



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**«Ηλεκτρονικές Παγίδες: Ένα νέο εργαλείο για την
αντιμετώπιση εχθρών των καλλιεργειών»**

Θεοδωροπούλου Α. Γεωργία Χριστίνα

Α' Επιβλέπων

Δρ. Παπαδόπουλος Νικόλαος

Β' Επιβλέπων

Δρ. Τριανταφυλλίδης Βασίλειος

Πάτρα 2025-2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή φοιτήτριας («συγγραφέας/ δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο 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 του 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 του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
SUMMARY.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1. Εχθροί των Καλλιεργειών και Φυτοπροστασία.....	10
1.2. Ιστορική Αναδρομή στην Αντιμετώπιση Εντόμων.....	11
1.3. Η Ολοκληρωμένη Αντιμετώπιση των Εχθρών των Καλλιεργειών.....	13
1.4. Η Παγίδευση των Εντόμων.....	15
1.5. Ο Ρόλος της Παγίδευσης των Εντόμων στην Ολοκληρωμένη Αντιμετώπιση Εχθρών.....	18
1.6. Παραδοσιακοί Τύποι Παγίδων των Εντόμων.....	20
1.6.1. Κατηγοριοποίηση Παγίδων των Εντόμων.....	20
1.6.1.1. Παθητικές Παγίδες.....	20
1.6.1.2. Ενεργητικές Παγίδες.....	21
1.6.2. Τρόποι Παγίδευσης.....	25
1.6.3. Ανάλυση και Παρουσίαση Δεδομένων από τις Παγίδες.....	27
1.6.4. Προβλήματα και Περιορισμοί της Παραδοσιακής Παγίδευσης.....	29
1.7. Σκοπός και Θεωρητικό Πλαίσιο της Διατριβής.....	31
1.7.1. Η Ανάγκη Εκσυγχρονισμού της Φυτοπροστασίας.....	31
1.7.2. Επιστημονικό Κενό και Αναγκαιότητα της Μελέτης.....	32
1.7.3. Σκοπός, Στόχοι και Σημασία της Διατριβής.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	
2. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΑΓΙΔΕΣ ENTOMΩΝ.....	36
2.1. Εισαγωγή στις Ηλεκτρονικές Παγίδες.....	36
2.2. Η Ιστορία των Ηλεκτρονικών Παγίδων.....	38
2.3. Τύποι Ηλεκτρονικών Παγίδων.....	40
2.3.1. Παγίδες με Αισθητήρες Ανίχνευσης Κίνησης ή Χημικών Ουσιών.....	40
2.3.1.1. Οπτικοί ή Φωτοηλεκτρικοί Αισθητήρες.....	40
2.3.1.2. Οπτοακουστικοί Αισθητήρες ή Αισθητήρες Πτερυγισμού.....	41
2.3.1.3. Αισθητήρες Μηχανικής Δόνησης ή Ακουστικοί Αισθητήρες.....	43

2.3.1.4. Χημικοί Αισθητήρες και Αισθητήρες Ανίχνευσης Πτητικών Ουσιών.....	44
2.3.2. Οπτικές Παγίδες με Κάμερα.....	46
2.3.3. Ακουστικές ή Βιοακουστικές Παγίδες.....	49
2.3.4. Πολυαισθητηριακά Συστήματα.....	51
2.4. Γεωργία Ακριβείας (Precision Agriculture- PA).....	54
2.4.1. Η έννοια και οι Βασικές Αρχές της Γεωργίας Ακριβείας.....	54
2.4.2. Ψηφιακές Τεχνολογίες και Συστήματα Συλλογής Δεδομένων στη Γεωργία Ακριβείας.....	56
2.4.3. Η Θέση της Φυτοπροστασίας στη Γεωργία Ακριβείας.....	58
2.5. Φυτοπροστασία Ακριβείας και Ηλεκτρονικές Παγίδες.....	60
2.5.1. Η Έννοια της Φυτοπροστασίας Ακριβείας.....	60
2.5.2. Ηλεκτρονικές Παγίδες ως Συστήματα Συλλογής Δεδομένων στη Φυτοπροστασία....	62
2.5.3. Διασύνδεση Ηλεκτρονικών Παγίδων με Ψηφιακά Συστήματα Φυτοπροστασίας.....	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3. ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΩΡΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΠΑΓΙΔΩΝ ENTOMΩΝ.....	66
3.1. Εισαγωγή στην Επιχειρησιακή Αξιολόγηση των Ηλεκτρονικών Παγίδων.....	66
3.2. Εμπορική Διαθεσιμότητα Ηλεκτρονικών Παγίδων.....	67
3.2.1. Μετάβαση από Ερευνητικά Πρωτότυπα σε Εμπορικά Συστήματα.....	67
3.2.2. Εμπορικές Δυνατότητες και Ψηφιακές Υπηρεσίες των Ηλεκτρονικών Παγίδων.....	69
3.2.3. Καλλιεργητικοί Τομείς Εμπορικής Εφαρμογής των Ηλεκτρονικών Παγίδων.....	71
3.2.4. Γεωγραφική Εξάπλωση και Διεθνής Ανάπτυξη των Ηλεκτρονικών Παγίδων.....	73
3.3. Κόστος Απόκτησης των Ηλεκτρονικών Συστημάτων Παγίδευσης.....	74
3.4. Λειτουργικό Κόστος και Κόστος Συντήρησης.....	77
3.4.1. Ενεργειακές Απαιτήσεις και Αυτονομία Λειτουργίας.....	77
3.4.2. Αντικατάσταση Αναλωσίμων και Ανανεώσιμων Υλικών.....	79
3.4.3. Τεχνική Συντήρηση και Λειτουργική Υποστήριξη των Συστημάτων.....	80
3.4.4. Ανθρώπινη Επίβλεψη και Επιχειρησιακή Παρέμβαση.....	82
3.5. Τεχνολογική Ωριμότητα και Επιχειρησιακοί Περιορισμοί.....	83
3.5.1. Ζητήματα Αξιοπιστίας στην Αυτόματη Καταγραφή και Αναγνώριση.....	83
3.5.2. Προβλήματα Συνδεσιμότητας και Μετάδοσης Δεδομένων.....	85
3.5.3. Περιβαλλοντικοί Περιορισμοί Λειτουργίας.....	87
3.5.4. Περιορισμοί των Συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης στην Αναγνώριση Εντόμων.....	88

3.5.5. Οικονομικοί Περιορισμοί και Δυσκολίες Υιοθέτησης.....	90
3.6. Συγκριτική Αξιολόγηση Εμπορικών Συστημάτων.....	91
3.7. Συμπερασματική Αποτίμηση.....	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΠΑΓΙΔΩΝ ΕΝΤΟΜΩΝ ΣΤΗ ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ, ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	93
4.1. Εισαγωγή στις Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Παγίδων Εντόμων.....	93
4.2. Παρακολούθηση Πληθυσμών και Υποστήριξη της IPM.....	94
4.3. Προγνωστικά Μοντέλα και Συστήματα Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων.....	95
4.4. Διαπίστωση της Παρουσίας Νέων ή Εισβλητικών Ειδών.....	98
4.5. Καταγραφή και Παρακολούθηση της Βιοποικιλότητας.....	100
4.6. Παρακολούθηση Πληθυσμών Εντόμων σε Αποθηκευμένους Χώρους.....	102
4.7. Δημόσια Υγεία και Επιδημιολογική Επιτήρηση.....	103
4.8. Βάσεις Δεδομένων και Αποθετήρια Στοιχείων για Μελλοντική Χρήση.....	104
4.9. Συμπερασματική Αποτίμηση των Εφαρμογών των Ηλεκτρονικών Παγίδων.....	106

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	108
5.1. Γενική Αποτίμηση της Διατριβής.....	108
5.2. Κύρια Συμπεράσματα.....	110
5.3. Περιορισμοί και Προκλήσεις.....	112
5.4. Μελλοντικές Προοπτικές.....	114
5.5. Τελικό Συμπέρασμα.....	116
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	118

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην εκπόνησή της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες παρατηρήσεις και τη συνεχή υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφικής διαδικασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους διδάσκοντες του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας» του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου για τις γνώσεις και τα εφόδια που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Την ειλικρινή και βαθιά μου ευγνωμοσύνη θα ήθελα να εκφράσω προς την οικογένειά μου και τους δικούς μου ανθρώπους για την αμέριστη αγάπη, τη διαρκή στήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η υπομονή, η κατανόηση και ενθάρρυνσή τους αποτέλεσαν πολύτιμη πηγή δύναμης σε κάθε στάδιο αυτής της απαιτητικής διαδρομής.

Η ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την ηθική τους συμπαράσταση, την πίστη στις δυνατότητές μου και την αδιάκοπη υποστήριξή τους στις δυσκολίες και τις προκλήσεις που αντιμετώπισα. Η παρουσία τους υπήρξε καθοριστική, προσφέροντάς μου το απαραίτητο κίνητρο να συνεχίσω με επιμονή και αφοσίωση την προσπάθειά μου μέχρι την ολοκλήρωση αυτού του σημαντικού στόχου.

Σε αυτούς αφιερώνω με ιδιαίτερη αγάπη και εκτίμηση την παρούσα εργασία.

Η αποτελεσματική παρακολούθηση των πληθυσμών των εντόμων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης Εχθρών και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων φυτοπροστασίας. Οι παραδοσιακές μέθοδοι παγίδευσης χρησιμοποιούνται επί δεκαετίες για την καταγραφή της παρουσίας και της αφθονίας των εντόμων, ωστόσο παρουσιάζουν περιορισμούς που σχετίζονται με την ανάγκη χειροκίνητης επιθεώρησης, τη χρονοβόρα επεξεργασία των δεδομένων και την περιορισμένη δυνατότητα άμεσης αξιοποίησης των πληροφοριών που συλλέγονται.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εξετάζει τις ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων ως ένα σύγχρονο εργαλείο παρακολούθησης και υποστήριξης της φυτοπροστασίας. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης Εχθρών, ο ρόλος της παγίδευσης στη διαχείριση των πληθυσμών των εντόμων και οι κυριότεροι τύποι συμβατικών παγίδων. Στη συνέχεια αναλύεται η εξέλιξη των ηλεκτρονικών παγίδων, οι τεχνολογίες που ενσωματώνουν και οι βασικές κατηγορίες τους, όπως οι παγίδες με αισθητήρες, οι οπτικές παγίδες με συστήματα απεικόνισης, τα βιοακουστικά συστήματα, οι ηλεκτρονικές κολλητικές παγίδες και τα πολυαισθητηριακά συστήματα.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις εφαρμογές των ηλεκτρονικών παγίδων στη γεωργία ακριβείας, στην παρακολούθηση πληθυσμών εντόμων, στην υποστήριξη προγνωστικών μοντέλων και συστημάτων λήψης αποφάσεων, στην έγκαιρη ανίχνευση εισβολικών ειδών, καθώς και στην παρακολούθηση της βιοποικιλότητας. Παράλληλα, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των ηλεκτρονικών και των συμβατικών παγίδων ως προς την ακρίβεια, το κόστος, τον βαθμό αυτοματοποίησης, τη δυνατότητα παροχής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την επιχειρησιακή τους αξιοποίηση.

Τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης δείχνουν ότι οι ηλεκτρονικές παγίδες μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της παρακολούθησης των εντόμων, να μειώσουν τις ανάγκες επιτόπιας εργασίας και να υποστηρίξουν πιο στοχευμένες και βιώσιμες πρακτικές φυτοπροστασίας. Παρά τους τεχνολογικούς και οικονομικούς περιορισμούς που εξακολουθούν να υπάρχουν, η συνεχής εξέλιξη των αισθητήρων, των συστημάτων επικοινωνίας και της τεχνητής νοημοσύνης αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω τον ρόλο των ηλεκτρονικών παγίδων στα σύγχρονα συστήματα γεωργίας ακριβείας.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων, Ολοκληρωμένη Αντιμετώπιση Εχθρών, φυτοπροστασία, γεωργία ακριβείας, παρακολούθηση πληθυσμών εντόμων, αισθητήρες, οπτικά συστήματα, βιοακουστικά συστήματα, πολυαισθητηριακά συστήματα, τεχνητή νοημοσύνη, μηχανική μάθηση, Διαδίκτυο των Πραγμάτων, συστήματα λήψης αποφάσεων, εισβολικά είδη εντόμων, ψηφιακή γεωργία.

«Electronic Traps: A New Tool for the Management of Crop Pests»

Theodoropoulou Georgia Christina

SUMMARY

Effective monitoring of insect populations is a fundamental prerequisite for the implementation of Integrated Pest Management (IPM) and the adoption of evidence-based crop protection strategies. Conventional insect trapping methods have long been used to detect, monitor and assess pest populations in agricultural systems. However, these approaches are often associated with limitations such as labor-intensive field inspections, delayed data acquisition and restricted real-time decision-making capabilities.

This thesis examines electronic insect traps as an emerging technological tool for pest monitoring and crop protection. Initially, the principles of Integrated Pest Management, the role of insect trapping in pest monitoring and management, and the main categories of conventional insect traps are presented. Subsequently, the development of electronic trapping technologies and their major categories are analyzed, including sensor-based traps, optical imaging systems, bioacoustic monitoring systems, electronic sticky traps and multisensory trapping systems.

Particular emphasis is placed on the applications of electronic traps in precision agriculture, population monitoring, decision support systems, predictive pest management models, early detection of invasive insect species and biodiversity monitoring. In addition, a comparative evaluation of conventional and electronic trapping systems is conducted with respect to monitoring accuracy, automation level, operational efficiency, real-time data availability and practical applicability in agricultural environments.

The findings of the literature review indicate that electronic traps can significantly improve the efficiency of insect monitoring, reduce labor requirements and support more targeted and sustainable crop protection practices. Despite existing technological and economic constraints, ongoing advances in sensor technologies, wireless communications, artificial intelligence and machine learning are expected to further enhance the role of electronic trapping systems within modern precision agriculture frameworks and sustainable pest management strategies.

Keywords: Electronic insect traps, insect pest monitoring, Integrated Pest Management (IPM), crop protection, precision agriculture, digital agriculture, sensors, optical monitoring systems, bioacoustic systems, multisensory systems, artificial intelligence, machine learning, Internet of Things (IoT), decision support systems, invasive insect species.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Εχθροί των Καλλιεργειών και Φυτοπροστασία

Οι προσβολές από εχθρούς αποτελούν βασικό παράγοντα της γεωργικής παραγωγής, επηρεάζοντας τόσο την ποσότητα όσο και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων.

Σύμφωνα με τον ορισμό του International Plant Protection Convention (IPPC), ως εχθρός των καλλιεργειών (pest) νοείται «κάθε είδος, στέλεχος φυτού, ζώου ή παθογόνου παράγοντα που είναι επιβλαβές για τα φυτά ή τα φυτικά προϊόντα». Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται κυρίως έντομα, ακάρεα και νηματώδεις, τα οποία δρουν είτε άμεσα μέσω κατανάλωσης φυτικών ιστών είτε έμμεσα μέσω μετάδοσης φυτοπαθογόνων οργανισμών. Η προσέγγιση αυτή υιοθετείται και στο κανονιστικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης, όπου οι επιβλαβείς οργανισμοί (εχθροί, ασθένειες, ζιζάνια) αντιμετωπίζονται ως κρίσιμοι παράγοντες στη φυτοπροστασία και τη διασφάλιση της αγροτικής παραγωγής (Oerke, 2006; Savary et al., 2019).

Τα έντομα αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που προκαλούν ζημιές στις γεωργικές καλλιέργειες. Η δράση των εντόμων παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα, καθώς μπορεί να εκδηλωθεί μέσω διαφορετικών βιολογικών μηχανισμών όπως την απομύζηση φυτικών χυμών, την κατανάλωση φυτικών οργάνων και την ωτοκία σε φυτικούς ιστούς. Για παράδειγμα, οι αφίδες προκαλούν άμεση απώλεια θρεπτικών στοιχείων και νερού από το φυτικό ιστό και παράλληλα λειτουργούν ως φορείς ιώσεων, ενώ οι προνύμφες λεπιδόπτερων καταστρέφουν τη φυλλική επιφάνεια και τους καρπούς, μειώνοντας σημαντικά τη φωτοσυνθετική ικανότητα και την απόδοση των φυτών (Oliveira et al., 2014). Αντίστοιχα, έντομα εδάφους δύναται να προσβάλλουν το ριζικό σύστημα, επηρεάζοντας τη θρέψη και τη στήριξη των φυτών.

Οι ζημιές που προκαλούνται από εχθρούς των καλλιεργειών διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Οι άμεσες ζημιές σχετίζονται με την καταστροφή φυτικών ιστών και τη μείωση της παραγωγής, ενώ οι έμμεσες περιλαμβάνουν τη μετάδοση παθογόνων, τη μείωση της ποιότητας των προϊόντων και ενδεχομένως την υποβάθμιση της δομής του φυτού. Παρατηρούνται επίσης, δευτερογενείς επιπτώσεις, όπως η αυξημένη ευπάθεια των φυτών σε άλλους βιοτικούς ή

αβιοτικούς παράγοντες, γεγονός που μπορεί να επιτείνει τις συνολικές απώλειες (Savary et al., 2019).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι απώλειες της γεωργικής παραγωγής λόγω ασθενειών και εχθρών εκτιμώνται σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα. Σύμφωνα με τον Oerke (2006), οι συνολικές απώλειες από επιβλαβείς οργανισμούς μπορεί να υπερβαίνουν το 30% της δυνητικής παραγωγής. Πιο πρόσφατες μελέτες αναφέρουν ότι το ποσοστό αυτό κυμαίνεται μεταξύ 20% και 40%, ακόμη και σε συστήματα όπου εφαρμόζονται μέτρα φυτοπροστασίας (Savary et al., 2019). Τα έντομα ειδικότερα ευθύνονται για σημαντικό μέρος αυτών των απωλειών, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη μείωση της απόδοσης βασικών για την ανθρώπινη διατροφή, καλλιεργειών παγκοσμίως (Oliveira et al., 2014).

Οι σημαντικές απώλειες που προκαλούν οι εχθροί των καλλιεργειών αναδεικνύουν την ανάγκη εφαρμογής αποτελεσματικών στρατηγικών φυτοπροστασίας για την διατήρηση της παραγωγικότητας και της επισιτιστικής ασφάλειας. Η σύγχρονη προσέγγιση βασίζεται σε ολοκληρωμένα συστήματα αντιμετώπισης εχθρών (Integrated Pest Management- IPM), τα οποία αποτελούν μια στρατηγική συνδυασμένης εφαρμογής βιολογικών, καλλιεργητικών, φυσικών και χημικών μεθόδων, με στόχο τη διατήρηση των πληθυσμών των εχθρών κάτω από τα επίπεδα οικονομικής ζημιάς και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η IPM ορίζεται ως ένα μηχανισμό διαχείρισης εχθρών που συνδυάζει βιολογικές, καλλιεργητικές, φυσικές και χημικές μεθόδους με στόχο τη διατήρηση των πληθυσμών των επιβλαβών οργανισμών σε αποδεκτά επίπεδα, με τη μικρότερη δυνατή περιβαλλοντική και οικονομική επιβάρυνση. Στο πλαίσιο αυτό, τα συστήματα IPM συνδυάζουν καλλιεργητικές πρακτικές, βιολογικό έλεγχο και ορθολογική χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων, με στόχο τη διατήρηση των πληθυσμών των εχθρών κάτω από τα επίπεδα οικονομικής ζημιάς και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Savary et al., 2019). Οι βασικές αρχές και η έννοια της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης Εχθρών αναλύονται εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα.

1.2. Ιστορική Αναδρομή στην Αντιμετώπιση Εντόμων

Η αντιμετώπιση των εντόμων- εχθρών των καλλιεργειών αποτελεί διαχρονικό αντικείμενο της γεωργικής πρακτικής, με ρίζες που εκτείνονται στις πρώτες οργανωμένες αγροτικές

κοινωνίες. Από την αρχαιότητα έως τη σύγχρονη εποχή, οι μέθοδοι φυτοπροστασίας εξελίχθηκαν σημαντικά, αντανακλώντας τόσο την πρόοδο της επιστημονικής γνώσης όσο και τις ανάγκες για αύξηση της γεωργικής παραγωγής.

Στις αρχαίες κοινωνίες, η αντιμετώπιση των εντόμων βασιζόταν κυρίως σε εμπειρικές και μηχανικές μεθόδους. Καλλιεργητικές πρακτικές όπως η αμειψισπορά, η επιλογή ανθεκτικών ποικιλιών και η χρήση φυσικών ουσιών (π.χ. εκχυλίσματα φυτών, θείο) εφαρμόζονταν ήδη από πολιτισμούς όπως της αρχαίας Ελλάδας, της Μεσοποταμίας και της Κίνας (Dent, 2000). Η χρήση φυσικών εχθρών εντόμων, όπως αρπακτικά και παρασιτοειδή, καταγράφεται ήδη από τον 3^ο αιώνα μ.Χ. στην Κίνα, όπου μυρμήγκια χρησιμοποιούνταν για την προστασία καλλιεργειών εσπεριδοειδών, αποτελώντας μια από τις πρώτες μορφές βιολογικής καταπολέμησης (Van den Bosch et al., 1982).

Η χρήση ανόργανων ενώσεων, όπως ο χαλκός και το αρσενικό, αποτέλεσε μία από τις πρώτες μορφές χημικής καταπολέμησης, ενώ η εμφάνιση της βιομηχανικής επανάστασης συνέβαλε στη μαζική παραγωγή φυτοπροστατευτικών ουσιών. Κατά την περίοδο αυτή, η αντιμετώπιση των εντόμων άρχισε να μεταβαίνει από παραδοσιακές πρακτικές, όπως η μηχανική απομάκρυνση εντόμων, η χρήση φυσικών ουσιών και οι βασικές καλλιεργητικές παρεμβάσεις, σε περισσότερο επιστημονικά τεκμηριωμένες μεθόδους.

Η μεγάλη τομή στην ιστορία της φυτοπροστασίας σημειώθηκε τον 20^ο αιώνα με την ανακάλυψη και ευρεία χρήση των συνθετικών εντομοκτόνων. Η εισαγωγή του DDT τη δεκαετία του 1940 σηματοδότησε την έναρξη μιας περιόδου έντονης εξάρτησης από τα χημικά μέσα, καθώς αυτά παρείχαν άμεση και αποτελεσματική καταπολέμηση πολλών εντόμων- εχθρών των καλλιεργειών (Carson, 1962). Η περίοδος αυτή συνδέεται στενά με την Πράσινη Επανάσταση, κατά την οποία η αύξηση της γεωργικής παραγωγής βασίστηκε σε υψηλής απόδοσης ποικιλίες, εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων και εντατική εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων (Evenson & Gollin, 2003).

Ωστόσο, η εκτεταμένη χρήση των εντομοκτόνων ανέδειξε σημαντικά προβλήματα, όπως η ανάπτυξη ανθεκτικότητας στα έντομα, η αναζωπύρωση δευτερογενών εχθρών και η υποβάθμιση των οικοσυστημάτων. Ήδη από τη δεκαετία του 1950 παρατηρήθηκαν περιπτώσεις εντόμων που ανέπτυξαν ανθεκτικότητα σε δραστικές ουσίες, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα των χημικών μεθόδων (Georghiou, 1990). Η ευρεία αρνητική επίπτωση των φυτοπροστατευτικών

προϊόντων στα οικοσυστήματα και οργανισμούς μη στόχους αναδείχθηκε μέσα από το έργο της Rachel Carson «Silent Spring», το οποίο συνέβαλε καθοριστικά στην περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση της διεθνούς κοινότητας (Carson, 1962).

Κατά τις επόμενες δεκαετίες, η συνεχής εμφάνιση φαινομένων ανθεκτικότητας εχθρών των καλλιεργειών σε φυτοφάρμακα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των χημικών παρεμβάσεων και οι περιορισμοί της αποκλειστικά χημικής καταπολέμησης οδήγησαν στη σταδιακή αναζήτηση πιο βιώσιμων στρατηγικών φυτοπροστασίας. Έτσι, άρχισαν να ενισχύονται προσεγγίσεις όπως η βιολογική καταπολέμηση, η εφαρμογή καλλιεργητικών πρακτικών, η συστηματική παρακολούθηση των πληθυσμών των εντόμων και η στοχευμένη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Αναπτύχθηκαν νέες έννοιες όπως το όριο οικονομικής ζημιάς (economic injury level), οι οποίες συνέβαλαν στη διαμόρφωση πιο ορθολογικών προσεγγίσεων διαχείρισης των εχθρών των καλλιεργειών (Stern et al., 1959; Pedigo et al., 1986). Οι εξελίξεις αυτές δημιούργησαν το επιστημονικό υπόβαθρο για τη θεμελίωση της IPM.

Η IPM, η οποία θεμελιώθηκε κατά τη δεκαετία του 1960, αναδείχθηκε ως μια περισσότερο ολιστική προσέγγιση, βασισμένη στον συνδυασμό βιολογικών, καλλιεργητικών, φυσικών και χημικών μεθόδων, με στόχο τον περιορισμό της εξάρτησης από τα εντομοκτόνα και την εφαρμογή περισσότερο βιώσιμων πρακτικών φυτοπροστασίας. Βασικός στόχος της είναι η διατήρηση των πληθυσμών των εχθρών κάτω από το επίπεδο οικονομικής ζημιάς, με παράλληλη ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της εξάρτησης από τα εντομοκτόνα (Kogan, 1998). Η προσέγγιση αυτή ενσωματώνει τη συνεχή παρακολούθηση των πληθυσμών των εντόμων, τη χρήση ορίων επέμβασης και την επιλογή στοχευμένων και περιβαλλοντικά συμβατών μεθόδων φυτοπροστασίας.

Στη σύγχρονη εποχή, η φυτοπροστασία συνδέεται ολοένα και περισσότερο με τις αρχές της βιώσιμης γεωργίας, της γεωργίας ακριβείας και της ψηφιακής παρακολούθησης των καλλιεργειών. Η ανάπτυξη αισθητήρων, ασύρματων δικτύων επικοινωνίας, συστημάτων τηλεμετρίας και τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης έχει οδηγήσει στην εμφάνιση νέων εργαλείων παρακολούθησης των πληθυσμών εντόμων, επιτρέποντας τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την υποστήριξη συστημάτων λήψης αποφάσεων φυτοπροστασίας (Barzman et al., 2015; Zhou et al., 2024). Οι εξελίξεις αυτές οδήγησαν και στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών παγίδων, οι οποίες επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση των

πληθυσμών των εντόμων και αποτελούν ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά παραδείγματα ψηφιακής φυτοπροστασίας.

Η ιστορική εξέλιξη της αντιμετώπισης των εντόμων αντανακλά τη μετάβαση από εμπειρικές και μονοδιάστατες πρακτικές σε επιστημονικά τεκμηριωμένες και ολοκληρωμένες προσεγγίσεις. Η Ολοκληρωμένη Αντιμετώπιση Εχθρών αποτελεί σήμερα το βασικό πλαίσιο για τη βιώσιμη φυτοπροστασία, συνδυάζοντας την παραγωγικότητα με την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας.

1.3. Η Ολοκληρωμένη Αντιμετώπιση των Εχθρών των Καλλιεργειών

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, η Ολοκληρωμένη Αντιμετώπιση Εχθρών των καλλιεργειών (IPM) αναπτύχθηκε ως απάντηση στα προβλήματα που προέκυψαν από την εκτεταμένη και συχνά αλόγιστη χρήση χημικών φυτοπροστατευτικών προϊόντων κατά τα μέσα του 20^{ου} αιώνα και βασίζεται στον συνδυασμό διαφορετικών μεθόδων διαχείρισης των εχθρών των καλλιεργειών (Kogan, 1998).

Η έννοια της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης άρχισε να διαμορφώνεται συστηματικά τη δεκαετία του 1960, όταν η επιστημονική κοινότητα εισήγαγε την αρχή της συνδυαστικής χρήσης διαφορετικών μεθόδων καταπολέμησης. Αντί της αποκλειστικής εξάρτησης από τα εντομοκτόνα, η IPM βασίζεται στη συνδυασμένη εφαρμογή βιολογικών, καλλιεργητικών, φυσικών και, όπου απαιτείται, χημικών μέτρων, με σκοπό τη διατήρηση των πληθυσμών των εχθρών σε επίπεδα που δεν προκαλούν οικονομικά σημαντικές ζημιές (Dent, 2000). Η προσέγγιση αυτή στηρίζεται στην κατανόηση της οικολογίας των αγροοικοσυστημάτων και της δυναμικής των πληθυσμών των επιβλαβών οργανισμών.

Κεντρικό στοιχείο της IPM αποτελεί η έννοια των ορίων ανεκτής πυκνότητας των πληθυσμών των εχθρών, τα οποία καθορίζουν το χρονικό σημείο και την αναγκαιότητα επέμβασης. Η χρήση των ορίων αυτών επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων με βάση πραγματικά δεδομένα πληθυσμιακής πυκνότητας και όχι προληπτικές εφαρμογές φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Τα όρια αυτά διακρίνονται κυρίως σε «όριο οικονομικής ζημιάς» (economic injury level- EIL) και «όριο επέμβασης» (economic threshold- ET). Το όριο οικονομικής ζημιάς ορίζεται ως η μικρότερη πυκνότητα πληθυσμού ενός εχθρού που προκαλεί οικονομική ζημιά ίση με το κόστος εφαρμογής μέτρων αντιμετώπισης. (Pedigo et al., 1986).

Η εφαρμογή της Ολοκληρωμένης αντιμετώπισης προϋποθέτει συνεπώς τη συστηματική εκτίμηση της πυκνότητας των πληθυσμών των εχθρών μέσω παρακολούθησης (monitoring) και δειγματοληψιών πεδίου. Μέθοδοι όπως οι παγίδες εντόμων, οι οπτικές εκτιμήσεις και τα μοντέλα πρόβλεψης χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της πληθυσμιακής δυναμικής και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων (Kogan, 1998). Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την αποφυγή περιττών επεμβάσεων και τη μείωση της χρήσης χημικών εισροών.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η IPM έχει εξελιχθεί σημαντικά, ενσωματώνοντας νέες τεχνολογίες και επιστημονικές γνώσεις. Η χρήση βιοτεχνολογικών εργαλείων, η ανάπτυξη ανθεκτικών ποικιλιών, καθώς και η αξιοποίηση ψηφιακών συστημάτων γεωργίας ακριβείας έχουν ενισχύσει την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης (Barzman et al., 2015). Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει νομοθετικό πλαίσιο που επιβάλλει την εφαρμογή των γενικών αρχών της IPM στο πλαίσιο της βιώσιμης χρήσης των φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Ειδικότερα, η Οδηγία 2009/128/EK επέβαλε την IPM ως υποχρεωτική προσέγγιση για τα κράτη- μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με στόχο τη μείωση των κινδύνων από τη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων και την προώθηση πιο βιώσιμων πρακτικών φυτοπροστασίας.

1.4. Η Παγίδευση των Εντόμων

Στο πλαίσιο της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης των Εχθρών των Καλλιεργειών, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στις μεθόδους παρακολούθησης και έγκαιρης εκτίμησης της πυκνότητας των πληθυσμών των εντόμων. Η παγίδευση των εντόμων αποτελεί μία από τις βασικότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό, συμβάλλοντας τόσο στη λήψη αποφάσεων όσο και, σε ορισμένες περιπτώσεις, στην άμεση μείωση των πληθυσμών.

Οι παγίδες εντόμων αποτελούν συστήματα που χρησιμοποιούνται για την προσέλκυση, σύλληψη, καταγραφή ή και τη θανάτωση εντόμων- στόχων, αξιοποιώντας φυσικά ή χημικά ερεθίσματα όπως φερομόνες, χρώματα, φως, τροφικά ελκυστικά ή άλλους φυσικούς και χημικούς παράγοντες. Η παγίδευση των εντόμων αναφέρεται στη διαδικασία χρήσης των παγίδων αυτών για την παρακολούθηση, την καταγραφή ή/και τη διαχείριση των πληθυσμών των εντόμων στις καλλιέργειες (Howse et al., 1998).

Η χρήση παγίδων εξυπηρετεί πολλαπλούς σκοπούς στη φυτοπροστασία, όπως η παρακολούθηση των πληθυσμών των εντόμων, η έγκαιρη ανίχνευση και ο εντοπισμός ειδών

εισβολέων ή εστιών προσβολής, η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μέτρων καταπολέμησης, καθώς και, σε ορισμένες περιπτώσεις, η άμεση μείωση των πληθυσμών μέσω μαζικής παγίδευσης. Η σημαντικότερη εφαρμογή των παγίδων στη σύγχρονη φυτοπροστασία αφορά τη συστηματική καταγραφή της παρουσίας και της χρονικής εξέλιξης των πληθυσμών των εντόμων. Οι πληροφορίες αυτές είναι κρίσιμες για τον καθορισμό του χρόνου επέμβασης στο πλαίσιο της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης, ιδιαίτερα σε σχέση με τα όρια οικονομικής ζημιάς (Dent, 2000).

Η παγίδευση χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό νέων εστιών προσβολής και την παρακολούθηση της εξάπλωσης εισβολικών ειδών. Παράλληλα, χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των εφαρμοζόμενων μεθόδων καταπολέμησης, μέσω της σύγκρισης των επιπέδων πληθυσμού πριν και μετά την επέμβαση. Σε ορισμένα συστήματα καλλιέργειας εφαρμόζεται και η μαζική παγίδευση, η οποία συμβάλλει άμεσα στη μείωση των πληθυσμών των εντόμων κάτω από τα επίπεδα οικονομικής ζημιάς (El-Sayed et al., 2006).

Οι παγίδες εντόμων διακρίνονται σε διάφορους τύπους, ανάλογα με τον μηχανισμό προσέλκυσης και σύλληψης. Οι φερομονικές παγίδες (Εικόνα 1.1.) αξιοποιούν συνθετικές ουσίες που μιμούνται τις σεξουαλικές φερομόνες των εντόμων και

χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση ειδών λεπιδόπτερων. Οι χρωματικές παγίδες (Εικόνα 1.2.) βασίζονται στην οπτική έλξη συγκεκριμένων χρωμάτων (π.χ. κίτρινο,

μπλε), ενώ οι τροφικές παγίδες χρησιμοποιούν ελκυστικές ουσίες για τη σύλληψη εντόμων που αναζητούν τροφή (Howse et al., 1998).



Εικόνα 1.1. Οι φερομονικές παγίδες χρησιμοποιούνται ευρέως στο πλαίσιο Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης Εχθρών για την παρακολούθηση πληθυσμών και τον καθορισμό του χρόνου επέμβασης. Πηγή: Oregon Department of Agriculture- Insect Pest Prevention and Management (<https://www.oregon.gov/oda/ippm/survey-treatment/pages/default.aspx>) με άδεια χρήσης από τον Josh Vlach, Entomologist.

Η εφαρμογή της παγίδευσης παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Πρόκειται για μέθοδο φιλική προς το περιβάλλον, καθώς δεν απαιτεί τη χρήση φυτοφαρμάκων και δεν επιβαρύνει τα αγροοικοσυστήματα. Ιδιαίτερα στις φερομονικές παγίδες, η υψηλή εκλεκτικότητα περιορίζει σημαντικά τις επιπτώσεις σε οργανισμούς μη στόχους. Επιπλέον, η παγίδευση παρέχει αξιόπιστα δεδομένα για τη δυναμική των πληθυσμών, συμβάλλοντας στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων (El-Sayed et al., 2006).



Εικόνα 1.2. Πειραματική διάταξη χρωματικών κολλητικών παγίδων (colored sticky traps) διαφορετικών χρωμάτων για τη μελέτη της ελκυστικότητας των οπτικών ερεθισμάτων σε έντομα. Η χρήση χρωμάτων όπως το κίτρινο, το μπλε και το λευκό αξιοποιείται ευρέως στη φυτοπροστασία, καθώς πολλά είδη εντόμων εμφανίζουν ειδική προτίμηση σε συγκεκριμένα μήκη κύματος φωτός, επιτρέποντας την αποτελεσματική παρακολούθηση των πληθυσμών τους. Πηγή: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9632929> με άδεια χρήσης από τον Francisco Infante (ECOSUR).

Η παγίδευση των εντόμων παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Η αποτελεσματικότητα της παγίδευσης επηρεάζεται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες, καθώς και από τη σωστή τοποθέτηση και συντήρηση των παγίδων. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις η παγίδευση δεν επαρκεί ως αυτόνομο μέτρο καταπολέμησης, αλλά λειτουργεί κυρίως συμπληρωματικά σε άλλες μεθόδους φυτοπροστασίας. Τέλος, απαιτείται εξειδικευμένη γνώση για την ορθή ερμηνεία των δεδομένων που προκύπτουν από την παρακολούθηση (Dent, 2000).

Η συμβολή της παγίδευσης στην παρακολούθηση των πληθυσμών και στην υποστήριξη των αποφάσεων φυτοπροστασίας εξηγεί γιατί αποτελεί σήμερα αναπόσπαστο στοιχείο των προγραμμάτων IPM.

1.5. Ο Ρόλος της Παγίδευσης των Εντόμων στην Ολοκληρωμένη Αντιμετώπιση Εχθρών

Η παγίδευση των εντόμων αποτελεί βασικό εργαλείο της IPM, καθώς επιτρέπει τη συστηματική καταγραφή της παρουσίας, της αφθονίας και της χρονικής εξέλιξης των πληθυσμών των εντόμων- εχθρών στις καλλιέργειες. Τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω των παγίδων αξιοποιούνται για τον καθορισμό του κατάλληλου χρόνου επέμβασης και την υποστήριξη τεκμηριωμένων αποφάσεων φυτοπροστασίας (Pedigo et al., 1986; Τζανακάκης & Κωβαίος, 2008).

Η παγίδευση αποτελεί βασικό μέσο καταγραφής και συλλογής αξιόπιστων δεδομένων πεδίου, απαραίτητων για την εφαρμογή ορθολογικών στρατηγικών φυτοπροστασίας. Τα δεδομένα παγίδευσης χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της έντασης των προσβολών, την αναγνώριση περιόδων αυξημένης δραστηριότητας και τη σύγκριση των πληθυσμών με τα όρια επέμβασης. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται ο ακριβέστερος χρονισμός των μέτρων φυτοπροστασίας και περιορίζονται οι μη αναγκαίες εφαρμογές φυτοπροστατευτικών προϊόντων (Southwood & Henderson, 2000; Τζανακάκης & Κωβαίος, 2008). Εκτός από τη συμβολή τους στην καταγραφή των πληθυσμών, οι παγίδες μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να χρησιμοποιηθούν και ως μέσο άμεσης διαχείρισης των εντόμων-εχθρών.

Πέρα από την παρακολούθηση πληθυσμών, οι παγίδες μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να συμβάλλουν και άμεσα στη διαχείριση των εντόμων-εχθρών μέσω τεχνικών όπως η μαζική παγίδευση (mass trapping), η οποία στοχεύει στη μείωση του αριθμού των ενηλίκων εντόμων και κατ' επέκταση, της αναπαραγωγικής τους ικανότητας. Πέραν αυτού, τεχνικές που βασίζονται στη χρήση φερομονών, όπως η διαταραχή σύζευξης (mating disruption), παρεμποδίζουν την εύρεση συντρόφου και περιορίζουν την αναπαραγωγή των εντόμων-στόχων. Οι μέθοδοι αυτές συμβάλλουν στον περιορισμό της πληθυσμιακής αύξησης των εχθρών και στη μείωση της ανάγκης για χημικές επεμβάσεις (El-Sayed et al., 2006).

Μέσω της αξιοποίησης των δεδομένων παγίδευσης, οι επεμβάσεις μπορούν να πραγματοποιούνται μόνο όταν οι πληθυσμοί προσεγγίζουν ή υπερβαίνουν τα προκαθορισμένα όρια επέμβασης, γεγονός που ενισχύει την αποτελεσματικότητα της λήψης αποφάσεων στο πλαίσιο της IPM (Barzman et al., 2015).

Η αποτελεσματικότητα της παγίδευσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή εφαρμογή και ερμηνεία των δεδομένων. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων προϋποθέτει κατάλληλο σχεδιασμό δειγματοληψιών, σωστή τοποθέτηση και συντήρηση των παγίδων και γνώση της βιολογίας και της οικολογίας των ειδών- στόχων (Dent, 2000; Τζανακάκης & Κωβαίος, 2008). Για τον λόγο αυτό, η παγίδευση χρησιμοποιείται συχνότερα ως μέρος ενός ευρύτερου και ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης των εχθρών των καλλιεργειών, αν και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να εφαρμοστεί και ως αυτόνομη μέθοδος καταπολέμησης μέσω της μαζικής παγίδευσης.

Η αυξανόμενη ανάγκη για συνεχή και ακριβέστερη παρακολούθηση των πληθυσμών των εντόμων έχει οδηγήσει τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη αυτοματοποιημένων και ψηφιακών συστημάτων παγίδευσης. Οι τεχνολογίες αυτές επιχειρούν να καλύψουν περιορισμούς των συμβατικών παγίδων, όπως η ανάγκη χειροκίνητης καταγραφής και η περιορισμένη δυνατότητα άμεσης αξιοποίησης των δεδομένων πεδίου.

1.6. Παραδοσιακοί Τύποι Παγίδων των Εντόμων

Οι παραδοσιακές παγίδες αποτελούν διαχρονικά βασικό εργαλείο παρακολούθησης και δειγματοληψίας εντόμων, καθώς επιτρέπουν την καταγραφή της παρουσίας και της δραστηριότητας διαφορετικών ειδών σε γεωργικά και φυσικά οικοσυστήματα. Η ανάπτυξη των διαφόρων τύπων παγίδων βασίστηκε στην αξιοποίηση του τρόπου με τον οποίο τα έντομα αντιλαμβάνονται και ανταποκρίνονται σε ερεθίσματα του περιβάλλοντος, όπως οσμές, το φως και το χρώμα. Ως αποτέλεσμα, έχουν αναπτυχθεί παγίδες με διαφορετικούς μηχανισμούς προσέλκυσης και σύλληψης (Howse et al., 1998).

1.6.1. Κατηγοριοποίηση Παγίδων των Εντόμων

Η ταξινόμηση των παγίδων πραγματοποιείται συνήθως με βάση τον τρόπο με τον οποίο τα έντομα οδηγούνται προς την παγίδα ή συλλαμβάνονται από αυτή. Οι παγίδες των εντόμων διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: παθητικές και ενεργητικές, αναλόγως του τρόπου προσέλκυσης των εντόμων.

1.6.1.1. Παθητικές Παγίδες

Οι παθητικές παγίδες είναι παγίδες που δεν βασίζονται στη χρήση εξειδικευμένων ελκυστικών ουσιών ή ενεργών μηχανισμών προσέλκυσης, αλλά στη σύλληψη εντόμων κατά τη

φυσική τους μετακίνηση στο χώρο. Η λειτουργία τους στηρίζεται κυρίως στη διέλευση, την πτώση ή την παρεμπόδιση της κίνησης των εντόμων και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως σε δειγματοληψίες, οικολογικές μελέτες και προγράμματα παρακολούθησης της εντομοπανίδας (McCravy, 2018).

Στις παθητικές παγίδες συμπεριλαμβάνονται οι παγίδες παρεμβολής πτήσης (flight interception traps), οι οποίες συλλέγουν έντομα που προσκρούουν σε κατακόρυφες επιφάνειες κατά την πτήση τους και οδηγούνται σε δοχείο συλλογής. Οι παγίδες αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε μελέτες βιοποικιλότητας και δειγματοληψίες ιπτάμενων εντόμων, ιδιαίτερα σε δασικά οικοσυστήματα (Muirhead-Thomson, 1991). Επίσης, ιδιαίτερα διαδεδομένες είναι οι παγίδες παρεμβολής (pitfall traps), οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή αρθρόποδων, όπως κολεόπτερα και αράχνες, μέσω δοχείων τοποθετημένων στο επίπεδο του εδάφους (Woodcock, 2005).

Οι παθητικές παγίδες χρησιμοποιούνται κυρίως για γενική δειγματοληψία, οικολογικές μελέτες και εκτίμηση της παρουσίας ή της σχετικής αφθονίας εντόμων σε μια περιοχή. Η αποτελεσματικότητα των παθητικών παγίδων επηρεάζεται σημαντικά από τη θέση τοποθέτησης, τη δραστηριότητα των εντόμων και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, γεγονός που δυσχεραίνει συχνά τη σύγκριση δεδομένων μεταξύ διαφορετικών δειγματοληψιών (Leather, 2005). Ορισμένοι τύποι παγίδων, όπως οι παγίδες νερού (pan traps), παρουσιάζουν ενδιάμεσα χαρακτηριστικά, καθώς η λειτουργία τους μπορεί να συνδέεται τόσο με παθητική σύλληψη (χωρίς χρώμα) όσο και με οπτικά ερεθίσματα προσέλκυσης (με χρώμα), γεγονός που καθιστά την ταξινόμησή τους μη απόλυτη.

Παράδειγμα αποτελούν οι παγίδες τύπου funnel (Εικόνα 1.3.), οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση λεπιδόπτερων, κολεόπτερων και άλλων εχθρών γεωργικής σημασίας. Οι φερομονικές παγίδες παρουσιάζουν υψηλό βαθμό εκλεκτικότητας, καθώς προσελκύουν συγκεκριμένα είδη ή ακόμη και συγκεκριμένο φύλο εντόμων, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμες σε συστήματα παρακολούθησης και έγκαιρης προειδοποίησης (Howse et al., 1998; Witzgall et al., 2010).



Εικόνα 1.3. Φερομονική παγίδα εντόμων τύπου funnel εγκατεστημένη σε αγρό για την παρακολούθηση πληθυσμών εντόμων στο πλαίσιο της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης Εχθρών. Η χρήση τέτοιων παγίδων επιτρέπει την εκτίμηση της παρουσίας και της δυναμικής των εντόμων- στόχων και συμβάλλει στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων φυτοπροστασίας. Πηγή: University of Kentucky Entomology (<https://entomology.mgcafe.uky.edu/efl12#>), με άδεια χρήσης από τον φωτογράφο DR. Ric Bessin.

1.6.1.2. Ενεργητικές Παγίδες

Οι ενεργητικές παγίδες χρησιμοποιούν ερεθίσματα προσέλκυσης που κατευθύνουν τα έντομα προς την παγίδα. Ανάλογα με τη φύση του ερεθίσματος που αξιοποιείται, διακρίνονται σε οσμηρές ή χημικές, οπτικές, ακουστικές ή βιοακουστικές και σύνθετες παγίδες, οι οποίες συνδυάζουν περισσότερους από έναν μηχανισμούς προσέλκυσης (Τζανακάκης & Κωβαίος, 2008; Southwood & Henderson, 2000).

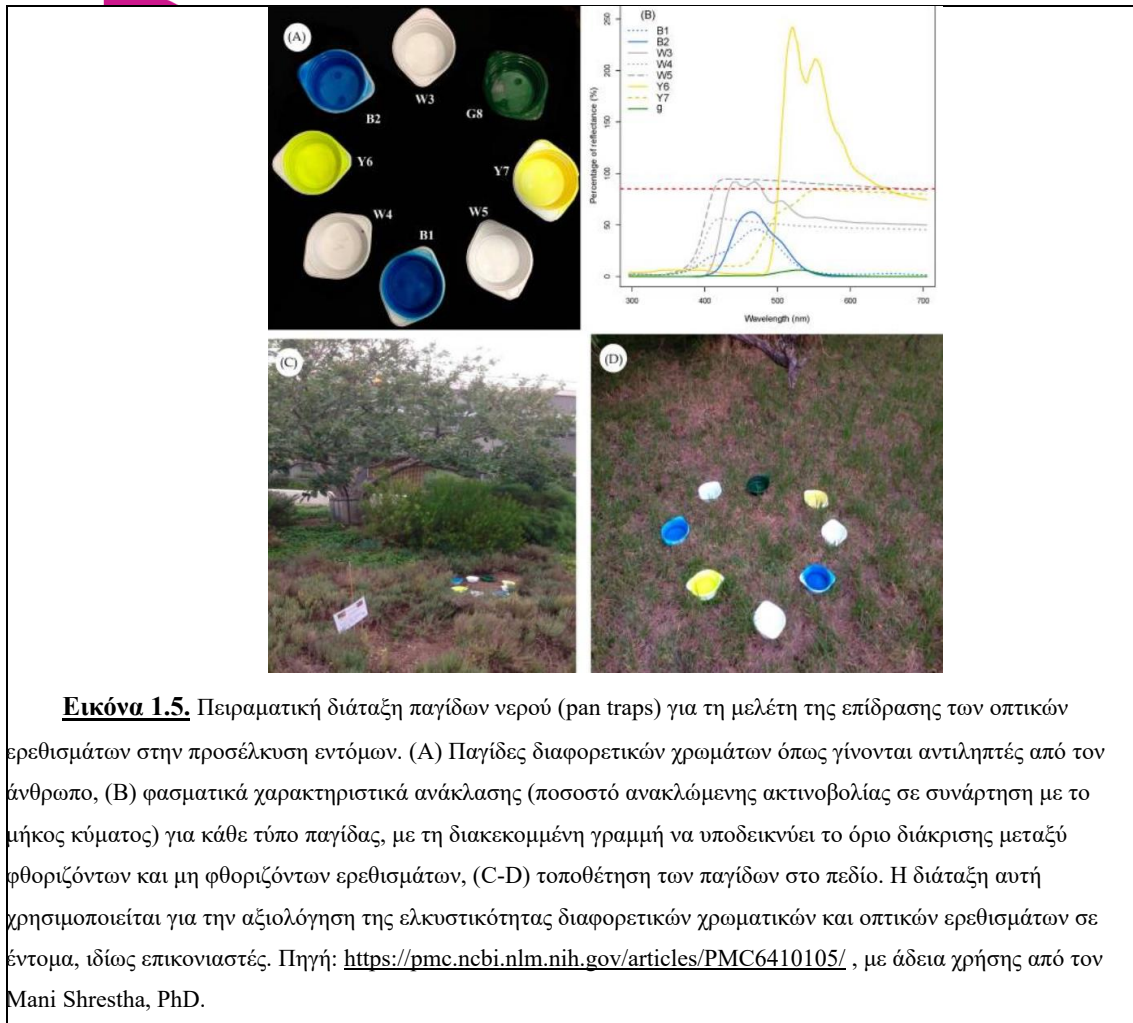
Οι οσμηρές ή χημικές παγίδες αξιοποιούν πτητικές ουσίες που λειτουργούν ως ελκυστικά για τα έντομα. Τα χημικά ελκυστικά μπορεί να περιλαμβάνουν σεξουαλικές φερομόνες, συναθροιστικές φερομόνες, τροφικά ελκυστικά ή συνθετικές που προσομοιάζουν οσμές φυτών-ξενιστών και επηρεάζουν τη συμπεριφορά των εντόμων. Ανάλογα με τον στόχο της εφαρμογής, οι παγίδες αυτές χρησιμοποιούνται είτε για παρακολούθηση πληθυσμών είτε για μαζική παγίδευση στο πλαίσιο προγραμμάτων IPM.

Οι οπτικές παγίδες βασίζονται στην προσέλκυση των εντόμων μέσω οπτικών ερεθισμάτων, όπως το χρώμα, η ένταση και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, καθώς και η οπτική αντίθεση (visual contrast) της παγίδας σε σχέση με το περιβάλλον. Η αποτελεσματικότητα των παγίδων αυτών σχετίζεται άμεσα με τη φυσιολογία της όρασης και τη φωτοτακτική συμπεριφορά των εντόμων, καθώς διαφορετικά είδη παρουσιάζουν διαφορετικές αποκρίσεις σε συγκεκριμένα φασματικά χαρακτηριστικά. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι χρωματικές κολλητικές παγίδες (Εικόνα 1.4.), κυρίως κίτρινου και μπλε χρώματος, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση αφίδων, θριπών, αλευρωδών και άλλων φυτοφάγων εντόμων.



Εικόνα 1.4. Κίτρινη κολλητική οπτική παγίδα εγκατεστημένη σε καλλιέργεια για την προσέλκυση και παγίδευση εντόμων μέσω χρωματικών ερεθισμάτων και αντίθεσης με το περιβάλλον. Οι παγίδες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση αφίδων, θριπών και άλλων μικρών φυτοφάγων εντόμων. Πηγή: <https://www.zerimarlaboratoire.com/plant-pest-info-treatments/trampas-crom%C3%A1ticas-o-adhesivas> με άδεια χρήσης από τον CEO, Jesus Martinez.

Στην κατηγορία των παγίδων δειγματοληψίας περιλαμβάνονται και οι παγίδες νερού (pan traps) (Εικόνα 1.5.), οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως για τη συλλογή επικονιαστών και άλλων ιπτάμενων εντόμων. Όταν δεν χρησιμοποιούνται χρωματικά ερεθίσματα, λειτουργούν κυρίως ως παθητικές παγίδες. Ωστόσο, η χρήση χρωματισμένων επιφανειών μετατρέπει τη λειτουργία τους σε οπτικά ενεργητική, καθώς το χρώμα δρα ως ερέθισμα προσέλκυσης των εντόμων (Campbell & Hanula, 2007).



Οι παγίδες φωτός (light traps) αξιοποιούν τη θετική φωτόταξη πολλών ειδών, ιδιαίτερα νυκτόβιων λεπιδόπτερων και κολεόπτερων και χρησιμοποιούνται τόσο για προγράμματα παρακολούθησης όσο και για μελέτες βιοποικιλότητας και πληθυσμιακής δυναμικής (Muirhead-Thomson, 1991; Shimoda & Honda, 2013).

Πέρα από τις χημικές και οπτικές παγίδες, έχουν αναπτυχθεί και συστήματα παγίδευσης που βασίζονται σε άλλα φυσικά ερεθίσματα, όπως ακουστικά ή βιοακουστικά σήματα. Οι ακουστικές ή βιοακουστικές παγίδες αξιοποιούν ήχους που παράγονται από τα ίδια τα έντομα, όπως οι συχνότητες πτερυγισμού ή τα σήματα επικοινωνίας, με σκοπό την προσέλκυση, ανίχνευση ή αναγνώρισή τους. Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως σε ερευνητικές εφαρμογές και σε συστήματα αυτοματοποιημένης παρακολούθησης, όπου η ανάλυση ηχητικών δεδομένων μπορεί να συμβάλλει στην αναγνώριση ειδών και στην εκτίμηση της δραστηριότητας των πληθυσμών (Mankin et al., 2011; Potamitis et al., 2015).

Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων περιλαμβάνουν αισθητήρες καταγραφής συχνότητας περυσισμού κουνουπιών και οπτικοακουστικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ιπτάμενων εντόμων σε αυτοματοποιημένα συστήματα παρακολούθησης.

Οι σύνθετες παγίδες συνδυάζουν περισσότερους από έναν μηχανισμούς προσέλκυσης, με στόχο την αύξηση της αποτελεσματικότητας και σε ορισμένες περιπτώσεις, τη βελτίωση της εκλεκτικότητας της παγίδευσης. Συνήθως συνδυάζονται χημικά, οπτικά και σπανιότερα ακουστικά ερεθίσματα, ώστε να ενισχύεται η συμπεριφορική ανταπόκριση των εντόμων. Αντιπροσωπευτική περίπτωση αποτελούν οι φερομονικές παγίδες που συνδυάζονται με χρωματικά ελκυστικά ή με φωτεινές πηγές, ιδιαίτερα σε συστήματα παρακολούθησης λεπιδόπτερων και δίπτερων. Ενώ συνδυασμός πολλαπλών ερεθισμάτων μπορεί να αυξήσει σημαντικά τα ποσοστά σύλληψης, συνεπώς και την αποτελεσματικότητα των παγίδων, καθώς πολλά έντομα χρησιμοποιούν συνδυασμό οσμητικών και οπτικών σημάτων κατά τον προσανατολισμό τους προς ξενιστές (Cook et al., 2007; Witzgall et al., 2010).

Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν επίσης οι τροφοελκυστικές παγίδες, οι οποίες χρησιμοποιούν πτητικές ουσίες τροφικής προέλευσης για την προσέλκυση των εντόμων. Οι παγίδες αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην παρακολούθηση ειδών της οικογένειας Tephritidae, καθώς επιτρέπουν την αποτελεσματική σύλληψη ατόμων που αναζητούν τροφή ή κατάλληλες θέσεις ωοτοκίας. Μελέτες σε πληθυσμούς της μύγας της Μεσογείου (*Ceratitis capitata*) έδειξαν ότι τα συνθετικά τροφικά ελκυστικά, όπως ο συνδυασμός οξικού αμμωνίου, πουτρεσκίνης και τριμεθυλαμίνης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά σε παγίδες τύπου McPhail για την παρακολούθηση των πληθυσμών του εντόμου (Katsoyannos et al., 1999).

Στην πράξη πολλές τροφοελκυστικές παγίδες λειτουργούν ως σύνθετα συστήματα προσέλκυσης, καθώς το τροφικό ελκυστικό συνδυάζεται με τα μορφολογικά και οπτικά χαρακτηριστικά της παγίδας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι παγίδες τύπου McPhail που χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση της *Ceratitis capitata* σε οπωρώνες της Ελλάδας όπου σύνθετα τροφικά ελκυστικά εφαρμόστηκαν σε συνδυασμό με συγκεκριμένο τύπο παγίδας για την έγκαιρη ανίχνευση και παρακολούθηση του πληθυσμού του εντόμου (Papadopoulos et al., 2001).

Η αποτελεσματικότητα των ενεργητικών παγίδων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή του κατάλληλου ελκυστικού, η οποία σχετίζεται με τη βιολογία, τη συμπεριφορά και τις αισθητηριακές αποκρίσεις του είδους-στόχου.

1.6.2. Τρόποι Παγίδευσης

Ο μηχανισμός σύλληψης των εντόμων αποτελεί βασικό στοιχείο σχεδιασμού των παγίδων, καθώς επηρεάζει τόσο την αποτελεσματικότητα της συλλογής όσο και τον τύπο των δεδομένων που μπορούν να προκύψουν από την παγίδευση. Ανάλογα με τον τρόπο συγκράτησης ή θανάτωσης των εντόμων, εφαρμόζονται διαφορετικές τεχνικές παγίδευσης, οι οποίες εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς παρακολούθησης ή διαχείρισης πληθυσμών (Pedigo & Rice, 2009).

Ένας από τους συνηθέστερους τρόπους παγίδευσης είναι η προσκόλληση των εντόμων σε συγκολλητικές επιφάνειες. Οι κολλητικές παγίδες χρησιμοποιούν ειδικές συγκολλητικές ουσίες υψηλής αντοχής, στις οποίες τα έντομα παγιδεύονται μετά την επαφή τους με την επιφάνεια της παγίδας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι χρωματικές κολλητικές παγίδες, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση αφίδων, θριπών, αλευρωδών και άλλων φυτοφάγων εντόμων σε καλλιέργειες και θερμοκήπια. Η απλότητα κατασκευής και η δυνατότητα άμεσης οπτικής εκτίμησης των συλλήψεων καθιστούν τις κολλητικές παγίδες ιδιαίτερα χρήσιμες σε προγράμματα τακτικής παρακολούθησης πληθυσμών (Horowitz & Gerling, 1984; Vernon & Gillespie, 1990).

Άλλος σημαντικός τρόπος παγίδευσης είναι ο πνιγμός των εντόμων σε υδατικό διάλυμα ή άλλο υγρό μέσο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι παγίδες νερού στις οποίες τα έντομα παγιδεύονται στην επιφάνεια του υγρού και αδυνατούν να διαφύγουν. Συχνά στο διάλυμα προστίθενται επιφανειοδραστικές ουσίες ώστε να μειώνεται η επιφανειακή τάση του νερού και να αυξάνεται η αποτελεσματικότητα της σύλληψης. Οι παγίδες αυτές χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε μελέτες βιοποικιλότητας και δειγματοληψίες επικονιαστών. Οι παγίδες αυτού του τύπου επιτρέπουν συχνά τη συλλογή μεγάλου αριθμού ατόμων και χρησιμοποιούνται ευρέως σε ποσοτικές δειγματοληψίες εντομοπανίδας (Westphal et al., 2008).

Σε συστήματα μαζικής παγίδευσης, η θανάτωση των εντόμων επιτυγχάνεται μέσω έκθεσής τους σε εντομοκτόνες ουσίες που βρίσκονται στο εσωτερικό της παγίδας. Οι παγίδες αυτές συνδυάζουν συνήθως χημικά ελκυστικά με τοξικούς παράγοντες και χρησιμοποιούνται κυρίως σε

προγράμματα attack and kill και μαζικής παγίδευσης για τη μείωση πληθυσμών επιβλαβών ειδών (Campos & Phillips, 2014).

Άλλες παγίδες βασίζονται στον εγκλωβισμό των εντόμων και στην αδυναμία διαφυγής τους μετά την είσοδο στην παγίδα. Τέτοιοι μηχανισμοί εφαρμόζονται σε παγίδες όπως οι funnel και McPhail traps, όπου η γεωμετρία της κατασκευής δυσχεραίνει τον επαναπροσανατολισμό και την έξοδο των εντόμων. Οι παγίδες αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση και τη διαχείριση διαφόρων ιπτάμενων γεωργικών εχθρών (Potamitis et al., 2014).

Η επιλογή του κατάλληλου μηχανισμού παγίδευσης εξαρτάται από τη βιολογία του είδους-στόχου, τον σκοπό της εφαρμογής και το είδος των δεδομένων που απαιτούνται. Οι διαφορές αυτές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία στα σύγχρονα συστήματα αυτοματοποιημένης παρακολούθησης, όπου ο τρόπος σύλληψης επηρεάζει άμεσα τη δυνατότητα ψηφιακής καταγραφής και ανάλυσης των δεδομένων.

1.6.3. Ανάλυση και Παρουσίαση Δεδομένων από τις Παγίδες

Τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω των παγίδων αποτελούν θεμελιώδες εργαλείο για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων στο πεδίο της φυτοπροστασίας, καθώς παρέχουν πληροφορίες για την παρουσία, την αφθονία και τη δυναμική των πληθυσμών των εντόμων. Η αξιόπιστη αξιοποίησή τους προϋποθέτει συστηματική και τυποποιημένη διαδικασία καταγραφής, η οποία συνήθως εκφράζεται ως αριθμός συλλήψεων ανά παγίδα και ανά μονάδα χρόνου (π.χ. άτομα/παγίδα/ημέρα ή εβδομάδα) (Southwood & Henderson, 2000).

Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται συνήθως μέσω γραφημάτων χρονικής εξέλιξης, τα οποία αποτυπώνουν τις μεταβολές των πληθυσμών στον χρόνο και επιτρέπουν τον εντοπισμό περιόδων αυξημένης δραστηριότητας ή πληθυσμιακών αιχμών. Χρησιμοποιούνται συγκριτικοί πίνακες, στατιστικοί δείκτες και γεωχωρικές απεικονίσεις, μέσω των οποίων καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της χωρικής κατανομής των προσβολών και η εφαρμογή στοχευμένων μέτρων διαχείρισης στο πλαίσιο της γεωργίας ακριβείας (Bongiovanni & Lowenberg-Deboer, 2004; Madden et al., 2007). Σε σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης, τα δεδομένα μπορούν επίσης να ενσωματώνονται σε ψηφιακές πλατφόρμες και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, διευκολύνοντας την αυτοματοποιημένη ανάλυση και την έγκαιρη προειδοποίηση για επικείμενες προσβολές (Potamitis et al., 2015).

Η ανάλυση των δεδομένων περιλαμβάνει την εκτίμηση της πληθυσμιακής τάσης μέσω της παρακολούθησης των διακυμάνσεων των συλλήψεων στον χρόνο, επιτρέποντας τον εντοπισμό περιόδων αύξησης ή μείωσης των πληθυσμών. Ιδιαίτερη σημασία έχει ο εντοπισμός των μέγιστων τιμών συλλήψεων (peaks), οι οποίες συχνά συνδέονται με κρίσιμα στάδια του βιολογικού κύκλου του εντόμου και αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τον σωστό χρονισμό των επεμβάσεων φυτοπροστασίας (Pedigo et al., 1986).

Η ερμηνεία των συλλήψεων βελτιώνεται όταν τα δεδομένα παγίδευσης συσχετίζονται με περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, οι βροχοπτώσεις, η ταχύτητα του ανέμου και η φωτοπερίοδος, καθώς οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν σημαντικά τη βιολογία, τη δραστηριότητα και τη χωρική κατανομή των εντόμων. Η συσχέτιση των συλλήψεων με μετεωρολογικά δεδομένα συμβάλλει στην ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων και στη βελτίωση της ακρίβειας των αποφάσεων φυτοπροστασίας, επιτρέποντας την πρόβλεψη περιόδων αυξημένου κινδύνου προσβολής (Dent, 2000; Pedigo & Rice, 2009).

Σε πιο προηγμένες εφαρμογές, τα δεδομένα παγίδευσης ενσωματώνονται σε συστήματα γεωργίας ακριβείας, γεωχωρικής ανάλυσης και μοντέλα πληθυσμιακής δυναμικής, μέσω των οποίων καθίσταται δυνατή η συνεχής παρακολούθηση των πληθυσμών και η πρόβλεψη της εξέλιξής τους στον χώρο και στον χρόνο. Η αξιοποίηση γεωχωρικών δεδομένων και συστημάτων GIS επιτρέπει τη δημιουργία χαρτών κατανομής πληθυσμών, τον εντοπισμό χωρικών προτύπων και την εφαρμογή στοχευμένων μέτρων φυτοπροστασίας, ιδιαίτερα σε καλλιέργειες με έντονη χωρική ετερογένεια προσβολών. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την εφαρμογή στοχευμένων επεμβάσεων, τη μείωση των άσκοπων εφαρμογών φυτοπροστατευτικών προϊόντων και την ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης για επικείμενες προσβολές στο πλαίσιο της γεωργίας ακριβείας και της IPM (Bongiovanni & Lowenberg-Deboer, 2004; Potamitis et al., 2015).

Η σύγκριση των καταγεγραμμένων τιμών με τα καθορισμένα όρια επέμβασης (economic thresholds) αποτελεί βασικό στοιχείο στη λήψη αποφάσεων, καθώς τα όρια αυτά προσδιορίζουν το επίπεδο πληθυσμού στο οποίο πρέπει να εφαρμοστούν μέτρα διαχείρισης ώστε να αποτραπεί η πρόκληση οικονομική ζημιάς στην καλλιέργεια (Pedigo et al., 1986). Ωστόσο, η αξιοπιστία αυτής της διαδικασίας εξαρτάται από τη συχνότητα, την ακρίβεια και τη χωρική αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων παγίδευσης. Στα συμβατικά συστήματα παρακολούθησης, η συλλογή των

δεδομένων βασίζεται σε επιτόπιες επισκέψεις και χειροκίνητη καταμέτρηση, γεγονός που αυξάνει το εργατικό κόστος, περιορίζει τη χρονική ανάλυση των παρατηρήσεων και μπορεί να καθυστερήσει την έγκαιρη εφαρμογή μέτρων φυτοπροστασίας (Potamitis et al., 2014; Preti et al., 2021).

Σε αρκετές περιπτώσεις, η πρόσβαση σε θέσεις παγίδευσης μπορεί να είναι πρακτικά δύσκολη, όπως σε περιβάλλοντα με έντονη τοπογραφική ανομοιογένεια, ψηλά δέντρα, εκτεταμένους οπωρώνες, απομακρυσμένες ή απόκρημνες περιοχές, με αποτέλεσμα η παρακολούθηση να μην αποτυπώνει πάντοτε με επάρκεια τη χωρική ετερογένεια των πληθυσμών. Τα προβλήματα αυτά καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων και απομακρυσμένων συστημάτων παγίδευσης, τα οποία μπορούν να ενισχύσουν τη συχνότητα καταγραφής, να μειώσουν την ανάγκη επιτόπιων ελέγχων και να υποστηρίξουν πιο άμεση λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της IPM.

Η ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων προϋποθέτει εξειδικευμένη γνώση της βιολογίας και της συμπεριφοράς του εντόμου- στόχου, καθώς και των ιδιαίτερων αγροοικολογικών συνθηκών της περιοχής μελέτης, δεδομένου ότι οι συλλήψεις σε παγίδες δεν αντιστοιχούν πάντοτε γραμμικά στην πραγματική πυκνότητα του πληθυσμού, αλλά επηρεάζονται από ποικίλους βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες (El-Sayed et al., 2006).

1.6.4. Προβλήματα και Περιορισμοί της Παραδοσιακής Παγίδευσης

Η παγίδευση των εντόμων, όπως αναπτύχθηκε στα προηγούμενα υποκεφάλαια, αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο για την παρακολούθηση και διαχείριση των πληθυσμών των εχθρών των καλλιεργειών στο πλαίσιο της IPM. Η εφαρμογή της βασίζεται στην αξιοποίηση βιολογικών και οικολογικών χαρακτηριστικών των εντόμων, επιτρέποντας τη συλλογή δεδομένων που είναι απαραίτητα για την εκτίμηση της πληθυσμιακής δυναμικής και τη καθορισμός επεμβάσεων (Dent, 2000).

Παρά τη σημαντική συμβολή τους στην παρακολούθηση των εντομολογικών πληθυσμών, οι παραδοσιακές μέθοδοι παγίδευσης παρουσιάζουν ορισμένους περιορισμούς που επηρεάζουν την αξιοπιστία, την ακρίβεια και την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα της διαδικασίας παρακολούθησης. Ένας από τους βασικότερους περιορισμούς αφορά την αντιπροσωπευτικότητα των συλλήψεων, καθώς οι αριθμοί των εντόμων που παγιδεύονται δεν αντανακλούν πάντοτε με

ακρίβεια την πραγματική πυκνότητα του πληθυσμού στο πεδίο. Οι συλλήψεις επηρεάζονται από ποικίλους βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι οποίοι μπορούν να μεταβάλλουν τη δραστηριότητα, τη μετακίνηση και την ανταπόκριση των εντόμων στα ελκυστικά μέσα (Howse et al., 1998; Carde & Elkinton, 1984).

Ένα άλλο μειονέκτημα των παραδοσιακών συστημάτων παγίδευσης είναι η εξάρτησή τους από τη χειρωνακτική συλλογή και επεξεργασία δεδομένων. Η ανάγκη τακτικής επιθεώρησης των παγίδων στο πεδίο συνεπάγεται αυξημένο κόστος εργασίας και περιορισμένη συχνότητα καταγραφών. Ως αποτέλεσμα, τα δεδομένα που συλλέγονται αποτυπώνουν διακριτά χρονικά στιγμιότυπα και όχι συνεχή εξέλιξη των πληθυσμών, γεγονός που δυσχεραίνει την ακριβή πρόβλεψη των πληθυσμιακών κορυφώσεων (Pedigo et al., 1986).

Ακόμα, η αξιοπιστία των δεδομένων επηρεάζεται από παράγοντες που σχετίζονται με την ανθρώπινη παρέμβαση. Η αναγνώριση και καταμέτρηση των εντόμων απαιτεί εξειδικευμένη γνώση, ενώ η παρουσία μη-στόχων οργανισμών ή φθορών στις παγίδες μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα εκτίμησης. Οι αβεβαιότητες αυτές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία όταν τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση με τα όρια επέμβασης, καθώς ακόμη και μικρές αποκλίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένες αποφάσεις.

Η αποτελεσματικότητα της παγίδευσης επηρεάζεται σημαντικά από τη σωστή επιλογή του τύπου παγίδας, του ελκυστικού μέσου και της θέσης εγκατάστασης. Παράγοντες όπως το ύψος τοποθέτησης, η πυκνότητα της βλάστησης, η απόσταση μεταξύ παγίδων και η χωρική ετερογένεια της καλλιέργειας μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα της παρακολούθησης (Southwood & Henderson, 2000).

Επιπρόσθετα, η καθυστέρηση μεταξύ συλλογής, καταγραφής και ανάλυσης των δεδομένων μπορεί να περιορίσει την έγκαιρη λήψη αποφάσεων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ταχείας αύξησης των πληθυσμών ή αιφνίδιας εμφάνισης προσβολών. Οι περιορισμοί αυτοί οδήγησαν σταδιακά στην ανάπτυξη αυτοματοποιημένων και ηλεκτρονικών συστημάτων παγίδευσης, τα οποία ενσωματώνουν αισθητήρες, ψηφιακή καταγραφή, ασύρματη μετάδοση δεδομένων και τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης, με στόχο τη συνεχή παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, τη μείωση της ανάγκης επιτόπιων ελέγχων, τη βελτίωση της ακρίβειας και της ταχύτητας λήψης αποφάσεων στη φυτοπροστασία (Potamitis et al., 2015).

Οι περιορισμοί αυτοί καθιστούν σαφές ότι, παρά τη χρησιμότητά τους, οι παραδοσιακές παγίδες δεν επαρκούν πλέον ως μοναδικό εργαλείο παρακολούθησης σε ένα περιβάλλον όπου η γεωργία χαρακτηρίζεται από αυξημένες απαιτήσεις ακριβείας, ταχύτητας και βιωσιμότητας. Η ανάγκη για συστήματα που να παρέχουν πιο αξιόπιστα, συνεχόμενα και άμεσα διαθέσιμα δεδομένα αποτελεί βασική πρόκληση για τη σύγχρονη φυτοπροστασία.

1.7. Σκοπός και Θεωρητικό Πλαίσιο της Διατριβής

1.7.1. Η Ανάγκη Εκσυγχρονισμού της Φυτοπροστασίας

Η μετάβαση από τις παραδοσιακές μεθόδους φυτοπροστασίας σε πιο σύγχρονες προσεγγίσεις συνδέεται άμεσα με τις ευρύτερες εξελίξεις στη γεωργική παραγωγή και στη διαχείριση των φυσικών πόρων. Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, η ανάγκη για ενίσχυση της παραγωγικότητας και η πίεση για μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση λύσεων που συνδυάζουν αποδοτικότητα και βιωσιμότητα (Savary et al., 2019).

Η IPM απαιτεί εργαλεία που να υποστηρίζουν την ακριβή και έγκαιρη λήψη αποφάσεων. Η αποτελεσματικότητα της IPM εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης υψηλής ακρίβειας και συχνότητας. Η έννοια της Γεωργίας Ακριβείας εισάγει νέα δεδομένα στη φυτοπροστασία, δίνοντας έμφαση στη συλλογή και αξιοποίηση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο.

Η τεχνολογική πρόοδος, ιδιαίτερα στους τομείς των αισθητήρων, της ψηφιακής καταγραφής και της επεξεργασίας δεδομένων, δημιουργεί νέες δυνατότητες για την αναβάθμιση των συστημάτων παρακολούθησης των εντόμων. Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών στη φυτοπροστασία επιτρέπει τη μετάβαση από περιοδικές και αποσπασματικές καταγραφές σε συνεχή και αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων.

Οι ηλεκτρονικές παγίδες αναδύονται ως ένα σύγχρονο εργαλείο που επιχειρεί να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της παραδοσιακής εντομολογικής παρακολούθησης και των απαιτήσεων της ψηφιακής γεωργίας. Η ανάπτυξή τους δεν αποτελεί απλώς τεχνολογική εξέλιξη, αλλά αντανακλά μια ευρύτερη μετατόπιση προς πιο ολοκληρωμένα και ευφυή συστήματα διαχείρισης των αγροοικοσυστημάτων.

1.7.2. Επιστημονικό Κενό και Αναγκαιότητα της Μελέτης

Παρότι τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη ηλεκτρονικών και αυτοματοποιημένων παγίδων εντόμων, η σχετική βιβλιογραφία δείχνει ότι η έρευνα επικεντρώνεται κυρίως σε επιμέρους τεχνολογικές εφαρμογές, όπως οι αισθητήρες, η επεξεργασία εικόνας, η μηχανική μάθηση και η απομακρυσμένη μετάδοση δεδομένων (Lima et al., 2020). Παράλληλα, ανασκοπήσεις για παγίδες με κάμερες επισημαίνουν ότι, παρά τα πλεονεκτήματα της αυτοματοποιημένης παρακολούθησης, εξακολουθούν να υπάρχουν πρακτικοί περιορισμοί, όπως το κόστος, η ενεργειακή αυτονομία, η ποιότητα εικόνας και η ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης της αυτόματης αναγνώρισης εντόμων (Preti et al., 2021). Επομένως, το ερευνητικό ενδιαφέρον δεν αφορά μόνο την τεχνολογική ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων, αλλά και την αξιολόγηση της αξιοπιστίας, της λειτουργικότητας και της δυνατότητας ενσωμάτωσής τους σε διαφορετικά γεωργικά συστήματα και στρατηγικές φυτοπροστασίας.

Στη διεθνή βιβλιογραφία παρατηρείται έλλειψη συγκριτικών μελετών όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ παραδοσιακών και ηλεκτρονικών παγίδων, ιδίως ως προς την ακρίβεια των μετρήσεων, το κόστος εφαρμογής, την αξιοπιστία των δεδομένων και τη συμβολή τους στη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης Εχθρών. Η περιορισμένη αυτή συγκριτική αξιολόγηση δυσχεραίνει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα της ενσωμάτωσης των νέων τεχνολογιών στην αγροτική πρακτική (Barzman et al., 2015).

Η ερμηνεία των δεδομένων παγίδευσης επηρεάζεται από πληθώρα βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων, γεγονός που έχει αναδειχθεί ήδη από κλασικές μελέτες δειγματοληψίας πληθυσμών, όπως αυτές των Southwood & Henderson (2000). Οι παράγοντες αυτοί, σε συνδυασμό με τους τεχνολογικούς περιορισμούς των ηλεκτρονικών συστημάτων, όπως η ακρίβεια αναγνώρισης ειδών και η λειτουργία σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, καθιστούν αναγκαία την περαιτέρω διερεύνηση της αξιοπιστίας τους σε πραγματικά αγροοικοσυστήματα.

Με δεδομένα τα παραπάνω, προκύπτει ένα σαφές επιστημονικό κενό, το οποίο αφορά την ολοκληρωμένη αξιολόγηση του ρόλου των ηλεκτρονικών παγίδων ως εργαλείων παρακολούθησης και υποστήριξης λήψης αποφάσεων στη σύγχρονη φυτοπροστασία. Η ανάγκη αυτή καθίσταται ακόμη πιο επιτακτική αν ληφθεί υπόψη ότι, σύμφωνα με τον Kogan (1998), η

αποτελεσματικότητα της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια της εκτίμησης της πληθυσμιακής δυναμικής των εχθρών.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην κάλυψη του συγκεκριμένου επιστημονικού κενού μέσω συστηματικής βιβλιογραφικής προσέγγισης, με στόχο τη σύνθεση των διαθέσιμων ερευνητικών δεδομένων και την κριτική αξιολόγηση της συμβολής των ηλεκτρονικών παγίδων στη φυτοπροστασία. Μέσω της ανάλυσης αυτής, επιδιώκεται η ανάδειξη τόσο των δυνατοτήτων όσο και των περιορισμών της τεχνολογίας, καθώς και η διατύπωση τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τον ρόλο της στη βελτίωση των στρατηγικών διαχείρισης των εχθρών των καλλιεργειών.

1.7.3. Σκοπός, Στόχοι και Σημασία της Διατριβής

Ο κύριος σκοπός της διατριβής είναι η διερεύνηση της συμβολής των ηλεκτρονικών παγίδων στην αντιμετώπιση των εχθρών των καλλιεργειών, με έμφαση στον ρόλο τους ως εργαλείο παρακολούθησης και υποστήριξης της IPM.

Ειδικότερα, η διατριβή εξετάζει την εξέλιξη, τις βασικές τεχνολογικές κατηγορίες και τις δυνατότητες εφαρμογής των ηλεκτρονικών παγίδων στη σύγχρονη φυτοπροστασία. Παράλληλα, αξιολογεί τη συμβολή τους στην παρακολούθηση των πληθυσμών των εντόμων, στη λήψη αποφάσεων και στη βελτίωση της διαχείρισης των διαθέσιμων γεωργικών δεδομένων. Διερευνώνται επίσης τα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί και οι προοπτικές αξιοποίησης των συστημάτων αυτών.

Η σημασία της παρούσας διατριβής εντοπίζεται τόσο σε επιστημονικό όσο και σε εφαρμοσμένο επίπεδο. Από επιστημονική άποψη, συμβάλλει στη συγκέντρωση και σύνθεση της διαθέσιμης γνώσης σχετικά με τις ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων και τις τεχνολογικές εξελίξεις που τις συνοδεύουν. Από εφαρμοσμένη σκοπιά, αναδεικνύει τις δυνατότητες αξιοποίησής τους για την υποστήριξη πιο στοχευμένων και αποτελεσματικών πρακτικών φυτοπροστασίας, συμβάλλοντας στη βελτίωση της αποδοτικότητας της παραγωγής και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η αυξανόμενη ανάγκη για ακριβέστερη και έγκαιρη παρακολούθηση των πληθυσμών των εντόμων οδήγησε στην ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων καταγραφής και ανάλυσης

δεδομένων. Το επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζει τις ηλεκτρονικές παίδες εντόμων, την ιστορική τους εξέλιξη, τις βασικές τεχνολογικές κατηγορίες τους και τις αρχές λειτουργίας τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΠΑΓΙΔΕΣ ΕΝΤΟΜΩΝ

2.1. Εισαγωγή στις Ηλεκτρονικές Παγίδες

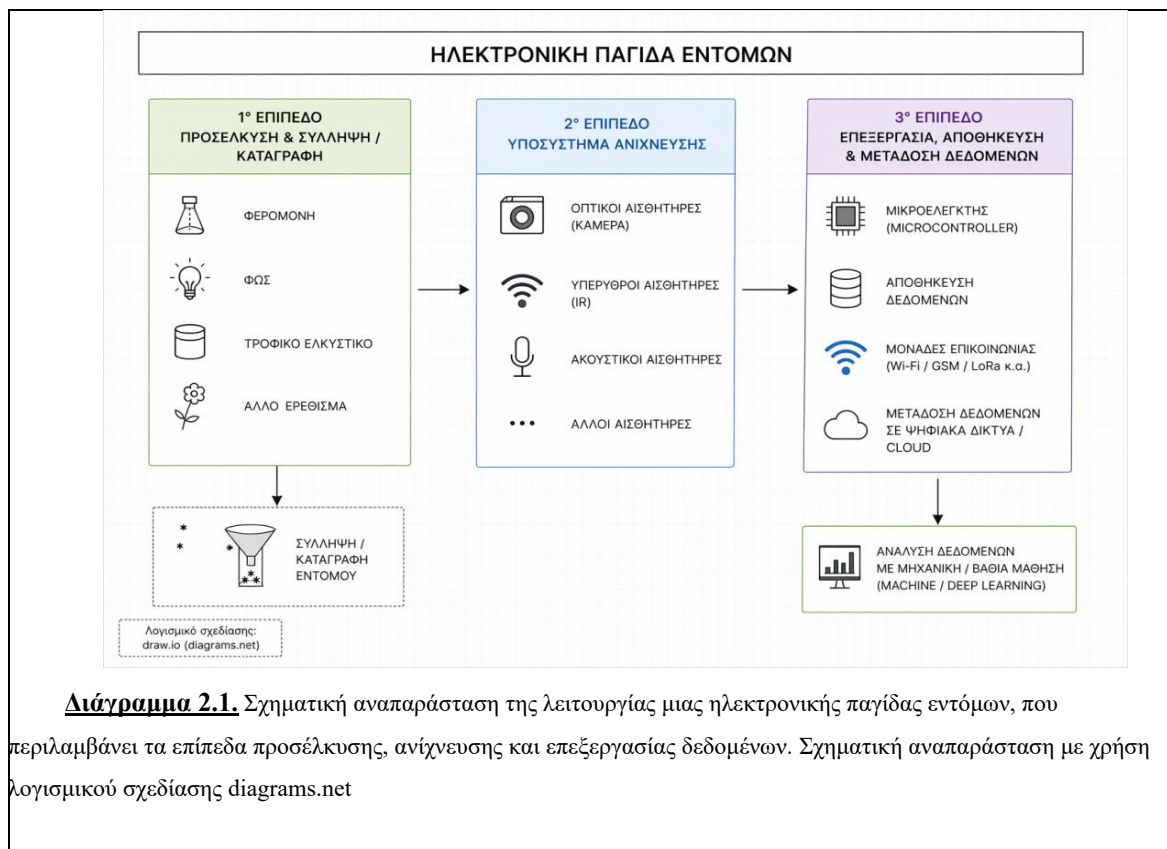
Οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων αποτελούν εξέλιξη των συμβατικών συστημάτων παγίδευσης, καθώς διατηρούν τον βασικό μηχανισμό προσέλκυσης ή σύλληψης των εντόμων, αλλά ενσωματώνουν επιπλέον ηλεκτρονικά υποσυστήματα ανίχνευσης, καταγραφής, επεξεργασίας και μετάδοσης δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό, η παγίδα δεν λειτουργεί μόνο ως μέσο συλλογής εντόμων, αλλά ως αυτοματοποιημένος σταθμός παρακολούθησης, ικανός να παράγει ψηφιακή πληροφορία σχετικά με την παρουσία, τη δραστηριότητα και σε ορισμένες περιπτώσεις, την ταυτότητα των εντόμων- στόχων (Potamitis et al., 2015; Lima et al., 2020; Teixeira et al., 2023).

Η βασική διαφοροποίηση των ηλεκτρονικών παγίδων από τις παραδοσιακές δεν εντοπίζεται απαραίτητα στον τρόπο προσέλκυσης των εντόμων, ο οποίος μπορεί να παραμείνει ίδιος. Η καινοτομία τους αφορά κυρίως την αυτοματοποίηση της καταγραφής και της διαχείρισης των δεδομένων. Αντί η πληροφορία να προκύπτει αποκλειστικά από επιτόπια επίσκεψη, χειροκίνητη καταμέτρηση και μεταγενέστερη επεξεργασία, τα δεδομένα μπορούν να συλλέγονται και να αποστέλλονται απομακρυσμένα, μειώνοντας την καθυστέρηση μεταξύ σύλληψης, καταγραφής και αξιοποίησης της πληροφορίας (Udutalapally et al., 2020; Preti et al., 2021).

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων συνδέεται με τη μετάβαση της φυτοπροστασίας προς τη γεωργία ακριβείας και τη χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων συλλογής δεδομένων πεδίου. (Eliopoulos et al., 2018).

Δομικά (Διάγραμμα 2.1.) μια ηλεκτρονική παγίδα μπορεί να αναλυθεί σε τρία βασικά λειτουργικά επίπεδα. Το πρώτο λειτουργικό επίπεδο περιλαμβάνει το συμβατικό τμήμα της παγίδας, δηλαδή το σύστημα προσέλκυσης και σύλληψης των εντόμων, το οποίο δεν διαφέρει ουσιαστικά από εκείνο των συμβατικών παγίδων. Σε αυτό εντάσσονται τα στοιχεία που είναι

κοινά με τις συμβατικές παγίδες (π.χ. ελκυστικό μέσο, μορφή παγίδας, η επιφάνεια σύλληψης ή ο θάλαμος εγκλωβισμού). Το δεύτερο επίπεδο αφορά το υποσύστημα ηλεκτρονικής ανίχνευσης, το οποίο αποτελεί το βασικό στοιχείο διαφοροποίησης των ηλεκτρονικών παγίδων από τις συμβατικές. Στο υποσύστημα αυτό ενσωματώνονται αισθητήρες ή συστήματα λήψης δεδομένων, όπως κάμερες ψηφιακής απεικόνισης, φωτοηλεκτρικοί αισθητήρες, αισθητήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας, ακουστικοί αισθητήρες ή συνδυασμός αισθητήρων (Potamitis et al., 2015). Το τρίτο επίπεδο περιλαμβάνει την επεξεργασία, αποθήκευση και μετάδοση των δεδομένων μέσω μικροελεγκτών, ασύρματων δικτύων και ψηφιακών πλατφορμών, ενώ σε πιο προηγμένα συστήματα εφαρμόζονται αλγόριθμοι μηχανικής ή βαθιάς μάθησης για την αυτόματη αναγνώριση και ταξινόμηση των εντόμων (Lima et al., 2020; Teixeira et al., 2023).



Οι ηλεκτρονικές παγίδες μπορούν να λειτουργήσουν ως κόμβοι συλλογής εντομολογικών δεδομένων σε συστήματα ψηφιακής φυτοπροστασίας, υποστηρίζοντας την απομακρυσμένη παρακολούθηση και την αυτοματοποιημένη καταγραφή των συλλήψεων (Preti et al., 2021).

Η εφαρμογή των ηλεκτρονικών παγίδων δεν περιορίζεται μόνο στη γεωργική φυτοπροστασία. Ανάλογες τεχνολογίες χρησιμοποιούνται στην προστασία αποθηκευμένων προϊόντων, όπου η έγκαιρη ανίχνευση εντόμων είναι κρίσιμη για την αποφυγή ποιοτικής και

οικονομικής υποβάθμισης. Συστήματα ηλεκτρονικής παγίδευσης εφαρμόζονται επίσης στη δημόσια υγεία, για παράδειγμα στην παρακολούθηση κουνουπιών και άλλων εντόμων-διαβιβαστών ασθενειών, καθώς η έγκαιρη καταγραφή της παρουσίας τους μπορεί να συμβάλλει στον σχεδιασμό μέτρων επιτήρησης και ελέγχου. Στην αστική εντομολογία μπορούν να αξιοποιηθούν για την παρακολούθηση εντόμων σε κατοικημένους χώρους, αποθήκες, πάρκα ή αστικά οικοσυστήματα, ενώ σε οικολογικές μελέτες μπορούν να συμβάλλουν στη συλλογή δεδομένων για τη βιοποικιλότητα και τη δραστηριότητα διαφορετικών ομάδων εντόμων. Η ίδια τεχνολογική αρχή μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικά περιβάλλοντα και για διαφορετικούς σκοπούς παρακολούθησης, γεγονός που εξηγεί το ευρύ πεδίο αξιοποίησης των ηλεκτρονικών παγίδων (Ahmed et al., 2024).

2.2. Η Ιστορία των Ηλεκτρονικών Παγίδων

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων συνδέεται άμεσα με την ανάγκη αυτοματοποίησης της παρακολούθησης των εντομολογικών πληθυσμών και τη σταδιακή μετάβαση από τη χειροκίνητη συλλογή δεδομένων σε ψηφιακά συστήματα καταγραφής και ανάλυσης. Παρότι οι συμβατικές παγίδες χρησιμοποιούνταν επί δεκαετίες στη φυτοπροστασία και στην εντομολογική δειγματοληψία, η ανάγκη για συχνότερη καταγραφή, μείωση του εργατικού κόστους και βελτίωση της χρονικής ανάλυσης των δεδομένων οδήγησε σταδιακά στην ενσωμάτωση ηλεκτρονικών τεχνολογιών στις διαδικασίες παρακολούθησης (Southwood & Henderson, 2000).

Οι πρώτες προσπάθειες ηλεκτρονικής καταγραφής της δραστηριότητας των εντόμων εμφανίστηκαν κατά το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα και βασίζονταν κυρίως στη χρήση φωτοηλεκτρικών αισθητήρων, οι οποίοι κατέγραφαν τη διέλευση των εντόμων μέσω μεταβολών σε φωτεινές δέσμες ή φωτοηλεκτρικά σήματα. Τα συστήματα αυτά δεν πραγματοποιούσαν αναγνώριση ειδών, αλλά παρείχαν αυτοματοποιημένη καταμέτρηση της δραστηριότητας των εντόμων και μείωναν την ανάγκη συνεχούς χειροκίνητης παρακολούθησης (Sciarretta & Calabrese, 2019). Η ανάγκη για μεγαλύτερη ακρίβεια, χρονική ανάλυση και επαναληψιμότητα των μετρήσεων οδήγησε στην περαιτέρω ενσωμάτωση ηλεκτρονικών διατάξεων στις παγίδες.

Από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα, η ανάπτυξη των μικροελεγκτών, των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας και των τεχνολογιών αισθητήρων επέτρεψε τη μετάβαση από απλά συστήματα καταμέτρησης σε ολοκληρωμένα συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης. Οι σύγχρονες ηλεκτρονικές παγίδες λειτουργούν πλέον ως συστήματα συλλογής και άμεσης μετάδοσης

δεδομένων, ενσωματώνοντας δυνατότητες αποθήκευσης, τηλεμετρίας και ανάλυσης (Lima et al., 2020).

Η πιο πρόσφατη φάση εξέλιξης χαρακτηρίζεται από την ενσωμάτωση τεχνολογιών μηχανικής όρασης και τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίες επιτρέπουν την αυτόματη αναγνώριση των εντόμων και την ανάλυση πληθυσμιακών δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό, οι παγίδες μετατρέπονται από παθητικά μέσα δειγματοληψίας σε ενεργά πληροφοριακά εργαλεία υπολογιστικής διαχείρισης και υποστήριξης αποφάσεων και βασικά στοιχεία των εφαρμογών γεωργίας ακριβείας (Teixeira et al., 2023).

Σήμερα, οι ηλεκτρονικές παγίδες χρησιμοποιούνται σε ποικίλα περιβάλλοντα και για διαφορετικούς σκοπούς. Στη γεωργία αξιοποιούνται για την παρακολούθηση πληθυσμών εχθρών και την υποστήριξη της IPM, ενώ σε αστικές και ερευνητικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση πληθυσμών αρθρόποδων και τη συλλογή οικολογικών δεδομένων υψηλής χρονικής και χωρικής ανάλυσης (Potamitis et al., 2015).

2.3. Τύποι Ηλεκτρονικών Παγίδων

Οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων μπορούν να ταξινομηθούν με βάση το είδος των αισθητήρων και συστημάτων που χρησιμοποιούν για την ανίχνευση κίνησης και καταγραφή των εντόμων, καθώς και με βάση τον βαθμό αυτοματοποίησης και επεξεργασίας των δεδομένων. (Lima et al., 2020; Barzman et al., 2015).

Με βάση τα παραπάνω, οι ηλεκτρονικές παγίδες μπορούν να διακριθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: (α) παγίδες με αισθητήρες ανίχνευσης, (β) οπτικές παγίδες με κάμερα, (γ) ακουστικές ή βιοακουστικές παγίδες και (δ) πολυαισθητηριακά συστήματα. Η ταξινόμηση αυτή αντανακλά τη σταδιακή μετάβαση από απλές τεχνολογίες καταγραφής σε σύνθετα συστήματα συλλογής και ανάλυσης δεδομένων υψηλής ακρίβειας (Teixeira et al., 2023).

2.3.1. Παγίδες με Αισθητήρες Ανίχνευσης Κίνησης ή Χημικών Ουσιών

Οι ηλεκτρονικές παγίδες με αισθητήρες βασίζονται στην ανίχνευση μεταβολών που σχετίζονται με τη δραστηριότητα των εντόμων, όπως οπτικά, μηχανικά, ακουστικά ή χημικά σήματα (Lima et al., 2020). Ανάλογα με το είδος του σήματος που ανιχνεύεται, οι αισθητήρες αυτοί διακρίνονται σε επιμέρους κατηγορίες, όπως οπτικοί ή φωτοηλεκτρικοί αισθητήρες, οι

αισθητήρες πτερυγισμού (wingbeat sensors), οι μηχανικοί ή ακουστικοί αισθητήρες δόνησης και οι χημικοί αισθητήρες ανίχνευσης πτητικών ουσιών.

2.3.1.1. Οπτικοί ή φωτοηλεκτρικοί αισθητήρες

Οι οπτικοί ή φωτοηλεκτρικοί αισθητήρες αποτελούν μια από τις πρώτες και περισσότερο διαδεδομένες τεχνολογίες ηλεκτρονικής καταγραφής εντόμων. Η λειτουργία τους βασίζεται συνήθως στη χρήση δέσμης υπέρυθρου ή ορατού φωτός, η οποία διακόπτεται όταν ένα έντομο διέρχεται από το πεδίο ανίχνευσης της παγίδας. Η διακοπή αυτή καταγράφεται από φωτοαισθητήρα και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα, επιτρέποντας την αυτόματη καταγραφή της παρουσίας ή του αριθμού διελεύσεων των εντόμων (Rydhmer et al., 2022).

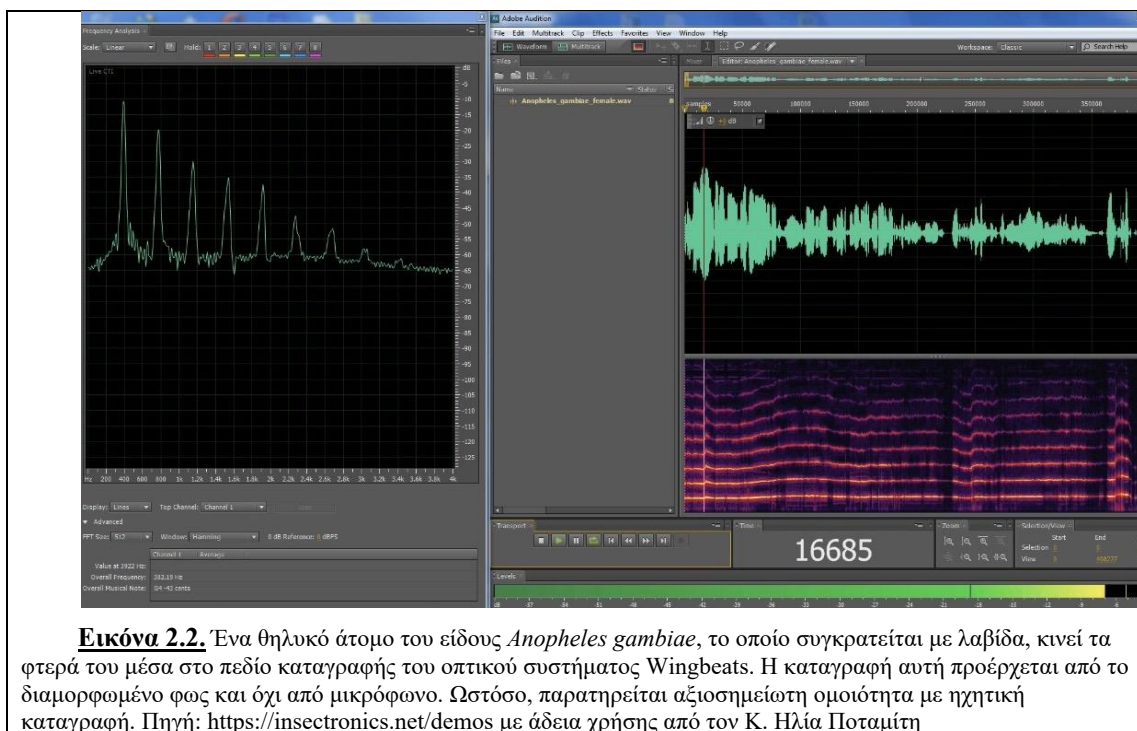
Τα συστήματα αυτά εφαρμόζονται κυρίως σε παγίδες εισόδου ή σε ελεγχόμενα περάσματα, όπου η πορεία των εντόμων μπορεί να κατευθυνθεί μέσα από συγκεκριμένο σημείο ανίχνευσης. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται συχνά για την παρακολούθηση ιπτάμενων εντόμων, όπως κουνουπιών, μυγών, λεπιδόπτερων και δίπτερων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να συνδυαστεί με αλγόριθμους επεξεργασίας σήματος για τη βελτίωση της ακρίβειας καταμέτρησης (Potamitis et al., 2015).

Πλεονεκτήματα των φωτοηλεκτρικών αισθητήρων αποτελεί η δυνατότητα συνεχούς και αυτοματοποιημένης καταγραφής χωρίς την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης παρουσίας. Παράλληλα, τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και δυνατότητα ενσωμάτωσης σε παγίδες πεδίου μεγάλης διάρκειας λειτουργίας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές παρακολούθησης πληθυσμών εντόμων σε γεωργικά και ερευνητικά περιβάλλοντα.

Παράδειγμα απλής εφαρμογής φωτοηλεκτρικού αισθητήρα είναι η καταγραφή της διέλευσης εντόμων μέσα από στενό πέρασμα ή είσοδο παγίδας. Σε τέτοια συστήματα, μια δέσμη υπέρυθρου φωτός εκπέμπεται συνεχώς μεταξύ πομπού και δέκτη και κάθε έντομο που διέρχεται από το σημείο ανίχνευσης προκαλεί στιγμιαία διακοπή της δέσμης. Η μεταβολή αυτή καταγράφεται ως ξεχωριστό συμβάν, επιτρέποντας την αυτόματη καταμέτρηση των διελεύσεων χωρίς να απαιτείται φυσική σύλληψη ή χειροκίνητη παρατήρηση. Παρόμοιες διατάξεις έχουν χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση ιπτάμενων εντόμων και αποτελούν μια από τις πιο απλούστερες μορφές ηλεκτρονικής καταγραφής σε συστήματα παρακολούθησης εντόμων (Potamitis et al., 2015; Rydhmer et al., 2022).

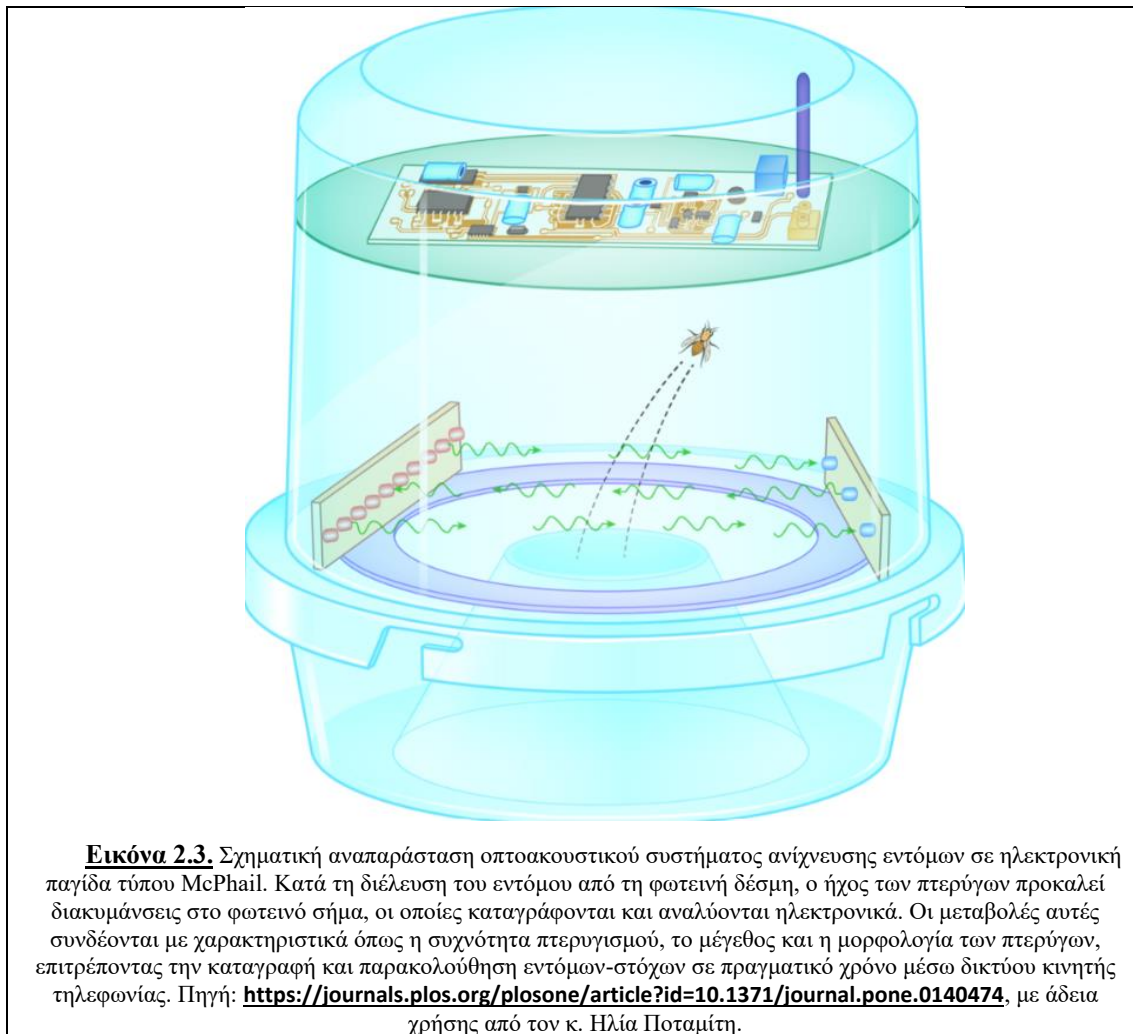
2.3.1.2. Οπτοακουστικοί αισθητήρες ή αισθητήρες πτερυγισμού

Μια πιο εξελιγμένη κατηγορία οπτικών αισθητήρων αποτελείται από τα οπτοακουστικά συστήματα ή αισθητήρες καταγραφής πτερυγισμού (wingbeat sensors), τα οποία δεν περιορίζονται μόνο στην ανίχνευση της διέλευσης των εντόμων, αλλά καταγράφουν και χαρακτηριστικά της πτήσης τους. Η λειτουργία τους βασίζεται συνήθως στη διέλευση του εντόμου μέσω από δέσμη υπέρυθρου ή ορατού φωτός, όπου η κίνηση των πτερύγων προκαλεί διακυμάνσεις στο φωτεινό σήμα. Οι μεταβολές αυτές μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα και αναλύονται με τεχνικές επεξεργασίας σήματος, επιτρέποντας την καταγραφή χαρακτηριστικών όπως η συχνότητα πτερυγισμού και το μοτίβο πτήσης του εντόμου (Εικόνα 2.2.) (Potamitis et al., 2015).



Η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς διαφορετικά είδη εντόμων εμφανίζουν διαφορετικές συχνότητες πτερυγισμού, γεγονός που επιτρέπει σε ορισμένες περιπτώσεις τη μερική διάκριση ή ταξινόμησή τους χωρίς τη χρήση κάμερας. Συστήματα αυτού του τύπου έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα ιπτάμενα έντομα της τάξης των δίπτερων, όπως μύγα της Μεσογείου (*Ceratitis capitata*) και ο δάκος της ελιάς (*Bactrocera oleae*), αλλά και σε κουνούπια και άλλα έντομα υγειονομικής σημασίας (Potamitis et al., 2015; Rydhmer et al., 2022).

Ενδεικτική περίπτωση αποτελεί το σύστημα που περιγράφεται από Potamitis et al. (2015), στο οποίο αισθητήρες υπέρυθρου φωτός ενσωματώνονται σε παγίδες τύπου McPhail για την απομακρυσμένη παρακολούθηση εντόμων. Στο σύστημα αυτό, η διέλευση του εντόμου από τη φωτεινή δέσμη προκαλεί μεταβολές στο οπτικό σήμα, οι οποίες καταγράφονται και αναλύονται ηλεκτρονικά, επιτρέποντας την καταγραφή της δραστηριότητας των εντόμων σε πραγματικό χρόνο (Εικόνα 2.3.).



2.3.1.3. Αισθητήρες Μηχανικής Δόνησης ή Ακουστικοί Αισθητήρες

Οι αισθητήρες μηχανικής δόνησης και οι ακουστικοί αισθητήρες αποτελούν μία ιδιαίτερη κατηγορία συστημάτων ανίχνευσης εντόμων, καθώς βασίζονται στην καταγραφή μηχανικών ταλαντώσεων, μικροδονήσεων ή ηχητικών σημάτων που παράγονται από τη δραστηριότητα των εντόμων. Σε αντίθεση με τους φωτοηλεκτρικούς αισθητήρες, οι οποίοι ανιχνεύουν κυρίως τη διέλευση ιπτάμενων εντόμων, τα συστήματα αυτά μπορούν να καταγράφουν κινήσεις, ήχους τροφής ή μηχανικές μεταβολές που προκαλούνται από την επαφή ή τη δραστηριότητα των εντόμων σε επιφάνειες, φυτικούς ιστούς ή αποθηκευμένα προϊόντα (Mankin et al., 2011).

Η λειτουργία των συστημάτων αυτών βασίζεται συνήθως σε αισθητήρες δόνησης, πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς ή μικρόφωνα υψηλής ευαισθησίας, τα οποία καταγράφουν μηχανικά ή ακουστικά σήματα πολύ χαμηλής έντασης. Τα σήματα αυτά μετατρέπονται σε ηλεκτρικές μεταβολές και αναλύονται με τεχνικές επεξεργασίας σήματος, επιτρέποντας την ανίχνευση της παρουσίας ή της δραστηριότητας των εντόμων ακόμη όταν αυτά δεν είναι ορατά εξωτερικά (Mankin et al., 2011).

Οι τεχνολογίες αυτές έχουν εφαρμοστεί κυρίως στην ανίχνευση εντόμων αποθηκευμένων προϊόντων και ξυλοφάγων ειδών, όπου η δραστηριότητα των προνύμφων ή των ενηλίκων παράγει χαρακτηριστικούς ήχους ή δονήσεις κατά τη διατροφή και την κίνηση. Αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις αποτελούν είδη όπως το *Sitophilus oryzae*, το *Ryzopertha dominica* και διάφορα είδη τερμιτών, των οποίων η παρουσία μπορεί να ανιχνευθεί μέσω ακουστικής ή δονητικής παρακολούθησης πριν ακόμα εμφανιστούν ορατά σημάδια προσβολής (Hagstrum et al., 1996, Mankin et al., 1996).

Η χρήση αισθητήρων μηχανικής δόνησης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε εφαρμογές έγκαιρης ανίχνευσης προσβολών, καθώς επιτρέπει τη συνεχή και μη καταστροφική παρακολούθηση βιολογικής δραστηριότητας σε αποθηκευμένα γεωργικά προϊόντα και φυτικών ιστών. Για το λόγο αυτό, οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε ερευνητικά συστήματα βιοακουστικής παρακολούθησης εντόμων και σε εφαρμογές ανίχνευσης κρυπτόβιων ειδών.

2.3.1.4. Χημικοί Αισθητήρες και Αισθητήρες Ανίχνευσης Πτητικών Ουσιών

Οι χημικοί αισθητήρες αποτελούν μία αναδυόμενη κατηγορία ηλεκτρονικών συστημάτων παρακολούθησης εντόμων, καθώς βασίζονται στην ανίχνευση πτητικών οργανικών ενώσεων (Volatile Organic Compounds- VOCs), φερομονών ή άλλων χημικών σημάτων που σχετίζονται με τη δραστηριότητα των εντόμων ή την προσβολή φυτικών και αποθηκευμένων προϊόντων. Σε αντίθεση με τους φωτοηλεκτρικούς και ακουστικούς αισθητήρες, οι οποίοι καταγράφουν φυσικές ή μηχανικές μεταβολές, οι χημικοί αισθητήρες στοχεύουν στην ανίχνευση χημικών «ιχνών» που παράγονται άμεσα ή έμμεσα από τα έντομα (Wilson, 2013).

Η λειτουργία των συστημάτων αυτών βασίζεται συνήθως σε ηλεκτροχημικούς αισθητήρες ή σε συστήματα ηλεκτρονικής όσφρησης (Electronic noses- e-noses), τα οποία μπορούν να

αναγνωρίζουν πρότυπα πτητικών ουσιών στον αέρα. Οι αισθητήρες αυτοί καταγράφουν μεταβολές στη χημική σύσταση του περιβάλλοντος και μετατρέπουν τα δεδομένα σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία αναλύονται με αλγορίθμους αναγνώρισης προτύπων (Wilson, 2013; Banga et al., 2018).

Οι τεχνολογίες αυτές έχουν εφαρμοστεί κυρίως στην ανίχνευση εντόμων αποθηκευμένων προϊόντων και στην πρόωμη αναγνώριση προσβολών σε γεωργικά προϊόντα, όπου η παρουσία των εντόμων ή των προνυμφών συνοδεύεται από παραγωγή χαρακτηριστικών πτητικών ενώσεων. Έντομα αποθηκευμένων σιτηρών, των οποίων η δραστηριότητα συνοδεύεται από την έκλυση VOCs που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βιοδείκτες προσβολής (Cai et al., 2022). Εφαρμογές αντίστοιχων συστημάτων έχουν επίσης αναφερθεί σε αποθηκευμένα δημητριακά, ξηρούς καρπούς και φρούτα, όπου οι χημικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται για την έγκαιρη ανίχνευση βιολογικής αλλοίωσης και εντομολογικής δραστηριότητας (Banga et al., 2018).

Παρότι οι χημικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται συχνότερα για την ανίχνευση προσβολών και τη διαπίστωση της παρουσίας εντόμων, μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε συστήματα παγίδευσης. Σε τέτοιες εφαρμογές, οι αισθητήρες παρακολουθούν τη συγκέντρωση φερομονών ή άλλων πτητικών ελκυστικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στις παγίδες και μπορούν να συμβάλλουν στην αυτόματη επιβεβαίωση της παρουσίας εντόμων στην περιοχή ενδιαφέροντος. Επιπλέον, έχουν προταθεί πειραματικά συστήματα στα οποία δεδομένα από χημικούς αισθητήρες συνδυάζονται με πληροφορίες από οπτικούς ή φωτοηλεκτρικούς αισθητήρες, με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας των ηλεκτρονικών παγίδων και την έγκαιρη ανίχνευση μεταβολών στους πληθυσμούς των εντόμων.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ	ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ	ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ/ ENTOMA
Οπτικοί/ φωτοηλεκτρικοί	Διακοπή δέσμης φωτός	Ιπτάμενα έντομα, μύγες, λεπιδόπτερα
Οπτοακουστικοί ή πτερυγισμού	Συχνότητα πτερυγισμού	Ceratitis capitata, Bactocera oleae
Μηχανικής δόνησης ή ακουστικοί	Δονήσεις και ηχητικά σήματα	Sitophilus oryzae, τερμίτες
Χημικοί/ e- noses	VOCs και χημικά σήματα	Έντομα αποθηκευμένων προϊόντων

Πίνακας 2.1. Βασικές κατηγορίες αισθητήρων ανίχνευσης που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικά συστήματα παρακολούθησης εντόμων.

Παρά το σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον, οι χημικοί αισθητήρες βρίσκονται ακόμη σε σχετικά πρώιμο στάδιο ανάπτυξης συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες ηλεκτρονικής παρακολούθησης. Ωστόσο, θεωρούνται ιδιαίτερα υποσχόμενοι για μελλοντικές εφαρμογές αυτοματοποιημένης ανίχνευσης εντόμων, κυρίως λόγω της δυνατότητάς τους να εντοπίζουν βιολογική δραστηριότητα ακόμη και πριν από την εμφάνιση ορατών συμπτωμάτων προσβολής.

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των παραπάνω συστημάτων είναι η μετατροπή φυσικών, μηχανικών ή χημικών σημάτων σε ψηφιακά δεδομένα, τα οποία μπορούν να αποθηκευτούν, να αναλυθούν και να μεταδοθούν απομακρυσμένα. Η εξέλιξη των αισθητήρων αυτών έχει συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων παρακολούθησης εντόμων, διευρύνοντας τις δυνατότητες συνεχούς καταγραφής βιολογικής δραστηριότητας σε γεωργικά και ερευνητικά περιβάλλοντα.

2.3.2. Οπτικές Παγίδες με Κάμερα

Οι οπτικές ηλεκτρονικές παγίδες αποτελούν μία από τις πιο εξελιγμένες και ταχέως αναπτυσσόμενες κατηγορίες συστημάτων παρακολούθησης εντόμων, καθώς βασίζονται στη χρήση ψηφιακών καμερών για την καταγραφή και ανάλυση της παρουσίας των εντόμων. Σε αντίθεση με τις παγίδες που βασίζονται αποκλειστικά σε αισθητήρες διέλευσης, οι οπτικές

παγίδες παρέχουν οπτικό υλικό (εικόνες ή βίντεο), το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για την αναγνώριση, καταμέτρηση και περαιτέρω ανάλυση των εντόμων- στόχων (Lima et al., 2020).

Η βασική αρχή λειτουργίας των συστημάτων αυτών περιλαμβάνει την τοποθέτηση κάμερας στο εσωτερικό ή στην είσοδο της παγίδας, η οποία καταγράφει εικόνες σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ή κατόπιν ενεργοποίησης από αισθητήρα. Οι εικόνες αυτές είτε αποθηκεύονται τοπικά είτε μεταδίδονται σε απομακρυσμένα συστήματα παρακολούθησης των συλλήψεων (Udutalapally et al., 2020).

Οι οπτικές παγίδες διαφοροποιούνται και ως προς τον τρόπο καταγραφής των εικόνων και τη μορφή της παγίδας. Σε ορισμένα συστήματα χρησιμοποιούνται κολλητικές επιφάνειες με ενσωματωμένες κάμερες (Εικόνα 2.4.), όπου οι εικόνες λαμβάνονται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα για την καταγραφή των συλλήψεων. Σε άλλες εφαρμογές οι κάμερες τοποθετούνται στο εσωτερικό παγίδων τύπου χοάνης (funnel) ή McPhail, επιτρέποντας την καταγραφή της δραστηριότητας των εντόμων κατά την είσοδο ή τη σύλληψή τους. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί και συστήματα συνεχούς βιντεοπαρακολούθησης, τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σε ερευνητικά περιβάλλοντα για τη μελέτη της συμπεριφοράς και της κινητικότητας των εντόμων (Sciarretta et al., 2019; Preti et al., 2020).



Εικόνα 2.4. Έξυπνη οπτική παγίδα εντόμων (sticky trap) εγκατεστημένη σε καλλιέργεια, εξοπλισμένη με κάμερα και αυτόνομη τροφοδοσία (ηλιακό πάνελ). Το σύστημα καταγράφει και μεταδίδει εικόνες για την αυτόματη ανίχνευση, καταμέτρηση και αναγνώριση εντόμων μέσω τεχνικών μηχανικής όρασης και μηχανικής μάθησης, συμβάλλοντας στη γεωργία ακριβείας και την αποτελεσματική εφαρμογή της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης Εχθρών (IPM). Πηγή: <https://4dfarm.org/research/2024/iot-smart-traps/>, με άδεια χρήσης από τον Glen C Rains, PhD

Η εξέλιξη των οπτικών παγίδων συνδέεται άμεσα με την πρόοδο στη μηχανική όραση και στη μηχανική μάθηση. Τα σύγχρονα συστήματα ενσωματώνουν αλγορίθμους επεξεργασίας εικόνας, οι οποίοι επιτρέπουν την αυτόματη ανίχνευση και καταμέτρηση εντόμων μέσα στο οπτικό πεδίο της κάμερας. Σε πιο προηγμένες εφαρμογές, χρησιμοποιούνται τεχνικές βαθιάς μάθησης (deep learning), όπως τα συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (CNNs), για την αναγνώριση των ειδών με υψηλό βαθμό ακρίβειας (Teixeira et al., 2023).

Οι τεχνολογίες αυτές έχουν εφαρμοστεί σε μεγάλο εύρος γεωργικών εχθρών, όπως λεπιδόπτερα, αφίδες, αλευρώδεις και μύγες των φρούτων, ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα συστήματα αυτόματης αναγνώρισης ειδών σε φερομονικές παγίδες. Η χρήση

αλγορίθμων μηχανικής όρασης επιτρέπει τη μείωση του ανθρώπινου χρόνου επιθεώρησης και τη συνεχή παρακολούθηση πληθυσμών σε πραγματικό χρόνο (Ding & Taylor, 2016). Το παράδειγμα της Εικόνας 2.5., όπου το σύστημα συνδυάζει συμβατική φερομονική παγίδα με ψηφιακή κάμερα, μονάδα επικοινωνίας και αυτόνομη ενεργειακή τροφοδοσία μέσω ηλιακού πάνελ. Η κάμερα καταγράφει περιοδικά εικόνες από το εσωτερικό της παγίδας, όπου συγκεντρώνονται τα έντομα-στόχοι, και τις μεταδίδει σε απομακρυσμένη πλατφόρμα μέσω ασύρματου δικτύου. Στη συνέχεια, εικόνες αναλύονται με αλγόριθμους μηχανικής όρασης για την αυτόματη καταγραφή και καταμέτρηση των συλλήψεων, επιτρέποντας την παρακολούθηση των πληθυσμών χωρίς την ανάγκη συχνών επιτόπιων επισκέψεων.



Εικόνα 2.5. Οπτική ηλεκτρονική παγίδα εντόμων εγκατεστημένη σε οπωρώνα, με ενσωματωμένο σύστημα καταγραφής και απομακρυσμένης παρακολούθησης για εφαρμογές γεωργίας ακριβείας και ολοκληρωμένης φυτοπροστασίας. Πηγή: <https://semios.com/our-hardware/automated-camera-traps/>, με άδεια χρήσης από τον Robert Fifer της ομάδας Semios.

Η δυνατότητα αυτή αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες κατηγορίες παγίδων, καθώς επιτρέπει όχι μόνο την καταγραφή της παρουσίας εντόμων, αλλά και την ταυτοποίησή τους, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό στο πλαίσιο της IPM. Επιπλέον, η ύπαρξη οπτικού αρχείου επιτρέπει την επαλήθευση των δεδομένων και τη μείωση των σφαλμάτων που σχετίζονται με την αυτόματη ανίχνευση.

Ταυτόχρονα, οι οπτικές παγίδες μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα γεωργίας ακριβείας, λειτουργώντας ως κόμβοι συλλογής δεδομένων που συνδέονται με πλατφόρμες υποστήριξης λήψης αποφάσεων. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να συσχετιστούν με

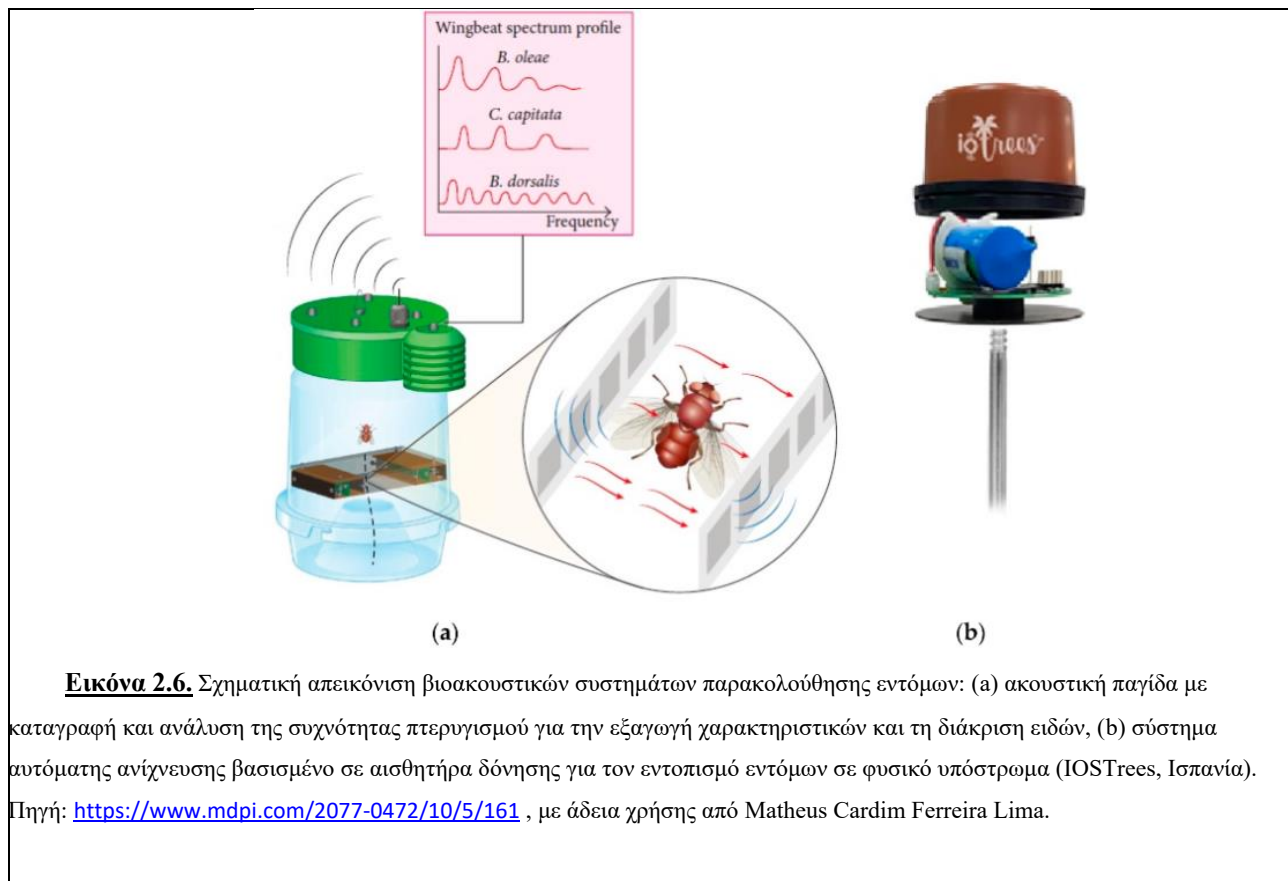
περιβαλλοντικές παραμέτρους και να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων πληθυσμιακής δυναμικής (Barzman et al., 2015).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, οι παγίδες με οπτικούς αισθητήρες παρουσιάζουν και ορισμένους περιορισμούς. Η απόδοσή τους επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι συνθήκες φωτισμού, η ποιότητα των εικόνων, η επικάλυψη των εντόμων και η πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος. Επιπλέον, η ακρίβεια των αλγορίθμων αναγνώρισης εξαρτάται από την ποιότητα και το μέγεθος των συνόλων εκπαίδευσης, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη γενίκευση των μοντέλων (Lima et al., 2020).

2.3.3. Ακουστικές ή Βιοακουστικές Παγίδες

Οι ακουστικές ή βιοακουστικές παγίδες αποτελούν μια εξειδικευμένη κατηγορία ηλεκτρονικών συστημάτων παρακολούθησης, οι οποίες βασίζονται όχι μόνο στην καταγραφή ηχητικών σημάτων, αλλά και στη βιολογική ερμηνεία τους. Τα συστήματα αυτά αξιοποιούν χαρακτηριστικά όπως η συχνότητα πτερυγισμού, τα ηχητικά μοτίβα επικοινωνίας και οι δονήσεις που παράγονται από τη δραστηριότητα των εντόμων, με στόχο την ανίχνευση, την αναγνώριση ή ακόμη και τη συμπεριφορική μελέτη διαφορετικών ειδών. Σε αντίθεση με τα συστήματα απλής ακουστικής ανίχνευσης, οι βιοακουστικές προσεγγίσεις δίνουν έμφαση στην ανάλυση των ακουστικών «υπογραφών» των εντόμων ως βιολογικών χαρακτηριστικών αναγνώρισης (Mankin et al., 2011).

Η βασική αρχή λειτουργίας των βιοακουστικών παγίδων στηρίζεται στην καταγραφή ήχου μέσω μικροφώνων ή αισθητήρων δόνησης, οι οποίοι τοποθετούνται είτε στο εσωτερικό της παγίδας είτε σε άμεση επαφή με το υπόστρωμα όπου δραστηριοποιούνται τα έντομα. Τα σήματα που συλλέγονται υφίστανται επεξεργασία μέσω αλγορίθμων ανάλυσης σήματος, με στόχο την εξαγωγή χαρακτηριστικών όπως η συχνότητα, το πλάτος και η χρονική κατανομή των παλμών.



Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα χρήσης της συχνότητας πτερυγισμού ως «βιομετρικού χαρακτηριστικού, καθώς ορισμένα είδη εντόμων εμφανίζουν σχετικά σταθερά πρότυπα συχνοτήτων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για την αναγνώρισή τους (Εικόνα 2.6.). Σε συνδυασμό με τεχνικές μηχανικής μάθησης, τα συστήματα αυτά μπορούν να επιτύχουν αυτόματη ταξινόμηση ηχητικών σημάτων, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη συστημάτων αυτόματης επιτήρησης (Teixeira et al., 2023). Η προσέγγιση αυτή έχει εφαρμοστεί ιδιαίτερα σε κουνούπια των γενών *Anopheles* και *Aedes*, όπου οι διαφορές στη συχνότητα πτερυγισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάκριση ειδών ή ακόμη και φύλου των ατόμων (Potamitis et al., 2015).

Οι βιοακουστικές προσεγγίσεις παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε περιπτώσεις όπου η οπτική παρατήρηση είναι δύσκολη ή ανεπαρκής, όπως σε περιβάλλοντα με χαμηλό φωτισμό, σε πυκνή βλάστηση ή σε εφαρμογές που αφορούν έντομα τα οποία δεν παγιδεύονται εύκολα με συμβατικές μεθόδους. Επιπλέον, επιτρέπουν την ανίχνευση εντόμων χωρίς απαραίτητα τη φυσική τους σύλληψη, γεγονός που μειώνει την παρεμβατικότητα της μεθόδου.

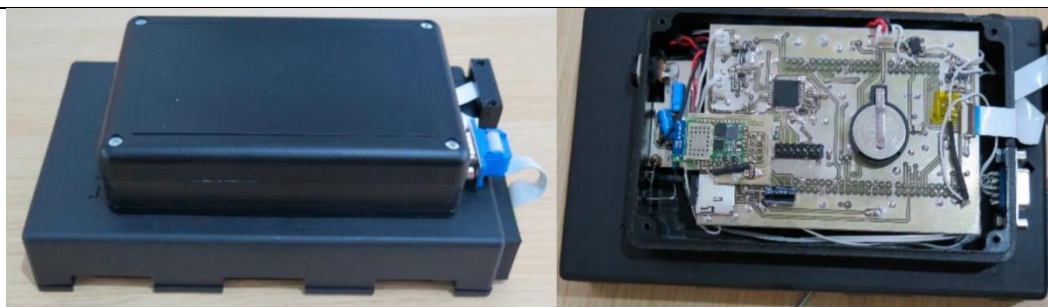
Η εφαρμογή των ακουστικών παγίδων συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις. Η παρουσία περιβαλλοντικού θορύβου, η επικάλυψη ηχητικών σημάτων από διαφορετικά είδη και η

μεταβλητότητα της συμπεριφοράς των εντόμων μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια της ανίχνευσης και ταξινόμησης. Για τον λόγο αυτό, οι βιοακουστικές παγίδες χρησιμοποιούνται κυρίως σε εξειδικευμένες εφαρμογές ή σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες, όπως οι οπτικές ή οι πολυαισθητηριακές παγίδες.

Σε ορισμένες εφαρμογές, τα βιοακουστικά συστήματα χρησιμοποιούνται όχι μόνο για την καταγραφή ηχητικών σημάτων, αλλά και για την προσέλκυση εντόμων μέσω τεχνητών ακουστικών ερεθισμάτων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αναπαραγωγή συχνοτήτων ή ήχων που σχετίζονται με την επικοινωνία ή τη συμπεριφορά συγκεκριμένων ειδών, επηρεάζοντας την κίνηση και την ανταπόκρισή τους. Αντίστοιχες προσεγγίσεις έχουν μελετηθεί σε κουνούπια και ορισμένα λεπιδόπτερα, όπου τα ηχητικά σήματα χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικά μέσα προσέλκυσης ή συμπεριφορικής διαχείρισης πληθυσμών, μέσω της καταγραφής της ανταπόκρισης των εντόμων στα ακουστικά ερεθίσματα (Lapshin & Vorontsov, 2018).

2.3.4. Πολυαισθητηριακά Συστήματα

Τα πολυαισθητηριακά συστήματα (Εικόνα 2.7.) αποτελούν την πιο εξελιγμένη κατηγορία ηλεκτρονικών παγίδων, καθώς συνδυάζουν περισσότερες από μια τεχνολογίες ανίχνευσης με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας, της αξιοπιστίας και της πληρότητας των δεδομένων. Σε αντίθεση με τις μονοδιάστατες προσεγγίσεις, όπου η ανίχνευση βασίζεται σε ένα μόνο τύπο αισθητήρα (π.χ. οπτικό ή ακουστικό), τα πολυαισθητηριακά συστήματα ενσωματώνουν διαφορετικές πηγές πληροφορίας, επιτρέποντας τη σύνθεση και διασταύρωση δεδομένων (Lima et al., 2020).



Εικόνα 2.7. Παράδειγμα πολυαισθητηριακής ηλεκτρονικής παγίδας εντόμων με σύστημα καταγραφής εικόνας, ηλεκτρονικό κύκλωμα επεξεργασίας δεδομένων και δυνατότητες αυτοματοποιημένης ανίχνευσης και απομακρυσμένης μετάδοσης πληροφοριών. Πηγή: A “Smart” Trap Device for Detection of Crawling Insects and Other Arthropods in Urban Environments, με άδεια χρήσης από τον κ. Ηλία Ποταμίτη.

Συνήθως, οι παγίδες αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν συνδυασμούς τεχνολογιών, όπως ψηφιακές κάμερες για οπτική καταγραφή, φωτοηλεκτρικούς ή υπέρυθρους αισθητήρες για ανίχνευση διέλευσης, μικρόφωνα για καταγραφή ακουστικών σημάτων, καθώς και αισθητήρες περιβάλλοντος (π.χ. θερμοκρασίας, υγρασίας ή φωτεινότητας). Σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές, ενσωματώνονται ακόμη και αισθητήρες χημικής ανίχνευσης για την καταγραφή πτητικών οργανικών ενώσεων που σχετίζονται με την παρουσία εντόμων ή φυτικών ξενιστών (Ahmed et al., 2024).

Οι οπτικές παγίδες μπορούν να διακριθούν σε συστήματα στατικής φωτογράφισης, παγίδες με εσωτερική οπτική καταγραφή και συστήματα συνεχούς βιντεοπαρακολούθησης, ενώ στα πολυαισθητηριακά συστήματα οι τεχνολογίες αυτές συνδυάζονται με επιπλέον αισθητήρες για την παραγωγή πιο ολοκληρωμένων δεδομένων παρακολούθησης. Ενδεικτικές εφαρμογές αποτελούν τα συστήματα που συνδυάζουν κάμερες με αισθητήρες πτερυγισμού, ακουστικούς αισθητήρες και αισθητήρες περιβάλλοντος, επιτρέποντας τη συσχέτιση της δραστηριότητας των εντόμων με μικροκλιματικές παραμέτρους και βιολογικά χαρακτηριστικά (Tschaikner et al., 2024; Potamitis et al., 2015).

Η βασική αρχή λειτουργίας των πολυαισθητηριακών συστημάτων είναι η λεγόμενη «συγχώνευση δεδομένων» (data fusion), κατά την οποία πληροφορίες από διαφορετικές πηγές συνδυάζονται για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων συμπερασμάτων. Για παράδειγμα, η ταυτόχρονη χρήση κάμερας και αισθητήρα διέλευσης επιτρέπει όχι μόνο την ανίχνευση της παρουσίας ενός εντόμου, αλλά και την οπτική επιβεβαίωση και αναγνώρισή του, μειώνοντας σημαντικά τα σφάλματα καταγραφής. Αντίστοιχα, η συνδυαστική αξιοποίηση ακουστικών και περιβαλλοντικών δεδομένων μπορεί να συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της δραστηριότητας και της συμπεριφοράς των πληθυσμών σε πραγματικές συνθήκες πεδίου (Kariyanna & Sowjanya, 2024).

Η προσέγγιση αυτή παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς βελτιώνει την ακρίβεια της ανίχνευσης, μειώνει την αβεβαιότητα και επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς και της δραστηριότητας των εντόμων σε πραγματικές συνθήκες. Επιπλέον, η ενσωμάτωση πολλαπλών αισθητήρων επιτρέπει τη συσχέτιση βιολογικών και περιβαλλοντικών δεδομένων, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων και τη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της Γεωργίας Ακριβείας (Eliopoulos et al., 2018)

Πολυαισθητηριακά συστήματα έχουν εφαρμοστεί κυρίως στην παρακολούθηση μυγών των φρούτων, λεπιδόπτερων και άλλων σημαντικών γεωργικών εχθρών, όπου η συνδυαστική χρήση διαφορετικών αισθητήρων συμβάλλει στη βελτίωση της ακρίβειας ανίχνευσης και στην έγκαιρη αναγνώριση πληθυσμιακών μεταβολών. Η δυνατότητα συνεχούς συλλογής βιολογικών και περιβαλλοντικών δεδομένων θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για εφαρμογές γεωργίας ακριβείας και αυτοματοποιημένης φυτοπροστασίας (Ahmed et al., 2024; Barzman et al., 2015; Rydhmer et al., 2022).

Εντούτοις, τα πολυαισθητηριακά συστήματα συνοδεύονται και από αυξημένη πολυπλοκότητα, τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού όσο και σε επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων. Η ανάγκη συγχρονισμού διαφορετικών αισθητήρων, η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων και η ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων συγχώνευσης αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για την ευρεία εφαρμογή τους (Ahmed et al., 2024; Tschaikner et al., 2024).

2.4. Γεωργία Ακριβείας (Precision Agriculture- PA)

2.4.1. Η έννοια και οι βασικές αρχές της Γεωργίας Ακριβείας

Η αναφορά στη Γεωργία Ακριβείας (Precision Agriculture- PA) είναι άμεσα συνδεδεμένη με το αντικείμενο της παρούσας διατριβής, καθώς οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων αποτελούν μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες συλλογής βιολογικών δεδομένων στο πεδίο. Μέσω αισθητήρων, συστημάτων τηλεμετρίας και ψηφιακών πλατφορμών, οι ηλεκτρονικές παγίδες παρέχουν πληροφορίες για την παρουσία και τη δυναμική των πληθυσμών των εντόμων, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για την υποστήριξη αποφάσεων φυτοπροστασίας. Ως εκ τούτου, η κατανόηση των βασικών αρχών της PA είναι απαραίτητη για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι ηλεκτρονικές παγίδες ενσωματώνονται στα σύγχρονα συστήματα ψηφιακής γεωργίας.

Η PA αποτελεί σύγχρονη προσέγγιση διαχείρισης της γεωργικής παραγωγής, η οποία βασίζεται στη συλλογή, ανάλυση και αξιοποίηση χωρικών και χρονικών δεδομένων με σκοπό τη βελτιστοποίηση των καλλιεργητικών πρακτικών και την αποτελεσματικότερη χρήση των διαθέσιμων πόρων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές πρακτικές ομοιόμορφης διαχείρισης των αγροτεμαχίων, η PA αναγνωρίζει ότι οι γεωργικές εκτάσεις παρουσιάζουν σημαντική χωρική και χρονική ετερογένεια ως προς τις φυτοχημικές ιδιότητες του εδάφους, τη διαθεσιμότητα

νερού, τη θρεπτική κατάσταση των φυτών, την παρουσία εχθρών και ασθενειών, καθώς και τις συνολικές συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας (Pierce & Nowak, 1999).

Η αναφορά στη PA κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, καθώς οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων αποτελούν μία από τις τεχνολογίες συλλογής βιολογικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα συστήματα ψηφιακής φυτοπροστασίας. Μέσω της συνεχούς καταγραφής και μετάδοσης πληροφοριών για τους πληθυσμούς των εντόμων, οι ηλεκτρονικές παγίδες λειτουργούν ως αισθητήρες πεδίου, παρέχοντας δεδομένα που μπορούν να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές PA και υποστήριξης λήψης αποφάσεων.

Η αρχή της PA στηρίζεται επομένως στη διαχείριση της ενδοαγροτικής μεταβλητότητας (within- field variability), Μέσω της εφαρμογής καλλιεργητικών παρεμβάσεων προσαρμοσμένων στις πραγματικές ανάγκες κάθε περιοχής του αγρού. Η προσέγγιση αυτή επιδιώκει τη βελτίωση της παραγωγικότητας, τη μείωση του κόστους παραγωγής και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, μέσω της στοχευμένης εφαρμογής εισροών, όπως το νερό άρδευσης, τα λιπάσματα και τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα (Gebbers & Adamchuk, 2010). Ως αποτέλεσμα, η λήψη αποφάσεων μετατοπίζεται από τη γενικευμένη διαχείριση σε περισσότερο εξατομικευμένες και δεδομενοκεντρικές πρακτικές καλλιέργειας.

Συνδέεται άμεσα με την πρόοδο ψηφιακών και γεωχωρικών τεχνολογιών που κατέστησαν δυνατή τη συλλογή και επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων πεδίου. Η ενσωμάτωση συστημάτων παγκόσμιου εντοπισμού θέσης (GPS), γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS), αισθητήρων πεδίου, τηλεπισκοπικών τεχνολογιών και ασύρματων δικτύων επικοινωνίας επέτρεψε τη συνεχή παρακολούθηση των καλλιεργειών και τη χαρτογράφηση της χωρικής μεταβλητότητας των αγροοικοσυστημάτων (Zhang et al., 2002). Οι τεχνολογίες αυτές παρέχουν τη δυνατότητα συλλογής πληροφοριών υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για την υποστήριξη καλλιεργητικών αποφάσεων σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη σύγχρονη PA διαδραματίζουν οι τεχνολογίες τηλεπισκόπησης και απομακρυσμένης παρακολούθησης. Η χρήση δορυφορικών εικόνων, μη επανδρωμένων αεροσκαφών (Unmanned Aerial Vehicles- UAVs) και πολυφασματικών αισθητήρων επιτρέπει την εκτίμηση παραμέτρων που σχετίζονται με τη φυσιολογική κατάσταση

των φυτών, όπως φυλλική επιφάνεια, η περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, η υδατική καταπόνηση και η παρουσία βιοτικών ή αβιοτικών στρεσογόνων παραγόντων (Mulla, 2013). Μέσω της ανάλυσης των δεδομένων αυτών καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός χωρικών προτύπων μεταβλητότητας και η εφαρμογή περισσότερο στοχευμένων πρακτικών διαχείρισης.

Παράλληλα, η ανάπτυξη δικτυωμένων συστημάτων αισθητήρων και τεχνολογιών IoT έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες συνεχούς παρακολούθησης των αγροοικοσυστημάτων. Αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, εδαφικής αγωγιμότητας και άλλων περιβαλλοντικών παραμέτρων μπορούν πλέον να λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας συνεχή ροή δεδομένων προς ψηφιακές πλατφόρμες διαχείρισης καλλιεργειών (Wolfert et al., 2017). Η εξέλιξη αυτή συνέβαλε στη σταδιακή μετάβαση από τη συμβατική γεωργία σε περισσότερο αυτοματοποιημένα και δεδομενοκεντρικά συστήματα παραγωγής, στα οποία η διαχείριση βασίζεται αρκετά στην ανάλυση ψηφιακών πληροφοριών και στη δυναμική υποστήριξη λήψης αποφάσεων.

Στην ίδια κατηγορία συστημάτων πεδίου εντάσσονται και οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων, οι οποίες λειτουργούν ως βιολογικοί αισθητήρες καταγράφοντας πληροφορίες σχετικά με την παρουσία, την αφθονία και τη χρονική δραστηριότητα των εντόμων- στόχων. Σε αντίθεση με τους περιβαλλοντικούς αισθητήρες, οι οποίοι καταγράφουν φυσικές παραμέτρους του αγροοικοσυστήματος, οι ηλεκτρονικές παγίδες παρέχουν άμεσες πληροφορίες για έναν από τους σημαντικότερους βιοτικούς παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή, δηλαδή τους πληθυσμούς των εχθρών των καλλιεργειών.

Η εφαρμογή της PA παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο σε οικονομικό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο. Η βελτιστοποίηση της χρήσης εισροών μπορεί να συμβάλλει στη μείωση του κόστους παραγωγής, στον περιορισμό απωλειών θρεπτικών στοιχείων και φυτοπροστατευτικών ουσιών προς το περιβάλλον και στη βελτίωση της αποδοτικότητας των καλλιεργητικών πρακτικών. Η στοχευμένη εφαρμογή παρεμβάσεων ενισχύει τη βιωσιμότητα των αγροτικών συστημάτων και συνδέεται άμεσα με τις σύγχρονες στρατηγικές βιώσιμης γεωργίας και περιβαλλοντικής διαχείρισης (Gebbers & Adamchuk, 2010).

Η PA συνοδεύεται και από σημαντικές τεχνολογικές, οικονομικές και επιχειρησιακές προκλήσεις. Η ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού, η πολυπλοκότητα διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων, η ανάγκη διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών ψηφιακών συστημάτων,

καθώς και το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης αποτελούν σημαντικούς περιοριστικούς παράγοντες, ιδιαίτερα για μικρές γεωργικές εκμεταλλεύσεις (Robert, 2002). Η αποτελεσματική αξιοποίηση των παραγόμενων δεδομένων προϋποθέτει εξειδικευμένη γνώση και κατάλληλη επιστημονική ερμηνεία, ώστε οι πληροφορίες να μπορούν να μετατραπούν σε αξιόπιστες καλλιεργητικές αποφάσεις.

Η ΡΑ έχει μεταβάλει ουσιαστικά τον τρόπο διαχείρισης των καλλιεργειών, επιτρέποντας τη λήψη αποφάσεων που βασίζονται σε δεδομένα πεδίου υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης, στα οποία εντάσσονται και οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων. Οι ηλεκτρονικές παγίδες δεν αποτελούν απλώς μέσα παρακολούθησης εντόμων, αλλά τμήμα ενός ευρύτερου ψηφιακού οικοσυστήματος συλλογής και αξιοποίησης δεδομένων, το οποίο υποστηρίζει την εφαρμογή στοχευμένων και δεδομενοκεντρικών πρακτικών φυτοπροστασίας.

2.4.2. Ψηφιακές Τεχνολογίες και Συστήματα Συλλογής Δεδομένων στη Γεωργία Ακριβείας

Η αποτελεσματική εφαρμογή της ΡΑ βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη δυνατότητα συστηματικής συλλογής, αποθήκευσης και ανάλυσης δεδομένων που περιγράφουν τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα των αγροοικοσυστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό, η ανάπτυξη ψηφιακών τεχνολογιών και αυτοματοποιημένων συστημάτων καταγραφής έχει διαμορφώσει ένα νέο μοντέλο γεωργικής διαχείρισης στο οποίο οι αποφάσεις δεν βασίζονται αποκλειστικά στην εμπειρική παρατήρηση, αλλά στην αξιοποίηση δεδομένων υψηλής ακρίβειας και συχνότητας καταγραφής (Zhang et al., 2002).

Οι ηλεκτρονικές παγίδες αποτελούν παράδειγμα εφαρμογής της λογικής αυτής, καθώς συνδυάζουν αισθητήρες, συστήματα επικοινωνίας και ψηφιακές πλατφόρμες για τη συνεχή συλλογή εντομολογικών δεδομένων. Οι πληροφορίες που παράγονται μπορούν να αποστέλλονται αυτόματα σε υπολογιστικά συστήματα, να συσχετίζονται με μετεωρολογικά ή γεωχωρικά δεδομένα και να αξιοποιούνται για την υποστήριξη αποφάσεων φυτοπροστασίας σε πραγματικό χρόνο.

Κεντρικό ρόλο στα συστήματα αυτά διαδραματίζουν οι αισθητήρες πεδίου, οι οποίοι επιτρέπουν τη συνεχή ή περιοδική παρακολούθηση περιβαλλοντικών και καλλιεργητικών παραμέτρων. Οι αισθητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για την καταγραφή μεταβλητών εδάφους, η

ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών και τη δυναμική των αγροοικοσυστημάτων (Aubert et al., 2012). Η συνεχής καταγραφή των δεδομένων αυτών επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των τοπικών συνθηκών του αγρού και διευκολύνει την ανάπτυξη στοχευμένων πρακτικών διαχείρισης.

Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι τεχνολογίες τηλεπισκόπησης, οι οποίες επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων χωρίς άμεση επαφή με την καλλιέργεια. Η αξιοποίηση δορυφορικών εικόνων, πολυφασματικών καμερών και μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs ή Drones) παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης φυσιολογικών και βιοφυσικών χαρακτηριστικών των φυτών σε μεγάλη κλίμακα. Μέσω της ανάλυσης φασματικών δεικτών, όπως ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Διαφοράς Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index- NDVI), μπορούν να εντοπιστούν σε περιοχές με διαφοροποιημένη βλαστική ανάπτυξη, υδατική καταπόνηση ή πιθανή παρουσία βιοτικών και αβιοτικών στρεσογόνων παραγόντων (Mulla, 2013).

Η ανάπτυξη ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks- WSNs) έχει ενισχύσει περαιτέρω τις δυνατότητες παρακολούθησης των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο. Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από πολλαπλούς αισθητήρες εγκατεστημένους σε διαφορετικά σημεία του αγρού, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους και μεταδίδουν δεδομένα σε κεντρικά συστήματα αποθήκευσης και ανάλυσης. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη συνεχή συλλογή χωρικά κατανομημένων πληροφοριών και διευκολύνει την παρακολούθηση της ετερογένειας των καλλιεργητικών συνθηκών σε επίπεδο αγρού (Ojha et al., 2015).

Η σημασία της χωρικής ανάλυσης των δεδομένων παρακολούθησης έχει αναδειχθεί και σε εφαρμογές που αξιοποιούν γεωστατικές μεθόδους για τη μελέτη της κατανομής των πληθυσμών των εντόμων. Οι Castrignanò et al., 2012 εξετάζοντας τη χωροχρονική δυναμική των πληθυσμών του δάκου της ελιάς, έδειξαν ότι τα δεδομένα παγίδευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό ζωνών παρακολούθησης και τη χαρτογράφηση της χωρικής μεταβλητότητας των προσβολών. Τα αποτελέσματα της μελέτης ανέδειξαν τη σημασία της γεωγραφικής διάστασης στην παρακολούθηση των εντομολογικών πληθυσμών και υποστήριξαν την ανάπτυξη περισσότερο στοχευμένων στρατηγικών διαχείρισης, σύμφωνα με τις αρχές της ΠΑ.

Η μετάδοση και επεξεργασία των δεδομένων υποστηρίζεται πλέον σε μεγάλο βαθμό από τεχνολογίες IoT και υπολογιστικών νεφών. Οι υποδομές αυτές επιτρέπουν τη διασύνδεση

αισθητήρων, γεωργικών μηχανημάτων και ψηφιακών πλατφορμών σε ενιαία πληροφοριακά συστήματα, στα οποία τα δεδομένα συλλέγονται, οργανώνονται και αναλύονται σχεδόν σε πραγματικό χρόνο (Wolfert et al., 2017). Μέσω της διαδικασίας αυτής οι πληροφορίες μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων ειδοποιήσεων, τη δημιουργία χαρτών μεταβλητότητας και την υποστήριξη καλλιεργητικών αποφάσεων με μεγαλύτερη χωρική και χρονική ακρίβεια.

Σημαντική εξέλιξη στη σύγχρονη ΡΑ αποτελεί επίσης η ενσωμάτωση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στην επεξεργασία γεωργικών δεδομένων. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν στην ανάλυση σύνθετων συνόλων πληροφοριών και την αναγνώριση προτύπων που σχετίζονται με τη φυτική ανάπτυξη, την εμφάνιση ασθενειών, τις συνθήκες στρες και τη δυναμική επιβλαβών οργανισμών (Liakos et al., 2018). Η αξιοποίηση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης συμβάλλει επομένως στη μετάβαση προς περισσότερο προγνωστικά και αυτοματοποιημένα συστήματα γεωργικής διαχείρισης.

Η ανάπτυξη ψηφιακών πλατφορμών διαχείρισης γεωργικών δεδομένων έχει καταστήσει δυνατή τη συγκέντρωση πληροφοριών από πολλαπλές πηγές σε ενιαία περιβάλλοντα λογισμικού. Στις πλατφόρμες αυτές μπορούν να ενσωματώνονται δεδομένα αισθητήρων, δορυφορικές εικόνες, μετεωρολογικές πληροφορίες και στοιχεία πεδίου, επιτρέποντας τη συνδυαστική αξιολόγηση διαφορετικών παραμέτρων που επηρεάζουν την παραγωγή (Aubert et al., 2012). Η συγκεντρωτική αυτή διαχείριση πληροφοριών ενισχύει σημαντικά τις δυνατότητες λήψης αποφάσεων στη σύγχρονη ψηφιακή γεωργία.

Η συνεχής εξέλιξη των ψηφιακών τεχνολογιών μεταβάλλει ουσιαστικά τον τρόπο παρακολούθησης και διαχείρισης των αγροοικοσυστημάτων, δημιουργώντας τις απαραίτητες υποδομές για την εφαρμογή περισσότερο εξειδικευμένων συστημάτων φυτοπροστασίας ακριβείας. Στο πλαίσιο αυτό, οι τεχνολογίες παρακολούθησης εντόμων και οι ηλεκτρονικές παγίδες εντάσσονται σταδιακά σε ολοκληρωμένα ψηφιακά περιβάλλοντα συλλογής και αξιοποίησης δεδομένων, τα οποία υποστηρίζουν τη στοχευμένη και δυναμικά προσαρμοζόμενη διαχείριση των καλλιεργειών.

2.4.3. Η Θέση της Φυτοπροστασίας στη Γεωργία Ακριβείας

Η φυτοπροστασία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς εφαρμογής της ΡΑ, καθώς η αποτελεσματική διαχείριση των εχθρών, των ασθενειών και των ζιζανίων επηρεάζει άμεσα τόσο την παραγωγικότητα όσο και τη βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων. Στα συμβατικά συστήματα παραγωγής, οι παρεμβάσεις φυτοπροστασίας βασίζονταν συχνά σε γενικευμένες ή προληπτικές εφαρμογές φυτοπροστατευτικών προϊόντων, χωρίς να λαμβάνονται επαρκώς υπόψη οι χωρικές διαφοροποιήσεις του αγρού ή η πραγματική ένταση των προσβολών. Η πρακτική αυτή συνδέθηκε με αυξημένο κόστος παραγωγής, ανάπτυξη ανθεκτικότητας των επιβλαβών οργανισμών και σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Peshin & Dhawan, 2009).

Η ανάπτυξη της ΡΑ επέτρεψε τη σταδιακή μετάβαση προς περισσότερο στοχευμένες και δεδομενοκεντρικές πρακτικές φυτοπροστασίας, στις οποίες οι αποφάσεις βασίζονται σε πραγματικές πληροφορίες πεδίου και όχι αποκλειστικά σε προληπτικά σχήματα εφαρμογών. Στο πλαίσιο αυτό, η συλλογή δεδομένων υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική για την έγκαιρη αναγνώριση πληθυσμιακών μεταβολών και την εκτίμηση του κινδύνου προσβολών σε επίπεδο αφρού ή καλλιεργητικής ζώνης (Bongiovanni & Lowenberg-Deboer, 2004)

Η ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών στη φυτοπροστασία επιτρέπει την ανάπτυξη συστημάτων επιτήρησης που βασίζονται στη συνεχή παρακολούθηση περιβαλλοντικών και βιολογικών παραμέτρων. Δεδομένα που αφορούν τις κλιματικές συνθήκες, την υγρασία του φυλλώματος, τη θερμοκρασία, τη βλαστική ανάπτυξη και τη δραστηριότητα των επιβλαβών οργανισμών μπορούν να αξιοποιηθούν για την εκτίμηση του κινδύνου εμφάνισης προσβολών και την υποστήριξη περισσότερο ακριβών και χρονικά στοχευμένων επεμβάσεων (Mahlein, 2016). Ως αποτέλεσμα, η φυτοπροστασία μετατοπίζεται σταδιακά από γενικευμένες εφαρμογές ευρείας κλίμακας προς περισσότερο εξειδικευμένες πρακτικές διαχείρισης.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή των γεωχωρικών τεχνολογιών στη χαρτογράφηση της χωρικής κατανομής των προσβολών και της μεταβλητότητας των πληθυσμών των επιβλαβών οργανισμών. Η χρήση GIS, τηλεσκοπικών δεδομένων και αισθητήρων πεδίου επιτρέπει τον εντοπισμό περιοχών αυξημένης πίεσης προσβολών και διευκολύνει την εφαρμογή διαφοροποιημένων πρακτικών διαχείρισης εντός ου ίδιου αγρού (Zhang et al., 2002). Η δυνατότητα αυτή αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της φυτοπροστασίας ακριβείας, καθώς επιτρέπει την εφαρμογή παρεμβάσεων μόνο όπου και όταν απαιτείται.

Η πρόοδος των τεχνολογιών αυτοματισμού και τηλεμετρίας συνέβαλε στην ανάπτυξη δυναμικών συστημάτων παρακολούθησης, τα οποία μπορούν να λειτουργούν σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η διασύνδεση αισθητήρων, μετεωρολογικών σταθμών και συστημάτων συλλογής δεδομένων με ψηφιακές πλατφόρμες ανάλυσης δημιουργεί νέες δυνατότητες για τη συνεχή επιτήρηση των καλλιεργειών και την υποστήριξη λήψης αποφάσεων στη φυτοπροστασία (Wolfert et al., 2017). Η αξιοποίηση των πληροφοριών αυτών επιτρέπει την ανάπτυξη περισσότερο δυναμικών και προσαρμοζόμενων στρατηγικών διαχείρισης των εχθρών και των ασθενειών.

Η μετάβαση προς περισσότερο στοχευμένες πραγματικές φυτοπροστασίες συνδέεται επίσης με τις σύγχρονες απαιτήσεις βιώσιμης γεωργικής παραγωγής και περιβαλλοντικής προστασίας. Η μείωση της αλόγιστης χρήσης φυτοπροστατευτικών προϊόντων, ο περιορισμός των απωλειών προς το περιβάλλον και η βελτίωση της αποδοτικότητας των εφαρμογών αποτελούν βασικούς στόχους των στρατηγικών βιώσιμης γεωργίας που προωθούνται διεθνώς και η βελτίωση της αποδοτικότητας των εφαρμογών αποτελούν βασικούς στόχους των στρατηγικών βιώσιμης γεωργίας που προωθούνται διεθνώς και ιδιαίτερα στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής γεωργικής πολιτικής (European Commission, 2020). Στο περιβάλλον αυτό, η φυτοπροστασία ακριβείας αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία ως προσέγγιση που επιδιώκει τη συνδυαστική αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών, δεδομένων πεδίου και αυτοματοποιημένων συστημάτων παρακολούθησης.

Κατά αυτόν τον τρόπο, οι τεχνολογίες παρακολούθησης και ιδιαίτερα οι ηλεκτρονικές παγίδες αποκτούν σημαντικό ρόλο ως συστήματα συλλογής βιολογικών δεδομένων υψηλής χρονικής και χωρικής ανάλυσης. Η δυνατότητα συνεχούς καταγραφής της δραστηριότητας των εντόμων και ενσωμάτωσης των πληροφοριών αυτών σε ψηφιακά συστήματα διαχείρισης δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη περισσότερο ευφυών και στοχευμένων στρατηγικών φυτοπροστασίας, οι οποίες εξετάζονται αναλυτικότερα στην επόμενη ενότητα.

Η πρακτική εφαρμογή των συστημάτων υποστήριξης λήψης αποφάσεων έχει ήδη αξιολογηθεί σε διαφορετικά εντομολογικά συστήματα, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες αξιοποίησης των δεδομένων παρακολούθησης στη φυτοπροστασία. Οι Nestel et al., (2019) ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση της αιθιοπική μύγα των φρούτων σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες, συνδυάζοντας δεδομένα παρακολούθησης του εντόμου με πληροφορίες σχετικές με το περιβάλλον και τη βιολογία του

είδους. Αντίστοιχα οι Ioannou et al., (2019) αξιολόγησαν ένα χωρικό σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη μύγα της κερασιάς σε εμπορικούς οπωρώνες κερασιάς, δείχνοντας ότι η αξιοποίηση δεδομένων παρακολούθησης και προγνωστικών μοντέλων μπορεί να υποστηρίξει περισσότερο στοχευμένες στρατηγικές διαχείρισης. Παράλληλα, οι Diller et al., (2023) έδειξαν ότι τα σύγχρονα συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης και ανάλυσης εικόνας μπορούν να υποστηρίξουν την έγκαιρη ανίχνευση και συνεχή επιτήρηση σημαντικών ειδών μυγών των φρούτων. Οι μελέτες αυτές καταδεικνύουν ότι τα δεδομένα που συλλέγονται από σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης μπορούν να αξιοποιηθούν όχι μόνο για την καταγραφή της παρουσίας των εντόμων αλλά και για την ανάπτυξη συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων που συμβάλλουν στην εφαρμογή περισσότερο στοχευμένων και αποτελεσματικών στρατηγικών φυτοπροστασίας.

Η ΡΑ παρέχει το τεχνολογικό και λειτουργικό πλαίσιο μέσα στο οποίο αναπτύσσονται και αξιοποιούνται οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων και για τον λόγο αυτό θεωρούνται πλέον βασικό συστατικό των εφαρμογών ΡΑ και των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων στη φυτοπροστασία.

2.5. Φυτοπροστασία Ακριβείας και Ηλεκτρονικές Παγίδες

2.5.1. Η Έννοια της Φυτοπροστασίας Ακριβείας

Η φυτοπροστασία ακριβείας (Precision Crop Protection) αποτελεί εξειδικευμένο πεδίο της ΡΑ, το οποίο επικεντρώνεται στη στοχευμένη και δεδομενοκεντρική διαχείριση των επιβλαβών οργανισμών των καλλιεργειών. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη συλλογή και αξιοποίηση πληροφοριών υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης με σκοπό την ακριβέστερη εκτίμηση του κινδύνου προσβολών και τη βελτιστοποίηση των επεμβάσεων φυτοπροστασίας. Σε αντίθεση με τις συμβατικές πρακτικές γενικευμένης εφαρμογής φυτοπροστατευτικών προϊόντων, η PCP επιδιώκει την εφαρμογή παρεμβάσεων μόνο όπου, όταν και στον βαθμό που απαιτείται, με βάση τις πραγματικές συνθήκες του αγρού (Stafford, 2000).

Η ανάπτυξη της προσέγγισης αυτής συνδέεται άμεσα με την αυξανόμενη ανάγκη περιορισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της γεωργικής παραγωγής και με τη βελτίωση της αποδοτικότητας των πρακτικών φυτοπροστασίας. Η υπερβολική ή μη στοχευμένη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων συνδέεται με σημαντικά προβλήματα, όπως η ανάπτυξη

ανθεκτικότητας των επιβλαβών οργανισμών, η επιβάρυνση εδαφικών και υδάτινων πόρων και οι επιπτώσεις στη μη στοχευμένη πανίδα και στη βιοποικιλότητα (Peshin & Dhawan, 2009). Ως αποτέλεσμα, η σύγχρονη φυτοπροστασία μετατοπίζεται σταδιακά προς περισσότερο βιώσιμα και τεχνολογικά υποστηριζόμενα μοντέλα διαχείρισης.

Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της PCP αποτελεί η δυνατότητα έγκαιρης και αξιόπιστης παρακολούθησης των πληθυσμών και επιβλαβών οργανισμών. Η συνεχής συλλογή πληροφοριών σχετικά με την παρουσία, τη δραστηριότητα και τη χωρική κατανομή των εχθρών επιτρέπει την ακριβέστερη εκτίμηση της έντασης των προσβολών και τη λήψη περισσότερο τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με την αναγκαιότητα και τον χρόνο εφαρμογής μέτρων αντιμετώπισης (Pedigo & Rice, 2009). Η παρακολούθηση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε καλλιεργητικά συστήματα υψηλής εντατικοποίησης, όπου ακόμη και μικρές καθυστερήσεις στην αναγνώριση προσβολών μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές οικονομικές απώλειες.

Οι ψηφιακές τεχνολογίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη σύγχρονη φυτοπροστασία. Η αξιοποίηση αισθητήρων πεδίου, τηλεπισκοπικών δεδομένων, GIS, ασύρματων δικτύων επικοινωνίας και αυτοματοποιημένων συστημάτων καταγραφής επιτρέπει τη δημιουργία ολοκληρωμένων υποδομών επισκόπησης των καλλιεργειών (Mahlein, 2016). Μέσω της συνεχούς ροής πληροφοριών, οι παραγωγοί και οι γεωπόνοι μπορούν να αξιολογούν δυναμικά την κατάσταση των καλλιεργειών και να εφαρμόζουν περισσότερο στοχευμένες στρατηγικές διαχείρισης.

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει επίσης η ανάπτυξη συστημάτων μεταβλητής εφαρμογής εισροών (Variable Rate Technology- VRT), τα οποία επιτρέπουν τη διαφοροποιημένη εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων ανάλογα με τις τοπικές ανάγκες κάθε περιοχής του αγρού. Η δυνατότητα αυτή βασίζεται στη χαρτογράφηση της χωρικής μεταβλητότητας των προσβολών και στη χρήση ψηφιακών χαρτών εφαρμογής, οι οποίοι καθοδηγούν τον εξοπλισμό ψεκασμού με μεγαλύτερη ακρίβεια (Zhang et al., 2002). Ως αποτέλεσμα, μειώνεται η κατανάλωση φυτοπροστατευτικών προϊόντων και βελτιώνεται η αποδοτικότητα των εφαρμογών.

Επιπρόσθετα, η πρόοδος της τεχνητής νοημοσύνης και των αλγόριθμων μηχανικής μάθησης ενισχύει σημαντικά τις δυνατότητες PCP. Η ανάλυση μεγάλου όγκου γεωργικών δεδομένων επιτρέπει την ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων που μπορούν να υποστηρίξουν την έγκαιρη εκτίμηση του κινδύνου εμφάνισης προσβολών ή την αναγνώριση προτύπων που σχετίζονται με

τη δραστηριότητα επιβλαβών οργανισμών (Liakos et al., 2018). Η εξέλιξη αυτή συμβάλλει στη σταδιακή μετάβαση από περισσότερο αντιδραστικές πρακτικές διαχείρισης προς περισσότερο προγνωστικές και δυναμικά προσαρμοζόμενες στρατηγικές φυτοπροστασίας.

Στο σύγχρονο αυτό τεχνολογικό περιβάλλον, οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων αποκτούν ιδιαίτερη σημασία ως συστήματα αυτοματοποιημένης συλλογής βιολογικών δεδομένων πεδίου. Η δυνατότητα συνεχούς καταγραφής της δραστηριότητας των εντόμων και απομακρυσμένης μετάδοσης πληροφοριών επιτρέπει την ενσωμάτωση δεδομένων παρακολούθησης σε ψηφιακά συστήματα PCP, συμβάλλοντας στη βελτίωση επιτήρησης και της λήψης αποφάσεων στη σύγχρονη γεωργική παραγωγή.

2.5.2. Ηλεκτρονικές Παγίδες ως Συστήματα Συλλογής Δεδομένων στη Φυτοπροστασία

Οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα συστήματα συλλογής βιολογικών δεδομένων στη σύγχρονη PCP, καθώς επιτρέπουν τη συνεχή και αυτοματοποιημένη παρακολούθηση της δραστηριότητας των επιβλαβών οργανισμών σε πραγματικές συνθήκες αγρού. Σε αντίθεση με τις συμβατικές παγίδες τα ηλεκτρονικά συστήματα παρέχουν τη δυνατότητα συνεχούς συλλογής και απομακρυσμένης μετάδοσης πληροφοριών, ενισχύοντας σημαντικά τη χρονική ακρίβεια της παρακολούθησης (Lima et al., 2020).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η λειτουργία των ηλεκτρονικών παγίδων βασίζεται στη χρήση αισθητήρων και ψηφιακών τεχνολογιών καταγραφής. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε καλλιεργητικά συστήματα όπου οι πληθυσμιακές μεταβολές μπορεί να εμφανίζονται ταχύτατα και να απαιτούν άμεση διαχειριστική απόκριση. Καθώς η εγκατάσταση πολλαπλών παγίδων σε διαφορετικά σημεία μιας καλλιέργειας καθιστά δυνατή τη χαρτογράφηση της χωρικής μεταβλητότητας των πληθυσμών των επιβλαβών οργανισμών και τον εντοπισμό περιοχών αυξημένης πίεσης προσβολών (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004). Η χωρική αυτή διάσταση της παρακολούθησης αποτελεί βασικό στοιχείο της PCP, καθώς επιτρέπει τη διαφοροποιημένη εφαρμογή μέτρων διαχείρισης ανάλογα με τις πραγματικές συνθήκες κάθε περιοχής του αγρού.

Συνολικά, οι ηλεκτρονικές παγίδες αποτελούν βασικές υποδομές συλλογής βιολογικών δεδομένων στην PCR, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα συνεχούς, χωρικά κατανεμημένης και αυτοματοποιημένης παρακολούθησης των πληθυσμών των εντόμων. Η ενσωμάτωσή τους σε ψηφιακά συστήματα διαχείρισης καλλιεργειών δημιουργεί τις προϋποθέσεις για περισσότερο στοχευμένες, δυναμικές και τεχνολογικά υποστηριζόμενες στρατηγικές φυτοπροστασίας.

2.5.3. Διασύνδεση Ηλεκτρονικών Παγίδων με Ψηφιακά Συστήματα Φυτοπροστασίας

Η αποτελεσματικότητα της PA εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό όχι μόνο από τη συλλογή δεδομένων πεδίου, αλλά και από τη δυνατότητα ενσωμάτωσης και αξιοποίησης των πληροφοριών αυτών σε ολοκληρωμένα ψηφιακά συστήματα διαχείρισης. Στο πλαίσιο αυτό, οι ηλεκτρονικές παγίδες δεν λειτουργούν πλέον αποκλειστικά ως αυτόνομα μέσα παρακολούθησης εντόμων, αλλά ως τμήματα ευρύτερων ψηφιακών υποδομών επιτήρησης και υποστήριξης λήψης αποφάσεων στη φυτοπροστασία (Wolfert et. al., 2017).

Η διασύνδεση των ηλεκτρονικών παγίδων με ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας και πλατφόρμες τηλεμετρίας επιτρέπει τη συνεχή μεταφορά δεδομένων από το πεδίο προς κεντρικά πληροφοριακά συστήματα. Οι πληροφορίες που συλλέγονται μπορούν να περιλαμβάνουν αριθμό συλλήψεων, εικόνες εντόμων, δεδομένα δραστηριότητας, γεωγραφικές συντεταγμένες και περιβαλλοντικές μεταβλητές, όπως θερμοκρασία και σχετική υγρασία (Sciarretta & Calabrese, 2019). Η συγκέντρωση των δεδομένων αυτών σε ενιαίες ψηφιακές πλατφόρμες διευκολύνει την ταυτόχρονη αξιολόγηση πολλαπλών παραμέτρων που επηρεάζουν την εξέλιξη των πληθυσμών των επιβλαβών οργανισμών.

Σημαντική εξέλιξη στη σύγχρονη ψηφιακή φυτοπροστασία αποτελεί η ανάπτυξη συστημάτων υποστήριξης λήψης αποφάσεων (Decision Support Systems- DSS), τα οποία αξιοποιούν δεδομένα από ηλεκτρονικές παγίδες, μετεωρολογικούς σταθμούς και άλλους αισθητήρες πεδίου για την εκτίμηση του κινδύνου προσβολών και την υποστήριξη καλλιεργητικών αποφάσεων. Τα συστήματα αυτά μπορούν να συσχετίζουν τη δραστηριότητα των εντόμων με περιβαλλοντικές παραμέτρους και βιολογικά μοντέλα ανάπτυξης, παρέχοντας ειδοποιήσεις ή συστάσεις σχετικά με τον βέλτιστο χρόνο εφαρμογής μέτρων φυτοπροστασίας (Jones et al., 2010). Η αξιοποίηση τέτοιων υποδομών ενισχύει τη μετάβαση προς περισσότερο προγνωστικές και δυναμικά προσαρμοζόμενες στρατηγικές διαχείρισης.

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών IoT επιτρέπει τη δημιουργία δικτυωμένων συστημάτων παρακολούθησης μεγάλης χωρικής κλίμακας. Στα συστήματα αυτά, πολλαπλές ηλεκτρονικές παγίδες εγκαθίστανται σε διαφορετικά σημεία μιας καλλιέργειας ή μιας ευρύτερης γεωγραφικής περιοχής και λειτουργούν ως κόμβοι συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η προσέγγιση αυτή διευκολύνει τη χαρτογράφηση της χωρικής εξάπλωσης των πληθυσμών και υποστηρίζει την ανάπτυξη περισσότερο στοχευμένων στρατηγικών διαχείρισης ανάλογα με τη γεωγραφική κατανομή των προσβολών (Ojha et al., 2015).

Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων ψηφιακών υποδομών αποτελούν εμπορικά συστήματα ηλεκτρονικής παρακολούθησης, όπως θα αναφερθεί σε παρακάτω κεφάλαιο. Οι πλατφόρμες αυτές συνδυάζουν ηλεκτρονικές παγίδες, τηλεμετρικά δίκτυα και λογισμικά ανάλυσης δεδομένων για την παρακολούθηση εντομολογικών πληθυσμών σε δενδροκομικές και αμπελουργικές καλλιέργειες. Η ανάπτυξη αντίστοιχων πλατφορμών καταδεικνύει τη σταδιακή ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών παγίδων σε περισσότερο ολοκληρωμένα ψηφιακά οικοσυστήματα γεωργικής διαχείρισης.

Η διασύνδεση των ηλεκτρονικών παγίδων με ψηφιακά συστήματα δημιουργεί επίσης σημαντικές δυνατότητες για την εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης και ανάλυσης μεγάλων όγκων δεδομένων (big data analysis). Η συνεχής παραγωγή μεγάλου όγκου πληροφοριών από δίκτυα παγίδων επιτρέπει την αναγνώριση χωρικών και χρονικών προτύπων δραστηριότητας των εντόμων, καθώς και τη βελτίωση προγνωστικών μοντέλων φυτοπροστασίας μέσω αλγόριθμων μηχανικής μάθησης (Liakos et al., 2018).

Ακόμα, η δυνατότητα σύνδεσης των συστημάτων αυτών με τεχνολογίες μεταβλητής εφαρμογής εισροών (Variable Rate Technology- VRT) δημιουργεί προοπτικές για περισσότερο ακριβείς και τοπικά προσαρμοσμένες εφαρμογές φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Η χωρική πληροφορία που προέρχεται από δίκτυα ηλεκτρονικών παγίδων μπορεί να αξιοποιηθεί για τη δημιουργία χαρτών προσβολών και την εφαρμογή διαφοροποιημένων ψεκασμών ανάλογα με την ένταση της πίεσης των πληθυσμών σε διαφορετικές περιοχές του αγρού. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται η κατανάλωση εισροών και περιορίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των παρεμβάσεων.

3. ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΩΡΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΠΑΓΙΔΩΝ ΕΝΤΟΜΩΝ

3.1. Εισαγωγή στην Επιχειρησιακή Αξιολόγηση των Ηλεκτρονικών Παγίδων

Οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων έχουν αρχίσει τα τελευταία χρόνια να μεταβαίνουν από το στάδιο των ερευνητικών πρωτοτύπων και των πιλοτικών εφαρμογών σε περισσότερο οργανωμένα εμπορικά συστήματα παρακολούθησης πεδίου. Η εξέλιξη αυτή συνδέεται με τη γενικότερη ανάπτυξη της ψηφιακής γεωργίας και των τεχνολογιών αυτοματοποιημένης συλλογής δεδομένων, καθώς αρκετά συστήματα δεν περιορίζονται πλέον μόνο στην καταγραφή συλλήψεων, αλλά λειτουργούν ως ολοκληρωμένες πλατφόρμες απομακρυσμένης επιτήρησης και διαχείρισης πληροφοριών (Preti et al., 2021; Suto, 2022). Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη εμπορικών δικτύων τηλεμετρίας και cloud-based πλατφορμών έχει επιτρέψει τη διάθεση συστημάτων που μπορούν να λειτουργήσουν σε πραγματικές συνθήκες γεωργικής παραγωγής και όχι αποκλειστικά σε πειραματικό επίπεδο (Soussi et al., 2024).

Η μετάβαση αυτή καθιστά αναγκαία μια ευρύτερη επιχειρησιακή αξιολόγηση των ηλεκτρονικών παγίδων, η οποία δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην τεχνολογική τους λειτουργία. Παρότι η επιστημονική βιβλιογραφία έχει επικεντρωθεί κυρίως στην ακρίβεια ανίχνευσης, στην αυτοματοποίηση της συλλογής δεδομένων και στις δυνατότητες απομακρυσμένης παρακολούθησης, η πρακτική εφαρμογή των συστημάτων αυτών εξαρτάται επίσης από παράγοντες όπως η εμπορική διαθεσιμότητα, το κόστος απόκτησης, το λειτουργικό κόστος, οι απαιτήσεις συντήρησης και η συνολική αξιοπιστία λειτουργίας σε πραγματικές συνθήκες πεδίου (Preti et al., 2021). Ειδικότερα, η λειτουργία των ηλεκτρονικών παγίδων σε αγροτικά περιβάλλοντα επηρεάζεται συχνά από περιβαλλοντικές μεταβολές, προβλήματα συνδεσιμότητας, ενεργειακές απαιτήσεις και ανάγκες τεχνικής υποστήριξης, στοιχεία που επηρεάζουν ουσιαστικά τη δυνατότητα μακροχρόνιας εφαρμογής τους.

Η εμπορική ωριμότητα των διαθέσιμων συστημάτων παραμένει ανομοιογενής. Ορισμένες τεχνολογίες, κυρίως οι οπτικές παγίδες με κάμερα και διαδικτυακή διασύνδεση, έχουν ήδη εξελιχθεί σε ολοκληρωμένα εμπορικά προϊόντα με δυνατότητες τηλεμετρίας, cloud αποθήκευσης δεδομένων και αυτόματης αποστολής ειδοποιήσεων προς τους χρήστες (Suto,

2022). Αντίθετα, άλλες κατηγορίες ηλεκτρονικών παγίδων εξακολουθούν να βρίσκονται σε στάδιο πιλοτικών ή ερευνητικών εφαρμογών, με περιορισμένη εμπορική διάθεση και αυξημένες απαιτήσεις τεχνικής υποστήριξης. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση των ηλεκτρονικών παγίδων δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά στην επιστημονική αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών τους, αλλά πρέπει να εξετάζει και τον βαθμό επιχειρησιακής τους εφαρμοσιμότητας στη γεωργική πράξη.

Το κεφάλαιο εξετάζει τη διαθεσιμότητα των ηλεκτρονικών παγίδων στην αγορά, το κόστος απόκτησης και χρήσης, τις ανάγκες συντήρησης και τους βασικούς επιχειρησιακούς περιορισμούς που επηρεάζουν την εφαρμογή τους στη γεωργική πράξη.

3.2. Εμπορική Διαθεσιμότητα Ηλεκτρονικών Παγίδων

3.2.1. Μετάβαση από Ερευνητικά Πρωτότυπα σε Εμπορικά Συστήματα

Η υιοθέτηση των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων συνδέθηκε αρχικά με ερευνητικές προσπάθειες αυτοματοποίησης της συλλογής και διαχείρισης δεδομένων πεδίου, καθώς και με τη μείωση της ανάγκης για χειροκίνητη καταγραφή πληροφοριών. Τα πρώτα συστήματα ηλεκτρονικής παγίδευσης βασίζονταν κυρίως σε πειραματικές διατάξεις αισθητήρων ή φωτογραφικής καταγραφής, οι οποίες αναπτύσσονταν για ερευνητικούς σκοπούς και χρησιμοποιούνταν κυρίως σε εξειδικευμένες πειραματικές και γεωργικές εφαρμογές. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονταν από περιορισμένη αυτονομία λειτουργίας, αυξημένες απαιτήσεις τεχνικής υποστήριξης και μικρή δυνατότητα ευρείας επιχειρησιακής εφαρμογής σε πραγματικές συνθήκες αγρού (Potamitis et al., 2015).

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, η εξέλιξη των τεχνολογιών τηλεμετρίας, των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας και των cloud υποδομών διαχείρισης δεδομένων συνέβαλε σημαντικά στη σταδιακή μετάβαση από ερευνητικά πρωτότυπα σε περισσότερο ολοκληρωμένα εμπορικά συστήματα πεδίου. Η εξέλιξη αυτή συνδέεται άμεσα με την αυξανόμενη ανάπτυξη της ψηφιακής γεωργίας και των τεχνολογιών απομακρυσμένης διαχείρισης γεωργικών δεδομένων. Ως αποτέλεσμα, αρκετά συστήματα ηλεκτρονικής παγίδευσης άρχισαν να ενσωματώνουν δυνατότητες απομακρυσμένης μεταφοράς δεδομένων, διαδικτυακής πρόσβασης και αυτοματοποιημένης διαχείρισης πληροφοριών, επιτρέποντας τη χρήση τους πέρα από το καθαρά ερευνητικό επίπεδο (Suto, 2022).

Η εμπορική αξιοποίηση των ηλεκτρονικών παγίδων παρατηρείται κυρίως σε συστήματα οπτικής παρακολούθησης με κάμερα και απομακρυσμένη διαχείριση δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιούνται σε δενδροκομικές καλλιέργειες, αμπελώνες και θερμοκηπιακά περιβάλλοντα. Τα συστήματα αυτά συνοδεύονται συχνά από διαδικτυακές πλατφόρμες διαχείρισης δεδομένων, υπηρεσίες τηλεμετρίας και εφαρμογές απομακρυσμένης επιτήρησης, διευκολύνοντας την απομακρυσμένη διαχείριση, οργάνωση και αξιοποίηση των πληροφοριών πεδίου, καθώς και τη μείωση της ανάγκης συχνών επιτόπιων επισκέψεων. Η ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών παγίδων σε ευρύτερα ψηφιακά οικοσυστήματα γεωργικής διαχείρισης αντανakλά τη σταδιακή μετατροπή τους από εξειδικευμένα εργαλεία δειγματοληψίας σε συστήματα επιχειρησιακής υποστήριξης και ψηφιακής γεωργικής διαχείρισης (Preti et al., 2021).

Ταυτόχρονα, συνεχίζεται η διάδοση περισσότερο εξειδικευμένων ή πολυαισθητηριακών συστημάτων, τα οποία επιχειρούν να συνδυάσουν διαφορετικές τεχνολογικές λειτουργίες και υποδομές διαχείρισης δεδομένων. Αν και αρκετά από τα συστήματα αυτά παραμένουν σε πιλοτικό ή ημι-ερευνητικό στάδιο, η συνεχής πρόοδος στις τεχνολογίες αισθητήρων, στις υποδομές επικοινωνίας και στη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων έχει ενισχύσει σημαντικά τη δυνατότητα μελλοντικής εμπορικής αξιοποίησής τους (Potamitis et al., 2015).

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί, η εμπορική ωριμότητα των ηλεκτρονικών παγίδων παραμένει διαφοροποιημένη μεταξύ των επιμέρους τεχνολογικών κατηγοριών. Ορισμένα συστήματα έχουν ήδη εξελιχθεί σε πλήρως εμπορικές λύσεις με δυνατότητα μαζικής εφαρμογής, ενώ άλλα εξακολουθούν να βρίσκονται σε μεταβατικό στάδιο μεταξύ ερευνητικής ανάπτυξης και επιχειρησιακής αξιοποίησης. Η διαφοροποίηση αυτή σχετίζεται τόσο με την τεχνολογική πολυπλοκότητα των συστημάτων όσο και με ζητήματα κόστους, συντήρησης, ενεργειακών απαιτήσεων και αξιοπιστίας λειτουργίας σε πραγματικές συνθήκες πεδίου.

3.2.2. Εμπορικές Δυνατότητες και Ψηφιακές Υπηρεσίες των Ηλεκτρονικών Παγίδων

Η εμπορική ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων δεν περιορίζεται πλέον στην πώληση μιας μεμονωμένης συσκευής πεδίου, αλλά συνδέεται με την παροχή ολοκληρωμένων ψηφιακών υπηρεσιών. Τα σύγχρονα εμπορικά συστήματα βασίζονται συνήθως σε έναν συνδυασμό υλικού εξοπλισμού, λογισμικού, ασύρματης συνδεσιμότητας και διαδικτυακών υποδομών διαχείρισης δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό, η ηλεκτρονική παγίδα εντάσσεται σε ένα ευρύτερο ψηφιακό οικοσύστημα γεωργικής διαχείρισης, όπου η αξία του συστήματος δεν

προκύπτει μόνο από τη συσκευή, αλλά και από τις υπηρεσίες που τη συνοδεύουν (Khanna & Kaur, 2019).

Βασικό στοιχείο αυτών των συστημάτων αποτελεί η χρήση cloud υποδομών, μέσω των οποίων τα δεδομένα που συλλέγονται στο πεδίο αποθηκεύονται, οργανώνονται και καθίστανται προσβάσιμα στον χρήστη από απόσταση. Η λειτουργία αυτή επιτρέπει τη συγκεντρωτική διαχείριση πληροφοριών από διαφορετικά σημεία εγκατάστασης και μειώνει την εξάρτηση από χειροκίνητες διαδικασίες ανάκτησης δεδομένων. Στο πλαίσιο της ψηφιακής γεωργίας, η αποθήκευση και αξιοποίηση δεδομένων μέσω διαδικτυακών υποδομών θεωρείται βασικό στοιχείο για τη μετάβαση από μεμονωμένες τεχνολογικές εφαρμογές σε ολοκληρωμένα συστήματα λήψης και διαχείρισης πληροφοριών (Wolfert et al., 2017).

Οι εμπορικές πλατφόρμες συνοδεύονται συχνά από διαδικτυακά περιβάλλοντα διαχείρισης και εφαρμογές κινητών συσκευών. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν στον χρήστη να παρακολουθεί την κατάσταση του εξοπλισμού, να ελέγχει τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί, να οργανώνει ιστορικά αρχεία και να διαχειρίζεται πολλαπλές παγίδες από ένα ενιαίο περιβάλλον. Επομένως, η εμπορική αξία των ηλεκτρονικών παγίδων συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με την ευχρηστία των ψηφιακών διεπαφών και με τη δυνατότητα απλοποίησης της καθημερινής διαχείρισης του εξοπλισμού (Fuentes-Peñailillo et al., 2024).

Σημαντικό στοιχείο αποτελεί επίσης η τηλεμετρία και η ασύρματη μεταφορά δεδομένων, καθώς επιτρέπουν τη λειτουργία των συστημάτων χωρίς συνεχή φυσική παρουσία του χρήστη στο σημείο εγκατάστασης. Η μετάδοση δεδομένων μπορεί να πραγματοποιείται μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας, LoRaWAN ή άλλων ασύρματων τεχνολογιών, ανάλογα με τις διαθέσιμες υποδομές και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εγκατάστασης. Ωστόσο, η λειτουργικότητα αυτή εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα της συνδεσιμότητας, την ενεργειακή αυτονομία και τη σταθερότητα των δικτύων επικοινωνίας, παράγοντες που επηρεάζουν την επιχειρησιακή αξιοπιστία του συστήματος (Jawad et al., 2017).

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της εμπορικής διάθεσης των ηλεκτρονικών παγίδων είναι η μετάβαση από την απλή αγορά εξοπλισμού σε μοντέλα παροχής υπηρεσιών. Σε αρκετές περιπτώσεις, η χρήση του συστήματος συνοδεύεται από συνδρομητικές υπηρεσίες που περιλαμβάνουν πρόσβαση σε πλατφόρμες δεδομένων, τεχνική υποστήριξη, αποθήκευση πληροφοριών, αναβαθμίσεις λογισμικού και απομακρυσμένη διαχείριση του εξοπλισμού. Το μοντέλο αυτό αντανακλά τη γενικότερη τάση της ψηφιακής γεωργίας προς υπηρεσιοκεντρικά

σχήματα, στα οποία το κόστος δεν περιορίζεται στην αρχική αγορά, αλλά κατανέμεται και στη συνεχή χρήση της τεχνολογίας (Wolfert et al., 2017).

Επιπλέον, ορισμένες εμπορικές πλατφόρμες προσφέρουν δυνατότητες διαλειτουργικότητας με άλλα ψηφιακά συστήματα γεωργικής διαχείρισης. Η διασύνδεση μέσω API επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων με αγρομετεωρολογικούς σταθμούς, λογισμικά διαχείρισης εκμεταλλεύσεων ή ευρύτερες πλατφόρμες γεωργίας ακριβείας. Η δυνατότητα αυτή είναι σημαντική, καθώς ενισχύει την ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών παγίδων σε ευρύτερες πληροφοριακές υποδομές και μειώνει τον κίνδυνο λειτουργίας τους ως απομονωμένων τεχνολογικών εφαρμογών (Khanna & Kaur, 2019).



Εικόνα 3.1. Ενδεικτικό εμπορικό σύστημα ηλεκτρονικής παγίδευσης τύπου funnel με δυνατότητες τηλεμετρίας, ψηφιακής απεικόνισης και απομακρυσμένης παρακολούθησης πληθυσμών εντόμων σε συνθήκες αγρού. Πηγή: <https://trapview.com/>, με άδεια χρήσης από Klemen Zevnik.

3.2.3. Καλλιεργητικοί Τομείς Εμπορικής Εφαρμογής των Ηλεκτρονικών Παγίδων

Η εμπορική ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων δεν εμφανίζεται με τον ίδιο βαθμό έντασης σε όλα τα γεωργικά συστήματα παραγωγής. Αντίθετα, η μέχρι σήμερα επιχειρησιακή τους αξιοποίηση παρατηρείται κυρίως σε καλλιέργειες υψηλής οικονομικής αξίας, όπου το αυξημένο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας μπορεί να αντισταθμιστεί από τη μεγαλύτερη οικονομική σημασία της παραγωγής και από την ανάγκη εντατικότερων απαιτήσεων διαχείρισης της παραγωγής (Finger et al., 2019).

Ιδιαίτερα έντονη εμπορική εφαρμογή παρατηρείται στις δενδροκομικές καλλιέργειες, όπως τα μηλοειδή, τα πυρηνόκαρπα και οι αμπελώνες. Οι καλλιέργειες αυτές χαρακτηρίζονται συνήθως από υψηλή εμπορική αξία ανά μονάδα έκτασης, αυξημένες απαιτήσεις ποιοτικού ελέγχου και σημαντική οικονομική επιβάρυνση σε περιπτώσεις εκτεταμένων προσβολών. Ως αποτέλεσμα, η επένδυση σε ψηφιακά συστήματα γεωργικής διαχείρισης θεωρείται περισσότερο οικονομικά δικαιολογημένη συγκριτικά με άλλες εκτατικές καλλιέργειες χαμηλότερης προστιθέμενης αξίας (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

Σημαντική εμπορική διείσδυση παρουσιάζουν τα ηλεκτρονικά συστήματα παρακολούθησης και σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Τα περιβάλλοντα αυτά θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλα για την ανάπτυξη τεχνολογιών ψηφιακής επιτήρησης, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλή εντατικοποίηση παραγωγής, αυξημένες απαιτήσεις ελέγχου και περισσότερο σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας. Το υψηλό οικονομικό κόστος πιθανών προσβολών σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις καθιστά συχνά βιώσιμη την επένδυση σε αυτοματοποιημένα συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης δεδομένων (Verdouw et al., 2021).

Εμπορικές εφαρμογές ηλεκτρονικών παγίδων εμφανίζονται σε καλλιέργειες όπως η ελιά και τα εσπεριδοειδή, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη εξαγωγική δραστηριότητα και υψηλές απαιτήσεις φυτοϋγειονομικού ελέγχου. Στις περιπτώσεις αυτές, η συστηματική διαχείριση γεωργικών δεδομένων και ποιοτικών απαιτήσεων παραγωγής συνδέεται όχι μόνο με τη μείωση των απωλειών παραγωγής αλλά και με τη διατήρηση της ποιότητας και της εμπορικής αξίας των παραγόμενων προϊόντων (Ayaz et al., 2019).

Η εφαρμογή ηλεκτρονικών παγίδων παραμένει περισσότερο περιορισμένη σε εκτατικές καλλιέργειες μεγάλης κλίμακας, όπως τα δημητριακά ή οι αροτραίες καλλιέργειες. Η περιορισμένη αυτή διείσδυση σχετίζεται κυρίως με ζητήματα οικονομικής βιωσιμότητας, καθώς το υψηλότερο κόστος εξοπλισμού και συντήρησης των συστημάτων είναι συχνά δυσκολότερο να δικαιολογηθεί σε καλλιέργειες χαμηλότερης οικονομικής απόδοσης ανά μονάδα επιφάνειας (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). Η εγκατάσταση και διαχείριση εκτεταμένων δικτύων παρακολούθησης σε μεγάλες αγροτικές εκτάσεις παρουσιάζει αυξημένες απαιτήσεις συνδεσιμότητας, ενεργειακής αυτονομίας και τεχνικής υποστήριξης.

Η διαφοροποίηση αυτή υποδεικνύει ότι η εμπορική εξάπλωση των ηλεκτρονικών παγίδων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις τεχνολογικές δυνατότητες των συστημάτων, αλλά και από οικονομικούς και επιχειρησιακούς παράγοντες που σχετίζονται με το είδος της καλλιέργειας, την

αξία της παραγωγής και τη συνολική βιωσιμότητα της επένδυσης. Ως αποτέλεσμα, η μέχρι σήμερα εμπορική ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων εμφανίζεται στενότερα συνδεδεμένη με εξειδικευμένα και υψηλής αξίας παραγωγικά συστήματα, όπου οι αυξημένες απαιτήσεις διαχείρισης και ελέγχου της παραγωγής μπορούν να υποστηρίξουν οικονομικά την υιοθέτηση τέτοιων τεχνολογιών.

3.2.4. Γεωγραφική Εξάπλωση και Διεθνής Ανάπτυξη των Ηλεκτρονικών Παγίδων

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων εμφανίζεται στενά συνδεδεμένη με τις περιοχές όπου η γεωργία ακριβείας και οι τεχνολογίες ψηφιακής διαχείρισης καλλιεργειών έχουν ήδη αναπτυχθεί σε σημαντικό βαθμό. Η επιχειρησιακή αξιοποίηση τέτοιων συστημάτων απαιτεί υποδομές τηλεπικοινωνιών, πρόσβαση σε ψηφιακά δίκτυα, τεχνική υποστήριξη και δυνατότητα επένδυσης σε τεχνολογικό εξοπλισμό, γεγονός που εξηγεί γιατί η μεγαλύτερη εξάπλωση των ηλεκτρονικών παγίδων παρατηρείται κυρίως σε αγορές υψηλής τεχνολογικής έντασης (Wolfert et al., 2017).

Η Ευρώπη αποτελεί μία από τις σημαντικότερες περιοχές ανάπτυξης τεχνολογιών ηλεκτρονικής παρακολούθησης εντόμων. Η αυξανόμενη έμφαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης στη βιώσιμη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων, στη μείωση των γεωργικών εισροών και στην προώθηση της ψηφιακής γεωργίας έχει ενισχύσει σημαντικά την ανάπτυξη συστημάτων απομακρυσμένης συλλογής και διαχείρισης δεδομένων πεδίου (European Commission, 2020). Η εκτεταμένη παρουσία δενδροκομικών και αμπελουργικών καλλιεργειών υψηλής αξίας σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες έχει δημιουργήσει ευνοϊκές συνθήκες για την επιχειρησιακή εφαρμογή ηλεκτρονικών παγίδων, ιδιαίτερα σε εξειδικευμένα συστήματα φυτοπροστασίας.

Σημαντική ανάπτυξη παρουσιάζεται επίσης στις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου η υιοθέτηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά σε σύγκριση με άλλες αγροτικές αγορές. Η μεγάλη κλίμακα παραγωγής, η υψηλή μηχανοποίηση της γεωργίας και η αυξημένη επένδυση σε ψηφιακές αγροτικές τεχνολογίες έχουν συμβάλει στην ταχεία ανάπτυξη συστημάτων αυτοματοποιημένης παρακολούθησης και διαχείρισης δεδομένων (Pierpaoli et al., 2013). Οι ηλεκτρονικές παγίδες εντάσσονται ευρύτερα στις τεχνολογίες ευφυούς γεωργίας που αξιοποιούνται για την αυτοματοποίηση της συλλογής πληροφοριών πεδίου και τη βελτίωση της επιχειρησιακής διαχείρισης των καλλιεργειών.

Η γεωγραφική εξάπλωση των ηλεκτρονικών παγίδων συνδέεται γενικότερα με τις αγορές της ψηφιακής γεωργίας και των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας, οι οποίες εμφανίζουν μεγαλύτερη ανάπτυξη σε περιοχές με ισχυρές ψηφιακές υποδομές και υψηλό επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας. Η αξιοποίηση αισθητήρων, τηλεμετρίας, ασύρματων δικτύων επικοινωνίας και συστημάτων διαχείρισης δεδομένων αποτελεί βασικό παράγοντα για την ανάπτυξη τέτοιων εφαρμογών, καθώς οι ηλεκτρονικές παγίδες λειτουργούν πλέον ως τμήματα ευρύτερων ψηφιακών οικοσυστημάτων γεωργικής διαχείρισης (Klerkx et al., 2019).

Η παγκόσμια εξάπλωση των ηλεκτρονικών παγίδων παραμένει άνιση. Σε πολλές γεωργικές περιοχές, ιδιαίτερα σε αγορές χαμηλότερης τεχνολογικής ανάπτυξης, η υιοθέτηση τέτοιων συστημάτων περιορίζεται από παράγοντες όπως το υψηλό κόστος εγκατάστασης, η περιορισμένη διαθεσιμότητα ψηφιακών υποδομών και οι αυξημένες απαιτήσεις τεχνικής υποστήριξης και συντήρησης. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων εμφανίζεται μέχρι σήμερα περισσότερο συγκεντρωμένη σε αγορές όπου η ψηφιακή γεωργία και οι τεχνολογίες αυτοματοποιημένης διαχείρισης έχουν ήδη αναπτυχθεί σε σημαντικό βαθμό.

3.3. Κόστος Απόκτησης των Ηλεκτρονικών Συστημάτων Παγίδευσης

Το κόστος απόκτησης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την επιχειρησιακή υιοθέτηση των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων στη σύγχρονη γεωργική παραγωγή. Η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων αυτών δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον βασικό εξοπλισμό πεδίου, αλλά επηρεάζεται από ένα ευρύτερο σύνολο τεχνολογικών, λειτουργικών και υποστηρικτικών παραμέτρων, όπως ο βαθμός αυτοματοποίησης, οι απαιτήσεις συνδεσιμότητας, οι ψηφιακές υποδομές και οι ανάγκες τεχνικής υποστήριξης (Klerkx et al., 2019).

Η διαφοροποίηση του κόστους σχετίζεται αρχικά με την τεχνολογική πολυπλοκότητα κάθε συστήματος. Τα απλούστερα ηλεκτρονικά συστήματα, τα οποία βασίζονται κυρίως σε βασικές λειτουργίες συλλογής δεδομένων και περιορισμένες δυνατότητες απομακρυσμένης διασύνδεσης, εμφανίζουν συγκριτικά μικρότερες απαιτήσεις εγκατάστασης και υποδομών. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται συνήθως από χαμηλότερο βαθμό τεχνικής πολυπλοκότητας και μικρότερες ανάγκες υποστήριξης, γεγονός που μπορεί να διευκολύνει την εφαρμογή τους σε μικρότερες γεωργικές εκμεταλλεύσεις ή σε παραγωγικά συστήματα περιορισμένης ψηφιακής υποδομής. Αντίθετα, τα περισσότερο εξελιγμένα συστήματα που ενσωματώνουν τεχνολογίες ψηφιακής απεικόνισης, ασύρματης επικοινωνίας, cloud υποδομών και αυτοματοποιημένης

διαχείρισης δεδομένων απαιτούν σημαντικά πιο σύνθετη τεχνική υποστήριξη και μεγαλύτερη επένδυση σε εξοπλισμό και λογισμικό (Preti et al., 2021).

Πολλαπλές τεχνολογικές λειτουργίες αυξάνουν σημαντικά τις συνολικές απαιτήσεις του συστήματος. Πολυαισθητηριακές πλατφόρμες ή συστήματα που βασίζονται σε συνδυασμό αισθητήρων, ασύρματων μονάδων επικοινωνίας και ενεργειακής αυτονομίας απαιτούν συνήθως πιο σύνθετες υποδομές εγκατάστασης και αυξημένες ανάγκες τεχνικής διαχείρισης. Η πολυπλοκότητα αυτή επηρεάζει όχι μόνο την αρχική επένδυση αλλά και τις απαιτήσεις συντήρησης και επιχειρησιακής υποστήριξης του συστήματος σε βάθος χρόνου. Επιπλέον, η αυξημένη τεχνολογική πολυπλοκότητα μπορεί να λειτουργήσει περιοριστικά για μικρές γεωργικές εκμεταλλεύσεις ή για περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε τεχνική υποστήριξη και ψηφιακές υποδομές (Shamshiri et al., 2018).

Σημαντικός παράγοντας διαμόρφωσης του κόστους αποτελεί επίσης η ύπαρξη συνοδευτικών ψηφιακών υπηρεσιών. Πολλά σύγχρονα εμπορικά συστήματα λειτουργούν πλέον με συνδυασμό φυσικού εξοπλισμού και συνδρομητικών υπηρεσιών, οι οποίες περιλαμβάνουν πρόσβαση σε cloud πλατφόρμες, αποθήκευση δεδομένων, ενημερώσεις λογισμικού, απομακρυσμένη τεχνική υποστήριξη και υπηρεσίες τηλεμετρίας. Η οικονομική αξιολόγηση των ηλεκτρονικών παγίδων δεν περιορίζεται στην αρχική αγορά εξοπλισμού αλλά επεκτείνεται και στις επαναλαμβανόμενες λειτουργικές επιβαρύνσεις που σχετίζονται με τη συνεχή χρήση των ψηφιακών υπηρεσιών. Η μετάβαση αυτή από την απλή αγορά εξοπλισμού προς περισσότερο υπηρεσιοκεντρικά μοντέλα λειτουργίας δημιουργεί νέες μορφές οικονομικής εξάρτησης από τους παρόχους τεχνολογίας και αυξάνει τη σημασία της μακροχρόνιας οικονομικής βιωσιμότητας των συστημάτων (Wolfert et al., 2017).

Το συνολικό κόστος επηρεάζεται σημαντικά από τις απαιτήσεις υποδομών και τις συνθήκες εφαρμογής του κάθε παραγωγικού συστήματος. Η αναγκαιότητα ενεργειακής αυτονομίας μέσω φωτοβολταϊκών μονάδων, η λειτουργία σε απομακρυσμένες περιοχές, η εγκατάσταση δικτύων ασύρματης επικοινωνίας και η διατήρηση σταθερής συνδεσιμότητας μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τις επιχειρησιακές απαιτήσεις των συστημάτων. Οι παράγοντες αυτοί αποκτούν ιδιαίτερη σημασία σε εκτεταμένες αγροτικές εγκαταστάσεις ή σε περιοχές με περιορισμένες ψηφιακές υποδομές, όπου η διατήρηση αξιόπιστης λειτουργίας απαιτεί συχνά πρόσθετες επενδύσεις σε υποστηρικτικό εξοπλισμό και τεχνική διαχείριση (Jawad et al., 2017).

Η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας και την οικονομική αξία της παραγωγής. Σε καλλιέργειες υψηλής προστιθέμενης αξίας, οι αυξημένες απαιτήσεις διαχείρισης και ποιοτικού ελέγχου μπορούν να υποστηρίξουν ευκολότερα την επένδυση σε ψηφιακά συστήματα γεωργικής διαχείρισης. Σε εκτατικές καλλιέργειες χαμηλότερης οικονομικής απόδοσης, οι αυξημένες απαιτήσεις υποδομών και τεχνικής υποστήριξης λειτουργούν συχνά περιοριστικά για την ευρύτερη υιοθέτηση τέτοιων τεχνολογιών. Η επιχειρησιακή εφαρμογή των ηλεκτρονικών παγίδων εμφανίζεται μέχρι σήμερα περισσότερο συμβατή με εξειδικευμένα ή υψηλής αξίας παραγωγικά συστήματα.

Το κόστος απόκτησης των ηλεκτρονικών παγίδων επηρεάζεται από ένα σύνθετο σύνολο τεχνολογικών και επιχειρησιακών παραγόντων και δεν μπορεί να αξιολογηθεί αποκλειστικά με βάση τον φυσικό εξοπλισμό πεδίου. Οι απαιτήσεις συνδεσιμότητας, οι ψηφιακές υπηρεσίες, οι ανάγκες τεχνικής υποστήριξης και η συνολική υποδομή λειτουργίας αποτελούν πλέον καθοριστικά στοιχεία της οικονομικής βιωσιμότητας των συστημάτων αυτών στη σύγχρονη ψηφιακή γεωργία. Επομένως, η επιχειρησιακή αξιολόγηση των ηλεκτρονικών παγίδων δεν εξαρτάται μόνο από τις τεχνολογικές δυνατότητες των συστημάτων, αλλά και από τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε βιώσιμα και μακροχρόνια εφαρμόσιμα μοντέλα γεωργικής διαχείρισης (Finger et al., 2019).

Πίνακας 3.1. Συγκριτική επιχειρησιακή και οικονομική αποτίμηση κατηγοριών ηλεκτρονικών παγίδων

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ Α ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ	ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ	ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ
Βασικά ηλεκτρονικά συστήματα	Χαμηλή	Περιορισμένες	Χαμηλές	Συνήθως περιορισμένες
Συστήματα οπτικής καταγραφής με τηλεμετρία	Μέτρια έως αυξημένη	Αυξημένες απαιτήσεις συνδεσιμότητας	Μέτριες	Συχνά διαθέσιμες
Πολυαισθητήριακά και cloud-based συστήματα	Αυξημένη	Εκτεταμένες ψηφιακές υποδομές	Αυξημένες	Συνήθως ενσωματωμένες

3.4. Λειτουργικό Κόστος και Κόστος Συντήρησης

3.4.1. Ενεργειακές Απαιτήσεις και Αυτονομία Λειτουργίας

Η συνεχής λειτουργία των ηλεκτρονικών παγίδων σε πραγματικές συνθήκες πεδίου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τις ενεργειακές απαιτήσεις και τη δυνατότητα ενεργειακής αυτονομίας των συστημάτων. Σε αντίθεση με τις συμβατικές παγίδες, τα ηλεκτρονικά συστήματα βασίζονται σε συνεχή τροφοδοσία ενέργειας για τη λειτουργία αισθητήρων, μονάδων επικοινωνίας, συστημάτων αποθήκευσης δεδομένων και ασύρματης μετάδοσης πληροφοριών. Η ενεργειακή διαχείριση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα της επιχειρησιακής αξιοπιστίας και της μακροχρόνιας λειτουργικής βιωσιμότητας των συστημάτων αυτών (Jawad et al., 2017).

Οι ενεργειακές απαιτήσεις διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με την τεχνολογική πολυπλοκότητα κάθε συστήματος. Απλούστερες ηλεκτρονικές παγίδες με περιορισμένες λειτουργίες καταγραφής και ασύρματης επικοινωνίας εμφανίζουν συνήθως χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και μεγαλύτερη λειτουργική αυτονομία. Αντίθετα, συστήματα που ενσωματώνουν κάμερες υψηλής ανάλυσης, συνεχή τηλεμετρία, cloud διασύνδεση ή πολλαπλές μονάδες αισθητήρων παρουσιάζουν αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τη διάρκεια αυτόνομης λειτουργίας τους στο πεδίο (Preti et al., 2021).

Στις περισσότερες εμπορικές εφαρμογές, η ενεργειακή τροφοδοσία των ηλεκτρονικών παγίδων βασίζεται είτε σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είτε σε συνδυασμό μπαταριών και φωτοβολταϊκών μονάδων μικρής κλίμακας. Η αξιοποίηση ηλιακών πάνελ θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για εφαρμογές μακροχρόνιας εγκατάστασης σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές, όπου η συχνή αντικατάσταση ή επαναφόρτιση μπαταριών είναι επιχειρησιακά δυσχερές. Η χρήση ενεργειακά αποδοτικότερων τεχνολογιών επικοινωνίας και χαμηλής κατανάλωσης ηλεκτρονικών υποσυστημάτων αποτελεί βασικό στόχο της σύγχρονης ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων (Ayaz et al., 2019).

Η ενεργειακή αυτονομία των ηλεκτρονικών παγίδων επηρεάζεται σημαντικά από τις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας. Παράγοντες όπως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, οι καιρικές συνθήκες, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η συχνότητα μετάδοσης δεδομένων μπορούν να επηρεάσουν ουσιαστικά τη διάρκεια λειτουργίας των συστημάτων και τις ανάγκες συντήρησης των ενεργειακών υποδομών. Ιδιαίτερα σε εκτεταμένες εγκαταστάσεις πεδίου, η περιορισμένη ενεργειακή αυτονομία μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις απαιτήσεις τεχνικής υποστήριξης και τις ανάγκες επιτόπιων παρεμβάσεων (Jawad et al., 2017).

Επιπλέον, οι αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις μπορούν να επηρεάσουν όχι μόνο τη λειτουργική αξιοπιστία αλλά και το συνολικό λειτουργικό κόστος των συστημάτων. Η ανάγκη αντικατάστασης μπαταριών, η περιοδική συντήρηση φωτοβολταϊκών μονάδων και η διατήρηση σταθερής λειτουργίας των συστημάτων επικοινωνίας δημιουργούν πρόσθετες επιχειρησιακές επιβαρύνσεις, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα εγκατάστασης. Ως αποτέλεσμα, η ενεργειακή διαχείριση αποτελεί βασικό στοιχείο της συνολικής επιχειρησιακής αξιολόγησης των ηλεκτρονικών παγίδων (Shamshiri et al., 2018).

Οι ενεργειακές απαιτήσεις και η δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη μακροχρόνια επιχειρησιακή βιωσιμότητα των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων. Η αποτελεσματική ενεργειακή διαχείριση δεν επηρεάζει μόνο τη λειτουργική αξιοπιστία των συστημάτων αλλά και τις συνολικές απαιτήσεις συντήρησης, τεχνικής υποστήριξης και επιχειρησιακού κόστους στη σύγχρονη ψηφιακή γεωργία.

3.4.2. Αντικατάσταση Αναλωσίμων και Ανανεώσιμων Υλικών

Ένα σημαντικό μέρος του λειτουργικού κόστους των ηλεκτρονικών παγίδων σχετίζεται με την ανάγκη περιοδικής αντικατάστασης αναλωσίμων και ανανεώσιμων υλικών που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση της αποτελεσματικής λειτουργίας των συστημάτων. Σε αντίθεση με τις συμβατικές παγίδες, πολλά ηλεκτρονικά συστήματα βασίζονται σε συνδυασμό φυσικών επιφανειών παγίδευσης και χημικών ελκυστικών ουσιών. Τα στοιχεία αυτά απαιτούν συστηματική ανανέωση κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Epsky et al., 2008).

Ιδιαίτερα συχνή είναι η ανάγκη αντικατάστασης των κολλητικών επιφανειών, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικά συστήματα οπτικής καταγραφής. Οι επιφάνειες αυτές επιβαρύνονται σταδιακά από τη συσσώρευση εντόμων, σκόνης, φυτικών υπολειμμάτων και άλλων περιβαλλοντικών ρύπων, γεγονός που μπορεί να μειώσει σημαντικά τόσο την αποτελεσματικότητα παγίδευσης όσο και την ποιότητα των ψηφιακών καταγραφών εικόνας. Η περιοδική αντικατάσταση των κολλητικών καρτών αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη διατήρηση της σταθερής λειτουργίας των συστημάτων πεδίου, ιδιαίτερα σε εφαρμογές μακροχρόνιας εγκατάστασης (Domingues et al., 2022).

Σημαντικό λειτουργικό κόστος συνδέεται επίσης με τη χρήση φερομονικών δολωμάτων και χημικών ελκυστικών ουσιών. Οι ουσίες αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως για την προσέλκυση συγκεκριμένων ειδών εντόμων και αποτελούν βασικό στοιχείο πολλών συστημάτων παγίδευσης. Η αποτελεσματικότητά τους μειώνεται σταδιακά λόγω εξάτμισης, περιβαλλοντικής αποδόμησης

ή απώλειας δραστηριότητας, γεγονός που καθιστά αναγκαία την περιοδική αντικατάστασή τους κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (University of Florida IFAS Extension, 1997).

Η συχνότητα αντικατάστασης των χημικών ελκυστικών ουσιών και των φερομονών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η διάρκεια έκθεσης στο πεδίο και η χημική σταθερότητα των χρησιμοποιούμενων ουσιών. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι αυξημένες θερμοκρασίες και η παρατεταμένη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να επιταχύνουν σημαντικά την απώλεια δραστηριότητας των φερομονικών δολωμάτων, αυξάνοντας έτσι τις απαιτήσεις συντήρησης και το συνολικό λειτουργικό κόστος των συστημάτων (Witzgall et al., 2010).

Η απαίτηση τακτικής αντικατάστασης αναλωσίμων δημιουργεί πρόσθετες επιχειρησιακές απαιτήσεις για επιτόπιους ελέγχους και τεχνικές παρεμβάσεις. Ιδιαίτερα σε εκτεταμένα δίκτυα εγκατάστασης, η συστηματική ανανέωση κολλητικών επιφανειών, φερομονών και άλλων ελκυστικών ουσιών μπορεί να αυξήσει σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο συντήρησης και το ανθρώπινο δυναμικό που απαιτείται για την υποστήριξη του συστήματος. Ως αποτέλεσμα, το λειτουργικό κόστος των ηλεκτρονικών παγίδων δεν εξαρτάται μόνο από τις ψηφιακές και τεχνολογικές υποδομές, αλλά και από τη συνεχή ανάγκη ανανέωσης των φυσικών και χημικών αναλωσίμων που χρησιμοποιούνται στο πεδίο.

Η αντικατάσταση αναλωσίμων αποτελεί βασικό στοιχείο της επιχειρησιακής συντήρησης των ηλεκτρονικών παγίδων και επηρεάζει ουσιαστικά τη μακροχρόνια λειτουργική βιωσιμότητα των συστημάτων. Η ανάγκη περιοδικής ανανέωσης κολλητικών επιφανειών, φερομονικών δολωμάτων και ελκυστικών ουσιών αυξάνει τις απαιτήσεις τεχνικής υποστήριξης και συντήρησης, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές ψηφιακής γεωργικής διαχείρισης.

3.4.3. Τεχνική Συντήρηση και Λειτουργική Υποστήριξη των Συστημάτων

Η τεχνική συντήρηση αποτελεί βασικό παράγοντα της μακροχρόνιας σταθερής απόδοσης των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων και επηρεάζει άμεσα τόσο τη σταθερότητα λειτουργίας όσο και το συνολικό λειτουργικό κόστος των συστημάτων. Σε αντίθεση με τις συμβατικές παγίδες χαμηλής τεχνολογικής απαίτησης, τα ηλεκτρονικά συστήματα βασίζονται σε συνδυασμό αισθητήρων, μονάδων επικοινωνίας, λογισμικού και ψηφιακών υποδομών, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τις ανάγκες τεχνικής υποστήριξης και περιοδικής συντήρησης (Fountas et al., 2020).

Ένα από τα συχνότερα ζητήματα συντήρησης αφορά τον καθαρισμό των οπτικών συστημάτων και ιδιαίτερα των ενσωματωμένων καμερών. Η συσσώρευση σκόνης, υγρασίας, υπολειμμάτων εντόμων και άλλων περιβαλλοντικών ρύπων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα των καταγραφών εικόνας και τη συνολική αξιοπιστία λειτουργίας των συστημάτων ψηφιακής απεικόνισης. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται εντονότερα σε αγροτικά περιβάλλοντα υψηλής σκόνης, σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις με αυξημένη υγρασία ή σε εφαρμογές μακροχρόνιας εγκατάστασης χωρίς συχνή επιτόπια επίβλεψη (Domingues et al., 2022).

Καθοριστικό στοιχείο τεχνικής συντήρησης αποτελεί η περιοδική βαθμονόμηση των αισθητήρων και των υποσυστημάτων καταγραφής. Η συνεχής έκθεση των ηλεκτρονικών παγίδων σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες μπορεί να επηρεάσει σταδιακά την ακρίβεια λειτουργίας αισθητήρων θερμοκρασίας, υγρασίας, οπτικής ανίχνευσης ή άλλων μονάδων συλλογής δεδομένων. Ως αποτέλεσμα, η περιοδική επαναρύθμιση και επαλήθευση της ορθής λειτουργίας των συστημάτων θεωρείται απαραίτητη για τη διατήρηση της αξιοπιστίας των δεδομένων που συλλέγονται στο πεδίο (Liakos et al., 2018).

Σημαντικές απαιτήσεις τεχνικής υποστήριξης συνδέονται επίσης με τη διαχείριση ενσωματωμένου λογισμικού και τις ανάγκες ενημέρωσής του. Πολλά σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα βασίζονται σε ενσωματωμένο λογισμικό για τη διαχείριση δεδομένων, την ασύρματη επικοινωνία και τη λειτουργία των ψηφιακών υπηρεσιών. Ως εκ τούτου, η περιοδική ενημέρωση του ενσωματωμένου λογισμικού αποτελεί βασικό στοιχείο της τεχνικής υποστήριξης, καθώς σχετίζεται με τη διόρθωση λειτουργικών προβλημάτων, τη βελτίωση της σταθερότητας λειτουργίας και τη διατήρηση της συμβατότητας με τις ψηφιακές πλατφόρμες διαχείρισης (Verdouw et al., 2021).

Επιπλέον, συχνά προβλήματα εμφανίζονται και στη συνδεσιμότητα των συστημάτων, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που βασίζονται σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας ή λειτουργούν σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές. Αποτυχίες σύνδεσης, ασταθής μετάδοση δεδομένων, περιορισμένη κάλυψη δικτύου και προσωρινές διακοπές επικοινωνίας μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη λειτουργική αξιοπιστία των ηλεκτρονικών παγίδων και να αυξήσουν τις ανάγκες τεχνικών παρεμβάσεων. Τα προβλήματα αυτά αποκτούν ιδιαίτερη σημασία σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα εγκατάστασης, όπου η διατήρηση σταθερής επικοινωνίας αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της επιχειρησιακής λειτουργίας (Friha et al., 2021).

Η απαίτηση για τακτική τεχνική συντήρηση αυξάνει σημαντικά τις απαιτήσεις ανθρώπινου δυναμικού και επιχειρησιακής υποστήριξης, ιδιαίτερα σε συστήματα μεγάλης γεωγραφικής διασποράς. Η περιοδική επιθεώρηση εξοπλισμού, η αντικατάσταση φθαρμένων εξαρτημάτων, η επανεκκίνηση συστημάτων και η αποκατάσταση τεχνικών δυσλειτουργιών δημιουργούν πρόσθετες λειτουργικές επιβαρύνσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιχειρησιακή αξιολόγηση των ηλεκτρονικών παγίδων.

Η τεχνική συντήρηση αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της μακροχρόνιας λειτουργικής βιωσιμότητας των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων. Ο καθαρισμός καμερών, η βαθμονόμηση αισθητήρων, οι ενημερώσεις και η διαχείριση προβλημάτων συνδεσιμότητας επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργική αξιοπιστία, τις απαιτήσεις τεχνικής υποστήριξης και το συνολικό λειτουργικό κόστος των συστημάτων στη σύγχρονη ψηφιακή γεωργία.

3.4.4. Ανθρώπινη Επίβλεψη και Επιχειρησιακή Παρέμβαση

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί στην αυτοματοποίηση των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων, τα περισσότερα διαθέσιμα συστήματα εξακολουθούν να απαιτούν σημαντικό βαθμό ανθρώπινης επίβλεψης και επιχειρησιακής παρέμβασης. Η παρουσία αισθητήρων, συστημάτων τηλεμετρίας και αυτοματοποιημένων διαδικασιών συλλογής δεδομένων δεν συνεπάγεται πλήρως αυτόνομη λειτουργία, καθώς η αποτελεσματική επιχειρησιακή αξιοποίηση των συστημάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνεχή τεχνική και λειτουργική υποστήριξη (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2004).

Στην πράξη, οι ηλεκτρονικές παγίδες απαιτούν τακτικό έλεγχο της κατάστασης λειτουργίας τους, επιθεώρηση των ενεργειακών υποδομών, αντικατάσταση αναλωσίμων και περιοδική επαλήθευση της ορθής καταγραφής δεδομένων. Ακόμη και σε συστήματα με υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης, η ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης παραμένει σημαντική, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις τεχνικών δυσλειτουργιών, προβλημάτων συνδεσιμότητας ή περιβαλλοντικών επιδράσεων που επηρεάζουν την απόδοση του εξοπλισμού (Pierpaoli et al., 2013).

Ιδιαίτερα σημαντική παραμένει η ανθρώπινη επίβλεψη στην αξιολόγηση και επιβεβαίωση των δεδομένων που συλλέγονται από τα ηλεκτρονικά συστήματα. Παρότι οι σύγχρονες πλατφόρμες μπορούν να αυτοματοποιούν μεγάλο μέρος της συλλογής και διαχείρισης πληροφοριών, η τελική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, η ερμηνεία πιθανών σφαλμάτων λειτουργίας και η λήψη επιχειρησιακών αποφάσεων εξακολουθούν σε μεγάλο βαθμό να εξαρτώνται από τον ανθρώπινο χειριστή. Η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα εμφανής σε περιπτώσεις

όπου περιβαλλοντικοί παράγοντες, μεταβολές φωτισμού ή τεχνικά προβλήματα μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα των ψηφιακών καταγραφών (Rose et al., 2021).

Η λειτουργία εκτεταμένων δικτύων ηλεκτρονικών παγίδων απαιτεί συχνά συντονισμό ανθρώπινου δυναμικού για την οργάνωση επιτόπιων παρεμβάσεων, τη διαχείριση τεχνικών προβλημάτων και την παρακολούθηση της συνολικής λειτουργικής κατάστασης των συστημάτων. Οι απαιτήσεις αυτές αυξάνονται ιδιαίτερα σε εφαρμογές μεγάλης γεωγραφικής διασποράς ή σε περιοχές με περιορισμένη τεχνική υποδομή, όπου η διατήρηση σταθερής και αξιόπιστης λειτουργίας μπορεί να καταστεί περισσότερο απαιτητική (Eastwood et al., 2017).

Η τεχνολογική απαίτηση ανθρώπινης επίβλεψης συνδέεται και με ζητήματα εκπαίδευσης και τεχνικής κατάρτισης των χρηστών. Η αποτελεσματική αξιοποίηση των ηλεκτρονικών παγίδων προϋποθέτει συχνά βασική εξοικείωση με ψηφιακά συστήματα διαχείρισης, διαδικτυακές πλατφόρμες, ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας και διαδικασίες τεχνικής συντήρησης. Ως αποτέλεσμα, η υιοθέτηση τέτοιων τεχνολογιών δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού αλλά και από τη δυνατότητα των χρηστών να υποστηρίξουν επιχειρησιακά τη συνεχή λειτουργία του συστήματος (Klerkx et al., 2019).

Παρά τον υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης που διαθέτουν πολλά σύγχρονα συστήματα, η αποτελεσματική λειτουργία τους εξακολουθεί να εξαρτάται από την ανθρώπινη επίβλεψη, την τεχνική υποστήριξη και τη σωστή επιχειρησιακή διαχείριση.

3.5. Τεχνολογική Ωριμότητα και Επιχειρησιακοί Περιορισμοί

3.5.1. Ζητήματα Αξιοπιστίας στην Αυτόματη Καταγραφή και Αναγνώριση

Η αξιοπιστία των ηλεκτρονικών παγίδων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους επιχειρησιακούς περιορισμούς κατά την εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες πεδίου. Παρότι τα σύγχρονα συστήματα μπορούν να αυτοματοποιούν σημαντικό μέρος της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων δεν είναι απόλυτη και επηρεάζεται από παράγοντες που σχετίζονται με την ποιότητα της εικόνας, τη θέση των εντόμων στην παγίδα, την ύπαρξη επικαλύψεων και τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε μελέτες αυτόματης ανίχνευσης μικρών εντόμων σε κολλητικές παγίδες, έχουν καταγραφεί διαφορές στην ακρίβεια ανάλογα με το είδος-στόχο, καθώς και περιπτώσεις λανθασμένων θετικών αναγνωρίσεων και αποτυχιών ανίχνευσης, γεγονός που δείχνει ότι η πλήρης αυτοματοποίηση εξακολουθεί να παρουσιάζει περιορισμούς (Li et al., 2022).

Ιδιαίτερο πρόβλημα αποτελούν οι λανθασμένες θετικές αναγνωρίσεις, δηλαδή οι περιπτώσεις όπου το σύστημα αναγνωρίζει λανθασμένα ως έντομο ένα αντικείμενο, υπόλειμμα ή οπτικό θόρυβο στην εικόνα. Αντίστοιχα, οι αποτυχίες ανίχνευσης προκύπτουν όταν το σύστημα αποτυγχάνει να εντοπίσει έντομα που υπάρχουν στην επιφάνεια της παγίδας. Τα φαινόμενα αυτά συνδέονται συχνά με το μικρό μέγεθος ορισμένων εντόμων, τη χαμηλή αντίθεση με το υπόβαθρο, την παρουσία σκόνης ή φυτικών υπολειμμάτων και τη μεταβλητότητα των συνθηκών φωτισμού. Η ύπαρξη τέτοιων σφαλμάτων καθιστά αναγκαία την περιοδική επαλήθευση των αυτόματων αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα όταν τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για επιχειρησιακές αποφάσεις.

Η λανθασμένη ταξινόμηση αποτελεί επίσης σημαντικό περιορισμό. Σε παγίδες όπου συσσωρεύονται διαφορετικά είδη ή ομάδες εντόμων, η οπτική ομοιότητα μεταξύ μικρών ειδών μπορεί να δυσχεράνει την ακριβή διάκρισή τους. Μελέτες σε εικόνες κολλητικών παγίδων έχουν δείξει ότι η αυτόματη καταμέτρηση και αναγνώριση μπορεί να επηρεάζεται από την πυκνότητα των εντόμων στην επιφάνεια, τις επικαλύψεις μεταξύ σωμάτων και την ποιότητα των επισημάνσεων στα δεδομένα εκπαίδευσης των αλγορίθμων (Ciampi et al., 2023).

Επιπλέον, οι συνθήκες φωτισμού και η ποιότητα της ψηφιακής εικόνας επηρεάζουν άμεσα τη σταθερότητα των αποτελεσμάτων. Η έντονη ή ανομοιομορφη φωτεινότητα, οι αντανακλάσεις, οι σκιές και οι αλλαγές στη γωνία λήψης μπορούν να μειώσουν την ικανότητα των συστημάτων να διακρίνουν με ακρίβεια τα έντομα από το υπόβαθρο. Η σημασία της ποιότητας εικόνας αναδεικνύεται και από νεότερα σύνολα δεδομένων για έντομα σε κολλητικές παγίδες, όπου επισημαίνονται διαφοροποιήσεις στην ποιότητα των εικόνων, αντανακλάσεις φωτισμού και μεταβολές που σχετίζονται με τις συνθήκες λήψης εικόνας (Ong et al., 2024).

Παράλληλα, περιβαλλοντικοί ρύποι όπως σκόνη, υγρασία, φυτικά υπολείμματα και φθορά των κολλητικών επιφανειών μπορούν να μειώσουν την αναγνωσιμότητα των εικόνων και να αυξήσουν την πιθανότητα σφαλμάτων. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μακροχρόνιες εγκαταστάσεις πεδίου, όπου η ποιότητα της επιφάνειας παγίδευσης μεταβάλλεται σταδιακά κατά τη διάρκεια χρήσης. Επομένως, η αξιοπιστία των ηλεκτρονικών παγίδων δεν εξαρτάται μόνο από τον αλγόριθμο αναγνώρισης, αλλά και από τη φυσική κατάσταση της παγίδας, τη συντήρηση του οπτικού συστήματος και την ποιότητα των δεδομένων που εισάγονται στο σύστημα.

Τα ζητήματα αξιοπιστίας δείχνουν ότι οι ηλεκτρονικές παγίδες δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως πλήρως αλάνθαστα συστήματα αυτόματης αναγνώρισης. Η ύπαρξη ψευδών αναγνώρισεων, λανθασμένων ταξινομήσεων, επικαλύψεων εντόμων και προβλημάτων εικόνας υποδεικνύει την ανάγκη συνδυασμού αυτοματοποιημένης ανάλυσης με περιοδικό ποιοτικό έλεγχο. Η ανάγκη αυτή αναδεικνύει ότι η πλήρης αυτοματοποίηση της αναγνώρισης εντόμων εξακολουθεί να παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς σε πραγματικές συνθήκες πεδίου.

3.5.2. Προβλήματα Συνδεσιμότητας και Μετάδοσης Δεδομένων

Η αποτελεσματική λειτουργία των ηλεκτρονικών παγίδων εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη δυνατότητα σταθερής και συνεχούς μετάδοσης δεδομένων από το πεδίο προς τις πλατφόρμες διαχείρισης και αποθήκευσης πληροφοριών. Ωστόσο, σε πραγματικές συνθήκες αγροτικής εφαρμογής, η συνδεσιμότητα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους επιχειρησιακούς περιορισμούς των συστημάτων αυτών, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές ή σε περιοχές με περιορισμένες τηλεπικοινωνιακές υποδομές (Elijah et al., 2018).

Οι ηλεκτρονικές παγίδες βασίζονται συνήθως σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας για τη μεταφορά εικόνων, μετρήσεων και λοιπών δεδομένων λειτουργίας. Η σταθερότητα αυτής της επικοινωνίας επηρεάζεται άμεσα από την ποιότητα του τηλεπικοινωνιακού σήματος, τη γεωμορφολογία της περιοχής, την απόσταση από σταθμούς δικτύου και την ύπαρξη φυσικών εμποδίων που μπορούν να περιορίσουν την κάλυψη ή τη σταθερότητα της σύνδεσης. Η αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων μπορεί να διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών και παραγωγικών συστημάτων (Khanna & Kaur, 2019).

Ιδιαίτερα προβληματικές εμφανίζονται οι εφαρμογές σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές, όπου η περιορισμένη κάλυψη δικτύων κινητής τηλεφωνίας ή η έλλειψη επαρκών υποδομών ασύρματης επικοινωνίας μπορεί να προκαλέσει διακοπές στη ροή δεδομένων και αδυναμία συνεχούς απομακρυσμένης παρακολούθησης. Σε τέτοιες συνθήκες, οι ηλεκτρονικές παγίδες ενδέχεται να αποθηκεύουν προσωρινά τα δεδομένα τοπικά μέχρι να αποκατασταθεί η επικοινωνία με το δίκτυο, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα πραγματικού χρόνου ενημέρωσης και μειώνει τη συνολική αποδοτικότητα των συστημάτων (Friha et al., 2021).

Οι αποτυχίες μετάδοσης δεδομένων μπορούν να επηρεάσουν άμεσα την αξιοπιστία των πληροφοριών που συλλέγονται. Προσωρινές διακοπές επικοινωνίας, απώλεια πακέτων δεδομένων, αστάθεια δικτύου ή καθυστερήσεις συγχρονισμού μπορούν να οδηγήσουν σε ελλιπή αρχεία καταγραφής ή σε καθυστέρηση της ενημέρωσης των χρηστών σχετικά με την κατάσταση

των παγίδων και των πληθυσμών εντόμων. Τα προβλήματα αυτά αποκτούν ιδιαίτερη σημασία σε εφαρμογές όπου τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για έγκαιρη λήψη αποφάσεων φυτοπροστασίας ή για συστήματα προειδοποίησης αυξημένης παρουσίας εντόμων (Tzounis et al., 2017).

Η ανάγκη διατήρησης συνεχούς συνδεσιμότητας αυξάνει τις απαιτήσεις τεχνικής υποστήριξης και διαχείρισης των συστημάτων. Η εγκατάσταση πρόσθετων υποδομών επικοινωνίας, η χρήση ενισχυτών σήματος ή η αξιοποίηση εναλλακτικών τεχνολογιών ασύρματης μετάδοσης μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τόσο την τεχνική πολυπλοκότητα όσο και το συνολικό λειτουργικό κόστος των εφαρμογών πεδίου. Η αξιοπιστία της συνδεσιμότητας αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη μακροχρόνια επιχειρησιακή βιωσιμότητα των ηλεκτρονικών παγίδων.

Τα προβλήματα συνδεσιμότητας και μετάδοσης δεδομένων εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικό περιορισμό για την πλήρη επιχειρησιακή αξιοποίηση των ηλεκτρονικών παγίδων σε πραγματικές συνθήκες αγρού. Η εξάρτηση των συστημάτων από σταθερές τηλεπικοινωνιακές υποδομές υποδεικνύει ότι η αποτελεσματική λειτουργία τους δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις τεχνολογικές δυνατότητες του εξοπλισμού πεδίου, αλλά και από τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων υποδομών επικοινωνίας.

3.5.3. Περιβαλλοντικοί Περιορισμοί Λειτουργίας

Η λειτουργία των ηλεκτρονικών παγίδων σε πραγματικές συνθήκες αγρού επηρεάζεται σημαντικά από περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να μειώσουν τη σταθερότητα λειτουργίας, την ποιότητα των καταγραφών και τη συνολική επιχειρησιακή απόδοση των συστημάτων. Σε αντίθεση με τις ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, οι εγκαταστάσεις πεδίου εκτίθενται συνεχώς σε μεταβολές θερμοκρασίας, βροχοπτώσεις, υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία και συσσώρευση σωματιδίων, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τόσο τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό όσο και την ποιότητα των συλλεγόμενων δεδομένων (Aqeel-ur-Rehman et al., 2014).

Η βροχή και η αυξημένη ατμοσφαιρική υγρασία αποτελούν σημαντικούς παράγοντες φθοράς για τα ηλεκτρονικά συστήματα πεδίου. Η συνεχής έκθεση σε υγρασία μπορεί να προκαλέσει οξείδωση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, αστάθεια αισθητήρων και υποβάθμιση των συστημάτων τροφοδοσίας ή επικοινωνίας. Παράλληλα, η παρουσία νερού στις επιφάνειες παγίδευσης ή στα οπτικά συστήματα λήψης εικόνας μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα των

καταγραφών και να μειώσει την ακρίβεια της αυτόματης αναγνώρισης εντόμων (Aqeel-ur-Rehman et al., 2014).

Σημαντικός περιορισμός σχετίζεται επίσης με τις ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές που παρατηρούνται σε υπαίθριες γεωργικές εγκαταστάσεις. Η παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να επηρεάσει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών, τη σταθερότητα των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και τη συνολική ενεργειακή απόδοση των συστημάτων. Ιδιαίτερα χαμηλές θερμοκρασίες μπορούν να μειώσουν την αποδοτικότητα των ενεργειακών μονάδων και να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία των συσκευών πεδίου (Pathak et al., 2019).

Η έντονη ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα τόσο στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό όσο και στην ποιότητα των ψηφιακών εικόνων. Οι έντονες αντανakλάσεις, οι μεταβολές φωτεινότητας και οι σκιές που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορούν να επηρεάσουν την ικανότητα των συστημάτων να διαχωρίζουν με ακρίβεια τα έντομα από το υπόβαθρο της παγίδας. Η μακροχρόνια έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να επιταχύνει τη φθορά εξωτερικών επιφανειών και προστατευτικών υλικών των συστημάτων πεδίου (Friha et al., 2021).

Η συσσώρευση σκόνης και αιωρούμενων σωματιδίων, γύρης και φυτικών υπολειμμάτων μπορεί να περιορίσει την απόδοση των οπτικών συστημάτων και να επηρεάσει τη σαφήνεια των καταγραφών. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται συχνότερα σε μακροχρόνιες εγκαταστάσεις υπαίθρου, όπου η συνεχής έκθεση του εξοπλισμού σε περιβαλλοντικούς ρύπους αυξάνει σταδιακά τις ανάγκες καθαρισμού και τεχνικής συντήρησης (Li et al., 2022).

Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες αποτελούν κρίσιμο περιορισμό για τη μακροχρόνια και σταθερή λειτουργία των ηλεκτρονικών παγίδων σε πραγματικές γεωργικές συνθήκες. Η αποτελεσματική επιχειρησιακή αξιοποίηση των συστημάτων αυτών προϋποθέτει όχι μόνο τεχνολογική επάρκεια, αλλά και δυνατότητα διατήρησης σταθερής λειτουργίας υπό μεταβαλλόμενες και συχνά δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες πεδίου.

3.5.4. Περιορισμοί των Συστημάτων Τεχνητής Νοημοσύνης στην Αναγνώριση Εντόμων

Η ενσωμάτωση συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης στις ηλεκτρονικές παγίδες έχει συμβάλει σημαντικά στην αυτοματοποίηση της ανίχνευσης και ταξινόμησης εντόμων. Παρά τη σημαντική πρόοδο των τελευταίων ετών, η αξιοπιστία των αλγορίθμων εξακολουθεί να επηρεάζεται από

περιορισμούς που σχετίζονται με την ποιότητα των δεδομένων εκπαίδευσης, τη μορφολογική ποικιλότητα των εντόμων και τις μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας στο πεδίο. Η απόδοση των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης συχνά διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ εργαστηριακών και πραγματικών γεωργικών συνθηκών (Høye et al., 2021).

Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς αφορά τη μεροληψία των δεδομένων εκπαίδευσης ως προς τα είδη που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη των αλγορίθμων. Πολλά συστήματα εκπαιδεύονται κυρίως σε περιορισμένο αριθμό οικονομικά σημαντικών ειδών ή σε εικόνες που έχουν ληφθεί υπό ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού και καταγραφής. Ως αποτέλεσμα, η ικανότητα αναγνώρισης μπορεί να μειώνεται όταν τα συστήματα εφαρμόζονται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, σε νέα είδη ή σε συνθήκες που αποκλίνουν από εκείνες των δεδομένων εκπαίδευσης (Høye et al., 2021).

Η ανάπτυξη αξιόπιστων αλγορίθμων απαιτεί μεγάλες ποσότητες ποιοτικά επισημασμένων δεδομένων εκπαίδευσης. Η συλλογή και η επισημάνση εικόνων εντόμων αποτελεί ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, καθώς προϋποθέτει συχνά εξειδικευμένη εντομολογική γνώση και σημαντικό χρόνο επεξεργασίας. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα εκτεταμένων και αντιπροσωπευτικών συνόλων δεδομένων δυσχεραίνει την ανάπτυξη περισσότερο γενικεύσιμων συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης για εφαρμογές πεδίου (Ding & Taylor, 2016).

Σημαντική δυσκολία εμφανίζεται επίσης κατά τη μεταφορά των αλγορίθμων από εργαστηριακές συνθήκες σε πραγματικά περιβάλλοντα αγρού. Σε ελεγχόμενες συνθήκες, οι εικόνες εκπαίδευσης χαρακτηρίζονται συνήθως από σταθερό φωτισμό, καθαρό υπόβαθρο και περιορισμένο οπτικό θόρυβο. Αντίθετα, στις πραγματικές γεωργικές συνθήκες, παράγοντες όπως οι σκιές, οι αντανakλάσεις, οι επικαλύψεις μεταξύ εντόμων, η παρουσία σκόνης και η φθορά των επιφανειών παγίδευσης μπορούν να μειώσουν σημαντικά την ακρίβεια αναγνώρισης των αλγορίθμων (Li et al., 2022).

Η μορφολογική ομοιότητα μεταξύ μικρών ειδών εντόμων ή μεταξύ διαφορετικών αναπτυξιακών σταδίων του ίδιου είδους μπορεί να δυσχεράνει την ακριβή ταξινόμηση των οργανισμών από τα αυτοματοποιημένα συστήματα. Οι δυσκολίες αυτές γίνονται περισσότερο εμφανείς όταν οι διαθέσιμες εικόνες εκπαίδευσης είναι περιορισμένες ή δεν καλύπτουν επαρκώς τη φυσική μεταβλητότητα των εντόμων σε πραγματικά γεωργικά περιβάλλοντα (Høye et al., 2021).

Οι περιορισμοί των συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης υποδεικνύουν ότι η αυτόματη αναγνώριση εντόμων εξακολουθεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα και την αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων εκπαίδευσης, καθώς και από τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας στο πεδίο. Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια, η αξιοπιστία των αλγορίθμων εξακολουθεί να μειώνεται όταν τα συστήματα εφαρμόζονται εκτός ελεγχόμενων εργαστηριακών συνθηκών ή σε περισσότερο σύνθετα περιβάλλοντα αγρού.

3.5.5. Οικονομικοί Περιορισμοί και Δυσκολίες Υιοθέτησης

Παρά τη σημαντική τεχνολογική πρόοδο των ηλεκτρονικών παγίδων, η ευρύτερη επιχειρησιακή εξάπλωσή τους εξακολουθεί να περιορίζεται από οικονομικούς και οργανωτικούς παράγοντες. Η αξιοποίηση τέτοιων συστημάτων προϋποθέτει συχνά σημαντική αρχική επένδυση, τεχνική υποστήριξη και πρόσβαση σε ψηφιακές υποδομές, στοιχεία που δεν είναι πάντοτε διαθέσιμα σε όλες τις γεωργικές εκμεταλλεύσεις. Ως αποτέλεσμα, η διάδοση των ηλεκτρονικών παγίδων εμφανίζεται μέχρι σήμερα περισσότερο συγκεντρωμένη σε παραγωγικά συστήματα υψηλής οικονομικής αξίας και σε περιοχές με μεγαλύτερη τεχνολογική ετοιμότητα (Klerkx et al., 2019).

Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς αφορά το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης που απαιτείται για την εγκατάσταση και λειτουργία τέτοιων συστημάτων. Παρότι οι ηλεκτρονικές παγίδες μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της παρακολούθησης και στη συστηματικότερη διαχείριση δεδομένων φυτοπροστασίας, η οικονομική απόσβεση της επένδυσης δεν είναι πάντοτε άμεσα εμφανής, ιδιαίτερα σε μικρές ή χαμηλότερης εντατικοποίησης γεωργικές εκμεταλλεύσεις (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

Η υιοθέτηση τεχνολογιών ψηφιακής γεωργίας επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος και τη δομή της εκμετάλλευσης. Μεγαλύτερες γεωργικές μονάδες διαθέτουν συνήθως αυξημένη δυνατότητα επένδυσης σε τεχνολογικό εξοπλισμό και περισσότερο ανεπτυγμένες υποδομές διαχείρισης δεδομένων. Αντίθετα, οι μικρότερες εκμεταλλεύσεις συχνά αντιμετωπίζουν δυσκολίες που σχετίζονται με το κόστος εγκατάστασης, τη διαθεσιμότητα τεχνικής υποστήριξης και την αβεβαιότητα σχετικά με το οικονομικό όφελος της επένδυσης (Finger et al., 2019).

Η οικονομική βιωσιμότητα των ηλεκτρονικών παγίδων επηρεάζεται από τη δυσκολία εκτίμησης της πραγματικής απόδοσης της επένδυσης σε πραγματικές συνθήκες παραγωγής. Σε αρκετές περιπτώσεις, τα οφέλη των συστημάτων αυτών συνδέονται κυρίως με τη βελτίωση της παρακολούθησης, την καλύτερη οργάνωση των δεδομένων και την έγκαιρη λήψη αποφάσεων,

παρά με άμεση και εύκολα μετρήσιμη οικονομική αύξηση της παραγωγής. Η δυσκολία ποσοτικοποίησης αυτών των ωφελειών μπορεί να λειτουργήσει αποτρεπτικά για την ευρύτερη υιοθέτηση των τεχνολογιών από παραγωγούς περιορισμένων επενδυτικών δυνατοτήτων (Barnes et al., 2019).

Η εφαρμογή συστημάτων ψηφιακής παρακολούθησης προϋποθέτει συχνά βασικές γνώσεις διαχείρισης ψηφιακών εργαλείων και πρόσβαση σε τεχνική υποστήριξη. Η περιορισμένη εξοικείωση ορισμένων παραγωγών με τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την αποδοχή και την αποτελεσματική αξιοποίηση των ηλεκτρονικών παγίδων, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου η ψηφιακή γεωργία δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό (Pathak et al., 2019).

Οι οικονομικοί περιορισμοί υποδεικνύουν ότι η ευρύτερη εφαρμογή των ηλεκτρονικών παγίδων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις τεχνολογικές δυνατότητες των συστημάτων, αλλά και από ευρύτερους οικονομικούς και οργανωτικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη δυνατότητα υιοθέτησής τους από διαφορετικού τύπου γεωργικές εκμεταλλεύσεις. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών εξακολουθεί να εμφανίζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ παραγωγικών συστημάτων με διαφορετικό επίπεδο οικονομικής και τεχνολογικής ανάπτυξης.

3.6. Συγκριτική Αξιολόγηση Εμπορικών Συστημάτων

Πίνακας 3.2. Συγκριτική αξιολόγηση βασικών κατηγοριών ηλεκτρονικών παγίδων ως προς την επιχειρησιακή ωριμότητα και τους κύριους περιορισμούς εφαρμογής

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΒΑΘΜΟΣ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	ΣΥΝΔΕΣΙΜΟ ΤΗΤΑ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΩΡΙΜΟΤΗΤΑ	ΒΑΣΙΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ
Απλές ηλεκτρονικές παγίδες αισθητήρων	Μέτριος	Περιορισμένη	Μεσαία	Περιορισμένη ακρίβεια
Οπτικές παγίδες με κάμερα	Αυξημένος	Αυξημένη	Αυξημένη	Εξάρτηση από φωτισμό
Πολυαισθητηριακά συστήματα	Πολύ αυξημένος	Αυξημένη	Μεσαία	Υψηλό κόστος και πολυπλοκότητα
Συστήματα τεχνητής νοημοσύνης	Πολύ αυξημένος	Αυξημένη	Μεταβαλλόμενη	Ανάγκη εκπαίδευσης αλγορίθμων

Η συγκριτική αξιολόγηση δείχνει ότι η επιχειρησιακή ωριμότητα των ηλεκτρονικών παγίδων διαφοροποιείται σημαντικά μεταξύ των επιμέρους τεχνολογικών κατηγοριών. Τα συστήματα οπτικής παρακολούθησης με απομακρυσμένη διασύνδεση εμφανίζουν σήμερα τη μεγαλύτερη εμπορική ανάπτυξη, ενώ οι περισσότερο σύνθετες πολυαισθητηριακές πλατφόρμες και οι τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν περιορισμούς που σχετίζονται με το κόστος, τη συντήρηση και την αξιοπιστία λειτουργίας σε συνθήκες γεωργικής εφαρμογής.

3.7. Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων έχει εξελιχθεί σημαντικά κατά τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς τα συστήματα αυτά μεταβαίνουν σταδιακά από το στάδιο των ερευνητικών πρωτοτύπων προς περισσότερες οργανωμένες επιχειρησιακές εφαρμογές και εμπορικά διαθέσιμα συστήματα. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών τηλεμετρίας, ψηφιακής απεικόνισης, ασύρματης επικοινωνίας και τεχνητής νοημοσύνης έχει ενισχύσει σημαντικά τις δυνατότητες αυτοματοποιημένης παρακολούθησης και απομακρυσμένης διαχείρισης δεδομένων φυτοπροστασίας. Ως αποτέλεσμα, οι ηλεκτρονικές παγίδες εμφανίζουν πλέον αυξανόμενη παρουσία σε συστήματα γεωργίας ακριβείας και ψηφιακής επιτήρησης καλλιεργειών.

Παρά τη σημαντική τεχνολογική πρόοδο, η επιχειρησιακή ωριμότητα των συστημάτων παραμένει διαφοροποιημένη μεταξύ των επιμέρους τεχνολογικών κατηγοριών. Ζητήματα που σχετίζονται με το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας, τις απαιτήσεις τεχνικής συντήρησης, την ανάγκη περιοδικής βαθμονόμησης των αισθητήρων, τη σταθερότητα λειτουργίας σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών ψηφιακών πλατφορμών εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για τη μακροχρόνια και ευρείας κλίμακας εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών. Ταυτόχρονα, αξιοπιστία των συστημάτων αυτόματης αναγνώρισης εξακολουθεί να επηρεάζεται από ζητήματα που σχετίζονται με την ποιότητα των δεδομένων εκπαίδευσης και τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας στο πεδίο.

Ωστόσο, παρά τους περιορισμούς αυτούς, οι ηλεκτρονικές παγίδες αποκτούν σταδιακά αυξανόμενο ρόλο στη σύγχρονη φυτοπροστασία και στη διαχείριση γεωργικών δεδομένων. Η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης, απομακρυσμένης πρόσβασης στις πληροφορίες και ταχύτερης εκτίμησης των πληθυσμών εντόμων δημιουργεί σημαντικές προοπτικές αξιοποίησης των συστημάτων αυτών σε εφαρμογές ολοκληρωμένης διαχείρισης εχθρών, παρακολούθησης βιοποικιλότητας και υποστήριξης συστημάτων λήψης αποφάσεων. Το επόμενο κεφάλαιο εξετάζει αναλυτικότερα τις βασικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών παγίδων στη σύγχρονη γεωργική και περιβαλλοντική διαχείριση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΠΑΓΙΔΩΝ ΕΝΤΟΜΩΝ ΣΤΗ ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ, ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.1. Εισαγωγή στις Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Παγίδων Εντόμων

Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων έχει μεταβάλει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η παρακολούθηση των επιβλαβών οργανισμών στη σύγχρονη φυτοπροστασία. Ενώ οι συμβατικές παγίδες χρησιμοποιούνταν κυρίως για την περιοδική καταγραφή της παρουσίας ή της αφθονίας συγκεκριμένων εντόμων-στόχων, τα ηλεκτρονικά συστήματα επιτρέπουν τη συνεχή συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω περισσότερο συστηματικής και συνεχούς συλλογής δεδομένων. Ως αποτέλεσμα, οι ηλεκτρονικές παγίδες δεν λειτουργούν πλέον αποκλειστικά ως μέσα παγίδευσης,

αλλά ως ολοκληρωμένα συστήματα υποστήριξης της επιτήρησης και της λήψης αποφάσεων στη φυτοπροστασία (Potamitis et al., 2015; Lima et al., 2020).

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι κυριότερες εφαρμογές των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων στη φυτοπροστασία, στη βιοασφάλεια, στην παρακολούθηση της βιοποικιλότητας και στη διαχείριση δεδομένων.

4.2. Παρακολούθηση Πληθυσμών και Υποστήριξη της IPM

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η συμβολή των ηλεκτρονικών παγίδων στην υποστήριξη της IPM, καθώς η συνεχής παρακολούθηση των πληθυσμών των εντόμων επιτρέπει τη λήψη περισσότερο τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση των προσβολών. Η αξιοποίηση συχνότερης και συστηματικότερης συλλογής δεδομένων διευκολύνει την εφαρμογή στοχευμένων και ακριβέστερων παρεμβάσεων και συμβάλλει στον περιορισμό μη αναγκαίων επεμβάσεων, στοιχείο που συνδέεται άμεσα με τις αρχές της βιώσιμης γεωργίας και της περιβαλλοντικής προστασίας (Lima et al., 2020).

Η συνεχής ή περισσότερο συχνή καταγραφή των συλλήψεων επιτρέπει την καλύτερη παρακολούθηση των πληθυσμών μεταβολών των εντόμων κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται ευκολότερη η αναγνώριση περιόδων αυξημένης δραστηριότητας ή πληθυσμιακής αύξησης, γεγονός που μπορεί να υποστηρίξει τον ακριβέστερο χρονικό προσδιορισμό των επεμβάσεων φυτοπροστασίας. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στο πλαίσιο της IPM, καθώς συμβάλλει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων και στον περιορισμό περιττών εφαρμογών φυτοπροστατευτικών προϊόντων (Barzman et al., 2015; Damos, 2015).

Η δυνατότητα εγκατάστασης πολλαπλών ηλεκτρονικών παγίδων σε διαφορετικά σημεία μιας καλλιέργειας επιτρέπει τη συλλογή χωρικά κατανεμημένων δεδομένων σχετικά με την παρουσία και τη δραστηριότητα των εντόμων. Η προσέγγιση αυτή διευκολύνει την αναγνώριση περιοχών αυξημένης πίεσης προσβολής και συμβάλλει στην εφαρμογή περισσότερο στοχευμένων παρεμβάσεων φυτοπροστασίας. Στο πλαίσιο της Γεωργίας Ακριβείας, η αξιοποίηση χωρικών δεδομένων από δίκτυα ηλεκτρονικών παγίδων μπορεί να υποστηρίξει πρακτικές διαφοροποιημένης διαχείρισης και ακριβέστερης παρακολούθησης των πληθυσμών των εχθρών των καλλιεργειών (Sciarretta & Calabrese, 2019).

4.3. Προγνωστικά Μοντέλα και Συστήματα Υποστήριξης Λήψης

Αποφάσεων

Η ανάπτυξη σύγχρονων αλγορίθμων φυτοπροστασίας και συστημάτων υποστήριξης λήψης αποφάσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων πληροφοριών σχετικά με τη δυναμική των πληθυσμών των εντόμων. Με βάση τις απαιτήσεις αυτές, οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων συμβάλλουν ουσιαστικά στη συστηματική παρακολούθηση χωρικών και χρονικών μεταβολών που σχετίζονται με την παρουσία και τη δραστηριότητα των εντόμων-στόχων. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους παρακολούθησης, οι οποίες βασίζονται σε περιοδικές χειροκίνητες καταγραφές, τα ηλεκτρονικά συστήματα επιτρέπουν αυτοματοποιημένη συλλογή πληροφοριών υψηλής συχνότητας, γεγονός που αυξάνει την ακρίβεια των αναλυτικών και προγνωστικών μοντέλων (Potamitis et al., 2014).

Οι πληροφορίες που προέρχονται από ηλεκτρονικές παγίδες μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη συστημάτων πρόβλεψης πληθυσμιακών εξάρσεων και εκτίμησης του κινδύνου προσβολής καλλιεργειών. Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν συνήθως στοιχεία σχετικά με τις συλλήψεις εντόμων και περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η φωτοπερίοδος και άλλες κλιματικές μεταβλητές, με στόχο την εκτίμηση της εξέλιξης των πληθυσμών ή του χρόνου εμφάνισης κρίσιμων βιολογικών σταδίων. Η διασύνδεση αυτή διευκολύνει τη μετάβαση από περισσότερο αντιδραστικές πρακτικές φυτοπροστασίας σε προγνωστικές και προληπτικές στρατηγικές διαχείρισης (Sciarretta & Calabrese, 2019).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η αξιοποίηση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στην επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται από ηλεκτρονικές παγίδες. Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται για την αυτοματοποιημένη και ταξινόμηση εντόμων, καθώς και για την ταχύτερη επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών που προέρχονται από συστήματα παρακολούθησης πεδίου. Παράλληλα, η διαρκής τροφοδότηση των συστημάτων με νέες καταγραφές συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη υποστήριξη της λήψης αποφάσεων στη φυτοπροστασία (Εικόνα 4.1.) (Lima et al., 2020).



Εικόνα 4.1. Παράδειγμα αυτοματοποιημένου συστήματος οπτικών παγίδων της Semios για την παρακολούθηση εντομολογικών πληθυσμών σε δενδροκομικές καλλιέργειες, με ημερήσια καταγραφή εικόνων και αυτόματη καταμέτρηση εντόμων μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και διαδικασιών εντομολογικής επαλήθευσης. Πηγή: https://semios.com/our-hardware/automated-camera-traps/?utm_source= με άδεια χρήσης από τον Robert Fifer της ομάδας Semios.

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής των συστημάτων αυτών αποτελεί η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων πλατφορμών παρακολούθησης εντόμων, στις οποίες οι πληροφορίες που συλλέγονται από ηλεκτρονικές παγίδες αξιοποιούνται για την υποστήριξη συστημάτων πρόβλεψης και λήψης αποφάσεων στη φυτοπροστασία. Μέσω της συνεχούς συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, τα συστήματα αυτά μπορούν να συμβάλλουν στην έγκαιρη αναγνώριση μεταβολών των πληθυσμών των εντόμων και στην εκτίμηση του κινδύνου προσβολής των καλλιεργειών. Η αξιοποίηση τέτοιων ψηφιακών συστημάτων παρακολούθησης ενισχύει τη μετάβαση προς περισσότερο προγνωστικές και τεκμηριωμένες στρατηγικές διαχείρισης, στο πλαίσιο της Γεωργίας Ακριβείας και της σύγχρονης φυτοπροστασίας (Sciarretta & Calabrese, 2019; Damos, 2015).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η δυνατότητα δημιουργίας αυτοματοποιημένων ειδοποιήσεων και συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης. Μέσω της συνεχούς ανάλυσης των δεδομένων που λαμβάνονται από τα δίκτυα παγίδων, οι ηλεκτρονικές πλατφόρμες μπορούν να εντοπίζουν απότομες αυξήσεις πληθυσμών ή ασυνήθιστα πρότυπα δραστηριότητας και να αποστέλλουν ειδοποιήσεις σε παραγωγούς, γεωπόνους ή ερευνητές. Με τον τρόπο αυτό,

διευκολύνεται η ταχύτερη εφαρμογή μέτρων φυτοπροστασίας και περιορίζεται ο κίνδυνος εκτεταμένων προσβολών (Lima et al., 2020).

Μεταξύ των πιο διαδεδομένων εφαρμογών τέτοιων συστημάτων αποτελούν εμπορικές πλατφόρμες όπως το Trapview (Εικόνα 4.2.) και το Semios (Εικόνα 4.1.), οι οποίες συνδυάζουν ηλεκτρονικές παγίδες με τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης, τηλεμετρίας και διαδικτυακής παρακολούθησης. Οι πλατφόρμες αυτές επιτρέπουν την απομακρυσμένη πρόσβαση σε δεδομένα συλλήψεων, την αυτόματη αναγνώριση εντόμων, την παραγωγή αναλυτικών γραφημάτων πληθυσμιακής εξέλιξης και την αποστολή ειδοποιήσεων προς τους χρήστες. Επιπλέον, ορισμένα συστήματα υποστηρίζουν διασύνδεση μέσω API με άλλα λογισμικά διαχείρισης γεωργικών εκμεταλλεύσεων, διευκολύνοντας την ενσωμάτωση των δεδομένων σε ευρύτερα ψηφιακά οικοσυστήματα γεωργίας ακριβείας.



Η συγκέντρωση πληροφοριών από εκτεταμένα δίκτυα ηλεκτρονικών παγίδων επιτρέπει την ανάπτυξη δυναμικών συστημάτων χωρικής ανάλυσης και παρακολούθησης της εξάπλωσης εντόμων σε επίπεδο περιοχής ή καλλιεργητικού συστήματος. Η αξιοποίηση των δικτύων αυτών ενισχύει ουσιαστικά την ανάπτυξη ψηφιακών εργαλείων γεωργίας ακριβείας, καθώς παρέχει τη βάση για την εφαρμογή στοχευμένων παρεμβάσεων και διαφοροποιημένων πρακτικών

διαχείρισης ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και την πραγματική πίεση των πληθυσμών των εχθρών. Ως αποτέλεσμα, οι ηλεκτρονικές παγίδες συμβάλλουν όχι μόνο στην παρακολούθηση εντόμων, αλλά και στη διαμόρφωση περισσότερο ευφών και δυναμικά προσαρμοζόμενων συστημάτων φυτοπροστασίας.

Η σημασία των συστημάτων παρακολούθησης και πρόβλεψης αναδεικνύεται και από πρόσφατες συνθετικές αναλύσεις της βιβλιογραφίας για τον δάκο της ελιάς. Ειδικότερα, οι Balampekou et al., (2024) εξετάζοντας τη διεθνή ερευνητική δραστηριότητα των τελευταίων ετών, κατέγραψαν ως βασικούς άξονες διαχείρισης τη μαζική παγίδευση, τα ελκυστικά δολώματα και τις τεχνικές βιολογικής καταπολέμησης. Η καταγραφή αυτή υπογραμμίζει ότι η συστηματική συλλογή δεδομένων από το πεδίο αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για την ανάπτυξη αποτελεσματικών προγνωστικών εργαλείων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης φυτοπροστασίας.

4.4. Διαπίστωση της Παρουσίας Νέων ή Εισβλητικών Ειδών

Η ταχεία διαπίστωση της παρουσίας νέων ή εισβλητικών ειδών αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την αποτελεσματική φυτοπροστασία και τη διατήρηση της φυτοϋγειονομικής ασφάλειας αγροτικών και φυσικών οικοσυστημάτων. Η εντατικοποίηση του διεθνούς εμπορίου, η αυξημένη διακίνηση φυτικού υλικού και οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής έχουν συμβάλει σημαντικά στη γεωγραφική εξάπλωση πολλών εντόμων πέρα από τις φυσικές περιοχές κατανομής τους. Ως αποτέλεσμα, η ανάπτυξη συστημάτων ανίχνευσης και επιτήρησης νέων εχθρών έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία τα τελευταία χρόνια (Brockerhoff & Liebhold, 2017).

Υπό τις συνθήκες αυτές, οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων παρουσιάζουν ουσιαστικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους παρακολούθησης, καθώς επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη καταγραφή δεδομένων χωρίς να απαιτείται συχνή επιτόπια επιθεώρηση. Η συχνότερη και περισσότερο άμεση πρόσβαση στις πληροφορίες που συλλέγονται από τις παγίδες επιταχύνει την άμεση αναγνώριση ύποπτων παρουσιών και περιορίζει το χρονικό διάστημα μεταξύ της εμφάνισης ενός νέου είδους και της εφαρμογής διαχειριστικών μέτρων. Η λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις χωροκατακτητών ειδών υψηλής επικινδυνότητας για τις καλλιέργειες, όπου ακόμη και μικρές καθυστερήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε ταχεία εγκατάσταση και εξάπλωση πληθυσμών (Potamitis et al., 2014).

Επιπλέον, ορισμένα ηλεκτρονικά συστήματα παρακολούθησης μπορούν να υποστηρίξουν την ταχύτερη αναγνώριση μη αναμενόμενων ή ύποπτων ειδών μέσω αυτοματοποιημένης επεξεργασίας των δεδομένων που συλλέγονται από τις παγίδες. Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ σημαντική σε προγράμματα φυτοϋγειονομικής επιτήρησης και έγκαιρης προειδοποίησης, όπου η ταχεία διαπίστωση της παρουσίας ενός ξενικού ή εισβολικού είδους μπορεί να συμβάλλει στον περιορισμό της εγκατάστασης και εξάπλωσής του (Lima et al., 2020).

Χαρακτηριστική εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών αποτελεί η αξιοποίηση αυτοματοποιημένων ηλεκτρονικών παγίδων για την επιτήρηση οργανισμών φυτοϋγειονομικού ενδιαφέροντος, όπως η μύγα της Μεσογείου (*Ceratitis capitata*) και άλλα οικονομικά σημαντικά δίπτερα, στο πλαίσιο προγραμμάτων φυτοϋγειονομικού ελέγχου. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την απομακρυσμένη αξιολόγηση των συλλήψεων και διευκολύνουν την εφαρμογή μέτρων αντιμετώπισης πριν από τη μαζική εξάπλωση του οργανισμού (Sciarretta & Calabrese, 2019). Αντίστοιχα, τεχνολογίες αυτοματοποιημένης καταγραφής χρησιμοποιούνται και για την επιτήρηση λεπιδόπτρων και ξυλοφάγων εντόμων σε δασικά οικοσυστήματα, όπου η ταχεία αναγνώριση νέων προσβολών είναι καθοριστικής σημασίας για την προστασία της δασικής βλάστησης (Brockhoff & Liebhold, 2017).

Η χρήση των ηλεκτρονικών παγίδων σε προγράμματα επιτήρησης νέων ειδών συνδέεται επίσης με την ανάπτυξη εκτεταμένων δικτύων ψηφιακής επιτήρησης σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Μέσω της ασύρματης επικοινωνίας και της συγκέντρωσης πληροφοριών σε κεντρικές πλατφόρμες, καθίσταται εφικτή η χαρτογράφηση της χωρικής εξάπλωσης πληθυσμών εντόμων και η ταχύτερη αναγνώριση περιοχών αυξημένου κινδύνου. Η ανάπτυξη τέτοιων δικτύων ψηφιακής επιτήρησης ενισχύει σημαντικά τις δυνατότητες φυτοϋγειονομικής παρακολούθησης και υποστηρίζει την εφαρμογή στρατηγικών έγκαιρης προειδοποίησης και διαχείρισης βιολογικών κινδύνων σε εθνικό και περιφερειακό επίπεδο. Η δυνατότητα ταχύτερης ανίχνευσης και χωρικής παρακολούθησης των πληθυσμών συμβάλλει ουσιαστικά στην προστασία των καλλιεργειών και στον περιορισμό της εξάπλωσης ξενικών και εισβολικών ειδών.

4.5. Καταγραφή και Παρακολούθηση της Βιοποικιλότητας

Η παρακολούθηση της βιοποικιλότητας των εντόμων αποτελεί αντικείμενο αυξανόμενου επιστημονικού ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια, καθώς πολυάριθμες μελέτες αναφέρουν σημαντικές μεταβολές στην αφθονία και τη σύνθεση των εντομολογικών πληθυσμών σε φυσικά και αγροτικά οικοσυστήματα. Η συστηματική καταγραφή των εντόμων είναι ιδιαίτερα

σημαντική τόσο για την κατανόηση οικολογικών διεργασιών όσο και για την αξιολόγηση των επιδράσεων περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως η εντατικοποίηση της γεωργίας, η απώλεια ενδιαιτημάτων και η κλιματική αλλαγή (Hallmann et al., 2017; Didham et al., 2020).

Οι ηλεκτρονικές παγίδες μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη συλλογή δεδομένων βιοποικιλότητας, καθώς επιτρέπουν περισσότερο συστηματική και συχνή παρακολούθηση των εντομολογικών πληθυσμών σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Η δυνατότητα αυτοματοποιημένης καταγραφής μειώνει την ανάγκη συνεχούς ανθρώπινης παρουσίας στο πεδίο και διευκολύνει τη συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων σε μακροχρόνιες μελέτες παρακολούθησης. Επιπλέον, η χρήση δικτύων παγίδων σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές επιτρέπει τη συγκέντρωση χωρικά κατανεμημένων πληροφοριών σχετικά με τη σύνθεση και τη δραστηριότητα των εντομολογικών κοινοτήτων (Høye et al., 2021).

Τα τελευταία χρόνια οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο σε οικολογικές μελέτες που αφορούν επικονιαστές, νυκτόβια έντομα και άλλες ομάδες οργανισμών που λειτουργούν ως δείκτες περιβαλλοντικών μεταβολών. Ταυτόχρονα, μπορούν να αξιοποιηθούν σε προστατευόμενα οικοσυστήματα και προγράμματα περιβαλλοντικής επιτήρησης, όπου απαιτείται συνεχής ή μεγάλης χρονικής διάρκειας παρακολούθηση της εντομοπανίδας. Η συστηματική συλλογή δεδομένων μπορεί να συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της εποχικής δραστηριότητας, της χωρικής κατανομής και των μεταβολών των πληθυσμών διαφορετικών ομάδων εντόμων (Bjerge et al., 2021).

Η αξιοποίηση των ηλεκτρονικών παγίδων σε μελέτες βιοποικιλότητας παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Η μεγάλη ποικιλία μορφολογικών χαρακτηριστικών μεταξύ των ειδών, η παρουσία πολυάριθμων μη-στόχων οργανισμών και οι δυσκολίες αυτόματης αναγνώρισης εντόμων σε σύνθετα φυσικά περιβάλλοντα μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια της καταγραφής και της ταξινόμησης. Επιπλέον, η οικολογική ερμηνεία των δεδομένων απαιτεί συχνά συνδυασμό των πληροφοριών από τις παγίδες με περιβαλλοντικά και βιοκλιματικά δεδομένα πεδίου (Høye et al., 2021; Didham et al., 2020).

Η χρήση οπτικών και βιοακουστικών συστημάτων επιτρέπει επίσης τη μη καταστροφική παρακολούθηση ορισμένων ομάδων εντόμων, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό σε μελέτες διατήρησης της βιοποικιλότητας. Σε αντίθεση με ορισμένες συμβατικές μεθόδους συλλογής, οι οποίες οδηγούν στη θανάτωση μεγάλου αριθμού οργανισμών, τα ηλεκτρονικά συστήματα μπορούν σε ορισμένες περιπτώσεις να καταγράφουν και να αναγνωρίζουν τα έντομα χωρίς να

απαιτείται φυσική σύλληψη ή καταστροφή τους. Η δυνατότητα αυτή θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμη για την παρακολούθηση προστατευόμενων ή σπάνιων ειδών και για την εφαρμογή περισσότερο φιλικών προς το περιβάλλον πρωτοκόλλων δειγματοληψίας (Lima et al., 2020).

4.6. Παρακολούθηση Πληθυσμών Εντόμων σε Αποθηκευμένους Χώρους

Η παρουσία εντόμων σε αποθηκευμένα γεωργικά προϊόντα αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για τη διατήρηση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων, καθώς οι προσβολές μπορούν να οδηγήσουν σε ποσοτικές απώλειες, υποβάθμιση της ποιότητας των προϊόντων και αύξηση του κόστους διαχείρισης κατά την αποθήκευση και διακίνηση. Έντομα όπως τα κολεόπτερα και τα λεπιδόπτερα των αποθηκευμένων προϊόντων αναπτύσσονται συχνά σε σιτηρά, όσπρια, αλεύρια και άλλες φυτικές πρώτες ύλες, ενώ πολλές προσβολές μπορούν να εξελιχθούν χωρίς εμφανή συμπτώματα στα αρχικά στάδια ανάπτυξής τους (Hagstrum et al., 2012).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ακουστικά και βιοακουστικά συστήματα παρακολούθησης, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση της δραστηριότητας εντόμων στο εσωτερικό αποθηκευμένων προϊόντων ή δομών αποθήκευσης. Η καταγραφή δονήσεων, κινήσεων ή ακουστικών σημάτων που παράγονται από τη δραστηριότητα των εντόμων μπορεί να συμβάλλει στην αναγνώριση κρυφών προσβολών, οι οποίες συχνά είναι δύσκολο να εντοπιστούν μέσω συμβατικών μεθόδων επιθεώρησης (Mankin et al., 2011). Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί συστήματα που συνδυάζουν φερομονικές παγίδες με αισθητήρες ή συστήματα ψηφιακής καταγραφής για την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση εντόμων σε αποθηκευτικούς χώρους (Potamitis et al., 2014).

Ηλεκτρονικά συστήματα παρακολούθησης εφαρμόζονται και σε βιομηχανικά ή εμπορικά περιβάλλοντα, όπως εγκαταστάσεις επεξεργασίας και αποθήκευσης τροφίμων, όπου η παρουσία εντόμων αποτελεί σημαντικό ζήτημα ποιότητας και ασφάλειας. Στις περιπτώσεις αυτές, οι ηλεκτρονικές παγίδες χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της υγειονομικής παρακολούθησης και στη συμμόρφωση με πρότυπα ασφάλειας και ποιότητας τροφίμων (Hagstrum et al., 2012).

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες των συστημάτων αυτών, η εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες αποθήκευσης παρουσιάζει και ορισμένες δυσκολίες, όπως η παρουσία περιβαλλοντικού θορύβου, οι μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας και η δυσκολία διάκρισης διαφορετικών ειδών εντόμων σε σύνθετα περιβάλλοντα αποθήκευσης. Επιπλέον, η αξιοπιστία

των καταγραφών μπορεί να επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά των αποθηκευμένων προϊόντων και τη δομή των χώρων αποθήκευσης (Mankin et al., 2011).

4.7. Δημόσια Υγεία και Επιδημιολογική Επιτήρηση

Η παρακολούθηση εντόμων που λειτουργούν ως φορείς παθογόνων οργανισμών αποτελεί σημαντικό τμήμα της σύγχρονης επιδημιολογικής επιτήρησης και της προστασίας της δημόσιας υγείας. Έντομα όπως τα κουνούπια μπορούν να μεταδώσουν παθογόνους οργανισμούς που σχετίζονται με σοβαρά νοσήματα ανθρώπων και ζώων, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα σημαντική τη συστηματική παρακολούθηση της παρουσίας και της χωρικής εξάπλωσής τους. Η αύξηση της κινητικότητας πληθυσμών, οι μεταβολές των κλιματικών συνθηκών και η εξάπλωση ξενικών ειδών εντόμων έχουν ενισχύσει το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη αποτελεσματικότερων συστημάτων επιτήρησης εντόμων υγειονομικής σημασίας (ECDC, 2012; WHO, 2017).

Στο πλαίσιο αυτό, οι ηλεκτρονικές παγίδες μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη συστηματική παρακολούθηση πληθυσμών εντόμων- φορέων μέσω συνεχούς ή συχνότερης συλλογής δεδομένων σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Η δυνατότητα ταχύτερης καταγραφής των μεταβολών των πληθυσμών μπορεί να υποστηρίξει την έγκαιρη αναγνώριση περιοχών αυξημένου κινδύνου και να συμβάλλει στη βελτίωση των στρατηγικών επιδημιολογικής επιτήρησης. Παράλληλα, η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων συστημάτων αναγνώρισης και καταγραφής εντόμων διευκολύνει τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων από δίκτυα παρακολούθησης και υποστηρίζει την αποτελεσματικότερη επιτήρηση εντόμων υγειονομικής σημασίας (González- Perez et al., 2024).

Η αξιοποίηση δικτύων ηλεκτρονικών παγίδων χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο σε προγράμματα παρακολούθησης κουνουπιών και άλλων εντόμων υγειονομικής σημασίας, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπάρχει αυξημένος κίνδυνος εμφάνισης νοσημάτων που μεταδίδονται μέσω αρθρώπων. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να αξιοποιηθούν για τη χαρτογράφηση της παρουσίας των πληθυσμών, την παρακολούθηση εποχικών μεταβολών και την υποστήριξη προγραμμάτων έγκαιρης προειδοποίησης και διαχείρισης επιδημιολογικών κινδύνων (González- Perez et al., 2024; ECDC, 2012).

Η εφαρμογή των συστημάτων αυτών σε πραγματικές συνθήκες επιδημιολογικής επιτήρησης συνοδεύεται και από ορισμένες προκλήσεις, όπως η δυσκολία διάκρισης μορφολογικά παρόμοιων ειδών, οι περιβαλλοντικές επιδράσεις στη δραστηριότητα των εντόμων και οι

διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών και οικοσυστημάτων. Επιπρόσθετα, η αποτελεσματική αξιοποίηση των δεδομένων απαιτεί συχνά συνδυασμό πληροφοριών από διαφορετικά συστήματα παρακολούθησης και περιβαλλοντικές μεταβλητές (WHO, 2017).

4.8. Βάσεις Δεδομένων και Αποθετήρια Στοιχείων για Μελλοντική Χρήση

Η συνεχής λειτουργία των ηλεκτρονικών παγίδων οδηγεί στην παραγωγή μεγάλου όγκου δεδομένων που σχετίζονται με την παρουσία, τη δραστηριότητα και τις μεταβολές των πληθυσμών των εντόμων σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Η συστηματική συλλογή των πληροφοριών αυτών δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης οργανωμένων βάσεων δεδομένων και ψηφιακών αποθετηρίων, στα οποία τα δεδομένα μπορούν να αποθηκεύονται, να διαχειρίζονται και να αξιοποιούνται για μελλοντικές εφαρμογές και ερευνητικούς σκοπούς (Sciarretta & Calabrese, 2019).

Η διασύνδεση αυτή βασίζεται συνήθως σε τεχνολογίες τηλεμετρίας, ασύρματων αισθητήρων και υπολογιστικών νεφών (cloud computing), μέσω των οποίων τα δεδομένα αποθηκεύονται, οργανώνονται και αναλύονται σε κεντρικές βάσεις δεδομένων. Οι πληροφορίες που συλλέγονται μπορεί να περιλαμβάνουν τον αριθμό συλλήψεων, εικόνες εντόμων, ακουστικά σήματα, γεωγραφικές συντεταγμένες, καθώς και περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως θερμοκρασία και υγρασία. Η συγκέντρωση των δεδομένων αυτών σε ενιαίες πλατφόρμες επιτρέπει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων παρακολούθησης και υποστήριξης λήψης αποφάσεων για τη φυτοπροστασία και τη γεωργία ακριβείας (Sciarretta & Calabrese, 2019).

Η δημιουργία μακροχρόνιων συνόλων δεδομένων μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη μελέτη των πληθυσμιακών μεταβολών των εντόμων και στην κατανόηση της επίδρασης περιβαλλοντικών ή κλιματικών παραγόντων στη δυναμική των πληθυσμών. Παράλληλα, τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για συγκριτικές αναλύσεις μεταξύ διαφορετικών περιοχών και χρονικών περιόδων, καθώς και για την ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων και συστημάτων υποστήριξης λήψης αποφάσεων στη φυτοπροστασία (Damos, 2015).

Η διασύνδεση δικτύων ηλεκτρονικών παγίδων με ψηφιακές πλατφόρμες παρακολούθησης διευκολύνει τη συγκέντρωση και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών φορέων και προγραμμάτων επιτήρησης. Η δυνατότητα συγκέντρωσης δεδομένων από πολλαπλές γεωγραφικές περιοχές μπορεί να υποστηρίξει την ανάπτυξη δικτύων μεγάλης κλίμακας για την

παρακολούθηση γεωργικών εχθρών, εισβολικών ειδών ή εντόμων υγειονομικής σημασίας. Η αποτελεσματική διαχείριση των δεδομένων αυτών παρουσιάζει και ορισμένες προκλήσεις, όπως η ανάγκη τυποποίησης των πληροφοριών, η διασφάλιση της ποιότητας των καταγραφών, η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και η διαχείριση πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων. Επιπλέον, η αξιοποίηση των πληροφοριών αυτών απαιτεί συχνά συνδυασμό δεδομένων από διαφορετικές πηγές και συστήματα παρακολούθησης (ECDC, 2012).

Η συνεχής παραγωγή μεγάλων όγκων δεδομένων δημιουργεί νέες δυνατότητες για την εφαρμογή τεχνικών ανάλυσης μεγάλων δεδομένων και τεχνητής νοημοσύνης στη φυτοπροστασία. Η συσχέτιση δεδομένων από ηλεκτρονικές παγίδες με μετεωρολογικά στοιχεία, δορυφορικές πληροφορίες και καλλιεργητικά δεδομένα επιτρέπει την ανάπτυξη περισσότερο σύνθετων και δυναμικών μοντέλων πρόγνωσης, ενισχύοντας τη μετάβαση προς πιο ψηφιοποιημένα και ευφυή συστήματα γεωργικής διαχείρισης.

Πίνακας 4.1. Βασικές εφαρμογές και λειτουργικές δυνατότητες των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων

ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΚΥΡΙΑ ΧΡΗΣΗ	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΑΞΙΑ
Παρακολούθηση πληθυσμών και IPM	Συνεχής καταγραφή πληθυσμών	Στοχευμένη φυτοπροστασία
Προγνωστικά μοντέλα και DSS	Ανάλυση δεδομένων πραγματικού χρόνου	Πρόβλεψη προσβολών
Ξενικά και εισβολικά είδη	Έγκαιρη ανίχνευση παρουσίας	Φυτοϋγειονομική επιτήρηση
Βιοποικιλότητα	Οικολογική καταγραφή	Περιβαλλοντικές μελέτες
Αποθηκευμένοι χώροι	Ανίχνευση κρυφών προσβολών	Υγειονομικός έλεγχος τροφίμων
Δημόσια υγεία	Επιτήρηση εντόμων- φορέων	Επιδημιολογική παρακολούθηση
Βάσεις δεδομένων	Συγκέντρωση αξιοποίηση δεδομένων	Ψηφιακά δίκτυα επιτήρησης

4.9. Συμπερασματική Αποτίμηση των Εφαρμογών των Ηλεκτρονικών Παγίδων

Οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων αποτελούν πλέον βασικά στοιχεία των σύγχρονων συστημάτων ψηφιακής φυτοπροστασίας και περιβαλλοντικής επιτήρησης, καθώς η εξέλιξη των αισθητήρων, της τηλεμετρίας και της τεχνητής νοημοσύνης έχει μετασχηματίσει ουσιαστικά τον τρόπο συλλογής, επεξεργασίας και αξιοποίησης εντομολογικών δεδομένων. Η ενσωμάτωση

ψηφιακών καμερών, αυτοματοποιημένων συστημάτων αναγνώρισης και τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας έχει διευρύνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογών των ηλεκτρονικών παγίδων, επιτρέποντας τη χρήση τους όχι μόνο στη φυτοπροστασία, αλλά και στη βιοασφάλεια, τη γεωργία ακριβείας, την οικολογική παρακολούθηση και τις μελέτες βιοποικιλότητας (Sciarretta & Calabrese, 2019; Lima et al., 2020).

Η δυνατότητα συνεχούς και αυτοματοποιημένης συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταβάλλει ουσιαστικά τη λογική της σύγχρονης φυτοπροστασίας, καθώς επιτρέπει τη μετάβαση από περιοδικές και κυρίως αντιδραστικές πρακτικές παρακολούθησης προς περισσότερο προγνωστικά και δυναμικά συστήματα διαχείρισης. Η έγκαιρη ανίχνευση πληθυσμιακών μεταβολών, η ταχύτερη διαπίστωση νέων ή εισβλητικών ειδών και η συνεχής τροφοδότηση συστημάτων πρόβλεψης και υποστήριξης λήψης αποφάσεων ενισχύουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα των στρατηγικών IPM. Ως αποτέλεσμα, καθίσταται δυνατή η εφαρμογή περισσότερο στοχευμένων παρεμβάσεων φυτοπροστασίας, με παράλληλη μείωση μη αναγκαίων εφαρμογών φυτοπροστατευτικών προϊόντων και περιορισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των γεωργικών πρακτικών (Potamitis et al., 2015; Barzman et al., 2015).

Η διασύνδεση των ηλεκτρονικών παγίδων με ψηφιακές πλατφόρμες, υπολογιστικά νέφη και συστήματα γεωργίας ακριβείας ενισχύει τη μετάβαση προς περισσότερο ψηφιοποιημένα και δεδομενοκεντρικά μοντέλα γεωργικής διαχείρισης. Η συνεχής συγκέντρωση και ανάλυση μεγάλων όγκων πληροφοριών επιτρέπει την εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης και ανάλυσης μεγάλων δεδομένων, μέσω των οποίων καθίσταται δυνατή η ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων πρόγνωσης, η αυτοματοποιημένη αναγνώριση προτύπων δραστηριότητας των εντόμων και η βελτίωση της ακρίβειας των συστημάτων υποστήριξης λήψης αποφάσεων. Η εξέλιξη αυτή αναδεικνύει τις ηλεκτρονικές παγίδες όχι μόνο ως μέσα παρακολούθησης, αλλά ως βασικά στοιχεία των ευρύτερων ψηφιακών υποδομών της σύγχρονης γεωργίας και περιβαλλοντικής επιτήρησης (Lima et al., 2020).

Ωστόσο, παρά τη σημαντική τεχνολογική πρόοδο των τελευταίων ετών, η ευρεία αξιοποίηση των ηλεκτρονικών παγίδων εξακολουθεί να συνοδεύεται από σημαντικές τεχνικές, οικονομικές και λειτουργικές προκλήσεις. Παράγοντες όπως το υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, η ανάγκη εξειδικευμένης τεχνικής υποστήριξης, οι απαιτήσεις ενεργειακής και δικτυακής υποδομής, καθώς και οι περιορισμοί στην ακρίβεια και αξιοπιστία των αλγορίθμων αναγνώρισης, μπορούν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα και τη δυνατότητα ευρείας εφαρμογής των

συστημάτων αυτών. Η απόδοση των ηλεκτρονικών παγίδων συχνά εξαρτάται από περιβαλλοντικούς παράγοντες, τη βιολογία των εντόμων-στόχων και την ποιότητα των δεδομένων εκπαίδευσης που χρησιμοποιούνται στα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη συνεχούς βελτιστοποίησης και προσαρμογής των τεχνολογιών αυτών στις πραγματικές συνθήκες πεδίου (Preti et al., 2021).

Η ευρύτερη σημασία των τεχνολογιών παρακολούθησης αποτυπώνεται και σε πρόσφατες χαρτογραφήσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας. Εξετάζοντας τις διαθέσιμες στρατηγικές διαχείρισης του δάκου της ελιάς, αναδείχθηκε ότι οι μέθοδοι παρακολούθησης και παγίδευσης αποτελούν βασικό συστατικό των σύγχρονων προγραμμάτων φυτοπροστασίας και λειτουργούν συμπληρωματικά με βιολογικές, βιοτεχνολογικές και χημικές μεθόδους αντιμετώπισης. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει ότι η αποτελεσματική διαχείριση των εχθρών των καλλιεργειών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων παρακολούθησης και από την ικανότητα έγκαιρης αξιοποίησής τους στη λήψη αποφάσεων (Balampekou et al., 2024).

Συνοψίζοντας, οι ηλεκτρονικές παγίδες έχουν εξελιχθεί από απλά συστήματα παρακολούθησης σε ολοκληρωμένες ψηφιακές πλατφόρμες συλλογής και αξιοποίησης δεδομένων, καθώς συνδυάζουν δυνατότητες αυτοματοποιημένης παρακολούθησης, ανάλυσης δεδομένων και υποστήριξης λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Η συνεχής πρόοδος στους τομείς των αισθητήρων, της τεχνητής νοημοσύνης, των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας και των συστημάτων ανάλυσης μεγάλων δεδομένων αναμένεται να ενισχύσει περαιτέρω τον ρόλο των τεχνολογιών αυτών στη διαχείριση αγροτικών και φυσικών οικοσυστημάτων. Παράλληλα, η αυξανόμενη διασύνδεση των ηλεκτρονικών παγίδων με πλατφόρμες γεωργίας ακριβείας, υποδομές περιβαλλοντικής επιτήρησης και ευφυή συστήματα λήψης αποφάσεων υποδηλώνει ότι τα συστήματα αυτά θα αποτελέσουν στο μέλλον βασικά στοιχεία των ολοκληρωμένων ψηφιακών υποδομών βιώσιμης γεωργικής και περιβαλλοντικής διαχείρισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

5.1. Γενική Αποτίμηση της Διατριβής

Από την παρούσα διατριβή προέκυψε ότι οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων αποτελούν μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις της σύγχρονης φυτοπροστασίας, καθώς συνδυάζουν δυνατότητες παρακολούθησης, καταγραφής και διαχείρισης εντομολογικών

δεδομένων με τεχνολογίες αυτοματοποίησης και ψηφιακής επεξεργασίας πληροφοριών. Η ανάπτυξή τους συνδέεται άμεσα με τη σταδιακή μετάβαση της γεωργίας προς περισσότερο τεκμηριωμένες, στοχευμένες και βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης των εχθρών των καλλιεργειών, στο πλαίσιο της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης Εχθρών και της γεωργίας ακριβείας (Barzman et al., 2015).

Η μελέτη των επιμέρους τεχνολογικών κατηγοριών έδειξε ότι οι ηλεκτρονικές παγίδες δεν αποτελούν μια ενιαία τεχνολογία, αλλά περιλαμβάνουν διαφορετικές προσεγγίσεις με διακριτά χαρακτηριστικά, δυνατότητες και βαθμό τεχνολογικής ωριμότητας. Παρότι τα συστήματα αυτά διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο ανίχνευσης, καταγραφής και επεξεργασίας των δεδομένων, κοινό τους στοιχείο αποτελεί η δυνατότητα αυτοματοποίησης της παρακολούθησης των εντομολογικών πληθυσμών και η παραγωγή ψηφιακής πληροφορίας που μπορεί να αξιοποιηθεί στη φυτοπροστασία.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε προέκυψε ότι η σημασία των ηλεκτρονικών παγίδων δεν περιορίζεται μόνο στη διευκόλυνση της καταγραφής των συλλήψεων. Η δυνατότητα διασύνδεσής τους με συστήματα αποθήκευσης, επεξεργασίας και αξιοποίησης δεδομένων ενισχύει ουσιαστικά τις δυνατότητες παρακολούθησης των πληθυσμών των εντόμων και δημιουργεί προϋποθέσεις για περισσότερο έγκαιρη και τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της σύγχρονης φυτοπροστασίας.

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια, η ευρύτερη εφαρμογή των ηλεκτρονικών παγίδων εξακολουθεί να επηρεάζεται από ορισμένους τεχνολογικούς, οικονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Οι προκλήσεις αυτές δεν μειώνουν τη σημασία των συστημάτων αυτών, αλλά αναδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω τεχνολογικής εξέλιξης και βελτίωσης, ώστε να καταστούν ακόμη περισσότερο αξιόπιστα, προσβάσιμα και προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις της γεωργικής πράξης.

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης υποδεικνύουν ότι οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων αποτελούν ένα ιδιαίτερα εξελισσόμενο και στρατηγικής σημασίας εργαλείο της σύγχρονης φυτοπροστασίας. Η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης, αυτοματοποιημένης συλλογής δεδομένων και υποστήριξης τεκμηριωμένων αποφάσεων αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά τον ρόλο τους στα μελλοντικά συστήματα γεωργικής διαχείρισης. Παράλληλα, η περαιτέρω εξέλιξη των αισθητήρων, των συστημάτων επικοινωνίας και των τεχνολογιών ανάλυσης δεδομένων εκτιμάται ότι θα συμβάλει στην ακόμη μεγαλύτερη επιχειρησιακή αξιοποίηση και

πρακτική εφαρμογή των ηλεκτρονικών παγίδων σε διαφορετικά αγροτικά και περιβαλλοντικά συστήματα.

5.2. Κύρια Συμπεράσματα

Από την τεχνολογική αξιολόγηση των επιμέρους κατηγοριών ηλεκτρονικών παγίδων προέκυψε ότι κάθε τεχνολογική προσέγγιση παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Τα οπτικά συστήματα με κάμερες εμφανίζουν υψηλή επιχειρησιακή ωριμότητα και σημαντικές δυνατότητες απομακρυσμένης παρακολούθησης, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με τεχνολογίες αυτόματης ανάλυσης εικόνας και τηλεμετρίας. Αντίθετα, περισσότερο εξειδικευμένα συστήματα, όπως τα βιοακουστικά και πολυαισθητηριακά συστήματα, παρουσιάζουν αυξημένες δυνατότητες ανάλυσης και επεξεργασίας δεδομένων, αλλά εξακολουθούν σε αρκετές περιπτώσεις να βρίσκονται σε μεταβατικό στάδιο μεταξύ ερευνητικής ανάπτυξης και επιχειρησιακής αξιοποίησης (Potamitis et al., 2015; Teixeira et al., 2023).

Διαπιστώθηκε ότι η αξία των ηλεκτρονικών παγίδων δεν περιορίζεται αποκλειστικά στην καταγραφή παρουσίας εντόμων, αλλά επεκτείνεται στην υποστήριξη τεκμηριωμένων στρατηγικών διαχείρισης στο πλαίσιο της Ολοκληρωμένης Αντιμετώπισης Εχθρών. Η δυνατότητα συχνότερης παρακολούθησης των πληθυσμών, η συλλογή χωρικά και χρονικά κατανεμημένων δεδομένων και η ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της λήψης αποφάσεων και στον ακριβέστερο χρονικό προσδιορισμό των παρεμβάσεων φυτοπροστασίας (Barzman et al., 2015; Sciarretta & Calabrese, 2019).

Κατέστη επίσης σαφές ότι οι ηλεκτρονικές παγίδες ενσωματώνονται ολοένα και περισσότερο σε ευρύτερα ψηφιακά συστήματα γεωργικής διαχείρισης. Η διασύνδεσή τους με δίκτυα επικοινωνίας, διαδικτυακές πλατφόρμες και άλλα εργαλεία γεωργίας ακριβείας διευρύνει σημαντικά τον ρόλο τους ως τμήματα ολοκληρωμένων συστημάτων παρακολούθησης και υποστήριξης λήψης αποφάσεων.

5.3. Περιορισμοί και Προκλήσεις

Παρά τη σημαντική τεχνολογική πρόοδο που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια, η ευρεία επιχειρησιακή αξιοποίηση των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων εξακολουθεί να συνοδεύεται από ουσιαστικούς τεχνολογικούς, οικονομικούς και λειτουργικούς περιορισμούς. Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτών δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις δυνατότητες ανίχνευσης ή καταγραφής που διαθέτουν, αλλά επηρεάζεται και από παράγοντες που

σχετίζονται με την αξιοπιστία λειτουργίας, τη συντήρηση, τη συνδεσιμότητα, την ενεργειακή αυτονομία και τη δυνατότητα πρακτικής εφαρμογής τους σε πραγματικές συνθήκες πεδίου (Preti et al., 2021).

Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς αφορά το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας των ηλεκτρονικών παγίδων. Σε αντίθεση με αρκετές συμβατικές παγίδες χαμηλού κόστους, τα ηλεκτρονικά συστήματα απαιτούν την ενσωμάτωση αισθητήρων, συστημάτων τηλεμετρίας, πηγών ενέργειας, εξοπλισμού επικοινωνίας και, σε αρκετές περιπτώσεις, συνδρομητικών ψηφιακών υπηρεσιών και υποδομών διαχείρισης δεδομένων. Το αυξημένο οικονομικό κόστος μπορεί να περιορίσει την ευρύτερη εφαρμογή τους, ιδιαίτερα σε μικρές γεωργικές εκμεταλλεύσεις ή σε περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε τεχνολογικές υποδομές (Wolfert et al., 2017).

Ιδιαίτερα σημαντικές προκλήσεις σχετίζονται με τη συνδεσιμότητα και τη σταθερότητα των υποδομών επικοινωνίας. Η λειτουργία πολλών ηλεκτρονικών παγίδων βασίζεται στην ασύρματη μετάδοση δεδομένων μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας ή άλλων τεχνολογιών επικοινωνίας, γεγονός που δημιουργεί εξάρτηση από την ποιότητα του διαθέσιμου δικτύου. Σε απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές, όπου η κάλυψη δικτύου είναι περιορισμένη ή ασταθής, ενδέχεται να προκύπτουν προβλήματα καθυστερημένης μεταφοράς δεδομένων, απώλειας πληροφοριών ή μειωμένης λειτουργικότητας των συστημάτων (Jawad et al., 2017). Επιπλέον, η συνεχής λειτουργία αισθητήρων, καμερών και συστημάτων επικοινωνίας αυξάνει τις ενεργειακές απαιτήσεις των παγίδων, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση συστημάτων ενεργειακής υποστήριξης και τακτικής συντήρησης.

Η συντήρηση και η τεχνική υποστήριξη αποτελούν επίσης κρίσιμες παραμέτρους για τη μακροχρόνια λειτουργία των ηλεκτρονικών παγίδων. Η έκθεση του εξοπλισμού σε εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως σκόνη, υγρασία, βροχόπτωση, υψηλές θερμοκρασίες ή έντονη ηλιακή ακτινοβολία, μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των αισθητήρων και τη συνολική αξιοπιστία των συστημάτων. Η ανάγκη περιοδικής βαθμονόμησης, αντικατάστασης εξαρτημάτων ή τεχνικής υποστήριξης αυξάνει τη λειτουργική πολυπλοκότητα και τις απαιτήσεις διαχείρισης των συστημάτων και περιορίζει σε ορισμένες περιπτώσεις την ευκολία χρήσης τους στη γεωργική πράξη.

Ιδιαίτερη πρόκληση εξακολουθεί να αποτελεί και η αξιοπιστία των συστημάτων αυτόματης αναγνώρισης και ταξινόμησης εντόμων. Παρότι οι τεχνολογίες μηχανικής μάθησης και

ανάλυσης εικόνας παρουσιάζουν σημαντική πρόοδο, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επηρεάζεται συχνά από παράγοντες όπως η ποιότητα των εικόνων, οι μεταβολές φωτισμού, η παρουσία σωματιδίων ή υπολειμμάτων στην επιφάνεια των παγίδων και η μορφολογική ομοιότητα μεταξύ διαφορετικών ειδών εντόμων (Teixeira et al., 2023). Ως αποτέλεσμα, η πλήρης αυτοματοποίηση της διαδικασίας αναγνώρισης δεν θεωρείται ακόμη απόλυτα αξιόπιστη σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμογής.

Από τη διατριβή προέκυψε ότι η ανθρώπινη επιστημονική αξιολόγηση εξακολουθεί να διατηρεί καθοριστικό ρόλο στην ερμηνεία των συλλεγόμενων δεδομένων και στη λήψη αποφάσεων φυτοπροστασίας. Παρότι οι ηλεκτρονικές παγίδες μπορούν να υποστηρίξουν τη διαδικασία παρακολούθησης και να βελτιώσουν τη διαθεσιμότητα πληροφοριών, η ορθή αξιολόγηση των δεδομένων απαιτεί συχνά εξειδικευμένη γνώση σχετικά με τη βιολογία των εντόμων, τις συνθήκες της καλλιέργειας και τη δυναμική των πληθυσμών. Για τον λόγο αυτό, οι ηλεκτρονικές παγίδες δεν αντικαθιστούν πλήρως τον ρόλο του γεωπόνου ή του ερευνητή, αλλά λειτουργούν κυρίως ως υποστηρικτικά εργαλεία λήψης αποφάσεων.

Οι περιορισμοί που εντοπίζονται σήμερα δεν σχετίζονται με τη βασική λειτουργική αξία των ηλεκτρονικών παγίδων, αλλά κυρίως με τον βαθμό τεχνολογικής και επιχειρησιακής ωρίμανσής τους. Η αντιμετώπιση των ζητημάτων αυτών αναμένεται να καθορίσει τον ρυθμό με τον οποίο οι τεχνολογίες αυτές θα ενσωματωθούν ευρύτερα στη γεωργική πράξη και θα αξιοποιηθούν ως βασικά εργαλεία της ψηφιακής φυτοπροστασίας.

5.4. Μελλοντικές Προοπτικές

Η συνεχής εξέλιξη των ψηφιακών τεχνολογιών, των συστημάτων αισθητήρων και των μεθόδων ανάλυσης δεδομένων αναμένεται να επηρεάσει καθοριστικά τη μελλοντική ανάπτυξη των ηλεκτρονικών παγίδων εντόμων. Η πρόοδος που καταγράφεται στους τομείς της τεχνητής νοημοσύνης, της μηχανικής μάθησης, της ασύρματης επικοινωνίας και της γεωργίας ακριβείας δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη περισσότερο αυτοματοποιημένων, αξιόπιστων και διασυνδεδεμένων συστημάτων παρακολούθησης εντόμων (Wolfert et al., 2017).

Ήδη αρκετά σύγχρονα συστήματα αξιοποιούν τη βελτίωση των συστημάτων αυτόματης αναγνώρισης και ταξινόμησης εντόμων μέσω εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης και βαθιάς μάθησης. Η αξιοποίηση μεγαλύτερων και περισσότερο διαφοροποιημένων βάσεων δεδομένων εικόνων και βιοακουστικών σημάτων αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά την ακρίβεια των αλγορίθμων αναγνώρισης, περιορίζοντας τα σφάλματα ταξινόμησης και βελτιώνοντας τη

δυνατότητα διάκρισης μορφολογικά παρόμοιων ειδών εντόμων. Η εξέλιξη των υπολογιστικών δυνατοτήτων των συστημάτων πεδίου εκτιμάται ότι θα επιτρέψει την ταχύτερη επεξεργασία δεδομένων απευθείας στο πεδίο λειτουργίας των παγίδων, μειώνοντας την ανάγκη μεταφοράς μεγάλου όγκου πληροφοριών σε απομακρυσμένους εξυπηρετητές (Teixeira et al., 2023).

Ιδιαίτερη σημασία αναμένεται να αποκτήσει και η ανάπτυξη περισσότερο εξελιγμένων αισθητήρων και πολυαισθητηριακών συστημάτων. Ο συνδυασμός οπτικών, βιοακουστικών, περιβαλλοντικών και χημικών αισθητήρων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αξιοπιστία της ανίχνευσης και να επιτρέψει πληρέστερη καταγραφή της δραστηριότητας των εντόμων σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Η πρόοδος των τεχνολογιών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και των αυτόνομων ενεργειακών συστημάτων αναμένεται να ενισχύσει τη δυνατότητα μακροχρόνιας λειτουργίας των παγίδων σε απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές.

Μία ακόμη σημαντική προοπτική αφορά τη δημιουργία δικτύων διασυνδεδεμένων ηλεκτρονικών παγίδων σε μεγάλη γεωγραφική κλίμακα. Η διασύνδεση πολλαπλών συστημάτων παρακολούθησης μπορεί να επιτρέψει τη συλλογή χωρικά και χρονικά εκτεταμένων δεδομένων σχετικά με τη δυναμική των πληθυσμών των εντόμων, διευκολύνοντας την ανάπτυξη περισσότερο ακριβών προγνωστικών μοντέλων και συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης. Η δυνατότητα αυτή αναμένεται να αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία για την αντιμετώπιση εντόμων εισβολέων, την παρακολούθηση διαβιβαστών ασθενειών και τη διαχείριση εντομολογικών κινδύνων σε περιφερειακή ή εθνική κλίμακα (Sciarretta & Calabrese, 2019).

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών παγίδων σε πλατφόρμες γεωργίας ακριβείας και συστήματα ψηφιακής διαχείρισης καλλιεργειών εκτιμάται ότι θα ενισχυθεί σημαντικά τα επόμενα χρόνια. Η διασύνδεση δεδομένων από παγίδες με μετεωρολογικά δεδομένα, δορυφορικές πληροφορίες, γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και μοντέλα πρόβλεψης μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων υποστήριξης λήψης αποφάσεων. Μέσω αυτών των προσεγγίσεων αναμένεται να καταστεί δυνατή η ακριβέστερη αξιολόγηση του κινδύνου προσβολών και ο καλύτερος χρονικός προγραμματισμός των παρεμβάσεων φυτοπροστασίας (Barzman et al., 2015).

Ιδιαίτερα σημαντική αναμένεται να είναι η ανάπτυξη κοινών βάσεων δεδομένων και συνεργατικών δικτύων ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ ερευνητικών ιδρυμάτων, γεωργικών οργανισμών και παραγωγών. Η συγκέντρωση μεγάλου όγκου δεδομένων από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές και καλλιέργειες μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ερευνητική

αξιοποίηση των ηλεκτρονικών παγίδων και να συμβάλει στη βελτίωση των αλγορίθμων αναγνώρισης και πρόβλεψης. Παράλληλα, η ανάπτυξη περισσότερο ανοικτών και διαλειτουργικών συστημάτων ενδέχεται να διευκολύνει τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών τεχνολογικών πλατφορμών και εφαρμογών ψηφιακής γεωργίας.

Οι μελλοντικές προοπτικές των ηλεκτρονικών παγίδων συνδέονται στενά με την περαιτέρω ενσωμάτωση τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης, αυτοματοποιημένης ανάλυσης δεδομένων και δικτυωμένων συστημάτων παρακολούθησης. Η βελτίωση αυτή αναμένεται να ενισχύσει τον ρόλο των ηλεκτρονικών παγίδων ως βασικών εργαλείων της ψηφιακής φυτοπροστασίας και της γεωργίας ακριβείας, συμβάλλοντας στη μετάβαση προς περισσότερο προληπτικά, στοχευμένα και βιώσιμα συστήματα διαχείρισης των εντομολογικών πληθυσμών.

5.5. Τελικό Συμπέρασμα

Η παρούσα διατριβή κατέδειξε ότι οι ηλεκτρονικές παγίδες εντόμων αποτελούν ένα από τα πλέον δυναμικά και εξελισσόμενα εργαλεία της σύγχρονης φυτοπροστασίας, καθώς αντανakλούν τη σταδιακή μετάβαση της φυτοπροστασίας προς περισσότερο ψηφιακές, αυτοματοποιημένες και προληπτικές μορφές γεωργικής διαχείρισης. Η δυνατότητα συνεχούς συλλογής και αξιοποίησης δεδομένων δημιουργεί νέες προοπτικές για έγκαιρες, τεκμηριωμένες και στοχευμένες παρεμβάσεις φυτοπροστασίας, ενισχύοντας τη μετάβαση προς περισσότερο βιώσιμα και προληπτικά συστήματα γεωργικής διαχείρισης.

Τα ευρήματα της παρούσας διατριβής υποδηλώνουν ότι οι ηλεκτρονικές παγίδες δεν αποτελούν απλώς μια τεχνολογική εξέλιξη των συμβατικών συστημάτων παγίδευσης, αλλά μια ουσιαστική μεταβολή στον τρόπο με τον οποίο συλλέγονται, διαχειρίζονται και αξιοποιούνται τα εντομολογικά δεδομένα. Η δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης και συστηματικής αξιοποίησης πληροφοριών δημιουργεί νέες προοπτικές για περισσότερο τεκμηριωμένες και αποτελεσματικές στρατηγικές φυτοπροστασίας. Υπό το πρίσμα των σύγχρονων απαιτήσεων για βιώσιμη γεωργική παραγωγή, οι ηλεκτρονικές παγίδες αναμένεται να διαδραματίσουν ολοένα σημαντικότερο ρόλο ως βασικά εργαλεία παρακολούθησης και υποστήριξης της λήψης αποφάσεων στη φυτοπροστασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahmed, S., Marwat, S. N. K., Brahim, G. B., Khan, W. U., Khan, S., Al-Fuqaha, A., & Koziel, S. (2024). IoT based intelligent pest management system for precision agriculture. *Scientific Reports*, 14(1), 31917. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83012-3>

Aqeel-ur-Rehman, Abbasi, A. Z., Islam, N., & Shaikh, Z. A. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 36(2), 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.004>

Aubert, B. A., Schroeder, A., & Grimaudo, J. (2012). IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decision Support Systems*, 54(1), 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.07.002>

Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E.-H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access*, 7, 129551–129583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>

Balampekou, E. I., Koutsos, T. M., Menexes, G. C., Koveos, D. S., & Kouloussis, N. A. (2024). Pest management pathways: Control strategies for the olive fruit fly (*Bactrocera oleae*)—A systematic map. *Agronomy*, 14(12), 2929. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122929>

Banga, K. S., Kotwaliwale, N., Mohapatra, D., & Giri, S. K. (2018). *Techniques for insect detection in stored food grains: An overview*. *Food Control*, 94, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.07.008>

Barnes, A. P., Soto, I., Eory, V., Beck, B., Balafoutis, A., Sánchez, B., Vangeyte, J., & Fountas, S., van der Wal, T., & Gómez-Barbero, M (2019). Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. *Land Use Policy*, 80, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.10.004>

Barzman, M., Bàrberi, P., Birch, A. N. E., Boonekamp, P., Dachbrodt-Saaydeh, S., Graf, B., Hommel, B., Jensen, J. E., Kiss, J., Kudsk, P., Lamichhane, J. R., Messéan, A., Moonen,

A.-C., Ratnadass, A., Ricci, P., Sarah, J.-L., & Sattin, M. (2015). Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1199–1215. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0327-9>

Bjerge, K., Mann, H. M. R., & Høye, T. T. (2022). Real-time insect tracking and monitoring with computer vision and deep learning. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 8(3), 315–327. <https://doi.org/10.1002/rse2.245>

Bongiovanni, R., & Lowenberg-DeBoer, J. (2004). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, 5(4), 359–387. <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>

Brockerhoff, E. G., & Liebhold, A. M. (2017). Ecology of forest insect invasions. *Biological Invasions*, 19(11), 3141–3159. <https://doi.org/10.1007/s10530-017-1514-1>

Cai, L., Wang, L., Chen, H., Shao, Y., & Mu, H. (2022). Identification of biomarker volatile organic compounds released by three stored-grain insect pests in wheat. *Molecules*, 27(6), 1963. <https://doi.org/10.3390/molecules27061963>

Campbell, J. W., & Hanula, J. L. (2007). Efficiency of Malaise traps and colored pan traps for collecting flower visiting insects from three forested ecosystems. *Journal of Insect Conservation*, 11(4), 399–408. <https://doi.org/10.1007/s10841-006-9055-4>

Campos, M., & Phillips, T. W. (2014). Attract-and-kill and other pheromone-based methods to suppress populations of the Indianmeal moth (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Economic Entomology*, 107(1), 473–480. <https://doi.org/10.1603/EC13451>

Cardé, R. T., & Elkinton, J. S. (1984). Field trapping with attractants: Methods and interpretation. In H. E. Hummel & T. A. Miller (Eds.), *Techniques in pheromone research* (pp. 111–129). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-5220-7_4

Cardim Ferreira Lima, M., Damascena de Almeida Leandro, M. E., Valero, C., Pereira Coronel, L. C., & Gonçalves Bazzo, C. O. (2020). Automatic detection and monitoring of

insect pests—A review. *Agriculture*, 10(5), 161.

<https://doi.org/10.3390/agriculture10050161>

Carson, R. (1962). *Silent spring*. Houghton Mifflin.

Castrignanò, A., L. Boccaccio, Y. Cohen, D. Nestel, I. Kounatidis, N. Papadopoulos, D. De Benedetto & P. Mavragani-Tsipidou (2012). Spatio-temporal population dynamics and area-wide delineation of *Bactrocera oleae* monitoring zones using multi-variate geostatistics. *Precision Agriculture* 13(4): 421–441. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9259-4>

Ciampi, L., Zeni, V., Incrocci, L., Canale, A., Benelli, G., Falchi, F., Amato, G., & Chessa, S. (2023). A deep learning-based pipeline for whitefly pest abundance estimation on chromotropic sticky traps. *Ecological Informatics*, 78, 102384. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102384>

Cook, S. M., Khan, Z. R., & Pickett, J. A. (2007). The use of push–pull strategies in integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 52, 375–400. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.52.110405.091407>

Damos, P. (2015). Modular structure of web-based decision support systems for integrated pest management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1347–1372. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0319-9>

Dent, D. (2000). *Insect pest management* (2nd ed.). CABI Publishing.

Didham, R. K., Basset, Y., Collins, C. M., Leather, S. R., Littlewood, N. A., Menz, M. H. M., Müller, J., Packer, L., Saunders, M. E., Schönrogge, K., Stewart, A. J. A., Yanoviak, S. P., & Hassall, C. (2020). Interpreting insect declines: Seven challenges and a way forward. *Insect Conservation and Diversity*, 13(2), 103–114. <https://doi.org/10.1111/icad.12408>

Diller, Y., A. Shamsian, B. Shaked, Y. Altman, B.-C. Danziger, A. Manrakhan, L. Serfontein, E. Bali, M. Wernicke and A. Egartner, M. Colacci, A. Sciarretta, G. Chechik, V. Alchanatis, N. T. Papadopoulos, D. Nestel. (2023). A real-time remote surveillance system for fruit flies of economic importance: sensitivity and image analysis. *Journal of Pest Science* 96(2): 611–622. <https://doi.org/10.1007/s10340-022-01528-x>

Ding, W., & Taylor, G. (2016). Automatic moth detection from trap images for pest management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 17–28.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.003>

Domingues, T., Figueiredo, M., Aragão, H., & Aguiar, A. (2022). Insect detection in sticky trap images of tomato crops using deep learning. *Agriculture*, 12(11), 1967.

<https://doi.org/10.3390/agriculture12111967>

Eastwood, C., Klerkx, L., Ayre, M., & Dela Rue, B. (2017). Managing socio-ethical challenges in the development of smart farming: From a fragmented to a comprehensive approach for responsible research and innovation. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 30(5), 741–768. <https://doi.org/10.1007/s10806-017-9704-5>

European Commission. (2020). *Farm to Fork Strategy: For a fair, healthy and environmentally-friendly food system*.

European Centre for Disease Prevention and Control. (2012). Guidelines for the surveillance of invasive mosquitoes in Europe. *Publications Office of the European Union*.

Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5), 3758–3773.

<https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844296>

El-Sayed, A. M., Suckling, D. M., Wearing, C. H., & Byers, J. A. (2006). Potential of mass trapping for long-term pest management and eradication of invasive species. *Journal of Economic Entomology*, 99(5), 1550–1564. <https://doi.org/10.1093/jee/99.5.1550>

Eliopoulos, P. A., Potamitis, I., & Rigakis, I. (2018). Automated detection and monitoring of grain beetles using a “smart” pitfall trap. *Julius-Kühn-Archiv*, 463, 463–470.

<https://doi.org/10.5073/jka.2018.463.063>

Eliopoulos, P., Tatlas, N.-A., Rigakis, I., & Potamitis, I. (2018). A “smart” trap device for detection of crawling insects and other arthropods in urban environments. *Electronics*, 7(9), 161. <https://doi.org/10.3390/electronics7090161>

Evenson, R. E., & Gollin, D. (2003). Assessing the impact of the Green Revolution, 1960–2000. *Science*, 300(5620), 758–762. <https://doi.org/10.1126/science.1078710>

European Parliament & Council of the European Union. (2009). Directive 2009/128/EC establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides. *Official Journal of the European Union*, L309, 71–86.

Epsky, N. D., Morrill, W. L., & Mankin, R. W. (2008). Traps for capturing insects. In J. L. Capinera (Ed.), *Encyclopedia of Entomology* (pp. 3887-3901) . Springer.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6359-6_2523

Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). Precision farming at the nexus of agricultural production and the environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11, 313–335. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>

Fountas, S., Mylonas, N., Malounas, I., Rodias, E., Hellmann Santos, C., & Pekkeriet, E. (2020). *Agricultural robotics for field operations. Sensors*, 20(9), 2672.
<https://doi.org/10.3390/s20092672>

Frost, S. W. (1958). Insects attracted to light traps placed at different heights. *Journal of Economic Entomology*, 51(4), 550–551. <https://doi.org/10.1093/jee/51.4.550>

Friha, O., Ferrag, M. A., Shu, L., Maglaras, L., & Wang, X. (2021). Internet of Things for the future of smart agriculture: A comprehensive survey of emerging technologies. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(4), 718–752.
<https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1003925>

Fuentes-Peñailillo, F., Gutter, K., Vega, R., & Silva, G. C. (2024). Transformative technologies in digital agriculture: leveraging Internet of Things, remote sensing, and artificial intelligence for Smart Crop Management. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(4), 39. <https://doi.org/10.3390/jsan13040039>

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>

Georghiou, G. P. (1990). Overview of insecticide resistance. In M. B. Green, H. M. LeBaron, & W. K. Moberg (Eds.), *Managing resistance to agrochemicals* (pp. 18–41). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-1990-0421.ch002>

González-Pérez, M. I., Faulhaber, B., Williams, M., Brosa, J., Aranda, C., Pujol, N., Verdún, M., Villalonga, P., Encarnação, J., Busquets, N., & Talavera, S. (2024). Field evaluation of an automated mosquito surveillance system which classifies *Aedes* and *Culex* mosquitoes by genus and sex. *Parasites & Vectors*, 17, 97. <https://doi.org/10.1186/s13071-024-06177-w>

Hagstrum, D. W., Flinn, P. W., & Shuman, D. (1996). Automated monitoring using acoustical sensors for insects in farm-stored wheat. *Journal of Economic Entomology*, 89(1), 211–217. <https://doi.org/10.1093/jee/89.1.211>

Hagstrum, D. W., Phillips, T. W., & Cuperus, G. W. (Eds.). (2012). Stored product protection. *Kansas State Research and Extension*.

Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörren, T., Goulson, D., & de Kroon, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE*, 12(10), e0185809 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>

Horowitz, A. R., & Gerling, D. (1984). Yellow traps for evaluating the population levels and dispersal patterns of *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Homoptera: Aleyrodidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 77(6), 753–759 <https://doi.org/10.1093/aesa/77.6.753>

Høye, T. T., Arje, J., Bjerger, K., Hansen, O. L. P., Iosifidis, A., Leese, F., Mann, H. M. R., Meissner, K., Melvad, C., & Raitoharju, J. (2021). Deep learning and computer vision will transform entomology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(2), e2002545117 <https://doi.org/10.1073/pnas.2002545117>

Howse, P. E., Stevens, I. D. R., & Jones, O. T. (1998). Insect pheromones and their use in pest management. *Springer* <https://doi.org/10.1007/978-94-011-5344-7>

Ioannou, C. S., S. A. Papanastasiou, K. D. Zarpas, M. A. Miranda, A. Sciarretta, D. Nestel and N. T. Papadopoulos (2019). Development and Field Testing of a Spatial Decision

Support System to Control Populations of the European Cherry Fruit Fly, *Rhagoletis cerasi*, in Commercial Orchards. *Agronomy*, 9(10), Article 568.

<https://doi.org/10.3390/agronomy9100568>

Jawad, H. M., Nordin, R., Gharghan, S. K., Jawad, A. M., & Ismail, M. (2017). Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors*, 17(8), 1781.

<https://doi.org/10.3390/s17081781>

Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E., Janssen, S., Keating, B. A., Muñoz-Carpena, R., Porter, C. H., Rosenzweig, C., & Wheeler, T. R. (2017). Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science.

Agricultural Systems, 155, 269–288. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.021>

Kariyanna, B., & Sowjanya, M. (2024). Unravelling the use of artificial intelligence in management of insect pests. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100517.

<https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100517>

Katsoyannos, B. I., Papadopoulos, N. T., Heath, R. R., Hendrichs, J., & Kouloussis, N. A. (1999). Evaluation of synthetic food-based attractants for female Mediterranean fruit flies (Dipt., Tephritidae) in McPhail type traps. *Journal of Applied Entomology*, 123(10), 607–612.

<https://doi.org/10.1046/j.1439-0418.1999.00419.x>

Khanna, A., & Kaur, S. (2019). Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 218–231.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039>

Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100315.

<https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>

Kogan, M. (1998). Integrated pest management: Historical perspectives and contemporary developments. *Annual Review of Entomology*, 43, 243–270.

<https://doi.org/10.1146/annurev.ento.43.1.243>

- Lapshin, D. N., & Vorontsov, D. D. (2018). Low-frequency sounds repel male mosquitoes *Aedes diaantaeus* N.D.K. (Diptera, Culicidae). *Entomological Review*, 98(3), 266–271. <https://doi.org/10.1134/S0013873818030028>
- Leather, S. R. (Ed.) (2005). Insect sampling in forest ecosystems. *Blackwell Publishing*. <https://doi.org/10.1002/9780470750513>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- Li, W., Chen, P., Wang, B., & Xie, C. (2022). Detection of small-sized insects in sticky trapping images using spectral residual model and machine learning. *Frontiers in Plant Science*, 13, 915543. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.915543>
- Madden, L. V., Hughes, G., & van den Bosch, F. (2007). The study of plant disease epidemics. *APS Press*. <https://doi.org/10.1094/9780890545058>
- Mahlein, A.-K. (2016). Plant disease detection by imaging sensors – Parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 100(2), 241–251. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>
- Mankin, R. W., Hagstrum, D. W., Guo, M., Eliopoulos, P. A., & Njoroge, A. W. (2021). Automated applications of acoustics for stored product insect detection, monitoring, and management. *Insects*, 12(3), 259. <https://doi.org/10.3390/insects12030259>
- Mankin, R. W., Hagstrum, D. W., Smith, M. T., Roda, A. L., & Kairo, M. T. K. (2011). Perspective and promise: A century of insect acoustic detection and monitoring. *American Entomologist*, 57(1), 30–44. <https://doi.org/10.1093/ae/57.1.30>
- Mankin, R. W., Shuman, D., Coffelt, J. A., (1996) Noise Shielding of Acoustic Devices for Insect Detection. *Journal of Economic Entomology*, 89 (5), 1301–1308. <https://doi.org/10.1093/jee/89.5.1301>
- McCravy, K. W. (2018). A review of sampling and monitoring methods for beneficial arthropods in agroecosystems. *Insects*, 9(4), 170. <https://doi.org/10.3390/insects9040170>

Muirhead-Thomson, R. C. (1991). Trap responses of flying insects: The influence of trap design on capture efficiency. *Academic Press*.

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>

Nestel, D., Y. Cohen, B. Shaked, V. Alchanatis, E. Nemny-Lavy, M. A. Miranda, A. Sciarretta and N. T. Papadopoulos (2019). "An Integrated Decision Support System for environmentally-friendly management of the Ethiopian fruit fly in greenhouse crops." *Agronomy* 9(8): 459. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080459>

Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>

Ojha, T., Misra, S., & Raghuwanshi, N. S. (2015). Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 66–84. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.011>

Oliveira, C. M., Auad, A. M., Mendes, S. M., & Frizzas, M. R. (2014). Crop losses and the economic impact of insect pests on Brazilian agriculture. *Crop Protection*, 56, 50–54.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.10.022>

Ong, S.-Q., & Høye, T. T. (2024). An annotated image dataset of pests on different coloured sticky traps acquired with different imaging devices. *Data in Brief*, 55, 110741.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110741>

Papadopoulos, N. T., Katsoyannos, B. I., Kouloussis, N. A., Hendrichs, J., Carey, J. R., & Heath, R. R. (2001). Early detection and population monitoring of *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) in a mixed-fruit orchard in northern Greece. *Journal of Economic Entomology*, 94(4), 971–978. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.4.971>

Pathak, H. S., Brown, P., & Best, T. (2019). A systematic literature review of the factors affecting the precision agriculture adoption process. *Precision Agriculture*, 20(6), 1292–1316. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09653-x>

Pedigo, L. P., Hutchins, S. H., & Higley, L. G. (1986). Economic injury levels in theory and practice. *Annual Review of Entomology*, 31, 341–368.

<https://doi.org/10.1146/annurev.en.31.010186.002013>

Pedigo, L. P., & Rice, M. E. (2009). Entomology and pest management (6th ed.). Pearson Prentice Hall.

Peshin, R., & Dhawan, A. K. (Eds.). (2009). Integrated pest management: Innovation-development process (Vol. 1). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8992-3>

Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, 67, 1–85. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60513-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1)

Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., & Canavari, M. (2013). Drivers of precision agriculture technologies adoption: A literature review. *Procedia Technology*, 8, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>

Potamitis I., Ganchev T., Kontodimas D. On automatic bioacoustic detection of pests: the cases of *Rhynchophorus ferrugineus* and *Sitophilus oryzae*. *J. Econ. Entomol.*; 2009; 102: 1681-1690. <https://doi.org/10.1603/029.102.0436>

Potamitis, I., Rigakis, I., & Fysarakis, K. (2015). Insect biometrics: Optoacoustic signal processing and its applications to remote monitoring of McPhail type traps. *PLOS ONE*, 10(11), e0140474. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140474>

Potamitis, I., Rigakis, I., & Fysarakis, K. (2014). The electronic McPhail trap. *Sensors*, 14(12), 22285–22299. <https://doi.org/10.3390/s141222285>

Preti, M., Verheggen, F., & Angeli, S. (2021). Insect pest monitoring with camera-equipped traps: A review. *Insects*, 12(10), 890.

Robert, P. C. (2002). Precision agriculture: A challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil*, 247(1), 143–149. <https://doi.org/10.1023/A:1021171514148>

Rose, D. C., & Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, Article 87.

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087>

Rydhmer, K., Bick, E., Still, L., Strand, A., Luciano, R., Helmreich, S., Beck, B., Grønne, C., Malmros, L., Poulsen, K., Elbæk, F., Brydegaard, M., Lemmich, J., & Nikolajsen, T. (2022). Automating insect monitoring using unsupervised near-infrared sensors. *Scientific Reports*, 12, 2603. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06439-6>

Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3(3), 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>

Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. M. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 1–22. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210>

Sciarretta, A., & Calabrese, P. (2019). Development of automated devices for the monitoring of insect pests. *Current Agriculture Research Journal*, 7(1), 19–25. <https://doi.org/10.12944/CARJ.7.1.03>

Shimoda, M., & Honda, K. (2013). Insect reactions to light and its applications to pest management. *Applied Entomology and Zoology*, 48, 413–421. <https://doi.org/10.1007/s13355-013-0219-x>

Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trincherro, D., & Fossa, M. (2024). Smart sensors and smart data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 24(8), 2647. <https://doi.org/10.3390/s24082647>

Southwood, T. R. E., & Henderson, P. A. (2000). *Ecological methods* (3rd ed.). Blackwell Science.

Stafford, J. V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(3), 267–275. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0577>

Stern, V. M., Smith, R. F., van den Bosch, R., & Hagen, K. S. (1959). The integrated control concept. *Hilgardia*, 29(2), 81–101. <https://doi.org/10.3733/hilg.v29n02p081>

Suto, J. (2022). Codling moth monitoring with camera-equipped automated traps: A Review. *Agriculture*, 12(10), 1721. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101721>

Tal, A. (2018). Making conventional agriculture environmentally friendly: Moving beyond the glorification of organic agriculture and the demonization of conventional agriculture. *Sustainability*, 10(4), 1078. <https://doi.org/10.3390/su10041078>

Teixeira, A. C., Ribeiro, J., Morais, R., Sousa, J. J., & Cunha, A. (2023). A systematic review on automatic insect detection using deep learning. *Agriculture*, 13(3), 713. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030713>

Tschaikner, M., Brandt, D., Schmidt, H., Bießmann, F., Chiaburu, T., Schrimpf, I., Schrimpf, T., Stadel, A., Haußer, F., & Beckers, I. (2024). Multisensor data fusion for automatized insect monitoring (KInsecta). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.18504>

Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164, 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>

Udotalapally, V., Mohanty, S. P., Pallagani, V., & Khandelwal, V. (2020). *sCrop*: An Internet-of-Agro-Things (IoAT) enabled solar powered smart device for automatic plant disease prediction. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.06342>

University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences. (1997, July 23). *Snap! Crackle! Pop! Electric bug zappers are useless for controlling mosquitoes, says UF/IFAS pest expert*.

Van den Bosch, R., Messenger, P. S., & Gutierrez, A. P. (1982). An introduction to biological control. *Plenum Press*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9162-4>

Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 189, 103046. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046>

Vernon, R. S., & Gillespie, D. R. (1990). Spectral responsiveness of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) determined by trap catches in greenhouses. *Environmental Entomology*, 19(5), 1229–1241. <https://doi.org/10.1093/ee/19.5.1229>

Walter, A., Finger, R., Huber, R., & Buchmann, N. (2017). Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(24), 6148–6150. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>

Wang, Z., Qiao, X., Wang, Y., Yu, H., & Mu, C. (2024). IoT-based system of prevention and control for crop diseases and insect pests. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1323074. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1323074>

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>

World Health Organization (WHO). (2017). *Global vector control response 2017–2030*.

Witzgall, P., Kirsch, P., & Cork, A. (2010). Sex pheromones and their impact on pest management. *Journal of Chemical Ecology*, 36, 80–100. <https://doi.org/10.1007/s10886-009-9737-y>

Wilson, A. D. (2013). Diverse applications of electronic-nose technologies in agriculture and forestry. *Sensors*, 13(2), 2295–2348. <https://doi.org/10.3390/s130202295>

Woodcock, B. A. (2005). Pitfall trapping in ecological studies. In S. R. Leather (Ed.), *Insect sampling in forest ecosystems* (pp. 37–57). *Blackwell Publishing*. <https://doi.org/10.1002/9780470750513.ch3>

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—A worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 113–132. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)

Zhu, F., Lavine, L., O’Neal, S., Lavine, M., Foss, C., & Walsh, D. (2016). Insecticide resistance and management strategies in urban ecosystems. *Insects*, 7(1), 2. <https://doi.org/10.3390/insects7010002>

«Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων 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»