



Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο

Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας

Διπλωματική Εργασία

Αξιολόγηση της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αγροτικής παραγωγής μέσω εφαρμογών της γεωργίας ακριβείας, στο πλαίσιο της Πράσινης Συμφωνίας της Ε.Ε.

Λούρης Χρήστος

Επιβλέπων καθηγητής: Γκρίλλα Ελένη

Πάτρα, Μάρτιος 2026

«Στους παππούδες μου, ως ελάχιστη ένδειξη ευγνωμοσύνης για την αγάπη, τη στήριξη και τη βοήθειά τους. Η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική στην πορεία μου και θα τους είμαι πάντα ευγνώμων»

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη εξετάζει την αξιολόγηση της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αγροτικής παραγωγής μέσω της εφαρμογής τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας, με έμφαση στη σύνδεση με τους στόχους της Πράσινης Συμφωνίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Green Deal, EGD) και της στρατηγικής «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο» (Farm to Fork, F2F). Μέσω ανασκόπησης βιβλιογραφίας και ανάλυσης σύγχρονων ερευνών, η μελέτη διερευνά πώς η χρήση αισθητήρων, GIS, UAV, υπερφασματικής τηλεπισκόπησης, συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων και τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης συμβάλλει στη μείωση της χρήσης λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων, στην αποδοτική διαχείριση νερού και στη βελτιστοποίηση των εισροών.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι οι τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την αποδοτικότητα της παραγωγής και υποστηρίζοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη. Παράλληλα, η χρήση γεωχωρικών δεδομένων και η ενσωμάτωση συστημάτων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο ενισχύει την αξιοπιστία της διαχείρισης των καλλιεργειών και διευκολύνει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Η μελέτη αναδεικνύει, επίσης, παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα και την υιοθέτηση των τεχνολογιών, όπως το μέγεθος των εκμεταλλεύσεων, η γεωργική εμπειρία, η εκπαίδευση των αγροτών και η ύπαρξη υποστηρικτικών πολιτικών. Παράλληλα, εντοπίζονται εμπόδια, όπως το υψηλό κόστος, η έλλειψη τεχνικής κατάρτισης και η περιορισμένη πρόσβαση σε δεδομένα, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν για την κλιμάκωση των εφαρμογών.

Συνολικά, η μελέτη επιβεβαιώνει ότι η γεωργία ακριβείας αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την επίτευξη των στόχων της EGD και της F2F, καθώς προωθεί την κυκλική οικονομία, την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων. Η υιοθέτησή της σε συνδυασμό με κατάλληλες πολιτικές, εκπαιδευτικά προγράμματα και τεχνολογική καινοτομία μπορεί να οδηγήσει σε πιο βιώσιμη, ανθεκτική και ανταγωνιστική αγροτική παραγωγή στην ΕΕ.

Λέξεις - κλειδιά: Γεωργία ακριβείας, περιβαλλοντική βιωσιμότητα, Πράσινη Συμφωνία της Ε.Ε., Farm to Fork, τεχνολογίες παρακολούθησης, αποδοτικότητα εισροών.

Abstract

This study examines the assessment of the reduction of the environmental impact of agricultural production through the implementation of precision agriculture technologies, with an emphasis on the connection with the objectives of the European Green Deal (EGD) and the Farm to Fork (F2F) strategy. Through a literature review and analysis of contemporary research, the study explores how the use of sensors, GIS, UAVs, hyperspectral remote sensing, decision support systems and artificial intelligence technologies contributes to the reduction of the use of fertilizers and plant protection products, to efficient water management and to the optimization of inputs. The results demonstrate that precision agriculture technologies can significantly reduce environmental impacts, while improving production efficiency and supporting sustainable development. At the same time, the use of geospatial data and the integration of real-time monitoring systems enhances the reliability of crop management and facilitates informed decision-making.

The study also highlights factors that affect the effectiveness and adoption of technologies, such as farm size, agricultural experience, farmer education and the existence of supportive policies. At the same time, obstacles are identified, such as high costs, lack of technical training and limited access to data, which need to be addressed to scale up applications.

Overall, the study confirms that precision agriculture is an important tool for achieving the goals of EGD and F2F, as it promotes the circular economy, energy efficiency and the sustainable use of natural resources. Its adoption combined with appropriate policies, training programs and technological innovation can lead to more sustainable, resilient and competitive agricultural production in the EU.

Keywords: Precision agriculture, environmental sustainability, EU Green Deal, Farm to Fork, monitoring technologies, input efficiency.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract.....	4
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	7
1.1 Γενικός προβληματισμός και σκοπός της εργασίας	7
1.2 Ανάλυση της σημερινής κατάστασης.....	7
1.3 Ελλείψεις και συμβολή της παρούσας εργασίας	8
1.4 Προτεινόμενη μεθοδολογία	9
1.5 Προσδοκώμενα αποτελέσματα	10
1.6 Συνεισφορά της εργασίας	10
1.7 Δομή της εργασίας.....	11
Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο	14
2.1 Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και η Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο».....	14
2.1.1 Η Κοινή Αγροτική Πολιτική (ΚΑΠ).....	14
2.1.2 Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (EGD)	15
2.1.3 Η Στρατηγική F2F	19
2.1.4 Σχέση με την ΚΑΠ.....	21
2.2 Η σημασία της γεωργίας ακριβείας στο πλαίσιο της EGD.....	24
2.3 Τεχνολογίες και εφαρμογές της Γεωργίας Ακριβείας	26
2.3.1 Ορισμός της Γεωργίας Ακριβείας	26
2.3.2 Στόχοι της Γεωργίας Ακριβείας	27
2.3.3 Τεχνολογίες της Γεωργίας Ακριβείας	29
2.3.4 Εφαρμογές της Γεωργίας Ακριβείας.....	31
2.3.5 Συλλογή και Απόκτηση Δεδομένων.....	33
2.3.6 Σχεδιασμός, λήψη αποφάσεων και εκτέλεση.....	37
2.4 Βιώσιμη Γεωργία	42
2.4.1 Μεγάλα δεδομένα (Big Data)	44
2.4.2 Τεχνολογία Μηχανικής Όρασης.....	45
2.4.3 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT).....	46
2.4.4 Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), Μηχανική Μάθηση (ML) και Βαθιά Μάθηση (DL)	
48	
2.4.5 Συστήματα καθοδήγησης	52
2.4.6 Τεχνολογία Blockchain	53

2.4.7 Ρομποτική και Αυτόνομα Συστήματα.....	54
2.4.8 Τεχνητοί Δορυφόροι, Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAV) και Μη Επανδρωμένα Επίγεια Οχήματα (UGV).....	55
2.4.9 Φαινοτυποποίηση υψηλής απόδοσης.....	56
2.4.10 Τηλεματική.....	59
2.5 Εμπόδια στην προσαρμογή νέων τεχνολογιών στην Γεωργία Ακριβείας.....	60
2.6 Απαιτούμενες μελλοντικές εξελίξεις.....	62
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία.....	64
3.1 Ανάγκες στη Διεθνή και Ευρωπαϊκή Βιβλιογραφία.....	64
3.2 Ερωτήματα που προκύπτουν από τα κενά γνώσης.....	65
3.3 Στόχος και συμβολή της παρούσας μελέτης.....	66
3.4 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.....	67
3.5 Ανάλυση δεδομένων.....	68
Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα.....	70
4.1 Παρουσίαση μελετών.....	70
4.2 Συγκριτική αξιολόγηση.....	82
4.2.1 Αξιολόγηση της επίδρασης της γεωργίας ακριβείας.....	82
4.2.2 Συνεισφορά των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.....	83
4.3 Αποδοτικότητα τεχνολογιών και συνδυασμών για περιβαλλοντικά οφέλη.....	85
4.4 Σύνδεση με τους στόχους της EGD και της F2F.....	86
4.5 Παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων.....	88
4.6 Εμπόδια υιοθέτησης και προϋποθέσεις κλιμάκωσης.....	90
4.7 Αξιοποίηση δεδομένων για βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.....	92
Κεφάλαιο 5: Συζήτηση.....	95
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	97
Βιβλιογραφία.....	100

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικός προβληματισμός και σκοπός της εργασίας

Η γεωργία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παραγωγικούς τομείς της ευρωπαϊκής οικονομίας, αλλά ταυτόχρονα και έναν από τους βασικούς παράγοντες πίεσης στο φυσικό περιβάλλον (Georgescu et al., 2025: 1-2; Rybaczewska-Błazejowska & Gierulski, 2018: 1). Η εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει σε υπερβολική χρήση λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων, υποβάθμιση των εδαφών, ρύπανση υδάτων και αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Sokal & Kachel, 2025: 1). Στο πλαίσιο αυτό, η EGD και η Στρατηγική F2F θέτουν ως στόχο τη μετάβαση προς ένα βιώσιμο και αποδοτικό σύστημα τροφίμων, με μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της γεωργίας έως το 2030 (Pawłowski & Sołtysiak, 2024: 1-2; Varzakas & Smaoui, 2024: 1-2).

Η γεωργία ακριβείας (Precision Agriculture) αναδεικνύεται ως ένα από τα πιο αποτελεσματικά μέσα για την επίτευξη αυτών των στόχων, καθώς επιτρέπει στοχευμένη εφαρμογή εισροών (λιπασμάτων, νερού, φυτοφαρμάκων), παρακολούθηση καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο και λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων (data-driven decision making) (Karunathilake et al., 2023: 1; Sanyaolu & Sadowski, 2024: 1). Ο γενικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αξιολογήσει τη συμβολή της γεωργίας ακριβείας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αγροτικής παραγωγής, εστιάζοντας στην ευρωπαϊκή πραγματικότητα και στους στόχους της EGD.

1.2 Ανάλυση της σημερινής κατάστασης

Τα τελευταία χρόνια, η γεωργία ακριβείας έχει αναδειχθεί σε έναν από τους βασικούς πυλώνες της σύγχρονης βιώσιμης γεωργίας, καθώς προσφέρει εργαλεία για τη στοχευμένη και αποδοτική χρήση εισροών, την παρακολούθηση της ανάπτυξης των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο και τη βελτίωση των αποφάσεων διαχείρισης των αγροτικών εκμεταλλεύσεων (Ahmed & Shakoor, 2025: 1; Chen, 2025: 2). Τεχνολογίες όπως αισθητήρες εδάφους και φυλλώματος, δορυφορικές εικόνες και drones (Guebsi

et al., 2024: 2), GPS/GIS εφαρμογές (Quamar et al., 2023: 1), καθώς και ευφυή συστήματα λήψης αποφάσεων (Decision Support Systems – DSS) έχουν ήδη εισαχθεί σε μεγάλο αριθμό αγροτικών μονάδων, ιδιαίτερα σε χώρες με προηγμένη τεχνολογία γεωργίας (Abiri et al., 2023: 1-2; Htun et al., 2022: 1).

Παρά την πρόοδο αυτή, η ευρεία εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας στην ΕΕ παραμένει περιορισμένη. Κύριοι περιορισμοί αποτελούν το υψηλό κόστος εξοπλισμού και λογισμικού, η έλλειψη εξειδικευμένων γνώσεων και εκπαίδευσης των αγροτών, καθώς και οι ανεπαρκείς ψηφιακές υποδομές (π.χ. 5G, σύνδεση GNSS, cloud platforms) σε ορισμένες αγροτικές περιοχές (Sanyaolu & Sadowski, 2024: 2).

Στο πλαίσιο της EGD και της F2F, η ανάγκη για βιώσιμη και αποδοτική γεωργία είναι μεγαλύτερη από ποτέ (Pawłowski & Sołtysiak, 2024: 2; Varzakas & Smaoui, 2024:2). Παράλληλα, οι υπάρχουσες μελέτες και πιλοτικά έργα έχουν δείξει ότι η γεωργία ακριβείας μπορεί να μειώσει σημαντικά τη χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και νερού, ενώ βελτιώνει την αποδοτικότητα των εισροών (Raza et al., 2025: 2). Ωστόσο, οι περισσότερες αξιολογήσεις είναι τοπικού ή πιλοτικού χαρακτήρα, με περιορισμένη εφαρμογή σε ευρωπαϊκή κλίμακα, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη για συστηματική και ολοκληρωμένη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε διαφορετικά αγροτικά συστήματα και καλλιέργειες (Pawłowski & Sołtysiak, 2024: 2; Varzakas & Smaoui, 2024: 2).

Η εργασία αυτή επιχειρεί να καλύψει αυτό το κενό, παρέχοντας μια συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης της γεωργίας ακριβείας στη βιωσιμότητα, με έμφαση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την αποτελεσματικότητα των εισροών και τη σύνδεση με τις ευρωπαϊκές πολιτικές και στρατηγικούς στόχους.

1.3 Ελλείψεις και συμβολή της παρούσας εργασίας

Παρά τη σημαντική πρόοδο στη γεωργία ακριβείας και τη διάδοση τεχνολογικών εφαρμογών που βελτιώνουν την αποδοτικότητα των αγροτικών εισροών, παρατηρούνται ορισμένες σημαντικές ελλείψεις (Huang & Wang, 2024: 2; Pandeya et al., 2025: 2). Συγκεκριμένα, λείπουν ολοκληρωμένες αξιολογήσεις των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ευρωπαϊκό επίπεδο, οι οποίες να συνδέουν τη χρήση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας με τους στόχους της EGD και της F2F (Pawłowski & Sołtysiak, 2024: 2; Varzakas & Smaoui, 2024: 2). Επιπλέον, η ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων όσον αφορά τη μείωση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων, νερού και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παραμένει περιορισμένη, ενώ οι διαφοροποιήσεις

ανά τύπο καλλιέργειας, κλίμα και μέγεθος εκμετάλλευσης δεν έχουν επαρκώς διερευνηθεί.

Η εργασία αυτή στοχεύει να καλύψει τα παραπάνω κενά προσφέροντας μια συστηματική ανάλυση των εφαρμογών της γεωργίας ακριβείας και της συμβολής τους στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Με βάση βιβλιογραφικές πηγές, ευρωπαϊκά έργα και συγκριτική αξιολόγηση δεικτών περιβαλλοντικής επίδοσης, επιχειρείται η καταγραφή των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών και η αξιολόγηση των συνθηκών που μεγιστοποιούν τα περιβαλλοντικά οφέλη.

Παράλληλα, η εργασία προσφέρει ποσοτικά στοιχεία και πρακτικές πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από αγρότες και φορείς πολιτικής για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των συστημάτων γεωργίας ακριβείας. Τέλος, συμβάλλει στην επιστημονική κατανόηση, υποστηρίζει τη διαμόρφωση πολιτικών και παρέχει προτάσεις για εφαρμογές και μελλοντική έρευνα, ενισχύοντας τη σύνδεση τεχνολογίας, βιωσιμότητας και στρατηγικών περιβαλλοντικών στόχων της ΕΕ.

1.4 Προτεινόμενη μεθοδολογία

Η παρούσα εργασία βασίζεται στη βιβλιογραφική ανασκόπηση ως κύρια μεθοδολογία, προκειμένου να αξιολογηθεί η συμβολή της γεωργίας ακριβείας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αγροτικής παραγωγής. Η επιλογή της βιβλιογραφικής ανασκόπησης επιτρέπει την καταγραφή, ανάλυση και σύνθεση των υπάρχοντων ερευνητικών δεδομένων σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο, προσφέροντας την απαραίτητη βάση για την κατανόηση των τάσεων, των αποτελεσμάτων και των ελλείψεων στη γνώση.

Η ανασκόπηση περιλαμβάνει τη συλλογή και επιλογή πηγών από επιστημονικά άρθρα και μελέτες περίπτωσης σχετικά με την εφαρμογή τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας και την επίδρασή τους στο περιβάλλον. Ακολουθεί η συγκριτική αξιολόγηση και σύνθεση των δεδομένων, η οποία επιτρέπει την αναγνώριση των παραγόντων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας και των συνθηκών που μεγιστοποιούν τα περιβαλλοντικά οφέλη. Ταυτόχρονα, η μεθοδολογία αναδεικνύει τα κενά στη βιβλιογραφία, όπως η περιορισμένη αξιολόγηση σε ευρωπαϊκή κλίμακα και η έλλειψη συγκριτικών στοιχείων για διαφορετικά είδη καλλιεργειών και μεγέθη εκμεταλλεύσεων.

Η χρήση της βιβλιογραφικής ανασκόπησης ως μεθοδολογικού εργαλείου επιτρέπει μια ολιστική και τεκμηριωμένη αξιολόγηση των επιπτώσεων της γεωργίας ακριβείας. Παράλληλα, προσφέρει στοιχεία που μπορούν να υποστηρίξουν συγκεκριμένες προτάσεις για εφαρμογή πολιτικών και πρακτικών, ενισχύοντας τη συνεισφορά της εργασίας στην επιστημονική γνώση, την τεχνική και την περιβαλλοντική διαχείριση στον ευρωπαϊκό αγροτικό τομέα.

1.5 Προσδοκώμενα αποτελέσματα

Η παρούσα εργασία αναμένεται να καταγράψει και να συνοψίσει τα αποτελέσματα της διεθνούς και ευρωπαϊκής βιβλιογραφίας σχετικά με τη γεωργία ακριβείας και τις περιβαλλοντικές της επιπτώσεις. Με βάση την ανάλυση των πηγών, εκτιμάται ότι η εφαρμογή τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, εξοικονομώντας πόρους και περιορίζοντας τη ρύπανση των εδαφών και των υδάτων.

Παράλληλα, αναμένονται αποτελέσματα που θα δείχνουν βελτίωση της αποδοτικότητας των εισροών, όπως η αύξηση της αποδοτικότητας αζώτου (NUE) και η εξοικονόμηση νερού και ενέργειας, χωρίς απώλειες στην παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Επιπλέον, η μελέτη αναμένεται να αναδείξει τα περιβαλλοντικά οφέλη σε όρους μειωμένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, προσφέροντας ποσοτικά και συγκριτικά στοιχεία για διαφορετικά συστήματα παραγωγής και τύπους καλλιεργειών. Η εργασία αναμένεται να εντοπίσει τα κύρια κενά στη βιβλιογραφία και να προσφέρει τεκμηριωμένες προτάσεις για την πρακτική εφαρμογή των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας σε ευρωπαϊκή κλίμακα, καθώς και για τη διαμόρφωση πολιτικών και στρατηγικών μέτρων που ενισχύουν τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα της γεωργικής παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο, τα προσδοκώμενα αποτελέσματα θα συμβάλλουν τόσο στην επιστημονική γνώση όσο και στη συμβουλευτική και πολιτική υποστήριξη του αγροτικού τομέα.

1.6 Συνεισφορά της εργασίας

Η παρούσα εργασία συμβάλλει ουσιαστικά στην επιστημονική γνώση σχετικά με τη γεωργία ακριβείας και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της αγροτικής παραγωγής. Μέσα από τη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση, παρέχει συγκεντρωμένα και συγκριτικά δεδομένα για την αποτελεσματικότητα των

τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας, την εξοικονόμηση εισροών και την επίδρασή τους στο περιβάλλον, καλύπτοντας κενά που παρατηρούνται στη βιβλιογραφία σε ευρωπαϊκή κλίμακα.

Επιπλέον, η εργασία προσφέρει πρακτική αξία για αγρότες, συμβούλους και φορείς πολιτικής, παρέχοντας πληροφορίες που μπορούν να υποστηρίξουν τη λήψη αποφάσεων για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των καλλιεργειών και τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Η ανάλυση και σύνθεση των ευρημάτων διευκολύνει την ενσωμάτωση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας σε στρατηγικές βιώσιμης γεωργίας και παρέχει υποδείξεις για τη διαμόρφωση πολιτικών κινήτρων και εκπαιδευτικών προγραμμάτων.

Η εργασία συμβάλλει στη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης εικόνας για την επίδραση της γεωργίας ακριβείας στη βιωσιμότητα του αγροτικού τομέα, ενισχύοντας τη γνώση για την πρακτική εφαρμογή των στόχων της Πράσινης Συμφωνίας και της στρατηγικής «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο». Με αυτόν τον τρόπο, η συνεισφορά της εργασίας εκτείνεται τόσο στην επιστήμη και την τεχνική όσο και στην κοινωνία και την πολιτική, προσφέροντας τεκμηριωμένα δεδομένα και προτάσεις για τη βιώσιμη ανάπτυξη της γεωργίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

1.7 Δομή της εργασίας

Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει τον γενικό προβληματισμό της εργασίας, επικεντρώνοντας στη σημασία της γεωργίας ακριβείας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας στο πλαίσιο της EGD. Παρουσιάζεται ο σκοπός της μελέτης, δηλαδή η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι νέες τεχνολογίες στη γεωργία μπορούν να υποστηρίξουν τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την επίτευξη των στόχων της στρατηγικής F2F.

Στη συνέχεια, αναλύεται η τρέχουσα κατάσταση στον αγροτικό τομέα, με έμφαση στις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι παραγωγοί και τα κράτη μέλη της ΕΕ. Εξετάζονται οι ελλείψεις στη βιβλιογραφία και οι περιορισμοί των υφιστάμενων πρακτικών, καθώς και η συμβολή της παρούσας εργασίας στην κάλυψή τους. Περιγράφεται η προτεινόμενη μεθοδολογία για τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων, τα αναμενόμενα αποτελέσματα και η θεωρητική και πρακτική αξία της μελέτης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μία συνοπτική παρουσίαση της δομής των επόμενων κεφαλαίων.

Το δεύτερο κεφάλαιο παρέχει τη θεωρητική βάση της εργασίας. Αρχικά, εξετάζονται οι κύριες πολιτικές της ΕΕ, όπως η ΚΑΠ, η EGD και η στρατηγική F2F. Αναλύεται η σχέση τους με την γεωργία ακριβείας και τον τρόπο με τον οποίο συμβάλλουν στη βιωσιμότητα και στην περιβαλλοντική προστασία. Επιπλέον, τονίζεται η σημασία της γεωργίας ακριβείας για την εφαρμογή αυτών των στρατηγικών και τη βελτίωση της αποδοτικότητας των αγροτικών συστημάτων.

Στη συνέχεια, το κεφάλαιο επικεντρώνεται στις τεχνολογίες και τις εφαρμογές της γεωργίας ακριβείας. Παρουσιάζεται ο ορισμός και οι στόχοι της, οι διαθέσιμες τεχνολογίες, όπως αισθητήρες, drones, GPS, συστήματα καθοδήγησης και IoT, καθώς και οι πρακτικές εφαρμογές τους στον αγροτικό τομέα. Επιπλέον, αναλύεται η έννοια της βιώσιμης γεωργίας και περιγράφονται τεχνολογίες που ενισχύουν τη βιωσιμότητα, όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση, η ρομποτική, τα μη επανδρωμένα οχήματα, η φαινοτυποποίηση υψηλής απόδοσης και τα συστήματα τηλεματικής. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των βασικών εμποδίων στην προσαρμογή των νέων τεχνολογιών και των απαιτούμενων μελλοντικών εξελίξεων.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει τη μεθοδολογική προσέγγιση της μελέτης. Αρχικά εντοπίζονται τα κενά στη διεθνή και ευρωπαϊκή βιβλιογραφία και αναλύονται τα ερωτήματα που προκύπτουν από αυτά τα κενά. Στη συνέχεια, ορίζεται ο στόχος και η συμβολή της παρούσας μελέτης, δηλαδή η αξιολόγηση της επίδρασης των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη βελτίωση της βιωσιμότητας. Περιγράφονται οι μέθοδοι συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, καθώς και οι τεχνικές ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα της μελέτης. Αρχικά, γίνεται αναλυτική παρουσίαση των μελετών που εξετάστηκαν και συγκρίνονται τα ευρήματα. Στη συνέχεια, αξιολογείται η επίδραση της γεωργίας ακριβείας στην αποδοτικότητα και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Παρουσιάζεται η αποδοτικότητα των τεχνολογιών και των συνδυασμών τους, η σύνδεσή τους με τους στόχους της EGD και της F2F, καθώς και οι παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων. Τέλος, εξετάζονται τα εμπόδια υιοθέτησης των τεχνολογιών και οι προϋποθέσεις για την κλιμάκωση και την αξιοποίηση των δεδομένων για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Στο κεφάλαιο της συζήτησης αναλύονται τα ευρήματα της μελέτης σε βάθος. Σχολιάζεται η σημασία τους σε σχέση με τις υπάρχουσες θεωρίες και πρακτικές, ενώ

αναδεικνύονται τα δυνατά σημεία και οι περιορισμοί της εργασίας. Επιπλέον, συζητούνται τα αποτελέσματα σε συνάρτηση με τους στόχους της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και τις στρατηγικές για βιώσιμη γεωργία.

Το τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης και προτείνει πρακτικές και πολιτικές δράσεις για την ενίσχυση της γεωργίας ακριβείας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Επισημαίνεται η συμβολή της εργασίας στη θεωρία και στην πράξη, ενώ προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα.

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και η Στρατηγική «Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο»

2.1.1 Η Κοινή Αγροτική Πολιτική (ΚΑΠ)

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η ΚΑΠ έχει προσανατολιστεί όλο και περισσότερο στην ένταξη περιβαλλοντικών στόχων, εισάγοντας σειρά καινοτομιών στα διαθέσιμα εργαλεία της. Σημαντικά παραδείγματα αποτελούν η καθιέρωση των πρώτων αγροπεριβαλλοντικών προγραμμάτων το 1992, η αποσύνδεση των άμεσων ενισχύσεων και η σύνδεσή τους με την περιβαλλοντική συμμόρφωση μετά τη Μεταρρύθμιση Fischler το 2003, καθώς και η υιοθέτηση της πράσινης πληρωμής το 2015. Παρά την ανάπτυξη αυτών των «πράσινων» μέτρων, η πραγματική περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα της ΚΑΠ παραμένει αντικείμενο έντονης συζήτησης (Erjavec & Erjavec, 2015: 53).

Ορισμένοι ερευνητές θεωρούν ότι οι μεταρρυθμίσεις εξυπηρετούν κυρίως τη νομιμοποίηση της υψηλής δημοσιονομικής δαπάνης της πολιτικής και διατηρούν, στην ουσία, τα παραδοσιακά παραγωγικά πρότυπα, φαινόμενο που έχει χαρακτηριστεί ως «πράσινο ζέπλυμα». Επιπλέον, αμφιβολίες εγείρονται σχετικά με την αποτελεσματικότητα συγκεκριμένων μέτρων, όπως τα εθελοντικά αγροπεριβαλλοντικά προγράμματα, τα οποία μπορεί να επηρεάζονται από μεροληψία επιλογής, περιορίζοντας τα πρόσθετα περιβαλλοντικά οφέλη. Αντίστοιχα, η πρόσφατη άμεση πληρωμή για οικολογικό προσανατολισμό έχει τεθεί υπό αμφισβήτηση ως προς την πραγματική συμβολή της στην περιβαλλοντική βελτίωση (Salvan et al., 2022: 1). Οι παραπάνω αβεβαιότητες υπογραμμίζουν την ανάγκη για συστηματική αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης της ΚΑΠ, ιδιαίτερα ενόψει της νέας προγραμματικής περιόδου μετά το 2023 (Alons, 2017: 1; Lazíková et al., 2019: 1-2). Η επικείμενη περίοδος πολιτικής στοχεύει στην ενίσχυση της ευελιξίας και της εξατομίκευσης των μέτρων για τους αγρότες, ενώ ταυτόχρονα απαιτεί την ακριβή μέτρηση των αποτελεσμάτων των πολιτικών παρεμβάσεων. Παράλληλα, η EGD και η Δράση για το Κλίμα της ΕΕ θα συντονίσουν τις πολιτικές της ΕΕ που αφορούν το περιβάλλον και το

κλίμα, συμπεριλαμβανομένης της ΚΑΠ, προωθώντας μια προσέγγιση βασισμένη σε αποτελέσματα και στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Bertoni et al., 2020: 1-2).

2.1.2 Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (EGD)

Η EGD αποτελεί μια συνολική πολιτική πρωτοβουλία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η οποία στοχεύει στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας για την ΕΕ έως το 2050 (Zuazua Ruiz et al., 2023: 1-2). Με αυτήν την πρωτοβουλία, η Ευρώπη φιλοδοξεί να γίνει το πρώτο κλιματικά ουδέτερο οικονομικό μπλοκ στον κόσμο, επηρεάζοντας κρίσιμους τομείς όπως η ενέργεια, οι μεταφορές, η κατασκευή, η βιοποικιλότητα και η παραγωγή τροφίμων. Ένα κεντρικό στοιχείο της EGD είναι η μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία, που δίνει έμφαση στην αποδοτική χρήση των πόρων και της ενέργειας, προάγοντας παράλληλα τη βιωσιμότητα σε όλους τους τομείς (Stefanis et al., 2024: 1). Η EGD στηρίζεται στη στενή συνεργασία μεταξύ ακαδημαϊκής έρευνας και εφαρμογής πολιτικών, αξιοποιώντας τα επιστημονικά δεδομένα για τη διαμόρφωση στρατηγικών και ενσωματώνοντας τις πρωτοβουλίες πανεπιστημίων και τοπικών κοινοτήτων ως πρακτικές λύσεις για την επίτευξη των φιλόδοξων στόχων της. Η συμφωνία προέκυψε ως απάντηση στις αυξανόμενες προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και της περιβαλλοντικής ρύπανσης, αναγνωρίζοντας αυτές ως υπαρξιακές απειλές για την Ευρώπη και τον κόσμο (Molek-Kozakowska, 2024: 182).

Περιλαμβάνει πολυάριθμες δράσεις και πολιτικές μεταρρυθμίσεις με στόχο τον μετασχηματισμό της ΕΕ σε μια δίκαιη, βιώσιμη και ανταγωνιστική οικονομία, με έμφαση στη μείωση της εξάρτησης από φυσικούς πόρους. Στα μέτρα αυτά περιλαμβάνονται το πακέτο «Fit for 55» για τη μείωση των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, νέες νομοθεσίες για την παρακολούθηση και ενίσχυση της ανθεκτικότητας των δασών, καθώς και προτάσεις για βιώσιμες μεταφορές και ενεργειακή απόδοση (Cerutti & Boccaleri, 2021: 141).

Επιπλέον, η EGD εισάγει κανονισμούς υποβολής εκθέσεων για την παρακολούθηση της προόδου σε θέματα βιωσιμότητας, όπως ο Κανονισμός για τον Οικολογικό Σχεδιασμό για Βιώσιμα Προϊόντα (ESPR), ο Κανονισμός για την Αποκάλυψη Βιώσιμων Χρηματοοικονομικών (SFDR), η Ταξινόμηση της ΕΕ και η Οδηγία για την Εταιρική Υποβολή Εκθέσεων Βιωσιμότητας (CSRD). Μέσω αυτών των μέτρων, προάγεται η διαφάνεια, η λογοδοσία και η συλλογική δράση, ενισχύοντας τη μετάβαση της ΕΕ προς μια βιώσιμη, κλιματικά ουδέτερη κοινωνία (Stefanis et al., 2024: 1).

Η EGD αποτελεί την κεντρική αναπτυξιακή στρατηγική της ΕΕ για τη μετατροπή της οικονομίας σε μια σύγχρονη, αποδοτική ως προς τους πόρους και ανταγωνιστική δομή, με τελικό στόχο την επίτευξη μηδενικών καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050 (European Commission, 2019). Μέσω αυτής της στρατηγικής, η ΕΕ επιδιώκει να αποσυνδέσει την οικονομική ανάπτυξη από την υπερβολική εκμετάλλευση φυσικών πόρων, θέτοντας την οικονομία και την κοινωνία σε μια βιώσιμη τροχιά που καλύπτει όλους τους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της γεωργίας (Pilvere et al., 2022: 1).

Οι οικονομικά πιο ανεπτυγμένες χώρες, όπως η Γερμανία και η Γαλλία, έχουν πρόσβαση σε περισσότερα κεφάλαια και προηγμένες τεχνολογίες, γεγονός που τους επιτρέπει να εφαρμόζουν γρηγορότερα μέτρα μείωσης εκπομπών και περιορισμού χρήσης φυτοφαρμάκων. Αντίθετα, οι χώρες της Ανατολικής Ευρώπης αντιμετωπίζουν περιορισμούς λόγω οικονομικών και υποδομικών δυσκολιών (Testi et al., 2023: 1).

Η EGD προωθεί οικολογικά προγράμματα που περιλαμβάνουν εθελοντικά μέτρα για την ενθάρρυνση των αγροτών σε βιώσιμες πρακτικές, όπως η καλλιέργεια οσπρίων, η διατήρηση αγρανάπαυσης για τη βιοποικιλότητα και η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, οι διαφορές στη συμμετοχή μεταξύ των χωρών αντικατοπτρίζουν διαφορετικά επίπεδα ευαισθητοποίησης και οικονομικής στήριξης. Σύμφωνα με την EGD, έως το 2030 το 25% της γεωργικής γης της ΕΕ θα πρέπει να είναι βιολογική, με ορισμένες χώρες, όπως η Αυστρία, να έχουν ήδη ξεπεράσει τον στόχο, ενώ άλλες, όπως η Ρουμανία, να θέτουν πιο μετριοπαθείς στόχους λόγω περιορισμένης ζήτησης και επιδοτήσεων (Prigoreanu et al., 2024: 1-2).

Τα κράτη μέλη εφαρμόζουν την ΚΑΠ 2023–2027 μέσω εθνικών στρατηγικών σχεδίων που προσαρμόζονται στις τοπικές ανάγκες, υποστηρίζοντας παράλληλα τους στόχους της ΕΕ και του EGD. Πολιτικές όπως η στρατηγική «*Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο*» και η στρατηγική «*Βιοποικιλότητα*» σηματοδοτούν τη μετάβαση προς μια πιο βιώσιμη γεωργία, αντιμετωπίζοντας τις κλιματικές προκλήσεις, μειώνοντας τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και βελτιώνοντας τη χρήση των φυσικών πόρων. Σημαντικά αποτελέσματα περιλαμβάνουν τη μείωση των πωλήσεων φυτοφαρμάκων κατά 7% μεταξύ 2011 και 2019 και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη γεωργία κατά 25% από το 1990 (Testi et al., 2022: 1).

Η βιολογική γεωργία αυξήθηκε κατά 5,5% ετησίως μεταξύ 2012 και 2019, φτάνοντας τα 13,8 εκατ. εκτάρια, με στόχο το 25% έως το 2030. Η διατήρηση του 10% της γεωργικής γης για περιοχές υψηλής βιοποικιλότητας ενισχύει την αποκατάσταση των

φυσικών οικοσυστημάτων και οικοτόπων. Κράτη μέλη όπως η Δανία, η Γερμανία και η Ολλανδία πρωτοπορούν στην αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως το βιοαέριο και η ηλιακή ενέργεια, ενώ υψηλό αρχικό κόστος και περιορισμένες υποδομές δυσχεραίνουν την επέκταση αυτών των πρακτικών σε άλλες περιοχές (Fusco, 2021: 1). Οι προκλήσεις για την επίτευξη των στόχων της EGD περιλαμβάνουν την έλλειψη επικονίασης σε περίπου το 50% της γεωργικής γης, τις ζημιές από ξηρασίες που προκαλούν ετήσιες απώλειες περίπου 9 δις ευρώ, τον κατακερματισμό της γης και την έλλειψη σύγχρονων υποδομών, ιδιαίτερα σε χώρες της Ανατολικής Ευρώπης, όπως η Ρουμανία και η Βουλγαρία. Η ΚΑΠ 2021–2027 διαθέτει σημαντικά κεφάλαια για την πράσινη μετάβαση, συμπεριλαμβανομένης της βιολογικής γεωργίας, επενδύσεων σε υποδομές και υποστήριξης μικρών και μεσαίων αγροτών, στοιχεία κρίσιμα για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων του EGD (Prigoreanu et al., 2024: 1-2).

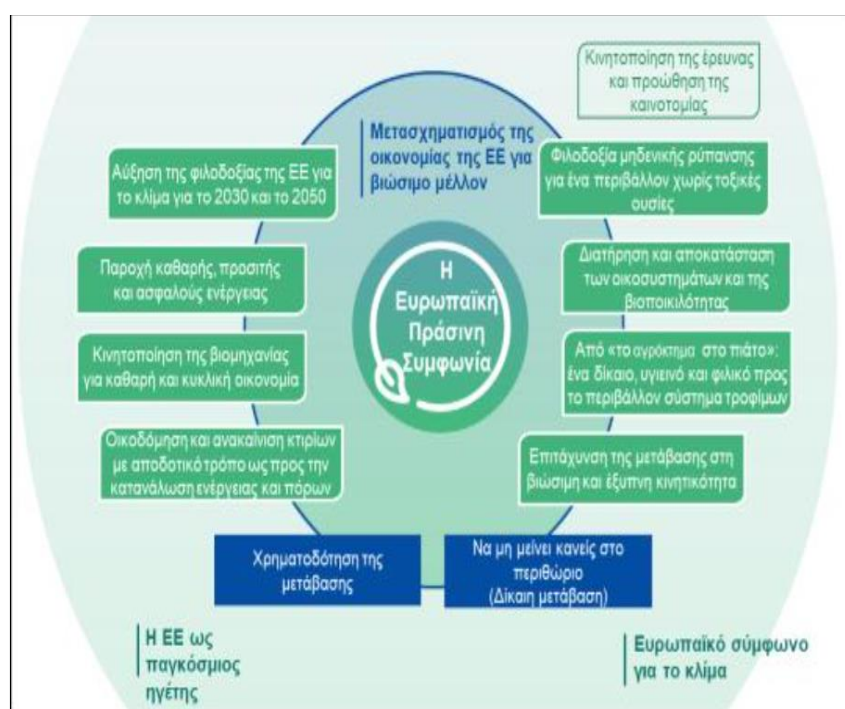
Η εφαρμογή της EGD απαιτεί ουσιαστικές αλλαγές στις πολιτικές στρατηγικές που αφορούν το σύνολο των παραγωγικών και κοινωνικών τομέων, συμπεριλαμβανομένων της ενέργειας, της βιομηχανίας, της γεωργίας, των μεταφορών και της κατανάλωσης. Για να επιτευχθούν οι φιλόδοξοι στόχοι που έχουν τεθεί, είναι απαραίτητο να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή στην προστασία και αποκατάσταση των φυσικών οικοσυστημάτων, στη βιώσιμη διαχείριση των φυσικών πόρων και στη βελτίωση της υγείας και της ευημερίας της κοινωνίας. Η επίτευξη αυτών των στόχων προϋποθέτει βαθιές διαρθρωτικές αλλαγές, τόσο σε επίπεδο πολιτικής όσο και στην πράξη (European Commission, 2019).

Οι τομείς δράσης που έχουν καθοριστεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στο πλαίσιο της EGD είναι αλληλένδετοι και αλληλοενισχυόμενοι. Ωστόσο, η υλοποίησή τους απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό ώστε να αποφεύγονται πιθανές αντισταθμίσεις ή συγκρούσεις μεταξύ οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών στόχων. Η πρόκληση έγκειται στη διασφάλιση μιας ισορροπημένης προσέγγισης που να προάγει τη βιώσιμη ανάπτυξη χωρίς να υπονομεύει την οικονομική σταθερότητα ή τη συνοχή των κοινωνιών (Wzraszcz & Prandecki, 2020: 159-160).

Για την υποστήριξη της εφαρμογής της EGD, η ΕΕ αξιοποιεί ένα σύνολο εργαλείων πολιτικής. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται οι κανονισμοί και τα πρότυπα τυποποίησης, που διασφαλίζουν κοινά κριτήρια και δεσμευτικούς στόχους, καθώς και οι επενδύσεις και η προώθηση της καινοτομίας, που ενισχύουν τη μετάβαση προς πιο πράσινες και αποδοτικές τεχνολογίες. Παράλληλα, εφαρμόζονται εθνικές μεταρρυθμίσεις και ενθαρρύνεται ο διάλογος με τους κοινωνικούς εταίρους, ώστε οι

αλλαγές να γίνονται με κοινωνικά δίκαιο και συμμετοχικό τρόπο. Εξίσου σημαντικός είναι και ο ρόλος της διεθνούς συνεργασίας, η οποία επιτρέπει στην ΕΕ να ηγηθεί παγκοσμίως στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προκλήσεων (European Commission, 2019).

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή συνεργάζεται στενά με τα κράτη μέλη για να ενισχύσει τις κοινές προσπάθειες και να εξασφαλίσει την αποτελεσματική εφαρμογή της ισχύουσας νομοθεσίας που συνδέεται με την EGD. Μέσα από αυτή τη συνεργατική προσέγγιση, επιδιώκεται η δημιουργία ενός συνεκτικού και ολοκληρωμένου πλαισίου που θα επιτρέψει στην ΕΕ να προχωρήσει με συνέπεια προς έναν κλιματικά ουδέτερο και βιώσιμο μέλλον, διασφαλίζοντας παράλληλα την οικονομική ανταγωνιστικότητα και την κοινωνική συνοχή (Wrzaszcz & Prandacki, 2020: 159-160).



Εικόνα 1: Στοιχεία της EGD

Πηγή: European Commission, (2019).

Όλες οι περιοχές και οι οικονομικοί τομείς της ΕΕ χρειάζονται σημαντική οικονομική στήριξη για να μπορέσουν να εφαρμόσουν τις απαιτήσεις της πρωτοβουλίας «ΕΕ για την Επόμενη Γενιά». Παρότι το επενδυτικό σκέλος της Οδηγίας καλύπτει μέρος αυτής της ανάγκης, ο Μηχανισμός Δίκαιης Μετάβασης θα προσφέρει επιπλέον τουλάχιστον 100 δις ευρώ την περίοδο 2021–2027, ειδικά για εκείνες τις περιοχές που θα επηρεαστούν περισσότερο από τις αλλαγές που προβλέπονται. Παράλληλα, η Οδηγία θεωρείται κεντρικό εργαλείο για την ανάκαμψη της Ευρώπης μετά την κρίση Covid-19 (Pawłowski & Sołtysiak, 2024: 1). Έχει ανακοινωθεί ότι περίπου το ένα τρίτο του

συνολικού πακέτου των 1,8 τρισ. ευρώ, που προβλέπει το πρόγραμμα «ΕΕ για την Επόμενη Γενιά» και ο επταετής προϋπολογισμός της ΕΕ, θα χρηματοδοτηθεί μέσω της συγκεκριμένης Οδηγίας (Ataseven, 2023: 15-16).

Η ΕΕ έχει υιοθετήσει σημαντικά μέτρα για την υλοποίηση της EGD, όπως η κλιματική νομοθεσία και ο φόρος άνθρακα στα σύνορα, ενώ παράλληλα δημιούργησε ειδικά ταμεία για να στηρίξει τις επιχειρήσεις στη μετάβαση προς καθαρή και μη ανθρακική ενέργεια. Τα ευρωπαϊκά κονδύλια για περιβαλλοντικές δράσεις τα επόμενα δέκα χρόνια ξεπερνούν το 1 τρις δολάρια, αποτελώντας τη μεγαλύτερη χρηματοδοτική δέσμευση για το κλίμα στην ιστορία της ΕΕ. Το 30% του πολυετούς προϋπολογισμού και του Next Generation EU θα κατευθυνθεί σε δράσεις για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Το Next Generation EU, ύψους 806,9 δισ. ευρώ, στηρίζει την οικονομική ανάκαμψη μετά την πανδημία και αποσκοπεί σε μια πιο πράσινη, ψηφιακή και ανθεκτική Ευρώπη (Uçak & Villi, 2021: 94).

Η χρηματοδότηση αυτή εντάσσεται σε ένα ευρύτερο επενδυτικό σχέδιο για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050, συνδυάζοντας ευρωπαϊκά, εθνικά, δημόσια και ιδιωτικά κεφάλαια. Επιπλέον, 15 δισ. ευρώ θα διατεθούν στο Ευρωπαϊκό Ταμείο Αγροτικής Ανάπτυξης για τη στήριξη των αγροτικών περιοχών σύμφωνα με τους στόχους της EGD και τις στρατηγικές «Βιοποικιλότητα» και της F2F. Λόγω του σημαντικού οικονομικού ρόλου της ΕΕ, οι πολιτικές της EGD επηρεάζουν και τις χώρες με τις οποίες συνεργάζεται. Η επιτυχία της εξαρτάται από τη διεθνή συμμετοχή, καθώς χωρίς κοινή δράση υπάρχει κίνδυνος αύξησης των παγκόσμιων εκπομπών (Ataseven, 2023: 16).

2.1.3 Η Στρατηγική F2F

Η Στρατηγική F2F αποτελεί μια δράση που ανέπτυξε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (Schebesta & Candel, 2020: 586; Wesseler, 2022: 1826). Εντάσσεται στο πλαίσιο της, δηλαδή του συνολικού πακέτου πολιτικών της ΕΕ που επιδιώκει τη μετάβαση της ευρωπαϊκής οικονομίας σε ένα πιο βιώσιμο μοντέλο (López-Santiago et al., 2024: 1). Η στρατηγική αυτή επικεντρώνεται ειδικά στο σύστημα παραγωγής τροφίμων, με σκοπό να το καταστήσει πιο βιώσιμο, ανθεκτικό και περιβαλλοντικά υπεύθυνο. Δίνει έμφαση σε γεωργικές πρακτικές που προστατεύουν το περιβάλλον, στη διατήρηση της βιοποικιλότητας και στη συμβολή στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής. Παράλληλα, επιδιώκει υψηλά πρότυπα ασφάλειας τροφίμων σε όλη την εφοδιαστική

αλυσίδα, μείωση της χρήσης χημικών φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων, ενίσχυση της βιολογικής γεωργίας και προώθηση μιας κυκλικής οικονομίας που μειώνει τα απόβλητα και αξιοποιεί καλύτερα τους διαθέσιμους πόρους (Billen et al., 2024: 1; Schebesta et al., 2020: 420).

Η στρατηγική F2F αποτελεί μια ολοκληρωμένη δεκαετή πρωτοβουλία της ΕΕ, που στοχεύει να μεταμορφώσει τον αγροδιατροφικό τομέα σε ένα πιο δίκαιο, υγιεινό και περιβαλλοντικά υπεύθυνο σύστημα τροφίμων. Επιχειρεί να προσαρμόσει τον τρόπο που παράγονται και καταναλώνονται τα τρόφιμα σε όλο το κόσμο, ενώ παράλληλα εκφράζει έντονη ανησυχία για τη διασφάλιση της επισιτιστικής ασφάλειας (Bazzani & Canavari, 2013: 11; Nicastro & Carillo, 2021: 1).

Ακόμη, επιδιώκει, μεταξύ άλλων, την προώθηση υγιεινών τροφίμων με προσιτό κόστος, τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής, την ανάπτυξη της βιολογικής γεωργίας, τον περιορισμό φυτοφαρμάκων, λιπασμάτων και αντιβιοτικών, την προστασία της υγείας των ζώων, τη μείωση της σπατάλης τροφίμων και τη στήριξη των αγροτών, ώστε η μετάβαση να είναι δίκαιη (Borrego et al., 2023: 3).

Για την επίτευξη αυτών των στόχων, η ΕΕ θέτει συγκεκριμένους ποσοτικούς στόχους έως το 2030, όπως μείωση κατά 50% της χρήσης φυτοφαρμάκων και αντιμικροβιακών, μείωση θρεπτικών απωλειών και χρήσης λιπασμάτων, καθώς και αύξηση της βιολογικής καλλιέργειας στο 25% των γεωργικών εκτάσεων (Pawłowski & Sołtysiak, 2024: 1; Pilvere et al., 2022: 1). Η στρατηγική προβλέπει επίσης νέα νομοθεσία και ρυθμίσεις, όπως αναθεώρηση της οδηγίας για τα φυτοφάρμακα, νέους κανόνες για τα κτηνιατρικά φάρμακα και μέτρα για τη διαχείριση θρεπτικών συστατικών. Παράλληλα, στηρίζει την κυκλοφορία νέων ζωοτροφικών προσθέτων, τα οικολογικά προγράμματα και πρακτικές όπως η γεωργία ακριβείας, η αγροοικολογία και η αγροδοασκοκομία (Borrego et al., 2023: 3).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και στη φορολογική πολιτική. Η ΕΕ προτείνει τη χρήση φορολογικών κινήτρων για να ενθαρρυνθούν πιο βιώσιμες και υγιεινές επιλογές, όπως χαμηλότεροι συντελεστές ΦΠΑ για βιολογικά προϊόντα. Ωστόσο, αρκετοί ερευνητές επισημαίνουν ότι η επιτυχία της στρατηγικής εξαρτάται από την επίλυση συγκρούσεων συμφερόντων και από τη διάθεση όλων των κρατών μελών να υιοθετήσουν ουσιαστικές αλλαγές, συμπεριλαμβανομένων φορολογικών μέτρων (Borrego et al., 2023: 3).

Γενικότερα, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει ο κλάδος τροφίμων στο πεδίο της βιωσιμότητας είναι σημαντικές και αφορούν περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές πτυχές σε όλα τα στάδια παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης (Sadiku et al., 2019: 128; Yadav et al., 2022). Η διαχείριση αυτών των θεμάτων απαιτεί λύσεις που συνδυάζουν περιβαλλοντική προστασία, κοινωνική υπευθυνότητα και οικονομική βιωσιμότητα (Lezoche et al., 2020: 1).

Παρά τις μέχρι τώρα προσπάθειες, ο αγροδιατροφικός τομέας βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο υιοθέτησης ολοκληρωμένων βιώσιμων πρακτικών. Αν και πολλές μελέτες αναδεικνύουν τόσο τις προκλήσεις όσο και τις ευκαιρίες για τις επιχειρήσεις τροφίμων (Amin-Chaudhry et al., 2022; 1-2), η συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα του τομέα καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη πιο δομημένων και ολοκληρωμένων μεθοδολογιών ενσωμάτωσης της βιωσιμότητας (Barth et al., 2017: 1).

2.1.4 Σχέση με την ΚΑΠ

Με την αύξηση του αστικού πληθυσμού, τα συστήματα τροφίμων και οι φυσικοί πόροι της Ευρώπης αντιμετωπίζουν αυξανόμενες πιέσεις, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη στρατηγικών βιώσιμης διαχείρισης που να αντιμετωπίζουν τόσο περιβαλλοντικές όσο και κοινωνικές προκλήσεις (Pretty et al., 2018: 441-442). Η ΚΑΠ της ΕΕ αποτελεί βασικό εργαλείο για τη μετατροπή του αγροδιατροφικού τομέα σε ένα βιώσιμο και ανθεκτικό σύστημα. Μέσω μέτρων προστασίας της γης, του εδάφους και της βιοποικιλότητας, η ΚΑΠ παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τη μετάβαση σε παραγωγικές πρακτικές που είναι ταυτόχρονα φιλικές προς το περιβάλλον και οικονομικά βιώσιμες. Η στρατηγική αυτή υποστηρίζει και συμπληρώνει τη Στρατηγική F2F, που στοχεύει στη βιωσιμότητα σε όλα τα στάδια της τροφικής αλυσίδας (Recanatì et al., 2019: 908; Wesseler, 2022: 1827).

Παράλληλα, η EGD ενισχύει την έμφαση στη βιώσιμη παραγωγή τροφίμων, θεωρώντας την κρίσιμη για την επίτευξη πλανητικής υγείας, κοινωνικής ευημερίας και οικονομικής βιωσιμότητας. Παρότι έχουν σημειωθεί σημαντικά βήματα προόδου, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις που απαιτούν περαιτέρω δράσεις, όπως η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η ενίσχυση της ανθεκτικότητας των συστημάτων τροφίμων και η εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών σε ολόκληρη την ΕΕ (Gobin & Uljee, 2025: 2; Pe'er et al., 2022: 305).

Η F2F συνδέεται άμεσα με την ΚΑΠ, καθώς αποτελεί τον κύριο μηχανισμό χρηματοδότησης και υλοποίησης των περιβαλλοντικών και κλιματικών στόχων της ΕΕ στον γεωργικό τομέα (Bazzani & Canavari, 2013: 11; Nicastro & Carillo, 2021: 1). Η ΚΑΠ παρέχει ένα ευρύ πλαίσιο πολιτικών εργαλείων και οικονομικών κινήτρων που επιτρέπουν στους αγρότες να υιοθετούν πρακτικές βιώσιμης γεωργίας, οι οποίες ευθυγραμμίζονται με τις προτεραιότητες της F2F (Alons, 2017: 1; Lazíková et al., 2019: 1-2).

Η νέα περίοδος εφαρμογής της ΚΑΠ (2023–2027) εισάγει σημαντικές αλλαγές, οι οποίες επικεντρώνονται στη βιώσιμη παραγωγή και στην ενίσχυση των περιβαλλοντικών δράσεων. Οι κυριότερες πρωτοβουλίες περιλαμβάνουν τα οικολογικά προγράμματα (eco-schemes), που παρέχουν οικονομικά κίνητρα σε αγρότες οι οποίοι εφαρμόζουν πρακτικές που μειώνουν τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, περιορίζουν τη χρήση χημικών φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων, ενισχύουν τη βιοποικιλότητα και υποστηρίζουν τη βιολογική γεωργία (Egjanec & Egjanec, 2015: 53). Οι δράσεις αυτές αποτελούν βασικό εργαλείο για την επίτευξη των συγκεκριμένων στόχων της F2F, όπως η μείωση κατά 50% της χρήσης φυτοφαρμάκων και η αύξηση της βιολογικής γεωργίας στο 25% της γεωργικής γης έως το 2030 (Pawłowski & Sołtysiak, 2024: 1-2; Tataridas et al., 2022: 1).

Επιπλέον, η ΚΑΠ συνδέεται με τα Ταμεία Αγροτικής Ανάπτυξης και επενδυτικά προγράμματα που ενισχύουν την εισαγωγή καινοτομιών, τεχνολογιών ακριβείας και βιώσιμων πρακτικών παραγωγής. Μέσω αυτών των εργαλείων, η ΚΑΠ προωθεί τη μετάβαση προς πιο οικολογικά αποδοτικά συστήματα παραγωγής, υποστηρίζοντας παράλληλα την κοινωνική και οικονομική βιωσιμότητα των αγροτικών κοινοτήτων (López-Santiago et al., 2024: 1).

Η στρατηγική αυτή και η ΚΑΠ, επομένως, λειτουργούν συμπληρωματικά: η F2F ορίζει τους στρατηγικούς στόχους για την αειφορία και τη βιωσιμότητα του συστήματος τροφίμων, ενώ η ΚΑΠ παρέχει τα χρηματοδοτικά εργαλεία, τα κίνητρα και τις νομικές ρυθμίσεις που επιτρέπουν την πρακτική εφαρμογή αυτών των στόχων σε επίπεδο αγροτών (Borrego et al., 2023: 3; Stefanis et al., 2024: 1). Η αλληλεπίδραση αυτή ενισχύει τη δυνατότητα επίτευξης περιβαλλοντικών και κλιματικών στόχων, μειώνοντας παράλληλα τις κοινωνικές και οικονομικές ανισότητες στον αγροδιατροφικό τομέα (Bertoni et al., 2020: 1-2).

Η ΚΑΠ έχει σταδιακά ενσωματώσει περιβαλλοντικά και οικολογικά μέτρα, όπως η πολλαπλή συμμόρφωση, οι οικολογικές πληρωμές και τα οικολογικά προγράμματα, με

στόχο την προώθηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών και τη διατήρηση της βιοποικιλότητας από το 2005 έως το 2030 (Prigoreanu et al., 2024: 2; Recanati et al., 2019: 908; Tataridas et al., 2022: 2; Wesseler, 2022: 1827). Αυτές οι μεταρρυθμίσεις παρέχουν κίνητρα στους αγρότες να προστατεύουν τους φυσικούς πόρους, να μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να ενισχύουν τις οικοσυστημικές υπηρεσίες, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζουν την ισορροπία μεταξύ παραγωγικότητας και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Η συμμετοχή των αγροτών εξαρτάται από τα οικονομικά και περιβαλλοντικά κίνητρα, καθώς και από την πολυπλοκότητα των μέτρων, με τα πιο σύνθετα να απαιτούν προσεκτική περιβαλλοντική διαχείριση (D'Alberto et al., 2024: 3). Πρακτικές όπως η κάλυψη των καλλιεργειών, η μηδενική άροση και η αμειψισπορά επηρεάζουν άμεσα τη χρήση της γης, ενισχύοντας τη δέσμευση άνθρακα και μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Spotorno et al., 2024: 2).

Οι πρόσφατες εξελίξεις στη μοντελοποίηση χρήσης και κάλυψης γης LULC έχουν βελτιώσει τον χωροταξικό σχεδιασμό, αξιοποιώντας τηλεπισκόπηση υψηλής ανάλυσης, χωροχρονικές αναλύσεις και τεχνητή νοημοσύνη. Τα δεδομένα και οι τεχνικές μηχανικής μάθησης, οι προσομοιώσεις με πράκτορες και τα κυβελοειδή αυτόματα χρησιμοποιούνται πλέον για να προβλέψουν τις αλλαγές στη χρήση γης σε κοινοτικό και περιφερειακό επίπεδο, όπως η αστικοποίηση, η μετατροπή γεωργικών εδαφών και ο κατακερματισμός οικοτόπων (Wan et al., 2024: 3; Wang et al., 2022: 2). Τα μοντέλα αυτά υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων σε περιοχές όπου η γεωργία, η δασοκομία και η αστική ανάπτυξη ανταγωνίζονται για τον ίδιο χώρο, επιτρέποντας τη διαμόρφωση προσαρμοστικών στρατηγικών για την προστασία του περιβάλλοντος (Liu et al., 2024: 2).

Σε ευρύτερη κλίμακα, τα μοντέλα LULC αξιολογούν τις επιπτώσεις της χρήσης γης και του κλίματος στις οικοσυστημικές υπηρεσίες, όπως η διατήρηση των οικοτόπων, η προστασία από πλημμύρες και η βιοποικιλότητα (Kim et al., 2018: 2). Η χρήση σεναρίων και συγκρίσεων μεταξύ «κανονικής λειτουργίας» και στρατηγικών εξοικονόμησης πόρων επιτρέπει την εκτίμηση των επιπτώσεων των πολιτικών και την προσαρμογή των στρατηγικών διαχείρισης γης σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο (Finch et al., 2021: 655).

Η διαχείριση της γης παίζει διττό ρόλο στον κύκλο του άνθρακα: τα αέρια του θερμοκηπίου, όπως CO₂, N₂O και CH₄, εκπέμπονται από διάφορες δραστηριότητες,

ενώ η δέσμευση άνθρακα απομακρύνει CO₂ από την ατμόσφαιρα και το αποθηκεύει στο έδαφος. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω φυσικών μηχανισμών, όπως η φωτοσύνθεση, η μικροβιακή δραστηριότητα και η προσθήκη οργανικής ύλης στο έδαφος, συμβάλλοντας σημαντικά στη μείωση της κλιματικής αλλαγής (Chang et al., 2021: 2; Gauci et al., 2024: 796; Li et al., 2025: 2).

Σε γενικές γραμμές, η ΚΑΠ προσφέρει επίσης μηχανισμούς παρακολούθησης και αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιδόσεων των αγροτών, διασφαλίζοντας ότι οι δράσεις που χρηματοδοτούνται συνεισφέρουν ουσιαστικά στους στόχους της F2F και της EGD (Bazzani & Canavari, 2013: 11; Nicastro & Carillo, 2021: 1). Αυτό καθιστά την ΚΑΠ βασικό εργαλείο όχι μόνο οικονομικής υποστήριξης, αλλά και στρατηγικού σχεδιασμού για τη βιωσιμότητα του αγροδιατροφικού τομέα της ΕΕ (Salvan et al., 2022: 2).

2.2 Η σημασία της γεωργίας ακριβείας στο πλαίσιο της EGD

Η γεωργία αποτελεί θεμελιώδη πυλώνα της παγκόσμιας οικονομίας, καθώς παρέχει τρόφιμα και πρώτες ύλες που υποστηρίζουν τον αυξανόμενο πληθυσμό και διασφαλίζουν την επισιτιστική ασφάλεια (Wegren & Elvestad, 2018: 565). Ωστόσο, η αύξηση της ζήτησης για τρόφιμα δημιουργεί έντονες πιέσεις στους φυσικούς πόρους και το περιβάλλον, οδηγώντας συχνά σε εντατικοποίηση της παραγωγής, υπερβολική χρήση νερού, λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, υποβάθμιση του εδάφους και απώλεια βιοποικιλότητας. Αυτή η κατάσταση καθιστά αναγκαία την υιοθέτηση καινοτόμων και βιώσιμων στρατηγικών που θα επιτρέπουν τη μεγιστοποίηση της παραγωγής με ταυτόχρονη προστασία του περιβάλλοντος (Sanyaolu & Sadowski, 2024: 2-3).

Η γεωργία ακριβείας προτείνεται ως μία τέτοια καινοτόμος προσέγγιση, αξιοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής, τη μείωση των εισροών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς και την αύξηση της οικονομικής αποδοτικότητας των αγροτικών εκμεταλλεύσεων (Abobatta, 2021: 23; Mishra, 2022: 31). Σε αντίθεση με την παραδοσιακή γεωργία, η γεωργία ακριβείας εστιάζει στη διαχείριση μεμονωμένων τμημάτων των αγρών, χρησιμοποιώντας συστήματα που συνδυάζουν οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, όπως η ακριβής εφαρμογή λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και άρδευσης (Nabi et al., 2017: 370).

Η εφαρμογή τεχνολογιών όπως η τηλεπισκόπηση, τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GNSS), τα γεωγραφικά πληροφοριακά συστήματα (GIS), οι αισθητήρες και τα drones επιτρέπει στους αγρότες να παρακολουθούν παραμέτρους όπως η ποιότητα του εδάφους, η υγεία των καλλιεργειών, η υγρασία και η θερμοκρασία (Karunathilake et al., 2023: 1; Petrović et al., 2024; 1-2). Με βάση αυτά τα δεδομένα, οι παραγωγοί μπορούν να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για φύτευση, λίπανση, άρδευση και συγκομιδή, βελτιστοποιώντας τη χρήση πόρων, μειώνοντας τα απόβλητα και ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των συστημάτων (Zaman, 2023: 1-3).

Η γεωργία ακριβείας ενισχύει παράλληλα τους στόχους της στρατηγικής F2F και της EGD, όπως η μείωση της χρήσης φυτοφαρμάκων και αντιβιοτικών, η προώθηση της βιολογικής γεωργίας και η ενίσχυση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας σε όλη την αγροδιατροφική αλυσίδα (Karunathilake et al., 2023: 1; Nabi et al., 2017: 370). Επιπλέον, συνδέεται στενά με την ΚΑΠ, υποστηρίζοντας οικολογικά προγράμματα, οικολογικές πληρωμές και αγρο-περιβαλλοντικά μέτρα που προωθούν πρακτικές όπως η αμειψισπορά, η κάλυψη καλλιεργειών, η διαχείριση θρεπτικών στοιχείων και η δέσμευση άνθρακα στο έδαφος (Petrović et al., 2024; 1-2; Zaman, 2023: 1-3).

Τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη της γεωργίας ακριβείας είναι σημαντικά. Μειώνει το κόστος εισροών, αυξάνει την παραγωγικότητα και την ποιότητα των προϊόντων, και επιτρέπει στους αγρότες να συμμετέχουν σε προγράμματα στήριξης και επιδοτήσεις (Liu et al., 2017: 562; West & Kovacs, 2017: 1). Η χρήση συστημάτων ανάλυσης δεδομένων και ψηφιακών τεχνολογιών δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης προσαρμοστικών στρατηγικών διαχείρισης πόρων, αυξάνοντας την ανθεκτικότητα των γεωργικών συστημάτων στις κλιματικές αλλαγές (Kanwal et al., 2022: 1-2; Mizlik, 2023: 384).

Ωστόσο, η υιοθέτηση της δεν είναι ομοιόμορφη. Οι μικρές εκμεταλλεύσεις, ειδικά σε αναπτυσσόμενες χώρες, αντιμετωπίζουν εμπόδια όπως υψηλό κόστος εξοπλισμού, έλλειψη τεχνικής υποστήριξης, περιορισμένες ψηφιακές υποδομές και χαμηλό εισόδημα (Blasch et al., 2022: 33-34; Krell et al., 2020: 215-216; Mizlik, 2023: 384; Onyango et al., 2021: 1). Οι μεγαλύτερες εκμεταλλεύσεις μπορούν να επωφεληθούν περισσότερο, λόγω οικονομιών κλίμακας, μεγαλύτερης μεταβλητότητας αγρού και καλύτερου ελέγχου των πόρων. Παρά τις προκλήσεις, η γεωργία ακριβείας έχει ήδη αρχίσει να εφαρμόζεται σε χώρες όπως η Γερμανία, η Πολωνία, η Ουγγαρία και οι ΗΠΑ, με ποικίλο βαθμό υιοθέτησης, και εξελίσσεται συνεχώς μέσω τεχνολογιών όπως Τεχνητή Νοημοσύνη και αισθητήρες ακριβείας (Mohr & Kühn, 2021: 1816).

Συμπερασματικά, η γεωργία ακριβείας αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την επίτευξη των στόχων της EGD. Συνδέει την παραγωγική αποδοτικότητα με τη διατήρηση των φυσικών πόρων, την κλιματική ουδετερότητα και τη βιώσιμη ανάπτυξη των αγροτικών περιοχών. Με κατάλληλη υποστήριξη, κατάρτιση και επενδύσεις, μπορεί να αποτελέσει τον πυλώνα της σύγχρονης βιώσιμης γεωργίας στην Ευρώπη και παγκοσμίως (Sanyaolu & Sadowski, 2024: 2-3).

2.3 Τεχνολογίες και εφαρμογές της Γεωργίας Ακριβείας

2.3.1 Ορισμός της Γεωργίας Ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας είναι μια ολιστική, βιώσιμη και καινοτόμος προσέγγιση που στοχεύει στη συστηματική διαχείριση της γεωργικής παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφοροποιήσεις σε χωρικό και χρονικό επίπεδο (Lee et al., 2021: 1). Η γεωργία ακριβείας ή αλλιώς διαχείριση καλλιεργειών σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, βασίζεται στην παρατήρηση και ανίχνευση της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των καλλιεργειών και στην εφαρμογή στοχευμένων μέτρων διαχείρισης ανάλογα με τις ανάγκες κάθε τμήματος του χωραφίου. Με άλλα λόγια, αντί να εφαρμόζονται ομοιόμορφα εισροές όπως λιπάσματα, φυτοφάρμακα ή νερό σε όλη την έκταση, οι ενέργειες προσαρμόζονται ανάλογα με τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες, δορυφόρους και GIS. Αυτή η στοχευμένη προσέγγιση επιτρέπει την αύξηση της παραγωγικότητας, τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων (Monteiro et al., 2021: 2).

Η γεωργία ακριβείας, σύμφωνα με τους Nabi et al., (2017: 370), ορίζεται ως ένα ιδιαίτερα αποδοτικό γεωργικό σύστημα που αξιοποιεί σύγχρονες τεχνολογίες και προηγμένες τεχνικές διαχείρισης με στόχο τη μέγιστη παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Μέσα από την εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών στον προγραμματισμό των καλλιεργειών, το όργωμα, τη φύτευση, τη λίπανση, την εφαρμογή φυτοφαρμάκων, τη συγκομιδή και τη μετασυλλεκτική επεξεργασία, οι αγρότες μπορούν να αυξήσουν την παραγωγικότητα, να βελτιώσουν την ποιότητα των προϊόντων τους και να μειώσουν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο των δραστηριοτήτων τους.

Με βάση τους Núñez-Cárdenas et al., (2022: 1) η γεωργία ακριβείας αποτελεί σήμερα μια ισχυρή λύση για τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των γεωργικών συστημάτων. Μέσω της ακριβούς παρακολούθησης και ανάλυσης των παραμέτρων κάθε αγρού, επιτρέπει την βελτιστοποιημένη χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων,

νερού και άλλων εισροών, μειώνοντας έτσι τόσο το κόστος παραγωγής όσο και τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Επιπλέον, σύμφωνα με τη Διεθνή Εταιρεία Γεωργίας Ακριβείας, η γεωργία ακριβείας θεωρείται στρατηγική διαχείρισης που συλλέγει, επεξεργάζεται και αναλύει δεδομένα φυτών και ζώων σε χωρικό, χρονικό και μεμονωμένο επίπεδο και τα συνδυάζει με άλλες πληροφορίες για να υποστηρίξει τις αποφάσεις διαχείρισης. Αυτό επιτρέπει την αξιολόγηση της μεταβλητότητας στο χωράφι και οδηγεί σε βελτιωμένη αποδοτικότητα χρήσης πόρων, παραγωγικότητα, ποιότητα, κερδοφορία και βιωσιμότητα της γεωργικής παραγωγής. Η γεωργία ακριβείας δεν αποτελεί μία μοναδική τεχνική, αλλά ένα σύνολο μεθοδολογιών και στρατηγικών που στοχεύουν στην αύξηση της ακρίβειας της γεωργικής διαχείρισης (Rejeb et al., 2024: 1).

2.3.2 Στόχοι της Γεωργίας Ακριβείας

Η Γεωργία Ακριβείας στοχεύει στη δημιουργία ενός ολιστικού και βιώσιμου γεωργικού συστήματος που μεγιστοποιεί την παραγωγικότητα και ταυτόχρονα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι βασικοί στόχοι της μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες: οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς (Duckett et al., 2018: 2; Kernecker et al., 2020: 34-35; Walter et al., 2017: 6148; Yarashynskaya & Prus, 2022: 1).

2.3.2.1 Οικονομικοί στόχοι

Ένας από τους πρωταρχικούς στόχους της γεωργίας ακριβείας είναι η αύξηση της παραγωγικότητας και της κερδοφορίας των αγροτικών εκμεταλλεύσεων (Duckett et al., 2018: 2; Kernecker et al., 2020: 34-35; Pandeya et al., 2025: 1-2; Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020: 2). Μέσω της στοχευμένης και τεκμηριωμένης εφαρμογής εισροών, όπως λιπάσματα, φυτοφάρμακα και νερό, οι αγρότες μπορούν να παράγουν περισσότερα προϊόντα με λιγότερο κόστος, μειώνοντας την υπερβολική χρήση εισροών και τις περιττές δαπάνες. Η γεωργία ακριβείας ενισχύει επίσης την αποδοτικότητα της διαχείρισης, μειώνοντας τα λειτουργικά κόστη, προάγοντας τη διαφοροποίηση του εισοδήματος και ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα των εκμεταλλεύσεων (Torero, 2021: 99-100). Επιπλέον, η δυνατότητα παρακολούθησης των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο και σε χωρική κλίμακα δίνει τη δυνατότητα στους παραγωγούς να

προγραμματίσουν καλύτερα το όργωμα, τη φύτευση, τη λίπανση και τη συγκομιδή, αυξάνοντας την απόδοση και την ποιότητα των προϊόντων (Walter et al., 2017: 6148).

2.3.2.2 Περιβαλλοντικοί στόχοι

Η γεωργία ακριβείας στοχεύει επίσης στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της γεωργίας. Η ακριβής εφαρμογή λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, σε συνδυασμό με τον βέλτιστο χρονοισμό και τη χρήση τεχνολογιών όπως η τηλεπισκόπηση και τα GIS, μειώνει τη ρύπανση του εδάφους και των υδάτων, περιορίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και επιβραδύνει τη διαδικασία υποβάθμισης του εδάφους (Duckett et al., 2018: 2). Ειδικότερα, η βελτιστοποίηση της άρδευσης και της διαχείρισης θρεπτικών στοιχείων προάγει την εξοικονόμηση νερού και μειώνει τις απώλειες αζώτου, οδηγώντας σε πιο βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων. Μέσα από τη μείωση της εξάρτησης από εισροές που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα και την ενσωμάτωση πράσινων τεχνολογικών λύσεων, συμβάλλει επίσης στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της γεωργικής παραγωγής (Yarashynskaya & Prus, 2022: 1).

2.3.2.3 Κοινωνικοί στόχοι

Η γεωργία ακριβείας έχει σημαντικό αντίκτυπο και στις κοινωνικές διαστάσεις της γεωργίας. Βοηθά στην επίτευξη της επισιτιστικής ασφάλειας, καθώς η ακριβής και αποτελεσματική διαχείριση των εισροών και των καλλιεργειών αυξάνει τις αποδόσεις, συμβάλλοντας στη θρέψη του αυξανόμενου πληθυσμού, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020; 2). Παράλληλα, προάγει τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης στις αγροτικές περιοχές, καθώς η χρήση τεχνολογιών μειώνει τη σκληρή χειρωνακτική εργασία, διευκολύνει τη διαχείριση καλλιεργειών σε δύσβατες ή περιθωριοποιημένες περιοχές και δημιουργεί νέες ευκαιρίες απασχόλησης στον τομέα της τεχνολογίας γεωργίας (Torero, 2021: 99-100). Η γεωργία ακριβείας συμβάλλει επίσης στη μείωση του τεχνολογικού χάσματος μεταξύ ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών. Οι τεχνολογίες της είναι εγγενώς προσαρμόσιμες σε διαφορετικά περιβάλλοντα και μεγέθη εκμεταλλεύσεων, παρέχοντας τη δυνατότητα μετάβασης από παραδοσιακές σε σύγχρονες πρακτικές γεωργικής παραγωγής βιομηχανικής κλίμακας. Η ενσωμάτωσή τους ενισχύει την εκπαίδευση και την εξοικείωση των νέων με τη γεωργία, καθιστώντας τη πιο ελκυστική επαγγελματική επιλογή και συμβάλλοντας στη συγκράτηση του αγροτικού πληθυσμού (Yarashynskaya & Prus, 2022: 1).

Συνολικά, οι στόχοι της γεωργίας ακριβείας επικεντρώνονται στη συνύπαρξη οικονομικής απόδοσης, περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και κοινωνικής ευημερίας, καθιστώντας την ένα κρίσιμο εργαλείο για τη σύγχρονη γεωργία. Μέσα από την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών και συστημάτων διαχείρισης, η γεωργία ακριβείας επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των πόρων, τη διαχείριση της μεταβλητότητας των καλλιεργειών και την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των αγροτικών συστημάτων απέναντι στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και της αυξανόμενης ζήτησης τροφίμων (Núñez-Cárdenas et al., 2022: 2).

2.3.3 Τεχνολογίες της Γεωργίας Ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας βασίζεται στην αξιοποίηση προηγμένων τεχνολογιών και πληροφοριακών συστημάτων για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν στους αγρότες να παρακολουθούν, να αναλύουν και να διαχειρίζονται σε πραγματικό χρόνο τη μεταβλητότητα των καλλιεργειών και των εκτάσεων, καθιστώντας δυνατή τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων (Pandeya et al., 2025: 2).

Τα τελευταία χρόνια έχει εξελιχθεί σε ένα από τα πλέον δυναμικά και καινοτόμα πεδία του αγροτικού τομέα, προσφέροντας νέες ευκαιρίες για τη μετάβαση σε περισσότερο βιώσιμα, αποδοτικά και ανθεκτικά παραγωγικά συστήματα. Στο επίκεντρό της βρίσκεται η χρήση τεχνολογιών που επιτρέπουν την ακριβή παρακολούθηση και διαχείριση της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των αγροτεμαχίων, με στόχο την ορθολογική χρήση πόρων και την αύξηση της παραγωγικότητας. Η προσέγγιση αυτή διαμορφώθηκε και αναπτύχθηκε βαθμιαία, ακολουθώντας την τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών (Karunathilake et al., 2023: 1).

Αρχικά, η ΓΑ στηριζόταν κυρίως σε τεχνολογίες όπως οι εφαρμογές μεταβλητού ρυθμού (Variable Rate Technology – VRT), οι ηλεκτρονικοί χάρτες, τα συστήματα καθοδήγησης και τα συστήματα παρακολούθησης της απόδοσης των καλλιεργειών (Liu et al., 2021: 4322). Η διάθεση των συστημάτων GPS στο ευρύ κοινό τη δεκαετία του '80 αποτέλεσε σημείο καμπής για την εξέλιξη της γεωργίας, καθώς το 1988 στη βόρεια Γερμανία και στη Δανία πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες πειραματικές εφαρμογές τεχνολογιών VRT (Karunathilake et al., 2023: 1). Λίγα χρόνια νωρίτερα, οι γεωργικές εκμεταλλεύσεις των ΗΠΑ είχαν ήδη αρχίσει να χρησιμοποιούν GPS (από το 1983), ανοίγοντας τον δρόμο για την ακριβή χαρτογράφηση των αγροτεμαχίων, τον

εντοπισμό ζωνών διαφοροποίησης και την προσαρμογή των καλλιεργητικών πρακτικών με βάση πραγματικά δεδομένα (Shin et al., 2022: 20; Hedley, 2015: 12).

Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, η ανάπτυξη συστημάτων παρακολούθησης της απόδοσης (yield monitoring) επέτρεψε στους αγρότες να καταγράφουν την παραγωγή σε πραγματικό χρόνο, να αξιολογούν τις επιδόσεις κάθε τμήματος του χωραφιού και να εντοπίζουν έγκαιρα προβλήματα σχετιζόμενα με θρεπτικές ελλείψεις, υδατικές ανάγκες ή ασθένειες (Hundal et al., 2023: 2). Παράλληλα, η ταχεία εξέλιξη των συστημάτων τηλεπισκόπησης –δορυφορικής, εναέριας και επίγειας– επέτρεψε τη συστηματική συλλογή δεδομένων υψηλής ανάλυσης, παρέχοντας λεπτομερή πληροφορία για την υγεία των καλλιεργειών, τη βλάστηση, την εδαφική υγρασία και άλλες κρίσιμες παραμέτρους (Monteiro et al., 2021: 2). Η χρήση drones, πολυφασματικών αισθητήρων, LiDAR, ραντάρ και υπερφασματικών δεδομένων επέτρεψε βαθύτερη κατανόηση των χωρικών ιδιοτήτων των αγρών, διευκολύνοντας την έγκαιρη λήψη αποφάσεων (Karunathilake et al., 2023: 2-3).

Σημαντικό είναι επίσης ότι η γεωργία ακριβείας δεν περιορίζεται στις φυτικές καλλιέργειες: επεκτείνεται στην κτηνοτροφία (π.χ. παρακολούθηση υγείας ζώων με αισθητήρες), στην υδατοκαλλιέργεια (έλεγχος ποιότητας νερού και τροφής), στην αγροδασοκομία και σε υβριδικά παραγωγικά συστήματα (Monteiro et al., 2021: 2; Trivelli et al., 2019: 1730-1731; Ma et al., 2021: 3). Έτσι, η γεωργία ακριβείας αποτελεί σήμερα μέρος ενός ευρύτερου πλαισίου ψηφιακού μετασχηματισμού της αγροτικής παραγωγής (Karunathilake et al., 2023: 2-3).

Ωστόσο, παρά την τεχνολογική πρόοδο, ο τομέας αντιμετωπίζει ακόμα σημαντικούς περιορισμούς. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται η μη αποδοτική χρήση πόρων σε αρκετές περιοχές, η επίμονη πρακτική της μονοκαλλιέργειας, η εντατικοποίηση της κτηνοτροφίας (Liu et al., 2021: 4322), οι περιβαλλοντικές δυσλειτουργίες, καθώς και η άνιση κατανομή των ψηφιακών εργαλείων μεταξύ διαφορετικών περιοχών και κοινωνικών ομάδων αγροτών (Sendros et al., 2022: 2). Παράλληλα, ζητήματα όπως η ανεπαρκής εκπαίδευση των παραγωγών, η δυσκολία πρόσβασης σε υποδομές, αλλά και η αργή υιοθέτηση νέων πρακτικών, περιορίζουν την πραγματική επίδραση των τεχνολογιών στην παραγωγικότητα και τη βιωσιμότητα (Chung et al., 2022: 735).

Η είσοδος της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης (Industry 4.0) το 2011 αποτέλεσε κρίσιμο σημείο για τον μετασχηματισμό της γεωργία ακριβείας, καθώς τεχνολογίες όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη (AI), η ρομποτική, η ανάλυση μεγάλων δεδομένων και το blockchain άρχισαν να εφαρμόζονται

συστηματικά στη γεωργία (Liu et al., 2021: 4322). Από το 2017, η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών οδήγησε στη δημιουργία της λεγόμενης «*Έξυπνης Γεωργίας*» ή Γεωργίας 4.0 (Javaid et al., 2022: 150), η οποία χαρακτηρίζεται από αυτοματοποιημένα συστήματα, δυνατότητα πρόγνωσης, συνδεδεμένα μηχανήματα και υψηλό βαθμό αυτονομίας. Η χρήση αυτόνομων ρομπότ για σπορά, ζιζανιοκτονία, συγκομιδή και δειγματοληψία εδάφους, καθώς και οι συσκευές IoT που συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, μειώνουν το κόστος εργασίας και αυξάνουν την αποδοτικότητα (Karunathilake et al., 2023: 2-3).

Η έξυπνη γεωργία ανοίγει νέους δρόμους για την αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων, όπως η κλιματική αλλαγή, η έλλειψη νερού, η ανάγκη παραγωγής περισσότερης τροφής με λιγότερους πόρους και η ανάγκη προστασίας της βιοποικιλότητας (Liu et al., 2021: 4322). Μέσα από προηγμένες τεχνολογίες αισθητήρων, μοντέλα πρόβλεψης και αυτοματοποιημένα συστήματα λήψης αποφάσεων, οι αγρότες αποκτούν τη δυνατότητα να κάνουν πιο στοχευμένες και έγκυρες επιλογές, εξασφαλίζοντας παραγωγή υψηλής ποιότητας με μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Sendros et al., 2022: 2).

Η ολιστική προσέγγιση της γεωργίας ακριβείας, που συνδυάζει συλλογή δεδομένων, σχεδιασμό, ανάλυση, λήψη αποφάσεων και εφαρμογή, επιτρέπει μια νέα αντίληψη για τη γεωργική παραγωγή: όχι ως μια ομοιογενή διαδικασία, αλλά ως ένα σύνθετο σύστημα που απαιτεί προσαρμογή στις πραγματικές συνθήκες του πεδίου (Monteiro et al., 2021: 2; Trivelli et al., 2019: 1730-1731; Ma et al., 2021: 3). Σε αυτό το πλαίσιο, παραδείγματα εφαρμογών από διάφορες χώρες δείχνουν ότι μπορεί να μειώσει τη χρήση λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων, να βελτιώσει την ομοιομορφία των καλλιεργειών, να αυξήσει την αποδοτικότητα των μηχανημάτων και να ενισχύσει τη συνολική ανθεκτικότητα των παραγωγικών συστημάτων (Monteiro et al., 2021: 2; Trivelli et al., 2019: 1730-1731).

2.3.4 Εφαρμογές της Γεωργίας Ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας βασίζεται στη συστηματική συλλογή, ανάλυση και αξιοποίηση γεωργικών δεδομένων, με στόχο την προσαρμογή των εισροών στις πραγματικές ανάγκες του αγρού. Μέσω της δεδομενοκεντρικής αυτής προσέγγισης, επιτυγχάνεται υψηλότερη αποδοτικότητα στη χρήση πόρων, όπως το νερό, τα λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα. Η αποτελεσματικότερη χρήση τους οδηγεί στη μείωση του κόστους

παραγωγής και ταυτόχρονα στη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με τη συμβατική γεωργία (Karunathilake et al., 2023: 4-5).

Κεντρικό στοιχείο της γεωργίας ακριβείας είναι η εφαρμογή ενός τριμερούς πλαισίου που περιλαμβάνει διάγνωση, λήψη αποφάσεων και εκτέλεση. Η διάγνωση αφορά την παρακολούθηση της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας μέσω αισθητήρων, τηλεπισκόπησης, δειγματοληψιών εδάφους και δεδομένων παραγωγής. Ακολουθεί η λήψη αποφάσεων, η οποία υποστηρίζεται από εργαλεία λογισμικού και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων. Η εκτέλεση περιλαμβάνει την εφαρμογή των εισροών με ακρίβεια, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως τα συστήματα μεταβλητού ρυθμού και ο εξοπλισμός καθοδήγησης υψηλής ακρίβειας (FAO, 2022: 1).

Πριν από την εμφάνιση της σύγχρονης έξυπνης γεωργίας, οι τεχνολογίες της γεωργίας ακριβείας στηρίζονταν κυρίως στις τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών. Η τηλεπισκόπηση, η τηλεματική, τα αυτόματα συστήματα υλικού και λογισμικού, τα drones, τα αυτόνομα οχήματα, οι τεχνολογίες GPS και οι ρομποτικές εφαρμογές αποτέλεσαν βασικά εργαλεία συλλογής και αξιοποίησης δεδομένων. Η ενσωμάτωσή τους επέτρεψε την ανάπτυξη πιο δομημένων και ακριβών γεωργικών πρακτικών, ανοίγοντας τον δρόμο για περαιτέρω ψηφιοποίηση του αγροτικού τομέα (Hegde, 2022: 1).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της πρώιμης υιοθέτησης τεχνολογιών ακριβείας αποτελεί η John Deere, η οποία ενσωμάτωσε συστήματα GPS στα τρακτέρ της. Η χρήση αυτών των συστημάτων επέτρεψε στους αγρότες να πραγματοποιούν εργασίες με αυξημένη ακρίβεια, μειώνοντας τις επικαλύψεις και περιορίζοντας τη σπατάλη καυσίμων, λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Η εφαρμογή GPS αποτέλεσε ένα από τα πρώτα σημαντικά βήματα προς τη μετάβαση σε μια περισσότερο αυτοματοποιημένη και αποδοτική γεωργία (Karunathilake et al., 2023: 4-5).

Συνολικά, η γεωργία ακριβείας πριν από την έλευση της έξυπνης γεωργίας μπορεί να περιγραφεί μέσα από τέσσερις κύριους άξονες: την έμφαση στη συλλογή και χαρτογράφηση δεδομένων, τη σχετικά περιορισμένη ανάλυση των δεδομένων, την ύπαρξη βασικών αλλά όχι διασυνδεδεμένων συστημάτων αυτοματοποίησης και την εφαρμογή τεχνικών μεταβλητού ρυθμού. Αυτά τα στοιχεία αποτέλεσαν τη βάση για την επόμενη γενιά γεωργικών τεχνολογιών, οδηγώντας στη σημερινή εποχή της Γεωργίας 4.0. Στο σύγχρονο πλαίσιο, τα διασυνδεδεμένα συστήματα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση επιτρέπουν πλέον πιο ολοκληρωμένη διαχείριση της παραγωγής. Έτσι, η γεωργία ακριβείας εξελίχθηκε από

ένα σύνολο εξειδικευμένων τεχνολογικών εργαλείων σε μια ολιστική φιλοσοφία διαχείρισης της γεωργικής παραγωγής, με πολλαπλά οφέλη για την οικονομική αποδοτικότητα, το περιβάλλον και την κοινωνία (FAO, 2022: 1).

2.3.5 Συλλογή και Απόκτηση Δεδομένων

Η συλλογή και απόκτηση δεδομένων αποτελεί τον πυρήνα της γεωργίας ακριβείας, καθώς χωρίς αξιόπιστα και ακριβή δεδομένα δεν είναι δυνατή η διάγνωση των χωρικών και χρονικών διαφοροποιήσεων εντός των αγροτεμαχίων. Τα δεδομένα λειτουργούν ως η βάση για την αξιολόγηση της κατάστασης των καλλιεργειών και του εδάφους, καθώς και για τη λήψη στοχευμένων αποφάσεων που σχετίζονται με τις καλλιεργητικές πρακτικές. Στο πλαίσιο αυτό, η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται μέσω ενός συνδυασμού τεχνολογιών αισθητήριων, συστημάτων παρακολούθησης και τηλεπισκόπησης, καθιστώντας τη διαδικασία της «ανίχνευσης» θεμελιώδες στοιχείο της γεωργίας ακριβείας (Alfred et al., 2021: 50358; Hundal et al., 2023: 2; Monteiro et al., 2021: 2).

Στη γεωργία ακριβείας, τα δεδομένα συλλέγονται τόσο επί του εδάφους όσο και εξ αποστάσεως, χρησιμοποιώντας αισθητήρες διαφορετικών τύπων και λειτουργιών. Οι επίγειοι αισθητήρες παρέχουν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας που σχετίζονται με τις κλιματικές συνθήκες (όπως θερμοκρασία, υγρασία αέρα, ταχύτητα ανέμου), τις ιδιότητες του εδάφους (π.χ. υγρασία, αγωγιμότητα, pH), καθώς και τις φυσιολογικές συνθήκες των καλλιεργειών. Οι παράμετροι της βιομάζας, όπως ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας και η χλωροφύλλη, θεωρούνται ιδιαίτερα κρίσιμες για την αξιολόγηση των στάσεων λίπανσης και της συνολικής υγείας των φυτών (Karunathilake et al., 2023: 4-5).

Σημαντικό ρόλο στη συλλογή δεδομένων διαδραματίζουν επίσης οι συσκευές παρακολούθησης απόδοσης, οι οποίες τοποθετούνται σε θεριζοαλωνιστικές μηχανές. Αυτές περιλαμβάνουν αισθητήρες ροής μάζας και αισθητήρες υγρασίας, σε συνδυασμό με δέκτες διαφορικού συστήματος παγκόσμιου εντοπισμού θέσης (DGPS). Όταν οι συσκευές είναι κατάλληλα βαθμονομημένες, παρέχουν ακριβή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την απόδοση, επιτρέποντας τον εντοπισμό ζωνών χαμηλής παραγωγικότητας. Οι πληροφορίες αυτές υποστηρίζουν την ανάπτυξη ειδικών σχεδίων διαχείρισης, όπως στοχευμένη λίπανση ή τροποποίηση της στρατηγικής άρδευσης (Hundal et al., 2023: 2).

Η τηλεπισκόπηση συμπληρώνει τα επίγεια δεδομένα με πληροφορίες μεγάλης κλίμακας. Η χρήση δορυφορικών εικόνων, αεροφωτογραφιών, drones και επιτόπιων καμερών επιτρέπει την παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων με υψηλή συχνότητα. Τα συστήματα αυτά ανιχνεύουν μεταβολές στη φυτοκάλυψη, την υγρασία και την κατάσταση των καλλιεργειών, ενώ παράλληλα παρέχουν χρήσιμους δείκτες όπως NDVI, SAVI και EVI, οι οποίοι βοηθούν στον εντοπισμό στρεσογόνων παραγόντων όπως ξηρασία, ασθένειες και θρεπτικές ανεπάρκειες. Η εφαρμογή αισθητήρων δεν περιορίζεται στις φυτικές καλλιέργειες. Η κτηνοτροφία ακριβείας αξιοποιεί εξειδικευμένες τεχνολογίες παρακολούθησης, όπως κολάρα θέσης, επιταχυνσιόμετρα, αισθητήρες θερμοκρασίας και συσκευές ανίχνευσης μοτίβων συμπεριφοράς των ζώων. Τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν στους παραγωγούς να παρακολουθούν την υγεία, την ευζωία, την κατανάλωση τροφής και τις αναπαραγωγικές ανάγκες των ζώων, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας τις απώλειες (Karunathilake et al., 2023: 4-5).

Ακόμη, εξειδικευμένα συστήματα, όπως οι αισθητήρες θέσης Colter σε συνδυασμό με υπερηχητικούς αισθητήρες επιφάνειας εδάφους, χρησιμοποιούνται σε δυναμικά συστήματα ελέγχου βάθους κατεργασίας εδάφους. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την αυτόματη προσαρμογή του βάθους εργασίας ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες του εδάφους, μειώνοντας την ενεργειακή κατανάλωση και βελτιώνοντας τη δομή του εδάφους (Monteiro et al., 2021: 2). Συνολικά, η συλλογή και απόκτηση δεδομένων αποτελεί μια πολυδιάστατη διαδικασία που επιτρέπει την εις βάθος κατανόηση των αγροοικοσυστημάτων. Όσο αυξάνεται η ακρίβεια και η ποικιλία των συλλεγόμενων δεδομένων, τόσο βελτιώνεται και η ικανότητα των αγροτών να εφαρμόζουν στοχευμένες και βιώσιμες πρακτικές διαχείρισης (Karunathilake et al., 2023: 4-5).

Οι τεχνολογίες τηλεπισκόπησης αποτελούν βασικό εργαλείο της γεωργίας ακριβείας, καθώς διευκολύνουν τη συλλογή κρίσιμων πληροφοριών για τις καλλιέργειες και τις εδαφικές συνθήκες. Χρησιμοποιώντας drones, επανδρωμένα αεροσκάφη, δορυφόρους και διάφορους τύπους επίγειων αισθητήρων, οι παραγωγοί έχουν πλέον πρόσβαση σε δεδομένα υψηλής ανάλυσης που αποτυπώνουν τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα του αγρού. Μέσω αυτών των τεχνολογιών, είναι δυνατή η παρακολούθηση παραμέτρων όπως η υγεία της φυτοκάλυψης, η διαθεσιμότητα νερού, τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους και οι πιθανές πιέσεις από ασθένειες ή έντομα (Monteiro et al., 2021: 2).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τηλεπισκόπησης είναι η ικανότητά της να αναγνωρίζει χωρικά μοτίβα που αντανακλούν τις φυτικές «υπογραφές», δηλαδή χαρακτηριστικά όπως η πυκνότητα, η χρωματική αλλοίωση ή η μειωμένη ανάπτυξη, τα οποία συχνά συνδέονται με υποκείμενα προβλήματα εδάφους ή με στρεσογόνους παράγοντες, όπως παράσιτα ή ασθένειες (Haneklaus et al., 2016: 1-2). Η χρήση απεικόνισης, είτε πρόκειται για δορυφορική, είτε για εναέρια, είτε για επίγεια, επιτρέπει τη λεπτομερή αποτύπωση της κατάστασης του αγρού, αποκαλύπτοντας στοιχεία που δεν είναι άμεσα ορατά με γυμνό μάτι και προσφέροντας μια πιο αξιόπιστη τεκμηρίωση για την ποιότητα του εδάφους (Haneklaus et al., 2016: 1-2; Monteiro et al., 2021: 2).

Στο παρελθόν, τα επανδρωμένα αεροσκάφη αποτελούσαν το κύριο μέσο για τη συλλογή γεωργικών εικόνων, ενώ χρησιμοποιούνταν συχνά και για εφαρμογές ψεκασμού λιπασμάτων ή φυτοπροστατευτικών ουσιών. Παράλληλα, οι δορυφορικές εικόνες έχουν συμβάλει σημαντικά στη γεωργική διαχείριση ήδη από τη δεκαετία του 1970, με δορυφόρους όπως ο US-LANDSAT να προσφέρουν δεδομένα ευρείας κλίμακας που υποστήριξαν τις πρώτες προσπάθειες χαρτογράφησης και παρακολούθησης καλλιεργειών (Karunathilake et al., 2023: 5-5).

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) εξοπλισμένων με τεχνολογία παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος πλοήγησης (GNSS) έχει φέρει επανάσταση στη γεωργία ακριβείας. Τα UAV παρέχουν εξαιρετικά ευέλικτες δυνατότητες χαρτογράφησης, συλλογής εικόνων και τοπογραφικών δεδομένων, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται για στοχευμένο ψεκασμό καλλιεργειών και για την παρακολούθηση ζώων σε συστήματα κτηνοτροφίας ακριβείας. Η υψηλή ευκρίνεια και η συχνότητα λήψης δεδομένων καθιστούν τα UAV πολύτιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της υγείας των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο (Monteiro et al., 2021: 2).

Η γεωκωδικοποιημένη δειγματοληψία αποτελεί βασικό συμπλήρωμα της τηλεπισκόπησης, καθώς επιτρέπει τη συνδυαστική αξιολόγηση χωρικών εικόνων και αναλυτικών μετρήσεων του εδάφους. Μέσω της ακριβούς τοποθέτησης των δειγμάτων σε συστήματα GIS, οι παραγωγοί μπορούν να λαμβάνουν αποφάσεις που αντανακλούν τις πραγματικές συνθήκες κάθε ζώνης του αγρού (Haneklaus et al., 2016: 1-2).

Επιπλέον, η ανάπτυξη τεχνολογιών τηλεπισκόπησης σε πραγματικό χρόνο, όπως το οικονομικά αποδοτικό σύστημα LASSIE (στατικός εξοπλισμός επιτήρησης χαμηλού υψομέτρου), προσδίδει νέα διάσταση στη διαχείριση των καλλιεργειών. Μέσω της

συνεχούς και αυτόματης επανακωδικοποίησης των εικόνων καλλιεργειών και εδάφους με γεωγραφική αναφορά σε GIS, το LASSIE επιτρέπει την άμεση παρακολούθηση της κατάστασης του αγρού και τη γρήγορη απόκριση σε αναδυόμενα προβλήματα (Haneklaus et al., 2016: 1-2). Οι πληροφορίες αυτές συμβάλλουν στην ορθολογική κατανομή πόρων, όπως το νερό, τα λιπάσματα και τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα, βελτιώνοντας τόσο την παραγωγικότητα όσο και τη βιωσιμότητα των καλλιεργητικών πρακτικών (Monteiro et al., 2021: 2-3).

Τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες σε συνδυασμό με γεωχωρικές πληροφορίες που παρέχονται από συστήματα παγκόσμιου δορυφορικού εντοπισμού (GNSS) αποτελούν βασικό θεμέλιο της γεωργίας ακριβείας. Η ενσωμάτωση των συντεταγμένων θέσης με τις μετρήσεις των αισθητήρων επιτρέπει τη δημιουργία χωρικά αναλυτικών χαρτών, όπως οι χάρτες απόδοσης και οι χάρτες εδάφους, οι οποίοι υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων σε επίπεδο συγκεκριμένων τοποθεσιών. Μέσω αυτής της διαδικασίας, κάθε παρατηρούμενη τιμή, είτε αφορά την παραγωγή είτε την εδαφική σύσταση, αποκτά γεωγραφική αναφορά, γεγονός που καθιστά δυνατή την ανάλυση της χωρικής μεταβλητότητας εντός του αγρού (Karunathilake et al., 2023: 5-6).

Οι χάρτες απόδοσης αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία της γεωργίας ακριβείας, καθώς αποτυπώνουν τόσο την ποσότητα όσο και την ποιότητα της παραγωγής σε κάθε σημείο του χωραφίου (Lund et al., 2016: 2). Οι πληροφορίες αυτές είναι κρίσιμες για τη λήψη διαχειριστικών αποφάσεων, αφού επιτρέπουν την αναγνώριση ζωνών υψηλής και χαμηλής παραγωγικότητας. Η ανάλυση των μεταβλητών που εμφανίζονται σε αυτούς τους χάρτες, όπως η υγρασία, η θρεπτική κατάσταση ή η παρουσία στρεσογόνων παραγόντων, βοηθά στον εντοπισμό των αιτιών που επηρεάζουν την τελική απόδοση των καλλιεργειών (Monteiro et al., 2021: 2-3). Με βάση αυτή την κατανόηση, ο παραγωγός μπορεί να εφαρμόσει διαφοροποιημένες πρακτικές διαχείρισης, όπως εισροές μεταβλητού ρυθμού, προσαρμοσμένη άρδευση ή στοχευμένη λίπανση (Karunathilake et al., 2023: 5-6).

Παράλληλα, οι χάρτες εδάφους παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες για τη χωρική κατανομή των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του εδάφους σε ένα χωράφι (Lund et al., 2016: 2). Αυτά τα δεδομένα αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για την υποστήριξη αποφάσεων στη γεωργία ακριβείας (Hundal et al., 2023: 2), καθώς τα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η υδατοϊκανότητα, η ικανότητα συγκράτησης θρεπτικών στοιχείων, η πυκνότητα όγκου, το πορώδες, η περιεκτικότητα σε οργανική ουσία και η

τοπογραφία, επηρεάζουν καθοριστικά την απόδοση των καλλιεργειών. Η κατανόηση αυτών των διαφοροποιήσεων βοηθά τους παραγωγούς να εφαρμόζουν πρακτικές προσαρμοσμένες στις ανάγκες κάθε ζώνης του αγρού, μεγιστοποιώντας την παραγωγικότητα και ελαχιστοποιώντας τη σπατάλη πόρων (Karunathilake et al., 2023: 5-6).

Πέρα από την ανάλυση της γης και της παραγωγής, τα δεδομένα από αισθητήρες χρησιμοποιούνται επίσης για την πρόβλεψη τάσεων καιρικών και κλιματικών συνθηκών. Η δυνατότητα πρόβλεψης μικροκλιματικών μεταβολών είναι ζωτικής σημασίας σε όλες τις γεωργικές πρακτικές, ιδίως σε καλλιέργειες υψηλού κινδύνου όπου ο χρόνος επέμβασης επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, στην καλλιέργεια ρυζιού paddy, ο χρόνος συγκομιδής αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές απώλειες σιτηρών. Με τη χρήση δεδομένων παρακολούθησης, οι παραγωγοί μπορούν να εντοπίζουν το κατάλληλο στάδιο συγκομιδής, μειώνοντας τις απώλειες και βελτιώνοντας την ποιότητα του τελικού προϊόντος (Alfred et al., 2021: 50359).

Σε γενικές γραμμές, η σύνδεση των δεδομένων αισθητήρων με γεωχωρικές πληροφορίες επιτρέπει μια ολοκληρωμένη και επιστημονικά τεκμηριωμένη προσέγγιση στη διαχείριση του αγρού. Αυτή η προσέγγιση ενισχύει την ακρίβεια, τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα της γεωργικής παραγωγής, αποτελώντας βασικό πυλώνα της σύγχρονης γεωργίας ακριβείας (Karunathilake et al., 2023: 5-6).

2.3.6 Σχεδιασμός, λήψη αποφάσεων και εκτέλεση

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων που βασίζεται στην ανάλυση των συλλεγόμενων δεδομένων, ακολουθεί το στάδιο της εκτέλεσης, στο οποίο οι σχεδιασμένες ενέργειες εφαρμόζονται μέσω εξοπλισμού και συστημάτων που λειτουργούν με βάση δεδομένα υψηλής ακρίβειας. Το στάδιο αυτό αποτελεί κρίσιμο μέρος της γεωργίας ακριβείας, καθώς μετατρέπει τις πληροφορίες σε στοχευμένες παρεμβάσεις στον αγρό, επιτρέποντας τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Karunathilake et al., 2023: 5-6).

Τα περισσότερα αγροτεμάχια παρουσιάζουν σημαντική ετερογένεια ως προς τις εδαφικές, κλιματικές και φυτοϋγειονομικές συνθήκες, με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις των καλλιεργειών να διαφοροποιούνται χωρικά και χρονικά (Jang et al., 2023: 1). Η συμβατική γεωργία δεν λάμβανε υπόψη αυτές τις μεταβλητότητες, εφαρμόζοντας

ομοιόμορφες πρακτικές σε όλο το χωράφι. Ως συνέπεια, παρατηρήθηκε συχνά υπερβολική ή λανθασμένη χρήση χημικών εισροών, υπερκατανάλωση λιπασμάτων και άρδευσης, καθώς και αναποτελεσματική διαχείριση των πόρων. Αυτές οι πρακτικές οδήγησαν σε μη βιώσιμα παραγωγικά μοντέλα, αυξημένο κόστος και περιβαλλοντική υποβάθμιση, συμπεριλαμβανομένης της ρύπανσης υδάτων, της υποβάθμισης εδαφών και της απώλειας βιοποικιλότητας (Karunathilake et al., 2023: 5-6).

Η γεωργία ακριβείας έχει αποδείξει ότι η εφαρμογή τεχνολογιών που λαμβάνουν υπόψη τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα εντός των αγρών μπορεί να βελτιώσει τόσο την παραγωγικότητα όσο και την περιβαλλοντική ποιότητα (Trivelli et al., 2019: 1730-1731). Μέσω της χρήσης συστημάτων καθοδηγούμενων από δεδομένα, οι αγρότες μπορούν να εφαρμόζουν εισροές ακριβώς εκεί όπου απαιτούνται, στο μέγεθος και χρονικό σημείο που απαιτείται, αποφεύγοντας τις γενικευμένες πρακτικές του παρελθόντος (Karunathilake et al., 2023: 5-6).

Κεντρικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία διαδραματίζουν οι τεχνολογίες μεταβλητού ρυθμού (VRT). Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την εφαρμογή λιπασμάτων, νερού, σπόρων και χημικών προϊόντων φυτοπροστασίας (π.χ. ζιζανιοκτόνα, εντομοκτόνα) σε διαφοροποιημένες ποσότητες ανάλογα με τις ανάγκες κάθε υποπεριοχής του αγρού (Martin & Yang, 2016: 4). Έτσι, περιοχές με υψηλότερες απαιτήσεις θρέψης ή υγρασίας λαμβάνουν μεγαλύτερες ποσότητες εισροών, ενώ περιοχές με χαμηλότερες ανάγκες αποφεύγουν την υπερ-εφαρμογή (Karunathilake et al., 2023: 5-6).

Αυτό το στοχευμένο μοντέλο διαχείρισης οδηγεί σε πολλαπλά οφέλη. Πρώτον, μειώνει τα προβλήματα υπολειμματικότητας χημικών ουσιών στο έδαφος και στο περιβάλλον, λόγω της ελαχιστοποίησης της περιττής χρήσης φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων. Δεύτερον, συμβάλλει στη σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής, καθώς οι εισροές εφαρμόζονται μόνο όπου είναι αναγκαίες και όχι σε όλο το χωράφι ανεξέλεγκτα. Τρίτον, αυξάνει το καθαρό κέρδος του παραγωγού, όχι μόνο λόγω της μείωσης των δαπανών αλλά και μέσω της βελτίωσης της συνολικής παραγωγικότητας των καλλιεργειών (Punithavathi et al., 2023: 2759-2760; Walter et al., 2017: 6148-6149).

Τελικά, η μετάβαση από τις ομοιόμορφες πρακτικές της συμβατικής γεωργίας σε εξατομικευμένες, δεδομενοκεντρικές εφαρμογές που λαμβάνουν υπόψη τις πραγματικές ανάγκες κάθε σημείου του αγρού αποτελεί βασική συνιστώσα της σύγχρονης ακριβούς γεωργίας. Μέσα από το τρίπτυχο σχεδιασμός, λήψη αποφάσεων, εκτέλεση, η γεωργία ακριβείας αναδεικνύεται ως ένα ολοκληρωμένο σύστημα που

υποστηρίζει την αποδοτικότητα, τη βιωσιμότητα και τη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα των γεωργικών παραγωγικών συστημάτων (Karunathilake et al., 2023: 5-6).

Η κατανόηση της χωρικής ετερογένειας ενός αγρού αποτελεί θεμέλιο της γεωργίας ακριβείας, καθώς επιτρέπει τον καθορισμό και την εφαρμογή εξατομικευμένων ποσοτήτων νερού, λιπασμάτων, ζιζανιοκτόνων, φυτοφαρμάκων και ασβεστοποίησης σύμφωνα με τις πραγματικές ανάγκες κάθε περιοχής. Με βάση τα δεδομένα που προκύπτουν από αισθητήρες, μοντέλα και χαρτογραφικές πληροφορίες, οι αγρότες μπορούν να εφαρμόζουν εισροές με υψηλή ακρίβεια, ενισχύοντας την αποδοτικότητα χρήσης πόρων και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Punithavathi et al., 2023: 2759-2760; Walter et al., 2017: 6148-6149).

Στο πεδίο της άρδευσης, οι πρακτικές της γεωργίας ακριβείας έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογικά καθοδηγούμενων, έξυπνων συστημάτων άρδευσης, τα οποία παρέχουν ακριβείς ποσότητες νερού στον κατάλληλο χρόνο. Τα συστήματα αυτά αξιοποιούν δεδομένα υγρασίας εδάφους από αισθητήρες για να εκτιμήσουν τις ανάγκες άρδευσης και να προσαρμόσουν τον ρυθμό εφαρμογής νερού σε πραγματικό χρόνο. Η άρδευση μεταβλητού ρυθμού ενεργοποιείται όταν η υγρασία αποκλίνει από το ιδανικό επίπεδο, επιτρέποντας την αποκατάστασή της με την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα νερού (Vellidis et al., 2016: 2). Τις περισσότερες φορές, οι υποδομές άρδευσης ελέγχονται αυτόματα, γεγονός που αυξάνει σημαντικά την αποδοτικότητα χρήσης αρδευτικού νερού (IWUE). Σύμφωνα με τους Monteiro et al. (2021: 4-5), συνδυασμοί δορυφορικών δεδομένων LANDSAT και τηλεπισκοπικών μετρήσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη λειτουργικών μοντέλων διαχείρισης αρδευτικού νερού, ενισχύοντας περαιτέρω την ακρίβεια των πρακτικών άρδευσης.

Εκτός από την άρδευση, η διαχείριση άλλων καλλιεργητικών πρακτικών, όπως το όργωμα, η λίπανση, ο χημικός ψεκασμός και η σπορά, επωφελείται σε μεγάλο βαθμό από τεχνολογίες μεταβλητού ρυθμού. Το βάθος οργώματος, για παράδειγμα, μπορεί να ρυθμιστεί με βάση τις μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους, προσφέροντας πιο αποτελεσματική και βιώσιμη προετοιμασία του εδάφους (Whattoff et al., 2017: 461-462). Στον τομέα της φυτοπροστασίας, η εφαρμογή χημικών ουσιών βασίζεται πλέον σε χάρτες συνταγογράφησης που καθορίζουν τοπικά τις απαιτούμενες ποσότητες. Ενώ παλαιότερα ο ψεκασμός γινόταν από χειριζόμενα αεροσκάφη, σήμερα χρησιμοποιούνται συστήματα αυτόματης προσαρμογής του ρυθμού ψεκασμού, καθώς

και UAV που λειτουργούν ως φορείς διανομής χημικών και λιπασμάτων (Martin & Yang, 2016: 4; Monteiro et al., 2021: 4-5).

Αντίστοιχα, η σπορά ακριβείας προσφέρει προηγμένες δυνατότητες ρύθμισης του βάθους, της πυκνότητας και των αποστάσεων μεταξύ των σπόρων. Η δυνατότητα τροποποίησης αυτών των παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο συμβάλλει στη βέλτιστη αξιοποίηση των σπόρων και στη μείωση του κόστους και του χρόνου εργασίας. Έρευνες δείχνουν ότι η σπορά ακριβείας με τεχνολογίες μεταβλητού ρυθμού είναι κατά 10% έως 30% πιο αποτελεσματική από τις συμβατικές πρακτικές, οδηγώντας σε βελτιωμένη φύτευση και ομοιομορφία καλλιεργειών (Monteiro et al., 2021: 4-5).

Η διαχείριση ανά τοποθεσία αυξάνει σημαντικά τον αριθμό των σωστών και έγκαιρων αποφάσεων ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου, οδηγώντας σε μεγαλύτερο καθαρό όφελος (Trivelli et al., 2019: 1730-1731). Παράλληλα, η εξοικονόμηση πόρων και η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αποτελούν αναπόσπαστα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτών των τεχνολογιών (Hundal et al., 2023: 2; Walter et al., 2017: 6148–6150).

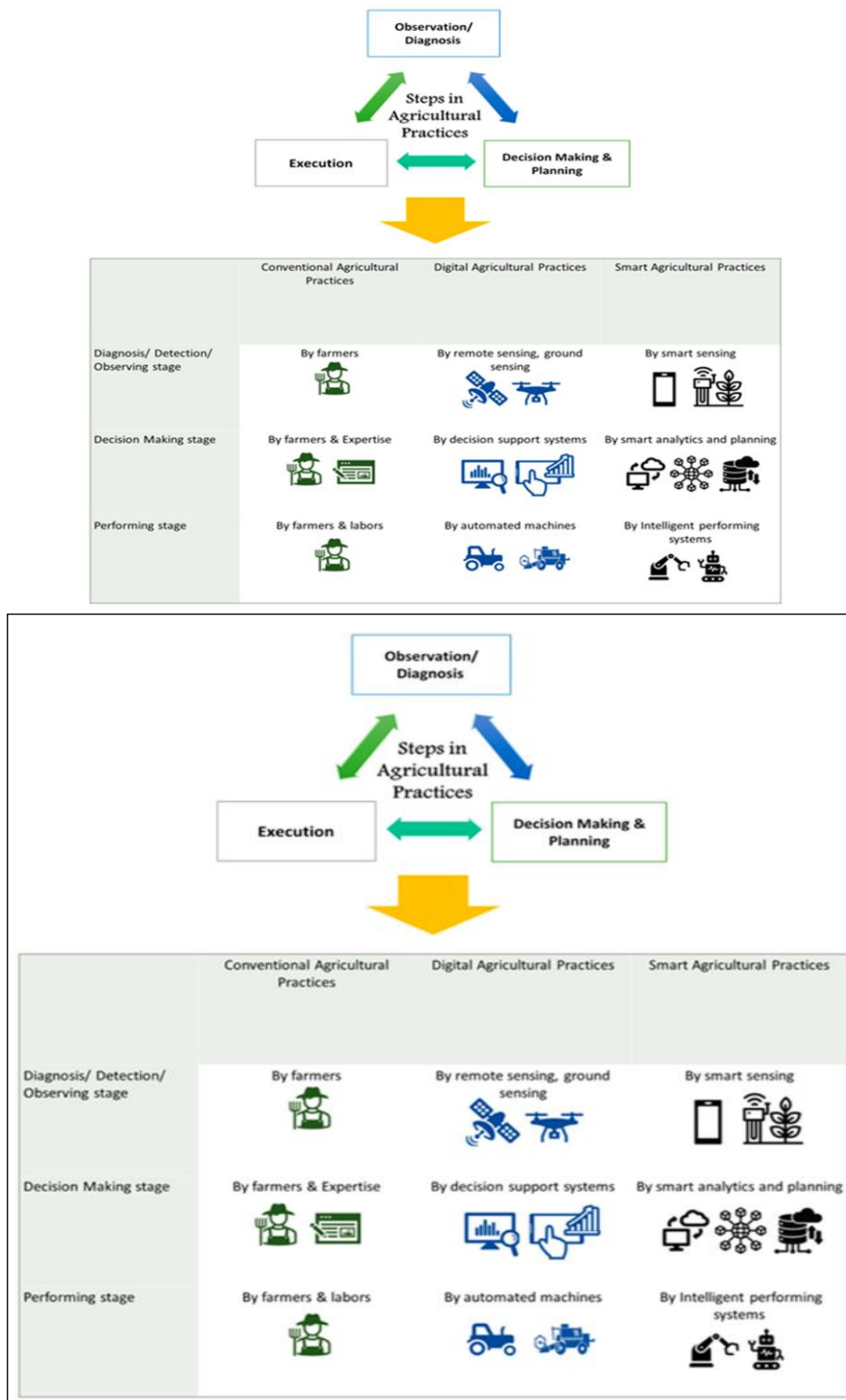
Ένα επιπλέον εργαλείο διαχείρισης που χρησιμοποιείται στη γεωργία ακριβείας είναι η δειγματοληψία πλέγματος, κατά την οποία το αγροτεμάχιο διαιρείται σε πλέγμα και συλλέγονται δεδομένα σε κάθε σημείο του πλέγματος. Η μέθοδος αυτή παρέχει μια λεπτομερή εικόνα της ενδοχωρικής μεταβλητότητας και επιτρέπει τον σχεδιασμό πρακτικών διαχείρισης προσαρμοσμένων στις ανάγκες κάθε τμήματος του αγρού (Haneklaus et al., 2016: 2). Για ακόμη πιο λεπτομερή διαχείριση μικρής κλίμακας, έχει αναπτυχθεί το σύστημα διαχείρισης τοπικών πόρων (LRM) στο πλαίσιο της γεωργίας υποβοηθούμενης από υπολογιστή (CAF), το οποίο μετατρέπει τις πληροφορίες σε εφαρμογές μεταβλητού ρυθμού, διευκολύνοντας την ακρίβεια στη διαχείριση των καλλιεργειών (Haneklaus et al., 2016: 3).

Στο πλαίσιο της Γεωργίας Ακριβείας, η τεχνολογική πρόοδος έχει μετασχηματίσει σταδιακά τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούνται η διάγνωση, η λήψη αποφάσεων και η εκτέλεση των γεωργικών εργασιών. Μέχρι πρόσφατα, οι άνθρωποι βασίζονταν κυρίως σε ψηφιακά εργαλεία για τη βελτίωση της διάγνωσης και της λήψης αποφάσεων, αξιοποιώντας παράλληλα αυτοματοποιημένα μηχανήματα για την ακριβή εκτέλεση των καλλιεργητικών εργασιών. Η τεχνολογία λειτουργούσε συμπληρωματικά ως εργαλείο ενίσχυσης της ανθρώπινης ικανότητας, χωρίς όμως να την αντικαθιστά (Ma et al., 2021: 3).

Ωστόσο, με την έλευση της Βιομηχανίας 4.0 και την επιτάχυνση της διείσδυσης ψηφιακών τεχνολογιών όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η ρομποτική, η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και η μηχανική μάθηση, οι διαδικασίες αυτές έχουν αρχίσει να αυτοματοποιούνται σε ολοένα και μεγαλύτερο βαθμό. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν στα συστήματα να συλλέγουν, να αναλύουν και να ερμηνεύουν δεδομένα με υψηλό βαθμό ακρίβειας, μειώνοντας αισθητά την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης στα στάδια της διάγνωσης και της λήψης αποφάσεων (Εικόνα 2). Σε αυτό το νέο μοντέλο, ο ρόλος του ανθρώπου μετατοπίζεται από την εκτέλεση και την ανάλυση στη διαχείριση και παρακολούθηση των αυτοματοποιημένων συστημάτων, επιτρέποντας πιο αποδοτικές, σταθερές και προβλέψιμες γεωργικές πρακτικές (Cravero & Sepúlveda, 2021: 2-3).

Αυτός ο τεχνολογικός μετασχηματισμός έχει ως βασικό στόχο τη βέλτιστη διαχείριση της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας των αγρών, με τελικό αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικότητας και την ποιοτική αναβάθμιση της παραγωγής. Ωστόσο, η κάλυψη της αυξανόμενης ζήτησης τροφίμων δεν θα πρέπει να στηρίζεται αποκλειστικά στην επιδίωξη περισσότερης παραγωγής. Η σύγχρονη γεωργία οφείλει παράλληλα να υιοθετεί πρακτικές που επιδιώκουν τη μείωση της σπατάλης τόσο των εισροών (όπως νερό, λιπάσματα, αγροχημικά) όσο και των εκροών (όπως απώλειες προϊόντων κατά τη συγκομιδή και τη μετασυλλεκτική διαχείριση). Η προσέγγιση αυτή συνάδει με τη βιώσιμη ανάπτυξη και επιδιώκει την εξισορρόπηση μεταξύ παραγωγικότητας, οικονομικής αποδοτικότητας και περιβαλλοντικής προστασίας (Monteiro et al., 2021: 4-5).

Κατά συνέπεια, η επανάσταση της γεωργίας ακριβείας στηρίζει ένα διττό όραμα: τη μεγιστοποίηση της παραγωγής μέσω της ορθολογικής διαχείρισης των πόρων και τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας μέσω της ελαχιστοποίησης των απωλειών και της σπατάλης. Ο συνδυασμός προηγμένων ψηφιακών τεχνολογιών, έξυπνων συστημάτων και αυτοματισμών ενισχύει τη δυνατότητα των αγροτών να λαμβάνουν ολοκληρωμένες, βέλτιστες και ακριβείς αποφάσεις, οδηγώντας σε μια νέα εποχή γεωργικής παραγωγής που δίνει έμφαση όχι μόνο στο «περισσότερο», αλλά στο «καλύτερο» και «αποδοτικότερο» (Karunathilake et al., 2023: 5-6).



Εικόνα 2: Τριφασικός κύκλος ενός συστήματος αυτοματισμού και η εξέλιξη του αυτοματισμού αυτών των φάσεων στη γεωργία με αναδυόμενες προηγμένες τεχνολογίες
 Πηγή: Karunathilake et al., (2023: 5)

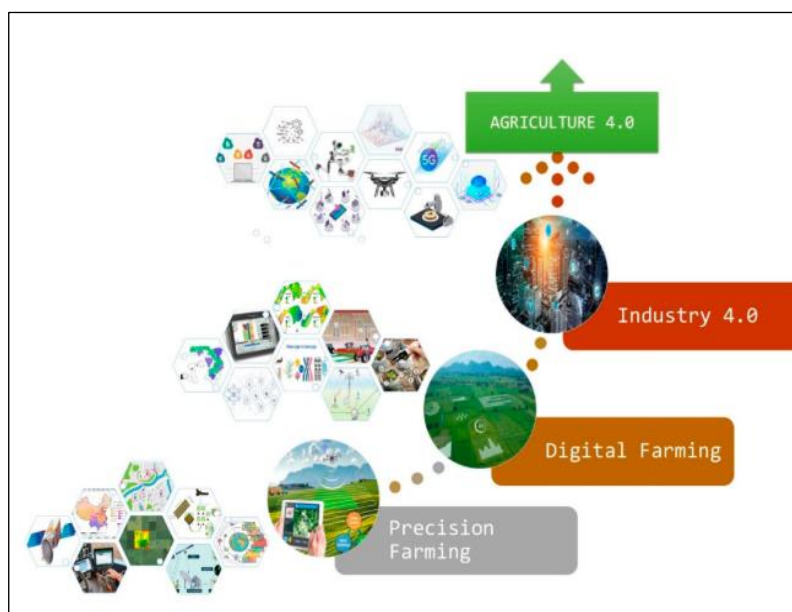
2.4 Βιώσιμη Γεωργία

Στο παρόν στάδιο, η γεωργία βρίσκεται στην αρχή μιας νέας επανάστασης που βασίζεται σε δεδομένα (Cravero & Sepúlveda, 2021: 2-3; Javaid et al., 2022: 151-152). Σε αυτήν την προσέγγιση, τα γεωργικά μηχανήματα υποστηρίζουν κάθε στάδιο της

παραγωγικής διαδικασίας, διάγνωση, λήψη αποφάσεων και εκτέλεση, ενώ η ανθρώπινη παρέμβαση περιορίζεται κυρίως στην παρακολούθηση και τη συντήρηση των συστημάτων (FAO, 2022: 1).

Η Γεωργία 4.0 προκύπτει ως αποτέλεσμα της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης, η οποία υπερβαίνει τις τροποποιήσεις των προηγούμενων τριών επαναστάσεων και διαμορφώνει τη σύγχρονη κατάσταση της γεωργίας. Ο νέος αυτός κλάδος χαρακτηρίζεται από διαχείριση βασισμένη σε δεδομένα, χρήση εξελιγμένων εργαλείων παραγωγής, βιωσιμότητα, επαγγελματικοποίηση και μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος (Walter et al., 2017: 6148–6150). Επιπλέον, ενσωματώνει προηγμένες τεχνολογίες, όπως ρομποτική (συμπεριλαμβανομένων των drones), μεγάλα δεδομένα, τεχνητή νοημοσύνη, υπολογιστική όραση, δίκτυα 5G, cloud computing, Διαδίκτυο των Πραγμάτων και τεχνολογία blockchain (Bhat & Huang, 2021: 2; Javaid et al., 2022: 151-152; Liu et al., 2021: 4324-4325; Yazdinejad et al., 2021: 1-2).

Η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών καθιστά τα συστήματα γεωργικής παραγωγής πιο αυτόνομα και έξυπνα, ενώ δημιουργεί νέες δυνατότητες για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της ακρίβειας και της βιωσιμότητας. Ως εκ τούτου, αναδεικνύονται συγκεκριμένες τάσεις και καινοτομίες στη γεωργία ακριβείας, οι οποίες εισάγουν νέα εργαλεία και δυνατότητες στην έξυπνη γεωργία, ενισχύοντας την προσαρμοστικότητα και την παραγωγική απόδοση των σύγχρονων αγροτικών συστημάτων (Εικόνα 3) (Shaikh et al., 2022: 1-2).



Εικόνα 3: Διαφορετικά ολοκληρωμένα τεχνολογικά πλαίσια για τη διαμόρφωση της τέταρτης γεωργικής επανάστασης: νέες τάσεις στη γεωργία ακριβείας
Πηγή: Karunathilake et al., (2023: 6)

2.4.1 Μεγάλα δεδομένα (Big Data)

Στη γεωργία ακριβείας, η λειτουργία των συστημάτων βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε δεδομένα και πληροφορίες (Yazdinejad et al., 2021: 1-2). Όπως συμβαίνει με μεγάλες επιχειρήσεις, όπως οι πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης, που χρησιμοποιούν τεράστια και αδόμητα σύνολα δεδομένων για την ανάλυση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πελατών (Bhat & Huang, 2021: 110209), έτσι και στη γεωργία ακριβείας η ανάλυση μεγάλων δεδομένων (Big Data) χρησιμοποιείται για την κατανόηση και βελτιστοποίηση γεωργικών διαδικασιών που απαιτούν συλλογή και επεξεργασία μεγάλης κλίμακας δεδομένων (Cravero & Sepúlveda, 2021: 1-2). Τα εργαλεία ανάλυσης αυτών των δεδομένων περιλαμβάνουν τεχνικές εξόρυξης δεδομένων, στατιστική ανάλυση, τεχνητή νοημοσύνη, προγνωστική ανάλυση, επεξεργασία φυσικής γλώσσας και άλλα (Bhat & Huang, 2021: 110210).

Η επιστήμη των μεγάλων δεδομένων αξιοποιεί μηχανική μάθηση (ML), cloud computing, επεξεργασία εικόνας, μοντελοποίηση, προσομοιώσεις, στατιστική ανάλυση, δείκτες βλάστησης όπως NDVI και γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS). Μέσω αυτών των τεχνικών, είναι δυνατή η ανακάλυψη συσχετίσεων, μοτίβων και τάσεων σε τεράστιες ποσότητες δεδομένων, υποστηρίζοντας την καταγραφή, αποθήκευση, ανταλλαγή, ανάλυση και διάχυση πληροφορίας υψηλής απόδοσης (Cravero & Sepúlveda, 2021: 1-2). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών παρέχουν προβλέψεις και συστάσεις που βοηθούν τους αγρότες να διαχειριστούν καλύτερα τα επερχόμενα γεγονότα, τους κινδύνους και τις προκλήσεις στον αγροτικό τομέα (Bhat & Huang, 2021: 110210).

Η χρήση των μεγάλων δεδομένων στις διαδικασίες παραγωγής συμβάλλει επίσης στην ιχνηλασιμότητα των προϊόντων, αυξάνοντας παράλληλα την ποιότητα, την ασφάλεια και τη γευστική αξία των γεωργικών προϊόντων. Επιπλέον, η διαφάνεια όσον αφορά το οικολογικό αποτύπωμα των προϊόντων ενισχύει τη ζήτηση και προσδίδει μεγαλύτερη αγοραία αξία (Tanikawa, 2018: 241). Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στην τηλεπισκόπηση υψηλής ανάλυσης και στις έξυπνες τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών, συμπεριλαμβανομένων των κοινωνικών μέσων, έχουν διευκολύνει την ανάλυση μεγάλων δεδομένων σε διάφορα στάδια της γεωργίας, όπως η λήψη αποφάσεων, η πρόγνωση καιρού, η διαχείριση φυσικών καταστροφών, η έξυπνη διαχείριση πόρων, η πρόληψη ασθενειών και παρασίτων και η πρόβλεψη χρόνου συγκομιδής (Anbarasan et al., 2020: 150-151; Bhat & Huang, 2021: 110211; Cravero & Sepúlveda, 2021: 1).

Παρά τα οφέλη, υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις στη χρήση μεγάλων δεδομένων στη γεωργία. Η ακρίβεια, η ορθότητα και η ασφάλεια των δεδομένων, η διαθεσιμότητα, καθώς και η προστασία των συσκευών και η κρυπτογράφηση αποτελούν κρίσιμους παράγοντες (Saranya et al., 2023: 2). Η χρήση μη έγκυρων ή ανακριβών δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες αποφάσεις και σπατάλη πόρων, με σημαντικό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος (Yazdinejad et al., 2021: 1-2).

2.4.2 Τεχνολογία Μηχανικής Όρασης

Η ακριβής συλλογή δεδομένων αποτελεί βασικό παράγοντα επιτυχίας της γεωργίας ακριβείας. Πρόσφατα, η ανάλυση εικόνας έχει εξελιχθεί σε μια αξιόπιστη και αποδοτική μέθοδο συλλογής πληροφοριών, αντικαθιστώντας τις παραδοσιακές, χειρωνακτικές, χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες (Jang et al., 2023: 3; Lay et al., 2023: 1-2). Μέσω αυτής της τεχνολογίας, οι μηχανές μπορούν να «διαβάσουν» και να κατανοήσουν το περιβάλλον μέσω εικόνων pixel, παρέχοντας ακριβείς πληροφορίες για συγκεκριμένες τοποθεσίες (Saranya et al., 2023: 2).

Οι μηχανές που διαθέτουν την ικανότητα όρασης σε γεωργικές δραστηριότητες ονομάζονται συστήματα μηχανικής όρασης (Machine Vision – MV). Η τεχνολογία αυτή, γνωστή και ως αγρο-όραση ή «μάτια» των ρομπότ, προσφέρει μη καταστροφικούς, γρήγορους, ακριβείς και σταθερούς τρόπους παρακολούθησης των διαδικασιών καλλιέργειας. Τα συστήματα MV επιτρέπουν στις μηχανές να αποκτήσουν δυνατότητες όρασης και κρίσης μέσω επεξεργασίας εικόνας και εξαγωγής δεδομένων (Shin et al., 2022: 20-21).

Παρά την επιτυχή εφαρμογή της τεχνολογίας MV για την αναγνώριση ειδών καλλιιεργειών, την ανίχνευση στρες, την αξιολόγηση της ποιότητας των σπόρων, την ανίχνευση ζιζανίων και ασθενειών, οι περισσότερες εφαρμογές βρίσκονται ακόμη σε επίπεδο πρωτοτύπου. Οι αναδυόμενες τεχνικές βαθιάς μάθησης (Deep Learning – DL) και μηχανικής μάθησης (Machine Learning – ML) ενσωματώνονται στην MV, προκειμένου να δημιουργηθούν έξυπνα ρομπότ που μπορούν να αναλύουν πολυφασματικές εικόνες σε πραγματικό χρόνο και να εφαρμόζουν στρατηγικές μεταβλητού ρυθμού πεδίου (Punithavathi et al., 2023: 2759; Shin et al., 2022: 20-21). Επιπλέον, τα εμπορικά smartphones, που είναι ευρέως διαδεδομένα, μπορούν να αξιοποιηθούν για τη παρακολούθηση της υγείας και της καταπόνησης των

καλλιιεργειών μέσω συστημάτων MV, καθιστώντας τη γεωργική παρατήρηση πιο προσιτή και πρακτική (Chung et al., 2018: 93-94).

2.4.3 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) αναφέρεται σε ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων αντικειμένων και τεχνολογιών που επικοινωνούν και ανταλλάσσουν δεδομένα (Javaid et al., 2022: 151-152). Το IoT αποτελεί μία από τις πλέον σημαντικές τεχνολογικές εξελίξεις στη γεωργία ακριβείας και την έξυπνη γεωργία (Yazdinejad et al., 2021: 1-2). Η αρχιτεκτονική IoT στη γεωργία περιλαμβάνει γεωργικούς αισθητήρες, τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ) και μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV), τα οποία συλλέγουν δεδομένα κρίσιμα για τη διαχείριση των καλλιιεργειών (Saranya et al., 2023: 2-3).

Παράλληλα, η ραγδαία ανάπτυξη του IoT και η αξιοποίηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αποτελούν τον πυρήνα της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης (Shin et al., 2022: 20-21). Η πρόοδος στις τεχνολογίες επικοινωνιών και τα ασύρματα δίκτυα, όπως τα 5G, LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox, ZigBee και Wi-Fi, έχουν επεκτείνει τις δυνατότητες εφαρμογής του IoT, επιτρέποντας τηλεχειρισμό σε πραγματικό χρόνο, φαινοτυποποίηση υψηλής απόδοσης και καλύτερη κάλυψη, εύρος ζώνης, πυκνότητα σύνδεσης και χαμηλή καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (Liu et al., 2021: 4322-4323).

Όταν ενσωματώνεται στη γεωργία σε συνδυασμό με το cloud computing, το IoT συμβάλλει στην ανάπτυξη έξυπνης γεωργίας (Cravero & Sepúlveda, 2021: 1-2), εφαρμόζοντας λύσεις για παρακολούθηση ζώων, έξυπνα θερμοκήπια, διαχείριση αλιείας και παρακολούθηση καιρού (Liu et al., 2021: 4322-4323). Επιπλέον, το IoT μπορεί να αξιοποιηθεί σε όλα τα στάδια της γεωργίας ακριβείας μέσω ανάπτυξης αισθητήρων και έξυπνων συσκευών με ανεξάρτητα δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας, όπως έξυπνοι ελκυστήρες, UAV και ρομπότ. Οι συσκευές αυτές αντικαθιστούν μεγάλο μέρος της χειρωνακτικής εργασίας, εκτελούν λειτουργίες υψηλής ακρίβειας και προσαρμόζονται σε απαιτητικές συνθήκες εργασίας (Saranya et al., 2023: 2-3).

Διάφοροι αισθητήρες IoT χρησιμοποιούνται στη γεωργία για τη μέτρηση παραμέτρων όπως θερμοκρασία, υγρασία, ένταση φωτός, πίεση, επίπεδα CO₂, προσβολές από έντομα, κατάσταση φυλλώματος, εντάσεις ηλιακού φωτός και ταχύτητα ανέμου, με σκοπό τη συλλογή δεδομένων που στη συνέχεια αποστέλλονται σε cloud συστήματα

υποστήριξης για τη διαχείρισή τους (Bhat & Huang, 2021; 110209-110210; Hundal et al., 2023; 3-4; Javaid et al., 2022: 151-152; Shaikh et al., 2022: 1-2). Οι αισθητήρες αυτοί μπορούν να ενσωματωθούν σε γεωργικά ρομπότ, αυτόνομες πλατφόρμες, μηχανήματα και μετεωρολογικούς σταθμούς για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο (Bhat & Huang, 2021; 110209-110210).

Η χρήση του IoT επιτρέπει στα UAV να πραγματοποιούν άμεσες παρατηρήσεις υψηλής ποιότητας και ανάλυσης, με τρισδιάστατη παρακολούθηση σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη κόμβων αισθητήρων, αυτόνομων γεωργικών οχημάτων και κινητών συστημάτων συλλογής δεδομένων βασισμένα στο IoT για την απόκτηση επίγειας και υποεπιφανειακής πληροφορίας (Liu et al., 2021: 4322-4323). Οι περισσότεροι αισθητήρες λειτουργούν σε ασύρματα πλαίσια ή δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος, επιτρέποντας τόσο την επιτόπια ανάλυση όσο και τη μαζική μεταφορά δεδομένων χωρίς διακοπές (Hundal et al., 2023; 3-4; Monteiro et al., 2021: 4-5; Saranya et al., 2023: 2-3; Tanikawa, 2018: 241).

Ωστόσο, η εφαρμογή του IoT στη γεωργία αντιμετωπίζει προκλήσεις κόστους, τεχνικής φύσης και διαχείρισης δεδομένων (Hundal et al., 2023; 3-4). Ο σχεδιασμός χαμηλού κόστους, ενεργειακά αποδοτικών και ασύρματων IoT τεχνολογιών εξαρτάται από παράγοντες όπως η καθυστέρηση δεδομένων σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας, η επεκτασιμότητα δεδομένων σε σχέση με το κόστος αποθήκευσης και επεξεργασίας, και η διαλειτουργικότητα με τα cloud συστήματα για την αποθήκευση και επεξεργασία διαφορετικών τύπων δεδομένων (Hundal et al., 2023; 4-5).

Διαφορετικές συσκευές IoT μπορούν να συγχωνευθούν σε δίκτυα για την επίτευξη υψηλής ταχύτητας ανταλλαγής δεδομένων (Anbarasan et al., 2020: 151; Bhat & Huang, 2021: 110211). Ένα καλά σχεδιασμένο πλαίσιο IoT συμβάλλει επίσης στην αντιμετώπιση προβλημάτων μεγάλων δεδομένων (Saranya et al., 2023: 3). Με την εξέλιξη των τεχνολογιών, δραστηριότητες όπως η προστασία καλλιεργειών, ο έλεγχος, η παρακολούθηση και η ανίχνευση μπορούν να ενισχυθούν μέσω έξυπνων τηλεφώνων συνδεδεμένων στο IoT (Punithavathi et al., 2023: 2759-2760). Για παράδειγμα, η παρακολούθηση της υγείας και της ευημερίας των βοοειδών έχει βελτιωθεί σημαντικά με τη χρήση του IoT, ενώ η ανίχνευση ζιζανίων πραγματοποιείται κυρίως μέσω μηχανικής όρασης και τεχνικών βαθιάς μάθησης (DL) (Javaid et al., 2022: 151-152).

Η υπολογιστική άκρη (edge computing) επιτρέπει τη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με οικονομικό τρόπο, μειώνοντας το μέγεθος των πακέτων και την

πίεση στους κεντρικούς πόρους cloud. Εταιρείες όπως η Cisco και η Huawei έχουν αναπτύξει ολοκληρωμένα πλαίσια και ελαφριά συστήματα υπολογιστών, επεκτείνοντας τις δυνατότητες των υπηρεσιών cloud σε δίκτυα άκρης. Παράλληλα, η έρευνα διερευνά εναέρια συστήματα edge-IoT για βελτιωμένη ταχύτητα σύγκλισης και υψηλότερους ρυθμούς ολοκλήρωσης εργασιών, επιτρέποντας τη σύνδεση αντικειμένων μέσω έξυπνων τεχνολογιών και τη βελτιστοποίηση των γεωργικών διαδικασιών (Gebresenbet et al., 2023: 1-2; Kautish, 2023: 81; Koubaa et al., 2023: 2-3).

2.4.4 Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), Μηχανική Μάθηση (ML) και Βαθιά Μάθηση (DL)

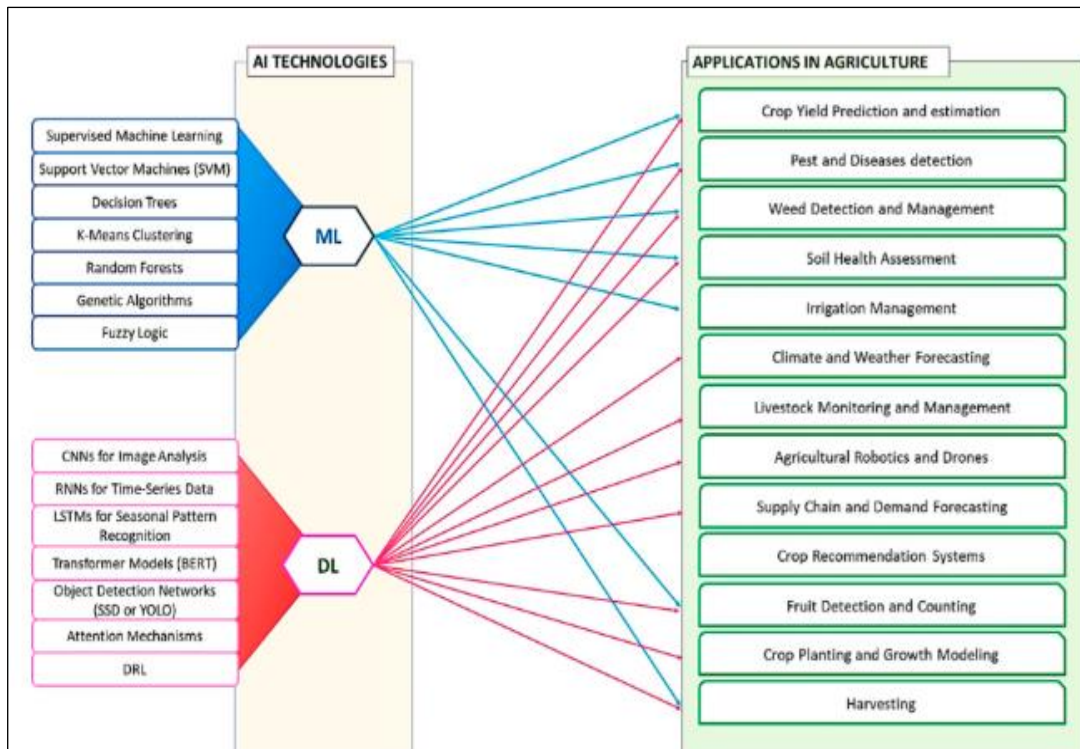
Η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία ρομποτικών και αυτόνομων συστημάτων (RAS) στη γεωργία. Η ενσωμάτωσή της στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) επιτρέπει τη συνεχή ροή δεδομένων (Saranya et al., 2023: 3). Η μετατροπή των γεωργικών δεδομένων σε ουσιαστικές πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων απαιτεί τεχνικές εξόρυξης δεδομένων, μέσω των οποίων η AI αναλύει ιστορικά αρχεία και περιβαλλοντικά δεδομένα, εντοπίζοντας κρυμμένα μοτίβα στα μεγάλα δεδομένα (Tanikawa, 2018: 242). Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση παρασίτων, την ανίχνευση ασθενειών, την πρόβλεψη απόδοσης και τον σχεδιασμό λιπάνσεων, ενσωματωμένων στα συστήματα υποστήριξης γεωργικών αποφάσεων (Punithavathi et al., 2023: 2759; Saranya et al., 2023: 3). Επιπλέον, η AI συμβάλλει στη μείωση της σπατάλης τροφίμων, στη βελτίωση της υγιεινής της παραγωγής και στην παρακολούθηση μηχανημάτων σε όλα τα στάδια της γεωργίας, όπως η αλυσίδα εφοδιασμού, η παραγωγή, η διαχείριση εδάφους, καλλιεργειών και υδάτων, καθώς και ο έλεγχος ασθενειών και παρασίτων (Bhat & Huang, 2021; 110209-110210; Liu et al., 2021: 4324-4325). Με αυτόν τον τρόπο, η Τεχνητή Νοημοσύνη μπορεί να υπερβεί περιορισμούς και προβλήματα που παρατηρούνται στη συμβατική γεωργία (Saranya et al., 2023: 4).

Η Μηχανική Μάθηση (ML) και η Βαθιά Μάθηση (DL) αποτελούν υποκατηγορίες της Τεχνητής Νοημοσύνης (Εικόνα 4) (Shin et al., 2022: 20-21). Η ML επιτρέπει σε υπολογιστικά συστήματα να βελτιώνουν αυτόνομα την απόδοση της AI, αξιοποιώντας την εξαγωγή σαφών χαρακτηριστικών (Cravero & Sepúlveda, 2021: 1-2). Εστιάζει στη θεωρία, την απόδοση και τις ιδιότητες συστημάτων μάθησης και αλγορίθμων, παρέχοντας εργαλεία υψηλής υπολογιστικής ισχύος για την ποσοτικοποίηση και

κατανόηση των γεωργικών διαδικασιών που απαιτούν δεδομένα (Cravero & Sepúlveda, 2021: 1-2). Αντίθετα, η DL χρησιμοποιεί συνδυασμούς στρώσεων και μη γραμμικών συναρτήσεων για την επίλυση πιο σύνθετων προβλημάτων (Shin et al., 2022: 22).

Η ενσωμάτωση αλγορίθμων ML σε ρομπότ, κινητά τερματικά και έξυπνες συσκευές έχει βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια των μεθόδων ανίχνευσης στη σύγχρονη γεωργία. Τα μοντέλα ML υποστηρίζουν αλγορίθμους ανίχνευσης μέσω κινητών συσκευών, επιτρέποντας πιο καινοτόμες και ακριβείς μεθόδους παρατήρησης και υπερβαίνοντας περιορισμούς όπως η περιορισμένη υπολογιστική ισχύς, η ανεπαρκής αποθηκευτική ικανότητα, η πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος και οι δυσκολίες ανίχνευσης μικρών στόχων (Punithavathi et al., 2023: 2759-2760; Wang et al., 2023: 1-2). Οι τεχνικές ML συμβάλλουν επίσης στη μείωση του μεγέθους των δικτύων και στη βελτίωση των ταχυτήτων λειτουργίας των συστημάτων (Wang et al., 2023: 1-2).

Οι εφαρμογές αυτής της προόδου περιλαμβάνουν την ακριβή ανίχνευση φρούτων και παρασίτων, καθώς και τη βελτιστοποίηση και πρόβλεψη σύνθετων συνθηκών σε καλλιέργειες φυτικών ιστών και διαδικασίες αναπαραγωγής (Aasim et al., 2023: 2; Punithavathi et al., 2023: 2759-2760; Shaikh et al., 2022: 1-2). Η μελέτη των Hundal et al., (2023; 4-5) απέδειξε την επιτυχή εφαρμογή μοντέλων ML και πολυστρωματικών τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την ενίσχυση της *in vitro* αναγέννησης σπόρων σόγιας, παρακολουθώντας παρατηρήσιμα χαρακτηριστικά όπως η συχνότητα αναγέννησης των βλαστών και το μήκος τους.



Εικόνα 4: Κύριες εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης σε διαφορετικές πρακτικές στη γεωργία ακριβείας

Πηγή: Karunathilake et al., (2023: 10)

Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται για την επικύρωση των δεδομένων, επιτρέποντας μια βαθύτερη κατανόηση των δυναμικών συνθηκών στα γεωργικά περιβάλλοντα μέσω των πληροφοριών που συλλέγονται από διάφορα συστήματα της σύγχρονης γεωργίας (Aasim et al., 2023: 2; Cravero & Sepúlveda, 2021: 1-2). Παρά τις προόδους αυτές, εξακολουθούν να υφίστανται προκλήσεις, όπως η ταχύτητα επεξεργασίας και η ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων οπτικοποίησης πληροφοριών για τους αγρότες κατά την ανάλυση μεγάλων δεδομένων (Cravero & Sepúlveda, 2021: 1-2). Ωστόσο, η συνεχής έρευνα στους τομείς των μεγάλων δεδομένων, του IoT, της μηχανικής μάθησης και της βαθιάς μάθησης δημιουργεί σημαντικές δυνατότητες για την υπέρβαση αυτών των εμποδίων, παρέχοντας ακριβείς προβλέψεις για τη δυναμική φύση της γεωργίας και εντοπίζοντας νέες ευκαιρίες (Alfred et al., 2021: 50359).

Οι εποπτευόμενες τεχνικές μηχανικής μάθησης περιλαμβάνουν μοντέλα όπως οι μηχανές υποστηρικτικών διανυσμάτων, τα δέντρα αποφάσεων, οι k-μέσες τιμές, τα τυχαία δάση, οι γενετικοί αλγόριθμοι, η βαθιά μάθηση και η ασαφής. Αυτά τα μοντέλα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον αυτοματισμό της γεωργίας, ενισχύοντας άλλες τεχνολογίες όπως τα smartphones, τα UAV, τα μη επανδρωμένα επίγεια οχήματα, τα δορυφορικά συστήματα, τα αυτοματοποιημένα μηχανήματα, τα γεωργικά ρομπότ και

η ανάλυση μεγάλων δεδομένων (Alfred et al., 2021: 50359; Saranya et al., 2023: 3; Shaikh et al., 2022: 1-2).

Η εφαρμογή κινητών συσκευών συνδέεται στενά με τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης, Μηχανικής Μάθησης, Βαθιάς Μάθησης και επεξεργασίας δεδομένων (Shin et al., 2022: 22). Οι αλγόριθμοι ML που συνδέονται με μεγάλα δεδομένα επιτρέπουν την εκμάθηση από τα δεδομένα για τη δημιουργία αποφάσεων, προβλέψεων και προοπτικών βασισμένων σε δεδομένα. Παρόλο που η αρχική υιοθέτηση μοντέλων ML στη γεωργία ακριβείας μπορεί να αντιμετωπίσει προκλήσεις σε χρόνο και κόστος λόγω της συλλογής των απαραίτητων δεδομένων από εμπορικές εκμεταλλεύσεις (Alfred et al., 2021: 50360; Anbarasan et al., 2020: 151; Cravero & Sepúlveda, 2021: 1-2), η συνεχής πρόοδος των αισθητήρων IoT, των αυτόνομων μηχανών και ρομπότ σε συνδυασμό με cloud computing, edge computing και blockchain διευκολύνει τη διαχείριση, την αποθήκευση και την επεξεργασία δεδομένων για τη δημιουργία μοντέλων ML (Whattoff et al., 2017: 462).

Η ML χρησιμοποιείται για την επίλυση ποικίλων ζητημάτων στη γεωργία, όπως η πρόβλεψη απόδοσης, η αξιολόγηση ποιότητας καλλιεργειών, η ανίχνευση ασθενειών και ζιζανίων, η αναγνώριση ειδών, η ευζωία των ζώων, η κτηνοτροφία, η διαχείριση υδάτων και εδάφους (Cravero & Sepúlveda, 2021: 1-2; Fragassa et al., 2023: 1-2). Κοινές τεχνικές ML περιλαμβάνουν ομαδοποίηση, δέντρα αποφάσεων, μοντέλα βασισμένα σε στιγμιότυπα, παλινδρόμηση, τεχνητά και βαθιά νευρωνικά δίκτυα, μάθηση σε σύνολο, μηχανές υποστήριξης διανυσμάτων και Bayesian μοντέλα (Cravero & Sepúlveda, 2021: 1-2). Μια μελέτη απέδειξε ότι η ML είναι ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση δεδομένων και την παρακολούθηση εισροών και εκροών με στόχο τη βελτιστοποίηση των πρωτοκόλλων καλλιέργειας φυτικών ιστών (Aasim et al., 2023: 2).

Η έξυπνη γεωργία στηρίζεται στη συνδυαστική χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης και IoT για τη διαχείριση κυβερνοφυσικών αγροκτημάτων (Shaikh et al., 2022: 1-2). Η AI εφαρμόζεται στη διαχείριση εδάφους, καλλιεργειών, ασθενειών και ζιζανίων, με συστήματα όπως το SRCDS (σύστημα υποστήριξης αποφάσεων χαρακτηρισμού κινδύνου εδάφους), MOM (μοντελοποίηση προσανατολισμένη στη διαχείριση), τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANNs), CALEX, PROLOG, ANN-GIS, IWO και μηχανές υποστήριξης διανυσμάτων (Bhat & Huang, 2021: 110211).

Μία από τις βασικές εφαρμογές της AI περιλαμβάνει κινητά συστήματα εμπειρογνομόνων, όπου οι αγρότες μπορούν να χρησιμοποιούν smartphones για

διάγνωση ασθενειών, αναγνώριση ειδών και αξιολόγηση της υγείας του εδάφους μέσω εφαρμογών (Walter et al., 2017: 6148–6150). Η ΑΙ επιτρέπει επίσης την ανάλυση δορυφορικών εικόνων σε πραγματικό χρόνο για παρακολούθηση γεωργικών δραστηριοτήτων. Μέσω αυτών των εφαρμογών, η γεωργία ακριβείας αποκτά επιστημονικό υπόβαθρο, συμβάλλοντας στην τυποποίηση διαδικασιών και στην επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων (Tanikawa, 2018: 241).

Στο μέλλον, η ΑΙ μπορεί να εξελιχθεί ώστε να αντιμετωπίσει τη δυναμική φύση των γεωργικών μικροκλιμάτων, παρόλο που η ετερογένεια των συνθηκών καθιστά δύσκολη την εξεύρεση μιας ενιαίας λύσης. Το χάσμα γνώσεων μεταξύ ερευνητών ΑΙ και αγροτών περιορίζει την πλήρη κατανόηση των προβλημάτων και λύσεων, επομένως απαιτείται στενότερη συνεργασία μεταξύ αγροτών, επαγγελματιών του κλάδου και ερευνητών ΑΙ. Παράλληλα, πρέπει να ληφθούν υπόψη ζητήματα προσβασιμότητας και προστασίας ιδιωτικότητας κατά την επεξεργασία μεγάλων δεδομένων, ώστε να επιτευχθεί αποτελεσματικότερη χρήση της Τεχνητής Νοημοσύνης (Javaid et al., 2022: 151-152; Liu et al., 2021: 4324-4325).

2.4.5 Συστήματα καθοδήγησης

Τα συστήματα καθοδήγησης αξιοποιούν την τεχνολογία GPS (παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης) για να παρέχουν στους αγρότες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τη θέση του εξοπλισμού τους και τις ζώνες βόσκησης, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση εργασιών πεδίου όπως φύτευση, συγκομιδή και εκτροφή ζώων (Alfred et al., 2021: 50360). Οι περιορισμοί που σχετίζονταν με τον μικρό αριθμό δορυφόρων, τη χαμηλή ισχύ σήματος και την έλλειψη αξιόπιστης συνδεσιμότητας αντιμετωπίστηκαν με την εισαγωγή των GNSS (παγκόσμιο δορυφορικό σύστημα πλοήγησης), τα οποία αντικατέστησαν τις χρονοβόρες και απαιτητικές σε εργασία μεθόδους με πιο αποτελεσματικές διαδικασίες, όπως η εφαρμογή μεταβλητού ρυθμού (VRA) (Saranya et al., 2023: 4-5).

Προηγουμένως, οι γεωργικές εισροές εκτελούνταν χειροκίνητα και, κατά την εποχή της Γεωργίας 3.0, πραγματοποιούνταν μηχανικά με τη χρήση ψηφιοποιημένων μηχανημάτων. Με την ταχεία εμπορευματοποίηση των γεωργικών τεχνολογιών, αναδείχθηκαν υπηρεσίες γεωργικών μηχανημάτων που απαιτούν αποτελεσματική διαχείριση για την αποφυγή προβλημάτων υπερβολικής ή ανεπαρκούς χρήσης. Το

GNSS διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην αύξηση της αποτελεσματικότητας και αποδοτικότητας των γεωργικών μηχανημάτων (Chen et al., 2023: 1-3).

Η ενσωμάτωση συσκευών GNSS σε πλήρως αυτοματοποιημένα συστήματα έλξης συμβάλλει στην εξοικονόμηση χρόνου, κόστους εργασίας και χρημάτων. Τα ακριβή γεωργικά ρομπότ απαιτούν υψηλής ανάλυσης λύσεις πλοήγησης για να λειτουργούν αποτελεσματικά. Ομοίως, γεωργικά ρόβερ και ρομπότ αποδίδουν μόνο όταν καθοδηγούνται με ακρίβεια στις ενέργειές τους (Fragassa et al., 2023: 1-2).

Ορισμένες μελέτες έχουν ενσωματώσει μοντέλα διάδοσης βαθιάς μάθησης (DL) σε GNSS, συνδυάζοντάς τα με σύνολα δεδομένων αδρανειακής πλοήγησης για εφαρμογές γεωργίας ακριβείας. Ένα παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη ηλεκτρικών σπαρτικών μηχανών με τεχνολογία ανίχνευσης οπτικών ινών, οι οποίες δοκιμάστηκαν με επιτυχία (Monteiro et al., 2021: 4-5). Επιπλέον, η χρήση λογισμικού για Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) προωθεί την αυτοματοποίηση της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, διευκολύνοντας την εποπτεία, την αποθήκευση, τη λήψη αποφάσεων και τη διαχείριση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων (Chen et al., 2023: 1-3).

2.4.6 Τεχνολογία Blockchain

Η τεχνολογία Blockchain ορίζεται ως μια αποκεντρωμένη, κατανεμημένη βάση δεδομένων που διατηρεί μια συνεχώς αυξανόμενη σειρά ταξινομημένων εγγραφών ή μπλοκ, αρχικά χρησιμοποιούμενη στα κρυπτονομίσματα. Το Blockchain προσφέρει διαφάνεια, αμετάβλητο χαρακτήρα και αξιοπιστία, ενισχύοντας την αμοιβαία εμπιστοσύνη μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών στην αλυσίδα εφοδιασμού (Sendros et al., 2022: 2-3).

Η εφαρμογή του στη γεωργία ακριβείας εισήγαγε νέες δυνατότητες ενσωμάτωσης ψηφιακών τεχνολογιών, αντιμετωπίζοντας τεχνικές προκλήσεις στην έξυπνη γεωργία. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η ανεπαρκής και ανασφαλής υποδομή για κοινή χρήση δεδομένων και η καθυστέρηση δορυφόρων τηλεπισκόπησης στην παρακολούθηση της μεταβλητότητας των καλλιεργήσιμων εκτάσεων. Το Blockchain προτείνεται ως λύση για τα ζητήματα αποκέντρωσης, ανωνυμίας και ασφάλειας στο IoT, παρέχοντας ελαφριά, κατανεμημένη, αποκεντρωμένη και διαφανή ασφάλεια και ιδιωτικότητα (Yazdinejad et al., 2021: 1-2).

Η τεχνολογία αυτή μπορεί να υποστηρίξει την ασφαλή και αξιόπιστη παρακολούθηση γεωργικών δραστηριοτήτων, βελτιώνοντας τον προγραμματισμό χρονοδιαγραμμάτων για διαδικασίες όπως η κοινή χρήση νερού άρδευσης, η διαχείριση ενέργειας, η ενσωμάτωση μηχανημάτων και εργασίας, καθώς και η συνεργασία ρομπότ και αυτόνομων UAV (Sendros et al., 2022: 2-3; Shaikh et al., 2022: 1-2). Στην αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων, το Blockchain καθίσταται κρίσιμο για την αντιμετώπιση ζητημάτων ασφάλειας τροφίμων και την επίλυση προβλημάτων που προκύπτουν από ασύμμετρες ή κατακερματισμένες πληροφορίες (Alfred et al., 2021: 50360; Liu et al., 2021: 4324-4325; Shin et al., 2022: 22). Παρά τις δυνατότητές του, η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο ωριμότητας, με σημαντικό δυναμικό για περαιτέρω ανάπτυξη και υιοθέτηση (Yazdinejad et al., 2021: 1-2).

2.4.7 Ρομποτική και Αυτόνομα Συστήματα

Τα τελευταία χρόνια, η αυτόνομη γεωργία ενσωματώνει εκτεταμένα ρομποτική, αισθητήρες, drones και τεχνολογίες τηλεπισκόπησης για την εκτέλεση ποικίλων γεωργικών εργασιών, όπως φύτευση, ψεκάσμο, συγκομιδή και ξεβοτάνισμα, μειώνοντας το κόστος εργασίας και βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα στη λήψη αποφάσεων (Fragassa et al., 2023: 1-2; Monteiro et al., 2021: 4-5). Τα Ρομποτικά και Αυτόνομα Συστήματα (RAS) συνδυάζουν σύγχρονες τεχνολογίες με βασικές εφαρμογές τόσο στις διαδικασίες γεωργικής παραγωγής όσο και στα πρότυπα παραγωγής. Κινητά ρομπότ, εξοπλισμένα με αισθητήρες, ενεργοποιητές και αλγόριθμους Μηχανικής Μάθησης (ML), επιτρέπουν την αυτόματη διαχείριση της μεταβλητότητας και της αβεβαιότητας στις γεωργικές πρακτικές (Fragassa et al., 2023: 1-2).

Βασικές εφαρμογές των RAS περιλαμβάνουν εργοστάσια, τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων και γεωργία βιοποικιλότητας, ενώ η αυτόνομη γεωργία, η εναέρια παρακολούθηση και η αυτοματοποιημένη κτηνοτροφία αποτελούν νέες κατευθύνσεις στις διαδικασίες παραγωγής (Liu et al., 2021: 4324-4325). Ωστόσο, τα γεωργικά RAS χρειάζονται περαιτέρω βελτιώσεις για να εκτελούν εργασίες με ακρίβεια στην καθοδήγηση, την αυτόνομη πλοήγηση και την ανίχνευση δυναμικών γεωργικών περιβαλλόντων, όπως μεταβαλλόμενες εμφανίσεις φυτών, στάδια ανάπτυξης, καιρικές συνθήκες και επικάλυψη αντικειμένων (Fragassa et al., 2023: 1-2).

Σήμερα, οι ευφυείς ενέργειες των RAS περιλαμβάνουν φαινοτυπία φυτών, καταμέτρηση και συγκομιδή καρπών, ξεφλούδισμα φύλλων, επιλεκτικό ψεκασμό και τρισδιάστατη χαρτογράφηση (Liu et al., 2021: 4324-4325). Τα αυτόματα κατευθυνόμενα γεωργικά οχήματα χρησιμοποιούνται σε πολλές εργασίες πεδίου, όπως όργωμα, φύτευση, χημικές εφαρμογές και συγκομιδή (Monteiro et al., 2021: 5). Μηχανήματα όπως θεριζοαλωνιστικές μηχανές, ψεκαστήρες, τρακτέρ και συστήματα ελέγχου ζιζανίων αξιοποιούν συστήματα καθοδήγησης μέσω φωτεινών μπαρών (Hundal et al., 2023; 4-5) ή GNSS (FAO, 2022: 1), παρέχοντας ακριβή απεικόνιση των θέσεων του εξοπλισμού και αποφεύγοντας παραλείψεις και επικαλύψεις, κρίσιμο στοιχείο για εφαρμογές μεταβλητού ρυθμού.

2.4.8 Τεχνητοί Δορυφόροι, Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (UAV) και Μη Επανδρωμένα Επίγεια Οχήματα (UGV)

Οι τεχνητοί δορυφόροι, όπως οι αμερικανικοί Landsat, το Ευρωπαϊκό Σύστημα Sentinel-2, ο αστερισμός RapidEye, το GeoEye-1 και το WorldView-3, χρησιμοποιούνται για τηλεπισκόπηση και παρέχουν δεδομένα εξ αποστάσεως σε πολυφασματικές μορφές (Liu et al., 2021: 4324-4325). Η εγκατάσταση αυτών των έξυπνων δορυφόρων έχει επιτρέψει πλήρη κάλυψη για τη συλλογή γεωργικών πληροφοριών (Berger et al., 2023: 2; Liu et al., 2021: 4324-4325; Saranya et al., 2023: 2). Πιο πρόσφατα, οι οικονομικά προσιτές και πανταχού παρούσες τεχνολογίες, όπως drones, αεροσκάφη και πληρώματα, έχουν καταστήσει δυνατή τη λήψη εικόνων πιο κοντά στο έδαφος με υψηλότερη συχνότητα, αυξάνοντας τη λεπτομέρεια και τη λειτουργικότητα (Fragassa et al., 2023: 1-2).

Τα Αυτόνομα Επίγεια Οχήματα (UGV) συλλέγουν δεδομένα υψηλής ανάλυσης για αναγνώριση και έλεγχο ζιζανίων, επιλεκτικό ψεκασμό φυτοφαρμάκων, ανάλυση εδάφους και παρακολούθηση καλλιεργειών, ενώ τα ρομπότ ανίχνευσης υλοποιούν συγκεκριμένες εργασίες, όπως μηχανικό ξεβοτάνισμα (Oz), ψεκασμό (GUSS), λίπανση, χαρτογράφηση και σπορά (RowBot), καθώς και διαχείριση αμπελώνων (VineRobots) (Bhat & Huang, 2021: 110211; Kim et al., 2019: 159-160).

Τα δεδομένα που παράγονται από δορυφόρους, UAV και UGV είναι κρίσιμα για τη γεωργία ακριβείας, καθώς υποστηρίζουν την αναγνώριση βλαστικών περιοχών, την ανίχνευση ζιζανίων, τον εντοπισμό προσβολών από παράσιτα, την παρατήρηση περιβαλλοντικών πιέσεων και την ακριβή ταξινόμηση σε εφαρμογές μεταβλητού ρυθμού (VRT) (Fragassa et al., 2023: 2). Επιπλέον, σε άλλους γεωργικούς τομείς όπως

η υδατοκαλλιέργεια, η αγροδασοκομία και η δασοκομία, τα δεδομένα απεικόνισης καλύπτουν εκτεταμένες περιοχές και είναι αναπαραγώγιμα (FAO, 2022: 1).

Τα δεδομένα αυτά υποστηρίζονται από λεπτομερή στοιχεία επίγειας έρευνας, τα οποία επεξεργάζονται με αλγόριθμους Μηχανικής Μάθησης (ML) και Βαθιάς Μάθησης (DL) για να παραχθούν ουσιαστικές πληροφορίες. Στη δασοκομία, για παράδειγμα, ο προσδιορισμός της πυκνότητας των δασών, που απαιτεί παραδοσιακά μεγάλη εργασία, μπορεί πλέον να επιτευχθεί γρήγορα σε ευρείες περιοχές χρησιμοποιώντας υπερφασματικές εικόνες και δεδομένα NDVI και RGB από UAV και Sentinel-2 (Hundal et al., 2023; 4-5; Javaid et al., 2022: 151-152). Οι δορυφόροι και τα drones παίζουν επίσης καθοριστικό ρόλο στην παρακολούθηση αποψύλωσης δασών, την ακριβή κάλυψη τύπων βλάστησης και την ταξινόμηση ειδών δέντρων, αποδεικνυόμενοι πιο αποτελεσματικά από UAV ή LiDAR (Ma et al., 2021: 3-4; Tomaszewski et al., 2023: 67).

Παρά τους περιορισμούς, η χρήση μη επανδρωμένων και τηλεκατευθυνόμενων αεροσκαφών αυξάνεται σημαντικά, παρέχοντας ακριβείς πληροφορίες για τη γεωργία ακριβείας μέσω υπερφασματικών αισθητήρων, πολυφασματικών καμερών και άλλων τεχνολογιών. Πρόκειται για μια οικονομικά αποδοτική και πολλά υποσχόμενη μέθοδο παρακολούθησης μεγάλων αγροκτημάτων, καλλιεργήσιμων εκτάσεων και δασικών περιοχών (Bhat & Huang, 2021: 110211; Ma et al., 2021: 3-4).

2.4.9 Φαινοτυποποίηση υψηλής απόδοσης

Η φαινοτυπική ανάλυση υψηλής απόδοσης έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την ενίσχυση της γεωργίας ακριβείας, επιτρέποντας την ταχεία και ακριβή μέτρηση των χαρακτηριστικών των φυτών, τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά (Jang et al., 2023: 2-3; Thakur et al., 2023: 2432; Xie et al., 2-3). Η δυνατότητα υψηλής ακρίβειας στη φαινοτυπική ανάλυση είναι κρίσιμη για την επιτάχυνση της βελτίωσης των καλλιεργειών (Xie et al., 2-3).

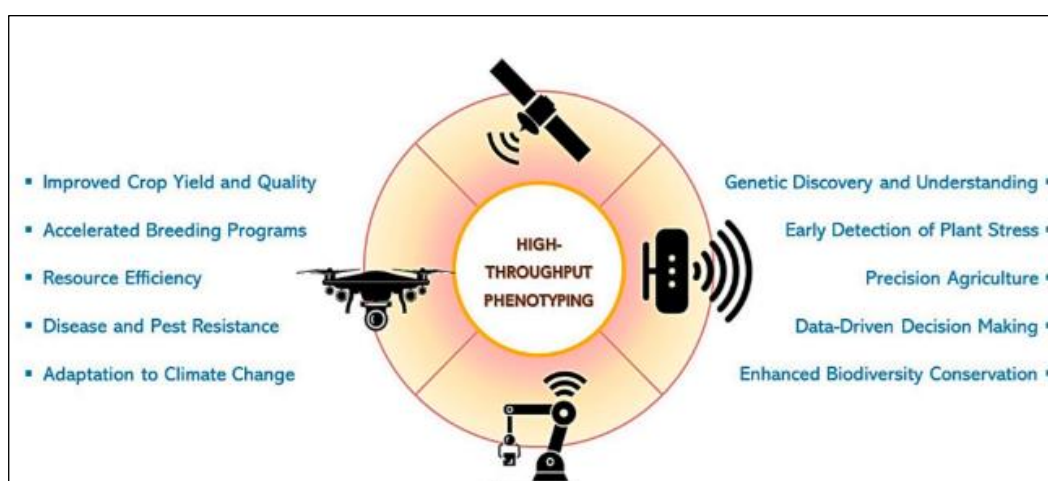
Η τεχνική αξιοποιεί προηγμένες τεχνολογίες, όπως τηλεπισκόπηση (Gebresenbet et al., 2023: 4), φασματική απεικόνιση (Koubaa et al., 2023: 4) και ρομποτική (Arunachalam & Andreasson, 2021: 3-4) για τη συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων σχετικά με χαρακτηριστικά των φυτών, όπως ο ρυθμός ανάπτυξης, η απόδοση, η αντοχή σε ασθένειες και η μορφολογία (Thakur et al., 2023: 2432). Η ανάλυση αυτών των δεδομένων επιτρέπει στους αγρότες να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά

με τη λίπανση, την άρδευση, τη συγκομιδή και τη διαχείριση παρασίτων (Jang et al., 2023: 2-3).

Η φαινοτυπική ανάλυση υψηλής απόδοσης παρέχει επίσης τη δυνατότητα στους βελτιωτές να αναπτύξουν νέες ποικιλίες καλλιεργειών που προσαρμόζονται καλύτερα στις τοπικές συνθήκες και προσφέρουν υψηλότερες αποδόσεις (Εικόνα 5) (Thakur et al., 2023: 2432). Η χρήση ενός πλήρους φάσματος ορατών και εγγύς υπέρυθρων υπερφασματικών δεδομένων επιτρέπει στις τεχνικές μηχανικής μάθησης (ML), όπως η παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων (LSR), να προβλέπουν βιοχημικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά πέρα από απλούς φυτικούς δείκτες (Wong et al., 2023: 3-4).

Τα συστήματα γεωργίας ακριβείας που βασίζονται σε μηχανική μάθηση ενσωματώνουν την Τεχνητή Νοημοσύνη (Xie et al., 2-3), και ως εκ τούτου, κατά την ανίχνευση ασθενειών, παρασίτων, έλλειψης θρεπτικών συστατικών και ζιζανίων, οι στρεσαρισμένες αντιδράσεις των φυτών μπορούν να εντοπιστούν μέσω εικόνων υψηλής ποιότητας που προέρχονται από τηλεπισκόπηση UAV ή UGV, υπερφασματική και δορυφορική απεικόνιση (Jang et al., 2023: 2-3).

Συνολικά, η φαινοτυπική ανάλυση υψηλής απόδοσης έχει τη δυνατότητα να μετασχηματίσει τη γεωργία, επιτρέποντας ακριβέστερη, σε πραγματικό χρόνο και αποτελεσματική παρακολούθηση των γεωργικών πρακτικών, με σκοπό τη βελτίωση της παραγωγικότητας, τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ενίσχυση της επισιτιστικής ασφάλειας (Wong et al., 2023: 3-4).



Εικόνα 5: Σημασία της φαινοτυπικής ανάλυσης υψηλής απόδοσης στη γεωργία
Πηγή: Karunathilake et al., (2023: 14)

Οι παραδοσιακές μέθοδοι βελτίωσης φυτών παρουσιάζουν περιορισμούς όσον αφορά τον χρόνο, το κόστος και την ακρίβεια. Αντίθετα, η φαινοτυπική ανάλυση υψηλής απόδοσης (HTP) χρησιμοποιεί μη καταστροφικές και ταχείες μεθόδους για τη συλλογή δεδομένων από μεγάλο αριθμό φυτών, επιτρέποντας στους βελτιωτές να εντοπίζουν αποτελεσματικά τα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος (Araus & Cairns, 2014: 52). Μια μελέτη των Zhang et al., (2017: 1554), χρησιμοποίησε HTP και χαρτογράφηση ποσοτικής θέσης χαρακτηριστικών (QTL) για να διερευνήσει τη γενετική αρχιτεκτονική της ανάπτυξης του καλαμποκιού, συλλέγοντας δεδομένα για χαρακτηριστικά όπως ύψος φυτού, επιφάνεια φύλλων και βιομάζα μέσω τεχνικών απεικόνισης και φασματοσκοπίας.

Τα μη επανδρωμένα εναέρια συστήματα (UAS) έχουν επιφέρει επαναστατική αλλαγή στον φαινοτυπικό προσδιορισμό υψηλής απόδοσης στο πεδίο, παρέχοντας πλατφόρμες για διαφορετικούς αισθητήρες τηλεπισκόπησης. Αυτοί περιλαμβάνουν κανονικές κάμερες RGB, πολυφασματικές και υπερφασματικές κάμερες, αισθητήρες θερμικής απεικόνισης και LiDAR, οι οποίοι επιτρέπουν μη καταστροφική εκτίμηση χαρακτηριστικών φυτών όπως η απόδοση, η βιομάζα, το ύψος και ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας. Τα UAS προσφέρουν υψηλότερη συχνότητα και ανάλυση δεδομένων σε σύγκριση με επίγειες ή δορυφορικές μεθόδους, ενώ παραμένουν οικονομικά αποδοτικά (Guo et al., 2020: 4).

Τα φαινοτυπικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή καλλιεργειών υψηλής απόδοσης και αντοχής σε στρες, όπως ανθεκτικότητα σε ασθένειες και αλατότητα, οδηγώντας σε βελτιωμένη παραγωγή. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, το μέλλον της HTP φαίνεται πολλά υποσχόμενο, καθώς η ενσωμάτωση drones, αισθητήρων και τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπει πιο αποτελεσματική και ακριβή ανάλυση (Zhang et al., 2017: 1554).

Επιπλέον, η HTP μπορεί να υποστηρίξει τη γεωργία ακριβείας, παρέχοντας δεδομένα που βοηθούν τους αγρότες να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με εισροές όπως λιπάσματα, φυτοφάρμακα και νερό, αυξάνοντας την αποδοτικότητα, μειώνοντας τα απόβλητα και βελτιώνοντας την απόδοση. Η τεχνική έχει επίσης κρίσιμο ρόλο στην έρευνα για την κλιματική αλλαγή, εντοπίζοντας ποικιλίες που προσαρμόζονται καλύτερα σε μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες και διασφαλίζοντας την επισιτιστική ασφάλεια. Εν κατακλείδι, η HTP μπορεί να ενισχύσει την παραγωγικότητα και την επισιτιστική ασφάλεια σε αναπτυσσόμενες χώρες, εφόσον

αναπτυχθούν οικονομικά προσιτές και προσβάσιμες τεχνολογίες που οι αγρότες μπορούν εύκολα να υιοθετήσουν (Araus & Cairns, 2014: 52; Wong et al., 2023: 3-4).

2.4.10 Τηλεματική

Η ευρυζωνική συνδεσιμότητα αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αντιμετώπιση προκλήσεων που σχετίζονται με την υιοθέτηση, το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των έξυπνων τεχνολογιών στη γεωργία. Η ανεπαρκής συνδεσιμότητα οδηγεί σε μειωμένη αποδοτικότητα, αυξάνοντας τον χρόνο διακοπής λειτουργίας των μηχανημάτων, τα ανθρώπινα λάθη και περιορίζοντας τη διαθεσιμότητα πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Η περιορισμένη συνδεσιμότητα επηρεάζει όχι μόνο την κερδοφορία των παραγωγών, αλλά και την υιοθέτηση της γεωργίας ακριβείας που βασίζεται σε δεδομένα πραγματικού χρόνου (Karunathilake et al., 2023: 14).

Οι παραγωγοί με επαρκή συνδεσιμότητα αναμένεται να είναι πιο αποδοτικοί, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της σύνδεσης δικτύων στην παραγωγική διαδικασία. Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G και μελλοντικά 6G διαθέτουν μετασχηματιστικό δυναμικό για την προώθηση επιχειρηματικών και κοινωνικών αλλαγών. Ωστόσο, ο ρόλος τους στη βιωσιμότητα και την καινοτομία αμφισβητείται, λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικές ανησυχίες και την κλιματική αλλαγή. Τομείς όπως η έξυπνη γεωργία, η δασοκομία, η παρακολούθηση της βιοποικιλότητας και η διαχείριση των υδάτων απαιτούν αποδοτική συνδεσιμότητα για τη βιώσιμη αξιοποίηση των πόρων. Η αξιολόγηση των δυνατοτήτων των δικτύων 5G και 6G, τόσο στην τρέχουσα όσο και στη μελλοντική τους μορφή, είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό περιπτώσεων χρήσης και των απαιτήσεων σε αυτούς τους κρίσιμους τομείς (Tomaszewski et al., 2023: 68-69).

Για παράδειγμα, μια μελέτη στην Ταϊλάνδη περιέγραψε τρακτέρ εξοπλισμένα με τηλεματική, τα οποία βοηθούν τους αγρότες στην αποτελεσματική διαχείριση των μηχανημάτων τους, βελτιστοποιώντας την απόδοση και ενισχύοντας τη συνολική παραγωγικότητα. Επιπλέον, αυτά τα τρακτέρ προσφέρουν λειτουργίες όπως η πρόληψη κλοπής, η παρακολούθηση της συντήρησης και η εποπτεία της λειτουργίας των μηχανημάτων (Karunathilake et al., 2023: 14).

2.5 Εμπόδια στην προσαρμογή νέων τεχνολογιών στην Γεωργία Ακριβείας

Οι τεχνολογίες υψηλής τεχνολογίας που προέρχονται από την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση διαθέτουν τη δυνατότητα να μεταμορφώσουν τον αγροτικό τομέα, επιτρέποντας την υιοθέτηση πιο αποτελεσματικών και βιώσιμων πρακτικών, βελτιώνοντας την παραγωγικότητα και μειώνοντας τη σπατάλη πόρων. Η ενσωμάτωση αυτών των προηγμένων τεχνολογιών στη γεωργία ακριβείας βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, γεγονός που δημιουργεί αρκετά εμπόδια τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου να διευκολυνθεί ο μετασχηματισμός της γεωργίας ακριβείας. Η αξιολόγηση των συγκεκριμένων απαιτήσεων, προκλήσεων και παραμέτρων εφαρμογής κάθε τεχνολογίας εντός του πλαισίου των διαφορετικών γεωργικών δραστηριοτήτων κρίνεται απαραίτητη (Karunathilake et al., 2023: 15).

Ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια είναι η έλλειψη διεπιστημονικών δεξιοτήτων, καθώς οι μηχανικοί μεγάλων δεδομένων, οι αναλυτές και οι επιστήμονες δεδομένων συχνά δεν διαθέτουν γεωργικό υπόβαθρο. Αντιστοίχως, οι έμπειροι αγρότες δεν έχουν επαρκή εκπαίδευση για να χειριστούν προηγμένες τεχνολογίες, όπως η τεχνητή νοημοσύνη (Liu et al., 2021: 4324-4325). Επιπλέον, το υψηλό κόστος παραγωγής, ανάπτυξης και εγκατάστασης εφαρμογών υψηλής τεχνολογίας στην πραγματική γεωργία αποτελεί σημαντικό περιορισμό (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020: 4). Το γεγονός αυτό μπορεί να καθιστά τις τεχνολογίες αυτές απρόσιτες για μικροκαλλιεργητές, οι οποίοι συχνά δεν διαθέτουν τους οικονομικούς πόρους για να επενδύσουν σε τέτοιες λύσεις (Liu et al., 2021: 4324-4325).

Η περιορισμένη διαθεσιμότητα οικονομικά προσιτών τεχνολογιών για μικροκαλλιεργητές μπορεί να δημιουργήσει ένα ψηφιακό χάσμα, όπου μόνο οι μεγάλης κλίμακας ή μορφωμένοι αγρότες θα μπορούν να επωφεληθούν από τις νέες τεχνολογίες (FAO, 2022: 2). Λόγω της άνιση κατανομής των πόρων παγκοσμίως, ορισμένες ομάδες αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην πρόσβαση σε τεχνολογικές καινοτομίες. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, η εφαρμογή πρακτικών ακριβούς γεωργίας συχνά καθίσταται δύσκολη λόγω έλλειψης κεφαλαίων, αμφιβολιών για την τεχνολογία, ανεπαρκούς υποδομής και περιορισμένων πόρων (Liu et al., 2021: 4324-4325; Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020: 4). Επιπλέον, η ανεπαρκής ενεργειακή υποδομή στις αγροτικές περιοχές περιορίζει τη χρήση νέων τεχνολογιών, ακόμη και όταν αναπτύσσονται ασύρματες μέθοδοι μεταφοράς και παραγωγής ενέργειας (Liu et al., 2021: 4324-4325).

Ο χαμηλός ψηφιακός γραμματισμός και η άνιση πρόσβαση στις ψηφιακές τεχνολογίες, σε συνδυασμό με προβλήματα συνδεσιμότητας, θέτουν σημαντικές προκλήσεις για την εγκατάσταση βιώσιμων ευφυών τεχνολογιών στη γεωργία (FAO, 2022: 1). Τεχνικά εμπόδια, όπως η περιορισμένη υπολογιστική ισχύς, η χωρητικότητα αποθήκευσης, η ταχύτητα επεξεργασίας και η υψηλή κατανάλωση ενέργειας των μπαταριών, επηρεάζουν ιδιαίτερα τη διαχείριση μεγάλων δεδομένων (Wang et al., 2023: 1-2). Επιπλέον, η συλλογή και ανάλυση γεωργικών δεδομένων μπορεί να εγείρει ανησυχίες για την ασφάλεια και το απόρρητο των πληροφοριών (Bhat & Huang, 2021: 110211), καθώς αυτά τα δεδομένα είναι ετερογενή και απαιτούν πλατφόρμες λογισμικού ιδιωτικών εταιρειών για τη μεταφορά και αποθήκευσή τους, δημιουργώντας ζητήματα ιδιοκτησίας (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020: 4).

Η διαλειτουργικότητα του blockchain, τα ζητήματα απορρήτου, η διαρροή δεδομένων, οι κυβερνοεπιθέσεις και η έλλειψη μηχανισμών αποποίησης ευθύνης για μεγάλα δεδομένα παραμένουν προκλήσεις για τη γεωργία ακριβείας (Liu et al., 2021: 4324-4325; Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020: 4), οδηγώντας σε δισταγμό από πλευράς αγροτών να μοιραστούν δεδομένα με τρίτους (Bhat & Huang, 2021: 110211; Javaid et al., 2022: 151-152). Σε περιοχές με περιορισμένη συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο, η συλλογή, μετάδοση και ανάλυση δεδομένων μπορεί να είναι περιορισμένη, επηρεάζοντας την απορρόφηση νέων τεχνολογιών (Bhat & Huang, 2021: 110211).

Η εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών απαιτεί επίσης τεχνική εμπειρογνομosύνη, που δεν είναι πάντα διαθέσιμη τοπικά, με αποτέλεσμα την ανακατανομή εργασίας και την ανεργία, καθώς οι νέες τεχνολογίες αυξάνουν τη ζήτηση για εξειδικευμένους εργαζόμενους και μειώνουν τις ευκαιρίες για μη εξειδικευμένους (FAO, 2022: 1; Liu et al., 2021: 4324-4325). Η κατάρτιση αγροτών και παρόχων υπηρεσιών είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική χρήση των τεχνολογιών, αλλά η ασυμβατότητα μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών ή με υπάρχοντα γεωργικά μηχανήματα μπορεί να περιορίσει την υιοθέτησή τους (Liu et al., 2021: 4324-4325).

Επιπλέον, προκαταλήψεις και διακρίσεις σε συνδυασμό με την τεχνολογία, την εκπαίδευση, τη στάση ανάληψης κινδύνων και τις δυτικές δομές εξουσίας αποτελούν εμπόδια στη διάδοση των τεχνολογιών έξυπνης γεωργίας, ιδίως στις αναπτυσσόμενες χώρες. Αυτό τονίζει την ανάγκη για πολιτικές σχετικά με την κοινοχρησία δεδομένων, οι οποίες να καλύπτουν τόσο τον δημόσιο όσο και τον γεωργικό τομέα και να διασφαλίζουν την προστασία των δεδομένων (FAO, 2022: 1).

2.6 Απαιτούμενες μελλοντικές εξελίξεις

Τα τελευταία χρόνια, ο γεωργικός τομέας έχει αναγνωρίσει τα πιθανά οφέλη από την υιοθέτηση νέων ψηφιακών τεχνολογιών. Ωστόσο, ο αργός ρυθμός προσαρμογής αποδίδεται σε διάφορα εμπόδια και αβεβαιότητες που σχετίζονται με αυτές τις εξελίξεις. Παρά τις προκλήσεις, η αυξανόμενη ζήτηση για βιολογικά τρόφιμα οδηγεί σε μια μετάβαση από τη βιώσιμη γεωργία προς την έξυπνη βιολογική γεωργία, δημιουργώντας νέες ευκαιρίες για τον τομέα (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020: 4).

Μια κρίσιμη πτυχή για την αξιοποίηση αυτής της ευκαιρίας είναι η γεφύρωση του χάσματος μεταξύ εξειδικευμένου προσωπικού και αγροτών. Η παροχή καλύτερης εκπαίδευσης και επαγγελματικής κατάρτισης σε νέες τεχνολογικές εφαρμογές μπορεί να ενδυναμώσει τους αγρότες, ώστε να αξιοποιούν αποτελεσματικά τις νέες τεχνολογίες (FAO, 2022: 2; Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020: 4). Οι κυβερνήσεις μπορούν να υποστηρίξουν αυτή τη διαδικασία μέσω της δημιουργίας φυσικών, οικονομικών, νομικών και κοινωνικών υποδομών που ενισχύουν την καθιέρωση της γεωργίας ακριβείας. Οι επενδύσεις σε ενεργειακές υποδομές, επικοινωνιακά δίκτυα, υπηρεσίες αγοράς, συμβουλευτικές υπηρεσίες και αγορές πιστώσεων μπορούν να ενσταλάξουν εμπιστοσύνη και προθυμία στους αγρότες να υιοθετήσουν αυτές τις τεχνολογίες (FAO, 2022: 1; Khanna & Kaur, 2023: 2-3).

Η αντιμετώπιση της έλλειψης επαγγελματικών γεωργικών αισθητήρων αποτελεί επίσης πρωταρχικό ζήτημα. Ο σχεδιασμός αισθητήρων υψηλής ποιότητας, υψηλής ανάλυσης και αξιόπιστων, τροφοδοτούμενων από το IoT, ειδικά προσαρμοσμένων στο περιβάλλον γεωργικής παραγωγής και στην παρακολούθηση φυσιολογικών σημείων φυτών και ζώων, είναι απαραίτητος (Liu et al., 2021: 4324-4325). Η ενσωμάτωση επιλογών ασύρματης μεταφοράς ενέργειας μπορεί να μειώσει την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις μπαταριών, ενώ η επιτόπια παραγωγή ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές, όπως ηλιακή ενέργεια ή βιοαέριο, μπορεί να προσφέρει οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση (Khanna & Kaur, 2023: 2-3).

Η διασύνδεση μεταξύ τεχνολογιών αποτελεί επίσης σημαντικό παράγοντα. Η μηχανική όραση για την παρακολούθηση ζώων, οι εφαρμογές έξυπνων τηλεφώνων για την παρακολούθηση χωρικών και χρονικών μεταβολών σε πραγματικό χρόνο, καθώς και η αξιοποίηση δικτύων κινητής τηλεφωνίας 6G προσφέρουν δυνατότητες δημιουργίας πολύτιμων δεδομένων για τεκμηριωμένες αποφάσεις. Επιπλέον, η ανάπτυξη νέων γεωργικών συστημάτων, όπως η έξυπνη υδροπονία με IoT και η εφαρμογή

τεχνολογιών DL και ML στην αναπαραγωγή, συμβάλλει στην περαιτέρω πρόοδο της γεωργίας ακριβείας (Liu et al., 2021: 4324-4325).

Οι μελλοντικές εξελίξεις στις τεχνολογίες της γεωργίας ακριβείας θεωρούνται πολλά υποσχόμενες για τον γεωργικό τομέα. Η υπέρβαση των υφιστάμενων εμποδίων και αβεβαιοτήτων είναι απαραίτητη για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων αυτών των τεχνολογιών. Εστιάζοντας στην εκπαίδευση, την ανάπτυξη υποδομών, την τεχνολογία αισθητήρων, τα συστήματα επικοινωνίας και τις νέες γεωργικές προσεγγίσεις, μπορεί να δημιουργηθεί ένα πιο αποτελεσματικό, βιώσιμο και παραγωγικό μέλλον στη γεωργία (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020: 4).

Τέλος, οι προοπτικές του τομέα είναι ιδιαίτερα ευοίωνες. Μελλοντικές εξελίξεις που σχετίζονται με την πλήρη διαλειτουργικότητα των μηχανημάτων, τη χρήση ρομποτικών συστημάτων μικρής κλίμακας, τη βελτίωση των αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης, την ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων (digital twins) για αγροτικά συστήματα και την ευρύτερη διάδοση των ανοικτών δεδομένων, αναμένεται να ενισχύσουν περαιτέρω τον ρόλο της γεωργίας ακριβείας στην παγκόσμια αγροδιατροφική αλυσίδα (Karunathilake et al., 2023: 2-3). Η διεπιστημονική έρευνα και η ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών αποτελούν τον θεμέλιο λίθο για τη διαμόρφωση ενός βιώσιμου μέλλοντος, όπου η γεωργική παραγωγή θα είναι ταυτόχρονα αποδοτική, περιβαλλοντικά υπεύθυνη και κοινωνικά δίκαιη (Pandeya et al., 2025: 2).

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

3.1 Ανάγκες στη Διεθνή και Ευρωπαϊκή Βιβλιογραφία

Παρά την αυξανόμενη διάδοση και ωριμότητα των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας, η υπάρχουσα βιβλιογραφία παρουσιάζει σημαντικά κενά που περιορίζουν την ολοκληρωμένη αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των δυνατοτήτων αυτών των τεχνολογιών. Ένα βασικό έλλειμμα αφορά την απουσία συστηματικών και συγκριτικών μελετών που να εξετάζουν τις επιδράσεις της γεωργίας ακριβείας σε διαφορετικά αγροτικά συστήματα, τύπους καλλιεργειών και κλιματικές ζώνες. Αν και υπάρχουν μελέτες περίπτωσης, τα συμπεράσματά τους δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα, ούτε συνδέονται με ενιαίους περιβαλλοντικούς δείκτες.

Επιπλέον, η ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών οφελών, όπως η μείωση των εισροών (λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων, νερού) και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, παραμένει περιορισμένη ή βασίζεται σε δεδομένα μικρής κλίμακας, γεγονός που δημιουργεί αβεβαιότητες για τη γενικευσιμότητα των αποτελεσμάτων σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Αντίστοιχα, η σύνδεση της χρήσης των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας με τους στόχους της EGD και της στρατηγικής F2F δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς. Ακόμη, μελετώνται συχνά μεμονωμένες τεχνολογίες (αισθητήρες, τηλεπισκόπηση, ρομποτική, εφαρμογές μεταβλητού ρυθμού), χωρίς να εξετάζεται πώς ο συνδυασμός και ο βαθμός ενσωμάτωσής τους επηρεάζει την περιβαλλοντική επίδοση και τη βιωσιμότητα της παραγωγής.

Πέρα από τα βιβλιογραφικά κενά, εντοπίζονται και τεχνολογικές/μεθοδολογικές ελλείψεις που δυσχεραίνουν την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της γεωργίας ακριβείας:

- Δεν υπάρχουν ενιαίες μεθοδολογίες αξιολόγησης που να συνδυάζουν τεχνικούς, περιβαλλοντικούς και οικονομικούς δείκτες.
- Τα διαθέσιμα δεδομένα είναι συχνά ετερογενή, αποσπασματικά και δύσκολα συγκρίσιμα.
- Παραμένει περιορισμένη η ανάλυση του τρόπου με τον οποίο η κλίμακα της εκμετάλλευσης, τα εδαφοκλιματικά χαρακτηριστικά και οι πρακτικές διαχείρισης επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών.

Η απουσία ολοκληρωμένων πλαισίων ανάλυσης δυσχεραίνει την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων για το πραγματικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της γεωργίας ακριβείας στην Ευρώπη.

Σημαντικά κενά αναδεικνύονται και στην κοινωνικοοικονομική διάσταση της υιοθέτησης των τεχνολογιών:

- Το υψηλό κόστος επένδυσης περιορίζει τη δυνατότητα υιοθέτησης από μικροκαλλιεργητές.
- Η έλλειψη τεχνικών και ψηφιακών δεξιοτήτων δυσχεραίνει την αποτελεσματική αξιοποίηση των συστημάτων.
- Παραμένουν ελάχιστα τεκμηριωμένες οι κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις των νέων τεχνολογιών στις αγροτικές περιοχές.

Αυτό καθιστά αδύνατη την αξιόπιστη εκτίμηση του πραγματικού εύρους εφαρμογής της γεωργίας ακριβείας στην Ευρώπη.

3.2 Ερωτήματα που προκύπτουν από τα κενά γνώσης

Με βάση τα παραπάνω ελλείμματα, αναδύονται κρίσιμα ερευνητικά ερωτήματα στα οποία η παρούσα εργασία επιδιώκει να απαντήσει:

1. Σε ποιο βαθμό οι τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας συμβάλλουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε διάφορα αγροτικά συστήματα της Ευρώπης;
2. Ποιες τεχνολογίες ή συνδυασμοί τεχνολογιών αποδίδουν τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά οφέλη και υπό ποιες συνθήκες;
3. Πώς συνδέεται η εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας με τους στόχους της EGD και της F2F, ιδίως όσον αφορά τη μείωση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων, νερού και εκπομπών GHG;
4. Ποιοι παράγοντες (κλιματικοί, εδαφικοί, τεχνολογικοί, οικονομικοί) καθορίζουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων γεωργίας ακριβείας;
5. Ποια εμπόδια υιοθέτησης και ποιες προϋποθέσεις κλιμάκωσης επηρεάζουν την επιτυχή εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών στην ευρωπαϊκή γεωργία;
6. Με ποιον τρόπο οι αγρότες και οι φορείς πολιτικής μπορούν να αξιοποιήσουν τα διαθέσιμα δεδομένα για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας;

3.3 Στόχος και συμβολή της παρούσας μελέτης

Ο κύριος στόχος της παρούσας μελέτης είναι να παράσχει μια ολοκληρωμένη και συστηματική αξιολόγηση της συμβολής των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και στη βελτίωση της βιωσιμότητας των γεωργικών συστημάτων σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Η μελέτη επιχειρεί να εξετάσει σε βάθος όχι μόνο το βαθμό αποτελεσματικότητας των επιμέρους τεχνολογικών εργαλείων, αλλά και τις συνθήκες υπό τις οποίες τα περιβαλλοντικά οφέλη μεγιστοποιούνται, λαμβάνοντας υπόψη το είδος της καλλιέργειας, την κλίμακα της εκμετάλλευσης, τα εδαφοκλιματικά χαρακτηριστικά και τον βαθμό ωριμότητας των τεχνολογικών εφαρμογών.

Παράλληλα, η εργασία στοχεύει στη γεφύρωση σημαντικών ερευνητικών κενών που εντοπίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Ειδικότερα, εστιάζει στην τεκμηρίωση της σχέσης μεταξύ γεωργίας ακριβείας και ευρωπαϊκών στρατηγικών, όπως η EGD και η στρατηγική F2F. Η σύνδεση αυτή παραμένει μέχρι σήμερα αποσπασματική, παρά την αυξανόμενη ανάγκη για τεκμηριωμένες εκτιμήσεις σχετικά με τη δυνατότητα των τεχνολογιών να συμβάλουν σε στόχους όπως η μείωση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, η εξοικονόμηση νερού και η συγκράτηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Η συμβολή της παρούσας μελέτης έγκειται επίσης στην προσφορά ποσοτικών εκτιμήσεων και συγκριτικών περιβαλλοντικών δεικτών που στηρίζονται σε βιβλιογραφικές πηγές, ερευνητικά έργα της ΕΕ και τεχνολογικά μοντέλα. Μέσα από αυτή την προσέγγιση, αναλύονται οι κρίσιμοι παράγοντες που καθορίζουν την επιτυχία των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας και προσδιορίζονται τα βασικά εμπόδια που περιορίζουν την υιοθέτησή τους, όπως οι οικονομικοί περιορισμοί, η έλλειψη τεχνικής γνώσης, η αδυναμία διαλειτουργικότητας, η ανισότητα πρόσβασης σε ψηφιακές υποδομές και οι αβεβαιότητες ως προς τη διαχείριση δεδομένων.

Πρακτικά, η εργασία επιδιώκει να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο τόσο για τους αγρότες όσο και για τους φορείς χάραξης πολιτικής, προσφέροντας τεκμηριωμένες προτάσεις που μπορούν να υποστηρίξουν τη μετάβαση σε πιο αποδοτικά και περιβαλλοντικά βιώσιμα γεωργικά συστήματα. Μέσω της σύνδεσης επιστημονικής γνώσης, τεχνολογικής καινοτομίας και στρατηγικών πολιτικής, η μελέτη συμβάλλει στην ενδυνάμωση της συζήτησης γύρω από τον πραγματικό ρόλο της γεωργίας ακριβείας στη μελλοντική αγροδιατροφική μετάβαση της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

3.4 Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

Η συλλογή και επεξεργασία δεδομένων αποτελεί καθοριστικό στάδιο της παρούσας μελέτης, καθώς επιτρέπει τη συστηματική καταγραφή των εφαρμογών γεωργίας ακριβείας και των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων. Η διαδικασία σχεδιάστηκε έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εγκυρότητα, η αξιοπιστία και η αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων, βασιζόμενη σε επιστημονικά τεκμηριωμένες πηγές και αναγνωρισμένες μεθοδολογικές προσεγγίσεις.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από συνδυασμό επιστημονικής βιβλιογραφίας, τεχνικών εκθέσεων, ερευνητικών έργων και ευρωπαϊκών στρατηγικών εγγράφων. Η αναζήτηση στη διεθνή βιβλιογραφία πραγματοποιήθηκε μέσω βάσεων δεδομένων όπως Scopus, Web of Science και Google Scholar, χρησιμοποιώντας στοχευμένες λέξεις-κλειδιά σχετικές με την ακριβείας γεωργία, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, τους δείκτες βιωσιμότητας και τις ψηφιακές τεχνολογίες. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν τεχνικές αναφορές διεθνών οργανισμών (FAO, OECD, ESA), καθώς και δεδομένα από ευρωπαϊκές επιτροπές και έργα Horizon 2020/Horizon Europe, τα οποία παρέχουν ποσοτικές εκτιμήσεις για την αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών σε πραγματικές συνθήκες αγροτικής παραγωγής.

Η διαδικασία συλλογής δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε διαδοχικά στάδια. Αρχικά έγινε εντοπισμός και επιλογή των πιο σχετικών μελετών, με βάση κριτήρια όπως η ποιότητα της μεθοδολογίας, το μέγεθος του δείγματος και η συνάφεια με τους περιβαλλοντικούς στόχους της ΕΕ. Από ένα αρχικό σύνολο άνω των 350 πηγών, επιλέχθηκαν εκείνες που παρείχαν πλήρη και αξιόπιστα στοιχεία σχετικά με τη χρήση τεχνολογιών ακριβείας και τη μείωση εισροών όπως λίπασμα, νερό, φυτοφάρμακα και ενέργεια. Στη συνέχεια έγινε εξαγωγή των διαθέσιμων δεδομένων, τα οποία ταξινομήθηκαν ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας, το είδος της καλλιέργειας, τις κλιματικές συνθήκες και το είδος των περιβαλλοντικών δεικτών που εξετάζονταν.

Ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων με συνδυασμό ποσοτικών και ποιοτικών μεθόδων. Η ποσοτική ανάλυση περιλάμβανε την αριθμητικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπου ήταν διαθέσιμες πληροφορίες, όπως ποσοστά μείωσης εισροών ή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση (benchmarking) για τη σύγκριση διαφορετικών τεχνολογιών υπό παρόμοιες συνθήκες παραγωγής. Η ποιοτική ανάλυση επικεντρώθηκε στην ερμηνεία των εμποδίων υιοθέτησης, των τεχνικών περιορισμών και των

κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων που σχετίζονται με την εφαρμογή συστημάτων ακριβείας.

Η εγκυρότητα των δεδομένων ενισχύθηκε μέσω διασταύρωσης πολλαπλών πηγών, εννοιολογικής τριγωνοποίησης και αποκλεισμού μελετών που δεν πληρούσαν συγκεκριμένα κριτήρια ποιότητας. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην εξάλειψη ασυνεπειών, στην καταγραφή των περιορισμών κάθε πηγής και στη διασφάλιση ότι τα δεδομένα ήταν συμβατά με τους περιβαλλοντικούς δείκτες που χρησιμοποιεί η EGD. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε μια μεθοδολογικά στιβαρή βάση για την ανάλυση που ακολουθεί, επιτρέποντας την αξιόπιστη αξιολόγηση των επιπτώσεων και της συμβολής της γεωργίας ακριβείας στη βιώσιμη ανάπτυξη.

3.5 Ανάλυση δεδομένων

Η ανάλυση των δεδομένων οργανώθηκε με τρόπο που να ανταποκρίνεται άμεσα στα ερευνητικά ερωτήματα της μελέτης και να επιτρέπει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της συμβολής της γεωργίας ακριβείας στη βιωσιμότητα. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση των δεδομένων σύμφωνα με τον τύπο καλλιέργειας, το αγροτικό σύστημα και τις μορφές τεχνολογιών που εφαρμόζονται, ώστε να εξασφαλιστεί η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Παράλληλα, εντοπίστηκαν βασικές ποσοτικές και ποιοτικές μεταβλητές, οι οποίες ευθυγραμμίζονται με τους περιβαλλοντικούς και παραγωγικούς στόχους που θέτει η ΕΕ, επιτρέποντας την εξαγωγή ουσιαστικών συμπερασμάτων.

Η ποιοτική ανάλυση των δεδομένων επικεντρώθηκε στην ερμηνεία των πληροφοριών που συλλέχθηκαν από βιβλιογραφικές πηγές, ευρωπαϊκά έργα και επίσημες στατιστικές βάσεις, προκειμένου να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας στη βιωσιμότητα των αγροτικών συστημάτων. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε την αναγνώριση μη ποσοτικοποιήσιμων παραμέτρων, όπως οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις, η εμπιστοσύνη των αγροτών στις νέες τεχνολογίες και οι περιβαλλοντικές αλληλεπιδράσεις που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των εφαρμογών.

Η ανάλυση περιελάμβανε επίσης την καταγραφή των εμπειρικών παρατηρήσεων από διαφορετικές ευρωπαϊκές χώρες, εντοπίζοντας τάσεις, κοινά χαρακτηριστικά και διαφοροποιήσεις ανάλογα με το κλίμα, το μέγεθος εκμεταλλεύσεων και τον τύπο καλλιέργειας. Η ποιοτική αξιολόγηση βοήθησε στην κατανόηση των παραγόντων που

περιορίζουν ή ενισχύουν την υιοθέτηση της γεωργίας ακριβείας, όπως το κόστος επένδυσης, η διαθεσιμότητα υποδομών, η εκπαίδευση των αγροτών και η διαθεσιμότητα δημόσιων επιδοτήσεων.

Επιπλέον, η ποιοτική ανάλυση ανέδειξε τη σημασία των συνδυαστικών τεχνολογιών, όπως η ενσωμάτωση IoT, τηλεπισκόπησης, αισθητήρων GNSS και ρομποτικής, και πώς η χρήση τους υπό διαφορετικές συνθήκες μπορεί να ενισχύσει την περιβαλλοντική απόδοση και τη βιωσιμότητα. Μέσα από αυτή την ανάλυση, εντοπίστηκαν επίσης κενά στη γνώση, όπως η περιορισμένη τεκμηρίωση για ορισμένες καλλιέργειες ή αγροτικά συστήματα, η έλλειψη δεδομένων σχετικά με την απόδοση μικρών και μεσαίων εκμεταλλεύσεων και η ανάγκη για συγκριτικές αξιολογήσεις σε διαφορετικές χώρες της Ευρώπης.

Τέλος, η ποιοτική ανάλυση αποτέλεσε τη βάση για τη διαμόρφωση ερευνητικών συμπερασμάτων, την ερμηνεία ποσοτικών αποτελεσμάτων και την εξαγωγή προτάσεων για πολιτικές, πρακτικές και μελλοντική έρευνα, συνδέοντας την τεχνολογία με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την οικονομική αποτελεσματικότητα των αγροτικών εκμεταλλεύσεων.

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

4.1 Παρουσίαση μελετών

Οι μελέτες επιβεβαιώνουν ότι η γεωργία αποτελεί σημαντικό παράγοντα των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η εργασία των Balafoutis et al. (2017) υπογραμμίζει ότι η παραδοσιακή γεωργία εστίαζε κυρίως στην αύξηση της παραγωγικότητας, αγνοώντας συχνά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι συγγραφείς προτείνουν την εφαρμογή της Βιώσιμης Γεωργίας και των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας για τη βελτιστοποίηση της χρήσης λιπασμάτων, νερού και ενέργειας, μειώνοντας τις εκπομπές και ενισχύοντας την αποδοτικότητα της παραγωγής.

Η έρευνα των Billen et al. (2024) αναλύει σενάρια πολιτικών για το 2050 στην Ευρώπη. Το σενάριο που βασίζεται στη στρατηγική F2F μειώνει κατά 40% την εξάρτηση από εισαγόμενα λιπάσματα και κατά 30% τις απώλειες αζώτου, αλλά δεν επιτυγχάνει πλήρως τους στόχους περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Αντίθετα, το αγροοικολογικό σενάριο, που περιλαμβάνει μετεγκατάσταση παραγωγής ζωοτροφών, χρήση βιολογικών αμειψισπορών και μείωση της κατανάλωσης προϊόντων ζωικής προέλευσης, περιορίζει σημαντικά τις εκπομπές αζώτου χωρίς να θυσιάζεται η παραγωγικότητα. Οι συγγραφείς τονίζουν την ανάγκη εφαρμογής πολιτικών αγροοικολογίας για τη μείωση των περιβαλλοντικών απωλειών και τη διατήρηση της παραγωγής.

Η μελέτη των Chang et al. (2021) επικεντρώνεται στα λιβάδια και δείχνει ότι οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν μετατρέψει τα διαχειριζόμενα λιβάδια από καταβόθρες άνθρακα σε πηγές αερίων θερμοκηπίου, κυρίως λόγω της αύξησης της ζωικής παραγωγής και της μετατροπής φυσικών εκτάσεων σε βοσκότοπους. Παράλληλα, η κλιματική αλλαγή αυξάνει την παραγωγικότητα των λιβαδιών, αλλά η καθαρή υπερθέρμανση παραμένει. Προτείνεται η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης για τη μείωση των εκπομπών και την ενίσχυση της αποθήκευσης άνθρακα στο έδαφος.

Η εργασία των Sanyaolu & Sadowski (2024) ανέδειξε ότι η γεωργία ακριβείας βελτιώνει την παραγωγικότητα και την κερδοφορία, κυρίως σε μεγάλες εκμεταλλεύσεις με οικονομικό μέγεθος άνω των 100.000 ευρώ. Σε μικρότερες εκμεταλλεύσεις, οι ΤΓΑ δεν είναι πάντα οικονομικά βιώσιμες χωρίς δημόσια

επιδότηση. Οι συγγραφείς προτείνουν ενίσχυση πολιτικών στήριξης και επιδοτήσεων για την προώθηση της υιοθέτησης ΤΓΑ.

Η μελέτη των Petrovic & Csambalik (2025) δείχνει ότι η δορυφορική απεικόνιση, η τηλεπισκόπηση, οι αισθητήρες υγρασίας και τα συστήματα άρδευσης ακριβείας αυξάνουν την αποδοτικότητα στη χρήση νερού, λιπασμάτων και ενέργειας. Οι συγγραφείς τονίζουν την ανάγκη προσαρμοσμένων εφαρμογών ανά χώρα για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων κλιματικών προκλήσεων και την προώθηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών.

Η εργασία των Arunachalam & Andreasson (2021) παρουσίασε το RTPP (Real-Time Plant Phenotyping), ένα εργαλείο φαινοτυπικής ανάλυσης φυτών που υποστηρίζει τον εντοπισμό και την παρακολούθηση πολλαπλών φυτών σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνοντας την ακρίβεια στην ομοιόμορφη σήμανση και την εξαγωγή οπτικών χαρακτηριστικών. Προτείνεται η ενσωμάτωση του RTPP σε προγράμματα βελτίωσης φυτών και σε εφαρμογές ακριβείας.

Η μελέτη των Berger et al. (2023) επικεντρώθηκε στη συνεργασία ασύρματων αερο- (UAS) και χερσαίων οχημάτων (UGV) για την παρακολούθηση καλλιιεργειών. Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους όρασης και AR-Tags, τα οχήματα μπορούν να προσεγγίζουν στόχους και να επιστρέφουν με ακρίβεια. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η συνεργατική αρχιτεκτονική πολλαπλών ρομπότ είναι αξιόπιστη και μπορεί να βελτιώσει την παρακολούθηση και την ακρίβεια των γεωργικών διαδικασιών.

Οι Chen et al. (2023) ανέπτυξαν μοντέλο τμηματοποίησης εικόνας βασισμένο σε νευρωνικά δίκτυα και BiLSTM για ταξινόμηση πεδίο-δρόμου πολλαπλών όψεων, χρησιμοποιώντας δεδομένα GNSS. Το μοντέλο παρέχει λεπτομερή αντιστοίχιση pixel σε πεδία, δρόμους και φόντο, βελτιώνοντας την ακρίβεια της χωρικής ανάλυσης. Προτείνεται η χρήση αυτών των τεχνικών για λεπτομερή παρακολούθηση καλλιιεργειών και αυτοματοποιημένη διαχείριση αγροτεμαχίων.

Η εργασία των Chung et al. (2022, 2018) αξιοποίησε UAV και RGB εικόνες για τον προσδιορισμό κατανομής τύπων δέντρων και εκτίμηση στρες φυτών μέσω NDVI. Η μέθοδος είναι οικονομική και γρήγορη, επιτρέποντας ακριβή παρακολούθηση φυτικής υγείας, σχεδιασμό μικτών δασών και αντιμετώπιση επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής.

Η μελέτη των Fragassa et al. (2023) χρησιμοποίησε drone images και αλγόριθμους ML για την αναγνώριση περιοχών βλάστησης και ζιζανίων σε πειραματικό χωράφι ζαχαρότευτλων, μειώνοντας τη χρήση νερού, θρεπτικών και ζιζανιοκτόνων. Η μέθοδος

ενσωματώνεται εύκολα σε συστήματα γεωργίας ακριβείας για αυτόνομη διαχείριση καλλιεργειών.

Η ανασκόπηση των Cravero & Sepúlveda (2021) υπογραμμίζει ότι τα Μεγάλα Δεδομένα και η ML έχουν μεγάλο δυναμικό στη γεωργία, αλλά απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό αρχιτεκτονικής συστημάτων. Παρά την ευκολία αποθήκευσης σε Cloud, υπάρχουν προκλήσεις στην ταχύτητα επεξεργασίας και στην οπτικοποίηση δεδομένων για τους αγρότες.

Οι μελέτες των Ahmed & Shakoor (2025) και Alfred et al. (2021) δείχνουν ότι η ενσωμάτωση IoT, ML και Big Data υποστηρίζει την έξυπνη γεωργία και τη γεωργία ακριβείας ρυθμού, βελτιώνοντας παρακολούθηση, πρόβλεψη απόδοσης, ανίχνευση ασθενειών και ταξινόμηση προϊόντων. Προτείνεται η ανάπτυξη κλιμακούμενων συστημάτων άνθρακα, αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και λύσεων blockchain για περιβαλλοντική βιωσιμότητα και ουδετερότητα άνθρακα.

Η μελέτη των Bhat & Huang (2021) εντοπίζει κοινωνικές και οικονομικές προκλήσεις στη χρήση Big Data, όπως η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων, η διαλειτουργικότητα και η εκπαίδευση χρηστών. Προτείνεται εκπαίδευση αγροτών και ανάπτυξη εργαλείων ανάλυσης προσαρμοσμένων στην πράξη.

Οι Bertoni et al. (2020) εξέτασαν αγροπεριβαλλοντικά μέτρα στη Λομβαρδία και διαπίστωσαν ότι η διαφοροποίηση καλλιεργειών, η συντήρηση λιβαδιών και η βιολογική γεωργία βελτιώνουν την περιβαλλοντική απόδοση, αν και το κόστος εφαρμογής παραμένει σημαντικό.

Οι Borrego et al. (2023) ανέλυσαν την περιβαλλοντική φορολογία στην Πορτογαλία και διαπίστωσαν ότι οι κανονισμοί δεν ευθυγραμμίζονται με τους στόχους F2F, με αποτέλεσμα περιορισμένη επίδραση στη βιωσιμότητα. Προτείνεται αναθεώρηση φορολογικών πολιτικών ώστε να υποστηρίξουν τη στρατηγική F2F.

Οι μελέτες των Erjavec & Erjavec (2015) και Fusco (2021) εστίασαν στην ΚΑΠ, αναδεικνύοντας τη σημασία του οικολογικού και παραγωγιστικού λόγου στην κατανομή πόρων. Προτείνονται στρατηγικές για ενίσχυση της περιβαλλοντικής διάστασης και καλύτερη ενοποίηση της επιστημονικής γνώσης στην πολιτική χάραξη.

Η μελέτη των Gauci et al. (2024) επικεντρώνεται στην in situ ανταλλαγή μεθανίου σε δασικές επιφάνειες ορεινών τροπικών, εύκρατων και βόρειων δασών. Τα ευρήματα δείχνουν ότι οι ξυλώδεις επιφάνειες, κυρίως περίπου 2 μέτρα πάνω από το δασικό έδαφος, μπορούν να συμβάλλουν καθοριστικά στην πρόσληψη μεθανίου, δημιουργώντας καθαρή καταβόθρα. Μέτρηση σταθερών ισοτόπων άνθρακα και

αναλύσεις πυρήνων ξύλου επιβεβαιώνουν ότι η απορρόφηση πραγματοποιείται μικροβιακά, εντός και πάνω στις ξυλώδεις επιφάνειες. Η προκαταρκτική εκτίμηση μέσω αλλομετρίας υποδεικνύει ότι τα δέντρα μπορεί να συνεισφέρουν παγκοσμίως περίπου 24,6–49,9 Tg μεθανίου. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν ότι η προστασία και η αναδάσωση δασών, ιδιαίτερα τροπικών και εύκρατων, μπορεί να έχουν μεγαλύτερο όφελος για το κλίμα από ό, τι είχε εκτιμηθεί προηγουμένως, προτείνοντας ενίσχυση των προγραμμάτων διατήρησης δασών και αναδάσωσης ως μέτρο αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής.

Η εργασία των Gebresenbet et al. (2023) προτείνει την πλήρη ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών για τη δημιουργία έξυπνων και βιώσιμων γεωργικών συστημάτων. Η πρόταση περιλαμβάνει συλλογή δεδομένων μέσω έξυπνων εργαλείων, πλατφόρμες διαχείρισης και κοινοποίησης δεδομένων, εφαρμογή τεχνητής νοημοσύνης, edge και cloud computing, Blockchain, συστήματα υποστήριξης αποφάσεων και διακυβέρνηση/ασφάλεια δεδομένων. Η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών αναμένεται να αυξήσει την αξία των δεδομένων, την παραγωγικότητα και την αποτελεσματικότητα, να βελτιώσει τη λήψη αποφάσεων και να υποστηρίξει καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα. Η μελέτη προτείνει μελλοντική έρευνα για περαιτέρω ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών, ωφελώντας ερευνητές, επαγγελματίες, προγραμματιστές έξυπνων εργαλείων και υπεύθυνους χάραξης πολιτικής.

Η μελέτη των Gobin & Uljee (2025) αξιολόγησε βιώσιμες στρατηγικές χρήσης γης στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (EGD) χρησιμοποιώντας περιορισμένο μοντέλο με κυψελοειδή αυτόματα και δεδομένα από τη Φλάνδρα. Στο σενάριο Business-as-Usual (BAU), η αστική επέκταση μείωσε τη μη καταχωρημένη γεωργική γη κατά 495 km², αυξάνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, παρά την αύξηση των χώρων πρασίνου κατά 11%. Το σενάριο Land Sharing (LSH) αύξησε τους χώρους πρασίνου κατά 36% και ενίσχυσε την ποικιλομορφία τοπίου, ενώ το Land Sparing (LSP) βελτίωσε τη συνοχή των οικοτόπων κατά 24%. Οι εκπομπές μεθανίου από κτηνοτροφία κυριάρχησαν (3,09 MtCO₂e), με τα βοοειδή υπεύθυνα για το 73%. Οι εκπομπές υποξειδίου του αζώτου μειώθηκαν σε όλα τα σενάρια και η δασική δέσμευση αντιστάθμισε έως και 34% των συνολικών εκπομπών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι χωρικές στρατηγικές που συνδυάζουν βιώσιμη γεωργία, διατήρηση φυσικών οικοτόπων και δράση για το κλίμα μπορούν να μεγιστοποιήσουν τα οφέλη της EGD, με το LSH να εμφανίζει τα μεγαλύτερα κέρδη.

Η ανασκόπηση των Guebsi et al. (2024) παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις εφαρμογές των drones στη γεωργία, εξετάζοντας μελέτες του 2020–2024. Η εργασία αναδεικνύει τις τεχνολογικές προόδους σε εναέριες πλατφόρμες, πολυφασματικούς και υπερφασματικούς αισθητήρες, καθώς και προηγμένα συστήματα πλοήγησης και επικοινωνίας. Διαχωρίζει τις εφαρμογές σε διαγνωστικές (π.χ. παρακολούθηση καλλιεργειών, πολυφασματική χαρτογράφηση) και παρεμβατικές (π.χ. ψεκασμός ακριβείας, σπορά με drones). Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και IoT επιτρέπει την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων, βελτιώνοντας την έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών, την εκτίμηση απόδοσης και τη διαχείριση άρδευσης. Οι μελέτες περιπτώσεων δείχνουν αποτελεσματικότητα των drones σε ποικίλες καλλιέργειες, ενώ επισημαίνονται εμπόδια όπως κανονιστικά ζητήματα, τεχνολογικοί περιορισμοί και οικονομικά εμπόδια. Οι συγγραφείς προτείνουν εναρμόνιση κανονισμών BVLOS, διευκόλυνση πρόσβασης για μικρούς παραγωγούς, χρήση σμηνών drones, αύξηση ενεργειακής αυτονομίας και ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, τονίζοντας τη σημασία της εκπαίδευσης των αγροτών και των κατάλληλων πολιτικών για βιώσιμη γεωργία.

Η μελέτη του Hedley (2015) χρησιμοποιεί τη Νέα Ζηλανδία ως μελέτη περίπτωσης για την ταχεία εξέλιξη του αγροτεχνολογικού τομέα. Τα ευρήματα δείχνουν ότι η γεωργία σε νεαρά και ποικίλα εδάφη προσφέρει ευκαιρίες υψηλής παραγωγικότητας, με δυνατότητα αποτελεσματικής επιστροφής επενδύσεων σε νέες τεχνολογίες. Η μελέτη υπογραμμίζει την ανάγκη για στρατηγικό προγραμματισμό και αξιολόγηση των επενδύσεων, ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγικότητα και η οικονομική βιωσιμότητα των αγροτικών περιοχών.

Η εργασία των Htun et al. (2022) παρουσιάζει έξι διαδικτυακά, οπτικά υποβοηθούμενα ΣΥΑ για γεωργικές εφαρμογές, όπως ανάλυση βιολογικής αποτελεσματικότητας, αξιολόγηση υδατικού στρες και πρόβλεψη τιμών προϊόντων. Η αξιολόγηση από ειδικούς έδειξε ότι τα ΣΥΑ είναι κατανοητά και αποδοτικά, παρότι απαιτούν μέτρια νοητική και χρονική προσπάθεια. Η δημοσίευση του πηγαίου κώδικα επιτρέπει την προσαρμογή και επαναχρησιμοποίηση τους από την γεωργική κοινότητα. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η ανάπτυξη εύχρηστων ΣΥΑ μπορεί να βελτιώσει την λήψη αποφάσεων και την παραγωγική αποτελεσματικότητα, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των γεωργικών πρακτικών.

Η μελέτη των Huang & Wang (2024) αναλύει την επίδραση των τεχνολογικών καινοτομιών στην αγροτική παραγωγικότητα και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα

στην Κίνα κατά την περίοδο 2012–2022, λαμβάνοντας υπόψη κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες. Χρησιμοποιώντας πολυεπίπεδα και δομικά μοντέλα, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τεχνολογικές καινοτομίες αυξάνουν σημαντικά την παραγωγικότητα, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη. Παράλληλα, οι βιώσιμες γεωργικές πρακτικές και οι στοχευμένες πολιτικές παρεμβάσεις είναι κρίσιμες για την αντιμετώπιση περιφερειακών ανισοτήτων. Η μελέτη καταλήγει ότι η συνεχιζόμενη ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και περιβαλλοντικών παραμέτρων είναι απαραίτητη για την επίτευξη μακροπρόθεσμης βιώσιμης γεωργικής ανάπτυξης.

Η μελέτη των Hundal et al., (2023) επικεντρώνεται στη χρήση τεχνολογιών ακριβείας στη γεωργία σειρών στην περιοχή της Ιντιάνα, με στόχο τη βελτίωση της περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας. Τα ευρήματα έδειξαν ότι παρά τις δυνατότητες που προσφέρουν τεχνολογίες όπως η άρδευση και λίπανση μεταβλητού ρυθμού, η ανάλυση δεδομένων στο cloud και η τηλεματική για πλοήγηση γεωργικών μηχανημάτων, η υιοθέτησή τους παραμένει περιορισμένη (π.χ., λίπασμα μεταβλητού ρυθμού 39%, άρδευση μεταβλητού ρυθμού 4%). Τα κύρια εμπόδια σχετίζονται με το κόστος, την κατανάλωση ενέργειας, την καθυστέρηση δεδομένων, την επεκτασιμότητα και τη διαλειτουργικότητα. Οι συγγραφείς υπογραμμίζουν την ανάγκη στρατηγικής αντιμετώπισης αυτών των εμποδίων και παρέχουν κατευθύνσεις για αγρότες, επαγγελματίες και φορείς λήψης αποφάσεων, ώστε να ενισχυθεί η εφαρμογή της ακριβούς γεωργίας βασισμένης στο IoT.

Παράλληλα, η ανασκόπηση των Kanwal et al., (2022) τονίζει τη σημασία των τεχνολογιών ακριβείας για την πρόβλεψη, παρακολούθηση και διαχείριση παρασίτων, προσφέροντας οικονομικά βιώσιμες και περιβαλλοντικά φιλικές λύσεις για τους αγρότες μακροπρόθεσμα.

Η εργασία των Jang et al., (2023) εστιάζει στη φαινοτυπική ανάλυση υψηλής απόδοσης για την ακριβή αξιολόγηση φυτικών χαρακτηριστικών σε καλλιέργειες kenaf. Η χρήση ανάλυσης εξάρτησης αποκάλυψε ετερογένεια στο πεδίο, επισημαίνοντας ότι η φαινοτυπική ανάλυση μπορεί να βελτιώσει την παρακολούθηση, τη διαχείριση και τη λήψη αποφάσεων στη γεωργία ακριβείας.

Η μελέτη των Javaid et al., (2022) παρέχει μια επισκόπηση της Γεωργίας 4.0, με έμφαση στην Έξυπνη Γεωργία. Οι τεχνολογίες αυτές, όπως οι ψηφιοποιημένοι στόλοι εξοπλισμού και η σύνδεση μέσω cloud computing, επιτρέπουν την παρακολούθηση των πεδίων, την εκτίμηση αναγκών σε εισροές και τον συντονισμό εργασιών με υψηλή αποτελεσματικότητα. Η μελέτη αναδεικνύει τη σημασία αυτών των συστημάτων για

τη βελτίωση της παραγωγικότητας και τη μείωση της πολυπλοκότητας των καθημερινών διαδικασιών.

Η έρευνα της Kautish (2023) επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω της ενσωμάτωσης blockchain. Η εισαγωγή ενός μοντέλου εμπιστοσύνης βελτιώνει τον συντονισμό, αυξάνει την αποδοτικότητα των λειτουργιών και μειώνει την υπολογιστική πολυπλοκότητα, προσφέροντας ασφαλές και αποτελεσματικό περιβάλλον για τη λειτουργία της αλυσίδας εφοδιασμού στην αγροτική παραγωγή.

Η μελέτη των Kernecker et al., (2024) αναδεικνύει τον αντίκτυπο των τεχνολογιών έξυπνης γεωργίας (SFT) στην Ευρώπη. Περίπου οι μισοί από τους 287 αγρότες που συμμετείχαν είχαν υιοθετήσει SFT, με μεγαλύτερη αποδοχή σε αροτραίες καλλιέργειες. Παρά την αναγνώριση της γενικής χρησιμότητας των SFT, οι αγρότες εκφράζουν σκεπτικισμό για την πρακτική αξία τους σε συγκεκριμένες συνθήκες. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν την ανάγκη ενσωμάτωσης των αντιλήψεων των αγροτών στις διαδικασίες καινοτομίας, τη βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ ομοτίμων και την παροχή αμερόληπτων συμβουλών, ώστε να ενισχυθεί η διάδοση των τεχνολογιών.

Η μελέτη των Khanna & Kaur (2023) επικεντρώνεται στη χρήση τεχνικών ακριβείας στην πολιτεία Παντζάμπ της Ινδίας και στον ρόλο τους στην οικονομική ενίσχυση των αγροτών. Παρά την ανάπτυξη τεχνολογιών όπως αισθητήρες, drones και GPS, η πλειονότητα των αγροτών διστάζει να τις υιοθετήσει λόγω έλλειψης επίγνωσης, οικονομικών περιορισμών και άλλων εμποδίων. Η ανάλυση 342 ερωτηματολογίων έδειξε ότι υπάρχει θετική τάση προς υιοθέτηση, αρκεί να αντιμετωπιστούν τα εμπόδια με ρεαλιστικές στρατηγικές. Οι συγγραφείς προτείνουν την παροχή στήριξης και κινήτρων για την ενίσχυση της παραγωγικότητας και της αποτελεσματικής χρήσης της γης.

Η συστηματική ανασκόπηση των Lee et al., (2021) αναδεικνύει τέσσερα χαρακτηριστικά που προωθούν την υιοθέτηση της γεωργίας ακριβείας: σχετικό πλεονέκτημα, συμβατότητα, δοκιμή (trialability) και παρατηρησιμότητα. Η έλλειψη επικοινωνίας αυτών των χαρακτηριστικών από τους φορείς αλλαγής προς τους αγρότες περιορίζει τον ρυθμό υιοθέτησης. Οι συγγραφείς προτείνουν εκπαίδευση προσωπικού πεδίου και εστίαση στην πολυπλοκότητα των τεχνολογιών για την αποτελεσματική παρακίνηση των αγροτών.

Η μελέτη των Koubaa et al., (2023) εισάγει μια υβριδική αρχιτεκτονική cloud-edge για UAV σε γεωργικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές. Το σύστημα AERO επιτρέπει την επεξεργασία AI απευθείας στα drones, αυξάνοντας την αυτονομία, την ακρίβεια και την πρακτική εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες. Τα πειράματα έδειξαν χαμηλό ποσοστό ψευδώς θετικών (0,7%), χαμηλές διακοπές παρακολούθησης (1,6%) και ταχύτητα 15,5 FPS, αποδεικνύοντας ότι η επεξεργασία στο edge μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη λειτουργικότητα των UAV στη γεωργία ακριβείας.

Παράλληλα, οι μελέτες των Guebsi et al., (2024) και Hedley (2015) υπογραμμίζουν ότι τα drones προσφέρουν ευκαιρίες για παρακολούθηση καλλιεργειών, εκτίμηση απόδοσης, διαχείριση άρδευσης και εντοπισμό ασθενειών, αλλά η ευρεία υιοθέτηση απαιτεί κανονιστική εναρμόνιση και εκπαίδευση των αγροτών.

Η έρευνα των Liu et al., (2017) συγκρίνει την τεχνολογία γεωργίας ακριβείας με παραδοσιακές μεθόδους για τη διαχείριση της όψιμης προσβολής της πατάτας. Η στρατηγική που βασίζεται στο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων BlightPro DSS αποδείχθηκε η πιο αποτελεσματική, με οικονομικά κέρδη έως 573 δολάρια ανά 0,41 εκτάριο και υψηλή προσαρμογή στον κίνδυνο. Η μελέτη αναδεικνύει ότι οι αγρότες με ουδέτερη ή χαμηλή ανοχή στον κίνδυνο επωφελούνται περισσότερο από την υιοθέτηση τεχνολογιών ακριβείας.

Στο ίδιο πλαίσιο, οι Htun et al., (2022) ανέπτυξαν διαδικτυακά ΣΥΑ για την υποστήριξη αποφάσεων στη γεωργία, που αξιολογήθηκαν θετικά από ειδικούς για τη χρηστικότητα, την αποδοχή και την εμπιστοσύνη, ενισχύοντας την πρακτική εφαρμογή και τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Η μελέτη των Lazíková et al., (2019) αξιολόγησε την ποικιλομορφία των καλλιεργειών στη Σλοβακία και τον ρόλο της ΚΑΠ. Διαπιστώθηκε ότι οι πληρωμές SAPS είχαν αρνητική επίδραση στην ποικιλομορφία, ενώ οι πληρωμές για περιοχές με φυσικούς περιορισμούς (ANC) και για την καλή μεταχείριση των ζώων είχαν θετική επίδραση. Η άρδευση, η έκταση, η ποιότητα του εδάφους και η γεωγραφική θέση επηρεάζουν επίσης την ποικιλομορφία, υπογραμμίζοντας την ανάγκη προσαρμοσμένων πολιτικών για τη διατήρηση των βιώσιμων αγροοικοσυστημάτων.

Η μελέτη των Hundal et al., (2023) συμπληρώνει την εικόνα, επισημαίνοντας ότι η οικονομική και ενεργειακή βιωσιμότητα αποτελεί κρίσιμο εμπόδιο για την υιοθέτηση τεχνολογιών ακριβείας, ενώ οι στρατηγικές υποστήριξης πρέπει να αντιμετωπίζουν το κόστος, την επεκτασιμότητα και τη διαλειτουργικότητα.

Η μελέτη των López-Santiago et al., (2024) εστιάζει στην Αλυσίδα Αξίας Οίνου (Wine Value Chain, WVC) και στις προκλήσεις βιωσιμότητας που αντιμετωπίζει ο κλάδος. Η έρευνα αναπτύσσει μια ολοκληρωμένη μέθοδο αξιολόγησης βιωσιμότητας για οινοποιεία, ενσωματώνοντας δείκτες απόδοσης σχετικούς με Συστήματα Διαχείρισης Ασφάλειας Τροφίμων (FSMS) και Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης (EMS). Τα ευρήματα δείχνουν ευρεία υιοθέτηση βέλτιστων πρακτικών, όπως HACCP (76,2%) και EMS (68,8%), ενώ υπογραμμίζουν την ανάγκη μεγαλύτερης εστίασης στη βιώσιμη διαχείριση κινδύνων. Η μελέτη προτείνει την ολιστική ενσωμάτωση πρακτικών FS και EM, με έμφαση στη συμμετοχή του προσωπικού και στη συμμόρφωση με κανονισμούς, παρέχοντας έναν πίνακα βιωσιμότητας ως πρακτικό εργαλείο για την αξιολόγηση και την προώθηση βιώσιμων στόχων στον κλάδο.

Η μελέτη των Ma et al., (2021) αξιολόγησε τη δυνατότητα ταξινόμησης ειδών δέντρων χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες Sentinel-2 στην περιοχή των βουνών Qilian. Η προσθήκη χαρακτηριστικών υψής και εδάφους βελτίωσε σημαντικά την ακρίβεια ταξινόμησης των ειδών, φτάνοντας το 90,31% για τα δέντρα. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι παράγοντες όπως υψόμετρο, κλίση και όψη επηρεάζουν τη χωρική κατανομή των ειδών. Η μεθοδολογία επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα των δορυφορικών εικόνων για την παρακολούθηση βιοποικιλότητας και την υποστήριξη της διαχείρισης δασικών πόρων. Η μελέτη των Mohr & Kühn (2021) εφαρμόζει το Μοντέλο Αποδοχής Τεχνολογίας (TAM) και τη Θεωρία Προσχεδιασμένης Συμπεριφοράς (TPB) για τη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν την αποδοχή της Τεχνητής Νοημοσύνης (TN) στη γεωργία. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο αντιληπτός έλεγχος συμπεριφοράς αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα αποδοχής, ενώ η προσωπική στάση των αγροτών ακολουθεί. Το μοντέλο εξηγεί το 59% της διακύμανσης στην αποδοχή της τεχνολογίας. Η μελέτη προτείνει στρατηγικές πολιτικής και εκπαίδευσης των αγροτών για την ενσωμάτωση των συστημάτων TN, ενισχύοντας τη χρήση νέων τεχνολογιών στη γεωργία.

Το άρθρο του Molek-Kozakowska (2024) εξετάζει κριτικά τη γλώσσα της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (EGD), αναδεικνύοντας την ιδεολογική και γλωσσική της δομή. Η ανάλυση δείχνει πώς η γλώσσα συνδέει περιβαλλοντικά και οικονομικά συμφέροντα, δημιουργώντας διαλογικές στρατηγικές που παρουσιάζουν τη βιωσιμότητα ως αρμονική ένωση μεταξύ οικολογίας και οικονομίας. Η μελέτη τονίζει την ενίσχυση της εξουσιοδότησης των θεσμικών οργάνων της ΕΕ και τη σημασία της στρατηγικής επικοινωνίας για την υλοποίηση δράσεων περιβαλλοντικής πολιτικής.

Η εργασία των Monteiro et al., (2021) παρέχει συνοπτική επισκόπηση των τεχνολογικών τάσεων στη γεωργία ακριβείας για καλλιέργειες και κτηνοτροφία. Η μελέτη λειτουργεί ως οδηγός για ερευνητές και παραγωγούς, τονίζοντας ότι η ανάπτυξη και λειτουργία των εφαρμογών απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση για τη διασφάλιση ακριβείας και εμπορικής εφαρμοσιμότητας. Η έρευνα υπογραμμίζει την ανάγκη συνδυασμού τεχνολογικής καινοτομίας, κατάλληλων πολιτικών και κατάρτισης των αγροτών για τη μεγιστοποίηση των ωφελειών από τη γεωργία ακριβείας.

Η ανασκόπηση των Onyango et al., (2021) εξέτασε 128 μελέτες σχετικά με τις πρακτικές ακριβείας στη Υποσαχάρια Αφρική (SSA). Τα ευρήματα δείχνουν ότι τεχνολογίες όπως αισθητήρες εδάφους και φυτών, δορυφορικές εικόνες, GIS και μοντέλα προσομοίωσης καλλιέργειών-εδάφους βελτιώνουν τη διαχείριση εισροών και ενισχύουν τη βιώσιμη γεωργική ανάπτυξη. Ωστόσο, η εφαρμογή παραμένει περιορισμένη, κυρίως σε μεγάλης κλίμακας εκμεταλλεύσεις της Νότιας Αφρικής, ενώ οι μικροκαλλιεργητές αντιμετωπίζουν εμπόδια στη διάχυση αυτών των τεχνολογιών. Συμπληρωματικά, η μελέτη των Pandeya et al., (2025) στο Κεντάκι των ΗΠΑ δείχνει ότι παράγοντες όπως το μέγεθος της εκμετάλλευσης και η γεωργική εμπειρία αυξάνουν την πιθανότητα υιοθέτησης τεχνολογιών ακριβείας, ενώ η ηλικία των αγροτών την περιορίζει. Άλλες δημογραφικές μεταβλητές (φύλο, εισόδημα, εκπαίδευση) δεν επηρέασαν σημαντικά. Προτείνονται πολιτικές για υποστήριξη νεότερων αγροτών, ανάπτυξη τεχνολογιών κατάλληλων για μικρές εκμεταλλεύσεις και εκπαίδευση για την προώθηση βιώσιμης γεωργίας.

Η μελέτη των Pawłowski & Sołtysiak, (2024) αξιολόγησε τις πιθανές επιπτώσεις της εφαρμογής των αρχών της EGD στην πολωνική γεωργία, με σενάρια μείωσης φυτοπροστατευτικών κατά 50% και λιπασμάτων κατά 20%. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι τα μεγάλα αγροκτήματα μπορεί να δουν μείωση της αξίας παραγωγής, ενώ τα μικρότερα αντιμετωπίζουν πιο κρίσιμες δυσκολίες. Η χρήση σύγχρονων τεχνολογιών ακριβείας και ψηφιακής γεωργίας 4.0 προτείνεται για την αντιστάθμιση των αρνητικών επιπτώσεων και τη διατήρηση της παραγωγικότητας.

Παράλληλα, η έρευνα των Prigoreanu et al., (2024) εστιάζει στην εναρμόνιση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών πολιτικών με τους στόχους της EGD και της ΚΑΠ. Η ανάλυση δείχνει ανισότητες στην εφαρμογή πολιτικών μεταξύ Ανατολικής και Δυτικής Ευρώπης, και επισημαίνει την ανάγκη συντονισμένης προσέγγισης σε επίπεδο ΕΕ για την υποστήριξη των αγροτών, τη μείωση των εκπομπών, τη βιώσιμη διαχείριση

φυσικών πόρων και τη διασφάλιση βιοποικιλότητας. Η έρευνα παρέχει συστάσεις για την ενίσχυση οικολογικών και ενεργειακά αποδοτικών πρακτικών και για μια συνεπή στρατηγική επίτευξης των στόχων της EGD έως το 2030.

Η ανασκόπηση των Quamar et al., (2023) παρουσιάζει την εξέλιξη των εφαρμογών GIS ενσωματωμένων σε drones, επισημαίνοντας τεχνικές προκλήσεις στην ανάπτυξη, διαμόρφωση και εφαρμογή. Η ενσωμάτωση drones στο GIS βελτιώνει την ακρίβεια και αποτελεσματικότητα, υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο και προσφέρει εργαλεία για ερευνητές, επιχειρηματίες και φορείς χάραξης πολιτικής.

Η μελέτη των Salvan et al., (2022) προτείνει μια μεθοδολογία επιλογής και ποσοτικοποίησης αγροπεριβαλλοντικών δεικτών σε διαφορετικές κλίμακες (καλλιέργεια – αγρόκτημα – περιοχή – περιφέρεια). Η εφαρμογή αφορά την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από αλλαγές στη χρήση γης λόγω των απαιτήσεων πρασίνου της ΚΑΠ στη Βόρεια Ιταλία. Τα αποτελέσματα δείχνουν τη δυνατότητα σύγκρισης επιπτώσεων μεταξύ καλλιεργειών, αλλά υπογραμμίζουν σημαντικά κενά γνώσης στη βιβλιογραφία.

Η ανασκόπηση των Sendros et al., (2022) διερευνά την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στον γεωργικό τομέα. Από τα 104 άρθρα που αναλύθηκαν, προέκυψε ότι η τεχνολογία επικεντρώνεται στην ακεραιότητα των αρχείων παραγωγής, την ιχνηλασιμότητα και την παρακολούθηση των βημάτων παραγωγής. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν μηχανισμούς κινήτρων, κυκλική οικονομία, πιστοποίηση προϊόντων και προστασία δεδομένων. Ο τομέας βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, με αρκετές πιλοτικές εφαρμογές.

Η μελέτη των Stefanis et al., (2024) παρουσιάζει τον αντίκτυπο της EGD στην ΕΕ, με στόχο την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. Η έρευνα δείχνει ότι η βιωσιμότητα απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικής καινοτομίας, πολιτικών μεταρρυθμίσεων και εμπειρικών μελετών για την αποτελεσματική διαχείριση πόρων και ενέργειας, καθώς και για την προώθηση της κυκλικής οικονομίας και των βιώσιμων οικονομικών πρακτικών.

Η ανασκόπηση των Tataridas et al., (2022) προσφέρει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη βιώσιμη διαχείριση ζιζανίων και καλλιεργειών στην ΕΕ. Η προσέγγιση περιλαμβάνει μη χημικές μεθόδους (ενδοκαλλιέργειες, αμειψισπορά, μειωμένο όργωμα, χρήση ωφέλιμων μικροοργανισμών, μηχανικό ξεβοτάνισμα, φυσικά ζιζανιοκτόνα) και καινοτόμες τεχνολογίες ακριβείας (UAV, συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, ρομπότ, omics, νανοτεχνολογία). Στόχος είναι η μείωση της χρήσης

χημικών, η βελτιστοποίηση των πρακτικών διαχείρισης και η ενίσχυση της αγροοικολογικής βιωσιμότητας και διατήρησης της βιοποικιλότητας.

Η μελέτη των Testi et al., (2023) επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ενός πολυχρηστικού αναλυτικού πλαισίου, ικανό να υποστηρίξει πολιτικές οικολογικής μετάβασης στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (EGD). Το πλαίσιο αυτό επιτρέπει συμμετοχικές και τοπικά προσαρμοσμένες αξιολογήσεις, ερμηνεύοντας και επικοινωνώντας τις περιβαλλοντικές, κοινωνικοοικονομικές και θεσμικές ιδιαιτερότητες των περιοχών. Τα ευρήματα υπογραμμίζουν ότι η ολοκληρωμένη πολυδιάστατη εδαφική ανάλυση συμβάλλει σημαντικά στην εμπλοκή των τοπικών διοικήσεων και των πολιτών, καθώς και στην αποτελεσματική αντιμετώπιση των προκλήσεων βιώσιμης ανάπτυξης.

Η εργασία των Zuazua Ruiz et al., (2023) διερεύνησε τον ρόλο της ΕΕ στη διεθνή περιβαλλοντική πολιτική, αξιολογώντας τον βαθμό συμμετοχής και υπευθυνότητας της στην αντιμετώπιση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προκλήσεων. Η ανάλυση καταδεικνύει ότι η ΕΕ διατηρεί ηγετική θέση στην προώθηση πολιτικών για την κλιματική αλλαγή και τη βιωσιμότητα, ενώ παράλληλα δημιουργεί ευκαιρίες για τεχνολογική καινοτομία και επιχειρηματική ανάπτυξη, με προτεινόμενες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα σε συνθήκες οικονομικής αβεβαιότητας και ενεργειακής κρίσης.

Όσον αφορά την υιοθέτηση της Ακριβούς Γεωργίας, η μελέτη των Yarashynskaya & Prus, (2022) αναγνώρισε και ανέλυσε τους παράγοντες που επηρεάζουν την εφαρμογή της σε 16 πολωνικά βοεβοδάτα. Με βάση συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας (SLR) και 21 άρθρα, οι παράγοντες κατατάχθηκαν σε πέντε ομάδες: κοινωνικοοικονομικοί, αγροτεχνολογικοί, οικονομικοί, τεχνολογικοί και πληροφοριακοί. Τα αποτελέσματα έδειξαν σαφή διάκριση «πυρήνα-περιφέρεια», με τις αναπτυγμένες μητροπολιτικές περιοχές να παρουσιάζουν υψηλό δυναμικό υιοθέτησης και τις λιγότερο ανεπτυγμένες περιφέρειες χαμηλό.

Η μελέτη των Wong et al., (2023) ανέδειξε τη σημασία της υπερφασματικής τηλεπισκόπησης υψηλής ανάλυσης για την παρακολούθηση φυτικών χαρακτηριστικών και την εκτίμηση της απόκρισης των φυτών σε συνθήκες ξηρασίας. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την ακριβή αξιολόγηση φαινοτυπικών χαρακτηριστικών, τον εντοπισμό ανθεκτικών γονότυπων και τη βελτίωση των ποικιλιών, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των καλλιεργειών απέναντι στις κλιματικές προκλήσεις.

Τέλος, η ανάλυση του Wesseler (2022) επικεντρώθηκε στις οικονομικές επιπτώσεις της στρατηγικής F2F στην ΕΕ. Η στρατηγική αναμένεται να μειώσει τη συνολική αγροτική παραγωγή και να προκαλέσει καθαρή απώλεια ευημερίας, κυρίως λόγω της μείωσης του πλεονάσματος των καταναλωτών. Παρά τα περιβαλλοντικά οφέλη που υποσχέθηκε, αυτά δεν έχουν ποσοτικοποιηθεί πλήρως. Η επιτυχία της στρατηγικής εξαρτάται από σημαντικές τεχνολογικές και θεσμικές αλλαγές, όπως η ενίσχυση της σύγχρονης βιοτεχνολογίας και η άρση κανονιστικών εμποδίων, ώστε να επιτευχθεί πραγματικό όφελος για την κοινωνία.

4.2 Συγκριτική αξιολόγηση

4.2.1 Αξιολόγηση της επίδρασης της γεωργίας ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας έχει σημαντική επίδραση στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, καθώς επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Σύμφωνα με τις μελέτες των Onyango et al. (2021) και Pandeya et al. (2025), η χρήση αισθητήρων εδάφους και φυτών, δορυφορικών εικόνων και μοντέλων προσομοίωσης καλλιεργειών-εδάφους διευκολύνει την ακριβή εφαρμογή λιπασμάτων και νερού, μειώνοντας την υπερκατανάλωση και την ρύπανση. Παράλληλα, οι Tataridas et al. (2022) επισημαίνουν ότι η χρήση μη χημικών μεθόδων για τη διαχείριση ζιζανίων μειώνει την εξάρτηση από ζιζανιοκτόνα και ενισχύει την αγροοικολογική βιωσιμότητα. Επιπλέον, η υπερφασματική τηλεπισκόπηση υψηλής ανάλυσης (Wong et al., 2023) επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό φυτικών χαρακτηριστικών και την παρακολούθηση της αντίδρασης των φυτών σε ξηρασία, συμβάλλοντας στην προστασία των οικοσυστημάτων και στην ανθεκτικότητα των καλλιεργειών.

Στην οικονομική διάσταση, η γεωργία ακριβείας αυξάνει την αποδοτικότητα των εισροών και την παραγωγικότητα των καλλιεργειών. Οι Onyango et al. (2021) και Pandeya et al. (2025) καταδεικνύουν ότι η στοχευμένη χρήση λιπασμάτων και νερού μπορεί να αυξήσει την παραγωγή χωρίς την προσθήκη περισσότερων εισροών. Οι Yarashynskaya & Prus (2022) επισημαίνουν ότι η υιοθέτηση της ΠΑ επηρεάζεται από κοινωνικοοικονομικούς και τεχνολογικούς παράγοντες, με μεγαλύτερη πιθανότητα εφαρμογής σε ανεπτυγμένες περιοχές και μεγαλύτερες εκμεταλλεύσεις. Παράλληλα, η μελέτη των Monteiro et al. (2021) αναδεικνύει την ανάγκη τεχνικής κατάρτισης και

εκπαίδευσης για τη διασφάλιση της αποτελεσματικής εφαρμογής της ΠΑ, ιδίως σε μικρότερες εκμεταλλεύσεις.

Η σύνδεση της γεωργίας ακριβείας με ευρωπαϊκές πολιτικές και στρατηγικούς στόχους είναι εμφανής μέσα από τη συμβολή της στην επίτευξη της EGD και της στρατηγικής F2F. Οι Pawłowski & Sołtysiak (2024) επισημαίνουν ότι η μείωση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων μπορεί να επηρεάσει την παραγωγή, αλλά η εφαρμογή τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας μπορεί να μετριάσει τις αρνητικές συνέπειες. Οι Testi et al. (2023) αναδεικνύουν τη σημασία ενός συμμετοχικού, τοπικά προσαρμοσμένου πλαισίου για την ενίσχυση της συμμετοχής των κοινοτήτων και την προώθηση των οικολογικών πολιτικών. Παράλληλα, οι Zuazua Ruiz et al. (2023) τονίζουν ότι η ΕΕ διατηρεί ηγετικό ρόλο στην παγκόσμια περιβαλλοντική πολιτική, δημιουργώντας ευκαιρίες για την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών γεωργίας, ενώ η ανάλυση του Wesseler (2022) υπογραμμίζει ότι η επιτυχία της F2F απαιτεί τεχνολογικές και θεσμικές αλλαγές, καθώς και αποδοχή των καταναλωτών.

Συνολικά, η γεωργία ακριβείας συμβάλλει στην ενίσχυση της βιωσιμότητας μέσω της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της βελτιστοποίησης των εισροών, ενώ παράλληλα υποστηρίζει την επίτευξη στρατηγικών ευρωπαϊκών στόχων. Η πλήρης αξιοποίηση των ωφελειών της γεωργίας ακριβείας προϋποθέτει πολιτική στήριξη, τοπική προσαρμογή, εκπαίδευση και θεσμική υποδομή, ώστε να ενισχυθεί η εφαρμογή της τόσο σε μεγάλες όσο και σε μικρές εκμεταλλεύσεις.

4.2.2 Συνεισφορά των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Η συνεισφορά των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι πολυδιάστατη και τεκμηριώνεται μέσα από πληθώρα ερευνών. Καταρχάς, η γεωργία ακριβείας επιτρέπει τη στοχευμένη εφαρμογή εισροών, όπως λιπάσματα, νερό και φυτοπροστατευτικά προϊόντα, μειώνοντας την υπερκατανάλωση και την περιβαλλοντική ρύπανση. Οι Onyango et al. (2021) και Pandeya et al. (2025) επισημαίνουν ότι η χρήση αισθητήρων εδάφους και φυτών, δορυφορικών εικόνων και μοντέλων προσομοίωσης επιτρέπει ακριβή διαχείριση των θρεπτικών συστατικών και του νερού, με αποτέλεσμα τη μείωση της ρύπανσης των υδάτων και την καλύτερη διατήρηση των φυσικών πόρων. Παράλληλα, η αξιοποίηση τηλεπισκόπησης υψηλής ανάλυσης και υπερφασματικών αισθητήρων (Wong et al., 2023) διευκολύνει την

παρακολούθηση της βλάστησης και την αξιολόγηση της αντίδρασης των φυτών σε ξηρασία, ενισχύοντας την προσαρμογή των καλλιεργειών στις κλιματικές προκλήσεις και μειώνοντας την ανάγκη για υπερβολική χρήση νερού.

Επιπλέον, η γεωργία ακριβείας συμβάλλει στη μείωση της χρήσης χημικών ουσιών μέσω ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης ζιζανίων και ασθενειών. Οι Tataridas et al. (2022) τονίζουν ότι η ενσωμάτωση μη χημικών εναλλακτικών λύσεων, όπως μειωμένο όργωμα, αμειψισπορά, διαφοροποίηση καλλιεργειών, βιολογικά ζιζανιοκτόνα και ωφέλιμοι μικροοργανισμοί, συνδυαστικά με εργαλεία ακριβείας, μειώνει την εξάρτηση από συμβατικά χημικά και υποστηρίζει τη βιοποικιλότητα. Παράλληλα, η χρήση συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων (DSS) επιτρέπει την έγκαιρη και ακριβή λήψη αποφάσεων, περιορίζοντας τις περιττές εφαρμογές φυτοφαρμάκων (Liu et al., 2017).

Τέλος, η γεωργία ακριβείας διευκολύνει την παρακολούθηση και τη διαχείριση της γης με μεγαλύτερη ακρίβεια, υποστηρίζοντας στρατηγικούς ευρωπαϊκούς στόχους για βιώσιμη γεωργία και περιβαλλοντική προστασία. Οι Pawłowski & Sołtysiak (2024) και Testi et al. (2023) αναφέρουν ότι η ενσωμάτωση τεχνολογιών ακριβείας μπορεί να μετριάσει τις επιπτώσεις που προκαλεί η μείωση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, συνδυάζοντας παραγωγική αποδοτικότητα με οικολογική βιωσιμότητα, στο πλαίσιο της EGD και της στρατηγικής F2F.

Συνολικά, η γεωργία ακριβείας μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μέσω της ακριβούς διαχείρισης εισροών, της περιορισμένης χρήσης χημικών, της βελτιωμένης παρακολούθησης των καλλιεργειών και της ενσωμάτωσης των ευρωπαϊκών πολιτικών για βιώσιμη ανάπτυξη (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας και τη συνεισφορά τους στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Τεχνολογία / Μέθοδος	Κύρια Συνεισφορά στη Μείωση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	Αναφορές
Αισθητήρες εδάφους και φυτών	Στοχευμένη εφαρμογή λιπασμάτων και νερού, μείωση ρύπανσης υδάτων, βελτιστοποίηση εισροών	Onyango et al., 2021; Pandeya et al., 2025
Δορυφορικές εικόνες & GIS	Παρακολούθηση βλάστησης, εκτίμηση υδατικού στρες, βελτίωση διαχείρισης καλλιεργειών	Onyango et al., 2021; Ma et al., 2021
Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (DSS)	Ακριβής και έγκαιρη εφαρμογή φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων, μείωση άσκοπων εφαρμογών	Liu et al., 2017
Υπερφασματική τηλεπισκόπηση	Παρακολούθηση φαινοτυπικών χαρακτηριστικών, ανίχνευση αντίδρασης φυτών σε ξηρασία, υποστήριξη επιλογής ανθεκτικών ποικιλιών	Wong et al., 2023

Μη χημικές μέθοδοι διαχείρισης ζιζανίων	Μείωση χρήσης ζιζανιοκτόνων, προστασία βιοποικιλότητας, ενίσχυση αγροοικολογικών πρακτικών	Tataridas et al., 2022
UAV / drones με GIS	Ακριβής παρακολούθηση καλλιεργειών, χαρτογράφηση σε πραγματικό χρόνο, μείωση περιττών εφαρμογών	Quamar et al., 2023
Προσαρμοσμένη διαχείριση εισροών	Μείωση χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων σύμφωνα με τις ανάγκες του εδάφους και της καλλιέργειας	Pawłowski & Sołtysiak, 2024; Testi et al., 2023

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

4.3 Αποδοτικότητα τεχνολογιών και συνδυασμών για περιβαλλοντικά οφέλη

Οι τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματικές στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, στη βελτιστοποίηση της χρήσης εισροών και στη διατήρηση της βιωσιμότητας των αγροοικοσυστημάτων. Η χρήση αισθητήρων εδάφους και φυτών σε συνδυασμό με συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) επιτρέπει την ακριβή εφαρμογή λιπασμάτων και νερού, μειώνοντας την υπερβολική χρήση εισροών και τον κίνδυνο ρύπανσης των υδάτων (Liu et al., 2017; Onyango et al., 2021). Η ενσωμάτωση UAV και drones με γεωγραφικά πληροφοριακά συστήματα (GIS) παρέχει δυνατότητα παρακολούθησης καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο και μειώνει τις περιττές εφαρμογές εισροών (Koubaa et al., 2023; Quamar et al., 2023). Επιπλέον, η υπερφασματική τηλεπισκόπηση υψηλής ανάλυσης υποστηρίζει την επιλογή ανθεκτικών ποικιλιών και τη διαχείριση άρδευσης υπό συνθήκες υδατικού στρες (Wong et al., 2023). Η εφαρμογή μη χημικών μεθόδων ζιζανιοκτόνων και βιολογικών εναλλακτικών μειώνει την εξάρτηση από χημικά προϊόντα, ενισχύει τη βιοποικιλότητα και ενσωματώνει αγροοικολογικές πρακτικές (Tataridas et al., 2022). Η χρήση δορυφορικών εικόνων σε συνδυασμό με GIS και DSS επιτρέπει τη διαχείριση των πόρων σε μεγαλύτερη κλίμακα, εξασφαλίζοντας ακρίβεια και μείωση περιβαλλοντικού κόστους (Ma et al., 2021; Pandeya et al., 2025).

Συνολικά, οι συνδυασμοί τεχνολογιών, ειδικά η ολοκληρωμένη ενσωμάτωση αισθητήρων, UAV και DSS, μεγιστοποιούν τόσο τα περιβαλλοντικά όσο και τα οικονομικά οφέλη. Οι πρακτικές αυτές μειώνουν τη χρήση χημικών και νερού χωρίς να θυσιάζουν την παραγωγικότητα και ευθυγραμμίζονται με τις ευρωπαϊκές πολιτικές για βιώσιμη γεωργία και τους στόχους της EGD (Wesseler, 2022; Prigoreanu et al.,

2024; Testi et al., 2023), ενισχύοντας την αποδοτικότητα των εισροών και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων.

Πίνακας 2: Αποδοτικότητα διαφόρων τεχνολογιών και συνδυασμών τους για περιβαλλοντικά οφέλη στη γεωργία ακριβείας

Τεχνολογία / Συνδυασμός	Κύρια Περιβαλλοντικά Οφέλη	Αποδοτικότητα / Σημαντικά Ευρήματα	Αναφορές
Αισθητήρες εδάφους + DSS	Στοχευμένη εφαρμογή λιπασμάτων & νερού, μείωση ρύπανσης και υπερβολικής χρήσης εισροών	Υψηλή αποδοτικότητα, μείωση άσκοπων εφαρμογών κατά 30–50%	Liu et al., 2017; Onyango et al., 2021
UAV / Drones + GIS	Ακριβής παρακολούθηση καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο, μείωση περιττών εισροών	Μεγάλη ακρίβεια ανίχνευσης (>90%), μείωση ψευδών εφαρμογών	Quamar et al., 2023; Koubaa et al., 2023
Υπερφασματική τηλεπισκόπηση + DSS	Παρακολούθηση φυτικών χαρακτηριστικών, διαχείριση υδατικού στρες, βελτίωση επιλογής ανθεκτικών ποικιλιών	Εξαιρετική ακρίβεια φαινοτυπικών χαρακτηριστικών (>85%), ενίσχυση ανθεκτικότητας	Wong et al., 2023
Μη χημικές μέθοδοι ζιζανίων + ακριβής διαχείριση	Μείωση χρήσης ζιζανιοκτόνων, προστασία βιοποικιλότητας, ενίσχυση αγροοικολογικών πρακτικών	Μέτρια έως υψηλή αποδοτικότητα, μείωση χημικών έως 40–60%	Tataridas et al., 2022
Δορυφορικές εικόνες + GIS + DSS	Χαρτογράφηση χρήσεων γης, βελτιστοποίηση εισροών, παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων	Υψηλή αποδοτικότητα σε μεγάλη κλίμακα, βελτίωση λήψης αποφάσεων	Ma et al., 2021; Onyango et al., 2021
Συνδυασμός αισθητήρων, UAV & DSS	Ολοκληρωμένη διαχείριση εισροών και καλλιεργειών, μείωση ρύπανσης, βελτίωση παραγωγικότητας χωρίς αύξηση εισροών	Πολύ υψηλή αποδοτικότητα, μεγιστοποίηση περιβαλλοντικών και οικονομικών οφελών	Pandeya et al., 2025; Testi et al., 2023

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Ο πίνακας 1 δείχνει ότι οι συνδυασμοί τεχνολογιών, ειδικά όταν ενσωματώνονται αισθητήρες, UAV και DSS, έχουν μεγαλύτερη περιβαλλοντική αποδοτικότητα από τη χρήση μιας μεμονωμένης τεχνολογίας.

4.4 Σύνδεση με τους στόχους της EGD και της F2F

Η γεωργία ακριβείας συνδέεται άμεσα με τους στρατηγικούς στόχους της EGD και της Στρατηγικής F2F μέσω της προώθησης βιώσιμων, αποδοτικών και περιβαλλοντικά φιλικών πρακτικών παραγωγής. Οι τεχνολογίες ακριβείας, όπως οι αισθητήρες εδάφους και φυτών, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (DSS), η υπερφασματική

τηλεπισκόπηση και η χρήση UAV/drones με GIS, επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της χρήσης λιπασμάτων, φυτοπροστατευτικών προϊόντων και νερού, μειώνοντας έτσι τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και τη ρύπανση των υδάτινων πόρων (Onyango et al., 2021; Wong et al., 2023; Quamar et al., 2023).

Η βελτιστοποίηση των εισροών και η ακριβής διαχείριση των πόρων συνδέεται με τους στόχους της F2F για τη μείωση των φυτοπροστατευτικών προϊόντων κατά 50% και των λιπασμάτων κατά 20%, ενώ ταυτόχρονα διατηρείται η παραγωγικότητα των καλλιεργειών (Pawłowski & Sołtysiak, 2024; Wesseler, 2022). Η εφαρμογή μη χημικών μεθόδων ζιζανιοκτόνων και αγροοικολογικών πρακτικών υποστηρίζει περαιτέρω την οικολογική μετάβαση των γεωργικών συστημάτων, ενισχύοντας τη βιοποικιλότητα και μειώνοντας την εξάρτηση από χημικές εισροές, σύμφωνα με τις επιδιώξεις της EGD για κλιματικά ουδέτερη και βιώσιμη γεωργία έως το 2050 (Tataridas et al., 2022; Testi et al., 2023).

Η ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών στη γεωργία επιτρέπει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων, προάγοντας τη διαφάνεια, την ιχνηλασιμότητα και την αποτελεσματική εφαρμογή πολιτικών F2F (Sendros et al., 2022; Prigoreanu et al., 2024). Παράλληλα, η χρήση δορυφορικών δεδομένων και υπερφασματικής τηλεπισκόπησης επιτρέπει την προσαρμογή των πρακτικών στις τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες, ενισχύοντας την ορθολογική διαχείριση πόρων και την ευθυγράμμιση με τις περιβαλλοντικές και ενεργειακές δεσμεύσεις της ΕΕ σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο (Zuazua Ruiz et al., 2023).

Συμπερασματικά, η γεωργία ακριβείας προσφέρει ένα τεχνολογικό εργαλείο που επιτρέπει τη συμμόρφωση με τους στόχους της EGD και της F2F, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αυξάνοντας την αποδοτικότητα εισροών και προωθώντας βιώσιμες, καινοτόμες και κοινωνικά υπεύθυνες γεωργικές πρακτικές. Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών είναι κρίσιμη για την επίτευξη μιας οικολογικά και οικονομικά βιώσιμης γεωργίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Πίνακας 3: Τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας με τους στόχους της EGD και της F2F, με έμφαση σε περιβαλλοντικά οφέλη και αποδοτικότητα εισροών

Τεχνολογία / Εργαλείο	Στόχοι EGD	Στόχοι F2F	Περιβαλλοντικά οφέλη	Αποδοτικότητα εισροών	Αναφορές
Αισθητήρες εδάφους φυτών &	Βιώσιμη διαχείριση πόρων, μείωση εκπομπών	Μείωση λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών	Μείωση ρύπανσης νερού, μείωση CO ₂	Ακριβής εφαρμογή λιπασμάτων και νερού	Onyango et al., 2021; Pandeya et al., 2025

Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (DSS)	Ορθολογική παραγωγή, μείωση περιβαλλοντικών κινδύνων	Προγραμματισμός εφαρμογών φυτοπροστασίας	Μείωση υπερβολικών εφαρμογών φυτοφαρμάκων	Βελτιστοποίηση χρόνου και ποσότητας εφαρμογής	Liu et al., 2017; Wong et al., 2023
UAV / Drones με GIS	Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, ακρίβεια δεδομένων	Ιχνηλασιμότητα και επίβλεψη καλλιεργειών	Μείωση περιβαλλοντικών επιπτώσεων από ακατάλληλες εφαρμογές	Ακριβής ανίχνευση προβλημάτων σε μικρές περιοχές	Quamar et al., 2023; Koubaa et al., 2023
Υπερφασματική τηλεπισκόπηση	Παρακολούθηση φυτικών χαρακτηριστικών, φαινοτυπική ανάλυση	Στοχευμένη διαχείριση καλλιεργειών	Βελτιστοποίηση χρήσης νερού, λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων	Παρακολούθηση απόκρισης φυτών σε πραγματικό χρόνο	Wong et al., 2023; Ma et al., 2021
Μη χημικές αγροοικολογικές πρακτικές	Προστασία βιοποικιλότητας, βιώσιμη αγροοικολογία	Μείωση ζιζανιοκτόνων και φυτοφαρμάκων	Αύξηση βιοποικιλότητας, βελτίωση εδάφους	Υποκατάσταση χημικών με βιώσιμες τεχνικές	Tataridas et al., 2022; Testi et al., 2023

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

4.5 Παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων

Οι παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων γεωργίας ακριβείας συνδέονται άμεσα με την τεχνολογία, την οικονομία, τις δεξιότητες των αγροτών, την προσαρμοστικότητα στις υφιστάμενες πρακτικές, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη συνεχή παρακολούθηση.

Αρχικά, ο τεχνολογικός παράγοντας αποτελεί βασικό στοιχείο, καθώς η ακρίβεια και η αξιοπιστία των συσκευών, όπως οι αισθητήρες εδάφους και φυτών, τα UAV και οι υπερφασματικοί αισθητήρες, επηρεάζουν άμεσα την επιτυχία των εφαρμογών ακριβείας. Υψηλής ποιότητας αισθητήρες και εξελιγμένοι αλγόριθμοι ανίχνευσης μειώνουν τα σφάλματα στην εφαρμογή εισροών και ενισχύουν την παρακολούθηση της καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο (Koubaa et al., 2023; Wong et al., 2023; Quamar et al., 2023).

Ο οικονομικός παράγοντας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα των συστημάτων, καθώς το κόστος υιοθέτησης και λειτουργίας επηρεάζει την προθυμία των αγροτών να τα εφαρμόσουν. Μεγάλες επενδύσεις μπορεί να είναι αποδοτικές μόνο σε εκμεταλλεύσεις μεγάλης κλίμακας, ενώ οι μικροκαλλιεργητές απαιτούν προσαρμοσμένες λύσεις. Η παροχή οικονομικών κινήτρων και επιδοτήσεων συμβάλλει

στην ενίσχυση της βιωσιμότητας της τεχνολογίας (Pandeya et al., 2025; Yarashynskaya & Prus, 2022).

Η κατάρτιση και οι δεξιότητες των αγροτών αποτελούν επίσης κρίσιμο παράγοντα. Η ικανότητα ανάλυσης δεδομένων, η χρήση συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων (DSS) και η κατανόηση των πληροφοριών που παρέχουν τα συστήματα ακριβείας επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα. Η επαγγελματική εκπαίδευση συμβάλλει στην ακριβέστερη εφαρμογή εισροών και στην αύξηση της απόδοσης (Lee et al., 2021; Mohr & Kühn, 2021).

Η συμβατότητα με τις υφιστάμενες γεωργικές πρακτικές είναι επίσης καθοριστική. Τα συστήματα πρέπει να ενσωματώνονται ομαλά στις τρέχουσες μεθόδους καλλιέργειας και στις υποδομές των εκμεταλλεύσεων για να επιτευχθεί μέγιστη αποτελεσματικότητα. Η ανάγκη για σημαντικές αλλαγές μπορεί να μειώσει την προθυμία υιοθέτησης (Khanna & Kaur, 2023; Lee et al., 2021).

Οι περιβαλλοντικοί και κλιματικοί παράγοντες, όπως ο τύπος εδάφους, το κλίμα, το υψόμετρο και η προσβασιμότητα, επηρεάζουν επίσης την αποτελεσματικότητα. Τα συστήματα γεωργίας ακριβείας πρέπει να προσαρμόζονται στις τοπικές συνθήκες για να μεγιστοποιείται η αποδοτικότητα και η περιβαλλοντική απόδοση (Ma et al., 2021; Lazíková et al., 2019).

Τέλος, η συστηματική παρακολούθηση και αξιολόγηση αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για τη διατήρηση της αποδοτικότητας. Η συνεχής συλλογή δεδομένων και η προσαρμογή των στρατηγικών διαχείρισης μέσω DSS, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση των στόχων της EGD και της F2F, ενισχύουν τη βιωσιμότητα και τα περιβαλλοντικά οφέλη της γεωργίας ακριβείας (Testi et al., 2023; Salvan et al., 2022).

Πίνακας 4: Παράγοντες που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα των συστημάτων γεωργίας ακριβείας, με σύνδεση στην αποδοτικότητα, τα περιβαλλοντικά οφέλη και τους στόχους της EGD/F2F

Παράγοντας	Επίδραση στην Αποδοτικότητα	Συνεισφορά σε Περιβαλλοντικά Οφέλη	Σύνδεση με EGD / F2F	Αναφορές
Τεχνολογία (αισθητήρες, UAV, υπερφασματικοί αισθητήρες, DSS)	Ακριβής εφαρμογή εισροών, μείωση σφαλμάτων	Μείωση υπερβολικής χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, βελτιστοποίηση νερού	Υποστηρίζει στόχους βιώσιμης γεωργίας, ακριβείας εισροών, μείωσης εκπομπών	Liu et al., 2017; Koubaa et al., 2023; Wong et al., 2023

Οικονομικοί παράγοντες (κόστος, επιδοτήσεις, κλίμακα εκμετάλλευσης)	Αύξηση πιθανότητας υιοθέτησης και συνέπειας στη χρήση	Επιτρέπει βιώσιμη χρήση πόρων χωρίς οικονομική υπερφόρτωση	Συμβαδίζει με πολιτικές στήριξης μικροκαλλιεργητών και ενεργειακά αποδοτικών πρακτικών	Pandeya et al., 2025; Pawłowski & Sołtysiak, 2024
Δεξιότητες Εκπαίδευση αγροτών	Βελτιώνει την ανάλυση δεδομένων και τη λήψη αποφάσεων	Βελτιώνει την ακρίβεια εφαρμογής, μειώνοντας απώλειες και περιβαλλοντικό αποτύπωμα	Προωθεί την ενημέρωση και συμμετοχή στις στρατηγικές EGD/F2F	Khanna & Kaur, 2023; Mohr & Kühn, 2021; Lee et al., 2021
Συμβατότητα με υφιστάμενες πρακτικές	Ομαλή ενσωμάτωση, ελαχιστοποίηση διαταραχών	Επιτρέπει ορθολογική χρήση εισροών χωρίς πρόσθετο περιβαλλοντικό κόστος	Βελτιώνει την εφαρμογή στρατηγικών βιώσιμης γεωργίας	Onyango et al., 2021; Testi et al., 2023
Περιβαλλοντικοί / Κλιματικοί παράγοντες (έδαφος, κλίμα, υψόμετρο)	Προσαρμογή στρατηγικών διαχείρισης στις τοπικές συνθήκες	Μέγιστη αποδοτικότητα και ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικών κινδύνων	Υποστηρίζει προσαρμοστική και ανθεκτική γεωργία σύμφωνα με EGD/F2F	Ma et al., 2021; Lazíková et al., 2019; Wan et al., 2024
Συστηματική παρακολούθηση & αξιολόγηση	Δυνατότητα συνεχιζόμενης βελτίωσης και προσαρμογής στρατηγικών	Μειώνει σπατάλη πόρων και ενισχύει τη βιώσιμη χρήση	Ενσωμάτωση δεικτών βιωσιμότητας και παρακολούθηση επίτευξης στόχων EGD/F2F	Salvan et al., 2022; Testi et al., 2023; Stefanis et al., 2024

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

4.6 Εμπόδια υιοθέτησης και προϋποθέσεις κλιμάκωσης

Η υιοθέτηση των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας αντιμετωπίζει ποικίλα εμπόδια, τα οποία διαφέρουν ανάλογα με το γεωργικό περιβάλλον και το επίπεδο ανάπτυξης των αγροτικών εκμεταλλεύσεων. Σύμφωνα με τους Khanna & Kaur (2023), η έλλειψη επίγνωσης και η περιορισμένη εκπαίδευση των αγροτών συνιστούν βασικό εμπόδιο στην Ινδία, όπου παρά την τεχνολογική διαθεσιμότητα, η χρήση προηγμένων εργαλείων όπως drones και αισθητήρες παραμένει περιορισμένη. Παρόμοια, οι Pandeya et al. (2025) επισημαίνουν ότι στην Υποσαχάρια Αφρική και σε μικροκαλλιέργειες στις ΗΠΑ, η ηλικία, η εμπειρία και το μέγεθος των εκμεταλλεύσεων επηρεάζουν σημαντικά την πιθανότητα υιοθέτησης. Οικονομικοί περιορισμοί, όπως υψηλό αρχικό κόστος και περιορισμένη πρόσβαση σε χρηματοδότηση, αναδεικνύονται επίσης ως κύρια εμπόδια (Wessler, 2022; Pawłowski & Sołtysiak, 2024).

Επιπλέον, η τεχνική πολυπλοκότητα των συστημάτων γεωργίας ακριβείας και η έλλειψη συμβατότητας με υπάρχουσες πρακτικές δυσχεραίνουν την ευρεία εφαρμογή τους (Lee et al., 2021; Mohr & Kühn, 2021). Ο περιορισμένος χρόνος και η ανάγκη συνεχούς συντήρησης των συστημάτων, καθώς και οι ανισότητες στην πρόσβαση σε ψηφιακά εργαλεία και δεδομένα, επισημαίνονται ως εμπόδια που μειώνουν τη βελτιστοποίηση των εισροών και την περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα (Onyango et al., 2021; Wan et al., 2024).

Για την κλιμάκωση και ευρεία υιοθέτηση των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας απαιτούνται ορισμένες προϋποθέσεις. Αρχικά, η εκπαίδευση και η κατάρτιση των αγροτών είναι κρίσιμη, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν τα συστήματα με αποτελεσματικότητα και ακρίβεια (Khanna & Kaur, 2023; Mohr & Kühn, 2021). Δεύτερον, η οικονομική υποστήριξη μέσω επιδοτήσεων, προγραμμάτων χρηματοδότησης ή κινήτρων ενίσχυσης της βιωσιμότητας μπορεί να μειώσει τα αρχικά κόστη και να ενθαρρύνει τη χρήση τεχνολογιών ακριβείας (Pandeya et al., 2025; Pawłowski & Sołtysiak, 2024). Τρίτον, η ενσωμάτωση των τεχνολογιών σε υφιστάμενα συστήματα και πρακτικές γεωργίας, καθώς και η ανάπτυξη προσαρμοσμένων εργαλείων για μικρές ή μεσαίες εκμεταλλεύσεις, διευκολύνουν την ομαλή κλιμάκωση (Yarashynskaya & Prus, 2022; Testi et al., 2023). Τέλος, η υποστήριξη με δεδομένα, αναλύσεις και συστήματα λήψης αποφάσεων, καθώς και η παρακολούθηση δεικτών βιωσιμότητας, είναι απαραίτητες για τη διαρκή βελτίωση των αποτελεσμάτων και τη διασφάλιση των περιβαλλοντικών οφελών (Salvan et al., 2022; Stefanis et al., 2024).

Συνολικά, η επιτυχής κλιμάκωση της γεωργίας ακριβείας συνδέεται άμεσα με την αντιμετώπιση των κοινωνικοοικονομικών, τεχνικών και περιβαλλοντικών προκλήσεων, ενώ η ενσωμάτωση αυτών των προϋποθέσεων ενισχύει την αποτελεσματικότητα των εισροών, τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ευθυγράμμιση με τους στόχους της EGD και της F2F.

Πίνακας 5: Εμπόδια υιοθέτησης των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας

Κατηγορία	Περιγραφή	Παραδείγματα/Σημεία	Πηγές
Οικονομικά εμπόδια	Υψηλό αρχικό κόστος, περιορισμένη πρόσβαση σε χρηματοδότηση, έλλειψη κινήτρων	Μικρές και μεσαίες εκμεταλλεύσεις συχνά αδυνατούν να επενδύσουν σε drones, αισθητήρες, λογισμικό	Wessler (2022); Pandeya et al. (2025); Pawłowski & Sołtysiak (2024)

Τεχνική πολυπλοκότητα	Πολύπλοκα συστήματα, δυσκολία ενσωμάτωσης σε υπάρχουσες πρακτικές	Συστήματα GPS, UAV, IoT και ανάλυσης δεδομένων που απαιτούν εξειδίκευση	Lee et al. (2021); Mohr & Kühl (2021)
Κοινωνικο-δημογραφικοί παράγοντες	Ηλικία, εμπειρία, μέγεθος εκμετάλλευσης	Ηλικιωμένοι αγρότες και μικρές εκμεταλλεύσεις δείχνουν χαμηλή υιοθέτηση	Pandeya et al. (2025); Onyango et al. (2021)
Έλλειψη γνώσης/κατάρτισης	Περιορισμένη εκπαίδευση για χρήση τεχνολογιών και αξιολόγηση δεδομένων	Ανεπαρκής γνώση για παρακολούθηση θρεπτικών στοιχείων και νερού	Khanna & Kaur (2023); Mohr & Kühl (2021)
Περιορισμένη πρόσβαση σε δεδομένα	Μη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δορυφορικών ή υπερφασματικών δεδομένων	Δυσκολία ακριβούς παρακολούθησης και προσαρμογής εισροών	Wan et al. (2024); Wong et al. (2023)
Υποδομές & συμβατότητα	Ασυμβατότητα με υπάρχουσες μηχανές ή διαδικασίες	Ανάγκη προσαρμογής λογισμικού και εξοπλισμού	Yarashynskaya & Prus (2022); Testi et al. (2023)

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Πίνακας 6: Προϋποθέσεις κλιμάκωσης των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας

Κατηγορία	Προϋποθέσεις κλιμάκωσης	Παραδείγματα/Σημεία	Πηγές
Εκπαίδευση & κατάρτιση	Ενίσχυση δεξιοτήτων αγροτών για χρήση τεχνολογιών ακριβείας	Εκπαίδευση σε drones, αισθητήρες, GIS, ανάλυση δεδομένων	Khanna & Kaur (2023); Mohr & Kühl (2021)
Οικονομική υποστήριξη	Επιδότησεις, προγράμματα χρηματοδότησης, κίνητρα βιωσιμότητας	Μείωση αρχικών επενδυτικών εμποδίων	Pandeya et al. (2025); Pawłowski & Sołtysiak (2024)
Προσαρμογή ενσωμάτωση	Συστήματα κατάλληλα για μικρές/μεσαίες εκμεταλλεύσεις, συμβατά με υπάρχουσες πρακτικές	Υιοθέτηση ειδικών εργαλείων για διαφορετικά μεγέθη αγροκτημάτων	Yarashynskaya & Prus (2022); Testi et al. (2023)
Υποστήριξη δεδομένων & λήψη αποφάσεων	Παροχή αξιόπιστων δεδομένων, δεικτών βιωσιμότητας, προγνωστικών εργαλείων	Χρήση δορυφορικών, υπερφασματικών δεδομένων, συστημάτων DSS	Salvan et al. (2022); Stefanis et al. (2024)
Πολιτικές στρατηγική υποστήριξη	Ευθυγράμμιση με EGD, F2F, περιβαλλοντικές πολιτικές	Καθοδήγηση πολιτικών για βιώσιμη χρήση εισροών και περιβαλλοντική προστασία	Wessler (2022); Testi et al. (2023)

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

4.7 Αξιοποίηση δεδομένων για βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας

Η χρήση δεδομένων αποτελεί κεντρικό στοιχείο για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας στη γεωργία ακριβείας. Μέσω δορυφορικών εικόνων, αισθητήρων

εδάφους και φυτών, καθώς και συστημάτων GIS, οι αγρότες μπορούν να παρακολουθούν την κατάσταση των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο και να λαμβάνουν αποφάσεις βασισμένες σε ακριβή δεδομένα. Αυτό επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της χρήσης εισροών, όπως νερό, λιπάσματα και φυτοπροστατευτικά, μειώνοντας την περιβαλλοντική επιβάρυνση και ταυτόχρονα αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα της παραγωγής (Onyango et al., 2021; Wong et al., 2023).

Η υπερφασματική τηλεπισκόπηση και οι σύγχρονοι υπερφασματικοί αισθητήρες παρέχουν λεπτομερή φασματικά δεδομένα που υποστηρίζουν τον φαινοτυπικό εντοπισμό φυτών υπό συνθήκες υδατικού στρες. Η αξιοποίηση αυτών των δεδομένων επιτρέπει την έγκαιρη προσαρμογή των πρακτικών άρδευσης και θρέψης, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως η υπερλίπανση και η λειψυδρία (Wong et al., 2023; Wan et al., 2024). Παράλληλα, τα δεδομένα συμβάλλουν στη δημιουργία δεικτών βιωσιμότητας και στην παρακολούθηση της συμμόρφωσης με περιβαλλοντικούς στόχους, διευκολύνοντας την εφαρμογή των στρατηγικών της EGD και της στρατηγικής F2F (Testi et al., 2023; Wesseler, 2022).

Η ενσωμάτωση των δεδομένων σε εργαλεία υποστήριξης DSS και μοντέλα προσομοίωσης χρήσης εισροών επιτρέπει την ανάπτυξη στοχευμένων στρατηγικών διαχείρισης ανά τοποθεσία (site-specific management). Αυτό μειώνει την περιβαλλοντική επιβάρυνση, ενισχύει τη βιωσιμότητα και υποστηρίζει την πρόληψη κινδύνων, όπως η ρύπανση υδάτων ή η υποβάθμιση του εδάφους (Salvan et al., 2022; Quamar et al., 2023). Τέλος, η συλλογή και ανάλυση μεγάλων δεδομένων (Big Data) σε συνδυασμό με τεχνολογίες AI και μηχανικής μάθησης ενισχύει την ικανότητα πρόβλεψης και βελτιστοποίησης των περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων σε διαφορετικές κλιματικές και εδαφικές συνθήκες (Mohr & Kühn, 2021; Stefanis et al., 2024).

Πίνακας 7: Κύρια εργαλεία και τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας για την αξιοποίηση δεδομένων και τη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας

Τεχνολογία / Εργαλείο	Τύπος Δεδομένων	Περιβαλλοντικά Οφέλη	Πηγές
Δορυφορικές εικόνες (Sentinel-2, UAV)	Φασματικά χαρακτηριστικά, εικόνες υψηλής ανάλυσης	Παρακολούθηση βλάστησης, έγκαιρη ανίχνευση στρες, βελτιστοποίηση άρδευσης	Ma et al., 2021; Wong et al., 2023
Αισθητήρες εδάφους και φυτών	Θρεπτικά συστατικά, υγρασία εδάφους, κατάσταση φυτών	Μείωση υπερλίπανσης, ορθολογική χρήση νερού,	Onyango et al., 2021; Pandeya et al., 2025

		μείωση περιβαλλοντικής ρύπανσης	
GIS και συστήματα DSS	Χωρικά δεδομένα, ιστορικά και πραγματικά δεδομένα	Βελτιστοποίηση εισροών, πρόληψη κινδύνων, υποστήριξη αποφάσεων σε επίπεδο αγρού	Quamar et al., 2023; Salvan et al., 2022
Υπερφασματική τηλεπισκόπηση	Φασματική ανάλυση φυτών και γονότυπων	Ακριβής αξιολόγηση φυτικού στρες, βελτιστοποίηση φαινοτυπικής επιλογής	Wong et al., 2023
Big Data & AI	Συλλογή δεδομένων πολλαπλών πηγών	Πρόβλεψη και βελτιστοποίηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, εξατομίκευση στρατηγικών	Stefanis et al., 2024; Mohr & Köhl, 2021
Προσομοιώσεις και μοντέλα διαχείρισης εισροών	Ιστορικά δεδομένα, κλιματικά δεδομένα, δεδομένα εδάφους	Μείωση χρήσης λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών, αειφορική διαχείριση καλλιεργειών	Wan et al., 2024; Liu et al., 2017

Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Κεφάλαιο 5: Συζήτηση

Η παρούσα ανάλυση καταδεικνύει ότι η γεωργία ακριβείας συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας μέσω της ορθολογικής διαχείρισης των εισροών και της βελτιστοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας. Οι τεχνολογίες που περιλαμβάνουν αισθητήρες εδάφους και φυτών, δορυφορικές εικόνες, GIS, και μοντέλα προσομοίωσης καλλιεργειών-εδάφους, όπως αναφέρουν οι Onyango et al. (2021) και Ma et al. (2021), επιτρέπουν στοχευμένη εφαρμογή λιπασμάτων, φυτοπροστατευτικών προϊόντων και νερού, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αυξάνοντας την αποδοτικότητα των πόρων. Παράλληλα, η χρήση υπερφασματικής τηλεπισκόπησης και UAVs για παρακολούθηση της βλάστησης σε πραγματικό χρόνο, όπως επισημαίνουν οι Wong et al. (2023) και Quamar et al. (2023), ενισχύει την ακρίβεια στη λήψη αποφάσεων και συμβάλλει στην προσαρμογή των καλλιεργητικών πρακτικών στις συνθήκες υδατικού στρες ή σε άλλες περιβαλλοντικές πιέσεις.

Η βιβλιογραφία δείχνει ότι οι τεχνολογίες ακριβείας εφαρμόζονται κυρίως σε μεγάλες εμπορικές εκμεταλλεύσεις, με περιορισμένη ενσωμάτωση στις μικροκαλλιέργειες της SSA, εκτός από τη Νότια Αφρική (Onyango et al., 2021). Τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης δείχνουν ότι, με κατάλληλη εκπαίδευση και πρόσβαση σε οικονομικούς πόρους, οι μικροκαλλιεργητές μπορούν επίσης να επωφεληθούν σημαντικά από αυτές τις τεχνολογίες. Η μελέτη των Pandeya et al. (2025) υπογραμμίζει ότι παράγοντες όπως το μέγεθος της εκμετάλλευσης και η γεωργική εμπειρία επηρεάζουν την υιοθέτηση, ενώ η ηλικία και η αντίληψη για την τεχνολογία μπορεί να λειτουργήσουν ως εμπόδια. Αυτά τα ευρήματα συμφωνούν με τις διαπιστώσεις των Yarashynskaya & Prus (2022) για την κατάταξη περιοχών με βάση το δυναμικό υιοθέτησης της ακριβείας, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη «πυρήνα-περιφέρειας» όπου οι πιο ανεπτυγμένες περιοχές υιοθετούν τις τεχνολογίες πιο γρήγορα.

Στο επίπεδο της περιβαλλοντικής επίδρασης, η ανάλυση επιβεβαιώνει τις τάσεις που επισημαίνουν οι Salvan et al. (2022) και Tataridas et al. (2022), σύμφωνα με τις οποίες η υιοθέτηση γεωργικών πρακτικών υψηλής ακρίβειας μειώνει τη χρήση χημικών και ενισχύει την αγροοικολογική διαχείριση, όπως η αμειψισπορά, η χρήση καλλιεργειών κάλυψης και η βιολογική προστασία ζιζανίων. Παράλληλα, η εργασία των Testi et al. (2023) υπογραμμίζει τη σημασία της συμμετοχικής και τοπικά προσαρμοσμένης

προσέγγισης για την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης, κάτι που ενισχύει την ολιστική εφαρμογή των τεχνολογιών ακριβείας σε διάφορες κλίμακες.

Η σύνδεση με την EGD και τη στρατηγική F2F είναι εμφανής. Οι στόχοι της EGD για μείωση των φυτοπροστατευτικών προϊόντων κατά 50% και των λιπασμάτων κατά 20% έως το 2030 (Pawłowski & Sołtysiak, 2024) μπορούν να επιτευχθούν σε μεγάλο βαθμό με την ενσωμάτωση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας, οι οποίες μεγιστοποιούν την αποτελεσματικότητα των εισροών και ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές απώλειες. Ταυτόχρονα, η στρατηγική F2F προβλέπει περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη, τα οποία, όπως αναφέρει ο Wessler (2022), απαιτούν τεχνολογικές και θεσμικές αλλαγές για να εξισορροπήσουν τις πιθανές απώλειες παραγωγής. Η εφαρμογή των τεχνολογιών ακριβείας υποστηρίζει αυτή την ισορροπία, συνδέοντας τις πολιτικές προτεραιότητες με πρακτικά εργαλεία για βιώσιμη παραγωγή.

Ωστόσο, η βιβλιογραφία δείχνει ότι παραμένουν εμπόδια. Οι Onyango et al. (2021) και Pandeya et al. (2025) αναφέρουν περιορισμένη πρόσβαση σε χρηματοδότηση, έλλειψη κατάρτισης και υποδομών, καθώς και τεχνολογικές προκλήσεις για μικρές εκμεταλλεύσεις. Η αντιμετώπιση αυτών των εμποδίων μέσω πολιτικών υποστήριξης, εκπαίδευσης και ανάπτυξης κατάλληλων τεχνολογιών αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την κλιμάκωση των οφελών της γεωργίας ακριβείας. Επιπλέον, η ενσωμάτωση συστημάτων παρακολούθησης και διαχείρισης δεδομένων (data-driven agriculture), όπως περιγράφουν οι Sendros et al. (2022) και Quamar et al. (2023), συμβάλλει στη συνεχή βελτίωση των πρακτικών και στην επίτευξη υψηλότερων επιπέδων περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Συνολικά, η ανάλυση δείχνει ότι η γεωργία ακριβείας δεν αποτελεί μόνο τεχνολογικό εργαλείο, αλλά και στρατηγικό μέσο για την επίτευξη των στόχων της EGD και της F2F, συνδυάζοντας περιβαλλοντικά, κοινωνικοοικονομικά και θεσμικά οφέλη. Οι τεχνολογίες αυτές συμβάλλουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, την αποτελεσματική χρήση εισροών και την προσαρμογή των πολιτικών σε κλίμακα αγροτικής εκμετάλλευσης, επιβεβαιώνοντας την αναγκαιότητα πολυδιάστατης, ολιστικής προσέγγισης.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η ανάλυση των ερευνητικών μελετών υπογραμμίζει τη σημαντική συμβολή της γεωργίας ακριβείας στη βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων, τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Οι τεχνολογίες ακριβείας, όπως αισθητήρες εδάφους και φυτών, δορυφορικές εικόνες, GIS, UAVs και υπερφασματική τηλεπισκόπηση, επιτρέπουν την ορθολογική διαχείριση των εισροών και την προσαρμογή των πρακτικών στις περιβαλλοντικές συνθήκες, μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων, την υπερβολική χρήση λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων.

Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων γεωργίας ακριβείας εξαρτάται από παράγοντες όπως το μέγεθος και η εμπειρία της εκμετάλλευσης, η πρόσβαση σε κατάλληλες τεχνολογίες, η εκπαίδευση των αγροτών και η υποδομή υποστήριξης. Οι περιορισμοί στην υιοθέτηση, ειδικά για μικροκαλλιεργητές και λιγότερο ανεπτυγμένες περιοχές, απαιτούν πολιτικές ενίσχυσης, πρόσβαση σε χρηματοδότηση και κατάρτιση, καθώς και ανάπτυξη τεχνολογιών κατάλληλων για μικρές εκμεταλλεύσεις.

Συνεπώς, η γεωργία ακριβείας εμφανίζεται ως κρίσιμο εργαλείο για την επίτευξη των στόχων της EGD και της στρατηγικής F2F, προωθώντας τη μείωση της χρήσης φυτοπροστατευτικών προϊόντων και λιπασμάτων, τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και την αύξηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας. Η χρήση συστημάτων διαχείρισης δεδομένων και ψηφιακών εργαλείων επιτρέπει την παρακολούθηση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την προσαρμογή των πολιτικών και των πρακτικών στις τοπικές συνθήκες.

Επιπλέον, η γεωργία ακριβείας υποστηρίζει τη βιώσιμη ανάπτυξη με ολιστικό τρόπο, συνδέοντας περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικοοικονομικά οφέλη, ενώ η ενσωμάτωσή της σε εθνικά και ευρωπαϊκά πλαίσια πολιτικής ενισχύει την κλιμάκωση των αποτελεσμάτων σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η επιτυχία της στρατηγικής εξαρτάται από τη συνεργασία μεταξύ τεχνολογικής καινοτομίας, πολιτικών κινήτρων και συμμετοχής των αγροτών, δημιουργώντας ένα πλαίσιο όπου η γεωργία ακριβείας μπορεί να λειτουργήσει ως μοχλός βιώσιμης παραγωγής.

Συμπερασματικά, η γεωργία ακριβείας αποτελεί ουσιαστικό εργαλείο για την επίτευξη περιβαλλοντικής, οικονομικής και κοινωνικής βιωσιμότητας στον αγροτικό τομέα, ενώ

η ενσωμάτωσή της στις πολιτικές EGD και F2F ενισχύει την ικανότητα των αγροτικών συστημάτων να ανταποκριθούν στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και των απαιτήσεων για βιώσιμη παραγωγή τροφίμων.

Η ενίσχυση της εκπαίδευσης και της κατάρτισης των αγροτών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ευρύτερη υιοθέτηση της γεωργίας ακριβείας. Η ανάπτυξη εκπαιδευτικών προγραμμάτων και σεμιναρίων για μικροκαλλιεργητές και μεσαίες εκμεταλλεύσεις μπορεί να βελτιώσει τις δεξιότητες στη χρήση τεχνολογιών όπως αισθητήρες, GIS, UAV και συστήματα διαχείρισης δεδομένων, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα της παραγωγής.

Η δημιουργία πολιτικών και οικονομικών κινήτρων, όπως επιδοτήσεις, φορολογικές ελαφρύνσεις ή χρηματοδοτικά εργαλεία, μπορεί να μειώσει τα εμπόδια υιοθέτησης, ειδικά για μικρές ή λιγότερο ανεπτυγμένες περιοχές. Αυτό θα διευκολύνει την κλιμάκωση και την αποτελεσματική εφαρμογή των συστημάτων γεωργίας ακριβείας. Η ανάπτυξη τεχνολογιών προσαρμοσμένων στις ανάγκες μικρών και τοπικών εκμεταλλεύσεων, με χαμηλότερο κόστος και απλοποιημένη διαχείριση, μπορεί να αυξήσει την υιοθέτηση και να ενισχύσει την αποδοτικότητα των εισροών. Τέτοιες λύσεις προσαρμοσμένες σε διαφορετικά μεγέθη και τύπους καλλιεργειών φαίνεται ότι έχουν μεγαλύτερη δυνατότητα διάχυσης στην πράξη.

Η ολιστική διαχείριση δεδομένων αποτελεί επίσης σημαντική προτεραιότητα. Η ενσωμάτωση γεωχωρικών, περιβαλλοντικών και παραγωγικών δεδομένων σε πλατφόρμες υποστήριξης αποφάσεων επιτρέπει την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την προσαρμογή των πρακτικών σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα.

Η σύνδεση των πρακτικών γεωργίας ακριβείας με τους ευρωπαϊκούς στρατηγικούς στόχους, όπως η EGD και η F2F, είναι απαραίτητη για την επίτευξη μείωσης της χρήσης λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών, την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την προώθηση της κυκλικής οικονομίας. Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών αυτών σε ευρωπαϊκές πολιτικές θα ενισχύσει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της γεωργίας.

Τέλος, η υποστήριξη της έρευνας και της καινοτομίας είναι απαραίτητη για την περαιτέρω ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών, όπως ρομποτική, υπερφασματικοί αισθητήρες, UAV και συστήματα τεχνητής νοημοσύνης. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να βελτιώσουν την παρακολούθηση της βλάστησης, τη διαχείριση των

εισροών και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, προσαρμόζοντας τη γεωργία στις σύγχρονες προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής.

Βιβλιογραφία

- Aasim, M, Katirci, R, Baloch, FS, Mustafa, Z, Bakhsh, A, Nadeem, MA, Ali, SA, Hatipoglu, R, Çiftçi, V, Habyarimana, E et al. 2022, ‘Innovation in the Breeding of Common Bean Through a Combined Approach of in vitro Regeneration and Machine Learning Algorithms’, *Front. Genet.* vol. 13, 897696, pp. 1-13.
- Abiri, R, Rizan, N, Balasundram, SK, Shahbazi, AB, Abdul-Hamid, H. 2023, ‘Application of Digital Technologies for Ensuring Agricultural Productivity’, *Heliyon*, vol. 9, e22601, pp. 1-21.
- Abobatta, WF. 2021, ‘Precision Agriculture’, Academic Press: Cambridge, MA, USA, pp. 23–45.
- Ahmed, & Shakoor. 2025, ‘Advancing Agriculture Through IoT, Big Data, and AI: A Review of Smart Technologies Enabling Sustainability’, *Smart Agricultural Technology*, vol. 10, 100848, pp. 1-19.
- Alfred, R, Obit, JH, Chin, CP-Y, Haviluddin, H, Lim, Y. 2021, ‘Towards Paddy Rice Smart Farming: A Review on Big Data, Machine Learning, and Rice Production Tasks’, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 50358–50380.
- Alons, G. 2017, ‘Environmental Policy Integration in the EU’s Common Agricultural Policy: Greening or Greenwashing?’, *J. Eur. Public Policy*, vol. 24, pp. 1604–1622.
- Amin-Chaudhry, A, Young, S, Afshari, L. 2022, ‘Sustainability Motivations and Challenges in the Australian Agribusiness’, *J. Clean Prod.*, vol. 361, 132229, pp. 1-10.
- Anbarasan, M, Muthu, B, Sivaparthipan, CB, Sundarasekar, R, Kadry, S, Krishnamoorthy, S, Daseel, AA. 2020, ‘Detection of Flood Disaster System Based on IoT, Big Data and Convolutional Deep Neural Network’, *Comput. Commun.*, vol. 150, pp. 150–157.
- Araus, JL, Cairns, JE. 2014, ‘Field High-Throughput Phenotyping: The New Crop Breeding Frontier’, *Trends Plant Sci.*, vol. 19, pp. 52–61.
- Arunachalam, A, Andreasson, H. 2021, ‘Real-Time Plant Phenomics Under Robotic Farming Setup: A Vision-Based Platform for Complex Plant Phenotyping Tasks’, *Comput. Electr. Eng.*, vol. 92, 107098, pp. 1-5.

- Ataseven, Y. 2023, 'Evaluation of the Possible Effects of the European Green Deal Process on Agricultural Policies in Türkiye', *Journal of Agricultural Sciences (Tarim Bilimleri Dergisi)*, vol. 29, no. 1, pp. 13–25.
- Balafoutis, A, Beck, B, Fountas, S, Vangeyte, J, van der Wal, T, Soto, I, Gómez-Barbero, M, Barnes, A, Eory, V. 2017, 'Precision Agriculture Technologies Positively Contributing to GHG Emissions Mitigation, Farm Productivity and Economics', *Sustainability*, vol. 9, 1339, pp. 1–28.
- Barth, H, Ulvenblad, P, Ulvenblad, P. 2017, 'Towards a Conceptual Framework of Sustainable Business Model Innovation in the Agri-Food Sector: A Systematic Literature Review', *Sustainability*, vol. 9, 1620.
- Bazzani, C, Canavari, M. 2013, 'Alternative Agri-Food Networks and Short Food Supply Chains: A Review of the Literature', *Econ. Agro-Aliment.*, vol. 15, pp. 11–13.
- Berger, GS, Teixeira, M, Cantieri, A, Lima, J, Pereira, AI, Valente, A, de Castro, GGR, Pinto, MF. 2023, 'Cooperative Heterogeneous Robots for Autonomous Insects Trap Monitoring System in a Precision Agriculture Scenario', *Agriculture*, vol. 13, 239, pp. 1-26.
- Bertoni, D, Curzi, D, Aletti, G, Olper, A. 2020, 'Estimating the Effects of Agri-Environmental Measures Using Difference-in-Difference Coarsened Exact Matching', *Food Policy*, vol. 90, 1017.
- Bhat, SA, Huang, N-F. 2021, 'Big Data and AI Revolution in Precision Agriculture: Survey and Challenges', *IEEE Access*, vol. 9, pp. 110209–110222.
- Billen, G, Aguilera, E, Einarsson, R, Garnier, J, Gingrich, S, Grizzetti, B, Lassaletta, L, Le Noë, J, Sanz-Cobena, A. 2024, 'Beyond the Farm to Fork Strategy: Methodology for Designing a European Agro-Ecological Future', *Sci. Total Environ.*, vol. 908, 168160.
- Blasch, J, van der Kroon, B, van Beukering, P, Munster, R, Fabiani, S, Nino, P, Vanino, S. 2022, 'Farmer Preferences for Adopting Precision Farming Technologies: A Case Study from Italy', *Eur. Rev. Agric. Econ.*, vol. 49, pp. 33–81.
- Borrego, AC, Abreu, R, Carreira, FA, Caetano, F, Vasconcelos, AL. 2023, 'Environmental Taxation on the Agri-Food Sector and the Farm to Fork Strategy: The Portuguese Case', *Sustainability*, vol. 15, 12124.
- Cerutti, S, Boccaleri, E. 2021, 'The Role Universities and Cities Can Play in the E.U.'s Green Deal', *J. Urban Regen. Renew.*, vol. 15, pp. 141–154.

- Chang, J, Ciaais, P, Gasser, T, Smith, P, Herrero, M, Havlík, P, Obersteiner, M, Guenet, B, Goll, DS, Li, W et al. 2021, 'Climate Warming from Managed Grasslands Cancels the Cooling Effect of Carbon Sinks in Sparsely Grazed and Natural Grasslands', *Nat. Commun.*, vol. 12, 118.
- Chen, X. 2025, 'The Role of Modern Agricultural Technologies in Improving Agricultural Productivity and Land Use Efficiency', *Front. Plant Sci.*, vol. 16, 1675657.
- Chen, Y, Quan, L, Zhang, X, Zhou, K, Wu, C. 2023, 'Field-Road Classification for GNSS Recordings of Agricultural Machinery Using Pixel-Level Visual Features', *Comput. Electron. Agric.*, vol. 210, 107937.
- Chung, YS, Yoon, SU, Heo, S, Kim, YS, Ahn, J, Han, GD. 2022, 'Characterization of Tree Composition Using Images from SENTINEL-2: A Case Study with Semiyang Oreum', *J. Environ. Sci. Int.*, vol. 31, pp. 735–741.
- Chung, S, Breshears, LE, Yoon, J-Y. 2018, 'Smartphone Near Infrared Monitoring of Plant Stress', *Comput. Electron. Agric.*, vol. pp. 154, 93–98.
- Cravero, A, Sepúlveda, S. 2021, 'Use and Adaptations of Machine Learning in Big Data—Applications in Real Cases in Agriculture', *Electronics*, vol. 10, 552.
- D'Alberto, R, Targetti, S, Schaller, L, Bartolini, F, Eichhorn, T, Haltia, E, Harmanny, K, Le Gloux, F, Nikolov, D, Runge, T et al. 2024, 'A European Perspective on Acceptability of Innovative Agri-Environment-Climate Contract Solutions', *Land Use Policy*, vol. 141, 107120.
- Duckett, T, Pearson, S, Blackmore, S, Grieve, B, Chen, WH, Cielniak, G, Yang, GZ. 2018, 'Agricultural Robotics: The Future of Robotic Agriculture', arXiv, arXiv:1806.06762.
- Erjavec, K, Erjavec, E. 2015, 'Greening the CAP'—Just a Fashionable Justification? A Discourse Analysis of the 2014–2020 CAP Reform Documents', *Food Policy*, vol. 51, pp. 53–62.
- European Commission. 2019, 'Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, European Green Deal, COM(2019) 640 Final, 11.12.2019'.
- FAO. 2022, 'In Brief to the State of Food and Agriculture 2022. Leveraging Automation in Agriculture for Transforming Agrifood Systems', FAO: Rome, Italy.

- Finch, T, Day, BH, Massimino, D, Redhead, JW, Field, RH, Balmford, A, Green, RE, Peach, WJ. 2021, 'Evaluating Spatially Explicit Sharing-Sparing Scenarios for Multiple Environmental Outcomes', *J. Appl. Ecol.*, vol. 58, pp. 655–666.
- Fragassa, C, Vitali, G, Emmi, L, Arru, M. 2023, 'A New Procedure for Combining UAV-Based Imagery and Machine Learning in Precision Agriculture', *Sustainability*, vol. 15, 998.
- Fusco, G. 2021, 'Twenty Years of Common Agricultural Policy in Europe: A Bibliometric Analysis', *Sustainability*, vol. 13, 10650.
- Gauci, V, Pangala, SR, Shenkin, A, Barba, J, Bastviken, D, Figueiredo, V, Gomez, C, Enrich-Prast, A, Sayer, E, Stauffer, T et al. 2024, 'Global Atmospheric Methane Uptake by Upland Tree Woody Surfaces', *Nature*, vol. 631, pp. 796–800.
- Gebresenbet, G, Bosona, T, Patterson, D, Persson, H, Fischer, B, Mandaluniz, N, Chirici, G, Zacepins, A, Komasilovs, V, Pitulac, T et al. 2023, 'A Concept for Application of Integrated Digital Technologies to Enhance Future Smart Agricultural Systems', *Smart Agric. Technol.*, vol. 5, 100255.
- Georgescu, P-L, Barbuta-Misu, N, Zlati, ML, Fortea, C, Antohi, VM. 2025, 'Quantifying the Performance of European Agriculture Through the New European Sustainability Model', *Agriculture*, vol. 15, 210.
- Gobin, A, Uljee, I. 2025, 'European Green Deal Strategies for Agriculture in Dynamic Urbanised Landscapes', *Land*, vol. 14, 424.
- Guebsi, R, Mami, S, Chokmani, K. 2024, 'Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review of Applications, Technologies, and Challenges', *Drones*, vol. 8, 686.
- Guo, W, Carroll, ME, Singh, A, Swetnam, TL, Merchant, N, Sarkar, S, Singh, AK, Ganapathysubramanian, B. 2021, 'UAS-Based Plant Phenotyping for Research and Breeding Applications', *Plant Phenomics*, vol. 2021, 9840192.
- Haneklaus, S, Lilienthal, H, Schnug, E. 2016, '25 Years Precision Agriculture in Germany—A Retrospective', In Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture, St. Louis, MO, USA.
- Hedley, C. 2015, 'The Role of Precision Agriculture for Improved Nutrient Management on Farms: Precision Agriculture Managing Farm Nutrients', *J. Sci. Food Agric.*, vol. 95, pp. 12–19.

- Hegde, P. 2021, 'Precision Agriculture: How Is It Different from Smart Farming?', <https://www.cropin.com/blogs/smart-farming-vs-precision-farming-systems>, ημερομηνία επίσκεψης 10/10/2025.
- Htun, N-N, Rojo, D, Ooge, J, De Croon, R, Kasimati, A, Verbert, K. 2022, 'Developing Visual-Assisted Decision Support Systems across Diverse Agricultural Use Cases', *Agriculture*, vol. 12, 1027.
- Huang, W, Wang, X. 2024, 'The Impact of Technological Innovations on Agricultural Productivity and Environmental Sustainability in China', *Sustainability*, vol. 16, 8480.
- Hundal, GS, Laux, CM, Buckmaster, D, Sutton, MJ, Langemeier, M. 2023, 'Exploring Barriers to the Adoption of Internet of Things-Based Precision Agriculture Practices', *Agriculture*, vol. 13, 163.
- Kanwal, S, Khan, MA, Saleem, S, Tahir, MN, Muntaha, ST, Samreen, T, Javed, S, Nazir, MZ, Shahzad, B. 2022, 'Integration of Precision Agriculture Techniques for Pest Management', *Environ. Sci. Proc.*, vol. 23, 19.
- Kim, D-W, Kim, Y, Kim, K-H, Kim, H-J, Chung, YS. 2019, 'Case Study: Cost-Effective Weed Patch Detection by Multi-Spectral Camera Mounted on Unmanned Aerial Vehicle in the Buckwheat Field', *Korean J. Crop Sci.*, vol. 64, pp. 159–164.
- Jang, G, Kim, D-W, Kim, H-J, Chung, YS. 2023, 'Short Communication: Spatial Dependence Analysis as a Tool to Detect the Hidden Heterogeneity in a Kenaf Field', *Agronomy*, vol. 13, 428.
- Javaid, M, Haleem, A, Singh, RP, Suman, R. 2022, 'Enhancing Smart Farming through the Applications of Agriculture 4.0 Technologies', *Int. J. Intell. Netw.*, vol. 3, pp. 150–164.
- Karunathilake, EMBM, Le, AT, Heo, S, Chung, YS, Mansoor, S. 2023, 'The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture', *Agriculture*, vol. 13, 1593.
- Kautish, E. 2023, 'Edge Computing and Intelligent Blockchain in the Construction of Agricultural Supply Chain System', *Acad. J. Agric. Sci.*, vol. 4, pp. 81–96.
- Kernecker, M, Knierim, A, Wurbs, A, Kraus, T, Borges, F. 2020, 'Experience versus Expectation: Farmers' Perceptions of Smart Farming Technologies for Cropping Systems across Europe', *Precis. Agric.*, vol. 21, pp. 34–50.

- Khanna, A, Kaur, S. 2023, 'An Empirical Analysis on Adoption of Precision Agricultural Techniques among Farmers of Punjab for Efficient Land Administration', *Land Use Policy*, vol. 126, 106533.
- Kim, H, Rosa, IMD, Alkemade, R, Leadley, P, Hurtt, G, Popp, A, Van Vuuren, DP, Anthoni, P, Arneth, A, Baisero, D et al. 2018, 'A Protocol for an Intercomparison of Biodiversity and Ecosystem Services Models Using Harmonized Land-Use and Climate Scenarios', *Geosci. Model Dev.*, vol. 11, pp. 4537–4562.
- Koubaa, A, Ammar, A, Abdelkader, M, Alhabashi, Y, Ghouti, L. 2023, 'AERO: AI-Enabled Remote Sensing Observation with Onboard Edge Computing in UAVs', *Remote Sens.*, vol. 15, 1873.
- Krell, NT, Giroux, SA, Guido, Z, Hannah, C, Lopus, SE, Caylor, KK, Evans, TP. 2020, 'Smallholder Farmers' Use of Mobile Phone Services in Central Kenya', *Clim. Dev.*, vol. 13, pp. 215–227.
- Lay, L, Lee, HS, Tayade, R, Ghimire, A, Chung, YS, Yoon, Y, Kim, Y. 2023, 'Evaluation of Soybean Wildfire Prediction via Hyperspectral Imaging', *Plants*, vol. 12, 901.
- Lazíková, J, Bandlerová, A, Rumanovská, L, Takáč, I, Lazíková, Z. 2019, 'Crop Diversity and Common Agricultural Policy. The Case of Slovakia', *Sustainability*, vol. 11, 1416.
- Lee, C-L, Strong, R, Dooley, KE. 2021, 'Analyzing Precision Agriculture Adoption across the Globe: A Systematic Review of Scholarship from 1999–2020', *Sustainability*, vol. 13, 10295.
- Lezoche, M, Hernandez, JE, Díaz, MdMEA, Panetto, H, Kacprzyk, J. 2020, 'Agri-Food 4.0: A Survey of the Supply Chains and Technologies for the Future Agriculture', *Comput. Ind.*, vol. 117, 103187.
- Li, L, Awada, T, Shi, Y, Jin, VL, Kaiser, M. 2025, 'Global Greenhouse Gas Emissions from Agriculture: Pathways to Sustainable Reductions', *Glob. Change Biol.*, vol. 31, e70015.
- Liu, C, Lu, S, Tian, J, Yin, L, Wang, L, Zheng, W. 2024, 'Research Overview on Urban Heat Islands Driven by Computational Intelligence', *Land*, vol. 13, 2176.
- Liu, Y, Langemeier, MR, Small, IM, Joseph, L, Fry, WE. 2017, 'Risk Management Strategies Using Precision Agriculture Technology to Manage Potato Late Blight', *Agron. J.*, vol. 109, pp. 562–575.

- Liu, Y, Ma, X, Shu, L, Hancke, GP, Abu-Mahfouz, AM. 2021, ‘From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges’, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 17, pp. 4322–4334.
- López-Santiago, J, Md Som, A, Asyadi Bin Md Yusof, F, Mazarrón, FR, Gómez-Villarino, MT. 2024, ‘Exploring Sustainability in Wineries: Evaluating Food Safety and Environmental Management Aligning with the Farm to Fork Strategy’, *Agriculture*, vol. 14, 330.
- Lund, ED, Maxton, CR, Lund, TJ. 2016, ‘A Data Fusion Method for Yield and Soil Sensor Maps’, International Society of Precision Agriculture: Monticello, IL, USA.
- Ma, M, Liu, J, Liu, M, Zeng, J, Li, Y. 2021, ‘Tree Species Classification Based on Sentinel-2 Imagery and Random Forest Classifier in the Eastern Regions of the Qilian Mountains’, *Forests*, vol. 12, 1736.
- Martin, DE, Yang, C. 2016, ‘Field Evaluation of a Variable-Rate Aerial Application System’, International Society of Precision Agriculture: Monticello, IL, USA.
- Mishra, S. 2022, ‘Emerging Technologies—Principles and Applications in Precision Agriculture’, In *Data Science in Agriculture and Natural Resource Management*; Springer: Singapore, pp. 31–53.
- Mizlik, T. 2023, ‘How Can Precision Farming Work on a Small Scale? A Systematic Literature Review’, *Precis. Agric.*, vol. 24, pp. 384–406.
- Mohr, S, Köhl, R. 2021, ‘Acceptance of Artificial Intelligence in German Agriculture: An Application of the Technology Acceptance Model and the Theory of Planned Behavior’, *Precision Agric.*, vol. 22, pp. 1816–1844.
- Molek-Kozakowska, K. 2024, ‘The Hybrid Discourse of the ‘European Green Deal’: Road-Mapping Economic Transition to Environmental Sustainability (Almost) Seamlessly’, *Crit. Discourse Stud.*, vol. 21, pp. 182–199.
- Monteiro, A, Santos, S, Gonçalves, P. 2021, ‘Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review’, *Animals*, vol. 11, 2345.
- Nabi, A, Narayan, S, Afroza, B, Mushtaq, F, Mufti, S, Ummiyah, HM, Malik, AA. 2017, ‘Precision Farming in Vegetables’, *J. Pharmacogn. Phytochem.*, vol. 6, pp. 370–375.
- Nicastro, R, Carillo, P. 2021, ‘Food Loss and Waste Prevention Strategies from Farm to Fork’, *Sustainability*, vol. 13, 5443.

- Núñez-Cárdenas, P, Diezma, B, San Miguel, G, Valero, C, Correa, EC. 2022, 'Environmental LCA of Precision Agriculture for Stone Fruit Production', *Agronomy*, vol. 12, 1545.
- Onyango, CM, Nyaga, JM, Wetterlind, J, Söderström, M, Piikki, K. 2021, 'Precision Agriculture for Resource Use Efficiency in Smallholder Farming Systems in Sub-Saharan Africa: A Systematic Review', *Sustainability*, vol. 13, 1158.
- Pandeya, S, Gyawali, BR, Upadhaya, S. 2025, 'Factors Influencing Precision Agriculture Technology Adoption Among Small-Scale Farmers in Kentucky and Their Implications for Policy and Practice', *Agriculture*, vol. 15, 177.
- Pawłowski, KP, Sołtysiak, G. 2024, 'The Potential Impact of the European Green Deal on Farm Production in Poland', *Sustainability*, vol. 16, 11080.
- Pe'er, G, Bonn, A, Bruelheide, H, Dieker, P, Eisenhauer, N, Feindt, PH, Hagedorn, G, Hansjurgens, B, Herzog, I, Lomba, A et al. 2020, 'Action Needed for the EU Common Agricultural Policy to Address Sustainability Challenges', *People Nat.*, vol. 2, pp. 305–316.
- Petrović, B, Bumbálek, R, Zoubek, T, Kuneš, R, Smutný, L, Bartoš, P. 2024, 'Application of Precision Agriculture Technologies in Central Europe—Review', *J. Agric. Food Res.*, vol. 15, 101048.
- Petrovic, B, Csambalik, L. 2025, 'Enhancing Precision Agriculture for Climate Change Mitigation in Visegrad Countries: Factors Shaping Adaptation', *Land*, vol. 14, 399.
- Pilvere, I, Nipers, A, Pilvere, A. 2022, 'Evaluation of the European Green Deal Policy in the Context of Agricultural Support Payments in Latvia', *Agriculture*, vol. 12, 2028.
- Pretty, J, Benton, TG, Bharucha, ZP, Dicks, LV, Flora, CB, Godfray, HCJ, Goulson, D, Hartley, S, Lampkin, N, Morris, C et al. 2018, 'Global Assessment of Agricultural System Redesign for Sustainable Intensification', *Nat. Sustain.*, vol. 1, pp. 441–446.
- Prigoreanu, I, Ungureanu, BA, Ungureanu, G, Ignat, G. 2024, 'Analysis of Sustainable Energy and Environmental Policies in Agriculture in the EU Regarding the European Green Deal', *Energies*, vol. 17, 6428.
- Punithavathi, R, Rani, ADC, Sughashini, KR, Kurangi, C, Nirmala, M, Ahmed, HFT, Balamurugan, SP. 2023, 'Computer Vision and Deep Learning-Enabled Weed

- Detection Model for Precision Agriculture’, *Comput. Syst. Sci. Eng.*, vol. 44, pp. 2759–2774.
- Quamar, MM, Al-Ramadan, B, Khan, K, Shafiullah, M, El Ferik, S. 2023, ‘Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology—A Review’, *Remote Sens.*, vol. 15, 5039.
- Raza, A, Ashraf, E, Sadaf, S, Khan, NA, Shah, AA, Alotaib, BA, Muzamil, MR. 2025, ‘The Potential Role of Precision Agriculture in Building Sustainable Livelihoods and Farm Resilience Amid Climate Change: A Stakeholders’ Perspective from Southern Punjab, Pakistan’, *Land*, vol. 14, 770.
- Recanati, F, Maughan, C, Pedrotti, M, Dembska, K, Antonelli, M. 2019, ‘Assessing the Role of CAP for More Sustainable and Healthier Food Systems in Europe: A Literature Review’, *Sci. Total Environ.*, vol. 653, pp. 908–919.
- Rybczewska-Błazejowska, M, Gierulski, W. 2018, ‘Eco-Efficiency Evaluation of Agricultural Production in the EU-28’, *Sustainability*, vol. 10, 4544.
- Sadiku, MN, Musa, SM, Ashaolu, TJ. 2019, ‘Food Industry: An Introduction’, *Int. J. Trend Sci. Res. Dev.*, vol. 3, pp. 128–130.
- Saiz-Rubio, V, Rovira-Más, F. 2020, ‘From Smart Farming Towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management’, *Agronomy*, vol. 10, 207.
- Salvan, MG, Bertoni, D, Cavicchioli, D, Bocchi, S. 2022, ‘Agri-Environmental Indicators: A Selected Review to Support Impact Assessment of New EU Green Deal Policies’, *Agronomy*, vol. 12, 798.
- Sanyaolu, M, Sadowski, A. 2024, ‘The Role of Precision Agriculture Technologies in Enhancing Sustainable Agriculture’, *Sustainability*, vol. 16, 6668.
- Saranya, T, Deisy, C, Sridevi, S, Anbananthen, KSM. 2023, ‘A Comparative Study of Deep Learning and Internet of Things for Precision Agriculture’, *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 122, 106034.
- Schebesta, H, Bernaz, N, Macchi, C. 2020, ‘The European Union Farm to Fork Strategy’, *Eur. Food Feed Law Rev.*, vol. 15, 420–427.
- Schebesta, H, Candel, JJ. 2020, ‘Game-Changing Potential of the EU’s Farm to Fork Strategy’, *Nat. Food*, vol. 1, pp. 586–588.
- Sendros, A, Drosatos, G, Efraimidis, PS, Tsirliganis, NC. 2022, ‘Blockchain Applications in Agriculture: A Scoping Review’, *Appl. Sci.*, vol. 12, 8061.

- Shaikh, TA, Rasool, T, Lone, FR. 2022, 'Towards Leveraging the Role of Machine Learning and Artificial Intelligence in Precision Agriculture and Smart Farming', *Comput. Electron. Agric.*, vol. 198, 107119.
- Shin, J, Mahmud, S, Rehman, TU, Ravichandran, P, Heung, B, Chang, YK. 2022, 'Trends and Prospect of Machine Vision Technology for Stresses and Diseases Detection in Precision Agriculture', *Agriengineering*, vol. 5, pp. 20–39.
- Sokal, K, Kachel, M. 2025, 'Impact of Agriculture on Greenhouse Gas Emissions—A Review', *Energies*, vol. 18, 2272.
- Stefanis, C, Stavropoulos, A, Stavropoulou, E, Tsigalou, C, Constantinidis, TC, Bezirtzoglou, E. 2024, 'A Spotlight on Environmental Sustainability in View of the European Green Deal', *Sustainability*, vol. 16, 4654.
- Spotorno, S, Gobin, A, Vanongeval, F, Del Borghi, A, Gallo, M. 2024, 'Carbon Farming Practices Assessment: Modelling Spatial Changes of Soil Organic Carbon in Flanders, Belgium', *Sci. Total Environ.*, vol. 922, 171267.
- Tanikawa, T. 2018, 'Mechanization of Agriculture Considering Its Business Model', In *Smart Plant Factory*; Kozai, T, Ed.; Springer: Singapore, pp. 241–244.
- Tataridas, A, Kanatas, P, Chatzigeorgiou, A, Zannopoulos, S, Travlos, I. 2022, 'Sustainable Crop and Weed Management in the Era of the EU Green Deal: A Survival Guide', *Agronomy*, vol. 12, 589.
- Testi, A, Zetti, I, Tarsi, E, Fontana, C, Gisotti, MR, Rossi, M. 2023, 'Supporting Local Implementation of the European Green Deal through a Place-Based, Participatory Approach: Methodology for a Comprehensive Analytical Framework', *Sustainability*, vol. 15, 15098.
- Thakur, S, Sharma, S, Barela, A, Nagre, SP. 2023, 'Plant Phenomics through Proximal Remote Sensing: A Review for Improved Crop Yield', *Pharma Innov. J.*, vol. 12, pp. 2432–2442.
- Tomaszewski, L, Kołakowski, R. 2023, 'Mobile Services for Smart Agriculture and Forestry, Biodiversity Monitoring, and Water Management: Challenges for 5G/6G Networks', *Telecom*, vol. 4, pp. 67–99.
- Torero, M. 2021, 'Robotics and AI in Food Security and Innovation: Why They Matter and How to Harness Their Power', In *Robotics, AI, and Humanity: Science, Ethics, and Policy*; von Braun, JJ, Archer, MS, Reichberg, GM, Sorondo, MS, Eds.; Springer: Cham, Switzerland, pp. 99–107.

- Trivelli, L, Apicella, A, Chiarello, F, Rana, R, Fantoni, G, Tarabella, A. 2019, 'From Precision Agriculture to Industry 4.0: Unveiling Technological Connections in the Agrifood Sector', *Br. Food J.*, vol. 121, pp. 1730–1743.
- Varzakas, T, Smaoui, S. 2024, 'Global Food Security and Sustainability Issues: The Road to 2030 from Nutrition and Sustainable Healthy Diets to Food Systems Change', *Foods*, vol. 13, 306.
- Vellidis, G, Liakos, V, Porter, W, Tucker, M, Liang, X. 2016, 'A Dynamic Variable Rate Irrigation Control System', International Society of Precision Agriculture: Monticello, IL, USA.
- Uçak, S, Villi, B. 2021, 'Possible Effects of the European Green Deal on the Steel Industry', *Journal of Empirical Economics and Social Sciences*, vol. 3(2), pp. 94–113.
- Walter, A, Finger, R, Huber, R, Buchmann, N. 2017, 'Smart Farming Is Key to Developing Sustainable Agriculture', *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 114, pp. 6148–6150.
- Wan, W, Tian, Y, Tian, J, Yuan, C, Cao, Y, Liu, K. 2024, 'Research Progress in Spatiotemporal Dynamic Simulation of LUCC', *Sustainability*, vol. 16, 8135.
- Wang, J, Bretz, M, Dewan, MAA, Delavar, MA. 2022, 'Machine Learning in Modelling Land-Use and Land Cover-Change (LULCC): Current Status, Challenges and Prospects', *Sci. Total Environ.*, vol. 822, 153559.
- Wang, X, Wu, Z, Jia, M, Xu, T, Pan, C, Qi, X, Zhao, M. 2023, 'Lightweight SM-YOLOv5 Tomato Fruit Detection Algorithm for Plant Factory', *Sensors*, vol. 23, 3336.
- Wegren, SK, Elvestad, C. 2018, 'Russia's Food Self-Sufficiency and Food Security: An Assessment', *Postcommunist Econ.*, vol. 30, pp. 565–587.
- Wesseler, J. 2022, 'The EU's Farm-to-Fork Strategy: An Assessment from the Perspective of Agricultural Economics', *Appl. Econ. Perspect. Policy*, vol. 44, pp. 1826–1843.
- West, G, Kovacs, K. 2017, 'Addressing Groundwater Declines with Precision Agriculture: An Economic Comparison of Monitoring Methods for Variable-Rate Irrigation', *Water*, vol. 9, 28.
- Whattoff, D, Mouazen, A, Waive, T. 2017, 'A Multi Sensor Data Fusion Approach for Creating Variable Depth Tillage Zones', *Adv. Anim. Biosci.*, vol. 8, pp. 461–465.

- Wong, CY, Gilbert, ME, Pierce, MA, Parker, T, Palkovic, A, Gepts, P, Magney, TS, Buckley, TN. 2023, 'Hyperspectral Remote Sensing for Phenotyping the Physiological Drought Response of Common and Tepary Bean', *Plant Phenomics*, vol. 5, 0021.
- Wrzaszcz, W, Prandecki, K. 2020, 'Agriculture and the European Green Deal', *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej / Problems of Agricultural Economics*, vol. 4(365), pp. 156–179.
- Yadav, VS, Singh, AR, Gunasekaran, A, Raut, RD, Narkhede, BE. 2022, 'A Systematic Literature Review of the Agro-Food Supply Chain: Challenges, Network Design, and Performance Measurement Perspectives', *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 29, pp. 685–704.
- Xie, P, Du, R, Ma, Z, Cen, H. 2023, 'Generating 3D Multispectral Point Clouds of Plants with Fusion of Snapshot Spectral and RGB-D Images', *Plant Phenomics*, vol. 5, 0040.
- Yarashynskaya, A, Prus, P. 2022, 'Precision Agriculture Implementation Factors and Adoption Potential: The Case Study of Polish Agriculture', *Agronomy*, vol. 12, 2226.
- Yazdinejad, A, Zolfaghari, B, Azmoodeh, A, Dehghantanha, A, Karimipour, H, Fraser, E, Green, AG, Russell, C, Duncan, E. 2021, 'A Review on Security of Smart Farming and Precision Agriculture: Security Aspects, Attacks, Threats and Countermeasures', *Appl. Sci.*, vol. 11, 7518.
- Zaman, QU. 2023, 'Precision Agriculture Technology', In *Precision Agriculture*; Academic Press: Cambridge, MA, USA, pp. 1–17.
- Zhang, X, Huang, C, Wu, D, Qiao, F, Li, W, Duan, L, Wang, K, Xiao, Y, Chen, G, Liu, Q et al. 2017, 'High-Throughput Phenotyping and QTL Mapping Reveals the Genetic Architecture of Maize Plant Growth', *Plant Physiol.*, vol. 173, pp. 1554–1564.
- Zuazua Ruiz, A, Martín Martín, JM, Prados-Castillo, JF. 2023, 'The European Union Facing Climate Change: A Window of Opportunity for Technological Development and Entrepreneurship', *Sustain. Technol. Entrep.*, vol. 2, 100035.