
- 24 European Commission. (n.d.). *Maximum residue levels*. Retrieved from European Commission: https://food.ec.europa.eu/plants/pesticides/eu-pesticides-database_en?utm_source

- 25 European Space Agency. (n.d.). *Δορυφόροι παρατήρησης της Γης – Εισαγωγή*. Retrieved from ESA Eduspace_GR: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR/SEMCRMJSDNG_0.html
- 26 Fedele, G. B.-D. (2020). "Modelling Biocontrol Agents as Plant Protection Tools". *Biology and Life Sciences Forum*, 4(1), p. 75. doi:<https://doi.org/10.3390/IECPS2020-08631>
- 27 Food and Agriculture Organization of the United Nations, & World Health Organization. (2014). *The international code of conduct on pesticide management*. Retrieved from <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/4aa015cc-f644-4a1a-88dc-d0c2272fca05/content>
- 28 Fotso Kamga, G. A., Bitjoka, L., Akram, T., Mengue Mbom, A., Rameez Naqvi, S., & Bouroubi, Y. (2021). Advancements in satellite image classification: Methodologies, techniques, approaches and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 42(20), pp. 7662–7722. doi:<https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1954261>
- 29 Gerhards, R. A.-Q. (2022, March 10). Advances in site-specific weed management in agriculture—A review. *Weed Research*, 62(2), pp. 123–133. doi:<https://doi.org/10.1111/wre.12526>
- 30 Getahun S., K. H. (2024). Application of Precision Agriculture Technologies for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability: A Systematic Review. *The Scientific World Journal*, σ. 12. doi:<https://doi.org/10.1155/2024/2126734>
- 31 Harrington, R. F. (2001). Climate change impacts on insect management and conservation in temperate regions: can they be predicted? *Agricultural and Forest Entomology*(4), p. 233. doi:10.1046/j.1461-9555.2001.00120.x
- 32 International Society of Precision Agriculture. (χ.χ.). ISPA. Ανάκτηση από <https://www.ispag.org/>
- 33 IPCC. (2021). *Summary for Policymakers*. Cambridge University Press., Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Ανάκτηση από <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/summary-for-policymakers/>
- 34 Khan, B.A., Nadeem, M.A., Nawaz, H., Amin, M.M., Abbasi, G.H., Nadeem, M., Ali, M., Ameen, M., Javaid, M.M., Maqbool, R., Ikram, M. & Ayub, M.A. (2023). *Pesticides: Impacts on Agriculture Productivity, Environment, and Management Strategies*. (E. C. Technologies., Ed.) Cham, Aftab: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-031-22269-6_5
- 35 Koutroulis, A. G. (2016). Cross sectoral impacts on water availability at +2 °C and +3 °C for east Mediterranean island states: The case of Crete., 532, pp. 16 – 28. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.015>
- 36 Laursen, M. S. (2016). Dicotyledon Weed Quantification Algorithm for Selective Herbicide Application in Maize Crops. *Sensors*, 16(11), σ. 1848. doi:<https://doi.org/10.3390/s16111848>

- 37 Leoci, R. & Ruberti, M. (2021). Pesticides: An Overview of the Current Health Problems of Their Use. doi:<https://doi.org/10.4236/gep.2021.98001>
- 38 Liu, J. X. (2021). Boost Precision Agriculture with Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing and Edge Intelligence: A Survey. *Remote Sensing*, 13(21), σ. 4387. doi:<https://doi.org/10.3390/rs13214387>
- 39 Mahmud, M. S. (2020). Robotics and Automation in Agriculture: Present and Future Applications. *Applications of Modelling and Simulation*, (4), σσ. 130–140. Ανάκτηση από http://arqiipubl.com/ojs/index.php/AMS_Journal/article/view/130
- 40 Mooney, D. F., Larson, J. A., Roberts, R. K., & English, B. C. (2009). When does variable rate technology for agricultural sprayers pay? A case study for cotton production in Tennessee. *Journal of the ASFMRA*. doi:<https://doi.org/10.22004/ag.econ.189863>
- 41 Moral, J. X. (2017). Variability in Susceptibility to Anthracnose in the World Collection of Olive Cultivars of Cordoba (Spain). *Front. Plant Sci.*, 8:1892. doi:10.3389/fpls.2017.01892
- 42 Nan, Y., Zhang, H., Zheng, J., Yang, K., & Ge, Y. (2023). Low-volume precision spray for plant pest control using profile variable rate spraying and ultrasonic detection. *Frontiers in Plant Science*, 13, σ. Article 1042769. doi:<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1042769>
- 43 Nugnes, F. L. (2020). Aleurocanthus spiniferus (Hemiptera: Aleyrodidae) in Some European Countries: Diffusion, Hosts, Molecular Characterization, and Natural Enemies. *Insects*, 11(1). doi:<https://doi.org/10.3390/insects11010042>
- 44 Pajač Živković, I. Č. (2025). Assessing cultivar-specific susceptibility and morphological adaptations of Bactrocera oleae (Diptera: Tephritidae) in olive orchards. 25(1), p. 13. doi:<https://doi.org/10.1093/jisesa/ieaf005>
- 45 Papadogiorgou, G. D. (2025). Comparative Efficacy of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) and Ground-Based Bait Applications for Olive Fruit Fly (Bactrocera oleae) Control in Greek Olive Orchards. *Agronomy*, 15(9), p. 2158. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy15092158>
- 46 Papadopoulos, G. A. (2024). Economic and environmental benefits of digital agricultural technologies in crop production: A review. *Smart Agricultural Technology*, 8, p. 100441. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100441>.
- 47 Papanastasiou, S. A. (2020). Population Dynamics of Drosophila suzukii in Coastal and Mainland Sweet Cherry Orchards of Greece. *Insects*, 11(9). doi:<https://doi.org/10.3390/insects11090621>
- 48 Paterson R. R. M. & Lima N. (2010). How will climate change affect mycotoxins in food? *Food research international*, 43(7), pp. 1902-1914.
- 49 Porter, J. P. (1991). The potential effects of climatic change on agricultural insect pests. *Agricultural and Forest Meteorology*(57), pp. 221-240. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0168192391900888>
- 50 Rahman, M. T. (2026). The Role of AI-Integrated Drone Systems in Agricultural Productivity and Sustainable Pest Management. *AgriEngineering*, 8(4), p. 142. doi:<https://doi.org/10.3390/agriengineering8040142>

- 51 Saponari, M. G. (2019). *Xylella fastidiosa* in Olive in Apulia: Where We Stand. *Phytopathology*, 109(2). doi:<https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-18-0319-FI>
- 52 Scott, J. W. (2014). Weeds and climate change: supporting weed management adaptation. *AdaptNRM*. Retrieved from https://adaptnrm.csiro.au/wp-content/uploads/2014/08/Adapt-NRM_M2_WeedsTechGuide_5.1_LR.pdf
- 53 Segarra, J., Buchailot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy*, 10(5), p. 641. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy10050641>
- 54 Sharma, S. (2023, Ιούλιος). Precision agriculture: Reviewing the advancements, technologies, and applications in precision agriculture for improved crop productivity and resource management. *Reviews in Food and Agriculture (RFNA)*, 4(2), σσ. 45-49. doi:<http://doi.org/10.26480/rfna.02.2023.45.49>
- 55 Soussi, A. Z. (2024). Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 24(8), p. 2647. doi: <https://doi.org/10.3390/s24082647>
- 56 Stavrianakis, G. S. (2025). Utilizing Olive Fly Ecology Towards Sustainable Pest Management. *Biology*, 14(2), p. 125. doi:<https://doi.org/10.3390/biology14020125>
- 57 Traversari, S. C. (2021). Precision Agriculture Digital Technologies for Sustainable Fungal Disease Management of Ornamental Plants. *Sustainability*, 13(7), σ. 3707. doi:<https://doi.org/10.3390/su13073707>
- 58 Van Evert, F. K., Gaitán-Cremaschi, D., Fountas, S., & Kempenaar, C. (2017). Can precision agriculture increase the profitability and sustainability of the production of potatoes and olives? *Sustainability*, 9(10), p. Article 1863. doi:<https://doi.org/10.3390/su9101863>
- 59 Wei, Z. X. (2023). Key Technologies for an Orchard Variable-Rate Sprayer: Current Status and Future Prospects. *Agronomy*, 13(1), p. 59. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy13010059>
- 60 Yang, C. (2020). Remote Sensing and Precision Agriculture Technologies for Crop Disease Detection and Management with a Practical Application Example. *Engineering*, 6(5), σσ. 528-532. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.10.015>
- 61 Zhang, C. L. (2025). Orchard Variable-Rate Sprayer Using LiDAR-Based Canopy Volume Measurement. *Agronomy*, 15(12), σ. 2709. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy15122709>
- 62 Zhou, J. D. (2016). Temperature mediates continental-scale diversity of microbes in forest soils. Στο N. Commun (Επιμ.), 7. doi:<https://doi.org/10.1038/ncomms12083>
- 63 Γενική Γραμματεία Έρευνας και Καινοτομίας (ΓΓΕΚ). (2021). *Στρατηγική Έρευνας και Καινοτομίας για την Έξυπνη Εξειδίκευση: Τομέας Αγροδιατροφής - Φυτική Παραγωγή*. Ανάκτηση από <https://gsri.gov.gr/wp-content/uploads/2021/12/%CE%A6%CF%85%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE-1.pdf>
- 64 Γεωργιάδης, Γ. (2022). *Ανάλυση εξάπλωσης χωροκατακτητικών ειδών στην Ελλάδα και Διεθνώς με προσεγγίσεις Στατιστικής και Ευφυών Πληροφοριακών Συστημάτων*.

- Μεταπτυχιακή διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. Ιδρυματικό Αποθετήριο ΔΠΘ. doi:<http://dx.doi.org/10.26257/heal.duth.12947>
- 65 Ελληνική Δημοκρατία. (2012). *Νόμος 4036/2012: Διάθεση γεωργικών φαρμάκων στην αγορά, ορθολογική χρήση αυτών και συναφείς διατάξεις*. Ανάκτηση από Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων: https://www.minagric.gr/images/stories/docs/interesting/nomos4036_georgika_farmaka.pdf
- 66 Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). (2025). ΕΡΕΥΝΑ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΩΝ, 2023. Ανάκτηση από <https://www.e-ea.gr/news/ereyna-elstat-gia-gevgria-kthnotrofia-h-diarthrvsh-toy-prvtogenoys-tomea/>
- 67 ΕΛΣΤΑΤ. (2023). *Απογραφή Γεωργίας-Κτηνοτροφίας 2021: Οριστικά Αποτελέσματα*. Ελληνική Στατιστική Αρχή. Ανάκτηση από https://elstat-outsourcers.statistics.gr/apografi_georgias_21_FINAL_web.pdf
- 68 ΕΛΣΤΑΤ. (2023). *Έρευνα Διάρθρωσης Γεωργικών και Κτηνοτροφικών Εκμεταλλεύσεων, έτους 2023 (Προσωρινά Στοιχεία)*. Ελληνική Στατιστική Αρχή. Ανάκτηση από <https://www.statistics.gr/documents/20181/2be3fc44-ebe4-3ac3-e663-cac641b71d6d>
- 69 Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο. (2009). *Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 1107/2009 σχετικά με τη διάθεση φυτοπροστατευτικών προϊόντων στην αγορά*. Ανάκτηση από EUR-Lex: <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/1107/oj>
- 70 Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2005). *Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 396/2005 για τα ανώτατα όρια καταλοίπων φυτοφαρμάκων μέσα ή πάνω στα τρόφιμα και τις ζωτροφές*. Ανάκτηση από EUR-Lex: <http://data.europa.eu/eli/reg/2005/396/oj>
- 71 Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2018). *Κανονισμός (ΕΕ) 2018/848 για τη βιολογική παραγωγή και την επισήμανση των βιολογικών προϊόντων*. Ανάκτηση από EUR-Lex.: <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/848/oj>
- 72 Λιολιοπούλου, Φ. (2019). *Γεωργία και κλιματική αλλαγή*. (δ. Α. Θεσσαλίας, Επιμ.) Ανάκτηση από Μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, ΠΜΣ Χωρική Ανάλυση και Διαχείριση Περιβάλλοντος: <https://ir.lib.uth.gr/xmlui/bitstream/handle/11615/52064/20193.pdf?sequence=1>
- 73 Μπρεδάκης, Π. (2025). *Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας, σε Ελαιώνες, στον Νομό Χανίων*. Ανάκτηση από Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο. Apothesis – Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.: <https://apothesis.eap.gr/archive/item/224127>
- 74 Παναγόπουλος, Χ. (2007). *Ασθένειες Καρποφόρων Δέντρων & Αμπέλου* (Τόμ. 4). Αθήνα: Εκδόσεις Σταμούλη Α.Ε.
- 75 Παπλωματάς, Ε.Ι. & Αντωνίου Π.Π. (2017). *Οι κυριότερες ασθένειες της ελιάς και η αντιμετώπιση τους*. (Χ. Ευαγγελία, Επιμ.) Αθήνα: Άξιον Εκδοτική.

- 76 Παρχαρίδης, Ι. (2015). *Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης Θεωρία και εφαρμογές*. Ανάκτηση από <http://www.kallipos.gr/>
- 77 Πεχλιβανίδου, Ε. (2024). *Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην παραγωγή φυτικών προϊόντων*. Ανάκτηση από [Πτυχιακή/διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος]:
<https://ir.lib.uth.gr/xmlui/bitstream/handle/11615/85351/30725.pdf?sequence=4>
- 78 Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (2007, Ιούνιος 28). *Κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 834/2007 για τη βιολογική παραγωγή και την επισήμανση των βιολογικών προϊόντων*. Ανάκτηση από EUR-Lex: <http://data.europa.eu/eli/reg/2007/834/oj>
- 79 Τζάμος, Ε. Κ. (2017). *Φυτοπαθολογία* (Τόμ. Β' Έκδοση). Αθήνα: Εκδόσεις Unibooks.
- 80 Τιμοσίδης, Γ. (2026). *Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας σε πράσινη ελιά ποικιλίας Χαλκιδικής: Μελέτη περίπτωσης*. [Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο]. . Aporthesis – Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο. Ανάκτηση από <https://aporthesis.eap.gr/archive/item/235930>
- 81 Τριανταφυλλίδης, Π. (2023). *Οικολογική Διαχείριση Ασθενειών Κόμης και Κορμού της Ελιάς, με έμφαση στο κυκλοκόνιο και τις ασθένειες του ξύλου*. (Ι. Α. Θεσσαλίας, Επιμ.) Ανάκτηση από Πτυχιακή/διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος.:
<https://ir.lib.uth.gr/xmlui/bitstream/handle/11615/82829/28209.pdf?sequence=4>
- 82 Τσεκούρας, Β. (2024). *Ανάλυση εκτιμώμενης αύξησης παθογόνων μικροοργανισμών στο περιβάλλον και στα τρόφιμα ως απόρροια της κλιματικής κρίσης*. (Ι. Α. Θεσσαλίας, Επιμ.) Ανάκτηση από Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Επιστημών Υγείας, Τμήμα Ιατρικής:
<https://ir.lib.uth.gr/xmlui/bitstream/handle/11615/84257/29675.pdf?sequence=4>
- 83 Τσούτσας, Θ. (2023). *Φυσικές Καταστροφές, Επίδραση στη Βιοποικιλότητα και Αποκατάσταση*. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου Περιβάλλοντος. Ανάκτηση από <https://ir.lib.uth.gr/xmlui/bitstream/handle/11615/83779/29159.pdf?sequence=4>
- 84 Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (ΥΠΑΑΤ). (χ.χ.). *Ηλεκτρονική πλατφόρμα με "Με ένα κλικ" (One Click UI)- Κατάλογος Φυτοπροστατευτικών Προϊόντων*. Ανάκτηση από <https://www.minagric.gr/>
- 85 Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. (2012). *Τμήμα Ε: Αεροψεκασμοί, Δικτυακός Τόπος Διαβουλεύσεων*. Ανάκτηση από <https://www.opengov.gr/ypaat/?p=469>
- 86 Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. (2023). *Στρατηγικό Σχέδιο Κοινής Αγροτικής Πολιτικής 2023–2027*. (Α. ΥΠΑΑΤ, Επιμελητής) Ανάκτηση από <https://www.minagric.gr/for-farmer-2/stratigiko-sxedio-kap2023-2027>

- 87 Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. (2024). *EL 2024 EFSA National Summary Report*. Ανάκτηση από Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων: https://www.minagric.gr/images/stories/docs/politis/Trofima_Ygeia/EL_2024_EFSA_National_Summary_Report.pdf
- 88 Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. Γενική Διεύθυνση Γεωργίας, Δ. Π. (2024). *Σχέδιο έκτακτης ανάγκης για τον επιβλαθή οργανισμό καραντίνας Xylella fastidiosa*. Ανάκτηση από https://www.minagric.gr/images/stories/docs/agrotis/Georgika_Farmaka/Fytoeigionomikos_Elegxos/SxedioXylellafastidiosa_090724.pdf
- 89 Φουντάς, Σ. & Γέμτος, Θ. (2015). *Γενική Εισαγωγή Γεωργίας Ακριβείας*. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. Ανάκτηση από <https://hdl.handle.net/11419/2671>
- 90 Χορταριάς, Γ.-Ε. Μ. (2023). *Σχεδιασμός και ανάπτυξη τεχνολογιών/αισθητήρων που εφαρμόζονται στην Γεωργία Ακριβείας*. [Διπλωματική/Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών]. Ιδρυματικό Αποθετήριο Πανεπιστημίου Θεσσαλίας., ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ. Ανάκτηση από <https://ir.lib.uth.gr/xmlui/bitstream/handle/11615/81469/26814.pdf?sequence=4>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.