



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
UNIVERSITY OF PIRAEUS

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

ΠΜΣ «Κλιματική Κρίση και Τεχνολογίες Πληροφορικής και
Επικοινωνιών»

Αξιολόγηση της αξιοπιστίας δεδομένων για βιώσιμη χρηματοδότηση στην Ψηφιακή Γεωργία

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ελένη Βλάχου

A.M.: MKK2306

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωάννης Μανιάτης

Αθήνα, 2025

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο

“Αξιολόγηση της αξιοπιστίας δεδομένων για βιώσιμη χρηματοδότηση στην Ψηφιακή Γεωργία ”

καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και οι πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Πειραιώς αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Βλάχου Ελένη, 2025, Αθήνα

Υπογραφή Φοιτητή:



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς τα πρόσωπα και τους φορείς που στήριξαν την παρούσα εργασία και συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωσή της. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναστάση Σταμάτη από τη Dataphoria και τον Ανδρέα Ζερκούλη από την Inagros για την καθοδήγηση, την ενθάρρυνση και την κοινή μας δέσμευση για ένα πιο δίκαιο και βιώσιμο μέλλον. Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων και σε ολόκληρη την ομάδα της Dataphoria, όχι μόνο για την υποστήριξη και τις ιδέες τους, αλλά και για την υπομονή και το χιούμορ τους καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διαδρομής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους ομιλητές του μεταπτυχιακού για τις επιστημονικές βάσεις και την έμπνευση που παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και την Ιωάννα Βούλγαρη, για τη συνεχή στήριξη και την υπομονή της. Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου, που υπήρξαν σταθερή πηγή ενθάρρυνσης και συμπαράστασης, ειδικά στις πιο απαιτητικές στιγμές αυτής της διαδρομής.

Abstract

As climate action and sustainable finance are increasingly supported by data-driven approaches, data reliability is becoming a foundation for trustworthy and transparent decision-making. Yet, this crucial aspect is often overlooked. This need is especially important in agriculture, where information comes from a fragmented mix of sources, including manual logs, invoices, sensors, GPS systems, and satellite imagery, each varying in accuracy and traceability. When such data is used to assess creditworthiness or eligibility for carbon market access, its reliability directly shapes financial inclusion, policy credibility, and environmental outcomes. This thesis introduces the Data Reliability Index (DRI), a novel framework for evaluating the consistency and trustworthiness of agricultural data across the following core dimensions: volume, input frequency, data variety, quality and source trustworthiness, and criticality (i.e., the relevance of a data element to a given decision). Developed through a Design Science Research methodology, the DRI functions as a diagnostic tool to determine whether datasets are fit for high-stakes applications. The framework is validated across three domains: credit and sustainability assessments in agriculture, ESG alignment and carbon market access, and real-time risk monitoring for financial institutions. These applications demonstrate that the DRI is a transparent and context-aware tool for supporting decisions, specifically designed for digital agriculture. The broader implication of this thesis is clear: data alone is not enough. For digital agriculture to advance sustainability, equity, and resilience, it must also assess and clearly communicate the reliability of the data that drives every decision.

Περίληψη

Η κλιματική δράση και η βιώσιμη χρηματοδότηση βασίζονται ολοένα και περισσότερο σε δεδομένα, των οποίων η αξιοπιστία είναι απαραίτητη για τη λήψη τεκμηριωμένων και διαφανών αποφάσεων. Παρ' όλα αυτά, η συστηματική αξιολόγηση της αξιοπιστίας συχνά παραβλέπεται. Το παραπάνω πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο στην Ψηφιακή Γεωργία, όπου τα δεδομένα προέρχονται από διαφορετικές και κατακερματισμένες πηγές, με σημαντικές αποκλίσεις στην ακρίβεια και την ιχνηλασιμότητα. Όταν τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για σκοπούς βιώσιμης χρηματοδότησης, όπως η αξιολόγηση πιστοληπτικής ικανότητας ή η συμμετοχή σε αγορές άνθρακα, η αξιοπιστία τους επηρεάζει άμεσα την πρόσβαση σε κεφάλαιο, την εμπιστοσύνη στις σχετικές πολιτικές και την ακρίβεια υπολογισμών ανθρακικού αποτυπώματος και άλλων μεγεθών. Η παρούσα εργασία προτείνει έναν Δείκτη Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI), ένα πολυδιάστατο διαγνωστικό εργαλείο για την ποσοτική αξιολόγηση της αξιοπιστίας γεωργικών δεδομένων για εφαρμογές και αποφάσεις υψηλού ρίσκου και σημασίας. Ο δείκτης βασίζεται σε πέντε διαστάσεις: όγκος, συχνότητα, ποικιλία, ποιότητα & εμπιστοσύνη στην πηγή, και κρισιμότητα ως προς την απόφαση. Αναπτύχθηκε με βάση τη μεθοδολογία Design Science Research και επικυρώνεται μέσα από διαφορετικά παραδείγματα χρήσης που αφορούν την αξιολόγηση χρηματοπιστοληπτικής ικανότητας και βιωσιμότητας στη γεωργία, τη συμμόρφωση με πρότυπα ESG και την πρόσβαση στις αγορές άνθρακα, καθώς και την παρακολούθηση κινδύνου σε πραγματικό χρόνο για χρηματοπιστωτικούς οργανισμούς. Μέσω αυτών, ο DRI αναδεικνύεται ως ένα διαφανές και ευαίσθητο ως προς τα συμφραζόμενα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, σχεδιασμένο για τις απαιτήσεις της ψηφιακής γεωργίας. Η εν λόγω εργασία επισημαίνει ότι η ύπαρξη δεδομένων από μόνη της δεν είναι αρκετή και προκειμένου η ψηφιακή γεωργία να συμβάλλει ουσιαστικά στη βιωσιμότητα, την ισότητα και την ανθεκτικότητα των αγροτικών επιχειρήσεων, απαιτείται η συστηματική αξιολόγηση και η σαφής επικοινωνία της αξιοπιστίας των δεδομένων που στηρίζουν την κάθε απόφαση.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1. Η σημασία της γεωργίας στην παγκόσμια και στην ελληνική οικονομία	1
1.2. Πρόβλημα	6
1.3. Στόχοι και σημασία της εργασίας	7
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	10
2.1. Εξέλιξη της γεωργίας και σύγχρονες προκλήσεις	10
2.2. Ψηφιακή Γεωργία	14
2.3. Τεχνικό υπόβαθρο της ψηφιακής γεωργίας	19
2.4. Αγροτικά Δεδομένα: Τύποι και Διαχείριση	34
2.5. Εισαγωγή στην Αξιοπιστία Δεδομένων στη Γεωργία	43
3. Βιβλιογραφική Επισκόπηση	44
3.1. Έννοιες και ορισμοί	44
3.2. Πλαίσια αξιοπιστίας και ποιότητας δεδομένων	47
3.3. Αξιοπιστία δεδομένων σε άλλους τομείς	49
3.4. Ποιότητα και αξιοπιστία γεωργικών δεδομένων	51
3.5. Κενά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία και ευκαιρίες	54
4. Σχεδιασμός πλαισίου αξιολόγησης της αξιοπιστίας δεδομένων	56
4.1. Ορισμός της αξιοπιστίας δεδομένων στην γεωργία	56
4.2. Πολυδιάστατο Μοντέλο Αξιολόγησης Αξιοπιστίας	58
4.3. Καθορισμός προτεραιοτήτων: Ποια δεδομένα έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα;	65
4.4. Υπολογισμός του Δείκτη Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI)	69
4.5. Από τη μεθοδολογία στην πράξη: Εφαρμογή και έλεγχος	72
5. Εφαρμογές του Πλαισίου Αξιοπιστίας Δεδομένων	74
5.1. Μεθοδολογία εφαρμογής και σχεδιασμός σεναρίων	74

5.2. Παραδείγματα	76
5.3. Επαλήθευση και έλεγχος ανθεκτικότητας του πλαισίου	87
6. Συζήτηση και Συμπεράσματα	91
6.1. Πλεονεκτήματα και Συνεισφορά του Πλαισίου	91
6.2. Περιορισμοί και Ανοικτά Ζητήματα	93
6.3. Υλοποίηση και Μελλοντικές Κατευθύνσεις	94
6.4. Τελικά Συμπεράσματα	96
7. Βιβλιογραφία	98

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1: Creating a sustainable food future by 2050 (Ranganathan et al., 2018)	1
Εικόνα 1.2 Η ακτινογραφία της ελληνικής γεωργίας (Μανιφάβα & Γεωργιοπούλου, 2024)....	2
Εικόνα 1.3 Διαχειριστές αγροτικών εκμεταλλεύσεων στην Ελλάδα ανά ηλικία (Μακαντάση et al., 2024)	3
Εικόνα 1.4: Τεχνική εκπαίδευση διαχειριστών αγροτικών εκμεταλλεύσεων το 2020 στην ΕΕ (Μακαντάση et al., 2024)	3
Εικόνα 1.5 Μέση έκταση ανά αγροτική εκμετάλλευση το 2020 στην ΕΕ (Μακαντάση et al., 2024).....	4
Εικόνα 1.6: Πρωτογενής τομέας στην Ελλάδα (Λιάλιος, 2024)	4
Εικόνα 1.7: Design Science Research Process (Peppers et al., 2020)	9
Εικόνα 2.1: Η εξελικτική πορεία της αγροτικής επανάστασης από τη Γεωργία 1.0 στη Γεωργία 4.0 (Gyamfi & Yakubu, 2024).....	12
Εικόνα 2.2: Η Γεωργία Ακριβείας αποτελεί υποσύνολο της Έξυπνης Γεωργίας, η οποία εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο της Ψηφιακής Γεωργίας. Πηγή:(Digital Seed, 2021).	17
Εικόνα 2.3: Οι ψηφιακές τεχνολογίες στη σύγχρονη γεωργία (Fuentes-Peñailillo et al., 2024)..	20
Εικόνα 2.4: Διαδίκτυο των πραγμάτων στην γεωργία (Fuentes-Peñailillo et al., 2024)	30
Εικόνα 2.5: Κύκλος ζωής ψηφιακής πληροφορίας στην γεωργία (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).....	31
Εικόνα 2.6: Η αλυσίδα δεδομένων στις εφαρμογές Big Data (Wolfert et al., 2017).....	35

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1: Βασικές τεχνολογίες της ενότητας.....	22
Πίνακας 2.2: Βασικά χαρακτηριστικά της δορυφορικής και της εναέριας τηλεπισκόπησης με UAV	28
Πίνακας 2.3: Ορισμοί των τεχνολογιών έξυπνης γεωργίας που παρουσιάστηκαν στο εν λόγω κεφάλαιο	34
Πίνακας 2.4: Τύποι γεωργικών δεδομένων και μέθοδοι/εργαλεία συλλογής.....	36
Πίνακας 4.1:Βαθμολογίες εμπιστοσύνης σε πηγές δεδομένων	64
Πίνακας 4.2: Λογική Εφαρμογής Διαστάσεων	68
Πίνακας 4.3: Κατηγοριοποίηση Αξιοπιστίας.....	68
Πίνακας 5.1: Παράμετροι και πηγές για το πλαίσιο προσομοίωσης.....	74
Πίνακας 5.2: Απαιτούμενα πεδία δεδομένων για το Παράδειγμα 1	75
Πίνακας 5.3: Ανάλυση διαστάσεων και υπολογισμός DRI για το Παράδειγμα 1	77
Πίνακας 5.4: Απαιτούμενα πεδία δεδομένων για το Παράδειγμα 2	79
Πίνακας 5.5: Ανάλυση διαστάσεων και υπολογισμός DRI για το Παράδειγμα 2	81
Πίνακας 5.6: Απαιτούμενα πεδία και βάρη για το Παράδειγμα 3	83
Πίνακας 5.7: Ανάλυση διαστάσεων για το Παράδειγμα 3.....	83
Πίνακας 5.8: Έλεγχος ευαισθησίας του πλαισίου	85
Πίνακας 6.1: Πίνακας 6.1: Συγκριτική θέση του πλαισίου DRI σε σχέση με τα υφιστάμενα πρότυπα.....	89

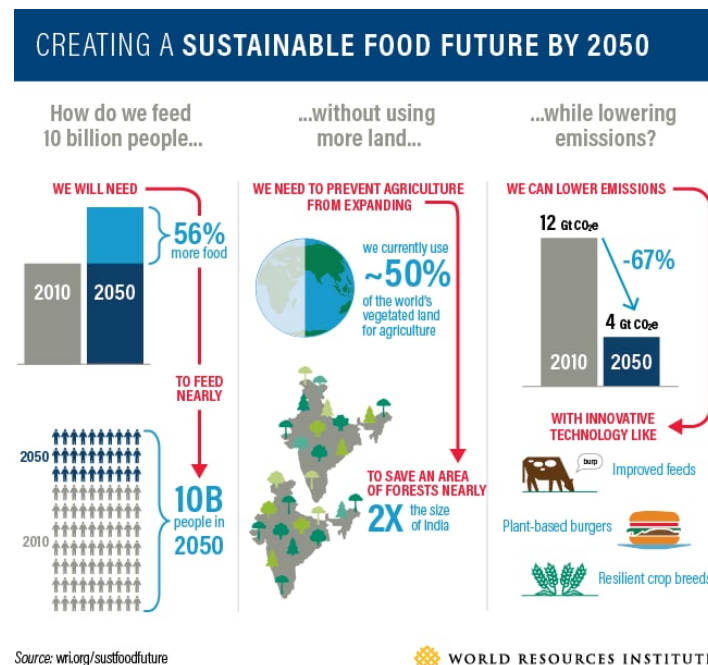
Συντομογραφίες

AI	Artificial Intelligence
API	Application Programming Interface
CAP	Common Agricultural Policy
DRI	Data Reliability Index
DSR	Design Science Research
ESG	Environmental, Social, and Governance
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, Reusable
FAO	Food and Agriculture Organization
FCSM	Federal Committee on Statistical Methodology
FMIS	Farm Management Information System
GHG	Greenhouse Gas
GIS	Geographic Information System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ISO	International Organization for Standardization
MRV	Monitoring, Reporting and Verification
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
TCFD	Task Force on Climate-related Financial Disclosures
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
USDA	United States Department of Agriculture
VRT	Variable Rate Technology

1. Εισαγωγή

1.1. Η σημασία της γεωργίας στην παγκόσμια και στην ελληνική οικονομία

Η γεωργία αποτελεί εδώ και αιώνες βασικό πυλώνα του ανθρώπινου πολιτισμού. Λειτουργεί τόσο ως πρωταρχική πηγή κάλυψης διατροφικών αναγκών όσο και ως βασική συνιστώσα οικονομικής ανάπτυξης και κοινωνικής σταθερότητας. Ενισχύει την απασχόληση στις αγροτικές περιοχές, επηρεάζει τη δυναμική του διεθνούς εμπορίου, αλληλεπιδρά με τα οικοσυστήματα μέσω της διαχείρισης των φυσικών πόρων και διατηρεί πολιτισμικές πρακτικές και παραδόσεις που συνδέονται με την αγροτική ζωή. Παγκοσμίως, σχεδόν 4 δισεκατομμύρια άνθρωποι εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα από τον αγροτικό τομέα, ενώ το 2023, η γεωργία, η δασοκομία και η αλιεία αντιπροσώπευαν περίπου το 4% του παγκόσμιου ΑΕΠ (World Bank and OECD, 2025),(Davis et al., 2023).



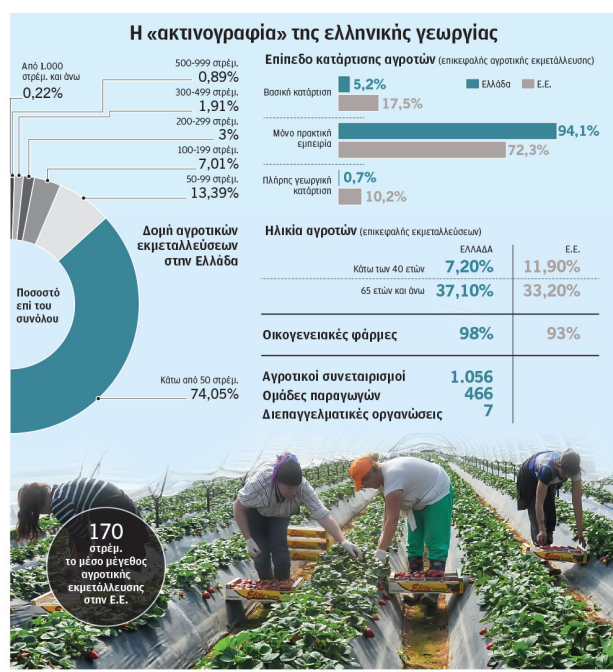
Εικόνα 1.1: Creating a sustainable food future by 2050 (Ranganathan et al., 2018)

Σήμερα, ο γεωργικός τομέας βρίσκεται αντιμέτωπος με μια σειρά από σύνθετες προκλήσεις. Αρχικά, ο παγκόσμιος πληθυσμός προβλέπεται ότι θα ξεπεράσει τους 10 δισεκατομμύρια κατοίκους μέχρι το 2050 (United Nations, 2024), οδηγώντας σε αυξημένη ανάγκη παραγωγής τροφής. Παράλληλα, αναμένεται μείωση της γεωργικής παραγωγής κατά 10% (Wing et al., 2021), αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων κατά 40% (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2024) και μείωση της διαθεσιμότητας νερού εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής. Η απώλεια βιοποικιλότητας και η υποβάθμιση των φυσικών πόρων που επέρχονται των παραπάνω καθιστούν επιτακτική τη μετάβαση σε πιο βιώσιμες αγροδιατροφικές πρακτικές. Σε αυτά τα προβλήματα η τεχνολογία προσφέρει σημαντικές λύσεις, μέσω της γεωργίας ακριβείας, της βιοτεχνολογίας και της ανάλυσης δεδομένων, που έχουν ως

αποτέλεσμα μεγαλύτερη αποδοτικότητα και περιβαλλοντική ισορροπία (Pierpaoli et al., 2013).

Η Γεωργία στην Ελλάδα: Παρόν και Προοπτικές

Η γεωργία στην Ελλάδα έχει βαθιές ιστορικές ρίζες και διατηρεί κρίσιμη σημασία για την εθνική οικονομία και κοινωνική ευημερία. Συμβάλλει περίπου 3% στο ΑΕΠ και απασχολεί σχεδόν το 11% του εργατικού δυναμικού της χώρας (Μακαντάση et al., 2024). Η ελληνική παραγωγή χαρακτηρίζεται από προϊόντα όπως το ελαιόλαδο, τα φρούτα και τα λαχανικά, τα οποία εξυπηρετούν τόσο τις διατροφικές ανάγκες της εσωτερικής αγοράς όσο και τις εξαγωγικές δραστηριότητες της χώρας (Μακαντάση et al., 2024).

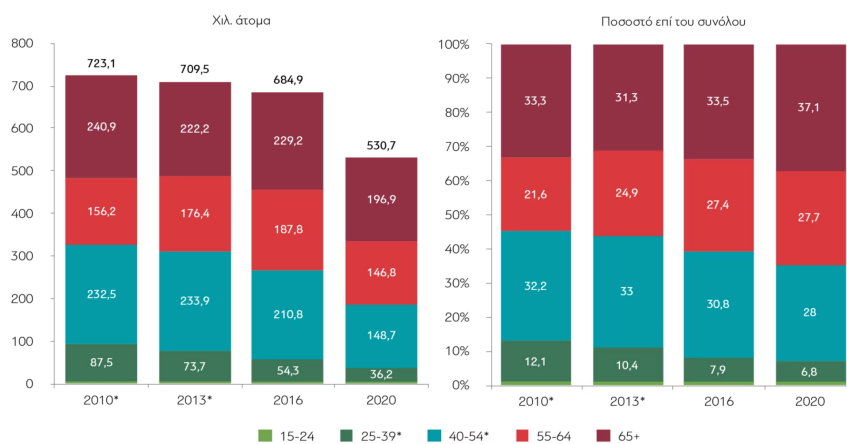


Εικόνα 1.2 Η ακτινογραφία της ελληνικής γεωργίας (Μανιφάβα & Γεωργοπούλου, 2024)

Παρά την πρόοδο της αγροτεχνολογίας σε διεθνές επίπεδο, η Ελλάδα υστερεί σημαντικά στην ενσωμάτωση ψηφιακών και καινοτόμων λύσεων στον πρωτογενή τομέα (Πιαρίδης, 2020). Η περιορισμένη υιοθέτηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας, αυτοματισμού και ανάλυσης δεδομένων υπονομεύει την ανταγωνιστικότητα και την αποδοτικότητα της παραγωγής (OECD 2023, FAO 2022).

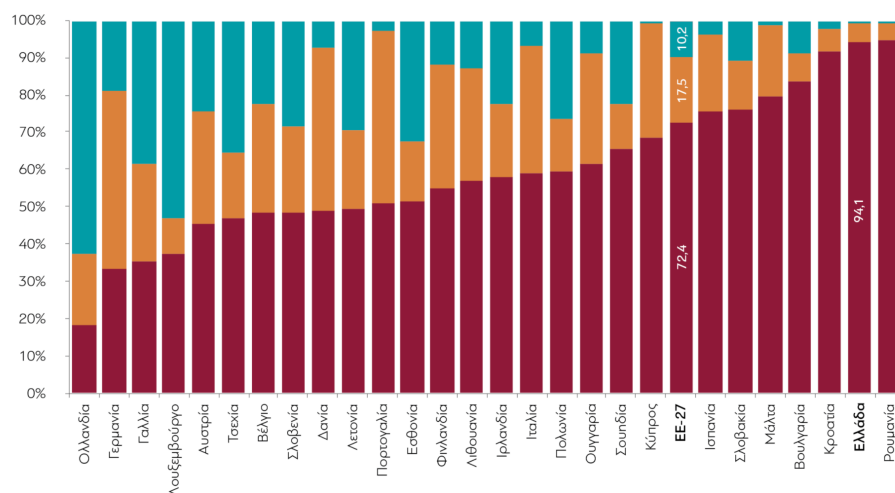
Ενδεικτικά, από τους περίπου 700.000 Έλληνες αγρότες (European Commission, 2024a):

- Μόλις το 6% είναι κάτω των 35 ετών (Staboulis et al., 2022).



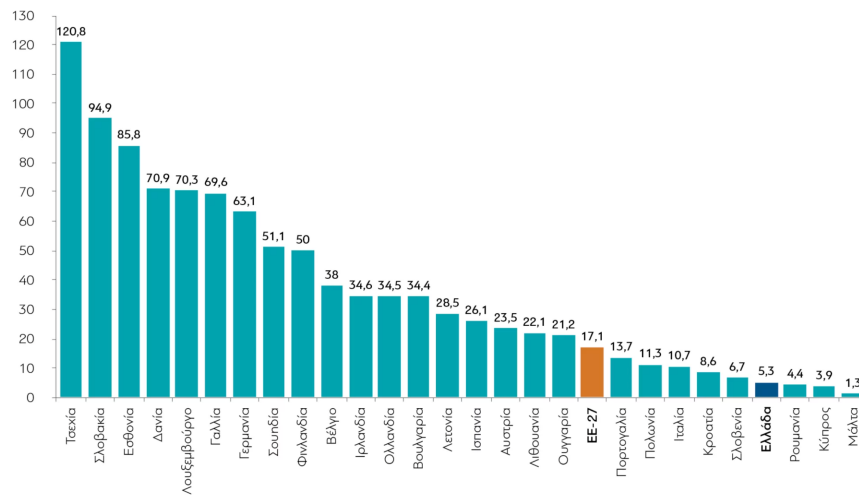
Εικόνα 1.3 Διαχειριστές αγροτικών εκμεταλλεύσεων στην Ελλάδα ανά ηλικία (Μακαντάση et al., 2024)

- Λιγότερο από το 30% έχουν ολοκληρώσει βασική εκπαίδευση (Πιαρίδης, 2020).

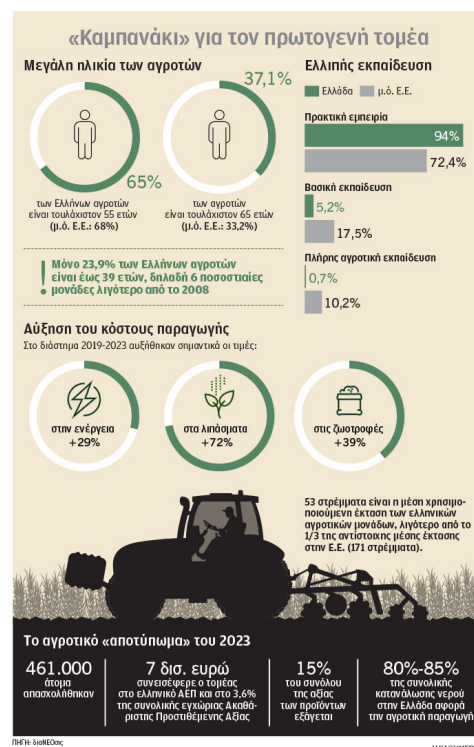


Εικόνα 1.4: Τεχνική εκπαίδευση διαχειριστών αγροτικών εκμεταλλεύσεων το 2020 στην ΕΕ (Μακαντάση et al., 2024)

- Κάτω από το 10% έχουν υιοθετήσει μεθόδους σύγχρονης γεωργίας (ypaithros.gr, 2024).
- Το 88% των γεωργικών εκμεταλλεύσεων είναι μικρότερο των 100 στρεμμάτων (eKathimerini, 2024), (AGRICORE project, 2023).



Εικόνα 1.5 Μέση έκταση ανά αγροτική εκμετάλλευση το 2020 στην ΕΕ (Μακαντάση et al., 2024)



Εικόνα 1.6: Πρωτογενής τομέας στην Ελλάδα (Λιάλιος, 2024)

Ο βιώσιμος μετασχηματισμός του γεωργικού τομέα απαιτεί στοχευμένες επενδύσεις στην έρευνα και την καινοτομία, βελτίωση της πρόσβασης σε χρηματοδοτικά εργαλεία και ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ αγροτών, της επιστημονικής κοινότητας και του ιδιωτικού τομέα. Καθώς η γεωργία βρίσκεται σε ένα κρίσιμο σταυροδρόμι, καλείται να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις μιας εποχής ραγδαίων αλλαγών. Η ενεργοποίηση του ανθρώπινου δυναμικού, η αξιοποίηση των ευρωπαϊκών πολιτικών και, κυρίως, η υιοθέτηση ψηφιακών τεχνολογιών συνιστούν βασικά σημεία αυτής της μετάβασης. Η ψηφιακή γεωργία δεν αποτελεί απλώς μια καινοτομία, αλλά ένα καθοριστικό βήμα για ένα πιο αποδοτικό, ανθεκτικό και βιώσιμο αγροδιατροφικό σύστημα.

Η άνοδος της ψηφιακής γεωργίας

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η γεωργία, ένας από τους θεμέλιους λίθους του ανθρώπινου πολιτισμού, βρίσκεται σήμερα σε φάση ταχύτατου μετασχηματισμού, χάρη στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών. Η αύξηση του πληθυσμού και η κλιματική αλλαγή έχουν αυξήσει την ανάγκη για πιο αποδοτικές, βιώσιμες και ανθεκτικές γεωργικές πρακτικές (Monteiro et al., 2021). Αυτή η πίεση έχει επιταχύνει την μετάβαση στην ψηφιακή γεωργία, μιας ποικιλίας τεχνολογικών μεθόδων που συνδυάζουν το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), τα δίκτυα αισθητήρων, την τηλεπισκόπηση και την ανάλυση δεδομένων, με στόχο την πιο έξυπνη, ευέλικτη και περιβαλλοντικά και κοινωνικά βιώσιμη παραγωγή (Ayaz et al., 2019).

Στον πυρήνα της ψηφιακής γεωργίας βρίσκεται το IoT, το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ έξυπνων συσκευών, αισθητήρων και γεωργικού εξοπλισμού. Τα διασυνδεδεμένα αυτά συστήματα καθιστούν δυνατή τη συνεχή παρακολούθηση κρίσιμων περιβαλλοντικών μεταβλητών όπως είναι η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα (Dhanaraju et al., 2022). Καθοριστικό ρόλο στην παραπάνω διαδικασία διαδραματίζουν οι αισθητήρες, οι οποίοι αποτελούν το βασικό μέσο συλλογής αγροτικών δεδομένων.

Συσκευές όπως οι αισθητήρες εδάφους, οι μετεωρολογικοί σταθμοί και τα drones με κάμερες υψηλής ανάλυσης συλλέγουν πολύτιμες πληροφορίες απευθείας από το πεδίο, ενώ δορυφορικά συστήματα με πολυφασματική απεικόνιση μπορούν να ανιχνεύσουν εγκαίρως σημάδια καταπόνησης των καλλιεργειών, επιθέσεις από έντομα ή ανεπάρκεια θρεπτικών συστατικών (Inoue, 2020). Οι παραπάνω πληροφορίες επιτρέπουν στους παραγωγούς να έχουν πλήρη γνώση της κατάστασης των καλλιεργειών τους και να προσαρμόσουν την άρδευση, τη λίπανση και τη χρήση φυτοπροστατευτικών μέσων, συμβάλλοντας τόσο στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όσο και στον περιορισμό του κόστους παραγωγής.

Η πραγματική δύναμη της ψηφιακής γεωργίας, ωστόσο, αναδεικνύεται μέσα από την αξιοποίηση των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί μέσω των παραπάνω τεχνολογιών. Τα δεδομένα αυτά συνδυάζονται με διάφορα καιρικά μοντέλα και ιστορικά στοιχεία και ύστερα επεξεργάζονται μέσω προηγμένων μεθόδων ανάλυσης, για να αξιολογήσουν την τρέχουσα κατάσταση των καλλιεργειών, να προβλέψουν μελλοντικές συνθήκες και να καθοδηγήσουν την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων (Tantalaki et al., 2019). Οι εφαρμογές αυτές βελτιώνουν σημαντικές δραστηριότητες, όπως ο προγραμματισμός της φύτευσης και η φυτοπροστασία (Chergui & Kechadi, 2022), ενώ η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης έρχεται να επιτρέψει στα συστήματα να «μαθαίνουν» από προηγούμενα αποτελέσματα και να παρέχουν ολοένα και πιο ακριβείς και αποτελεσματικές λύσεις (Gardezi et al., 2024). Όσο πιο «έξυπνες» γίνονται οι γεωργικές εκμεταλλεύσεις, τόσο πιο ουσιαστική γίνεται και η συμβολή τους στους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης.

Η επίδραση της ψηφιακής γεωργίας, δεν περιορίζεται μόνο στην παραγωγή της κάθε καλλιέργειας. Οι σύγχρονες αγροτικές πρακτικές διαμορφώνουν ένα νέο πλαίσιο βιώσιμης διαχείρισης φυσικών πόρων, μειώνουν τη σπατάλη και ενισχύουν την προσαρμογή των διατροφικών συστημάτων στις αυξανόμενες σε συχνότητα και ένταση κλιματικές μεταβολές.

Παράλληλα, ενισχύουν τη διαφάνεια στις εφοδιαστικές αλυσίδες, καθώς και την ιχνηλασιμότητα, κρίσιμα στοιχεία για την επισιτιστική ασφάλεια και την εφαρμογή των αρχών Περιβαλλοντικής, Κοινωνικής και Εταιρικής Διακυβέρνησης (ESG) (Torky & Hassanein, 2020); (Finger et al., 2019). Έτσι, η ενσωμάτωση των παραπάνω τεχνολογιών στις σύγχρονες γεωργικές πρακτικές συμβάλλει καθοριστικά στη διαμόρφωση ενός πιο υπεύθυνου και βιώσιμου αγροδιατροφικού συστήματος.

1.2. Πρόβλημα

Η ψηφιακή γεωργία έχει μεταμορφώσει τον αγροδιατροφικό τομέα τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, όπως σε κάθε περίπτωση μετάβασης σε νέες πρακτικές, συνοδεύεται και από σημαντικές προκλήσεις. Μία από τις πιο έντονες στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το ψηφιακό χάσμα, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες περιοχές, όπου η έλλειψη υποδομών, το υψηλό κόστος και οι περιορισμένες ψηφιακές δεξιότητες δυσχεραίνουν την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών (Lowenberg-DeBoer, 2022). Ειδικότερα, πολλοί μικροκαλλιεργητές είναι συχνά αποκλεισμένοι από την αξιοποίηση των δυνατοτήτων της ψηφιακής εποχής, καθώς στερούνται των απαιτούμενων πόρων και της απαραίτητης υποστήριξης.

Μια εξίσου κρίσιμη πρόκληση στη μετάβαση προς την ψηφιακή γεωργία είναι η ορθή διαχείριση και η αξιοπιστία των γεωργικών δεδομένων. Η ευρεία χρήση ψηφιακών εργαλείων έχει οδηγήσει σε εκρηκτική αύξηση του όγκου των παραγόμενων δεδομένων. Παρ' όλα αυτά, η ανάπτυξη αυτή δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη πρόοδο σε επίπεδο ποιότητας και προσβασιμότητας. Τα γεωργικά δεδομένα είναι συχνά κατακερματισμένα, συλλέγονται με πρόχειρο και ασυντόνιστο τρόπο και δεν ακολουθούν ενιαία πρότυπα και διαδικασίες διασφάλισης ποιότητας (Kamilaris et al., 2017). Ουσιαστικά, η απουσία ενός κοινού πλαισίου καταγραφής, αποθήκευσης και κοινοποίησης δεδομένων δυσχεραίνει την αποτελεσματική αξιοποίησή τους σε όλη την αγροδιατροφική αλυσίδα.

Η αξιοπιστία των δεδομένων είναι βασική προϋπόθεση για τη λήψη σωστών και τεκμηριωμένων αποφάσεων. Για τους παραγωγούς, η ύπαρξη αξιόπιστων και ακριβών δεδομένων μεταφράζεται σε αύξηση εσόδων, πιο αποδοτικές γεωργικές πρακτικές, και καλύτερη προετοιμασία απέναντι σε κινδύνους, όπως είναι οι ακραίες καιρικές συνθήκες ή οι ασθένειες των φυτών. Δεδομένα χαμηλής ποιότητας μπορεί να οδηγήσουν σε λάθος παρεμβάσεις, σπατάλη πόρων και μείωση της παραγωγικότητας. Επίσης, για αγρότες που προσβλέπουν σε χρηματοδότηση ή συμμετοχή σε αναπτυξιακά και ενισχυτικά προγράμματα, η χρήση δομημένων και αξιόπιστων δεδομένων αυξάνει τις πιθανότητες έγκρισης, καθώς επιβεβαιώνει την ύπαρξη ενός βιώσιμου και τεκμηριωμένου επιχειρηματικού πλάνου.

Αντίστοιχα, οι επενδυτές βασίζονται σε ποιοτικά δεδομένα για να αξιολογήσουν ρίσκα και την απόδοση μιας καλλιέργειας, και ειδικά στις περιπτώσεις αξιολογήσεων ESG. Η έλλειψη εμπιστοσύνης στην ακρίβεια των δεδομένων αυξάνει τον επενδυτικό κίνδυνο και μπορεί να οδηγήσει σε κακή κατανομή κεφαλαίου ή σε υπερβολικούς ισχυρισμούς περί βιωσιμότητας (OECD, 2020). Χωρίς ένα ξεκάθαρο και συνεπές πλαίσιο αξιολόγησης της ποιότητας των

δεδομένων, οι αξιολογήσεις βιωσιμότητας και κοινωνικής υπευθυνότητας κινδυνεύουν να είναι μεροληπτικές ή και παραπλανητικές.

Τέλος, οι φορείς χάραξης πολιτικής και οι ρυθμιστικές αρχές χρειάζονται αξιόπιστα δεδομένα για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση περιβαλλοντικών και αγροτικών πολιτικών. Όταν αυτά είναι ελλιπή ή αδόμητα, υπάρχει κίνδυνος λήψης αποφάσεων που δεν ανταποκρίνονται σε πραγματικές προκλήσεις και ανάγκες.

Συνεπώς, η αξιοπιστία των γεωργικών δεδομένων δεν αποτελεί μόνο τεχνικό ζητούμενο, αλλά βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία ενός ψηφιοποιημένου, βιώσιμου, κοινωνικά υπεύθυνου και διαφανούς αγροδιατροφικού συστήματος. Ενώ η επιστημονική βιβλιογραφία αναγνωρίζει τις δυνατότητες της ψηφιακής γεωργίας για τη βελτίωση της παραγωγικότητας και της βιωσιμότητας, συχνά αγνοεί τη σημασία της αξιοπιστίας των δεδομένων ως προϋπόθεση για ουσιαστική πρόοδο. Η απουσία μηχανισμών ποσοτικής αξιολόγησης αξιοπιστίας περιορίζει τη δυνατότητα διαφανούς λήψης αποφάσεων, την αξιοπιστία εργαλείων χρηματοδότησης, και τη σύνδεση γεωργικών πρακτικών με κανονιστικές απαιτήσεις ή αγορές βιωσιμότητας.

Έτσι, η ανάγκη για την ανάπτυξη ενός ενιαίου και τυποποιημένου πλαισίου αξιολόγησης αξιοπιστίας γεωργικών δεδομένων, βασισμένου σε σαφή και αντικειμενικά κριτήρια, όπως η ακρίβεια, η πληρότητα, η συνέπεια, η επικαιρότητα και η κρισιμότητα ως προς την εκάστοτε απόφαση, είναι σήμερα πιο επιτακτική από ποτέ (van der Burg et al., 2019).

1.3. Στόχοι και σημασία της εργασίας

Η παρούσα εργασία εστιάζει σε ένα κρίσιμο και έως σήμερα υποτιμημένο ζήτημα της ψηφιακής γεωργίας: την απουσία ενός δομημένου και προσαρμοσμένου στο εκάστοτε πλαίσιο χρήσης μεθοδολογικού πλαισίου για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των γεωργικών δεδομένων. Όλο και περισσότερες αποφάσεις και εφαρμογές, όπως η αγροτική χρηματοδότηση, οι απολογισμοί βιωσιμότητας, η παρακολούθηση ρίσκου και η αξιολόγηση κανονιστικής συμμόρφωσης βασίζονται στα εν λόγω δεδομένα, πράγμα που αυξάνει την ανάγκη για αξιοπιστία και ποιότητα. Παρά τη σημαντική πρόοδο στην αυτοματοποίηση της συλλογής δεδομένων μέσω αισθητήρων, συστημάτων γεωργικού λογισμικού και τεχνολογιών τηλεπισκόπησης, ελάχιστα συστήματα προσφέρουν διαφανείς και μετρήσιμους τρόπους για να αξιολογηθεί κατά πόσο τα δεδομένα είναι αξιόπιστα για τη στήριξη αποφάσεων υψηλής σημασίας.

Προκειμένου να καλυφθεί το παραπάνω κενό, στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται και αξιολογείται ένας Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (Data Reliability Index - DRI), ένα πλαίσιο ποσοτικής αξιολόγησης της αξιοπιστίας γεωργικών δεδομένων σε συγκεκριμένα σενάρια λήψης αποφάσεων. Ο DRI συνδυάζει πέντε βασικές διαστάσεις αξιοπιστίας (Όγκος, Συχνότητα, Ποικιλία, Ποιότητα & Εμπιστευτικότητα Πηγής) με επιμέρους συντελεστές βαρύτητας ανάλογα με τη χρήση (διάσταση κρισιμότητας), ενσωματώνοντας προσαρμοστική λογική ώστε να ανταποκρίνεται σε διαφορετικά είδη δεδομένων και περιπτώσεις χρήσης.

Παράγει διαφανείς, ερμηνεύσιμους και τεκμηριωμένους δείκτες αξιοπιστίας που λαμβάνουν υπόψη τόσο τα εγγενή χαρακτηριστικά των δεδομένων όσο και τη σημασία τους για κάθε συγκεκριμένη απόφαση.

Ερευνητικά ερωτήματα και στόχοι

Το κύριο ερευνητικό ερώτημα είναι το πώς μπορεί η αξιοπιστία γεωργικών δεδομένων να αξιολογηθεί και να ποσοτικοποιηθεί συστηματικά, ώστε να υποστηρίξει αποφάσεις υψηλής σημασίας στους τομείς της χρηματοδότησης, της παρακολούθησης κινδύνων και της κανονιστικής συμμόρφωσης.

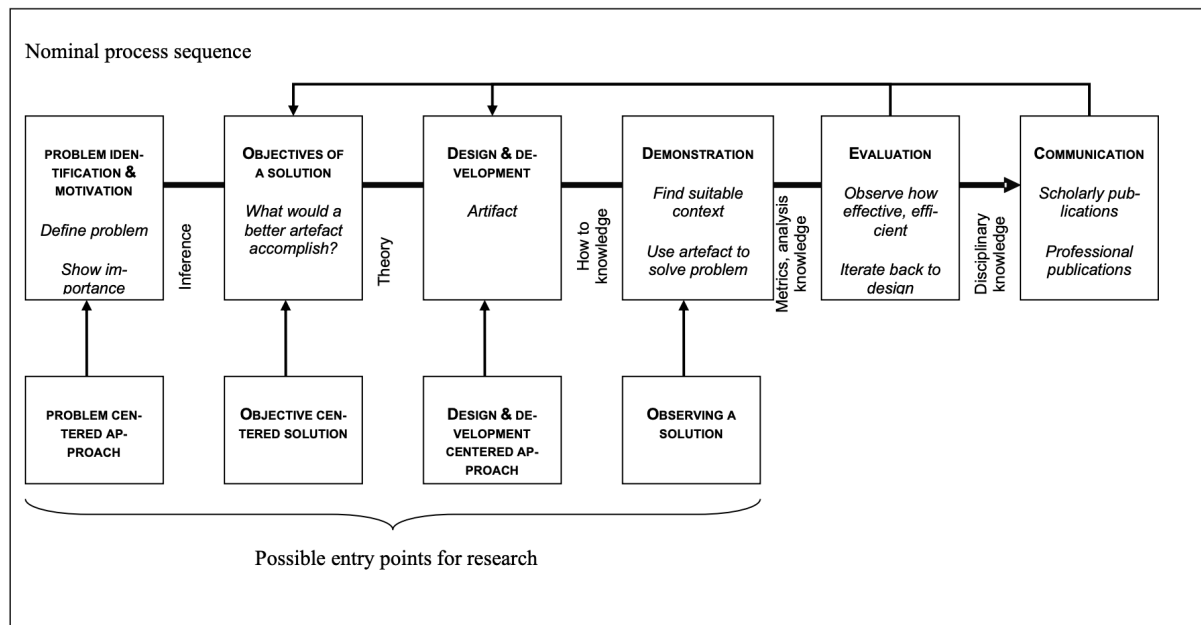
Κύριοι στόχοι της έρευνας:

- Η ανάπτυξη ενός πλαισίου αξιολόγησης που να αντανακλά την πολυπλοκότητα και την ετερογένεια των γεωργικών δεδομένων.
- Η δημιουργία μιας αρθρωτής, ποσοτικής μεθοδολογίας βαθμολόγησης που να συνδυάζει τεχνική ποιότητα με τη σημασία της κάθε περίπτωσης χρήσης.
- Η επίδειξη της πρακτικής εφαρμογής, της ανθεκτικότητας και της χρησιμότητας του πλαισίου σε ρεαλιστικά σενάρια (π.χ. Αξιολόγηση πιστοληπτικής ικανότητας και βιωσιμότητας, πρόσβαση σε Carbon Market, real time παρακολούθηση καλλιεργειών και μείωση του πιστωτικού κινδύνου).
- Η αξιολόγηση της εσωτερικής συνέπειας και της σταθερότητας των ταξινομήσεων του DRI υπό συνθήκες υποβάθμισης ή μεταβολής των δεδομένων.

Ακαδημαϊκή συνεισφορά και μεθοδολογική προσέγγιση

Η εργασία προσφέρει, τόσο θεωρητική, όσο και πρακτική συμβολή στον τομέα της επιστήμης δεδομένων στην ψηφιακή γεωργία. Σε θεωρητικό επίπεδο, προτείνει ένα νέο πλαίσιο που αντιμετωπίζει την αξιοπιστία των δεδομένων όχι ως μια στατική, τεχνική ιδιότητα, αλλά ως μια έννοια εξαρτώμενη από την εκάστοτε χρήση των δεδομένων. Το ίδιο σύνολο δεδομένων μπορεί να είναι επαρκές για μακροπρόθεσμο σχεδιασμό αλλά ακατάλληλο για άμεσες, κρίσιμες αποφάσεις. Πρακτικά, το πλαίσιο προσφέρει σαφή κριτήρια και αριθμητικούς δείκτες για τη στοχευμένη αξιολόγηση των γεωργικών δεδομένων.

Η μεθοδολογία ακολουθεί τις αρχές της Design Science Research (DSR), μιας προσέγγισης που δίνει έμφαση στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση μεθόδων, μοντέλων και εργαλείων με πρακτικό αντίκρισμα (Hevner et al., 2004); (Peppers et al., 2012). Ο Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων αποτελεί ένα τέτοιο ερευνητικό «τεχνούργημα» (artifact), δηλαδή ένα δομημένο εργαλείο σχεδιασμένο να καλύψει μια υπαρκτή ανάγκη του αγροδιατροφικού τομέα για αξιολόγηση της αξιοπιστίας δεδομένων σε χρηματοοικονομικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές.



Εικόνα 1.7: Design Science Research Process (Peppers et al., 2020)

Σύμφωνα με τις βέλτιστες πρακτικές της DSR, ο δείκτης αξιολογείται εκ των προτέρων (ex ante) μέσα από προσομοιωμένα αλλά ρεαλιστικά σενάρια, ώστε να εξεταστεί η λογική, η δομή και η χρησιμότητά του πριν την πλήρη πρακτική εφαρμογή του (Gregor & Hevner, 2013); (Sonnenberg & vom Brocke, 2012). Η χρήση επιμελημένων ψευδοδεδομένων θεωρείται αποδεκτή προσέγγιση στο πλαίσιο ερευνητικών εργασιών πρώιμου σταδίου, και ευθυγραμμίζεται με τις διεθνείς επιστημονικές οδηγίες για την εφαρμογή του DSR (Hevner & Chatterjee, 2010).

Δομή της εργασίας

Στο κεφάλαιο 1 εισάχθηκε το γενικό θέμα της εργασίας, ενώ το Κεφάλαιο 2 παραθέτει το θεωρητικό και τεχνικό υπόβαθρο αυτής. Το Κεφάλαιο 3 αναλύει την υπάρχουσα βιβλιογραφία για την ποιότητα δεδομένων, τα πλαίσια αξιολόγησης αξιοπιστίας και τις προκλήσεις της διαχείρισης δεδομένων στην ψηφιακή γεωργία. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται αναλυτικά το προτεινόμενο πλαίσιο DRI, ενώ στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα δοκιμαστικά σενάρια εφαρμογής και εξετάζεται η ελαστικότητα του πλαισίου. Το Κεφάλαιο 6 αξιολογεί τα αποτελέσματα του πέμπτου κεφαλαίου, παραθέτει τους περιορισμούς της μεθοδολογίας και προτείνει τα επόμενα βήματα για την εφαρμογή του πλαισίου και περαιτέρω έρευνα.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Το εν λόγω κεφάλαιο παρουσιάζει τις βασικές έννοιες και το τεχνικό υπόβαθρο που απαιτούνται για την κατανόηση των επόμενων κεφαλαίων. Εξετάζει αρχικά την εξέλιξη της γεωργίας από την αρχή της έως την ψηφιακή εποχή, τις κύριες τεχνολογίες που υποστηρίζουν την ψηφιακή γεωργία, τους τύπους και τα χαρακτηριστικά των γεωργικών δεδομένων, καθώς δίνεται και μια εισαγωγική περιγραφή της αξιοπιστίας των δεδομένων.

2.1. Εξέλιξη της γεωργίας και σύγχρονες προκλήσεις

2.1.1. Ιστορική Αναδρομή

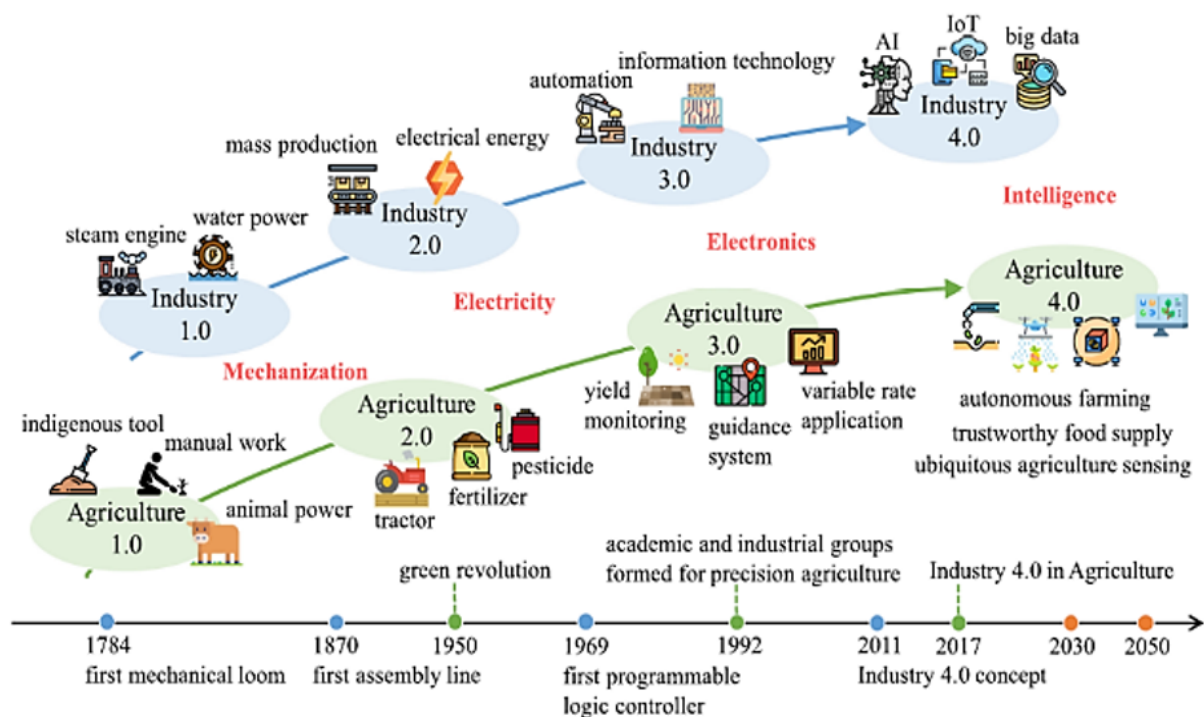
Πριν από περίπου 12.000 χρόνια, κατά τη διάρκεια της Πρώτης Γεωργικής Επανάστασης, ο άνθρωπος προχώρησε από τη νομαδική κυνηγετική και συλλεκτική δραστηριότητα στην ανάπτυξη αγροτικών κοινοτήτων μέσω της εξημέρωσης των φυτών και των ζώων (Mellaby et al., 2025). Χάρη σε αυτή τη μετάβαση αυξήθηκε ο πληθυσμός, δημιουργήθηκαν μόνιμοι οικισμοί και συγκροτήθηκαν σύνθετες κοινωνίες, που έθεσαν τα θεμέλια για τους επόμενους πολιτισμούς (Carey, 2023).

Η γεωργία εξελίχθηκε ακόμη περισσότερο το διάστημα από τον 16ο έως τις αρχές του 19ου αιώνα κατά τη Δεύτερη Γεωργική Επανάσταση, η οποία σηματοδοτήθηκε από καινοτομίες όπως η περίφραξη των κτημάτων, η αμειψισπορά, η επιλεκτική αναπαραγωγή και νέες τεχνολογίες καλλιέργειας, όπως η σπαρτική και η αλωνιστική μηχανή. Αυτές οι εξελίξεις ενίσχυσαν θεαματικά την παραγωγικότητα, γεγονός που προώθησε την βιομηχανοποίηση και την αστικοποίηση (Overton, 1996). Ωστόσο, η ίδια επανάσταση οδήγησε και σε σημαντικές κοινωνικές μετατοπίσεις, διεύρυνση των ανισοτήτων και σημαντική περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Στα μέσα του 20ου αιώνα ξεκίνησε η Πράσινη Επανάσταση, μια άλλη κομβική περίοδος στην ιστορία της γεωργίας, με την εισαγωγή ποικιλιών καλλιεργειών υψηλής απόδοσης, χημικών λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και προηγμένων μεθόδων άρδευσης (Pereira, 2025). Οι εξελίξεις αυτές αύξησαν σημαντικά την παραγωγή τροφίμων, αμβλύνοντας την εκτεταμένη πείνα, ιδίως σε αναπτυσσόμενες περιοχές όπως η Ασία και η Λατινική Αμερική (Briggs, 2009). Παρ' όλα αυτά, η επανάσταση αυτή είχε ακούσιες οικολογικές και κοινωνικές συνέπειες, όπως εδαφολογική υποβάθμιση, ρύπανση των υδάτων και αύξηση των κοινωνικών ανισοτήτων, καθώς οι μικροκαλλιεργητές αγωνίζονταν να ανταγωνιστούν τις μεγαλύτερες, τεχνολογικά εξελιγμένες επιχειρήσεις.

Σήμερα, η γεωργία βρίσκεται σε έναν ακόμη βαθύ μετασχηματισμό, γνωστό ως Γεωργία 4.0, με κύρια χαρακτηριστικά την ψηφιοποίηση, την αυτοματοποίηση και την εφαρμογή πρακτικών που βασίζονται σε δεδομένα (Y. Liu et al., 2021). Οι σύγχρονες τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων IoT, της τηλεπισκόπησης, της τεχνητής νοημοσύνης, των drones και της ρομποτικής (European Investment Bank, 2022),

διευκολύνουν τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων, την ενίσχυση της παραγωγικότητας, την αντιμετώπιση σημαντικών προκλήσεων όσον αφορά τη βιωσιμότητα, και την παρακολούθηση των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλοντας έτσι κάλυψη των αναγκών του συνεχώς αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού (Dayioğlu & Turker, 2021).



Εικόνα 2.1: Η εξελικτική πορεία της αγροτικής επανάστασης από τη Γεωργία 1.0 στη Γεωργία 4.0 (Gyamfi & Yakubu, 2024)

2.1.2. Σύγχρονες προκλήσεις

Περιβαλλοντικές και οικολογικές πιέσεις

Υπερβόσκηση και αποψίλωση των εδαφών: Η υπερβολική πυκνότητα του ζωικού κεφαλαίου στους βοσκότοπους αποτελεί σημαντική αιτία διάβρωσης και συρρίκνωσης του εδάφους καθώς και απώλειας της αυτοφυούς βλάστησης (Stavi et al., 2020). Οι παραπάνω παθογένειες παρεμποδίζουν τη φυσική αναγέννηση της χλωρίδας, ελαττώνουν τη γονιμότητα του εδάφους και συμβάλλουν στη μείωση της βιοποικιλότητας (Conant et al., 2017). Όπως αναμένεται, στις περιοχές με περισσότερη ξηρασία, όπου η βλάστηση είναι ήδη περιορισμένη, η υπερβόσκηση μπορεί να προκαλέσει εξαιρετικά σοβαρές απώλειες (Schlecht et al., 2020). Προκειμένου, λοιπόν, να αποκατασταθεί η υγεία των οικοσυστημάτων και να διατηρηθεί μακροπρόθεσμα η γεωργική παραγωγικότητα, πρέπει να εφαρμόζονται βιώσιμες πρακτικές εδαφολογικής διαχείρισης. Σε αυτές περιλαμβάνονται η εκ περιτροπής βοσκή, ο καθορισμός προστατευόμενων περιοχών για την εκτροφή των ζώων και η προώθηση της αναβλάστησης (Bailey et al., 2019; Maestre et al., 2022).

Ερημοποίηση: Η ερημοποίηση αναφέρεται στη διαδικασία όπου η εύφορη γη μετατρέπεται σε άνυδρο, μη παραγωγικό έδαφος (Cordovil et al., 2020). Είναι αποτέλεσμα συνδυασμού

παραγόντων, όπως η κλιματική αλλαγή, οι μη βιώσιμες πρακτικές εκμετάλλευσης της γης, η υπερβόσκηση, η υπέρμετρη χρήση φυτοφαρμάκων και λιπασμάτων και η αποψίλωση των δασών (Chalise et al., 2019; L. Zhang et al., 2022). Η αλλοίωση της δομής του εδάφους και η εξάντληση της δυνατότητας συγκράτησης υγρασίας μειώνουν την καλλιεργήσιμη γη, θέτουν σε κίνδυνο την επισιτιστική ασφάλεια και εκτοπίζουν ευάλωτους πληθυσμούς (Lal, 2012).

Εδαφική αλάτωση: Η αλάτωση του εδάφους αποτελεί σοβαρή απειλή, ιδιαίτερα σε περιοχές που βασίζονται στην άρδευση (Cuevas et al., 2019). Προκαλείται από τη συσσώρευση υδατοδιαλυτών αλάτων, όπως χλωριούχα, θειικά και βορικά άλατα ασβεστίου, νατρίου και μαγνησίου, τόσο στα επιφανειακά όσο και στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Τα άλατα αυτά μπορεί να προέρχονται από τη φυσική αποσάθρωση πετρωμάτων, από τα αρδευτικά νερά, τα λιπάσματα ή ακόμα και από την επίδραση της θάλασσας σε παραθαλάσσιες περιοχές. Η συσσώρευση αλάτων γύρω από τις ρίζες των φυτών εμποδίζει την ανάπτυξή τους και άρα μειώνει την απόδοση της καλλιέργειας, ενώ ενδέχεται να καταστήσει το έδαφος ακατάλληλο για περαιτέρω φύτευση (Billib et al., 2009; Mukhopadhyay et al., 2021). Μεταξύ των στρατηγικών μετριασμού συγκαταλέγονται η άρδευση ακριβείας, η υιοθέτηση ποικιλιών καλλιεργειών που αντέχουν στα άλατα και οι τεχνικές εδαφικής απόπλυσης (Tarolli et al., 2024).

Περιβάλλον και Κλίμα: Τα γεωργικά συστήματα γίνονται όλο και πιο ευάλωτα απέναντι σε περιβαλλοντικές πιέσεις, όπως είναι τα ακραία καιρικά φαινόμενα, οι έντονες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και οι ασταθείς βροχοπτώσεις. Οι συνθήκες αυτές επηρεάζουν το πότε οι αγρότες μπορούν να φυτέψουν, τη συμπεριφορά των παρασίτων, και επομένως και το κατά πόσο οι καλλιέργειες μπορούν να αναπτυχθούν με επιτυχία (Loboguerrero et al., 2019). Ως αποτέλεσμα, η παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια κινδυνεύει (Hassan et al., 2025; Panchasara et al., 2021). Για να αντιμετωπιστούν οι μεταβολές αυτές χρειάζονται πρακτικές έξυπνης γεωργίας, τις οποίες θα δούμε στο παρακάτω υποκεφάλαιο.

Τεχνολογικές και εμπορικές προκλήσεις

Χρήση φυτοφαρμάκων και συνέπειες στο περιβάλλον: Η συμβατική γεωργία εξαρτάται συνήθως σε μεγάλο βαθμό από τα χημικά φυτοφάρμακα, τα οποία μπορούν να βλάψουν τόσο το φυσικό περιβάλλον όσο και την ανθρώπινη υγεία (Rani et al., 2021; Udeigwe et al., 2015). Όταν τα φυτοφάρμακα παρασύρονται από τα χωράφια, μολύνουν το έδαφος και το νερό. Μπορούν επίσης να βλάψουν τους επικονιαστές όπως τις μέλισσες και να επηρεάσουν τα ωφέλιμα μικρόβια στο έδαφος (Tudi et al., 2021). Τα υπολείμματα φυτοφαρμάκων στις καλλιέργειες ενδέχεται να μην είναι ασφαλή για τους καταναλωτές, και με την πάροδο του χρόνου, τα παρασιτοειδή μπορεί να γίνουν πιο ανθεκτικά, γεγονός που οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη ανάγκη χρήσης φυτοφαρμάκων (Mandal et al., 2020). Για να περιοριστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, οι αγρότες μπορούν να χρησιμοποιήσουν άλλες μεθόδους, όπως η βιολογική γεωργία ώστε να μειωθεί ή χημικών ουσιών και να γίνει η γεωργία πιο φιλική προς το περιβάλλον.

Δυναμική της αγοράς και βιωσιμότητα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων: Οι συνεχείς μεταβολές των αγορών, η αστάθεια στις τιμές των εισροών και οι άνισες αλυσίδες εφοδιασμού επηρεάζουν σημαντικά τα εισοδήματα και τη βιωσιμότητα των αγροτών (Dhillon & Moncur, 2023). Πολλοί μικροκαλλιεργητές δυσκολεύονται να ανταγωνιστούν σε ελεύθερες αγορές που κυριαρχούνται από μεγάλες αγροτοδιατροφικές επιχειρήσεις. Η συγκέντρωση της αγροτικής παραγωγής σε περιορισμένο αριθμό φορέων μειώνει τη διαπραγματευτική δύναμη των παραγωγών και ενισχύει την εξάρτησή τους από εξωτερικές εισροές (Levi et al., 2020). Δημόσιες πολιτικές που προωθούν τη σταθερότητα των τιμών, την πρόσβαση στη χρηματοδότηση και τα συνεταιριστικά μοντέλα θα μπορούσαν να ενισχύσουν την οικονομική ασφάλεια των μικρών τοπικών παραγωγών (Diao et al., 2023).

Κοινωνικοοικονομικές και γεωπολιτικές προκλήσεις

Παγκόσμιο εμπόριο και αγροτικά προϊόντα: Η παγκοσμιοποίηση της αγροτικής παραγωγής και του εμπορίου συνοδεύεται τόσο από ευκαιρίες όσο και από κινδύνους. Η πρόσβαση στις διεθνείς αγορές ενισχύει τα εισοδήματα των παραγωγών και αυξάνει τη διαθεσιμότητα τροφίμων σε εθνικό επίπεδο, ωστόσο, συχνά οδηγεί σε μονοκαλλιέργειες, κατάχρηση εισροών και εξάντληση των διαθέσιμων φυσικών πόρων, όπως αναφέρουν οι (Blank, 2001) και (Kim, 2016). Επιπλέον, η απελευθέρωση του εμπορίου εκθέτει τον αγροτικό τομέα στη διεθνή μεταβλητότητα των τιμών, με δυσανάλογες επιπτώσεις στους μικροκαλλιεργητές, όπως είδαμε και στην προηγούμενη παράγραφο (van Berkum, 2021). Αν και η εστίαση στο συγκριτικό πλεονέκτημα έχει νόημα από οικονομικής άποψης, μπορεί να αποδυναμώσει την ικανότητα μιας χώρας να ελέγχει το διατροφικό της σύστημα και να επιβαρύνει το περιβάλλον στις περιοχές που καλλιεργούν προϊόντα για εξαγωγή (FAO, 2022). Πολιτικές που υποστηρίζουν ποικίλες, οικολογικά ορθές μεθόδους καλλιέργειας και δίκαιο εμπόριο μπορούν να συμβάλουν στην επίτευξη καλύτερης ισορροπίας μεταξύ οικονομικών στόχων και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

Εξαγορές μεγάλων οικοπέδων και επιπτώσεις σε τοπικό επίπεδο: Σε πολλά μέρη του κόσμου, ιδίως στις πιο φτωχές χώρες, μεγάλες εκτάσεις γης αγοράζονται ή μισθώνονται από ξένες κυβερνήσεις και μεγάλες εταιρείες. Σύμφωνα με τους (Balehegn, 2015; Dell'Angelo et al., 2017; Kalabamu & Lyamuya, 2021), οι συμφωνίες αυτές βλάπτουν τις τοπικές κοινότητες, ιδίως τους γηγενείς και τους μικροκαλλιεργητές, καθώς τους στερούν τη γη από την οποία εξαρτώνται για την εξασφάλιση της τροφής και της επιβίωσής τους. Αν και ορισμένα από αυτά τα έργα παρουσιάζονται ως ευκαιρίες ανάπτυξης, συχνά επικεντρώνονται σε εξαγωγικές καλλιέργειες ή στην παραγωγή βιοκαυσίμων και όχι στις τοπικές επισιτιστικές ανάγκες. Για την προστασία των πολιτών και του περιβάλλοντος, είναι σημαντικό να υπάρχουν δίκαιοι νόμοι περί ιδιοκτησίας γης, να απαιτείται η συμμετοχή της κοινωνίας σε τέτοιες αποφάσεις και να εξασφαλίζεται η αειφόρος χρήση γης.

Προκλήσεις στη ισότιμη διανομή τροφίμων: Παρόλο που η παγκόσμια παραγωγή τροφίμων επαρκεί για την κάλυψη της ζήτησης, εκατομμύρια άνθρωποι εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν πείνα και υποσιτισμό (KC et al., 2018). Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό

στην άνιση πρόσβαση σε τρόφιμα και στην χαμηλή αποτελεσματικότητα των συστημάτων διανομής προϊόντων (Béné et al., 2019; Kick et al., 2017). Παράγοντες όπως οι κακές υποδομές, οι απώλειες παραγωγής μετά τη συγκομιδή και οι ανισότητες μεταξύ αστικών και αγροτικών περιοχών συμβάλλουν στη διατήρηση της επισιτιστικής ανασφάλειας, ιδίως σε περιοχές χαμηλού εισοδήματος (Kick et al., 2017; Malav, 2021). Η αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων προϋποθέτει επενδύσεις στα τοπικά συστήματα τροφίμων, στήριξη της πρόσβασης σε θρεπτικά και οικονομικά προσιτά τρόφιμα, καθώς και την ενίσχυση πρωτοβουλιών που διοχετεύουν πλεονάζοντα τρόφιμα σε ευάλωτους πληθυσμούς. Ωστόσο, οι προσπάθειες αυτές συχνά περιορίζονται από θεσμικές αδυναμίες, έλλειψη χρηματοδότησης και ανεπαρκή συντονισμό μεταξύ των επιμέρους φορέων (Evans et al., 2015; Weiler et al., 2015). Η βελτίωση της διατροφικής ισότητας απαιτεί από κοινού δράση των κυβερνήσεων, της κοινωνίας των πολιτών και των ενδιαφερόμενων επιχειρήσεων.

2.2. Ψηφιακή Γεωργία

2.2.1. Αποσαφήνιση Όρων

Ο αγροτικός τομέας ανέκαθεν εξελισσόταν σε συνάρτηση με την πρόοδο της τεχνολογίας, όμως τις τελευταίες δεκαετίες η πρόοδος αυτή έχει επιταχυνθεί ραγδαία. Ως αποτέλεσμα, η γεωργία έχει αυτοματοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό, και έχει στραφεί σε πρακτικές βασισμένες σε δεδομένα, μεταβάλλοντας σημαντικά τον τρόπο που πραγματοποιούνται οι αγροτικές δραστηριότητες. Ο μετασχηματισμός αυτός έχει οδηγήσει σε νέες προσεγγίσεις, όπως η γεωργία ακριβείας, η έξυπνη γεωργία και η ψηφιακή γεωργία. Αν και οι όροι αυτοί χρησιμοποιούνται συχνά ως συνώνυμοι, ο καθένας από αυτούς αναφέρεται σε διαφορετικές έννοιες με διαφορετικούς στόχους, μεθοδολογίες και εφαρμογές. Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να ορίσει με σαφήνεια καθεμία από τις παραπάνω έννοιες, να επισημάνει τις διαφορές τους και να εξηγήσει τη μεταξύ τους σχέση, προκειμένου να γίνει καλύτερα αντιληπτός ο εκάστοτε ρόλος τους στη διαμόρφωση της σύγχρονης γεωργίας.

Γεωργία Ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας είναι μια μέθοδος που διαχειρίζεται τις γεωργικές εισροές, όπως το νερό, τα λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα, πιο στοχευμένα, χρησιμοποιώντας δεδομένα που σχετίζονται με το έδαφος, τις καλλιέργειες και το περιβάλλον (A. Jiang & Ahamed, 2025). Με τη βοήθεια εργαλείων όπως τα κατευθυνόμενα με GPS τρακτέρ, οι εδαφολογικοί χάρτες, τα drones, οι σένσορες και η τεχνολογία μεταβλητού ποσοστού (VRT), οι αγρότες μπορούν να διαχειρίζονται τα διάφορα τμήματα ενός αγροτεμαχίου σύμφωνα με τις ξεχωριστές ανάγκες τους. Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων, στη βελτίωση της απόδοσης των καλλιεργειών και στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της γεωργίας (Gawande et al., 2023). Από τη δεκαετία του 1990, όταν εισήχθησαν τα τρακτέρ με GPS από την John Deere (Nelson et al., n.d.), οι νέες τεχνολογίες, όπως η ρομποτική και η τηλεπισκόπηση, κατέστησαν δυνατή την ακριβέστερη διαχείριση κάθε τμήματος ενός αγροτικού χωραφίου, καθώς αγρότες μπορούν πλέον να προσαρμόζουν παράγοντες όπως η

άρδευση ή η χρήση λιπασμάτων με βάση τις ακριβείς συνθήκες σε κάθε περιοχή. Μια έκθεση του 2019 από την McKinsey & Company (Magnin, 2016) έδειξε ότι η χρήση μεγάλων δεδομένων, δορυφορικών εικόνων και τεχνικών ανάλυσης ωθεί τους αγρότες να λαμβάνουν εξαιρετικά ακριβείς αποφάσεις, οδηγώντας σε αυξημένη παραγωγικότητα και παράλληλα εξοικονόμηση πόρων.

Έξυπνη Γεωργία

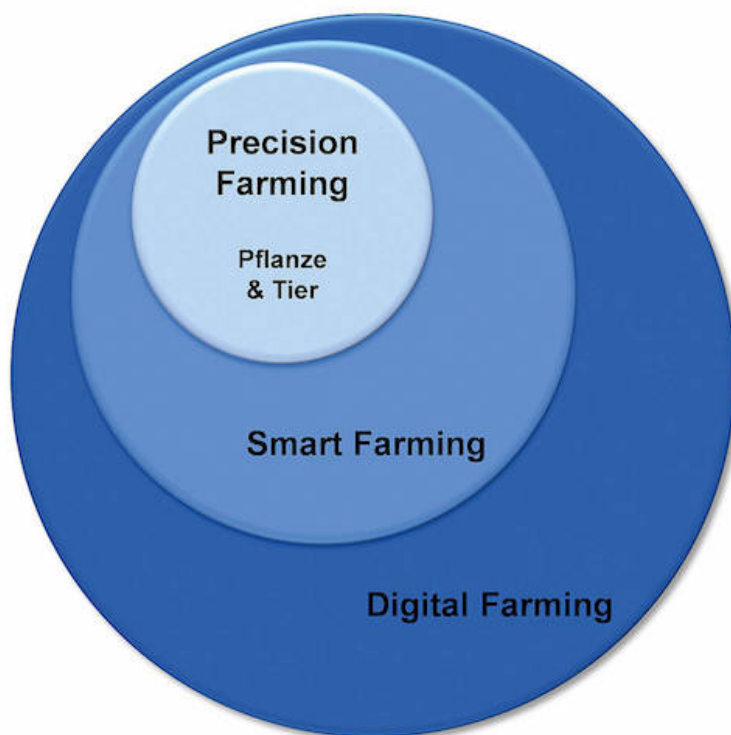
Η έξυπνη γεωργία στηρίζεται πάνω στη γεωργία ακριβείας, καθώς εστιάζει στα δεδομένα πραγματικού χρόνου και στην έξυπνη λήψη αποφάσεων για ολόκληρη την καλλιέργεια, όπως αναφέρουν οι (Fastellini & Schillaci, 2020). Χρησιμοποιεί τεχνολογίες όπως το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), την τεχνητή νοημοσύνη (AI), τη μηχανική μάθηση και τη ρομποτική για τη συλλογή και τη διασύνδεση δεδομένων από αισθητήρες, drones, μετεωρολογικούς σταθμούς και γεωργικά μηχανήματα. Με τη βοήθεια εφαρμογών για κινητά, dashboards και άλλες cloud based τεχνολογίες, οι γεωργοί είναι σε θέση να παρακολουθούν την υγεία των φυτών, την υγρασία του εδάφους και την επίδοση του μηχανολογικού τους εξοπλισμού εξ αποστάσεως και να λαμβάνουν γρήγορα δράση, είτε πρόκειται για την έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών, τη βελτίωση της αποδοτικότητας των γεωργικών εργασιών ή τη διαχείριση του ζωικού κεφαλαίου. Το σημαντικό είναι ότι οι παραπάνω τεχνολογίες διατίθενται όλο και περισσότερο σε μικρές και οικογενειακές γεωργικές εκμεταλλεύσεις, επιτρέποντας σε ακόμα περισσότερα άτομα να αξιοποιήσουν προηγμένα εργαλεία που κάποτε χρησιμοποιούνταν μόνο από μεγάλες αγροτικές επιχειρήσεις.

Ψηφιακή Γεωργία

Η ψηφιακή γεωργία αποτελεί την πιο ευρεία έννοια από τις τρεις, καθώς ανάγει τα ακατέργαστα δεδομένα σε χρήσιμες πληροφορίες για ολόκληρο το αγροδιατροφικό σύστημα. Ενώ η γεωργία ακριβείας επικεντρώνεται σε ό,τι συμβαίνει στην καλλιέργεια, η ψηφιακή γεωργία υποστηρίζει επίσης τον στρατηγικό σχεδιασμό, τη διαχείριση κινδύνων και τη ρύθμιση της ολόκληρης της αλυσίδας εφοδιασμού. Συνδυάζει εργαλεία από την ακριβή και έξυπνη γεωργία με επιπλέον δεδομένα, όπως οι τιμές της αγοράς, τα logistics και οι χρηματοοικονομικές τάσεις, με τη χρήση τεχνολογιών όπως το υπολογιστικό νέφος, το blockchain και οι ψηφιακές πλατφόρμες. Σύμφωνα με τη Γερμανική Γεωργική Εταιρεία (DLG) (DLG, 2018), η ψηφιακή γεωργία συνεπάγεται ομαλό συντονισμό μεταξύ των συστημάτων στη γεωργική εκμετάλλευση και φορέων όπως είναι οι προμηθευτές, οι λιανοπωλητές και οι καταναλωτές, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας και της διαφάνειας. Για παράδειγμα, μια ψηφιακή πλατφόρμα μπορεί να συνδυάζει χάρτες απόδοσης με δεδομένα πραγματικού χρόνου για τις τιμές και τον χρονοπρογραμματισμό των δρομολογίων μεταφοράς, προκειμένου να αποφασιστεί η καλύτερη δυνατή στιγμή για τη συγκομιδή και την πώληση των αγροτικών προϊόντων.

Διασύνδεση μεταξύ των όρων

Η γεωργία ακριβείας, η έξυπνη γεωργία και η ψηφιακή γεωργία αποτελούν στάδια μιας δυναμικής διαδικασίας τεχνολογικής προόδου στη γεωργία. Η εν λόγω διαδικασία ξεκινά με τον ακριβή έλεγχο των εισροών σε επίπεδο καλλιέργειας, περνά στην παρακολούθηση και τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο και καταλήγει σε ολοκληρωμένα συστήματα δεδομένων που διασυνδέουν όλα τα τμήματα της αγροδιατροφικής εφοδιαστικής αλυσίδα. Η κατανόηση των διαφορών μεταξύ των τριών ανωτέρω μεθόδων είναι απαραίτητη, όχι μόνο για τους αγρότες, οι οποίοι καλούνται να επιλέξουν τη βέλτιστη τεχνολογία για τις εργασίες τους, αλλά και για τους υπεύθυνους διαμόρφωσης πολιτικών και κανονισμών, καθώς και για τους ενδιαφερόμενους φορείς που επενδύουν στην αειφόρο γεωργική καινοτομία. Αυτό, διότι οδηγούμαστε σε πιο στρατηγικές επενδύσεις, στη βελτίωση της χάραξης πολιτικής και στην προώθηση αγροτικών συστημάτων που είναι ανθεκτικά, αποτελεσματικά και προετοιμασμένα να ανταποκριθούν, τόσο στις περιβαλλοντικές, όσο και στις οικονομικές προκλήσεις του



σήμερα.

2.2.2.Ο ρόλος της ψηφιακής γεωργίας στην αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων

Όπως συζητήθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 2.1, η σύγχρονη γεωργία βρίσκεται αντιμέτωπη με μια σειρά πολύπλευρων και αλληλένδετων προκλήσεων, όπως η εξάντληση των φυσικών πόρων, η ολοένα και ταχύτερη περιβαλλοντική υποβάθμιση, οι εντονότερες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και η μόνιμη έλλειψη εργατικού δυναμικού στις αγροτικές περιοχές. Στο πλαίσιο αυτό, η ψηφιακή γεωργία και η γεωργία ακριβείας αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο όχι απλώς ως τεχνολογικές καινοτομίες, αλλά ως πρακτικά, ευέλικτα συστήματα

ικανά να προσφέρουν απτές λύσεις σε ορισμένα από τα πιο κρίσιμα ζητήματα που πλήττουν σήμερα τα παγκόσμια επισιτιστικά δίκτυα. Όμως, η πραγματική τους σημασία δεν βρίσκεται στην καινοτομία των ίδιων των εργαλείων, αλλά στο πόσο αποτελεσματικά χρησιμοποιούνται τα εν λόγω εργαλεία για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας και της αειφορίας στην αγροτική παραγωγή.

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα της σύγχρονης γεωργίας είναι η αποτελεσματική διαχείριση των περιορισμένων πόρων, όπως το νερό, η καλλιεργήσιμη γη και οι γεωργικές εισροές, όπως τα λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα. Οι συμβατικές καλλιεργητικές πρακτικές, αν και υιοθετούνται ευρέως, συχνά οδηγούν στην υπερβολική χρήση των παραπάνω εισροών, συμβάλλοντας στην καταστροφή του περιβάλλοντος μέσω της εκροής χημικών ουσιών, της αλλοίωσης του εδάφους και της εξαφάνισης της βιοποικιλότητας. Η γεωργία ακριβείας παρέχει άμεση λύση στο πρόβλημα αυτό, καθώς επιτρέπει τη διαχείριση των εισροών ανά περιοχή, καθοδηγούμενη από δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο από το πεδίο με τη βοήθεια αισθητήρων, δορυφορικών εικόνων και άλλων ψηφιακών εργαλείων (Getahun et al., 2024). Αυτή η δεδομενοκεντρική προσέγγιση δίνει στους γεωργούς τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τις δραστηριότητές τους με μεγάλη ακρίβεια, διασφαλίζοντας ότι οι εισροές εφαρμόζονται μόνο όπου και όταν χρειάζονται, μειώνοντας έτσι τη σπατάλη, προστατεύοντας την υγεία του εδάφους και μετριάζοντας τις ευρύτερες οικολογικές επιπτώσεις των γεωργικών δραστηριοτήτων.

Παράλληλα, οι κλιμάκωση των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει τα συστήματα παραγωγής τροφίμων σε ακόμα μεγαλύτερη αστάθεια, καθώς τα ολοένα και πιο έντονα και συχνά καιρικά φαινόμενα και η σταδιακή μείωση της καλλιεργήσιμης γης συνεχίζουν να υποβαθμίζουν την ανθεκτικότητα της σύγχρονης γεωργίας. Η ψηφιακή γεωργία έρχεται να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις αυτές, εξοπλίζοντας τους γεωργούς με εργαλεία πρόβλεψης και τεχνικές προσαρμογής που συμβάλλουν στη λήψη πιο αποτελεσματικών και τεκμηριωμένων αποφάσεων (Xing & Wang, 2024). Τεχνολογίες όπως οι πλατφόρμες κλιματικών προβλέψεων, τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης για τις επιδημίες παρασίτων και ασθενειών καθώς και τα μοντέλα καλλιέργειας σε ελεγχόμενο περιβάλλον, συμπεριλαμβανομένων των υδροπονικών και των συστημάτων κάθετης καλλιέργειας (Oh & Lu, 2023), παρέχουν κρίσιμες δικλίδες ασφαλείας έναντι της κλιματικής αβεβαιότητας. Οι καινοτομίες αυτές όχι μόνο σταθεροποιούν την απόδοση σε αντίξοες συνθήκες, αλλά συμβάλλουν επίσης στην ασφάλεια και την αξιοπιστία του επισιτιστικού εφοδιασμού σε μια εποχή αυξανόμενων δημογραφικών και περιβαλλοντικών πιέσεων.

Οι ελλείψεις σε εργατικό δυναμικό συνιστούν έναν ακόμα σοβαρό περιορισμό, ιδίως στην επαρχία, όπου οι νέες γενιές απομακρύνονται όλο και περισσότερο από τα παραδοσιακά αγροτικά επαγγέλματα. Τα συνεπακόλουθα κενά στη διαθεσιμότητα ανθρώπινου δυναμικού απειλούν την απόδοση και την κερδοφορία των γεωργικών επιχειρήσεων, ιδίως σε περιοχές που βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη χειρωνακτική εργασία. Η γεωργία ακριβείας επιλύει αυτό το θέμα μέσω της αυτοματοποίησης και των έξυπνων μηχανημάτων, τα οποία μειώνουν την εξάρτηση από τη φυσική εργασία μέσω της ανάληψης βασικών δραστηριοτήτων με

μεγαλύτερη ταχύτητα και ακρίβεια. Η ανάπτυξη drones για την παρακολούθηση των καλλιεργειών, αυτόνομων τρακτέρ για τις αγροτικές εργασίες και της ρομποτικής για τη συγκομιδή ή τη φροντίδα του ζωικού κεφαλαίου επιτρέπει στους αγρότες να διατηρούν υψηλά επίπεδα παραγωγικότητας, παρά τους περιορισμούς στο εργατικό δυναμικό. Ταυτόχρονα, η υιοθέτηση των τεχνολογιών αυτών συμβάλλει στον εκσυγχρονισμό της γεωργίας ως τομέα (Klerkx & Rose, 2020; Ren et al., 2020), καθιστώντας την πιο ελκυστική για τους νέους και υποστηρίζοντας την ευρύτερη οικονομική ανάπτυξη της υπαίθρου.

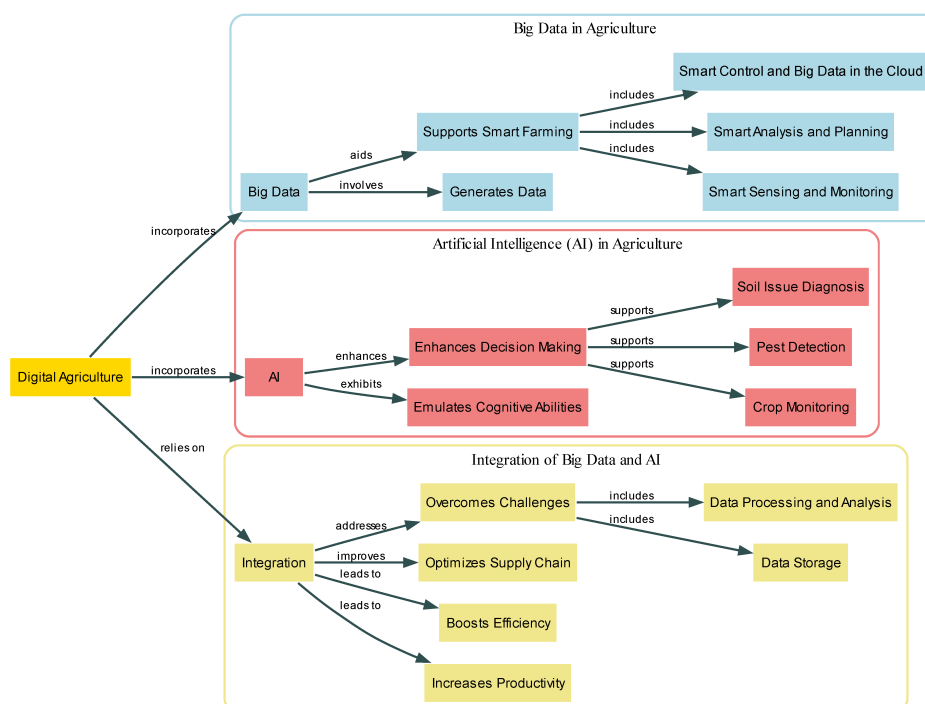
Τα περιβαλλοντικά οφέλη της ψηφιακής γεωργίας και της γεωργίας ακριβείας είναι εξίσου σημαντικά, ιδιαίτερα όσον αφορά τη μείωση της υπερκατανάλωσης εισροών που συμβάλλουν στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Με την πιο αποδοτική χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, οι αγρότες μπορούν να περιορίσουν τους κινδύνους της οξίνισης του εδάφους, του ευτροφισμού των υδάτινων σωμάτων και της υπερκατανάλωσης ορυκτών καυσίμων που συνδέονται με τη συμβατική παραγωγή. Η κτηνοτροφία ακριβείας, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση αισθητήρων και αυτοματοποιημένων συστημάτων για την παρακολούθηση της υγείας, της διατροφής και της μετακίνησης των ζώων, παίζει επίσης ρόλο στη μείωση των εκπομπών και στη βελτίωση της ευημερίας των ζώων. Αν και ο βαθμός μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου εξαρτάται από συγκεκριμένες πρακτικές κάθε φορά, είναι σαφές ότι η ψηφιακή γεωργία υποστηρίζει μια μετρήσιμη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου χωρίς να θυσιάζονται, αλλά συχνά να βελτιώνονται, οι οικονομικές επιδόσεις των γεωργικών επιχειρήσεων (Daheim et al., 2016; Gebbers & Adamchuk, 2010).

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα οφέλη της ψηφιακής γεωργίας και της γεωργίας ακριβείας δεν περιορίζονται μόνο σε μεγάλης κλίμακας, βιομηχανοποιημένες επιχειρήσεις σε χώρες υψηλού εισοδήματος. Αν και τα ποσοστά υιοθέτησης παραμένουν υψηλότερα στις τεχνολογικά προηγμένες ζώνες, η λήψη αποφάσεων με βάση τα δεδομένα, η αποδοτική χρήση των πόρων και η προσαρμοστική διαχείριση, μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορες κλίμακες και συνθήκες. Η διευρυμένη πρόσβαση χάρη στη χρηματοδότηση για ψηφιακές υποδομές, η κατάρτιση των γεωργών και η θεσμική υποστήριξη είναι απαραίτητα για να διασφαλιστεί ότι οι μικροκαλλιεργητές και οι παραγωγοί στις αναπτυσσόμενες περιοχές μπορούν επίσης να συμμετάσχουν και να επωφεληθούν από αυτή την τεχνολογική πρόοδο (Klerkx & Rose, 2020). Έτσι, η ψηφιακή γεωργία γίνεται εργαλείο όχι μόνο για την καινοτομία, αλλά και για την συμπερίληψη, επιτρέποντας μια πιο δίκαιη συμμετοχή στα παγκόσμια διατροφικά συστήματα.

Εν τέλει, αυτό που δίνει στη ψηφιακή γεωργία τις μετασχηματιστικές της δυνατότητες δεν είναι απλώς το υλικό ή το λογισμικό που χρησιμοποιεί, αλλά η ευρύτερη τάση της να ανταποκρίνεται στις πραγματικές και εξελισσόμενες προκλήσεις στη γεωργία σήμερα. Με την προώθηση της πιο έξυπνης χρήσης πόρων, την ενίσχυση της ανθεκτικότητας στις κλιματικές μεταβολές, την υποστήριξη της απόδοσης στις αγροτικές δραστηριότητες και την βελτίωση της αειφορίας, η ψηφιακή γεωργία παρέχει μια ολοκληρωμένη διέξοδο σε πιο ασφαλή, παραγωγικά και ανθεκτικά γεωργικά συστήματα (FAO & ITU, 2022).

2.3. Τεχνικό υπόβαθρο της ψηφιακής γεωργίας

Η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών στη γεωργία έχει αλλάξει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο συλλέγονται, επεξεργάζονται και αξιοποιούνται τα δεδομένα στη διαχείριση των καλλιεργειών. Η γεωργία ακριβείας και η ψηφιακή γεωργία δεν ορίζονται από ένα συγκεκριμένο εργαλείο ή μια μόνο μέθοδο, αλλά από ένα σύνολο τεχνολογιών που λειτουργούν συνδυαστικά, επιτρέποντας τη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων σε διαφορετικές κλίμακες, τόσο χρονικά όσο και χωρικά (Finger et al., 2019; Liakos et al., 2018). Το παρόν κεφάλαιο προσφέρει μια επισκόπηση των βασικών τεχνολογιών που συνθέτουν το εν λόγω σύνολο, αναδεικνύοντας τους ρόλους, τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις και τη θέση τους στο πλαίσιο των σύγχρονων γεωργικών συστημάτων.



Εικόνα 2.3: Οι ψηφιακές τεχνολογίες στη σύγχρονη γεωργία (Fuentes-Peñailillo et al., 2024)

Το κεφάλαιο αυτό, αντί να εξετάζει την κάθε τεχνολογία ξεχωριστά, ακολουθεί μια βαθμιαία προσέγγιση. Η παρουσίαση ξεκινά από τις απλές και ημιψηφιακές μεθόδους συλλογής δεδομένων, όπως είναι τα χειρόγραφα αρχεία, τα υπολογιστικά φύλλα και τα έντυπα παρατήρησης των καλλιεργειών, τα οποία, παρά την απλότητά τους, εξακολουθούν να αποτελούν βασικές πηγές πληροφορίας για πολλές γεωργικές μονάδες (Mulla, 2013). Στη συνέχεια, εξετάζονται διαδοχικά τα επίπεδα ανίχνευσης και αυτοματοποίησης, τα οποία περιλαμβάνουν φορητές συσκευές, αισθητήρες, εφαρμογές για κινητά, μηχανήματα με ενσωματωμένα τεχνολογικά συστήματα, καθώς και εναέρια μέσα τηλεπισκόπησης, όπως τα drones και οι δορυφόροι (Wolfert et al., 2017). Η δομή κορυφώνεται με τις πιο ολοκληρωμένες ψηφιακές υποδομές, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSNs), οι αρχιτεκτονικές Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και τα πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης γεωργικών εκμεταλλεύσεων (FMIS), τα οποία διασυνδέουν και συντονίζουν ετερογενείς ροές δεδομένων, μετατρέποντάς τες σε αξιοποιήσιμη γνώση (C. Zhang &

Konacs, 2012). Τέλος, παρουσιάζεται μια ενότητα αφιερωμένη στις αναδυόμενες και πειραματικές τεχνολογίες, όπως είναι οι νανοαισθητήρες, οι εφαρμογές blockchain και η υπερφασματική απεικόνιση.

Το επίκεντρο του κεφαλαίου είναι η κατανόηση της λειτουργίας κάθε τεχνολογίας, των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών της, καθώς και της συμβολής της στη συνολική διασύνδεση του γεωργικού συστήματος. Ο στόχος δεν είναι απλώς η καταγραφή των εργαλείων, αλλά η αποτύπωση ενός συνεκτικού πλαισίου που αναδεικνύει πώς τα τεχνολογικά επίπεδα συνεργάζονται, τόσο ως προς τη ροή των δεδομένων όσο και ως προς τον επιχειρησιακό τους ρόλο. Η παρούσα επισκόπηση θέτει τις βάσεις για τις επόμενες ενότητες, οι οποίες θα εστιάσουν στην αξιοπιστία των δεδομένων, τη διακυβέρνηση της πληροφορίας και τις θεσμικές προκλήσεις που σχετίζονται με την εφαρμογή και διαχείριση της τεχνολογίας στον αγροδιατροφικό τομέα.

Η συγγραφέας συνοψίζει στον παρακάτω πίνακα τις βασικές τεχνολογίες που αναφέρονται στην παρούσα ενότητα, περιγράφοντας τις βασικές λειτουργίες τους, τις τυπικές εφαρμογές και τους τύπους δεδομένων που παράγουν. Η επισκόπηση αυτή προορίζεται ως οδηγός των ψηφιακών εργαλείων που καθοδηγούν τη λήψη αποφάσεων στη σύγχρονη γεωργία.

Εργαλείο	Λειτουργία	Κύρια εφαρμογή	Τύπος δεδομένων
GPS (RTK-GPS)	Ακριβής γεωγραφικός εντοπισμός και πλοήγηση	Καθοδήγηση μηχανημάτων, σήμανση δεδομένων	Χωρικές συντεταγμένες
GIS	Πολυεπίπεδη ανάλυση και χαρτογράφηση χωρικών δεδομένων	Οριοθέτηση ζώνης, σχεδιασμός VRA, διάγνωση	Χάρτες με γεωαναφορά, δεδομένα πολλαπλών πηγών
NDVI/Δείκτες βλάστησης	Αξιολόγηση της ευρωστίας των φυτών μέσω της φασματικής ανάκλασης	Παρακολούθηση της υγείας των καλλιεργειών, βελτιστοποίηση εισροών	Φασματικά δεδομένα (πολυφασματικά, NDVI)
Yield Monitor - Παρακολούθηση απόδοσης	Μετρά τον όγκο και την υγρασία της συγκομιδής	Χαρτογράφηση απόδοσης, ανάλυση κερδοφορίας	Παραγωγή καλλιεργείας, υγρασία, τοποθεσία
Αισθητήρες EC εδάφους	Χαρτογραφούν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους	Χαρτογράφηση της υφής του εδάφους, οριοθέτηση των ζωνών διαχείρισης	Μεταβλητότητα εδάφους, μετρήσεις EC

Εργαλείο	Λειτουργία	Κύρια εφαρμογή	Τύπος δεδομένων
UAV (Drone) - Μη επανδρωμένα αεροσκάφη	Captures high-resolution aerial imagery	Ανίχνευση τάσεων, ανάλυση θόλου, 3D μοντελοποίηση	Εικόνες, υψομετρικά μοντέλα
Δορυφορικές εικόνες	Καταγράφει αεροφωτογραφίες υψηλής ανάλυσης	Προγνώσεις, ανίχνευση ξηρασίας, χωροθέτηση της χρήσης γης	Χρονικά και χωρικά δεδομένα ανάκλασης
FMIS - Πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης αγροκτημάτων	Κεντρική διαχείριση δεδομένων αγροκτήματος	Παρακολούθηση δραστηριοτήτων, VRA, συμμόρφωση	Ενσωματωμένα δεδομένα πολλαπλών πηγών
IoT Sensor Node - Αισθητήρες διαδικτύου των πραγμάτων	Συνεχή περιβαλλοντική παρακολούθηση	Άρδευση, κλιματικές ειδοποιήσεις, αυτοματισμοί	Περιβαλλοντικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο

Πίνακας 2.1: Βασικές τεχνολογίες της ενότητας

2.3.1.Χειροκίνητη και Ημψηφιακή Συλλογή Δεδομένων

Η αυτοματοποίηση κερδίζει συνεχώς έδαφος στη γεωργία, αλλά οι χειροκίνητες και ημψηφιακές μέθοδοι συλλογής δεδομένων εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως, ιδιαίτερα σε μικρές και μεσαίες εκμεταλλεύσεις. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν παραδοσιακές πρακτικές καταγραφής, όπως χειρόγραφα ημερολόγια, σημειωματάρια, τιμολόγια και ημερολόγια καλλιεργειών, καθώς και πιο δομημένες και σύγχρονες μορφές, όπως λογιστικά φύλλα (spreadsheets). Παρόλο που συχνά θεωρούνται ξεπερασμένες, εξακολουθούν να αποτελούν βασικές πηγές λειτουργικών και ιστορικών πληροφοριών και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη και επαλήθευση πιο σύνθετων ψηφιακών συστημάτων (Eastwood et al., 2019).

Η χειροκίνητη καταγραφή χρησιμοποιείται συχνά για την τεκμηρίωση εφαρμογών των γεωργικών εισροών, όπως η χρήση λιπασμάτων, φυτοπροστατευτικών προϊόντων και νερού, την παρακολούθηση της λειτουργίας γεωργικών μηχανημάτων και την εκτίμηση της απόδοσης. Αν και αυτά τα δεδομένα ενδέχεται να μην διαθέτουν την ακρίβεια ή την αντικειμενικότητα των μετρήσεων που βασίζονται σε αισθητήρες, συχνά αποτυπώνουν κρίσιμες πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων και για άλλες παρεμβάσεις, οι οποίες είναι δύσκολο να καταγραφούν με αυτοματοποιημένα μέσα (Rose et al., 2019). Στη ζωική παραγωγή, για παράδειγμα, οι παρατηρήσεις των παραγωγών σχετικά με τη συμπεριφορά ή την υγεία των ζώων παραμένουν καθοριστικής σημασίας και συχνά καταγράφονται ψηφιακά μέσω εφαρμογών κινητού ή συστημάτων διαχείρισης εκμεταλλεύσεων (Aubert et al., 2012).

Η μετάβαση από πλήρως χειροκίνητες μεθόδους σε ημψηφιακά εργαλεία χαρακτηρίζεται συνήθως από τη χρήση εφαρμογών καταγραφής δεδομένων σε κινητά, λογισμικού που μπορεί να αξιοποιηθεί και χωρίς σύνδεση στο διαδίκτυο, αλλά και ψηφιακών πρωτοκόλλων επιτόπιας παρατήρησης. Πολλά από αυτά τα εργαλεία έχουν σχεδιαστεί ώστε να μειώνουν τα σφάλματα καταγραφής και να βελτιώνουν την ανιχνευσιμότητα, χωρίς να καταργούν την ανάγκη για χειροκίνητη εισαγωγή δεδομένων, όπως για παράδειγμα εφαρμογές για την αναγνώριση ζιζανίων ή εντόμων ή φωτογραφίες με γεωγραφική ετικέτα για την τεκμηρίωση της κατάστασης των καλλιεργειών. Οι γεωχωρικές αυτές παρατηρήσεις ενισχύουν την ακρίβεια και την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων και διευκολύνουν την ενσωμάτωσή τους σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), στα οποία είναι δυνατή η οπτικοποίηση χωρικών προτύπων και η υποστήριξη τοπικά προσαρμοσμένων αποφάσεων.

2.3.2. Proximal Sensing και Φορητά Όργανα Μέτρησης

Τα εργαλεία proximal sensing, τα οποία χρησιμοποιούνται σε μικρές κλίμακες και συχνά λειτουργούν χειροκίνητα, αποτελούν ένα σημαντικό βήμα προς την ψηφιακή συλλογή δεδομένων στις καλλιέργειες. Τα όργανα αυτά προσφέρουν στοχευμένες και υψηλής ανάλυσης μετρήσεις εδαφικών, φυτικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων, ενώ χρησιμοποιούνται ευρέως τόσο στην έρευνα όσο και στις σύγχρονες γεωργικές πρακτικές (Adamchuk et al., 2004; Gebbers & Adamchuk, 2010). Η φορητότητα και το σχετικά χαμηλό κόστος τους τα καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την επιτόπια επιθεώρηση, τη γρήγορη διάγνωση και τις χωρικά εξειδικευμένες εκτιμήσεις που στηρίζουν αποφάσεις διαχείρισης σε τοπικό επίπεδο.

Στα συνηθισμένα φορητά όργανα περιλαμβάνονται μετρητές υγρασίας εδάφους, αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), μετρητές χλωροφύλλης (όπως οι συσκευές SPAD), πενετρόμετρα για την εκτίμηση της συμπίεσης του εδάφους και φορητά φασματοραδιόμετρα. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν τη γρήγορη συλλογή ποσοτικών δεδομένων σχετικά με την υγεία των φυτών, τη γονιμότητα του εδάφους ή τις φυσικές του ιδιότητες, χωρίς να απαιτείται μόνιμη υποδομή (De Benedetto et al., 2013; Mulla, 2013). Για παράδειγμα, οι μετρητές χλωροφύλλης προσφέρουν αδιάβλητες εκτιμήσεις της περιεκτικότητας των φύλλων σε άζωτο, ενώ οι αισθητήρες EC βοηθούν στη χαρτογράφηση της εδαφικής μεταβλητότητας για τη διαχείριση σε κάθε ζώνη (Schirrmann et al., 2011).

Παρότι παρέχουν συνήθως αξιόπιστες επιτόπιες μετρήσεις, η αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ορθή δειγματοληψία. Η αποτελεσματικότητα των εν λόγω εργαλείων βασίζεται ιδιαίτερα στην ικανότητα του χρήστη να επιλέγει κατάλληλες τοποθεσίες μέτρησης, να ερμηνεύει σωστά τα αποτελέσματα και να ενσωματώνει τα ευρήματα στη συνολική στρατηγική διαχείρισης της καλλιέργειας. Για τον λόγο αυτό, τα φορητά όργανα συχνά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με γεωαναφερόμενα πρωτόκολλα δειγματοληψίας ή ψηφιακές εφαρμογές επιτόπιας παρατήρησης, οι οποίες ενισχύουν την ποιότητα και την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων (Heil & Schmidhalter, 2019).

Μία από τις κύριες προκλήσεις στη χρήση φορητών αισθητήρων σχετίζεται με την ενσωμάτωση και την τυποποίηση των δεδομένων. Πολλές συσκευές δεν ακολουθούν κοινά πρότυπα εξόδου και συχνά δεν διαθέτουν δυνατότητα συνδεσιμότητας, γεγονός που δυσχεραίνει την ενσωμάτωσή τους σε κεντρικά πληροφοριακά συστήματα (Costa et al., 2025). Νεότερα μοντέλα προσπαθούν να αντιμετωπίσουν το ζήτημα ενσωματώνοντας λειτουργίες Bluetooth ή διασύνδεση με εφαρμογές κινητού για αυτόματη καταγραφή και αποστολή των δεδομένων. Ωστόσο, η έλλειψη διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών και μοντέλων εξακολουθεί να αποτελεί εμπόδιο για την απρόσκοπτη ενσωμάτωσή τους σε ολοκληρωμένες ψηφιακές πλατφόρμες διαχείρισης.

Παρά τους περιορισμούς τους, τα εργαλεία proximal sensing παραμένουν εξαιρετικά χρήσιμα λόγω της ακρίβειας, της ευελιξίας και της άμεσης πληροφόρησης που προσφέρουν. Είναι κατάλληλα για υβριδικά συστήματα, στα οποία η πλήρης αυτοματοποίηση δεν είναι πρακτική ή οικονομικά βιώσιμη. Μέσα από τη δυνατότητα επιτόπιας διάγνωσης και την επαλήθευση παρατηρήσεων ευρύτερης κλίμακας, τα φορητά αυτά όργανα αποτελούν έναν αποτελεσματικό συνδυασμό κρίκο μεταξύ της χειροκίνητης συλλογής δεδομένων και της αυτοματοποιημένης παρακολούθησης μέσω αισθητήρων. Επιπλέον, η φορητότητά τους τα καθιστά ιδανικούς συνεργάτες για πιο μόνιμα συστήματα πεδίου, όπως οι σταθεροί εδαφικοί αισθητήρες, τους οποίους θα δούμε παρακάτω.

2.3.3. Σταθεροί Αισθητήρες (In-Situ)

Οι αισθητήρες in-situ είναι όργανα εγκατεστημένα απευθείας στον αγρό, συχνά για μεγάλα χρονικά διαστήματα, με σκοπό την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών και εδαφικών συνθηκών (Yin et al., 2021). Συνιστούν βασικό εργαλείο στη γεωργία ακριβείας, καθώς προσφέρουν συνεχή, χωρικά εξειδικευμένα δεδομένα χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση. Τα αποτελέσματά τους υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα αποφάσεων, όπως η διαχείριση της άρδευσης, η βελτιστοποίηση εισροών και η μακροχρόνια προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή.

Οι πιο συνήθεις τύποι αισθητήρων περιλαμβάνουν ανιχνευτές υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους, αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και μετεωρολογικούς σταθμούς για τη μέτρηση βροχόπτωσης, ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας-υγρασίας. Τα όργανα αυτά τοποθετούνται στρατηγικά στις χωρικές ζώνες του αγρού και, στην περίπτωση των εδαφικών αισθητήρων, μπορούν να εγκατασταθούν σε διαφορετικά βάθη ώστε να παρακολουθούν τη μετακίνηση του νερού στο έδαφος. Τα δεδομένα μικροκλίματος που παρέχουν οι μετεωρολογικοί σταθμοί είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την πρόβλεψη ασθενειών, τον προγραμματισμό φυτοπροστασίας και τη μοντελοποίηση των σταδίων ανάπτυξης των καλλιεργειών (Mulla, David, 2018; Soussi et al., 2024).

Ένα βασικό πλεονέκτημα των στατικών αισθητήρων είναι η ικανότητά τους να παράγουν σταθερά, δεδομένα χρονοσειράς, τα οποία επιτρέπουν την παρακολούθηση της εξέλιξης των αγροτεμαχίων μέσα στον χρόνο (Manivannan & Sankar, 2023). Σε αντίθεση με κινητές ή εναέριες πλατφόρμες, οι αισθητήρες αυτοί λειτουργούν συνεχόμενα και δεν επηρεάζονται

Βλάχου Ελένη - Α.Μ. MKK2306 23

από καιρικές συνθήκες ή επιχειρηματικούς περιορισμούς. Ωστόσο, απαιτούν προσεκτική εγκατάσταση, τακτική συντήρηση και αξιόπιστες υποδομές για την παροχή ενέργειας και τη μετάδοση δεδομένων, στοιχεία που μπορεί να αυξήσουν το κόστος, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές.

Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, αρκετά συστήματα πλέον ενσωματώνουν τεχνολογίες Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), χρησιμοποιώντας ασύρματα πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως τα LoRaWAN, ZigBee ή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (Soussi et al., 2024). Ορισμένες συσκευές υποστηρίζουν επίσης τοπική επεξεργασία δεδομένων (edge computing), μειώνοντας τον όγκο μετάδοσης και ενισχύοντας τη σταθερότητα του συστήματος. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις σε επίπεδο τυποποίησης και διαλειτουργικότητας, καθώς πολλοί κατασκευαστές χρησιμοποιούν ιδιόκτητα πρότυπα και κλειστά οικοσυστήματα. Αυτό δυσχεραίνει την ενοποίηση με ευρύτερες πλατφόρμες διαχείρισης αγροτικών δεδομένων (Wolfert et al., 2017).

2.3.4.Κινητοί Αισθητήρες

Οι κινητοί αισθητήρες και εκείνοι που είναι ενσωματωμένοι σε γεωργικά μηχανήματα συλλέγουν αγρονομικά δεδομένα κατά τη διάρκεια των συνηθισμένων γεωργικών εργασιών, αξιοποιώντας την κίνηση των μηχανημάτων στο αγρό. Τοποθετούνται σε τρακτέρ, θεριζοαλωνιστικές, ψεκαστήρες ή αυτόνομα ρομποτικά οχήματα, και καταγράφουν συνεχώς χωρικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να απαιτούνται ξεχωριστές διελεύσεις για παρατήρηση ή δειγματοληψία.

Ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα είναι ο μετρητής απόδοσης-yield monitor, ο οποίος εγκαθίσταται σε θεριζοαλωνιστικές μηχανές. Καταγράφει τη ροή του προϊόντος, την υγρασία και την ταχύτητα συγκομιδής, δημιουργώντας λεπτομερείς χάρτες απόδοσης. Η ακρίβεια αυτών των δεδομένων εξαρτάται από τη σωστή βαθμονόμηση, η οποία περιλαμβάνει συγχρονισμό με το GPS, προσαρμογή στην υγρασία του καρπού και συνυπολογισμό παραγόντων όπως το ανάγλυφο και το είδος της καλλιέργειας. Λανθασμένη βαθμονόμηση μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στις μεταβλητές εφαρμογές εισροών ή στην ανάλυση κερδοφορίας.

Άλλα συστήματα περιλαμβάνουν οπτικούς ή πολυφασματικούς αισθητήρες, που τοποθετούνται σε τρακτέρ ή ψεκαστήρες, οι οποίοι μετρούν δείκτες βλάστησης όπως οι NDVI. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιούνται για την εφαρμογή εισροών με μεταβλητό ρυθμό, ιδιαίτερα αζωτούχων λιπασμάτων. Ορισμένα μηχανήματα φέρουν επίσης αισθητήρες κόμης που παρακολουθούν τη βιομάζα ή την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη, επιτρέποντας την άμεση ρύθμιση εισροών κατά την κίνηση τους (Mulla. David, 2018; Wikipedia contributors, 2023).

Τα τελευταία χρόνια, έχουν κυκλοφορήσει αυτόνομα οχήματα και ρομποτικές πλατφόρμες, τα οποία φέρουν προηγμένους αισθητήρες όπως LiDAR, θερμικές κάμερες ή υπερφασματικά συστήματα και να πλοηγούνται με ακρίβεια μέσω RTK-GNSS ή τεχνητής όρασης. Αν και η

χρήση τους είναι ακόμη περιορισμένη, προσφέρουν νέες δυνατότητες για υψηλής συχνότητας και λεπτομερή παρακολούθηση.

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι κινητοί αισθητήρες παρουσιάζουν προκλήσεις ως προς τη διασύνδεση και την εναρμόνιση δεδομένων. Πολλές κατασκευάστριες εταιρείες χρησιμοποιούν κλειστά συστήματα και μη συμβατά πρότυπα τηλεμετρίας, όπως είδαμε και για τους προηγούμενους τύπους αισθητήρων. Αν και το πρότυπο ISOBUS (ISO 11783) έχει βελτιώσει την επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων και παρελκόμενων, στην πράξη η πλήρης διαλειτουργικότητα δεν έχει ακόμη επιτευχθεί (ISO, 2017; Wei et al., 2024).

2.3.5.Εναέρια Τηλεπισκόπηση με UAVs - Drones

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs), γνωστά και ως drones, έχουν εξελιχθεί σε ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στη ψηφιακή γεωργία, κυρίως λόγω της ικανότητάς τους να συλλέγουν δεδομένα υψηλής ανάλυσης και επικαιρότητας σε τεράστιες γεωργικές εκτάσεις (Alsadik et al., 2023). Σε αντίθεση με τους σταθερούς αισθητήρες πεδίου ή εδάφους, τα UAVs προσφέρουν εναέρια απεικόνιση και φέρουν διαφορετικούς αισθητήρες προσαρμοσμένους σε συγκεκριμένες αγρονομικές ανάγκες. Η ευελιξία τους, η χωρική τους ακρίβεια και η ικανότητα άμεσης απόκρισης στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της καλλιέργειας τα καθιστούν ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην παρακολούθηση των φυτών και τη διάγνωση με ακρίβεια (Alsadik et al., 2023).

Στη γεωργία, τα UAVs διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα drones με περιστροφικούς έλικες, όπως τα τετρακόπτερα, και τις σταθερής πτέρυγας πλατφόρμες. Τα περιστροφικά drones προτιμώνται για μικρότερες εκτάσεις και λεπτομερείς επιθεωρήσεις, λόγω της ευκολίας ελιγμών και της δυνατότητας αιώρησης. Αντίθετα, τα drones σταθερής πτέρυγας είναι πιο κατάλληλα για μεγαλύτερες εκτάσεις, καθώς προσφέρουν μεγαλύτερη διάρκεια πτήσης και ταχύτερη κάλυψη. Και οι δύο τύποι μπορούν να εξοπλιστούν με αισθητήρες όπως πολυφασματικές, θερμικές, RGB ή LiDAR κάμερες (Dronefly, 2024).

Μία από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές της τηλεπισκόπησης με UAV είναι η συλλογή δεικτών βλάστησης, όπως ο NDVI, μέσω πολυφασματικών εικόνων. Οι δείκτες αυτοί βοηθούν στην αξιολόγηση της ευρωστίας των φυτών, την ανίχνευση καταπόνησης και την ανάδειξη χωρικών διαφορών στο χωράφι. Οι θερμικές κάμερες επιτρέπουν την παρακολούθηση της διαπνοής και την ανίχνευση υδατικού στρες, χρήσιμες στη διαχείριση της άρδευσης. Οι απλούστερες RGB κάμερες υποστηρίζουν την καταμέτρηση φυτών, την εκτίμηση φυτοκάλυψης και την καταγραφή εντοπισμένων ασθενειών. Πιο προηγμένες πλατφόρμες μπορούν να φέρουν υπερφασματικούς αισθητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως στην έρευνα λόγω του υψηλού κόστους και της πολυπλοκότητας (Specim, 2024).

Σε αντίθεση με τους πολυφασματικούς αισθητήρες, που καταγράφουν φάσματα σε λίγες ευρείες ζώνες, οι υπερφασματικοί καταγράφουν εκατοντάδες συνεχόμενες και στενές φασματικές ζώνες. Αυτό επιτρέπει την ανίχνευση λεπτών διαφορών στα φυτά, όπως η συγκέντρωση χλωροφύλλης, η έλλειψη θρεπτικών στοιχείων ή τα πρώιμα στάδια ασθένειας,

πριν ακόμη εμφανιστούν ορατά συμπτώματα. Ωστόσο, οι απαιτήσεις σε όγκο δεδομένων και υπολογιστική ισχύ περιορίζουν την εφαρμογή τους σε εμπορική κλίμακα (R. Li et al., 2023).

Τα UAVs μπορούν επίσης να παράγουν ορθοφωτομωσαϊκά, ψηφιακά μοντέλα επιφάνειας (DSM) και χάρτες ύψους κόμης. Τα προϊόντα αυτά συμβάλλουν στην αξιολόγηση της δομής των καλλιεργειών, της παρουσίας ζιζανίων και της μορφολογίας του εδάφους, υποστηρίζοντας μεταβαλλόμενες εφαρμογές εισροών, παρεμβάσεις σε ζώνες και αναλύσεις μετά τη συγκομιδή. Τα δεδομένα των UAVs είναι γεωαναφερόμενα μέσω ενσωματωμένου GPS και επεξεργάζονται συχνά σε λογισμικά GIS ώστε να συνδυαστούν με άλλα γεωργικά δεδομένα (Wu et al., 2017).

Παρά τα πλεονεκτήματά τους, η χρήση UAVs συνοδεύεται από τεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις. Ο προγραμματισμός πτήσεων, η τήρηση των κανονισμών και η ευαισθησία στις καιρικές συνθήκες μπορεί να περιορίσουν τη χρήση τους, ειδικά σε περιοχές με αυστηρή εναέρια νομοθεσία ή συχνά και έντονα καιρικά φαινόμενα (Climavision, 2024). Η αυτονομία των μπαταριών και η χωρητικότητα φορτίου περιορίζουν επίσης τον χρόνο και την έκταση κάλυψης, ιδιαίτερα για τα περιστροφικά drones .

Η επεξεργασία των δεδομένων αποτελεί μια ακόμη πρόκληση. Οι ακατέργαστες εικόνες απαιτούν επεξεργασία σε ειδικές πλατφόρμες (όπως Pix4D, Agisoft, DroneDeploy) ώστε να μετατραπούν σε αξιοποιήσιμες πληροφορίες. Η διαδικασία αυτή είναι υπολογιστικά απαιτητική και χρειάζεται τεχνική εξοικείωση. Η ενσωμάτωση των δεδομένων στα συστήματα διαχείρισης αγροκτημάτων απαιτεί συνεπή γεωαναφορά, πρότυπα μεταδεδομένων και συμβατότητα με άλλα επίπεδα πληροφορίας (όπως χάρτες απόδοσης ή δεδομένα εδάφους). Οικονομικά μιλώντας, η χρήση UAV προϋποθέτει αρχικές επενδύσεις σε εξοπλισμό, λογισμικό και εκπαίδευση. Ωστόσο, η μείωση του κόστους και η αύξηση της ευχρηστίας έχουν καταστήσει τα drones πιο προσβάσιμα τα τελευταία χρόνια (Vegetable Growers News, 2023).

Παρόλο που τα UAVs προσφέρουν ευέλικτη, υψηλής ανάλυσης απεικόνιση, οι περιορισμοί εμβέλειας και ρυθμιστικού πλαισίου περιορίζουν την κλιμάκωσή τους. Τα δορυφορικά συστήματα προσφέρουν συνεχή και ευρείας κλίμακας κάλυψη, αποτελώντας χρήσιμο συμπλήρωμα για την παρακολούθηση της γεωργικής παραγωγής σε περιφερειακό ή εθνικό επίπεδο (Alsadik et al., 2023).

2.3.6. Δορυφορική Παρακολούθηση

Η τηλεπισκόπηση επιτρέπει τη σταθερή και ευρεία παρακολούθηση των γεωργικών συστημάτων στον χώρο και τον χρόνο. Σε αντίθεση με τα UAVs, τα οποία προσφέρουν υψηλή χωρική ανάλυση σε επίπεδο αγρού, οι δορυφόροι παρέχουν μεγαλύτερη κάλυψη, τακτικές επαναληπτικές λήψεις και ιστορικά αρχεία. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι απαραίτητα για την παρακολούθηση των καλλιεργειών, την κατηγοριοποίηση της χρήσης γης, την πρόβλεψη απόδοσης και τη λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με το κλίμα σε περιφερειακή ή εθνική κλίμακα (Copernicus, n.d.).

Οι δορυφορικοί αισθητήρες διαφέρουν ως προς τη χωρική, φασματική και χρονική ανάλυση. Από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα δημόσια συστήματα είναι το Sentinel-2 (ESA) και το Landsat-8/9 (NASA/USGS). Το Sentinel-2 προσφέρει ανάλυση 10–20 μέτρων με επανάληψη κάθε πέντε ημέρες, ενώ το Landsat παρέχει ανάλυση 30 μέτρων με κύκλο 16 ημερών (Segarra et al., 2020). Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα δωρεάν και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εργαλεία παρακολούθησης της γεωργίας. Στην Ευρώπη, το πρόγραμμα Copernicus και ειδικά το Sentinel-2 παίζουν βασικό ρόλο στην αγροτική παρακολούθηση, με τα δεδομένα τους να χρησιμοποιούνται για κατηγοριοποίηση καλλιεργειών, ανάλυση βλάστησης και εντοπισμό στρες. Αυτά τα δεδομένα ενσωματώνονται σε δημόσιες πλατφόρμες και εμπορικά συστήματα διαχείρισης εκμεταλλεύσεων για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, τη συμμόρφωση με την ΚΑΠ και την παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών ακριβείας (Sarvia et al., 2021).

Οι εφαρμογές με χρήση τηλεπισκόπησης περιλαμβάνουν τον υπολογισμό δεικτών βλάστησης (όπως NDVI, EVI), ταξινόμηση καλλιεργειών, φαινολογική χαρτογράφηση, εντοπισμό ξηρασίας και εκτίμηση υγρασίας εδάφους. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται σε μοντέλα πρόβλεψης απόδοσης, εκτιμήσεις επισιτιστικής ασφάλειας και συστήματα όπως το ASIS του FAO (Van Hoolst et al., 2016). Τα δεδομένα επεξεργάζονται συνήθως σε GIS, επιτρέποντας την απεικόνιση χωρικών προτύπων και τον συνδυασμό με άλλα επίπεδα πληροφορίας.

Φυσικά, υπάρχουν και ορισμένοι περιορισμοί. Οι οπτικοί αισθητήρες επηρεάζονται από την παρουσία νέφους. Συστήματα ραντάρ όπως το Sentinel-1 (SAR) προσφέρουν λήψεις 24ωρου ανεξαρτήτως καιρού, χρήσιμες για παρακολούθηση υγρασίας, πλημμυρών και δομών, αν και απαιτούν εξειδικευμένη επεξεργασία (H. Li et al., 2023). Επίσης, οι σταθεροί χρόνοι επανάληψης μπορεί να είναι ανεπαρκείς για δυναμικές καλλιέργειες. Τέλος, η ερμηνεία σύνθετων ή πολυχρονικών δεδομένων απαιτεί εξειδικευμένη τεχνική κατάρτιση.

Ο παρακάτω πίνακας συγκρίνει βασικά χαρακτηριστικά της δορυφορικής και εναέριας τηλεπισκόπησης με UAV:

Παράμετρος	Δορυφορική Τηλεπισκόπηση	Τηλεπισκόπηση με UAVs
Χωρική Ανάλυση	Μέτρια έως υψηλή (10–30 μ.); υπομέτρων σε εμπορικά δεδομένα	Πολύ υψηλή (1–10 εκ. ανάλογα με τον αισθητήρα και το ύψος)
Χρονική Ανάλυση	Σταθερή (π.χ. 5 ημέρες για Sentinel-2)	Κατ' απαίτηση, ελεγχόμενη από τον χρήστη
Κάλυψη	Ευρείας κλίμακας (περιφερειακή, εθνική, παγκόσμια)	Τοπική (αγρός ή μικρές εκτάσεις ανά πτήση)
Εξάρτηση από καιρό	Επηρεάζεται από νεφοκάλυψη (οπτικά); λιγότερο το SAR	Ιδιαίτερα ευαίσθητη σε άνεμο, βροχή, θερμοκρασία
Κόστος	Δωρεάν (Sentinel, Landsat); υψηλό για εμπορικές εικόνες	Μέτριο έως υψηλό (εξοπλισμός, συντήρηση, εκπαίδευση χειριστών)
Τύποι Αισθητήρων	Πολυφασματικοί, υπερφασματικοί, SAR, θερμικοί	RGB, πολυφασματικοί, υπερφασματικοί, θερμικοί, LiDAR

Ευελιξία	Περιορισμένη στο πρόγραμμα του δορυφόρου	Υψηλή – πλήρως προσαρμόσιμη
Όγκος Δεδομένων	Μέτριος έως υψηλός	Πολύ υψηλός – μεγάλες ανάγκες αποθήκευσης και επεξεργασίας
Επιχειρησιακή Πολυπλοκότητα	Χαμηλή (λήψη και βασική επεξεργασία)	Υψηλή (σχεδιασμός πτήσεων, κανονισμοί, επεξεργασία εικόνας)
Τυπικές Εφαρμογές	Παρακολούθηση καλλιεργειών, ξηρασίας, ταξινόμηση χρήσεων γης	Επιτόπια παρακολούθηση, ανίχνευση ασθενειών, πρόβλεψη απόδοσης

Πίνακας 2.2: Βασικά χαρακτηριστικά της δορυφορικής και της εναέριας τηλεπισκόπησης με UAV

Η κατανόηση αυτών των διαφορών βοηθά στην επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας ανάλογα με την καλλιέργεια, τον τύπο του έργου και τις διαθέσιμες υποδομές. Ο συνδυασμός δορυφορικών εικόνων με δεδομένα UAV (π.χ. NDVI με ψηφιακά μοντέλα εδάφους) αποτελεί βέλτιστη πρακτική και ενισχύει την ακρίβεια των αναλύσεων.

Παρά τους περιορισμούς, η δορυφορική απεικόνιση ενσωματώνεται ευρέως σε πλατφόρμες γεωργίας ακριβείας και εθνικά πληροφοριακά συστήματα. Μάλιστα, η πρόσφατη πρόοδος στην υπολογιστική ισχύ και στην τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει τη σχεδόν σε πραγματικό χρόνο ανάλυση εικόνων. Επιπλέον, εμπορικοί πάροχοι πλέον προσφέρουν υπηρεσίες βασισμένες σε δορυφορικά δεδομένα, όπως dashboards παρακολούθησης καλλιεργειών και συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Ιδιαίτερα σε περιοχές με περιορισμένες υποδομές, οι δορυφόροι παρέχουν σημαντική υποστήριξη, τόσο για τακτική διαχείριση όσο και για στρατηγικό σχεδιασμό στις καλλιέργειες.

2.3.7. Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things–IoT) και τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks–WSNs) αποτελούν τον βασικό κορμό επικοινωνίας της ψηφιακής γεωργίας. Επιτρέπουν τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τον συγχρονισμό μεταξύ συσκευών και την αυτοματοποιημένη αντίδραση σε μεταβαλλόμενες αγρονομικές συνθήκες. Τα WSNs αποτελούνται από κατανεμημένους αισθητήρες στην γεωργική εκμετάλλευση, οι οποίοι παρακολουθούν μεταβλητές όπως η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία του αέρα και η βροχόπτωση. Τα δεδομένα μεταδίδονται σε κεντρικούς κόμβους μέσω ασύρματων πρωτοκόλλων όπως το LoRa, το NB-IoT ή το Sigfox, τεχνολογίες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας που είναι κατάλληλες για αγροτικές περιοχές με ηλιακή τροφοδοσία (Sadowski & Spachos, 2020).

Ένα τυπικό σύστημα IoT περιλαμβάνει αισθητήρες και ενεργοποιητές συνδεδεμένους σε μία πύλη επικοινωνίας, η οποία προωθεί τα δεδομένα σε υπολογιστική υποδομή στο νέφος (cloud), όπου πραγματοποιείται η ανάλυση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η επεξεργασία μπορεί να γίνει τοπικά μέσω τεχνολογιών edge computing, μειώνοντας την ανάγκη μετάδοσης

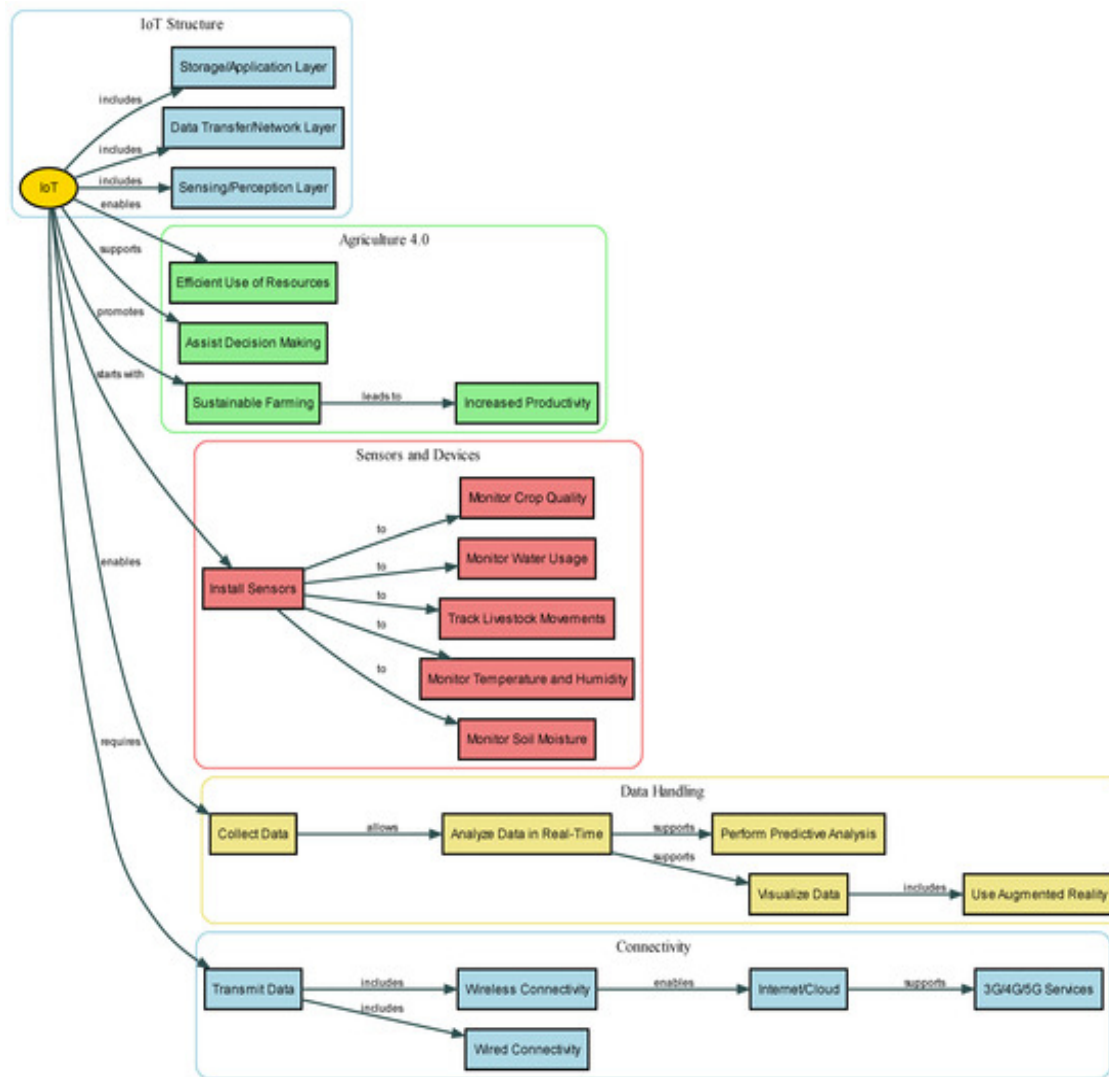
δεδομένων και ενισχύοντας την ανθεκτικότητα σε περιοχές με χαμηλή συνδεσιμότητα (AgriTechTomorrow, 2024).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής στην Ευρώπη είναι το ελληνικό σύστημα *gaiasense*, το οποίο ενσωματώνει αισθητήρες πεδίου, μετεωρολογικούς σταθμούς και αγρονομικά μοντέλα για την παροχή εξατομικευμένων συμβουλών σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα είναι ευθυγραμμισμένο με τις πολιτικές της ΕΕ για τη «έξυπνη γεωργία» και εξυπηρετεί παράλληλα στόχους αύξησης της παραγωγικότητας και βιωσιμότητας (Neuropublic, n.d.).

Η αρχιτεκτονική ενός συστήματος IoT στη γεωργία περιλαμβάνει τέσσερα βασικά επίπεδα:

- Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer): Αφορά τους φυσικούς αισθητήρες που συλλέγουν ακατέργαστα δεδομένα από το περιβάλλον.
- Επίπεδο Δικτύου (Network Layer): Ασχολείται με τη μεταφορά δεδομένων μέσω ασύρματων τεχνολογιών επικοινωνίας.
- Επίπεδο Επεξεργασίας (Processing Layer): Περιλαμβάνει την ανάλυση των δεδομένων είτε σε υπολογιστικά νέφη είτε σε τοπικές μονάδες.
- Επίπεδο Εφαρμογής (Application Layer): Παρέχει τα εργαλεία λήψης αποφάσεων, διαδραστικούς πίνακες και διεπαφές χρήστη.

Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει την επεκτάσιμη, υψηλής ανάλυσης και συνεχόμενη παρακολούθηση σε πολλαπλές ζώνες της αγροτικής εκμετάλλευσης. Ενισχύει τη λήψη αποφάσεων, διευκολύνει τη συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια και βελτιώνει τη χρήση των πόρων. Ωστόσο, υπάρχουν ακόμα τεχνικές προκλήσεις όπως η ασταθής συνδεσιμότητα, η μικρή διάρκεια ζωής των μπαταριών και η έλλειψη διαλειτουργικότητας λόγω ιδιόκτητων συστημάτων. Πρωτοβουλίες όπως οι Ag-APIs και τα ανοικτά πρότυπα στοχεύουν στη βελτίωση της συμβατότητας. Παράλληλα, η ασφαλής μετάδοση δεδομένων και ο έλεγχος πρόσβασης βάσει ρόλων είναι απαραίτητα για την προστασία της πληροφορίας (Jung & Oh, 2021).



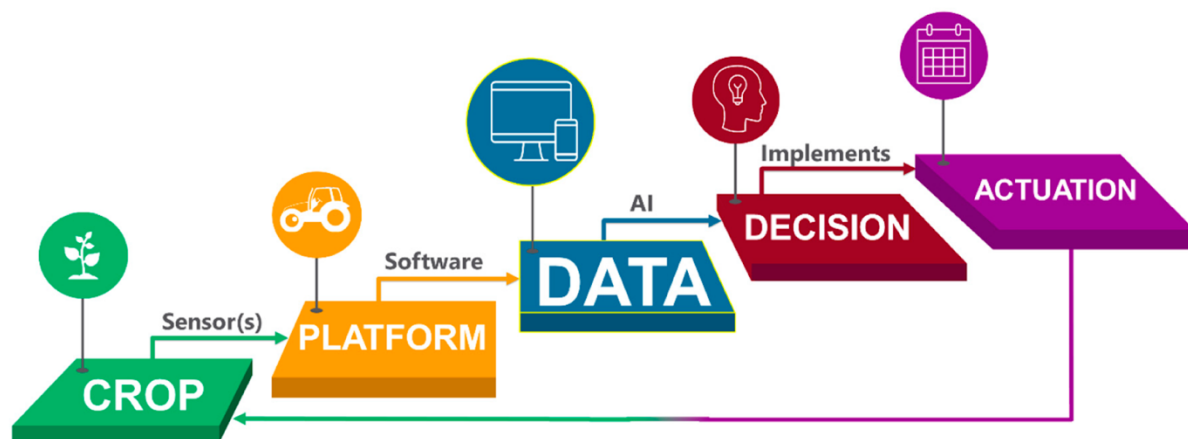
Εικόνα 2.4: Διαδίκτυο των πραγμάτων στην γεωργία (Fuentes-Peñailillo et al., 2024)

Συνοψίζοντας, το IoT και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελούν κρίσιμους πυλώνες της «διασυνδεδεμένης» γεωργικής εκμετάλλευσης. Υποστηρίζουν την αυτοματοποίηση, την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την προσαρμοσμένη διαχείριση του αγρού. Η πλήρης αξιοποίησή τους επιτυγχάνεται όταν ενσωματώνονται σε ολοκληρωμένες πλατφόρμες, όπως τα Συστήματα Πληροφόρησης Διαχείρισης Εκμεταλλεύσεων (FMIS), τα οποία μετατρέπουν τα ακατέργαστα δεδομένα σε αξιοποιήσιμη γνώση για μια πιο έξυπνη και βιώσιμη γεωργία.

2.3.8. Πληροφοριακά Συστήματα Διαχείρισης Εκμεταλλεύσεων (FMIS)

Καθώς η ψηφιακή γεωργία παράγει ολοένα και πιο πολύπλοκα και μεγάλα σε όγκο δεδομένα, τα Συστήματα Πληροφόρησης Διαχείρισης Εκμεταλλεύσεων (Farm Management Information Systems–FMIS) αποτελούν βασικά εργαλεία για την οργάνωση, την ενσωμάτωση και την ανάλυση πληροφοριών από διάφορες πηγές. Σε αυτές περιλαμβάνονται χειροκίνητες εγγραφές, δίκτυα IoT, αισθητήρες εδάφους και τεχνολογίες τηλεπισκόπησης. Οι πλατφόρμες FMIS λειτουργούν ως κεντρικοί κόμβοι που συγκεντρώνουν αγρονομικά, περιβαλλοντικά, επιχειρησιακά και οικονομικά δεδομένα.

Τα συστήματα αυτά υποστηρίζουν κρίσιμες λειτουργίες όπως η παρακολούθηση των εισροών, ο σχεδιασμός των καλλιεργειών, η διαχείριση αποθεμάτων και η τεκμηρίωση για κανονιστική συμμόρφωση. Οι πιο εξελιγμένες πλατφόρμες επιτρέπουν επίσης την χωρική απεικόνιση δεδομένων, τη δημιουργία ζωνών εφαρμογής μεταβλητού ρυθμού (variable-rate prescriptions) και την αυτόματη αποστολή ειδοποιήσεων βάσει των συνθηκών στον αγρό (Farmfit Insights Hub, n.d.).



Εικόνα 2.5: Κύκλος ζωής ψηφιακής πληροφορίας στην γεωργία (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020)

Οι τεχνολογίες GIS και GPS αποτελούν τον θεμέλιο λίθο των σύγχρονων FMIS. Το GPS προσφέρει γεωχωρική ακρίβεια για τα σημεία συλλογής δεδομένων, ενώ τα GIS επιτρέπουν την απεικόνιση και ανάλυση στον χώρο. Αυτή η δυνατότητα υποστηρίζει εργασίες όπως η χαρτογράφηση διαφοροποιήσεων στην απόδοση, η βελτιστοποίηση των γεωργικών εργασιών και ο σχεδιασμός διαδρομών για γεωργικά μηχανήματα (Salami & Ahmadi, 2010).

Παρά τις δυνατότητές τους, η υλοποίηση των FMIS εξακολουθεί να αντιμετωπίζει προκλήσεις σχετικά με την ενσωμάτωση δεδομένων. Πολλές γεωργικές πληροφορίες είναι κατακερματισμένες μεταξύ ιδιόκτητων συστημάτων με μη συμβατά πρότυπα, γεγονός που περιορίζει τη διαλειτουργικότητα. Πρωτοβουλίες όπως το πρότυπο ISO 11783 (ISOBUS), τα πρότυπα AgGateway και οι ανοικτές διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (APIs) επιδιώκουν να βελτιώσουν την ανταλλαγή δεδομένων, αν και η πλήρης ενοποίηση παραμένει περιορισμένη (AgGateway, n.d.).

Οι πλατφόρμες FMIS που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος προσφέρουν πλεονεκτήματα ως προς την κλιμάκωση και την ευκολία πρόσβασης. Συγχρονίζονται με εξωτερικές πηγές δεδομένων, όπως μετεωρολογικές υπηρεσίες και αγορές γεωργικών προϊόντων. Η δυνατότητα ελέγχου πρόσβασης ανά ρόλο επιτρέπει την προσαρμογή των λειτουργιών στις ανάγκες διαφορετικών χρηστών, όπως παραγωγοί, γεωπόνοι ή εργολάβοι (H. Li et al., 2023).

2.3.9. Προηγμένη Χρήση Δεδομένων και Τεχνητή Νοημοσύνη

Το επόμενο βήμα στη ψηφιακή γεωργία επικεντρώνεται στη μετατροπή σύνθετων δεδομένων σε χρήσιμες πληροφορίες, αξιοποιώντας τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης (AI), Μηχανικής Μάθησης (ML) και Ανάλυσης Μεγάλων Δεδομένων. Η τεχνητή νοημοσύνη υποστηρίζει λειτουργίες όπως η αναγνώριση προτύπων και η λήψη αποφάσεων προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένες συνθήκες. Η μηχανική μάθηση αξιοποιεί ιστορικά δεδομένα για τη βελτίωση της λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Οι τεχνολογίες αυτές συνδυάζουν δεδομένα από δορυφόρους, drones, συσκευές IoT και αγροτικά μηχανήματα για την πρόβλεψη αποδόσεων, την ανίχνευση προβλημάτων και την παρακολούθηση της υγείας των ζώων (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018; Picsellia, 2024).

Η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει την εξέλιξη των αναλύσεων από περιγραφικές σε προγνωστικές και συμβουλευτικές, προτείνοντας παρεμβάσεις βάσει προβλέψεων. Ωστόσο, η αξιοπιστία των μοντέλων εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα μεγάλων και ποιοτικών συνόλων δεδομένων. Παράλληλα, προκύπτουν ζητήματα όπως η μεροληψία, η διαφάνεια και η προστασία προσωπικών δεδομένων, ειδικά όταν οι αποφάσεις επηρεάζουν ενισχύσεις ή κανονιστική συμμόρφωση (Kotal et al., 2023).

Για τον λόγο αυτό, η διακυβέρνηση των δεδομένων αποκτά κεντρική σημασία στη βιώσιμη ψηφιακή γεωργία. Είναι απαραίτητο να υπάρχουν σαφείς κανόνες σχετικά με την ιδιοκτησία, τη χρήση και την πρόσβαση στα δεδομένα, ιδιαίτερα όταν αυτά κοινοποιούνται σε τρίτους, όπως επιχειρήσεις ή δημόσιους φορείς. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο Κώδικας Δεοντολογίας της ΕΕ για την Κοινοχρησία Αγροτικών Δεδομένων, ο οποίος προτείνει αρχές για υπεύθυνη χρήση των δεδομένων (FEFAC, 2020).

Στην Ελλάδα, το σύστημα GAIA EPIC δείχνει πώς τα ψηφιακά εργαλεία μπορούν να υποστηρίξουν τόσο την εφαρμογή της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (ΚΑΠ) όσο και την περιβαλλοντική παρακολούθηση (C-GAIA, n.d.). Στο μέλλον, τα Συστήματα Πληροφόρησης Διαχείρισης Εκμεταλλεύσεων (FMIS) θα ενισχυθούν με τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και ισχυρές υποδομές δεδομένων. Η εξέλιξη αυτή θα πρέπει να βασίζεται σε διαφανή, ηθικά και δίκαια πλαίσια διακυβέρνησης δεδομένων.

2.3.10. Αναδυόμενες και Πειραματικές Τεχνολογίες

Πέρα από τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται σήμερα στη γεωργία ακριβείας, ένα νέο κύμα καινοτόμων τεχνολογιών διαμορφώνει το μέλλον της ψηφιακής γεωργίας. Αν και πολλές από αυτές βρίσκονται ακόμη σε πιλοτικό στάδιο ή σε φάση ερευνητικής ανάπτυξης, αναμένεται να ενισχύσουν την ακρίβεια, την αυτοματοποίηση και τη διαφάνεια στις γεωργικές διαδικασίες.

Μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες είναι η υπερφασματική απεικόνιση, η οποία καταγράφει δεδομένα ανακλαστικότητας σε εκατοντάδες φασματικές ζώνες. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση φυτοκαταπόνησης, διατροφικών ελλείψεων ή

επιμολύνσεων με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με τα πολυφασματικά συστήματα. Ωστόσο, η υψηλή πολυπλοκότητα των δεδομένων και το μεγάλο μέγεθος των αρχείων περιορίζουν προς το παρόν τη χρήση της κυρίως σε ερευνητικά πλαίσια ή σε καλλιέργειες υψηλής αξίας (Paul et al., 2020).

Οι νανοαισθητήρες, οι οποίοι λειτουργούν σε μοριακό επίπεδο, προσφέρουν δυνατότητες ανίχνευσης συγκεκριμένων ενώσεων σε πραγματικό χρόνο στο έδαφος, στο νερό ή στους φυτικούς ιστούς. Θα μπορούσαν να φέρουν επανάσταση στη διάγνωση επιπέδων θρεπτικών στοιχείων, υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων και ασθενειών, αν και παραμένουν τεχνικές προκλήσεις όπως η σταθερότητα στο πεδίο και η ανθεκτικότητα των αισθητήρων (Shaw & Honeychurch, 2022).

Το blockchain διερευνάται επίσης ως μέσο ενίσχυσης της ιχνηλασιμότητας στις αλυσίδες αγροδιατροφής. Μέσω αδιάβλητων ψηφιακών μητρώων, θα μπορούσε να τεκμηριώσει τη χρήση εισροών, τις συγκομιδές, τη μεταφορά προϊόντων και τις πιστοποιήσεις. Παρότι το δυναμικό του είναι σημαντικό, η υιοθέτηση παραμένει περιορισμένη λόγω κόστους, διστακτικότητας των χρηστών και έλλειψης τυποποίησης (Marchese & Tomarchio, 2022), (Lakhan et al., 2025; Torky & Hassanein, 2020).

Άλλες καινοτομίες περιλαμβάνουν σμήνη ρομπότ, δίκτυα αισθητήρων με ενσωματωμένη τεχνητή νοημοσύνη και αυτόνομα drones. Οι τεχνολογίες αυτές στοχεύουν στη μείωση της χειρωνακτικής εργασίας και στην άμεση προσαρμογή στις συνθήκες του αγρού (Ramachandran, 2024).

Αν και δεν έχουν ακόμη ευρεία εφαρμογή, οι τεχνολογίες αυτές υποδεικνύουν ένα μέλλον με βαθύτερη αυτοματοποίηση, υψηλότερη χωρική ανάλυση και πιο ολοκληρωμένη υποστήριξη αποφάσεων, υπό την προϋπόθεση ότι θα είναι τεχνικά βιώσιμες, οικονομικά προσιτές και κοινωνικά αποδεκτές.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται όλες οι τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν στο παρόν υποκεφάλαιο

Όρος	Ορισμός
RTK-GPS (Real-Time Kinematic GPS)	Σύστημα εντοπισμού υψηλής ακρίβειας που διορθώνει τα σήματα GPS μέσω σταθμών βάσης, προσφέροντας ακρίβεια σε επίπεδο εκατοστού για αυτόματη καθοδήγηση, χαρτογράφηση και γεωργικές εργασίες.
NDVI (Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης)	Φασματικός δείκτης που προκύπτει από την ανακλαστικότητα στο κόκκινο και το κοντινό υπέρυθρο, χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της υγείας της βλάστησης και της φυτομάζας. Εφαρμόζεται ευρέως σε εικόνες UAV και δορυφόρων.

LoRaWAN	Πρωτόκολλο ασύρματου δικτύου μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, το οποίο χρησιμοποιείται σε γεωργικά συστήματα IoT για μετάδοση μικρών πακέτων δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις.
FMIS (Σύστημα Πληροφόρησης Διαχείρισης Εκμετάλλευσης)	Ψηφιακή πλατφόρμα που συγκεντρώνει δεδομένα επιπέδου εκμετάλλευσης για τον σχεδιασμό, την παρακολούθηση, τη συμμόρφωση και τη λήψη αποφάσεων σε όλα τα στάδια της παραγωγής.
SPAD Meter	Φορητή συσκευή που εκτιμά μη καταστροφικά την περιεκτικότητα των φύλλων σε χλωροφύλλη. Χρησιμοποιείται για τη διαχείριση του αζώτου και την παρακολούθηση της υγείας των καλλιεργειών.
VRA (Εφαρμογή Μεταβλητού Ρυθμού)	Μέθοδος γεωργίας ακριβείας που προσαρμόζει τις δόσεις εισροών (π.χ. λιπάσματα, φυτοφάρμακα) με βάση τη χωρική μεταβλητότητα του αγρού.
Edge Computing	Τοπική επεξεργασία δεδομένων κοντά στον αισθητήρα ή τη συσκευή, αντί για αποστολή σε κεντρικό διακομιστή στο cloud. Μειώνει την καθυστέρηση και χρησιμοποιείται συχνά σε συστήματα IoT.
Πολυφασματική Απεικόνιση (Multispectral Imaging)	Τηλεπισκόπηση με χρήση λίγων ευρείων φασματικών ζωνών (π.χ. RGB, NIR) για την αξιολόγηση χαρακτηριστικών επιφάνειας, όπως η υγεία της βλάστησης ή η κατάσταση του εδάφους.
Υπερφασματική Απεικόνιση (Hyperspectral Imaging)	Τεχνολογία που καταγράφει εκατοντάδες στενές, συνεχόμενες φασματικές ζώνες για την ανίχνευση λεπτών βιοχημικών αλλαγών στις καλλιέργειες. Χρησιμοποιείται κυρίως στην έρευνα ή σε καλλιέργειες υψηλής αξίας.
SAR (Συνθετικό Άνοιγμα Διαφράγματος)	Τεχνολογία τηλεπισκόπησης με ραντάρ, ικανή να συλλέγει δεδομένα ανεξαρτήτως νέφωσης και φωτισμού. Ιδιαίτερα χρήσιμη για παρακολούθηση υγρασίας εδάφους, μορφολογίας και πλημμυρών.

Πίνακας 2.3: Ορισμοί των τεχνολογιών έξυπνης γεωργίας που παρουσιάστηκαν στο εν λόγω κεφάλαιο

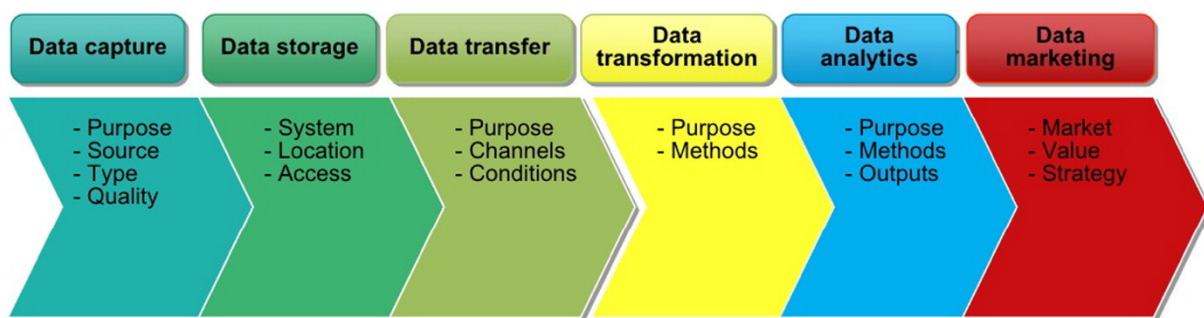
2.4. Αγροτικά Δεδομένα: Τύποι και Διαχείριση

Η σύγχρονη γεωργία βασίζεται σε ένα ευρύ φάσμα δεδομένων που προέρχονται από ποικίλες πηγές, ορισμένες από τις οποίες παρουσιάστηκαν συνοπτικά στο αμέσως προηγούμενο κεφάλαιο. Τα δεδομένα αυτά υποστηρίζουν τους αγρότες, τους ερευνητές, τους φορείς πολιτικής και τις επιχειρήσεις στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, στη βελτιστοποίηση των δραστηριοτήτων τους και στην προώθηση της βιωσιμότητας. Η κατανόηση, λοιπόν, των

τύπων και των πηγών των γεωργικών δεδομένων είναι κρίσιμη για όλους τους εμπλεκόμενους στον αγροτικό τομέα.

Με την πρόοδο της ψηφιακής γεωργίας, ο όγκος και η ποικιλομορφία των δεδομένων αυξάνονται. Αισθητήρες, μηχανήματα, drones, δορυφόροι, εφαρμογές και πλατφόρμες διαχείρισης γεωργικών εκμεταλλεύσεων συνεισφέρουν στη συνεχή ροή πληροφοριών, και επομένως η σωστή κατηγοριοποίηση και αξιοποίηση των δεδομένων αυτών είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό καλύτερων στρατηγικών, εργαλείων και πολιτικών.

Το εν λόγω κεφάλαιο παρουσιάζει τους βασικούς τύπους γεωργικών δεδομένων, ταξινομημένους με βάση την προέλευση, τη χρήση και τη λειτουργία τους στο πλαίσιο της γεωργικής παραγωγής.



Εικόνα 2.6: Η αλυσίδα δεδομένων στις εφαρμογές Big Data (Wolfert et al., 2017)

2.4.1.Κατηγορίες γεωργικών δεδομένων

Τύπος Δεδομένων	Χειροκίνητα / Ημιδομημένα	Εργαλεία Proximal Sensing	Αισθητήρες & IoT	Τηλεπισκόπηση	Αισθητήρες ενσωματωμένοι σε Μηχανήματα	Ψηφιακές Πλατφόρμες / FMIS
Διαχείριση Εκμετάλλευσης	Ημερολόγια, λογιστικά φύλλα, τιμολόγια	–	RFID (παρακολούθηση εργασίας)	–	Τηλεμετρία μηχανημάτων	Πίνακες FMIS, αποθήκευση στο cloud
Δεδομένα Μηχανημάτων	Αρχεία συντήρησης, δελτία εξοπλισμού	–	Αισθητήρες κινητήρα, καυσίμου, φορτίου	–	Οθόνες συγκομιδής, EC αισθητήρες	FMIS, πίνακες ελέγχου μηχανημάτων
Δεδομένα Γης	Φύλλα εδάφους, χάρτες αγροτεμαχίων	Εδαφικοί καθετήρες, χαρτογράφηση EC	Αισθητήρες υγρασίας, EC, θερμοκρασίας	LiDAR, πολυφασματικοί αισθητήρες, υψομετρικοί χάρτες	GPS, χάρτες GIS	Εργαλεία GIS, FMIS
Αγρονομικά Δεδομένα	Αρχεία σποράς, ψεκασμών	Μετρητές χλωροφύλλης / κόμης	Αισθητήρες θρεπτικών στοιχείων & υγείας φυτών	NDVI, χάρτες στρες και ασθενειών	Εφαρμογές μεταβλητού ρυθμού	Χάρτες συνταγών, FMIS
Κλίμα & Καιρός	Παρατηρήσεις πεδίου	–	Μετεωρολογικοί σταθμοί, αισθητήρες υγρασίας φύλλων	Δορυφορικά δεδομένα βροχόπτωσης, θερμοκρασίας επιφάνειας	–	Πίνακες καιρού, συστήματα ειδοποιήσεων
Οικονομικά / Ασφάλειες	Αποδείξεις, δάνεια, ασφαλιστικά έγγραφα	–	Αισθητήρες παρακολούθησης περιουσιακών στοιχείων	UAV/δορυφόροι για εκτίμηση ζημιών	Τηλεμετρία για αιτήσεις αποζημίωσης	Πλατφόρμες ασφάλισης, εφαρμογές κινητών
Βιωσιμότητα / Εκπομπές GHG	Καταγραφή πρακτικών	–	Αισθητήρες άνθρακα, αζώτου, νερού	Τηλεπισκόπηση μεταβολών χρήσης γης	Καταγραφές κατανάλωσης καυσίμου	Εργαλεία αναφοράς βιωσιμότητας / εκπομπών

Πίνακας 2.4: Τύποι γεωργικών δεδομένων και μέθοδοι/εργαλεία συλλογής

Δεδομένα Διαχείρισης Γεωργικών Εκμεταλλεύσεων

Τα δεδομένα διαχείρισης γεωργικών εκμεταλλεύσεων περιλαμβάνουν όλες τις επιχειρησιακές, οικονομικές και ρυθμιστικές πληροφορίες που απαιτούνται για την αποτελεσματική λειτουργία μιας αγροτικής μονάδας. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα προγράμματα εργασίας, τα αρχεία διαχείρισης προσωπικού και οι μισθοδοσίες, καθώς και οικονομικά έγγραφα όπως καταγραφές εξόδων, φορολογικές δηλώσεις και δανειακές συμβάσεις. Τα δεδομένα αυτά καταγράφονται ψηφιακά, συνήθως μέσω λογιστικών φύλλων ή FMIS (Farmfit Insights Hub, n.d.), και είναι απαραίτητα για τον προγραμματισμό, τη συμμόρφωση και την παρακολούθηση της απόδοσης (Porre et al., 2023).

Ιδιαίτερη σημασία έχουν επίσης τα δεδομένα που σχετίζονται με την εφοδιαστική αλυσίδα και την αγορά. Πληροφορίες για προμηθευτές, συναλλαγές με πελάτες, αγορές εισροών και

πωλήσεις προϊόντων βοηθούν στην καλύτερη διαχείριση του αποθέματος, του συντονισμού του εφοδιασμού και της παρουσίας στην αγορά. Κατά την αποθήκευση και μεταφορά των προϊόντων, παράμετροι όπως η θερμοκρασία και η υγρασία μπορούν να παρακολουθούνται με αισθητήρες IoT, διασφαλίζοντας την ποιότητα και την ιχνηλασιμότητα τους (TagoIO, 2024).

Οι παραγωγοί παρακολουθούν επίσης τις τιμές των αγροτικών προϊόντων και το κόστος των εισροών, ώστε να αξιολογούν την κερδοφορία και να σχεδιάζουν την παραγωγή τους. Παράλληλα, η υποβολή κανονιστικών στοιχείων, όπως η χρήση φυτοφαρμάκων, οι εκπομπές ή οι πρακτικές διαχείρισης γης, πραγματοποιείται όλο και περισσότερο μέσω ψηφιακών συστημάτων. Αυτή η μετάβαση ενισχύει τη διαφάνεια και υποστηρίζει τη συμμόρφωση με περιβαλλοντικά πρότυπα και καθεστώτα αγροτικών επιδοτήσεων (TraceX Technologies, 2024).

Δεδομένα Μηχανολογικού Εξοπλισμού

Τα δεδομένα μηχανημάτων προέρχονται από γεωργικό εξοπλισμό όπως είναι τα τρακτέρ, οι θεριζοαλωνιστικές μηχανές, τα ψεκαστικά και τα συστήματα άρδευσης. Περιλαμβάνουν τεχνικά και λειτουργικά στοιχεία, όπως τον τύπο του εξοπλισμού, το ιστορικό χρήσης και συντήρησης, καθώς και δείκτες απόδοσης όπως η κατανάλωση καυσίμου, τα διαγνωστικά του κινητήρα και καταγραφές σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες και τηλεματικά συστήματα (BKT Tires, 2024). Οι πληροφορίες αυτές επιτρέπουν στους παραγωγούς να παρακολουθούν την κατάσταση του εξοπλισμού τους, να προγραμματίζουν έγκαιρα τη συντήρηση και να βελτιστοποιούν τη χρήση των μηχανημάτων, με στόχο τη μείωση του κόστους λειτουργίας και την αποφυγή απρογραμματίστων βλαβών (Just Agriculture, 2024). Πιο εξελιγμένα συστήματα συνδέονται άμεσα με πλατφόρμες FMIS, προσφέροντας δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης, αυτόματων ειδοποιήσεων και υποστήριξης λήψης αποφάσεων βάσει της απόδοσης του εξοπλισμού.

Δεδομένα Γης

Τα δεδομένα γης παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες σχετικά με τα φυσικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των γεωργικών αγροτεμαχίων. Περιλαμβάνουν ιδιότητες του εδάφους, όπως το pH, τα επίπεδα θρεπτικών στοιχείων και η μηχανική σύσταση, καθώς και δεδομένα για τη διαθεσιμότητα νερού, την τοπογραφία και την κάλυψη γης. Οι παραδοσιακές αναλύσεις εδάφους ενισχύονται πλέον με ψηφιακούς καθετήρες και ηλεκτρομαγνητικούς αισθητήρες που προσφέρουν μετρήσεις υψηλότερης ανάλυσης και μεγαλύτερη ακρίβεια (Adamchuk et al., 2004).

Οι γεωχωρικές τεχνολογίες, όπως το GPS και τα GIS, υποστηρίζουν τη χαρτογράφηση των ορίων των χωραφιών, την καθοδήγηση μηχανημάτων και τη διαχείριση των αγροτεμαχίων. Επιπλέον, εργαλεία τηλεπισκόπησης όπως πολυφασματικές κάμερες, LiDAR και εικόνες από drones παρέχουν χωρικά δεδομένα για τις υψομετρικές διαφορές, την κατανομή υγρασίας και τη μεταβλητότητα του κτήματος (GPS.gov, n.d.). Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν τους

παραγωγούς να καθορίσουν ζώνες διαχείρισης, να βελτιστοποιήσουν τις εισροές και να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Τα δεδομένα γης περιλαμβάνουν επίσης στοιχεία για τις πρακτικές κατεργασίας του εδάφους, τα μέτρα ελέγχου διάβρωσης και τα σημεία πρόσβασης στα αγροτεμάχια, παράγοντες που επηρεάζουν την κίνηση των μηχανημάτων, τον κίνδυνο συμπίεσης του εδάφους και τη μακροπρόθεσμη υγεία του εδαφικού πόρου.

Αγρονομικά Δεδομένα

Τα αγρονομικά δεδομένα σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή και τη διαχείριση των καλλιεργειών. Περιλαμβάνουν πληροφορίες όπως η επιλογή ποικιλιών σπόρου, τα προγράμματα σποράς, τα σχέδια λίπανσης, η χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων και τα τελικά αποτελέσματα συγκομιδής. Τα δεδομένα αυτά βοηθούν τους παραγωγούς να προσαρμόζουν τις πρακτικές τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες και να αξιοποιούν πιο αποτελεσματικά τους διαθέσιμους πόρους.

Οι σύγχρονες τεχνολογίες επιτρέπουν πιο ακριβή εφαρμογή εισροών μέσω χαρτών και εξοπλισμού μεταβλητού ρυθμού. Δεδομένα από μετρητές χλωροφύλλης, αισθητήρες θρεπτικών στοιχείων και απεικόνιση της κόμης των φυτών προσφέρουν δυνατότητα παρακολούθησης της υγείας των καλλιεργειών σε πραγματικό χρόνο. Κατά τη συγκομιδή, οι αισθητήρες απόδοσης που είναι εγκατεστημένοι σε θεριζοαλωνιστικές μηχανές δημιουργούν χωρικούς χάρτες παραγωγής, οι οποίοι αξιοποιούνται για τον σχεδιασμό επόμενων εφαρμογών και σπορών (University of Nebraska-Lincoln, n.d.).

Τα αγρονομικά δεδομένα είναι επίσης θεμελιώδη για την ολοκληρωμένη διαχείριση παρασίτων και ασθενειών (IPM), καθώς επιτρέπουν την παρακολούθηση του πού, πότε και πώς εφαρμόζονται τα φυτοπροστατευτικά προϊόντα. Η καταγραφή στοιχείων εφαρμογής και θεραπείας ενισχύει την ακρίβεια, την ιχνηλασιμότητα και τη συμμόρφωση με τις κανονιστικές απαιτήσεις (U.S. Environmental Protection Agency, n.d.).

Δεδομένα Κλίματος και Καιρού

Τα δεδομένα κλίματος και καιρού προσφέρουν κρίσιμη πληροφόρηση όσον αφορά το περιβάλλον, τόσο για τις καθημερινές εργασίες στην καλλιέργεια, όσο και για τον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί που είναι εγκατεστημένοι σε γεωργικές εκτάσεις καταγράφουν βασικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η βροχόπτωση, η ένταση του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον αισθητήρες, όπως εκείνοι για την υγρασία φύλλων και την υγρασία του εδάφους, προσφέρουν επιπρόσθετες πληροφορίες για τις συνθήκες που επηρεάζουν τον κίνδυνο ασθενειών και τις ανάγκες άρδευσης (Croptracker, 2024).

Αυτά τα δεδομένα υποστηρίζουν βραχυπρόθεσμες αποφάσεις, όπως ο προγραμματισμός φυτοπροστατευτικών εφαρμογών ή η προστασία από παγετό, και τροφοδοτούν μοντέλα πρόβλεψης για ενδεχόμενες προσβολές από εχθρούς, αποδόσεις ή καταστάσεις καταπόνησης.

Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και συστήματα επικοινωνίας χαμηλής ισχύος επιτρέπουν συνεχή παρακολούθηση και αυτόματες ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο (Musa et al., 2023).

Όταν συνδυάζονται με δεδομένα τηλεπισκόπησης και ιστορικά αρχεία κλίματος, οι επίγειες μετρήσεις συμβάλλουν στη βελτίωση των προβλέψεων, στην αποδοτικότερη χρήση των πόρων και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας απέναντι στη μεταβλητότητα του καιρού. Παράλληλα, αυτά τα σύνολα δεδομένων είναι σημαντικά για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας, συμπεριλαμβανομένων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της κατανάλωσης νερού και της συμμόρφωσης με περιβαλλοντικά πρότυπα (C. Ge et al., 2024).

2.4.2. Προκλήσεις Διαχείρισης Δεδομένων στη Ψηφιακή Γεωργία

Καθώς η γεωργία περνάει την ψηφιακή μετάβαση που έχουμε αναλύσει εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια, η αποτελεσματική, ασφαλής και ευρείας κλίμακας διαχείριση των δεδομένων έχει καθοριστική σημασία. Τα δεδομένα προέρχονται πλέον από πολλές και διαφορετικές πηγές, όπως αισθητήρες, drones, γεωργικά μηχανήματα, εφαρμογές κινητών και πλατφόρμες cloud. Ωστόσο, η πραγματική τους αξία εξαρτάται από το πόσο καλά οργανώνονται, ερμηνεύονται και αξιοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων.

Για να γίνει αυτό πραγματικότητα, η ψηφιακή γεωργία πρέπει να αντιμετωπίσει ορισμένες προκλήσεις, οι οποίες καλύπτουν έξι αλληλένδετους τομείς: τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συστημάτων, τη διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων (big data), την ύπαρξη κατάλληλων υποδομών, την προστασία της ιδιωτικότητας, την ασφάλεια των δεδομένων και την ολοκλήρωση (integration) των πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πλατφορμών.

Διαλειτουργικότητα

Η διαλειτουργικότητα αναφέρεται στη δυνατότητα διαφορετικών συστημάτων και συσκευών να ανταλλάσσουν και να κατανοούν δεδομένα. Στη γεωργία, η διαλειτουργικότητα εξακολουθεί να αποτελεί σημαντική πρόκληση, κυρίως λόγω της απουσίας καθολικών προτύπων. Πολλοί αισθητήρες, πλατφόρμες και εξοπλισμοί χρησιμοποιούν ιδιόκτητα πρότυπα και πρωτόκολλα, γεγονός που δυσκολεύει τη σύνδεση μεταξύ συστημάτων και τη ροή των δεδομένων.

Για παράδειγμα, η συνένωση δεδομένων από αισθητήρες εδάφους, μετεωρολογικούς σταθμούς και drones μπορεί να απαιτεί χειροκίνητη επεξεργασία ώστε να ευθυγραμμιστούν οι χρονικές σημάνσεις, οι μονάδες μέτρησης ή οι γεωγραφικές συντεταγμένες. Ακόμη και όταν παρέχονται APIs, συχνά επιτρέπουν μόνο μερική πρόσβαση στα δεδομένα. Μια ακόμη πρόκληση είναι η σημασιολογική διαλειτουργικότητα, δηλαδή η κοινή κατανόηση της σημασίας των δεδομένων. Η απουσία της μπορεί να οδηγήσει σε σύγχυση μεταξύ όρων όπως «δυναμικό υδατικής τάσης εδάφους» και «όγκος υγρασίας» (AgGateway, 2024).

Ορισμένες πρωτοβουλίες προσπαθούν να καλύψουν αυτό το κενό. Εργαλεία όπως το ADAPT της AgGateway και τα ψηφιακά πλαίσια γεωργίας της ΕΕ επιδιώκουν να θέσουν κοινά πρότυπα δεδομένων (European Commission, 2024b). Ωστόσο, η εφαρμογή αυτών των προτύπων παραμένει περιορισμένη, ιδιαίτερα μεταξύ μικρότερων παρόχων και κατασκευαστών.

Μεγάλα Δεδομένα (Big Data)

Η ψηφιοποίηση της γεωργίας δημιουργεί τεράστιους όγκους δεδομένων, οι οποίοι συνοδεύονται από προκλήσεις που σχετίζονται με τον όγκο, την ταχύτητα, την ποικιλία και την ακρίβεια των πληροφοριών.

Όγκος (Volume): Η χρήση εργαλείων όπως εικόνες υψηλής ανάλυσης από drones, συνεχής παρακολούθηση μέσω αισθητήρων IoT και τηλεμετρία γεωργικών μηχανημάτων παράγει τεραμπάιτ δεδομένων κάθε χρόνο. Πολλές εκμεταλλεύσεις δεν διαθέτουν την απαραίτητη υποδομή για να αποθηκεύσουν ή να διαχειριστούν αξιόπιστα τέτοιες ποσότητες δεδομένων (Wolfert et al., 2017).

Ταχύτητα (Velocity): Τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο απαιτούν άμεση επεξεργασία ώστε να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά, για παράδειγμα για την προσαρμογή της άρδευσης βάσει των καιρικών συνθηκών. Ωστόσο, πολλές περιοχές δεν διαθέτουν τις απαραίτητες υπολογιστικές δυνατότητες ή τη συνδεσιμότητα που απαιτείται για την ανάλυση σε πραγματικό χρόνο (Reddy et al., 2021).

Ποικιλία (Variety): Τα γεωργικά δεδομένα εμφανίζονται σε διαφορετικά μορφότυπα, όπως δομημένα αρχεία (π.χ. χάρτες, πίνακες), ημιδομημένα (π.χ. XML) και αδόμητα (π.χ. εικόνες). Η συγχώνευση αυτών των δεδομένων απαιτεί σύνθετη προεπεξεργασία, τυποποίηση και καθαρισμό (Agmatix, 2024).

Ακρίβεια (Veracity): Σφάλματα βαθμονόμησης αισθητήρων, προβλήματα μετάδοσης ή μη συνεπής επισήμανση μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα. Συχνά απουσιάζουν αξιόπιστες διαδικασίες επικύρωσης και ελέγχου ποιότητας (Wolfert et al., 2017).

Περιορισμοί στις Υποδομές

Η ψηφιακή γεωργία βασίζεται σε αξιόπιστες υποδομές για τη συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο, την παροχή ενέργειας, την αποθήκευση δεδομένων και την τοπική επεξεργασία. Ωστόσο, πολλές αγροτικές περιοχές δεν διαθέτουν τα απαραίτητα συστήματα για την υποστήριξη αυτών των τεχνολογιών.

Συνδεσιμότητα: Σε πολλές γεωργικές περιοχές, η πρόσβαση στο διαδίκτυο είναι περιορισμένη, ασταθής ή ανύπαρκτη. Αυτό δυσχεραίνει τη χρήση πλατφορμών cloud, την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και τη λειτουργία συστημάτων IoT. Τεχνολογίες όπως

το LoRaWAN μπορούν να δώσουν μερική λύση, αλλά δεν υποστηρίζουν μετάδοση μεγάλων αρχείων, όπως εικόνες από drones ή βίντεο (Pagano et al., 2023).

Τοπική Επεξεργασία: Χωρίς τη χρήση συσκευών edge computing, τα αγροκτήματα βασίζονται σε αποστολή δεδομένων στο cloud για επεξεργασία. Αυτό προκαλεί καθυστερήσεις και δυσχεραίνει τη λήψη άμεσων αποφάσεων. Το κόστος και η τεχνική πολυπλοκότητα της εγκατάστασης τοπικών συστημάτων αποτελεί επιπλέον εμπόδιο (Simply NUC, 2024).

Αποθήκευση και Πρόσβαση: Οι πλατφόρμες cloud προσφέρουν ευελιξία και επεκτασιμότητα στην αποθήκευση δεδομένων, αλλά ενδέχεται να είναι ακριβές και να δημιουργούν ανησυχίες ως προς την ασφάλεια. Η χρήση διαφορετικών παρόχων λογισμικού μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα συμβατότητας και να αυξήσει το κόστος διαχείρισης (AgriTechTomorrow, 2024).

Παροχή Ενέργειας: Οι αισθητήρες και οι συσκευές πεδίου απαιτούν σταθερή και αξιόπιστη παροχή ρεύματος. Τα ηλιακά συστήματα έχουν βελτιώσει την αυτονομία πολλών εφαρμογών, αλλά η συντήρηση των μπαταριών και οι ακραίες καιρικές συνθήκες εξακολουθούν να αποτελούν προκλήσεις (AgriTechTomorrow, 2024).

Ιδιωτικότητα και Ιδιοκτησία Δεδομένων

Καθώς τα γεωργικά δεδομένα αποκτούν όλο και μεγαλύτερη αξία, εντείνονται οι ανησυχίες σχετικά με την ιδιοκτησία, την πρόσβαση και τη χρήση τους. Οι παραγωγοί συχνά συγκεντρώνουν μεγάλους όγκους δεδομένων μέσω διασυνδεδεμένων εργαλείων, αλλά ενδέχεται να μην έχουν τον έλεγχο του τρόπου αποθήκευσης ή αξιοποίησής τους από τρίτους.

Ασαφείς όροι χρήσης, κλειστά οικοσυστήματα και αδιαφανείς πρακτικές δεδομένων δημιουργούν κινδύνους. Σε πολλές περιπτώσεις, οι παραγωγοί δεν μπορούν να εξάγουν τα δεδομένα τους, να αποσύρουν την πρόσβαση ή να επωφεληθούν από τη συλλογική αξιοποίησή τους. Τα συγκεντρωτικά δεδομένα ενδέχεται να χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη προϊόντων ή για εμπορικές στρατηγικές τιμολόγησης, χωρίς τη συγκατάθεση των παραγωγών, δημιουργώντας ανταγωνιστικά μειονεκτήματα (Wolfert et al., 2017).

Οργανισμοί όπως η Open Ag Data Alliance (OADA) και ο Κώδικας Δεοντολογίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Κοινοχρησία Αγροτικών Δεδομένων προωθούν αρχές όπως η κυριότητα των δεδομένων, η συγκατάθεση και η διαφάνεια (FEFAC, 2020). Ωστόσο, η εφαρμογή αυτών των αρχών παραμένει μέχρι σήμερα άنيση και περιορισμένη.

Ασφάλεια Δεδομένων και Κίνδυνοι

Η αυξανόμενη χρήση ψηφιακών τεχνολογιών στη γεωργία συνοδεύεται από αυξημένο κίνδυνο για παραβιάσεις κυβερνοασφάλειας. Κάθε συνδεδεμένη συσκευή, από αισθητήρες μέχρι εφαρμογές κινητών, ενδέχεται να αποτελέσει σημείο εισόδου για κακόβουλες επιθέσεις.

Ευάλωτα Σημεία: Παρωχημένο λογισμικό, μη ασφαλή δίκτυα και ελλιπής έλεγχος πρόσβασης μπορούν να επιτρέψουν μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε συστήματα ή αλλοίωση δεδομένων (FirstPoint, 2024).

Συνέπειες: Παραβιάσεις ασφάλειας μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές, όπως απώλεια παραγωγής (π.χ. μέσω παραβιασμένων συστημάτων άρδευσης), οικονομικές απώλειες ή και νομικές επιπτώσεις, εάν διαρρεύσουν ευαίσθητα δεδομένα.

Καλές Πρακτικές: Η αντιμετώπιση αυτών των κινδύνων περιλαμβάνει τη χρήση κρυπτογράφησης, 2-factor authentication, ελέγχου πρόσβασης και τακτικών ενημερώσεων λογισμικού. Ωστόσο, πολλές γεωργικές εκμεταλλεύσεις δεν διαθέτουν την απαραίτητη τεχνογνωσία για τη σταθερή εφαρμογή αυτών των μέτρων, ενώ τα πρότυπα ασφάλειας ειδικά για τον γεωργικό τομέα είναι ακόμα υπό διαμόρφωση (Moldstud, 2024).

Προκλήσεις Ενοποίησης Δεδομένων

Η αποτελεσματική αξιοποίηση των γεωργικών δεδομένων προϋποθέτει τη διασύνδεση και το συνδυασμό πληροφοριών από διαφορετικές πλατφόρμες και πηγές. Ωστόσο, οι περισσότερες εκμεταλλεύσεις εξακολουθούν να βασίζονται σε κατακερματισμένα συστήματα που δεν συνεργάζονται εύκολα μεταξύ τους.

Τεχνικά Εμπόδια: Οι διαφορές σε μορφές αρχείων, μεταδεδομένα, μονάδες μέτρησης ή χρονικό και χωρικό συγχρονισμό δυσκολεύουν τη συγχώνευση των δεδομένων. Επιπλέον, πολλοί προμηθευτές λογισμικού περιορίζουν τη χρήση APIs ή επιτρέπουν μόνο μερική πρόσβαση, ενισχύοντας την απομόνωση των πληροφοριών.

Οργανωτικά Εμπόδια: Παραγωγοί, γεωπόνοι και ερευνητές συχνά χρησιμοποιούν διαφορετικές πλατφόρμες ή ακολουθούν ξεχωριστές διαδικασίες. Οι διαφορές στις ψηφιακές δεξιότητες και στην πρόσβαση σε τεχνολογία δυσκολεύουν περαιτέρω τη συνεργασία και την ανταλλαγή δεδομένων.

Νεότερες προσεγγίσεις, όπως οι ομοσπονδιακές πλατφόρμες δεδομένων και τα ανοικτά πρότυπα διαλειτουργικότητας, επιδιώκουν να βελτιώσουν τη συμβατότητα και να ενισχύσουν τον έλεγχο των παραγωγών στα δικά τους δεδομένα. Ωστόσο, η ευρύτερη υιοθέτηση αυτών των λύσεων απαιτεί όχι μόνο τεχνικές υποδομές αλλά και εμπιστοσύνη, συνεργασία και ενίσχυση των τοπικών ικανοτήτων.

Συμπεράσματα

Η διαχείριση των γεωργικών δεδομένων δεν αποτελεί απλώς μια τεχνική λεπτομέρεια, αλλά κεντρικό στοιχείο για την επιτυχία της ψηφιακής γεωργίας. Η διαλειτουργικότητα, ο όγκος και η ποιότητα των δεδομένων, η υποδομή, η προστασία της ιδιωτικότητας, η ασφάλεια και η ολοκληρωμένη χρήση αποτελούν σημαντικά εμπόδια που πρέπει να αντιμετωπιστούν ολιστικά. Η πλήρης αξιοποίηση του δυναμικού της ψηφιακής γεωργίας θα εξαρτηθεί από τις

επεκτάσιμες τεχνολογίες, τη συμπεριληπτική διακυβέρνηση και τα πλαίσια διαφάνειας που θα ενδυναμώνουν τους αγρότες προωθώντας παράλληλα την καινοτομία και τη βιωσιμότητα.

2.5. Εισαγωγή στην Αξιοπιστία Δεδομένων στη Γεωργία

Καθώς εξετάσαμε προηγουμένως τις κύριες τεχνολογίες και τα δεδομένα που αξιοποιούνται στη σύγχρονη γεωργία, γίνεται πλέον σαφές ότι η αξιοπιστία των δεδομένων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη λειτουργία και την αποτελεσματικότητα των ψηφιακών συστημάτων. Είτε προέρχονται από αισθητήρες πεδίου, δορυφορικές πλατφόρμες είτε από συστήματα διαχείρισης εκμεταλλεύσεων, τα γεωργικά δεδομένα πρέπει να παραμένουν ακριβή, συνεπή και αξιόπιστα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, από τη συλλογή και τη μετάδοση μέχρι την ανάλυση και τη λήψη αποφάσεων.

Η αξιοπιστία δεδομένων αναφέρεται στον βαθμό κατά τον οποίο τα δεδομένα διατηρούν την ακεραιότητά τους, τη συνέπειά τους και τη χρησιμότητά τους με την πάροδο του χρόνου και υπό διαφορετικές συνθήκες (IBM, 2024). Σε αντίθεση με συναφείς έννοιες, όπως η ποιότητα ή η εγκυρότητα των δεδομένων, που συχνά αξιολογούνται σε μια χρονική στιγμή, η αξιοπιστία δίνει έμφαση στη διαχρονική αξιοπιστία της πληροφορίας, ώστε να υποστηρίξει ουσιαστικές αποφάσεις ακόμη και όταν αλλάζει το πλαίσιο.

Στο πλαίσιο της ψηφιακής γεωργίας, τα προβλήματα από μη αξιόπιστα δεδομένα μπορεί να είναι σημαντικά: εσφαλμένες εφαρμογές εισροών, λανθασμένα προβλεπτικά μοντέλα και επιχειρησιακές δυσλειτουργίες. Η διασφάλιση της αξιοπιστίας αποτελεί θεμέλιο για την αποτελεσματική λειτουργία τεχνολογιών όπως οι εφαρμογές μεταβλητού ρυθμού, η αυτοματοποιημένη άρδευση και τα προβλεπτικά μοντέλα απόδοσης.

Δεδομένης της σημασίας της, η αξιοπιστία των δεδομένων πρέπει να προσεγγίζεται τόσο εννοιολογικά όσο και πρακτικά. Το επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζει μια αναλυτική επισκόπηση του τρόπου με τον οποίο ορίζεται και μετράται η αξιοπιστία σε διάφορους επιστημονικούς τομείς, με έμφαση στα σχετικά πλαίσια, δείκτες και προκλήσεις που αφορούν το γεωργικό περιβάλλον. Η επισκόπηση αυτή θα αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας αξιολόγησης της αξιοπιστίας δεδομένων σε συστήματα ψηφιακής γεωργίας.

3. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Όπως προαναφέρθηκε, η αξιοπιστία των δεδομένων στην ψηφιακή γεωργία αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας για τη λήψη αποτελεσματικών αποφάσεων και την επίτευξη βιώσιμης παραγωγής. Από την άρδευση και τη λίπανση έως την πρόσβαση σε χρηματοδότηση και την παρακολούθηση βιωσιμότητας, τα δεδομένα επηρεάζουν ένα ευρύ φάσμα δράσεων τόσο σε επίπεδο καλλιέργειας όσο και σε επίπεδο πολιτικής. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα, ο όγκος και η ετερογένεια των πηγών γεωργικών δεδομένων, όπως είναι οι αισθητήρες, οι δορυφόροι, οι χειροκίνητες εγγραφές και οι πλατφόρμες cloud, δημιουργούν σημαντικές προκλήσεις. Μη συμβατοί τύποι δεδομένων, αισθητήρες χαμηλού κόστους και ποιότητας, περιορισμένη συνδεσιμότητα και χειροκίνητη καταχώρηση απειλούν τη συνέπεια, την ακρίβεια και την αξιοπιστία των δεδομένων.

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει μια δομημένη επισκόπηση του τρόπου με τον οποίο η αξιοπιστία δεδομένων ορίζεται, αξιολογείται και εφαρμόζεται σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία, όπως στα συστήματα πληροφοριών, στην τηλεεπισκόπηση, στο IoT και στην υγειονομική περίθαλψη. Στόχος είναι να αναδειχθούν μεθοδολογικά εργαλεία και εννοιολογικές προσεγγίσεις που μπορούν να στηρίξουν την ανάπτυξη ενός πλαισίου αξιολόγησης της αξιοπιστίας δεδομένων στη γεωργία, το οποίο αναπτύσσεται στο Κεφάλαιο 4.

3.1. Έννοιες και ορισμοί

3.1.1. Διάκριση βασικών όρων

Η ποιότητα δεδομένων - quality ορίζεται ως ο βαθμός στον οποίο τα δεδομένα ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της προβλεπόμενης χρήσης, λαμβάνοντας υπόψη χαρακτηριστικά όπως η ακρίβεια, η πληρότητα, η επικαιρότητα και η συνέπεια (Gualo et al., 2021). Η ποιότητα αξιολογείται τόσο βάσει εσωτερικών χαρακτηριστικών (π.χ. ορθότητα, ακρίβεια) όσο και με βάση τη χρησιμότητά τους σε συγκεκριμένο πλαίσιο.

Η ακεραιότητα των δεδομένων - integrity αφορά τη διατήρηση της εσωτερικής δομής και συνοχής των δεδομένων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Εξασφαλίζει ότι τα δεδομένα δεν αλλοιώνονται κατά την εισαγωγή, τη μετάδοση ή την αποθήκευση, και σχετίζεται άμεσα με την ασφάλεια, την ιχνηλασιμότητα και την προστασία από μη εξουσιοδοτημένες παρεμβάσεις (Ismail et al., 2024).

Η εγκυρότητα - validity αφορά το κατά πόσο τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια το φαινόμενο που προορίζονται να μετρήσουν. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας μπορεί να δίνει συνεπή (αξιόπιστα) αποτελέσματα, αλλά αν δεν έχει βαθμονομηθεί σωστά, οι μετρήσεις του μπορεί να μην ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα (δηλαδή να είναι μη έγκυρες). Η εγκυρότητα συνδέεται με τη σημασιολογική ακρίβεια, δηλαδή με το κατά πόσο τα δεδομένα

αντικατοπτρίζουν σωστά τις πραγματικές συνθήκες και τα εννοιολογικά μοντέλα (Kahn et al., 2002).

Στην παρούσα εργασία, η αξιοπιστία - reliability αφορά τη σταθερότητα, τη συνέπεια και την αξιοπιστία των δεδομένων με την πάροδο του χρόνου και σε διαφορετικά συστήματα. Είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιβάλλοντα όπου οι αποφάσεις λαμβάνονται σε πραγματικό χρόνο ή όπου ακόμη και μικρά σφάλματα μπορούν να έχουν σημαντικές επιχειρηματικές ή οικονομικές επιπτώσεις. Ακόμα, η έλλειψη αξιοπιστίας μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τα μοντέλα πρόβλεψης, τα αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου και τη συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια.

Ο Ahituv (Agmon & Ahituv, 1987) ορίζει την αξιόπιστη πληροφορία ως εκείνη που είναι έγκαιρη, σχετική και ακριβής για τη λήψη αποφάσεων. Το μοντέλο αυτό συνεχίζει να είναι σημαντικό, ιδίως στον χώρο της επιχειρηματικής πληροφόρησης, όπου η χρονική καθυστέρηση και η αβεβαιότητα των δεδομένων είναι κρίσιμα ζητήματα. Ωστόσο, στη γεωργία, όπου εμφανίζονται φαινόμενα όπως η μετατόπιση αισθητήρων, η ασταθής συνδεσιμότητα και η ετερογένεια δεδομένων, η αξιοπιστία απαιτεί πιο ολιστική προσέγγιση.

3.1.2. Αξιοπιστία στο πλαίσιο των Μεγάλων Δεδομένων

Σε μεγάλης κλίμακας συστήματα που βασίζονται σε αισθητήρες και μεγάλα δεδομένα, η αξιοπιστία σχετίζεται με τις λεγόμενες “τέσσερις Vs”: όγκος, ταχύτητα, ποικιλία και ακρίβεια (volume, velocity, variety, veracity) (Laney, 2001). Οι ταχείες ροές δεδομένων από συσκευές IoT, δορυφορικά κανάλια και μηχανήματα δημιουργούν ιδιαίτερες προκλήσεις αξιοπιστίας, όπως:

- Αποσταθεροποίηση σημάτων από αισθητήρες πεδίου
- Απώλειες δεδομένων λόγω ασθενούς συνδεσιμότητας
- Ασυμβατότητα μορφότυπων μεταξύ διαφορετικών πηγών
- Ελλιπή μεταδεδομένα που δυσκολεύουν την ερμηνεία.

Σε αυτά τα περιβάλλοντα, η αξιοπιστία δεν μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη. Πρέπει να μετράται, να επαληθεύεται και να αξιολογείται όσον αφορά τον σκοπό χρήσης, είτε πρόκειται για χαμηλού κινδύνου αναλύσεις τάσεων είτε για κρίσιμες παρεμβάσεις, όπως η δοσολογία λιπασμάτων ή η αξιολόγηση πιστοληπτικής ικανότητας.

3.1.3. Η κρίσιμη σημασία της αξιοπιστίας δεδομένων στην γεωργία

Η ροή πληροφοριών που τροφοδοτεί τα συστήματα ψηφιακής γεωργίας ενισχύει τη δυνατότητα λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων, όμως εγείρει σοβαρές ανησυχίες σχετικά με την αξιοπιστία των δεδομένων που στηρίζουν τις εν λόγω αποφάσεις. Σε αντίθεση με

ελεγχόμενα περιβάλλοντα, τα αγροτικά δεδομένα είναι κατακερματισμένα, ετερογενή και συχνά ευάλωτα σε ασυνέπειες και απώλειες.

- Σφάλματα αισθητήρων: Αισθητήρες πεδίου, όπως οι ανιχνευτές υγρασίας εδάφους και οι μετεωρολογικοί σταθμοί, είναι ευάλωτοι σε μετατόπιση μετρήσεων (drift), σφάλματα βαθμονόμησης και φθορά εξαιτίας περιβαλλοντικών συνθηκών. Οι μη ομοιογενείς προδιαγραφές εξοπλισμού και η περιορισμένη συντήρηση επιδεινώνουν το πρόβλημα (Byabazaire et al., 2023).
- Περιορισμένη συνδεσιμότητα: Πολλές γεωργικές δραστηριότητες εκτελούνται σε απομακρυσμένες ή αγροτικές περιοχές με ασθενές ή διακοπτόμενο σήμα διαδικτύου. Η ροή δεδομένων από συσκευές IoT μπορεί να καθυστερήσει, να χαθεί ή να μεταφερθεί μερικώς, ιδίως όταν η τοπική αποθήκευση είναι ανεπαρκής και υπάρχει υψηλή εξάρτηση από συγχρονισμό με το υπολογιστικό νέφος (Omar et al., 2020), (Navarro et al., 2020).
- Κατακερματισμός δεδομένων: Τα δεδομένα αποθηκεύονται συχνά σε απομονωμένα συστήματα, τα μηχανολογικά δεδομένα στις πλατφόρμες των κατασκευαστών, οι δορυφορικές εικόνες σε τρίτους παρόχους και τα χειρόγραφα ημερολόγια σε φύλλα excel ή τετράδια. Αυτός ο κατακερματισμός οδηγεί σε ασυνεπή ενοποίηση, έλλειψη μεταδεδομένων και δυσκολίες ευθυγράμμισης μεταξύ συνόλων δεδομένων (Navarro et al., 2020).
- Χειροκίνητη καταγραφή: Όπως έχουμε δει στο κεφάλαιο 2.4.1, πολλές σημαντικές εγγραφές, όπως ημερομηνίες σποράς, θεραπείες ή συγκομιδές, εισάγονται χειροκίνητα από γεωργούς ή εργάτες. Αυτά τα δεδομένα συχνά δεν ακολουθούν τυποποιημένη δομή και μπορεί να παρουσιάζουν ασάφειες ή ανακρίβειες, ειδικά όταν τα εργαλεία καταγραφής είναι ακατάλληλα ή χρησιμοποιούνται με λανθασμένο τρόπο (García-Pedrero et al., 2019; Paraforos et al., 2017).
- Περιβαλλοντική μεταβλητότητα: Διαφορές στο μικρόκλιμα, στη σύσταση του εδάφους ή στο ανάγλυφο δημιουργούν χωρική και χρονική μεταβλητότητα στα δεδομένα. Χωρίς αξιόπιστα εργαλεία συλλογής και συνεπή χωρική και χρονική ανάλυση, γίνεται δύσκολη η διάκριση του πραγματικού σήματος από τον «θόρυβο» (Lake et al., 1997; Nyéki & Neményi, 2022; Pierce & Nowak, 1999).

Οι παραπάνω προκλήσεις καθιστούν δύσκολη την ενοποίηση, την ερμηνεία και την αξιοποίηση των γεωργικών δεδομένων. Ένα μόνο σφάλμα, όπως ένας εσφαλμένα βαθμονομημένος αισθητήρας ή μια λανθασμένη εγγραφή, μπορεί να επηρεάσει τα dashboards, τα μοντέλα ανάλυσης και τα αυτοματοποιημένα συστήματα, οδηγώντας σε λανθασμένες ή ακόμη και επικίνδυνες αποφάσεις.

3.2. Πλαίσια αξιοπιστίας και ποιότητας δεδομένων

3.2.1. Βασικά πλαίσια ποιότητας δεδομένων

Η καθιέρωση πλαισίων για την αξιολόγηση της ποιότητας και της αξιοπιστίας των δεδομένων αποτελεί βασικό σημείο αναφοράς της επιστήμης δεδομένων και της έρευνας στον τομέα της διαχείρισης πληροφοριών. Οι κατευθυντήριες αρχές FAIR για τη διαχείριση και διαχείριση επιστημονικών δεδομένων (Wilkinson et al., 2016) έχουν αναδειχθεί ως ένα θεμελιώδες πλαίσιο που τονίζει ότι τα δεδομένα πρέπει να είναι:

- Findable (Εντοπίσιμα): Τα δεδομένα και τα μεταδεδομένα τους πρέπει να διαθέτουν σταθερούς αναγνωριστικούς κωδικούς και να περιγράφονται μέσω πλούσιων μεταδεδομένων, ευρετηριασμένων σε συστήματα αναζήτησης.
- Accessible (Προσβάσιμα): Τα δεδομένα θα πρέπει να είναι ανακτήσιμα μέσω τυποποιημένων πρωτοκόλλων, ακόμα και αν απαιτείται περιορισμένη πρόσβαση.
- Interoperable (Διαλειτουργικά): Τα δεδομένα πρέπει να χρησιμοποιούν πρότυπες μορφές αρχείων, λεξιλόγια και οντολογίες, ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν και να αλληλεπιδρούν με άλλα σύνολα δεδομένων και συστήματα.
- Reusable (Επαναχρησιμοποιήσιμα): Τα δεδομένα πρέπει να είναι επαρκώς τεκμηριωμένα, αδειοδοτημένα και εμπλουτισμένα με πληροφορίες προέλευσης, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά σε μελλοντική έρευνα ή για σκοπούς λήψης αποφάσεων.

Μέσω των παραπάνω αρχών παρέχεται μια δομημένη προσέγγιση διαχείρισης δεδομένων, η οποία αντιμετωπίζει εγγενώς το ζήτημα της αξιοπιστίας με τη θέσπιση σαφών προδιαγραφών για την τεκμηρίωση των δεδομένων, τα μεταδεδομένα και τα πρωτόκολλα προσβασιμότητας.

Το πλαίσιο ποιότητας δεδομένων της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Στατιστικής Μεθοδολογίας (FCSM) (Dworak-Fisher et al., 2020) συνιστά μια ολοκληρωμένη μέθοδο εκτίμησης της ποιότητας δεδομένων, καθορίζοντας βασικές διαστάσεις, όπως:

- Συνάφεια (Relevance): Ο βαθμός στον οποίο τα δεδομένα καλύπτουν τις τρέχουσες και μελλοντικές ανάγκες των χρηστών.
- Ακρίβεια (Accuracy): Η εγγύτητα μεταξύ της τιμής ενός δεδομένου και της πραγματικής (αληθούς) τιμής.
- Πληρότητα (Completeness): Εάν όλα τα απαιτούμενα δεδομένα είναι παρόντα.
- Επικαιρότητα (Timeliness): Εάν τα δεδομένα είναι διαθέσιμα όταν χρειάζονται.
- Προσβασιμότητα (Accessibility): Ο βαθμός ευκολίας με τον οποίο οι χρήστες μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση στα δεδομένα.

- **Συνοχή και Συγκρισιμότητα (Coherence and Comparability):** Η συνέπεια των δεδομένων διαχρονικά, μεταξύ πηγών και μεταξύ διαφορετικών τομέων.

Το εν λόγω πλαίσιο έχει υιοθετηθεί ευρέως σε διάφορους τομείς και θέτει μετρήσιμα κριτήρια για την αξιολόγηση αξιοπιστίας των δεδομένων. Η αξία του έγκειται στη συστηματική του προσέγγιση στον προσδιορισμό των δεικτών ποιότητας και στην καθιέρωση πρωτοκόλλων μέτρησης που μπορούν να προσαρμοστούν στις ειδικές απαιτήσεις κάθε τομέα.

Σημαντική συμβολή στα πλαίσια ποιότητας των δεδομένων έχουν και οι μεγάλοι διεθνείς οργανισμοί. Το πλαίσιο διασφάλισης της ποιότητας στατιστικής του FAO (FAO SQAF) (FAO, 2014) αφορά ειδικά τα γεωργικά δεδομένα και τα δεδομένα επισιτιστικής ασφάλειας, παρέχοντας κατευθυντήριες γραμμές ανά τομέα για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των δεδομένων στη γεωργική στατιστική και βασίζεται σε έξι διαστάσεις ποιότητας:

- **Συνάφεια (Relevance):** Τα δεδομένα πρέπει να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των χρηστών.
- **Ακρίβεια και Αξιοπιστία (Accuracy and Reliability):** Τα δεδομένα πρέπει να αντανakλούν με ακρίβεια τα φαινόμενα που επιδιώκουν να μετρήσουν.
- **Επικαιρότητα και Τήρηση Προθεσμιών (Timeliness and Punctuality):** Τα δεδομένα πρέπει να δημοσιεύονται εντός χρονικού πλαισίου που διατηρεί τη χρησιμότητά τους.
- **Συνοχή και Συγκρισιμότητα (Coherence and Comparability):** Τα δεδομένα πρέπει να είναι συνεπή διαχρονικά και συγκρίσιμα μεταξύ περιοχών ή συνόλων δεδομένων.
- **Προσβασιμότητα και Κατανόηση (Accessibility and Clarity):** Τα δεδομένα πρέπει να είναι εύκολα διαθέσιμα και να παρουσιάζονται με σαφήνεια.
- **Θεσμικό Περιβάλλον (Institutional Environment):** Δίνεται έμφαση στη διακυβέρνηση, την επαγγελματική ανεξαρτησία και την αμεροληψία των στατιστικών αρχών.

Το τελευταίο αυτό πλαίσιο αναγνωρίζει τις ιδιαίτερες προκλήσεις των αγροτικών δεδομένων, όπως είναι η εποχική μεταβλητότητα, η χωρική κατανομή και η πολυπλοκότητα των συστημάτων ψηφιακής γεωργίας.

3.2.2.Πλαίσια διακυβέρνησης επιχειρηματικών δεδομένων

Το πλαίσιο DAMA-DMBOK (Ismail et al., 2024) αντιπροσωπεύει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη διακυβέρνηση δεδομένων και περιλαμβάνει την αξιοπιστία των δεδομένων ως βασική συνιστώσα. Το συγκεκριμένο πλαίσιο τονίζει τη σημασία της δομής, των ρόλων και των αρμοδιοτήτων της διακυβέρνησης δεδομένων για τη διατήρηση της ποιότητας και της αξιοπιστίας των δεδομένων σε όλα τα συστήματα ενός οργανισμού. Η ολιστική προσέγγιση του πλαισίου καλύπτει τις τεχνικές, διαδικαστικές και οργανωτικές πτυχές της διαχείρισης

δεδομένων, αναγνωρίζοντας ότι η αξιοπιστία τους δεν είναι απλώς μια τεχνική πρόκληση, αλλά απαιτεί ολοκληρωμένες δομές διακυβέρνησης.

Οι βιομηχανικές εφαρμογές των πλαισίων ποιότητας δεδομένων έχουν αποδείξει την πρακτική εφαρμογή θεωρητικών εννοιών. Το πρότυπο ISO/IEC 25012 σχετικά με την πιστοποίηση της ποιότητας δεδομένων (Gualo et al., 2021) παρέχει μετρήσιμα κριτήρια για την αξιολόγηση της ποιότητας δεδομένων στο πλαίσιο της βιομηχανίας. Το πρότυπο αυτό έχει εφαρμοστεί σε διάφορους κλάδους, δίνοντας πληροφορίες για τις πρακτικές προκλήσεις και τα οφέλη των επίσημων διαδικασιών πιστοποίησης της ποιότητας δεδομένων.

3.3. Αξιοπιστία δεδομένων σε άλλους τομείς

3.3.1. Υγεία και ιατρικές εφαρμογές

Ο τομέας της υγείας έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στην αντιμετώπιση των προκλήσεων αξιοπιστίας δεδομένων, ιδιαίτερα όσον αφορά τα ηλεκτρονικά ιατρικά αρχεία και τα δεδομένα από ιατρικές συσκευές. Έρευνες σχετικά με την αξιοπιστία δεδομένων από ηλεκτροεγκεφαλογραφήματα σε παιδιατρικούς ασθενείς (Xu et al., 2024) έχουν αναπτύξει ολοκληρωμένα εργαλεία για την εκτίμηση της αξιοπιστίας, της επίδρασης μεγέθους (effect size), αλλά και δείκτες ποιότητας δεδομένων. Τα εργαλεία αυτά προσφέρουν τυποποιημένες μεθοδολογίες αξιολόγησης της αξιοπιστίας πολύπλοκων παθοφυσιολογικών δεδομένων και μπορούν δυνητικά να προσαρμοστούν σε γεωργικά συστήματα αισθητήρων.

Η αξιοπιστία δεδομένων που προέρχονται φορητές συσκευές (Hu et al., 2024) έχει αναδειχθεί επίσης ως κρίσιμο ζήτημα, καθώς τα συστήματα υγείας χρησιμοποιούν ψηφιακές συσκευές παρακολούθησης υγείας όλο και περισσότερο. Η σχετική έρευνα έχει εντοπίσει βασικές προκλήσεις όπως η απόκλιση βαθμονόμησης, οι περιβαλλοντικές παρεμβολές και η συμπεριφορά των χρηστών, παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία των δεδομένων. Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν για την αντιμετώπιση αυτών των θεμάτων στην υγειονομική περίθαλψη προσφέρουν χρήσιμα διδάγματα για τις γεωργικές εφαρμογές IoT, όπου εντοπίζονται παρόμοια προβλήματα βαθμονόμησης και περιβαλλοντικής επίδρασης.

Επιπλέον, η αξιοπιστία των δεδομένων από ερωτηματολόγια στον τομέα της υγείας (Meltzer & Hochstim, 1970) έχει αντιμετωπιστεί με την ανάπτυξη πρωτοκόλλων που διασφαλίζουν τη συνέπεια και την εγκυρότητα των πληροφοριών που καταχωρούνται χειροκίνητα. Τα πρωτόκολλα αυτά συνοδεύονται από προκλήσεις όπως η προκατάληψη στις απαντήσεις, η χρονική συνέπεια και η επικύρωση έναντι αντικειμενικών μετρήσεων. Οι εν λόγω μέθοδοι θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν και στο πλαίσιο της γεωργίας, όπου τα δεδομένα παραγωγών που περνώνται χειροκίνητα αποτελούν σημαντικό μέρος των γεωργικών πληροφοριακών συστημάτων.

Τέλος, η αξιοπιστία δεδομένων από βιοτράπεζες και ομικές μελέτες (Antona et al., 2025) είναι επίσης κρίσιμη, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο την ερευνητική αξιοπιστία όσο και τις κλινικές εφαρμογές. Η αξιολόγηση μεθόδων κρυοσυντήρησης και η επίδρασή τους στην

ακεραιότητα βιοδεικτών αναδεικνύει τη σημασία της συστηματικής ανάλυσης του τρόπου συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων. Τα ευρήματα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τη γεωργία, όπου η μακροχρόνια διατήρηση δεδομένων απαιτεί αντίστοιχα υψηλά πρότυπα αξιοπιστίας.

3.3.2.Χρηματοοικονομικά και λογιστικά συστήματα

Έρευνες στον χώρο των λογιστικών πληροφοριακών συστημάτων (Krishnan et al., 2005) έχουν αναπτύξει ολοκληρωμένες προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της ακρίβειας, της πληρότητας και της συνέπειας των οικονομικών δεδομένων. Οι προσεγγίσεις αυτές δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στη σημασία των εσωτερικών ελέγχων, της ιχνηλασιμότητας και των διαδικασιών επικύρωσης, προκειμένου να διασφαλίζεται η αξιοπιστία των δεδομένων.

Η εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στον τομέα της ασφάλισης ζωικού κεφαλαίου (Shen et al., 2023) αποτελεί ακόμα ένα καινοτόμο παράδειγμα αξιοποίησης καταναμεμένων μητρώων για τη βελτίωση της αξιοπιστίας δεδομένων. Η σχετική έρευνα δείχνει πώς αναδυόμενες τεχνολογίες μπορούν να ενισχύσουν την αξιοπιστία των δεδομένων μέσω αμετάβλητων εγγραφών και διαφανούς ιχνηλασιμότητας σχετικά με την προέλευση της πληροφορίας. Η χρήση της τεχνολογίας blockchain σε δεδομένα γεωργικής ασφάλισης προσφέρει ένα πρότυπο που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την ενίσχυση της αξιοπιστίας των δεδομένων σε ευρύτερα γεωργικά χρηματοοικονομικά συστήματα.

3.3.3.Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και τεχνικά συστήματα

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) προσφέρει σημαντικές δυνατότητες, αλλά και προκλήσεις στον τομέα της αξιοπιστίας δεδομένων. Η βιβλιογραφία γύρω από την αξιοπιστία σε δίκτυα IoT (Singh et al., 2025) έχει αναδείξει εργαλεία και τεχνικές για την αντιμετώπιση ζητημάτων όπως οι αστοχίες επικοινωνίας, η φθορά των αισθητήρων και οι δυσκολίες συγχρονισμού. Τα εν λόγω ζητήματα είναι ιδιαίτερα συναφή με την αγροτική παραγωγή, όπου τα δίκτυα αισθητήρων συχνά λειτουργούν κάτω από μεταβαλλόμενες ή δύσκολες συνθήκες.

Συστήματα που βασίζονται σε ηλιακή ενέργεια, όπως τα ηλιακά δίκτυα αισθητήρων (Yang et al., 2009), έχουν μελετηθεί εκτενώς σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους. Το σύστημα SolarStore, για παράδειγμα, δείχνει πώς η σωστή διαχείριση ενέργειας και η αποδοτική αποθήκευση δεδομένων μπορούν να εξασφαλίσουν την αξιοπιστία, ακόμα και όταν η τροφοδοσία είναι ασταθής. Τέτοιες προσεγγίσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για απομακρυσμένες αγροτικές περιοχές όπου η συνεχής λειτουργία αισθητήρων δεν είναι δεδομένη.

Ακόμη πιο ακραίες είναι οι συνθήκες που αντιμετωπίζουν τα υποβρύχια δίκτυα IoT (B. Jiang et al., 2024), τα οποία έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη πλαισίων αξιοπιστίας και ασφάλειας που διασφαλίζουν την ακεραιότητα των δεδομένων σε ιδιαίτερα περιβάλλοντα. Τα ευρήματα

από αυτές τις εφαρμογές μπορούν να αξιοποιηθούν και σε αγροτικά συστήματα που λειτουργούν υπό δύσκολες καιρικές ή περιβαλλοντικές συνθήκες.

Καθώς η αποθήκευση δεδομένων μεταβαίνει όλο και περισσότερο σε υποδομές cloud, η αξιοπιστία στο νέφος (Alzahrani et al., 2022) είναι πιο επίκαιρη από ποτέ. Υβριδικές προσεγγίσεις ενίσχυσης της αξιοπιστίας στην αποθήκευση στο υπολογιστικό νέφος προσφέρουν λύσεις απέναντι στον πλεονασμό δεδομένων, τις στρατηγικές εναλλακτικής αποθήκευσης, και την ανοχή και προσαρμογή σε λάθη του συστήματος.

Τέλος, έρευνες γύρω από την αξιοπιστία του συστήματος αυτόματου εντοπισμού AIS (Harati-Mokhtari et al., 2007) ανέδειξαν τον ρόλο του ανθρώπινου παράγοντα στα σφάλματα καταγραφής και διαχείρισης δεδομένων. Τα συμπεράσματα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα και για τη γεωργία, όπου μεγάλο μέρος των δεδομένων προέρχεται από χειροκίνητη εισαγωγή, με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την ποιότητα και την ακρίβειά τους.

3.4. Ποιότητα και αξιοπιστία γεωργικών δεδομένων

3.4.1. Εφαρμογές στην γεωργία ακριβείας

Μεθοδολογικές προτάσεις για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας της πληροφορίας στις αλυσίδες λήψης αποφάσεων της γεωργίας ακριβείας, όπως την (Mazzetto & Sacco, 2019) έχουν θεμελιώσει ολοκληρωμένα πλαίσια για την αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, από τη συλλογή έως τη λήψη αποφάσεων. Τα εν λόγω πλαίσια αντιμετωπίζουν την πολυπλοκότητα των συστημάτων γεωργίας ακριβείας, στα οποία πολλαπλές πηγές δεδομένων, αλγόριθμοι επεξεργασίας και εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων πρέπει να λειτουργούν συντονισμένα ώστε να παρέχουν αξιόπιστες πληροφορίες για τη διαχείριση των αγροτεμαχίων.

Η αξιοπιστία των δεδομένων από συστήματα παρακολούθησης απόδοσης (yield monitors) (Jensen et al., 2016) αποτελεί επίσης κρίσιμο στοιχείο για τη γεωργία ακριβείας, καθώς οι ακριβείς μετρήσεις απόδοσης είναι απαραίτητες για την κατάρτιση χαρτών πεδίου και τον καθορισμό ζωνών διαχείρισης. Η σχετική έρευνα έχει αναπτύξει μεθοδολογίες για την αξιολόγηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας αυτών των δεδομένων, περιλαμβάνοντας διαδικασίες βαθμονόμησης, αλγόριθμους ανίχνευσης σφαλμάτων και πρωτόκολλα επαλήθευσης. Οι προσεγγίσεις αυτές αντιμετωπίζουν συνήθεις πηγές σφάλματος, όπως η μετατόπιση βαθμονόμησης των αισθητήρων, οι περιορισμοί στην ακρίβεια GPS και τα σφάλματα που προκαλούνται από τον χειριστή τους κάθε φορά.

Η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μηχανοποιημένων καλλιεργητικών εργασιών (Lovarelli & Bacenetti, 2017) έχει επίσης τονίσει τη σημασία της αξιόπιστης συλλογής δεδομένων για την κατανόηση των περιβαλλοντικών συνεπειών της γεωργικής δραστηριότητας. Η εν λόγω έρευνα τονίζει το χάσμα που υπάρχει μεταξύ των υφιστάμενων δυνατοτήτων συλλογής δεδομένων και των απαιτήσεων για αξιόπιστη περιβαλλοντική

αποτίμηση, παρουσιάζοντας ευκαιρίες για τη βελτίωση της αξιοπιστίας των δεδομένων με σκοπό την υποστήριξη βιώσιμων γεωργικών πρακτικών.

3.4.2.Συστήματα IoT και αισθητήρων στη γεωργία

Έρευνες σχετικά με την ακρίβεια και την αξιοπιστία των IoT συστημάτων στη γεωργία ακριβείας (Omar et al., 2020) έχουν διαμορφώσει ολοκληρωμένες προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της απόδοσης των αισθητήρων σε αγροτικά περιβάλλοντα. Οι εν λόγω προσεγγίσεις λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαίτερες προκλήσεις που παρουσιάζουν οι γεωργικές εφαρμογές IoT, όπως η περιβαλλοντική παρεμβολή, η αποδοτική διαχείριση ενέργειας και η αξιοπιστία επικοινωνίας σε απομακρυσμένες περιοχές.

Γενικά μοντέλα αξιολόγησης αξιοπιστίας για αγροτικά δίκτυα IoT (Thiam et al., 2021) έχουν προτείνει τεχνικές για την εκτίμηση της συνολικής αξιοπιστίας σε πολύπλοκα δίκτυα αισθητήρων. Οι συγκεκριμένες τεχνικές εστιάζουν στις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των κόμβων αισθητήρων, των συστημάτων επικοινωνίας και των μηχανισμών επεξεργασίας δεδομένων που συνθέτουν τα σύγχρονα γεωργικά συστήματα IoT. Οι προσεγγίσεις αξιολόγησης που έχουν αναπτυχθεί προσφέρουν πρακτικά εργαλεία για τους σχεδιαστές και τους διαχειριστές τέτοιων συστημάτων.

Οι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες που εγκαθίστανται απευθείας στο πεδίο (Saha et al., 2023) αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία αισθητήρων, στην οποία οι προκλήσεις αξιοπιστίας είναι ακόμα πιο έντονες. Η σχετική βιβλιογραφία έχει παρουσιάσει νέα πρότυπα αξιοπιστίας ανίχνευσης σε αγροτικά περιβάλλοντα, αντιμετωπίζοντας ζητήματα όπως η φθορά των αισθητήρων, οι μετατοπίσεις βαθμονόμησης και οι εξωτερικές παρεμβολές. Οι προσεγγίσεις που έχουν προταθεί για την αξιοπιστία αυτών των αισθητήρων παρέχουν χρήσιμες γνώσεις που μπορούν να επεκταθούν και σε άλλες κατηγορίες γεωργικών αισθητήρων.

Η ανάλυση αξιοπιστίας από άκρο σε άκρο (end-to-end) (Kamyod, 2018) καλύπτει ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός αγροτικού συστήματος IoT, από την εγκατάσταση των αισθητήρων μέχρι την ανάλυση δεδομένων και τη λήψη αποφάσεων. Αυτή η ολιστική προσέγγιση αναγνωρίζει ότι η αξιοπιστία των δεδομένων εξαρτάται από την εύρυθμη λειτουργία όλων των επιμέρους στοιχείων ενός συστήματος και των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Τα σχετικά πλαίσια δίνουν πρακτικά εργαλεία για τον εντοπισμό αδυναμιών και την αξιοποίηση ευκαιριών βελτιστοποίησης σε κάθε στάδιο του συστήματος.

3.4.3.Διαχείριση συστημάτων γεωργικών δεδομένων

Στην έρευνα των (FAO, 2021) για τα συστήματα διαχείρισης και διαμοιρασμού αγροτικών δεδομένων έχουν ασχοληθεί με τις ευρύτερες προκλήσεις που αφορούν την ενοποίηση και τη διαλειτουργικότητα των γεωργικών πληροφοριακών συστημάτων. Συγκεκριμένα, η έρευνα έχει αναδείξει βασικά προβλήματα, όπως η έλλειψη προτυποποίησης δεδομένων, οι ανησυχίες ιδιωτικότητας και οι απαιτήσεις ενσωμάτωσης μεταξύ ετερογενών συστημάτων. Οι προσεγγίσεις που έχουν αναπτυχθεί για τη διαχείριση δεδομένων σε επίπεδο αγροκτημάτων

προσφέρουν λύσεις που ενισχύουν την αξιοπιστία των δεδομένων σε ποικίλα γεωργικά πληροφοριακά περιβάλλοντα.

Η διακυβέρνηση των γεωργικών δεδομένων (Devare et al., 2023) έχει επίσης αναδειχθεί ως κρίσιμο πεδίο, όπου συγκλίνουν οι πολιτικές, οι τεχνολογικές εξελίξεις και οι αγροτικές πρακτικές. Η βιβλιογραφία εντοπίζει βασικές προκλήσεις και διατυπώνει προτάσεις για τη ρύθμιση των γεωργικών πληροφοριακών συστημάτων, με έμφαση σε θέματα όπως η κυριότητα των δεδομένων, η προστασία της ιδιωτικότητας και η διασφάλιση της ποιότητας. Τα σχετικά πλαίσια διακυβέρνησης προσφέρουν ολιστικές προσεγγίσεις για την ενίσχυση της αξιοπιστίας τόσο σε τεχνολογικό όσο και σε θεσμικό επίπεδο.

Επιπλέον, οι εφαρμογές ανάλυσης μεγάλων δεδομένων στη γεωργία (Kamilaris et al., 2017) έχουν εστιάσει στις δυσκολίες διατήρησης της αξιοπιστίας κατά την επεξεργασία εκτεταμένων γεωργικών συνόλων δεδομένων. Η εν λόγω έρευνα εντοπίζει στοιχεία που σχετίζονται με την ενοποίηση δεδομένων, την εκτίμηση ποιότητας και τα πρωτόκολλα επαλήθευσης. Οι αναπτυγμένες προσεγγίσεις στην ίδια έρευνα παρέχουν πρακτικά εργαλεία για τη διατήρηση της αξιοπιστίας σε διαδικασίες μεγάλης κλίμακας.

Η ποιότητα δεδομένων στις γεωργικές εφαρμογές (Malaverri & Medeiros, 2012) έχει αποτελέσει αντικείμενο συστηματικής μελέτης, με την ανάπτυξη ολοκληρωμένων μεθοδολογιών για την αξιολόγηση και τη βελτίωσή της σε διάφορα αγροτικά περιβάλλοντα. Η σχετική εργασία προσφέρει πρακτικά εργαλεία και τεχνικές αξιολόγησης που ανταποκρίνονται στις ειδικές απαιτήσεις του αγροτικού τομέα και συμβάλλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της συνολικής αξιοπιστίας των γεωργικών δεδομένων.

3.4.4. Αξιολόγηση αξιοπιστίας δεδομένων στη γεωργία

Η αξιοπιστία των δεδομένων που αφορούν την παραγωγή των καλλιεργειών (Sadras et al., 2014) έχει μελετηθεί μέσα από εμπειρικές μελέτες σε βασικές αγροτικές περιοχές, προσφέροντας χρήσιμες πληροφορίες για τις προκλήσεις που επηρεάζουν τα γεωργικά στατιστικά στοιχεία και την πρόβλεψη της παραγωγής. Οι μελέτες αυτές εντοπίζουν κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία, όπως οι μεθοδολογίες δειγματοληψίας, τα συστήματα αναφοράς και οι διαδικασίες επαλήθευσης.

Η αξιοπιστία των δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας στον γεωργικό τομέα (Sant & Dixit, 1997) εστιάζει στις ιδιαίτερες δυσκολίες που σχετίζονται με την καταγραφή και τη χρήση ενεργειακών δεδομένων στις αγροτικές δραστηριότητες. Η σχετική έρευνα αναδεικνύει καθοριστικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια και την πληρότητα των δεδομένων αυτών, προτείνοντας βελτιωμένες προσεγγίσεις για τη συλλογή και την επαλήθευσή τους.

Τέλος, έρευνα αξιοπιστίας ΤΠΕ για τη γεωργία (Harivallabha et al., 2016) έχει αναπτύξει ολοκληρωμένα πλαίσια για την αξιολόγηση και ενίσχυση της αξιοπιστίας των συστημάτων πληροφορικής και επικοινωνιών στα αγροτικά περιβάλλοντα. Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαίτερες απαιτήσεις και τους περιορισμούς των γεωργικών ΤΠΕ, προσφέροντας

πρακτικά εργαλεία για τον σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη συντήρηση αξιόπιστων πληροφοριακών συστημάτων.

3.4.5. Θεσμικές πρωτοβουλίες

Διεθνείς πρωτοβουλίες όπως το πρόγραμμα 50x2030 (Villarino et al., 2022) έχουν ασχοληθεί με τις γενικότερες προκλήσεις που αφορούν τα γεωργικά στατιστικά δεδομένα και τα συστήματα πληροφόρησης σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι δράσεις αυτές αναγνωρίζουν τον κομβικό ρόλο της αξιόπιστης γεωργικής πληροφόρησης στην αντιμετώπιση της επισιτιστικής ασφάλειας και εισάγουν πλήρη πλαίσια για τη βελτίωση των αγροτικών δεδομένων διεθνώς.

Παράλληλα, προσπάθειες για την ενίσχυση των γεωργικών πληροφοριακών συστημάτων (Carletto, 2021) εστιάζουν στον εντοπισμό εφαρμόσιμων στρατηγικών για τη βελτίωση της ποιότητας και της αξιοπιστίας των δεδομένων στον αγροτικό τομέα. Οι πρωτοβουλίες αυτές δίνουν έμφαση στη σημασία του συντονισμού μεταξύ τεχνολογικών παρόχων, αγροτικών οργανώσεων και φορέων χάραξης πολιτικής, ώστε να αντιμετωπιστούν οι πολυεπίπεδες προκλήσεις αξιοπιστίας με συλλογικό και συστηματικό τρόπο.

3.5. Κενά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία και ευκαιρίες

Παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί σε επιμέρους τομείς όπως η γεωργία ακριβείας, τα συστήματα IoT και η διακυβέρνηση δεδομένων, το πεδίο της αξιοπιστίας γεωργικών δεδομένων παραμένει αποσπασματικό και ελλιπώς ενοποιημένο. Αν και βασικά θεωρητικά πλαίσια, όπως οι αρχές FAIR, οι οδηγίες FCSM και τα πρότυπα ISO/IEC 25012, προσφέρουν σταθερό υπόβαθρο (Dworak-Fisher et al., 2020; FAO, 2014; Gualo et al., 2021; Ismail et al., 2024; Wilkinson et al., 2016), η εφαρμογή τους στη γεωργία είναι συχνά μερική ή περιορισμένη. Η πρόοδος που έχει επιτευχθεί σε επιλεγμένα πεδία, όπως η παρακολούθηση γεωργικής απόδοσης (yield monitoring) (Jensen et al., 2016), η αξιολόγηση αξιοπιστίας αισθητήρων (Kamyod, 2018; Omar et al., 2020; Saha et al., 2023; Thiam et al., 2021) και συστημάτων διαμοιρασμού δεδομένων (FAO, 2021), δεν επαρκεί για τη διασφάλιση αξιόπιστων δεδομένων στο σύνολο των συστημάτων ψηφιακής γεωργίας.

Ένα από τα σημαντικότερα κενά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία αφορά την ενοποίηση και την τυποποίηση. Τα υπάρχοντα πλαίσια αξιολόγησης επικεντρώνονται συνήθως σε απομονωμένες συνιστώσες, όπως συγκεκριμένοι τύποι αισθητήρων ή μεμονωμένες μετρήσεις ποιότητας, χωρίς να προσφέρουν ενιαίες προσεγγίσεις που να διασφαλίζουν την αξιοπιστία στο σύνολο των δεδομένων. Καθώς η ψηφιακή γεωργία γίνεται όλο και πιο περίπλοκη, συνδυάζοντας δεδομένα από αισθητήρες, δορυφόρους, γεωργικά μηχανήματα και χειροκίνητες εισαγωγές, η ανάγκη για συνεκτικά πλαίσια αξιοπιστίας είναι πιο επιτακτική από ποτέ (DLG, 2018), (Elijah et al., 2018).

Παράλληλα, εντοπίζονται θεσμικά και πολιτικά κενά που περιορίζουν την εφαρμογή αξιόπιστων συστημάτων στην πράξη. Στρατηγικές για τη γεωργική στατιστική (Eurostat, 2015) επισημαίνουν την απουσία προσαρμοσμένων προτύπων ποιότητας δεδομένων που να

λαμβάνουν υπόψη τις εποχικές, γεωγραφικές και παραγωγικές ιδιαιτερότητες της γεωργίας. Επίσης, η αξιοπιστία των δεδομένων σπάνια ενσωματώνεται σε εθνικές πολιτικές, με αποτέλεσμα το ερευνητικό έργο να μην μεταφράζεται σε θεσμικά εργαλεία ή χρηματοδοτικά κίνητρα (Woodard et al., 2019).

Ένα ακόμη κρίσιμο πεδίο είναι η περιβαλλοντική και βιώσιμη διάσταση της αξιοπιστίας. Αν και τα δεδομένα παραγωγής βρίσκονται συχνά στο επίκεντρο των γεωργικών εφαρμογών, η αξιολόγηση της αξιοπιστίας περιβαλλοντικών δεικτών, όπως οι εκπομπές ρύπων, η χρήση υδάτινων πόρων ή η προστασία της βιοποικιλότητας, παραμένει σε δεύτερη μοίρα (Rozenstein et al., 2024). Αυτό περιορίζει τη δυνατότητα διαφανούς και τεκμηριωμένης αξιολόγησης βιώσιμων πρακτικών, σε μια εποχή όπου οι απαιτήσεις ESG εντείνονται.

Όσον αφορά το μέλλον, η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση και η τεχνολογία blockchain δημιουργούν νέες ευκαιρίες για την ενίσχυση της αξιοπιστίας, αλλά ταυτόχρονα επιφέρουν νέες τεχνικές και ρυθμιστικές προκλήσεις. Η υφιστάμενη βιβλιογραφία δεν έχει ακόμη καλύψει επαρκώς τις απαιτήσεις αξιοπιστίας που προκύπτουν από την αυξανόμενη χρήση προγνωστικών αλγορίθμων και σύνθετων αναλυτικών εργαλείων στη γεωργία (Luycx & Reins, 2022).

Τα παραπάνω διατομεακά κενά, σε τεχνικό, θεσμικό, περιβαλλοντικό και τεχνολογικό επίπεδο, αναδεικνύουν την ανάγκη για προσαρμοσμένα, ενοποιημένα πλαίσια αξιολόγησης, τα οποία θα μπορούν να εφαρμόζονται από το επίπεδο του αγρού έως τα συστήματα υπολογιστικού νέφους, και από την κανονιστική συμμόρφωση έως την καθημερινή λήψη αποφάσεων των παραγωγών. Οι μελλοντικές έρευνες θα πρέπει να εστιάσουν στον συλλογικό σχεδιασμό τέτοιων πλαισίων, με τη συμμετοχή ειδικών τεχνολογίας, αγροτών και υπευθύνων πολιτικής, ώστε να διασφαλιστεί τόσο η μεθοδολογική αρτιότητα όσο και η πρακτική χρησιμότητα.

Η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων της ψηφιακής γεωργίας δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθεσιμότητα δεδομένων, αλλά κυρίως από την εμπιστοσύνη, την επαληθευσιμότητα και την καταλληλότητά τους για λήψη αποφάσεων. Η κάλυψη των παραπάνω κενών είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να μη μετατραπεί η αξιοπιστία σε εμπόδιο, αλλά σε μοχλό προόδου για τη γεωργία του μέλλοντος.

4. Σχεδιασμός πλαισίου αξιολόγησης της αξιοπιστίας δεδομένων

4.1. Ορισμός της αξιοπιστίας δεδομένων στην γεωργία

Καθώς τα ψηφιακά εργαλεία καθίστανται αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης γεωργικής πρακτικής, αναδεικνύεται η ανάγκη για συστηματική αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της χρησιμότητας των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για κάθε δραστηριότητα ή απόφαση. Από αιτήσεις δανειοδότησης και υπολογισμούς εκπομπών άνθρακα έως την ακριβή διαχείριση της άρδευσης, η ποιότητα των δεδομένων επηρεάζει καθοριστικά την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των ψηφιακών εφαρμογών.

Τα συμβατικά πλαίσια αξιολόγησης ποιότητας δεδομένων εστιάζουν κυρίως σε γενικά χαρακτηριστικά, όπως η πληρότητα ή η επικαιρότητα. Ωστόσο, συχνά δεν απαντούν στο ερώτημα: είναι τα διαθέσιμα δεδομένα επαρκή και κατάλληλα για τη λήψη μιας συγκεκριμένης απόφασης; Το ζήτημα αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο στον αγροτικό τομέα, όπου τα δεδομένα εμφανίζονται κατακερματισμένα, συλλέγονται σε ετερογενείς μορφές και χρησιμοποιούνται σε απολύτως εξειδικευμένα επιχειρησιακά συμφραζόμενα.

Σε αυτό το πλαίσιο, η αξιοπιστία των δεδομένων επαναπροσδιορίζεται ως η καταλληλότητά τους για τη λήψη μιας συγκεκριμένης απόφασης. Με άλλα λόγια, τίθεται το ερώτημα: είναι τα δεδομένα επαρκώς ακριβή, συναφή και επίκαιρα ώστε να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τη συγκεκριμένη απόφαση, στο αντίστοιχο λειτουργικό περιβάλλον; Ένα dataset μπορεί να θεωρείται πχ. πλήρως αξιόπιστο για τον σχεδιασμό της σποράς και της άρδευσης σε μια καλλιεργητική περίοδο, αλλά να αποδεικνύεται ανεπαρκές όταν χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του ανθρακικού αποτυπώματος.

4.1.1. Αξιολόγηση γεωργικών δεδομένων: Πεδίο εφαρμογής και προσέγγιση

Ο Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (Data Reliability Index - DRI) αξιολογεί συγκεκριμένα στοιχεία, δηλαδή ομάδες συναφών πληροφοριών για την υποστήριξη ενός συγκεκριμένου μέρους μιας απόφασης. Για παράδειγμα, μπορεί να απαιτούνται οικονομικά στοιχεία τριετίας για αίτηση χρηματοδότησης, ενώ καθημερινά στοιχεία άρδευσης ενδέχεται να είναι απαραίτητα για ασφαλιστικούς ή περιβαλλοντικούς ελέγχους. Κάθε τέτοιο στοιχείο δεδομένων έχει διαφορετικές απαιτήσεις αξιοπιστίας, ανάλογα με τη χρήση του.

Αυτή η λεπτομερής, προσανατολισμένη στην περίπτωση χρήσης προσέγγιση επιτρέπει στοχευμένες αξιολογήσεις, πιο ουσιαστικές από τους γενικούς δείκτες ποιότητας που έχουν μελετηθεί έως τώρα. Αντανακλά την ευρέως αποδεκτή αρχή ότι η καταλληλότητα για χρήση εξαρτάται από την εκάστοτε περίπτωση χρήσης, μια θεμελιώδης έννοια τόσο στη λήψη αποφάσεων όσο και στη σύγχρονη βιβλιογραφία περί διακυβέρνησης δεδομένων (Dworak-Fisher et al., 2020).

Το πλαίσιο αξιολογεί κάθε στοιχείο δεδομένων βάσει τεσσάρων διαφορετικών διαστάσεων:

- Όγκος (Volume)
- Συχνότητα (Frequency)
- Ποικιλία (Variety)
- Ποιότητα και Αξιοπιστία Πηγής (Quality and Source Trustworthiness)

Οι διαστάσεις αυτές προέκυψαν μέσω τεχνικής συνεργασίας με τις εταιρείες Dataphoria και Inagros, συνδυάζοντας την επιχειρηματική εμπειρία από αγροτικές ψηφιακές πλατφόρμες με την ανατροφοδότηση ενδιαφερόμενων φορέων και τις πραγματικές ανάγκες λήψης αποφάσεων στον κλάδο. Ο σχεδιασμός του πλαισίου στηρίχθηκε επίσης σε καθιερωμένα ακαδημαϊκά και τεχνικά πρότυπα ποιότητας δεδομένων (NIST, 2023).

4.1.2. Αρχές σχεδιασμού

Ο Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI) βασίζεται σε διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα ποιότητας δεδομένων, προσαρμόζοντάς τα στις ανάγκες της ψηφιακής γεωργίας. Ενσωματώνει τις αρχές FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) (Wilkinson et al., 2016), μετατρέποντάς τις σε λειτουργική δομή που εξυπηρετεί άμεσα τη λήψη αποφάσεων.

- Η διάσταση Όγκος (Volume) δεν αφορά μόνο την ύπαρξη των δεδομένων (ευρεσιμότητα), αλλά και το αν ο όγκος τους είναι επαρκής για να στηρίξει την εκάστοτε απόφαση.
- Η Ποικιλία (Variety) αποτυπώνει τη διαλειτουργικότητα, εξετάζοντας αν οι πηγές μπορούν να ενσωματωθούν και να διασταυρωθούν.
- Η Ποιότητα (Quality) αξιολογεί όχι μόνο την τεχνική ακρίβεια, αλλά και το αν τα δεδομένα είναι προσβάσιμα, αξιοποιήσιμα και αξιόπιστα.

Σε αντίθεση με γενικά πλαίσια που προωθούν την επαναχρησιμοποίηση δεδομένων για κάθε πιθανή χρήση, ο DRI επικεντρώνεται στο κατά πόσο τα δεδομένα είναι αξιόπιστα και αξιοποιήσιμα σε αποφάσεις υψηλής σημασίας, όπως η υποβολή αίτησης για δάνειο ή η επιβεβαίωση ενός ισχυρισμού για εκπομπές άνθρακα σε μια έκθεση βιωσιμότητας.

Το πλαίσιο αντλεί επιπλέον επιρροές από την Federal Committee on Statistical Methodology (FCSM), η οποία περιγράφει βασικές διαστάσεις ποιότητας δεδομένων (Dworak-Fisher et al., 2020). Στο πλαίσιο του DRI:

- Η Ακρίβεια διευρύνεται ώστε να λαμβάνει υπόψη τυπικές γεωργικές αβεβαιότητες (π.χ. Δεδομένα που καταχωρούνται χειροκίνητα, θόρυβος αισθητήρων).
- Η Πληρότητα ορίζεται με βάση τις ανάγκες της κάθε απόφασης και όχι με βάση αυθαίρετα πρότυπα.

- Η Επικαιρότητα μετασχηματίζεται σε Συχνότητα (Frequency), δίνοντας έμφαση σε σταθερή, ευθυγραμμισμένη με τη λήψη αποφάσεων, συλλογή δεδομένων.

Ο DRI ενσωματώνει επίσης λογική που είναι ειδικές για τον αγροτικό τομέα: λαμβάνει υπόψη την εποχικότητα, την ποικιλία στις μεθόδους συλλογής και το γεγονός ότι κάθε τύπος απόφασης βασίζεται σε διαφορετικά χαρακτηριστικά των δεδομένων. Αυτό το επίπεδο προσαρμογής είναι σπάνιο στα γενικά πρότυπα ποιότητας αλλά απολύτως αναγκαίο στη γεωργία, όπου η χρήση μη αξιόπιστων δεδομένων μπορεί να έχει άμεσες και ουσιαστικές επιπτώσεις.

Η παρούσα έρευνα έχει σκοπίμως θεωρητικό χαρακτήρα. Στόχος της είναι να θεμελιώσει μια καθαρή και ευέλικτη δομή για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας δεδομένων σε αγροτικά συστήματα. Αντί να προσφέρει ένα πλήρως επικυρωμένο εργαλείο, παρέχει το εννοιολογικό και μεθοδολογικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο μπορούν να βασιστούν μελλοντικές δοκιμές, βελτιώσεις και ενσωμάτωση σε πλατφόρμες υποστήριξης γεωργικών αποφάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, υποστηρίζει τόσο την επιστημονική έρευνα όσο και την πρακτική καινοτομία στη διακυβέρνηση γεωργικών δεδομένων.

4.2. Πολυδιάστατο Μοντέλο Αξιολόγησης Αξιοπιστίας

4.2.1. Αρχιτεκτονική

Ο Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI) αξιολογεί τη γεωργική πληροφορία βάσει τεσσάρων βασικών διαστάσεων: Όγκος Δεδομένων, Συχνότητα εισαγωγής δεδομένων, Ποικιλία Δεδομένων και Ποιότητα & Εμπιστοσύνη στην Πηγή. Οι διαστάσεις αυτές αποτυπώνουν τους κρίσιμους παράγοντες που καθορίζουν κατά πόσο ένα σύνολο δεδομένων είναι κατάλληλο για να υποστηρίξει μια συγκεκριμένη απόφαση, όπως η έγκριση δανείου, η εκτίμηση εκπομπών άνθρακα ή η παρακολούθηση της χρήσης εισροών.

Το πολυδιάστατο αυτό μοντέλο αναπτύχθηκε μέσω συνδυασμού ακαδημαϊκής έρευνας και πρακτικής συνεργασίας με τις Dataphoria και Inagros, δύο οργανισμούς με δραστηριότητα σε ψηφιακές γεωργικές πλατφόρμες και αναφορές ESG. Η συμβολή τους εξασφάλισε ότι το πλαίσιο αντανακλά όχι μόνο τεχνικά πρότυπα αλλά και τις πραγματικές προκλήσεις και προτεραιότητες λήψης αποφάσεων που αντιμετωπίζουν οι χρήστες γεωργικών δεδομένων (Basso & Antle, 2020).

Κάθε διάσταση αποτιμά μια διαφορετική πτυχή της αξιοπιστίας: πόσα δεδομένα υπάρχουν, πόσο συχνά συλλέγονται, πόσες πηγές συνεισφέρουν, και πόσο ακριβή και τεκμηριωμένη είναι η προέλευσή τους. Αν και κάθε διάσταση αποτελεί αυτόνομο δείκτη, το πλαίσιο DRI τις συνδυάζει για να παράγει μια σύνθετη βαθμολογία που αποτυπώνει τη συνολική καταλληλότητα ενός συνόλου δεδομένων για μια συγκεκριμένη απόφαση.

Για να προσαρμόζεται σε διαφορετικούς τύπους δεδομένων, το μοντέλο υποστηρίζει:

- Τυπική ενσωμάτωση, όπου και οι τέσσερις διαστάσεις περιλαμβάνονται στη συνολική βαθμολογία αξιοπιστίας, (Basso & Antle, 2020) και
- Προσαρμοσμένη ενσωμάτωση, όπου μία ή περισσότερες διαστάσεις εξαιρούνται αν δεν είναι εφαρμόσιμες. Για παράδειγμα, στατικά σύνολα δεδομένων (π.χ. μητρώα αγροτεμαχίων) δεν απαιτούν αξιολόγηση συχνότητας, ενώ δεδομένα από μια μόνο πηγή (π.χ. λογαριασμοί κοινής ωφέλειας) ενδέχεται να μην επωφελούνται από αξιολόγηση ποικιλίας.

Αυτή η ευέλικτη αρχιτεκτονική επιτρέπει την εφαρμογή του μοντέλου σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων χρήσης, χωρίς να θίγεται η σαφήνεια ή η αμεροληψία στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Pirino et al., 2002).

4.2.2. Όγκος: Επάρκεια και πληρότητα εγγραφών

Η διάσταση του Όγκου αξιολογεί κατά πόσο υπάρχει επαρκής ποσότητα δεδομένων για τη στήριξη μιας συγκεκριμένης απόφασης. Απαντά στο βασικό ερώτημα: «Πόσα δεδομένα είναι διαθέσιμα και πόσο πλήρη είναι;» Το ερώτημα αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο στη γεωργία, όπου οι ελλειπείς εγγραφές ή τα ημιτελή αρχεία μπορούν να μειώσουν σημαντικά την αξιοπιστία των αποφάσεων (Pan et al., 2023).

Η βαθμολογία αξιοπιστίας αντικατοπτρίζει δύο συνιστώσες: τον αριθμό των διαθέσιμων εγγραφών και τον βαθμό στον οποίο έχουν συμπληρωθεί τα απαιτούμενα πεδία εντός αυτών. Ο ακόλουθος τύπος τα αποτυπώνει και τα δύο:

$$V_{\text{score}} = \min\left(1, \frac{\text{actual_records}}{\text{required_records}}\right) \times \left(\frac{\text{populated_fields}}{\text{required_fields}}\right) \times 10$$

Η συνάρτηση $\min$ διασφαλίζει ότι η ύπαρξη υπερβολικού αριθμού εγγραφών δεν «φουσκώνει» τη βαθμολογία, δίνοντας έμφαση κυρίως στην επάρκεια και όχι στην ποσότητα. Αυτό, διότι ακόμη και εκτενή σύνολα δεδομένων μπορεί να είναι αναξιόπιστα εάν λείπουν κρίσιμα πεδία.

Η αξιολόγηση του όγκου είναι ιδιαιτέρως σημαντική σε γεωργικά περιβάλλοντα, όπου η συλλογή δεδομένων περιορίζεται συχνά από εποχιακούς κύκλους, ανεπαρκείς υποδομές ή την μεταβλητή συμμόρφωση των παραγωγών. Για παράδειγμα:

- Στην αξιολόγηση πιστοληπτικής ικανότητας, ενδέχεται να απαιτούνται τρία έτη οικονομικών στοιχείων με τουλάχιστον 90% πληρότητα στα απαραίτητα πεδία.
- Στην παρακολούθηση κινδύνου σε πραγματικό χρόνο, η προτεραιότητα είναι η συνεχής ή σχεδόν πλήρης ημερήσια καταγραφή, όπως για δεδομένα καιρού ή αισθητήρων.

- Στην αναφορά ESG, η αξιοπιστία του όγκου μπορεί να εξαρτάται από την αντιπροσωπευτική κάλυψη των αγροτεμαχίων ή των εκμεταλλεύσεων, ακόμη κι αν τα δεδομένα δεν καταγράφονται σε καθημερινή βάση (Chaterji et al., 2020).

Καθεμία από τις παραπάνω περιπτώσεις χρήσης συνεπάγεται διαφορετικά όρια ως προς το τι θεωρείται «επαρκές» σύνολο δεδομένων. Το πλαίσιο DRI επιτρέπει την προσαρμογή αυτών των απαιτήσεων ανάλογα με την απόφαση, ορίζοντάς τις εξαρχής κατά την αξιολόγηση.

4.2.3. Συχνότητα: Επάρκεια και χρονική συνέπεια καταγραφής

Η διάσταση της Συχνότητας μετρά το πόσο συχνά συλλέγονται τα δεδομένα και κατά πόσο αυτά καταγράφονται σε τακτά και συνεπή χρονικά διαστήματα. Απαντά στο ερώτημα: «Καταγράφονται τα δεδομένα αρκετά συχνά και με σταθερό ρυθμό ώστε να στηρίξουν την εκάστοτε απόφαση;»

Διαφορετικές γεωργικές αποφάσεις απαιτούν διαφορετικό χρονικό βάθος ανάλυσης. Ο στρατηγικός σχεδιασμός ενδέχεται να αρκείται σε ετήσια δεδομένα, ενώ ο έλεγχος άρδευσης σε πραγματικό χρόνο μπορεί να απαιτεί ωριαίες μετρήσεις. Και στις δύο περιπτώσεις, η αξιοπιστία δεν εξαρτάται μόνο από την ποσότητα των δεδομένων, αλλά και από το κατά πόσο αυτά συλλέγονται με σταθερό ρυθμό.

Η βαθμολογία συχνότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$F_{\text{score}} = \min\left(1, \frac{\text{expected_frequency}}{\text{actual_frequency}}\right) \times \text{consistency_factor} \times 100$$

όπου:

- actual_frequency είναι ο αριθμός των καταγραφών μέσα σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (π.χ. ανά μήνα ή σεζόν),
- expected_frequency ορίζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της απόφασης,
- consistency_factor είναι το ποσοστό των καταγραφών που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στον χρόνο (π.χ. ημερήσιες ή εβδομαδιαίες) ως προς το σύνολο των διαστημάτων, ώστε να εντοπίζονται κενά ή συγκεντρωμένα επεισόδια καταγραφής (Waldner et al., 2019).

Αυτή η δομή εξασφαλίζει ότι η βαθμολογία αντικατοπτρίζει τόσο τη συχνότητα όσο και τη συνέπεια της συλλογής δεδομένων. Για παράδειγμα, 200 μετρήσεις υγρασίας εδάφους σε μια καλλιεργητική περίοδο μπορεί να θεωρηθούν επαρκείς, εφόσον οι 180 είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες. Αντίθετα, αν υπάρξουν 10 καταγραφές μέσα σε μία εβδομάδα και καμία για έναν μήνα, η βαθμολογία μειώνεται.

Η συλλογή γεωργικών δεδομένων επηρεάζεται συχνά από την εποχικότητα και κάποιους λειτουργικούς περιορισμούς. Το DRI λαμβάνει υπόψη αυτήν την ιδιαιτερότητα, διακρίνοντας ανάμεσα σε αναμενόμενα εποχικά μοτίβα (π.χ. αδράνεια κατά τον χειμώνα) και τυχαία κενά που μπορεί να υποδηλώνουν βλάβες αισθητήρων ή σφάλματα καταγραφής (Yunis et al., 2024).

Ενδεικτικά παραδείγματα απαιτήσεων συχνότητας περιλαμβάνουν:

- Παρακολούθηση πιστοληπτικής ικανότητας, όπου μηνιαίες ενημερώσεις μπορεί να είναι επαρκείς για τα περισσότερα χρηματοοικονομικά μεγέθη.
- Τιμολόγηση ασφαλιστικών κινδύνων, όπου απαιτείται συνεπής συλλογή μετεωρολογικών δεδομένων στη διάρκεια κρίσιμων περιόδων.
- Περιβαλλοντική συμμόρφωση, όπου ενδέχεται να απαιτείται συνεχής καταγραφή για την παρακολούθηση εκπομπών, ακόμη κι αν οι σχετικές αναφορές υποβάλλονται ανά τρίμηνο (Nguyen et al., 2025).

Μετρώντας τόσο τη συχνότητα όσο και τη χρονική συνέπεια, το DRI βοηθά τους εμπλεκόμενους φορείς να κατανοήσουν κατά πόσο τα δεδομένα τους μπορούν να στηρίξουν με αξιόπιστο και έγκαιρο τρόπο τις αποφάσεις που καλούνται να λάβουν.

4.2.4.Ποικιλία: Ετερογένεια και τύποι δεδομένων

Η διάσταση της Ποικιλίας αξιολογεί εάν υπάρχουν διαθέσιμοι πολλαπλοί και συναφείς τύποι δεδομένων για τη στήριξη μιας συγκεκριμένης απόφασης. Απαντά στο ερώτημα: «Πόσοι διαφορετικοί τύποι δεδομένων περιλαμβάνονται και κατα πόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά;»

Πολλές γεωργικές αποφάσεις απαιτούν περισσότερα από έναν τύπο πληροφορίας. Για παράδειγμα, η αξιολόγηση της βιωσιμότητας μιας εκμετάλλευσης μπορεί να προϋποθέτει τον συνδυασμό οικονομικών στοιχείων, γεωργικών πρακτικών, μετεωρολογικών δεδομένων και αρχείων αξιοποίησης εισροών. Αν λείπουν βασικές κατηγορίες δεδομένων ή δεν μπορούν να ενσωματωθούν λειτουργικά, η αξιοπιστία της απόφασης μειώνεται (Cravero et al., 2022).

Η βαθμολογία ποικιλίας υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Var}_{\text{score}} = \left(\frac{\text{available_data_types}}{\text{required_data_types}} \right) \times 100$$

Η συγκεκριμένη βαθμολογία δίνει έμφαση στο εύρος και όχι στο βάθος. Με άλλα λόγια, είναι προτιμότερο να υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι συναφών δεδομένων παρά μεγάλοι όγκοι ενός μόνο τύπου. Αν, για παράδειγμα, μια περιβαλλοντική αναφορά απαιτεί τόσο μετεωρολογικά όσο και εδαφικά δεδομένα, η ύπαρξη μόνο του ενός, όσο εκτενής και αν είναι, δεν θεωρείται επαρκής.

Οι βασικές κατηγορίες γεωργικών δεδομένων περιλαμβάνουν συνήθως:

- Λειτουργικά Δεδομένα (π.χ. αποδόσεις καλλιεργειών, χρήση εισροών)
- Οικονομικά Δεδομένα (π.χ. έσοδα, δαπάνες)
- Περιβαλλοντικά Δεδομένα (π.χ. καιρός, έδαφος, εκπομπές)
- Δεδομένα Αγοράς (π.χ. τιμές, ζήτηση)

Κάθε απόφαση ορίζει τις δικές της «απαιτούμενες κατηγορίες» και η βαθμολογία βασίζεται στο πόσες από αυτές είναι παρούσες (Malaverri & Medeiros, 2012).

Πέρα από τη διαθεσιμότητα, το πλαίσιο λαμβάνει υπόψη και τη δυνατότητα λειτουργικής ενσωμάτωσης. Ακόμα και αν δύο τύποι δεδομένων είναι τεχνικά διαθέσιμοι, ενδέχεται να είναι δύσχρηστοι σε συνδυασμό, λόγω διαφορών στη μορφοποίηση, στη χρονική σήμανση ή στην ανάλυση των γεωχωρικών δεδομένων. Για παράδειγμα, δορυφορικές εικόνες με ανάλυση 10 μέτρων ίσως να μην ευθυγραμμίζονται εύκολα με αρχεία εφαρμογών εισροών σε επίπεδο αγροτεμαχίου, εκτός αν υπάρχουν συγχρονισμένες γεωαναφορές. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η δυσκολία ενσωμάτωσης μειώνει την ουσιαστική βαθμολογία της ποικιλίας (Ngo et al., 2019).

Εστιάζοντας τόσο στην ετερογένεια των δεδομένων όσο και στη διαλειτουργικότητα στην πράξη, το DRI βοηθά τους ενδιαφερόμενους να αξιολογήσουν κατά πόσο τα συστήματα δεδομένων τους μπορούν να υποστηρίξουν σύνθετες, πολυπαραγοντικές αποφάσεις χωρίς κενά ή ασυμβατότητες.

4.2.5. Ποιότητα και εμπιστοσύνη στην πηγή: ακρίβεια και αξιοπιστία προέλευσης

Αυτή η διάσταση αξιολογεί τόσο την τεχνική ακρίβεια των δεδομένων όσο και την αξιοπιστία της πηγής τους (Malaverri & Medeiros, 2012). Απαντά στο κρίσιμο ερώτημα: «Πόσο ακριβή είναι τα δεδομένα και κατά πόσο μπορούμε να εμπιστευτούμε την προέλευσή τους;»

Η τελική βαθμολογία προκύπτει μέσω σταθμισμένου υπολογισμού που συνδυάζει και τις δύο πτυχές:

$$QT_{score} = (Accuracy_{score} \times 0.6) + (Source_{trustworthiness} \times 0.4)$$

όπου:

$$Accuracy_{score} = (1 - error_{rate}) \times 100$$

Αυτή η στάθμιση αντανakλά τόσο τις προτεραιότητες των ενδιαφερομένων, όσο και τη μεθοδολογική συνέπεια με καθιερωμένα πρότυπα όπως τα USDA-NIST (NIST, 2023), τα οποία καθοδηγούν τη μοντελοποίηση εμπιστοσύνης σε συστήματα IoT και βιωσιμότητας στη γεωργία.

Αξιολόγηση ακρίβειας

Η ακρίβεια αποτιμάται με μεθόδους προσαρμοσμένες στον τύπο δεδομένων και συγκρίσεις με αξιόπιστες αναφορές. Ενδεικτικά παραδείγματα:

- Καταγραφές GPS μπορούν να επαληθευτούν με βάση επίσημα όρια αγροτεμαχίων ή εγκεκριμένους χάρτες.
- Αναγνώσεις αισθητήρων (π.χ. υγρασία εδάφους) συγκρίνονται με αποτελέσματα εργαστηριακών αναλύσεων ή βαθμονομημένα πρότυπα.
- Χειροκίνητες εγγραφές (π.χ. κατανάλωση καυσίμων) διασταυρώνονται με τιμολόγια ή αναμενόμενα πρότυπα χρήσης.

Ο συντελεστής σφάλματος (error rate) υπολογίζεται βάσει της απόκλισης από την αξιόπιστη αναφορά, εφόσον αυτή είναι διαθέσιμη (Malaverri & Medeiros, 2012).

Κατάταξη εμπιστοσύνης στην πηγή

Κάθε τύπος πηγής δεδομένων κατατάσσεται με βάση μια βασική βαθμολογία εμπιστοσύνης, η οποία προκύπτει από την ιστορική αξιοπιστία και τις δυνατότητες επαλήθευσης και επικύρωσης (U.S. Department of Agriculture, 2021). Ενδεικτικά παραδείγματα:

- Δημόσια διαθέσιμα δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς και πιστοποιημένες εργαστηριακές αναλύσεις λαμβάνουν βαθμολογίες άνω των 90.
- Καταχωρήσεις από παραγωγούς ή μη βαθμονομημένοι αισθητήρες τυπικά βαθμολογούνται μεταξύ 50-70, λόγω αυξημένης μεταβλητότητας και περιορισμένης ιχνηλασιμότητας.
- Τιμολόγια συνδυασμένα με γεωεντοπισμένα αρχεία (π.χ. εφαρμογές λιπασμάτων) συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 80-85, αντικατοπτρίζοντας μέτρια έως υψηλή αξιοπιστία.

Αναλυτικός πίνακας κατάταξης πηγών ανά κατηγορία δεδομένων παρατίθεται στον Πίνακα 4.1, με οδηγίες βαθμολόγησης για τύπους όπως δεδομένα εδάφους, μετεωρολογικά αρχεία, χρήση καυσίμων, καταγραφές καλλιεργειών και απομακρυσμένη παρατήρηση, βάσει τεκμηρίωσης, βαθμονόμησης και προτύπων ιχνηλασιμότητας (Wikipedia Contributors, 2025b).

Data Category	Source Type	Trustworthiness Score	Notes / Rationale	Citations
---------------	-------------	-----------------------	-------------------	-----------

Soil Data	Certified laboratory analysis	95	Official labs follow standardized sampling, calibration, and QA protocols	(Carter & Gregorich, 2007; FAO, 2006)
	Commercial third-party sampling services	85	Less transparent QA but generally reliable	(Adamchuk et al., 2004; Y. Ge et al., 2011)
	Farmer-collected or self-tested samples	65	No calibration or documentation; high user-dependent error margin	(Jensen et al., 2016; Stiles et al., 2011)
Weather Data	Government weather stations (e.g., NOA, EMA)	95	High accuracy, professionally maintained, quality-controlled	(FAO, 2014; Omar et al., 2020)
	Certified private weather services	90	Comparable to public stations, with transparent calibration procedures	(Mazzetto & Sacco, 2019)
	On-farm calibrated stations	80	Reliable if sensor drift is managed and metadata exists	(Byabazaire et al., 2023)
	On-farm uncalibrated sensors	65	High variability, poor documentation, prone to drift	(Saha et al., 2023)
Fuel / Energy Data	Utility bills / digital meters	90	Independently issued and auditable	(Moore & Rutherford, 2020)
	Equipment GPS logs (validated)	85	High accuracy but may lack full context (e.g., idle vs. operational)	(Kos & Kloppenburg, 2019)
	Manual logs or handwritten fuel diaries	60	Prone to human error, delays, and intentional omissions	(Gourlay et al., 2019)
Crop Data	Certified yield monitors	85	Calibrated machinery-based sensors	(Fulton, 2015; Jensen et al., 2016)
	Farmer-entered digital logs	70	Some standardization, but not always traceable	(Tey & Brindal, 2012)
	Paper-based records	50	No traceability, no timestamps, unverifiable	(Gourlay et al., 2019)
Fertilizer & Chemicals	Purchase invoice + GPS-linked application logs	85	Verifiable origin and use; often required for compliance	(Clark et al., 2025; OECD, 2024)

	Sensor-based application data	75	Reliable but sensitive to calibration and maintenance	(Hagn et al., 2025; J. Liu et al., 2023)
	Farmer-reported applications	55	Often unverified, inconsistent format	(Wollburg et al., 2021; Yacoubou Djima & Kilic, 2021)
Remote Sensing Data	Sentinel-2 / Landsat (Level 2/3 processing)	90	Standardized by international agencies, high processing transparency	(Drusch et al., 2012; US Geological Survey, 2024)
	Commercial satellite NDVI platforms	85	Strong QA, often used in finance/insurance	(Darabi et al., 2025; Planet Labs, 2024)
	Raw NDVI from unknown tools	70	Unclear source or processing method	(Almalki et al., 2022; H. Zhang et al., 2020)
Sensor Networks	Calibrated IoT sensors (e.g., soil moisture)	80	Dependable if calibration and connectivity are stable	(Omar et al., 2020; Thiam et al., 2021)
	Commercial mid-grade ag sensors	75	Widely used in digital farming platforms; generally accurate but may suffer from battery, placement, or communication limitations	(Kamyod, 2018; Saha et al., 2023)
	Consumer-grade or non-calibrated sensors	60	Susceptible to signal drift, inconsistent placement, and environmental interference; limited validation procedures	(Bainbridge et al., 2011; Tzounis et al., 2017)

Πίνακας 4.1: Βαθμολογίες εμπιστοσύνης σε πηγές δεδομένων

4.3. Καθορισμός προτεραιοτήτων: Ποια δεδομένα έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα;

Ενώ οι τέσσερις βασικές διαστάσεις επιτρέπουν την αξιολόγηση της εσωτερικής αξιοπιστίας των δεδομένων, η τελική βαθμολογία πρέπει επίσης να αντικατοπτρίζει τη σημασία κάθε επιμέρους στοιχείου για τη συγκεκριμένη απόφαση. Αυτό απαιτεί τη χρήση συμφραζόμενων για τη λήψη απόφασης μέσω στοχευμένης στάθμισης, η οποία εισάγεται στην παρούσα ενότητα.

4.3.1.Προσδιορισμός Συντελεστών Επίδρασης Απόφασης

Δεν είναι όλα τα δεδομένα εξίσου σημαντικά για τη λήψη γεωργικών αποφάσεων. Ένα αρχείο κατανάλωσης καυσίμων, για παράδειγμα, μπορεί να είναι κρίσιμο σε μια αναφορά εκπομπών GHG, αλλά να έχει ελάχιστη σημασία σε μια αξιολόγηση πιστοληπτικής ικανότητας. Για την αντιμετώπιση αυτής της διαφοροποίησης, το πλαίσιο DRI εισάγει τους Συντελεστές Επίδρασης Απόφασης, ένα δομημένο σύστημα ποσοτικοποίησης της κρισιμότητας κάθε δεδομένου για τη λήψη μιας συγκεκριμένης απόφασης.

Οι συντελεστές αυτοί προσαρμόζουν το βάρος κάθε επιμέρους στοιχείου στη συνολική βαθμολογία αξιοπιστίας, επιτρέποντας στο πλαίσιο να αποτυπώνει με ακρίβεια τις προτεραιότητες που σχετίζονται με διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε αρχές της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων (multi-criteria decision analysis) και ενσωματώνει τόσο εξειδικευμένη γνώση του αγροτικού τομέα όσο και τη συμβολή των ενδιαφερομένων μερών (Bhole, 2018; Wikipedia Contributors, 2025c).

Η χρήση των Συντελεστών Επίδρασης διασφαλίζει ότι δύο σύνολα δεδομένων με παρόμοιες βαθμολογίες αξιοπιστίας μπορούν να ερμηνευτούν διαφορετικά, ανάλογα με τη σημασία των συγκεκριμένων δεδομένων για την εκάστοτε απόφαση (Pakkar, 2017; Wikipedia Contributors, 2025a).

Το πλαίσιο υποστηρίζει τρεις συμπληρωματικές μεθόδους για τον προσδιορισμό αυτών των συντελεστών:

- Αξιολόγηση από εμπειρογνώμονες και ενδιαφερόμενους φορείς (συνιστάται για την αρχική εφαρμογή): Βασίζεται στη γνώση πεδίου και σε ιστορική εμπειρία λήψης αποφάσεων.
- Ευθυγράμμιση με κανονιστικά και πολιτικά πλαίσια: Αντλεί συντελεστές από υπάρχοντα πλαίσια όπως το Basel III (πιστωτικός κίνδυνος) (Basel Committee on Banking Supervision, 2021) ή το TCFD (κλιματικές γνωστοποιήσεις) (TCFD, 2017).
- Εμπειρική ανάλυση: Εφαρμόζει στατιστικές μεθόδους ή μηχανική μάθηση (π.χ. σημαντικότητα χαρακτηριστικών σε μοντέλα πρόβλεψης) για την εξαγωγή συντελεστών από ιστορικά δεδομένα λήψης αποφάσεων (Belton & Stewart, 2002).

4.3.2.Κατηγορίες Επίδρασης και Σενάρια Εφαρμογής

Για την υποστήριξη της πρακτικής εφαρμογής των Συντελεστών Επίδρασης Απόφασης, τα επιμέρους δεδομένα κατατάσσονται σε τρεις βαθμίδες επίδρασης, καθεμία με προκαθορισμένο εύρος βάρους.

Υψηλή Επίδραση (Συντελεστής = 1.2–1.5):

Δεδομένα που καθορίζουν άμεσα την έκβαση μιας απόφασης.

- Πιστοδοτήσεις: Τρέχοντα οικονομικά στοιχεία, δείκτες εξυπηρέτησης χρέους
- Ασφάλιση: Ιστορικά αρχεία ζημιών, δείκτες έκθεσης σε κίνδυνο
- ESG: Άμεσες εκπομπές (Scope 1), επικυρωμένα πιστοποιητικά συμμόρφωσης (Basel Committee on Banking Supervision, 2021)

Μέτρια Επίδραση (Συντελεστής = 0.8–1.1):

Δεδομένα που επηρεάζουν την απόφαση αλλά δεν είναι από μόνα τους καθοριστικά.

- Πιστοδοτήσεις: Δείκτες λειτουργικής αποδοτικότητας, σήματα της αγοράς
- Ασφάλιση: Περιφερειακοί χάρτες κινδύνου, δείκτες ποιότητας επιχειρηματικών πρακτικών
- ESG: Εκπομπές Scope 3, δεδομένα εφοδιαστικής αλυσίδας (TCFD, 2017)

Χαμηλή Επίδραση (Συντελεστής = 0.3–0.7):

Υποστηρικτικά ή συγκριτικά δεδομένα που ενισχύουν την ερμηνεία μιας απόφασης ή προσφέρουν πλαίσιο σύγκρισης.

- Πιστοδοτήσεις: Δημογραφικά στοιχεία, μέσοι όροι βιομηχανικού κλάδου
- Ασφάλιση: Μακροοικονομικές τάσεις, συγκρίσεις με παρόμοιους παραγωγούς
- ESG: Τομεακοί στόχοι, προαιρετικές δεσμεύσεις για βιώσιμες πρακτικές (UNEP Finance Initiative, 2021)

Διαδικασία Ανάθεσης Συντελεστών

Η ανάθεση Συντελεστών Επίδρασης Απόφασης ακολουθεί μια δομημένη διαδικασία πέντε σταδίων, ώστε να εξασφαλίζεται η εσωτερική συνοχή και η συνάφεια με τις προτεραιότητες των ενδιαφερόμενων μερών:

1. Καθορισμός Λογικής της Απόφασης: Προσδιορίζονται τα βασικά κριτήρια που επηρεάζουν την απόφαση.
2. Αντιστοίχιση Δεδομένων: Κάθε τύπος δεδομένων συνδέεται με τον ρόλο του στη διαδικασία λήψης της απόφασης.
3. Αξιολόγηση της Επίδρασης: Εκτιμάται η σχετική σημασία κάθε στοιχείου για την τελική απόφαση.
4. Κανονικοποίηση Συντελεστών: Τα βάρη εξισορροπούνται ώστε να είναι συγκρίσιμα μεταξύ διαφορετικών σεναρίων.

5. Επικύρωση με Ενδιαφερόμενους Φορείς: Οι τιμές επανεξετάζονται σε συνεργασία με ειδικούς στο πεδίο, για να διασφαλιστεί η ευθυγράμμιση με την πραγματικότητα (Keeney & Raiffa, 1993).

4.3.3. Από τη χειροκίνητη εκτίμηση στη αυτοματοποιημένη στάθμιση

Στα αρχικά στάδια εφαρμογής του πλαισίου σε πραγματικά δεδομένα είναι αναγκαία η χειροκίνητη ανάθεση Συντελεστών Επίδρασης Απόφασης. Η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις όπως:

- Καινούργια ή πολύπλοκα σενάρια λήψης αποφάσεων
- Σενάρια που απαιτούν εξειδικευμένη κρίση, όπως νομικοί ή κοινωνικοί κίνδυνοι
- Σενάρια που επηρεάζονται από συνεχώς μεταβαλλόμενους κανονισμούς (Blagojević et al., 2023)

Καθώς το πλαίσιο ωριμάζει, θα καθίσταται εφικτή η σταδιακή αυτοματοποίηση της διαδικασίας ανάθεσης βαρών συντελεστών επίδρασης απόφασης. Θα μπορούν πλέον να αναπτυχθούν τυποποιημένα πρότυπα στάθμισης ανάλογα με τον τύπο της κάθε απόφασης, το σύστημα ψηφιακής γεωργίας και τις θεσμικές απαιτήσεις. Η επιλογή των βαρών μπορεί να βασίζεται είτε σε απλούς κανόνες αντιστοίχισης είτε σε πιο σύνθετους αλγορίθμους επιλογής βάρους.

Σε πιο προχωρημένα στάδια, κάποια μοντέλα μηχανικής μάθησης θα μπορούν να βελτιστοποιούν τις στάθμισεις βάσει ανάλυσης ιστορικών δεδομένων, βελτιώνοντας με την πάροδο του χρόνου την μαθηματική ακρίβεια και την ρυθμιστική ευθυγράμμιση (Mayatopani, 2023).

Συνιστώμενο χρονοδιάγραμμα εφαρμογής

Το πλαίσιο υποστηρίζει μια διαδοχική στρατηγική εφαρμογής, η οποία συνδυάζει ευελιξία και τη διαφάνεια με τη μελλοντική δυνατότητα αυτοματισμού:

- Αρχική Φάση: Χειροκίνητη ανάθεση Συντελεστών Επίδρασης σε βασικά σενάρια, με υποστήριξη από εμπειρογνώμονες.
- Φάση Δημιουργίας Αντιστοιχίσεων: Αυτοματοποιημένος καθορισμός του βάρους του συντελεστή βάσει κανόνων για επαναλαμβανόμενες αποφάσεις παρόμοιου τύπου, με δυνατότητα χειροκίνητης παρέμβασης.
- Φάση Προσαρμογής: Δυναμική στάθμιση μέσω συστημάτων ανατροφοδότησης και μηχανικής μάθησης χρησιμοποιώντας τις ίδιες τις αποφάσεις (Zardari et al., 2015).

Αυτή η ισορροπημένη προσέγγιση εξασφαλίζει τόσο τη διαφάνεια και τη δυνατότητα ελέγχου όσο και την προοδευτική μετάβαση σε αυτοματοποιημένη, προσαρμοζόμενη βελτιστοποίηση.

4.4. Υπολογισμός του Δείκτη Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI)

4.4.1. Λογική βαθμολόγησης και ενοποίηση διαστάσεων

Ο Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI) συνδυάζει τις επιμέρους βαθμολογίες αξιοπιστίας ανά διάσταση με τους Συντελεστές Επίδρασης ανά περίπτωση χρήσης, προκειμένου να παραχθεί ένας ενιαίος και τυποποιημένο αριθμητικός δείκτης της καταλληλότητας των δεδομένων για τη λήψη γεωργικών αποφάσεων. Ο υπολογισμός του DRI ακολουθεί μια διαδικασία τριών βημάτων, η οποία συνδυάζει την μεθοδολογική αυστηρότητα με την ευελιξία που απαιτεί η χρήση πολλών και διαφορετικών τύπων δεδομένων.

Βήμα 1: Υπολογισμός Αξιοπιστίας ανά Διάσταση

Για κάθε είδος δεδομένων αξιολογούνται οι διαστάσεις αξιοπιστίας που είναι συναφείς με τη φύση και τη χρήση του: Όγκος Δεδομένων, Συχνότητα Εισόδου, Ποικιλία, και Ποιότητα & Εμπιστοσύνη στην Πηγή.

Για να διασφαλιστεί η ισοδυναμία μεταξύ των διαφορετικών τύπων δεδομένων:

- Η αξιολόγηση των διαστάσεων Όγκου και Ποιότητας είναι υποχρεωτική για όλα τα δεδομένα.
- Η Συχνότητα αξιολογείται μόνο όταν τα δεδομένα συλλέγονται περιοδικά ή παρουσιάζουν δυναμική φύση ως προς το χρόνο.
- Η Ποικιλία εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου η απόφαση βασίζεται στον συνδυασμό διαφορετικών τύπων ή πηγών δεδομένων.

Όταν δεν είναι όλες οι διαστάσεις απαραίτητες, το πλαίσιο χρησιμοποιεί προσαρμοζόμενη ενοποίηση, υπολογίζοντας έναν σταθμισμένο μέσο όρο μόνο των διαθέσιμων διαστάσεων. Έτσι, διασφαλίζεται ότι οι στατικοί τύποι δεδομένων ή τα δεδομένα που προέρχονται από μία μόνο πηγή δεν θα διαστρεβλώσουν άδικα και λανθασμένα τον δείκτη (USDA, 2025).

Διάσταση	Πότε Εξαιρείται;	Συνθήκη Εφαρμογής
Όγκος Δεδομένων	Δεν εξαιρείται ποτέ	Όλα τα δεδομένα πρέπει να πληρούν βασικές απαιτήσεις πληρότητας και επάρκειας εγγραφών
Συχνότητα Εισόδου	Εξαιρείται όταν τα δεδομένα είναι στατικά ή καταχωρούνται εφάπαξ (π.χ. ανάλυση εδάφους, μητρώα)	Εφαρμόζεται μόνο όταν τα δεδομένα συλλέγονται περιοδικά ή παρουσιάζουν χρονική δυναμική

Ποικιλία Πηγών	Εξαιρείται όταν τα δεδομένα προέρχονται από μία μόνο πηγή ή όταν ένας τύπος δεδομένων αρκεί για την απόφαση	Εφαρμόζεται όταν η απόφαση βασίζεται στον συνδυασμό διαφορετικών τύπων ή πηγών δεδομένων
Ποιότητα και Εμπιστοσύνη στην Πηγή	Δεν εξαιρείται ποτέ	Πάντα σχετική, καθώς αξιολογεί την ακρίβεια των δεδομένων και την αξιοπιστία της πηγής προέλευσής τους

Πίνακας 4.2: Λογική Εφαρμογής Διαστάσεων

Βήμα 2: Στάθμιση της επίδρασης

Η συνολική βαθμολογία αξιοπιστίας κάθε στοιχείου πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο Συντελεστή Επίδρασης Απόφασης, όπως ορίζεται στην Ενότητα 4.3. Με αυτόν τον τρόπο, προσαρμόζεται η βαρύτητα κάθε εισροής με βάση τη σημασία της για την εν λόγω απόφαση.

Βήμα 3: Συγκεντρωτικός υπολογισμός δείκτη

Ο τελικός Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI) υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος όλων των επιμέρους βαθμολογιών, αφού ληφθούν υπόψη οι συντελεστές επίδρασης. Η τιμή κανονικοποιείται σε κλίμακα 0–100, ώστε να είναι ευανάγνωστη και συγκρίσιμη μεταξύ διαφορετικών τύπων αποφάσεων.

4.4.2. Κατηγοριοποίηση αξιοπιστίας

Η τελική τιμή του DRI κατατάσσεται σε μία από τέσσερις κατηγορίες, ώστε να καθοδηγήσει πρακτικά τη λήψη αποφάσεων:

Κατηγορία	Τιμή DRI	Οδηγία Απόφασης
ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΗ	≥ 85	Προχωρήστε με ασφάλεια, επαρκεί η τυπική παρακολούθηση
ΚΑΛΗ	70–84	Προχωρήστε με προσοχή, συνιστάται περιοδική επαναξιολόγηση
ΟΡΙΑΚΗ	55–69	Προχωρήστε στην λήψη απόφασης μόνο μετά την εφαρμογή προληπτικών μέτρων ή πρόσθετης επαλήθευσης δεδομένων
ΑΝΕΠΑΡΚΗΣ	< 55	Η χρήση των δεδομένων για την λήψη απόφασης δεν συνιστάται, εκτός αν βελτιωθεί η ποιότητα των δεδομένων (Zardari et al., 2015)

Πίνακας 4.3: Κατηγοριοποίηση Αξιοπιστίας

Κάθε βαθμολογία συνοδεύεται από ένα Προφίλ Αξιοπιστίας, το οποίο παρουσιάζει συνολικά:

- Τις επιμέρους βαθμολογίες ανά διάσταση

- Το βαθμό επίδρασης κάθε στοιχείου
- Την τελική κατηγορία ταξινόμησης
- Σημεία που προτείνεται να βελτιωθούν

Το παραπάνω επιτρέπει στους ενδιαφερόμενους φορείς να κατανοήσουν όχι μόνο το εάν τα δεδομένα είναι αξιόπιστα, αλλά και γιατί πήραν αυτή τη βαθμολογία και πώς μπορούν να βελτιωθούν.

4.4.3. Υπολογισμός του δείκτη βήμα-βήμα

Ο αλγόριθμος υπολογισμού του DRI αποτελείται από 5 βήματα, τα οποία συνοψίζονται παρακάτω:

1. Εκτίμηση καταλληλότητας διαστάσεων

Για κάθε στοιχείο δεδομένων, προσδιορίστε τις ισχύουσες διαστάσεις αξιοπιστίας:

- Όγκος και Ποιότητα - εφαρμόζονται πάντα
- Συχνότητα - μόνο για δεδομένα χρονοσειρών
- Ποικιλία - μόνο για δεδομένα πολλαπλών πηγών

2. Βαθμολόγηση κάθε διάστασης

Χρησιμοποιούνται οι πρότυποι μαθηματικοί τύποι (βλ. Ενότητες 4.2.2–4.2.5) για τον υπολογισμό βαθμολογιών με βάση τον όγκο εγγραφών, τη συχνότητα εισόδου, την ποικιλία τύπων δεδομένων, την ακρίβεια και την εμπιστοσύνη στην πηγή.

3. Συνδυασμός βαθμολογιών για όλες τις διαστάσεις

- Τυπική μέθοδος: Ίση στάθμιση και των τεσσάρων διαστάσεων
- Προσαρμοζόμενη μέθοδος: Σταθμισμένος μέσος όρος μόνο των ισχυουσών διαστάσεων

4. Εφαρμογή συντελεστών επίδρασης στην απόφαση

Η συνολική βαθμολογία αξιοπιστίας κάθε στοιχείου πολλαπλασιάζεται με τον αντίστοιχο Συντελεστή Επίδρασης Απόφασης (βλ. Ενότητα 4.3), ώστε να αποτυπωθεί η κρισιμότητά του για τη λήψη της απόφασης.

5. Συγκεντρωτική τελική βαθμολογία

Ο τελικός Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI) υπολογίζεται ως εξής:

$$DRI = (\sum_{i=1}^n (Αξιοπιστία_i \times Βάρος_i)) / (\sum_{i=1}^n Βάρος_i)$$

$$DRI = \frac{\sum_{i=1}^n (Reliability_i \times Weight_i)}{\sum_{i=1}^n Weight_i}$$

Η τιμή που προκύπτει είναι η βαθμολογία αξιοπιστίας με βάση την κάθε περίπτωση χρήσης σε κλίμακα 0–100, έτοιμη για κατηγοριοποίηση και χρήση από τους ενδιαφερόμενους φορείς.

4.5. Από τη μεθοδολογία στην πράξη: Εφαρμογή και έλεγχος

Αν και στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η θεωρητική δομή και η λογική υπολογισμού του Δείκτη Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI), η πραγματική αξία του πλαισίου θα αποδειχθεί μόνο μέσα από την εφαρμογή του σε πρακτικές συνθήκες. Η μετάβαση από τη θεωρία στην πράξη απαιτεί πιλοτική δοκιμή, προσαρμογή σε κάθε περίπτωση χρήσης και σταδιακή βελτιστοποίηση του εργαλείου.

Για να υποστηριχθεί αυτή η μετάβαση, το πλαίσιο δοκιμάζεται σε μια σειρά προσομοιωμένων σεναρίων, τα οποία αναπαριστούν ρεαλιστικά περιβάλλοντα λήψης γεωργικών αποφάσεων. Τα σενάρια αυτά δεν χρησιμοποιούν στην παρούσα φάση πραγματικά δεδομένα, αλλά έχουν σχεδιαστεί ώστε να αντικατοπτρίζουν τη δομή, τα προβλήματα αξιοπιστίας και τις ανάγκες που συναντώνται σε τομείς όπως η χρηματοπιστολητική ικανότητα των αγροτικών επιχειρήσεων, η παρακολούθηση ρίσκου και η ασφάλιση, καθώς και η συμμόρφωση με τις συνεχώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ESG.

Η χρήση προσομοιωμένων δεδομένων είναι μεθοδολογικά τεκμηριωμένη και βασίζεται στις αρχές της Έρευνας Επιστήμης Σχεδιασμού (Design Science Research - DSR), όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 1. Το DSR επικεντρώνεται στη δημιουργία και την αξιολόγηση εργαλείων, όπως μοντέλα, πλαίσια ή συστήματα, τα οποία σχεδιάζονται για να επιλύουν προβλήματα από την πραγματική ζωή (Hevner et al., 2004). Εδώ, ο DRI λειτουργεί ως εννοιολογικό και υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο συνδυάζει τη δομημένη λογική, τη μαθηματική αξιολόγηση και την σημασία κάθε στοιχείου για την υποστήριξη διαφανούς και συνεπούς αξιολόγησης της αξιοπιστίας των δεδομένων στην ψηφιακή γεωργία.

Σύμφωνα με το DSR, η χρήση τεχνητών δεδομένων και δομημένων παραδειγμάτων αποτελεί έγκυρη μορφή αξιολόγησης εκ των προτέρων, η οποία υποστηρίζει τη θεωρητική επαλήθευση και τον έλεγχο χρήσης μιας νέας μεθόδου πριν από την πλήρη υλοποίηση της (Gregor & Hevner, 2013; Peffers et al., 2012). Η εν λόγω προσέγγιση βοηθά στην επιβεβαίωση της εσωτερικής συνέπειας του πλαισίου και της συνάφειάς του με τους ενδιαφερόμενους φορείς.

Η εφαρμογή του DRI σε αυτά τα σενάρια εξυπηρετεί τρεις βασικούς στόχους:

- Επίδειξη της λειτουργίας του πλαισίου σε ελεγχόμενα αλλά ρεαλιστικά περιβάλλοντα
- Έλεγχος της λογικής βαθμολόγησης υπό διαφορετικές συνθήκες εισροών
- Σύνδεση και συνάφεια με πραγματικές και κρίσιμες αγροτικές περιπτώσεις λήψης αποφάσεων

Οι ακόλουθες δομημένες εφαρμογές προσφέρουν ένα αυστηρό και ερμηνεύσιμο πεδίο δοκιμών για να επαληθευτεί η διαφάνεια, η προσαρμοστικότητα και η χρησιμότητα για λήψη αποφάσεων του DRI. Υποστηρίζουν επίσης την έγκαιρη δοκιμή και την περαιτέρω προσαρμογή των πηγών δεδομένων, των διαστάσεων, των βαρών και των ορίων βαθμολόγησης.

Με αυτόν τον τρόπο, τα εικονικά σενάρια λειτουργούν ως σημαντική γέφυρα μεταξύ θεωρίας και εφαρμογής, προωθώντας τον DRI από εννοιολογικό μοντέλο σε πρακτικό εργαλείο διακυβέρνησης αγροτικών δεδομένων και υποστήριξης αποφάσεων.

5. Εφαρμογές του Πλαισίου Αξιοπιστίας Δεδομένων

5.1. Μεθοδολογία εφαρμογής και σχεδιασμός σεναρίων

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει την πρακτική εφαρμογή του Πλαισίου Αξιολόγησης Αξιοπιστίας Γεωργικών Δεδομένων μέσω τριών δομημένων περιπτώσεων χρήσης, οι οποίες αντιπροσωπεύουν διακριτά και υψηλής σημασίας περιβάλλοντα λήψης αποφάσεων στους τομείς της αγροτικής χρηματοδότησης, της διαχείρισης κινδύνων και του ESG και την παρακολούθηση της βιώσιμης ανάπτυξης των γεωργικών επιχειρήσεων.

Για την πρακτική αξιοποίηση του πλαισίου, το κεφάλαιο υιοθετεί μια προσέγγιση proof-of-concept, βασισμένη στις αρχές της ερευνητικής μεθοδολογίας Design Science Research (Gregor & Hevner, 2013; Hevner et al., 2004). Μέσα από παραδείγματα δίνεται έμφαση στο πόσο εφικτή είναι τεχνική εφαρμογή η δομημένη αξιολόγηση της αξιοπιστίας των δεδομένων, και όχι στην εμπειρική επιβεβαίωση της μεθόδου μέσα από εφαρμογή της στο πεδίο. Τα κατασκευασμένα αυτά σενάρια λειτουργούν ως στοχευμένα πεδία δοκιμής, σχεδιασμένα ώστε να αξιολογείται με σαφήνεια και υπό ελεγχόμενες συνθήκες η λογική βαθμολόγησης του πλαισίου, η προσαρμογή του στα συμφραζόμενα και η ικανότητά του να υποστηρίζει ουσιαστικά τη λήψη αποφάσεων. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται και στις τρεις περιπτώσεις αντικατοπτρίζουν ρεαλιστικά επίπεδα πληρότητας, επικαιρότητας και αξιοπιστίας, βασισμένα σε καθιερωμένα σημεία αναφοράς από δημοσιεύσεις του κλάδου, έρευνες υιοθέτησης του USDA και γεωπονικές και αγροτικές μελέτες.

Η πληρότητα δεδομένων, η οποία αποτυπώνεται ως Όγκος Δεδομένων, κυμαίνεται μεταξύ 60–95%, σε συμφωνία με τα ποσοστά συμμετοχής στα προγράμματα συλλογής στοιχείων του USDA (όπως τα ARMS και NASS, (U.S. Department of Agriculture Economic Research Service, 2024; US Department of Agriculture: National Agricultural Statistics Service, 2023)) και με τη γνωστή ετερογένεια στην υιοθέτηση τεχνολογιών και τις πρακτικές καταγραφής.

Η Συχνότητα Εισαγωγής Δεδομένων καθορίζεται σύμφωνα με τις επιχειρηματικές πρακτικές: ετήσια υποβολή για οικονομικά και αγροτικά στοιχεία, εποχικά αρχεία για τη χρήση λιπασμάτων και ενημερώσεις, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, για μετεωρολογικά δεδομένα, δεδομένα άρδευσης και μεταβλητών βασισμένων σε αισθητήρες.

Η Ποιότητα και Εμπιστοσύνη στην Πηγή των δεδομένων βαθμολογείται βάσει γνωστών διαφορών στην αξιοπιστία: οι δημόσιοι μετεωρολογικοί σταθμοί βαθμολογούνται μεταξύ 90–95, λόγω τυποποιημένων διαδικασιών βαθμονόμησης και ποιοτικού ελέγχου (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021), οι αισθητήρες IoT βαθμολογούνται με 75–85, λαμβάνοντας υπόψη την απόκλιση βαθμονόμησης και τις απώλειες σύνδεσης (US Department of Agriculture, 2022), ενώ τα δεδομένα που καταγράφονται από τους παραγωγούς βαθμολογούνται με 50–70, λόγω πιθανών σφαλμάτων μνήμης, ασυνέπειας στην καταγραφή και δυσκολίας επαλήθευσης (Basso & Antle, 2020).

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται και στην πραγματικότητα όσον αφορά την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, καθώς στα τρία σενάρια ενσωματώνονται παραδοχές όπως η μερική ψηφιοποίηση, η ελλιπής κάλυψη από αισθητήρες, τα μη ομοιογενή πρότυπα καταγραφής δεδομένων και η συνύπαρξη χειροκίνητων και αυτόματων πηγών δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά αυτά εξασφαλίζουν την αναλυτική εγκυρότητα των σεναρίων, καθώς και την πρακτική και θεσμική συνάφεια των ευρημάτων. Ωστόσο, γίνεται μια σκόπιμη παραδοχή για απλοποίηση: όλα τα δεδομένα θεωρούνται διαθέσιμα και πλήρως προσβάσιμα, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η διστακτικότητα των παραγωγών να κοινοποιήσουν δεδομένα, η δυσπιστία προς τις ψηφιακές πλατφόρμες ή η χαμηλή ψηφιακή ετοιμότητα. Αυτοί οι πραγματικοί περιορισμοί, και οι επιπτώσεις τους στην εφαρμογή του πλαισίου, συζητούνται εκτενώς στο Κεφάλαιο 6.

Κάθε περίπτωση χρήσης ακολουθεί μια δομημένη διαδικασία αξιολόγησης, η οποία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- a. Ορισμός του σεναρίου για την λήψη απόφασης,
- b. Καταγραφή των απαιτούμενων δεδομένων,
- c. Βαθμολόγηση κάθε στοιχείου ως προς τις τέσσερις διαστάσεις αξιοπιστίας (Όγκος Δεδομένων, Συχνότητα Εισαγωγής, Ποικιλία Πηγών και Ποιότητα/Εμπιστοσύνη στην Πηγή)
και τέλος
- d. Υπολογισμός του Δείκτη Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI) με στάθμιση ανάλογα με την περίπτωση χρήσης.

Ο Πίνακας 5.1 συνοψίζει τις βασικές παραμέτρους και τις βιβλιογραφικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν στον σχεδιασμό του πλαισίου προσομοίωσης. Ο σχεδιασμός αυτός, βασισμένος σε πρότυπα αξιολόγησης και υπάρχοντα όρια και δεδομένα, εξασφαλίζει την εσωτερική συνέπεια μεταξύ των περιπτώσεων και επιτρέπει τεκμηριωμένη και διαφανή αιτιολόγηση των βαθμολογιών που παρουσιάζονται στις ενότητες 5.2 έως 5.4.

Παράμετρος	Τιμή / Εύρος	Βάση στη Βιβλιογραφία / Πρακτική	Παραπομπή
Επαλήθευση Οικονομικών Δεδομένων	95% κάλυψη	Οι αναφορές του USDA δείχνουν ότι το 90-95% των αγροτικών δανείων απαιτούν ελεγμένες οικονομικές αναφορές.	(U.S. Department of Agriculture, 2021)
Υιοθέτηση Γεωργίας Ακρίβειας (Yield Monitors)	90% σε μεγάλες εκμεταλλεύσεις	Το 88% των αγροκτημάτων καλαμποκιού/σόγιας στις ΗΠΑ χρησιμοποιούν αισθητήρες απόδοσης (έρευνα USDA 2023).	(US Department of Agriculture: National Agricultural Statistics Service, 2023)

Καθυστέρηση Δεδομένων Καιρού	4 ώρες	Τα αγρομετεωρολογικά δεδομένα της NOAA καθυστερούν 3-5 ώρες για έλεγχο ποιότητας.	(National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021)
Υιοθέτηση Αισθητήρων Υγρασίας Εδάφους	85-91% κάλυψη	Σύμφωνα με το USDA, το 85% των αρδευόμενων αγροκτημάτων χρησιμοποιεί αισθητήρες υγρασίας εδάφους, 91% σε ασφαλισμένες καλλιέργειες.	(US Department of Agriculture, 2022)
Ελλείψεις σε Δεδομένα Ενέργειας ESG	8% λογαριασμοί λείπουν	Οι ενεργειακοί έλεγχοι δείχνουν 5-10% απώλειες λόγω καταγραφής με ξεχωριστά ρολόγια(οικιακή vs. αγροτική χρήση).	(US Department of Agriculture, 2020)
Ακρίβεια Καταγραφής Λιπασμάτων	70-75% αξιοπιστία	Μελέτες δείχνουν σφάλματα 25-30% στις δηλώσεις χρήσης αζώτου από παραγωγούς.	(Basso & Antle, 2020)
Χρησιμότητα Δορυφορικών Δεδομένων	75% αποτελεσματικότητα	Ο ESA αναφέρει ότι μόνο το 75% των δορυφορικών δεδομένων Sentinel-2 είναι αξιοποιήσιμα λόγω νεφοκάλυψης.	(Drusch et al., 2012)

Πίνακας 5.1: Παράμετροι και πηγές για το πλαίσιο προσομοίωσης

5.2. Παραδείγματα

5.2.1. Αξιολόγηση πιστοληπτικής ικανότητας στη γεωργία

Σενάριο απόφασης και απαιτούμενα δεδομένα

Ένας περιφερειακός συνεταιρισμός δημητριακών υποβάλλει αίτηση για δάνειο ύψους 2,5 εκατομμυρίων δολαρίων, με σκοπό την επέκταση της αποθηκευτικής του ικανότητας και την αντικατάσταση παλιού εξοπλισμού συγκομιδής. Ο δανειστής εφαρμόζει μια διαδικασία πιστοδότησης βασισμένη στον κίνδυνο και υποστηριζόμενη από δεδομένα, η οποία απαιτεί τεκμηριωμένα στοιχεία οικονομικής σταθερότητας και επιχειρησιακής απόδοσης για διάστημα πολλών ετών.

Απαιτήσεις απόφασης:

- Συμμόρφωση με τους κανονισμούς γεωργικού δανεισμού που ευθυγραμμίζονται με το κανονιστικό πλαίσιο Basel (Basel Committee on Banking Supervision, 2021), μέσω διαφανών και επαληθεύσιμων αξιολογήσεων δεδομένων (U.S. Department of Agriculture, 2021).
- Προσαρμογή του κόστους δανεισμού και του βαθμού εποπτείας βάσει της αξιοπιστίας των παρεχόμενων στοιχείων.

Απαιτήσεις αξιοπιστίας:

Τα δεδομένα που υποβάλλονται πρέπει να έχουν:

- Επαρκή πληρότητα για πολυετή χρονική περίοδο.
- Δυνατότητα επαλήθευσης με ανιχνεύσιμες και ελέγξιμες πηγές.
- Συνάφεια με γνωστούς γεωργικούς κινδύνους που επηρεάζουν τη δυνατότητα αποπληρωμής.

Απαιτούμενα πεδία δεδομένων

Πεδίο	Στοιχεία
Οικονομική Απόδοση (3 έτη)	Καταστάσεις αποτελεσμάτων, φορολογικές δηλώσεις, ταμειακές ροές, δείκτες χρέους
Απόδοση Επιχειρησιακής Λειτουργίας (5 έτη)	Ιστορικό αποδόσεων με GPS, καταγραφές εισροών, χρήση εξοπλισμού, τίτλοι γης
Αγρονομικό & Περιβαλλοντικό Πλαίσιο	Τιμές εμπορευμάτων, δείκτες CBOT, μετεωρολογικά δεδομένα, στοιχεία εδάφους και διατήρησης
Εκτίμηση Περιουσιακών Στοιχείων	Εκτιμήσεις γης, αποσβέσεις μηχανημάτων, απογραφικοί έλεγχοι, ασφαλιστική κάλυψη

Πίνακας 5.2: Απαιτούμενα πεδία δεδομένων για το Παράδειγμα 1

Αξιολόγηση αξιοπιστίας - Εφαρμογή

Κάθε πηγή δεδομένων βαθμολογείται με βάση τις τέσσερις διαστάσεις αξιοπιστίας: Όγκος Δεδομένων (V), Συχνότητα Εισαγωγής (F), Ποικιλία (Va) και Ποιότητα & Εμπιστοσύνη στην Πηγή (QT). Οι Συντελεστές Επίδρασης Απόφασης αντικατοπτρίζουν τη σχετική σημασία κάθε τύπου δεδομένων ως προς την πρόβλεψη πιστωτικού κινδύνου, σύμφωνα με τις πρακτικές γεωργικού δανεισμού (Basel Committee on Banking Supervision, 2021).

Α. Οικονομικές Αναφορές (2021–2023)

- Όγκος (95/100): Παρουσιάζονται όλα τα απαιτούμενα έτη χωρίς χρονικά κενά. Παρότι η τριετία καλύπτεται πλήρως, μικρές διαφοροποιήσεις στη λεπτομέρεια των υπο-εκθέσεων και μια συντηρητική στάθμιση μειώνουν ελαφρώς τη βαθμολογία από το άριστο.
- Συχνότητα (100/100): Η υποβολή γίνεται με ετήσια συνέπεια.
- Ποικιλία (85/100): Περιλαμβάνονται ελεγμένες οικονομικές καταστάσεις, φορολογικές δηλώσεις και ταμειακές ροές.

- Ποιότητα & Εμπιστοσύνη (92/100): Τα έγγραφα συντάχθηκαν από εξειδικευμένη λογιστική εταιρεία του αγροτικού τομέα και το 95% των συναλλαγών είναι επαληθευμένο από τράπεζα.

- Συνδυαστική Αξιοπιστία: $(95 + 100 + 85 + 92)/4 = 93,0$

Βάρος: 1,4

Βαθμός Επίδρασης στην Απόφαση: $93,0 \times 1,4 = 130,2$

B. Ιστορικό Απόδοσης Επιχειρησιακής Λειτουργίας(2019–2023)

- Όγκος (88/100): Το 90% της καλλιεργούμενης έκτασης παρακολουθείται με GPS, με πλήρη κάλυψη πενταετίας.
- Συχνότητα (100/100): Ετήσια καταγραφή, πλήρως ευθυγραμμισμένη με τις καλλιεργητικές περιόδους.
- Ποικιλία: Εξαιρείται σύμφωνα με την Ενότητα 4.3.5 (χρήση μόνο ενός συστήματος - GPS yield monitor).
- Ποιότητα & Εμπιστοσύνη (85/100): Τα δεδομένα από τον yield monitor βαθμονομήθηκαν και επικυρώθηκαν με βάση τα στοιχεία πώλησης.
- Συνδυαστική Αξιοπιστία: $(88 + 100 + 85)/3 = 91,0$

Βάρος: 1,3

Βαθμός Επίδρασης στην Απόφαση: $91,0 \times 1,3 = 118,3$

C. Δεδομένα Αγοράς (2019–2023)

- Όγκος (100/100): Διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα τοπικών και χρηματιστηριακών τιμών για όλη την περίοδο.
- Συχνότητα (100/100): Καταγραφή με ημερήσια ανάλυση υψηλής ευκρίνειας.
- Ποικιλία (90/100): Συνδυάζει στοιχεία από αποθήκες, feeds του CBOT και στατιστικά του USDA.
- Ποιότητα & Εμπιστοσύνη (95/100): Προέρχονται από θεσμικές πηγές, με ελάχιστο κίνδυνο διαστρέβλωσης.
- Συνδυαστική Αξιοπιστία: $(100 + 100 + 90 + 95)/4 = 96,3$

Βάρος: 1,0

Βαθμός Επίδρασης στην Απόφαση: $96,3 \times 1,0 = 96,3$

D. Μετεωρολογικά και Κλιματικά Δεδομένα (2019–2023)

- Όγκος (100/100): Πλήρης καταγραφή από μετεωρολογικό σταθμό της NWS, σε απόσταση 8 χιλιομέτρων από την τοποθεσία.
- Συχνότητα (100/100): Ημερήσια δεδομένα χωρίς κενά.
- Ποικιλία (85/100): Περιλαμβάνει θερμοκρασία, βροχόπτωση, βαθμομέρες και εξατμισοδιαπνοή.
- Ποιότητα & Εμπιστοσύνη (95/100): Πηγές με κρατική πιστοποίηση και ελεγμένους δείκτες ποιότητας.
- Συνδυαστική Αξιοπιστία: $(100 + 100 + 85 + 95)/4 = 95,0$

Βάρος: 0,8

Βαθμός Επίδρασης στην Απόφαση: $95,0 \times 0,8 = 76,0$

Ανάλυση διαστάσεων και υπολογισμός DRI

Στοιχείο	Διαστάσεις που Χρησιμοποιήθηκαν	Συνδυαστική Αξιοπιστία	Συντελεστής Επίδρασης	Βαθμός Επίδρασης
Οικονομικές Καταστάσεις	V, F, Va, QT	93,0	1,4	130,2
Ιστορικό Αποδόσεων	V, F, QT (<i>Va εξαιρείται</i>)	91,0	1,3	118,3
Δεδομένα Αγοράς	V, F, Va, QT	96,3	1,0	96,3
Μετεωρολογικά Δεδομένα	V, F, Va, QT	95,0	0,8	76,0
Σύνολο			4,5	420,8
Τελικός DRI				93,5

Πίνακας 5.3: Ανάλυση διαστάσεων και υπολογισμός DRI για το Παράδειγμα 1

Προφίλ αξιοπιστίας - Αξιολόγηση πιστοληπτικής ικανότητας

- Όγκος Δεδομένων: 96/100 (Εξαιρετική)
- Συχνότητα Εισαγωγής: 100/100 (Εξαιρετική)

- Ποικιλία Πηγών: 84/100 (Καλή)
- Ποιότητα και Εμπιστοσύνη στην Πηγή: 92/100 (Εξαιρετική)
- Συνολικός Δείκτης Αξιοπιστίας (DRI): 93,5 (Εξαιρετική)
- Κατάσταση: μπορεί να προχωρήσει η λήψη απόφασης με πλήρη εμπιστοσύνη στα δεδομένα

Σημειώσεις:

1. Η διάσταση Ποικιλίας εξαιρείται για το ιστορικό αποδόσεων λόγω χρήσης μόνο ενός συστήματος (GPS), σύμφωνα με την Ενότητα 4.3.5.
2. Οι μέσοι όροι ανά διάσταση προκύπτουν από το σύνολο των στοιχείων στα οποία εφαρμόζονται.

Συνέπειες για τη λήψη αποφάσεων και ενέργειες ενδιαφερόμενων μερών

Δανειστές: Ο υψηλός DRI (93,5) δικαιολογεί πλήρη έγκριση του δανείου χωρίς πρόσθετα επιτόκια λόγω κινδύνου αξιοπιστίας. Επιτρέπει σε ρυθμιστικές αρχές και πιστωτικούς αναλυτές να βασιστούν σε τεκμηριωμένα στοιχεία φερεγγυότητας και επιχειρησιακής σταθερότητας.

Παραγωγοί: Η ισχυρή τεκμηρίωση αξιοπιστίας ενισχύει τη χρηματοπιστοληπτική τους ικανότητα και μπορεί να οδηγήσει σε ευνοϊκότερους όρους. Τομείς προς βελτίωση περιλαμβάνουν την ενίσχυση της ποικιλίας στα συστήματα παρακολούθησης απόδοσης.

Ρυθμιστικές Αρχές και Ελεγκτές: Το σενάριο πληροί τα πρότυπα διαφάνειας πιστοληπτικής αξιολόγησης σύμφωνα με το πλαίσιο Basel και μπορεί να υποστηριχθεί σε ελέγχους ή ρυθμιστικές διαδικασίες.

Λειτουργικές επισημάνσεις:

- Η τιμολόγηση του δανείου μπορεί να ευθυγραμμιστεί με τον επιμέρους χρηματοοικονομικό κίνδυνο του δανειολήπτη, χωρίς επιβαρύνσεις λόγω χαμηλής εμπιστοσύνης στα δεδομένα.
- Η συχνότητα παρακολούθησης και οι υποχρεώσεις αναφοράς μπορούν να μειωθούν λόγω υψηλής αξιοπιστίας.
- Οι βαθμολογίες DRI μπορούν να ενσωματωθούν απευθείας στους υπολογισμούς κινδύνου σταθμισμένων περιουσιακών στοιχείων για χρηματοπιστωτικά ιδρύματα.

5.2.2. Παρακολούθηση κινδύνου σε πραγματικό χρόνο

Σενάριο απόφασης και απαιτούμενα δεδομένα

Ένας πάροχος γεωργικής ασφάλισης λειτουργεί ένα σύστημα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, με σκοπό την ανίχνευση συνθηκών ξηρασίας και θερμικού στρες σε 350 εκμεταλλεύσεις αροτραίων καλλιεργειών. Τα εν λόγω συστήματα τροφοδοτούν αυτοματοποιημένες βαθμολογίες κινδύνου κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και καθοδηγούν ενέργειες όπως προσαρμογές ασφαλιστρών, έγκαιρες προειδοποιήσεις και στοχευμένες παρεμβάσεις.

Απαιτήσεις απόφασης:

Ο ασφαλιστικός φορέας βασίζεται σε δεδομένα υψηλής χρονικής ανάλυσης και γεωγραφικής κατανομής για να αξιολογήσει την έκθεση των καλλιεργειών και τις τάσεις κινδύνου σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Ο στόχος είναι η ακριβής ιεράρχηση κινδύνων και η τεκμηρίωση οικονομικών αποφάσεων (π.χ. επιστροφές ή επιβαρύνσεις ασφαλιστρών) έναντι ρυθμιστικών αρχών και αντασφαλιστών. Οι βασικές απαιτήσεις δεδομένων περιλαμβάνουν:

- Υψηλή συχνότητα παρακολούθησης για έγκαιρες ειδοποιήσεις (ωριαία έως εβδομαδιαία, ανάλογα με την πηγή)
- Ευρεία γεωγραφική κάλυψη και συνέπεια σε όλα τα αγροτεμάχια που παρακολουθούνται
- Τεκμηριωμένη αξιοπιστία των πηγών για τη στήριξη αποζημιώσεων και τη συμμόρφωση με κανονιστικά πρότυπα

Απαιτούμενα πεδία δεδομένων

Πεδίο	Κύρια Στοιχεία Δεδομένων
Μετεωρολογικά Δεδομένα	Θερμοκρασία, υγρασία, βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή (ET), έλλειμμα πίεσης ατμών (VPD), προειδοποιήσεις καταιγίδας (ανά ώρα)
Παρακολούθηση Υγρασίας Εδάφους	Μετρήσεις αισθητήρων σε διάφορα βάθη, αρδευτικά ημερολόγια, δεδομένα διήθησης και αποστράγγισης (καθημερινά)
Εκτίμηση Κατάστασης Καλλιέργειας	Δείκτες NDVI και EVI, εικόνες από drones, καταγραφές εδάφους, αναφορές ασθενειών και προσβολών (εβδομαδιαία)
Επιχειρησιακά Δεδομένα	GPS δραστηριότητα, προγραμματισμός άρδευσης, καταγραφές εισροών, αισθητήρες συγκομιδής

Πίνακας 5.4: Απαιτούμενα πεδία δεδομένων για το Παράδειγμα 2

Αξιολόγηση αξιοπιστίας - Εφαρμογή

Κάθε σύνολο δεδομένων αξιολογείται με βάση τις τέσσερις βασικές διαστάσεις αξιοπιστίας: Όγκος Δεδομένων (V), Συχνότητα Εισαγωγής (F), Ποικιλία Πηγών (Va) και Ποιότητα & Εμπιστοσύνη στην Πηγή (QT). Η τελική βαθμολογία κάθε στοιχείου σταθμίζεται με βάση τη σημασία του για τη λήψη ασφαλιστικών αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, όπως καθορίζεται στην Ενότητα 4.4.

Οι εκχωρημένοι συντελεστές βαρύτητας αντικατοπτρίζουν την αμεσότητα της απόφασης και τη διαγνωστική ικανότητα κάθε στοιχείου ως προς την ανάδειξη κινδύνου, σύμφωνα με τα κριτήρια που ορίζονται στην Ενότητα 4.4:

- Μετεωρολογικά Δεδομένα (βάρος 1,5): Λαμβάνουν τη μεγαλύτερη βαρύτητα, καθώς οι πραγματικές καιρικές συνθήκες ενεργοποιούν απευθείας ειδοποιήσεις και διαδικασίες παρέμβασης.
- Παρακολούθηση Υγρασίας Εδάφους (βάρος 1,4): Παρέχει κρίσιμα δεδομένα για το στρες λόγω ξηρασίας και αποτελεί βασικό παράγοντα σε μοντέλα πρόβλεψης πρώιμης παρέμβασης.
- Εκτίμηση Κατάστασης Καλλιέργειας (βάρος 1,2): Συμβάλλει στην επιβεβαίωση του κινδύνου και στην ανάλυση χωρικών μοτίβων, αλλά δεν έχει την ίδια αμεσότητα.
- Επιχειρησιακά Δεδομένα (βάρος 0,9): Παρότι σημαντικά για την ερμηνεία και την τεκμηρίωση, έχουν δευτερεύοντα ρόλο στην άμεση ανίχνευση κινδύνου και άρα λαμβάνουν χαμηλότερη βαρύτητα.

A. Μετεωρολογικά Δεδομένα

- Όγκος (85/100): Οι μετεωρολογικοί σταθμοί καλύπτουν το 85% των αγροτεμαχίων εντός ακτίνας 15 μιλίων.
- Συχνότητα (75/100): Τα δεδομένα ενημερώνονται ανά ώρα, με καθυστέρηση 4 ωρών λόγω επεξεργασίας. Η καθυστέρηση αυτή, αν και ευθυγραμμισμένη με τα πρωτόκολλα ποιοτικού ελέγχου του NOAA για αγροτικά δεδομένα (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021), περιορίζει τη χρήση για ειδοποιήσεις με υπο-ωριαία απόκριση.
- Ποικιλία (100/100): Περιλαμβάνει τόσο πρωτογενείς μεταβλητές (θερμοκρασία, βροχόπτωση) όσο και παραγόμενες (εξάτμιση, VPD).
- Ποιότητα & Εμπιστοσύνη (93/100): Πιστοποιημένες πηγές δεδομένων (NWS, κρατικά αγρομετεωρολογικά δίκτυα).
- Συνδυαστική Αξιοπιστία: $(85 + 75 + 100 + 93)/4 = 88,3$
- Βάρος: 1,5

- Βαθμός Επίδρασης στην Απόφαση: $88,3 \times 1,5 = 132,5$

B. Παρακολούθηση Εδαφικής Υγρασίας

- Όγκος (91/100): Δίκτυο αισθητήρων εγκατεστημένο σε 320 από τα 350 αγροτεμάχια.
- Συχνότητα (95/100): Ημερήσια καταγραφή καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.
- Ποικιλία: Εξαιρείται, καθώς χρησιμοποιούνται μόνο αισθητήρες ενός τύπου (σύμφωνα με την Ενότητα 4.3.5).
- Ποιότητα & Εμπιστοσύνη (80/100): Ετήσια βαθμονόμηση με χρήση χειροκίνητων δειγματοληψιών.
- Συνδυαστική Αξιοπιστία: $(91 + 95 + 80)/3 = 88,7$
- Βάρος: 1,4
- Βαθμός Επίδρασης στην Απόφαση: $88,7 \times 1,4 = 124,2$

Γ. Αξιολόγηση Κατάστασης Καλλιεργειών

- Όγκος (100/100): Πλήρης κάλυψη πεδίων μέσω δορυφορικής εικόνας κάθε 5 ημέρες.
- Συχνότητα (75/100): Μειωμένη διαθεσιμότητα σε περιόδους νεφοκάλυψης.
- Ποικιλία (95/100): NDVI, drone εικόνες για το 40% των αγροτεμαχίων, αναφορές επιτόπιας παρατήρησης.
- Ποιότητα & Εμπιστοσύνη (88/100): Δορυφορικά δεδομένα και λήψεις drone, διασταυρωμένα με επιτόπια επαλήθευση.
- Συνδυαστική Αξιοπιστία: $(100 + 75 + 95 + 88)/4 = 89,5$
- Βάρος: 1,2
- Βαθμός Επίδρασης στην Απόφαση: $89,5 \times 1,2 = 107,4$

Δ. Δεδομένα Επιχειρησιακής Λειτουργίας

- Όγκος (80/100): Καταγραφή GPS για το 80% των αγροτεμαχίων, αρχεία άρδευσης στο 60%.
- Συχνότητα (70/100): Από πραγματικό χρόνο έως εβδομαδιαία, ανάλογα με τη συνδεσιμότητα και τον εξοπλισμό.
- Ποικιλία (90/100): Περιλαμβάνει δεδομένα κίνησης, εισροών, και άρδευσης.

- Ποιότητα & Εμπιστοσύνη (75/100): Μικτές πηγές, ορισμένες αυτοματοποιημένες, άλλες χειροκίνητες.
- Συνδυαστική Αξιοπιστία: $(80 + 70 + 90 + 75)/4 = 78,8$
- Βάρος: 0,9
- Βαθμός Επίδρασης στην Απόφαση: $78,8 \times 0,9 = 70,9$

Ανάλυση διαστάσεων και υπολογισμός DRI

Στοιχείο	Διαστάσεις που Χρησιμοποιήθηκαν	Συνδυαστική Αξιοπιστία	Συντελεστής Επίδρασης	Βαθμός Επίδρασης
Μετεωρολογικά Δεδομένα	V, F, Va, QT	88,3	1,5	132,5
Υγρασία Εδάφους	V, F, QT (Va εξ.)	88,7	1,4	124,2
Κατάσταση Καλλιιεργειών	V, F, Va, QT	89,5	1,2	107,4
Επιχειρησιακά Δεδομένα	V, F, Va, QT	78,8	0,9	70,9
Σύνολο			5,0	435,0
Τελικός DRI				87,0

Πίνακας 5.5: Ανάλυση διαστάσεων και υπολογισμός DRI για το Παράδειγμα 2

Προφίλ αξιοπιστίας - Παρακολούθηση κινδύνου σε πραγματικό χρόνο

- Όγκος Δεδομένων: 89/100 (Εξαιρετική)
- Συχνότητα Εισαγωγής: 79/100 (Καλή)
- Ποικιλία Πηγών: 89/100 (Εξαιρετική)
- Ποιότητα και Εμπιστοσύνη στην Πηγή: 84/100 (Καλή)
- Συνολικός Δείκτης Αξιοπιστίας (DRI): 87,0 (Εξαιρετική)
- Κατάσταση: μπορεί να προχωρήσει η λήψη απόφασης με ενεργή παρακολούθηση

Σημειώσεις:

Η διάσταση Ποικιλίας εξαιρείται για την Υγρασία Εδάφους λόγω χρήσης ενός μόνο τύπου αισθητήρων (βλ. Ενότητα 4.3.5). Οι μέσοι όροι ανά διάσταση βασίζονται στα στοιχεία στα οποία εφαρμόζεται η αντίστοιχη διάσταση.

Συνέπειες για τη λήψη αποφάσεων και ενέργειες ενδιαφερόμενων μερών

Ασφαλιστικές Εταιρείες: Ο δείκτης DRI (87,0) μπορεί να αξιοποιηθεί για την τεκμηρίωση μοντέλων ιεράρχησης αιτημάτων και τη μείωση ψευδών θετικών προειδοποιήσεων. Τα ασφάλιστρα μπορούν να προσαρμόζονται ανά περιοχή βάσει τοπικών δεικτών αξιοπιστίας.

Παραγωγοί: Συνιστάται η προσθήκη πλεονασμού (π.χ. περισσότερων αισθητήρων) σε περιπτώσεις όπου ο Όγκος Δεδομένων είναι κάτω από 80. Η βελτίωση της συνέπειας καταγραφής δεδομένων μπορεί να μειώσει κενά στην κάλυψη.

Ρυθμιστικές Αρχές: Η τεκμηριωμένη βαθμολόγηση DRI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικύρωση των ασφαλιστικών πρωτοκόλλων και για να διασφαλίσει ότι τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης πληρούν τα ελάχιστα αποδεικτικά κριτήρια.

Πάροχοι Αγροτεχνολογίας: Να ρυθμιστούν οι μηχανισμοί ειδοποίησης βάσει των βαθμολογιών Συχνότητας και Ποιότητας/Εμπιστοσύνης. Οι διεπαφές χρηστών θα πρέπει επίσης να εμφανίζουν με σαφήνεια τις τιμές αξιοπιστίας κατά τη λήψη απόφασης.

Λειτουργικές επισημάνσεις:

- Ο υψηλός συνολικός δείκτης DRI ενισχύει την εμπιστοσύνη στις αποφάσεις παρακολούθησης κινδύνου.
- Οι καθυστερήσεις στα μετεωρολογικά δεδομένα υποδεικνύουν την ανάγκη για ρυθμίσεις ασφαλείας στα όρια ενεργοποίησης (π.χ. ενεργοποίηση προειδοποίησης στις 6 ώρες αντί για τις 2).
- Η μεταβλητότητα στη συχνότητα επιχειρησιακών δεδομένων επισημαίνει την ανάγκη για δυναμικά μοντέλα προσαρμογής.

5.2.3. Αναφορές ESG και Ανθρακικού Αποτυπώματος

Σενάριο Απόφασης και Απαιτούμενα Δεδομένα

Ένα επενδυτικό ταμείο βιώσιμης γεωργίας διαχειρίζεται 125 εκμεταλλεύσεις σε συνολική έκταση 85.000 στρεμμάτων. Για να συμμορφωθεί με τις απαιτήσεις των επενδυτών και ρυθμιστικών πλαισίων όπως η Ομάδα Εργασίας για τις Χρηματοοικονομικές Γνωστοποιήσεις που σχετίζονται με το Κλίμα - Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD) και η ταξινόμια της ΕΕ (Schütze & Stede, 2024; TCFD, 2017; UNEP Finance Initiative, 2021), το ταμείο υποβάλλει ετήσιες αναφορές ανθρακικού αποτυπώματος. Οι αναφορές αυτές υποστηρίζουν επίσης τη συμμετοχή σε αγορές άνθρακα.

Καθώς αυτή η περίπτωση χρήσης στοχεύει κυρίως να αναδείξει τη διατομεακή προσαρμογή του πλαισίου και όχι να εισάγει νέους μηχανισμούς βαθμολόγησης, η αξιολόγηση αξιοπιστίας παρουσιάζεται σε πιο συνοπτική μορφή από τα προηγούμενα δύο παραδείγματα.

Απαιτήσεις Απόφασης:

Το σύστημα αναφοράς πρέπει να παρέχει τυποποιημένα και ανιχνεύσιμα δεδομένα άνθρακα που:

- Καλύπτουν τις Εκπομπές Scope 1, 2 και 3 με επαρκή πληρότητα
- Προέρχονται από επαληθεύσιμες και ελέγξιμες πηγές
- Ευθυγραμμίζονται με πρότυπα MRV (Μετρήσιμα, Αναφερόμενα, Επαληθεύσιμα) για ESG και αγορές άνθρακα (Luo et al., 2024).

Απαιτούμενα Πεδία Δεδομένων και Σταθμίσεις

Πεδίο	Συνάφεια Εκπομπών	Συντελεστής Επίδρασης
Κατανάλωση Ενέργειας	Scope 1 & 2	1,3
Λιπάσματα & Χημικά	Scope 3, ρυθμιστικά	1,3
Χρήση Γης & Διαχείριση	Απορρόφηση, EE	1,1
Μεταφορές & Εφοδιαστική Αλυσίδα	Έμμεσες εκπομπές	0,8

Πίνακας 5.6: Απαιτούμενα πεδία και βάρη για το Παράδειγμα 3

Βαθμολογίες Αξιοπιστίας

Πεδίο	Βαθμολογία	Διαστάσεις που Χρησιμοποιήθηκαν	Σύνοψη Αιτιολόγησης
Ενέργεια	89,0	V, F, Va, QT	Κάλυψη 92%, πολλαπλές πηγές, 85% επαληθευμένοι λογαριασμοί
Λιπάσματα	79,3	Όλες	Εποχικά δεδομένα· 25–30% σφάλμα σε αυτοαναφερόμενες τιμές
Χρήση Γης	84,0	V, Va, QT (F εξαιρείται)	Ετήσιες ενημερώσεις, δορυφορικά και επιτόπια στοιχεία, μέτρια εμπιστοσύνη
Μεταφορές	67,5	Όλες	Μερική κάλυψη, μεγάλη εξάρτηση από εκτιμήσεις

Πίνακας 5.7: Ανάλυση διαστάσεων για το Παράδειγμα 3

Υπολογισμός DRI

Οι σταθμισμένες βαθμολογίες οδηγούν σε τελική πολυκριτηριακή βαθμολογία $DRI = 81,2$, η οποία κατατάσσει την περίπτωση στην κατηγορία Καλή αξιοπιστία.

Μέσοι όροι ανά διάσταση:

- Όγκος Δεδομένων: 76
- Συχνότητα Εισαγωγής: 87 (εξαιρείται η Χρήση γης)
- Ποικιλία Πηγών: 81
- Ποιότητα & Εμπιστοσύνη στην Πηγή: 77

Επιπτώσεις για τους ενδιαφερόμενους φορείς

- **Διαχειριστές Ταμείων:** Ο δείκτης $DRI \geq 80$ καλύπτει τις απαιτήσεις ESG. Απαιτείται προσοχή στην ποιότητα δεδομένων για λιπάσματα και μεταφορές.
- **Επενδυτές:** Η ποιότητα γνωστοποιήσεων καλύπτει τα βασικά πρότυπα, όμως οι τιμές $DRI < 85$ ίσως χρήζουν πιο προσεκτικής παρακολούθησης, ιδίως σε παρακολούθηση απόδοσης από portfolios .
- **Ελεγκτές & Επαληθευτές:** Τα αρχεία ενέργειας και λιπασμάτων πληρούν τα πρότυπα MRV, τα δεδομένα μεταφορών απαιτούν πιο συντηρητική προσέγγιση.
- **Ρυθμιστικές Αρχές και Φορείς Πολιτικής:** Η αξιολόγηση αναδεικνύει κενά αξιοπιστίας στις τιμές που είναι περασμένες χειροκίνητα και στις εκτιμήσεις μεταφορών, καθιστώντας αναγκαία την υποστήριξη μικρών παραγωγών και την εμπλοκή τρίτων ελεγκτών.

5.3. Επαλήθευση και έλεγχος ανθεκτικότητας του πλαισίου

Σε συνέχεια των περιπτώσεων χρήσης στις Ενότητες 5.2.1 έως 5.2.3, η παρούσα ενότητα εξετάζει την εσωτερική ανθεκτικότητα του πλαισίου DRI, δηλαδή το κατά πόσο ανταποκρίνεται με αναλογικό και κατανοητό τρόπο σε μεταβολές που αφορούν την ποιότητα, την πληρότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων. Ο στόχος δεν είναι η αξιολόγηση της προβλεπτικής του ικανότητας, αλλά η επιβεβαίωση της μεθοδολογικής συνέπειας, εάν δηλαδή το πλαίσιο «τιμωρεί» τα υποβαθμισμένα δεδομένα και εάν τα όρια κατάταξης που εφαρμόζει ευθυγραμμίζονται με τις ανάγκες λήψης αποφάσεων.

Για τον σκοπό αυτό εφαρμόστηκαν δύο αναγνωρισμένες προσεγγίσεις, βασισμένες στη βιβλιογραφία για ανάλυση ευαισθησίας και μοντελοποίηση κινδύνου (Basel Committee on Banking Supervision, 2018; Saltelli et al., 2007):

- Έλεγχος ευαισθησίας: Προσομοιώνονται ήπιες υποβαθμίσεις (10-20%) στις διαστάσεις Όγκου, Συχνότητας ή Ποιότητας.
- Έλεγχος πίεσης: Προσομοιώνονται σοβαρότερες αστοχίες, όπως απώλεια 50% στον όγκο, μηδενική εμπιστοσύνη στην πηγή ή πλήρης εξαίρεση μιας διάστασης.

Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στα σενάρια της Ενότητας 5.2, τα οποία βασίζονται σε ρεαλιστικά γεωργικά δεδομένα και κρίσιμες περιπτώσεις λήψης αποφάσεων, όπως η χρηματοδότηση, η ασφάλιση και η συμμόρφωση με τα κριτήρια ESG. Οι Συντελεστές Επίδρασης Απόφασης και οι εξαιρέσεις κατά περίπτωση εφαρμόστηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Ενότητας 4.4.

5.3.1.Στρατηγική και Στόχοι Επικύρωσης

Ο Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI) αποτελεί ένα εργαλείο σε στάδιο ανάπτυξης, και επικύρωση του βασίζεται σε τρία θεμελιώδη κριτήρια:

- Εσωτερική συνέπεια: Ανταποκρίνεται η βαθμολόγηση με λογικό τρόπο σε διαφορετικά είδη εισροών;
- Ευκολία ερμηνείας: Είναι οι μεταβολές στη βαθμολογία κατανοητές και αναλογικές;
- Συνάφεια με την περίπτωση χρήσης: Οδηγούν οι διακυμάνσεις σε ουσιαστικές αλλαγές στη λήψη απόφασης;

Έτσι, δοκιμάζονται παρακάτω τόσο σενάρια υποβάθμισης σε μία μόνο διάσταση όσο και πολυδιάστατες μεταβολές, ώστε να αξιολογηθεί αν οι αλλαγές επιφέρουν μεταβολές μεταξύ των κατηγοριών βαθμολόγησης (π.χ. από «Εξαιρετική» σε «Καλή»), οι οποίες λειτουργούν ως πρακτικά όρια ενεργοποίησης περαιτέρω ελέγχων των δεδομένων.

5.3.2. Αποτελέσματα Ελέγχων Ευαισθησίας και Πίεσης

(α) Έλεγχος Ευαισθησίας: Ήπιες, Ελεγχόμενες Υποβαθμίσεις

Περίπτωση Χρήσης	Σενάριο	Αρχικός DRI	Νέος DRI	Μεταβολή	Επίδραση στην Κατάταξη
Πιστοδότηση	-10% Όγκος	93,00	91,83	-1,17	Καμία αλλαγή
Πιστοδότηση	-20% Ποιότητα	93,00	89,39	-3,61	Καμία αλλαγή
Διαχείριση Κινδύνου	-10% Συχνότητα	88,30	85,65	-2,65	Καμία αλλαγή
Διαχείριση Κινδύνου	-20% Όγκος	88,30	84,07	-4,23	Εξαιρετική → Καλή
ESG	-20% Όγκος	79,30	77,12	-2,18	Καμία αλλαγή

Πίνακας 5.8: Έλεγχος ευαισθησίας του πλαισίου

Η λειτουργία του DRI αποδεικνύεται ευαίσθητη και ερμηνεύσιμη, καθώς αντικατοπτρίζει με ακρίβεια τις επιπτώσεις της υποβάθμισης στις επιμέρους διαστάσεις. Για παράδειγμα, η μείωση κατά 20% στον Όγκο δεδομένων στο σενάριο διαχείρισης κινδύνου οδήγησε σε μεταβολή κατάταξης από «Εξαιρετική» σε «Καλή», δείγμα ότι η έλλειψη πληρότητας μπορεί να υπονομεύσει την αξιοπιστία. Αντίστοιχα, η πτώση της Ποιότητας στα δεδομένα πιστοληπτικής αξιολόγησης προκάλεσε μείωση κατά 3,6 μονάδες, επιβεβαιώνοντας τη σημασία της επικύρωσης των πηγών στον χρηματοπιστωτικό τομέα.

(β) Έλεγχος Πίεσης: Σοβαρές αλλά Πιθανές Αστοχίες

Οι έλεγχοι πίεσης περιλάμβαναν μείωση κατά 50% στον Όγκο δεδομένων, πλήρη απουσία εμπιστοσύνης στην πηγή (π.χ. μη ελεγμένα αρχεία) και εξαίρεση ολόκληρης διάστασης σε περιπτώσεις δεδομένων από μία μόνο πηγή.

- Στην περίπτωση αξιολόγησης πιστοληπτικής ικανότητας, η μείωση του Όγκου των οικονομικών στοιχείων κατά 50% οδήγησε τον DRI από 93,0 σε 85,8, ακριβώς πάνω από το όριο για «πλήρη αξιοπιστία».
- Στο σενάριο ESG, η ανάθεση μηδενικής Ποιότητας στα δεδομένα λιπασμάτων (πλήρως αυτοαναφερόμενα, χωρίς έλεγχο) προκάλεσε μείωση άνω των 10 μονάδων, μετακινώντας την κατάταξη από «Καλή» σε «Οριακή».

Αυτές οι τάσεις αντανakλούν γνωστά προβλήματα με τα αυτοαναφερόμενα γεωργικά δεδομένα (Basso & Antle, 2020) και ενισχύουν την ικανότητα του πλαισίου να σηματοδοτεί πού απαιτείται πρόσθετη επαλήθευση.

(γ) Σύνθετα Αποτελέσματα: Πολυδιάστατη Υποβάθμιση

Η προσομοίωση ταυτόχρονων υποβαθμίσεων σε πολλαπλές διαστάσεις (π.χ. -15% στον Όγκο, -10% στη Συχνότητα και -10% στην Ποιότητα) οδήγησε σε αθροιστική πτώση του DRI κατά 6-8 μονάδες, συχνά συνοδευόμενη από αλλαγές στην κατάταξη. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι το πλαίσιο δεν αντιδρά υπερβολικά σε μεμονωμένες αδυναμίες, αλλά είναι ευαίσθητο σε συσσωρευμένα ελλείμματα αξιοπιστίας, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλού ρίσκου όπως η ασφάλιση.

5.3.3.Ερμηνεία και Επιπτώσεις για τη Λήψη Αποφάσεων

Ο Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI) παρουσίασε τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ανταπόκριση ανάλογη με τις μεταβολές στις επιμέρους διαστάσεις της αξιοπιστίας, αντικατοπτρίζοντας εύλογα την υποβάθμιση δεδομένων.
- Η πτώση του DRI κάτω από 85 μονάδες αποτελεί ένδειξη ότι αυξάνεται ο κίνδυνος και απαιτείται ενισχυμένος έλεγχος πριν από τη λήψη απόφασης.
- Η ερμηνευσιμότητα εξασφαλίζει ότι κάθε πτώση στη βαθμολογία μπορεί να συσχετιστεί με μια συγκεκριμένη διάσταση, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων.

Σε πρακτικό επίπεδο:

- Πτώσεις του DRI μεγαλύτερες από 2,5 μονάδες μπορούν να λειτουργήσουν ως πρώιμοι δείκτες προειδοποίησης για ελεγκτές ή αναλυτές.
- Αλλαγές κατάταξης (π.χ. από «Εξαιρετική» σε «Καλή») θα πρέπει να ενεργοποιούν πρωτόκολλα επικύρωσης ή εκ νέου υποβολής δεδομένων.
- Στις πλατφόρμες ψηφιακής γεωργίας, τα αποτελέσματα του DRI μπορούν να συνδεθούν με αυτοματοποιημένες ενδείξεις, ελέγχους επιλεξιμότητας ή μηχανισμούς επικύρωσης με ανθρώπινη παρέμβαση (human-in-the-loop).

Συνολικά, τα αποτελέσματα αυτά επαληθεύουν τον DRI ως ένα διαφανές και ευαίσθητο ως προς τα συμφραζόμενα εργαλείο αξιοπιστίας, που υποστηρίζει τεκμηριωμένες, αποφάσεις σε τομείς όπως η γεωργία, η πράσινη οικονομία και η βιωσιμότητα.

6. Συζήτηση και Συμπεράσματα

6.1. Πλεονεκτήματα και Συνεισφορά του Πλαισίου

Η παρούσα ενότητα συνοψίζει τα βασικά πλεονεκτήματα και τη συνολική συνεισφορά του Δείκτη Αξιοπιστίας Γεωργικών Δεδομένων (DRI), με βάση τις περιπτώσεις χρήσης και τους ελέγχους ανθεκτικότητας που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Τα πλεονεκτήματα αυτά καλύπτουν τόσο τη μεθοδολογική καινοτομία όσο και τη πρακτική εφαρμογή του πλαισίου, επιβεβαιώνοντας τη λειτουργία του ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, ειδικά σχεδιασμένο για τις απαιτήσεις της ψηφιακής γεωργίας.

Παρότι τα υφιστάμενα πλαίσια αξιολόγησης ποιότητας δεδομένων, όπως οι αρχές FAIR (Wilkinson et al., 2016), το πρότυπο ISO/IEC 25012 (Gualo et al., 2021), και το πλαίσιο FCSM (Dworak-Fisher et al., 2020), προσφέρουν χρήσιμες γενικές αρχές διαχείρισης δεδομένων, δεν ανταποκρίνονται επαρκώς στις απαιτήσεις των αποφάσεων υψηλού ρίσκου και εξειδικευμένου χαρακτήρα, όπως αυτές του αγροτικού τομέα. Έτσι, το πλαίσιο DRI αναπτύχθηκε ακριβώς για να καλύψει αυτό το κενό, δηλαδή να προσφέρει μια δομημένη, επεκτάσιμη και ευαίσθητη στην περίπτωση χρήσης μεθοδολογία για την ποσοτική εκτίμηση της αξιοπιστίας των γεωργικών δεδομένων.

6.1.1. Στάθμιση ανά Περίπτωση Χρήσης

Το πλέον διακριτό χαρακτηριστικό του DRI είναι η δυνατότητά του να σταθμίζει τις διαστάσεις ποιότητας δεδομένων ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τις απαιτήσεις της κάθε απόφασης. Η λογική αυτή του πλαισίου αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα, όπου δεν έχουν όλα τα είδη δεδομένων την ίδια σημασία σε κάθε απόφαση. Για παράδειγμα, η αξιοπιστία των οικονομικών στοιχείων είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση πιστοληπτικής ικανότητας, ενώ η χωρική κάλυψη και η χρονική συχνότητα των δεδομένων είναι πιο καθοριστικές στη διαχείριση κινδύνου ή στην τιμολόγηση ασφαλιστηρίων.

Ο DRI λαμβάνει υπόψη τις εν λόγω διαφοροποιήσεις μέσω ενός ευέλικτου συστήματος στάθμισης της επίδρασης σε μια απόφαση, το οποίο επιτρέπει την προσαρμογή της αξιολόγησης της αξιοπιστίας στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της κάθε περίπτωσης χρήσης. Αυτή η προσέγγιση ξεπερνά τα γενικά μοντέλα ποιότητας δεδομένων, καθώς προσφέρει στοχευμένη αξιολόγηση της καταλληλότητας των δεδομένων για τον σκοπό, ένα χαρακτηριστικό απολύτως απαραίτητο σε γεωργικά συστήματα που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα, μεταβλητή έκθεση σε κίνδυνο και συνεχή κανονιστική εποπτεία.

6.1.2. Λειτουργική Καταλληλότητα για Γεωργικά Πληροφοριακά Συστήματα

Τα γεωργικά δεδομένα που είναι από τη φύση τους ετερογενή, καθώς προέρχονται από συνδυασμούς αισθητήρων IoT, χειροκίνητων καταγραφών, δορυφορικών απεικονίσεων και τιμολογίων, είναι συχνά είναι κατακερματισμένα ανά αγροτεμάχιο, καλλιεργητική περίοδο

και ψηφιακή πλατφόρμα, ενώ παρουσιάζουν ελλειπείς τιμές ή μη σταθερά διαστήματα ενημέρωσης. Σε αντίθεση με γενικά μοντέλα αξιολόγησης ποιότητας, ο DRI έχει σχεδιαστεί με πλήρη επίγνωση αυτών των ιδιαιτεροτήτων. Η αρθρωτή αρχιτεκτονική του επιτρέπει την επιλεκτική ενσωμάτωση ή εξαίρεση διαστάσεων όπως η Ποικιλία ή η Συχνότητα Εισόδου, ανάλογα με τη φύση των δεδομένων. Το παραπάνω αποτρέπει τη λανθασμένη υποβάθμιση στατικών ή στοιχείων από μια μόνο πηγή, ενισχύοντας τη δικαιοσύνη και τη λειτουργικότητα του πλαισίου σε περιβάλλοντα με διαφορετικό βαθμό ψηφιακής ωριμότητας, κάλυψης αισθητήρων και πρακτικών καταγραφής.

Το πλαίσιο λαμβάνει επίσης υπόψη υποθέσεις εξειδικευμένες στον αγροτικό τομέα, σχετικά με την αξιοπιστία, την πληρότητα και τον ρυθμό χρήσης δεδομένων, οι οποίες τεκμηριώνονται στα κεφάλαια 2 και 3 και επικυρώνονται μέσα από τα ρεαλιστικά σενάρια του Κεφαλαίου 5. Αυτή η προσαρμογή στην ψηφιακή γεωργία καθιστά τον DRI όχι μόνο πιο κατανοητό για τους γεωπόνους και τους παραγωγούς, αλλά και πιο αξιόπιστο για τα ενδιαφερόμενα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα, τις ασφαλιστικές εταιρείες και τους ελεγκτικούς φορείς που βασίζονται στα δεδομένα για τη λήψη κρίσιμων αποφάσεων.

6.1.3.Ευκολία κατανόησης και χρήσης

Το σύστημα βαθμολόγησης του DRI έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τη χρηστικότητα και την άμεση εφαρμογή. Αντί να βασίζεται σε αφηρημένες έννοιες ποιότητας ή σε ελέγχους πληρότητας μεταδεδομένων, παρέχει σαφείς, αριθμητικές βαθμολογίες αξιοπιστίας (0-100), συνοδευόμενες από κατηγορίες ταξινόμησης (π.χ. Εξαιρετική, Καλή, Οριακή, Ανεπαρκής). Αυτές οι βαθμολογίες μπορούν να ενσωματωθούν στη ροή διαδικασιών για τη λήψη αποφάσεων, ώστε να ενεργοποιούνται τα σχετικά πρωτόκολλα εξακρίβωσης δεδομένων, να προσαρμόζονται τα όρια κινδύνου ή να προσδιορίζεται η καταλληλότητα για χρηματοδότηση, επιδοτήσεις ή συστήματα υποβολής εκθέσεων βιωσιμότητας.

Η εν λόγω δομή εξυπηρετεί πολλούς ενδιαφερόμενους φορείς, όπως τράπεζες, ασφαλιστικές εταιρείες και γεωπόνους. Τα προφίλ αξιοπιστίας και τα σαφώς καθορισμένα όρια της κάθε κατηγορίας ενισχύουν τη διαφάνεια, διευκολύνοντας την αιτιολόγηση αποφάσεων και την επικοινωνία του επιπέδου εμπιστοσύνης στα δεδομένα, χωρίς να απαιτείται η αποκάλυψη ευαίσθητου περιεχομένου. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε συνεργατικά σχήματα, θεσμικούς ελέγχους ή εφαρμογές βιώσιμης χρηματοδότησης.

6.1.4.Συγκριτική Αξιολόγηση: Επέκταση Υφιστάμενων Προτύπων

Αν και ο DRI είναι ευθυγραμμισμένος με τις υπάρχουσες αρχές διακυβέρνησης δεδομένων, προχωρά ένα βήμα παραπέρα, καθώς επιχειρεί να ποσοτικοποιήσει την αξιοπιστία των δεδομένων με τρόπους που τα γενικά πρότυπα δεν καλύπτουν. Ο Πίνακας 6.1 συνοψίζει τη θέση του DRI σε σχέση με πέντε ευρέως αναφερόμενα μοντέλα. Ο DRI καλύπτει πλήρως όλες τις βασικές διαστάσεις ποιότητας, προσθέτοντας όμως τρεις κρίσιμες βελτιώσεις:

- **Στάθμιση ανά περίπτωση χρήσης:** Κανένα από τα συγκρινόμενα πρότυπα δεν λαμβάνει υπόψη τη διαφοροποιημένη σημασία κάθε διάστασης ανάλογα με τον τύπο της εκάστοτε απόφασης.
- **Εφαρμογή στον αγροτικό τομέα:** Λαμβάνει υπόψη τόσο τους εποχικούς κύκλους, όσο και τη χωρική ετερογένεια και τις πολλαπλές πηγές εισροών που συναντώνται στην γεωργία
- **Ερμηνευσιμότητα βαθμολογιών:** Μεταφράζει την αξιοπιστία σε άμεσα αξιοποιήσιμες βαθμολογίες για λήψη αποφάσεων, αντί να την παρουσιάζει μέσα από αφηρημένες μετρικές ή μεταδεδομένα.

Κριτήριο	Πλαίσιο DRI	FAIR	ISO 25012	FCSM	USDA-NIST
Στάθμιση ανά περίπτωση χρήσης	Ναι	Όχι	Όχι	Όχι	Όχι
Καταλληλότητα για γεωργικά δεδομένα	Υψηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέτρια
Ερμηνευσιμότητα για φορείς	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Μέτρια	Μέτρια

Πίνακας 6.1: Συγκριτική θέση του πλαισίου DRI σε σχέση με τα υφιστάμενα πρότυπα

Η παραπάνω σύγκριση δείχνει ότι ο DRI δεν επιχειρεί να υποκαταστήσει τα υφιστάμενα μοντέλα, αλλά να λειτουργήσει συμπληρωματικά με αυτά, παρέχοντας μια πρακτική προσέγγιση για την αξιολόγηση αξιοπιστίας. Βασίζεται στα δυνατά σημεία των μοντέλων αυτών, όπως η διαφάνεια και η αρθρωτή δομή, και τα εμπλουτίζει με λογική προσαρμοσμένη στις ανάγκες της γεωργίας.

Συνοψίζοντας, το πλαίσιο που προτάθηκε στην εν λόγω διατριβή προσφέρει μια καινοτόμα, τεκμηριωμένη λύση σε ένα κρίσιμο κενό στα γεωργικά πληροφοριακά συστήματα σήμερα, που δεν είναι άλλο από την απουσία ενός δομημένου, προσαρμοζόμενου προτύπου για την ποσοτική εκτίμηση της αξιοπιστίας των δεδομένων. Όπως αναδείχθηκε στο Κεφάλαιο 5 και επιβεβαιώθηκε μέσω της παραπάνω συγκριτικής ανάλυσης, ο DRI δεν αποτελεί απλώς θεωρητική βελτίωση σε σχέση με τα υπάρχοντα μοντέλα, αλλά προσφέρει έναν πρακτικό οδηγό για πιο υπεύθυνη, αποτελεσματική και διαφανή λήψη αποφάσεων χρησιμοποιώντας γεωργικά δεδομένα.

6.2. Περιορισμοί και Ανοικτά Ζητήματα

Παρότι ο δείκτης DRI παρουσιάζει σαφή μεθοδολογικά πλεονεκτήματα και σημαντική πρακτική αξία, παραμένει, προς το παρόν, ένα εργαλείο υπό ανάπτυξη. Ενώ η εσωτερική του αρχιτεκτονική και η θεωρητική του τεκμηρίωση έχουν ολοκληρωθεί, δεν έχει ακόμη δοκιμαστεί σε ρεαλιστικές επιχειρησιακές συνθήκες. Οι περιορισμοί που ακολουθούν αφορούν κυρίως σημεία που απαιτούν εμπειρική ρύθμιση, ανατροφοδότηση από τους

ενδιαφερόμενους φορείς και τεχνική αξιολόγηση, πριν το πλαίσιο καταστεί κατάλληλο για εφαρμογή σε ευρεία κλίμακα.

Ένα πιλοτικό έργο πεδίου έχει προγραμματιστεί για το τρίτο τρίμηνο του 2025, σε συνεργασία με νεοφυή επιχείρηση ψηφιακής γεωργίας και εταίρους από τον χρηματοοικονομικό τομέα. Η πιλοτική φάση θα εστιάσει στη δοκιμή του πλαισίου σε πραγματικά δεδομένα και στη σταδιακή αντιμετώπιση των ακόλουθων ζητημάτων:

Εμπειρική Βαθμονόμηση Συντελεστών και Ορίων: Οι υφιστάμενες παράμετροι βαθμολόγησης, όπως οι Συντελεστές Επίδρασης Απόφασης και οι κατηγορίες αξιοπιστίας βασίζονται σε τεκμηρίωση από τη βιβλιογραφία και την εμπειρογνωμοσύνη, αλλά δεν έχουν ακόμη ευθυγραμμιστεί με πραγματικά αποτελέσματα. Απαιτείται επικύρωση με βάση αποφάσεις του πραγματικού κόσμου (π.χ. εγκρίσεις δανείων, αποδοχές αποζημιώσεων, έλεγχοι ESG), ώστε να επιβεβαιωθεί κατά πόσο οι βαθμολογίες DRI αντανακλούν με ακρίβεια τη συνάφεια και τον κίνδυνο των αποφάσεων.

Πρακτική Χρήση και Ενδιαφερόμενοι Φορείς: Παρότι ο σχεδιασμός του DRI περιλαμβάνει σαφείς αριθμητικές τιμές και κατηγορίες βαθμολόγησης, η πρακτική χρήση αυτών των εξόδων από τους τελικούς χρήστες δεν έχει ακόμη δοκιμαστεί. Δεν είναι ξεκάθαρο το πώς οι διαφορετικοί ενδιαφερόμενοι, όπως παραγωγοί, τράπεζες ή ασφαλιστικοί φορείς, θα ερμηνεύσουν τα αποτελέσματα, τι διευκρινίσεις θα χρειαστούν και πώς θα ανταποκριθούν σε χαμηλές ή οριακές βαθμολογίες αξιοπιστίας.

Τεχνολογική Υλοποίηση και Αυτοματοποίηση: Για να μπορεί να υιοθετηθεί ευρέως το πλαίσιο και να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, απαιτείται η ενσωμάτωσή του σε ψηφιακές πλατφόρμες, όπως τα FMIS, οι μηχανισμοί παρακολούθησης ESG ή οι ασφαλιστικές εφαρμογές. Αυτό προϋποθέτει την ανάπτυξη API, την τυποποίηση των μορφών εισόδου και την κατάλληλη υποδομή για ασφάλεια, ιχνηλασιμότητα και διαχείριση νέων εκδόσεων (version control).

Οι παραπάνω περιορισμοί δεν σχετίζονται με αδυναμίες του πλαισίου ως προς τη λογική ή τον σχεδιασμό του, αλλά με την ανάγκη μετάβασης από την ερευνητική προσέγγιση στην πρακτική εφαρμογή. Αντιμετωπίζοντάς τους συστηματικά στο πλαίσιο της πιλοτικής φάσης, ο DRI θα αποκτήσει τα αναγκαία εφόδια για να υλοποιηθεί σε υπάρχοντα περιβάλλοντα, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την αξιοπιστία στη λήψη αποφάσεων για τη γεωργική χρηματοδότηση, την ασφάλιση και τη βιώσιμη ανάπτυξη.

6.3. Υλοποίηση και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Ο Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI) σχεδιάστηκε, όχι μόνο ως εννοιολογικό πλαίσιο, αλλά και ως πρακτικό εργαλείο για τη βελτίωση της λήψης αποφάσεων στη γεωργική χρηματοδότηση, στην ασφάλιση, στο ESG analytics και στην παροχή ψηφιακών υπηρεσιών. Με τη βασική λογική πλήρως διαμορφωμένη και το proof-of-concept ολοκληρωμένο, η επόμενη φάση αφορά την πρακτική εφαρμογή. Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τον οδικό

χάρτη για την υλοποίηση σε πραγματικές συνθήκες, αρχής γενομένης από το τρίτο τρίμηνο του 2025, καθώς και τις βασικές κατευθύνσεις για μελλοντική ερευνητική εξέλιξη.

6.3.1.Πιλοτική Εφαρμογή: Ιούλιος-Σεπτέμβριος 2025

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6.2, ένα πλήρες πιλοτικό έργο έχει προγραμματιστεί για το τρίτο τρίμηνο του 2025, σε συνεργασία με ελληνική startup έξυπνης γεωργίας. Το έργο θα εφαρμόσει το σύστημα βαθμολόγησης DRI σε πραγματικά σύνολα δεδομένων, καλύπτοντας διαφορετικούς τύπους γεωργικών εκμεταλλεύσεων και υπηρεσιών, σηματοδοτώντας έτσι την πρώτη ολοκληρωμένη δοκιμή του πλαισίου υπό επιχειρηματικές συνθήκες. Οι στόχοι του προγράμματος περιλαμβάνουν:

- **Εμπειρική Ρύθμιση Συντελεστών:** Συνεργασία με γεωπόνους, χρηματοοικονομικούς αναλυτές και υπεύθυνους ESG για τη βελτίωση των συντελεστών επίδρασης και των παραμέτρων βαθμολόγησης. Η ρύθμιση θα βασιστεί σε επαναληπτικά στάδια ανατροφοδότησης και στην αξιολόγηση πραγματικών δεδομένων.
- **Ευθυγράμμιση Ορίων με Πραγματικά Αποτελέσματα:** Αντιστοίχιση των κατηγοριών βαθμολόγησης (π.χ. Εξαιρετική, Καλή) με πραγματικές αποφάσεις, όπως εγκρίσεις δανείων ή αναφορές ESG, ώστε τα όρια να αντανακλούν τα όρια κάθε τομέα απέναντι σε τυχόν αβεβαιότητα.
- **Έλεγχος Χρηστικότητας και Διεπαφών:** Αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο οι χρήστες ερμηνεύουν τις βαθμολογίες DRI σε εργαλεία λήψης αποφάσεων, καθώς και πώς ανταποκρίνονται σε ενδείξεις χαμηλής αξιοπιστίας ή πρώιμων προειδοποιήσεων.
- **Αυτοματοποίηση Ροών και Ενσωμάτωση μέσω API:** Μετατροπή της λογικής βαθμολόγησης σε αυτοματοποιημένες ροές εργασίας για ενσωμάτωση σε πλατφόρμες FMIS και ESG μέσω API και ελαφρών ψηφιακών υπηρεσιών.

6.3.2.Πεδία Εφαρμογής και Στρατηγική Αξία

Το DRI είναι σχεδιασμένο ώστε να προσαρμόζεται σε διαφορετικές περιπτώσεις, με γνώμονα όμως τις απαιτήσεις της εκάστοτε απόφασης. Η επιχειρησιακή του αξία εντοπίζεται στη στήριξη αποφάσεων βασισμένων σε δεδομένα με αξιολόγηση κινδύνου σε τέσσερις βασικούς τομείς:

Γεωργική Χρηματοδότηση: Η ενσωμάτωση των βαθμολογιών DRI σε διαδικασίες αξιολόγησης αιτήσεων δανείων μπορεί να αντικαταστήσει τις υποκειμενικές εκτιμήσεις. Τα δεδομένα υψηλής αξιοπιστίας ενδέχεται να επιτρέψουν ευνοϊκότερους όρους, ενώ οι χαμηλές βαθμολογίες μπορεί να αποτελούν κίνητρο για επιπλέον ελέγχους.

Ασφάλιση και Παρακολούθηση Κινδύνου: Οι ασφαλιστικοί πάροχοι μπορούν να διαφοροποιούν τα αγροτεμάχια με βάση την αξιοπιστία των δεδομένων τους. Υψηλά DRI

υποστηρίζουν αυτοματοποιημένες αποζημιώσεις, ενώ χαμηλές τιμές ενδέχεται να σηματοδοτούν ελλιπή τεκμηρίωση ή κίνδυνο υποαναφοράς.

Αναφορές ESG και Λογοδοσία: Οι βαθμολογίες DRI ενισχύουν τη διαφάνεια στις διαδικασίες MRV (Μέτρηση, Αναφορά, Επαλήθευση), παρέχοντας αντικειμενική εκτίμηση της αξιοπιστίας δεδομένων (π.χ. κατανάλωση καυσίμων, χρήση λιπασμάτων). Μελλοντικά, μπορούν να χρησιμοποιούνται ως προϋποθέσεις για πρόσβαση σε αγορές άνθρακα ή βιώσιμη χρηματοδότηση.

Ψηφιακές Πλατφόρμες: Πάροχοι ψηφιακών υπηρεσιών μπορούν να αξιοποιούν τις βαθμολογίες DRI για εσωτερικό έλεγχο ποιότητας δεδομένων, στοχευμένη εκπαίδευση και διαφανή διαμοιρασμό δεδομένων με τεκμηριωμένη αξιοπιστία.

6.3.3.Μελλοντικοί Ερευνητικοί Άξονες

Για την εξέλιξη του DRI από θεωρητικό πλαίσιο σε ώριμο εργαλείο διακυβέρνησης δεδομένων, απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε τέσσερις βασικές κατευθύνσεις:

Επικύρωση με βάση τα αποτελέσματα: Ανάλυση της συσχέτισης μεταξύ βαθμολογιών DRI και πραγματικών συμπερασμάτων (π.χ. αθετήσεις δανείων, αποτελέσματα ελέγχων) για την ενίσχυση της αξιοπιστίας του ως εργαλείο εκτίμησης κινδύνου.

Αξιολόγηση Εμπιστοσύνης με Βάση την Τεχνητή Νοημοσύνη: Διερεύνηση εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης και τεχνολογιών blockchain για τη δυναμική, ανθεκτική σε αλλοιώσεις βαθμολόγηση εμπιστοσύνης, με στόχο την μεγαλύτερη αυτοματοποίηση και ιχνηλασιμότητα.

Συνεργασία με Φορείς και Διακυβέρνηση: Ανάπτυξη συμμετοχικών διαδικασιών ρύθμισης συντελεστών και διαφάνειας, ιδίως σε πλαίσια μικρών παραγωγών, συνεταιρισμών ή δεδομένων ευαίσθητου χαρακτήρα.

Διατομεακή Εφαρμογή: Πειραματική εφαρμογή του DRI και σε άλλους τομείς με αντίστοιχες προκλήσεις ετερογενών δεδομένων, όπως η υγεία, η πολιτική προστασία ή η παρακολούθηση βιοποικιλότητας.

6.4. Τελικά Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία επιχείρησε να αντιμετωπίσει μια από τις σύγχρονες προκλήσεις της ψηφιακής γεωργίας: την απουσία ενός δομημένου, διαφανούς και προσανατολισμένου στη λήψη αποφάσεων μηχανισμού αξιολόγησης της αξιοπιστίας γεωργικών δεδομένων. Καθώς ο τομέας καθίσταται ολοένα και πιο εξαρτημένος από τα δεδομένα, είτε αυτό είναι για σκοπούς χρηματοδότησης, βελτιστοποίησης γεωργικών πρακτικών και αύξηση παραγωγής ή για σκοπούς διαχείρισης κινδύνου, η ανάγκη για ερμηνεύσιμους και πρακτικά αξιοποιήσιμους δείκτες αξιοπιστίας είναι πλέον επιτακτική.

Ο Δείκτης Αξιοπιστίας Δεδομένων (DRI) εισάγει μια νέα μεθοδολογική προσέγγιση για την ποσοτική αποτίμηση της αξιοπιστίας και της καταλληλότητας των δεδομένων ανά περίπτωση χρήσης. Μέσω αρθρωτής βαθμολόγησης με βάση τα εκάστοτε συμφραζόμενα και καθορισμένων ορίων ερμηνείας, ο DRI μεταφράζει αφηρημένες ανησυχίες για την ποιότητα και την εμπιστευτικότητα των δεδομένων σε λειτουργικές και συγκρίσιμες βαθμολογίες αξιοπιστίας. Σε αντίθεση με τα υφιστάμενα γενικά ή στατικά πρότυπα, το προτεινόμενο πλαίσιο ανταποκρίνεται στις ιδιαιτερότητες της γεωργικής πραγματικότητας, που δεν είναι άλλες από τον κατακερματισμό των δεδομένων, την ποικιλία των τύπων δεδομένων και των επιπέδων εμπιστοσύνης τους, αλλά και τις έντονες χωροχρονικές διαφοροποιήσεις τους.

Μέσα από στοχευμένα σενάρια προσομοίωσης και δοκιμές ανθεκτικότητας, ο DRI απέδειξε ότι μπορεί να παράγει αντιπροσωπευτικές εκτιμήσεις, ικανές να υποστηρίξουν κρίσιμες αποφάσεις. Με αυτόν τον τρόπο, καλύπτει ένα σημαντικό μεθοδολογικό κενό, επεκτείνοντας τα υφιστάμενα πρότυπα διαχείρισης ποιότητας σε ένα πρακτικό, διαλειτουργικό εργαλείο για χρήστες και φορείς του αγροτικού τομέα.

Η συμβολή της παρούσας έρευνας είναι διττή: αφενός προτείνει μια νέα εννοιολογική προσέγγιση, αναγνωρίζοντας την αξιοπιστία ως δυναμική ως προς την περίπτωση χρήσης ιδιότητα των δεδομένων, αφετέρου παραδίδει ένα εφαρμόσιμο πλαίσιο, έτοιμο για πιλοτική εφαρμογή. Αν και η χρήση προσομοιωμένων δεδομένων περιορίζει προσωρινά την δυνατότητα άμεσης πρακτικής υιοθέτησης του πλαισίου, το επικείμενο πιλοτικό έργο κατά το δεύτερο μισό του 2025 αναμένεται να επιτρέψει εμπειρική βαθμονόμηση, ενσωμάτωση σε πραγματικά συστήματα ψηφιακής γεωργίας και ουσιαστική ανατροφοδότηση από εμπλεκόμενους φορείς.

Όπως επισημαίνει το Πανεπιστήμιο του Stanford (Stanford University, 2024), το foundational research αποτελεί το «αθέατο έργο που απαιτείται για τη γέννηση νέας γνώσης και ουσιαστικής καινοτομίας». Υπό αυτό το πρίσμα, ο DRI ξεχωρίζει τόσο για την επιστημονική συμβολή του στον τομέα των γεωργικών δεδομένων, όσο και ως μια πλατφόρμα για διεπιστημονική πρόοδο στον χώρο της διακυβέρνησης δεδομένων.

Το ευρύτερο μήνυμα της εργασίας είναι ότι τα δεδομένα από μόνα τους δεν αρκούν. Για να ανταποκριθεί η ψηφιακή γεωργία στις προσδοκίες της βιωσιμότητας, της ισότητας και της ανθεκτικότητας, απαιτείται η αξιολόγηση και η σαφής επικοινωνία της αξιοπιστίας που τα συνοδεύει. Το παραπάνω προϋποθέτει αυστηρές αλλά προσαρμόσιμες μεθόδους, που να είναι διαφανείς και πλήρως ευθυγραμμισμένες με τις πρακτικές του αγροτικού τομέα. Μέσα από το Δείκτη Αξιοπιστίας Δεδομένων, ανοίγει ένας νέος δρόμος για την ενίσχυση της εμπιστοσύνης στα γεωργικά δεδομένα.

7. Βιβλιογραφία

- 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>
- AgGateway. (n.d.). On-Farm Initiatives. In *AgGateway*. <https://aggateway.org/CurrentWork/On-Farm.aspx>
- AgGateway. (2024). AgGateway Releases ADAPT Standard Version 1.0. In *AgGateway News*. <https://aggateway.org/News/2024PressReleases/AgGatewayReleasesAdaptStandardVersion10.aspx>
- Agmatix. (2024). Big Data Analytics in Agriculture. In *Agmatix Blog*. <https://www.agmatix.com/blog/big-data-analytics-in-agriculture-the-key-to-unlocking-the-potential-of-field-trials/>
- Agmon, N., & Ahituv, N. (1987). Assessing Data Reliability in an Information System. *Journal of Management Information Systems*, 4(2), 34–44. <https://doi.org/10.1080/07421222.1987.11517792>
- AGRICORE project. (2023). Greece Socio-Economic Impacts. In *AGRICORE*. AGRICORE Project. <https://agricore-project.eu/greece-socio-economic-impacts/>
- AgriTechTomorrow. (2024). Benefits of Edge Computing in Agriculture. In *AgriTechTomorrow*. <https://www.agritechtomorrow.com/story/2024/03/benefits-of-edge-computing-in-agriculture/15357/>
- Almalki, R., Khaki, M., Saco, P. M., & Rodriguez, J. F. (2022). Monitoring and Mapping Vegetation Cover Changes in Arid and Semi-Arid Areas Using Remote Sensing Technology: A Review. *Remote Sensing*, 14(20), 5143. <https://doi.org/10.3390/rs14205143>
- Alsadik, B., Javan, F. D., & Nex, F. (2023). *UAV remote sensing for smart agriculture*. GIM-International.
- Alzahrani, A., Alyas, T., Alissa, K., Abbas, Q., Alsaawy, Y., & Tabassum, N. (2022). Hybrid Approach for Improving the Performance of Data Reliability in Cloud Storage Management. *Sensors*, 22(16), 5966. <https://doi.org/10.3390/s22165966>
- Antona, A., Bettio, V., Venetucci, J., Cracas, S. V., Mazzucco, E., Garro, G., Varalda, M., Fontanarosa, C., Spinelli, M., Amoresano, A., Rolla, R., & Capello, D. (2025). Evaluating Cryopreservation Methods in Biobanking: Impacts on Biomarker Integrity and Omics Data Reliability. *Biopreservation and Biobanking*. <https://doi.org/10.1089/bio.2024.0141>
- Aubert, B. A., Schroeder, A., & Grimaudo, J. (2012). IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. *Decision Support Systems*, 54(1), 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.07.002>
- Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E.-H. M. (2019). Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk. *IEEE Access*, 7, 129551–129583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>
- Bailey, D. W., Mosley, J. C., Estell, R. E., Cibils, A. F., Horney, M., Hendrickson, J. R., Walker, J. W., Launchbaugh, K. L., & Burritt, E. A. (2019). Synthesis Paper: Targeted Livestock Grazing: Prescription for Healthy Rangelands. *Rangeland Ecology & Management*, 72(6), 865–877. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.06.003>
- Bainbridge, S., Eggeling, D., & Page, G. (2011). Lessons from the Field—Two Years of Deploying Operational Wireless Sensor Networks on the Great Barrier Reef. *Sensors*, 11(7), 6842–6855. <https://doi.org/10.3390/s110706842>
- Balehegn, M. (2015). Unintended Consequences: The Ecological Repercussions of Land Grabbing in Sub-Saharan Africa. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 57(2), 4–21. <https://doi.org/10.1080/00139157.2015.1001687>
- Basel Committee on Banking Supervision. (2018). Stress Testing Principles. In *Bank for International Settlements*. Bank for International Settlements. <https://www.bis.org/bcbs/publ/d450.pdf>
- Basel Committee on Banking Supervision. (2021). Basel III: Finalising post-crisis reforms. In *Bank for International Settlements*. <https://www.bis.org/bcbs/publ/d424.pdf>
- Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3(4), 254–256. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>

- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
- Béné, C., Prager, S. D., Achicanoy, H. A. E., Toro, P. A., Lamotte, L., Bonilla, C., & Mapes, B. R. (2019). Global map and indicators of food system sustainability. *Scientific Data*, 6(1), 279. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0301-5>
- Bhole, G. P. (2018). Multi Criteria Decision Making (MCDM) Methods and its applications. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 6(5), 899–915. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.5145>
- Billib, M., Bardowicks, K., & Arumí, J. L. (2009). Integrated Water Resources Management for Sustainable Irrigation at the Basin Scale. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392009000500007>
- BKT Tires. (2024). Predictive Maintenance in Tractor Fleets. In *BKT Agriculture Blog*. <https://www.bkt-tires.com/gb/en/blog/agriculture-blog/agriculture-insights/predictive-maintenance-how-its-redefining-and-evolving-the-tractor-fleet>
- Blagojević, B., Nordström, E.-M., & Lindroos, O. (2023). A framework for defining weights of decision makers in group decision-making, using consistency between different multicriteria weighting methods. *International Journal of Forest Engineering*, 34(2), 130–142. <https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2192774>
- Blank, S. C. (2001). Globalization, Cropping Choices, and Profitability in American Agriculture. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 33(2), 315–326. <https://doi.org/10.1017/S1074070800005770>
- Briggs, J. (2009). Green Revolution. In *International Encyclopedia of Human Geography* (pp. 634–638). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044910-4.00099-7>
- Byabazaire, J., O'Hare, G. M. P., Collier, R., & Delaney, D. (2023). IoT Data Quality Assessment Framework Using Adaptive Weighted Estimation Fusion. *Sensors*, 23(13), 5993. <https://doi.org/10.3390/s23135993>
- Carey, J. (2023). Unearthing the origins of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(15). <https://doi.org/10.1073/pnas.2304407120>
- Carletto, C. (2021). Better data, higher impact: Improving agricultural data systems for societal change. In *European Review of Agricultural Economics* (Vol. 48, Issue 4, pp. 719–740). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/erae/jbab030>
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil Sampling and Methods of Analysis* (M. R. Carter & E. G. Gregorich, Eds.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420005271>
- C-GAIA. (n.d.). GAIA EPICHEIREIN. In *GAIA Epicheirein*. <https://www.c-gaia.gr/en/>
- Chalise, D., Kumar, L., & Kristiansen, P. (2019). Land Degradation by Soil Erosion in Nepal: A Review. *Soil Systems*, 3(1), 12. <https://doi.org/10.3390/soilsystems3010012>
- Chaterji, S., DeLay, N., Evans, J., Mosier, N., Engel, B., Buckmaster, D., & Chandra, R. (2020). *Artificial Intelligence for Digital Agriculture at Scale: Techniques, Policies, and Challenges*.
- Chergui, N., & Kechadi, M. T. (2022). Data analytics for crop management: a big data view. *Journal of Big Data*, 9(1), 123. <https://doi.org/10.1186/s40537-022-00668-2>
- Clark, R., Dahlhaus, P., Robinson, N., & Morse-McNabb, E. (2025). Sustainability, Reporting and Market Access for Grain and Oilseed Growers: Can Yield Data Provide More Rigour and Transparency? *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 4(2). <https://doi.org/10.1002/sae2.70059>
- Climavision. (2024). Can Drones Fly in Rain? How Weather Impacts UAV Operations. In *Climavision*.
- Conant, R. T., Cerri, C. E. P., Osborne, B. B., & Paustian, K. (2017). Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis. *Ecological Applications*, 27(2), 662–668. <https://doi.org/10.1002/eap.1473>
- Copernicus. (n.d.). Sentinel-2 for Agriculture. In *Copernicus*. <https://www.copernicus.eu/en/sentinel-2-agriculture>

- Cordovil, C. M. d. S., Bittman, S., Brito, L. M., Goss, M. J., Hunt, D., Serra, J., Gourley, C., Aarons, S., Skiba, U., Amon, B., Vale, M. J., Cruz, S., Reis, R., Dalgaard, T., & Hutchings, N. (2020). Climate-resilient and smart agricultural management tools to cope with climate change-induced soil quality decline. In *Climate Change and Soil Interactions* (pp. 613–662). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00022-9>
- Costa, G. P., Sakata, G. Y. A., Oliveira, L. F. P. de, Chaves, M. E. D., Duarte, L. F. C., Matulovic, M., Buzo, R. F., & Morais, F. J. O. (2025). FarmSync: Ecosystem for Environmental Monitoring of Barns in Agribusiness. *AgriEngineering*, 7(4), 124. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7040124>
- Cravero, A., Pardo, S., Galeas, P., López Fenner, J., & Caniupán, M. (2022). Data Type and Data Sources for Agricultural Big Data and Machine Learning. *Sustainability*, 14(23), 16131. <https://doi.org/10.3390/su142316131>
- Croptracker. (2024). On-Farm Weather Stations in Precision Agriculture. In *Croptracker*. <https://www.croptracker.com/blog/on-farm-weather-stations-in-precision-agriculture.html>
- Cuevas, J., Daliakopoulos, I. N., del Moral, F., Hueso, J. J., & Tsanis, I. K. (2019). A Review of Soil-Improving Cropping Systems for Soil Salinization. *Agronomy*, 9(6), 295. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060295>
- Daheim, C., Poppe, K., & Schrijver, R. (2016). *Precision agriculture and the future of farming in Europe : scientific foresight study*.
- Darabi, H., Haghighi, A. T., Klöve, B., & Luoto, M. (2025). Remote sensing of vegetation trends: A review of methodological choices and sources of uncertainty. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 37, 101500. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101500>
- Davis, B., Mane, E., Gurbuzer, L. Y., Caivano, G., Piedrahita, N., Azhar, N., Benali, M., Chaudhary, N., Rivera, R., Schneider, K., Ambikapathi, R., & Winters, P. (2023). *Estimating global and country-level employment in agrifood systems* (FAO, Ed.). FAO Statistics Working Paper Series. <https://doi.org/10.4060/cc4337en>
- DAYIOĞLU, M. A., & TURKER, U. (2021). Digital Transformation for Sustainable Future - Agriculture 4.0 : A review. *Tarım Bilimleri Dergisi*. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.986431>
- De Benedetto, D., Castrignano, A., Diacono, M., Rinaldi, M., Ruggieri, S., & Tamborrino, R. (2013). Field partition by proximal and remote sensing data fusion. *Biosystems Engineering*, 114(4), 372–383. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.12.001>
- Dell'Angelo, J., D'Odorico, P., & Rulli, M. C. (2017). Threats to sustainable development posed by land and water grabbing. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26–27, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.07.007>
- Devare, M., Arnaud, E., Antezana, E., & King, B. (2023). Governing Agricultural Data: Challenges and Recommendations. In *Towards Responsible Plant Data Linkage: Data Challenges for Agricultural Research and Development* (pp. 201–222). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13276-6_11
- Dhanaraju, M., Chenniappan, P., Ramalingam, K., Pazhanivelan, S., & Kaliaperumal, R. (2022). Smart Farming: Internet of Things (IoT)-Based Sustainable Agriculture. *Agriculture*, 12(10), 1745. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101745>
- Dhillon, R., & Moncur, Q. (2023). Small-Scale Farming: A Review of Challenges and Potential Opportunities Offered by Technological Advancements. *Sustainability*, 15(21), 15478. <https://doi.org/10.3390/su152115478>
- Diao, X., Reardon, T., Kennedy, A., DeFries, R. S., Koo, J., Minten, B., Takeshima, H., & Thornton, P. (2023). The Future of Small Farms: Innovations for Inclusive Transformation. In *Science and Innovations for Food Systems Transformation* (pp. 191–205). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15703-5_10
- Digital Seed. (2021). *Precision or Digital or Smart Farming*. <https://www.digitalseed.eu/2021/10/30/precision-or-digital-or-smart-farming/>
- DLG. (2018). *Digital Agriculture – Opportunities. Risks. Acceptance*. <https://www.dlg.org/en/mediacenter/alle-publikationen/strategische-positionspapiere/digital-agriculture-opportunities-risks-acceptance>

- Dronefly. (2024). The Farmer's Drone Camera: RGB, Multispectral, and LIDAR Explained. In *Dronefly*.
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Dworak-Fisher, K., Mirel, L. B., Parker, J. D., Popham, J., Prell, M., Schmitt, R. R., Seastrom, M. M., & Young, L. (2020). *FCSM - A Framework for Data Quality*. U.S. Office of Management and Budget. <https://doi.org/10.21949/1529866>
- Eastwood, C., Klerkx, L., Ayre, M., & Dela Rue, B. (2019). Managing Socio-Ethical Challenges in the Development of Smart Farming: From a Fragmented to a Comprehensive Approach for Responsible Research and Innovation. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 32(5–6), 741–768. <https://doi.org/10.1007/s10806-017-9704-5>
- eKathimerini. (2024). Greece's agricultural sector is suffering. *EKathimerini*. <https://www.ekathimerini.com/economy/1232220/greeces-agricultural-sector-is-suffering/>
- Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. H. D. N. (2018). An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5), 3758–3773. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2844296>
- European Commission. (2024a). *Greece – CAP Strategic Plan*. Agriculture and Rural Development. https://agriculture.ec.europa.eu/cap-my-country/cap-strategic-plans/greece_en
- European Commission. (2024b). Standards and Platforms for Innovation in Agriculture. In *Digital Strategy EU*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/standards-and-platform-development-enabling-innovation-agriculture-ecosystem-perspective>
- European Investment Bank. (2022). *What is Agriculture 4.0? From AI to IoT, Italy brings you the tractor of the future*.
- Eurostat. (2015). Strategy for agricultural statistics for 2020 and beyond. In *Eurostat*. European Commission. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/749240/749310/Strategy+on+agricultural+statistics+Final+version+for+publication.pdf/9c7787ca-0e00-f676-7a64-7f56e74ec813>
- Evans, A., Banks, K., Jennings, R., Nehme, E., Nemec, C., Sharma, S., Hussaini, A., & Yaroch, A. (2015). Increasing access to healthful foods: a qualitative study with residents of low-income communities. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 12(S1), S5. <https://doi.org/10.1186/1479-5868-12-S1-S5>
- FAO. (2006). *Guidelines for soil description*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2014). *The FAO Statistics Quality Assurance Framework*. www.fao.org/publications
- FAO. (2021). *Farm data management, sharing and services for agriculture development*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb2840en>
- FAO. (2022). *The State of Agricultural Commodity Markets 2022*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0471en>
- FAO, & ITU. (2022). *Status of digital agriculture in 47 sub-Saharan African countries*. FAO; ITU; <https://doi.org/10.4060/cb7943en>
- Farmfit Insights Hub. (n.d.). Farm Management Information Systems (FMIS). In *Farmfit Insights Hub*. <https://farmfitinsightshub.org/resources/farm-management-information-systems-fmis>
- Fastellini, G., & Schillaci, C. (2020). Precision farming and IoT case studies across the world. In *Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming* (pp. 331–415). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818373-1.00007-X>
- FEFAC. (2020). EU Code of Conduct on Agricultural Data Sharing. In *FEFAC*. https://fefac.eu/wp-content/uploads/2020/07/eu_code_of_conduct_on_agricultural_data_sharing-1.pdf
- Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*, 11(1), 313–335. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>

- FirstPoint. (2024). IoT Cybersecurity Vulnerabilities. In *FirstPoint Blog*. <https://www.firstpoint-mg.com/blog/iot-cyber-security-vulnerabilities/>
- Fuentes-Peñailillo, F., Gutter, K., Vega, R., & Silva, G. C. (2024). Transformative Technologies in Digital Agriculture: Leveraging Internet of Things, Remote Sensing, and Artificial Intelligence for Smart Crop Management. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(4), 39. <https://doi.org/10.3390/jsan13040039>
- Fulton, J. P. (2015). *Improving Yield Map Quality by Reducing Errors through Yield Data File Post-Processing*.
- Garcia-Pedrero, A., Lillo-Saavedra, M., Rodriguez-Esparragon, D., & Gonzalo-Martin, C. (2019). Deep Learning for Automatic Outlining Agricultural Parcels: Exploiting the Land Parcel Identification System. *IEEE Access*, 7, 158223–158236. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950371>
- Gardezi, M., Joshi, B., Rizzo, D. M., Ryan, M., Prutzer, E., Brugler, S., & Dadkhah, A. (2024). Artificial intelligence in farming: Challenges and opportunities for building trust. *Agronomy Journal*, 116(3), 1217–1228. <https://doi.org/10.1002/agj2.21353>
- Gawande, V., Saikanth, D. R. K., Sumithra, B. S., Aravind, S. A., Swamy, G. N., Chowdhury, M., & Singh, B. V. (2023). Potential of Precision Farming Technologies for Eco-Friendly Agriculture. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35(19), 101–112. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i193528>
- Ge, C., Zhang, C., Zhang, Y., Fan, Z., Kong, M., & He, W. (2024). Synergy of UAV-LiDAR Data and Multispectral Remote Sensing Images for Allometric Estimation of Phragmites Australis Aboveground Biomass in Coastal Wetland. *Remote Sensing*, 16(16), 3073. <https://doi.org/10.3390/rs16163073>
- Ge, Y., Thomasson, J. A., & Sui, R. (2011). Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Frontiers of Earth Science*. <https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0>
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision Agriculture and Food Security. *Science*, 327(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Getahun, S., Kefale, H., & Gelaye, Y. (2024). Application of Precision Agriculture Technologies for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability: A Systematic Review. *The Scientific World Journal*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/2126734>
- Gourlay, S., Kilic, T., & Lobell, D. B. (2019). A new spin on an old debate: Errors in farmer-reported production and their implications for inverse scale - Productivity relationship in Uganda. *Journal of Development Economics*, 141, 102376. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2019.102376>
- GPS.gov. (n.d.). Agricultural Applications of GPS. In *GPS.gov*. <https://www.gps.gov/applications/agriculture/>
- Gregor, S., & Hevner, A. R. (2013). Positioning and Presenting Design Science Research for Maximum Impact. *MIS Quarterly*, 37(2), 337–355. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2013/37.2.01>
- Gualo, F., Rodriguez, M., Verdugo, J., Caballero, I., & Piattini, M. (2021). Data quality certification using ISO/IEC 25012: Industrial experiences. *Journal of Systems and Software*, 176, 110938. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2021.110938>
- Gyamfi, E. K., & Yakubu, M. (2024). *Agricultural 4.0 Leveraging on Technological Solutions: Study for Smart Farming Sector*.
- Hagn, L., Mittermayer, M., Kern, A., Kimmelman, S., Maidl, F.-X., & Hülsbergen, K.-J. (2025). Effects of Sensor-Based, Site-Specific Nitrogen Fertilizer Application on Crop Yield, Nitrogen Balance, and Nitrogen Efficiency. *Sensors*, 25(3), 795. <https://doi.org/10.3390/s25030795>
- Harati-Mokhtari, A., Wall, A., Brooks, P., & Wang, J. (2007). Automatic Identification System (AIS): Data Reliability and Human Error Implications. *Journal of Navigation*, 60(3), 373–389. <https://doi.org/10.1017/S0373463307004298>
- Harivallabha, V. M., Anithamahalakshmi, I., & Selvi, S. S. (2016). A model to improve the reliability of ICT in agriculture. *2016 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR)*, 124–132. <https://doi.org/10.1109/TIAR.2016.7801226>
- Hassan, R., Di Martino, M., & Daher, B. (2025). Quantifying sustainability and resilience in food systems: a systematic analysis for evaluating the convergence of current methodologies and metrics. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1479691>

- Heil, K., & Schmidhalter, U. (2019). Theory and Guidelines for the Application of the Geophysical Sensor EM38. *Sensors*, 19(19), 4293. <https://doi.org/10.3390/s19194293>
- Hevner, A., & Chatterjee, S. (2010). *Design Science Research in Information Systems* (pp. 9–22). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5653-8_2
- Hevner, March, Park, & Ram. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Hu, X., Sgherza, T. R., Nothrup, J. B., Fresco, D. M., Naragon-Gainey, K., & Bylsma, L. M. (2024). From lab to life: Evaluating the reliability and validity of psychophysiological data from wearable devices in laboratory and ambulatory settings. *Behavior Research Methods*, 56(7), 1–20. <https://doi.org/10.3758/s13428-024-02387-3>
- IBM. (2024). Data Reliability | IBM. In *IBM Think*. <https://www.ibm.com/think/topics/data-reliability>
- Inoue, Y. (2020). Satellite- and drone-based remote sensing of crops and soils for smart farming – a review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 66(6), 798–810. <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1738899>
- Ismail, A., Suroso, A. I., & Hermadi, I. (2024). Data Governance Design with the DAMA-DMBOK Framework (Case Study: PT. XYZ). *International Journal of Research and Review*, 11(8), 210–221. <https://doi.org/10.52403/ijrr.20240823>
- ISO. (2017). *ISO 11783-1:2017*.
- Jensen, T. A., Gobbett, D., Bramley, R., & Garmendia, A. G. (2016). A methodology to assess the accuracy and reliability of yield-monitor data. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, 29, 1831–1839. <https://pypi.python.org/pypi/Shapely>
- Jiang, A., & Ahamed, T. (2025). Development of an autonomous navigation system for orchard spraying robots integrating a thermal camera and LiDAR using a deep learning algorithm under low- and no-light conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 235, 110359. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110359>
- Jiang, B., Feng, J., Cui, X., Wang, J., Liu, Y., & Song, H. (2024). Security and Reliability of Internet of Underwater Things: Architecture, Challenges, and Opportunities. *ACM Computing Surveys*, 57(3). <https://doi.org/10.1145/3700640>
- Jung, H. J., & Oh, K. K. (2021). Production of Bio-Based Chemicals, Acetic Acid and Furfural, through Low-Acid Hydrothermal Fractionation of Pine Wood (*Pinus densiflora*) and Combustion Characteristics of the Residual Solid Fuel. *Applied Sciences*, 11(16), 7435. <https://doi.org/10.3390/app1167435>
- Just Agriculture. (2024). Telematics in Agriculture: Enhancing Machinery Performance. In *Just Agriculture*. <https://justagriculture.in/wp-content/uploads/2024/12/42.-Telematics-in-Agriculture-Enhancing-Machinery-Performance.pdf>
- Kahn, B. K., Strong, D. M., & Wang, R. Y. (2002). Information quality benchmarks: product and service performance. *Communications of the ACM*, 45(4ve). <https://doi.org/10.1145/505999.506007>
- Kalabamu, F., & Lyamuya, P. (2021). Small-scale land grabbing in Greater Gaborone, Botswana. *Town and Regional Planning*, 78, 34–45. <https://doi.org/10.18820/2415-0495/trp78i1.3>
- Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. In *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 143, pp. 23–37). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- Kamyod, C. (2018). End-to-end reliability analysis of an IoT based smart agriculture. *2018 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT)*, 258–261. <https://doi.org/10.1109/ICDAMT.2018.8376535>
- KC, K. B., Dias, G. M., Veeramani, A., Swanton, C. J., Fraser, D., Steinke, D., Lee, E., Wittman, H., Farber, J. M., Dunfield, K., McCann, K., Anand, M., Campbell, M., Rooney, N., Raine, N. E., Acker, R. Van, Hanner, R., Pascoal, S., Sharif, S., ... Fraser, E. D. G. (2018). When too much isn't enough: Does current food production meet global nutritional needs? *PLOS ONE*, 13(10), e0205683. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205683>

- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). *Decisions with Multiple Objectives*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084>
- Kick, E. L., Tiezzi, F., & Pena, D. C. (2017). Food Production or Food Distribution: The Key to Global Food Security? *Perspectives on Global Development and Technology*, 16(6), 666–682. <https://doi.org/10.1163/15691497-12341455>
- Kim, H.-J. (2016). Opportunities and Challenges of Alternative Specialty Crops: The Global Picture. *HortScience*, 51(11), 1316–1319. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI10659-16>
- Klerkx, L., & Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24, 100347. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>
- Kos, D., & Kloppenburg, S. (2019). Digital technologies, hyper-transparency and smallholder farmer inclusion in global value chains. In *Current Opinion in Environmental Sustainability* (Vol. 41, pp. 56–63). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2019.10.011>
- Kotal, A., Elluri, L., Gupta, D., Mandalapu, V., & Joshi, A. (2023). *Privacy-Preserving Data Sharing in Agriculture: Enforcing Policy Rules for Secure and Confidential Data Synthesis*. <https://doi.org/10.1109/BigData59044.2023.10386276>
- Krishnan, R., Peters, J., Padman, R., & Kaplan, D. (2005). On Data Reliability Assessment in Accounting Information Systems. *Research*, 16(3), 307–326. <https://doi.org/10.1287/isre.1050.0063>
- Lake, J. V, Bock, G. R., & Goode, J. (1997). *Precision agriculture : spatial and temporal variability of environmental quality*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:265959809>
- Lakhan, A., Mohammed, M. A., Al-Budair, L. Q. A., Memon, S., Slany, V., Deveci, M., & Martinek, R. (2025). Enhancing transparency and efficiency in blockchain harvest: Empowering farmers and consumers through transparent trading in agricultural applications. *Alexandria Engineering Journal*, 118, 91–104. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.01.005>
- Lal, R. (2012). Climate Change and Soil Degradation Mitigation by Sustainable Management of Soils and Other Natural Resources. *Agricultural Research*, 1(3), 199–212. <https://doi.org/10.1007/s40003-012-0031-9>
- Laney, D. (2001). *3D Data Management: Controlling Data Volume, Velocity and Variety*. https://staging.gmbi.net/index.jsp/Resources/S66721/Ad949_3d_Data_Management_Controlling_Data_Volume_Velocity_And_Variety.pdf
- Levi, R., Rajan, M., Singhvi, S., & Zheng, Y. (2020). The impact of unifying agricultural wholesale markets on prices and farmers' profitability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(5), 2366–2371. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906854117>
- Li, H., Xu, Z., Zhou, Y., He, X., & He, M. (2023). Flood Monitoring Using Sentinel-1 SAR for Agricultural Disaster Assessment in Poyang Lake Region. *Remote Sensing*, 15(21), 5247. <https://doi.org/10.3390/rs15215247>
- Li, R., Wen, C., Li, S., Li, R., Pu, H., Jiang, Y., & Song, Z. (2023). Quality prediction of tractor rotary tillage based on BiConvLSTM with self-attention. *Computers and Electronics in Agriculture*, 206, 107643. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107643>
- Liakos, K., 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>
- Liu, J., Cai, H., Chen, S., Pi, J., & Zhao, L. (2023). A Review on Soil Nitrogen Sensing Technologies: Challenges, Progress and Perspectives. *Agriculture*, 13(4), 743. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040743>
- Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2021). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4322–4334. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>
- Loboguerrero, A., Campbell, B., Cooper, P., Hansen, J., Rosenstock, T., & Wollenberg, E. (2019). Food and Earth Systems: Priorities for Climate Change Adaptation and Mitigation for Agriculture and Food Systems. *Sustainability*, 11(5), 1372. <https://doi.org/10.3390/su11051372>
- Lovarelli, D., & Bacenetti, J. (2017). Bridging the gap between reliable data collection and the environmental impact for mechanised field operations. *Biosystems Engineering*, 160, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.002>

- Lowenberg-DeBoer, J. (2022). *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2624en>
- Luo, Y., Shen, J., Liang, H., Sun, L., & Dong, L. (2024). Carbon monitoring, reporting and verification (MRV) for cleaner built environment: Developing a solar photovoltaic blockchain tool and applications in Hong Kong's building sector. *Journal of Cleaner Production*, 471, 143456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143456>
- Luyckx, M., & Reins, L. (2022). The Future of Farming: The (Non)-Sense of Big Data Predictive Tools for Sustainable EU Agriculture. *Sustainability*, 14(20), 12968. <https://doi.org/10.3390/su142012968>
- Maestre, F. T., Le Bagousse-Pinguet, Y., Delgado-Baquerizo, M., Eldridge, D. J., Saiz, H., Berdugo, M., Gozalo, B., Ochoa, V., Guirado, E., García-Gómez, M., Valencia, E., Gaitán, J. J., Asensio, S., Mendoza, B. J., Plaza, C., Díaz-Martínez, P., Rey, A., Hu, H.-W., He, J.-Z., ... Gross, N. (2022). Grazing and ecosystem service delivery in global drylands. *Science*, 378(6622), 915–920. <https://doi.org/10.1126/science.abq4062>
- Magnin, C. (2016). *How big data will revolutionize the global food chain*. McKinsey Archive.
- Malav, D. (2021). *There is a global food surplus, so why are millions of people still food insecure*. Million Meals Mission.
- Malaverri, J., & Medeiros, C. (2012). Data quality in agriculture applications. *Proceedings of the Brazilian Symposium on GeoInformatics*, 128–139.
- Mandal, A., Sarkar, B., Mandal, S., Vithanage, M., Patra, A. K., & Manna, M. C. (2020). Impact of agrochemicals on soil health. In *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation* (pp. 161–187). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00007-6>
- Manivannan, K., & Sankar, B. (2023). *Smart farming using iot for efficient crop growth*.
- Marchese, A., & Tomarchio, O. (2022). A Blockchain-Based System for Agri-Food Supply Chain Traceability Management. *SN Computer Science*, 3(4), 279. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01148-3>
- Mayatopani, H. (2023). Multi-criteria decision making using weighted aggregated sum product assessment in corn seed selection system. *Jurnal Teknik Informatika C.I.T Medicom*, 15(1), 21–31. <https://doi.org/10.35335/cit.Vol15.2023.302.pp21-31>
- Mazzetto, F., & Sacco, P. (2019). *A methodological proposal to assess the information reliability in the Precision Agriculture decisional chains*. <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor.2019.8909230>
- Mellanby, K., Fussell, G. E., Rasmussen, W. D., Rasmussen, W. D., Crawford, G. W., Ordish, G., & Gray, A. William. (2025). Origins of agriculture. In *Encyclopedia Britannica*. Encyclopedia Britannica.
- Meltzer, J. W., & Hochstim, J. R. (1970). *Reliability and Validity of Survey Data on Physical Health*.
- Moldstud. (2024). Data Security and Privacy in Agricultural Management. In *Moldstud.com*. <https://moldstud.com/articles/p-ensuring-data-security-and-privacy-in-agricultural-management>
- Monteiro, A., Santos, S., & Gonçalves, P. (2021). Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review. *Animals*, 11(8), 2345. <https://doi.org/10.3390/ani11082345>
- Moore, H. E., & Rutherford, I. D. (2020). Researching agricultural environmental behaviour: Improving the reliability of self-reporting. *Journal of Rural Studies*, 76, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.04.012>
- Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Jat, H. S., Sharma, P. C., & Bolan, N. S. (2021). Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security. *Journal of Environmental Management*, 280, 111736. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111736>
- 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>
- Mulla, David. (2018). *Comparison of real-time N stress sensors and remote sensing from unmanned aerial vehicles for precision management of N fertilizer and improvement of water quality*.
- Musa, P., Sugeru, H., & Wibowo, E. P. (2023). Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations. *Sensors*, 24(1), 51. <https://doi.org/10.3390/s24010051>

- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). AgroClimate Data Documentation. In *NOAA*. <https://agroclimate.org/data-documentation>
- Navarro, E., Costa, N., & Pereira, A. (2020). A Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming. *Sensors*, 20(15), 4231. <https://doi.org/10.3390/s20154231>
- Nelson, F., Pickett, T., Smith, W., & Ott, L. (n.d.). The GreenStar precision farming system. *Proceedings of Position, Location and Navigation Symposium - PLANS '96*, 6–9. <https://doi.org/10.1109/PLANS.1996.509048>
- Neuropublic. (n.d.). Smart Farming: gaiaSense. In *Neuropublic*. <https://www.neuropublic.gr/en/smart-farming-gaiaSense/>
- Ngo, V. M., Le-Khac, N.-A., & Kechadi, M.-T. (2019). *Designing and Implementing Data Warehouse for Agricultural Big Data*.
- Nguyen, T. T., Mushtaq, S., Kath, J., Nguyen-Huy, T., & Reymondin, L. (2025). Satellite-based data for agricultural index insurance: a systematic quantitative literature review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 25(2), 913–927. <https://doi.org/10.5194/nhess-25-913-2025>
- NIST. (2023). Precision Agriculture DRAFT – Precision Agriculture Recommendations. In *National Institute of Standards and Technology*. <https://www.nist.gov/system/files/documents/2023/06/01/IoT%20AB%20Subteam%20-%20Precision%20Agriculture%20Recommendations%20v2.pdf>
- Nyéki, A., & Neményi, M. (2022). Crop Yield Prediction in Precision Agriculture. *Agronomy*, 12(10), 2460. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102460>
- OECD. (2020). *ESG Investing: Practices, Progress and Challenges*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/b4f71091-en>
- OECD. (2024). Measuring the Environmental Performance of Agriculture. In *OECD Data Dashboards*. <https://www.oecd.org/en/data/dashboards/measuring-the-environmental-performance-of-agriculture.html>
- Oh, S., & Lu, C. (2023). Vertical farming - smart urban agriculture for enhancing resilience and sustainability in food security. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 98(2), 133–140. <https://doi.org/10.1080/14620316.2022.2141666>
- Omar, N., Zen, H., Anak Aldrin, N. N., Waluyo, W., & Hadiatna, F. (2020). Accuracy and Reliability of Data in IoT System for Smart Agriculture. *International Journal of Integrated Engineering*, 12(6). <https://doi.org/10.30880/ijie.2020.12.06.013>
- Overton, M. (1996). *Agricultural Revolution in England*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511607967>
- Pagano, A., Croce, D., Tinnirello, I., & Vitale, G. (2023). A Survey on LoRa for Smart Agriculture: Current Trends and Future Perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(4), 3664–3679. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3230505>
- Pakkar, M. S. (2017). *An integrated approach to grey relational analysis, analytic hierarchy process and data envelopment analysis*. <https://doi.org/10.1108/JCC-08-2016-0005>
- Pan, Y., Sun, J., Yu, H., Bai, G., Ge, Y., Luck, J., & Awada, T. (2023). *Transforming Agriculture with Intelligent Data Management and Insights*.
- Panchasara, H., Samrat, N., & Islam, N. (2021). Greenhouse Gas Emissions Trends and Mitigation Measures in Australian Agriculture Sector—A Review. *Agriculture*, 11(2), 85. <https://doi.org/10.3390/agriculture11020085>
- Paraforos, D. S., Vassiliadis, V., Kortenbruck, D., Stamkopoulos, K., Ziogas, V., Sapounas, A. A., & Griepentrog, H. W. (2017). Multi-level automation of farm management information systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 504–514. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.022>
- Paul, M., Debnath, S., Debnath, T., Rogiers, S., Baby, T., Rahaman, D. M., Zheng, L., & Schmidtke, L. (2020). *Hyperspectral Imaging to detect Age, Defects and Individual Nutrient Deficiency in Grapevine Leaves*.
- Peffer, K., Rothenberger, M., Tuunanen, T., & Vaezi, R. (2012). *Design Science Research Evaluation* (pp. 398–410). https://doi.org/10.1007/978-3-642-29863-9_29

- Peffer, K., Tuunanen, T., Gengler, C. E., Rossi, M., Hui, W., Virtanen, V., & Bragge, J. (2020). *Design Science Research Process: A Model for Producing and Presenting Information Systems Research*.
- Pereira, A. (2025). Green Revolution. In *Encyclopedia Britannica*. Encyclopedia Britannica.
- Picsellia. (2024). AI in Livestock Monitoring. In *Picsellia*. <https://www.picsellia.com/post/ai-livestock-monitoring-animal-welfare-farm-productivity>
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). *Aspects of Precision Agriculture* (pp. 1–85). [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60513-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1)
- Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., & Canavari, M. (2013). Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. *Procedia Technology*, 8, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>
- Pipino, L. L., Lee, Y. W., & Wang, R. Y. (2002). Data quality assessment. *Communications of the ACM*, 45(4), 211–218. <https://doi.org/10.1145/505248.506010>
- Planet Labs. (2024). Agriculture Industry Solutions. In *Planet*. <https://www.planet.com/industries/agriculture/>
- Poppe, K., Vrolijk, H., & Bosloper, I. (2023). Integration of Farm Financial Accounting and Farm Management Information Systems for Better Sustainability Reporting. *Electronics*, 12(6), 1485. <https://doi.org/10.3390/electronics12061485>
- Ramachandran, A. (2024). The Rise of Autonomous UAV Swarms. In *LinkedIn*. <https://www.linkedin.com/pulse/rise-autonomous-uav-swarms-harnessing-advanced-ai-anand-ramachandran-38tue/>
- Ranganathan, J., Waite, R., Searchinger, T., & Hanson, C. (2018). *How to sustainably feed 10 billion people by 2050, in 21 charts*. <https://www.wri.org/insights/how-sustainably-feed-10-billion-people-2050-21-charts>
- Rani, L., Thapa, K., Kanojia, N., Sharma, N., Singh, S., Grewal, A. S., Srivastav, A. L., & Kaushal, J. (2021). An extensive review on the consequences of chemical pesticides on human health and environment. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124657. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124657>
- Reddy, G. P. O., B.S.Dwivedi, & Gajjala, R. (2021). *Big data in smart farming- Challenges and opportunities*. 71, 75–78.
- Ren, G., Lin, T., Ying, Y., Chowdhary, G., & Ting, K. C. (2020). Agricultural robotics research applicable to poultry production: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, 105216. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105216>
- Rose, D. C., Sutherland, W. J., Barnes, A. P., Borthwick, F., Ffoulkes, C., Hall, C., Moorby, J. M., Nicholas-Davies, P., Twining, S., & Dicks, L. V. (2019). Integrated farm management for sustainable agriculture: Lessons for knowledge exchange and policy. *Land Use Policy*, 81, 834–842. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.001>
- Rozenstein, O., Cohen, Y., Alchanatis, V., Behrendt, K., Bonfil, D. J., Eshel, G., Harari, A., Harris, W. E., Klapp, I., Laor, Y., Linker, R., Paz-Kagan, T., Peets, S., Rutter, S. M., Salzer, Y., & Lowenberg-DeBoer, J. (2024). Data-driven agriculture and sustainable farming: friends or foes? *Precision Agriculture*, 25(1), 520–531. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10061-5>
- Sadowski, S., & Spachos, P. (2020). *Wireless Technologies for Agricultural Monitoring using Internet of Things Devices with Energy Harvesting Capabilities*. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105338>
- Sadras, V. O., Grassini, P., Costa, R., Cohan, L., & Hall, A. J. (2014). How reliable are crop production data? Case studies in USA and Argentina. *Food Security*, 6(4), 447–459. <https://doi.org/10.1007/s12571-014-0361-5>
- Saha, A., Sedaghat, S., Gopalakrishnan, S., Waimin, J., Yermembetova, A., Glassmaker, N., Mousoulis, C., Shakouri, A., Wei, A., Rahimi, R., & Alam, M. A. (2023). A new paradigm of reliable sensing with field-deployed electrochemical sensors integrating data redundancy and source credibility. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25920-w>
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy*, 10(2), 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>

- Salami, P., & Ahmadi, H. (2010). Review of Farm management Information Systems (FMIS). *New York Sci J*, 3, 87–95.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2007). *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470725184>
- Sant, G., & Dixit, S. (1997). How reliable are agricultural power use data? In *Prayas Energy Group*. <https://prayaspune.org/girish-sant/publications/how-reliable-are-agricultural-power-use-data>
- Sarvia, F., Xausa, E., De Petris, S., Cantamessa, G., & Borgogno-Mondino, E. (2021). A Possible Role of Copernicus Sentinel-2 Data to Support Common Agricultural Policy Controls in Agriculture. *Agronomy*, 11(1), 110. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010110>
- Schirrmann, M., Gebbers, R., Kramer, E., & Seidel, J. (2011). Soil pH Mapping with an On-The-Go Sensor. *Sensors*, 11(1), 573–598. <https://doi.org/10.3390/s110100573>
- Schlecht, E., Turner, M. D., Hülsebusch, C. G., & Buerkert, A. (2020). Managing Rangelands Without Herding? Insights From Africa and Beyond. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.549954>
- Schütze, F., & Stede, J. (2024). The EU sustainable finance taxonomy and its contribution to climate neutrality. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 14(1), 128–160. <https://doi.org/10.1080/20430795.2021.2006129>
- Segarra, J., Buchailot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy*, 10(5), 641. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050641>
- Shaw, D. S., & Honeychurch, K. C. (2022). Nanosensor Applications in Plant Science. *Biosensors*, 12(9), 675. <https://doi.org/10.3390/bios12090675>
- Shen, L., Zhang, Z., Zhou, Y., & Xu, Y. (2023). Applying Blockchain Technology and the Internet of Things to Improve the Data Reliability for Livestock Insurance. *Sensors*, 23(14). <https://doi.org/10.3390/s23146290>
- Simply NUC. (2024). Edge Computing for Agriculture and Smart Farming. In *Simply NUC Blog*. <https://simplynuc.co.uk/blog/edge-computing-for-agriculture-and-smart-farming/>
- Singh, K., Yadav, M., Singh, Y., & Moreira, F. (2025). Techniques in reliability of internet of things (IoT). *Procedia Computer Science*, 256, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.095>
- Sonnenberg, C., & vom Brocke, J. (2012). *Evaluations in the Science of the Artificial – Reconsidering the Build-Evaluate Pattern in Design Science Research* (pp. 381–397). https://doi.org/10.1007/978-3-642-29863-9_28
- Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trincherio, D., & Fossa, M. (2024). Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 24(8), 2647. <https://doi.org/10.3390/s24082647>
- Specim. (2024). *HYPERSPECTRAL IMAGING IN AGRICULTURE AND VEGETATION*. Specim.
- Staboulis, C., Natos, D., Gkatsikos, A., Tsakiridou, E., Mattas, K., Bojar, W., Baranowski, P., Krzyszczyk, J., Rivero, O. P., & Roldán, Á. O. (2022). Assessing the Role of the Young Farmer Scheme in the Export Orientation of Greek Agriculture. *Sustainability*, 14(6), 3287. <https://doi.org/10.3390/su14063287>
- Stanford University. (2024). Foundational Research: The unseen work required for new knowledge and real-world innovation. In *Stanford Humanities and Sciences*. School of Humanities and Sciences. <https://humsci.stanford.edu/foundational-research>
- Stavi, I., Siad, S. M., Kyriazopoulos, A. P., & Halbac-Cotoara-Zamfir, R. (2020). Water runoff harvesting systems for restoration of degraded rangelands: A review of challenges and opportunities. *Journal of Environmental Management*, 255, 109823. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109823>
- Stiles, C. A., Hammer, R. D., Johnson, M. G., Ferguson, R., Galbraith, J., O'Geen, T., Arriaga, J., Shaw, J., Falen, A., McDaniel, P., & Miles, R. (2011). Validation Testing of a Portable Kit for Measuring an Active Soil Carbon Fraction. *Soil Science Society of America Journal*, 75(6), 2330–2340. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0350>
- TagoIO. (2024). IoT and the Future of Food Safety. In *TagoIO Blog*. <https://tago.io/blog/iot-and-the-future-of-food-safety>

- Tantalaki, N., Souravlas, S., & Roumeliotis, M. (2019). Data-Driven Decision Making in Precision Agriculture: The Rise of Big Data in Agricultural Systems. *Journal of Agricultural & Food Information*, 20(4), 344–380. <https://doi.org/10.1080/10496505.2019.1638264>
- Tarolli, P., Luo, J., Park, E., Barcaccia, G., & Masin, R. (2024). Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering. *IScience*, 27(2), 108830. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108830>
- TCFD. (2017). TCFD Recommendations. In *TCFD*. <https://www.fsb-tcfd.org/recommendations/>
- Tey, Y. S., & Brindal, M. (2012). Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: a review for policy implications. *Precision Agriculture*, 13(6), 713–730. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9273-6>
- Thiam, F., Mbaye, M., & Wyglinski, A. M. (2021). Generic Reliability Analysis Model of IoT : Agriculture use case. *IEEE Vehicular Technology Conference, 2021-April*. <https://doi.org/10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448791>
- Torky, M., & Hassanein, A. E. (2020). Integrating blockchain and the internet of things in precision agriculture: Analysis, opportunities, and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105476. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105476>
- TraceX Technologies. (2024). Farm Management Systems for Sustainable Agriculture. In *TraceX Blog*. <https://tracex.tech.com/farm-management-systems-for-sustainable-agriculture/>
- Tudi, M., Daniel Ruan, H., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D. T. (2021). Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1112. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>
- Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164, 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>
- Udeigwe, T. K., Teboh, J. M., Eze, P. N., Hashem Stietiya, M., Kumar, V., Hendrix, J., Mascagni, H. J., Ying, T., & Kandakji, T. (2015). Implications of leading crop production practices on environmental quality and human health. *Journal of Environmental Management*, 151, 267–279. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.024>
- UNEP Finance Initiative. (2021). Changing Course: A Comprehensive Investor Guide to Scenario-Based Methods for Climate Risk Assessment in Response to the TCFD. In *United Nations Environment Programme Finance Initiative*. <https://www.unepfi.org/industries/investment/changing-course-a-comprehensive-investor-guide-to-scenario-based-methods-for-climate-risk-assessment-in-response-to-the-tcfd/>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2024). The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019). In *UNDRR*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. <https://www.undrr.org/quick/50922>
- University of Nebraska-Lincoln. (n.d.). Yield Monitoring and Mapping. In *CropWatch*. <https://cropwatch.unl.edu/yield-monitoring-and-mapping/>
- US Department of Agriculture. (2020). Energy Use in U.S. Agriculture. In *USDA*. <https://www.ers.usda.gov/topics/farm-practices-management/energy>
- US Department of Agriculture. (2022). Irrigation and Water Management Survey. In *USDA*. https://www.nass.usda.gov/Surveys/Guide_to_NASS_Surveys/Irrigation_and_Water_Management
- U.S. Department of Agriculture, E. R. S. (2021). *ERS Data Product Quality Standards*. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. <https://www.ers.usda.gov/about-ers/policies-and-standards/data-product-quality/ers-data-product-quality-standards>
- U.S. Department of Agriculture Economic Research Service. (2024). *ARMS - Farm Financial and Crop Production Practices*.
- US Department of Agriculture: National Agricultural Statistics Service. (2023). Farm Computer Usage and Ownership. In *USDA NASS*. https://www.nass.usda.gov/Publications/Highlights/2023/computer_usage

- U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). Integrated Pest Management (IPM) Principles. In *U.S. Environmental Protection Agency*. <https://www.epa.gov/safepestcontrol/integrated-pest-management-ipm-principles>
- US Geological Survey. (2024). Landsat Missions. In *USGS*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions>
- van Berkum, S. (2021). How trade can drive inclusive and sustainable food system outcomes in food deficit low-income countries. *Food Security*, 13(6), 1541–1554. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01218-z>
- van der Burg, S., Bogaardt, M.-J., & Wolfert, S. (2019). Ethics of smart farming: Current questions and directions for responsible innovation towards the future. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.01.001>
- Van Hoolst, R., Eerens, H., Haesen, D., Royer, A., Bydekerke, L., Rojas, O., Li, Y., & Racionzer, P. (2016). FAO's AVHRR-based Agricultural Stress Index System (ASIS) for global drought monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 37(2), 418–439. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1126378>
- Vegetable Growers News. (2023). Drones help scout crops, but growers must consider costs. In *Vegetable Growers News*.
- Villarino, M. E. J., Buenaseda Tejada, M. G., & Patterson, S. E. (2022). From agricultural statistics to zero hunger: How the 50x2030 Initiative is closing data gaps for SDG2 and beyond. *Statistical Journal of the IAOS*, 38(1), 63–73. <https://doi.org/10.3233/SJI-210904>
- Waldner, F., Horan, H., Chen, Y., & Hochman, Z. (2019). High temporal resolution of leaf area data improves empirical estimation of grain yield. *Scientific Reports*, 9(1), 15714. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51715-7>
- Wei, W., Xiao, M., Duan, W., Wang, H., Zhu, Y., Zhai, C., & Geng, G. (2024). Research Progress on Autonomous Operation Technology for Agricultural Equipment in Large Fields. *Agriculture*, 14(9), 1473. <https://doi.org/10.3390/agriculture14091473>
- Weiler, A. M., Hergesheimer, C., Brisbois, B., Wittman, H., Yassi, A., & Spiegel, J. M. (2015). Food sovereignty, food security and health equity: a meta-narrative mapping exercise. *Health Policy and Planning*, 30(8), 1078–1092. <https://doi.org/10.1093/heapol/czu109>
- Wikipedia contributors. (2023). Grain yield monitor. In *In Wikipedia, The Free Encyclopedia*.
- Wikipedia Contributors. (2025a). Analytic hierarchy process --- Wikipedia, The Free Encyclopedia. In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Analytic_hierarchy_process&oldid=1292140281
- Wikipedia Contributors. (2025b). Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database --- Wikipedia, The Free Encyclopedia. In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Food_and_Agriculture_Organization_Corporate_Statistical_Database&oldid=1279846685
- Wikipedia Contributors. (2025c). Weighted sum model --- Wikipedia, The Free Encyclopedia. In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Weighted_sum_model&oldid=1292110993
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, Ij. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1), 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- Wing, I. S., De Cian, E., & Mistry, M. N. (2021). Global vulnerability of crop yields to climate change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 109, 102462. <https://doi.org/10.1016/j.jeeem.2021.102462>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>
- Wollburg, P., Tiberti, M., & Zezza, A. (2021). Recall length and measurement error in agricultural surveys. *Food Policy*, 100, 102003. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.102003>
- Woodard, J. D., Sherrick, B. J., Moseley, J., O'mara, C., Gold, B., Piotti, J., Willett, S., Scarlett, L., Gordon, D. R., Fogel, G., Salas, W. A., Mattson, C., Duncanson, K. W., Blair, R., Yoder, F., & Atwood, D. M. (2019). *Harnessing the Power of Data to Improve Agricultural Policy and Conservation Outcomes* (Vol. 34, Issue 3).

- World Bank and OECD. (2025). *Share of GDP from agriculture*.
- Wu, M., Yang, C., Song, X., Hoffmann, W., Huang, W., Niu, Z., Wang, C., & Li, W. (2017). Evaluation of Orthomosaics and Digital Surface Models Derived from Aerial Imagery for Crop Type Mapping. *Remote Sensing*, 9(3), 239. <https://doi.org/10.3390/rs9030239>
- Xing, Y., & Wang, X. (2024). Precise application of water and fertilizer to crops: challenges and opportunities. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1444560>
- Xu, W., Monachino, A. D., McCormick, S. A., Margolis, E. T., Sobrino, A., Bosco, C., Franke, C. J., Davel, L., Zieff, M. R., Donald, K. A., Gabard-Durnam, L. J., & Morales, S. (2024). Advancing the reporting of pediatric EEG data: Tools for estimating reliability, effect size, and data quality metrics. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2024.101458>
- Yacoubou Djima, I., & Kilic, T. (2021). *Survey Measurement Errors and the Assessment of the Relationship between Yields and Inputs in Smallholder Farming Systems: Evidence from Mali*. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-9841>
- Yang, Y., Wang, L., Noh, D. K., Le, H. K., & Abdelzaher, T. F. (2009). SolarStore: enhancing data reliability in solar-powered storage-centric sensor networks. *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 333–346. <https://doi.org/10.1145/1555816.1555850>
- Yin, H., Cao, Y., Marelli, B., Zeng, X., Mason, A. J., & Cao, C. (2021). Soil Sensors and Plant Wearables for Smart and Precision Agriculture. *Advanced Materials*, 33(20). <https://doi.org/10.1002/adma.202007764>
- ypaithros.gr. (2024). *Μονόδρομος για την αύξηση της παραγωγικότητας και την προστασία του περιβάλλοντος η αγροτεχνολογία*. <https://www.ypaithros.gr/m-bretania-monodromos-ayksisi-paragokotitas-prostasia-periballontos-agrotenologia/>
- Yunis, R., Halim, A., & Pardosi, I. A. (2024). Big data analytics for seasonal crop patterns: integrating machine learning techniques. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4 (132)), 46–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.315066>
- Zardari, N. H., Ahmed, K., Shirazi, S. M., & Yusop, Z. Bin. (2015). *Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12586-2>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>
- Zhang, H., Ma, J., Chen, C., & Tian, X. (2020). NDVI-Net: A fusion network for generating high-resolution normalized difference vegetation index in remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 168, 182–196. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.08.010>
- Zhang, L., Qu, J., Gui, D., Liu, Q., Ahmed, Z., Liu, Y., & Qi, Z. (2022). Analysis of desertification combating needs based on potential vegetation NDVI—A case in the Hotan Oasis. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1036814>
- Λιάλιος, Γ. (2024). *Γηρασμένοι αγρότες με μικρές εκτάσεις*. Kathimerini.Gr.
- Μακαντάση, Φ., Ερευνών, Δ., & Βαλεντής, Η. (2024). *Ο Αγροτικός Τομέας στην Ελλάδα*.
- Μανιφάβα, Δ., & Γεωργιοπούλου, Τ. (2024). *Αγροτικός τομέας, ο μεγάλος ασθενής – Τι δίνει η κυβέρνηση, τι απαντούν οι αγρότες*. Kathimerini.Gr.
- Πιαρίδης, Δ. (2020). *Αγροτική Ανάπτυξη και Δημόσια Διοίκηση*. Eranistis. <https://eranistis.net/wordpress/wp-content/uploads/2020/11/piaridi.pdf>