



«Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας»

«Εφαρμογές Γεωργίας Ακριβείας»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

«Αξιολόγηση Εφαρμογών Γεωργίας Ακριβείας στο καλαμπόκι:

Παραγωγικά ευρήματα και Οικονομικές επιπτώσεις »

Θωμάς Μάλαμας

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Αθανασία Μαυρομμάτη

Πάτρα, Ιούνιος 2026

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

«Αξιολόγηση Εφαρμογών Γεωργίας Ακριβείας στο καλαμπόκι:
Παραγωγικά ευρήματα και Οικονομικές επιπτώσεις»

Θωμάς Μάλαμας

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Αθανασία Μαυρομμάτη

Επίκουρος Καθηγήτρια Οικονομίας και
Αγροτικής Οικονομίας, Πανεπιστήμιο
Πατρών

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Θωμάς Αλεξανδρίδης

Αναπληρωτής καθηγητής
Τηλεπισκόπησης και GIS, ΑΠΘ - Σχολή
Γεωπονίας Α.Π.Θ.

Πάτρα, Ιούνιος 2026

*Θωμάς Μάλαμας, Αξιολόγηση Εφαρμογών Γεωργίας Ακριβείας
στο καλαμπόκι: Παραγωγικά ευρήματα και Οικονομικές
επιπτώσεις*

*«Αφιερώνεται:
Στους γονείς μου Στέργιο και Κορνηλία»*

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αξιολογεί τις παραγωγικές και οικονομικές επιπτώσεις από την εφαρμογή τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ) στην καλλιέργεια του καλαμποκιού. Καθώς το καλαμπόκι αποτελεί μια από τις σημαντικότερες καλλιέργειες παγκοσμίως, η πίεση για μείωση του κόστους παραγωγής και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος καθιστά επιτακτική τη μετάβαση σε πιο στοχευμένες πρακτικές διαχείρισης. Η έρευνα βασίστηκε σε εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση και δομήθηκε γύρω από τρεις βασικούς τεχνολογικούς άξονες: τη Μεταβλητή Δόση Αζώτου (VRT), την Τηλεπισκόπηση και τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV), και τα συστήματα Παγκόσμιου Προσδιορισμού Θέσης (GPS) με αυτόματη καθοδήγηση (AutoSteer) και χαρτογράφηση.

Τα παραγωγικά ευρήματα καταδεικνύουν ότι η τεχνολογία VRT επιτρέπει τη διατήρηση ή και την αύξηση των αποδόσεων, βελτιώνοντας θεαματικά την αποδοτικότητα χρήσης του αζώτου και μειώνοντας τις απαιτούμενες εισροές. Η Τηλεπισκόπηση και τα UAV λειτουργούν ως η βασική υποδομή συλλογής χωρικών δεδομένων, τα οποία, μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, μετατρέπονται σε ακριβείς χάρτες εφαρμογής. Παράλληλα, τα συστήματα GPS και AutoSteer εξασφαλίζουν μέγιστη λειτουργική ακρίβεια, εκμηδενίζοντας τις επικαλύψεις και αποτρέποντας απώλειες παραγωγής από σφάλματα πλοήγησης.

Σε οικονομικό επίπεδο, τα συστήματα αυτόματης καθοδήγησης παρουσιάζουν την ταχύτερη απόσβεση (ROI) και την πιο άμεση μείωση του λειτουργικού κόστους. Η συνδυαστική χρήση πολλαπλών ψηφιακών εργαλείων δημιουργεί ισχυρές συνέργειες, πολλαπλασιάζοντας τα οικονομικά και παραγωγικά οφέλη σε σχέση με τη μεμονωμένη χρήση τους.

Ωστόσο, η επιτυχής υιοθέτηση της ΓΑ προϋποθέτει επαρκή χωρική ετερογένεια και κατάλληλη κλίμακα εκμετάλλευσης. Στο πλαίσιο της ελληνικής πραγματικότητας, η οποία χαρακτηρίζεται από μικρό και πολυτεμαχισμένο κλήρο, το υψηλό κόστος κεφαλαίου αποτελεί σημαντικό περιοριστικό παράγοντα. Συμπερασματικά, η βιώσιμη ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών στην Ελλάδα απαιτεί προσαρμοσμένες στρατηγικές, όπως η

αξιοποίηση τεχνολογιών χαμηλού κόστους, η παροχή υπηρεσιών από εργολάβους γεωργικών μηχανημάτων και η ενίσχυση των συνεταιριστικών σχημάτων για την κοινή χρήση του εξοπλισμού.

Λέξεις – Κλειδιά

Γεωργία Ακριβείας, Καλαμπόκι, Μεταβλητή Δόση Αζώτου, Τηλεπισκόπηση, Οικονομική Αξιολόγηση

«Evaluation of Precision Agriculture Applications in Maize: Production Findings and Economic Impacts»

Thomas Malamas

Abstract

This master's thesis evaluates the production and economic impacts of implementing Precision Agriculture (PA) technologies in maize cultivation. As maize is one of the most important crops globally, the pressure to reduce production costs and environmental footprint makes the transition to more targeted management practices imperative. The research was based on an extensive literature review and structured around three main technological axes: Variable Rate Technology (VRT) for nitrogen, Remote Sensing and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), and Global Positioning Systems (GPS) with automatic guidance (AutoSteer) and mapping.

Production findings demonstrate that VRT allows for the maintenance or even increase of yields, significantly improving nitrogen use efficiency and reducing required inputs. Remote Sensing and UAVs serve as the primary infrastructure for spatial data collection, which through machine learning algorithms, are converted into accurate application maps. Concurrently, GPS and AutoSteer systems ensure maximum operational accuracy, eliminating overlaps and preventing yield losses caused by navigation errors.

On an economic level, automatic guidance systems exhibit the fastest return on investment (ROI) and the most direct reduction in operating costs. The combined use of multiple digital tools creates strong synergies, multiplying the economic and production benefits compared to their individual application.

However, the successful adoption of PA requires sufficient spatial heterogeneity and an appropriate farm scale. In the context of the Greek reality, which is characterized by small and fragmented landholdings, the high capital cost constitutes a significant limiting factor. In conclusion, the sustainable integration of these technologies in Greece requires tailored strategies, such as the utilization of low-cost technologies, the provision of services by agricultural machinery contractors, and the strengthening of cooperative schemes for shared equipment use.

Keywords

Precision Agriculture, Maize, Variable Rate Technology, Remote Sensing, Economic Evaluation

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	vii
Abstract	viii
Περιεχόμενα	x
Συνοτομογραφίες & Ακρωνύμια.....	xiii
1. Εισαγωγή.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.2 Οι τρεις τεχνολογικοί άξονες.....	3
1.3 Διάρθρωση της εργασίας	5
2. Μεθοδολογία βιβλιογραφικής ανασκόπησης.....	9
2.1 Εγκυρότητα και κριτήρια επιλογής άρθρων.....	9
2.2 Χρονικό εύρος και γεωγραφική κάλυψη μελετών.....	7
3. Μεταβλητή δόση αζώτου	9
3.1 Αρχές και αισθητήρες.....	9
3.2 Παραγωγικά ευρήματα.....	10
3.3 Οικονομικές επιπτώσεις- σύνοψη μελετών.....	15
4. Τηλεπισκόπηση και UAV.....	20
4.1 Τεχνολογίες και εφαρμογές.....	20
4.2 Παραγωγικά ευρήματα.....	23
4.3 Οικονομικές επιπτώσεις.....	27
5. Autosteer, Mapping & GPS.....	31
5.1 Συστήματα αυτόματης καθοδήγησης και χαρτογράφησης απόδοσης.....	31
5.2 Παραγωγικά ευρήματα.....	34
5.3 Οικονομικές επιπτώσεις.....	38
6. Συνθετική ανάλυση των τριών τεχνολογικών αξόνων.....	42
6.1 Ποιες τεχνολογίες δίνουν τα μεγαλύτερα παραγωγικά οφέλη στο καλαμπόκι.....	42
6.2 Συνδυαστικές εφαρμογές τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας.....	44
7. Συζήτηση.....	47
7.1 Σύνοψη βασικών διαπιστώσεων.....	47
7.2 Προϋποθέσεις επιτυχίας.....	50
7.3 Γενίκευση ευρημάτων στην ελληνική πραγματικότητα.....	53
Βιβλιογραφία.....	56

*Θωμάς Μάλαμας, Αξιολόγηση Εφαρμογών Γεωργίας Ακριβείας
στο καλαμπόκι: Παραγωγικά ευρήματα και Οικονομικές
επιπτώσεις*

*Θωμάς Μάλαμας, Αξιολόγηση Εφαρμογών Γεωργίας Ακριβείας
στο καλαμπόκι: Παραγωγικά ευρήματα και Οικονομικές
επιπτώσεις*

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Ακολουθούν κάποια παραδείγματα:

ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
ΕΑΠ	Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
ΘΕ	Θεματική Ενότητα
ΠΕ	Πτυχιακή Εργασία
ΠΣ	Πρόγραμμα Σπουδών
ΣΥΝ	Συντονιστής/Συντονίστρια

1. Εισαγωγή

Το καλαμπόκι (*Zea mays* L.) είναι σήμερα το δεύτερο κορυφαίο σιτηρό παγκοσμίως σε όγκο παραγωγής και βασικός πυλώνας της παγκόσμιας αγροδιατροφικής οικονομίας (Erenstein et al., 2022). Η καλλιέργειά του αποτελεί μία από τις σημαντικότερες σταθερές παγκοσμίως, τόσο για τροφή και ζωοτροφή όσο και για βιομηχανική χρήση. Παράλληλα τα υπολείμματά του μπορούν να αξιοποιηθούν για παραγωγή βιοαιθανόλης και θα μπορούσαν να αποδώσουν πάνω από 45 εκατ. m³ καυσίμου, καλύπτοντας περίπου το 60% της σημερινής παγκόσμιας παραγωγής, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά περισσότερο από 150 εκατ. τόνους CO₂ ετησίως (Aghaei, Alavijeh, Shafiei, & Karimi, 2022).

Είναι μια πρώτη ύλη με εξέχων ρόλο στην επισιτιστική και διατροφική ασφάλεια του πλανήτη, ενώ παράλληλα στηρίζει το αγροτικό εισόδημα ουσιαστικά και διαχρονικά (Erenstein et al., 2022).

Η αυξανόμενη ζήτηση, σε συνδυασμό με την πίεση για μείωση του κόστους παραγωγής και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, καθιστούν αναγκαία την υιοθέτηση πιο αποδοτικών και στοχευμένων πρακτικών διαχείρισης της καλλιέργειάς του. Αυτήν την πραγματικότητα επηρεάζουν παράγοντες όπως η κλιματική αλλαγή, η υποβάθμιση των εδαφών αλλά και γεωπολιτικές εξελίξεις που διαμορφώνουν ένα πλαίσιο εξαιρετικά απρόβλεπτο και δυσμενές για το κόστος παραγωγής της καλλιέργειας.

Σε αυτό το πλαίσιο, η Γεωργία Ακριβείας προβάλλει ως βασική στρατηγική για τη βελτιστοποίηση των εισροών και τη μεγιστοποίηση της ανταποδοτικότητας ανά μονάδα επιφάνειας. Οι τεχνολογίες Γεωργίας Ακριβείας όπως τα συστήματα αυτόματης καθοδήγησης, η χαρτογράφηση της παραγωγής, η χρήση δορυφορικών ή UAV εικόνων και οι εφαρμογές μεταβλητής δόσης λιπάσματος, επιτρέπουν την αξιοποίηση της χωρικής και χρονικής παραλλακτικότητας μέσα στον αγρό. Η παραλλακτικότητα αυτή αποτελεί και το έναυσμα για την αντιμετώπιση της διαφορετικότητας ως παράγοντα κερδοφορίας.

1.1 Σκοπός της εργασίας

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, αναδεικνύεται η ανάγκη για συστηματική αξιολόγηση των εφαρμογών Γεωργίας Ακριβείας στο καλαμπόκι, με ταυτόχρονη ανάλυση παραγωγικών και οικονομικών δεικτών. Ενώ υπάρχουν πολλές εργασίες που τεκμηριώνουν επιμέρους εφαρμογές όπως χρήση on the go αισθητήρων, μεταβλητής λίπανσης αζώτου και Τηλεπισκόπησης με χρήση GPS για παραγωγή χαρτών, η ολοκληρωμένη εκτίμηση του κατά πόσο οι πρακτικές αυτές βελτιώνουν ταυτόχρονα την παραγωγή και την οικονομική βιωσιμότητα σε πραγματικές συνθήκες αγρού, παραμένει ζητούμενο.

Κύριος σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση εφαρμογών γεωργίας ακριβείας στο καλαμπόκι ως προς τα παραγωγικά ευρήματα και τις οικονομικές επιπτώσεις τους. Ειδικότερα, επιδιώκεται:

- να διερευνηθεί κατά πόσο διαφορετικές εφαρμογές (π.χ. μεταβλητή σπορά, μεταβλητή λίπανση, διαφοροποιημένη διαχείριση λόγω ζωνοποίησης) οδηγούν σε αύξηση της απόδοσης και βελτίωση κρίσιμων αγρονομικών δεικτών σε σχέση με τις πρακτικές της συμβατικής γεωργίας,
- να εκτιμηθεί η οικονομική τους επίδραση, μέσω ανάλυσης κόστους-οφέλους που θα λαμβάνει υπόψη τη δαπάνη για σπόρο, λίπασμα και λοιπές εισροές, καθώς και το παραγόμενο εισόδημα ανά εκτάριο,
- και να αποτυπωθούν οι συνθήκες (π.χ. επίπεδο παραλλακτικότητας, τιμές αγοράς, επίπεδο τεχνολογικής υιοθέτησης) υπό τις οποίες οι εφαρμογές γεωργίας ακριβείας στο καλαμπόκι είναι οικονομικά συμφέρουσες.

Με τον τρόπο αυτό, η εργασία φιλοδοξεί να συμβάλει στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία, προσφέροντας τεκμηριωμένα συμπεράσματα για την πραγματική αξία της Γεωργίας Ακριβείας στο καλαμπόκι, τόσο από πλευράς παραγωγής όσο και από πλευράς κερδοφορίας και λήψης αποφάσεων σε επίπεδο εκμετάλλευσης.

1.2 Οι τρεις τεχνολογικοί άξονες

Η Γεωργία Ακριβείας (Precision Agriculture) βασίζεται σε τρεις βασικούς τεχνολογικούς άξονες που συνεργάζονται διεξοδικά: α) τηλεπισκόπηση & UAV, β) εφαρμογές μεταβλητής δόσης (Variable Rate Technology, VRT), και γ) δορυφορική πλοήγηση/αυτόματη οδήγηση με GPS/GNSS και AutoSteer.

Πρώτα, ο άξονας της Τηλεπισκόπησης και των UAV παρέχει τα “μάτια” της Γεωργίας Ακριβείας. Δορυφορικές εικόνες και πολυφασματικές κάμερες σε UAV καταγράφουν χωρική και χρονική μεταβλητότητα στη βλάστηση, την υγρασία, τις θρεπτικές ελλείψεις και τις προσβολές, χρησιμοποιώντας δείκτες όπως NDVI ή Red-edge δείκτες για βιομάζα και πρόσληψη αζώτου (Sishodia, Ray, & Singh, 2020). Η υψηλή χωρική ανάλυση των UAV επιτρέπει λεπτομερή χαρτογράφηση ακόμη και σε μικρά αγροτεμάχια, στηρίζοντας αποφάσεις για λίπανση, άρδευση και φυτοπροστασία (Argento et al., 2020)

Στη συνέχεια, ο άξονας της μεταβλητής δόσης (VRT, ιδίως αζώτου) είναι το εργαλείο που υλοποιεί τη διαχείριση. Με βάση χάρτες ζωνών διαχείρισης και δείκτες βλάστησης, συστήματα VRT σε λιπασματοδιανομείς ή ψεκαστικά μηχανήματα κατανέμουν το λίπασμα σε διαφορετικές δόσεις μέσα στο ίδιο χωράφι, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα χρήσης του αζώτου. Οικονομικές αναλύσεις δείχνουν ότι τα οφέλη εξαρτώνται από τον βαθμό χωρικής ετερογένειας και το κόστος της τεχνολογίας (Thompson & Puntel, 2020).

Τέλος, ο άξονας του GPS/GNSS και της αυτόματης οδήγησης (AutoSteer, αυτόνομα τρακτέρ) εξασφαλίζει ακριβή χωρική τοποθέτηση και κίνηση των μηχανημάτων. Τα GNSS (GPS, GLONASS, Galileo,) αποτελούν βασική προϋπόθεση για χαρτογράφηση, καθοδήγηση μηχανημάτων και λειτουργία VRT, ενώ οι αυτόματοι πιλότοι και τα συστήματα αυτόνομης πλοήγησης επιτρέπουν βέλτιστες διαδρομές, ελαχιστοποίηση επικαλύψεων και ακριβή εκτέλεση των χαρτών συνταγογράφησης (Radočaj, Plaščak, & Jurišić, 2023).

Έτσι, η Γεωργία Ακριβείας διακρίνεται καθαρά σε: συλλογή χωρικής πληροφορίας (τηλεπισκόπηση/UAV), λήψη και υλοποίηση αποφάσεων σε επίπεδο ζώνης (VRT αζώτου), και ακριβή χωρική κίνηση/πλοήγηση των μηχανημάτων (GPS/GNSS, AutoSteer και

αυτόνομα συστήματα), με τους τρεις άξονες να είναι αλληλοεξαρτώμενοι και συμπληρωματικοί.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα εργασία εξετάζει την εφαρμογή τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας στο καλαμπόκι, με έμφαση τόσο στα παραγωγικά αποτελέσματα όσο και στις οικονομικές επιπτώσεις. Στόχος είναι να αποτιμηθεί κατά πόσο τρεις βασικοί τεχνολογικοί άξονες – η μεταβλητή δόση αζώτου (VRT), η τηλεπισκόπηση και τα UAV, καθώς και τα συστήματα AutoSteer και GPS – μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα χρήσης εισροών, την παραγωγή και την κερδοφορία της καλλιέργειας. Η εργασία δομείται ώστε να περνά από τη μεθοδολογία της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, στην ανάλυση κάθε άξονα ξεχωριστά, και καταλήγει σε μια συνθετική σύγκριση και συζήτηση για τις προϋποθέσεις εφαρμογής στις ελληνικές συνθήκες.

Αρχικά, στην εισαγωγή παρουσιάζεται η σημερινή εικόνα της καλλιέργειας καλαμποκιού σε παγκόσμιο επίπεδο, οι προκλήσεις που αντιμετωπίζει όπως η πίεση για μείωση κόστους και περιβαλλοντικών επιπτώσεων, γεγονός που δίνει γόνιμο έδαφος για χρήση Γεωργίας Ακριβείας. Διευκρινίζεται ο σκοπός της εργασίας και περιγράφονται συνοπτικά οι τρεις τεχνολογικοί άξονες, αναδεικνύοντας πώς συνδέονται μεταξύ τους: οι πληροφορίες από τηλεπισκόπηση και UAV τροφοδοτούν συστήματα VRT, ενώ η καθοδήγηση και χαρτογράφηση μέσω GPS/AutoSteer υποστηρίζουν την ακριβή εφαρμογή τους.

Στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Παρουσιάζονται τα κριτήρια επιλογής άρθρων, με έμφαση σε μελέτες που περιλαμβάνουν ποσοτικά δεδομένα για απόδοση καλαμποκιού, δόσεις αζώτου, δείκτες βλάστησης και οικονομική αξιολόγηση. Γίνεται τεκμηρίωση από μελέτες από άλλα συστήματα (π.χ. σιτάρι, ελαιώνες, αμπέλι) καθώς αποδεικνύουν γενικές αρχές διαχείρισης αζώτου, Τηλεπισκόπησης και αυτοματισμών που στο καλαμπόκι. Περιγράφονται, επίσης, το χρονικό εύρος και η γεωγραφική κάλυψη των μελετών.

Ο πρώτος τεχνολογικός άξονας αφορά τη μεταβλητή δόση αζώτου (VRT). Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της μεταβλητής λίπανσης, οι αισθητήρες εδάφους και φυτού, καθώς και η χρήση ζωνών διαχείρισης και δεικτών βλάστησης για την παραγωγή χαρτών συνταγογράφησης. Κατόπιν παρουσιάζονται τα ποσοτικά δεδομένα που αφορούν την παραγωγή και τέλος στο οικονομικό σκέλος, συζητούνται οι επιδράσεις στην εξοικονόμηση λιπάσματος, στην αποδοτικότητα χρήσης N (NUE) και στην απόδοση επένδυσης (ROI).

Ο δεύτερος άξονας εστιάζει στην τηλεπισκόπηση και στα UAV. Περιγράφονται οι διαθέσιμες τεχνολογίες (δορυφορικές εικόνες, UAV με πολυφασματικούς αισθητήρες) που συσχετίζονται με βιομάζα, πρόσληψη N και τελικά με την απόδοση. Παρουσιάζονται εν συνεχεία τα παραγωγικά ευρήματα της χρήσης αυτών στο καλαμπόκι, καθώς και οικονομικά αποτελέσματα που δείχνουν εξοικονόμηση εισροών και βελτιστοποίηση κέρδους.

Ο τρίτος άξονας αφορά τα συστήματα Autosteer, Mapping και GPS. Παρουσιάζονται οι τεχνολογίες GNSS/RTK, αυτόματης καθοδήγησης και χαρτογράφησης απόδοσης και αναλύεται ο ρόλος τους στην ακρίβεια διαδρομών και στη μείωση επικαλύψεων, γεγονός που συμβάλλει στην εξοικονόμηση καυσίμων, χρόνου και εισροών. Τέλος, αναλύονται στοιχεία οικονομικής αξιολόγησης όπως το κόστος και η οικονομική βιωσιμότητα.

Στο επόμενο στάδιο, η εργασία προχωρά σε συνοπτική παρουσίαση και σύγκριση των τριών αξόνων. Συζητείται ποιοι παρέχουν τα ισχυρότερα παραγωγικά οφέλη στο καλαμπόκι, ποιοι επικεντρώνονται κυρίως στην εξοικονόμηση εισροών και πώς μπορούν να συνδυαστούν σε ολοκληρωμένα σχήματα (π.χ. χάρτες NDVI από UAV → VRT λίπανση → χαρτογράφηση παραγωγής και ανατροφοδότηση).

Τέλος, στο κεφάλαιο της συζήτησης συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα από τη βιβλιογραφία και αναλύονται οι προϋποθέσεις επιτυχούς υιοθέτησης των τεχνολογιών, όπως ο βαθμός χωρικής ετερογένειας, το μέγεθος αγροτεμαχίων, η διαθεσιμότητα δεδομένων και το κόστος επένδυσης. Σχολιάζεται, επίσης, η δυνατότητα γενίκευσης των ευρημάτων στην ελληνική πραγματικότητα, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες των καλλιεργητικών συστημάτων καλαμποκιού, τη δομή των εκμεταλλεύσεων στη χώρα μας και τα τρέχοντα επίπεδα τεχνολογικής υιοθέτησης.

2. Μεθοδολογία βιβλιογραφικής ανασκόπησης

2.1 Εγκυρότητα και κριτήρια επιλογής άρθρων

Η παρούσα εργασία βασίζεται στη μεθοδολογία της αφηγηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης (Narrative Literature Review), με συστηματική προσέγγιση στην αναζήτηση και αξιολόγηση της επιστημονικής βιβλιογραφίας. Η αναζήτηση των σχετικών δημοσιεύσεων πραγματοποιήθηκε στις διεθνώς αναγνωρισμένες βάσεις δεδομένων Scopus, Web of Science και Google Scholar, με τη χρήση συνδυασμών λέξεων-κλειδίων όπως Precision Agriculture, Maize, Corn, Variable Rate Technology (VRT), Remote Sensing, UAV, AutoSteer, GPS, economic evaluation και nitrogen management. Η επιλογή των μελετών πραγματοποιήθηκε βάσει προκαθορισμένων κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού, με στόχο τη διασφάλιση της επιστημονικής ποιότητας και της συνέπειας με το αντικείμενο της έρευνας.

Ειδικότερα, συμπεριλήφθηκαν άρθρα δημοσιευμένα σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά με σύστημα ανώνυμης κρίσης (peer-reviewed), τα οποία παρείχαν ποσοτικά δεδομένα σχετικά με τις παραγωγικές επιδόσεις, την αποδοτικότητα χρήσης αζώτου και τις οικονομικές επιπτώσεις των τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας στην καλλιέργεια του καλαμποκιού. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν συστηματικές ανασκοπήσεις και μετα-ανάλυσεις με σκοπό τη σύνθεση και τη γενίκευση των διαθέσιμων ερευνητικών ευρημάτων. Δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα σε πρόσφατες δημοσιεύσεις της περιόδου 2018-2025, προκειμένου να αποτυπωθούν οι σύγχρονες εξελίξεις του πεδίου, χωρίς ωστόσο να αποκλείονται παλαιότερες εργασίες που θεωρούνται θεμελιώδεις για την κατανόηση των τεχνολογιών και των εφαρμογών της Γεωργίας Ακριβείας.

Αντίθετα, αποκλείστηκαν μελέτες που δεν περιλάμβαναν σαφή μεθοδολογία, δεν παρείχαν εμπειρικά ή ποσοτικά δεδομένα ή δεν παρουσίαζαν άμεση συνάφεια με το αντικείμενο της παρούσας έρευνας. Η τελική επιλογή της βιβλιογραφίας βασίστηκε στην επιστημονική εγκυρότητα, τη θεματική συνάφεια, την επικαιρότητα των πηγών και τη δυνατότητα εξαγωγής τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τις παραγωγικές και οικονομικές επιπτώσεις των εφαρμογών Γεωργίας Ακριβείας στο καλαμπόκι.

Πολλά άρθρα είναι πρωτογενείς εμπειρικές μελέτες πεδίου (π.χ. επιδράσεις μεταβλητής δόσης N, άρδευσης, τελικές αποδόσεις σε παραγωγή, κέρδος, αποτελεσματικότητα χρήσης αζώτου). Άλλα άρθρα είναι συστηματικές/θεματικές ανασκοπήσεις και μελέτες, που συνοψίζουν ή γενικεύουν ευρήματα (Medici & Canavari, 2022· Bahmutsky et al., 2024· Mandrini et al., 2021). Ο συνδυασμός επιμέρους πειραμάτων και ανασκοπήσεων αυξάνει τη συνολική αξιοπιστία και επιτρέπει σύνθεση σε ανώτερο επίπεδο. Η παρουσία εργασιών με μεγάλο αριθμό ετεροαναφορών (π.χ. Finger et al., 2019 με περισσότερες από 300 ετεροαναφορές, Yost et al., 2017, Zhang et al., 2018) αποτελεί επιπλέον ένδειξη επιστημονικής αναγνώρισης.

Ορισμένες ανασκοπήσεις αναφέρουν ρητά χρήση PRISMA και τυποποιημένων πρωτοκόλλων συστηματικής ανασκόπησης (Medici & Canavari, 2022· Bahmutsky et al., 2024). Η τυποποίηση της μεθοδολογίας ενισχύει την αξιοπιστία των δευτερογενών συμπερασμάτων.

Οι περισσότερες εργασίες βασίζονται σε πειράματα πολλών ετών ή πολλών πεδίων, με στατιστική ανάλυση (ANOVA, μοντελοποίηση, αξιολόγηση κύκλου ζωής, προσομοιώσεις με APSIM). Αυτό επιτρέπει εξαγωγή έγκυρων συμπερασμάτων για σχέση τεχνολογίας–απόδοσης–οικονομικών δεικτών. Παράλληλα υπάρχει διεπιστημονική προσέγγιση δηλαδή οι πηγές συνδυάζουν αγρονομία, οικονομικά, περιβάλλον (π.χ. Zhang et al. 2018, 2023· Bahmutsky et al. 2024) και επιτρέπουν την ανάλυση μεταξύ απόδοσης, κόστους, και περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

2.2 Χρονικό εύρος και γεωγραφική κάλυψη μελετών

Αναφερόμενοι στο χρονικό πλαίσιο, εδώ η βιβλιογραφία καλύπτει ένα διάστημα τεσσάρων δεκαετιών εντατικής έρευνας σε πολλά αγρονομικά και κλιματικά περιβάλλοντα. Υπάρχει ισχυρή παρουσία πρόσφατων εργασιών (2018–2025), που αντανakλούν τη σύγχρονη φάση ανάπτυξης της Γεωργίας Ακριβείας, των UAV, IoT και Big Data. Η επικαιρότητα αποτελεί βασικό κριτήριο εγκυρότητας σε ένα ταχέως εξελισσόμενο πεδίο όπως αυτό.

Οι μελέτες καλύπτουν μεγάλο γεωγραφικό εύρος αφού περιλαμβάνουν διαφορετικές ηπείρους και χώρες με τα αντίστοιχα αγροσυστήματα (Κίνα, Νεπάλ, ΗΠΑ, Ευρώπη, βόρεια

Ινδία), επιτρέποντας συζήτηση για τη μεταφορά αποτελεσμάτων και τους περιορισμούς που μπορεί να προκύπτουν (π.χ. περιπτώσεις όπου VRI/VRT δεν είναι οικονομικά συμφέρουσες). Αυτό ενισχύει την κριτική προσέγγιση. Πραγματικά ορισμένες μελέτες δείχνουν θετικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από VRT, άλλες μικρά ή αρνητικά οικονομικά αποτελέσματα λόγω υψηλού κόστους επένδυσης (π.χ. Sharma & Irmak 2020, Mandrini et al. 2021).

Συνολικά, η βιβλιογραφία που έχει επιλεγεί είναι επιστημονικά έγκυρη, επικαιροποιημένη, θεματικά συναφής και μεθοδικά τεκμηριωμένη για μια μεταπτυχιακή εργασία με θέμα την παραγωγική και οικονομοτεχνική αξιολόγηση εφαρμογών Γεωργίας Ακριβείας στο καλαμπόκι. Η ισορροπία ανάμεσα σε πειραματικές μελέτες, οικονομικές αναλύσεις και συστηματικές ανασκοπήσεις, η επικαιρότητα και η έμφαση σε ποσοτικά στοιχεία απόδοσης και κερδοφορίας συνιστούν σαφή κριτήρια επιλογής και υποστηρίζουν την αξιοπιστία των συμπερασμάτων της διπλωματικής.

3. Μεταβλητή δόση Αζώτου (VRT N)

3.1 Αρχές και αισθητήρες

Η μεταβλητή δόση αζώτου είναι μία από τις βασικότερες τεχνολογίες Γεωργίας Ακριβείας στα σιτηρά και φυσικά στο καλαμπόκι. Κεντρική της ιδέα είναι να μην εφαρμόζεται η ίδια ποσότητα λίπανσης παντού, αλλά διαφορετική δόση ανά ζώνη αγρού, ανάλογα με τη γονιμότητα της καλλιέργειας και το δυναμικό απόδοσης. Στόχος είναι να αυξηθεί η αποδοτικότητα χρήσης αζώτου, να περιοριστούν οι απώλειες και να διατηρηθεί η απόδοση και η ποιότητα των σιτηρών.

Πρώτο στάδιο είναι ο εντοπισμός της εδαφικής παραλλακτικότητας, όπου εδώ γίνεται χρήση άλλων χρήσιμων τεχνολογιών ούτως ώστε να μετρηθεί αυτή η χωρική μεταβλητότητα. Είτε δηλαδή γίνονται δειγματοληψίες εδάφους και μέσω ιστορικών δεδομένων απόδοσης αναδεικνύονται ζώνες διαχείρισης του αγρού. Είτε γίνεται ενσωμάτωση δεδομένων Τηλεπισκόπησης (δορυφορικές εικόνες ή εικόνες UAV με πολυφασματικούς δέκτες) για υπολογισμό δεικτών βλάστησης(π.χ. NDVI) ώστε να αποτυπωθεί η χωρική παραλλακτικότητα της βλάστησης και της θρεπτικής κατάστασης του καλαμποκιού. Εναλλακτικά γίνεται χρήση on-the-go αισθητήρων όπου η μηχανή «βλέπει» την καλλιέργεια σε πραγματικό χρόνο (φασματικοί δείκτες βλάστησης) και ένας ενσωματωμένος αλγόριθμος υπολογίζει άμεσα τη δόση του εφαρμοζόμενου λιπάσματος ανά λεπτό τμήμα του αγρού, δημιουργώντας στην ουσία μια ζωνοποίηση του αγρού. Γιατί και τρεις μέθοδοι που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν σαν στόχο την παραγωγή χαρτών συνταγογράφησης λιπάσματος, απλά με τη χρήση της τρίτης μεθόδου ο χάρτης παράγεται κατά τη διάρκεια της λίπανσης του χωραφιού.

Ακολούθως οι χάρτες συνταγογράφησης λιπάσματος ή τα σήματα των αισθητήρων διασυνδέονται με έναν VRT εξοπλισμό (μπεκ ή ηλεκτροκίνητοι δίσκοι διασποράς), ο οποίος ρυθμίζει αυτόματα τη ροή λιπάσματος ανά θέση, με τη βοήθεια GPS. Ο χάρτης δοσολογίας λιπάσματος ενημερώνει τον ελεγκτή του λιπασματοδιανομέα, ο οποίος με τη βοήθεια GPS, προσαρμόζει συνεχώς την παροχή N καθώς κινείται μέσα στο χωράφι. Εναλλακτικά, ο ελεγκτής λαμβάνει σήματα σε πραγματικό χρόνο από τον on -the -go αισθητήρα και αλλάζει άμεσα τη δόση χωρίς προγενέστερο χάρτη.

3.2 Παραγωγικά ευρήματα της χρήσης VRT

Η μεταβλητή δόση αζώτου (VRT) συνιστά τεχνολογία διαφοροποιημένης εφαρμογής εισροών βάσει της χωρικής ετερογένειας του αγρού και της συνακόλουθης διαφοροποίησης των αναγκών της καλλιέργειας. Στο καλαμπόκι, η σημασία της αποτυπώνεται κυρίως στη δυνατότητα ανακατανομής του αζώτου σε ζώνες με διαφορετική παραγωγική ικανότητα, με στόχο τη διατήρηση ή και τη βελτίωση της απόδοσης με πιο στοχευμένες δόσεις και την ενίσχυση της αποδοτικότητας χρήσης του θρεπτικού (Athanasios Balafoutis et al., 2017; David J. Mulla, 2012; Ntsikane Maine et al., 2009; Raffaele Casa et al., 2011). 1.1 3.2.1 Maine et al. (2010).

Μελέτη στη Νότια Αφρική αφορούσε καλαμπόκι σε αγρό 104 εκταρίων στο Rietgat της επαρχίας Free State και εστίασε στη σχέση μεταξύ χωρικής μεταβλητότητας του εδάφους, ζωνών διαχείρισης και εφαρμογής αζώτου με μεταβλητό ρυθμό (Ntsikane Maine et al., 2009). Το πείραμα οργανώθηκε σε λωρίδες(strip-plots) με εναλλαγή μεταβλητής δόσης (VR) και ενιαίας δόσης (SR) αζώτου, ενώ οι ζώνες διαχείρισης είχαν οριστεί από προηγούμενους χάρτες απόδοσης και συνδέθηκαν με το αποτελεσματικό βάθος ριζοβολίας (Ntsikane Maine et al., 2009). Το βάθος του ριζοστρώματος κυμαινόταν από 1,2 έως 2m. Το μέσο αποτελεσματικό βάθος ριζοβολίας του αγρού ήταν 174 cm, με τιμές ζωνών που κυμαίνονταν από 164 cm στη ζώνη 2 έως 197 cm στη ζώνη 3 (Ntsikane Maine et al., 2009). Οι εφαρμοζόμενες δόσεις αζώτου διέφεραν ανά ζώνη και έτος. Το 2002–2003 εφαρμόστηκαν 84, 92, 100 και 110 kg αζώτου ανά εκτάριο υπό VR στις ζώνες 1 έως 4 αντίστοιχα, έναντι 105 kg αζώτου ανά εκτάριο υπό SR σε όλες τις ζώνες. Το 2003–2004 οι αντίστοιχες δόσεις VR ήταν 69, 85, 110 και 123 kg αζώτου ανά εκτάριο έναντι 102 kg αζώτου ανά εκτάριο SR, ενώ το 2004–2005 οι VR δόσεις ήταν 69, 85, 114 και 127 kg αζώτου ανά εκτάριο έναντι 102 kg αζώτου ανά εκτάριο SR (Ntsikane Maine et al., 2009). Η ανάλυση δεδομένων απόδοσης με χωρική παλινδρόμηση, έδειξε ότι η μεταχείριση VRT, η αλληλεπίδραση μεταχείρισης με έτος και η αλληλεπίδραση μεταχείρισης με ζώνη διαχείρισης ήταν στατιστικά σημαντικές (Ntsikane Maine et al., 2009). Ως προς την παραγωγική συμπεριφορά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πρώτο έτος η VR υπερείχε μόνο

στη ζώνη 3 και 4, με πλεονέκτημα 0,07 και 0,32 t /ha αντίστοιχα, ενώ στις ζώνες 1 και 2 καταγράφηκαν μικρές αρνητικές διαφορές (-0,06 και -0,04 t /ha). Το δεύτερο έτος οι διαφορές υπέρ της VR ήταν σαφώς μεγαλύτερες και θετικές σε όλες τις ζώνες, από 0,74 έως 1,11 t/ha. Το τρίτο έτος το πλεονέκτημα της VR ήταν εκ νέου θετικό αλλά μικρότερο, ιδίως στις ζώνες 1 έως 3, όπου κυμάνθηκε από πρακτικά μηδενικό έως 0,013 t/ha, ενώ στη ζώνη 4 ανήλθε σε 0,38 t/ha. Οι εκτιμήσεις για αναμενόμενη απόδοση στο μέσο βάθος εδάφους, κατέδειξαν αντίστοιχα μοτίβα: το έτος 1 οι διαφορές VR ήταν κοντά στο μηδέν, το έτος 2 κυμάνθηκαν από 0,79 έως 0,83 t/ha και το έτος 3 από 0,06 έως 0,11 t/ha. Η μελέτη κατέληξε ότι η VR είχε παραγωγικό πλεονέκτημα όταν το βάθος εδάφους υπερέβαινε τον μέσο όρο του αγρού, ενώ οι ζώνες διαχείρισης με βάση το βάθος ριζοβολίας ήταν σχετικές με τη χωρική διαφοροποίηση της απόδοσης (Ntsikane Maine et al., 2009). Παρά τη διακύμανση μεταξύ ετών, τα δεδομένα τεκμηριώνουν ότι η χωρικά στοχευμένη κατανομή αζώτου μπορούσε να διατηρήσει ή να βελτιώσει την απόδοση σε συγκεκριμένες ζώνες, ιδίως όπου η εδαφική ικανότητα υποστήριζε υψηλότερη απόκριση της καλλιέργειας (Ntsikane Maine et al., 2009).

Σε άλλη μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε εμπορικό αγρό στη Μασσαρέζε της Ρώμης, στην Ιταλία, σε συνολική επιφάνεια περίπου 10 ha εντός μεγαλύτερης εκμετάλλευσης 37 ha, με καλλιέργεια υβριδίου καλαμποκιού Pioneer PR32F27 τα παραγωγικά ευρήματα ήταν λίγο διαφορετικά. Η πειραματική προσέγγιση βασίστηκε σε χάρτες εδαφικών ιδιοτήτων και χάρτες απόδοσης, οι οποίοι συνδυάστηκαν για τον ορισμό τεσσάρων ομοιόμορφων ζωνών διαχείρισης μέσω kriging και fuzzy c-means αλγόριθμων συσταδοποίησης (Raffaele Casa et al., 2011). Το πρώτο λίπασμα αζώτου ήταν ομοιόμορφο και ανήλθε σε 138 kg N/ ha, ενώ η δεύτερη επιφανειακή εφαρμογή διαφοροποιήθηκε με βάση τις ζώνες, με μεταβλητή δόση 69 ή 92 kg N/ha, σε σύγκριση με ομοιόμορφη δόση 92 kg /ha. Οι εκτιμήσεις αναγκών αζώτου ανά ζώνη κυμάνθηκαν από 201 έως 239 kg N/ha, οδηγώντας σε προτεινόμενη δεύτερη δόση 69 ή 92 kg N/ha ανάλογα με τη ζώνη (Raffaele Casa et al., 2011). Παρά τη χωρική αυτή διαφοροποίηση της συνταγής, η μελέτη δεν εντόπισε σημαντικές διαφορές μεταξύ μεταβλητής και ομοιόμορφης εφαρμογής ως προς την απόδοση καρπού (Raffaele Casa et al., 2011). Αντίστοιχα, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στη συγκέντρωση νιτρικών στο έδαφος μετά τη συγκομιδή, αν και οι ζώνες με VRT εμφάνισαν σταθερά χαμηλότερες τιμές από τις ζώνες ομοιόμορφης εφαρμογής. Αγρονομικά, το αποτέλεσμα

υποδηλώνει ότι η μεταβλητή χορήγηση αζώτου, όταν βασίζεται σε εδαφικές ζώνες και χάρτες απόδοσης, μπορεί να αναπαράγει το παραγωγικό επίπεδο της ομοιόμορφης λίπανσης χωρίς απώλεια απόδοσης (Raffaele Casa et al., 2011). Η μελέτη δεν ανέδειξε πλεονέκτημα υπέρ της VRT ως προς την τελική παραγωγή, αλλά επιβεβαίωσε ότι η χωρικά στοχευμένη κατανομή του αζώτου ήταν συμβατή με τη διατήρηση της παραγωγικότητας του καλαμποκιού (Raffaele Casa et al., 2011).

Η εργασία των Balafoutis et al. αποτελεί ανασκοπική σύνθεση τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας και όχι πρωτογενή πειραματική μελέτη (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Στο τμήμα που αφορά τη μεταβλητή εφαρμογή θρεπτικών, η ανασκόπηση περιγράφει ότι η VRT αζώτου στοχεύει στην προσαρμογή της δόσης στις τοπικές ανάγκες της καλλιέργειας μέσω χαρτών συνταγογράφησης λιπάσματος, αισθητήρων εδάφους και άλλων συστημάτων επιτόπιας μέτρησης (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Για το καλαμπόκι, το κείμενο αναφέρει ότι η μεταβλητή λίπανση αζώτου παρείχε καλύτερα αποτελέσματα από τη συμβατική εφαρμογή, με εξοικονόμηση αζώτου από 6% έως 46% (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Επιπλέον, παρατίθεται ότι σε μελέτη του Maryland επιτεύχθηκε αύξηση απόδοσης καλαμποκιού κατά 5% με 21% λιγότερο άζωτο, ενώ στη Virginia καταγράφηκε σχεδόν ισοδύναμη απόδοση με χρήση περίπου 27 kg/ha λιγότερο άζωτο (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Η ανασκόπηση υποστηρίζει επίσης ότι οι τεχνικές αυτές μπορούν να ευθυγραμμίσουν καλύτερα την παροχή αζώτου με τις ανάγκες της καλλιέργειας και να διατηρήσουν ή να βελτιώσουν την παραγωγή με χαμηλότερες εισροές (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Αν και το κείμενο είναι συνθετικό και βασίζεται σε ποικίλη βιβλιογραφία για σιτηρά και άλλα συστήματα, το παραγωγικό μήνυμα που αφορά το καλαμπόκι είναι σαφές: η VRT αζώτου συνδέεται με μείωση της εφαρμοζόμενης ποσότητας αζώτου χωρίς αναλογική απώλεια απόδοσης, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να συνοδεύεται και από αύξηση παραγωγής (Athanasios Balafoutis et al., 2017).

Σε εργασία των Medici & Canavari που είναι ανασκόπηση 31 μελετών σε σιτηρά και πρέπει να αντιμετωπίζεται ως συνθετικό και όχι ως πρωτογενές, τεκμήριο τα συμπεράσματα της ανασκόπησης αποδεικνύουν ότι η VRT αζώτου σε σιτηρά συνδέεται κατά κανόνα με παρόμοιο επίπεδο παραγωγής σε σχέση με την ομοιόμορφη λίπανση, αλλά με μικρότερες ή πιο στοχευμένες δόσεις αζώτου και υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης του θρεπτικού [Medici & Canavari, 2022]. Το κείμενο αποδίδει αυτό το αποτέλεσμα στη χωρική και

χρονική βελτιστοποίηση της εφαρμογής, δηλαδή στην καλύτερη αντιστοίχιση της δόσης με την ετερογένεια του αγρού και τις χρονικές ανάγκες της καλλιέργειας. Η ανασκόπηση δεν περιορίζεται αποκλειστικά στο καλαμπόκι, όμως τα συνθετικά ευρήματα είναι συμβατά με το βασικό παραγωγικό μοτίβο που παρατηρείται και σε καλλιέργειες σιτηρών: η VRT μπορεί να διατηρεί την παραγωγή ενώ βελτιώνει δείκτες αποδοτικότητας, ιδίως όταν οι δόσεις αζώτου αναπροσαρμόζονται σύμφωνα με τη χωρική μεταβλητότητα [Medici & Canavari, 2022]. Επιπλέον, η εργασία αναφέρει ότι η VRT συνδέεται με μειωμένες εισροές και υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης αζώτου, χωρίς να τεκμηριώνει γενικευμένη απώλεια απόδοσης σε σχέση με την ομοιόμορφη εφαρμογή [Medici & Canavari, 2022].

Επιπλέον, η ανάλυση του Schimmelpfennig βασίζεται σε δεδομένα USDA και αφορά αμερικανικές εκμεταλλεύσεις καλαμποκιού ως μια αποτύπωση της χρήσης τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Η πηγή δεν παρουσιάζει πειραματικές αποδόσεις από VRT αζώτου, αλλά περιγράφει τη VRT λίπανση ως τεχνολογία που συχνά συνδυάζεται με χάρτες απόδοσης, χαρτογράφηση εδάφους και χρήση αισθητήρων, τα οποία αποτελούν τη βάση για χωρικά διαφοροποιημένη κατανομή των εισροών εντός του αγρού (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Στο επίπεδο του παραγωγικού ευρήματος, η εργασία επισημαίνει ότι η VRT αζώτου αποτελεί υποσχόμενη προσέγγιση για την προσαρμογή της αζωτούχου λίπανσης στις χωρικές ανάγκες, χωρίς όμως να παραθέτει ειδικούς δείκτες απόδοσης για το καλαμπόκι (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Κατά συνέπεια, το τεκμηριωμένο συμπέρασμα της πηγής για το παραγωγικό πλαίσιο της VRT στο καλαμπόκι είναι περιορισμένο αλλά σαφές: η διαφοροποίηση των δόσεων εντός αγρού συνδέεται με την αξιοποίηση της χωρικής ετερογένειας μέσω δεδομένων απόδοσης και εδάφους, ενώ οι αποδόσεις δεν ποσοτικοποιούνται στο ίδιο το κείμενο (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Η πηγή επομένως υποστηρίζει κυρίως το λειτουργικό υπόβαθρο της VRT, χωρίς να επιτρέπει περαιτέρω ποσοτική εξαγωγή για παραγωγικά οφέλη (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019).

Η μετα-ανάλυση των Lan & Ban αποτελεί συνθετική αξιολόγηση 47 μελετών και δεν είναι ειδική αποκλειστικά για το καλαμπόκι, αν και τα συμπεράσματά της αφορούν ευρύτερα την εφαρμογή VRT αζώτου σε καλλιέργειες σιτηρών (Lan & Ban, 2025). Το βασικό ποσοτικό εύρημα που αναφέρεται είναι ότι η VRT αύξησε την αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (NUE)

κατά 15,1%, βάσει 47 μελετών (Lan & Ban, 2025). Η μετα-ανάλυση αποδίδει αυτή τη βελτίωση στη χωροχρονική βελτιστοποίηση του αζώτου και στη μείωση των απωλειών, μεταξύ άλλων μέσω περιορισμού της έκπλυσης. Παρότι το κείμενο έχει ευρύτερο καλλιεργητικό εύρος, το παραγωγικό συμπέρασμα είναι άμεσα σχετικό με το καλαμπόκι στο μέτρο που τεκμηριώνει ότι η VRT μπορεί να αυξάνει την αποδοτικότητα του αζώτου χωρίς να απαιτεί αντίστοιχη αύξηση εισροών (Lan & Ban, 2025). Η ερμηνεία της μετα-ανάλυσης είναι συνεπής με τα επιμέρους πειραματικά δεδομένα που δείχνουν διατήρηση της παραγωγής με πιο στοχευμένες δόσεις και, σε ορισμένες περιπτώσεις, βελτιωμένη απόκριση της καλλιέργειας (Lan & Ban, 2025).

Αν κάνουμε μια των σύνθεση παραγωγικών ευρημάτων συνολικά, οι πηγές συγκλίνουν σε τρία σταθερά παραγωγικά μοτίβα: **1)** η VRT αζώτου στο καλαμπόκι μπορεί να διατηρεί ή να βελτιώνει την απόδοση όταν οι δόσεις προσαρμόζονται στη χωρική ετερογένεια του αγρού, όπως φάνηκε στη Νότια Αφρική με θετικές αποκρίσεις σε συγκεκριμένες ζώνες και ιδίως σε έτη με ισχυρότερη παραγωγική ανταπόκριση (Ntsikane Maine et al., 2009). **2)** η VRT συνδέεται με βελτιωμένη αποδοτικότητα χρήσης αζώτου και μείωση των εισροών, ως άμεσο πλεονέκτημα σε συγκριτικές εφαρμογές με ομοιόμορφη λίπανση (Medici & Canavari, 2022, Lan & Ban, 2025). **3)** η αξιοποίηση χαρτών απόδοσης, εδαφικών χαρτών και δεδομένων αισθητήρων αποτελεί τον βασικό μηχανισμό με τον οποίο η VRT μετατρέπει τη χωρική μεταβλητότητα σε παραγωγικό πλεονέκτημα ή σε διατήρηση της παραγωγής με πιο στοχευμένη αζωτούχο διαχείριση (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019; Ntsikane Maine et al., 2009; Raffaele Casa et al., 2011).

3.3 Οικονομικές επιπτώσεις της χρήσης VRT – Σύνοψη μελετών

Η παραγωγική επίδοση της VRT αζώτου στο καλαμπόκι, όπως αποτυπώθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αποκτά πρακτική σημασία μόνο όταν συνδεθεί με το κόστος των εισροών, το καθαρό οικονομικό αποτέλεσμα και τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας σε επίπεδο εκμετάλλευσης. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα ενότητα εστιάζει αποκλειστικά στις οικονομικές επιπτώσεις της VRT, εξετάζοντας την εξοικονόμηση αζώτου, τις μεταβολές κόστους, το καθαρό κέρδος, το ROI όπου αυτό τεκμηριώνεται, και τη σχέση κόστους-οφέλους κάτω από διαφορετικά γεωγραφικά και τεχνολογικά πλαίσια. Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται οι οικονομικές επιπτώσεις που αποτυπώνονται από τα παραγωγικά ευρήματα των μελετών της προηγούμενης ενότητας.

Η μελέτη του Maine et al. πραγματοποιήθηκε σε αγρό 104 ha στο Rietgat της Νότιας Αφρικής και αξιολόγησε τη μεταβλητή δόση αζώτου σε καλαμπόκι με βάση ζώνες διαχείρισης που είχαν οριστεί από προηγούμενους χάρτες απόδοσης και από το αποτελεσματικό βάθος ριζοβολίας (Ntsikane Maine et al., 2009). Η οικονομική διάσταση της ανάλυσης συνδέθηκε με τη χωρική ετερογένεια του αγρού, καθώς το ερώτημα δεν ήταν μόνο αν η VRT επηρεάζει την απόδοση, αλλά αν οι εφαρμοζόμενες δόσεις προσεγγίζουν εκείνες που μεγιστοποιούν το κέρδος. Η εργασία ανέφερε ότι οι δόσεις αζώτου υπό VR διέφεραν ανά ζώνη και έτος, με τις ομοιόμορφες δόσεις SR να ανέρχονται σε 105 kg N/ ha το 2002–2003 και σε 102 kg N/ ha τα επόμενα δύο έτη, ενώ οι VR δόσεις κυμάνθηκαν από 69 έως 127 kg N/ ha ανά ζώνη και χρονιά (Ntsikane Maine et al., 2009). Ωστόσο, το βασικό οικονομικό συμπέρασμα δεν διατυπώθηκε ως απλή σύγκριση κόστους ανά ζώνη, αλλά ως συνολική αποτίμηση της τεχνολογίας: η μελέτη κατέληξε ότι οι VR N δόσεις που εφαρμόστηκαν ήταν κοντά σε εκείνες που θα μεγιστοποιούσαν το κέρδος και ότι, σε καθαρή οικονομική βάση, η VRT ήταν ελαφρώς πιο κερδοφόρα από την ομοιόμορφη εφαρμογή. Η οικονομική ερμηνεία είναι ότι η χωρικά διαφοροποιημένη διαχείριση αζώτου μπορούσε να αξιοποιήσει καλύτερα την εδαφική ετερογένεια του αγρού, με αποτέλεσμα μικρή αλλά θετική υπεροχή ως προς την κερδοφορία έναντι της SR εφαρμογής (Ntsikane Maine et al., 2009).

Η μελέτη του Casa et al. διεξήχθη σε εμπορικό αγρό περίπου 10 ha στη Μάσσαρέζε της Ρώμης και βασίστηκε σε χάρτες εδαφικών ιδιοτήτων και χάρτες απόδοσης για τη

διαμόρφωση τεσσάρων ομοιόμορφων ζωνών διαχείρισης. Η οικονομική αξιολόγηση επικεντρώθηκε στη σύγκριση μιας ομοιόμορφης δεύτερης επιφανειακής δόσης αζώτου 92 kg N /ha με μια μεταβλητή συνταγή 69 ή 92 kg N/ ha ανά ζώνη, μετά από κοινή πρώτη εφαρμογή 138 kg N /ha (Raffaele Casa et al., 2011). Από οικονομική άποψη, το πλέον άμεσο ποσοτικό εύρημα ήταν ότι η μεταβλητή στρατηγική θα οδηγούσε, εάν εφαρμοζόταν σε ολόκληρο το πεδίο, σε περιορισμένη εξοικονόμηση λιπάσματος, η οποία στο καλαμπόκι υπολογίστηκε σε περίπου 10 kg N/ ha ή σε 186 kg ουρίας συνολικά για το σύνολο του αγρού (Raffaele Casa et al., 2011). Παράλληλα, η εργασία αναφέρει ότι η χρήση του χάρτη συνταγογράφησης λιπάσματος δεν προκάλεσε σημαντικές διαφορές έναντι της ομοιόμορφης λίπανσης ως προς το οικονομικό αποτέλεσμα που αφορά το κόστος του αζώτου, γεγονός που υποδηλώνει ότι το άμεσο χρηματοοικονομικό πλεονέκτημα ήταν περιορισμένο υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες (Raffaele Casa et al., 2011). Η σύγκριση με την ομοιόμορφη λίπανση δείχνει ότι η VRT στην περίπτωση αυτή δεν παρήγαγε μετρήσιμη διαφορά στο οικονομικό ισοζύγιο, αλλά προσέφερε μικρή εξοικονόμηση εισροής (Raffaele Casa et al., 2011). Επομένως, το οικονομικό μήνυμα της μελέτης είναι συντηρητικό: η χωρική διαφοροποίηση των δόσεων μπορεί να μειώσει ελαφρά τη χρήση αζώτου, όμως χωρίς να τεκμηριώνεται σαφές καθαρό οικονομικό πλεονέκτημα έναντι της ομοιόμορφης εφαρμογής στο συγκεκριμένο παράδειγμα (Raffaele Casa et al., 2011).

Ως προς τη VRT αζώτου, η εργασία των Balafoutis et al ως ανασκόπηση υποστηρίζει ότι η μεταβλητή εφαρμογή θρεπτικών μπορεί να μειώσει τις εισροές αζώτου και να βελτιώσει την οικονομική απόδοση της εκμετάλλευσης, καθώς η λίπανση προσαρμόζεται στις τοπικές ανάγκες της καλλιέργειας μέσω χαρτών συνταγογράφησης λιπάσματος, φασματικών δεικτών βλάστησης, αισθητήρων εδάφους και άλλων σχετικών τεχνολογιών (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Για το καλαμπόκι, η ανασκόπηση παραθέτει δύο ενδεικτικά οικονομικοτεχνικά αποτελέσματα: στην κεντρική Maryland, η χρήση GreenSeeker συνδέθηκε με αύξηση της απόδοσης καλαμποκιού κατά 5% με 21% λιγότερο άζωτο, ενώ στη Virginia καταγράφηκε σχεδόν ισοδύναμη απόδοση με περίπου 27 kg/ha λιγότερο άζωτο. Παρότι το κείμενο δεν παραθέτει άμεσο καθαρό κέρδος ή ROI για αυτές τις περιπτώσεις, το οικονομικό συμπέρασμα είναι σαφές: η μείωση της εφαρμογής αζώτου χωρίς απώλεια παραγωγικότητας ενισχύει τη δυνητική κερδοφορία μέσω χαμηλότερου κόστους λιπάσματος (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Η ανασκόπηση υπογραμμίζει

επίσης ότι τα οφέλη της VRT γίνονται πιο εμφανή όταν η τεχνολογία συνδέεται με χαρτογραφικά δεδομένα ή δεδομένα αισθητήρων που επιτρέπουν καλύτερη στόχευση των εισροών (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Σε οικονομικούς όρους, η συνθετική εικόνα που προκύπτει είναι ότι η VRT αζώτου στο καλαμπόκι μπορεί να μειώσει το κόστος εισροών και να υποστηρίξει τη χρηματοοικονομική αποδοτικότητα, αλλά το μέγεθος του οφέλους εξαρτάται από το πλαίσιο εφαρμογής και δεν ποσοτικοποιείται ενιαία στην ανασκόπηση (Athanasios Balafoutis et al., 2017).

Η εργασία των Medici & Canavari αποτελεί ανασκόπηση 31 μελετών σε σιτηρά και συνεπώς τα οικονομικά συμπεράσματά της πρέπει να θεωρούνται συνθετικά και όχι ειδικά για μία μόνο καλλιέργεια ή μία μόνο εκμετάλλευση [Medici & Canavari, 2022]. Στο κείμενο, η VRT αζώτου παρουσιάζεται ως πρακτική που συνδέεται με υψηλότερη αποδοτικότητα χρήσης αζώτου και με πιο στοχευμένη διαχείριση εισροών, στοιχεία τα οποία αποτελούν τη βάση για οικονομικό όφελος μέσω περιορισμού της σπατάλης λιπάσματος. Η ανασκόπηση δεν παραθέτει συγκεκριμένους αριθμούς για καθαρό κέρδος ή ROI στο σώμα των επιτρεπτών δεδομένων, αλλά το μήνυμά της είναι ότι η οικονομική επίδραση της VRT γίνεται θετική όταν η τεχνολογία αξιοποιεί την ετερογένεια του αγρού και μειώνει τις περιττές δόσεις χωρίς να απαιτείται ισοδύναμη αύξηση εισροών (Medici & Canavari, 2022). Με άλλα λόγια, το οικονομικό κέρδος προκύπτει ως παράγωγο της καλύτερης στόχευσης και όχι ως αποτέλεσμα υψηλότερης έντασης χρήσης αζώτου. Σε αυτό το πλαίσιο, η VRT φαίνεται να είναι οικονομικά ευνοϊκότερη όταν οι συνθήκες του αγρού επιτρέπουν σαφή διαφοροποίηση δόσεων μεταξύ ζωνών, ενώ η χρηματοοικονομική της αξία μειώνεται όταν η χωρική μεταβλητότητα είναι περιορισμένη ή όταν η διαχείριση δεν μπορεί να μεταφράσει τη χωρική πληροφορία σε πρακτική εξοικονόμηση εισροών. Επομένως, η ανασκόπηση ενισχύει την άποψη ότι η οικονομική αποδοτικότητα της VRT εξαρτάται από την ποιότητα της χωρικής πληροφορίας και από την ικανότητα της τεχνολογίας να μετασχηματίζει αυτή την πληροφορία σε οικονομικά μετρήσιμη μείωση κόστους (Medici & Canavari, 2022).

Η ανάλυση του Schimmelpfennig βασίζεται σε δεδομένα USDA και αποτυπώνει τη χρήση τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας σε αμερικανικές εκμεταλλεύσεις καλαμποκιού ως συνθετική προσέγγιση (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Το κείμενο δεν παρέχει πειραματικά οικονομικά μεγέθη για VRT αζώτου, αλλά επισημαίνει ότι η VRT

λίπανση συνδέεται με χάρτες απόδοσης, χαρτογράφηση εδάφους και αισθητήρες, δηλαδή με τα εργαλεία που επιτρέπουν τη μείωση του κόστους μέσω στοχευμένης εφαρμογής (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Η οικονομική συμβολή της πηγής έγκειται κυρίως στο ότι περιγράφει τη VRT ως τμήμα ενός ευρύτερου τεχνολογικού συνόλου που μπορεί να υποστηρίξει την αποδοτικότερη χρήση εισροών, αν και δεν παρέχει άμεσο καθαρό κέρδος ή ROI για το καλαμπόκι (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Εφόσον η πηγή δεν αποδίδει ποσοτικοποιημένα οικονομικά αποτελέσματα στο επίπεδο της εκμετάλλευσης, το ασφαλές συμπέρασμα είναι ότι το οικονομικό εύρημα αφορά τη δυνητική εξοικονόμηση κόστους από τη χωρική διαφοροποίηση των δόσεων και όχι τεκμηριωμένο χρηματοοικονομικό αποτέλεσμα (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Ως εκ τούτου, η χρησιμότητα της εργασίας για την παρούσα ενότητα είναι κυρίως εννοιολογική: δείχνει ότι η οικονομική αξία της VRT στο καλαμπόκι στηρίζεται στην ενσωμάτωση χαρτών και αισθητήρων για τη βελτιωμένη στόχευση των εισροών, χωρίς όμως να επιτρέπει περαιτέρω ποσοτική αποτίμηση (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019).

Η μετα-ανάλυση των Lan & Ban είναι στην ουσία σύνθεση και δεν αφορά αποκλειστικά το καλαμπόκι, αλλά παρέχει ευρύτερα τεκμηριωμένα συμπεράσματα για την οικονομική επίδραση της VRT αζώτου σε καλλιέργειες σιτηρών. Στα δεδομένα που παίρνουμε δεν παρατίθενται αριθμητικές τιμές για ROI ή καθαρό κέρδος, αλλά η εργασία αναφέρει ότι η VRT βελτίωσε την αποδοτικότητα χρήσης αζώτου κατά 15,1% βάσει 47 μελετών (Lan & Ban, 2025). Αν και η βελτίωση αυτή είναι αγρονομικός δείκτης, το οικονομικό της νόημα είναι ότι η καλύτερη αξιοποίηση του αζώτου μειώνει την ανάγκη για περιττές δαπάνες εισροών και στηρίζει την οικονομική αποδοτικότητα της εφαρμογής. Η μετα-ανάλυση αποδίδει την επίδραση αυτή στη χωροχρονική βελτιστοποίηση της δόσης και στη μείωση των απωλειών, γεγονός που υποδηλώνει ότι το οικονομικό πλεονέκτημα της VRT προκύπτει όταν η τεχνολογία περιορίζει την υπερλίπανση και βελτιώνει τη στόχευση (Lan & Ban, 2025). Επειδή η πηγή δεν δίνει άμεσα οικονομικούς δείκτες για το καλαμπόκι, η συμβολή της στην παρούσα ενότητα είναι συνθετική: ενισχύει το συμπέρασμα ότι η VRT

μπορεί να είναι οικονομικά ευνοϊκή μέσω της αποδοτικότερης χρήσης αζώτου, αλλά χωρίς να επιτρέπει ειδική εκτίμηση κέρδους για το καλαμπόκι.

Συνολικά, οι επιτρεπτές πηγές συγκλίνουν στο ότι η οικονομική σκοπιμότητα της VRT αζώτου στο καλαμπόκι εξαρτάται πρωτίστως από την ικανότητά της να μειώνει ή να ανακατανέμει αποτελεσματικότερα τις δόσεις αζώτου σε χωρικά ετερογενή εδάφη (Athanasios Balafoutis et al., 2017; James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019; Ntsikane Maine et al., 2009; Raffaele Casa et al., 2011). Στη Νότια Αφρική, η VRT ήταν ελαφρώς πιο κερδοφόρα από την ομοιόμορφη εφαρμογή και οι εφαρμοζόμενες δόσεις προσέγγιζαν τα επίπεδα που θα μεγιστοποιούσαν το κέρδος, αν και τα οφέλη μεταβάλλονταν από έτος σε έτος (Ntsikane Maine et al., 2009). Στην Ιταλία, η VRT παρήγαγε περιορισμένη εξοικονόμηση αζώτου περίπου 10 kg N/ ha ή 186 kg ουρίας συνολικά, χωρίς σημαντική διαφορά στο οικονομικό αποτέλεσμα πάνω από το κόστος του αζώτου (Raffaele Casa et al., 2011). Οι ανασκοπικές πηγές ενισχύουν το ίδιο μοτίβο: η VRT και οι σχετικές τεχνολογίες αισθητήρων μπορούν να μειώσουν το κόστος εισροών και να βελτιώσουν την οικονομική αποδοτικότητα όταν η χωρική πληροφορία μεταφράζεται σε στοχευμένη εφαρμογή (Lan & Ban, 2025). Ωστόσο, το οικονομικό αποτέλεσμα δεν είναι ομοιόμορφο. Εξαρτάται από το μέγεθος και τη δομή της εκμετάλλευσης, τη διαθεσιμότητα χαρτών και αισθητήρων, και τον βαθμό χωρικής ετερογένειας που μπορεί να αξιοποιηθεί πρακτικά (Athanasios Balafoutis et al., 2017; James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019; Ntsikane Maine et al., 2009). Συνεπώς, το συνολικό οικονομικό μήνυμα της βιβλιογραφίας είναι ότι η VRT αζώτου στο καλαμπόκι δεν εγγυάται αυτόματα υψηλή κερδοφορία, αλλά μπορεί να προσφέρει μετρήσιμο όφελος όταν εφαρμόζεται σε αγρούς με επαρκή εσωτερική μεταβλητότητα και όταν οι δόσεις προσαρμόζονται με βάση αξιόπιστα χωρικά δεδομένα.

4. Τηλεπισκόπηση και UAV

4.1 Τεχνολογίες και εφαρμογές

Η Τηλεπισκόπηση συνιστά βασικό μηχανισμό απόκτησης και ανάλυσης χωρικά αναφερόμενων δεδομένων από απόσταση και έχει καταστεί κεντρικό εργαλείο για την παρακολούθηση της ετερογένειας των αγρών, την έγκαιρη διάγνωση της κατάστασης της κόμης και την υποστήριξη τεκμηριωμένων αποφάσεων διαχείρισης. Στη Γεωργία Ακριβείας, η εξελικτική αυτή διαδρομή έχει συνδεθεί με την ενσωμάτωση ποικίλων πλατφορμών και αισθητήρων, οι οποίοι επιτρέπουν την αποτύπωση της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας της καλλιέργειας σε πολύ λεπτότερη κλίμακα από τις παραδοσιακές προσεγγίσεις (David J. Mulla, 2012). Στο εννοιολογικό αυτό πλαίσιο, η τηλεπισκόπηση δεν λειτουργεί απλώς ως μέσο παρατήρησης, αλλά ως πληροφοριακή υποδομή για τη μετάβαση από τη γενικευμένη διαχείριση προς τη διαφοροποιημένη, σημειακά τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων (Athanasios Balafoutis et al., 2017; David J. Mulla, 2012). Ιστορικά, οι εφαρμογές Τηλεπισκόπησης στη Γεωργία Ακριβείας ξεκίνησαν με δορυφορικά συστήματα και αερομεταφερόμενες πλατφόρμες, τα οποία αρχικά βασίζονταν σε περιορισμένο αριθμό φασματικών ζωνών και σχετικά μικρή χωρική ανάλυση. Η προοδευτική μείωση του φασματικού εύρους, σε συνδυασμό με τη βελτίωση της χωρικής ανάλυσης και της συχνότητας λήψης δεδομένων, επέτρεψε την αξιολόγηση ιδιοτήτων εδάφους και καλλιέργειας με πολύ μεγαλύτερη λεπτομέρεια (David J. Mulla, 2012). Ο Mulla επισημαίνει ότι η εξέλιξη αυτή από τα δορυφορικά προς τα πιο ευέλικτα συστήματα οδήγησε σε εικόνες από εκατοντάδες μέτρα έως και υπομετρική ακρίβεια, ενώ η χρονική συχνότητα παρατήρησης βελτιώθηκε ώστε να υποστηρίζει σχεδόν πραγματικού χρόνου παρακολούθηση. Παράλληλα, η εμφάνιση UAV ως πλατφορμών Τηλεπισκόπησης ενίσχυσε την επιχειρησιακή ευελιξία, επιτρέποντας επαναλαμβανόμενη συλλογή δεδομένων σε επίπεδο αγρού με μικρότερες απαιτήσεις σε σχέση με τις παραδοσιακές αεροπορικές αποστολές (David J. Mulla, 2012). Στο επίπεδο των UAV, η βιβλιογραφία αναδεικνύει ιδιαίτερα τη χρήση RGB καμερών για τη συλλογή υψηλής ανάλυσης εικόνων και την αποτύπωση της οπτικής κατάστασης της κόμης (Meina Zhang et al., 2020). Στη μελέτη των Zhang et al., οι εικόνες αποκτήθηκαν από UAV σε τρεις φάσεις ανάπτυξης, στη συνέχεια συγκολλήθηκαν σε ενιαία μωσαϊκά και από αυτές εξήχθη ο δείκτης Excess Green

(ExG) για τη μοντελοποίηση της καλλιέργειας. Το παράδειγμα αυτό είναι τεχνολογικά ενδεικτικό, διότι καταδεικνύει πώς η εναέρια απεικόνιση από UAV επιτρέπει την εξαγωγή χωρικών προτύπων φυτικής κάλυψης, χρωματικής διαφοροποίησης και μεταβλητότητας της κόμης σε κλίμακες κατάλληλες για διαχείριση εντός αγρού (Meina Zhang et al., 2020). Παράλληλα, η ίδια πηγή αναφέρει ότι το ExG εμφάνισε σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ επιπέδων αζώτου και σταδίων ανάπτυξης, γεγονός που υποδηλώνει τη δυνατότητα των RGB εικόνων να λειτουργούν ως οπτικοί δείκτες της φυτικής κατάστασης (Meina Zhang et al., 2020). Η τεχνολογική σημασία των UAV ενισχύεται περαιτέρω από το γεγονός ότι τα δεδομένα τους μπορούν να ενσωματωθούν σε ροές επεξεργασίας που περιλαμβάνουν συρραφή, γεωαναφορά και στατιστική μοντελοποίηση, ώστε η οπτική πληροφορία να μετατραπεί σε χωρικά συνεπή πληροφορία διαχείρισης (Meina Zhang et al., 2020). Η Wang et al. [2025] επισημαίνουν, σε συνθετικό επίπεδο, ότι τα ψηφιακά εργαλεία στη Γεωργία Ακριβείας περιλαμβάνουν UAV παρατήρηση, αισθητήρες εδάφους και μεταβλητή δόση λιπάσματος, συγκροτώντας ένα πολυτεχνολογικό περιβάλλον συλλογής και αξιοποίησης δεδομένων (Emine Yilmaz, 2025). Στο πλαίσιο αυτό, τα UAV δεν αποτελούν απομονωμένα συστήματα απεικόνισης, αλλά έναν από τους κόμβους ενός δικτύου τεχνολογιών που διευκολύνουν την ανάλυση της χωρικής ετερογένειας και τη χαρτογραφική υποστήριξη της διαχείρισης (Emine Yilmaz, 2025; Meina Zhang et al., 2020). Παράλληλα με τα UAV, οι ενεργοί αισθητήρες κόμης και οι δείκτες βλάστησης έχουν αναδειχθεί σε κρίσιμα εργαλεία για τη διάγνωση της κατάστασης αζώτου και την υποστήριξη διαχειριστικών αποφάσεων. Η λειτουργική τους αξία έγκειται στο ότι μετατρέπουν τη φασματική απόκριση της καλλιέργειας σε ποσοτικοποιημένη ένδειξη θρεπτικής κατάστασης, επιτρέποντας την υποστήριξη αποφάσεων για διαφοροποιημένη εφαρμογή αζώτου (David J. Mulla, 2012). Στο ίδιο πλαίσιο, η χρήση δεικτών όπως ο NDVI και ο RVI εντάσσεται στην ευρύτερη λογική των φασματικών δεικτών βλάστησης που έχουν αναπτυχθεί για τη μέτρηση της φυτικής κατάστασης και της καταπόνησης λόγω έλλειψης θρεπτικών στοιχείων. Η τεχνολογική τους λειτουργία δεν εξαντλείται στην απλή απεικόνιση, αλλά συνίσταται στη μετατροπή οπτικών ή φασματικών διαφορών σε επιχειρησιακά αξιοποιήσιμες παραμέτρους διαχείρισης (David J. Mulla, 2012). Η σύγχρονη αρχιτεκτονική λήψης αποφάσεων στη Γεωργία Ακριβείας συγκροτείται, επομένως, από το συνδυασμό τηλεπισκόπησης, UAV, ενεργών αισθητήρων κόμης, μηχανικής μάθησης και μοντέλων καλλιέργειας (Athanasios

Balafoutis et al., 2017; David J. Mulla, 2012; Emine Yilmaz, 2025). Η ανασκόπηση των Balafoutis et al. υπογραμμίζει ότι οι τεχνολογίες Γεωργίας Ακριβείας, συμπεριλαμβανομένης της VRT, βασίζονται σε χάρτες συνταγογράφησης, αισθητήρες και συστήματα επιτόπιας πληροφόρησης που στοχεύουν στην προσαρμογή των εισροών στις τοπικές ανάγκες (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Αντίστοιχα, η Wang et al. [2025] αναδεικνύει ότι οι ψηφιακές τεχνολογίες, όπως οι αισθητήρες εδάφους, η χρήση drone και VRT, λειτουργούν σε συνδυασμό με αναλυτικές ροές δεδομένων που υποστηρίζουν τη διαχείριση (Emine Yilmaz, 2025). Στο πλαίσιο αυτό, η μηχανική μάθηση και τα μοντέλα καλλιέργειας δεν πρέπει να θεωρηθούν ως ανεξάρτητες οντότητες, αλλά ως ερμηνευτικά και προγνωστικά στάδια που αξιοποιούν τα δεδομένα τηλεπισκόπησης για να μετασχηματίσουν την παρατήρηση σε απόφαση (David J. Mulla, 2012; Emine Yilmaz, 2025). Η συνολική εικόνα της βιβλιογραφίας υποδηλώνει ότι η τηλεπισκόπηση και τα UAV αποτελούν πλέον δομικά στοιχεία της Γεωργίας Ακριβείας, επειδή συνδυάζουν υψηλή χωρική λεπτομέρεια, επαναληψιμότητα και δυνατότητα ολοκλήρωσης με συστήματα ανάλυσης και λήψης αποφάσεων (Athanasios Balafoutis et al., 2017; David J. Mulla, 2012; Emine Yilmaz, 2025; Meina Zhang et al., 2020). Η εξέλιξη από τις δορυφορικές και αερομεταφερόμενες πλατφόρμες προς ευέλικτες εναέριες λύσεις και η παράλληλη πρόοδος των αισθητήρων έχουν συγκροτήσει ένα τεχνολογικό οικοσύστημα στο οποίο η χωρική πληροφορία μετασχηματίζεται σε διαχειριστική δράση (David J. Mulla, 2012). Στη σύγχρονη πρακτική, η προστιθέμενη αξία αυτών των τεχνολογιών έγκειται ακριβώς στη διασύνδεσή τους με αλγοριθμικά και μοντελοποιητικά εργαλεία, ώστε η παρακολούθηση της καλλιέργειας να καταλήγει σε τεκμηριωμένη, χωρικά διαφοροποιημένη υποστήριξη αποφάσεων (Athanasios Balafoutis et al., 2017; Emine Yilmaz, 2025).

4.2 Παραγωγικά ευρήματα

Σε παραγωγικό επίπεδο, η συμβολή της Τηλεπισκόπησης και των UAV έγκειται κυρίως στη δυνατότητα να συσχετίζονται φασματικοί ή οπτικοί δείκτες με τη βιομάζα, την απόδοση και την θρεπτική κατάσταση, ώστε η διαχείριση να βασίζεται σε χωρικά διαφοροποιημένη πληροφορία και όχι σε ομοιόμορφες παραδοχές (Meina Zhang et al., 2020; David J. Mulla, 2012). Οι τρεις πηγές της παρούσας ενότητας συγκροτούν ένα ολοκληρωμένο και συνεκτικό πλαίσιο δηλαδή μια εμπειρική μελέτη UAV-RGB για εκτίμηση απόδοσης, μια ανασκόπηση για τις παραγωγικές εφαρμογές της Τηλεπισκόπησης στη Γεωργία Ακριβείας και μια πρόσφατη πολυετή μελέτη που συνδέει την πληροφορία από δορυφόρο και από αισθητήρες με τη φυτική βιομάζα και την περιεκτικότητα σε άζωτο.

Η μελέτη των Zhang et al. το 2016 διερεύνησε την εκτίμηση της απόδοσης καλαμποκιού και την αποτύπωση της επίδρασης της μεταβλητής δόσης αζώτου μέσω UAV- RGB απεικόνισης σε αγρό 27 ha κοντά στο Centralia στην πολιτεία Missouri των ΗΠΑ και χρήση υβριδίου καλαμποκιού Golden Harvest G14R38-3000 GT. Οι εικόνες συλλέχθηκαν σε τρία στάδια ανάπτυξης, ενώ το σύνολο των διαδοχικών λήψεων συγκροτήθηκε σε ενιαία μωσαϊκά και από αυτά έγινε εξαγωγή του χρωματικού χαρακτηριστικού Excess Green (ExG) για τη μοντελοποίηση της απόδοσης (Meina Zhang et al., 2020). Η επιλογή του ExG είναι παραγωγικά σημαντική, επειδή το χαρακτηριστικό αυτό αποτυπώνει διαφορές στο πράσινο της κόμης και συνεπώς συνδέεται με την οπτική κατάσταση της φυτείας, η οποία επηρεάζει την παραγωγικότητα (Meina Zhang et al., 2020).

Η πειραματική διάταξη περιλάμβανε μεταβλητές εφαρμογές αζώτου στις ζώνες διαφορετικής θρεπτικής κατάστασης, με σκοπό να αξιολογηθεί αν η εικόνα UAV μπορεί να διακρίνει την ανταπόκριση της καλλιέργειας σε διαφορετικά επίπεδα αζώτου. Το άρθρο αναφέρει ότι όλες οι γραμμικές παλινδρομήσεις μεταξύ ExG και απόδοσης ήταν στατιστικά σημαντικές, γεγονός που τεκμηριώνει ότι το εξαγόμενο οπτικό χαρακτηριστικό είχε πραγματική προγνωστική αξία για την απόδοση του καλαμποκιού (Meina Zhang et al., 2020).

Από παραγωγική άποψη, το βασικό αποτέλεσμα είναι ότι το σύστημα UAV- RGB παρείχε χρήσιμη πληροφορία για την εκτίμηση της απόδοσης και την αποτύπωση της

διαφοροποίησης της καλλιέργειας υπό διαφορετικά επίπεδα αζώτου. Το ExG ήταν διαφορετικό μεταξύ επιπέδων αζώτου και σταδίων ανάπτυξης, με τις διαφορές αυτές να είναι εντονότερες στα πρώιμα στάδια και να μειώνονται στο R6 στάδιο, όπου η χρωματική μετάβαση της καλλιέργειας από το κίτρινο αντανakλούσε τη φυσιολογική ωρίμανση. Αυτό σημαίνει ότι η πληροφορία που πάρθηκε με Τηλεπισκόπηση δεν λειτούργησε απλώς ως εικόνα αλλά ως δείκτης της κατάστασης του φυτού σε σχέση με την αζωτούχο διαχείριση και τελικά του παραγωγικού δυναμικού (Zhang et al., 2020). Οι συγγραφείς καταλήγουν ότι το χαμηλού κόστους UAV- RGB σύστημα μπορεί να υποστηρίξει τη διαχείριση του αγρού παρέχοντας αξιόπιστη πληροφορία για την απόδοση, με σαφή παραγωγική σημασία για τη χωρικά διαφοροποιημένη παρακολούθηση του καλαμποκιού.

Η ανασκόπηση του Mulla δεν παρουσιάζει πρωτογενή πειραματικά δεδομένα για το καλαμπόκι, αλλά συνοψίζει την εξέλιξη και τη συμβολή της Τηλεπισκόπησης στη Γεωργία Ακριβείας, εστιάζοντας σε εκείνες τις εφαρμογές που είναι άμεσα σχετικές με την παραγωγική αξιολόγηση της καλλιέργειας. Για το καλαμπόκι και συναφείς καλλιέργειες, το κείμενο υπογραμμίζει ότι η Τηλεπισκόπηση επιτρέπει την σε πραγματικό χρόνο την παρακολούθηση της κατάστασης της κόμης, της χωρικής μεταβλητότητας του αγρού και της θρεπτικής κατάστασης, στοιχείων δηλαδή που είναι αναγκαία για την εκτίμηση της παραγωγικότητας (David J. Mulla, 2012).

Στο πλαίσιο της αζωτούχου θρέψης, η ανασκόπηση περιγράφει τη χρήση υπερφασματικών δεικτών, GreenSeeker, χλωροφυλλόμετρων, ραδιόμετρων τοποθετημένων σε βραχίονα, αγρογλυφικών και αλγόριθμων δεικτών απόκρισης για την υποστήριξη διαχείρισης του αζώτου. Η σημασία τους για την παραγωγικότητα βασίζεται στο γεγονός ότι οι δείκτες αυτοί μετατρέπουν τη φασματική απόκριση της καλλιέργειας σε πληροφορία σχετική με την θρεπτική επάρκεια της φυτείας, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί για την καλύτερη αξιοποίηση των εισροών σύμφωνα πάντα με τις ανάγκες της (David J. Mulla, 2012).

Από την οπτική της παραγωγικότητας, το κρίσιμο συμπέρασμα της ανασκόπησης είναι ότι η Τηλεπισκόπηση έχει εξελιχθεί σε εργαλείο που επιτρέπει την παρακολούθηση της χωρικής μεταβλητότητας του αγρού με ακρίβεια από εκατοντάδες μέτρα ως και κάτω του μέτρου επίπεδα, γεγονός που βελτιώνει την ικανότητα εντοπισμού περιοχών με διαφορετικό παραγωγικό δυναμικό. Η ανασκόπηση δεν παρουσιάζει αριθμητικά αποτελέσματα, αλλά

αποδεικνύει ότι τα συστήματα αυτά υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων για αζωτούχο λίπανση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, η οποία αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση ή βελτίωση της παραγωγικότητας (David J. Mulla, 2012). Επιπλέον, η δυνατότητα συλλογής δεδομένων σε πολλές χρονικές στιγμές ενισχύει την εκτίμηση της εξέλιξης της καλλιέργειας, επιτρέποντας τη σύγκριση σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης και την καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που διαμορφώνουν την τελική απόδοση.

Έτσι, παρόλο που η πηγή είναι μια σύνθεση, θεμελιώνει ότι η Τηλεπισκόπηση εξυπηρετεί την παραγωγική αξιολόγηση μέσω της εκτίμησης θρεπτικής επάρκειας και της παρακολούθησης της ετερογένειας μέσα στον αγρό που σχετίζεται με την απόδοση (David J. Mulla, 2012).

Η μελέτη των Wang et al. αποτελεί την πιο πρόσφατη και παραγωγικά εκτενή πηγή της ενότητας αυτής, καθώς γίνεται αξιολόγηση πολυετούς και σε ευρύτερα γεωγραφικά πλαίσια έρευνας με στόχο την ανάπτυξη μια καινοτόμου στρατηγικής διαχείρισης αζώτου ακριβείας (Precision Nitrogen Management – PNM) για το καλαμπόκι. Το πείραμα είχε διάρκεια πέντε έτη και πραγματοποιήθηκε σε τέσσερις γεωγραφικές τοποθεσίες στην επαρχία Jilin της Βορειοανατολικής Κίνας, συνδυάζοντας ενεργούς αισθητήρες κόμης, μοντέλα προσομοίωσης καλλιέργειας και αλγόριθμους μηχανικής μάθησης. Χρησιμοποιήθηκε η ποικιλία καλαμποκιού Liangyu 66 με δόσεις αζώτου από 0 έως 300 kg N/ha και π ενώ ενσωμάτωσε αποστάσεις φύτευσης πυκνότητες φύτευσης από 55.000 έως 85.000 φυτά/ha. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας GreenSeeker για τη συλλογή δεδομένων Τηλεπισκόπησης στο στάδιο V8-V9 του καλαμποκιού. Στο σύνολο των αγρών η διαχείριση αζώτου έγινε με σκοπό την εκπαίδευση μοντέλων που συνδέουν την υπέργεια φυτική βιομάζα (AGB), την πρόσληψη του αζώτου από το φυτό (PNU). Η πρωτοτυπία της μελέτης συνίσταται στο ότι τα δεδομένα πεδίου χρησιμοποιήθηκαν όχι μόνο για την αποτίμηση της κατάστασης της φυτείας, αλλά και για τη σύγκριση διαφορετικών προγνωστικών σχημάτων δηλαδή αλγόριθμων ML (Random Forest, LASSO, SVR) ως προς την ακρίβεια και την αγρονομική τους αξία.

Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι η ενσωμάτωση του μοντέλου RF με μοντέλο προσομοίωσης καλλιέργειας δημιούργησε τη στρατηγική MSM-PNM, η οποία προέβλεψε την οικονομικά βέλτιστη δόση επιφανειακής λίπανσης (EOSN) με υψηλή ακρίβεια.

Στο αγρονομικό σκέλος, η μελέτη αναφέρει ότι οι στρατηγική διαχείρισης ακριβείας (PM) συγκρίθηκε με την πρακτική των αγροτών (FP, σταθερή δόση 250 kg N/ha) και τη βέλτιστη περιφερειακή διαχείριση (ROM, σταθερή δόση 180 kg N/ha) και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η PM διατήρησε την υψηλή απόδοση στα ίδια επίπεδα με την FP. Το 2018 η απόδοση ήταν 13,6 t/ha (PM) έναντι 13,74 t/ha (FP). Το 2019 ήταν 11,49 t/ha (PM) έναντι 11,25 t/ha (FP). Αντίθετα η ROM μείωσε την απόδοση κατά 15% το 2019. Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα αζώτου η PM μείωσε τις συνολικές δόσεις αζώτου κατά 6-16% σε σχέση με την FP γεγονός που ανάγεται σε αύξηση της μερικής παραγωγικότητας συντελεστή (PFP) κατά 8-18% και της αγρονομικής αποδοτικότητας (AE) κατά 9-17%. Αποδεικνύεται ότι μέσω της ακριβικής διαχείρισης η τελική απόδοση παρέμεινε υψηλή ενώ η χρήση αζώτου μειώθηκε.

Συνολικά οι πηγές συγκλίνουν σε ένα σαφές παραγωγικό μοτίβο: η Τηλεπισκόπηση και τα UAV επιτρέπουν την ανίχνευση της χωρικής ετερογένειας του καλαμποκιού και τη μετατροπή της σε μετρήσιμη πληροφορία για την απόδοση, τη βιομάζα και την κατάσταση του αζώτου (Meina Zhang et al., 2020; David J. Mulla, 2012; Wang et al., 2025). Η μελέτη των Zhang et al. έδειξε ότι ένα απλό χρωματικό χαρακτηριστικό, το ExG, μπορεί να συσχετιστεί στατιστικά σημαντικά με την απόδοση και να αποτυπώσει διαφορές μεταξύ επιπέδων αζώτου και σταδίων ανάπτυξης, έστω και με περιορισμένη επεξηγηματική ισχύ (Meina Zhang et al., 2020). Η ανασκόπηση του Mulla απόδειξε ότι η Τηλεπισκόπηση σε πραγματικό χρόνο την παρακολούθηση της θρεπτικής κατάστασης και την χωρική μεταβλητότητα εντός του αγρού, ενισχύοντας την παραγωγική αξιολόγηση μέσω δεικτών βλάστησης και φασματικών προσεγγίσεων (David J. Mulla, 2012). Η μελέτη των Wang et al. έδειξε ότι η ενσωμάτωση δεδομένων και μοντέλων μπορεί να βελτιώσει την εκτίμηση της βιομάζας, τη μείωση της χρήσης αζωτούχου λιπάσματος, ενώ διατηρεί υψηλές αποδόσεις και βελτιώνει δείκτες αποδοτικότητας (Wang et al., 2025).

4.3 Οικονομικές επιπτώσεις

Η ενσωμάτωση της τηλεπισκόπησης και των UAV στη διαχείριση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων συνεπάγεται συγκεκριμένες οικονομικές απαιτήσεις, αλλά ταυτόχρονα προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες για τη βελτίωση της κερδοφορίας. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η χρήση τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας έχει τη δυνατότητα να επιδράσει θετικά στα οικονομικά της εκμετάλλευσης, καθώς επιτρέπει την επίτευξη ίσων ή υψηλότερων αποδόσεων με χαμηλότερο κόστος παραγωγής σε σύγκριση με τις συμβατικές πρακτικές (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Η χρήση συστημάτων UAV χαμηλού κόστους, εξοπλισμένων με κάμερες RGB, αναδεικνύεται ως μια πρακτική και οικονομικά προσιτή λύση για τη συλλογή πληροφοριών διαχείρισης εντός του αγρού, παρέχοντας δεδομένα που μπορούν να καθοδηγήσουν τη λήψη αποφάσεων (Meina Zhang et al., 2020).

Η μελέτη των Zhang et al. (2020) αναδεικνύει μια κρίσιμη οικονομική διάσταση της σύγχρονης γεωργίας ακριβείας, εστιάζοντας στη χρήση συστημάτων απεικόνισης χαμηλού κόστους για την παρακολούθηση του καλαμποκιού (Meina Zhang et al., 2020). Ιστορικά, η απόκτηση εναέριων δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης απαιτούσε σημαντικές επενδύσεις σε εξειδικευμένο εξοπλισμό, όπως οι πολυφασματικοί και υπερφασματικοί αισθητήρες, το υψηλό κόστος των οποίων αποτελούσε συχνά αποτρεπτικό παράγοντα για την ευρεία υιοθέτησή τους από τους παραγωγούς. Αντιθέτως, η συγκεκριμένη έρευνα αξιολόγησε την απόδοση μιας εμπορικής, καταναλωτικού τύπου κάμερας RGB προσαρτημένης σε ένα προσιτό μη επανδρωμένο αεροσκάφος (Meina Zhang et al., 2020).

Από οικονομική άποψη, η προσέγγιση αυτή μεταβάλλει ριζικά το ισοζύγιο κόστους-οφέλους. Η χρήση RGB αισθητήρων κατέστησε πιο προσιτή την πρόσβαση στην τεχνολογία, καθώς μειώνει δραστικά το αρχικό κόστος επένδυσης σε σύγκριση με τα παραδοσιακά πολυφασματικά συστήματα, καθιστώντας την εναέρια παρακολούθηση οικονομικά προσιτή ακόμη και για μικρότερης κλίμακας εκμεταλλεύσεις (Meina Zhang et al., 2020). Παρά το χαμηλό κόστος κτήσης, το σύστημα απέδειξε την ικανότητά του να παρέχει αξιόπιστη πληροφορία, επιτυγχάνοντας εκτίμηση της απόδοσης του καλαμποκιού με μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα που κυμάνθηκε από 6,2% έως 15,1% (Meina Zhang et al., 2020).

Το γεγονός ότι ένας οικονομικά προσιτός εξοπλισμός μπορεί να εξάγει δείκτες, όπως το Excess Green (ExG), ικανούς να αξιολογήσουν την επίδραση της μεταβλητής δόσης αζώτου στην ανάπτυξη της καλλιέργειας, υποδηλώνει ότι η οικονομική βιωσιμότητα δεν απαιτεί απαραίτητα τον πιο ακριβό τεχνολογικό εξοπλισμό (Meina Zhang et al., 2020). Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τα συστήματα UAV χαμηλού κόστους μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες διαχείρισης του αγρού, προσφέροντας μια οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση που εξισορροπεί την ανάγκη για ακριβή χωρικά δεδομένα με τους αυστηρούς προϋπολογισμούς των γεωργικών εκμεταλλεύσεων (Meina Zhang et al., 2020).

Η ανασκόπηση του Mulla (2013) προσφέρει μια διαχρονική προοπτική της οικονομικής εξέλιξης της Τηλεπισκόπησης στη γεωργία ακριβείας κατά τη διάρκεια μιας εικοσιπενταετίας, αναδεικνύοντας πώς οι τεχνολογικές μεταβάσεις επηρέασαν το κόστος και την προσβασιμότητα των δεδομένων (David J. Mulla, 2012). Στα πρώτα στάδια εφαρμογής της, η Τηλεπισκόπηση βασιζόταν σχεδόν αποκλειστικά σε δορυφορικές εικόνες, οι οποίες, πέραν της χαμηλής χωρικής τους ανάλυσης, χαρακτηρίζονταν από ιδιαίτερα υψηλό κόστος πρόσκτησης και επεξεργασίας (David J. Mulla, 2012). Το ιστορικά υψηλό κόστος των δορυφορικών δεδομένων, σε συνδυασμό με πρακτικά εμπόδια όπως η νεφοκάλυψη και οι απαιτήσεις για πολύπλοκες ατμοσφαιρικές διορθώσεις, λειτούργησε ως σημαντικός ανασταλτικός παράγοντας για την ευρεία ενσωμάτωση της τεχνολογίας στο επίπεδο της εμπορικής γεωργικής εκμετάλλευσης (David J. Mulla, 2012).

Ωστόσο, η σταδιακή εξέλιξη οδήγησε σε μια σαφή στροφή προς πιο οικονομικά αποδοτικές και ευέλικτες λύσεις. Η ανάπτυξη αισθητήρων υψηλής ανάλυσης, η εμφάνιση των UAV και η διάδοση των εγγύς αισθητήρων μείωσαν δραστικά το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης πληροφορίας (David J. Mulla, 2012). Αυτή η ευρεία χρήση των δεδομένων επέτρεψε τη συλλογή εικόνων με υπομετρική ακρίβεια και υψηλή χρονική συχνότητα, καθιστώντας εφικτή την παρακολούθηση της καλλιέργειας σε σχεδόν πραγματικό χρόνο (David J. Mulla, 2012).

Από οικονομική σκοπιά, η μετάβαση αυτή είναι κρίσιμη, καθώς κατέστησε βιώσιμη τη διαχείριση ειδικά για κάθε θέση. Η ικανότητα των σύγχρονων, προσιτών αισθητήρων να ανιχνεύουν τις ελλείψεις αζώτου και να καθοδηγούν τη μεταβλητή λίπανση εντός της

καλλιεργητικής περιόδου δημιουργεί άμεσα οικονομικά οφέλη (David J. Mulla, 2012). Όπως επισημαίνεται, οι εφαρμογές άζωτου που βασίζονται σε αισθητήρες υπερτερούν οικονομικά έναντι των σταθερών δόσεων που επιλέγουν εμπειρικά οι παραγωγοί, καθώς βελτιστοποιούν τη χρήση των εισροών και μεγιστοποιούν τις οικονομικές αποδόσεις της καλλιέργειας, μετατρέποντας την τηλεπισκόπηση από ένα ακριβό ερευνητικό εργαλείο σε μια κερδοφόρα γεωργική επένδυση (David J. Mulla, 2012).

Η μελέτη των Wang et al. (2025) παρέχει ρητά και ποσοτικοποιημένα οικονομικά δεδομένα συγκρίνοντας διαφορετικές στρατηγικές άζωτούχου λίπανσης στο καλαμπόκι, αναδεικνύοντας την καθαρή οικονομική αξία της τηλεπισκόπησης και των αισθητήρων. Η έρευνα εστίασε στην οικονομική αξιολόγηση της Διαχείρισης Ακριβείας (Precision Management - PM) σε αντιπαραβολή με τη Βέλτιστη Περιφερειακή Διαχείριση (Regional Optimal Management - ROM) και τις συμβατικές πρακτικές των παραγωγών (Wang et al., 2025).

Το πλέον εντυπωσιακό οικονομικό εύρημα της μελέτης είναι ότι η Διαχείριση Ακριβείας (PM) κατόρθωσε να διατηρήσει σταθερό το Οριακό Κέρδος της εκμετάλλευσης, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα σημαντική εξοικονόμηση στο κόστος των λιπασμάτων, καθώς απαίτησε 6% έως 16% λιγότερο άζωτο σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους (Wang et al., 2025). Η μείωση αυτή των εισροών μεταφράζεται σε άμεση συμπίεση του λειτουργικού κόστους, χωρίς να θυσιάζεται η τελική πρόσοδος. Στον αντίποδα, η εφαρμογή της Βέλτιστης Περιφερειακής Διαχείρισης (ROM), η οποία βασίζεται σε γενικευμένες συστάσεις και όχι σε δεδομένα αισθητήρων πραγματικού χρόνου, οδήγησε σε μείωση του Οριακού Κέρδους (MR) κατά 14%, κυρίως εξαιτίας της απώλειας παραγωγής που προκλήθηκε από την αδυναμία προσαρμογής στις τοπικές χωρικές ανάγκες του αγρού (Wang et al., 2025).

Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν την οικονομική βιωσιμότητα της ενσωμάτωσης αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης (ML) σε συνδυασμό με ενεργούς αισθητήρες κόμης (Wang et al., 2025). Η ικανότητα αυτών των προηγμένων συστημάτων να εκτιμούν με ακρίβεια τις ανάγκες επιφανειακής λίπανσης αποτρέπει την υπερκατανάλωση ακριβών εισροών και προστατεύει την επένδυση του παραγωγού (Wang et al., 2025). Συμπερασματικά, η προσέγγιση των Wang et al. (2025) αποδεικνύει ότι η επένδυση σε

τεχνολογίες τηλεπισκόπησης και διαχείρισης ακριβείας δεν αποτελεί απλώς ένα τεχνολογικό επίτευγμα, αλλά μια αυστηρά κερδοφόρα επιλογή που προστατεύει το περιθώριο κέρδους μέσω της δραστηκής μείωσης του κόστους του αζώτου (Wang et al., 2025).

5. AutoSteer, Mapping & GPS

5.1 AutoSteer, Mapping & GPS: Τεχνολογίες και Εφαρμογές

Η Γεωργία Ακριβείας βασίζεται θεμελιωδώς στην ενσωμάτωση χωρικών τεχνολογιών που επιτρέπουν τον ακριβή εντοπισμό, την παρακολούθηση και τη διαχείριση της ετερογένειας εντός του αγρού. Στο επίκεντρο αυτής της τεχνολογικής υποδομής βρίσκονται τα συστήματα Παγκόσμιου Προσδιορισμού Θέσης (GPS), τα συστήματα αυτόματης καθοδήγησης (AutoSteer) και οι τεχνολογίες χαρτογράφησης (Mapping) (David J. Mulla, 2012; James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Οι τεχνολογίες αυτές λειτουργούν συνεργατικά, μετατρέποντας τα γεωργικά μηχανήματα σε έξυπνες πλατφόρμες συλλογής δεδομένων και στοχευμένης εφαρμογής εισροών. Η παρούσα ενότητα εισάγει τις βασικές αρχές λειτουργίας των συστημάτων GPS και αυτόματης καθοδήγησης, καθώς και τον ρόλο των συστημάτων χαρτογράφησης απόδοσης και εδάφους, αναδεικνύοντας τη σημασία τους ως τεχνολογικών πυλώνων για τη μετάβαση από τη συμβατική στη χωρικά διαφοροποιημένη γεωργική πρακτική (Athanasios Balafoutis et al., 2017; Emine Yilmaz, 2025).

Τα συστήματα Παγκόσμιου Προσδιορισμού Θέσης (GPS) αποτελούν τον τεχνολογικό πυρήνα της γεωργίας ακριβείας, παρέχοντας τις απαραίτητες χωρικές συντεταγμένες για την ακριβή πλοήγηση των γεωργικών ελκυστήρων και την καταγραφή δεδομένων πεδίου (David J. Mulla, 2012). Η βασική αρχή λειτουργίας του GPS στη γεωργία έγκειται στη λήψη σημάτων από δορυφορικά δίκτυα, τα οποία επιτρέπουν τον προσδιορισμό της θέσης του μηχανήματος σε πραγματικό χρόνο. Η εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας οδήγησε στην ανάπτυξη των συστημάτων αυτόματης καθοδήγησης (AutoSteer), τα οποία αναλαμβάνουν τον έλεγχο του συστήματος διεύθυνσης του ελκυστήρα, διατηρώντας τον σε προκαθορισμένες, παράλληλες γραμμές πορείας με ελάχιστη απόκλιση (Athanasios Balafoutis et al., 2017).

Η λειτουργικότητα των συστημάτων AutoSteer βασίζεται συχνά σε διορθώσεις σήματος υψηλής ακρίβειας, όπως το RTK (Real-Time Kinematic), το οποίο εξασφαλίζει ακρίβεια σε επίπεδο εκατοστού. Τα επιχειρησιακά οφέλη από την εφαρμογή της αυτόματης καθοδήγησης είναι πολλαπλά και άμεσα μετρήσιμα. Πρωτίστως, η τεχνολογία αυτή

ελαχιστοποιεί τις επικαλύψεις και τα κενά κατά τη διάρκεια των γεωργικών εργασιών, όπως η σπορά, η λίπανση και ο ψεκασμός, οδηγώντας σε βελτιστοποίηση της χρήσης των εισροών (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Παράλληλα, η μείωση της απόκλισης από τη γραμμή φύτευσης αποτρέπει την καταστροφή των φυτών και βελτιώνει την παραγωγικότητα. Ενδεικτικά, η χρήση RTK auto-steering για τη διόρθωση αποκλίσεων της τάξης των 90 mm έως 180 mm έχει συνδεθεί με σημαντική αποτροπή απωλειών απόδοσης (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Επιπρόσθετα, η αυτόματη καθοδήγηση μειώνει δραστικά την κόπωση του χειριστή, επιτρέποντάς του να επικεντρωθεί στον έλεγχο των παρελκόμενων μηχανημάτων και στην ποιότητα της εκτελούμενης εργασίας, αντί για τη συνεχή χειροκίνητη διόρθωση της πορείας του ελκυστήρα.

Όσον αφορά τις τάσεις υιοθέτησης, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι οι τεχνολογίες καθοδήγησης παρουσιάζουν τα υψηλότερα ποσοστά διείσδυσης στον αγροτικό τομέα. Η καθοδήγηση μέσω GNSS (Global Navigation Satellite System) και οι σχετικές τεχνολογίες έχουν υιοθετηθεί ταχύτατα σε παγκόσμιο επίπεδο, παρουσιάζοντας πολύ ταχύτερους ρυθμούς ενσωμάτωσης σε σύγκριση με τις τεχνολογίες μεταβλητής δόσης (VRT) (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Η ευρεία αυτή αποδοχή επιβεβαιώνεται και από πιο πρόσφατα δεδομένα, όπου σε αξιολόγηση ψηφιακών εργαλείων γεωργίας, οι ελκυστήρες με καθοδήγηση GPS αποτέλεσαν το πιο ευρέως υιοθετημένο εργαλείο, αντιπροσωπεύοντας το 28,4% της συνολικής χρήσης ψηφιακών εργαλείων στις εξεταζόμενες εκμεταλλεύσεις (Emine Yilmaz, 2025). Η υψηλή αυτή προτίμηση οφείλεται στο γεγονός ότι τα συστήματα AutoSteer προσφέρουν άμεσα, ορατά λειτουργικά πλεονεκτήματα, αποτελώντας συχνά το πρώτο βήμα για την περαιτέρω ψηφιοποίηση των γεωργικών πρακτικών (Emine Yilmaz, 2025; James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019).

Τα συστήματα χαρτογράφησης (Mapping) αποτελούν τον βασικό μηχανισμό αποτύπωσης και ποσοτικοποίησης της χωρικής ετερογένειας εντός των γεωργικών εκτάσεων, παρέχοντας τα απαραίτητα δεδομένα για τη λειτουργία των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων στη γεωργία ακριβείας. Οι δύο κυριότερες κατηγορίες χαρτογράφησης που χρησιμοποιούνται ευρέως για την καθοδήγηση της χωρικά διαφοροποιημένης διαχείρισης είναι η χαρτογράφηση απόδοσης και η χαρτογράφηση εδαφικών ιδιοτήτων (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019; Raffaele Casa et al., 2011).

Η χαρτογράφηση απόδοσης πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της συγκομιδής, χρησιμοποιώντας θεριζοαλωνιστικές μηχανές εξοπλισμένες με συστήματα Γεωργίας Ακριβείας. Τα συστήματα αυτά ενσωματώνουν δέκτες διαφορικού GPS (DGPS), αισθητήρες ροής καρπού και αισθητήρες υγρασίας, επιτρέποντας τη συνεχή καταγραφή της παραγόμενης ποσότητας σε γεωαναφερόμενα σημεία (Raffaele Casa et al., 2011). Τα δεδομένα που συλλέγονται υφίστανται επεξεργασία, φιλτράρισμα και καθαρισμό μέσω εξειδικευμένου λογισμικού, προκειμένου να παραχθούν ακριβείς χάρτες που αποτυπώνουν την παραγωγική ικανότητα των διαφόρων τμημάτων του αγρού (Ntsikane Maine et al., 2009). Η υπέρθεση χαρτών απόδοσης από διαδοχικά έτη επιτρέπει τον εντοπισμό σταθερών χωρικών προτύπων και τη δημιουργία αξιόπιστων ζωνών διαχείρισης (Ntsikane Maine et al., 2009).

Παράλληλα, η χαρτογράφηση εδάφους εστιάζει στην καταγραφή των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του υποβάθρου. Η συλλογή δεδομένων μπορεί να γίνει μέσω συστηματικής δειγματοληψίας σε κάνναβο με χρήση υδραυλικών γεωτρήσεων και καταγραφή συντεταγμένων GPS, ή μέσω αισθητήρων χαρτογράφησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019; Ntsikane Maine et al., 2009; Raffaele Casa et al., 2011). Η επεξεργασία αυτών των χωρικών δεδομένων απαιτεί προηγμένες γεωστατιστικές μεθόδους. Για παράδειγμα, τεχνικές όπως το ordinary kriging χρησιμοποιούνται για τη χωρική παρεμβολή των εδαφικών ιδιοτήτων, ενώ αλγόριθμοι ομαδοποίησης, όπως το fuzzy c-means clustering, εφαρμόζονται για την οριοθέτηση Ομοιόμορφων Ζωνών Διαχείρισης (Uniform Management Zones - UMZs) (Raffaele Casa et al., 2011).

Ο ρόλος της χαρτογράφησης είναι καθοριστικός για τη λήψη αποφάσεων, καθώς οι παραγόμενοι χάρτες μετατρέπονται σε χάρτες συνταγογράφησης που καθοδηγούν τα μηχανήματα μεταβλητής δόσης για τη στοχευμένη εφαρμογή λιπασμάτων και άλλων εισροών (Athanasios Balafoutis et al., 2017; Raffaele Casa et al., 2011). Ωστόσο, παρά τη θεμελιώδη σημασία τους, οι τεχνολογίες συλλογής πληροφοριών παρουσιάζουν βραδύτερους ρυθμούς υιοθέτησης σε σχέση με τα συστήματα καθοδήγησης. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι το υψηλό κόστος της χειροκίνητης δειγματοληψίας εδάφους και των συστημάτων που βασίζονται σε χάρτες αποτελεί εμπόδιο, με ιστορικά δεδομένα να δείχνουν περιορισμένη χρήση τεχνικών όπως η χαρτογράφηση της ηλεκτρικής

αγωγιμότητας (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Παρ' όλα αυτά, η συνεχής βελτίωση της χωρικής ανάλυσης και η ενσωμάτωση δεδομένων από αισθητήρες και UAV ενισχύουν διαρκώς την ακρίβεια και την επιχειρησιακή αξία των συστημάτων χαρτογράφησης στη σύγχρονη γεωργία (David J. Mulla, 2012; Emine Yilmaz, 2025).

5.2 Παραγωγικά ευρήματα

Η ενσωμάτωση συστημάτων αυτόματης καθοδήγησης (AutoSteer), τεχνολογιών χαρτογράφησης (Mapping) και Παγκόσμιου Προσδιορισμού Θέσης (GPS) στη διαχείριση του καλαμποκιού επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις παραγωγικές και λειτουργικές παραμέτρους της καλλιέργειας. Η παρούσα ενότητα εστιάζει αποκλειστικά στα παραγωγικά ευρήματα αυτών των τεχνολογιών, αναλύοντας την επίδρασή τους στις αποδόσεις, τη λειτουργική ικανότητα των μηχανημάτων, τη μείωση των επικαλύψεων κατά την εφαρμογή εισροών και την ακρίβεια των γεωργικών εργασιών. Μέσα από την εξέταση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας, αναδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο η χωρική πληροφορία και η αυτοματοποιημένη πλοήγηση μεταφράζονται σε μετρήσιμα αγρονομικά πλεονεκτήματα, αποτελώντας βασικό εργαλείο για τη χωρικά διαφοροποιημένη γεωργία (Athanasios Balafoutis et al., 2017; Emine Yilmaz, 2025; James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019).

Στο πλαίσιο της αξιολόγησης της λειτουργικής αποδοτικότητας, η βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι ο εξοπλισμός που καθοδηγείται από συστήματα GPS διευκολύνει την εφαρμογή χειρισμών ειδικά για κάθε θέση (site-specific treatment) εντός του αγρού (Athanasios Balafoutis et al., 2017; Ntsikane Maine et al., 2009). Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη μείωση της χρήσης λιπασμάτων, διατηρώντας ή και βελτιώνοντας ταυτόχρονα τις αποδόσεις των καλλιεργειών (Ntsikane Maine et al., 2009; Raffaele Casa et al., 2011). Ειδικότερα στο καλαμπόκι, η χρήση χαρτών απόδοσης και εδαφικών δεδομένων μέσω GPS επιτρέπει τη δημιουργία ζωνών διαχείρισης, οι οποίες καθοδηγούν τα μηχανήματα για την ακριβή τοποθέτηση των εισροών (Ntsikane Maine et al., 2009; Raffaele Casa et al., 2011).

Η ακρίβεια που παρέχουν τα συστήματα αυτόματης καθοδήγησης (AutoSteer) έχει άμεσο αντίκτυπο στην παραγωγικότητα, καθώς αποτρέπει τις απώλειες απόδοσης που προκύπτουν από σφάλματα κατά την πλοήγηση. Για παράδειγμα, η χρήση συστημάτων RTK auto-steering εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια, αποτρέποντας αποκλίσεις από τη γραμμή φύτευσης. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι κάθε 20 mm απόκλισης από τη σειρά μπορεί να αντιστοιχεί σε αναμενόμενη απώλεια απόδοσης 186 kg/ha (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Συνεπώς, η διατήρηση της ακριβούς πορείας μέσω GPS και AutoSteer διασφαλίζει ότι η καλλιέργεια αναπτύσσεται στις βέλτιστες χωρικές συνθήκες, χωρίς καταστροφή φυτών από τα διερχόμενα μηχανήματα (Athanasios Balafoutis et al., 2017).

Επιπλέον, η λειτουργική ικανότητα των μηχανημάτων ενισχύεται σημαντικά, καθώς η αυτοματοποιημένη πλοήγηση επιτρέπει την εκτέλεση των εργασιών με μεγαλύτερη ταχύτητα και συνέπεια, ανεξαρτήτως των συνθηκών ορατότητας. Η μείωση των επικαλύψεων και των κενών κατά τη σπορά και τη λίπανση οδηγεί σε πιο ομοιόμορφη κατανομή των φυτών και των θρεπτικών στοιχείων, γεγονός που αντανακλάται στην τελική παραγωγή (Balafoutis et al., 2017). Η εφαρμογή χειρισμών ειδικά για κάθε θέση μέσω μηχανημάτων καθοδηγούμενων από GPS επιτρέπει την προσαρμογή των δόσεων αζώτου στις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας. Στη μελέτη των Maine et al., η χρήση γεωαναφερόμενων δεδομένων απόδοσης και η πλοήγηση μέσω GPS επέτρεψαν την εφαρμογή μεταβλητών δόσεων αζώτου, οι οποίες σε ορισμένες ζώνες διαχείρισης οδήγησαν σε παραγωγικό πλεονέκτημα έως και 1,11 t/ha σε σύγκριση με την ομοιόμορφη εφαρμογή (Maine et al., 2009). Αντίστοιχα, η μελέτη των Casa et al. κατέδειξε ότι η καθοδηγούμενη από GPS εφαρμογή χαρτών συνταγογράφησης μπορεί να επιτύχει εξοικονόμηση λιπάσματος της τάξης των 10 kg N/ha, διατηρώντας την απόδοση του καλαμποκιού στα ίδια επίπεδα με την ομοιόμορφη λίπανση (Raffaele Casa et al., 2011). Τα ευρήματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η ενσωμάτωση του GPS και της χαρτογράφησης αποτελεί τον κρίσιμο σύνδεσμο για τη μετατροπή της χωρικής πληροφορίας σε στοχευμένη και παραγωγικά αποδοτική εργασία (Ntsikane Maine et al., 2009; Raffaele Casa et al., 2011).

Οι Lowenberg-DeBoer και Erickson (2019) επισημαίνουν ότι η καθοδήγηση GNSS και οι σχετικές τεχνολογίες έχουν υιοθετηθεί με ταχείς ρυθμούς, αποτελώντας τη βάση πάνω στην οποία στηρίζονται πιο σύνθετες εφαρμογές, όπως η μεταβλητή δόση (VRT) (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Η χαρτογράφηση της απόδοσης και η

χαρτογράφηση του εδάφους λειτουργούν ως τεχνολογίες συλλογής πληροφοριών που είναι απολύτως απαραίτητες για την κατανόηση της χωρικής ετερογένειας (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Η υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών οδηγεί σε πιο συνεπή και βελτιστοποιημένα αγρονομικά αποτελέσματα, καθώς οι αποφάσεις διαχείρισης παύουν να βασίζονται σε εμπειρικές εκτιμήσεις και στηρίζονται πλέον σε ακριβή, γεωαναφερόμενα δεδομένα (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019).

Στο καλαμπόκι, η χρήση δεδομένων από το 2016 (όπως καταγράφεται σε έρευνες του USDA) δείχνει ότι ένα σημαντικό ποσοστό των εκμεταλλεύσεων αξιοποιεί αυτές τις τεχνολογίες για να καθοδηγήσει τη χωρικά διαφοροποιημένη εφαρμογή λιπασμάτων. Η ενσωμάτωση του GPS με τους χάρτες απόδοσης διασφαλίζει ότι κάθε τμήμα του αγρού λαμβάνει την ενδεδειγμένη φροντίδα, μεγιστοποιώντας την παραγωγική δυναμική της καλλιέργειας (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). Συνολικά, η μετάβαση από τη χειροκίνητη διαχείριση στην αυτοματοποιημένη πλοήγηση και χαρτογράφηση εξασφαλίζει υψηλότερη λειτουργική ακρίβεια, προστατεύει τον εξοπλισμό και σταθεροποιεί την παραγωγική συμπεριφορά του καλαμποκιού (Balafoutis et al., 2017; Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

Η σταθερότητα που προσφέρει η αυτόματη καθοδήγηση συμβάλλει στη βελτιστοποίηση των δραστηριοτήτων στον αγρό, καθώς επιτρέπει την ταχύτερη και πιο αποτελεσματική ολοκλήρωση των εργασιών, ανεξάρτητα από την κόπωση του χειριστή ή τις συνθήκες ορατότητας (Athanasios Balafoutis et al., 2017; James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Παράλληλα, η ομαλότερη λειτουργία και η αποφυγή περιττών ελιγμών ή επικαλύψεων μειώνουν τη φθορά των μηχανημάτων, ενισχύοντας τη μακροβιότητα του εξοπλισμού και διασφαλίζοντας την αδιάλειπτη παραγωγική διαδικασία κατά τις κρίσιμες περιόδους της καλλιεργητικής περιόδου (Balafoutis et al., 2017).

Η πρόσφατη μελέτη της Yilmaz (2025) σε εμπορικές εκμεταλλεύσεις καλαμποκιού και σιταριού παρέχει εκτενή ποσοτικά δεδομένα σχετικά με την παραγωγική επίδραση των ψηφιακών εργαλείων, με ιδιαίτερη έμφαση στα συστήματα πλοήγησης και χαρτογράφησης (Yilmaz, 2025). Σύμφωνα με τα ευρήματα, οι ελκυστήρες που διέθεταν καθοδήγηση GPS αποτέλεσαν το πιο ευρέως υιοθετημένο ψηφιακό εργαλείο, αντιπροσωπεύοντας το 28,4% της συνολικής χρήσης τεχνολογιών στις εξεταζόμενες εκμεταλλεύσεις (Yilmaz, 2025).

Ένα από τα σημαντικότερα λειτουργικά συμπεράσματα της μελέτης είναι ότι η καθοδήγηση μέσω GPS συνέβαλε πρωτίστως στη μείωση των επικαλύψεων κατά την εφαρμογή των εισροών, παρά στην άμεση και αυτόνομη αύξηση της απόδοσης (Emine Yilmaz, 2025). Η ακριβής πλοήγηση των μηχανημάτων περιόρισε σημαντικά τις διπλοεφαρμογές λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων, οδηγώντας σε μια πιο ορθολογική και στοχευμένη διαχείριση της καλλιέργειας (Yilmaz, 2025). Η μείωση αυτή των επικαλύψεων αποτελεί κρίσιμη λειτουργική παράμετρο, καθώς διασφαλίζει ότι τα φυτά λαμβάνουν την ακριβή ποσότητα εισροών που απαιτείται, αποφεύγοντας φαινόμενα τοξικότητας ή ανταγωνισμού που θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν την παραγωγικότητα (Emine Yilmaz, 2025).

Επιπλέον, η έρευνα ανέδειξε τη σημασία της συνδυαστικής χρήσης πολλαπλών τεχνολογιών. Η ταυτόχρονη εφαρμογή τριών ή περισσότερων ψηφιακών εργαλείων (όπως η καθοδήγηση GPS, οι αισθητήρες εδάφους και τα συστήματα μεταβλητής δόσης) παρήγαγε ισχυρά συνεργιστικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, το συνδυασμένο παραγωγικό όφελος υπερέβη το άθροισμα των μεμονωμένων συνεισφορών κάθε εργαλείου κατά 18% έως 27% (Yilmaz, 2025). Αυτό υποδηλώνει ότι η τεχνολογία GPS μεγιστοποιεί την παραγωγική της αξία όταν λειτουργεί ως υποδομή για την υποστήριξη άλλων συστημάτων γεωργίας ακριβείας (Yilmaz, 2025).

Συνοψίζοντας, η ενσωμάτωση των συστημάτων AutoSteer, GPS και χαρτογράφησης στο καλαμπόκι επιφέρει καθοριστικές βελτιώσεις στη λειτουργική αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα. Η αυτόματη καθοδήγηση εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια στις εργασίες πεδίου, μειώνοντας δραστικά τις επικαλύψεις εισροών και αποτρέποντας απώλειες απόδοσης λόγω αποκλίσεων από τη γραμμή φύτευσης (Athanasios Balafoutis et al., 2017; Emine Yilmaz, 2025). Παράλληλα, η χαρτογράφηση απόδοσης και εδάφους παρέχει την απαραίτητη χωρική πληροφορία για την εφαρμογή χειρισμών ειδικά για κάθε θέση, επιτρέποντας τη στοχευμένη χρήση λιπασμάτων χωρίς συμβιβασμούς στην τελική παραγωγή (Maine et al., 2009; Casa et al., 2011). Η συνδυαστική χρήση αυτών των ψηφιακών εργαλείων δημιουργεί βέλτιστα αποτελέσματα, οδηγώντας σε σημαντικές αυξήσεις της απόδοσης (έως και 24,6%) και εξασφαλίζοντας πιο συνεπή και καλύτερα αγρονομικά αποτελέσματα σε σχέση με τις συμβατικές πρακτικές διαχείρισης (Yilmaz, 2025; James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019).

5.3 Οικονομικές επιπτώσεις

Η μετάβαση από την παραγωγική αξιολόγηση των συστημάτων αυτόματης καθοδήγησης (AutoSteer), χαρτογράφησης (Mapping) και Παγκόσμιου Προσδιορισμού Θέσης (GPS) στην οικονομική τους αποτίμηση αποτελεί κρίσιμο βήμα για την κατανόηση της βιωσιμότητάς τους. Ενώ η προηγούμενη ανάλυση ανέδειξε τη συμβολή τους στη λειτουργική ακρίβεια, η παρούσα ενότητα εστιάζει αποκλειστικά στις οικονομικές επιπτώσεις. Εξετάζονται παράμετροι όπως η εξοικονόμηση κόστους, η απόδοση της επένδυσης (ROI), η μείωση των δαπανών για εισροές και το ισοζύγιο μεταξύ κόστους εργασίας και αποσβέσεων κεφαλαίου, αναδεικνύοντας τα οικονομικά οφέλη και τους περιορισμούς αυτών των τεχνολογιών (Balafoutis et al., 2017; Yilmaz, 2025; Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

Η υιοθέτηση συστημάτων αυτόματης καθοδήγησης και χαρτογράφησης προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες για τη μείωση του κόστους παραγωγής και την ενίσχυση του καθαρού οικονομικού αποτελέσματος των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Τα συστήματα AutoSteer, μέσω της ελαχιστοποίησης των επικαλύψεων και της ακριβούς πλοήγησης, οδηγούν σε άμεση εξοικονόμηση πόρων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η χρήση συστημάτων αυτόματης καθοδήγησης RTK (Real-Time Kinematic) μπορεί να αποφέρει σημαντικά πρόσθετα καθαρά έσοδα, τα οποία εκτιμώνται από 83 έως 356 €/ha για τη διόρθωση απόκλισης 90 mm και από 285 έως 612 €/ha για απόκλιση 180 mm (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Αυτή η οικονομική απόδοση προκύπτει από την αποτροπή οικονομικών απωλειών και τη βελτιστοποίηση της χρήσης των μηχανημάτων.

Παράλληλα, η χαρτογράφηση της απόδοσης και η χαρτογράφηση του εδάφους μέσω GPS αποτελούν θεμελιώδη εργαλεία για τη χωρικά διαφοροποιημένη διαχείριση, αν και η οικονομική τους αποδοτικότητα εξαρτάται από το κόστος εφαρμογής τους (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Η συλλογή δεδομένων μέσω χαρτών απόδοσης επιτρέπει τον εντοπισμό ζωνών διαχείρισης, οδηγώντας σε πιο ορθολογική

κατανομή των δαπανών για εισροές (Ntsikane Maine et al., 2009). Ωστόσο, το υψηλό κόστος των συστημάτων που βασίζονται σε χάρτες και της χειροκίνητης δειγματοληψίας εδάφους αποτελεί συχνά εμπόδιο για την ευρύτερη υιοθέτησή τους (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

Σε επίπεδο επένδυσης, ιστορικά δεδομένα δείχνουν ότι το κόστος για τεχνολογίες μεταβλητής δόσης και χαρτογράφησης μπορεί να είναι σημαντικό, με το ετήσιο κόστος εφαρμογής να υπολογίζεται σε 150 Rand ανά εκτάριο για έναν αγρό 500 εκταρίων στη Νότια Αφρική, έναντι μιας αρχικής επένδυσης 326.190 Rand (Ntsikane Maine et al., 2009). Παρά το αρχικό κεφάλαιο, η χρήση αυτών των τεχνολογιών αποδεικνύεται ελαφρώς πιο κερδοφόρα από την ομοιόμορφη εφαρμογή, καθώς η εξοικονόμηση από τη στοχευμένη χρήση λιπασμάτων αντισταθμίζει το κόστος της χαρτογράφησης και του εξοπλισμού (Ntsikane Maine et al., 2009). Συνεπώς, η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων καθοδήγησης και χαρτογράφησης εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ του κόστους επένδυσης και της τελικής μείωσης των λειτουργικών εξόδων (Balafoutis et al., 2017; Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).,

Η οικονομική αξιολόγηση των ψηφιακών εργαλείων στη Γεωργία Ακριβείας καταδεικνύει ότι η υιοθέτηση τεχνολογιών όπως το GPS συνδέεται άμεσα με τη μείωση του κόστους των εισροών και τη βελτίωση της απόδοσης της επένδυσης (ROI). Η πρόσφατη μελέτη της Yilmaz (2025) σε εμπορικές εκμεταλλεύσεις παρέχει σαφή ποσοτικά δεδομένα για την οικονομική επίδραση αυτών των συστημάτων. Σύμφωνα με την έρευνα, καταγράφηκε υψηλή υιοθέτηση ψηφιακών εργαλείων, με τους ελκυστήρες που διαθέτουν καθοδήγηση GPS να κυριαρχούν, αντιπροσωπεύοντας το 28,4% της συνολικής χρήσης τεχνολογιών (Emine Yilmaz, 2025).

Η εκτεταμένη χρήση αυτών των συστημάτων οδήγησε σε σημαντική εξοικονόμηση πόρων. Συγκεκριμένα, στις εκμεταλλεύσεις με υψηλό βαθμό υιοθέτησης ψηφιακών τεχνολογιών (βαθμολογία 8-10), το κόστος των εισροών μειώθηκε κατά 14,8% (Emine Yilmaz, 2025). Η μείωση αυτή αποδίδεται κυρίως στον περιορισμό των επικαλύψεων κατά την εφαρμογή λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η ακρίβεια στην πλοήγηση μεταφράζεται σε άμεσο οικονομικό όφελος. Αντίθετα, στις εκμεταλλεύσεις

με χαμηλή υιοθέτηση (βαθμολογία 1-3), η αντίστοιχη μείωση του κόστους εισροών περιορίστηκε μόλις στο 4,3% (Emine Yilmaz, 2025).

Εξίσου σημαντικά είναι και τα ευρήματα που αφορούν την απόδοση της επένδυσης (ROI). Η μελέτη έδειξε ότι η αυξημένη ενσωμάτωση ψηφιακών εργαλείων επιταχύνει την απόσβεση του κεφαλαίου. Ενώ στις εκμεταλλεύσεις με χαμηλή υιοθέτηση ο χρόνος απόσβεσης (ROI) ανερχόταν σε 4,2 έτη, στις εκμεταλλεύσεις με μεσαία υιοθέτηση μειώθηκε στα 2,8 έτη, φτάνοντας τελικά τα 2,1 έτη για την κατηγορία υψηλής υιοθέτησης (Emine Yilmaz, 2025). Τα δεδομένα αυτά αποδεικνύουν ότι η αρχική επένδυση σε συστήματα GPS και τεχνολογίες ακριβείας ανακτάται ταχύτερα όταν η χρήση τους είναι εντατική και ολοκληρωμένη (Emine Yilmaz, 2025). Συνολικά, η τεχνολογία καθοδήγησης μέσω GPS δεν αποτελεί απλώς ένα εργαλείο διευκόλυνσης, αλλά έναν κρίσιμο μηχανισμό για τη μείωση των λειτουργικών εξόδων και τη διασφάλιση της οικονομικής αποδοτικότητας της γεωργικής εκμετάλλευσης (Emine Yilmaz, 2025).

Η οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων γεωργίας ακριβείας, όπως το AutoSteer και η χαρτογράφηση, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ισοζύγιο μεταξύ του κόστους κεφαλαίου και της εξοικονόμησης λειτουργικών εξόδων. Η μετάβαση σε ψηφιακές τεχνολογίες απαιτεί σημαντικές αρχικές επενδύσεις, οι οποίες αυξάνουν τις αποσβέσεις κεφαλαίου για την εκμετάλλευση, ενώ ταυτόχρονα στοχεύουν στη μείωση των δαπανών για εισροές και εργασία (Yilmaz, 2025; Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

Οι Lowenberg-DeBoer και Erickson (2019) επισημαίνουν ότι η οικονομική βιωσιμότητα και οι κινητήριοι μοχλοί υιοθέτησης αυτών των τεχνολογιών συνδέονται άμεσα με το κόστος τους. Ενώ τα συστήματα καθοδήγησης GNSS έχουν υιοθετηθεί ταχύτατα λόγω των άμεσων και ορατών οικονομικών οφελών τους, τεχνολογίες όπως η χαρτογράφηση εδάφους και τα συστήματα μεταβλητής δόσης (map-based systems) παρουσιάζουν βραδύτερη διείσδυση (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Το υψηλό κόστος της χειροκίνητης δειγματοληψίας και η αβεβαιότητα σχετικά με τους κανόνες απόφασης αποτελούν σημαντικά εμπόδια, καθώς οι παραγωγοί απαιτούν αποδεδειγμένη οικονομική αξία για να δικαιολογήσουν την αύξηση των παγίων εξόδων τους (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019).

Επιπλέον, η οικονομική αποδοτικότητα αυτών των επενδύσεων χαρακτηρίζεται από έντονη εξάρτηση από την κλίμακα. Η μελέτη της Yilmaz αναδεικνύει ότι το μέγεθος της εκμετάλλευσης επηρεάζει καθοριστικά την ικανότητα απόσβεσης του εξοπλισμού (Emine Yilmaz, 2025). Τα υψηλά πάγια κόστη αποτελούν σημαντικό περιορισμό για τις μικρές ιδιοκτησίες, καθιστώντας συχνά αναγκαία την ανάπτυξη συνεργατικών μοντέλων ιδιοκτησίας προκειμένου να ξεπεραστούν τα εμπόδια πρόσβασης στην τεχνολογία (Yilmaz, 2025). Αντίστοιχα, η οικονομική ανάλυση ευαισθησίας από τη Νότια Αφρική επιβεβαιώνει ότι το μέγεθος της εκμετάλλευσης και η τιμή του προϊόντος είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την κερδοφορία των τεχνολογιών ακριβείας (Ntsikane Maine et al., 2009). Συμπερασματικά, το οικονομικό όφελος από τη χρήση GPS και χαρτογράφησης προκύπτει όταν η εξοικονόμηση πόρων υπερβαίνει την αύξηση των αποσβέσεων κεφαλαίου, μια συνθήκη που ευνοείται σαφώς σε εκμεταλλεύσεις μεγαλύτερης κλίμακας (Yilmaz, 2025; Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

Συνοψίζοντας, η οικονομική αξιολόγηση των συστημάτων AutoSteer, Mapping και GPS καταδεικνύει ότι οι τεχνολογίες αυτές προσφέρουν σημαντικές ευκαιρίες για τη βελτίωση της κερδοφορίας, κυρίως μέσω της μείωσης του κόστους των εισροών. Η καθοδήγηση μέσω GPS ελαχιστοποιεί τις επικαλύψεις, οδηγώντας σε άμεση εξοικονόμηση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, ενώ επιταχύνει την απόδοση της επένδυσης (ROI) (Balafoutis et al., 2017; Yilmaz, 2025). Παράλληλα, η χαρτογράφηση υποστηρίζει τη στοχευμένη κατανομή των πόρων, αν και η υιοθέτησή της περιορίζεται συχνά από το υψηλό κόστος εφαρμογής (James Lowenberg-DeBoer & Bruce Erickson, 2019). Ωστόσο, η οικονομική βιωσιμότητα αυτών των συστημάτων εξαρτάται άμεσα από την κλίμακα της εκμετάλλευσης, καθώς οι υψηλές αποσβέσεις κεφαλαίου απαιτούν επαρκές μέγεθος αγρού ή συνεργατικά σχήματα για να αντισταθμιστούν από τη μείωση των λειτουργικών εξόδων (Yilmaz, 2025; Maine et al., 2009).

6. Συνθετική ανάλυση των τριών τεχνολογικών αξόνων

6.1 Τεχνολογίες που δίνουν τα μεγαλύτερα παραγωγικά και οικονομικά οφέλη στο καλαμπόκι.

Η συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας στο καλαμπόκι καταδεικνύει ότι κάθε κατηγορία προσφέρει διακριτά παραγωγικά και οικονομικά πλεονεκτήματα, τα οποία αλληλοσυμπληρώνονται στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης διαχείρισης. Βάσει των διαθέσιμων δεδομένων, τα συστήματα αυτόματης καθοδήγησης (GPS/AutoSteer) παρέχουν τα υψηλότερα και πλέον άμεσα οικονομικά οφέλη για τις γεωργικές εκμεταλλεύσεις. Συγκεκριμένα, η αποτροπή των επικαλύψεων κατά την εφαρμογή των εισροών οδηγεί σε σημαντική μείωση του κόστους, η οποία αγγίζει το 14,8% στις εκμεταλλεύσεις με υψηλό επίπεδο ψηφιακής υιοθέτησης (Emine Yilmaz, 2025). Η εξοικονόμηση αυτή επιτρέπει την επίτευξη ενός ταχύτατου χρόνου απόσβεσης (ROI) της τάξης των 2,1 ετών (Emine Yilmaz, 2025). Παράλληλα, η εξαιρετική ακρίβεια στην πλοήγηση αποτρέπει την καταστροφή των φυτών και τη συνακόλουθη απώλεια απόδοσης, η οποία υπολογίζεται σε 186 kg/ha για κάθε 20 mm απόκλισης από την ιδανική γραμμή φύτευσης (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Αυτή η προστασία της παραγωγής μεταφράζεται σε πρόσθετα καθαρά έσοδα που μπορούν να ανέλθουν έως και 612 €/ha, καθιστώντας το AutoSteer την πλέον προσοδοφόρα τεχνολογία βάσης (Athanasios Balafoutis et al., 2017).

Στον αντίποδα, οι τεχνολογίες Τηλεπισκόπησης και η μεταβλητή δόση εφαρμογής (VRT) διακρίνονται πρωτίστως για τα μέγιστα οφέλη που προσφέρουν ως προς την αποδοτικότητα των πόρων και τη χωρική βελτιστοποίηση. Η εφαρμογή τους βελτιώνει θεαματικά την αποδοτικότητα χρήσης αζώτου (NUE) κατά 15,1% και ενισχύει τη μερική παραγωγικότητα παραγόντων (PFP) κατά 8-18%, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα εξοικονόμηση αζώτου που κυμαίνεται από 6% έως 21% (Athanasios Balafoutis et al., 2017). Η στοχευμένη αυτή διαχείριση, η οποία βασίζεται στην έγκαιρη διάγνωση του στρες και στη χαρτογράφηση της ετερογένειας, επιτρέπει τη διατήρηση του οριακού κέρδους της εκμετάλλευσης (Emine

Yilmaz, 2025). Η μείωση των περιττών εισροών αντισταθμίζει πλήρως το κόστος της τεχνολογίας, χωρίς να θυσιάζεται η τελική παραγωγή.

Συμπερασματικά, η σύγκριση αναδεικνύει ότι το GPS/AutoSteer λειτουργεί ως ο βασικός πυλώνας άμεσης κερδοφορίας και απόσβεσης, ενώ η συνδυαστική χρήση Τηλεπισκόπησης /UAV και VRT μεγιστοποιεί την αγρονομική αποδοτικότητα, προστατεύοντας τους φυσικούς πόρους και διασφαλίζοντας τη μακροπρόθεσμη οικονομική βιωσιμότητα της καλλιέργειας του καλαμποκιού.

Τα βασικά ευρήματα της συγκριτικής αξιολόγησης συνοψίζονται παρακάτω στον πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1: Συγκριτική Αξιολόγηση Τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας στο Καλαμπόκι

Τεχνολογία	Κύριο Παραγωγικό Όφελος	Κύριο Οικονομικό Όφελος	Χρόνος Απόσβεσης (ROI)
GPS/AutoSteer	Αποτροπή απώλειας απόδοσης (186 kg/ha ανά 20mm απόκλισης)	Μείωση κόστους 14,8%, έως 612 €/ha πρόσθετα έσοδα	2,1 έτη
RS/UAV	Έγκαιρη διάγνωση στρες, χαρτογράφηση ετερογένειας	Διατήρηση Οριακού Κέρδους (Marginal Return)	Μεσοπρόθεσμος
VRT	Αύξηση NUE (+15,1%), PFP (+8-18%)	Εξοικονόμηση αζώτου 6-21%	Εξαρτάται από την κλίμακα

6.2 Συνδυαστικές εφαρμογές τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας

Η Γεωργία Ακριβείας δεν βασίζεται στην απομονωμένη χρήση μεμονωμένων τεχνολογιών, αλλά στη συνέργεια που προκύπτει από τη συνδυαστική τους εφαρμογή. Η διασύνδεση διαφορετικών ψηφιακών εργαλείων δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης, όπου τα δεδομένα ρέουν συμπληρωματικά, ενισχύοντας την τελική παραγωγικότητα και μειώνοντας το λειτουργικό κόστος (David J. Mulla, 2012; Emine Yilmaz, 2025). Η μετάβαση από την απλή παρατήρηση στη στοχευμένη δράση απαιτεί μια αυστηρά δομημένη αλληλουχία ενεργειών.

Μια τυπική συνδυαστική ροή εργασίας ξεκινά με τη συλλογή δεδομένων και καταλήγει στην αξιολόγηση της παραγωγής. Αρχικά, τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV) συλλέγουν υψηλής ανάλυσης RGB δεδομένα για την αποτύπωση της χωρικής ετερογένειας και της κατάστασης της κόμης (Meina Zhang et al., 2020). Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά τροφοδοτούν μοντέλα μηχανικής μάθησης (ML), όπως οι αλγόριθμοι τυχαίου δάσους (Random Forest), τα οποία αναλύουν τη χωρική πληροφορία για τη δημιουργία ακριβών χαρτών συνταγογράφησης (Athanasios Balafoutis et al., 2017; Meina Zhang et al., 2020). Στο επόμενο στάδιο, γεωργικοί ελκυστήρες εξοπλισμένοι με συστήματα αυτόματης καθοδήγησης (GPS AutoSteer) αξιοποιούν αυτούς τους χάρτες για την εφαρμογή μεταβλητής δόσης αζώτου (VRT), ελαχιστοποιώντας τις επικαλύψεις και βελτιστοποιώντας τη χρήση των εισροών (Athanasios Balafoutis et al., 2017; Emine Yilmaz, 2025). Τέλος, κατά τη συγκομιδή, τα συστήματα παρακολούθησης απόδοσης (GPS yield monitors) χαρτογραφούν την τελική παραγωγή, παρέχοντας τα απαραίτητα δεδομένα για την αξιολόγηση της παρέμβασης και τον σχεδιασμό της επόμενης καλλιεργητικής περιόδου (Ntsikane Maine et al., 2009; Raffaele Casa et al., 2011).

Σχήμα 6-2 Κυκλική ροή συνδυαστικής εφαρμογής τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας



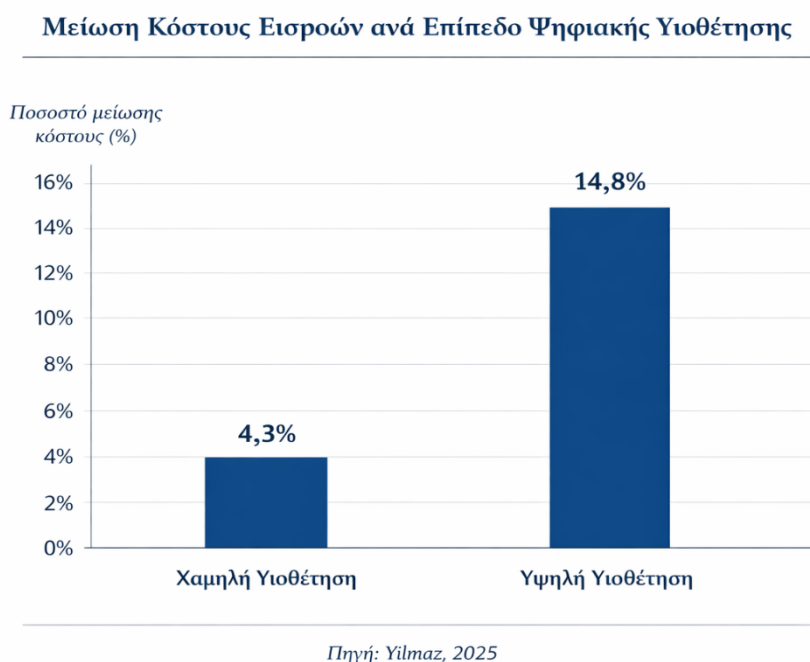
Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Η αξία αυτής της συνδυαστικής προσέγγισης επιβεβαιώνεται ποσοτικά από τη βιβλιογραφία. Όπως διαπιστώνει η Yilmaz (2025), η ταυτόχρονη ενσωμάτωση τριών ή περισσότερων ψηφιακών εργαλείων παράγει ισχυρά συνεργιστικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, το συνδυασμένο παραγωγικό όφελος υπερβαίνει το άθροισμα των μεμονωμένων συνεισφορών κάθε τεχνολογίας κατά 18% έως 27% (Emine Yilmaz, 2025). Αυτό αποδεικνύει ότι η συνεργιστικότητα μεταξύ UAV, αλγορίθμων ML, GPS και VRT πολλαπλασιάζει την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης, μετατρέποντας τα μεμονωμένα δεδομένα σε μια ενιαία, παραγωγικά ανώτερη στρατηγική (David J. Mulla, 2012; Emine Yilmaz, 2025).

Το γράφημα παρακάτω αποτυπώνει το αποτέλεσμα των πειραματικών δεδομένων (Emine Yilmaz, 2025), δηλαδή ότι η υψηλή υιοθέτηση Γεωργίας Ακριβείας συνδέεται με σημαντικά μεγαλύτερη μείωση του κόστους εισροών σε σύγκριση με τη χαμηλή υιοθέτηση. Συγκεκριμένα, η μείωση κόστους ανέρχεται σε 14,8% για την υψηλή υιοθέτηση, έναντι

4,3% για τη χαμηλή, γεγονός που υποδηλώνει ότι η εντονότερη αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση της αποδοτικότητας και στη συγκράτηση των εισροών.

Γράφημα 6-3 Μείωση κόστους εισροών ανάλογα με το επίπεδο υιοθέτησης τεχνολογιών Γεωργίας Ακριβείας



7. Συζήτηση

7.1 Σύνοψη βασικών διαπιστώσεων

Η μετάβαση προς τη Γεωργία Ακριβείας στην καλλιέργεια του καλαμποκιού δεν αποτελεί απλώς την άθροιση μεμονωμένων τεχνολογικών εφαρμογών, αλλά το αποτέλεσμα μιας βαθιάς και δομικής συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών ψηφιακών συστημάτων. Η σύνθεση των βασικών διαπιστώσεων από τα προηγούμενα κεφάλαια αποδεικνύει ότι η βελτιστοποίηση της παραγωγής και η μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους προκύπτουν μέσα από την αλληλεπίδραση της τεχνολογίας Μεταβλητής Δόσης (VRT), της Τηλεπισκόπησης και των Μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (RS/UAV), καθώς και των συστημάτων Παγκόσμιου Προσδιορισμού Θέσης και Αυτόματης Καθοδήγησης (GPS/AutoSteer). Κάθε τεχνολογικός πυλώνας επιτελεί έναν διακριτό αλλά απολύτως συμπληρωματικό ρόλο, διαμορφώνοντας ένα ολοκληρωμένο οικοσύστημα διαχείρισης που μετασχηματίζει τη χωρική πληροφορία σε στοχευμένη γεωργική πρακτική.

Στο επίκεντρο αυτής της γεωργικής πρακτικής, η τεχνολογία Μεταβλητής Δόσης (VRT) λειτουργεί ως ο κύριος μηχανισμός για τη χωρικά διαφοροποιημένη εφαρμογή των εισροών. Τα ερευνητικά δεδομένα επιβεβαιώνουν σταθερά ότι η VRT έχει την ικανότητα να διατηρεί ή και να αυξάνει την απόδοση του καλαμποκιού, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα σημαντική εξοικονόμηση αζώτου. Ενδεικτικά, η εφαρμογή μεταβλητής δόσης αζώτου μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση λιπάσματος της τάξης του 6% έως 46%, διασφαλίζοντας ισοδύναμες ή ελαφρώς υψηλότερες αποδόσεις σε σύγκριση με τις συμβατικές πρακτικές ομοιόμορφης εφαρμογής (Balafoutis et al., 2017). Ακόμη και σε περιπτώσεις όπου η αύξηση της τελικής παραγωγής δεν είναι στατιστικά σημαντική, η VRT προσφέρει το αδιαμφισβήτητο πλεονέκτημα της μείωσης των περιττών εισροών, προσαρμόζοντας τις δόσεις στις πραγματικές ανάγκες των επιμέρους ζωνών διαχείρισης του αγρού (Casa et al., 2011). Η προσέγγιση αυτή αποτρέπει την υπερλίπανση, βελτιώνει την αποδοτικότητα χρήσης του αζώτου και ενισχύει την οικονομική βιωσιμότητα, ειδικά όταν οι εφαρμοζόμενες δόσεις προσεγγίζουν τα επίπεδα που μεγιστοποιούν το κέρδος της εκμετάλλευσης (Maine et al., 2009).

Ωστόσο, η επιτυχής και αποδοτική εφαρμογή της VRT εξαρτάται απολύτως από την ύπαρξη ακριβών και αξιόπιστων χωρικών δεδομένων. Σε αυτό το κρίσιμο σημείο, η Τηλεπισκόπηση (RS) και τα UAV λειτουργούν ως η θεμελιώδης πληροφοριακή υποδομή του συστήματος. Η χρήση προσιτών συστημάτων απεικόνισης RGB μέσω UAV επιτρέπει την εξαγωγή χρωματικών δεικτών, όπως ο Excess Green (ExG), οι οποίοι αποτυπώνουν με εξαιρετική λεπτομέρεια τη χωρική ετερογένεια της καλλιέργειας και την απόκρισή της στα διαφορετικά επίπεδα αζώτου, επιτυγχάνοντας εκτιμήσεις απόδοσης με χαμηλό μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (Zhang et al., 2020). Παράλληλα, η διαχρονική εξέλιξη των εγγύς αισθητήρων και των δορυφορικών δεδομένων παρέχει τη δυνατότητα μη καταστροφικής, σε πραγματικό χρόνο παρακολούθησης της έλλειψης αζώτου και της βιομάζας (David J. Mulla, 2012). Η ενσωμάτωση αυτών των ψηφιακών εργαλείων παρακολούθησης μετατρέπει την οπτική και φασματική πληροφορία σε αξιοποιήσιμα δεδομένα, τα οποία είναι απολύτως απαραίτητα για τη δημιουργία των χαρτών συνταγογράφησης που καθοδηγούν τα συστήματα μεταβλητής δόσης (Mulla, 2012; Yilmaz, 2025).

Ενώ τα UAV και η τηλεπισκόπηση παρέχουν τη διάγνωση και η VRT εκτελεί τη διαφοροποιημένη εφαρμογή, τα συστήματα GPS και AutoSteer προσφέρουν την απαραίτητη επιχειρησιακή ακρίβεια για την απρόσκοπτη υλοποίηση αυτών των παρεμβάσεων στον αγρό. Οι ελκυστήρες που καθοδηγούνται από GPS αποτελούν την πιο ευρέως υιοθετημένη ψηφιακή τεχνολογία, καθώς ελαχιστοποιούν τις επικαλύψεις και τα κενά κατά τη διάρκεια των γεωργικών εργασιών (Yilmaz, 2025). Η ακρίβεια αυτή αποτρέπει την καταστροφή των φυτών από αποκλίσεις της πορείας των μηχανημάτων, προστατεύοντας την αναμενόμενη απόδοση και αποτρέποντας σημαντικές οικονομικές απώλειες (Balafoutis et al., 2017). Επιπλέον, η εξάλειψη των διπλοεφαρμογών οδηγεί σε άμεση μείωση του κόστους των εισροών, η οποία μπορεί να αγγίξει το 14,8% σε εκμεταλλεύσεις με υψηλό βαθμό ψηφιακής ενσωμάτωσης (Yilmaz, 2025). Λόγω αυτών των άμεσων και μετρήσιμων μειώσεων στο λειτουργικό κόστος, τα συστήματα GPS/AutoSteer εξασφαλίζουν την ταχύτερη απόδοση επένδυσης (ROI), με τον χρόνο απόσβεσης να περιορίζεται στα 2,1 έτη για τις πλήρως ψηφιοποιημένες εκμεταλλεύσεις (Yilmaz, 2025). Ταυτόχρονα, το GPS αποτελεί τον τεχνολογικό φορέα που επιτρέπει τη γεωαναφορά των

δεδομένων απόδοσης και εδάφους, καθιστώντας εφικτή τη χαρτογράφηση που απαιτείται για τη λειτουργία της VRT (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

Η πραγματική δυναμική της Γεωργίας Ακριβείας αναδεικνύεται μέσα από τη συνεργιστική λειτουργία αυτών των τριών πυλώνων. Η μεμονωμένη χρήση ενός αισθητήρα ή ενός συστήματος πλοήγησης προσφέρει γραμμικά οφέλη, αλλά η ταυτόχρονη ενσωμάτωση της παρακολούθησης μέσω UAV, της ακριβούς καθοδήγησης μέσω GPS/AutoSteer και της στοχευμένης εφαρμογής μέσω VRT παράγει εκθετικά αποτελέσματα. Η βιβλιογραφία τεκμηριώνει ότι η συνδυαστική χρήση πολλαπλών ψηφιακών εργαλείων δημιουργεί συνεργιστικά οφέλη που υπερβαίνουν το άθροισμα των μεμονωμένων συνεισφορών τους, οδηγώντας σε συνολική αύξηση της απόδοσης έως και 24,6% (Yilmaz, 2025). Μέσα από αυτή την αλυσίδα αξίας, όπου τα δεδομένα συλλέγονται με ακρίβεια (RS/UAV) μεταφράζονται σε χωρικές αποφάσεις και εκτελούνται με απόλυτη πιστότητα (GPS/AutoSteer) για τη βελτιστοποίηση των εισροών (VRT), η σύγχρονη διαχείριση του καλαμποκιού επιτυγχάνει την ιδανική ισορροπία μεταξύ μέγιστης παραγωγικότητας, προστασίας των φυσικών πόρων και διασφάλισης της μακροπρόθεσμης οικονομικής κερδοφορίας.

7.2 Προϋποθέσεις επιτυχίας

Η επιτυχής εφαρμογή της Γεωργίας Ακριβείας και η μετάβαση από τη θεωρητική δυναμική των τεχνολογιών στο πρακτικό παραγωγικό και οικονομικό όφελος δεν αποτελούν αυτόματη διαδικασία, αλλά εξαρτώνται από αυστηρές προϋποθέσεις. Η βασικότερη από αυτές είναι η ύπαρξη επαρκούς χωρικής παραλλακτικότητας εντός του αγρού. Η τεχνολογία μεταβλητής δόσης (VRT) και τα συστήματα στοχευμένης διαχείρισης σχεδιάστηκαν ακριβώς για να ανταποκρίνονται στη χωρική μεταβλητότητα των εδαφικών ιδιοτήτων και των αναγκών της καλλιέργειας (Balafoutis et al., 2017). Εάν ένας αγρός παρουσιάζει υψηλή ομοιογένεια, η εφαρμογή διαφοροποιημένων εισροών δεν προσφέρει ουσιαστική απόδοση επένδυσης (ROI), καθώς η ενιαία διαχείριση επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών των φυτών. Στη βιβλιογραφία, η σημασία της ετερογένειας τεκμηριώνεται σαφώς: στη Νότια Αφρική, η μεταβλητή εφαρμογή αζώτου στο καλαμπόκι παρουσίασε παραγωγικό πλεονέκτημα κυρίως σε περιοχές όπου το βάθος του εδάφους υπερέβαινε τον μέσο όρο του αγρού, ενώ τα οφέλη εμφάνισαν έντονη διακύμανση από έτος σε έτος ανάλογα με τη χωρική ανταπόκριση (Maine et al., 2009). Αντίθετα, σε περιπτώσεις όπου η οριοθέτηση των ζωνών διαχείρισης δεν συνοδεύεται από έντονες διαφοροποιήσεις στις εδαφικές ιδιότητες, όπως παρατηρήθηκε σε πειραματική εφαρμογή στην Ιταλία, η μεταβλητή λίπανση δεν επέφερε στατιστικά σημαντικές διαφορές στην τελική απόδοση του καρπού σε σύγκριση με την ομοιόμορφη εφαρμογή (Casa et al., 2011). Συνεπώς, η αξιόπιστη χαρτογράφηση και η επιβεβαίωση της χωρικής μεταβλητότητας αποτελούν το αναγκαίο πρώτο βήμα, καθώς χωρίς αυτήν, η επένδυση σε VRT καθίσταται οικονομικά αδικαιολόγητη (Maine et al., 2009; Casa et al., 2011).

Δεύτερη κρίσιμη προϋπόθεση αποτελεί η κλίμακα της γεωργικής εκμετάλλευσης σε συνάρτηση με το υψηλό κόστος κεφαλαίου. Οι τεχνολογίες Γεωργίας Ακριβείας, όπως οι αισθητήρες, τα συστήματα πλοήγησης και ο εξοπλισμός μεταβλητής δόσης, απαιτούν σημαντικές αρχικές επενδύσεις, οι οποίες μεταφράζονται σε υψηλά πάγια κόστη (Yilmaz, 2025; Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019; Maine et al., 2009). Για να καταστεί βιώσιμη η απόσβεση αυτού του εξοπλισμού, απαιτείται επαρκής καλλιεργήσιμη έκταση. Η οικονομική ανάλυση ευαισθησίας δείχνει ότι το μέγεθος της εκμετάλλευσης και η τιμή πώλησης του προϊόντος συνιστούν τους καθοριστικότερους παράγοντες για την κερδοφορία

της μεταβλητής εφαρμογής αζώτου (Maine et al., 2009). Η επιρροή της κλίμακας επιβεβαιώνεται και από δεδομένα υιοθέτησης ψηφιακών εργαλείων, όπου η μέση έκταση των εκμεταλλεύσεων αυξάνεται γραμμικά με τον βαθμό ενσωμάτωσης των τεχνολογιών, υποδεικνύοντας ότι οι μικρές ιδιοκτησίες αντιμετωπίζουν σοβαρά εμπόδια πρόσβασης λόγω του δυσανάλογου κόστους (Yilmaz, 2025). Το υψηλό κόστος της χειροκίνητης δειγματοληψίας εδάφους και των συστημάτων που βασίζονται σε χάρτες επιβαρύνει περαιτέρω τον προϋπολογισμό των μικρών παραγωγών (Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019). Για την υπέρβαση αυτού του περιορισμού, η βιβλιογραφία προτείνει την ανάπτυξη συνεργατικών μοντέλων ιδιοκτησίας, τα οποία μπορούν να επιμερίσουν το αρχικό κεφάλαιο και να καταστήσουν την τεχνολογία προσιτή σε μικρότερους παραγωγούς (Yilmaz, 2025).

Η τρίτη προϋπόθεση αφορά την ικανότητα ενσωμάτωσης και ανάλυσης των δεδομένων. Η απλή απόκτηση τεχνολογικού εξοπλισμού, όπως ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος (UAV) ή ένας αισθητήρας εδάφους, δεν επαρκεί από μόνη της για τη βελτίωση της παραγωγικότητας (Yilmaz, 2025; Zhang et al., 2020). Η πραγματική αξία της Γεωργίας Ακριβείας αναδεικνύεται όταν τα πρωτογενή δεδομένα μετασχηματίζονται σε αξιοποιήσιμη πληροφορία μέσω της ενσωμάτωσής τους σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων (Yilmaz, 2025). Η βιβλιογραφία υπογραμμίζει την ανάγκη για προηγμένη βαθμονόμηση των αισθητήρων, ατμοσφαιρικές διορθώσεις και γεωαναφορά, προκειμένου τα δεδομένα Τηλεπισκόπησης να είναι αξιόπιστα (Mulla, 2012). Επιπλέον, η εξαγωγή δεικτών βλάστησης, όπως ο Excess Green (ExG), απαιτεί προσεκτικό πειραματικό σχεδιασμό και μοντελοποίηση για να συσχετιστεί με ακρίβεια με την τελική απόδοση, καθώς συχνά τα απλά γραμμικά μοντέλα παρουσιάζουν χαμηλούς συντελεστές προσδιορισμού (Zhang et al., 2020). Η μέγιστη παραγωγική βελτίωση επιτυγχάνεται μόνο όταν πολλαπλά ψηφιακά εργαλεία λειτουργούν συνεργιστικά, συνδυάζοντας την ένταση χρήσης με την υψηλή εξάρτηση από τα ψηφιακά δεδομένα για τη λήψη αποφάσεων (Yilmaz, 2025). Η απουσία τέτοιων αναλυτικών ροών και μοντέλων ακυρώνει το πλεονέκτημα της συλλογής δεδομένων, μετατρέποντας την τεχνολογία σε μη αξιοποιήσιμο παράγοντα.

Τέλος, η επιτυχία της Γεωργίας Ακριβείας εξαρτάται άμεσα από το ανθρώπινο κεφάλαιο και τον βαθμό τεχνολογικού αλφαριθμητισμού των παραγωγών. Η διαχείριση πολύπλοκων συστημάτων, η ερμηνεία χωρικών δεδομένων και η λειτουργία λογισμικών απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις και συνεχή εκπαίδευση (Iticha et al., 2021; Maine et al., 2009).

Μελέτες αναδεικνύουν ότι το μορφωτικό επίπεδο και η συχνότητα επαφής με γεωργικούς συμβούλους αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες που επηρεάζουν θετικά την υιοθέτηση και την ένταση χρήσης καινοτόμων πρακτικών, όπως η ορθολογική χρήση λιπασμάτων (Iticha et al., 2021). Αντίθετα, η έλλειψη γνώσης και οι περιορισμοί στη ικανότητα διαχείρισης των δεδομένων αναγνωρίζονται ως βασικά εμπόδια (Yilmaz, 2025; Iticha et al., 2021). Είναι χαρακτηριστικό ότι το κόστος εκπαίδευσης και ο χρόνος που απαιτείται από τον παραγωγό για την εκμάθηση του εξοπλισμού και την ανάλυση των δεδομένων αποτελούν σημαντικές, αν και συχνά μη καταγεγραμμένες, παραμέτρους της συνολικής επένδυσης (Maine et al., 2009). Χωρίς την κατάλληλη υποστήριξη και την ανάπτυξη δεξιοτήτων, οι παραγωγοί αδυνατούν να αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες των συστημάτων, περιορίζοντας την εφαρμογή τους σε βασικές μόνο λειτουργίες και χάνοντας τα ουσιαστικά οφέλη της χωρικά διαφοροποιημένης διαχείρισης.

7.3 Γενίκευση ευρημάτων στην ελληνική πραγματικότητα

Η μετάβαση από τη διεθνή δεδομένα στην ελληνική πραγματικότητα απαιτεί την κριτική προσαρμογή των τεχνολογικών και οικονομικών ευρημάτων της Γεωργίας Ακριβείας στα ιδιαίτερα δομικά χαρακτηριστικά του εγχώριου πρωτογενούς τομέα. Ενώ η διεθνής βιβλιογραφία τεκμηριώνει σημαντικά παραγωγικά οφέλη από τη χρήση συστημάτων μεταβλητής δόσης και Τηλεπισκόπησης, η άμεση μεταφορά αυτών των συμπερασμάτων στα ελληνικά δεδομένα προσκρούει σε εγγενείς περιορισμούς, όπως ο μικρός και κατακερματισμένος κλήρος. Η παρούσα ενότητα αναλύει κριτικά τη δυνατότητα εφαρμογής αυτών των τεχνολογιών στο ελληνικό πλαίσιο, συγκρίνοντας τα παγκόσμια εμπειρικά δεδομένα με τις τοπικές συνθήκες και προτείνοντας βιώσιμες στρατηγικές υιοθέτησης, όπως η χρήση τεχνολογιών χαμηλού κόστους, η αξιοποίηση εργολάβων γεωργικών μηχανημάτων και η ενίσχυση των συνεταιριστικών σχημάτων.

Η διεθνής βιβλιογραφία που εξετάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια βασίζεται κατά κύριο λόγο σε εμπειρικά δεδομένα από γεωργικές εκμεταλλεύσεις μεγάλης κλίμακας. Για παράδειγμα, οι μελέτες αξιολόγησης της μεταβλητής δόσης αζώτου (VRT) και της Τηλεπισκόπησης μέσω μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAV) διεξήχθησαν σε αγρούς μεγέθους 104 εκταρίων στη Νότια Αφρική (Maine et al., 2009) και 27 εκταρίων στις Ηνωμένες Πολιτείες (Zhang et al., 2020). Αντίστοιχα, οι οικονομικές αναλύσεις συχνά προϋποθέτουν εκτάσεις εκατοντάδων εκταρίων για την ταχεία απόσβεση του κεφαλαιουχικού εξοπλισμού (Yilmaz, 2025; Maine et al., 2009). Αντιθέτως, η θεωρητική και πρακτική εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών στην Ελλάδα καλείται να λειτουργήσει σε ένα εντελώς διαφορετικό περιβάλλον. Η ελληνική γεωργία χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μικρό και πολυτεμαχισμένο κλήρο, με τη μέση γεωργική εκμετάλλευση να υπολείπεται των 7 εκταρίων, σύμφωνα με τα πλέον πρόσφατα στατιστικά δεδομένα της ΕΛΣΤΑΤ του 2022.

Αυτή η θεμελιώδης διαφορά κλίμακας δημιουργεί σημαντικούς περιορισμούς. Το υψηλό κόστος κεφαλαίου για την απόκτηση προηγμένου εξοπλισμού, όπως οι ελκυστήρες με συστήματα αυτόματης καθοδήγησης RTK, οι εξειδικευμένοι αισθητήρες εδάφους και τα παρελκόμενα μεταβλητής εφαρμογής, καθίσταται απαγορευτικό για τον μεμονωμένο Έλληνα μικροκαλλιεργητή (Fountas et al., 2005). Όπως επισημαίνεται στη βιβλιογραφία,

το μέγεθος της εκμετάλλευσης αποτελεί τον πλέον καθοριστικό παράγοντα για την κερδοφορία των τεχνολογιών ακριβείας, καθώς τα υψηλά πάγια κόστη απαιτούν μεγάλες επιφάνειες για να αποσβεστούν μέσω της εξοικονόμησης εισροών (Yilmaz, 2025; Maine et al., 2009). Επιπλέον, η έλλειψη εξοικείωσης και οι αυξημένες εκπαιδευτικές ανάγκες των παραγωγών δυσχεραίνουν περαιτέρω την ενσωμάτωση πολύπλοκων ψηφιακών εργαλείων στην καθημερινή πρακτική (Kountios et al., 2017).

Είναι σημαντικό ωστόσο να τονιστεί ότι η γεωγραφική και κλιματική εγγύτητα της Ελλάδας με άλλες μεσογειακές χώρες καθιστά ορισμένα διεθνή ευρήματα ιδιαίτερα σχετικά. Για παράδειγμα, η μελέτη των Casa et al. στην Ιταλία, η οποία διεξήχθη σε εμπορικό αγρό 10 εκταρίων – μέγεθος πολύ πιο κοντά στα ελληνικά δεδομένα σε σχέση με τις αμερικανικές εκμεταλλεύσεις – κατέδειξε ότι η μεταβλητή εφαρμογή αζώτου μπορεί να διατηρήσει την απόδοση του καλαμποκιού σταθερή, προσφέροντας ταυτόχρονα εξοικονόμηση λιπάσματος (Casa et al., 2011). Στην Ελλάδα, όπου η εδαφική ετερογένεια είναι έντονη ακόμη και σε μικρής έκτασης αγροτεμάχια, η χαρτογράφηση των εδαφικών ιδιοτήτων και η δημιουργία ζωνών διαχείρισης αποκτούν κρίσιμη σημασία. Η εφαρμογή στοχευμένων εισροών αποτρέπει την υπερλίπανση, η οποία όχι μόνο αυξάνει το κόστος παραγωγής, αλλά επιβαρύνει και τα ευαίσθητα μεσογειακά οικοσυστήματα μέσω της έκλυσης νιτρικών (Casa et al., 2011).

Παρά τους περιορισμούς κλίμακας, η γενίκευση των ευρημάτων υποδεικνύει ότι υπάρχουν ρεαλιστικές και βιώσιμες οδοί για την ενσωμάτωση της Γεωργίας Ακριβείας στην ελληνική πραγματικότητα. Η πρώτη βιώσιμη στρατηγική αφορά την υιοθέτηση τεχνολογιών χαμηλού κόστους. Η διεθνής εμπειρία αποδεικνύει ότι η ακριβής παρακολούθηση της καλλιέργειας δεν απαιτεί απαραίτητα ακριβούς υπερφασματικούς αισθητήρες. Η χρήση εμπορικών καμερών RGB προσαρτημένων σε προσιτά μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV) μπορεί να εκτιμήσει την απόδοση του καλαμποκιού με ικανοποιητική ακρίβεια και να καθοδηγήσει τη διαχείριση του αζώτου, διατηρώντας το σφάλμα πρόβλεψης σε χαμηλά επίπεδα 6,2% έως 15,1%. (Zhang et al., 2020). Σε συνδυασμό με τα ελεύθερα διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα, οι προσεγγίσεις αυτές καθιστούν προσιτή την πρόσβαση στη χωρική πληροφορία, παρακάμπτοντας το εμπόδιο του υψηλού αρχικού κόστους (Mulla, 2012).

Η δεύτερη και ίσως κρισιμότερη διέξοδος για τα ελληνικά δεδομένα είναι η ανάπτυξη της αγοράς των παρόχων υπηρεσιών και των εργολάβων γεωργικών μηχανημάτων. Δεδομένου ότι η μεμονωμένη αγορά εξοπλισμού VRT ή AutoSteer δεν είναι οικονομικά βιώσιμη για αγρούς των 5 ή 10 εκταρίων, οι εργολάβοι μπορούν να επενδύσουν σε αυτά τα συστήματα και να αποσβέσουν το κόστος επιμερίζοντάς το σε πολλούς πελάτες και σε χιλιάδες στρέμματα αθροιστικά (Fountas et al., 2005). Με αυτόν τον τρόπο, ο μικρός παραγωγός αγοράζει την υπηρεσία της Γεωργίας Ακριβείας απολαμβάνοντας τα οφέλη της μείωσης των επικαλύψεων και της βελτιστοποίησης των εισροών, χωρίς να επωμίζεται το δυσβάσταχτο κόστος κτήσης και συντήρησης των μηχανημάτων (Balafoutis et al., 2017; Lowenberg-DeBoer & Erickson, 2019).

Τέλος, η τρίτη στρατηγική αφορά την αξιοποίηση των συνεταιριστικών σχημάτων. Η βιβλιογραφία τονίζει ότι τα συνεργατικά μοντέλα ιδιοκτησίας (cooperative ownership models) είναι απαραίτητα για την υπέρβαση των εμποδίων πρόσβασης στις μικρές ιδιοκτησίες (Yilmaz, 2025). Οι αγροτικοί συνεταιρισμοί στην Ελλάδα μπορούν να λειτουργήσουν ως κεντρικοί κόμβοι επένδυσης, αγοράζοντας τον απαραίτητο ψηφιακό εξοπλισμό και παρέχοντάς τον στα μέλη τους. Μια τέτοια προσέγγιση όχι μόνο επιλύει το πρόβλημα της κλίμακας, αλλά διευκολύνει και την κεντρική διαχείριση των δεδομένων, την εκπαίδευση των αγροτών και την ορθολογική λήψη αποφάσεων σε επίπεδο ευρύτερης γεωγραφικής ζώνης (Kountios et al., 2017). Μέσω των συνεταιρισμών, η μείωση του κόστους των εισροών κατά 14,8%, η οποία καταγράφεται σε εκμεταλλεύσεις υψηλής ψηφιακής υιοθέτησης, μπορεί να επιτευχθεί συλλογικά, ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα του ελληνικού καλαμποκιού (Yilmaz, 2025).

Συμπερασματικά, ενώ η ελληνική γεωργία υστερεί σε φυσικό μέγεθος εκμεταλλεύσεων συγκριτικά με τα διεθνή πρότυπα, τα παραγωγικά και οικονομικά οφέλη της Γεωργίας Ακριβείας παραμένουν απολύτως εφαρμόσιμα. Η επιτυχής μετάβαση προϋποθέτει την εγκατάλειψη του μοντέλου της ατομικής ιδιοκτησίας ακριβού εξοπλισμού και τη στροφή προς τεχνολογίες χαμηλού κόστους, την παροχή εξειδικευμένων εργολαβικών υπηρεσιών και την ισχυροποίηση των συνεταιριστικών δομών.

Βιβλιογραφία

ΕΛΣΤΑΤ. (2022). *Απογραφή Γεωργίας - Κτηνοτροφίας 2021*. Ελληνική Στατιστική Αρχή.

Aghaei, S., Karimi Alavijeh, M., Shafiei, M., & Karimi, K. (2022). A comprehensive review on bioethanol production from corn stover: Worldwide potential, environmental importance, and perspectives. *Biomass and Bioenergy*, 159, 106419.

Argento, F., Anken, T., Abt, F., Vogelsanger, E., Walter, A., & Liebisch, F. (2020). Site-specific nitrogen management in winter wheat supported by low-altitude remote sensing and soil data. *Precision Agriculture*, 21, 1321–1344.

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*, 9(8), 1339.

Casa, R., Cavalieri, A., & Lo Cascio, B. (2011). Nitrogen fertilisation management in precision agriculture: A preliminary application example on maize. *Italian Journal of Agronomy*, 6(1), e5.

Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., & Prasanna, B. M. (2022). Global maize production, consumption and trade: Trends and R&D implications. *Food Security*, 14, 1295–1319.

Fountas, S., Aggelopoulou, K., & Gemtos, T. A. (2005). Precision agriculture in Greece. *Precision Agriculture*, 6(1), 41–56.

Kountios, G., Ragkos, A., Bournaris, T., & Michailidis, A. (2017). Educational needs and perceptions of Greek farmers towards precision agriculture. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 8(1), 1–14.

Lan, Y., & Ban, S. (2025). Economic and environmental benefits of precision agriculture technologies: A meta-analysis. *Sustainability*, 17(2), 450.

Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4), 1552–1569.

Maine, N., Lowenberg-DeBoer, J., Nell, W. T., & Alemu, Z. G. (2010). Impact of variable-rate application of nitrogen on yield and profit: A case study from South Africa. *Precision Agriculture*, 11(5), 448–463.

Medici, M., & Canavari, M. (2022). The economic impact of precision agriculture technologies: A systematic review. *CAB Reviews*, 17(1), 1–15.

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371.

Oosterwijk, L., van der Werf, W., & Klerkx, L. (2026). Environmental, economic, and social impacts of precision agriculture technology adoption: A review. *Journal of Rural Studies*, 98, 103–115.

Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurišić, M. (2023). Global navigation satellite systems as state-of-the-art solutions in precision agriculture: A review of studies indexed in the Web of Science. *Agriculture*, 13(7), 1417.

Schimmelpennig, D. (2016). *Farm profits and adoption of precision agriculture* (Economic Research Report No. 217). U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service.

Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136.

- Thompson, L., & Puntel, L. (2020). Transforming unmanned aerial vehicle (UAV) and multispectral sensor into a practical decision support system for precision nitrogen management in corn. *Remote Sensing*, 12(10), 1631.
- Wang, Y., Li, X., Zhang, Y., & Chen, X. (2025). Precision nitrogen management for maize based on crop modeling, remote sensing and machine learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 228, 108650.
- Yilmaz, E. (2025). Evaluation of digital agriculture tools for precision crop management and yield optimization. *International Journal of Research in Agronomy*, 8(1), 123–130.
- Zhang, M., Zhou, J., Sudduth, K. A., & Kitchen, N. R. (2020). Estimation of maize yield and effects of variable-rate nitrogen application using UAV-based RGB imagery. *Biosystems Engineering*, 189, 17–25.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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