

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη αισθητήρων στην γεωργία ακριβείας και μεθόδων
ανάλυσης δεδομένων»



Αλεπούδης Ραφαήλ
512001

Επιβλέπων
Δρ. Κυριάκος Τσιακμάκης

Ιούνιος 2026

Μελέτη αισθητήρων στην γεωργία ακριβείας και μεθόδων ανάλυσης δεδομένων

Κωδικός: **26221**

Φοιτητής: Αλεπούδης Ραφαήλ

Εισηγητής: Κυριάκος Τσιακμάκης

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 26-03-2026

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 27-05-2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως πτυχιακή εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

*Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή **Ραφαήλ Αλεπούδη** που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.*

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί μελέτη για τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας και για τις βασικές μεθόδους ανάλυσης δεδομένων που αξιοποιούνται σε σύγχρονα αγροτικά συστήματα. Αρχικά παρουσιάζεται η έννοια της γεωργίας ακριβείας ως μια προσέγγιση διαχείρισης που βασίζεται στη συλλογή, επεξεργασία και αξιοποίηση δεδομένων από το χωράφι, με στόχο την ορθότερη χρήση νερού, λιπασμάτων, φυτοπροστατευτικών και ενέργειας. Στη συνέχεια εξετάζονται βασικές κατηγορίες αισθητήρων, όπως αισθητήρες εδάφους, κλιματικοί αισθητήρες, αισθητήρες φυτικής κατάστασης, κάμερες, UAV, δορυφορικά συστήματα και μηχανισμοί χαρτογράφησης παραγωγής. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις κάμερες RGB, πολυφασματικές, υπερφασματικές και θερμικές, καθώς και σε αισθητήρες εδάφους όπως υγρασίας, θερμοκρασίας, pH και φαινομενικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Επιπλέον αναλύονται μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων, όπως καθαρισμός, κανονικοποίηση, υπολογισμός δεικτών βλάστησης, ομαδοποίηση, ταξινόμηση και πρόβλεψη με μηχανική μάθηση. Τέλος, παρουσιάζεται ενδεικτικό πρακτικό κεφάλαιο με χρήση έτοιμων datasets και Python, ώστε να φανεί πώς μπορεί να υλοποιηθεί μια απλή αλυσίδα ανάλυσης δεδομένων για ταξινόμηση ή σύσταση καλλιέργειας.

« Study of sensors in precision agriculture and data analysis methods»

Abstract

This thesis is a review study on sensors used in precision agriculture and on data analysis methods applied in modern agricultural monitoring systems. First, the concept of precision agriculture is introduced as a data-driven management approach that supports more efficient use of water, fertilizers, pesticides, energy and labour. Then, the main categories of sensors are presented, including soil sensors, climate sensors, crop-status sensors, cameras, UAV-based systems, satellite platforms and yield mapping technologies. Special emphasis is placed on RGB, multispectral, hyperspectral and thermal cameras, as well as on soil sensors for moisture, temperature, pH and apparent electrical conductivity. The thesis also discusses contact and non-contact soil measurements, aerial measurements and remote sensing. In addition, the main stages of agricultural data analysis are described, including data cleaning, normalization, vegetation-index calculation, clustering, classification and prediction using machine learning. Finally, a practical chapter presents how ready-made datasets can be used with Python to build reproducible examples for crop recommendation, plant-related classification and sensor-data analysis.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου για την καθοδήγηση και τις χρήσιμες παρατηρήσεις του. Ευχαριστώ επίσης την οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξη κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract	5
Ευχαριστίες.....	6
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων.....	9
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στη γεωργία ακριβείας	11
1.1 Τι είναι η γεωργία ακριβείας	11
1.2 Γιατί είναι σημαντική	12
1.3 Από το δεδομένο στην απόφαση.....	12
Κεφάλαιο 2ο: Κατηγορίες αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας	14
2.1 Γενική ταξινόμηση αισθητήρων	14
2.2 Αισθητήρες εδάφους.....	15
2.3 Κλιματικοί αισθητήρες και μικρομετεωρολογικοί σταθμοί	15
2.4 Αισθητήρες κατάστασης φυτού	15
2.5 Επικοινωνία και τροφοδοσία αισθητήρων	15
Κεφάλαιο 3ο: Χρήση καμερών και συστημάτων απεικόνισης	16
3.1 Ρόλος της εικόνας στη γεωργία ακριβείας	16
3.2 Δείκτες βλάστησης	17
3.3 Κάμερες RGB.....	20
3.4 Κάμερες NIR και πολυφασματικές κάμερες	21
3.5 Υπερφασματικές κάμερες.....	22
3.6 Θερμικές κάμερες	23
3.7 Κάμερες stereo, depth και 3D απεικόνιση	23
3.8 Κριτήρια επιλογής κάμερας για αγροτική εφαρμογή.....	24
3.9 Επεξεργασία εικόνας και μηχανική όραση	25
Κεφάλαιο 4ο: Μέτρηση με αισθητήρες εδάφους.....	27
4.1 Υγρασία εδάφους.....	27
4.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα εδάφους.....	29
4.3 pH, θερμοκρασία και θρεπτικά στοιχεία.....	30
4.4 Βαθμονόμηση και αξιοπιστία μετρήσεων.....	32

4.5	Ερευνητική κατεύθυνση: ολοκληρωμένος χαμηλού κόστους αισθητήρας εδάφους	33
Κεφάλαιο 5ο: Μέτρηση εδάφους χωρίς επαφή.....		35
5.1	Γιατί χρειάζονται μη επαφικές μετρήσεις	35
5.2	Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και εδαφική μεταβλητότητα	36
5.3	Όργανα μέτρησης αγωγιμότητας χωρίς επαφή με το έδαφος.....	37
5.4	Πρωτόκολλο μέτρησης και χαρτογράφησης ECa	38
5.5	Φασματική ανάλυση εδάφους χωρίς επαφή.....	40
5.6	Άλλες μη επαφικές και γεωφυσικές τεχνικές εδάφους.....	40
5.7	Ερμηνεία χαρτών αγωγιμότητας και σύνδεση με αγρονομικές αποφάσεις	41
5.8	Σύγκριση επαφικών και μη επαφικών μετρήσεων	42
5.9	Πηγές σφάλματος, βαθμονόμηση και αξιοπιστία	43
5.10	Ερευνητική κατεύθυνση: συνδυασμός ECa, αισθητήρων εδάφους και IoT	44
Κεφάλαιο 6ο: Μέτρηση από αέρα και τηλεπισκόπηση.....		45
6.1	UAV και εφαρμογές χαμηλού ύψους.....	45
6.2	Δορυφορική τηλεπισκόπηση και παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων	46
6.3	Θερμική απεικόνιση και υδατικό στρες	47
6.4	LiDAR και τρισδιάστατη πληροφορία.....	48
6.5	Συνδυασμός αερομετρήσεων με αισθητήρες εδάφους	48
6.6	Περιορισμοί, σφάλματα και απαιτήσεις αξιοπιστίας	49
6.7	Ερευνητικές δυνατότητες	49
Κεφάλαιο 7ο: Μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων		51
7.1	Απόκτηση, καθαρισμός και προετοιμασία δεδομένων.....	51
7.2	Στατιστική ανάλυση και οπτικοποίηση.....	51
7.3	Μηχανική μάθηση	51
7.4	Δείκτες αξιολόγησης	52
Κεφάλαιο 8ο: Εφαρμογή σε έτοιμα datasets με Python.....		53
8.1	Σκοπός πρακτικού κεφαλαίου.....	53
8.2	Πηγές datasets και τρόπος πρόσβασης.....	54
8.3	Μαθηματική βάση της ανάλυσης	54
8.4	Παράδειγμα 1: Crop Recommendation Dataset	55
8.5	Παράδειγμα 2: Dry Bean Dataset	58
8.6	Παράδειγμα 3: Δορυφορικά δεδομένα και δείκτες βλάστησης	59
8.7	Δομή αποτελεσμάτων	60
8.8	Σύνδεση με τους αισθητήρες	61

Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα.....	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	63

Κατάλογος Σχημάτων

Εικόνα 1.1. Γενική αρχιτεκτονική συστήματος γεωργίας ακριβείας	11
Εικόνα 2.1. Κατηγορίες αισθητήρων στη γεωργία ακριβείας.....	14
Εικόνα 3.1. Ενδεικτική ερμηνεία τιμών NDVI σε αγροτικές εφαρμογές	18
Εικόνα 3.2. Ενδεικτικά φασματικά κανάλια που αξιοποιούνται σε κάμερες γεωργίας ακριβείας	21
Εικόνα 4.1. Ενδεικτική αλυσίδα μέτρησης αισθητήρων εδάφους από το φυσικό μέγεθος μέχρι την απεικόνιση σε πληροφοριακό σύστημα	27
Εικόνα 4.2. Ενδεικτικό παράδειγμα καμπύλης βαθμονόμησης αισθητήρα υγρασίας με μετρήσεις αναφοράς.....	32
Εικόνα 5.1. Αρχή λειτουργίας μη επαφικού οργάνου ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής για εκτίμηση φαινομενικής αγωγιμότητας εδάφους	36
Εικόνα 5.2. Ενδεικτική ροή εργασίας για χαρτογράφηση εδάφους με μη επαφική μέτρηση ECa.....	39
Εικόνα 7.1. Γενική ροή ανάλυσης δεδομένων.....	51
Εικόνα 8.1. Γενική ροή πρακτικής ανάλυσης δεδομένων με Python.....	53
Εικόνα 8.2. Ενδεικτικό γράφημα σχέσης pH και βροχόπτωσης ανά καλλιέργεια	56
Εικόνα 8.3. Ενδεικτική σημαντικότητα μεταβλητών για μοντέλο Random Forest.....	57
Εικόνα 8.4. Ενδεικτικός πίνακας σύγχυσης για ταξινόμηση καλλιεργειών	57
Εικόνα 8.5. Κατανομή των επτά κλάσεων του Dry Bean Dataset	58
Εικόνα 8.6. Ενδεικτική χρονοσειρά NDVI και EVI κατά τη διάρκεια καλλιεργητικής περιόδου	60

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1. Βασικές εφαρμογές της γεωργίας ακριβείας.....	12
Πίνακας 2.1. Κατηγορίες αισθητήρων και μετρούμενες παράμετροι.....	14
Πίνακας 3.1. Σύγκριση βασικών τύπων καμερών στη γεωργία ακριβείας	16
Πίνακας 3.2. Ενδεικτικοί δείκτες βλάστησης και χρήση τους.....	19
Πίνακας 3.3. Ενδεικτικές χρήσεις RGB καμερών	20
Πίνακας 3.4. Διαφορά πολυφασματικής και υπερφασματικής απεικόνισης.....	22
Πίνακας 3.5. Επιλογή κάμερας ανά σκοπό εφαρμογής	24
Πίνακας 3.6. Τυπική ροή επεξεργασίας εικόνας σε γεωργική εφαρμογή	25
Πίνακας 4.1. Βασικές τεχνικές μέτρησης υγρασίας εδάφους και χαρακτηριστικά τους.....	29
Πίνακας 4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν τη μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους.....	30
Πίνακας 4.3. Παράμετροι pH, θερμοκρασίας και θρεπτικών στοιχείων σε αισθητήρες εδάφους	31
Πίνακας 4.4. Διαδικασία βαθμονόμησης και αξιολόγησης αισθητήρων εδάφους.....	33
Πίνακας 5.1. Ενδεικτικές χρήσεις μη επαφικών τεχνικών εδάφους στη γεωργία ακριβείας	35

Πίνακας 5.2. Ενδεικτικές κατηγορίες οργάνων μη επαφικής μέτρησης φαινομενικής αγωγιμότητας εδάφους.....	38
Πίνακας 5.3. Προτεινόμενο πρωτόκολλο μέτρησης και αξιοποίησης μη επαφικών μετρήσεων ECa	39
Πίνακας 5.4. Σύγκριση μη επαφικών και γεωφυσικών τεχνικών για εδαφική χαρτογράφηση	41
Πίνακας 5.5. Σύγκριση επαφικών και μη επαφικών μετρήσεων εδάφους	42
Πίνακας 5.6. Βασικές πηγές σφάλματος στις μη επαφικές μετρήσεις ECa και τρόποι αντιμετώπισης	43
Πίνακας 6.1. Συνοπτική σύγκριση UAV, δορυφορικών δεδομένων και LiDAR στη γεωργία ακριβείας	47
Πίνακας 7.1. Βασικές τεχνικές ανάλυσης δεδομένων	51
Πίνακας 7.2. Μετρικές αξιολόγησης μοντέλων	52
Πίνακας 8.1. Πηγές και βασικά χαρακτηριστικά των datasets που χρησιμοποιούνται στο πρακτικό κεφάλαιο	54
Πίνακας 8.2. Δομή παρουσίασης αποτελεσμάτων ανά dataset και μοντέλο	60

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή στη γεωργία ακριβείας

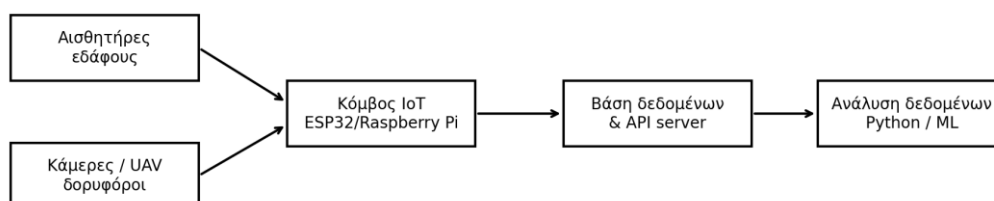
1.1 Τι είναι η γεωργία ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας είναι μια σύγχρονη προσέγγιση διαχείρισης της αγροτικής παραγωγής, στην οποία οι αποφάσεις δεν λαμβάνονται μόνο με βάση την εμπειρία ή τον μέσο όρο ενός χωραφιού αλλά με βάση λεπτομερή δεδομένα που συλλέγονται από διαφορετικές πηγές. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να προέρχονται από αισθητήρες εδάφους, μετεωρολογικούς σταθμούς, κάμερες, UAV, δορυφορικές εικόνες, μηχανήματα συγκομιδής και πληροφοριακά συστήματα. Ο στόχος είναι να γίνεται η κατάλληλη ενέργεια, στη σωστή θέση, στη σωστή στιγμή και με τη σωστή ποσότητα [1], [2].

Στην παραδοσιακή γεωργία, πολλές αποφάσεις εφαρμόζονται ομοιόμορφα σε ολόκληρο το χωράφι. Για παράδειγμα το ίδιο πότισμα ή η ίδια ποσότητα λιπάσματος μπορεί να εφαρμόζεται σε όλα τα τμήματα, ακόμη και αν το ένα τμήμα έχει μεγαλύτερη υγρασία, άλλο τμήμα έχει χαμηλότερη οργανική ουσία και άλλο παρουσιάζει μεγαλύτερη ανάπτυξη φυτών. Η γεωργία ακριβείας προσπαθεί να αντιμετωπίσει αυτή τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα. Με άλλα λόγια αναγνωρίζει ότι το χωράφι δεν είναι ενιαίο και ομοιόμορφο αλλά αποτελείται από μικρότερες ζώνες με διαφορετικές ανάγκες.

Η έννοια αυτή συνδέεται με τεχνολογίες όπως GPS, GIS, αισθητήρες, δίκτυα IoT, ασύρματες επικοινωνίες, αυτόματα συστήματα άρδευσης, drones, δορυφορική τηλεπισκόπηση και αλγορίθμους ανάλυσης δεδομένων. Τα σύγχρονα συστήματα δεν καταγράφουν απλώς μετρήσεις, αλλά μπορούν να υποστηρίξουν αποφάσεις. Για παράδειγμα ένα σύστημα μπορεί να εντοπίσει περιοχές με υδατικό στρες, να εκτιμήσει τη διαφοροποίηση της βλάστησης ή να προτείνει διαφορετική ποσότητα λίπανσης ανά ζώνη [3], [4].

Επομένως η γεωργία ακριβείας δεν είναι μόνο η χρήση ενός αισθητήρα ή ενός drone. Είναι ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που συνδυάζει μετρήσεις, χωρική πληροφορία, ανάλυση δεδομένων και αγρονομική ερμηνεία. Η τελική αξία προκύπτει όταν οι μετρήσεις μετατρέπονται σε χρήσιμη απόφαση για τον παραγωγό. Για τον λόγο αυτό οι αισθητήρες αποτελούν την αρχή της διαδικασίας αλλά η ανάλυση δεδομένων αποτελεί το κρίσιμο βήμα που μετατρέπει τα δεδομένα σε γνώση.



Ροή δεδομένων στη γεωργία ακριβείας: μέτρηση → αποθήκευση → ανάλυση → απόφαση

Εικόνα 1.1. Γενική αρχιτεκτονική συστήματος γεωργίας ακριβείας

1.2 Γιατί είναι σημαντική

Η σημασία της γεωργίας ακριβείας αυξάνεται λόγω της ανάγκης για παραγωγή περισσότερων και ποιοτικότερων τροφίμων με λιγότερους πόρους. Η κλιματική αλλαγή, η έλλειψη νερού, το αυξημένο κόστος παραγωγής και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί δημιουργούν πίεση για πιο αποδοτική χρήση εισροών. Με την αξιοποίηση αισθητήρων και δεδομένων ο παραγωγός μπορεί να μειώσει περιττές εφαρμογές και να εντοπίσει προβλήματα νωρίτερα και να βελτιώσει την απόδοση της καλλιέργειας [5].

Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα ένας αισθητήρας υγρασίας εδάφους μπορεί να δείξει πότε πραγματικά χρειάζεται άρδευση. Μια πολυφασματική εικόνα μπορεί να δείξει περιοχές με μειωμένη φωτοσυνθετική δραστηριότητα πριν αυτές γίνουν ορατές στο ανθρώπινο μάτι. Ένας μετεωρολογικός σταθμός μπορεί να υποστηρίξει μοντέλα πρόβλεψης ασθενειών. Με αυτόν τον τρόπο η απόφαση γίνεται πιο καλή.

Η γεωργία ακριβείας υποστηρίζει επίσης την αειφορία. Η καλύτερη χρήση λιπασμάτων μειώνει τις απώλειες θρεπτικών στοιχείων και την πιθανή ρύπανση υδάτων. Η ακριβέστερη άρδευση μειώνει τη σπατάλη νερού και ενέργειας. Η στοχευμένη φυτοπροστασία μπορεί να μειώσει τη χρήση χημικών. Συνεπώς το όφελος δεν είναι μόνο οικονομικό αλλά και περιβαλλοντικό [6].

Πίνακας 1.1. Βασικές εφαρμογές της γεωργίας ακριβείας

Εφαρμογή	Παράδειγμα δεδομένων	Πιθανή απόφαση
Άρδευση	Υγρασία εδάφους, θερμοκρασία, πρόγνωση καιρού	Πότε και πόσο να ποτιστεί κάθε ζώνη
Λίπανση	EC, pH, ανάλυση εδάφους, δείκτες βλάστησης	Μεταβλητή δόση λιπάσματος
Φυτοπροστασία	Θερμοκρασία, υγρασία φύλλου, εικόνες καλλιέργειας	Έγκαιρη προειδοποίηση ασθενειών
Παρακολούθηση ανάπτυξης	NDVI, GNDVI, ύψος φυτών, κάμερες	Εντοπισμός περιοχών στρες
Συγκομιδή	Χάρτες παραγωγής, υγρασία καρπού	Αξιολόγηση αποδοτικότητας αγρού

1.3 Από το δεδομένο στην απόφαση

Η βασική αλυσίδα λειτουργίας ενός συστήματος γεωργίας ακριβείας περιλαμβάνει τέσσερα στάδια. Πρώτα γίνεται η συλλογή δεδομένων. Στη συνέχεια τα δεδομένα αποθηκεύονται και καθαρίζονται. Έπειτα αναλύονται με στατιστικές ή υπολογιστικές μεθόδους. Τέλος τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον χρήστη ή οδηγούν σε κάποια ενέργεια όπως άρδευση, λίπανση ή ειδοποίηση.

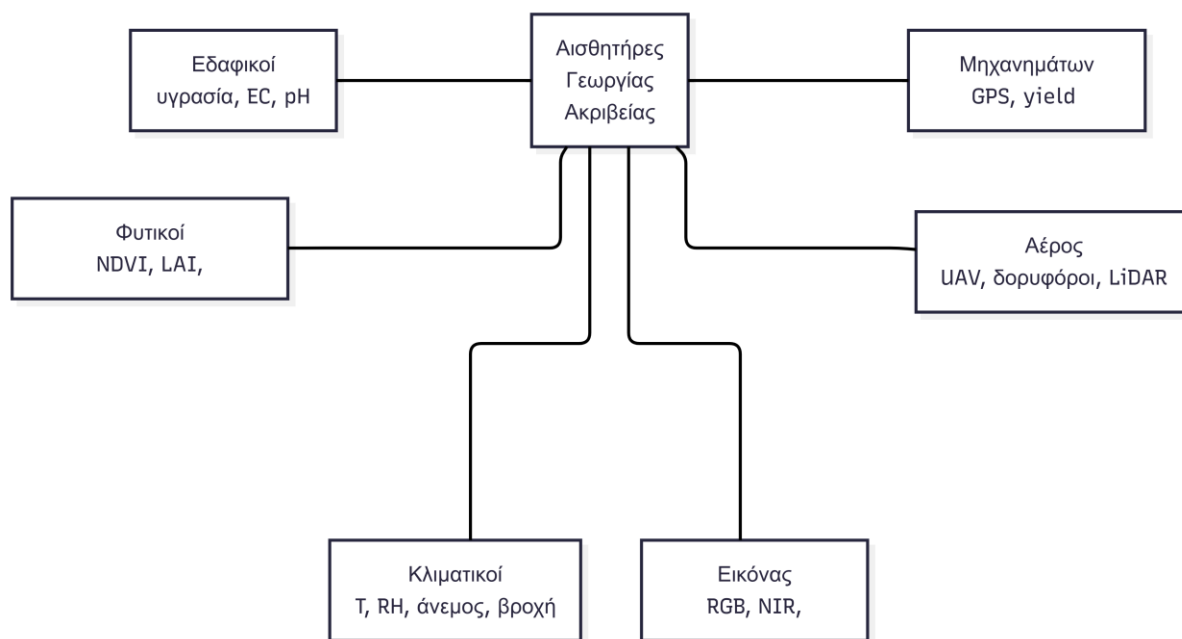
Η αξιοπιστία όλης της αλυσίδας εξαρτάται από την ποιότητα των μετρήσεων, τη σωστή βαθμονόμηση και την κατάλληλη ερμηνεία.

Στην παρούσα εργασία ο αναγνώστης εισάγεται στις βασικές τεχνολογίες αισθητήρων και στη συνέχεια στις μεθόδους ανάλυσης δεδομένων. Η εργασία περιλαμβάνει και πρακτικό κεφάλαιο με Python, ώστε να φανεί πώς μπορούν να αξιοποιηθούν έτοιμα datasets για εκπαιδευτική και ερευνητική ανάλυση.

Κεφάλαιο 2ο: Κατηγορίες αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας

2.1 Γενική ταξινόμηση αισθητήρων

Οι αισθητήρες στη γεωργία ακριβείας μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το τι μετρούν, πού εγκαθίστανται και με ποια φυσική αρχή λειτουργούν. Μια πρακτική ταξινόμηση περιλαμβάνει αισθητήρες εδάφους, φυτικού καλύμματος, μικροκλίματος, απεικόνισης, από αέρα, αισθητήρες μηχανημάτων και αισθητήρες ποιότητας προϊόντων [4], [7].



Εικόνα 2.1. Κατηγορίες αισθητήρων στη γεωργία ακριβείας

Πίνακας 2.1. Κατηγορίες αισθητήρων και μετρούμενες παράμετροι

Κατηγορία αισθητήρων	Παράμετροι	Τυπική χρήση
Εδαφικοί αισθητήρες	Υγρασία, θερμοκρασία, EC, pH, θρεπτικά	Άρδευση, λίπανση, χαρτογράφηση εδάφους
Κλιματικοί αισθητήρες	Θερμοκρασία, σχετική υγρασία, βροχή, άνεμος	Πρόγνωση ασθενειών, μικροκλίμα, άρδευση
Αισθητήρες φυτού	Χλωροφύλλη, NDVI, LAI, υδατικό στρες	Παρακολούθηση ανάπτυξης και στρες
Κάμερες	RGB, NIR, θερμική, υπερφασματική πληροφορία	Ανάλυση εικόνας, δείκτες βλάστησης
Από αέρα	UAV, δορυφόροι, LiDAR	Χαρτογράφηση μεγάλων εκτάσεων

Μηχανημάτων	GPS, αισθητήρες παραγωγής, κατανάλωση	Χάρτες απόδοσης, μεταβλητή εφαρμογή
-------------	---------------------------------------	-------------------------------------

2.2 Αισθητήρες εδάφους

Οι αισθητήρες εδάφους είναι από τις πιο σημαντικές κατηγορίες, επειδή το έδαφος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τη διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών στοιχείων. Οι πιο συχνές μετρήσεις είναι η υγρασία, η θερμοκρασία, το pH και η φαινομενική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η υγρασία εδάφους είναι κρίσιμη για την άρδευση, ενώ η EC μπορεί να συνδεθεί με την αλατότητα, την υφή του εδάφους και τη χωρική διαφοροποίηση [6], [21].

Οι αισθητήρες υγρασίας μπορούν να βασίζονται σε χωρητικές, αντιστατικές, TDR ή FDR τεχνικές. Οι χωρητικοί αισθητήρες είναι οικονομικοί και εύκολοι στην ενσωμάτωση με μικροελεγκτές, αλλά επηρεάζονται από την αλατότητα, τη θερμοκρασία και τη βαθμονόμηση. Οι TDR/FDR τεχνικές προσφέρουν καλύτερη ακρίβεια, αλλά συνήθως έχουν μεγαλύτερο κόστος [6], [23].

Οι αισθητήρες pH και θρεπτικών στοιχείων έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αλλά συχνά παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσκολία στην πρακτική χρήση. Το pH μπορεί να μετρηθεί με ηλεκτροχημικά ηλεκτρόδια, τα οποία απαιτούν βαθμονόμηση και συντήρηση. Για τα θρεπτικά στοιχεία, όπως N, P και K, η αξιόπιστη επιτόπια μέτρηση είναι πιο σύνθετη και πολλές εφαρμογές βασίζονται ακόμη σε εργαστηριακές αναλύσεις ή σε έμμεσες μετρήσεις.

2.3 Κλιματικοί αισθητήρες και μικρομετεωρολογικοί σταθμοί

Οι κλιματικοί αισθητήρες καταγράφουν τις συνθήκες γύρω από την καλλιέργεια. Περιλαμβάνουν θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία, βροχόπτωση, πίεση και υγρασία φύλλου. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής, την πρόβλεψη ασθενειών και τη βελτιστοποίηση άρδευσης. Σε ένα σύστημα IoT, τα δεδομένα αποστέλλονται σε server και μπορούν να συνδυαστούν με δεδομένα εδάφους και εικόνας.

2.4 Αισθητήρες κατάστασης φυτού

Η κατάσταση του φυτού μπορεί να εκτιμηθεί με αισθητήρες που μετρούν οπτικά, φασματικά ή φυσιολογικά χαρακτηριστικά. Οι δείκτες βλάστησης, όπως NDVI και GNDVI, βασίζονται στη διαφορά ανάκλασης στο ορατό και στο κοντινό υπέρυθρο. Η χλωροφύλλη, το LAI, η θερμοκρασία κόμης και η υδατική κατάσταση αποτελούν σημαντικές παράμετρους για την παρακολούθηση στρες [13]-[15].

2.5 Επικοινωνία και τροφοδοσία αισθητήρων

Στην πράξη, ένας αισθητήρας δεν λειτουργεί μόνος του. Απαιτείται κόμβος μέτρησης, τροφοδοσία, μικροελεγκτής, επικοινωνία και πλατφόρμα αποθήκευσης. Σε αγροτικά περιβάλλοντα χρησιμοποιούνται συχνά Wi-Fi, LoRa/LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M ή τοπικά RF links. Η επιλογή εξαρτάται από την απόσταση, την κατανάλωση ενέργειας, τη συχνότητα αποστολής δεδομένων και τη διαθεσιμότητα δικτύου. Για απομακρυσμένους κόμβους, η τροφοδοσία με μπαταρία και μικρό φωτοβολταϊκό είναι συχνά απαραίτητη [8], [9].

Κεφάλαιο 3ο: Χρήση καμερών και συστημάτων απεικόνισης

3.1 Ρόλος της εικόνας στη γεωργία ακριβείας

Οι κάμερες και γενικότερα τα συστήματα απεικόνισης αποτελούν μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες της γεωργίας ακριβείας, επειδή μπορούν να αποτυπώσουν την κατάσταση της καλλιέργειας με χωρική λεπτομέρεια. Σε αντίθεση με έναν σημειακό αισθητήρα, ο οποίος δίνει μέτρηση μόνο σε ένα συγκεκριμένο σημείο, μία εικόνα περιλαμβάνει χιλιάδες ή εκατομμύρια εικονοστοιχεία. Κάθε εικονοστοιχείο μπορεί να θεωρηθεί ως μια μικρή μέτρηση της επιφάνειας του φυτού, του εδάφους ή του περιβάλλοντος. Έτσι, η εικόνα επιτρέπει όχι μόνο την παρακολούθηση μιας μέσης τιμής, αλλά και τη μελέτη της ανομοιομορφίας μέσα στον αγρό [5], [11].

Η πληροφορία που προέρχεται από κάμερες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτίμηση φυτοκάλυψης, καταμέτρηση φυτών, αναγνώριση ζιζανίων, εκτίμηση ύψους και όγκου κόμης, παρακολούθηση ασθενειών, υπολογισμό δεικτών βλάστησης και εντοπισμό υδατικού ή θρεπτικού στρες. Η βασική ιδέα είναι ότι η οπτική ή φασματική συμπεριφορά του φυτού μεταβάλλεται όταν αλλάζει η φυσιολογική του κατάσταση. Για παράδειγμα, ένα φυτό με καλή ανάπτυξη παρουσιάζει διαφορετική ανάκλαση στο κόκκινο και στο κοντινό υπέρυθρο σε σχέση με ένα φυτό που βρίσκεται σε στρες ή έχει μειωμένη χλωροφύλλη [13], [14].

Οι εικόνες μπορούν να ληφθούν από διαφορετικές πλατφόρμες. Σε εργαστηριακές ή θερμοκηπιακές εφαρμογές χρησιμοποιούνται σταθερές κάμερες ή κάμερες τοποθετημένες σε ράγες. Σε αγρό μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάμερες πάνω σε γεωργικά μηχανήματα, τρίποδες, UAV ή δορυφορικές πλατφόρμες. Η επιλογή πλατφόρμας επηρεάζει άμεσα τη χωρική ανάλυση, τη συχνότητα λήψης, το κόστος και το είδος της πληροφορίας που μπορεί να εξαχθεί. Για παράδειγμα, μια επίγεια κάμερα μπορεί να δώσει λεπτομέρεια σε επίπεδο φύλλου, ενώ ένας δορυφόρος παρέχει επαναλαμβανόμενη κάλυψη σε πολύ μεγαλύτερη έκταση [16], [17].

Σημαντικό σημείο είναι ότι η εικόνα δεν είναι από μόνη της τελικό αποτέλεσμα. Πρέπει να περάσει από στάδια προεπεξεργασίας, βαθμονόμησης, επιλογής περιοχής ενδιαφέροντος, υπολογισμού χαρακτηριστικών και τελικά ερμηνείας. Χωρίς σωστή επεξεργασία, οι σκιές, η γωνία λήψης, η ώρα της ημέρας, οι νεφώσεις, η αντανάκλαση του εδάφους και η γεωμετρική παραμόρφωση μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα. Για αυτό οι εικόνες στη γεωργία ακριβείας πρέπει να αντιμετωπίζονται ως μετρητικά δεδομένα και όχι απλώς ως φωτογραφίες.

Πίνακας 3.1. Σύγκριση βασικών τύπων καμερών στη γεωργία ακριβείας

Τύπος κάμερας	Κανάλια/πληροφορία	Τυπικές εφαρμογές	Κύρια πλεονεκτήματα	Κύριοι περιορισμοί
RGB	Κόκκινο, πράσινο, μπλε	Φυτοκάλυψη, καταμέτρηση φυτών, ζιζάνια, ασθένειες	Χαμηλό κόστος, απλή χρήση, υψηλή ανάλυση	Εξάρτηση από φωτισμό, περιορισμένη φασματική πληροφορία
NIR/πολυφασματική	Ορατό, NIR, red-edge	NDVI, GNDVI, NDRE, χλωροφύλλη, στρες	Σύνδεση με φυσιολογία φυτού, χρήσιμοι δείκτες	Απαιτεί βαθμονόμηση και σωστή έκθεση
Υπερφασματική	Πολλά στενά φασματικά κανάλια	Πρώιμη διάγνωση στρες, ποιότητα, θρεπτικά	Πολύ πλούσια πληροφορία	Υψηλό κόστος, μεγάλος όγκος δεδομένων
Θερμική	Θερμοκρασία κόμης/επιφάνειας	Υδατικό στρες, άρδευση, διαπνοή	Ανιχνεύει μεταβολές μη ορατές στο RGB	Επηρεάζεται από άνεμο, ακτινοβολία και ώρα λήψης
Stereo/Depth	Βάθος και 3D δομή	Ύψος φυτών, όγκος κόμης, γεωμετρία	Τρισδιάστατη πληροφορία	Απαιτεί βαθμονόμηση και υπολογιστική επεξεργασία

3.2 Δείκτες βλάστησης

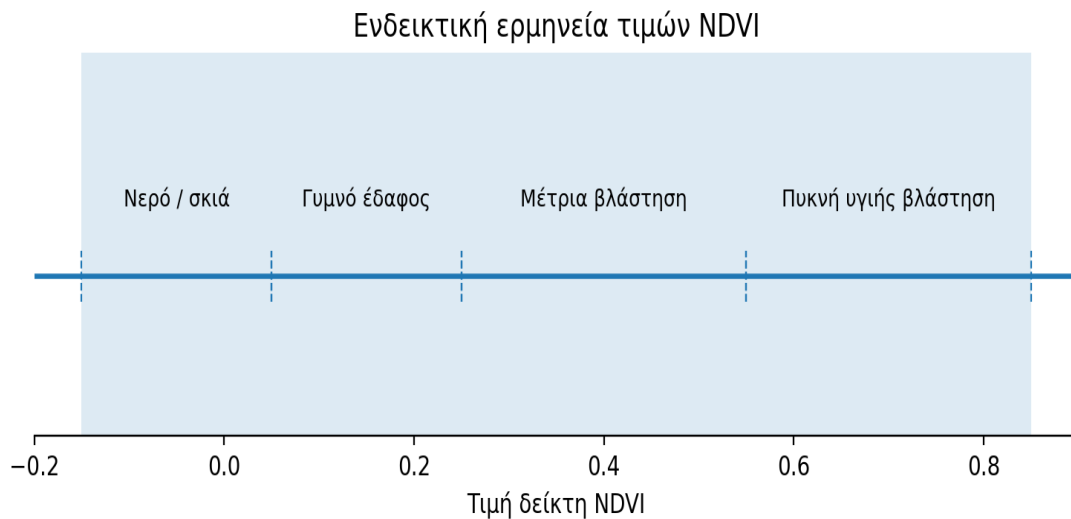
Οι δείκτες βλάστησης είναι αριθμητικοί δείκτες που προκύπτουν από μαθηματικούς συνδυασμούς φασματικών καναλιών. Χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν την πληροφορία μιας εικόνας σε πιο ερμηνεύσιμη μεταβλητή, η οποία σχετίζεται με τη φυτική ανάπτυξη, την ποσότητα χλωροφύλλης, τη φυτοκάλυψη, τη βιομάζα ή το στρες. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στην τηλεπισκόπηση και στη γεωργία ακριβείας, επειδή επιτρέπουν τη σύγκριση διαφορετικών περιοχών ενός αγρού και τη δημιουργία χαρτών κατάστασης της καλλιέργειας [13], [14].

Η φυσική βάση των δεικτών βλάστησης σχετίζεται με τον τρόπο με τον οποίο τα φύλλα αλληλεπιδρούν με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η χλωροφύλλη απορροφά σημαντικό μέρος της ακτινοβολίας στο κόκκινο τμήμα του ορατού φάσματος, επειδή το κόκκινο φως χρησιμοποιείται στη φωτοσύνθεση. Αντίθετα, η εσωτερική δομή των φύλλων ανακλά έντονα στο κοντινό υπέρυθρο. Επομένως, ένα υγιές φυτό συνήθως εμφανίζει χαμηλή ανάκλαση στο κόκκινο και υψηλή ανάκλαση στο NIR. Όσο πιο έντονη είναι αυτή η διαφορά, τόσο πιο ισχυρό είναι συνήθως το σήμα της βλάστησης.

Ο πιο γνωστός δείκτης είναι ο NDVI, ο οποίος υπολογίζεται από το κοντινό υπέρυθρο και το κόκκινο κανάλι:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Οι τιμές του NDVI κυμαίνονται θεωρητικά από -1 έως +1. Τιμές κοντά στο μηδέν ή αρνητικές συνδέονται συνήθως με νερό, σκιά, μη φυτικές επιφάνειες ή γυμνό έδαφος. Τιμές περίπου 0,2-0,4 μπορεί να υποδηλώνουν αραιή ή μέτρια βλάστηση, ενώ υψηλότερες τιμές, όπως 0,6-0,8, συνδέονται με πυκνή και υγιή βλάστηση. Η ερμηνεία όμως δεν είναι απόλυτη, επειδή εξαρτάται από το είδος της καλλιέργειας, το στάδιο ανάπτυξης, την πυκνότητα φυλλώματος, την υγρασία, το έδαφος και τις συνθήκες λήψης [13], [14].



Εικόνα 3.1. Ενδεικτική ερμηνεία τιμών NDVI σε αγροτικές εφαρμογές

Ένας δεύτερος χρήσιμος δείκτης είναι ο GNDVI, στον οποίο το κόκκινο κανάλι αντικαθίσταται από το πράσινο. Ο δείκτης αυτός μπορεί να είναι πιο ευαίσθητος σε μεταβολές χλωροφύλλης σε ορισμένα στάδια ανάπτυξης, επειδή το πράσινο τμήμα του φάσματος σχετίζεται με διαφορετικό τρόπο με τη φυτική αντανάκλαση σε σχέση με το κόκκινο [15].

$$GNDVI = (NIR - Green) / (NIR + Green)$$

Σε εφαρμογές όπου υπάρχει διαθέσιμο red-edge κανάλι, χρησιμοποιούνται δείκτες όπως ο NDRE. Το red-edge βρίσκεται στη μεταβατική περιοχή ανάμεσα στο κόκκινο και στο κοντινό υπέρυθρο και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε πιο ανεπτυγμένη ή πυκνή βλάστηση, όπου ο NDVI μπορεί να κορεστεί. Ο κορεσμός σημαίνει ότι ο δείκτης δεν αυξάνεται αρκετά όταν η φυτική μάζα συνεχίζει να αυξάνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα διάκρισης ανάμεσα σε υψηλά επίπεδα βλάστησης.

$$NDRE = (NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge)$$

Άλλοι δείκτες, όπως ο SAVI, προσπαθούν να μειώσουν την επίδραση του εδάφους, ειδικά όταν η φυτοκάλυψη είναι αραιή. Αυτό είναι σημαντικό σε πρώιμα στάδια ανάπτυξης, όπου μεγάλο μέρος της εικόνας μπορεί να αποτελείται από γυμνό έδαφος. Ο SAVI εισάγει έναν παράγοντα διόρθωσης L, ώστε να περιοριστεί η επίδραση της ανακλαστικότητας του εδάφους.

$$SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) \times (1 + L)$$

Υπάρχουν επίσης δείκτες που σχετίζονται με το νερό, όπως ο NDWI, οι οποίοι αξιοποιούνται για την εκτίμηση υδατικής κατάστασης της βλάστησης ή της υγρασίας. Η επιλογή δείκτη πρέπει να γίνεται

με βάση τον σκοπό της εφαρμογής. Για παράδειγμα, για γενική παρακολούθηση φυτοκάλυψης ο NDVI είναι απλός και διαδεδομένος. Για εκτίμηση χλωροφύλλης μπορεί να προτιμηθεί ο GNDVI ή δείκτες red-edge. Για υδατικό στρες μπορεί να συνδυαστούν δείκτες νερού με θερμική πληροφορία.

Πίνακας 3.2. Ενδεικτικοί δείκτες βλάστησης και χρήση τους

Δείκτης	Τύπος	Απαιτούμενα κανάλια	Κύρια χρήση	Σχόλιο
NDVI	$(\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$	NIR, Red	Γενική βλάστηση, φυτοκάλυψη, βιομάζα	Πολύ διαδεδομένος, αλλά μπορεί να κορεστεί σε πυκνή βλάστηση
GNDVI	$(\text{NIR} - \text{Green}) / (\text{NIR} + \text{Green})$	NIR, Green	Χλωροφύλλη και θρεπτική κατάσταση	Χρήσιμος σε εφαρμογές παρακολούθησης ανάπτυξης
NDRE	$(\text{NIR} - \text{RedEdge}) / (\text{NIR} + \text{RedEdge})$	NIR, Red-edge	Πυκνή βλάστηση, χλωροφύλλη	Απαιτεί πολυφασματική κάμερα με red-edge
SAVI	$((\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red} + \text{L})) \times (1 + \text{L})$	NIR, Red	Αραιή βλάστηση	Μειώνει την επίδραση γυμνού εδάφους
NDWI	$(\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$ ή παραλλαγές	NIR, SWIR/Green	Υδατική κατάσταση	Η ακριβής μορφή εξαρτάται από τα διαθέσιμα κανάλια

Παρά τη χρησιμότητά τους, οι δείκτες βλάστησης δεν πρέπει να ερμηνεύονται απομονωμένα. Μια χαμηλή τιμή NDVI μπορεί να οφείλεται σε στρες, σε έλλειψη φυτοκάλυψης, σε σκιά, σε κακή γεωαναφορά ή σε λάθος βαθμονόμηση. Αντίστοιχα, μια υψηλή τιμή δεν σημαίνει πάντα υψηλή παραγωγή. Για πιο αξιόπιστη ερμηνεία πρέπει να συνδυάζονται με παρατηρήσεις πεδίου, μετρήσεις εδάφους, ιστορικά δεδομένα, στάδιο ανάπτυξης και αγρονομική γνώση.

Στην πράξη, η ροή εργασίας για τους δείκτες βλάστησης περιλαμβάνει: λήψη εικόνας, ραδιομετρική διόρθωση, γεωμετρική διόρθωση, μάσκα βλάστησης, υπολογισμό δείκτη για κάθε pixel, δημιουργία χάρτη και εξαγωγή στατιστικών ανά ζώνη. Έτσι μπορεί να προκύψει, για παράδειγμα, ένας χάρτης NDVI που χωρίζει τον αγρό σε ζώνες χαμηλής, μέσης και υψηλής ανάπτυξης. Οι ζώνες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στοχευμένη επιθεώρηση, διαφοροποιημένη λίπανση ή επιλογή σημείων δειγματοληψίας.

3.3 Κάμερες RGB

Οι κάμερες RGB είναι οι πιο απλές και οικονομικές κάμερες που χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας. Καταγράφουν την εικόνα στο ορατό φάσμα, δηλαδή στα κανάλια κόκκινο, πράσινο και μπλε. Παρότι δεν παρέχουν πληροφορία στο κοντινό υπέρυθρο, μπορούν να είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, κυρίως όταν το ζητούμενο είναι η οπτική μορφή, το χρώμα, η κάλυψη και η γεωμετρία της καλλιέργειας [26].

Ένα βασικό πλεονέκτημα των RGB καμερών είναι το χαμηλό κόστος και η μεγάλη διαθεσιμότητα. Μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα σε σταθερά σημεία, σε Raspberry Pi, σε κινητά συστήματα, σε UAV ή σε γεωργικά μηχανήματα. Επίσης, παρέχουν συνήθως υψηλή χωρική ανάλυση, γεγονός που επιτρέπει την αναγνώριση μικρών αντικειμένων, όπως φύλλα, καρποί, άνθη, γραμμές φύτευσης ή ζιζάνια.

Με RGB εικόνες μπορούν να υπολογιστούν απλοί δείκτες χρώματος, όπως ExG (Excess Green), ExR (Excess Red), VARI και άλλοι δείκτες που βασίζονται στο ορατό φάσμα. Αυτοί οι δείκτες δεν έχουν την ίδια φυσιολογική ερμηνεία με τον NDVI, αλλά μπορούν να βοηθήσουν στον διαχωρισμό πράσινης βλάστησης από το έδαφος. Για παράδειγμα, σε μια εικόνα καλλιέργειας, το πράσινο χρώμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τμηματοποίηση φυτών, ώστε να υπολογιστεί το ποσοστό φυτοκάλυψης.

Οι RGB κάμερες χρησιμοποιούνται επίσης στην αναγνώριση ασθενειών και ελλείψεων, όταν αυτές προκαλούν ορατές αλλαγές στο φύλλο, όπως κιτρίνισμα, καφέ κηλίδες, ξήρανση ή παραμόρφωση. Σε τέτοιες εφαρμογές, συχνά εφαρμόζονται τεχνικές μηχανικής μάθησης ή βαθιάς μάθησης, όπως CNN, για ταξινόμηση υγιών και ασθενών φύλλων. Η επιτυχία όμως εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων, την ποικιλία των συνθηκών λήψης και τη σωστή επισημάνση των εικόνων [29].

Βασικός περιορισμός των RGB καμερών είναι η ευαισθησία στον φωτισμό. Η ίδια καλλιέργεια μπορεί να εμφανίζεται διαφορετική αν η λήψη γίνει πρωί, μεσημέρι, με συννεφιά ή με έντονες σκιές. Για αυτό χρειάζεται σταθεροποίηση των συνθηκών λήψης ή εφαρμογή αλγορίθμων διόρθωσης φωτισμού. Επιπλέον, επειδή δεν υπάρχει NIR κανάλι, οι RGB κάμερες δεν μπορούν να υπολογίσουν κλασικούς δείκτες όπως NDVI και GNDVI.

Πίνακας 3.3. Ενδεικτικές χρήσεις RGB καμερών

Εφαρμογή	Παράδειγμα ανάλυσης	Αποτέλεσμα
Φυτοκάλυψη	Τμηματοποίηση πράσινων περιοχών	Ποσοστό κάλυψης εδάφους από φυτά
Καταμέτρηση φυτών	Αναγνώριση αντικειμένων/σειρών	Πλήθος φυτών και κενά φύτευσης
Ζιζάνια	Διάκριση καλλιέργειας-ζιζανίων	Χάρτης πιθανών ζιζανίων
Ασθένειες	Ταξινόμηση φύλλων ή περιοχών	Πιθανότητα προσβολής
Ανάπτυξη	Σύγκριση εικόνων στον χρόνο	Ρυθμός αύξησης φυτοκάλυψης

3.4 Κάμερες NIR και πολυφασματικές κάμερες

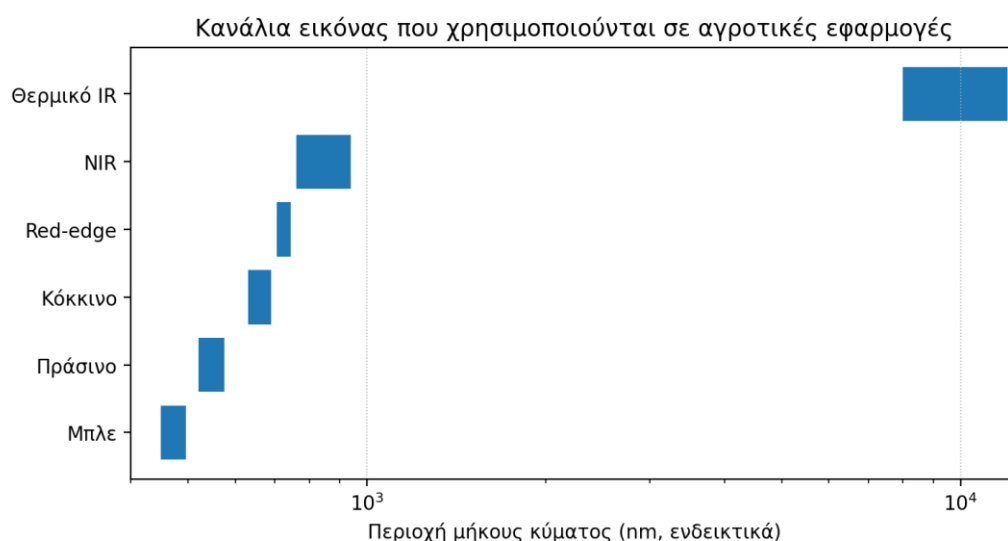
Οι κάμερες NIR και οι πολυφασματικές κάμερες αποτελούν βασικό εργαλείο για τον υπολογισμό δεικτών βλάστησης. Το κοντινό υπέρυθρο δεν είναι ορατό από τον άνθρωπο, όμως είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη μελέτη φυτών, επειδή η υγιής βλάστηση το ανακλά έντονα. Όταν μια κάμερα καταγράφει ταυτόχρονα το NIR και κανάλια του ορατού φάσματος, μπορεί να υπολογιστεί ο NDVI, ο GNDVI και άλλοι δείκτες [13]-[15].

Οι πολυφασματικές κάμερες συνήθως διαθέτουν λίγα, αλλά επιλεγμένα φασματικά κανάλια. Τυπικά περιλαμβάνουν μπλε, πράσινο, κόκκινο, red-edge και NIR. Αυτή η διάταξη είναι πρακτική, επειδή δεν δημιουργεί τεράστιο όγκο δεδομένων, αλλά παρέχει αρκετή πληροφορία για βασικούς δείκτες βλάστησης. Σε UAV εφαρμογές, οι πολυφασματικές κάμερες είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς, επειδή επιτρέπουν τη δημιουργία χαρτών NDVI ή NDRE σε επίπεδο αγρού [27], [28].

Η χρήση πολυφασματικών καμερών απαιτεί προσοχή στη ραδιομετρική βαθμονόμηση. Η φωτεινότητα που καταγράφει ο αισθητήρας δεν εξαρτάται μόνο από το φυτό, αλλά και από τον ήλιο, τα σύννεφα, τη γωνία λήψης και τις ρυθμίσεις της κάμερας. Για αυτό χρησιμοποιούνται συχνά βαθμονομημένα πάνελ αναφοράς και αισθητήρες ηλιακής ακτινοβολίας. Με αυτόν τον τρόπο, οι τιμές των καναλιών μπορούν να μετατραπούν σε πιο συγκρίσιμη ανακλαστικότητα.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των πολυφασματικών καμερών είναι ότι μπορούν να εντοπίσουν μεταβολές που δεν είναι εύκολα ορατές στην RGB εικόνα. Για παράδειγμα, ένα φυτό μπορεί να φαίνεται πράσινο στο ανθρώπινο μάτι, αλλά να παρουσιάζει μείωση στο NIR ή μεταβολή στο red-edge λόγω πρώιμου στρες. Έτσι, οι πολυφασματικές εικόνες μπορούν να λειτουργήσουν ως εργαλείο έγκαιρης προειδοποίησης.

Ωστόσο, οι δείκτες που προκύπτουν από πολυφασματικές εικόνες πρέπει να συσχετίζονται με πραγματικά δεδομένα πεδίου. Ένας χάρτης NDVI δείχνει διαφορές στη φασματική απόκριση, αλλά δεν εξηγεί μόνος του την αιτία. Η χαμηλή τιμή μπορεί να οφείλεται σε έλλειψη νερού, ασθένεια, έλλειψη αζώτου, αραιώση φυτών ή πρόβλημα εδάφους. Για αυτό η ερμηνεία πρέπει να γίνεται συνδυαστικά.



Εικόνα 3.2. Ενδεικτικά φασματικά κανάλια που αξιοποιούνται σε κάμερες γεωργίας ακριβείας

3.5 Υπερφασματικές κάμερες

Οι υπερφασματικές κάμερες καταγράφουν πολύ περισσότερα φασματικά κανάλια σε σχέση με τις πολυφασματικές. Αντί για λίγα πλατιά κανάλια, καταγράφουν δεκάδες ή εκατοντάδες στενές φασματικές ζώνες. Το αποτέλεσμα είναι ένας κύβος δεδομένων, όπου κάθε ρίξει έχει ένα σχεδόν συνεχές φασματικό αποτύπωμα. Αυτή η πληροφορία μπορεί να αποκαλύψει λεπτές διαφοροποιήσεις στη χημική και φυσιολογική κατάσταση των φυτών [18], [19].

Στη γεωργία ακριβείας, οι υπερφασματικές κάμερες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρώιμη ανίχνευση ασθενειών, εκτίμηση θρεπτικής κατάστασης, αναγνώριση ποικιλιών, έλεγχο ποιότητας προϊόντων και ανάλυση στρες. Για παράδειγμα, μικρές αλλαγές στη χλωροφύλλη, στα καροτενοειδή, στην περιεκτικότητα νερού ή στη δομή του φύλλου μπορεί να εμφανιστούν σε συγκεκριμένες φασματικές περιοχές πριν γίνουν εμφανείς στο ανθρώπινο μάτι.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της υπερφασματικής απεικόνισης είναι η ακρίβεια της φασματικής πληροφορίας. Ο ερευνητής δεν περιορίζεται σε προκαθορισμένους δείκτες, αλλά μπορεί να αναζητήσει τα μήκη κύματος που συσχετίζονται περισσότερο με το πρόβλημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε ερευνητικές εφαρμογές, όπου ο στόχος είναι να εντοπιστούν νέοι δείκτες ή να μελετηθεί λεπτομερώς η απόκριση της καλλιέργειας.

Το μειονέκτημα είναι ότι τα δεδομένα είναι μεγάλα και σύνθετα. Απαιτούνται τεχνικές μείωσης διαστάσεων, όπως PCA, επιλογή χαρακτηριστικών ή αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης. Επίσης, οι υπερφασματικές κάμερες είναι ακριβότερες, πιο απαιτητικές στη βαθμονόμηση και συχνά πιο δύσκολες στη χρήση σε πραγματικές συνθήκες αγρού. Για αυτό, στην πράξη χρησιμοποιούνται κυρίως σε ερευνητικά έργα ή σε εξειδικευμένες εφαρμογές υψηλής αξίας.

Ένα πρακτικό σενάριο είναι η συλλογή υπερφασματικών δεδομένων από φυτά με γνωστές συνθήκες στρες και στη συνέχεια η εκπαίδευση μοντέλου ταξινόμησης. Το μοντέλο μπορεί να μάθει ποια φασματικά κανάλια διαχωρίζουν καλύτερα υγιή και στρεσαρισμένα φυτά. Στη συνέχεια, η γνώση αυτή μπορεί να οδηγήσει ακόμη και στον σχεδιασμό φθηνότερης πολυφασματικής κάμερας με λίγα κρίσιμα κανάλια.

Πίνακας 3.4. Διαφορά πολυφασματικής και υπερφασματικής απεικόνισης

Χαρακτηριστικό	Πολυφασματική	Υπερφασματική
Πλήθος καναλιών	Λίγα επιλεγμένα κανάλια	Δεκάδες ή εκατοντάδες κανάλια
Όγκος δεδομένων	Μέτριος	Πολύ μεγάλος
Κόστος	Μέσο έως υψηλό	Υψηλό
Επεξεργασία	Σχετικά απλή	Απαιτητική
Χρήση	Πρακτικοί δείκτες βλάστησης	Ερευνητική/λεπτομερής φασματική ανάλυση

3.6 Θερμικές κάμερες

Οι θερμικές κάμερες καταγράφουν την υπέρυθρη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τις επιφάνειες και τη μετατρέπουν σε θερμοκρασιακή πληροφορία. Στη γεωργία ακριβείας χρησιμοποιούνται κυρίως για την εκτίμηση της θερμοκρασίας της κόμης και τη μελέτη υδατικού στρες. Η βασική αρχή είναι ότι όταν το φυτό έχει επαρκές νερό, η διαπνοή λειτουργεί σαν μηχανισμός ψύξης. Αντίθετα, όταν το φυτό αντιμετωπίζει έλλειψη νερού, τα στόματα κλείνουν, η διαπνοή μειώνεται και η θερμοκρασία της κόμης αυξάνεται [19], [20].

Η θερμική απεικόνιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη επειδή μπορεί να εντοπίσει στρες που δεν φαίνεται άμεσα σε μια RGB εικόνα. Για παράδειγμα, δύο φυτά μπορεί να έχουν παρόμοιο χρώμα, αλλά διαφορετική θερμοκρασία λόγω διαφορετικής υδατικής κατάστασης. Έτσι, μια θερμική κάμερα μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή περιοχών που χρειάζονται έλεγχο ή άρδευση.

Στην άρδευση, οι θερμικές εικόνες μπορούν να συνδυαστούν με δείκτες όπως ο CWSI (Crop Water Stress Index), ο οποίος συγκρίνει τη θερμοκρασία της κόμης με περιβαλλοντικές συνθήκες. Σκοπός δεν είναι απλώς να βρεθεί ποια περιοχή είναι πιο θερμή, αλλά να εκτιμηθεί αν η θερμοκρασία αυτή συνδέεται με πραγματικό υδατικό στρες. Για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα απαιτούνται μετρήσεις θερμοκρασίας αέρα, υγρασίας, ακτινοβολίας και ανέμου.

Οι θερμικές κάμερες έχουν όμως σημαντικούς περιορισμούς. Η θερμοκρασία της επιφάνειας επηρεάζεται από την ώρα της ημέρας, τη γωνία λήψης, τον άνεμο, την ηλιακή ακτινοβολία, την υγρασία της ατμόσφαιρας και την εκπεμπτικότητα της επιφάνειας. Επίσης, όταν η ανάλυση της εικόνας είναι χαμηλή, ένα pixel μπορεί να περιλαμβάνει και φύλλο και έδαφος, με αποτέλεσμα η μέτρηση να μην αντιπροσωπεύει καθαρά την κόμη.

Για αυτό, η θερμική απεικόνιση πρέπει να σχεδιάζεται προσεκτικά. Προτιμώνται λήψεις σε σταθερές ώρες, αποφυγή έντονων αλλαγών καιρού, σωστή επιλογή ύψους πτήσης και συνδυασμός με RGB ή πολυφασματική εικόνα ώστε να γίνεται μάσκα μόνο της βλάστησης. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η ανάμιξη θερμοκρασίας εδάφους και φυτού.

3.7 Κάμερες stereo, depth και 3D απεικόνιση

Οι stereo και depth κάμερες δεν δίνουν μόνο δισδιάστατη εικόνα, αλλά πληροφορία βάθους. Η πληροφορία αυτή είναι σημαντική όταν το ενδιαφέρον δεν περιορίζεται στο χρώμα ή στη φασματική απόκριση, αλλά αφορά τη γεωμετρία της καλλιέργειας. Στη γεωργία ακριβείας, η τρισδιάστατη απεικόνιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτίμηση ύψους φυτών, όγκου κόμης, πυκνότητας φυλλώματος, δομής γραμμών φύτευσης και ανάπτυξης στον χρόνο.

Η βασική αρχή των stereo συστημάτων είναι η χρήση δύο καμερών που βλέπουν την ίδια σκηνή από ελαφρώς διαφορετική θέση. Από τη διαφορά θέσης των ίδιων σημείων στις δύο εικόνες μπορεί να υπολογιστεί το βάθος. Άλλες τεχνολογίες, όπως structured light ή time-of-flight, χρησιμοποιούν ενεργό φωτισμό ή μέτρηση χρόνου επιστροφής σήματος για να εκτιμήσουν την απόσταση.

Σε καλλιέργειες με έντονη τρισδιάστατη δομή, όπως δενδρώδεις καλλιέργειες ή αμπελώνες, η πληροφορία βάθους μπορεί να προσφέρει σημαντική αξία. Για παράδειγμα, μπορεί να εκτιμηθεί ο όγκος κόμης, να εντοπιστούν κενά στη βλάστηση ή να υπολογιστεί η ανάπτυξη φυτών σε

διαφορετικές χρονικές στιγμές. Σε χαμηλές καλλιέργειες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτίμηση ύψους φυτών ή διαχωρισμό φυτού-εδάφους.

Το μειονέκτημα είναι ότι η 3D απεικόνιση είναι ευαίσθητη σε φωτισμό, υφή επιφάνειας, κίνηση φύλλων και γεωμετρία λήψης. Τα συστήματα depth μικρής εμβέλειας μπορεί να λειτουργούν καλά σε εργαστήριο ή θερμοκήπιο, αλλά δυσκολεύονται σε έντονο ηλιακό φως. Αντίστοιχα, τα stereo συστήματα χρειάζονται σωστή βαθμονόμηση των δύο καμερών και ισχυρή επεξεργασία.

Η 3D πληροφορία μπορεί να συνδυαστεί με RGB ή πολυφασματική πληροφορία. Έτσι, ένα σύστημα μπορεί να γνωρίζει όχι μόνο αν μια περιοχή έχει υψηλό NDVI, αλλά και αν η κόμη έχει μεγάλο ύψος ή όγκο. Αυτός ο συνδυασμός είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για πιο ολοκληρωμένη εκτίμηση βιομάζας και ανάπτυξης.

3.8 Κριτήρια επιλογής κάμερας για αγροτική εφαρμογή

Η επιλογή κάμερας πρέπει να γίνεται με βάση το ερευνητικό ή πρακτικό ερώτημα. Αν ο στόχος είναι απλή παρακολούθηση ανάπτυξης, καταμέτρηση φυτών ή εντοπισμός ορατών προβλημάτων, μια RGB κάμερα μπορεί να είναι αρκετή. Αν ο στόχος είναι ο υπολογισμός NDVI ή η παρακολούθηση χλωροφύλλης, απαιτείται NIR ή πολυφασματική κάμερα. Αν ο στόχος είναι πρώιμη διάγνωση στρες με λεπτή φασματική ανάλυση, τότε η υπερφασματική κάμερα προσφέρει μεγαλύτερη πληροφορία. Για υδατικό στρες, η θερμική απεικόνιση είναι πολύ χρήσιμη, ενώ για γεωμετρικά χαρακτηριστικά απαιτείται stereo, depth ή LiDAR.

Εκτός από το είδος της πληροφορίας, πρέπει να ληφθούν υπόψη το κόστος, η ευκολία χρήσης, η ανάγκη βαθμονόμησης, η ανάλυση, η πλατφόρμα λήψης, ο όγκος δεδομένων και η δυνατότητα επεξεργασίας. Μια ακριβή κάμερα δεν είναι πάντα καλύτερη αν δεν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες λήψης, η τεχνογνωσία επεξεργασίας και τα δεδομένα πεδίου για επιβεβαίωση.

Πίνακας 3.5. Επιλογή κάμερας ανά σκοπό εφαρμογής

Σκοπός	Καταλληλότερη κάμερα	Σχόλιο
Καταμέτρηση φυτών	RGB ή depth	Χρειάζεται υψηλή χωρική ανάλυση
Υπολογισμός NDVI	Πολυφασματική/NIR	Απαραίτητο NIR κανάλι
Εκτίμηση χλωροφύλλης	GNDVI/NDRE πολυφασματική	Χρήσιμα πράσινο και red-edge κανάλια
Πρώιμη διάγνωση στρες	Υπερφασματική	Απαιτεί ερευνητική επεξεργασία
Υδατικό στρες	Θερμική + μετεωρολογικά δεδομένα	Η θερμοκρασία πρέπει να ερμηνεύεται με περιβάλλον
Ύψος και όγκος φυτών	Stereo/depth/LiDAR	Απαιτεί τρισδιάστατη πληροφορία

3.9 Επεξεργασία εικόνας και μηχανική όραση

Η επεξεργασία εικόνας είναι το στάδιο που μετατρέπει την αρχική εικόνα σε χρήσιμη πληροφορία. Τα βασικά βήματα περιλαμβάνουν διόρθωση φωτισμού, απομάκρυνση θορύβου, γεωμετρική διόρθωση, ευθυγράμμιση καναλιών, επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος, τμηματοποίηση φυτών από το υπόβαθρο και εξαγωγή χαρακτηριστικών. Σε εφαρμογές πεδίου, οι σκιές, η ανομοιομορφία φωτισμού, η κίνηση των φύλλων και η παρουσία εδάφους ή υπολειμμάτων δυσκολεύουν την ανάλυση.

Για τις RGB εικόνες, συχνά εφαρμόζονται μετατροπές χρωματικού χώρου, όπως HSV ή Lab, ώστε να διαχωριστεί καλύτερα το χρώμα από τη φωτεινότητα. Για τις πολυφασματικές εικόνες, κρίσιμο στάδιο είναι η ευθυγράμμιση των καναλιών και η μετατροπή των τιμών σε ανακλαστικότητα. Για τις θερμικές εικόνες, απαιτείται συχνά απομόνωση της κόμης, ώστε να μην επηρεάζεται η μέση θερμοκρασία από το έδαφος.

Η μηχανική όραση μπορεί να εφαρμοστεί με κλασικές τεχνικές ή με βαθιά μάθηση. Οι κλασικές τεχνικές βασίζονται σε κανόνες, κατώφλια, χρωματικά χαρακτηριστικά, υφές και μορφολογικές πράξεις. Είναι απλές και ερμηνεύσιμες, αλλά μπορεί να αποτύχουν όταν αλλάζουν οι συνθήκες λήψης. Τα βαθιά νευρωνικά δίκτυα, όπως CNN, μπορούν να μάθουν πιο σύνθετα χαρακτηριστικά, όμως απαιτούν μεγάλο αριθμό εικόνων, σωστή επισημάνση και ανεξάρτητη αξιολόγηση [29].

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης εικόνας στη γεωργία ακριβείας πρέπει να περιλαμβάνει όχι μόνο αλγόριθμο, αλλά και διαδικασία αξιολόγησης. Για παράδειγμα, αν ένα μοντέλο αναγνωρίζει ασθένεια σε φύλλα, πρέπει να ελεγχθεί σε εικόνες από διαφορετικές ημέρες, διαφορετικό φωτισμό και διαφορετικά φυτά. Αν ένα σύστημα υπολογίζει NDVI, πρέπει να συγκριθεί με δεδομένα πεδίου ή με ανεξάρτητες παρατηρήσεις. Μόνο έτσι μπορεί να αποδειχθεί ότι το αποτέλεσμα έχει πρακτική αξία.

Η τελική έξοδος της ανάλυσης μπορεί να είναι ένας αριθμός, ένας χάρτης, μια κατηγορία ή μια ειδοποίηση. Για παράδειγμα, το σύστημα μπορεί να εμφανίζει μέσο NDVI ανά ζώνη, ποσοστό φυτοκάλυψης, πιθανότητα ασθένειας ή χάρτη θερμοκρασίας κόμης. Η αξία αυτών των αποτελεσμάτων είναι μεγαλύτερη όταν παρουσιάζονται με απλό τρόπο στον παραγωγό ή στον γεωπόνο και συνδέονται με πιθανή απόφαση, όπως επιθεώρηση, άρδευση ή διαφοροποιημένη λίπανση.

Πίνακας 3.6. Τυπική ροή επεξεργασίας εικόνας σε γεωργική εφαρμογή

Στάδιο	Περιγραφή	Παράδειγμα
Λήψη εικόνας	Συλλογή RGB/πολυφασματικής/θερμικές εικόνας	UAV πτήση πάνω από αγρό
Προεπεξεργασία	Διόρθωση φωτισμού, θορύβου και γεωμετρίας	Radiometric calibration
Τμηματοποίηση	Διαχωρισμός φυτού, εδάφους και σκιάς	Μάσκα βλάστησης

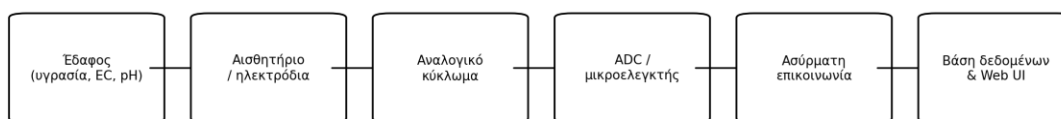
Εξαγωγή χαρακτηριστικών	Υπολογισμός δεικτών, χρώματος, υφής ή σχήματος	NDVI, ExG, θερμοκρασία κόμης
Μοντέλο/ανάλυση	Στατιστική ή μηχανική μάθηση	Ταξινόμηση στρες
Παρουσίαση	Χάρτης, πίνακας ή ειδοποίηση	Ζώνες χαμηλής ανάπτυξης

Κεφάλαιο 4ο: Μέτρηση με αισθητήρες εδάφους

Οι αισθητήρες εδάφους αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά πεδία εφαρμογής της γεωργίας ακριβείας, επειδή συνδέουν άμεσα τη φυσική κατάσταση του εδάφους με πρακτικές αποφάσεις άρδευσης, λίπανσης και γενικότερης διαχείρισης της καλλιέργειας. Σε αντίθεση με τις εικόνες από κάμερες ή δορυφόρους, οι οποίες δίνουν κυρίως έμμεση πληροφορία για την κατάσταση των φυτών, οι αισθητήρες εδάφους μετρούν παραμέτρους στο περιβάλλον όπου αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα. Για τον λόγο αυτό, η υγρασία, η θερμοκρασία, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και το pH θεωρούνται βασικές μεταβλητές για την κατανόηση της συμπεριφοράς του αγρού.

Η ερευνητική σημασία των αισθητήρων εδάφους είναι μεγάλη, διότι η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου, οικονομικού και ενεργειακά αποδοτικού αισθητήρα δεν είναι απλή διαδικασία. Απαιτείται γνώση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, επιλογή κατάλληλης αρχής μέτρησης, σωστή βαθμονόμηση, προστασία από υγρασία και διάβρωση, αποθήκευση δεδομένων και τελικά σύνδεση με λογισμικό ανάλυσης. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα δεν περιορίζεται μόνο στο αισθητήριο στοιχείο, αλλά περιλαμβάνει αναλογικό κύκλωμα προσαρμογής, μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, μικροελεγκτή, ασύρματη επικοινωνία, βάση δεδομένων και γραφικό περιβάλλον προβολής.

Αλυσίδα μέτρησης αισθητήρων εδάφους σε σύστημα γεωργίας ακριβείας



Εικόνα 4.1. Ενδεικτική αλυσίδα μέτρησης αισθητήρων εδάφους από το φυσικό μέγεθος μέχρι την απεικόνιση σε πληροφοριακό σύστημα

Στην πράξη, η αξιοπιστία των μετρήσεων εξαρτάται από πολλές λεπτομέρειες: το βάθος εγκατάστασης, την επαφή του αισθητήρα με το έδαφος, τον τύπο του εδάφους, την αλατότητα, τη θερμοκρασία, τη συμπίεση, την παρουσία ριζών, αλλά και τη σταθερότητα του ηλεκτρονικού κυκλώματος. Επομένως, κάθε μέτρηση πρέπει να αντιμετωπίζεται ως αποτέλεσμα ενός ολοκληρωμένου συστήματος και όχι ως μια απλή τιμή που δίνει ένας αισθητήρας.

4.1 Υγρασία εδάφους

Η υγρασία εδάφους είναι από τις πιο κρίσιμες παραμέτρους στη γεωργία, επειδή καθορίζει τη διαθεσιμότητα νερού για το φυτό. Το νερό συμμετέχει στη μεταφορά θρεπτικών στοιχείων, στη φωτοσύνθεση, στη ρύθμιση της θερμοκρασίας του φυτού και στη γενική φυσιολογική του λειτουργία. Αν το έδαφος έχει πολύ χαμηλή υγρασία, το φυτό δυσκολεύεται να απορροφήσει νερό, εμφανίζεται υδατικό στρες και μειώνεται η ανάπτυξη. Αντίθετα, η υπερβολική υγρασία μπορεί να οδηγήσει σε κακό αερισμό της ρίζας, έκπλυση θρεπτικών στοιχείων και αυξημένη πιθανότητα ασθενειών.

Η υγρασία μπορεί να εκφραστεί με διαφορετικούς τρόπους. Η βαρυμετρική υγρασία δείχνει πόσο νερό υπάρχει σε σχέση με τη μάζα του ξηρού εδάφους, ενώ η ογκομετρική υγρασία δείχνει τον όγκο του νερού σε σχέση με τον συνολικό όγκο του εδάφους. Στις εφαρμογές αισθητήρων χρησιμοποιείται συχνότερα η ογκομετρική περιεκτικότητα νερού, επειδή συνδέεται καλύτερα με την ποσότητα νερού που υπάρχει στη ζώνη των ριζών και μπορεί να αξιοποιηθεί σε συστήματα άρδευσης [6], [23].

Για την ερμηνεία της υγρασίας είναι χρήσιμες τρεις έννοιες: η υδατοϊκανότητα, το σημείο μόνιμης μάρανσης και το διαθέσιμο νερό. Η υδατοϊκανότητα περιγράφει την κατάσταση στην οποία το έδαφος έχει συγκρατήσει νερό μετά την αποστράγγιση του πλεονάζοντος νερού. Το σημείο μόνιμης μάρανσης είναι το επίπεδο υγρασίας κάτω από το οποίο το φυτό δεν μπορεί να ανακτήσει την κανονική του κατάσταση. Η διαφορά των δύο ορίων ορίζει το νερό που είναι πρακτικά διαθέσιμο στο φυτό. Έτσι, η ίδια ένδειξη υγρασίας μπορεί να σημαίνει διαφορετικό πράγμα σε αμμώδες, πηλώδες ή αργιλώδες έδαφος.

Οι οικονομικοί χωρητικοί αισθητήρες υγρασίας χρησιμοποιούνται πολύ συχνά σε εφαρμογές IoT, επειδή μπορούν να συνδεθούν εύκολα με μικροελεγκτές όπως Arduino, ESP32 ή Raspberry Pi μέσω αναλογικής ή ψηφιακής εξόδου. Η βασική αρχή τους στηρίζεται στη μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους. Επειδή το νερό έχει πολύ μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από τα ανόργανα συστατικά και τον αέρα, η αύξηση της υγρασίας μεταβάλλει την ηλεκτρική απόκριση του αισθητήρα. Το πλεονέκτημά τους είναι το χαμηλό κόστος, όμως επηρεάζονται από την αλατότητα, τη θερμοκρασία, τον τύπο εδάφους και την ποιότητα κατασκευής.

Οι τεχνικές TDR και FDR θεωρούνται πιο αξιόπιστες για επιστημονικές εφαρμογές, επειδή βασίζονται στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικού σήματος ή στη μέτρηση απόκρισης σε συγκεκριμένη συχνότητα. Οι αισθητήρες TDR υπολογίζουν τη διηλεκτρική σταθερά μέσω του χρόνου διάδοσης ενός παλμού κατά μήκος μεταλλικών ράβδων, ενώ οι FDR αισθητήρες αξιοποιούν μεταβολές στη συχνότητα ή στη χωρητική συμπεριφορά. Συνήθως έχουν μεγαλύτερο κόστος, αλλά παρέχουν καλύτερη επαναληψιμότητα, ιδιαίτερα όταν συνοδεύονται από κατάλληλη βαθμονόμηση.

Η εγκατάσταση του αισθητήρα έχει πολύ μεγάλη σημασία. Ο αισθητήρας πρέπει να τοποθετείται σε βάθος που αντιστοιχεί στη ζώνη ριζών της καλλιέργειας. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται δύο ή περισσότερα βάθη, για παράδειγμα ένα ρηχό βάθος για την άμεση απόκριση μετά την άρδευση και ένα βαθύτερο για την παρακολούθηση της διήθησης του νερού. Αν ο αισθητήρας δεν έχει καλή επαφή με το έδαφος ή αν δημιουργούνται κενά αέρα γύρω του, οι μετρήσεις μπορεί να είναι λανθασμένες.

Σε ένα πρακτικό σύστημα άρδευσης, η τιμή της υγρασίας δεν πρέπει να χρησιμοποιείται μεμονωμένα. Πρέπει να εξετάζεται η χρονική της μεταβολή. Για παράδειγμα, η απότομη αύξηση μετά από πότισμα και η σταδιακή μείωση τις επόμενες ώρες δείχνουν την κατανάλωση νερού και την αποστράγγιση. Αν η υγρασία πέφτει γρήγορα, μπορεί να υπάρχει υψηλή εξατμισοδιαπνοή ή χαμηλή ικανότητα συγκράτησης νερού. Αν παραμένει πολύ υψηλή για μεγάλο διάστημα, μπορεί να υπάρχει κακή αποστράγγιση ή υπερβολική άρδευση.

Πίνακας 4.1. Βασικές τεχνικές μέτρησης υγρασίας εδάφους και χαρακτηριστικά τους

Μέθοδος	Αρχή λειτουργίας	Πλεονεκτήματα	Περιορισμοί
Αντιστατικοί αισθητήρες	Η αντίσταση μεταβάλλεται με την υγρασία	Πολύ χαμηλό κόστος, απλή ανάγνωση	Διάβρωση ηλεκτροδίων, μεγάλη επίδραση αλάτων
Χωρητικοί αισθητήρες	Μεταβολή διηλεκτρικής σταθεράς	Κατάλληλοι για IoT, χαμηλή κατανάλωση	Απαιτούν βαθμονόμηση ανά έδαφος
TDR	Χρόνος διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού παλμού	Υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα	Μεγαλύτερο κόστος και σύνθετη ηλεκτρονική
FDR	Απόκριση σε συγκεκριμένη συχνότητα	Καλή ακρίβεια, κατάλληλο για συνεχή μέτρηση	Εξάρτηση από βαθμονόμηση και συχνότητα λειτουργίας
Νευτρονικές/εργαστηριακές μέθοδοι	Έμμεση ή εργαστηριακή εκτίμηση νερού	Χρήσιμες ως αναφορά	Δεν είναι πρακτικές για καθημερινό IoT πεδίου

4.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα εδάφους

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους είναι ιδιαίτερα σημαντική μεταβλητή, επειδή συνδέεται με την παρουσία διαλυμένων ιόντων, την αλατότητα, την υγρασία, την υφή, την περιεκτικότητα σε άργιλο και οργανική ουσία. Στη γεωργία ακριβείας χρησιμοποιείται συχνά ο όρος φαινομενική ηλεκτρική αγωγιμότητα, επειδή η μέτρηση στο πεδίο δεν απομονώνει μόνο ένα χημικό χαρακτηριστικό, αλλά περιγράφει τη συνολική ηλεκτρική συμπεριφορά του εδάφους σε συγκεκριμένες συνθήκες [21], [22].

Η EC δεν πρέπει να ερμηνεύεται μονοσήμαντα. Μια υψηλή τιμή μπορεί να οφείλεται σε αυξημένη αλατότητα, αλλά μπορεί επίσης να σχετίζεται με μεγαλύτερη υγρασία, λεπτότερη υφή ή υψηλότερη περιεκτικότητα σε άργιλο. Αντίστοιχα, μια χαμηλή τιμή μπορεί να εμφανιστεί σε ξηρό ή αμμώδες έδαφος. Για αυτό, η EC πρέπει να συνδυάζεται με υγρασία, θερμοκρασία, τύπο εδάφους και, όπου είναι δυνατόν, με εργαστηριακές αναλύσεις.

Η μέτρηση μπορεί να γίνει με επαφικά ηλεκτρόδια, συνήθως με διάταξη δύο ή τεσσάρων ακροδεκτών. Στη διάταξη δύο ηλεκτροδίων, το ίδιο ζεύγος χρησιμοποιείται για την εφαρμογή σήματος και τη μέτρηση απόκρισης. Η προσέγγιση είναι απλή, αλλά επηρεάζεται από την αντίσταση επαφής και την πόλωση των ηλεκτροδίων. Στη διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων, δύο ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για τη διέγερση και δύο για τη μέτρηση τάσης, μειώνοντας την επίδραση της επαφής και βελτιώνοντας την αξιοπιστία.

Σε ερευνητικές διατάξεις χαμηλού κόστους έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η χρήση εναλλασσόμενου σήματος αντί συνεχούς τάσης. Η συνεχής τάση μπορεί να οδηγήσει σε ηλεκτρόλυση, πόλωση και διάβρωση, ειδικά σε υγρά και αλατούχα εδάφη. Αντίθετα, η εφαρμογή ημιτονοειδούς ή εναλλασσόμενης διέγερσης σε κατάλληλη συχνότητα μπορεί να περιορίσει τα προβλήματα αυτά και να επιτρέψει μέτρηση της σύνθετης ηλεκτρικής συμπεριφοράς, δηλαδή τόσο του πλάτους όσο και της φάσης.

Η ηλεκτρονική υλοποίηση ενός αισθητήρα EC μπορεί να περιλαμβάνει γεννήτρια διέγερσης, φίλτρα, αναλογική βαθμίδα ενίσχυσης, κύκλωμα μέτρησης πλάτους ή φάσης, μετατροπέα ADC και μικροελεγκτή. Σε τέτοια συστήματα, η επιλογή συχνότητας είναι κρίσιμη. Πολύ χαμηλές συχνότητες μπορεί να αυξήσουν φαινόμενα πόλωσης, ενώ πολύ υψηλές μπορεί να εισάγουν παρασιτικές χωρητικότητες και δυσκολίες στη μέτρηση. Η σωστή περιοχή λειτουργίας προκύπτει πειραματικά και εξαρτάται από τα ηλεκτρόδια, το έδαφος και το κύκλωμα.

Η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Σε γενικές γραμμές, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και η κινητικότητα των ιόντων, άρα μπορεί να αυξηθεί η μετρούμενη αγωγιμότητα. Για τον λόγο αυτό, οι μετρήσεις EC πρέπει να συνοδεύονται από θερμοκρασία εδάφους και, όταν απαιτείται, να γίνεται διόρθωση σε θερμοκρασία αναφοράς. Χωρίς τέτοια διόρθωση, δύο μετρήσεις διαφορετικών ημερών μπορεί να μην είναι άμεσα συγκρίσιμες.

Στη γεωργία ακριβείας, οι χάρτες EC χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ζωνών διαχείρισης. Οι ζώνες αυτές μπορεί να έχουν διαφορετική ικανότητα συγκράτησης νερού, διαφορετική ανάγκη λίπανσης ή διαφορετική παραγωγικότητα. Η EC δεν δίνει από μόνη της την τελική απόφαση, αλλά βοηθά στον χωρικό διαχωρισμό του αγρού. Όταν συνδυαστεί με δεδομένα παραγωγής, δείκτες βλάστησης και υγρασία εδάφους, μπορεί να υποστηρίξει πιο στοχευμένη άρδευση και λίπανση.

Πίνακας 4.2. Παράγοντες που επηρεάζουν τη μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους

Παράγοντας	Επίδραση στη μέτρηση EC	Πρακτική αντιμετώπιση
Υγρασία εδάφους	Αυξάνει συνήθως τη μετρούμενη αγωγιμότητα	Να μετριέται μαζί με EC
Θερμοκρασία	Μεταβάλλει την κινητικότητα των ιόντων	Χρήση θερμοκρασιακής διόρθωσης
Αλατότητα	Αυξάνει τα διαλυμένα ιόντα	Σύνδεση με εργαστηριακή ανάλυση όταν απαιτείται
Υφή και άργιλος	Επηρεάζουν την αγωγή διαδρομή	Ερμηνεία ανά τύπο εδάφους
Επαφή ηλεκτροδίων	Μπορεί να δημιουργήσει σφάλματα	Σταθερή γεωμετρία και καλή εισαγωγή στο έδαφος
Συχνότητα διέγερσης	Επηρεάζει πλάτος, φάση και πόλωση	Πειραματική επιλογή κατάλληλης συχνότητας

4.3 pH, θερμοκρασία και θρεπτικά στοιχεία

Το pH του εδάφους εκφράζει την οξύτητα ή την αλκαλικότητα και αποτελεί βασικό δείκτη για τη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων. Ακόμη και αν ένα θρεπτικό στοιχείο υπάρχει στο έδαφος, μπορεί να μην είναι διαθέσιμο στο φυτό όταν το pH βρίσκεται εκτός κατάλληλου εύρους. Για παράδειγμα, σε πολύ όξινα ή πολύ αλκαλικά εδάφη μπορεί να μειωθεί η διαθεσιμότητα φωσφόρου ή ιχνοστοιχείων. Επομένως, το pH είναι κρίσιμο για τη λίπανση και τη γενικότερη διαχείριση της γονιμότητας.

Η μέτρηση pH στο πεδίο γίνεται συνήθως με ηλεκτροχημικά ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια pH μπορούν να δώσουν άμεση μέτρηση, αλλά απαιτούν προσεκτική χρήση, καθαρισμό, αποθήκευση και βαθμονόμηση με πρότυπα διαλύματα. Σε αντίθεση με έναν απλό αισθητήρα θερμοκρασίας, ένα

ηλεκτρόδιο pH έχει χημική συμπεριφορά και η απόδοσή του μπορεί να μεταβληθεί με τον χρόνο. Για αυτό, σε συστήματα αυτοματοποιημένης μέτρησης πρέπει να προβλέπεται περιοδικός έλεγχος και συντήρηση.

Εναλλακτικά, σε ερευνητικό επίπεδο μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες στερεάς κατάστασης, όπως ISFET, ή χημικοί/οπτικοί αισθητήρες. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν ενδιαφέρον για φορητές ή ενσωματωμένες εφαρμογές, όμως η μακροχρόνια σταθερότητα στο έδαφος παραμένει απαιτητικό ζήτημα. Το έδαφος είναι ανομοιογενές και περιέχει σωματίδια, άλατα, οργανική ύλη και μεταβαλλόμενη υγρασία, στοιχεία που δυσκολεύουν τη σταθερή μέτρηση.

Η θερμοκρασία εδάφους είναι φαινομενικά απλή μεταβλητή, αλλά επηρεάζει πολλές διεργασίες. Συνδέεται με τη βλάστηση σπόρων, την ανάπτυξη ριζών, τη μικροβιακή δραστηριότητα, τη διάσπαση οργανικής ουσίας και την απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων. Επίσης επηρεάζει την απόκριση άλλων αισθητήρων, όπως υγρασίας και EC. Για αυτό, σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα εδάφους είναι χρήσιμο η θερμοκρασία να μετριέται μαζί με τις υπόλοιπες παραμέτρους.

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας μπορούν να είναι θερμίστορ, ψηφιακοί αισθητήρες ή RTD. Για εφαρμογές χαμηλού κόστους χρησιμοποιούνται συχνά ψηφιακοί αισθητήρες, επειδή παρέχουν απλή διασύνδεση με μικροελεγκτή. Ωστόσο, η θέση τοποθέτησης παίζει σημαντικό ρόλο. Ένας αισθητήρας πολύ κοντά στην επιφάνεια επηρεάζεται έντονα από την ηλιακή ακτινοβολία και τις ημερήσιες μεταβολές, ενώ ένας αισθητήρας βαθύτερα δίνει πιο σταθερή εικόνα της ζώνης ριζών.

Η επιτόπια μέτρηση θρεπτικών στοιχείων, όπως άζωτο, φώσφορος και κάλιο, είναι πιο σύνθετη από τη μέτρηση υγρασίας ή θερμοκρασίας. Υπάρχουν ιοντοεκλεκτικά ηλεκτρόδια, χρωματομετρικές μέθοδοι, ηλεκτροχημικές τεχνικές και φασματικές προσεγγίσεις, όμως η αξιόπιστη μέτρηση στο πραγματικό έδαφος είναι δύσκολη. Οι συγκεντρώσεις επηρεάζονται από υγρασία, pH, θερμοκρασία, ιοντική ισχύ, οργανική ουσία και αλληλεπιδράσεις μεταξύ ιόντων.

Για τον λόγο αυτό, πολλά πρακτικά συστήματα γεωργίας ακριβείας δεν βασίζονται αποκλειστικά σε άμεση μέτρηση N-P-K στο χωράφι. Συχνά συνδυάζουν εργαστηριακές αναλύσεις εδάφους, ιστορικά δεδομένα, χάρτες παραγωγής, δείκτες βλάστησης και αισθητήρες εδάφους. Έτσι, η λίπανση δεν αποφασίζεται από μία μόνο τιμή, αλλά από συνδυασμό δεδομένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για να αποφεύγονται λανθασμένες συστάσεις λίπανσης.

Πίνακας 4.3. Παράμετροι pH, θερμοκρασίας και θρεπτικών στοιχείων σε αισθητήρες εδάφους

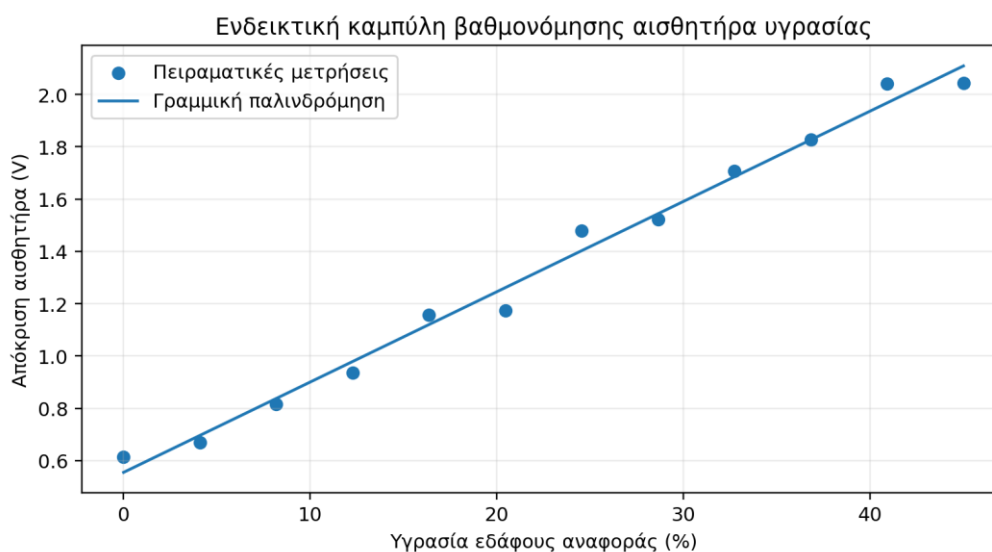
Παράμετρος	Τεχνολογία μέτρησης	Χρήση στη γεωργία	Σημεία προσοχής
pH	Ηλεκτρόδιο γυαλιού, ISFET, χημικός αισθητήρας	Διαθεσιμότητα θρεπτικών και οξύτητα εδάφους	Συχνή βαθμονόμηση, καθαρισμός, υγρασία δείγματος
Θερμοκρασία	Θερμίστορ, RTD, ψηφιακός αισθητήρας	Ρυθμός βλάστησης, ρίζες, διόρθωση EC	Σωστό βάθος και προστασία από επιφανειακές μεταβολές
Άζωτο	Ιοντοεκλεκτικό, χρωματομετρικό ή έμμεσο μοντέλο	Λίπανση και ανάπτυξη φυτού	Μεγάλη μεταβλητότητα και ανάγκη επιβεβαίωσης

Φώσφορος	Χημική/εργαστηριακή μέτρηση, έμμεσες μέθοδοι	Ριζική ανάπτυξη και ενέργεια φυτού	Δύσκολη άμεση μέτρηση στο πεδίο
Κάλιο	Ιοντοεκλεκτικό ή εργαστηριακό	Ρύθμιση νερού και ποιότητα παραγωγής	Επίδραση άλλων ιόντων και υγρασίας

4.4 Βαθμονόμηση και αξιοπιστία μετρήσεων

Η βαθμονόμηση είναι ίσως το πιο κρίσιμο βήμα για την αξιοποίηση των αισθητήρων εδάφους. Ένας αισθητήρας μπορεί να δίνει σταθερή τάση ή ψηφιακή τιμή, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι η τιμή αντιστοιχεί σωστά στο φυσικό μέγεθος. Η σχέση μεταξύ εξόδου αισθητήρα και πραγματικής υγρασίας, EC ή pH πρέπει να προσδιοριστεί με μετρήσεις αναφοράς. Χωρίς βαθμονόμηση, ο αισθητήρας μπορεί να είναι χρήσιμος μόνο για σχετικές μεταβολές και όχι για απόλυτες τιμές.

Η βαθμονόμηση υγρασίας μπορεί να γίνει με δείγματα εδάφους διαφορετικής υγρασίας, όπου η πραγματική υγρασία υπολογίζεται με εργαστηριακή μέθοδο ξήρανσης. Στη συνέχεια καταγράφεται η απόκριση του αισθητήρα και δημιουργείται καμπύλη συσχέτισης. Η καμπύλη μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική, ανάλογα με τον αισθητήρα και το έδαφος. Σε πολλές περιπτώσεις χρειάζεται ξεχωριστή βαθμονόμηση για διαφορετικούς τύπους εδάφους.



Εικόνα 4.2. Ενδεικτικό παράδειγμα καμπύλης βαθμονόμησης αισθητήρα υγρασίας με μετρήσεις αναφοράς

Για την EC, η βαθμονόμηση μπορεί να γίνει με πρότυπα διαλύματα γνωστής αγωγιμότητας και στη συνέχεια με δοκιμές σε εδαφικά δείγματα. Τα πρότυπα διαλύματα βοηθούν στον έλεγχο του ηλεκτρονικού κυκλώματος, όμως δεν αναπαριστούν πλήρως την πολυπλοκότητα του εδάφους. Για αυτό, είναι χρήσιμο να γίνεται και αξιολόγηση με πραγματικά δείγματα διαφορετικής υγρασίας και αλατότητας. Η θερμοκρασία πρέπει να καταγράφεται παράλληλα.

Η αξιοπιστία ενός αισθητήρα δεν αφορά μόνο την ακρίβεια μιας μέτρησης, αλλά και την επαναληψιμότητα, τη σταθερότητα στον χρόνο, την ευαισθησία σε εξωτερικούς παράγοντες και την ανθεκτικότητα στο πεδίο. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας μπορεί να είναι ακριβής στο εργαστήριο,

αλλά να παρουσιάζει μετατόπιση τιμών μετά από εβδομάδες στο έδαφος λόγω διάβρωσης, υγρασίας στο κύκλωμα ή μηχανικής καταπόνησης.

Κατά την αξιολόγηση χρησιμοποιούνται δείκτες όπως το μέσο απόλυτο σφάλμα, το RMSE, ο συντελεστής συσχέτισης και η ανάλυση υπολοίπων. Όμως η απλή αριθμητική σύγκριση δεν αρκεί. Πρέπει να εξετάζεται αν τα σφάλματα είναι τυχαία ή συστηματικά. Αν υπάρχει συστηματική απόκλιση, μπορεί να διορθωθεί με βαθμονόμηση. Αν όμως τα σφάλματα εξαρτώνται έντονα από την υγρασία, τη θερμοκρασία ή την αλατότητα, τότε το μοντέλο πρέπει να περιλαμβάνει περισσότερες μεταβλητές.

Σε πραγματικές εγκαταστάσεις, είναι σημαντικό να εφαρμόζεται διαδικασία ελέγχου ποιότητας δεδομένων. Τιμές εκτός φυσιολογικών ορίων, απότομες μεταβολές χωρίς φυσική αιτία, μεγάλα κενά στη χρονοσειρά ή συνεχώς σταθερές τιμές μπορεί να δείχνουν σφάλμα αισθητήρα, αποσύνδεση ή πρόβλημα επικοινωνίας. Ένα σύστημα γεωργίας ακριβείας πρέπει να μπορεί να εντοπίζει τέτοια προβλήματα και να ενημερώνει τον χρήστη.

Πίνακας 4.4. Διαδικασία βαθμονόμησης και αξιολόγησης αισθητήρων εδάφους

Βήμα	Περιγραφή	Αποτέλεσμα
1. Επιλογή φυσικού μεγέθους	Ορισμός υγρασίας, EC, pH ή θερμοκρασίας που θα μετρηθεί	Σαφής στόχος μέτρησης
2. Μέτρηση αναφοράς	Χρήση εργαστηριακής ή εμπορικής αξιόπιστης μεθόδου	Τιμή ground truth
3. Καταγραφή εξόδου αισθητήρα	Λήψη πολλών επαναλήψεων σε διαφορετικές συνθήκες	Πίνακας ζευγών αισθητήρα-αναφοράς
4. Μοντέλο βαθμονόμησης	Γραμμική ή μη γραμμική συσχέτιση	Εξίσωση μετατροπής τιμών
5. Έλεγχος σε νέα δεδομένα	Δοκιμή σε δείγματα που δεν χρησιμοποιήθηκαν στη βαθμονόμηση	Εκτίμηση γενίκευσης
6. Συντήρηση	Επαναληπτικός έλεγχος μετά από χρήση στο πεδίο	Μείωση μετατόπισης και σφαλμάτων

4.5 Ερευνητική κατεύθυνση: ολοκληρωμένος χαμηλού κόστους αισθητήρας εδάφους

Ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο είναι η ανάπτυξη χαμηλού κόστους αισθητήρων που μπορούν να εκτιμήσουν περισσότερες από μία παραμέτρους του εδάφους. Για παράδειγμα, η μέτρηση ηλεκτρικής απόκρισης με εναλλασσόμενο σήμα μπορεί να δώσει πληροφορία για την αγωγιμότητα και, έμμεσα, για την υγρασία. Αν το ίδιο σύστημα συνδυαστεί με αισθητήρα θερμοκρασίας, μπορεί να γίνει θερμοκρασιακή διόρθωση και καλύτερη ερμηνεία των δεδομένων.

Η ηλεκτρονική αρχιτεκτονική ενός τέτοιου αισθητήρα μπορεί να περιλαμβάνει γεννήτρια ημιτονοειδούς σήματος, φίλτρο, ηλεκτρόδια μέτρησης, αναλογική βαθμίδα ανίχνευσης πλάτους ή φάσης, μικροελεγκτή και ασύρματη επικοινωνία. Η χρήση κυκλωμάτων που μπορούν να μετρούν διαφορά πλάτους ή φάσης είναι χρήσιμη, επειδή το έδαφος δεν συμπεριφέρεται ως απλή αντίσταση αλλά ως σύνθετο ηλεκτρικό φορτίο με αντιστατικό και χωρητικό χαρακτήρα.

Από ερευνητική άποψη, το σημαντικό δεν είναι μόνο να ληφθεί μια ένδειξη, αλλά να αποδειχθεί ότι η ένδειξη συνδέεται αξιόπιστα με πραγματικές ιδιότητες του εδάφους. Αυτό απαιτεί πειραματική διαδικασία με διαφορετικά δείγματα, διαφορετικά επίπεδα υγρασίας, πιθανές μεταβολές αλατότητας και σύγκριση με εμπορικό ή εργαστηριακό σύστημα αναφοράς. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αξιολογηθεί αν ο αισθητήρας είναι κατάλληλος για πρακτική χρήση στη γεωργία ακριβείας.

Η σύνδεση με IoT πλατφόρμα προσθέτει επιπλέον αξία. Οι μετρήσεις μπορούν να αποστέλλονται περιοδικά σε server, να αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων και να εμφανίζονται σε web εφαρμογή με γραφήματα. Ο παραγωγός ή ο ερευνητής μπορεί να παρακολουθεί την εξέλιξη της υγρασίας και της EC στο χρόνο, να εντοπίζει ανωμαλίες και να συγκρίνει διαφορετικές ζώνες του αγρού. Έτσι, ο αισθητήρας μετατρέπεται από απλό όργανο μέτρησης σε μέρος ολοκληρωμένου συστήματος λήψης αποφάσεων.

Οι αισθητήρες εδάφους αποτελούν πεδίο όπου συνδυάζονται ηλεκτρονικά κυκλώματα, φυσικές αρχές μέτρησης, μικροελεγκτές, ασύρματα δίκτυα, βάσεις δεδομένων και ανάλυση δεδομένων. Για αυτό το Κεφάλαιο συνδέεται άμεσα με τον ερευνητικό χαρακτήρα της εργασίας και δείχνει ότι η γεωργία ακριβείας δεν βασίζεται μόνο στη χρήση έτοιμων αισθητήρων αλλά και στη δυνατότητα σχεδίασης, αξιολόγησης και βελτίωσης νέων μετρητικών διατάξεων.

Κεφάλαιο 5ο: Μέτρηση εδάφους χωρίς επαφή

5.1 Γιατί χρειάζονται μη επαφικές μετρήσεις

Οι μη επαφικές μετρήσεις εδάφους αποτελούν ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία τεχνολογιών στη γεωργία ακριβείας, επειδή επιτρέπουν τη γρήγορη συλλογή πληροφορίας σε μεγάλη έκταση χωρίς να απαιτείται η τοποθέτηση πολλών αισθητήρων μέσα στο έδαφος. Σε ένα χωράφι, οι ιδιότητες του εδάφους μπορεί να αλλάζουν σημαντικά από σημείο σε σημείο. Η υγρασία, η αλατότητα, η περιεκτικότητα σε άργιλο, η οργανική ουσία, η συμπίεση και η μηχανική δομή δεν είναι συνήθως ομοιόμορφες. Αν ο παραγωγός βασιστεί μόνο σε λίγα δείγματα ή σε έναν σημειακό αισθητήρα, υπάρχει κίνδυνος να χαθεί η πραγματική χωρική μεταβλητότητα.

Με τις μη επαφικές τεχνικές ο αισθητήρας κινείται πάνω από το έδαφος ή κοντά στην επιφάνεια, χωρίς να χρειάζεται να εισαχθούν ηλεκτρόδια ή αισθητήρες στο έδαφος. Αυτό είναι πρακτικό για γρήγορη χαρτογράφηση, για μετρήσεις πριν τη σπορά, για έλεγχο αλατότητας, για εντοπισμό ζωνών με διαφορετική υφή και για σχεδιασμό δειγματοληψιών. Το αποτέλεσμα δεν είναι συνήθως μια απόλυτη τιμή ενός εδαφικού χαρακτηριστικού, αλλά ένας χωρικός χάρτης που δείχνει πού υπάρχουν διαφοροποιήσεις.

Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι ότι οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν “on-the-go”, δηλαδή ενώ το όργανο μεταφέρεται με μικρό όχημα, γεωργικό μηχανήμα, ATV ή χειροκίνητο καρότσι. Αν το όργανο συνδεθεί με GPS, κάθε τιμή αποθηκεύεται μαζί με τη γεωγραφική της θέση. Έτσι δημιουργείται ένα πυκνό σύνολο δεδομένων, από το οποίο μπορούν να παραχθούν χάρτες φαινομενικής αγωγιμότητας, ζώνες διαχείρισης και σημεία για στοχευμένη δειγματοληψία.

Οι μη επαφικές μετρήσεις δεν καταργούν τους κλασικούς αισθητήρες ή τις εργαστηριακές αναλύσεις. Αντίθετα, τις συμπληρώνουν. Η σωστή προσέγγιση είναι να χρησιμοποιείται η μη επαφική μέτρηση για να εντοπιστούν οι ζώνες διαφοροποίησης και στη συνέχεια να λαμβάνονται δείγματα ή σημειακές μετρήσεις σε αντιπροσωπευτικές θέσεις. Με αυτόν τον τρόπο συνδυάζεται η μεγάλη χωρική κάλυψη με την ακρίβεια της επιτόπιας ή εργαστηριακής επιβεβαίωσης.

Πίνακας 5.1. Ενδεικτικές χρήσεις μη επαφικών τεχνικών εδάφους στη γεωργία ακριβείας

Στόχος μη επαφικής μέτρησης	Τυπική τεχνολογία	Πρακτικό αποτέλεσμα
Χαρτογράφηση αλατότητας	Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή / ECa	Χάρτης περιοχών με υψηλή ή χαμηλή αγωγιμότητα
Εντοπισμός διαφορών υφής	ECa, φασματική ανάκλαση, gamma radiometrics	Διάκριση αμμωδών, αργιλωδών ή ενδιάμεσων ζωνών
Σχεδιασμός δειγματοληψίας	ECa με GPS και GIS	Επιλογή αντιπροσωπευτικών σημείων εδάφους
Εκτίμηση υγρασίας σε χωρική κλίμακα	ECa και βαθμονόμηση με επιτόπια δεδομένα	Χάρτης πιθανών διαφορών στη ζώνη ριζών
Ζώνες μεταβλητής εφαρμογής	Συνδυασμός ECa, παραγωγής και δεικτών βλάστησης	Διαφορετική άρδευση, λίπανση ή διαχείριση ανά περιοχή

5.2 Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και εδαφική μεταβλητότητα

Η πιο χαρακτηριστική τεχνική για μη επαφική μέτρηση της αγωγιμότητας του εδάφους είναι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή, γνωστή και ως Electromagnetic Induction ή EMI. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της φαινομενικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους, δηλαδή της ECa. Ο όρος “φαινομενική” είναι σημαντικός, επειδή η μέτρηση δεν αντιστοιχεί σε ένα απλό, καθαρό μέγεθος όπως η αγωγιμότητα ενός διαλύματος. Αντιθέτως, εκφράζει τη συνολική ηλεκτρική απόκριση ενός όγκου εδάφους που επηρεάζεται από την υγρασία, την αλατότητα, την υφή, την περιεκτικότητα σε άργιλο, τη θερμοκρασία, την πυκνότητα και τη δομή του εδάφους [21], [22].

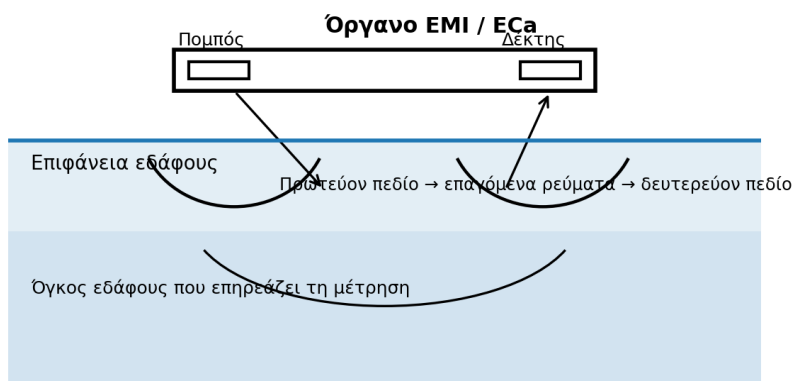
Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η εξής: ένα πηνίο πομπού δημιουργεί πρωτεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το πεδίο αυτό επάγει μικρά ηλεκτρικά ρεύματα στο έδαφος. Τα επαγόμενα ρεύματα δημιουργούν με τη σειρά τους ένα δευτερεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το οποίο ανιχνεύεται από ένα πηνίο δέκτη. Από τη σχέση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πεδίου, το όργανο εκτιμά την ECa. Επειδή δεν χρειάζεται ηλεκτρική επαφή, το όργανο μπορεί να βρίσκεται λίγα εκατοστά ή και περισσότερο πάνω από την επιφάνεια, αρκεί να διατηρείται σταθερή γεωμετρία και ύψος.

Η ECa είναι ιδιαίτερα χρήσιμη επειδή λειτουργεί ως έμμεσος δείκτης εδαφικής μεταβλητότητας. Για παράδειγμα, ένα αργιλώδες έδαφος μπορεί να παρουσιάζει μεγαλύτερη αγωγιμότητα από ένα αμμώδες, επειδή συγκρατεί περισσότερο νερό και έχει διαφορετικές επιφανειακές ιδιότητες. Αντίστοιχα, ένα αλατούχο τμήμα μπορεί να εμφανίζει υψηλές τιμές ECa λόγω αυξημένης συγκέντρωσης διαλυμένων ιόντων. Επομένως, η ECa δεν πρέπει να ερμηνεύεται μόνη της αλλά σε συνδυασμό με δείγματα εδάφους, ιστορικά δεδομένα παραγωγής και πληροφορίες για την καλλιέργεια.

Η μέτρηση επηρεάζεται επίσης από το βάθος διερεύνησης. Κάθε όργανο έχει συγκεκριμένη γεωμετρία πηνίων και διαφορετική ευαισθησία ως προς το βάθος. Ορισμένες διατάξεις δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στο επιφανειακό στρώμα, ενώ άλλες επηρεάζονται περισσότερο από βαθύτερα στρώματα. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στη γεωργία, επειδή η ζώνη ενδιαφέροντος μπορεί να είναι τα πρώτα 20-30 cm για επιφανειακή διαχείριση ή μεγαλύτερο βάθος για ριζικό σύστημα και αποθήκευση νερού.

Μη επαφική μέτρηση φαινομενικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (ECa)

Το όργανο δεν εισάγει ηλεκτρόδια στο έδαφος. Η απόκριση του εδάφους εκτιμάται μέσω ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 5.1. Αρχή λειτουργίας μη επαφικού οργάνου ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής για εκτίμηση φαινομενικής αγωγιμότητας εδάφους

5.3 Όργανα μέτρησης αγωγιμότητας χωρίς επαφή με το έδαφος

Στην πράξη, τα όργανα που χρησιμοποιούνται για μη επαφική εκτίμηση της αγωγιμότητας ανήκουν κυρίως στην κατηγορία των EMI αισθητήρων. Τα πιο γνωστά ονόματα στη βιβλιογραφία και στις εφαρμογές γεωργίας ακριβείας είναι όργανα τύπου EM38, EM31, DUALEM, CMD και παρόμοιες διατάξεις με πηνία πομπού και δέκτη. Παράλληλα, υπάρχουν συστήματα που σύρονται ή μεταφέρονται σε πλατφόρμα και συνδυάζουν μέτρηση ECa με GPS, ώστε να δημιουργείται χάρτης σε πραγματικό χρόνο. Η λογική δεν είναι απλώς να ληφθεί μία τιμή, αλλά να χαρτογραφηθεί η μεταβολή μέσα στον αγρό.

Τα φορητά όργανα τύπου EM38 χρησιμοποιούνται συχνά για χαρτογράφηση μικρών και μεσαίων αγροτεμαχίων. Μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικούς προσανατολισμούς, όπως οριζόντια ή κατακόρυφη διάταξη, ώστε να αλλάζει η ευαισθησία σε διαφορετικά βάθη. Αυτή η ιδιότητα επιτρέπει στον ερευνητή να εξετάσει αν η διαφοροποίηση εντοπίζεται κυρίως κοντά στην επιφάνεια ή αν σχετίζεται με βαθύτερα εδαφικά στρώματα. Η σωστή χρήση απαιτεί σταθερή απόσταση από το έδαφος, προθέρμανση του οργάνου, αποφυγή μεταλλικών αντικειμένων κοντά στον αισθητήρα και έλεγχο για θερμοκρασιακή μεταβολή.

Τα όργανα τύπου DUALEM χρησιμοποιούν συνήθως πολλαπλές γεωμετρίες πηνίων ή διαφορετικές αποστάσεις πομπού-δέκτη. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να παρέχουν πληροφορία για περισσότερα από ένα βάθη διερεύνησης. Αυτό είναι χρήσιμο όταν ο στόχος είναι να γίνει διαχωρισμός μεταξύ επιφανειακών και βαθύτερων εδαφικών επιδράσεων. Για παράδειγμα, μια υψηλή τιμή μπορεί να οφείλεται σε επιφανειακή υγρασία μετά από βροχή ή σε βαθύτερο στρώμα με μεγαλύτερη αλατότητα. Η πολυβάθμια πληροφορία βοηθά στην πιο προσεκτική ερμηνεία.

Υπάρχουν επίσης όργανα με μεγαλύτερο βάθος διερεύνησης, όπως διατάξεις τύπου EM31 ή αντίστοιχα συστήματα για γεωφυσική χαρτογράφηση. Αυτά μπορεί να είναι χρήσιμα όταν ενδιαφέρει η γενικότερη δομή του εδάφους ή η ύπαρξη βαθύτερων διαφορών, αλλά στη γεωργία ακριβείας πρέπει να εξετάζεται αν το βάθος μέτρησης είναι συμβατό με τη ριζόσφαιρα και με την απόφαση που θα ληφθεί. Ένα όργανο που “βλέπει” πολύ βαθιά μπορεί να επηρεάζεται από στρώματα που δεν σχετίζονται άμεσα με την τρέχουσα καλλιέργεια.

Τα συστήματα “on-the-go” έχουν ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον. Σε αυτά, ο αισθητήρας συνδέεται σε όχημα ή καρότσι μαζί με GPS και καταγραφικό δεδομένων. Καθώς το όχημα κινείται, καταγράφονται συνεχώς τιμές ECa και συντεταγμένες. Μετά την ολοκλήρωση της μέτρησης, τα δεδομένα καθαρίζονται, φιλτράρονται και εισάγονται σε GIS για παραγωγή χάρτη. Η προσέγγιση αυτή είναι πολύ χρήσιμη για τον ορισμό ζωνών διαχείρισης, επειδή μπορεί να παρέχει εκατοντάδες ή χιλιάδες σημεία μέτρησης σε ένα χωράφι.

Πίνακας 5.2. Ενδεικτικές κατηγορίες οργάνων μη επαφικής μέτρησης φαινομενικής αγωγιμότητας εδάφους

Κατηγορία οργάνου	Τρόπος λειτουργίας	Χρήση στη γεωργία	Σημεία προσοχής
EMI τύπου EM38	Πηνίο πομπού και δέκτη, μικρό βάθος διερεύνησης	Χαρτογράφηση ECa, υγρασίας, αλατότητας και υφής σε επίπεδο αγρού	Σταθερό ύψος, θερμοκρασία, προσανατολισμός πηνίων
EMI τύπου EM31	Μεγαλύτερο βάθος διερεύνησης	Γενικότερη γεωφυσική εικόνα και βαθύτερες εδαφικές διαφοροποιήσεις	Πιθανή επίδραση στρωμάτων εκτός ριζόσφαιρας
DUALEM / πολυγεωμετρικά EMI	Πολλαπλές αποστάσεις ή γεωμετρίες πομπού-δέκτη	Εκτίμηση μεταβολών σε περισσότερα βάθη	Ανάγκη σωστής ερμηνείας βάθους και βαθμονόμησης
CMD και παρόμοια φορητά όργανα	Μη επαφική ηλεκτρομαγνητική μέτρηση ECa	Ταχεία επιφανειακή ή μέσου βάθους χαρτογράφηση	Επίδραση μεταλλικών αντικειμένων και ηλεκτρομαγνητικού θορύβου
On-the-go πλατφόρμες	Αισθητήρας ECa + GPS + καταγραφικό	Πυκνοί χάρτες για ζώνες μεταβλητής εφαρμογής	Απόσταση γραμμών, ταχύτητα κίνησης, καθαρισμός δεδομένων

Είναι σημαντικό να γίνει διάκριση ανάμεσα στα μη επαφικά EMI όργανα και στα επαφικά όργανα αγωγιμότητας. Τα επαφικά συστήματα εισάγουν ηλεκτρικό ρεύμα στο έδαφος μέσω ηλεκτροδίων ή δίσκων που ακουμπούν στο έδαφος. Τα μη επαφικά συστήματα βασίζονται στην επαγωγή και δεν απαιτούν απευθείας ηλεκτρική σύνδεση. Και οι δύο κατηγορίες μετρούν ECa, αλλά με διαφορετική φυσική αρχή και διαφορετική ευαισθησία σε πρακτικές συνθήκες.

Η επιλογή οργάνου εξαρτάται από τον στόχο της μέτρησης. Αν ο στόχος είναι η αλατότητα σε αρδευόμενη καλλιέργεια, χρειάζεται όργανο με καλή ευαισθησία στην περιοχή της ριζόσφαιρας και κατάλληλη βαθμονόμηση με δείγματα εδάφους. Αν ο στόχος είναι ο εντοπισμός ζωνών διαφορετικής υφής, η μέτρηση μπορεί να συνδυαστεί με κοκκομετρική ανάλυση ή με δεδομένα παραγωγής. Αν ο στόχος είναι η παρακολούθηση υγρασίας, τότε πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η ECa επηρεάζεται ταυτόχρονα από υγρασία και αλατότητα, άρα χρειάζεται προσεκτική ερμηνεία.

5.4 Πρωτόκολλο μέτρησης και χαρτογράφησης ECa

Για να έχει αξία η μη επαφική μέτρηση, πρέπει να εφαρμόζεται συγκεκριμένο πρωτόκολλο. Πρώτο βήμα είναι ο σχεδιασμός των διαδρομών μέτρησης. Οι γραμμές κίνησης πρέπει να καλύπτουν ομοιόμορφα το χωράφι και να έχουν απόσταση που να ταιριάζει με το μέγεθος του αγρού και την επιθυμητή ανάλυση. Σε μικρό αγρό μπορεί να χρησιμοποιηθεί πυκνό πλέγμα, ενώ σε μεγαλύτερες εκτάσεις μπορεί να επιλεγεί μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ διαδρομών.

Δεύτερο βήμα είναι ο έλεγχος του οργάνου πριν την έναρξη. Πολλά όργανα χρειάζονται χρόνο σταθεροποίησης. Πρέπει επίσης να αποφεύγονται μετρήσεις κοντά σε μεταλλικούς φράκτες, σωλήνες, οχήματα ή ηλεκτρικές γραμμές που μπορεί να επηρεάσουν το σήμα. Η ταχύτητα κίνησης πρέπει να είναι σχετικά σταθερή, γιατί οι απότομες αλλαγές μπορεί να οδηγήσουν σε μη ομοιόμορφη πυκνότητα σημείων.

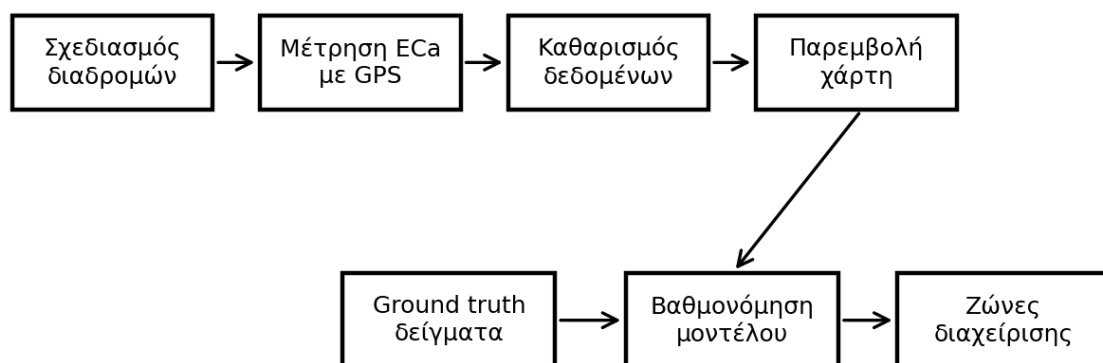
Τρίτο βήμα είναι η αποθήκευση της μέτρησης μαζί με GPS. Κάθε εγγραφή πρέπει να περιλαμβάνει χρόνο, γεωγραφικό μήκος, γεωγραφικό πλάτος, τιμή ECa και πιθανώς θερμοκρασία, ύψος αισθητήρα, προσανατολισμό και κατάσταση οργάνου. Στη συνέχεια γίνεται καθαρισμός δεδομένων. Αφαιρούνται τιμές εκτός ορίων, σημεία εκκίνησης/στάσης, επαναλήψεις, μετρήσεις κοντά σε εμπόδια και μετρήσεις που αντιστοιχούν σε μη κανονική λειτουργία.

Τέταρτο βήμα είναι η παρεμβολή και η δημιουργία χάρτη. Οι σημειακές μετρήσεις μπορούν να μετατραπούν σε συνεχή χάρτη με μεθόδους όπως inverse distance weighting, kriging ή άλλες χωρικές τεχνικές. Ο χάρτης δεν πρέπει να ερμηνεύεται μηχανικά. Πρέπει να συγκρίνεται με το ανάγλυφο, την παραγωγή, την υγρασία, τις εικόνες βλάστησης και τις εργαστηριακές αναλύσεις.

Τελικό βήμα είναι η δημιουργία ζωνών διαχείρισης. Οι ζώνες αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για μεταβλητή άρδευση, διαφοροποίηση λίπανσης, επιλογή σημείων δειγματοληψίας ή καλύτερη κατανόηση της απόδοσης. Η ECa από μόνη της δεν “λέει” πάντα ποια απόφαση πρέπει να ληφθεί, αλλά δείχνει πού το έδαφος παρουσιάζει σημαντικές διαφορές.

Ροή εργασίας για χαρτογράφηση εδάφους με μη επαφική αγωγιμότητα

Η μέτρηση αποκτά αξία όταν συνδεθεί με GPS, επιτόπια δείγματα και αγρονομική ερμηνεία.



Εικόνα 5.2. Ενδεικτική ροή εργασίας για χαρτογράφηση εδάφους με μη επαφική μέτρηση ECa

Πίνακας 5.3. Προτεινόμενο πρωτόκολλο μέτρησης και αξιοποίησης μη επαφικών μετρήσεων ECa

Στάδιο	Ενέργεια	Σκοπός
1. Σχεδιασμός	Καθορισμός διαδρομών και πυκνότητας μέτρησης	Ομοιόμορφη κάλυψη του αγρού
2. Έλεγχος οργάνου	Προθέρμανση, έλεγχος μπαταρίας, αποφυγή μεταλλικών πηγών	Σταθερότητα και μείωση σφαλμάτων

3. Μέτρηση με GPS	Καταγραφή ECa και συντεταγμένων σε συνεχή κίνηση	Δημιουργία χωρικού dataset
4. Καθαρισμός	Αφαίρεση ακραίων, στάσεων, εμποδίων και προβληματικών σημείων	Αξιόπιστος χάρτης
5. Παρεμβολή	Μετατροπή σημείων σε χωρική επιφάνεια	Οπτική απεικόνιση της μεταβλητότητας
6. Ground truth	Δειγματοληψία σε αντιπροσωπευτικές ζώνες	Σύνδεση ECa με πραγματικές εδαφικές ιδιότητες
7. Απόφαση	Ορισμός ζωνών διαχείρισης	Στοχευμένη γεωργική πρακτική

5.5 Φασματική ανάλυση εδάφους χωρίς επαφή

Η φασματική ανάλυση εδάφους είναι μια άλλη σημαντική μη επαφική προσέγγιση. Βασίζεται στη μέτρηση της ανάκλασης του εδάφους σε διαφορετικά μήκη κύματος, συνήθως στο ορατό, στο κοντινό υπέρυθρο και στο βραχύ υπέρυθρο. Η φασματική απόκριση μπορεί να συνδεθεί με ιδιότητες όπως οργανική ουσία, υγρασία, υφή, ανθρακικά, σίδηρος και ορισμένα χημικά χαρακτηριστικά. Η μέθοδος δεν μετρά άμεσα την αγωγιμότητα, αλλά μπορεί να συμπληρώσει την ECa και να βοηθήσει στην ερμηνεία της εδαφικής μεταβλητότητας [24].

Σε σύγκριση με την EMI μέτρηση, η φασματική ανάλυση επηρεάζεται περισσότερο από την επιφάνεια του εδάφους. Η υγρασία στην επιφάνεια, η τραχύτητα, τα φυτικά υπολείμματα, οι σκιές και ο φωτισμός μπορούν να αλλάξουν την ανάκλαση. Για αυτό, οι φασματικές μετρήσεις απαιτούν προσεκτική βαθμονόμηση και συχνά συνδυάζονται με εργαστηριακά δείγματα. Παρ' όλα αυτά, αποτελούν ισχυρό εργαλείο όταν στόχος είναι η γρήγορη εκτίμηση εδαφικών ιδιοτήτων χωρίς καταστροφική δειγματοληψία.

Στη γεωργία ακριβείας, η φασματική ανάλυση μπορεί να γίνει με φορητά φασματόμετρα, με αισθητήρες πάνω σε όχημα ή με κάμερες από UAV όταν το έδαφος είναι εκτεθειμένο. Πριν την ανάπτυξη της καλλιέργειας ή μετά τη συγκομιδή, όταν υπάρχει μεγαλύτερη ορατότητα του εδάφους, η πληροφορία αυτή μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Σε συνδυασμό με χάρτες ECa, μπορεί να βοηθήσει στη διάκριση αν μια περιοχή έχει υψηλή αγωγιμότητα λόγω υγρασίας, αλατότητας ή διαφορετικής υφής.

5.6 Άλλες μη επαφικές και γεωφυσικές τεχνικές εδάφους

Εκτός από την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και τη φασματική ανάλυση, υπάρχουν και άλλες μη επαφικές ή σχεδόν μη επαφικές τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εδαφική χαρτογράφηση. Μία από αυτές είναι το Ground Penetrating Radar, δηλαδή το γεωραντάρ. Το GPR εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο έδαφος και αναλύει τις ανακλάσεις από διαφορετικά στρώματα. Μπορεί να δώσει πληροφορία για στρωμάτωση, συμπίεση, βάθος ριζών, υγρασία ή υπόγειες ανωμαλίες, αλλά η απόδοσή του επηρεάζεται από την υγρασία και την αγωγιμότητα.

Άλλη τεχνική είναι η φυσική gamma ακτινομετρία, η οποία μετρά τη φυσική ακτινοβολία που σχετίζεται με στοιχεία όπως κάλιο, ουράνιο και θόριο. Αν και ακούγεται πιο γεωφυσική μέθοδος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαρτογράφηση εδαφικών διαφορών, ειδικά σε μεγάλες εκτάσεις. Συνδυάζεται συχνά με ECa για καλύτερη οριοθέτηση ζωνών.

Η θερμική απεικόνιση του εδάφους μπορεί επίσης να δώσει έμμεση πληροφορία, κυρίως για την υγρασία και τη θερμική αδράνεια. Έδαφος με διαφορετική υγρασία μπορεί να θερμαίνεται και να ψύχεται διαφορετικά. Ωστόσο, η θερμική πληροφορία επηρεάζεται έντονα από την ώρα, την ακτινοβολία, τον άνεμο, τη φυτοκάλυψη και τις πρόσφατες βροχοπτώσεις.

Το LiDAR και η φωτογραμμετρία δεν μετρούν αγωγιμότητα, αλλά παρέχουν τρισδιάστατη πληροφορία για την επιφάνεια. Σε επίπεδο εδάφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μικροανάλυφο, κλίσεις, απορροή νερού και περιοχές συσσώρευσης. Επειδή η υγρασία και η διάβρωση συνδέονται με το ανάλυφο, η τρισδιάστατη πληροφορία μπορεί να υποστηρίξει την ερμηνεία των χαρτών ECa.

Πίνακας 5.4. Σύγκριση μη επαφικών και γεωφυσικών τεχνικών για εδαφική χαρτογράφηση

Τεχνική	Τι μετρά κυρίως	Σχέση με την αγωγιμότητα / εδαφική μεταβλητότητα	Περιορισμοί
EMI / ECa	Φαινομενική ηλεκτρική αγωγιμότητα όγκου εδάφους	Άμεσος μη επαφικός δείκτης αλατότητας, υγρασίας, υφής και αργίλου	Απαιτεί ground truth και επηρεάζεται από θερμοκρασία/ύψος
GPR	Ανακλάσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε στρώματα	Μπορεί να δείξει στρωμάτωση, υγρασία ή συμπίεση	Δυσκολία σε πολύ αγωγίμα ή υγρά εδάφη
Φασματική ανάλυση	Ανάκλαση σε VIS-NIR-SWIR	Συμπληρώνει την ECa με πληροφορία επιφάνειας και οργανικής ουσίας	Επηρεάζεται από φωτισμό, υγρασία και υπολείμματα
Gamma radiometrics	Φυσική ακτινοβολία εδάφους	Συνδέεται με γεωλογική/εδαφική διαφοροποίηση	Εξειδικευμένος εξοπλισμός και ερμηνεία
Θερμική απεικόνιση	Επιφανειακή θερμοκρασία	Έμμεση ένδειξη υγρασίας ή διαφορών θερμικής συμπεριφοράς	Μεγάλη επίδραση ώρας και καιρικών συνθηκών
LiDAR / φωτογραμμετρία	Μικροανάλυφο και 3D επιφάνεια	Βοηθά στην ερμηνεία απορροής, διάβρωσης και υγρασίας	Δεν μετρά ηλεκτρική ιδιότητα

5.7 Ερμηνεία χαρτών αγωγιμότητας και σύνδεση με αγρονομικές αποφάσεις

Ένας χάρτης ECa είναι ιδιαίτερα χρήσιμος, αλλά μπορεί να παρερμηνευθεί αν θεωρηθεί ότι δείχνει μόνο μία ιδιότητα. Υψηλή ECa μπορεί να σημαίνει υψηλή αλατότητα, μεγαλύτερη υγρασία, περισσότερη άργιλο ή συνδυασμό αυτών. Χαμηλή ECa μπορεί να σχετίζεται με αμμώδες έδαφος, χαμηλή υγρασία ή μικρότερη περιεκτικότητα σε ιόντα. Για αυτό, η ερμηνεία πρέπει να γίνεται με βάση το πλαίσιο της περιοχής και όχι με έναν γενικό κανόνα.

Στην πράξη, ο χάρτης χωρίζεται συχνά σε χαμηλές, μέσες και υψηλές ζώνες ECa. Από κάθε ζώνη λαμβάνονται δείγματα εδάφους. Αν οι εργαστηριακές αναλύσεις δείξουν ότι οι υψηλές τιμές συνδέονται με αλατότητα, τότε ο χάρτης μπορεί να υποστηρίξει διαχείριση άρδευσης και

αποστράγγισης. Αν δείξουν ότι συνδέονται με περισσότερη άργιλο, τότε μπορεί να υποστηρίξει διαφορετική λίπανση, διαφορετικό πρόγραμμα άρδευσης ή διαφορετική επιλογή καλλιέργειας.

Η ECa μπορεί να συνδεθεί και με χάρτες παραγωγής. Αν οι περιοχές χαμηλής παραγωγής συμπίπτουν με υψηλή ECa, τότε υπάρχει πιθανότητα αλατότητας, κακής στράγγισης ή υπερβολικής υγρασίας. Αν συμπίπτουν με χαμηλή ECa, μπορεί να σχετίζονται με ξηρότερο ή πιο αμμώδες έδαφος. Σε κάθε περίπτωση, ο χάρτης λειτουργεί ως εργαλείο διερεύνησης και όχι ως τελική διάγνωση.

Η μεγάλη αξία αυτών των οργάνων είναι ότι επιτρέπουν στον ερευνητή ή στον γεωπόνο να αποφασίσει πού αξίζει να μετρήσει πιο αναλυτικά. Αντί να γίνει τυχαία δειγματοληψία, η δειγματοληψία γίνεται με βάση τη χωρική πληροφορία. Αυτό μειώνει το κόστος και αυξάνει την πιθανότητα να εντοπιστούν πραγματικά προβληματικές ή χαρακτηριστικές περιοχές.

5.8 Σύγκριση επαφικών και μη επαφικών μετρήσεων

Οι επαφικές και οι μη επαφικές τεχνικές δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ανταγωνιστικές αλλά ως συμπληρωματικές. Οι επαφικοί αισθητήρες είναι κατάλληλοι όταν απαιτείται συνεχής μέτρηση σε συγκεκριμένο σημείο, για παράδειγμα σε ένα σταθμό άρδευσης. Οι μη επαφικές τεχνικές είναι κατάλληλες όταν απαιτείται χαρτογράφηση μεγάλης έκτασης. Η μία προσέγγιση δίνει χρονική λεπτομέρεια σε λίγα σημεία, ενώ η άλλη δίνει χωρική λεπτομέρεια σε πολλά σημεία.

Για παράδειγμα, ένας σταθερός αισθητήρας υγρασίας μπορεί να δείχνει πότε πρέπει να ποτιστεί ένα συγκεκριμένο σημείο. Ένα όργανο ECa μπορεί να δείξει ότι το χωράφι έχει τρεις διαφορετικές ζώνες με διαφορετική συμπεριφορά. Ο συνδυασμός τους επιτρέπει να τοποθετηθούν οι σταθεροί αισθητήρες σε σωστότερα σημεία και να σχεδιαστεί πρόγραμμα άρδευσης ανά ζώνη.

Η μη επαφική μέτρηση έχει επίσης πλεονέκτημα σε δύσκολες συνθήκες εγκατάστασης. Δεν χρειάζεται καλωδίωση μέσα στο έδαφος, δεν υπάρχει φθορά ηλεκτροδίων, δεν απαιτείται μόνιμη εγκατάσταση και μπορεί να γίνει επαναληπτική σάρωση σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Από την άλλη πλευρά, απαιτεί καλό πρωτόκολλο, εξειδικευμένη ερμηνεία και συσχέτιση με πραγματικές εδαφικές ιδιότητες.

Πίνακας 5.5. Σύγκριση επαφικών και μη επαφικών μετρήσεων εδάφους

Κριτήριο	Επαφικές μετρήσεις	Μη επαφικές μετρήσεις
Βασική λογική	Μέτρηση σε συγκεκριμένο σημείο ή βάθος	Χαρτογράφηση μεγάλου αριθμού σημείων χωρίς εισαγωγή αισθητήρα
Πλεονέκτημα	Καλή χρονική παρακολούθηση και άμεση μέτρηση	Μεγάλη χωρική κάλυψη και γρήγορη σάρωση
Τυπική εφαρμογή	Άρδευση με αισθητήρες υγρασίας, pH, θερμοκρασία	ECa mapping, ζώνες διαχείρισης, σχεδιασμός δειγματοληψίας
Περιορισμός	Περιορισμένη χωρική κάλυψη, ανάγκη εγκατάστασης	Έμμεση ερμηνεία και ανάγκη βαθμονόμησης
Συντήρηση	Έλεγχος αισθητήρων, επαφή με έδαφος, πιθανή διάβρωση	Έλεγχος οργάνου, ύψους, GPS και συνθηκών μέτρησης

Καλύτερη χρήση	Συνεχής παρακολούθηση σε επιλεγμένα σημεία	Γρήγορη χαρτογράφηση και εντοπισμός διαφορών
----------------	--	--

5.9 Πηγές σφάλματος, βαθμονόμηση και αξιοπιστία

Η αξιοπιστία των μη επαφικών μετρήσεων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Πρώτος παράγοντας είναι η υγρασία του εδάφους τη στιγμή της μέτρησης. Η ίδια περιοχή μπορεί να δώσει διαφορετικές τιμές ECa μετά από βροχή και διαφορετικές τιμές σε ξηρή περίοδο. Αυτό δεν σημαίνει ότι το όργανο είναι λάθος, αλλά ότι η ECa εκφράζει δυναμική ηλεκτρική απόκριση του εδάφους. Για συγκρίσεις στον χρόνο, πρέπει οι μετρήσεις να γίνονται σε όσο το δυνατόν παρόμοιες συνθήκες ή να συνοδεύονται από καταγραφή υγρασίας.

Δεύτερος παράγοντας είναι η θερμοκρασία. Η αγωγιμότητα επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, ενώ και το ίδιο το όργανο μπορεί να εμφανίζει μικρές μεταβολές στη λειτουργία του. Για αυτό, σε ερευνητικές εφαρμογές καταγράφεται η θερμοκρασία και εφαρμόζονται διορθώσεις όταν χρειάζεται. Τρίτος παράγοντας είναι το ύψος του αισθητήρα από το έδαφος. Αν το όργανο ανεβοκατεβαίνει κατά την κίνηση, αλλάζει η απόκριση και μπορεί να δημιουργηθούν τεχνητές διαφορές στον χάρτη.

Τέταρτος παράγοντας είναι η παρουσία μετάλλων και ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Μεταλλικά μέρη του οχήματος, φράχτες, σωλήνες, καλώδια και άλλα αντικείμενα μπορούν να επηρεάσουν τη μέτρηση. Για αυτό, όταν το όργανο τοποθετείται σε πλατφόρμα, πρέπει να υπάρχει κατάλληλη απόσταση από μεταλλικά στοιχεία. Πέμπτος παράγοντας είναι η ακρίβεια του GPS. Αν οι συντεταγμένες έχουν μεγάλο σφάλμα, ο χάρτης μπορεί να εμφανίσει λάθος θέση για τις ζώνες.

Η βαθμονόμηση γίνεται με ground truth, δηλαδή με πραγματικές μετρήσεις αναφοράς. Επιλέγονται σημεία από διαφορετικές ζώνες ECa, λαμβάνονται δείγματα εδάφους και μετρώνται εργαστηριακά ιδιότητες όπως υγρασία, EC κορεσμένου εκχυλίσματος, pH, οργανική ουσία, άργιλος και άλατα. Στη συνέχεια εξετάζεται ποια από αυτές τις ιδιότητες εξηγεί καλύτερα τη χωρική κατανομή της ECa. Έτσι, ο χάρτης αποκτά αγρονομική σημασία.

Σε επίπεδο ανάλυσης δεδομένων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συσχετίσεις, παλινδρόμηση, πολυμεταβλητά μοντέλα ή μηχανική μάθηση. Όμως η ερμηνεία πρέπει να παραμένει προσεκτική. Ένα μοντέλο που εκπαιδεύτηκε σε ένα χωράφι ή σε μία χρονική στιγμή δεν είναι βέβαιο ότι θα ισχύει σε άλλη περιοχή ή άλλη εποχή. Για αυτό, η αξιολόγηση πρέπει να περιλαμβάνει ανεξάρτητα δείγματα, διαφορετικές ζώνες και σαφή αναφορά των συνθηκών μέτρησης.

Πίνακας 5.6. Βασικές πηγές σφάλματος στις μη επαφικές μετρήσεις ECa και τρόποι αντιμετώπισης

Πηγή σφάλματος	Πιθανή επίδραση	Προτεινόμενη αντιμετώπιση
Μεταβολή υγρασίας εδάφους	Αλλαγή ECa χωρίς αλλαγή μόνιμης εδαφικής ιδιότητας	Καταγραφή συνθηκών, επαναληπτικές μετρήσεις, ground truth
Θερμοκρασία	Μεταβολή αγωγιμότητας και απόκρισης οργάνου	Θερμοκρασιακή διόρθωση και σταθερός χρόνος μέτρησης
Μεταβολή ύψους αισθητήρα	Τεχνητές χωρικές διαφορές στον χάρτη	Σταθερή βάση στήριξης και ομαλή κίνηση

Μεταλλικά αντικείμενα	Παρεμβολές στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο	Απόσταση από μέταλλα, καθαρισμός προβληματικών σημείων
Σφάλμα GPS	Λάθος χωρική τοποθέτηση μετρήσεων	Χρήση αξιόπιστου GPS και έλεγχος διαδρομών
Λάθος παρεμβολή	Υπερβολικά εξομαλυμένος ή παραπλανητικός χάρτης	Σωστή επιλογή μεθόδου και έλεγχος με πραγματικά σημεία

5.10 Ερευνητική κατεύθυνση: συνδυασμός ECa, αισθητήρων εδάφους και IoT

Για μια ερευνητική εργασία που συνδέεται με αισθητήρες, ηλεκτρονικά και γεωργία ακριβείας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει ο συνδυασμός μη επαφικής χαρτογράφησης ECa με σταθερούς αισθητήρες εδάφους και σύστημα IoT. Η μη επαφική μέτρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρχικά για να χαρτογραφηθεί το χωράφι και να εντοπιστούν οι κύριες ζώνες μεταβλητότητας. Στη συνέχεια, σε κάθε ζώνη μπορούν να τοποθετηθούν αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας ή EC, ώστε να παρακολουθείται η χρονική συμπεριφορά.

Με αυτόν τον τρόπο, η ECa δίνει τη χωρική εικόνα και οι σταθεροί αισθητήρες δίνουν τη χρονική εικόνα. Η πληροφορία μπορεί να αποθηκεύεται σε βάση δεδομένων και να εμφανίζεται σε web εφαρμογή με χάρτες, γραφήματα και ειδοποιήσεις. Για παράδειγμα, αν μια ζώνη έχει χαμηλή ECa και ταυτόχρονα ο αισθητήρας υγρασίας δείχνει ταχύτερη ξήρανση, το σύστημα μπορεί να προτείνει διαφορετική άρδευση για αυτήν τη ζώνη.

Σε επίπεδο ηλεκτρονικών, μια τέτοια ερευνητική κατεύθυνση περιλαμβάνει επιλογή αισθητήρων, σχεδίαση κόμβου μέτρησης, τροφοδοσία με μπαταρία ή φωτοβολταϊκό, ασύρματη επικοινωνία, αποθήκευση δεδομένων και λογισμικό ανάλυσης. Σε επίπεδο δεδομένων, απαιτείται συνδυασμός χωρικής πληροφορίας, χρονοσειρών και αγρονομικών παραμέτρων. Η εργασία μπορεί έτσι να αναδείξει ότι η γεωργία ακριβείας δεν βασίζεται μόνο σε ένα όργανο, αλλά σε ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης και λήψης αποφάσεων.

Μια πιθανή πειραματική διαδικασία θα μπορούσε να περιλαμβάνει: σάρωση αγροτεμαχίου με EMI όργανο, παραγωγή χάρτη ECa, επιλογή τριών ζωνών χαμηλής, μέσης και υψηλής αγωγιμότητας, λήψη δειγμάτων εδάφους, εγκατάσταση κόμβων υγρασίας/θερμοκρασίας/EC σε κάθε ζώνη, συλλογή δεδομένων για αρκετές εβδομάδες και τελική συσχέτιση με δείκτες βλάστησης ή παραγωγή. Αυτή η διαδικασία είναι κατάλληλη για πτυχιακή εργασία, επειδή συνδυάζει αισθητήρες, ηλεκτρονική υλοποίηση, βάση δεδομένων, Python ανάλυση και αγρονομική ερμηνεία.

Κεφάλαιο 6ο: Μέτρηση από αέρα και τηλεπισκόπηση

Η μέτρηση από αέρα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία της γεωργίας ακριβείας, επειδή επιτρέπει την παρατήρηση της καλλιέργειας σε μεγαλύτερη κλίμακα από αυτή που μπορούν να καλύψουν οι σημειακοί αισθητήρες εδάφους. Ενώ ένας αισθητήρας υγρασίας ή αγωγιμότητας δίνει πολύτιμη πληροφορία για ένα συγκεκριμένο σημείο, μια αεροφωτογραφία ή μια δορυφορική εικόνα μπορεί να αποτυπώσει τη χωρική διαφοροποίηση ολόκληρου του αγρού. Έτσι, ο παραγωγός ή ο ερευνητής μπορεί να εντοπίσει ζώνες με διαφορετική ανάπτυξη, περιοχές με πιθανό υδατικό στρες, ανομοιομορφίες στη λίπανση, προβλήματα αποστράγγισης ή σημεία όπου απαιτείται πιο λεπτομερής επιτόπιος έλεγχος [5], [27], [28].

Η τηλεπισκόπηση δεν αντικαθιστά τις επιτόπιες μετρήσεις, αλλά τις συμπληρώνει. Η βασική της αξία είναι ότι μετατρέπει το χωράφι σε χάρτη πληροφορίας. Η εικόνα μπορεί να αναλυθεί ανά εικονοστοιχείο ή ανά ζώνη, να υπολογιστούν δείκτες βλάστησης και να δημιουργηθούν θεματικοί χάρτες. Οι χάρτες αυτοί μπορούν να συγκριθούν με δεδομένα εδάφους, ιστορικά δεδομένα παραγωγής, μετεωρολογικές συνθήκες και παρατηρήσεις από τον παραγωγό. Με αυτόν τον τρόπο, η αεροπορική και δορυφορική παρακολούθηση λειτουργεί ως γέφυρα ανάμεσα στη φυσική κατάσταση της καλλιέργειας και στη λήψη αποφάσεων.

Στην πράξη, οι μετρήσεις από αέρα διακρίνονται ανάλογα με την πλατφόρμα λήψης και τον αισθητήρα που χρησιμοποιείται. Οι βασικές πλατφόρμες είναι τα UAV, τα επανδρωμένα αεροσκάφη και οι δορυφόροι. Οι βασικοί αισθητήρες είναι οι RGB κάμερες, οι πολυφασματικές και υπερφασματικές κάμερες, οι θερμικές κάμερες και τα συστήματα LiDAR. Κάθε επιλογή έχει διαφορετικό κόστος, διαφορετική χωρική ανάλυση, διαφορετική συχνότητα κάλυψης και διαφορετικές απαιτήσεις επεξεργασίας.

6.1 UAV και εφαρμογές χαμηλού ύψους

Τα UAV, γνωστά και ως drones, χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στη γεωργία ακριβείας επειδή προσφέρουν υψηλή χωρική ανάλυση και ευελιξία στον χρόνο λήψης. Ο ερευνητής ή ο παραγωγός μπορεί να προγραμματίσει πτήση σε συγκεκριμένη ημέρα και ώρα, να καλύψει ένα χωράφι με επαναλαμβανόμενο τρόπο και να λάβει εικόνες με ανάλυση που μπορεί να φτάσει σε επίπεδο εκατοστών ανά εικονοστοιχείο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές όπου απαιτείται λεπτομέρεια, όπως η καταμέτρηση φυτών, η εκτίμηση ποσοστού κάλυψης, η αναγνώριση κενών στη φύτευση, ο εντοπισμός ζιζανίων και η παρακολούθηση μικρών πειραματικών τεμαχίων [27], [28].

Ένα τυπικό UAV σύστημα περιλαμβάνει την πλατφόρμα πτήσης, τον αισθητήρα απεικόνισης, το σύστημα εντοπισμού θέσης GPS/GNSS, την μπαταρία, τον ελεγκτή πτήσης και το λογισμικό σχεδιασμού αποστολής. Πριν από τη λήψη ορίζονται το ύψος πτήσης, η επικάλυψη μεταξύ των εικόνων, η ταχύτητα πτήσης και η περιοχή κάλυψης. Η επικάλυψη είναι κρίσιμη, επειδή επιτρέπει τη δημιουργία ορθοφωτοχάρτη και τη σωστή συρραφή των εικόνων. Αν η επικάλυψη είναι μικρή ή αν οι συνθήκες φωτισμού αλλάζουν έντονα κατά τη διάρκεια της πτήσης, το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να παρουσιάσει σφάλματα.

Οι RGB κάμερες σε UAV είναι η πιο οικονομική λύση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οπτική παρακολούθηση της καλλιέργειας. Παρότι δεν δίνουν πληροφορία στο κοντινό υπέρυθρο, μπορούν να αξιοποιηθούν για δείκτες που βασίζονται στο ορατό φάσμα, για τμηματοποίηση φυλλώματος, για

εκτίμηση ποσοστού κάλυψης και για εντοπισμό οπτικών διαφορών. Σε ερευνητικές εφαρμογές, οι RGB εικόνες μπορούν να συνδυαστούν με τεχνικές μηχανικής όρασης και βαθιάς μάθησης, ώστε να εντοπίζονται φυτά, καρποί, ασθένειες ή περιοχές με χαμηλή ανάπτυξη.

Οι πολυφασματικές κάμερες σε UAV επιτρέπουν τον υπολογισμό δεικτών όπως NDVI, GNDVI, NDRE και άλλων δεικτών που αξιοποιούν το NIR ή το red-edge. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη επειδή η καλλιέργεια μπορεί να εμφανίζει φασματικές μεταβολές πριν εμφανιστούν ορατά συμπτώματα. Για παράδειγμα, μια περιοχή μπορεί να έχει μειωμένη φωτοσυνθετική δραστηριότητα χωρίς ακόμη να φαίνεται κίτρινη ή ξερή στο ανθρώπινο μάτι. Η πολυφασματική απεικόνιση μπορεί να υποδείξει τέτοιες περιοχές για επιτόπιο έλεγχο.

Για να είναι αξιόπιστη η ανάλυση UAV εικόνων, απαιτείται σωστή ραδιομετρική και γεωμετρική επεξεργασία. Η ραδιομετρική βαθμονόμηση συνήθως γίνεται με χρήση ειδικού πάνελ αναφοράς πριν ή μετά την πτήση, ώστε οι τιμές των εικόνων να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ διαφορετικών ημερών. Η γεωμετρική επεξεργασία περιλαμβάνει τη διόρθωση παραμορφώσεων, τη δημιουργία ορθομωσαϊκού και, όπου χρειάζεται, τη χρήση σημείων ελέγχου εδάφους. Χωρίς αυτά τα βήματα, οι τιμές των δεικτών μπορεί να επηρεαστούν από τη γωνία λήψης, τον φωτισμό και τη θέση της κάμερας.

6.2 Δορυφορική τηλεπισκόπηση και παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση είναι κατάλληλη για παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων, επειδή παρέχει επαναλαμβανόμενη κάλυψη χωρίς να απαιτείται τοπική πτήση. Δορυφορικές αποστολές όπως το Sentinel-2 και το Landsat χρησιμοποιούνται ευρέως για μελέτη βλάστησης, παρακολούθηση εποχικής εξέλιξης και δημιουργία χρονοσειρών δεικτών. Το πλεονέκτημα των δορυφορικών δεδομένων είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύγκριση διαφορετικών χρονικών στιγμών και για ανάλυση μεγάλων περιοχών με χαμηλό ή μηδενικό κόστος πρόσβασης στα δεδομένα [16], [17].

Οι δορυφόροι έχουν όμως χαμηλότερη χωρική ανάλυση σε σχέση με τα UAV. Για παράδειγμα, μια εικόνα Sentinel-2 μπορεί να έχει χωρική ανάλυση 10 m σε ορισμένα κανάλια, ενώ ένα UAV μπορεί να δώσει ανάλυση μερικών εκατοστών. Αυτό σημαίνει ότι ο δορυφόρος είναι κατάλληλος για γενική παρακολούθηση αγροτεμαχίων, αλλά όχι πάντα για λεπτομέρεια σε επίπεδο μεμονωμένου φυτού. Παράλληλα, οι νεφώσεις αποτελούν σημαντικό περιορισμό, ειδικά σε περιόδους όπου απαιτείται συχνή παρακολούθηση.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των δορυφορικών δεδομένων είναι η δυνατότητα δημιουργίας χρονοσειρών. Η εξέλιξη του NDVI ή άλλων δεικτών μέσα στην καλλιεργητική περίοδο μπορεί να δείξει πότε η καλλιέργεια αναπτύσσεται κανονικά, πότε εμφανίζει καθυστέρηση και πότε αρχίζει η γήρανση ή η ωρίμανση. Η χρονική ανάλυση είναι σημαντική, επειδή μια μεμονωμένη εικόνα μπορεί να επηρεαστεί από προσωρινές συνθήκες, ενώ μια σειρά εικόνων δείχνει τη γενική τάση.

Σε πρακτικές εφαρμογές, τα δορυφορικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχικό επίπεδο πληροφορίας. Για παράδειγμα, ο παραγωγός μπορεί να εντοπίσει με βάση τον χάρτη NDVI περιοχές με χαμηλή βλάστηση και στη συνέχεια να επισκεφθεί αυτές τις περιοχές ή να πραγματοποιήσει πτήση UAV για λεπτομερέστερη ανάλυση. Έτσι, ο δορυφόρος λειτουργεί ως εργαλείο γρήγορης επιτήρησης, ενώ το UAV και οι αισθητήρες εδάφους λειτουργούν ως εργαλεία λεπτομερούς διερεύνησης.

Πίνακας 6.1. Συνοπτική σύγκριση UAV, δορυφορικών δεδομένων και LiDAR στη γεωργία ακριβείας

Πλατφόρμα τεχνική /	Κάλυψη	Χωρική λεπτομέρεια	Κύρια χρήση	Βασικός περιορισμός
UAV	Αγρός πειραματικό τεμάχιο ή	Πολύ υψηλή	Λεπτομερής χαρτογράφηση, δείκτες βλάστησης, καταμέτρηση φυτών	Κόστος πτήσης, μπαταρία, καιρικές συνθήκες
Δορυφόρος	Μεγάλη περιοχή	Μέτρια	Χρονοσειρές, παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων, ιστορική ανάλυση	Νεφώσεις και μικρότερη λεπτομέρεια
LiDAR	Αγρός, δενδρώνας ή πειραματική περιοχή	Υψηλή 3D πληροφορία	Ύψος φυτών, όγκος κόμης, δομή βλάστησης	Κόστος και σύνθετη επεξεργασία

6.3 Θερμική απεικόνιση και υδατικό στρες

Η θερμική απεικόνιση χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της θερμοκρασίας της κόμης και μπορεί να συνδεθεί με την υδατική κατάσταση του φυτού. Όταν ένα φυτό έχει επαρκές νερό, η διαπνοή λειτουργεί ως μηχανισμός ψύξης. Το νερό εξατμίζεται από τα στομάτια των φύλλων και η θερμοκρασία της κόμης παραμένει χαμηλότερη. Όταν το φυτό βρίσκεται σε υδατικό στρες, τα στόματα κλείνουν για να μειωθεί η απώλεια νερού, η διαπνοή περιορίζεται και η θερμοκρασία της κόμης αυξάνεται [19].

Η μέτρηση θερμοκρασίας από αέρα μπορεί να γίνει με θερμικές κάμερες τοποθετημένες σε UAV ή σε σταθερές θέσεις. Το αποτέλεσμα είναι θερμικός χάρτης του αγρού, όπου μπορούν να εντοπιστούν περιοχές με υψηλότερη θερμοκρασία. Αυτές οι περιοχές μπορεί να σχετίζονται με έλλειψη νερού, χαμηλή υγρασία εδάφους, προβλήματα άρδευσης ή διαφοροποίηση του εδαφικού υποβάθρου. Ωστόσο, η ερμηνεία πρέπει να γίνεται με προσοχή, επειδή η θερμοκρασία επηρεάζεται από την ώρα λήψης, την ηλιακή ακτινοβολία, τον άνεμο, τη σχετική υγρασία και τη γωνία παρατήρησης.

Ένας απλός θερμικός χάρτης δεν αρκεί πάντα για ασφαλή συμπεράσματα. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συχνά δείκτες που συγκρίνουν τη θερμοκρασία κόμης με τη θερμοκρασία αέρα ή με επιφάνειες αναφοράς. Σε πειραματικές εφαρμογές είναι χρήσιμο να συνδυάζεται η θερμική εικόνα με αισθητήρες υγρασίας εδάφους και μετεωρολογικά δεδομένα. Αν μια θερμή περιοχή συμπίπτει με χαμηλή υγρασία εδάφους, τότε η πιθανότητα υδατικού στρες είναι μεγαλύτερη. Αν όμως η θερμή περιοχή οφείλεται σε γυμνό έδαφος ή διαφορετικό φωτισμό, τότε απαιτείται διαφορετική ερμηνεία.

Η θερμική απεικόνιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε καλλιέργειες όπου η διαχείριση άρδευσης είναι κρίσιμη, όπως δενδρώνες, αμπελώνες και θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Μπορεί να βοηθήσει στον

εντοπισμό βουλωμένων σταλακτήρων, προβλημάτων στο αρδευτικό δίκτυο ή ζωνών που χρειάζονται διαφορετικό πρόγραμμα άρδευσης. Η πρακτική της αξία αυξάνεται όταν οι θερμικές μετρήσεις επαναλαμβάνονται σε διαφορετικές ημερομηνίες, ώστε να παρακολουθείται η εξέλιξη του προβλήματος.

6.4 LiDAR και τρισδιάστατη πληροφορία

Το LiDAR είναι τεχνολογία ενεργητικής τηλεπισκόπησης, επειδή εκπέμπει παλμούς φωτός και μετρά τον χρόνο επιστροφής τους. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται νέφος σημείων, δηλαδή ένα σύνολο τρισδιάστατων σημείων που περιγράφουν τη μορφή της επιφάνειας και της βλάστησης. Σε αντίθεση με μια απλή εικόνα, το LiDAR δεν δίνει μόνο χρώμα ή φασματική πληροφορία, αλλά και γεωμετρική πληροφορία για το ύψος, τον όγκο και τη δομή της κόμης.

Στη γεωργία ακριβείας το LiDAR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτίμηση ύψους φυτών, όγκου κόμης, πυκνότητας βλάστησης, μορφολογίας δενδρώνων και ανάγλυφου εδάφους. Σε καλλιέργειες όπως αμπέλια, οπωρώνες και δενδρώδεις καλλιέργειες, η τρισδιάστατη πληροφορία είναι ιδιαίτερα σημαντική επειδή η παραγωγικότητα και η υγεία των φυτών δεν εξαρτώνται μόνο από το χρώμα των φύλλων, αλλά και από τη δομή της κόμης, τον φωτισμό στο εσωτερικό της και την ανάπτυξη του φυλλώματος.

Ένα πλεονέκτημα του LiDAR είναι ότι μπορεί να διαχωρίσει διαφορετικά επίπεδα πληροφορίας. Για παράδειγμα, μπορεί να δημιουργηθεί μοντέλο εδάφους και μοντέλο επιφάνειας καλλιέργειας. Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο μοντέλων μπορεί να οδηγήσει σε εκτίμηση ύψους φυτών. Αυτό είναι χρήσιμο σε ερευνητικές εφαρμογές όπου πρέπει να παρακολουθείται η ανάπτυξη με αντικειμενικό τρόπο και όχι μόνο με οπτική παρατήρηση.

Ο βασικός περιορισμός του LiDAR είναι το κόστος και η πολυπλοκότητα επεξεργασίας. Τα νέφη σημείων απαιτούν εξειδικευμένο λογισμικό και υπολογιστική ισχύ. Επίσης, για να συνδεθεί η τρισδιάστατη πληροφορία με αγρονομικά συμπεράσματα, χρειάζεται σωστός σχεδιασμός πειράματος και δεδομένα αναφοράς. Παρ' όλα αυτά, ο συνδυασμός LiDAR με RGB ή πολυφασματικές εικόνες μπορεί να προσφέρει πολύ ισχυρή περιγραφή της καλλιέργειας, επειδή ενώνει φασματική και γεωμετρική πληροφορία.

6.5 Συνδυασμός αερομετρήσεων με αισθητήρες εδάφους

Η μεγαλύτερη αξία των μετρήσεων από αέρα εμφανίζεται όταν συνδυάζονται με αισθητήρες εδάφους και επιτόπια δεδομένα. Οι αερομετρήσεις δίνουν χωρική εικόνα, αλλά συχνά είναι έμμεσες. Για παράδειγμα, χαμηλός NDVI μπορεί να οφείλεται σε έλλειψη νερού, έλλειψη αζώτου, ασθένεια, συμπίεση εδάφους ή χαμηλή πυκνότητα φυτών. Για να γίνει σωστή ερμηνεία χρειάζονται μετρήσεις αναφοράς, όπως υγρασία εδάφους, EC, pH, θερμοκρασία, δεδομένα λίπανσης και παρατήρηση στο πεδίο.

Ένα πρακτικό σενάριο είναι η δημιουργία ζωνών διαχείρισης. Αρχικά, από UAV ή δορυφορικά δεδομένα υπολογίζονται δείκτες βλάστησης και εντοπίζονται περιοχές με παρόμοια συμπεριφορά. Στη συνέχεια, σε κάθε ζώνη τοποθετούνται ή χρησιμοποιούνται αισθητήρες εδάφους για μέτρηση υγρασίας και αγωγιμότητας. Αν μια ζώνη έχει χαμηλό NDVI και χαμηλή υγρασία, τότε η απόφαση μπορεί να αφορά την άρδευση. Αν έχει χαμηλό NDVI αλλά η υγρασία είναι κανονική, τότε πρέπει να εξεταστούν άλλα αίτια, όπως θρεπτική έλλειψη, ασθένεια ή πρόβλημα εδάφους.

Ο συνδυασμός δεδομένων μπορεί να γίνει σε επίπεδο βάσης δεδομένων και GIS. Κάθε μέτρηση πρέπει να έχει χρονική σήμανση και γεωγραφική θέση. Οι εικόνες μετατρέπονται σε χάρτες, οι αισθητήρες δίνουν χρονοσειρές και όλα τα δεδομένα μπορούν να εμφανιστούν σε web εφαρμογή. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης δεν βλέπει απλώς αριθμούς, αλλά συνδυασμένη εικόνα της κατάστασης του αγρού. Αυτό συνδέει άμεσα τα ηλεκτρονικά, τους αισθητήρες, την τηλεπισκόπηση και την ανάλυση δεδομένων.

6.6 Περιορισμοί, σφάλματα και απαιτήσεις αξιοπιστίας

Οι μετρήσεις από αέρα έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα, αλλά δεν είναι απαλλαγμένες από σφάλματα. Ο φωτισμός, οι σκιές, οι νεφώσεις, η γωνία λήψης, η υγρασία της ατμόσφαιρας, η ταχύτητα του ανέμου και η κατάσταση του φυλλώματος μπορούν να επηρεάσουν την εικόνα. Σε UAV εφαρμογές, η σταθερότητα της πτήσης, η ποιότητα του GPS, η επικάλυψη εικόνων και η βαθμονόμηση της κάμερας είναι κρίσιμες παράμετροι. Σε δορυφορικές εφαρμογές, η νεφοκάλυψη και η μικρότερη χωρική ανάλυση μπορεί να περιορίσουν τη χρησιμότητα των δεδομένων.

Για να βελτιωθεί η αξιοπιστία, πρέπει να ακολουθείται σταθερό πρωτόκολλο λήψης. Οι πτήσεις UAV είναι προτιμότερο να γίνονται σε παρόμοια ώρα της ημέρας, με σταθερό ύψος, επαρκή επικάλυψη και χρήση ραδιομετρικού πάνελ όταν απαιτείται. Οι εικόνες πρέπει να επεξεργάζονται με ίδιο τρόπο, ώστε οι δείκτες να είναι συγκρίσιμοι μεταξύ ημερομηνιών. Επίσης, είναι χρήσιμο να κρατούνται σημειώσεις πεδίου, όπως στάδιο ανάπτυξης, πρόσφατη άρδευση, λίπανση, βροχόπτωση ή εμφάνιση ασθενειών.

Ένα ακόμη ζήτημα είναι ότι οι δείκτες βλάστησης μπορεί να κορεστούν σε πυκνή βλάστηση. Αυτό σημαίνει ότι σε πολύ ανεπτυγμένες καλλιέργειες ο NDVI μπορεί να μη διακρίνει εύκολα μικρές διαφορές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, δείκτες red-edge, θερμική απεικόνιση ή LiDAR μπορεί να προσφέρουν συμπληρωματική πληροφορία. Επομένως, η επιλογή αισθητήρα δεν πρέπει να γίνεται μόνο με βάση το κόστος, αλλά και με βάση το ερώτημα που θέλει να απαντήσει η εφαρμογή.

6.7 Ερευνητικές δυνατότητες

Στην ιδέα ενός ολοκληρωμένου συστήματος γεωργίας ακριβείας ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει σταθερούς αισθητήρες εδάφους, μετεωρολογικό σταθμό, περιοδική λήψη εικόνων από UAV ή δορυφόρο και web εφαρμογή για αποθήκευση και προβολή δεδομένων. Η ερευνητική αξία βρίσκεται στον συνδυασμό των δεδομένων και όχι μόνο στη μεμονωμένη λήψη εικόνων.

Μια πιθανή ερευνητική προσέγγιση είναι η σύγκριση των χαρτών NDVI ή θερμοκρασίας κόμης με τις μετρήσεις υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διερευνηθεί αν περιοχές με συγκεκριμένη εδαφική συμπεριφορά εμφανίζουν και διαφορετική φυτική ανάπτυξη. Για παράδειγμα, μια περιοχή με υψηλή φαινομενική αγωγιμότητα μπορεί να σχετίζεται με μεγαλύτερη υγρασία, διαφορετική υφή ή πιθανή αλατότητα. Αν αυτή η περιοχή εμφανίζει διαφορετικό δείκτη βλάστησης, τότε μπορεί να δημιουργηθεί πιο ολοκληρωμένη ερμηνεία της μεταβλητότητας του αγρού.

Επιπλέον, τα δεδομένα από αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδος σε αλγορίθμους μηχανικής μάθησης. Οι μεταβλητές μπορεί να περιλαμβάνουν NDVI, GNDVI, θερμοκρασία κόμης, υγρασία εδάφους, EC, θερμοκρασία αέρα και βροχόπτωση. Το μοντέλο μπορεί να εκπαιδευτεί για ταξινόμηση ζωνών στρες, πρόβλεψη ανάγκης άρδευσης ή εκτίμηση παραγωγικότητας. Έτσι, η

τηλεπισκόπηση δεν παραμένει απλώς εργαλείο απεικόνισης, αλλά γίνεται μέρος μιας αλυσίδας ανάλυσης δεδομένων.

Οι μετρήσεις από αέρα αποτελούν βασικό επίπεδο πληροφορίας για τη γεωργία ακριβείας. Τα UAV δίνουν λεπτομέρεια, οι δορυφόροι δίνουν επαναλαμβανόμενη κάλυψη, οι θερμικές κάμερες βοηθούν στην εκτίμηση υδατικού στρες και το LiDAR δίνει τρισδιάστατη πληροφορία. Ο συνδυασμός τους με αισθητήρες εδάφους και μεθόδους ανάλυσης δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε πιο αξιόπιστες αποφάσεις για άρδευση, λίπανση, φυτοπροστασία και διαχείριση αγροτεμαχίων.

Κεφάλαιο 7ο: Μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων

7.1 Απόκτηση, καθαρισμός και προετοιμασία δεδομένων

Η ανάλυση δεδομένων στη γεωργία ακριβείας ξεκινά με την αξιόπιστη συλλογή και οργάνωση των μετρήσεων. Τα δεδομένα μπορεί να είναι χρονοσειρές αισθητήρων, εικόνες, χάρτες, μετεωρολογικά δεδομένα ή πίνακες με χαρακτηριστικά εδάφους. Πριν χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα, πρέπει να ελεγχθούν για κενές τιμές, ακραίες τιμές, σφάλματα αισθητήρων και ασυμφωνίες μονάδων.



Η ανάλυση δεδομένων είναι επαναληπτική: κάθε νέα μέτρηση βελτιώνει τη γνώση για το χωράφι.

Εικόνα 7.1. Γενική ροή ανάλυσης δεδομένων

7.2 Στατιστική ανάλυση και οπτικοποίηση

Η πρώτη ανάλυση ενός dataset πρέπει να περιλαμβάνει περιγραφικά στατιστικά, γραφήματα και συσχετίσεις. Ο μέσος όρος, η διάμεσος, η τυπική απόκλιση και τα διαγράμματα κατανομής βοηθούν στον εντοπισμό γενικών τάσεων. Οι χάρτες θερμότητας και οι συσχετίσεις μπορούν να δείξουν ποιες μεταβλητές συνδέονται μεταξύ τους, για παράδειγμα υγρασία εδάφους και θερμοκρασία ή NDVI και απόδοση.

7.3 Μηχανική μάθηση

Η μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται για ταξινόμηση, πρόβλεψη και αναγνώριση προτύπων. Σε αγροτικές εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη απόδοσης, σύσταση καλλιέργειας, αναγνώριση ασθενειών, ταξινόμηση εικόνων, εντοπισμό ζιζανίων και πρόβλεψη ανάγκης άρδευσης [10], [29], [30].

Πίνακας 7.1. Βασικές τεχνικές ανάλυσης δεδομένων

Μέθοδος	Τύπος προβλήματος	Παράδειγμα στη γεωργία
Γραμμική παλινδρόμηση	Πρόβλεψη συνεχούς τιμής	Πρόβλεψη απόδοσης από δείκτες βλάστησης
Random Forest	Ταξινόμηση/παλινδρόμηση	Σύσταση καλλιέργειας ή πρόβλεψη στρες
SVM	Ταξινόμηση	Διάκριση υγιών και ασθενών φυτών
K-means	Ομαδοποίηση	Ζώνες διαχείρισης μέσα στο χωράφι

CNN	Ανάλυση εικόνας	Αναγνώριση ασθενειών σε φύλλα
Time-series models	Πρόβλεψη στο χρόνο	Υγρασία εδάφους και άρδευση

7.4 Δείκτες αξιολόγησης

Η αξιολόγηση των μοντέλων είναι απαραίτητη. Για ταξινόμηση χρησιμοποιούνται accuracy, precision, recall, F1-score και confusion matrix. Για παλινδρόμηση χρησιμοποιούνται MAE, RMSE και R^2 . Σε αγροτικές εφαρμογές η απλή υψηλή ακρίβεια δεν αρκεί πάντα. Πρέπει να εξετάζεται αν το μοντέλο γενικεύει σε διαφορετικές χρονιές, χωράφια και συνθήκες.

Πίνακας 7.2. Μετρικές αξιολόγησης μοντέλων

Μετρική	Χρήση	Ερμηνεία
Accuracy	Ταξινόμηση	Ποσοστό σωστών προβλέψεων
Precision	Ταξινόμηση	Πόσες θετικές προβλέψεις ήταν σωστές
Recall	Ταξινόμηση	Πόσες πραγματικές θετικές περιπτώσεις εντοπίστηκαν
F1-score	Ταξινόμηση	Ισορροπία precision και recall
MAE	Παλινδρόμηση	Μέσο απόλυτο σφάλμα
RMSE	Παλινδρόμηση	Σφάλμα με μεγαλύτερη έμφαση στα μεγάλα λάθη
R^2	Παλινδρόμηση	Ποσοστό εξηγούμενης διακύμανσης

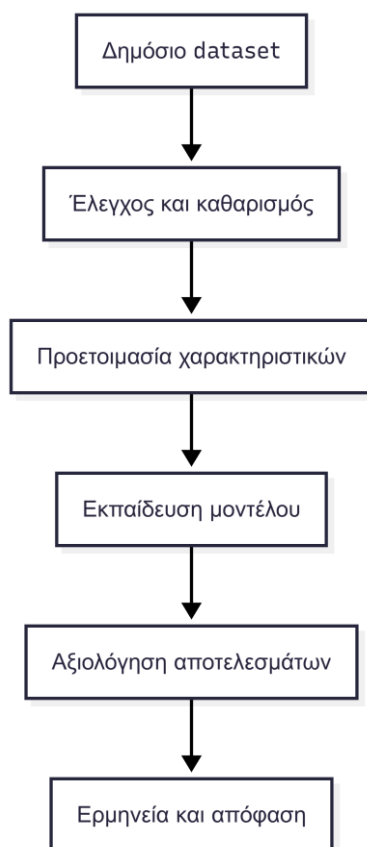
Κεφάλαιο 8ο: Εφαρμογή σε έτοιμα datasets με Python

8.1 Σκοπός πρακτικού κεφαλαίου

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί το πρακτικό μέρος της εργασίας και έχει στόχο να δείξει πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν πραγματικά ή δημόσια διαθέσιμα datasets για ανάλυση δεδομένων στη γεωργία ακριβείας. Η βασική λογική είναι ότι ο αναγνώστης δεν περιορίζεται στη θεωρητική περιγραφή των αισθητήρων αλλά βλέπει πώς τα δεδομένα που παράγονται από αισθητήρες, κάμερες και δορυφορικές πλατφόρμες μπορούν να μετατραπούν σε χαρακτηριστικά, γραφήματα, μοντέλα και τελικά σε απόφαση.

Στην πράξη, μια εφαρμογή γεωργίας ακριβείας μπορεί να ξεκινά από έναν αισθητήρα εδάφους, μια κάμερα RGB, μια πολυφασματική λήψη από UAV ή έναν δορυφορικό δείκτη βλάστησης. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να είναι αριθμητικές μετρήσεις, εικόνες, φασματικά κανάλια ή χρονοσειρές. Η Python είναι κατάλληλη για εκπαιδευτική και ερευνητική χρήση επειδή συνδυάζει βιβλιοθήκες για πίνακες δεδομένων, γραφήματα, μηχανική μάθηση, επεξεργασία εικόνας και γεωχωρική ανάλυση.

Στο κεφάλαιο χρησιμοποιούνται τρεις βασικές κατηγορίες datasets: ένα dataset σύστασης καλλιέργειας από το Kaggle, ένα dataset υπολογιστικής όρασης από το UCI Machine Learning Repository και δεδομένα/δείκτες τηλεπισκόπησης από NASA/ESA/Copernicus. Τα δύο πρώτα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για εκπαίδευση μοντέλων ταξινόμησης, ενώ το τρίτο δείχνει πώς μπορούν να αξιοποιηθούν δορυφορικά προϊόντα για παρακολούθηση βλάστησης και χωρική ανάλυση.



Εικόνα 8.1. Γενική ροή πρακτικής ανάλυσης δεδομένων με Python

8.2 Πηγές datasets και τρόπος πρόσβασης

Πριν από την ανάλυση είναι σημαντικό να τεκμηριώνεται από πού προέρχεται κάθε dataset, τι περιέχει και ποιος είναι ο σκοπός χρήσης του. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μια πτυχιακή εργασία, επειδή ο αναγνώστης πρέπει να μπορεί να επαναλάβει τα βήματα και να εντοπίσει τα αρχικά δεδομένα.

Πίνακας 8.1. Πηγές και βασικά χαρακτηριστικά των datasets που χρησιμοποιούνται στο πρακτικό κεφάλαιο

Dataset	Πού βρίσκεται στο Internet	Τύπος δεδομένων	Ενδεικτική χρήση
Crop Recommendation Dataset	Kaggle: https://www.kaggle.com/datasets/atharvaingle/crop-recommendation-dataset	Πίνακας με N, P, K, θερμοκρασία, υγρασία, pH, βροχόπτωση και καλλιέργεια	Σύσταση/ταξινόμηση καλλιεργειών
Dry Bean Dataset	UCI Machine Learning Repository: https://archive.ics.uci.edu/dataset/602/dry+bean+dataset	Χαρακτηριστικά σχήματος από εικόνες κόκκων φασολιού	Ταξινόμηση ποικιλίας με μηχανική μάθηση
HLS / Sentinel-2 Vegetation Indices	NASA Earthdata / LP DAAC: https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog/lpcloud-hlss30-vi-2.0	Δορυφορικοί δείκτες βλάστησης σε μορφή raster	Χρονοσειρές NDVI/EVI/NDMI και χωρική παρακολούθηση καλλιεργειών
Sentinel-2 / Copernicus	Copernicus Data Space ή Sentinel Hub / EO Browser	Πολυφασματικές εικόνες Sentinel-2	Υπολογισμός δεικτών βλάστησης από φασματικά κανάλια

Ο Πίνακας 8.1 δείχνει ότι τα datasets δεν έχουν όλα την ίδια μορφή. Το Crop Recommendation είναι κλασικό tabular dataset, δηλαδή κάθε γραμμή είναι ένα δείγμα και κάθε στήλη είναι μεταβλητή. Το Dry Bean προέρχεται από εικόνες αλλά παρέχεται ήδη ως πίνακας χαρακτηριστικών. Αντίθετα, τα Sentinel/HLS δεδομένα είναι γεωχωρικά raster, δηλαδή εικόνες με χωρική αναφορά, στις οποίες κάθε pixel αντιστοιχεί σε περιοχή της γης.

8.3 Μαθηματική βάση της ανάλυσης

Η ανάλυση ενός dataset στη γεωργία ακριβείας βασίζεται σε μια γενική μαθηματική αναπαράσταση. Αν έχουμε n δείγματα και p χαρακτηριστικά, τότε τα δεδομένα μπορούν να γραφούν ως πίνακας X με διαστάσεις $n \times p$. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα δείγμα και κάθε στήλη σε μια μεταβλητή, όπως pH, υγρασία ή δείκτης βλάστησης.

$$X = [x_{ij}], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{και} \quad j = 1, 2, \dots, p$$

Στα προβλήματα ταξινόμησης υπάρχει και μια ετικέτα y , η οποία μπορεί να είναι η καλλιέργεια, η ποικιλία ή η κατάσταση του φυτού. Το ζητούμενο είναι να μάθει ένα μοντέλο μια συνάρτηση f , ώστε από τα χαρακτηριστικά X να προβλέπει την ετικέτα y .

$$\hat{y} = f(X)$$

Πριν την εκπαίδευση, αρκετά μοντέλα χρειάζονται κανονικοποίηση των αριθμητικών μεταβλητών. Η συνηθέστερη μορφή είναι η τυποποίηση z-score, όπου από κάθε τιμή αφαιρείται ο μέσος όρος και το αποτέλεσμα διαιρείται με την τυπική απόκλιση.

$$z = (x - \mu) / \sigma$$

Με αυτόν τον τρόπο μεταβλητές με διαφορετικές μονάδες, για παράδειγμα θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου και βροχόπτωση σε χιλιοστά, αποκτούν συγκρίσιμη κλίμακα. Αυτό είναι χρήσιμο κυρίως σε μοντέλα όπως SVM, KNN και παλινδρόμηση.

Για την αξιολόγηση ταξινόμησης χρησιμοποιούνται βασικές μετρικές. Η ακρίβεια δείχνει το ποσοστό σωστών προβλέψεων, ενώ precision, recall και F1-score είναι πιο χρήσιμα όταν οι κλάσεις δεν έχουν ίδιο πλήθος δειγμάτων.

Accuracy = (σωστές προβλέψεις) / (σύνολο προβλέψεων)

Precision = TP / (TP + FP), Recall = TP / (TP + FN), F1 = 2 · (Precision · Recall) / (Precision + Recall)

8.4 Παράδειγμα 1: Crop Recommendation Dataset

Το Crop Recommendation Dataset βρίσκεται στο Kaggle και είναι κατάλληλο για πρώτη πρακτική εφαρμογή μηχανικής μάθησης στη γεωργία. Περιλαμβάνει μεταβλητές που σχετίζονται με θρεπτικά στοιχεία και κλιματικές συνθήκες: άζωτο (N), φώσφορο (P), κάλιο (K), θερμοκρασία, υγρασία, pH και βροχόπτωση. Η ετικέτα είναι η προτεινόμενη καλλιέργεια.

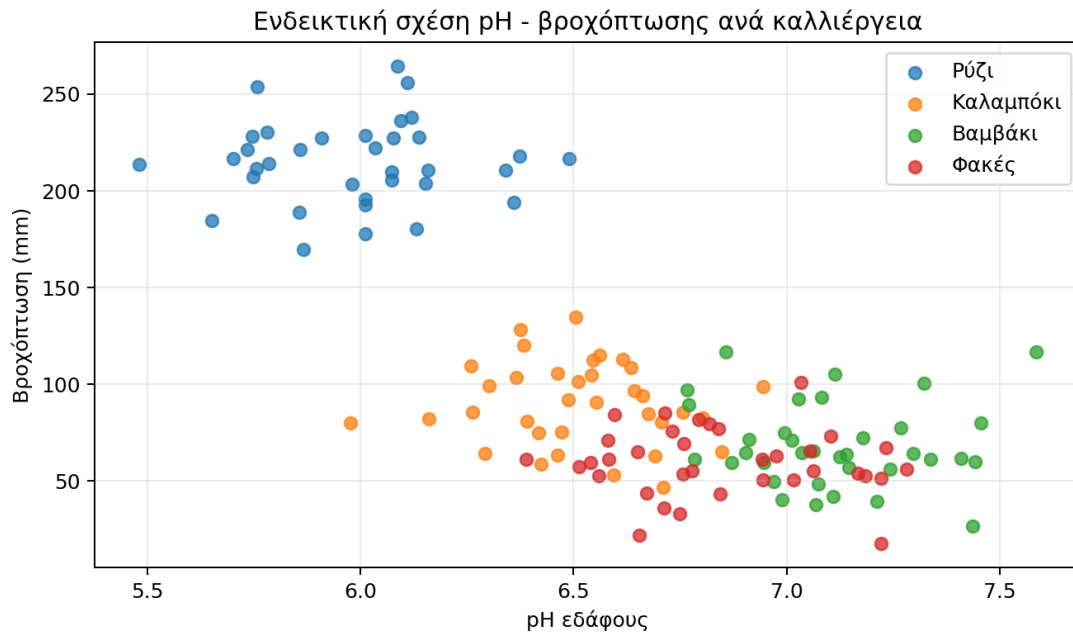
Το dataset μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ταξινόμηση, όπου το μοντέλο προσπαθεί να μάθει ποια καλλιέργεια αντιστοιχεί σε έναν συνδυασμό εδαφικών και κλιματικών παραμέτρων. Σε πραγματικό αγροτικό σύστημα, αντίστοιχες μεταβλητές θα μπορούσαν να προέρχονται από αισθητήρες εδάφους, μετεωρολογικό σταθμό και εργαστηριακή ανάλυση.

Η πρόσβαση γίνεται από τη σελίδα του Kaggle. Ο χρήστης δημιουργεί λογαριασμό, κατεβάζει το αρχείο crop_recommendation.csv και το τοποθετεί στον ίδιο φάκελο με το notebook ή το αρχείο Python. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί Kaggle API, όμως για εκπαιδευτική χρήση η απλή λήψη του CSV είναι αρκετή [31].

```
import pandas as pd

df = pd.read_csv("crop_recommendation.csv")
print(df.head())
print(df.info())
print(df.describe())
print(df["label"].value_counts())
```

Το πρώτο βήμα είναι ο έλεγχος των στηλών, των τύπων δεδομένων και των κενών τιμών. Στη συνέχεια εξετάζεται η κατανομή των καλλιεργειών, ώστε να φανεί αν το dataset είναι ισορροπημένο ή αν κάποιες κατηγορίες έχουν περισσότερα δείγματα από άλλες.



Εικόνα 8.2. Ενδεικτικό γράφημα σχέσης pH και βροχόπτωσης ανά καλλιέργεια

Στην Εικόνα 8.2 παρουσιάζεται ενδεικτικά η λογική ενός διαγράμματος διασποράς. Στην πράξη, τέτοια γραφήματα βοηθούν να εντοπιστούν ομάδες καλλιεργειών που εμφανίζονται σε διαφορετικές περιοχές του χώρου χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα, μια καλλιέργεια μπορεί να εμφανίζεται συχνότερα σε περιοχές με υψηλότερη βροχόπτωση, ενώ μια άλλη να εμφανίζεται σε μεγαλύτερες τιμές pH.

```
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.pipeline import Pipeline
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.metrics import classification_report, confusion_matrix, accuracy_score

X = df[["N", "P", "K", "temperature", "humidity", "ph", "rainfall"]]
y = df["label"]

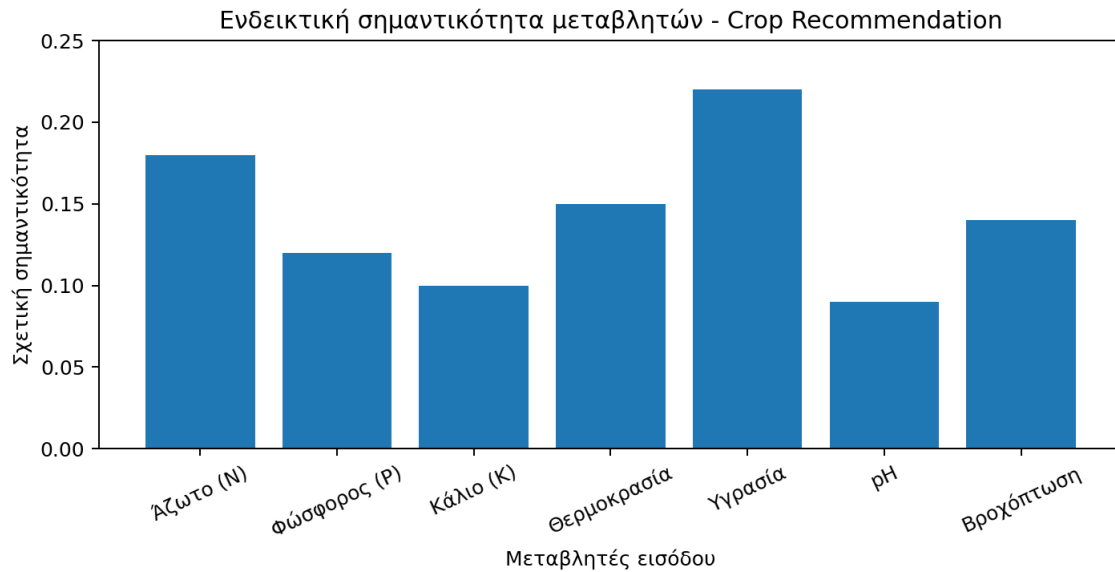
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, y, test_size=0.20, random_state=42, stratify=y
)

model = Pipeline(steps=[
    ("scaler", StandardScaler()),
    ("rf", RandomForestClassifier(n_estimators=300, random_state=42))
])

model.fit(X_train, y_train)
y_pred = model.predict(X_test)

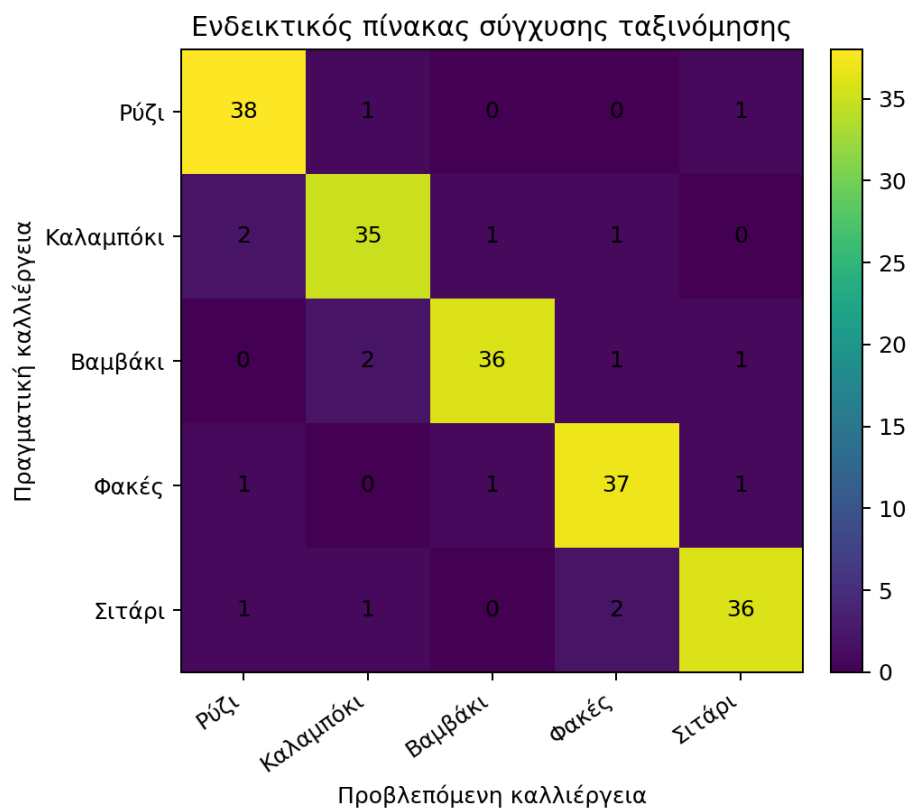
print("Accuracy:", accuracy_score(y_test, y_pred))
print(classification_report(y_test, y_pred))
print(confusion_matrix(y_test, y_pred))
```

Η χρήση train/test split είναι απαραίτητη για να αξιολογηθεί το μοντέλο σε δεδομένα που δεν έχει δει κατά την εκπαίδευση. Η επιλογή stratify=y βοηθά ώστε η αναλογία των καλλιεργειών να παραμείνει παρόμοια τόσο στο σύνολο εκπαίδευσης όσο και στο σύνολο ελέγχου.



Εικόνα 8.3. Ενδεικτική σημαντικότητα μεταβλητών για μοντέλο Random Forest

Η Εικόνα 8.3 δείχνει πώς μπορεί να παρουσιαστεί η σημαντικότητα των μεταβλητών. Σε ένα Random Forest, οι μεταβλητές με μεγαλύτερη σημαντικότητα συμβάλλουν περισσότερο στον διαχωρισμό των κλάσεων. Η ερμηνεία όμως πρέπει να γίνεται προσεκτικά, επειδή η σημαντικότητα εξαρτάται από το dataset, τη μέθοδο και τις συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών.



Εικόνα 8.4. Ενδεικτικός πίνακας σύγχυσης για ταξινόμηση καλλιεργειών

Ο πίνακας σύγχυσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμος επειδή δεν δείχνει μόνο το συνολικό ποσοστό επιτυχίας, αλλά και σε ποιες κλάσεις γίνονται τα λάθη. Αν για παράδειγμα δύο καλλιέργειες έχουν

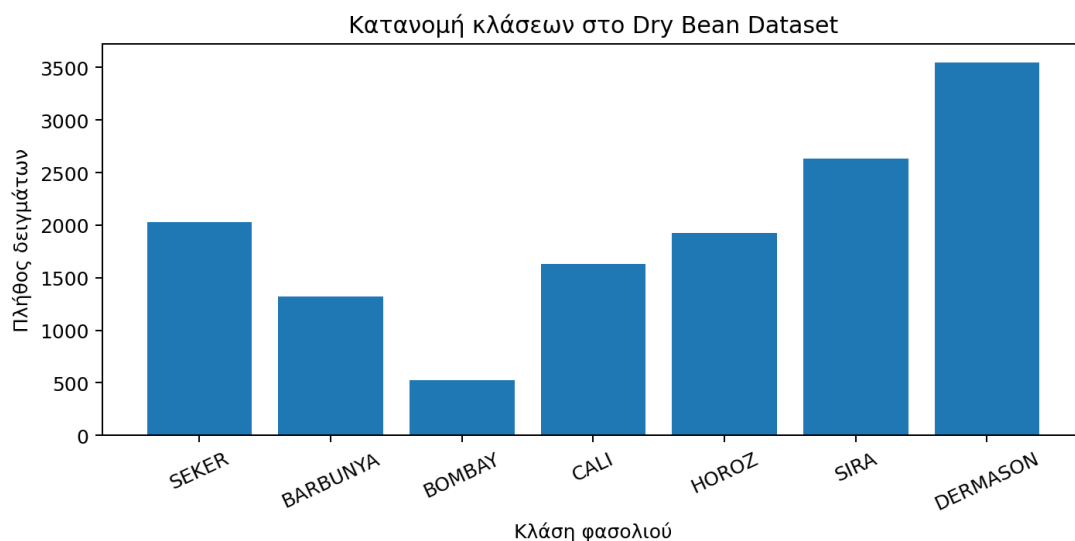
παρόμοιες απαιτήσεις σε pH, θερμοκρασία και βροχόπτωση, είναι πιθανό να συγχέονται από το μοντέλο.

8.5 Παράδειγμα 2: Dry Bean Dataset

Το Dry Bean Dataset βρίσκεται στο UCI Machine Learning Repository και αποτελεί πολύ καλό παράδειγμα σύνδεσης εικόνας και μηχανικής μάθησης. Στην αρχική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν εικόνες 13.611 κόκκων φασολιού από επτά ποικιλίες. Από τις εικόνες εξήχθησαν 16 χαρακτηριστικά που σχετίζονται με διαστάσεις και μορφή, όπως area, perimeter, major axis length, minor axis length, eccentricity, extent και solidity [33], [34].

Το σημαντικό σημείο είναι ότι το dataset προέρχεται από υπολογιστική όραση, αλλά δεν δίνεται ως αρχείο εικόνων. Δίνεται ως πίνακας αριθμητικών χαρακτηριστικών. Αυτό δείχνει ένα συνηθισμένο στάδιο στην ανάλυση εικόνας: η εικόνα πρώτα τμηματοποιείται, μετά υπολογίζονται χαρακτηριστικά και στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά χρησιμοποιούνται σε αλγόριθμο ταξινόμησης.

Η πρόσβαση γίνεται από τη σελίδα του UCI. Ο χρήστης μπορεί να κατεβάσει το αρχείο Dry_Bean_Dataset.xlsx και να το φορτώσει με pandas. Επειδή το dataset έχει πολλές αριθμητικές μεταβλητές και επτά κλάσεις, είναι κατάλληλο για σύγκριση μοντέλων όπως Random Forest, SVM, KNN και Logistic Regression.



Εικόνα 8.5. Κατανομή των επτά κλάσεων του Dry Bean Dataset

Η Εικόνα 8.5 παρουσιάζει την κατανομή των κλάσεων. Η κατανομή των δειγμάτων είναι σημαντική επειδή επηρεάζει την αξιολόγηση. Αν μια κλάση έχει πολύ περισσότερα δείγματα, ένα μοντέλο μπορεί να εμφανίζει υψηλή συνολική ακρίβεια αλλά να αποδίδει χειρότερα στις μικρότερες κλάσεις.

```
import pandas as pd
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
from sklearn.metrics import classification_report, accuracy_score

bean = pd.read_excel("Dry_Bean_Dataset.xlsx")

X = bean.drop(columns=["Class"])
y = bean["Class"]
```

```

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, y, test_size=0.20, random_state=42, stratify=y
)

clf = RandomForestClassifier(n_estimators=300, random_state=42)
clf.fit(X_train, y_train)
y_pred = clf.predict(X_test)

print("Accuracy:", accuracy_score(y_test, y_pred))
print(classification_report(y_test, y_pred))

```

Στο Dry Bean Dataset η σχέση με τη γεωργία ακριβείας είναι η εξής: μια κάμερα ή ένα σύστημα μηχανικής όρασης μπορεί να μετατρέψει ένα φυσικό αντικείμενο, όπως σπόρο ή καρπό, σε αριθμητικές μεταβλητές. Έπειτα, οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιούνται για ταξινόμηση ποιότητας, ποικιλίας ή κατάστασης. Η ίδια λογική μπορεί να εφαρμοστεί σε καρπούς, φύλλα, ζιζάνια ή ασθένειες.

Μια απλή μαθηματική περιγραφή του προβλήματος είναι ότι κάθε δείγμα περιγράφεται από διάνυσμα χαρακτηριστικών $x = [x_1, x_2, \dots, x_{16}]$. Το μοντέλο ταξινόμησης αναθέτει το δείγμα σε μία από τις επτά κλάσεις:

$f(x) \in \{\text{SEKER, BARBUNYA, BOMBAY, CALI, HOROZ, SIRA, DERMASON}\}$

8.6 Παράδειγμα 3: Δορυφορικά δεδομένα και δείκτες βλάστησης

Η τρίτη κατηγορία δεδομένων αφορά δορυφορικά προϊόντα, όπως Sentinel-2, Landsat και Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS). Σε αντίθεση με τα προηγούμενα datasets, τα δεδομένα αυτά δεν είναι απλός πίνακας CSV αλλά γεωχωρικές εικόνες. Κάθε εικόνα αποτελείται από pixels που έχουν συντεταγμένες, χωρική ανάλυση και τιμές ανά φασματικό κανάλι.

Η NASA Earthdata παρέχει HLS Vegetation Indices, δηλαδή έτοιμα προϊόντα δεικτών βλάστησης με χωρική ανάλυση 30 m. Στο προϊόν HLSS30_VI περιλαμβάνονται δείκτες όπως NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, NDMI, NDWI, NBR, NBR2 και TVI. Τα προϊόντα αυτά είναι κατάλληλα για παρακολούθηση αλλαγών στη βλάστηση, εντοπισμό στρες και ανάλυση χρονοσειρών [16], [41].

Σε εκπαιδευτική πτυχιακή εργασία δεν είναι απαραίτητο να κατέβει μεγάλο πλήθος δορυφορικών εικόνων. Μπορεί να επιλεγεί μια μικρή περιοχή ενδιαφέροντος, για παράδειγμα ένας αγρός ή μια αγροτική περιοχή, και να εξαχθούν τιμές NDVI σε διαφορετικές ημερομηνίες. Έτσι δημιουργείται χρονοσειρά που δείχνει την ανάπτυξη και την ωρίμανση της καλλιέργειας.

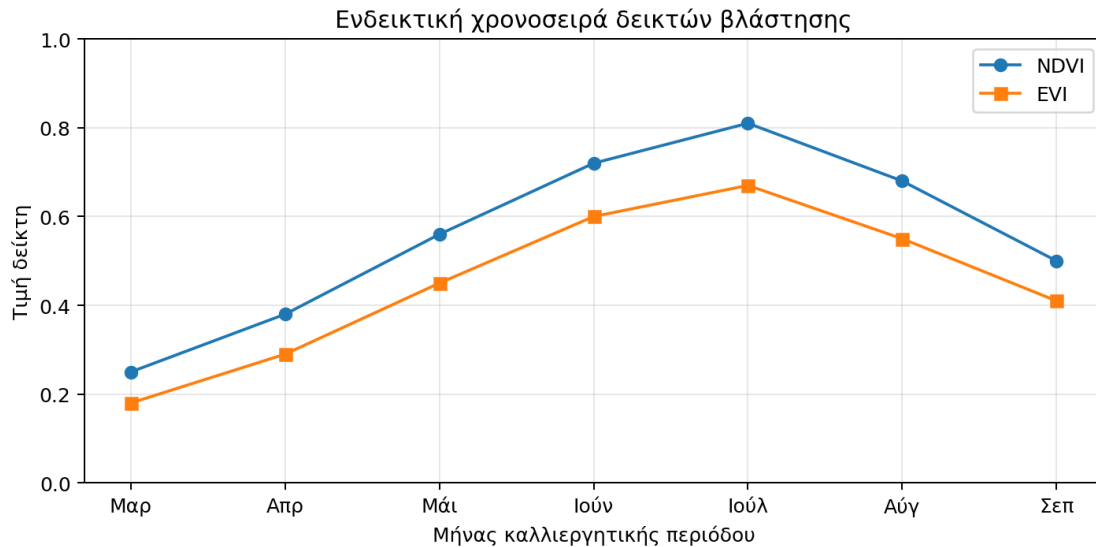
Οι βασικοί δείκτες που μπορούν να παρουσιαστούν είναι:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red})$$

$$\text{EVI} = 2.5 \cdot (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + 6 \cdot \text{Red} - 7.5 \cdot \text{Blue} + 1)$$

$$\text{NDMI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

Ο NDVI συνδέεται κυρίως με τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα και την πράσινη βιομάζα. Ο EVI μειώνει ορισμένες επιδράσεις κορεσμού και ατμόσφαιρας, ενώ ο NDMI σχετίζεται περισσότερο με την υγρασία της βλάστησης.



Εικόνα 8.6. Ενδεικτική χρονοσειρά NDVI και EVI κατά τη διάρκεια καλλιεργητικής περιόδου

Η Εικόνα 8.6 δείχνει την τυπική λογική μιας χρονοσειράς δείκτη βλάστησης. Στην αρχή της περιόδου οι τιμές είναι χαμηλότερες, στη φάση έντονης ανάπτυξης αυξάνονται και προς το τέλος μειώνονται. Σε πραγματικά δεδομένα, απότομες πτώσεις μπορεί να συνδεόνται με ασθένεια, ξηρασία, συγκομιδή ή σφάλμα λόγω νεφώσεων.

```
# Ενδεικτική λογική υπολογισμού NDVI από δύο κανάλια raster
# Σε πραγματική εφαρμογή χρησιμοποιούνται βιβλιοθήκες όπως rasterio και numpy.

import numpy as np

red = np.array([[0.12, 0.14], [0.18, 0.20]])
nir = np.array([[0.45, 0.50], [0.60, 0.65]])

ndvi = (nir - red) / (nir + red)
print(ndvi)
```

8.7 Δομή αποτελεσμάτων

Ένας απλός τρόπος είναι να οργανωθούν τα αποτελέσματα ανά dataset και ανά μοντέλο.

Πίνακας 8.2. Δομή παρουσίασης αποτελεσμάτων ανά dataset και μοντέλο

Dataset	Μοντέλο	Κύρια μετρική	Γράφημα/έξοδος	Ερμηνεία
Crop Recommendation	Random Forest	Accuracy, F1-score	Feature importance, confusion matrix	Ποιες μεταβλητές επηρεάζουν περισσότερο τη σύσταση καλλιέργειας
Crop Recommendation	SVM ή KNN	Accuracy, F1-score	Πίνακας σύγκρισης μοντέλων	Έλεγχος επίδρασης κανονικοποίησης
Dry Bean	Random Forest	Accuracy, macro F1	Κατανομή κλάσεων, confusion matrix	Ποιες ποικιλίες συγχέονται

Sentinel/HLS	Στατιστική χρονοσειρά	Μέσος NDVI ανά ημερομηνία	Γράφημα NDVI/EVI	Παρακολούθηση ανάπτυξης και πιθανών στρες
--------------	--------------------------	------------------------------	------------------	---

Σημαντικό είναι να μη γίνεται υπερβολική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τα έτοιμα datasets είναι χρήσιμα για εκπαίδευση και επίδειξη μεθοδολογίας, αλλά δεν αντικαθιστούν πραγματικό πείραμα πεδίου. Για να έχει ένα μοντέλο πρακτική αξία, πρέπει να ελεγχθεί σε διαφορετικά χωράφια, εποχές, ποικιλίες και συνθήκες μέτρησης.

8.8 Σύνδεση με τους αισθητήρες

Οι αισθητήρες εδάφους δίνουν αριθμητικές μεταβλητές όπως υγρασία, EC, θερμοκρασία και pH. Οι κάμερες δίνουν εικόνες, από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν χρώματα, δείκτες βλάστησης, περιοχές φυλλώματος και μορφολογικά χαρακτηριστικά. Τα UAV και οι δορυφόροι δίνουν χωρικούς χάρτες και χρονοσειρές για μεγάλες εκτάσεις.

Ένα πλήρες ερευνητικό σύστημα θα μπορούσε να συνδυάζει δεδομένα από χαμηλού κόστους αισθητήρες εδάφους, μετεωρολογικό σταθμό, κάμερα RGB ή πολυφασματική κάμερα και δορυφορικά προϊόντα. Τα δεδομένα θα αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων, θα καθαρίζονται, θα αναλύονται με Python και θα εμφανίζονται σε web εφαρμογή με γραφήματα και ειδοποιήσεις.

Με αυτόν τον τρόπο η πτυχιακή δεν μένει μόνο στη βιβλιογραφική περιγραφή των τεχνολογιών, αλλά δείχνει και μια πρακτική διαδρομή από τον αισθητήρα προς την απόφαση. Η ίδια λογική μπορεί να επεκταθεί σε πραγματική πειραματική διάταξη, όπου οι μετρήσεις του εδάφους και οι εικόνες από το πεδίο θα χρησιμοποιούνται για πρόβλεψη άρδευσης, εντοπισμό στρες ή αξιολόγηση της ανάπτυξης της καλλιέργειας.

Το κεφάλαιο δείχνει ότι η αξία της γεωργίας ακριβείας βρίσκεται στη σύνδεση τριών επιπέδων: μέτρηση, ανάλυση και απόφαση. Οι αισθητήρες χωρίς ανάλυση παράγουν απλώς δεδομένα. Η ανάλυση χωρίς σωστές μετρήσεις παράγει αβέβαια αποτελέσματα. Η χρήσιμη εφαρμογή προκύπτει όταν οι μετρήσεις είναι αξιόπιστες, τα μοντέλα αξιολογούνται σωστά και η τελική ερμηνεία συνδέεται με πραγματική αγρονομική ανάγκη.

Κεφάλαιο 9ο: Συμπεράσματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσίασε μια συνολική μελέτη των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στη γεωργία ακριβείας και των βασικών μεθόδων ανάλυσης δεδομένων που μπορούν να αξιοποιηθούν σε σύγχρονα αγροτικά συστήματα. Η βασική ιδέα που αναδείχθηκε είναι ότι το χωράφι δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μία ομοιομορφη επιφάνεια, αλλά ως ένα δυναμικό σύστημα με χωρική και χρονική μεταβλητότητα. Για να ληφθούν σωστές αποφάσεις, απαιτούνται αξιόπιστες μετρήσεις, σωστή βαθμονόμηση, αποθήκευση δεδομένων και προσεκτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Από την ανάλυση των αισθητήρων εδάφους προκύπτει ότι παράμετροι όπως η υγρασία, η θερμοκρασία, το pH και η ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι κρίσιμες για την άρδευση, τη λίπανση και τη γενικότερη διαχείριση της καλλιέργειας. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ηλεκτρονική και μετρητική πλευρά των αισθητήρων, επειδή η ακρίβεια δεν εξαρτάται μόνο από το αισθητήριο στοιχείο, αλλά και από το κύκλωμα προσαρμογής, τη συχνότητα διέγερσης, τη θερμοκρασιακή διόρθωση, την εγκατάσταση στο έδαφος και τη διαδικασία βαθμονόμησης.

Οι μη επαφικές τεχνικές, όπως η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή και η χαρτογράφηση φαινομενικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, προσφέρουν σημαντική δυνατότητα γρήγορης αποτύπωσης της εδαφικής μεταβλητότητας. Τα όργανα που μετρούν ECa χωρίς επαφή δεν αντικαθιστούν τους επαφικούς αισθητήρες ή τις εργαστηριακές αναλύσεις, αλλά λειτουργούν συμπληρωματικά. Μπορούν να υποδείξουν ζώνες διαφορετικής συμπεριφοράς στις οποίες στη συνέχεια τοποθετούνται αισθητήρες ή λαμβάνονται δείγματα αναφοράς.

Οι κάμερες, τα UAV, οι δορυφόροι και οι τεχνικές τηλεπισκόπησης προσθέτουν τη χωρική διάσταση στην ανάλυση. Οι RGB, πολυφασματικές, υπερφασματικές, θερμικές και 3D απεικονίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό δεικτών βλάστησης, την εκτίμηση φυτοκάλυψης, την ανίχνευση υδατικού στρες, την παρακολούθηση ανάπτυξης και την αναγνώριση περιοχών που χρειάζονται επιτόπιο έλεγχο. Η αξία τους αυξάνεται όταν συνδυάζονται με αισθητήρες εδάφους και πραγματικά δεδομένα πεδίου.

Το πρακτικό κεφάλαιο με Python έδειξε πώς δημόσια datasets μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκπαίδευση, οπτικοποίηση και αξιολόγηση μοντέλων. Το Crop Recommendation Dataset δείχνει τη χρήση αριθμητικών εδαφικών και κλιματικών παραμέτρων για ταξινόμηση καλλιέργειας, το Dry Bean Dataset δείχνει τη μετατροπή εικόνων σε χαρακτηριστικά και ταξινόμηση, ενώ τα δορυφορικά δεδομένα HLS/Sentinel δείχνουν πώς οι δείκτες βλάστησης μπορούν να αναλυθούν ως χρονοσειρές και χάρτες.

Η εργασία δείχνει ότι η γεωργία ακριβείας δεν είναι μόνο θέμα χρήσης αισθητήρων, αλλά ένα ολοκληρωμένο πεδίο που συνδυάζει ηλεκτρονικά κυκλώματα, ενσωματωμένα συστήματα, ασύρματες επικοινωνίες, βάσεις δεδομένων, επεξεργασία εικόνων και μηχανική μάθηση. Η τελική αξία προκύπτει όταν τα δεδομένα μετατρέπονται σε απλή και τεκμηριωμένη απόφαση για άρδευση, λίπανση, παρακολούθηση στρες ή διαχείριση ζωνών.

Ως μελλοντική επέκταση προτείνεται η υλοποίηση πραγματικού πειραματικού συστήματος με κόμβους IoT στο χωράφι, αισθητήρες υγρασίας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας, θερμοκρασιακή αντιστάθμιση, κάμερα ή πολυφασματικό αισθητήρα, αποθήκευση σε βάση δεδομένων και web εφαρμογή για προβολή μετρήσεων. Επιπλέον, θα μπορούσε να δημιουργηθεί μοντέλο πρόβλεψης άρδευσης ή εντοπισμού στρες με συνδυασμό δεδομένων εδάφους, εικόνων και δορυφορικών δεικτών. Με αυτόν τον τρόπο η

εργασία μπορεί να αποτελέσει βάση για ένα ολοκληρωμένο, χαμηλού κόστους και ερευνητικά αξιοποιήσιμο σύστημα γεωργίας ακριβείας.

Να σημειωθεί ότι κατά τη μελέτη, οργάνωση και γλωσσική διαμόρφωση του κειμένου χρησιμοποιήθηκε τεχνολογία τεχνητής νοημοσύνης με βοηθητικό και υποστηρικτικό ρόλο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] FAO. (2017). Precision agriculture: A smart farming approach to agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/e-agriculture/news/precision-agriculture-smart-farming-approach-agriculture>
- [2] FAO. (2026). AGROVOC Concept of the Week: Precision Agriculture. <https://www.fao.org/agrovoc/news/agrovoc-concept-week-precision-agriculture>
- [3] USDA Agricultural Research Service. (2025). Benefits and Evolution of Precision Agriculture. <https://www.ars.usda.gov/oc/utm/benefits-and-evolution-of-precision-agriculture/>
- [4] Soussi, A., et al. (2024). Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 24(8), 2647. <https://doi.org/10.3390/s24082647>
- [5] Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- [6] Zhang, X., et al. (2024). Advanced technologies of soil moisture monitoring in precision agriculture: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, 101473. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101473>
- [7] Faqir, Y., et al. (2024). A review on the application of advanced soil and plant sensors in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 225, 109281. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109281>
- [8] Sajib, M. M. H., et al. (2025). Innovations in Sensor-Based Systems and Sustainable Agriculture. *Encyclopedia*, 5(2), 67. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5020067>
- [9] Pascoal, D., et al. (2024). A technical survey on practical applications and guidelines for IoT-capable sensors in viticulture. *Scientific Reports*, 14, 29026. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80924-y>
- [10] Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). Machine Learning in Agriculture: A Review. *Sensors*, 18(8), 2674. <https://doi.org/10.3390/s18082674>
- [11] Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- [12] Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3, 254-256. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>
- [13] Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

- [14] Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA SP-351.
- [15] Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289-298.
- [16] NASA Earthdata. (2025). The Harmonized Landsat Sentinel-2 Project Releases Vegetation Indices. <https://www.earthdata.nasa.gov/news/harmonized-landsat-sentinel-2-project-releases-vegetation-indices>
- [17] European Space Agency. (n.d.). Sentinel-2 Mission. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>
- [18] Jensen, J. R. (2016). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Pearson.
- [19] Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford University Press.
- [20] Kirkham, M. B. (2014). *Principles of Soil and Plant Water Relations*. Academic Press.
- [21] Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1-3), 11-43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>
- [22] Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 71-91. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002>
- [23] Bogaen, H. R., Huisman, J. A., Oberdörster, C., & Vereecken, H. (2007). Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*, 344(1-2), 32-42.
- [24] Viscarra Rossel, R. A., & McBratney, A. B. (1998). Soil chemical analytical accuracy and costs: implications from precision agriculture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38, 765-775.
- [25] Hedley, C. (2015). The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(1), 12-19.
- [26] Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating biomass of barley using crop surface models from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395-10412.
- [27] Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13, 693-712.
- [28] Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in Plant Science*, 24(2), 152-164.
- [29] Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90.

- [30] van Klompenburg, T., Kassahun, A., & Catal, C. (2020). Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105709.
- [31] Ingle, A. (2020). Crop Recommendation Dataset. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/atharvaingle/crop-recommendation-dataset>
- [32] Dua, D., & Graff, C. (2019). UCI Machine Learning Repository. University of California, Irvine. <https://archive.ics.uci.edu/>
- [33] UCI Machine Learning Repository. (2020). Dry Bean Dataset. <https://archive.ics.uci.edu/dataset/602/dry+bean+dataset>
- [34] Koklu, M., & Ozkan, I. A. (2020). Multiclass classification of dry beans using computer vision and machine learning techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105507.
- [35] Scikit-learn Developers. (2026). scikit-learn: Machine Learning in Python. <https://scikit-learn.org/>
- [36] OpenCV Team. (2026). OpenCV documentation. <https://docs.opencv.org/>
- [37] McKinney, W. (2010). Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*.
- [38] Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. Springer.
- [39] James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2021). *An Introduction to Statistical Learning*. Springer.
- [40] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- [41] Neigh, C. (2025). HLS Sentinel-2 Multi-spectral Instrument Vegetation Indices Daily Global 30m v2.0 [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/HLS/HLSS30_VI.002