



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ &  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Τίτλος: “Εφαρμογή Τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων, Μηχανικής Μάθησης και Ψηφιακού Διδύμου στην Γεωργία Ακριβείας: Προκλήσεις και Δυνατότητες”**

**Φοιτητής: Ναυροζίδης Σταύρος  
ΑΜ: 50106958**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Πυρομάλης Δημήτριος  
Καθηγητής ΔΕΠ**

**Αθήνα-Αιγάλεω, 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND  
ELECTRONIC ENGINEERING**

**Diploma Thesis**

**Title: "Application of IoT, Machine Learning, and Digital Twin Technologies in Precision Agriculture: Challenges and Opportunities"**

**Student: Navrozidis Stavros**

**Registration Number: 50106958**

**Supervisor: Piromalis Dimitrios**

**Professor Ph.D.**

**Athens, Egaleo, 2024**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Πυρομάλης Δημήτριος, Αναπληρωτής Καθηγητής	Παπαγέωργας Παναγιώτης, Καθηγητής	Καμινάρης Σταύρος, Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright© Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΝΑΥΡΟΖΙΔΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ, ΣΕΠΤΕΒΡΙΟΣ, 2023

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 τους συγγραφείς. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **ΝΑΥΡΟΖΙΔΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ** του **ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ**, με αριθμό μητρώου **50106958** φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής **ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ** του Τμήματος **ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Ο ΔΗΛΩΝ

ΝΑΥΡΟΖΙΔΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ



## **Περίληψη**

Η εργασία αυτή εξετάζει την εφαρμογή των τεχνολογιών IoT, Machine Learning και Digital Twin στη Γεωργία Ακριβείας. Παρουσιάζει την σημαντικότητα της εκμετάλλευσης της τεχνολογίας στον τομέα τις γεωργίας, και τα προνόμια που την επακολουθούν. Παρουσιάζονται τα θεωρητικά υπόβαθρα των τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων, της Μηχανικής Μάθησης και του Ψηφιακού Διδύμου, για αύξηση της αποδοτικότητας και της επίδοσης της παραγωγής του αγροτικού τομέα, καθόλη την διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Η αξιοποίηση των τεχνολογιών είναι αναγκαία για ένα καλύτερο μέλλον στα επίπεδα της βιωσιμότητας, της οικονομίας, του περιβάλλοντος και της κοινωνίας. Παρουσιάζονται επίσης οι προκλήσεις που μπορεί να χρειαστεί να αντιμετωπίσουν οι τεχνολογίες, οι οποίες όμως μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω ερευνών στο μέλλον.

## **Λέξεις - Κλειδιά**

Γεωργία Ακριβείας, Διαδίκτυο των Πραγμάτων, Ψηφιακό Δίδυμο, Τεχνητή Νοημοσύνη, Μηχανική Μάθηση, Έξυπνη Γεωργία, Δίκτυα Αισθητήρων, Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

## **ABSTRACT**

This work examines the application of IoT (Internet of Things), Machine Learning, and Digital Twin technologies in Precision Agriculture. It highlights the significance of leveraging technology in the field of agriculture and the benefits that follow. The theoretical backgrounds of IoT, Machine Learning, and Digital Twin technologies are presented to enhance the efficiency and performance of agricultural production in all stages of the production process. The utilization of these technologies is essential for a better future concerning sustainability, economy, environment, and society. Additionally, the challenges that the technologies may encounter are also discussed, which can be addressed through future research.

## Keywords

Precision Agriculture, Internet of Things (IoT), Digital Twin, Artificial Intelligence (AI), Machine Learning, Smart Agriculture, Sensor Networks, Communication Protocols.

## Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	7
Κατάλογος Εικόνων.....	7
Αλφαβητικό Ευρετήριο.....	9
Εισαγωγή.....	12
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : IoT, LPWAN, Machine Learning, Digital Twin και Precision Farming....	13
1.1 IoT.....	13
1.2 LPWAN.....	15
1.3 Machine Learning.....	16
1.4 Digital Twin.....	17
1.5 Precision Farming.....	18
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : IoT στην Γεωργία Ακριβείας.....	20
2.1 Εισαγωγή στην Χρήση IoT στην Γεωργία Ακριβείας.....	20
2.2 Συσκευές IoT.....	21
2.3 Τεχνολογίες Επικοινωνίας.....	23
2.4 Εφαρμογές IoT στην Γεωργία Ακριβείας.....	27
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Μηχανική Μάθηση στην Γεωργία Ακριβείας.....	33
3.1 Μηχανική Μάθηση ως Εργαλείο.....	33
3.2 Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης.....	37
3.3 Εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης στην Γεωργία Ακριβείας.....	40
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> : Εφαρμογή Digital Twin στον Γεωργικό Τομέα.....	54
4.1 Βασικά Στοιχεία και Αρχιτεκτονική Ψηφιακού Διδύμου.....	54
4.2 Εφαρμογές Digital Twin στην Γεωργία Ακριβείας.....	55
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> : Προκλήσεις των Τεχνολογιών IoT, ML, και DT και συμπεράσματα.....	65
5.1 IoT: Προκλήσεις και Συμπεράσματα.....	65
5.2 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση: Προκλήσεις και συμπεράσματα.....	68

<b>5.3 Ψηφιακό Δίδυμο: Προκλήσεις και Συμπεράσματα.....</b>	<b>70</b>
---	-----------

<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>72</b>
--------------------------	-----------

### **Κατάλογος Πινάκων**

- 2.3.1 Τεχνολογίες Επικοινωνίας στην Γεωργία Ακριβείας
- 3.1.1 Τρόποι Χρήσης Μηχανικής μάθησης στην Γεωργία Ακριβείας
- 3.3.1 Παραδείγματα Μηχανικής Μάθησης για Πρόβλεψη Χημικών Ουσιών
- 3.3.2 Παραδείγματα Χρήσης Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης για Ανίχνευση Ασθενειών σε Σοδειά

### **Κατάλογος Εικόνων**

- 1.1.1 Απεικόνιση της Τεχνολογίας IOT
- 1.1.2 Απεικόνιση της Τεχνολογίας Cloud Computing
- 1.2.1 Απεικόνιση της Τεχνολογίας LPWAN
- 1.3.1 Απεικόνιση της Τεχνολογίας Machine Learning
- 1.4.1 Απεικόνιση της Τεχνολογίας Digital Twin
- 1.5.1 Απεικόνιση του Όρου Γεωργία Ακριβείας
- 2.1.1 Απεικόνιση IoT στην Γεωργία Ακριβείας
- 2.1.2 Παράδειγμα Εφαρμογής IoT στην Γεωργία Ακριβείας
- 2.2.1 Απεικόνιση της Αρχιτεκτονικής μιας Συσκευής IoT
- 2.2.2 Απεικόνιση Χαρακτηριστικών μίας Συσκευής IoT
- 2.3.1 Απεικόνιση IoT με Cloud Service και AI Σύστημα Αποφάσεων
- 2.3.2 Παράδειγμα Εφαρμογής IoT σε Φάρμα
- 2.4.1 Weather Radar
- 2.4.2 Aquaponics System
- 2.4.3 Παράδειγμα Εφαρμογής IoT σε Δάσος
- 2.4.4 Παράδειγμα Εφαρμογής IoT για Παρακολούθηση και Ιχθυόλατση
- 2.4.5 Παράδειγμα Εφαρμογής IoT στη Γεωργία Ακριβείας με Χρήση Cloud
- 2.4.6 Παράδειγμα Εφαρμογής IoT σε Έξυπνο Θερμοκήπιο
- 3.1.1 Απεικόνιση της Μηχανικής Μάθησης στον Τομέα της Γεωργίας Ακριβείας



- 3.1.2 Σχηματική Αναπαράσταση ενός Συστήματος Μηχανικής Μάθησης
- 3.1.3 Ομάδες και Υποομάδες Μηχανικής Μάθησης
- 3.2.1 Παράδειγμα της Τεχνολογίας Μηχανικής Μάθησης ANN
- 3.2.2 Παράδειγμα της Τεχνολογίας Μηχανικής Μάθησης SVM
- 3.2.3 Παράδειγμα της Τεχνολογίας Μηχανικής Μάθησης DT
- 3.2.4 Παράδειγμα της Τεχνολογίας Μηχανικής Μάθησης RF
- 3.3.1 Σχηματική Αναπαράσταση της Παραγωγικής Διαδικασίας
- 3.3.2 Διαδικασίες Ανάλογα με το Στάδιο της Παραγωγής
- 3.3.3 Απεικόνιση ενός Expert System
- 3.3.4 Μπλοκ Διάγραμμα ενός Αυτόματου Συστήματος Άρδευσης
- 3.3.5 Απεικόνιση Διαδικασίας FTIR
- 3.3.6 Απεικόνιση του Μοντέλου Μηχανικής Μάθησης CNN
- 3.3.7 Απεικόνιση του Μοντέλου Μηχανικής Μάθησης LSTM
- 3.3.8 Απεικόνιση του Μοντέλου Μηχανικής Μάθησης DNN
- 3.3.9 Απεικόνιση Λειτουργιών Τεχνητής Νοημοσύνης
- 3.3.10 Συγκομιδή Σοδειάς Με Χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης
- 3.3.11 Διαδικασία Διαχωρισμού Με Βάση το Χρώμα
- 3.3.12 Διαδικασία Ελέγχου Ποιότητας με Χρήση Μηχανικής Μάθησης
- 3.3.13 Απεικόνιση Τεχνητής Νοημοσύνης στον Αγροτικό Τομέα
- 4.1.1 Σχηματική Απεικόνιση Ψηφιακού Διδύμου στον Αγροτικό Τομέα
- 4.2.1 Απεικόνιση Συστήματος Άρδευσης
- 4.2.2 Σχηματικό Διάγραμμα Ψηφιακού Διδύμου στην Γεωργία Ακριβείας
- 4.2.3 Αρχιτεκτονική ενός DT με εφαρμογή σε Γεωργικές Τεχνολογίες
- 4.2.4 Απεικόνιση Ενός Digital Twin σε Αγρόκτημα
- 4.2.5 Σχηματική Απεικόνιση Λειτουργίας ενός DT στον Γεωργικό τομέα
- 4.2.6 Σχηματικό Παράδειγμα ενός Ψηφιακού Διδύμου σε Θερμοκήπιο

## Αλφαβητικό Ευρετήριο

**AD HOC NETWORKS:** Δίκτυα που δημιουργούνται προσωρινά και αυτόνομα μεταξύ συσκευών, χωρίς την ανάγκη μιας κεντρικής υποδομής.

**ANN:** Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο, ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης εμπνευσμένο από τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου.

**Backhaul:** Το σύνολο των συνδέσεων που ενώνουν ένα δίκτυο με τον κεντρικό πυρήνα.

**BD:** Βάσεις Δεδομένων, αποθηκεύουν και διαχειρίζονται μεγάλο όγκο δεδομένων.

**BLR:** Bayes Linear Regression, μέθοδος μηχανικής μάθησης.

**BPNN:** Τα Backpropagation Neural Networks είναι ένα είδος τεχνητού νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων μάθησης.

**CAR-RR:** Complementary Augmented Regularized Ridge, μέθοδος μηχανικής μάθησης.

**CAR-SVR:** Complementary Augmented Regularized Support Vector Regression, μέθοδος μηχανικής μάθησης.

**CC:** Cloud Computing, το μοντέλο παροχής υπηρεσιών πληροφορικής μέσω του διαδικτύου.

**CHNS:** Carbon, Hydrogen, Nitrogen, Sulfur, μέθοδος ανάλυσης χημικών στοιχείων.

**CNN:** Convolutional Neural Network, τύπος τεχνητού νευρωνικού δικτύου για την αναγνώριση προτύπων σε εικόνες.

**COGNITIVE RADIO:** Τεχνολογία που επιτρέπει την αυτόματη επιλογή των συχνοτήτων επικοινωνίας για βελτιστοποίηση του χρήστη.

**Cubist:** Αλγόριθμος πρόβλεψης μηχανικής μάθησης.

**DF:** Decoding Functions, συναρτήσεις αποκωδικοποίησης.

**DL:** Deep Learning, μέθοδος μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιεί νευρωνικά δίκτυα με πολλά επίπεδα.

**D2D:** Device-to-Device, επικοινωνία μεταξύ συσκευών χωρίς την ανάγκη περάσματος από την κεντρική υποδομή.

**DT:** Digital Twin, ψηφιακό αντίγραφο ενός πραγματικού αντικειμένου ή συστήματος.

**EC-GPRS:** Enhanced Circuit-Switched Data, τεχνολογία επικοινωνίας δεδομένων.

**ELM:** Extreme Learning Machine, μέθοδος μηχανικής μάθησης.

**FFD:** Full-Function Device, συσκευή με πλήρεις λειτουργίες σε δίκτυο Zigbee.

**FTIR:** Fourier Transform Infrared Spectroscopy, τεχνική ανάλυσης χημικών ενώσεων.

**FPGA:** Field-Programmable Gate Array, ένας τύπος ψηφιακού κυκλώματος.

**GSM:** Global System for Mobile Communications, τεχνολογία κινητής τηλεφωνίας.

**GNSS:** Global Navigation Satellite System, παγκόσμιο σύστημα πλοήγησης μέσω δορυφόρων.

**GIS:** Geographic Information System, σύστημα πληροφοριών γεωγραφικών δεδομένων.

**ICT:** Information and Communication Technology, τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνίας.

**k-Means Clustering:** Αλγόριθμος ομαδοποίησης δεδομένων.

**k-NN:** k-Nearest Neighbors, μέθοδος ταξινόμησης δεδομένων.

**LDA:** Linear Discriminant Analysis, μέθοδος ταξινόμησης δεδομένων.

**LIBS:** Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, τεχνική ανάλυσης χημικών ενώσεων.

**Lora:** Δίκτυο χαμηλής κατανάλωσης ιδανικό για το IoT.

**LoraWan:** Πρωτόκολλο επικοινωνίας για Lora δίκτυα.

**LPWA:** Low Power Wide Area, τεχνολογία χαμηλής κατανάλωσης για ευρεία εμβέλεια.

**LPWAN:** Low Power Wide Area Network, δίκτυο χαμηλής κατανάλωσης για ευρεία εμβέλεια.

**LTE-3GPP:** Long-Term Evolution, πρότυπο κινητής τηλεφωνίας.

**LSTM:** Long Short-Term Memory, τύπος νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιείται για χρονοσειρές δεδομένων.

**ML:** Machine Learning, Μηχανική Μάθηση, αλγόριθμοι που επιτρέπουν στο σύστημα να μάθει από δεδομένα.

**MLR:** Multiple Linear Regression, μέθοδος μηχανικής μάθησης.

**MSCU-net + C:** Mixed Signal Chip Units Network and Control, τεχνολογία δικτύου και ελέγχου.

**NFC:** Near Field Communication, τεχνολογία επικοινωνίας σύντομων αποστάσεων.

**NB:** Naive Bayes, αλγόριθμος ταξινόμησης δεδομένων.

**NB-IoT:** Narrowband Internet of Things, πρωτόκολλο επικοινωνίας για το IoT.

**NFMI:** Near-Field Magnetic Induction, τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας.

**PF:** Particle Filter, αλγόριθμος παρατηρητής κατανομής.

**PLS:** Partial Least Squares, μέθοδος ταξινόμησης δεδομένων.

**PLSR:** Partial Least Squares Regression, μέθοδος μηχανικής μάθησης.

**QR:** Quick Response, τεχνολογία κωδικών QR.

**RF:** Radio Frequency, συχνότητες ραδιοκυμάτων.

**RFD:** Reduced-Function Device, συσκευή με περιορισμένες λειτουργίες σε δίκτυο Zigbee.

**RGB:** Red, Green, Blue, μοντέλο χρωμάτων.

**RGB-D:** Red, Green, Blue, Depth, μοντέλο χρωμάτων με βάθος.

**RFE-SVM:** Recursive Feature Elimination - Support Vector Machine, μέθοδος επιλογής χαρακτηριστικών και ταξινόμησης δεδομένων.

**RFID:** Radio Frequency Identification, τεχνολογία αναγνώρισης μέσω ραδιοκυμάτων.

**RGB:** Red, Green, Blue, τρεις βασικές αποχρώσεις.

**SEM:** Structural Equation Modeling, τεχνική στατιστικής ανάλυσης δεδομένων.

**SIGFOX:** Πρωτόκολλο επικοινωνίας για LPWA δίκτυα.

**SLR:** Simple Linear Regression, μέθοδος μηχανικής μάθησης.

**SVM:** Support Vector Machine, αλγόριθμος ταξινόμησης δεδομένων.

**STR:** Smoothness Terms, τεχνική εξομάλυνσης δεδομένων.

**SVR:** Support Vector Regression, μέθοδος μηχανικής μάθησης.

**UAV:** Unmanned Aerial Vehicle, αυτόματα ή απομακρυσμένα ελεγχόμενο αεροσκάφος.

**UN:** Universal Network, δίκτυο που χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς.

**UNB:** Ultra-Narrowband, τεχνολογία επικοινωνίας με πολύ στενή ζώνη συχνοτήτων.

**VIS-NIR:** Visible-Near-Infrared, τεχνική ανάλυσης εικόνων.

**WLAN:** Wireless Local Area Network, ασύρματο τοπικό δίκτυο.

**WHAN:** Wireless Home Area Network, ασύρματο δίκτυο στο σπίτι.

**Wi-Fi:** Τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας δικτύου.

**WiMAX:** Worldwide Interoperability for Microwave Access, τεχνολογία ευρείας ζώνης.

**WPN:** Wireless Personal Network, ασύρματο δίκτυο προσωπικού χρήστη.

**WSN:** Wireless Sensor Network, ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

**WWAN:** Wireless Wide Area Network, ασύρματο δίκτυο ευρείας ζώνης.

**ZigBEE:** Τεχνολογία ασύρματων δικτύων χαμηλής κατανάλωσης.

**Z-Wave:** Τεχνολογία επικοινωνίας για ασύρματα δίκτυα έξυπνων συσκευών.

## Εισαγωγή

Η ανάπτυξη και η ραγδαία εξέλιξη των τεχνολογιών του ψηφιακού διδύμου (Digital Twin) και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT), και της μηχανικής μάθησης (ML) έχουν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον τομέα της γεωργίας ακρίβειας. Αυτές οι προηγμένες τεχνολογίες έχουν εισάγει νέες δυνατότητες και προοπτικές για τη βελτίωση της πολλών πτυχών της αγροτικής παραγωγής, όπως είναι η αποδοτικότητα και η βιωσιμότητα.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει τις δυνατότητες και τα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή της μηχανικής μάθησης, του ψηφιακού διδύμου και του διαδικτύου των πραγμάτων στον τομέα της γεωργίας ακρίβειας. Εστιάζοντας στις πρακτικές εφαρμογές, η εργασία αυτή θα εξετάσει πώς αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να βοηθήσουν τους αγρότες να λαμβάνουν ακριβείς και έγκυρες πληροφορίες σχετικά με τις καλλιέργειές τους, τις συνθήκες του εδάφους, το κλίμα, την υγεία των φυτών και τις ποιοτικές παραμέτρους της παραγωγής.

Η εργασία θα παρουσιάσει τις κύριες αρχές και τις λειτουργίες της μηχανικής μάθησης, καθώς και της τεχνολογίας του ψηφιακού διδύμου και του Διαδικτύου των Πραγμάτων που σχετίζονται με την γεωργία ακρίβειας. Θα εξετάσει τις διάφορες μεθόδους και αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις τεχνολογίες, και πώς μπορούν να εφαρμοστούν στην αγροτική παραγωγή για την αύξηση της αποδοτικότητας και της ποιότητας της παραγωγής.

Επιπλέον, η εργασία θα αναλύσει πρακτικά παραδείγματα επιτυχημένων εφαρμογών της μηχανικής μάθησης, του ψηφιακού διδύμου και του διαδικτύου των πραγμάτων σε γεωργικά συστήματα. Θα διερευνήσει τις προκλήσεις και τα εμπόδια που μπορεί να αντιμετωπίζουν οι αγρότες και οι ερευνητές κατά την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών και πώς μπορούν να αντιμετωπιστούν.

Συνολικά, η διπλωματική αυτή εργασία αποσκοπεί στην κατανόηση της συμβολής της μηχανικής μάθησης, του ψηφιακού διδύμου και του Διαδικτύου των Πραγμάτων στον τομέα της γεωργίας ακρίβειας και την εξεύρεση καινοτόμων λύσεων για τη βελτίωση της γεωργικής παραγωγής και της βιωσιμότητας του αγροτικού τομέα. Μέσα από την έρευνα και την αξιοποίηση των προηγμένων τεχνολογιών, αυτή η εργασία στοχεύει να συμβάλει στην πρόοδο και την ανάπτυξη του τομέα της ακριβούς γεωργίας και να παράσχει πολύτιμες συμβουλές για τον τομέα της γεωργίας και της αγροτικής παραγωγής.

Η εργασία ξεκινάει με το θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνολογιών του Διαδικτύου των πραγμάτων, του LPWAN, της μηχανικής μάθησης, του ψηφιακού διδύμου και της Γεωργίας Ακρίβειας. Συνεχίζοντας, γίνεται μια εισαγωγή για την χρήση του IoT στην γεωργία ακρίβειας, αναφορά στις συσκευές IoT, τις τεχνολογίες επικοινωνίας και τις εφαρμογές IoT στην γεωργία ακρίβειας. Έπειτα, μελετάμε την μηχανική μάθηση ως εργαλείο, βλέπουμε κάποιες χρήσιμες

τεχνικές μηχανικής μάθησης, και εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης στην γεωργία ακριβείας. Παρακάτω, θα δούμε τα βασικά στοιχεία και την αρχιτεκτονική ενός ψηφιακού διδύμου, και τις εφαρμογές της τεχνολογίας στην γεωργία ακριβείας. Τέλος, θα δούμε τις προκλήσεις που συναντούνται κατά την εφαρμογή των τεχνολογιών, και τα συμπεράσματα της εργασίας.

## **Κεφάλαιο 1: IoT, LPWAN, Machine Learning, Digital Twin και Precision**

### **Farming**

#### **1.1 Internet Of Things (IoT)**

Το Internet of Things (IoT) είναι ένα σύστημα που συνδέει διαφορετικά αντικείμενα, συσκευές και αισθητήρες μεταξύ τους μέσω δικτύων υπολογιστών και διαδικτύου, επιτρέποντάς τους να ανταλλάσσουν δεδομένα και να διαχειρίζονται λειτουργίες αυτόνομα. Η έννοια του IoT προέκυψε από την ανάγκη για συνδεσιμότητα και διασύνδεση σε έναν κόσμο όπου η τεχνολογία παίζει ολοένα και πιο σημαντικό ρόλο στην καθημερινή ζωή.[2]

Το IoT αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία: τον εξοπλισμό των αισθητήρων και τον εξοπλισμό του δικτύου. Οι αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν διάφορα στοιχεία, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η φωτεινότητα, η κίνηση και άλλα, και να τα μεταδώσουν μέσω ασύρματων δικτύων στον εξοπλισμό του δικτύου, που είναι υπεύθυνος για τη συλλογή, την ανάλυση και τη διανομή των δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν για να βελτιωθεί η απόδοση, η ασφάλεια και η ενεργειακή απόδοση συστημάτων και εφαρμογών.

Η ανάπτυξη του IoT έχει ριζικά αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούμε και αλληλεπιδρούμε με το περιβάλλον μας, καθώς επιτρέπει την αναγνώριση, την καταγραφή και τον διαμοιρασμό δεδομένων από διαφορετικά αντικείμενα. Οι εφαρμογές του IoT καλύπτουν πολλούς τομείς, όπως η επιστήμη της υγείας, η γεωργία, η βιομηχανία, οι μεταφορές, οι πόλεις και οι καταναλωτές.

Η ανάπτυξη του IoT βασίζεται σε πολλές τεχνολογίες, όπως αισθητήρες, δίκτυα ασύρματης επικοινωνίας, πλατφόρμες συλλογής και ανάλυσης δεδομένων και cloud computing. Οι πλατφόρμες αυτές δίνουν τη δυνατότητα σε διαφορετικούς χρήστες να συνδέονται και να αλληλεπιδρούν με το δίκτυο του IoT, δίνοντας τους πρόσβαση σε δεδομένα και προγράμματα επεξεργασίας δεδομένων.

Ωστόσο, η ανάπτυξη του IoT έχει δημιουργήσει επίσης προκλήσεις στους τομείς της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας. Με τη συλλογή και την ανάλυση τόσο μεγάλου όγκου



*Εικόνα 1.1.1 – Απεικόνιση IoT [290]*

δεδομένων από διαφορετικά αντικείμενα, υπάρχει κίνδυνος ανεπιθύμητης παρακολούθησης και παραβίασης της ιδιωτικότητας. Επίσης, η ανοικτή φύση του δικτύου IoT μπορεί να καθιστά τα αντικείμενα που συνδέονται με αυτό ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις.[1]

Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, είναι απαραίτητο να επικεντρωθούμε στην ανάπτυξη ασφαλών και αξιόπιστων λύσεων IoT. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη αλγορίθμων ασφάλειας, τη χρήση κρυπτογράφησης για την προστασία των δεδομένων, τη δημιουργία πιστοποιητικών ασφάλειας για τα αντικείμενα IoT και την επικοινωνία τους, καθώς και τη διασφάλιση της ασφάλειας του cloud computing που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση και την επεξεργασία των δεδομένων.

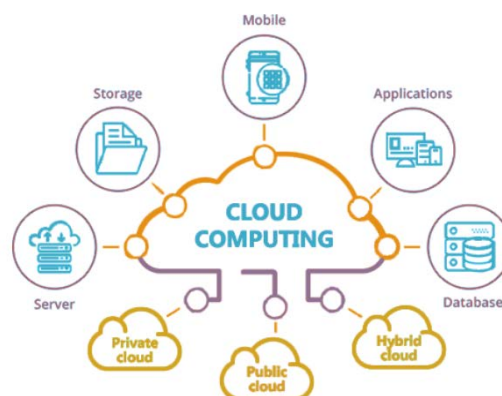
Σε θεωρητικό επίπεδο, οι τεχνολογίες που απαιτούνται για τη λειτουργία του IoT περιλαμβάνουν:

**Αισθητήρες:** Οι αισθητήρες είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ή τη μέτρηση των φυσικών παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η πίεση και η κίνηση.

**Δίκτυα αισθητήρων (WSN):** Τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από πολλούς αισθητήρες που επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα για να συλλέξουν δεδομένα και να τα μεταδώσουν σε ένα κεντρικό σύστημα για ανάλυση και επεξεργασία. Τα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές του IoT, όπως η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα ή του νερού, η παρακολούθηση της κίνησης στους δρόμους ή σε ένα εργοστάσιο και η παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας.

**Τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας:** Οι τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας επιτρέπουν στους αισθητήρες να επικοινωνούν μεταξύ τους και με το κεντρικό σύστημα διαχείρισης. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν το Bluetooth, το Wi-Fi, το Zigbee και το LoRaWAN.

**Cloud Computing:** Η τεχνολογία του cloud computing επιτρέπει την αποθήκευση, τη διαχείριση και την ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες στο cloud. Η ανάλυση των δεδομένων στο cloud μπορεί να παρέχει ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης και των τάσεων στα δεδομένα και να βοηθήσει στη λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, οι υπηρεσίες του cloud μπορούν να παρέχουν ασφαλή αποθήκευση δεδομένων και δυνατότητα πρόσβασης σε αυτά από οποιοδήποτε μέρος του κόσμου



Εικόνα 1.1.2 – Απεικόνιση Cloud Computing [291]

**Μηχανική μάθηση και αναγνώριση προτύπων:** Η μηχανική μάθηση και η αναγνώριση

προτύπων αποτελούν σημαντικά κομμάτια της τεχνολογίας IoT. Η μηχανική μάθηση επιτρέπει στο σύστημα να αναλύει τα δεδομένα και να αναγνωρίζει πρότυπα, ενώ η αναγνώριση προτύπων επιτρέπει στο σύστημα να αναγνωρίζει συγκεκριμένα συμβάντα ή καταστάσεις και να λαμβάνει αποφάσεις βάσει αυτών των αναγνωρισμένων προτύπων.

**Ασφάλεια:** Η ασφάλεια αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην τεχνολογία IoT. Η προστασία των δεδομένων και η αποτροπή από τις επιθέσεις και τους κινδύνους αποτελούν πρωταρχικά ζητήματα για την ασφάλεια στο IoT. Η κρυπτογράφηση των δεδομένων και η επιλογή πολύπλοκων κωδικών ασφαλείας είναι απαραίτητα για να προστατευτούν τα δεδομένα. Επιπλέον, οι συσκευές IoT πρέπει να ενημερώνονται τακτικά για να διορθωθούν τυχόν κενά ασφαλείας που μπορεί να εντοπιστούν.

**Διαχείριση των συσκευών:** Η διαχείριση των συσκευών είναι επίσης σημαντικό κομμάτι της τεχνολογίας IoT. Η διαχείριση περιλαμβάνει την ενημέρωση των συσκευών, τη διαχείριση των ρυθμίσεων και των αναβαθμίσεων λογισμικού. Επιπλέον, η διαχείριση περιλαμβάνει την αντιμετώπιση προβλημάτων και την παροχή υποστήριξης για τους χρήστες των συσκευών. [2]

Συνολικά, το IoT αντιπροσωπεύει μια σημαντική εξέλιξη στον κόσμο της τεχνολογίας και μπορεί εν δυνάμει να αλλάξει ριζικά τον τρόπο ζωής και εργασίας του ανθρώπου. Παρά τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει, η ανάπτυξη του IoT συνεχίζεται με εντυπωσιακό ρυθμό και αναμένεται να επηρεάσει θετικά την οικονομία, τη βιομηχανία, την υγεία και το περιβάλλον.

## 1.2 LPWAN

Τα δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης και ευρείας εμβέλειας (LPWANs) αποτελούν μια αναδυόμενη τεχνολογία που υπόσχεται να συνδέσει με αποδοτικό και αξιόπιστο τρόπο μεγάλο αριθμό συσκευών IoT. Αυτά τα δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν υψηλές επιδόσεις στην επικοινωνία μεταξύ συσκευών, χωρίς να απαιτούν υψηλή κατανάλωση ενέργειας ή υψηλούς πόρους. Στο παρόν κείμενο θα αναλύσουμε το θεωρητικό υπόβαθρο των δικτύων LPWAN και θα αναφέρουμε τις βασικές τεχνολογίες και πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται.



Εικόνα 1.2.1 – Απεικόνιση LPWAN [292]

Τα δίκτυα LPWAN έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες, συχνά στα 900 MHz ή 800 MHz. Αυτό επιτρέπει στα σήματα να διανύουν μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας τα δίκτυα LPWAN κατάλληλα για τη σύνδεση συσκευών που απαιτούν μικρή κατανάλωση ενέργειας, όπως αισθητήρες και μικρές συσκευές IoT. Οι συσκευές αυτές μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο με τη χρήση διαφόρων πρωτοκόλλων, όπως το LoRaWAN, το Sigfox και το NB-IoT.

Το LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) είναι ένα από τα πιο δημοφιλή πρωτόκολλα για τα δίκτυα LPWAN. Αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί τη δικτύωση τύπου star και επιτρέπει τη σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών σε ένα δίκτυο. Επίσης, το LoRaWAN



παρέχει υψηλή ανθεκτικότητα στις παρεμβολές από άλλα σήματα στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων.

Το Sigfox είναι ένα άλλο πρωτόκολλο για τα δίκτυα LPWAN. Αυτό το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί τη δικτύωση τύπου star και χρησιμοποιεί το φάσμα των 868 MHz. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία Ultra Narrow Band (UNB) για την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών και του δικτύου. Αυτό επιτρέπει στο Sigfox να παρέχει μια αξιόπιστη σύνδεση με μεγάλη απόσταση κάλυψης.[3]

Το NB-IoT (Narrowband IoT) είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί το φάσμα των κινητών τηλεφώνων. Αυτό το πρωτόκολλο παρέχει υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων και ανθεκτικότητα στην παρέμβαση από άλλα σήματα. Το LoRa έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μεγάλο εύρος εμβέλειας και χαμηλή κατανάλωση ισχύος, αλλά με χαμηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με άλλα πρωτόκολλα LPWAN. Αντίθετα, το Sigfox παρέχει μικρότερη εμβέλεια αλλά μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων. Και τα δύο πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές IoT, όπως παρακολούθηση αντικειμένων και περιβαλλοντικών συνθηκών.

Στην πράξη, η επιλογή μεταξύ των διαφόρων πρωτοκόλλων LPWAN εξαρτάται από τις απαιτήσεις και τις περιοριστικές συνθήκες της κάθε εφαρμογής. Ωστόσο, υπάρχει επίσης ένας αριθμός άλλων πρωτοκόλλων LPWAN, όπως το NB-IoT, το LTE-M και το Weightless, που χρησιμοποιούνται επίσης σε διάφορες εφαρμογές IoT.[145]

### 1.3 Machine Learning

Το Machine Learning είναι μια από τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες του σήμερα, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη ευφών εφαρμογών στους διάφορους τομείς, όπως η ρομποτική, η ιατρική, η χρηματοοικονομική και η βιομηχανία. Μία από τις ιδέες για το Machine Learning είναι να δοθεί στις μηχανές η δυνατότητα να μαθαίνουν από τα δεδομένα, αντί να προγραμματίζονται για συγκεκριμένες εργασίες. Στην συνέχεια, θα αναλύσουμε τις βασικές έννοιες και τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στο Machine Learning.



Εικόνα 1.3.1 – Απεικόνιση Machine Learning [293]

Η βασική ιδέα πίσω από το Machine Learning είναι να χρησιμοποιηθούν αλγόριθμοι που μπορούν να εξάγουν αποτελέσματα από δεδομένα, χωρίς να χρειάζεται να γραφτεί ένας συγκεκριμένος κανόνας ή αλγόριθμος. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: επιβλεπόμενη μάθηση, ανεπιβλεπτή μάθηση και ενισχυτική μάθηση.

**Επιβλεπόμενη μάθηση:** Στην επιβλεπόμενη μάθηση, ο στόχος είναι να προβλέψουμε μια επιθυμητή έξοδο για μια συγκεκριμένη είσοδο σε μια μηχανή μάθησης. Στην πραγματικότητα, η επίβλεψη σημαίνει ότι οι ετικέτες είναι γνωστές για κάθε είσοδο. Συνεπώς, η μηχανή μάθησης μπορεί να εκπαιδευτεί για να εξάγει την επιθυμητή έξοδο από τις εισόδους που δίνονται, χρησιμοποιώντας διάφορους αλγόριθμους μάθησης όπως οι μέθοδοι της παλινδρόμησης και της ταξινόμησης.

Ένα απλό παράδειγμα επιβλεπόμενης μάθησης είναι η κατηγοριοποίηση εικόνων. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σύνολο δεδομένων που περιλαμβάνει εικόνες και τις αντίστοιχες ετικέτες κατηγορίας (π.χ. σκύλος, γάτα, αυτοκίνητο κλπ.). Ο στόχος είναι να εκπαιδύσουμε ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης που θα μπορεί να αναγνωρίζει την κατηγορία

μιας εικόνας που του δίνεται ως είσοδος. Για να εκπαιδύσουμε ένα μοντέλο επιβλεπόμενης μάθησης, διαχωρίζουμε τα δεδομένα μας σε ένα σύνολο εκπαίδευσης και ένα σύνολο ελέγχου. Το σύνολο εκπαίδευσης χρησιμοποιείται για να εκπαιδύσουμε το μοντέλο, ενώ το σύνολο ελέγχου χρησιμοποιείται για να ελέγξουμε πόσο καλά λειτουργεί το μοντέλο σε νέα δεδομένα.

**Ανεπίβλεπτη μάθηση:** Στην ανεπίβλεπτη μάθηση, η μηχανή μάθησης εκπαιδεύεται χωρίς την παρουσία ετικετών ή στόχων εξόδου. Αντ' αυτού, ο στόχος είναι η ανακάλυψη χαρακτηριστικών στα δεδομένα, τα οποία επιτρέπουν την ομαδοποίηση, την περιγραφή της δομής των δεδομένων, ή την εύρεση μεταβολών στο χώρο των δεδομένων. Οι αλγόριθμοι ανεπίβλεπτης μάθησης μπορούν να διαχωριστούν σε διάφορες κατηγορίες, όπως οι μέθοδοι συσταδοποίησης, οι μέθοδοι περιγραφής δομής, και οι μέθοδοι μείωσης διαστάσεων. Στην ανεπίβλεπτη μάθηση, η μηχανή μάθησης μπορεί να ανακαλύψει μοτίβα και δομές στα δεδομένα, χωρίς την απαίτηση να προσδιορίσουμε εκ των προτέρων το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Ένα απλό παράδειγμα ανεπιβλεπτης μάθησης είναι η ομαδοποίηση (clustering) δεδομένων. Στην ομαδοποίηση, τα δεδομένα δεν έχουν καμία ετικέτα ή κατηγορία, και ο στόχος είναι να τα ομαδοποιήσουμε σε συγκεκριμένες ομάδες (clusters) βάσει κοινών χαρακτηριστικών τους. Για παράδειγμα, αν έχουμε ένα σύνολο δεδομένων που περιλαμβάνει πληροφορίες για κάποια φρούτα, όπως το βάρος και η υφή τους, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ομαδοποίηση για να τα ομαδοποιήσουμε σε διαφορετικές κατηγορίες (π.χ. εσπεριδοειδή, μήλα, αχλάδια κλπ.), χωρίς να έχουμε προκαθορισμένες ετικέτες ή κατηγορίες.

**Ενισχυτική μάθηση:** Η ενισχυτική μάθηση αφορά την εκπαίδευση μηχανών που μπορούν να λαμβάνουν αποφάσεις σε περιβάλλοντα που αλληλεπιδρούν με αυτές. Στην ενισχυτική μάθηση, η μηχανή μάθησης αντιμετωπίζει ένα περιβάλλον στο οποίο πρέπει να λαμβάνει αποφάσεις και να δρα σε αυτό το περιβάλλον με σκοπό να μεγιστοποιήσει μια ανταμοιβή ή να μειώσει μια κόστος. Η μηχανή μάθησης μαθαίνει από την ανταμοιβή ή το κόστος των επιλογών της στο περιβάλλον, προσπαθώντας να καταλήξει στην βέλτιστη στρατηγική για να επιτύχει τον στόχο της.

Ένα παράδειγμα ενισχυτικής μάθησης είναι ο αυτόματος πιλότος ενός αυτοκινήτου. Ο αλγόριθμος πρέπει να μάθει να αντιδρά σε διάφορες καταστάσεις, όπως είναι οι στροφές, οι περιορισμοί ταχύτητας, η αποφυγή εμποδίων και λοιπά. Ο αλγόριθμος δρα καθοδηγούμενος από ενισχύσεις, που είναι τα αποτελέσματα των ενεργειών του στο περιβάλλον, και στόχος του είναι να μάθει να προσεγγίζει ολοένα και καλύτερα το βέλτιστο σετ ενεργειών σε κάθε κατάσταση. Μέσω της διαδικασίας αυτής, ο αλγόριθμος ενισχύεται από τις ενέργειες που έχουν θετικό αποτέλεσμα και αποφεύγει τις πράξεις που έχουν αρνητική επίδραση.

Καταλήγοντας, η μηχανική μάθηση είναι μια από τις πιο σημαντικές και αναπτυσσόμενες τεχνολογίες στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης και της πληροφορικής γενικότερα. Με τη χρήση της μηχανικής μάθησης, μπορούμε να αναπτύξουμε αλγόριθμους και μοντέλα που μπορούν να αναγνωρίζουν πρότυπα και να προβλέπουν αποτελέσματα χωρίς να χρειάζεται να προγραμματίζουμε εξαρχής κάθε δυνατό σενάριο.[5] [6]

## 1.4 Digital Twin

Το Digital Twin είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια τεχνολογία που επιτρέπει τη δημιουργία ενός ψηφιακού διπλότυπου ενός πραγματικού αντικειμένου, όπως μια μηχανή, μια διαδικασία παραγωγής ή ένα κτήριο. Το Digital Twin επιτρέπει στους χρήστες να παρακολουθούν την κατάσταση του πραγματικού αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες και άλλες συσκευές IoT.



Εικόνα 1.4.1 – Απεικόνιση Digital Twin [294]

Τα Digital Twins μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρακολουθήσουν την απόδοση του πραγματικού αντικειμένου, να προβλέψουν προβλήματα πριν αυτά συμβούν, να βελτιώσουν την απόδοση και την ασφάλεια και να μειώσουν τον χρόνο αναμονής για την αντικατάσταση ή επισκευή.

Η τεχνολογία του Digital Twin έχει εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως η βιομηχανία, η ενέργεια, η υγεία και η κατασκευή. Η εξέλιξη της τεχνολογίας IoT και η αύξηση της διασύνδεσης των συσκευών μέσω του Διαδικτύου είναι καίρια για τη συνέχιση της ανάπτυξης του Digital Twin. Η συλλογή δεδομένων από τις συσκευές IoT και η χρήση των δεδομένων αυτών για τη δημιουργία ενός ψηφιακού αντίγραφου επιτρέπει στους χρήστες να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση και τη λειτουργία του φυσικού αντικειμένου. Η χρήση της τεχνολογίας Digital Twin μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους και του χρόνου ανάπτυξης, βελτιώσεις στην απόδοση και αξιοπιστία του αντικειμένου και προσφέρει επίσης τη δυνατότητα προβλεπτικής συντήρησης και βελτιστοποίησης της λειτουργίας του.

Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις στην εφαρμογή της τεχνολογίας. Αρχικά, υπάρχει η πρόκληση της συλλογής και ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων από τα αντίστοιχα συστήματα παραγωγής και της δημιουργίας ενός ακριβούς ψηφιακού αντιγράφου. Επιπλέον, η απόδοση του Digital Twin μπορεί να επηρεαστεί από την αντοχή του συστήματος στις αλλαγές και στην αβεβαιότητα, καθώς και από την ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται. Τέλος, η ασφάλεια των συστημάτων και η προστασία των δεδομένων αποτελούν σημαντική πρόκληση καθώς οι ψηφιακοί δίδυμοι συνδέονται με το δίκτυο και έχουν πρόσβαση σε ευαίσθητες πληροφορίες.

Η τεχνολογία του Digital Twin αντιπροσωπεύει μια καινοτόμο προσέγγιση στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε και αλληλεπιδρούμε με τα συστήματα και τους εξοπλισμούς μας. Με τη δυνατότητα του να προσομοιώνει την απόδοση και την κατάσταση ενός πραγματικού αντικειμένου ή συστήματος, το Digital Twin μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και την αξιοπιστία των εφαρμογών σε διάφορους τομείς, αλλά παράλληλα αντιμετωπίζει και προκλήσεις, όπως η ασφάλεια των δεδομένων, η ακρίβεια των μοντέλων και η διαχείριση των μεγάλων όγκων δεδομένων. [7]

## 1.5 Precision Farming

Η γεωργία ακριβείας είναι μια στρατηγική που χρησιμοποιεί τεχνολογίες και δεδομένα για τη βελτίωση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας της γεωργικής παραγωγής. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στην γεωργία ακριβείας περιλαμβάνει συλλογή δεδομένων με αισθητήρες και έξυπνες συσκευές, ανάλυση δεδομένων, χρήση συστημάτων πλοήγησης και ρομποτικής, καθώς και τη χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS).



Εικόνα 1.5.1 – Απεικόνιση Precision Farming [295]

Η γεωργία ακριβείας επιτρέπει στους αγρότες να λαμβάνουν ακριβή δεδομένα για την υγεία των φυτών, το έδαφος, την υγρασία, τη θερμοκρασία και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της καλλιέργειας. Αυτά τα δεδομένα επιτρέπουν στους αγρότες να λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με τη σπορά, την ποτίστρα, τη χρήση λιπασμάτων και την εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων. [8]

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι η χρήση αισθητήρων. Οι αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν τα διάφορα χαρακτηριστικά του εδάφους, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η σύσταση του εδάφους και η φωτεινότητα. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τη διαχείριση της καλλιέργειας, να προβλέψουν τις ανάγκες της καλλιέργειας και να εντοπίσουν προβλήματα στο εδαφικό περιβάλλον. Επιπλέον, οι αισθητήρες μπορούν να συλλέγουν δεδομένα για την παραγωγή, όπως την παραγωγή καρπών, την υγρασία και τη θερμοκρασία του αέρα, και τον παράγοντα εξωτερικού περιβάλλοντος, όπως η βροχή και οι ηλιακοί ακτίνες, για να βελτιώσουν την παραγωγή και να μειώσουν τα αποθέματα

Ένας επίσης σημαντικός παράγοντας στη γεωργία ακριβείας είναι η ανάλυση δεδομένων. Η ανάλυση δεδομένων μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση του εδαφικού περιβάλλοντος, στην ανίχνευση προβλημάτων, στην επιλογή των κατάλληλων προϊόντων για την καλλιέργεια και στον προγραμματισμό των εργασιών. Η ανάλυση δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και βαθιάς μάθησης, που επιτρέπουν την αναγνώριση μοτίβων και την πρόβλεψη των επιπτώσεων των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση των καλλιεργειών.

Τα αποτελέσματα της γεωργίας ακριβείας είναι τα εξής:

- Μείωση της μόλυνσης του εδάφους, του νερού και του αέρα με την ελάχιστη ζητούμενη χρήση φυτοφαρμάκων
- Αύξηση της αποδοτικότητας
- Προγραμματισμός της συγκομιδής της σοδειάς, όταν είναι πλήρης και ώριμη
- Γενική μείωση της χρήσης χημικών ουσιών
- Καλύτερη διαχείριση του νερού, με πιο αποτελεσματικούς τρόπους χρήσης
- Καλύτερη ποιότητα, ποσότητα και μειωμένο κόστος παραγωγής με αποτέλεσμα αύξηση του Return on Investment, δηλαδή αύξηση των εσόδων
- Πλήρης γνώση για τις ανάγκες του εδάφους, όσον αφορά τις αναγκαίες θρεπτικές ουσίες.

- Μείωση των περιβαλλοντολογικών ρίσκων
- Μείωση της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα
- Καλύτερη και πιο αποδοτική χρήση των πρώτων υλών
- Βιωσιμότητα [9] [10]

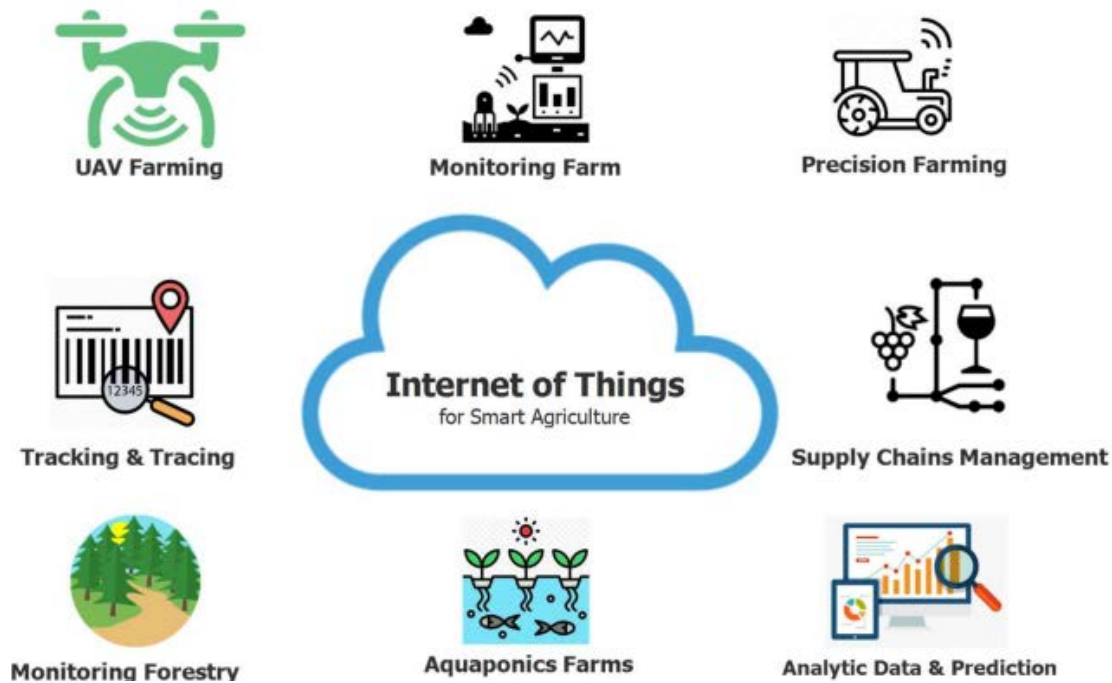
Συνολικά, η γεωργία ακριβείας αποτελεί μια σύγχρονη προσέγγιση στη γεωργία, που επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και τη μείωση του κόστους παραγωγής, μέσω της χρήσης προηγμένων τεχνολογιών. Η χρήση σύγχρονων μηχανημάτων, αισθητήρων και συστημάτων πληροφορικής σε συνδυασμό με την ανάλυση δεδομένων και την τεχνητή νοημοσύνη, επιτρέπει τη βελτίωση της παραγωγής και την αντιμετώπιση των προκλήσεων του μέλλοντος στον τομέα της γεωργίας.

## **Κεφάλαιο 2: ΙοΤ στην Γεωργία Ακριβείας**

### **2.1 Εισαγωγή στην χρήση ΙοΤ στην Γεωργία Ακριβείας**



Για να καλυφθούν οι παγκόσμιες απαιτήσεις της ανθρωπότητας, προτείνονται και εφαρμόζονται συνεχώς νέες λύσεις και τεχνολογίες. Μία από τις ολοένα και αυξανόμενης χρήσης, τεχνολογίες, είναι η τεχνολογία IOT (Internet of Things) ή Διαδίκτυο των Πραγμάτων[14][15].



Εικόνα 2.1.1 – IoT for Smart Agriculture [12]

Το IoT ορίζεται ως ένα δίκτυο με αντικείμενα και τα οποία εντάσσονται όλα μαζί, είτε πρόκειται για συσκευές, αισθητήρες, μηχανές και μηχανήματα, λογισμικό ή ακόμα και ανθρώπους που συναναστρέφονται μέσω του διαδικτυακού περιβάλλοντος που τους προσφέρεται, με σκοπό εκτός της επικοινωνίας, την ανταλλαγή πληροφοριών, για εύρεση λύσεων μεταξύ του πραγματικού και του ψηφιακού κόσμου[16]. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα, η τεχνολογία IoT, έχει επεκταθεί σε έξυπνα σπίτια[17,18], έξυπνες πόλεις[19,20], έξυπνη ενέργεια[21,22], αυτοκινούμενα οχήματα[20,21], και όπως θα δούμε και στο παρών κείμενο, και στην γεωργία ακριβείας[22-25].

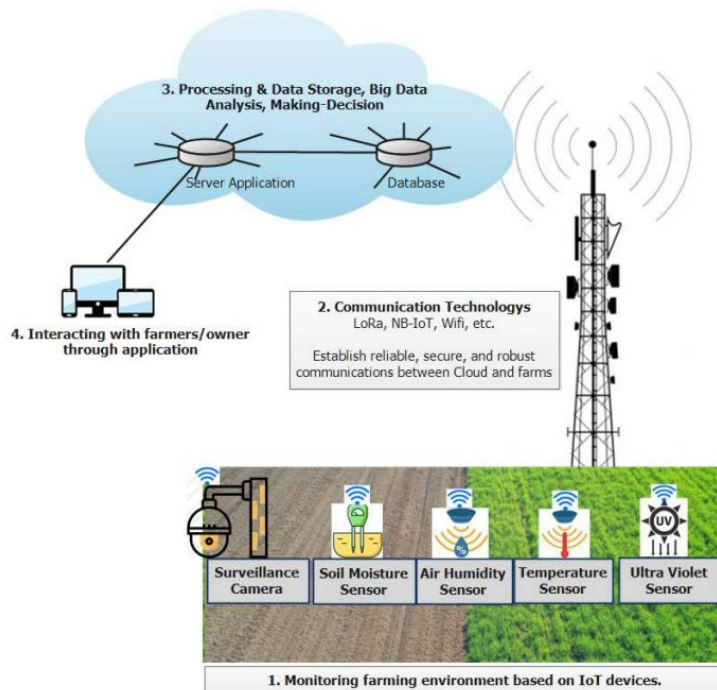
Σύμφωνα με την UN (2019), ο παγκόσμιος πληθυσμός θα αυξηθεί κατά 10 δισεκατομμύρια, μέχρι το έτος 2050. Ως επίπτωση αυτού, οι απαιτήσεις του γεωργικού τομέα θα αυξηθούν ραγδαία. Παρά όμως την συγκεκριμένη συνθήκη, τα σε χρήση γεωργικά στρέμματα είναι υπό μείωση, οι φυσικοί πόροι μειώνονται επίσης με ανησυχητικούς ρυθμούς, και παγκόσμιοι κίνδυνοι όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη, η διάβρωση του εδάφους, πλημμύρες και η ασφάλεια των τροφίμων, φαίνονται προ των πυλών.

Μία προσπάθεια λύσεις, ή έστω βελτίωσης των προβλημάτων, είναι η εφαρμογή της τεχνολογίας IoT και μεγάλων πακέτων δεδομένων, στον γεωργικό τομέα[34]. Ένας σημαντικός αριθμός επιστημονικών κειμένων έχει συγγραφεί τα τελευταία χρόνια, τα οποία εστιάζουν σε έρευνα, πειράματα, καθώς και εφαρμογές της τεχνολογίας[35,36]. Σύμφωνα με έρευνα της Cisco, ο αριθμός των συσκευών IoT, που θα είναι συνδεδεμένα στο διαδίκτυο, μέχρι το 2030[37], θα υπερβαίνουν τα 500 δισεκατομμύρια. Η τεχνολογία IoT και Big Data, στην γεωργία ακριβείας, προορίζεται να αυξήσει την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα[38].

Με το πέρασμα των χρόνων, τα συστήματα WSN, τα οποία έχουμε δει παραπάνω,

χρησιμοποιούνται με συνεχώς αυξανόμενη συχνότητα, στον γεωργικό τομέα[39], δημιουργώντας έτσι τα θεμέλια για την έξυπνη γεωργία και την γεωργία ακριβείας[40]. Τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά των WSN, όπως η δυνατότητα να μπορούν αυτόνομα να οργανώσουν, να αντιληφθούν, να εγκαθιδρύσουν, και να επαναφερθούν σε προηγούμενη κατάσταση, τα κάνουν κατάλληλα και πολύτιμα για την γεωργία ακριβείας. Οι αισθητήριες συσκευές διαθέτουν έναν πομποδέκτη ραδιοκυμάτων RF, έναν αισθητήρα, έναν μικροελεγκτή, και κάποιου είδους μπαταρία για παροχή[41]. Τα WSN χρησιμοποιούνται κυρίως για παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών, αυτοματισμό της των μηχανών, καθώς και ανιχνευσιμότητα[42-45].

Μαζί με την βελτίωση της επιστήμης και της τεχνολογίας, σημαντική απαίτηση για την εύρεση επαναστατικών λύσεων και τεχνολογιών, για την αύξηση της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας στον αγροτικό τομέα, είναι η εφαρμογή της τεχνολογίας IoT. Το κύριο κίνητρο

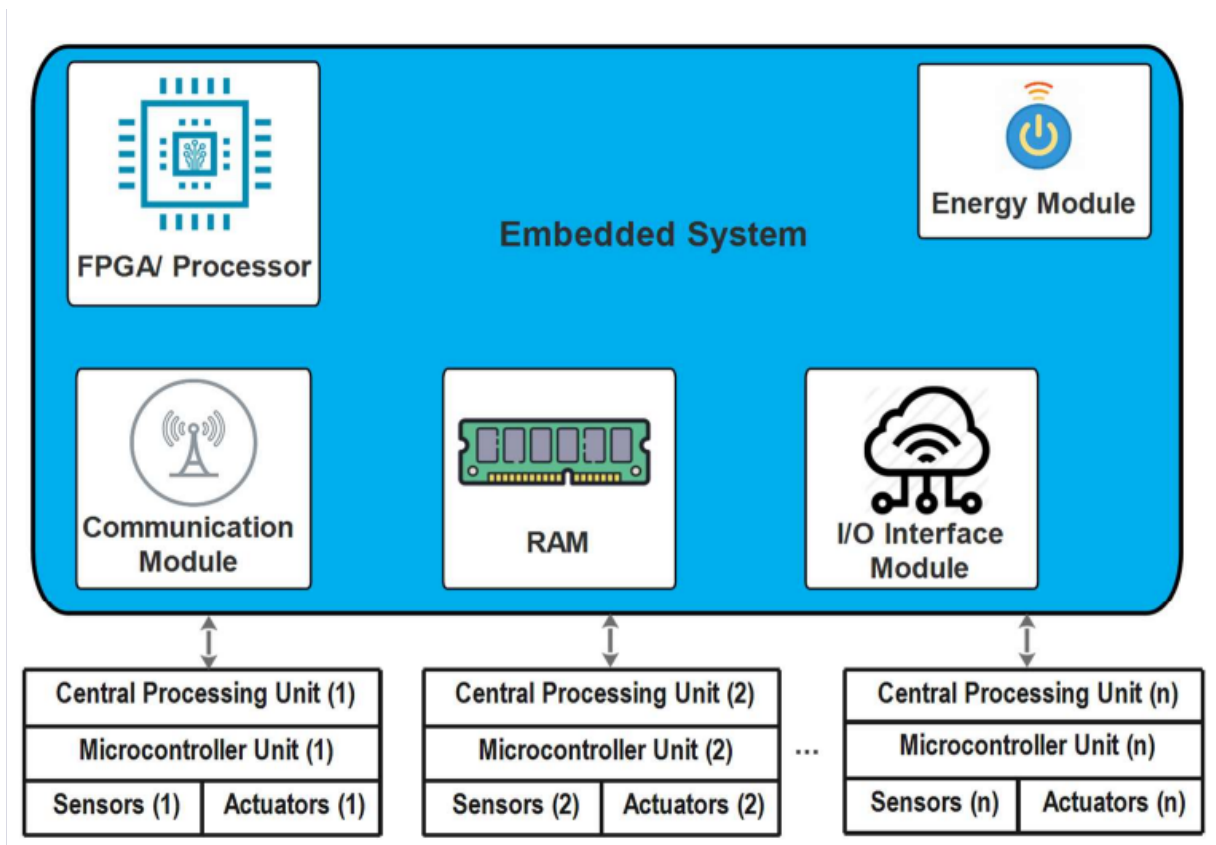


Εικόνα 2.1.2 – Απεικόνιση IoT οικοσυστήματος [12]

για την εφαρμογή της τεχνολογίας είναι ο σημαντικός και αναντικατάστατος ρόλος, ως το μέλλον ενός έξυπνου και βιώσιμου περιβάλλοντος. Το IoT χρησιμοποιεί μία σειρά από είδη υπάρχουσες τεχνολογίες και λύσεις, όπως τα δίκτυα αισθητήρων WSN, cognitive radio, ad hoc networks, end-user applications και cloud computing. Στον τομέα της γεωργίας ακριβείας, οι αυτοματοποιημένες λύσεις και τεχνολογίες, τα μηχανήματα, οι γνώσεις, τα εργαλεία, οι υπηρεσίες και το λογισμικό των IoT, εφαρμόστηκαν ανεμπόδιστα, και βοήθησαν τους αγρότες να αυξήσουν την παραγωγικότητα, την ποιότητα και την ποσότητα των προϊόντων τους[36,47].

## 2.2 Συσκευές IoT

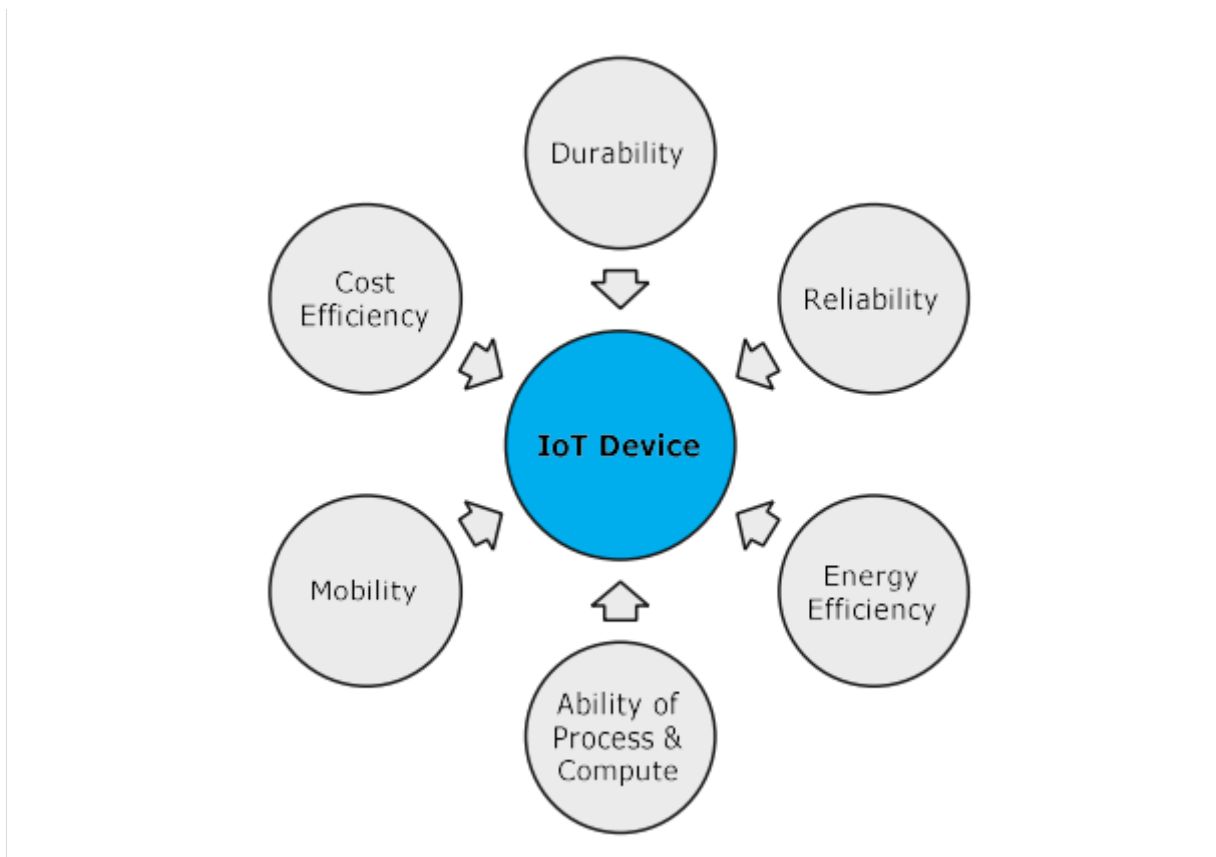
Η συνήθης αρχιτεκτονική μίας IoT συσκευής αποτελείται από τους αισθητήρες που αντλούν δεδομένα από το περιβάλλον, ενεργοποιητές που βασίζονται είτε σε ενσύρματες είτε σε ασύρματες συνδέσεις, ένα ενσωματωμένο σύστημα το οποίο με την σειρά του αποτελείται από, έναν επεξεργαστή, μνήμη, μοντέλα επικοινωνίας, διεπαφές εισόδου-εξόδου, και μπαταρία για παροχή[48,49]. Παρατηρείται σχηματικά μία συσκευή IoT που χρησιμοποιείται στην γεωργία ακριβείας, στην εικόνα 2.2.1 που ακολουθεί.



Εικόνα 2.2.1 - Απεικόνιση Αρχιτεκτονικής Συσκευής IoT [12]

Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι διαδραστικά modules, τα οποία μπορούν να προγραμματιστούν, ανάλογα με τον σκοπό που θέλει ο χρήστης να επιτελέσουν. Τα κύρια που χρησιμοποιούνται ονομάζονται FPGAs (field programmable gate arrays). Οι αισθητήριες συσκευές είναι ειδικά σχεδιασμένες να λειτουργούν σε ανοιχτά περιβάλλοντα, είτε αυτά είναι στην φύση, στο έδαφος, στο νερό ή ακόμα και στον αέρα, ώστε να συλλέγουν τις εκάστοτε ζητούμενες περιβαλλοντικές παραμέτρους, που επηρεάζουν της παραγωγή. Αυτές οι παράμετροι μπορεί να είναι τα θρεπτικά στοιχεία του εδάφους, η υγρασία, η θερμοκρασία και λοιπά. Στην γεωργία ακριβείας, η τεχνολογίες είναι πιθανότερο να εφαρμόζονται σε μεγάλα στρέμματα καλλιεργήσιμης Γης, σε εξωτερικούς δηλαδή χώρους, οπότε είναι αναγκαίο οι συσκευές να έχουν κάποια μοναδικά χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να μπορούν να αντέξουν και να λειτουργούν υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να είναι η αντίσταση στο νερό, την υγρασία και την ανομοιογένειες της θερμοκρασίας καθόλη την διάρκεια ζωής τους. Ακολουθεί στην εικόνα 2.2.2, ένα σχεδιάγραμμα με τα βασικά χαρακτηριστικά μίας συσκευής IoT, για χρήση στην γεωργία ακριβείας.[50-52]





Εικόνα 2.2.2 – Χαρακτηριστικά IoT Συσκευής [12]

Ανάλογα την ζητούμενη διεργασία, υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων που χρησιμοποιούνται και εφαρμόζονται στην γεωργία ακριβείας. Κάποιοι τύποι αισθητήρων μπορεί να είναι οι αισθητήρες τοποθεσίας, οπτικοί αισθητήρες, μηχανικοί αισθητήρες, ηλεκτροχημικοί αισθητήρες καθώς και αισθητήρες πίεσης. Αυτοί οι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα όπως, η θερμοκρασία του αέρα, η θερμοκρασία του εδάφους, η υγρασία της ατμόσφαιρας, η υγρασία του εδάφους, η υγρασία των φύλλων, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου καθώς και την ραδιενέργεια των ηλιακών κυμάτων και την βαρομετρική πίεση.[31,34,46]

### 2.3 Τεχνολογίας Επικοινωνίας

Οι τεχνολογίες επικοινωνίας των συσκευών IoT [53,54] υπέδειξαν πως για να λειτουργήσουν στον τομέα της γεωργίας, θα πρέπει να βελτιωθούν σημαντικά. Η γεωργία ακριβείας λοιπόν, έφερε σημαντική ανάπτυξη στον τομέα IoT, γενικότερα. Τα υπάρχοντα συστήματα επικοινωνίας μπορούν να διαχωριστούν στις εξής κατηγορίες. Protocol (Πρωτόκολλο), Spectrum (Φασματικό) και Topology (Τοπολογικό).

1. Protocol: Πολλές ασύρματες επικοινωνίες πρωτοκόλλου έχουν προταθεί για την γεωργία ακριβείας. Βασισμένες σε αυτά τα πρωτόκολλα, οι συσκευές, σε ένα σύστημα έξυπνης γεωργίας, μπορούν να επικοινωνήσουν, να ανταλλάξουν πληροφορίες, να πάρουν αποφάσεις για την επίβλεψη και τον έλεγχο των συνθηκών και να βελτιώσουν την εμπορικότητα και την αποδοτικότητα. Τα τυπικά, χαμηλής ισχύος πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται, στην γεωργία ακριβείας μπορούν να χωριστούν σε μικρής και μεγάλης εμβέλειας.

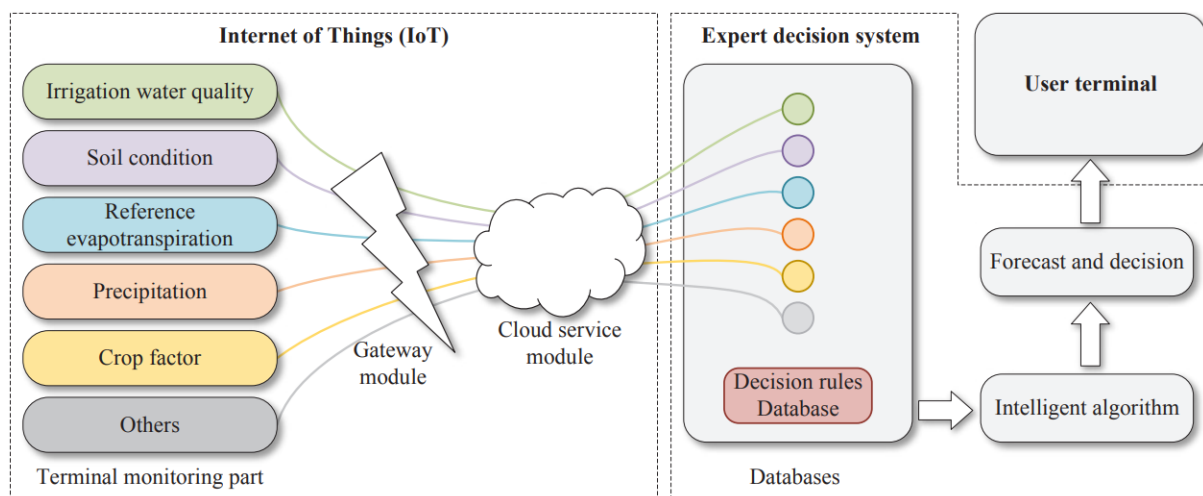
- Μικρής Εμβέλειας: NFMI (near-field magnetic induction)[55], Bluetooth[56], ZigBee[57], terahertz (Z-Wave)[58,59], και RFID[61]
- Μεγάλης Εμβέλειας: Lora[62], Sigfox[63], και NB-IoT (Narrowband IoT) [64]

Στον παρακάτω πίνακα 2.3.1 θα δούμε κάποιες τυπικές τεχνολογίες επικοινωνίας για την γεωργία ακριβείας. Από τις τιμές του πίνακα συμπεραίνουμε πως η τεχνολογίες επικοινωνίας μικρής εμβέλειας έχουν απόσταση μετάδοσης, μικρότερη των 20 μέτρων, με μεγάλη ενεργειακή αποδοτικότητα, και χαμηλό ρυθμό ανταλλαγής δεδομένων. Αυτά τα πρωτόκολλα συνήθως χρησιμοποιούνται σε δίκτυα αισθητήρων, ενώ οι τεχνολογίες μεγάλης εμβέλειας χρησιμοποιούνται για αποστάσεις μέχρι και δεκάδων χιλιομέτρων, με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερη ενέργεια. Συνήθως χρησιμοποιούνται για Backhaul επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών. Ο όρος Backhaul σημαίνει πως η μετάδοση γίνεται από ένα απομακρυσμένο δίκτυο στο κεντρικό. [66]

Τύπος	Φάσμα	Απόσταση Μετάδοσης	Τύπος Δικτύου	Συχνότητα	Ρυθμός Μετάδοσης Δεδομένων
802.11a/b/g/n/ac	Unlicensed	100 m	WLAN	2.4–5 GHz	2–700 Mbps
802.11ah	Unlicensed	1000 m	WLAN	Several Sub-GHz	78 Mbps
802.11p	Licensed	1 km	WLAN	5.9 GHz	3–27 Mbps
802.11af	Licensed	1 km	WLAN	54–790	25–550 Mbps
SigFox	Licensed	Rural: 50 km Urban: 10 km	LPWA	Zwave	100–600 bps
LoRaWAN	Licensed	20 km	LPWA	Several Sub-GHz	0.3–100 kbps
NB-IoT	Licensed	35 km	LPWA	Zwave	250 kbps
LTE-3GPP	Licensed	5 km	WWAN	1.4 MHz	200 kbps
EC-GPRS	Licensed	5 m	WWAN	GSM bands	240 kbps
WiMAX	Hybrid	50-80 km	WWAN	Several Sub-GHz	70 Mbps
Bluetooth	Unlicensed	100 m	WPAN	2.4 GHz	2–26 Mbps
ZigBee	Unlicensed	1 km	WHAN	2.4 GHz	250 kbps
Z-Wave	Unlicensed	100 m	WHAN	900 MHz	100 kbps
6LoWPAN	Unlicensed	30 m	WHAN	Zwave	250 kbps
NFC	Unlicensed	20 cm	D2D	13.56 MHz	424 kbps

Πίνακας 2.3.1 – Τεχνολογίες Επικοινωνίας στην Γεωργίας Ακριβείας [12]

2. **Spectrum:** Κάθε συσκευή ραδιοκυμάτων έχει ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων για επικοινωνία. Η FCC (Federal Communications Commission), έχει ορίσει ένα χωρίς άδεια ζώνη εύρους για χωρίς άδεια διεργασίες για επιστημονικούς, βιομηχανικούς και ιατρικούς σκοπούς[68]. Αυτή η ζώνη εύρους χρησιμοποιείται συχνά σε χαμηλής ισχύος και μικρής εμβέλειας εφαρμογές. Μία σειρά από συνήθεις εφαρμογές στον τομέα της έξυπνης γεωργίας, είναι από ασύρματος χειρισμός μηχανών και UAVs, έως και τεχνολογίες επικοινωνίας, όπως είναι το Bluetooth και το Wi-Fi. Όλες αυτές οι τεχνολογίες χρησιμοποιούν ζώνη εύρους χωρίς άδεια[68]. Αυτό όμως μπορεί να φέρει και προκλήσεις, όπως είναι η ποιότητα της υπηρεσίας, το κόστος της αρχικής εφαρμογής, αλλά και οι τυχόν παρεμβολές μεταξύ των συσκευών, λόγω του μεγάλου όγκου των IoT συσκευών που είναι πλέον σε χρήση. [69,70]



Εικόνα 2.3.1 – Σύστημα Άρδευσης με χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης [11]

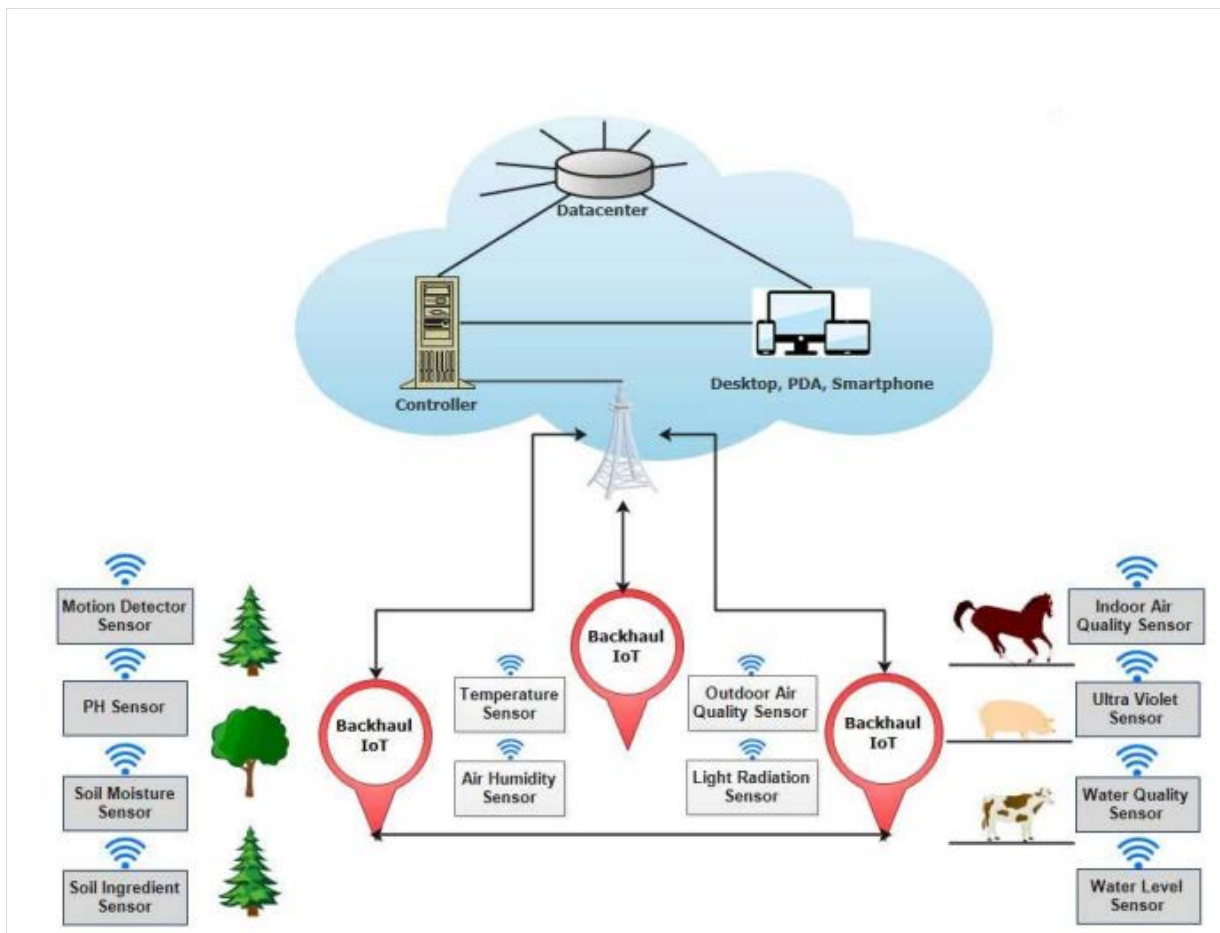
Ένα παράδειγμα μιας ζώνης εύρους με άδεια, είναι τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Επιτρέπουν στην πιο αποδοτική χρήση του δικτύου, με μεγαλύτερη αξιοπιστία, ποιότητα υπηρεσιών, προστασία καθώς και κάλυψη, με μικρότερο κόστος από την μεριά του χρήστη. Παρόλαυτα, και η χρήση αδειοδοτημένης ζώνης εύρους έχει τους περιορισμούς της, όπως είναι το κόστος μεταφοράς μεγάλου όγκου δεδομένων και η μικρή ενεργειακή αποδοτικότητα των συσκευών IoT. [71]

Πολλές ερεύνες έχουν αποδείξει πως η αποδοτικότητα των μη αδειοδοτημένων ζωνών εύρους εμφανίζεται στο μήκος κύματος των mm. Καταναλώνει εξαιρετικά χαμηλή ισχύ, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει τεράστιες αποστάσεις μετάδοσης, με υψηλό ρυθμό μεταφοράς δεδομένων[72,73]. Το μόνο εμπόδιο στο mm μήκος κύματος είναι πως η μεταφορά δεδομένων, μπορεί να επηρεαστεί από τις καιρικές συνθήκες και ειδικότερα την βροχή.[74]

3. **Topology:** Η εγκαθίδρυση της επικοινωνιακής ζώνης εύρους και της λειτουργίας των πρωτοκόλλων των συσκευών IoT, εξαρτώνται από την δομή των συσκευών αυτών, στις εφαρμογές της γεωργίας ακριβείας. Η δομή του δικτύου στον γεωργικό τομέα, συνήθως αποτελείται από δύο είδη κόμβων, ένας αισθητήριος και ένα backhaul[75]. Τα συνήθη χαρακτηριστικά των αισθητήριων κόμβων σε ένα IoT είναι η μικρή απόσταση

επικοινωνίας, ο χαμηλός ρυθμός ανταλλαγής δεδομένων, και η μεγάλη ενεργειακή αποδοτικότητα. Αντιθέτως, οι IoT Backhaul κόμβοι συνήθως απαιτούν μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης, μεγάλη διακίνηση και ρυθμούς ανταλλαγής δεδομένων. Για αυτόν λοιπόν τον λόγο, με βάση και τον ρόλο του κάθε κόμβου του δικτύου IoT, οι αισθητήριοι και οι backhaul κόμβοι, εγκαθίστανται με τις κατάλληλες επικοινωνιακές τεχνολογίες[76]. Στην εικόνα 2.2.5 έχουμε την αναπαράσταση ενός τυπικού δικτύου τοπολογίας χαμηλής ισχύος, σχεδιασμένο για την μετρήσεις και επίβλεψη μίας έξυπνης φάρμας. Το σύστημα αποτελείται από:

- Αισθητήριους κόμβους IoT, που συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον της φάρμας, όπως είναι για παράδειγμα η υγρασία του εδάφους, και του αέρα, η ποιότητα του νερού, η θερμοκρασία, και τα θρεπτικά στοιχεία του εδάφους. Έπειτα, τα δεδομένα αυτά μεταφέρονται στις συσκευές backhaul IoT. Ανάλογα με τον σκοπό και τον τόπο εγκατάστασης, οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να εγκατασταθούν ως RFDs (reduced-function devices), τα οποία επικοινωνούν μόνο με FFDs (full-function devices). Αυτοί οι κόμβοι δεν είναι σε θέση να επικοινωνήσουν με άλλα RFDs, με σκοπό την μείωση του κόστους, και της απαιτούμενης ενέργειας.
- Οι backhaul κόμβοι από την άλλη, εκτός του ρόλου των αισθητήριων IoT κόμβων, έχουν και τον ρόλο του διαμεσολαβητή, καθώς λαμβάνουν πληροφορίες από άλλες συσκευές IoT, και τις μεταδίδουν με την σειρά τους στο κέντρο ελέγχου. Οι backhaul κόμβοι συνήθως εγκαθίστανται ως FFD συσκευές, ώστε να έχουν την δυνατότητα να επικοινωνήσουν με RFD αλλά και άλλες FFD συσκευές.



Εικόνα 2.3.2 – Απεικόνιση Τοπολογίας IoT-Γεωργία Ακρίβειας [12]

## 2.4 Εφαρμογές IoT στην Γεωργία Ακριβείας

Τα τελευταία χρόνια, έχουν παρουσιαστεί μια σειρά από εφαρμογές IoT για τη γεωργία. Κάποιες από τις κατηγορίες ακολουθούν αναλυτικά παρακάτω.

### Επίβλεψη

Στον τομέα της γεωργίας, οι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγική διαδικασία μπορούν να δεχτούν επίβλεψη και να προσφέρουν σημαντικά δεδομένα, όπως την υγρασία του εδάφους, την υγρασία του αέρα, την θερμοκρασία και λοιπά. Σε αυτούς τους παράγοντες βασίζεται μεγάλο κομμάτι της παραγωγικής διαδικασίας. Κάποιοι τρόποι εφαρμογής τεχνολογιών επίβλεψης είναι οι εξής:

**Crop Farming:** Σε αυτόν τον τομέα, οι ζωτικής σημασίας παράγοντες που τον επηρεάζουν όσον αφορά την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα μπορεί να είναι η θερμοκρασία του αέρα, η διάβρωση του εδάφους, η υγρασία του αέρα, η υγρασία του εδάφους, παράσιτα, θρεπτικά στοιχεία εδάφους, και λοιπά. Υπάρχουν συσκευές IoT, όπως είναι το FarmFox[93], σχεδιασμένες ώστε να λαμβάνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, και να αναλύουν την σύσταση του εδάφους, μεταδίδοντας έπειτα την πληροφορία στον χρήστη μέσω του διαδικτύου. Τα αποτελέσματα επιδεικνύουν την ποιότητα και την υγεία του εδάφους, σε πραγματικό χρόνο και προσφέρουν συστάσεις στους χρήστες με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας και της παραγωγικότητας.

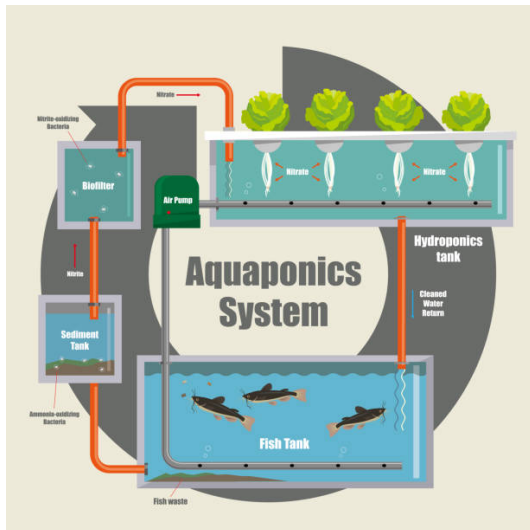
Επιπροσθέτως, [94] υπάρχουν συσκευές IoT που επιτρέπουν τον 'έξυπνο' έλεγχο των παραγόντων που επηρεάζουν την θερμοκρασία και την υγρασία. Η συσκευή αυτές ονομάζονται weather radars, ή ραντάρ καιρού. Η συσκευή αυτή εκπέμπει σήμα κινδύνου με οπτικά μέσα, στέλνοντας σήμα στον χρήστη ότι η υγρασία ή η θερμοκρασίας, έχουν ξεπεράσει τις τιμές τις οποίες έχει θέσει ο ίδιος.

Η πληροφορίες που λαμβάνονται κατά την διάρκεια της επίβλεψης, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία, ενισχύει τον έλεγχο των συνθηκών της σοδειάς, βοηθώντας έτσι τον αγρότη να σχεδιάσει και να υλοποιήσει σχέδια για την σοδειά του, για μεγιστοποίηση του κέρδους και μείωση του εργατικού κόστους. Επίσης, τα συλλεγόμενα δεδομένα, μαζί με την τεχνολογία επεξεργασίας δεδομένων, μπορούν να προσφέρουν συστάσεις για πρόληψη ή ακόμα και βελτίωση στον πόλεμο ενάντια σε ζιζάνια, παράσιτα και ασθένειες της χλωρίδας.



Εικόνα 2.4.1 - Ραντάρ Καιρού [296]

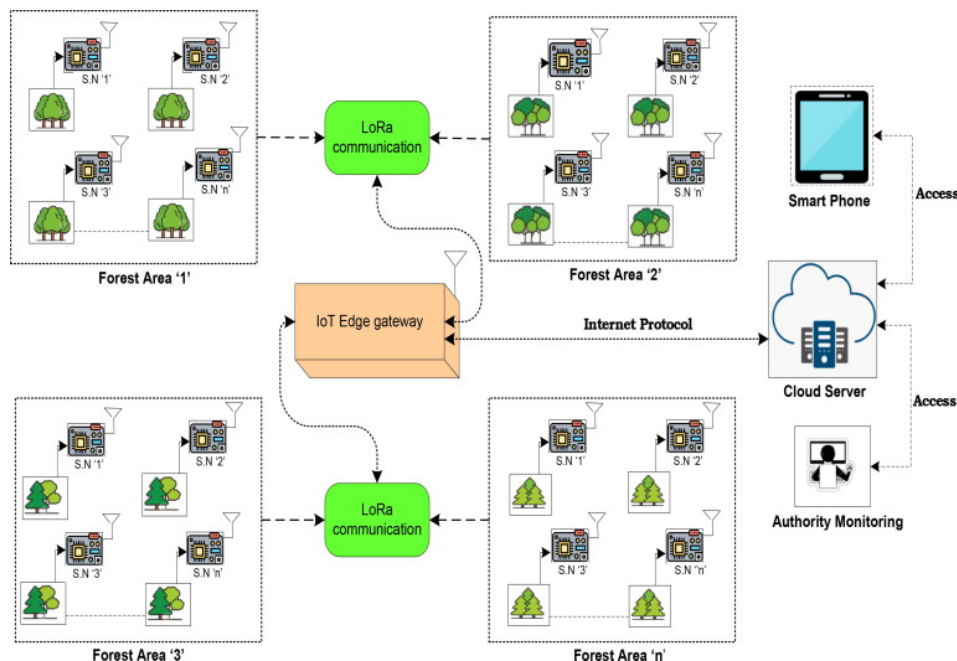




Εικόνα 2.4.2 – Aquaponics System [297]

Aquaponics: Πρόκειται για έναν συνδυασμό της υδατοκαλλιέργειας και της υδροπονίας. Είναι μία τεχνική, όπου τα περιττώματα των ψαριών γίνονται πηγή θρεπτικών ουσιών για τα χωράφια. Ένα από τα βασικότερα προβλήματα με αυτήν την τεχνική, είναι η συνεχής ανάγκη επίβλεψης του νερού, όσον αφορά την ποιότητα του, την στάθμη του, την θερμοκρασία του, το pH του και άλλα[96-98]. Υπάρχουν όμως IoT συσκευές, που έχουν την δυνατότητα να επιβλέπουν την θερμοκρασία και το pH του νερού σε φάρμες τέτοιου είδους. Επίσης, το σύστημα διαθέτει ένα σύστημα ελέγχου, ώστε να κρατάει το περιβάλλον του σε σταθερή κατάσταση, τρέφοντας αυτόματα και τα ψάρια για την μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας. Τα αποτελέσματα φαίνονται σε πραγματική ώρα, με όλες τις παραμέτρους.

Forestry: Το ανθρώπινο είδος βασίζεται στα δάση για την επιβίωσή του. Τα δάση, έχουν επίσης, ζωτικό ρόλο στον κύκλο του διοξειδίου του άνθρακα στον πλανήτη, και προσφέρουν ένα ιδανικό περιβάλλον για περισσότερα από τα δύο τρίτα όλων των ειδών των ζώων του πλανήτη. Τα δάση επίσης προσφέρουν αντίσταση απέναντι στις πλημμύρες, λειτουργούν ως λεκάνες απορροής και κρατάνε σταθερό το κλίμα. Οι βασικοί παράμετροι που πρέπει να επιβλέπονται σε ένα δάσος είναι η σύσταση του εδάφους, η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία και η πυκνότητα διαφόρων αερίων, όπως είναι το οξυγόνο, το μεθάνιο και η αμμωνία. Για αυτό ήταν



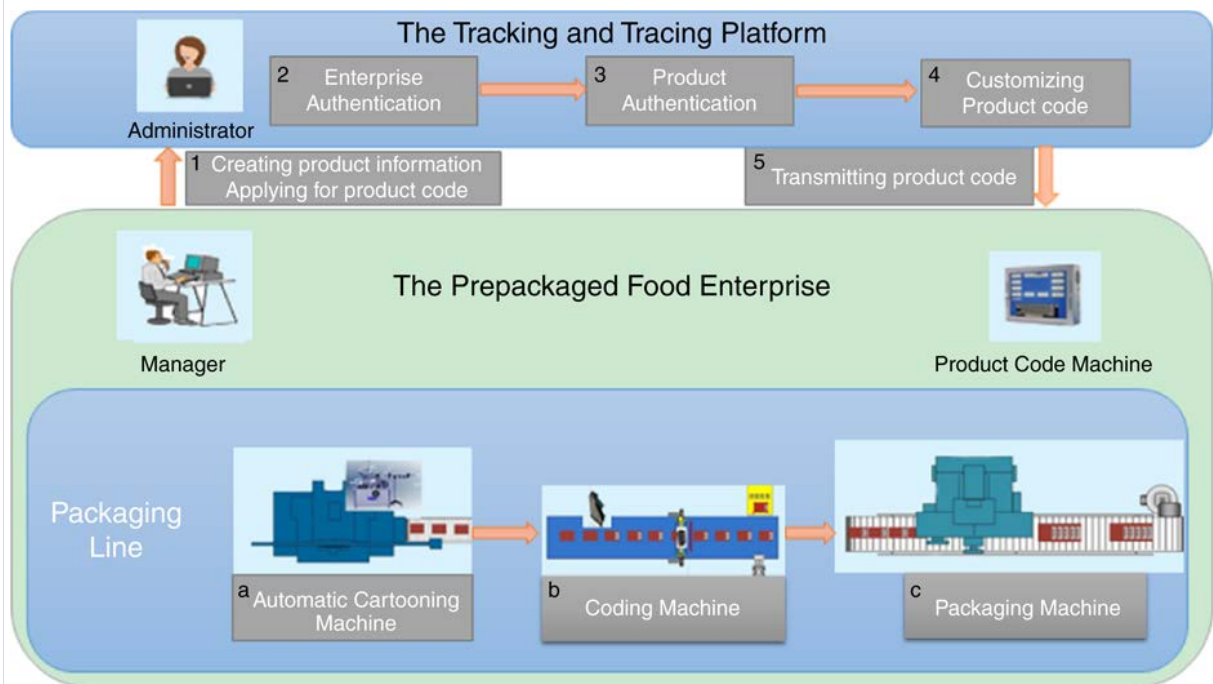
Εικόνα 2.4.3 – Εφαρμογή IoT σε Δασική Περιοχή [139]

αναγκαία η δημιουργία IoT συσκευών και συστημάτων για το έλεγχο των παραμέτρων αυτών, με σκοπό την προστασία των δασών[100,101]. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται στα δάση, μπορούν να χρησιμοποιούν ηλιακά πάνελ, για την παροχή ενέργειάς τους, ώστε να είναι πιο υλοποιήσιμο. Οι συσκευές επικοινωνούν με την βάση μέσω ενός δικτύου LoRa, το οποίο

προσφέρει τις μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης που χρειάζονται. Έχει προταθεί επίσης, η χρήση εικόνων υψηλής ποιότητας από RapidEye [103] δορυφόρους. Αυτή η πρόταση έχει υλοποιηθεί ήδη στην Γερμανία, με αποτέλεσμα την ανακάλυψη ασθενειών των φύλλων που προκλήθηκαν από παράσιτα σε πευκοδάσος. Οι έρευνες έχουν δείξει πως η επίβλεψη των δασών επικεντρώνεται κυρίως στην πρόληψη με συστήματα συναγερμών σε περιπτώσεις πυρκαγιάς, επίθεσης από παράσιτα και αποδάσωσης.

### Παρακολούθηση και Ιχνηλάτηση

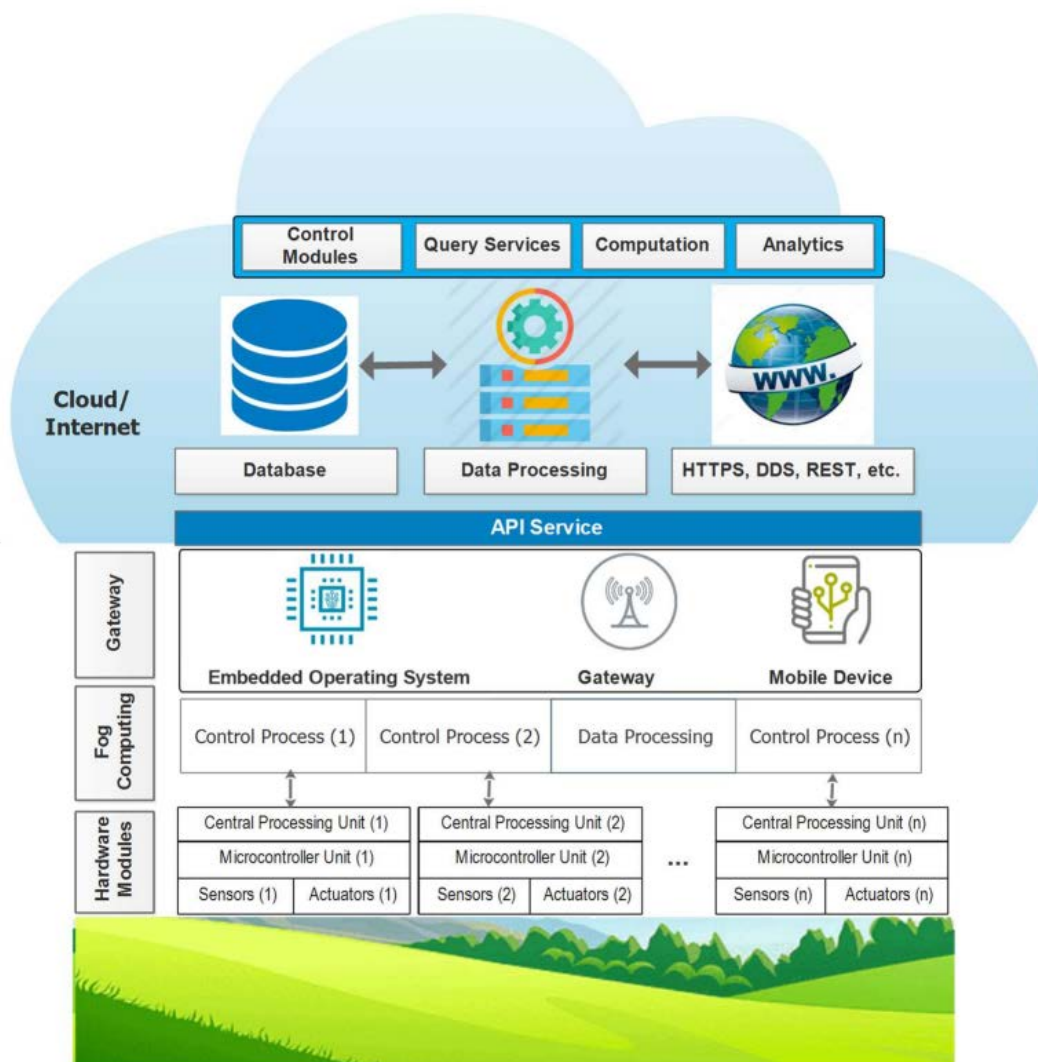
Για την ικανοποίηση των πελατών και την αύξηση του κέρδους, θα χρειαστεί στο μέλλον, οι φάρμες και τα αγροκτήματα, να επιδεικνύουν ότι τα προϊόντα που προσφέρουν στην αγορά είναι καθαρά, και μπορεί να ανιχνευτεί η καταγωγή τους, και η παραγωγική διαδικασία που ακολούθησαν μέχρι την αγορά, ώστε να εκπνεύσουν εμπιστοσύνη στους καταναλωτές, για την ποιότητα και την ασφάλειά τους. Για την λύση αυτού του προβλήματος, μία σειρά από συστήματα IoT έχουν προταθεί, με σκοπό την παρακολούθηση και την ιχνηλάτηση. Για παράδειγμα ένα σύστημα πληροφόρησης που χρησιμοποιείται είναι το [108,109]SISTABENE, το οποίο επιτρέπει την παρακολούθηση γαλακτοκομικών προϊόντων και λαχανικών. Το σύστημα βοηθά τους προμηθευτές να παρακολουθούν την παραγωγική διαδικασία, να προλαμβάνουν λάθη στην αλυσίδα των προμηθειών και να επιτρέπει στους καταναλωτές να γνωρίζουν την προέλευση της τροφής. Η τεχνολογία IoT βοηθάει στην παρακολούθηση της παραγωγικής διαδικασίας των προϊόντων του αγροτικού τομέα καθόλη την διάρκειά της. Παρόλες τις δυσκολίες, τα αποτελέσματα από την έως τώρα χρήση είναι θετικά, με χρήση κωδικών QR, βελτιώνεται η ποιότητα των προϊόντων και η ιχνηλάτησή τους[110,111]. Ο καταναλωτής, μπορεί με μία εφαρμογή να ξέρει ολόκληρη την ιστορία του προϊόντος. Καθ'όλη την διάρκεια της παρακολούθησης, η τεχνολογία συλλέγει δεδομένα, τα οποία μπορούν να μελετηθούν και να δώσουν απαντήσεις σε κάθε ερώτηση που έχει ο καταναλωτής.



Εικόνα 2.4.4 – Απεικόνιση Track and Trace IoT [190]

## Έξυπνη Γεωργία Ακριβείας

Η διαδεδωμένη χρήση του GPS (Global Positioning System), έχει προωθήσει και άλλους τομείς της τεχνολογίας ως προς την εξέλιξή τους. Το GPS προσφέρει σημαντικές παραμέτρους σχετικά με την τοποθεσία μιας συσκευής, δίνοντας θέση και χρόνο. Τα συστήματα GPS έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε πολλούς τομείς, όπως είναι τα κινητά, τα οχήματα αλλά και οι συσκευές IoT και τα οικοσυστήματα που δημιουργούν. Το αρνητικό όμως στα συστήματα GPS είναι πως έχουν καλή στήριξη στον ουρανό, και σε εξωτερικούς χώρους. Ταυτόχρονα η ανάγκη για αναγνώριση τοποθεσίας και πλοήγηση, τόσο στο σπίτι, όσο και σε δρόμους έξυπνων πόλεων, αυξάνεται συνεχώς. Με σκοπό την λύση αυτού του προβλήματος, ένα νέο εξελιγμένο σύστημα έχει παραταχθεί, που ονομάζεται GNSS, και είναι ένα ανεπτυγμένο παγκόσμιο σύστημα δορυφόρων[112]. Με βάση τόσο το GPS, όσο και το GNSS, έχουν κατασκευαστεί ειδικοί χάρτες για αγροκτήματα και φάρμες. Ως αποτέλεσμα, οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται στον αγροτικό τομέα, καθώς και εξοπλισμός, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτόνομα[113]. Στην εικόνα 2.2.5 που ακολουθεί έχουμε την απεικόνιση μίας τυπικής πλατφόρμας έξυπνης γεωργίας, με χρήση IoT και με βοήθεια cloud.



Εικόνα 2.4.5 – Πλατφόρμα Προβλέψεων Βασισμένη σε IoT και Cloud [12]

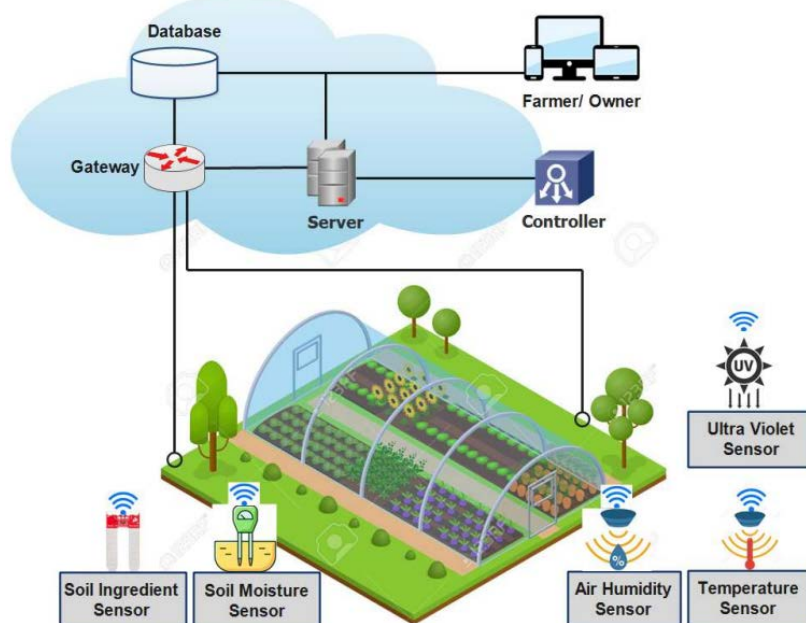


Στην γεωργία ακριβείας, μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές, είναι η χρήση drone[114], για την επίβλεψη και τις γενικότερες αγροτικές διαδικασίες. Κάποιες συνήθεις εργασίες που καλύπτονται με χρήση UAVs, μπορεί να είναι το ψέκασμα παρασιτοκτόνων, λιπάσματος, το φύτεμα σπόρων, η ανάλυση και χαρτογράφηση του εδάφους, και η επίβλεψη της ανάπτυξης της σοδειάς. Υπάρχουν και UAVs που βασίζονται σε συστήματα με κάμερες, και αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνων με μηχανικούς ενεργοποιητές. [115] Σε πειράματα που έγιναν σε αγροτικά προϊόντα όπως είναι τα πορτοκάλια και οι ντομάτες, το αποτέλεσμα της ομαδοποίησης των παραπάνω ήταν κατά 95% σωστό, με ρυθμό ομαδοποίησης μικρότερο από 1 s. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα ομαδοποίησης πολλών διαφορετικών αγροτικών προϊόντων. Για παράδειγμα η [116] τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ομαδοποίηση σταφυλιών ανάλογα το χρώμα και το μέγεθός τους, χρησιμοποιώντας RGB-D κάμερες σε ρομποτικές πλατφόρμες.

Τα πειράματα που έχουν γίνει, δείχνουν πως στον τομέα της γεωργίας ακριβείας, με αγροτικό εξοπλισμό, όπως UAVs, συστήματα άρδευσης, και έξυπνο εξοπλισμό γεωργίας, μπορούν να ανακατασκευαστούν ώστε να επιτρέπεται οι αυτόνομοι χρήση τους, ανάλογα με τις συνθήκες, ή την εξ'αποστάσεως χρήση τους από τους αγρότες μέσω του διαδικτύου[117,118]. Με την γεωργία ακριβείας έχουμε βελτίωση της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας, και είναι ιδανική για χρήση σε μεγάλα αγροκτήματα. Στην σημερινή εποχή, οι προμηθευτές εξοπλισμού γεωργίας ακριβείας χρησιμοποιούν IoT μονάδες προεγκατεστημένες στις συσκευές τους, επιτρέποντας σε αυτές να λειτουργούν είτε αυτόνομα, είτε με έλεγχο μέσω του διαδικτύου.[119]

## Greenhouse Production

Ένα θερμοκήπιο αποτελείται από τοίχους και οροφή, συνήθως φτιαγμένα από διάφανα υλικά, όπως είναι το πλαστικό και το γυαλί. Στα θερμοκήπια τα φυτά αναπτύσσονται σε ένα συνεχώς



Εικόνα 2.4.6 – Απεικόνιση ‘Έξυπνου’ Θερμοκηπίου [12]

ελεγχόμενο περιβάλλον με συγκεκριμένες συνθήκες παραμέτρων, όπως η υγρασία, τα θρεπτικά στοιχεία του εδάφους, το φως, η θερμοκρασία και άλλα. Έτσι, η τεχνολογία των θερμοκηπίων δίνει την δυνατότητα στον άνθρωπο να αναπτύξει οποιοδήποτε είδος φυτού ή φρούτου, οποιαδήποτε στιγμή, κατασκευάζοντας τις τεχνητές ιδανικές συνθήκες [120]. Στην εικόνα 2.4.6 απεικονίζεται σχηματικά ένα σύστημα IoT σε θερμοκήπιο.

Υπάρχουν προτάσεις[121] για παρακολούθηση του περιβάλλοντος σε μεγάλα

ένα σύστημα οδήγησης που επιτρέπει στο σύστημα των αισθητήρων να κινείται αυτόνομα σε διαφορετικές τοποθεσίες εντός του θερμοκηπίου. Τα αποτελέσματα των σχετικών πειραμάτων έδειξαν πως το σύστημα αυτό μπορεί να επίβλεψη επιτυχώς πολλά διαφορετικά σημεία ενός μεγάλου θερμοκηπίου. Επίσης, μία άλλη πρόταση στην συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η εξοικονόμηση ενέργειας μέσω ελέγχου θερμοκρασίας στα έξυπνα θερμοκήπια. Στα πειράματα που ακολούθησαν [122] παρατηρήθηκε εξοικονόμηση ενέργειας κατά 15% της συνολικής κατανάλωσης του θερμοκηπίου. Άλλα συστήματα IoT[123], έχουν σχεδιαστεί να λειτουργούν σε συγκεκριμένες περιοχές. Για παράδειγμα στην Σαουδική Αραβία, όπου η θερμοκρασία τις πρωινές ώρες περνάει τους 50 °C , η θερμική αυτή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξοικονόμηση ενέργειας. Σε πρόσφατες μελέτες φαίνεται πως η ενσωμάτωση IoT, τεχνητής νοημοσύνης και big data, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκήπια, για την μείωση εργασίας, και την ενεργειακή αποδοτικότητα. Επίσης, προσφέρουν άμεση επικοινωνία μεταξύ τους αγροκτήματος και του καταναλωτή.[125-128]

## **Κεφάλαιο 3: Μηχανική Μάθηση στην Γεωργία Ακριβείας**

### **3.1 Μηχανική Μάθηση ως Εργαλείο**

Η μηχανική μάθηση έχει αναδειχθεί ως ένα από τα βασικά εργαλεία της γεωργίας ακριβείας, καθώς μπορεί να βοηθήσει στην ανάλυση μεγάλων όγκων δεδομένων και στην παραγωγή προβλέψεων και μοντέλων για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής. Οι



*Εικόνα 3.1.1 – Precision Farming [298]*

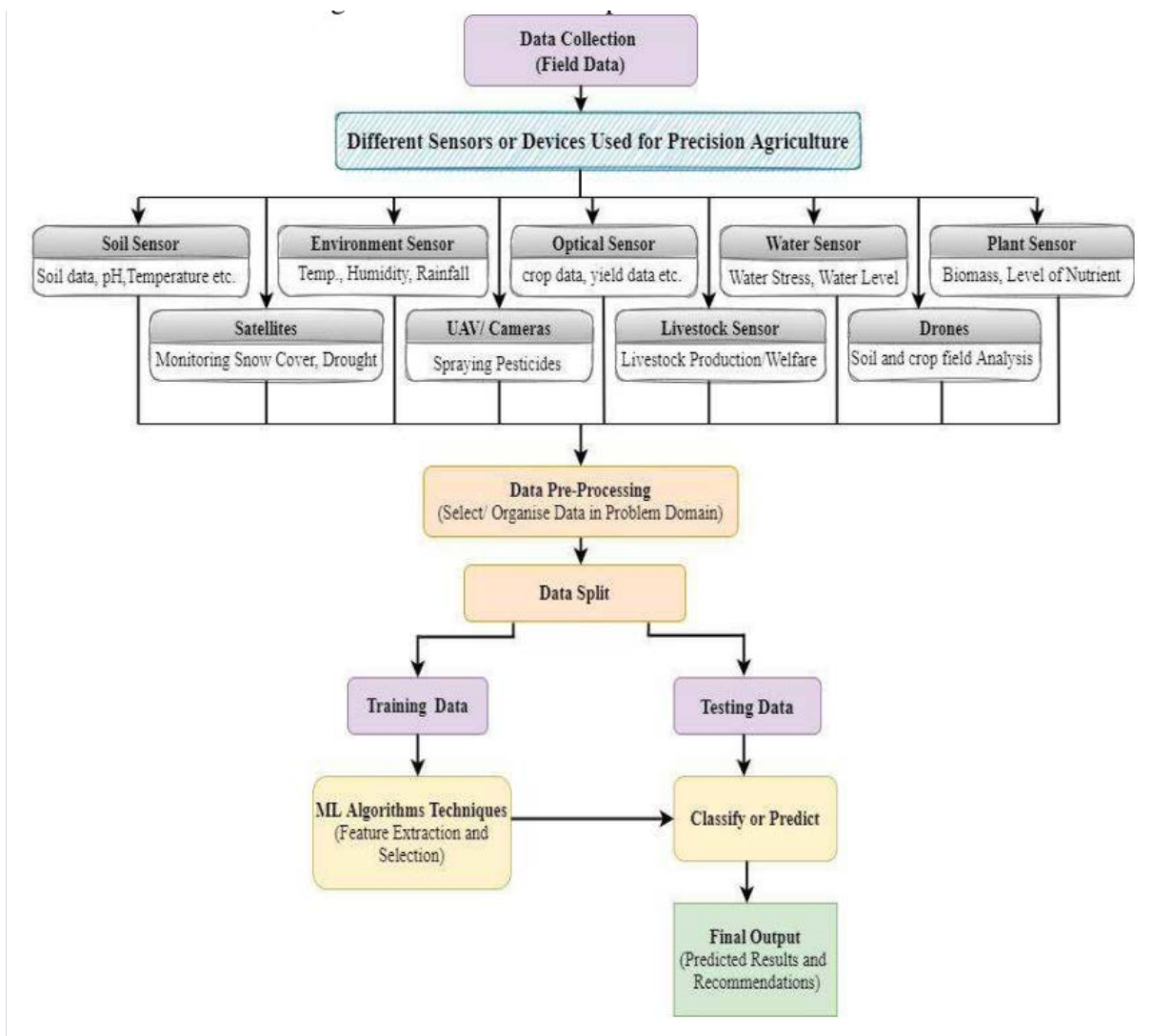
Οι παραδοσιακές τεχνικές που

χρησιμοποιούνται στην γεωργία δεν είναι επαρκής πλέον για να καλύψουν την ζήτηση. Η νέα και συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη χρήσης ‘έξυπνων’ τεχνικών γεωργίας, για την μείωση του κόστους και την γενική αύξηση της αποδοτικότητας. Ο συνδυασμός των ασύρματων αισθητήρων WSN και της μηχανικής μάθησης (Machine Learning), είναι ένας τρόπος βελτίωσης του αγροτικού τομέα. Οι διάφοροι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται συλλέγουν δεδομένα από το έδαφος, το περιβάλλον, τις σοδιές κτλ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με κάποιον αλγόριθμο μηχανικής μάθησης, για να προβλέψουν το σχετικό αποτέλεσμα που ζητείται. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ανάλογα το ζητούμενο αποτέλεσμα. Οι προβλέψεις μπορεί να είναι σχετικές με, το πως μια σοδειά συμπεριφέρεται σε σχέση με τις διάφορες καιρικές συνθήκες, ανάλογα και με το έδαφος στο οποίο τοποθετούνται. Ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης μπορεί επίσης να βοηθήσει τον εκάστοτε αγρότη να γνωρίζει τα ακριβή ζητούμενα της σοδειάς, ζητούμενα όπως οι αναγκαίες βιταμίνες, ποσότητα νερού, αντιπαρασιτικά κτλ. Για την γεωργία ακριβείας μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μορφές μηχανικής μάθησης, όπως είναι το

ANN (Artificial Neural Network), decision tree, k-Means Clustering, και λοιπά.

Το μέλλον της μηχανικής μάθησης στον τομέα της γεωργίας ακριβείας φαίνεται λαμπρό, καθώς έχει πολλές χρήσεις, από το φύτεμα των σπόρων μέχρι και την συγκομιδή της σοδειάς. Περιλαμβάνει της προετοιμασία του εδάφους, την πρόγνωση του καιρού, της διαχείριση των υδάτινων πόρων, τη χρήση των κατάλληλων φυτοφαρμάκων για τις κατάλληλες σοδειές, την καλύτερη χρονικά στιγμή συγκομιδής για το μέγιστο οικονομικό κέρδος. Η μηχανική μάθηση έχει δημιουργήσει νέες ευκαιρίες για την ανάλυση πολύπλοκων δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιούνται σε γεωργικές διαδικασίες.[120,121]

Η γεωργία ακριβείας αποτελείται από δύο επιμέρους κομμάτια: Μία βάση δεδομένων στην οποία περιλαμβάνονται όλες οι πληροφορίες του αγροτικού τομέα, και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα δεδομένα για την εκπαίδευση και την επεξεργασία τους. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, διαφορετικοί αισθητήρες προσφέρουν διαφορετικά δεδομένα, δεδομένα σχετικά με τον καιρό, το έδαφος, το νερό, την σοδειά, και τα δεδομένα αυτά μπορεί να είναι το pH του εδάφους, η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η πίεση του νερού, και λοιπά, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν από διάφορους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, για την εύρεση μοτίβων για καλύτερη ανάλυση. Στην Εικόνα 3.1.2 δίνεται η γενική ιδέα ενός συστήματος μηχανικής μάθησης, ο οποίος χρησιμοποιεί αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, τα οποία εκπαιδεύονται και 'μαθαίνουν' από μεγάλο όγκο δεδομένων και να αναγνωρίσει μοτίβα και πρότυπα, τα οποία δεν είναι δυνατό να αναγνωριστούν από τον άνθρωπο. Τα δεδομένα εισόδου πρέπει να έχουν προεπεξεργαστεί ώστε να είναι στην σωστή μορφή. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του θορύβου, την βοήθεια στην ενσωμάτωση και τις μετατροπής. Η εξαγωγή και η επολογή κάποιων χαρακτηριστικών δεδομένων δημιουργεί ένα υποσύνολο χαρακτηριστικών για την υλοποίηση του μοντέλου μάθησης. Ένα σύστημα ανατροφοδότησης βελτιώνει την αποδοτικότητα την διαδικασίας μάθησης. Τα δοκιμαστικά δεδομένα εφαρμόζονται στο εκπαιδευμένο μοντέλο σε μορφή feature vector, δηλαδή σε μορφή διανύσματος με πολλά δεδομένα. Ανάλογα με την έξοδο, θα παρθεί και η ανάλογη απόφαση, η οποία καθορίζεται από τους ορισμένους κανόνες πρόβλεψης και ομαδοποίησης.

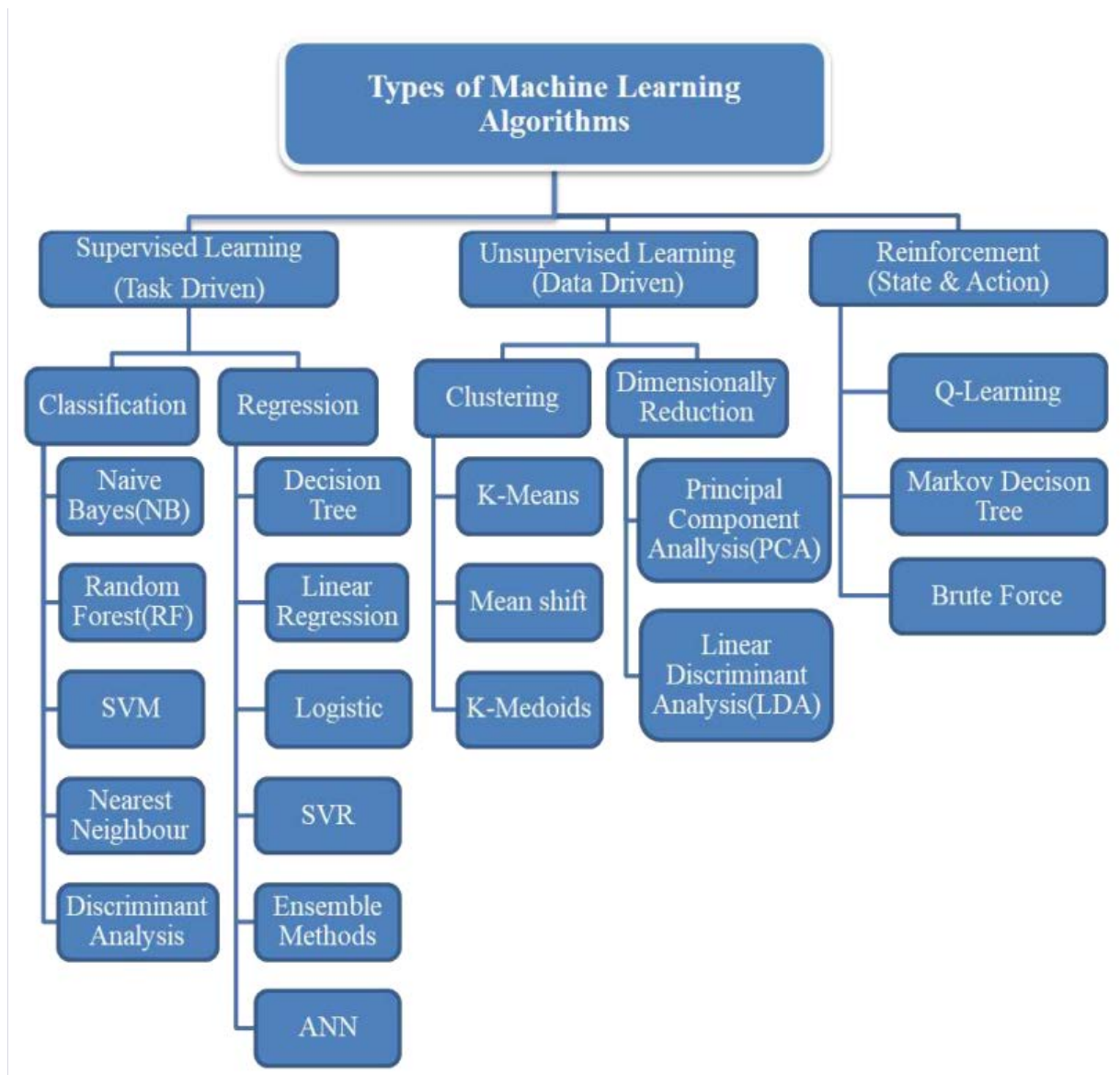


Εικόνα 3.1.2 – Σύστημα Μηχανικής Μάθησης [13]

Η μηχανική μάθηση είναι ουσιαστικά μία υποομάδα της τεχνητής νοημοσύνης, στην οποία μία μηχανή, εκπαιδεύεται και μαθαίνουν αυτοματοποιημένα, με βάση κάποια δεδομένα εκπαίδευσης[122]. Η μηχανική μάθηση είναι ένα από τα σημαντικότερα και πιο εύχρηστα εργαλεία για την ανακάλυψη ασυνεχειών, λαθών και προτύπων – μοτίβων, από πακέτα δεδομένων. Λόγω του συνεχώς αυξανόμενου όγκου δεδομένων στον τομέα της γεωργίας, η μηχανική μάθηση είναι αναγκαία για την γεωργική παραγωγή, για να καταφερθεί απόλυτη ακρίβεια στις σχετικές και ζητούμενες προβλέψεις. [123]

Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης κατηγοριοποιούνται σε τρεις τύπους όπως έχουμε δει και παραπάνω. Ονομαστικά: Supervised Learning (Επιβλεπόμενη Μάθηση), Unsupervised Learning (Ανεπίβλεπτη Μάθηση), Reinforcement Learning (Ενισχυτική Μάθηση). Αυτοί οι τρεις τύποι χωρίζονται σε περαιτέρω υποκατηγορίες όπως παρατηρείται στην Εικόνα 3.1.3 που ακολουθεί.





Εικόνα 3.1.3 – Τύποι Μηχανικής Μάθησης [13]

Οι τεχνικές μηχανικής μάθησης, βοηθούν τους αγρότες με προβλέψεις σχετικές με την ανάπτυξη των καλλιεργειών, την ανίχνευση τυχόν ασθενειών, και το προγραμματισμό χρήσης λιπασμάτων. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε συνεργασία με την μηχανική μάθηση, προσφέρουν στους αγρότες προβλέψεις σχετικά με την ποιότητα των καλλιεργειών, την κατηγοριοποίηση των φυτών, με αποτέλεσμα την αποφυγή αρνητικών καταστάσεων, όπως για παράδειγμα επιδημία ζιζανίων. Οι προβλέψεις της μηχανικής μάθησης βασίζονται σε πολλά χαρακτηριστικά, όπως πρότυπα και μοτίβα, και γνώσεις από ανακαλύψεις στα πακέτα δεδομένων. Τα πακέτα δεδομένων χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση των χαρακτηριστικών, και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αποτελέσματα από προηγούμενη εμπειρία. Παρακάτω ακολουθεί ο Πίνακας 3.1.1 στον οποίο περιέχονται όλοι οι διάφοροι τρόποι μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται στον γεωργικό τομέα, για τις ανάλογες χρήσεις και δραστηριότητες της γεωργίας ακριβείας.[124]

Εφαρμογή MM	Επιμέρους Απαιτήσεις ΓΑ	Αλγόριθμοι MM που χρησιμοποιούνται
Διαχείριση Σοδειάς	<ul style="list-style-type: none"> <li>Αναγνώριση Σοδειάς</li> <li>Ποιότητα Σοδειάς</li> <li>Ανίχνευση Ασθενειών</li> <li>Ανίχνευση Παρασίτων</li> <li>Πρόβλεψη Απόδοσης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RF, SVM, Ensemble Learning(EL), DT</li> <li>SVM, NB, LDA, BLR(Bayesian Linear Regression)</li> <li>ANN, LR, SVM, DF, EL</li> <li>ANN, k-NN (k-Nearest Neighbor), SVM, RF</li> <li>ANN, SVR(Support Vector Regression), MLR(Multiple Linear Regression), RF</li> </ul>
Διαχείριση Εδάφους	<ul style="list-style-type: none"> <li>Υγρασία Εδάφους</li> <li>Θερμοκρασία Εδάφους</li> <li>PH Εδάφους</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RF, Cubist Algorithm</li> <li>Extreme Learning Machine(ELM), RF</li> <li>ELM, Markov Models</li> <li>Logistic or Linear Regression, ELM</li> </ul>
Προβλέψεις Καιρικών Συνθηκών	<ul style="list-style-type: none"> <li>Πιθανότητα Βροχής</li> <li>Πιθανότητα Κατακρήμνισης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SVM, k-NN, RF, BLR, k-Means, Clustering</li> <li>RF, ANN, SVM, k-Means, NB</li> </ul>
Διαχείριση Νερού	<ul style="list-style-type: none"> <li>Στάγδην Άρδευση</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Multiple Linear Regression (MLR) Algorithm, ANN, RF</li> </ul>
Διαχείριση Μετά-Συγκομιδής	<ul style="list-style-type: none"> <li>Επεξεργασία Σπόρων</li> <li>Εμπορευματοποίηση</li> <li>Έξυπνη Συγκομιδή, Πρόβλεψη Αγοράς</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SVM, Decision Tree</li> <li>PCA, Logistic or Multimodal Regression</li> <li>LDA, SVM, ANN, MLR</li> </ul>

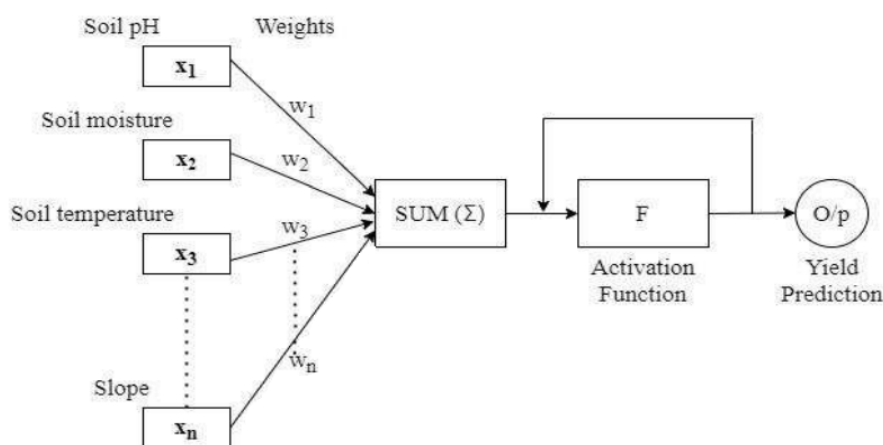
Πίνακας 3.1.1 – Χρήσεις Μηχανικής Μάθησης [13]

### 3.2 Τεχνικές Μηχανικής Μάθησης

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, παρατηρείται πως υπάρχουν πολλές τεχνικές μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται στην γεωργία ακριβείας. Για την κάλυψη των σημερινών αναγκών της γεωργίας, χρησιμοποιούνται έξυπνοι αλγόριθμοι και έχουμε ως αποτέλεσμα την γεωργία ακριβείας. Τα πιο δημοφιλή μοντέλα μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται στην γεωργία ακριβείας είναι: Support Vector Machines (SVMs) (Μηχανή Διανυσματικής Υποστήριξης), Random Forest (RF) (Τυχαίων Δασών), Artificial Neural Networks (ANNs) (Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα), Ensemble Learning Model (ELM) (Μοντέλο Εκμάθησης Συνόλου) και Decision Tree (DT) (Δέντρα Απόφασης). Ακολουθούν επεξηγήσεις για το κάθε ένα από τα δημοφιλή είδη μοντέλων μηχανικής μάθησης.

- Artificial Neural Networks (ANN)

Το ANN είναι το πιο ευρέως διαδεδομένο και δημοφιλές εργαλείο για την γεωργία ακριβείας, και είναι εμπνευσμένο από την λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο, βασισμένο σε νευρωνικά δίκτυα, τα οποία βοηθούν στην αναγνώριση προτύπων, την επιλογή αποφάσεων, την εκμάθηση, και την λειτουργική σκέψη. Το ANN, εφόσον είναι βασισμένο στους βιολογικούς νευρώνες του ανθρώπου, παρουσιάζει ομοιότητες και στον τρόπο λειτουργίας με τον ανθρώπινο εγκέφαλο, όντας διατεταγμένο σε διάφορες στρώσεις. Είναι ένα αποτελεσματικό μοντέλο, που βασίζεται σε δεδομένα, και χρησιμοποιείται για μη γραμμικά δυναμικά συστήματα μοντελοποίησης και αναγνώρισης. Τα δεδομένα εκπαιδεύονται με την χρήση νευρωνικών δικτύων με σκοπό την πρόβλεψη μελλοντικών δεδομένων, με παρόμοια μοτίβα. Το ANN προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με την εμπορευματοποίηση σε σχέση με τεχνικές παλυνδομητικής ανάλυσης (Regression techniques). Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορες προβλέψεις σχετικά με την σοδειά, βασισμένο σε παραμέτρους που αντλούνται από τους αισθητήρες, σχετικά με το έδαφος, το περιβάλλον, τα θρεπτικά στοιχεία του εδάφους, την θερμοκρασία, την πιθανότητα βροχής, την υγρασία, και λοιπά. Πολλά πειράματα διεξάγονται με την χρήση του μοντέλου μηχανικής μάθησης ANN, από διαφορετικούς ερευνητές, για διαφορετικά ήδη σοδειάς, όπως είναι για παράδειγμα τα ζαχαροκάλαμα, το σιτάρι, το ρύζι και το βαμβάκι, για την πρόβλεψη της ανάπτυξής τους σε σχέση με τις άστατες και συνεχώς εναλλασσόμενες καιρικές συνθήκες. Παρακάτω ακολουθεί σχηματικά στην Εικόνα 3.2.1 ένα μοντέλο ANN, το οποίο προβλέπει την σοδειά με βάση τις συνθήκες του εδάφους.[136,137]

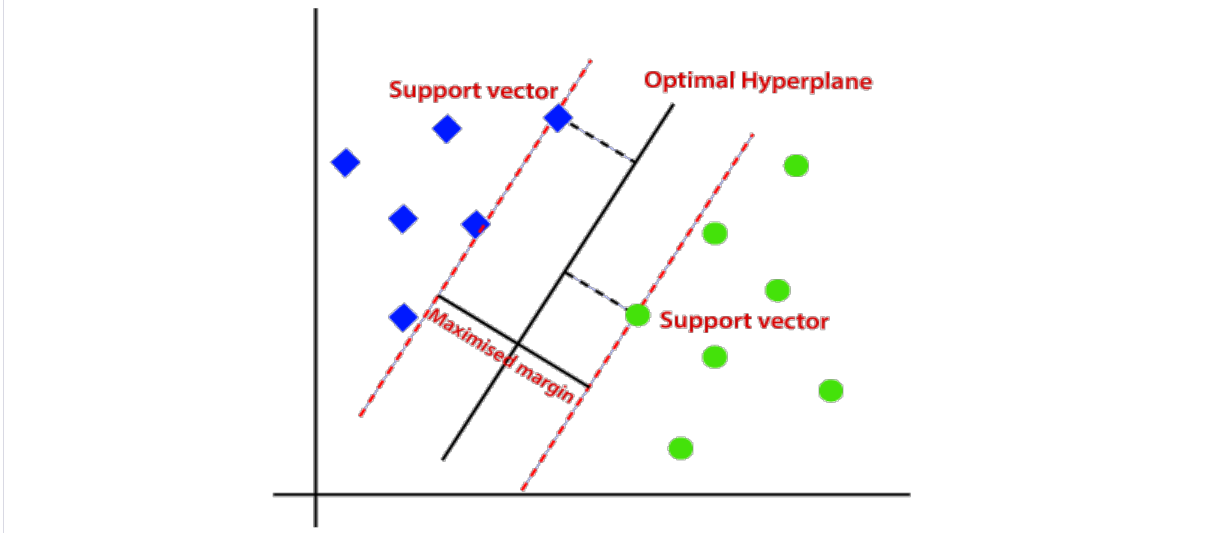


Εικόνα 3.2.1 – Μοντέλο ANN [13]

- Support Vector Machines (SVMs)

Τα SVMs είναι δυαδικοί ομαδοποιητές, οι οποίοι βασίζονται στην ομαδοποίηση και την συσχέτιση αλγορίθμων, με σκοπό την δημιουργία πολυδιάστατων ορίων μεταξύ των δεδομένων στον χώρο των διανυσμάτων. Η έξοδος ενός μοντέλου SVM είναι πρόβλεψη βασισμένη στις κλάσεις που διαχωρίστηκαν με την χρήση των δεδομένων εκμάθησης. Τα SVMs χρησιμοποιούνται στην γεωργία, για την πρόβλεψη της ποιότητας της σοδειάς, και της εμπορευματοποίησης, καθώς και στην κτηνοτροφία. Η ομαδοποίηση χρησιμοποιεί κόλλα Kernel τα οποία βελτιώνουν τις διαστάσεις των αρχικών δεδομένων. Ένα SVM μπορεί να αύξηση την αποδοτικότητα με ελάχιστους πόρους, απλά παρακολουθώντας κάποιες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα την ποιότητα της σοδειάς. Οι αλγόριθμοι SVM

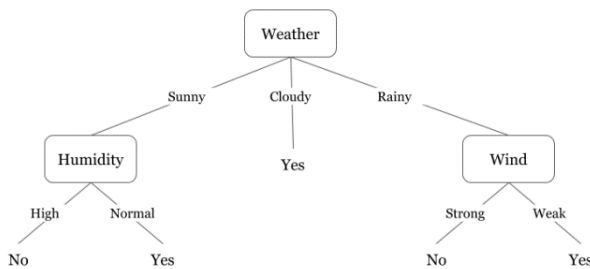
προτιμούνται, καθώς έχουν μεγάλη ακρίβεια, με μικρότερη υπολογιστική δύναμη, και ομαδοποιεί τύπους σοδειών, με βάση τις ιδιότητές τους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προβλήματα ομαδοποίησης, αλλά και συσχέτισης.



Εικόνα 3.2.2 – Μοντέλο SVM [299]

- Decision Trees (DT)

Τα DT είναι αλγόριθμοι επιβλεπόμενης μάθησης, με μεγάλη ταχύτητα και μικρή ανάγκη για μνήμη, για πιο γρήγορα και καλύτερα αποτελέσματα. Τα DT χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη και την ομαδοποίηση δεδομένων του γεωργικού τομέα. Μπορούν να



Εικόνα 3.2.3 – Μοντέλο DT [300]

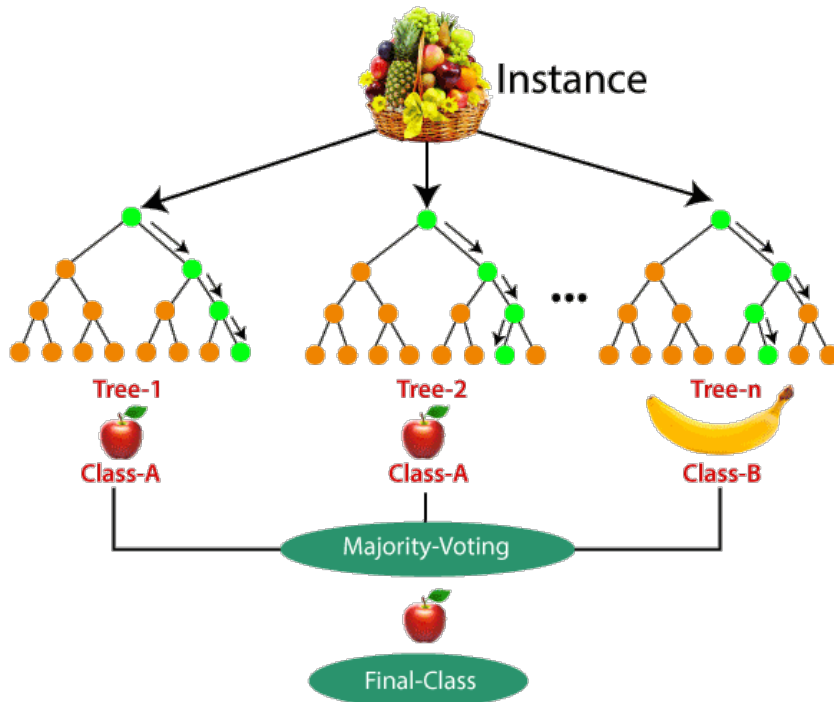
χρησιμοποιηθούν σε προβλήματα ομαδοποίησης, με οποιοδήποτε πακέτο δεδομένων. Βασίζεται στην απλή έννοια του ΝΑΙ ή ΟΧΙ. Ο σκοπός ενός DT είναι να αναγνωρίζει τις διάφορες παραμέτρους, που μπορούν να βοηθήσουν στην μείωση των ρίσκων και να δώσει προτεραιότητες, χρησιμοποιώντας σοφά περιορισμένους πόρους. Ο τρόπος ομαδοποίησης των DT, είναι με χρήση των κανόνων if, then, else. Αποτελείται από κόμβους, κλάδους και τερματικές αξίες. Σε αυτό το μοντέλο συσχέτισης, ο εσωτερικός κόμβος αντιστοιχεί σε μία επιλεγμένη μεταβλητή εισόδου, και δουλεύει με συγκρίσεις, ενώ ο κλάδος είναι η έξοδος του αλγορίθμου. Εν συντομία, τα DT είναι πολύ εύκολα σε ερμηνεία και κατανόηση.[137]

- Random Forest (RF)

Ο αλγόριθμος Τυχαίων Δασών είναι ένας τύπος επιβλεπόμενης μάθησης, ο οποίος χρησιμοποιείται για την επίλυση πολλών προβλημάτων που σχετίζονται με ομαδοποίηση και συσχέτισης. Χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές με μεγάλα πακέτα δεδομένων, για αυτό είναι κατάλληλο για τον γεωργικό τομέα, ο οποίος έχει πολύ μεγάλο όγκο δεδομένων και



παραμέτρων, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν. Ένας αλγόριθμος RF αποτελείται από πολλούς αλγορίθμους DT, τους οποίους είδαμε παραπάνω. Τα RF χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν τις προβλέψεις των DT. Εφόσον ένα RF αποτελείται από πολλά DT, καθίσταται πιο δύσκολη η ερμηνεία του. Από διαφορετικές εξόδους, φαίνεται πως τα RF, είναι ένας αποδοτικός αλγόριθμος εκμάθησης, για την ανάλυση της σοδειάς σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, με τεράστια ακρίβεια στην ανάλυση των δεδομένων. Σε σχέση με άλλα μοντέλα, τα RF, προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια καθώς χρησιμοποιεί πολλούς ομαδοποιητές για την εύρεση λύσεων σε πολύπλοκα προβλήματα, με μεγάλη επεξεργαστική ταχύτητα, με το μόνο αρνητικό να φαίνεται στην δυσκολία της ερμηνείας των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3.2.4 – Μοντέλο RF [301]

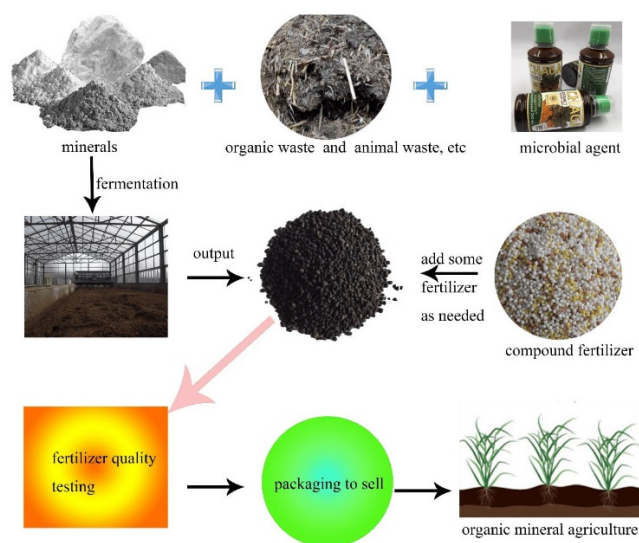
Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν πως η μηχανική μάθηση, εκπνέει αμέτρητες ευκαιρίες στον τομέα της γεωργίας, με την γεωργία ακριβείας. Βοηθά στην καλύτερη ποιότητα και ποσότητα της σοδειάς, αυξάνει το συνολικό κέρδος από την πώληση των προϊόντων, και διευκολύνει σημαντικά την δουλειά ενός αγρότη. Οι βιομηχανίες σήμερα, έχουνε θέση στόχο την συνεχή βελτίωση της μηχανικής μάθησης, και κυρίως στα δεδομένα εκπαίδευσης για την γεωργία, σχετικά με τις μεταβλητές εισόδου που δέχονται από τους αισθητήρες, διάφορα drone ή και αυτοκινούμενα οχήματα. Με την συνεχή βελτίωση της μηχανικής μάθησης, η γεωργία ακριβείας μπορεί να ανθίσει σε πραγματική τεχνητή νοημοσύνη, η οποία θα είναι σε θέση να προβλέψει και να προτείνει βελτιώσεις με απόλυτη ακρίβεια.

### 3.3 Εφαρμογές της Τεχνητής Νοημοσύνης και της Μηχανικής Μάθησης στην Γεωργία Ακριβείας

## Έλεγχος Ποιότητας Λιπάσματος

Στο στάδιο πριν την παραγωγική διαδικασία, η ποιότητα του λιπάσματος του εδάφους παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της σοδειάς. Η πυκνότητα και η σύσταση του εδάφους, σε βιταμίνες, ιχνοστοιχεία και μεταλλικά στοιχεία είναι σημαντικός δείκτης για τυχόν μόλυνση του εδάφους[146,147], και για την καταλληλότητά του για το συγκεκριμένο είδος φυτού που ενδιαφέρεται να φυτέψει ο αγρότης. Για αυτόν λοιπόν τον λόγο, είναι ζωτικής σημασίας οι συστηματικές δοκιμές και έλεγχοι του εδάφους και του λιπάσματος πριν το φύτεμα. Υπάρχουν πολλές ουσίες στο έδαφος που επηρεάζουν την ανάπτυξη της σοδειάς. Οι ουσίες αυτές θα μπορούσαν με απλό τρόπο να διαχωριστούν σε αυτές που μπορεί να παρατηρήσει το ανθρώπινο μάτι και σε αυτές που δεν μπορεί. Μεταξύ τους, οι ουσίες που μπορεί να παρατηρήσει το ανθρώπινο μάτι είναι κυρίως απομεινάρια από προηγούμενες σοδειές, ενώ αυτές που δεν μπορεί είναι ουσίες στο έδαφος, είτε χημικές είτε φυσικές, είτε βιολογικές, οι οποίες χρειάζονται κάποιο είδος εργαλείου για να ανακαλυφθούν.

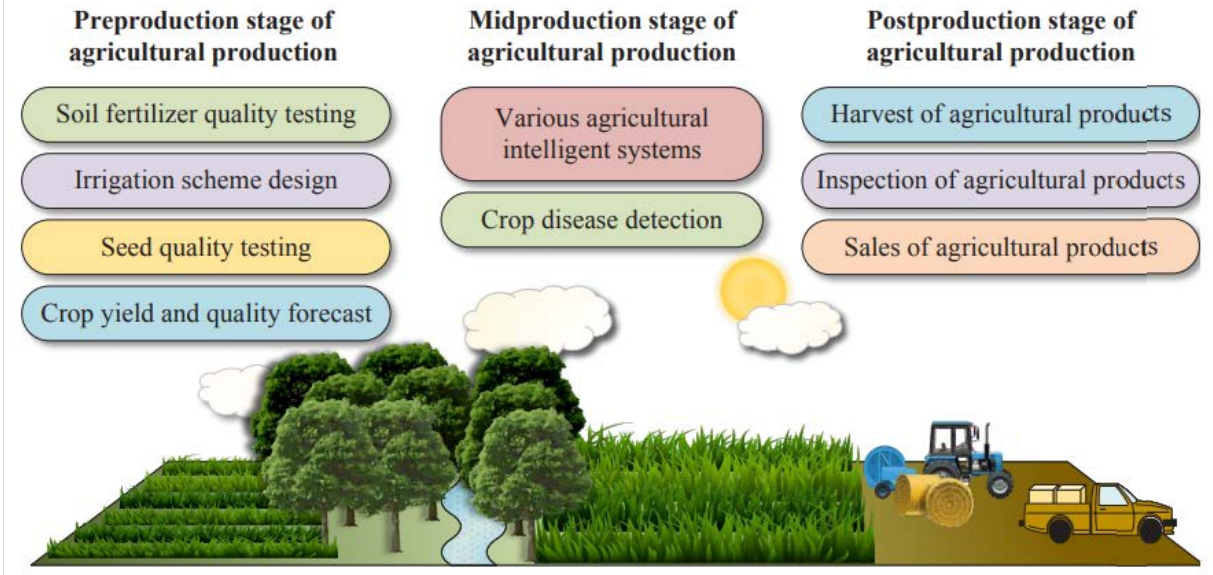
Πρώτον, η ανίχνευση στοιχείων που είναι διακριτά από το ανθρώπινο μάτι, που βρίσκονται στο έδαφος, επικεντρώνεται σε απομεινάρια φυτών τα οποία προστατεύουν το έδαφος. Όχι μόνο μειώνουν την διάβρωσή του, αλλά σταθεροποιούν την ποιότητα του εδάφους και φέρουν θρεπτικά συστατικά για την καλύτερη δομή της επόμενης καλλιέργειας. Παρόλαυτα, το φόρτο εργασίας για να ανιχνευτούν τα στοιχεία αυτά σε μεγάλα αγροκτήματα είναι τεράστιο, και πολύ χρονοβόρο, καθώς είναι επίσης και ανομοιογενές και υποκειμενικό, έτσι τα αποτελέσματα διαφέρουν ανάλογα την εμπειρία του εκάστοτε παρατηρητή, και δεν μπορούν να είναι ακριβή. Έχοντας αυτό στον νου, με την βοήθεια της μηχανικής όρασης, της επεξεργασίας εικόνας και άλλων τεχνολογιών έχουν δημιουργηθεί αυτοματοποιημένες μέθοδοι με μεγάλη αξιοπιστία και συνέπεια. Για παράδειγμα, η μέθοδος μηχανικής μάθησης MSCU-net + C, χρησιμοποιείται για να σκιαγραφεί την κάλυψη από απομεινάρια σε μεγάλα αγροκτήματα καλαμποκιού, με χρήση μεγάλης ανάλυσης εικόνων από δορυφόρους, δίνοντας πληροφορίες για το μέγεθος και τον ρυθμό της κάλυψης. Άλλο παράδειγμα υπολογισμού των απομεινारीων του εδάφους, είναι η χρήση μηχανικής μάθησης σε RGB εικόνες. Με την χρήση της μεθόδου RFE-SVM, τα αποτελέσματα ήταν 10 φορές καλύτερα σε σχέση με άλλες μεθόδου, για την κάλυψη από απομεινάρια, με χρήση Bayesian μοντέλου ομαδοποίησης.[148]



Εικόνα 3.3.1-Αναπαράσταση της Παραγωγικής Διαδικασίας [302]

Από την άλλη, όσο αφορά τις μη ανιχνεύσιμες από ανθρώπινο μάτι ουσίες, οι πιο βασικές είναι η ανίχνευση της περιεκτικότητας σε άλατα από το έδαφος, φωσφόρου, καλίου, άνθρακα και

αζώτου, τα οποία είναι τα κύρια θρεπτικά στοιχεία που επηρεάζουν την ανάπτυξη της σοδειάς. Η περιεκτικότητα σε άλατα συνδέεται άμεσα με την σταθερή ανάπτυξη της γεωργίας γενικότερα, με το φαινόμενο της υποβάθμισης του εδάφους. Γι' αυτό είναι αναγκαία η ακριβής επίβλεψη της περιεκτικότητας αυτής. [149]



Εικόνα 3.3.2 – Στάδια Παραγωγικής Διαδικασίας [11]

Ένας διάσημος τρόπος ανίχνευσης της περιεκτικότητας άλατος του εδάφους είναι ο συνδυασμός της μηχανικής μάθησης με IoT. Μέσω του IoT γίνεται η συλλογή πληροφοριών, όπως εικόνες, και σε συνδυασμό με ένα μοντέλο προβλέψεων μηχανικής μάθησης καταλήγουμε στο ζητούμενο αποτέλεσμα. Η ανάλυση των θρεπτικών ουσιών του εδάφους, και η κατάλληλη ρύθμιση του λιπάσματος είναι ανάγκες που αν δεν καλυφθούν, μπορεί να καταλήξουν σε αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, κλιματικές καταστροφές, οικονομικές καταστροφές καθώς και μείωση της παραγωγικότητας. Στον πίνακα 3.3.1 που ακολουθεί δίνονται παραδείγματα από χρήση μηχανικής μάθησης για την πρόβλεψη των χημικών στοιχείων του εδάφους. [149]

Πηγές Υλικών	Μέθοδοι Δοκιμών Εδάφους	Στοιχεία που Ανιχνεύτηκαν	Εικόνες/Δεδομένα που Συλλέχθηκαν	Μοντέλα	Δείκτες Απόδοσης
Ινδία	-	O-C, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Fe, Mn, Zn	-	76 regressors, που ανήκουν σε 20 οικογένειες	RMSE, R <sup>2</sup>
Κίνα	Kjedahl	TN	Near infrared (hyperspectral imaging) HSI	PLS, ELM	Rc, rp, RPD, RMSEC,

			system		RMSEP
Κίνα	CHNS combustion gas analyzer	SO-C	UAV + Multispectral Camera	STR, PLSR, SVM, BPNN, ELM	R <sup>2</sup> , RMSE, RPIQ
Ινδία	Transformation factor and their molecular mass determination: Ion Chromatography Technology	N (Urea)	Portable Spectroradiometer	DL Network based on DASU	R <sup>2</sup>
ΗΠΑ	Laser-Induced breakdown spectroscopy (LIBS)	N	UAV + Multispectral Camera, UAV+ Sentera High Precision NDVI Single Sensor	MLP-R, SVR	RMSE
Νότια Κορέα	Inductively coupled plasma-optical emission spectrometry (ICP-OES)	NPKC	UAV + Multispectral Camera	CNN Regression	RMSE, R <sup>2</sup> , MAPE
Ινδία	Homemade Samples	N (Urea)	Midinfrared spectroscopy	PLSR, SVM	RMSE, R <sup>2</sup>

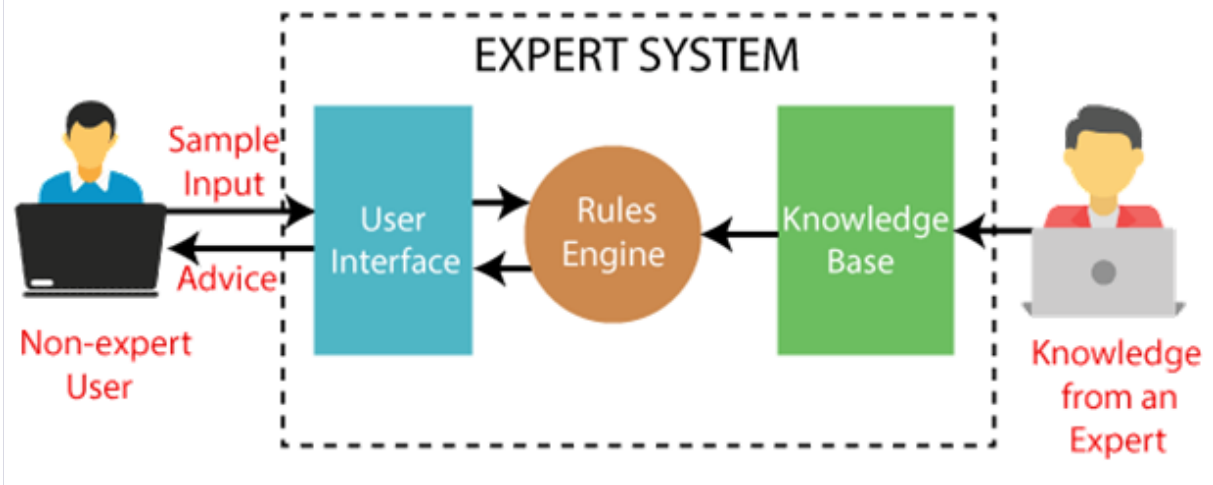
Πίνακας 3.3.1 – Περιπτώσεις Εντοπισμού Στοιχείων με Χρήση Μηχανικής Μάθησης [11]

Μετά τον έλεγχο της σύστασης του εδάφους, και σχεδιάγραμμα για την εφαρμογή του λιπάσματος, ανάλογα με τις προβλέψεις των μοντέλων, η σοδειά θα γίνει καλύτερης ποιότητας και πιο αποδοτική. Η ανομοιογενής κατανομή του λιπάσματος, που συμβαίνει από τυφλές και μηχανικές εφαρμογές λιπάσματος, έχει πολλές αρνητικές επιπτώσεις, όπως η μόλυνση του εδάφους, αλλά και την υπερβολική δόση θρεπτικών ουσιών. Τεχνολογίες όπως η μηχανική μάθηση, η επεξεργασία εικόνας, και το IoT μπορούν αξιοποιήσουν με τον καλύτερο τρόπο την εφαρμογή του λιπάσματος. Η μηχανική μάθηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί το κατάλληλο λίπασμα για το εκάστοτε είδος καλλιέργειας. Με τις συνεχείς προσπάθειες των επιστημόνων, βελτιώνονται συνεχώς οι χρήσεις λιπάσματος, για μεγαλύτερη ακρίβεια, και λιγότερη άσκοπη χρήση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σταθερότητα στην ανάπτυξη γεωργικών προϊόντων, και σωστή χρήση της γεωργίας ακριβείας.[148,150]

### Σχεδιασμός Συστήματος Άρδευσης

Έκτος του εδάφους, επίσης σημαντικό ρόλο στον αγροτικό τομέα, έχει το νερό. Στο στάδιο πριν την παραγωγή, ο σωστός σχεδιασμός του συστήματος άρδευσης, είναι η βάση για μία αποδοτική και σταθερή γεωργική παραγωγή. Τα τελευταία χρόνια, έχουν συστηθεί πολλές 'έξυπνες' τεχνολογίες, για την αυτοματοποίηση της άρδευσης, την διαχειρισή της, και τις αποφάσεις που πρέπει να παρθούν για να είναι η διαδικασία της άρδευσης βέλτιστη, με αποτέλεσμα την βελτίωση πολλών πτυχών του αγροτικού τομέα. Στην εικόνα 2.3.1 έχουμε δει ένα σύστημα 'έξυπνης' άρδευσης, με χρήση τεχνητής νοημοσύνης.[151]

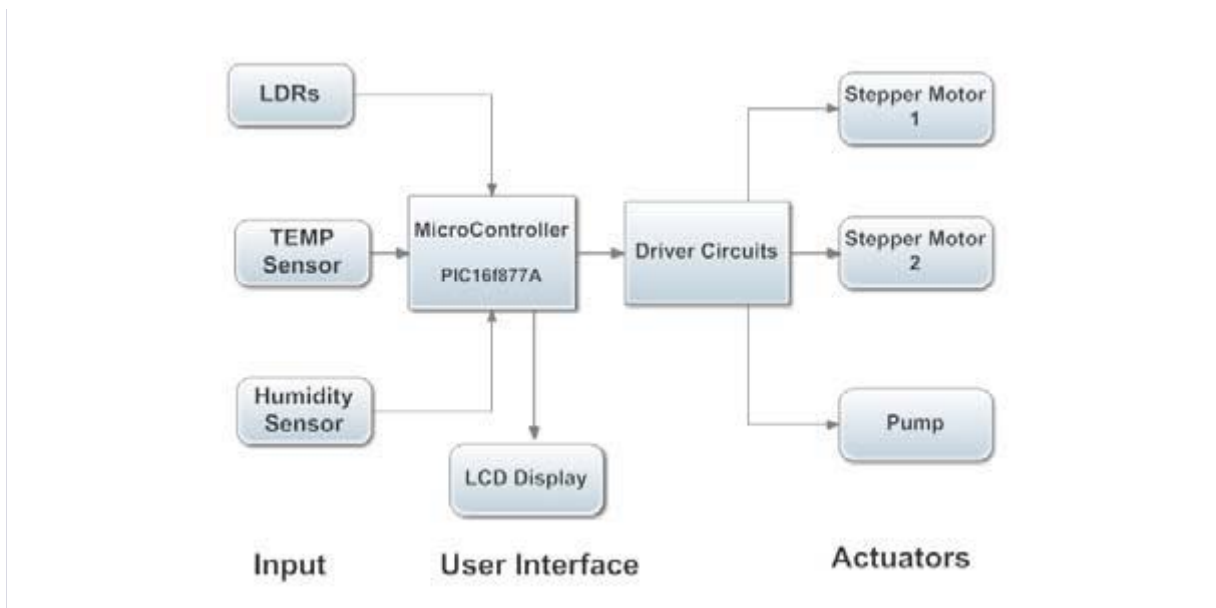
Το τυπικό αυτό σύστημα αποτελείται από, έναν τερματικό επίβλεψης, ένα gateway module, ένα module υπηρεσιών cloud, ένα σύστημα βέλτιστων επιλογών, και έναν τερματικό για τον χρήστη. Το σύστημα επιλογών είναι το βασικό κομμάτι για όλη την λειτουργία του συστήματος, από την επεξεργασία, τους υπολογισμούς, τις προβλέψεις, την ανάλυση παλαιότερων δεδομένων και δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στο σύστημα cloud, μέσω αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης, για να παρθούν οι βέλτιστες αποφάσεις. Τα δεδομένα που επηρεάζουν κυρίως την απόφαση είναι, η ποιότητα του νερού, η κατάσταση του εδάφους, η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, η βροχόπτωση, το είδος της σοδειάς και άλλα. Στην εικόνα 3.3.3 έχουμε απεικόνιση ενός συστήματος βέλτιστων επιλογών.



Εικόνα 3.3.3 – Επικόνιση Expert System [141]

Ο γεωργικός τομέας και το νερό, δεν διαχωρίζονται, και μία από τις κυριότερες παραμέτρους στην άρδευση είναι η ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ελέγχου ποιότητα του νερού είναι δύσχρηστες και ακριβές αυξάνοντας το φόρτο εργασίας των αγροτών. Η χρήση τεχνητής νοημοσύνης για την πρόβλεψη και την διαχείριση της ποιότητας του νερού άρδευσης είναι ένας σημαντικός τομέας που χρίζει ερευνών. Μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί για την συγκεκριμένη διεργασία, είναι το CAR-RR και το advanced CAR-SVR, τα οποία έχουν αναπτυχθεί για την μοντελοποίηση των υπογείων ρευμάτων, χρησιμοποιώντας SVR και MLR μοντέλα μηχανικής μάθησης. Άλλα μοντέλα μηχανικής μάθησης που έχουν χρησιμοποιηθεί για την συγκεκριμένη διεργασία είναι: SVM, Cubist, RF, Baysia-ANN, τα οποία προσφέρουν χαμηλό κόστος και προβλέψεις σε πραγματικό χρόνο για την ποιότητα του νερού άρδευσης.[152,153]



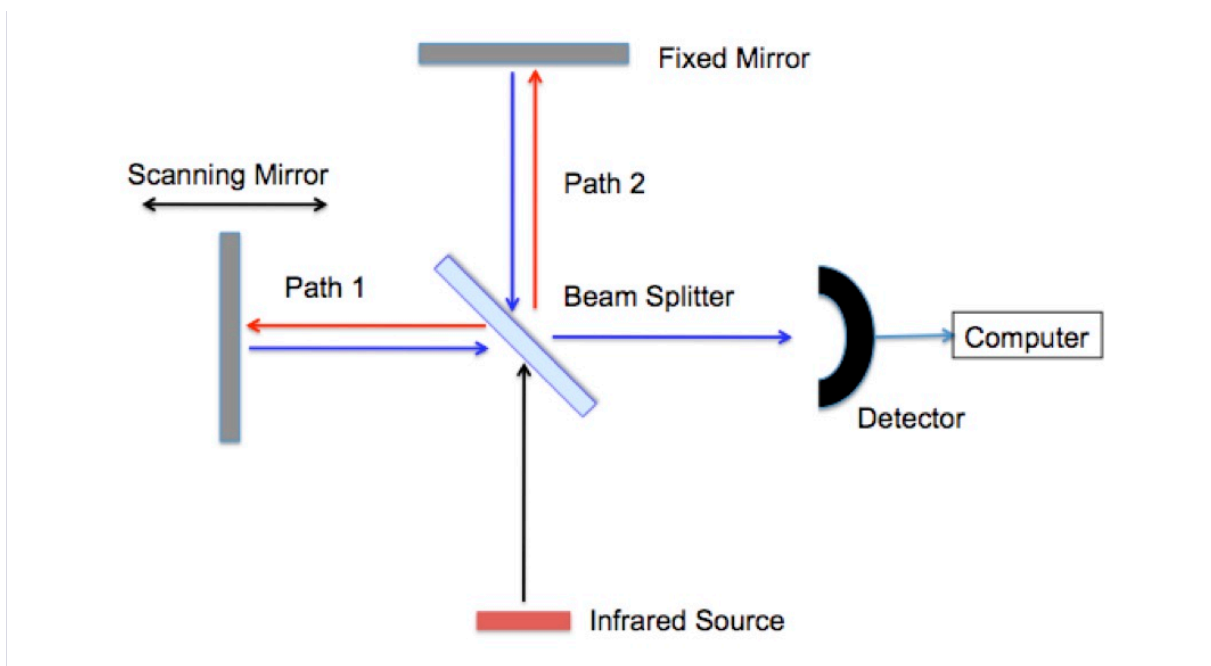


Εικόνα 3.3.4 – Block Diagram Συστήματος Άρδευσης [303]

### Έλεγχος Ποιότητας Σπόρων

Ο έλεγχος ποιότητας των σπόρων περιλαμβάνει έλεγχο αγνότητας, προσδιορισμός του είδους, έλεγχος για μικροοργανισμούς, έλεγχος βιωσιμότητας, και έλεγχος υγείας. Ο έλεγχος και ο προσδιορισμός των σπόρων με επιστημονικούς και αξιόπιστους τρόπους, είναι σημαντικά εργαλεία για την διασφάλιση ποιότητας των σπόρων, υπολογίζοντας ταυτοχρόνως την ιδανική ποσότητα σποράς, την επιλογή των κατάλληλων παρτίδων σπόρων, και τις αποφάσεις για την κατάλληλη διεργασία του εδάφους. Οι παλαιότερες μέθοδοι και εξοπλισμός ελέγχου, ο μικρός αριθμός επαγγελματιών ελεγκτών, και η ανεπαρκής γνώση πάνω στο αντικείμενο, περιορίζουν τα αποτελέσματα των ελέγχων, σε μικρότερη ακρίβεια και επιστημονική βάση. Οι σημερινές μέθοδοι ελέγχου σπόρων, βασίζονται κυρίως στον συνδυασμό IoT με μηχανική μάθηση, χρησιμοποιώντας το διαδίκτυο των πραγμάτων για συλλογή δεδομένων και εικόνων, κυρίως φασματοσκοπία, υπερφασματική απεικόνιση, ηλεκτρονική μύτη (αισθητήρας), τεχνολογία θερμικής εικόνας, και τεχνολογία X-Ray. Οι αλγόριθμοι της μηχανικής μάθησης με την σειρά τους, με χρήση deep learning, χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στην κατασκευή του μοντέλου.[154]

Ένα παράδειγμα χρήσης της τεχνολογίας, είναι FTIR (infrared spectroscopy), και αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για την διάκριση της ευρωστίας σπόρων σόγιας, διαχωρίζοντας τα πειραματικά σε υψηλής και χαμηλής ευρωστίας με 100% ποσοστό επιτυχίας. [155]



Εικόνα 3.3.5 – Απεικόνιση Μεθόδου FTIR [304]

Άλλο παράδειγμα είναι η χρήση single-core near-infrared spectroscopy (SK-NIRS), με την οποία τεχνική, πειραματικά κατηγοριοποιήθηκαν 5 διαφορετικές κατηγορίες σπόρων αγγουριού, με διαφορετικά επίπεδα ωριμότητας, σε μη καταστροφική κατάσταση, με ακρίβεια 99,69%. Τα αποτελέσματα αυτών των ερευνών, δείχνουν την μεγάλη προσαρμοστικότητα της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης για το έλεγχο ποιότητας των σπόρων.[156]

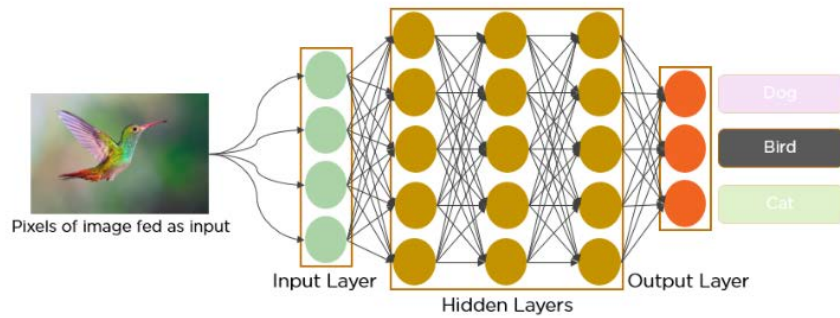
### Πρόβλεψη Ποιότητας και Απόδοσης της Καλλιέργειας

Η πρόβλεψη της ποιότητας και της απόδοσης της καλλιέργειας είναι ένα από τα πιο απαιτητικά προβλήματα στην γεωργία ακριβείας, και ένα σημαντικό έργο για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στον αγροτικό τομέα. Τα μοντέλα ακριβούς επίβλεψης της απόδοσης της καλλιέργειας μπορούν να βοηθήσουν τους αγρότες να αποφασίσουν τι να καλλιεργήσουν και πότε, ενώ επίσης βοηθάει την κυβέρνηση να αναπτύξει έγκυρες πολιτικές σχετικά με το φαγητό, όπως οι τιμές τους, οι πολιτικές εισαγωγών και εξαγωγών, καθώς και η σωστή διαχείριση χώρων αποθήκευσης αποθεμάτων. Όμως, η πρόβλεψη της απόδοσης της καλλιέργειας δεν είναι εύκολο, καθώς βασίζεται σε πολλούς διαφορετικούς παράγοντες, όπως είναι η κλιματική αλλαγή, ο καιρός, το έδαφος, το είδος σπόρων και λιπάσματος, και λοιπά. Η πιο διάσημη μέθοδος τα τελευταία χρόνια είναι η χρήση τεχνολογιών μηχανικής μάθησης και μηχανικής όρασης, για τις προβλέψεις αυτές. [158,159]

Ερευνητές έχουν κάνει δοκιμές με SLR (systematic literature review)[160], επικεντρωμένο στην γεωργία ακριβείας, και μελετήθηκαν σχετικές εργασίες με χρήση υπερφασματικής τηλεπισκόπησης, για τις προβλέψεις. Έπειτα από έρευνες[161], καταλήξαμε πως η πρόβλεψη της απόδοσης και της ποιότητας της καλλιέργειας, μπορούν να αναλυθούν σε 3 βασικές κατηγορίες: επιλογή χαρακτηριστικών πρόβλεψης, επιλογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και επιλογή αξιολόγησης παραμέτρων. Οι πιο συνήθεις μέθοδοι μηχανικής μάθησης που

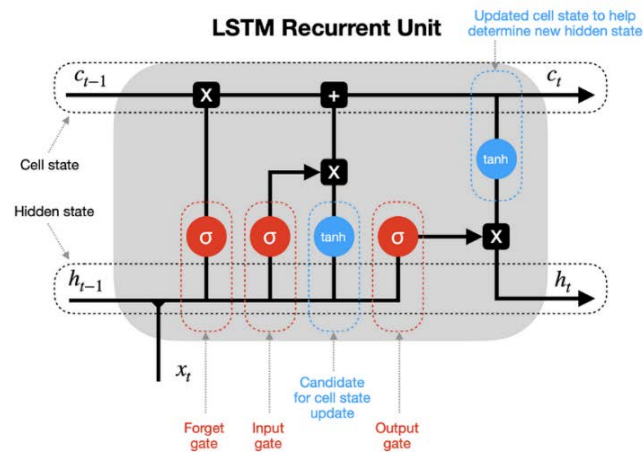


χρησιμοποιούνται είναι CNN (Conventional Neural Networks) , LSTM (Long Short Term Memory) και DNN. Στις εικόνες 3.3.6, 3.3.7, 3.3.8 που ακολουθούν απεικονίζονται οι αντίστοιχες μέθοδοι μηχανικής μάθησης.[162]

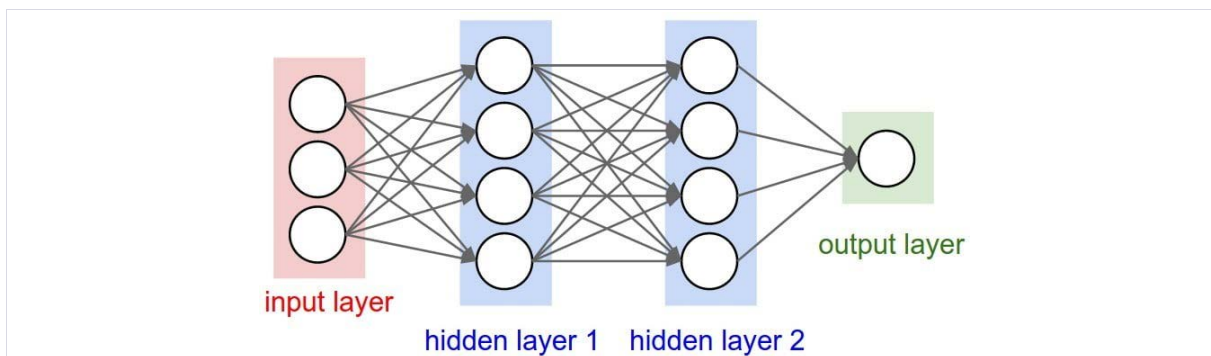


Εικόνα 3.3.6 – Μέθοδος CNN [142]

## LONG SHORT-TERM MEMORY NEURAL NETWORKS



Εικόνα 3.3.7 – Μέθοδος LSTM [143]



Εικόνα 3.3.8 – Μέθοδος DNN [144]

### Έξυπνα Αγροτικά Συστήματα στο Στάδιο της Γεωργικής Παραγωγής

Τα έξυπνα αγροτικά συστήματα, είναι υπολογιστικά συστήματα που μετατρέπουν την γνώση και την εμπειρία ειδικών του αγροτικού τομέα, και τα μετατρέπουν σε προβλέψεις και προτάσεις για την αντιμετώπιση προβλημάτων, κατά την διάρκεια της γεωργικής παραγωγής[163]. Είναι ευρέως γνωστό πως για την επίλυση των γεωργικών προβλημάτων, χρειάζεται εμπειρία γνώση και έρευνα με μεγάλες απαιτήσεις. Τα άτομα με την κατάλληλη τεχνογνωσία, δεν είναι πάντοτε στην διάθεση των αγροτών. Για την επίλυση λοιπόν των προβλημάτων, τα έξυπνα αγροτικά συστήματα μεταφέρουν τις χρήσιμες γνώσεις σε μία βάση δεδομένων, και με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων και μηχανικής μάθησης, βοηθούν τους αγρότες με επιστημονικό τρόπο. Για παράδειγμα, ένα σύστημα το οποίο χρησιμοποιεί τις γνώσεις για το φυτό της Μηλιάς που σχεδιάστηκε από την CLIPS, βοηθά τους αγρότες να κάνουν σωστή διάγνωση και θεραπεία σε περισσότερες από 12 ασθένειες του φυτού.[164]

Επίσης, κάποια συστήματα επιτρέπουν στον χρήστη την πρόσβαση μέσω του διαδικτύου, για ερωτήσεις, από τις οποίες λαμβάνουν απαντήσεις από ειδικούς. Υπάρχουν συστήματα τα οποία ανιχνεύουν τις ασθένειες σε καρύδες[165], και άλλα για την διαχείριση της ανάπτυξης σοδειάς ρυζιού[166], βασισμένο στις μεθόδους Positive chain και Deterministic Factor στην οποία περιλαμβάνονται η βοήθεια στην επιλογή των σπόρων και αντιπαρασιτικών. Τέτοια συστήματα μπορούν να δώσουν απαντήσεις επιπέδου αυθεντίας, στην μητρική γλώσσα του αγρότη, με τεράστια ακρίβεια[167]. Ο συνδυασμός της τεχνολογίας με ειδικούς χάρτες, προσφέρουν στον αγρότη γρήγορες, βολικές και ακριβείς υπηρεσίες, και τους βοηθάει να πάρουν αποφάσεις με βάση την γνώση.

Η καταγραφή, η επίβλεψη, και ο έλεγχος των περιβαλλοντικών συνθηκών στον αγροτικό τομέα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ο εξοπλισμός IoT, σε συνδυασμό με δίκτυα αισθητήρων, και υπηρεσίες cloud, ενσωματωμένα με τις δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης και την μηχανικής μάθησης είναι πλέον οι πυλώνες της επίβλεψης στην γεωργία ακριβείας (SEM). Έξυπνα συστήματα εντοπισμού περιβαλλοντικών συνθηκών, χρησιμοποιούνται στην έξυπνη ή πράσινη γεωργία. [168] Βοηθά τον αγρότη να με πληροφορίες για την υγεία του εδάφους, την ανάλυση του νερού, το επίπεδο μόλυνσης του νερού, το επίπεδο, και δεδομένα για άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την βιώσιμη λειτουργία της παραγωγικής διαδικασίας. Επιπροσθέτως, έχουν αναπτυχθεί συστήματα όπως ομαδοποίησης φυτών[169], προβλέψεων και αποφάσεων για τον αγροτικό τομέα[170], βοηθημάτων για τον αγροτικό τομέα[171], συστημάτων γεωγραφικής πληροφόρησης[172], και φορητά συστήματα πληροφόρησης[173].



Εικόνα 3.3.9 – Απεικόνιση Λειτουργιών Τεχνητής Νοημοσύνης [174]

### Ανίχνευση και Έλεγχος Ασθενειών Σοδειάς

Οι ασθένειες σοδειάς προκαλούν μεγάλες ζημιές στην οικονομία, στην παραγωγή, στην ποιότητα καθώς και στην ποσότητα των αγροτικών προϊόντων. Είναι λοιπόν αναγκαίο, να επιβλέπεται η υγεία της σοδειάς, από τα πρώτα στάδια της ανάπτυξης της μέχρι και το στάδιο της συγκομιδής. Ο πιο παραδοσιακός τρόπος ανίχνευσης είναι με οπτική παρακολούθηση, ο οποίος δεν είναι μόνο σημαντικά χρονοβόρος, αλλά απαιτεί επόπτες με μεγάλη επαγγελματική εμπειρία και γνώση. Για την λύση αυτών των προβλημάτων, ερευνητές έχουν παραθέσει μία σειρά από αυτοματοποιημένες μεθόδους ανίχνευσης ασθενειών με χρήση τεχνητής νοημοσύνης. Κάποια τυπικά παραδείγματα ακολουθούν στον πίνακα 3.3.2.

Αναφορά	Αντικείμενο Εντοπισμού	Δεδομένα/ Εικόνες Ανάκτησης	Μέγεθος Βάσης Δεδομένων	Μέθοδος Ανίχνευσης	Μέθοδος Ομαδοποίησης	Ακρίβεια
[175]	Ντομάτα	PlantVillage Dataset	14828 Εικόνες	AlexNet, GoogleNet	Deep Learning	98,660%, 99,185%
[176]	Ρύζι	Ψηφιακή Κάμερα/Smartphone	-	CNN	Deep Learning	90,9%
[177]	Βαμβάκι	NB, AIR, Natural Scenes Dataset	50 Κλάσεις με 10 εικόνες η κάθε μία	CNN, FPGA	Few-Shot Learning	95,4% 96,2%
[178]	Καλαμπόκι	PlantVillage Dataset	4 κλάσεις με 500 εικόνες η κάθε μία	SCNN-KSVM, SCNN-RF	Deep Learning	94% 94%
[179]	20 Στοιχεία	Crop Pest/Plant Leaf Datasets	200 εικόνες για κάθε Dataset	ANN-Based Continual Classification	Deep Learning	~100%

[180]	Tessaratomy Papillosa	UAV, Smartphone	687 Εικόνες Ενήλικων Tessaratomy Papillosa	YOLOv3 με βάση CNN	Deep Learning	~90%
[181]	38 Στοιχεία	PlantVillage Dataset	1000 Εικόνες Ανά Κατηγορία	Semisupervised few-shot Learning	Few-Shot Learning	92,6%
[182]	Σταφύλλια	PlantVillage Dataset	10 Esca, 10 Leaf Bright, 300 Black Rot, 300 Υγειή	CycleGAN, LFMGAN	Deep Learning	90,91% 92,44%
[183]	20 Στοιχεία	PlantVillage Dataset	6000 Εικόνες	CNN	Few-Shot Learning	90,4%
[184]	Σιτάρι	CGIAR Crop Disease Dataset, Google Images	440 Εικόνες	MobileNetv3	Few-Shot Learning	>92%
[185]	Εσπεριδοειδή	Hybrid Citrus, Citrus Leaves, Citrus Fruits	3988 + 2184 +1328 Εικόνες	Resnet18, Inception V3	Deep Learning	99,5% 94% 97,7%

Πίνακας 3.3.2 – Παραδείγματα Χρήσης Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης για Ανίχνευση Ασθενειών σε Σοδειά

Από τα δεδομένα του Πίνακα 3.3.2 παρατηρούμε ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι Deep Learning και Few-Shot Learning με την δεύτερη να παίρνει με το πέρασμα του καιρού την σκυτάλη από την πρώτη. Αυτό συμβαίνει κυρίως διότι οι αλγόριθμοι για την μέθοδο deep learning, βασίζονται πολύ σε μεγάλο όγκο δεδομένων. Το αποτέλεσμα αυτού είναι το μεγάλο κόστος για την απόκτηση αυτών των δεδομένων, του hardware που χρησιμοποιείται για την λήψη αυτών των δεδομένων, καθώς και η μεγάλη ζήτηση σε ισχύ, από το hardware[186]. Για την αντιμετώπιση του υψηλού αυτού κόστους, και την καλύτερη βιωσιμότητα του αγροτικού τομέα, οι ερευνητές επικεντρώθηκαν στην ανταλλαγή μεταξύ της ποιότητας και της ποσότητας των δεδομένων. Για την ποιότητα των δεδομένων πιστεύεται πως, περιορισμένος αριθμός καλής ποιότητας δεδομένων υπερνικά μεγάλο αριθμό κακής ποιότητας δεδομένων[187]. Για το πρόβλημα της ποσότητας των δεδομένων εφαρμόζεται η μέθοδος few-shot learning στην γεωργία ακριβείας[188]. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η χρήση μικρού αλλά καλού δείγματος σε κάποιες αγροτικές εργασίες, επιτυγχάνει καλύτερο μοντέλο αλγορίθμου, με μικρότερη ποσότητα δεδομένων.[189]

### Συγκομιδή Αγροτικών Προϊόντων

Οι δραστηριότητες συγκομιδής καλλιεργειών περιλαμβάνουν τη συγκομιδή, τη στοίβαξη, το χειρισμό, το αλώνισμα, τον καθαρισμό και τη μεταφορά. Αυτές οι εργασίες είναι συνήθως κουραστικές και απαιτούν μεγάλο εργατικό δυναμικό και υψηλή επαναληψιμότητα. Υπό την



επίδραση της αυξανόμενης ζήτησης για γεωργικά προϊόντα και της έλλειψης εργατικού δυναμικού, η συγκομιδή των γεωργικών προϊόντων πρέπει να βελτιωθεί σε επίπεδο γεωργικής αυτοματοποίησης και ρομποτικοποίησης. Για τις καλλιέργειες δημητριακών, όπως το σιτάρι και το καλαμπόκι, οι οποίες ωριμάζουν ομοιόμορφα στον αγρόκτημα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγάλες μηχανές αυτοματοποιημένες για τη συγκομιδή, για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και σε μεγάλη κλίμακα. Τα διάφορα φρούτα έχουν διαφορετικό περιβάλλον ανάπτυξης, χωρική θέση, γεωμετρικό σχήμα, μέγεθος, χρώμα, σκληρότητα, και ωριμότητα, οπότε δεν είναι κατάλληλα για ομοιόμορφη συγκομιδή. Ταυτόχρονα, παράγοντες όπως το δύσβατο έδαφος του οπωρώνα και τυχόν εμπόδια αυξάνουν επίσης τη δυσκολία της συγκομιδής των φρούτων. Επομένως απαιτούνται μικρότερα ρομπότ συγκομιδής, ικανά να ανιχνεύουν και να προσαρμόζονται στις διαφορετικές καλλιέργειες ή περιβαλλοντικές αλλαγές. [190]

Στην σημερινή εποχή, τα ρομπότ συγκομιδής φρούτων μπορούν ήδη να χρησιμοποιούν οπτική αντίληψη για να αντιλαμβάνονται και να μαθαίνουν πληροφορίες για τις καλλιέργειες, με τις οποίες μπορεί να γίνει η βαθμονόμηση της κάμερας [191] η αναγνώριση και ο εντοπισμός



*Εικόνα 3.3.10 – Συγκομιδή Σοδειάς Με Χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης [198]*

στόχων [192] αναγνώριση φόντου στόχου [193], τρισδιάστατη ανακατασκευή [194], σχεδιασμό της συμπεριφοράς του ρομπότ με βάση οπτικό εντοπισμό [195], και την αποφυγή πολύπλοκων παραγόντων παρεμβολής κατά την διάρκεια του εντοπισμού [196]. Η μέθοδοι αναγνώρισης αντικειμένων για αυτά τα ρομπότ συγκομιδής είναι κυρίως μέθοδοι όρασης singlefeature, μέθοδοι σύντηξης multifeature και αλγόριθμοι βαθιάς μάθησης. Επιπλέον, οι μελέτες έχουν καταλήξει στο ότι για τη γλυκοπατάτα, την πατάτα, το ταρό και άλλες ριζώδεις καλλιέργειες που αναπτύσσονται στο έδαφος, η τεχνολογία συγκομιδής παραμένει ως επί το πλείστον στο δρόμο της χειροκίνητης εξόρυξης, ή της ημι-ανθρώπινης και ημι-μηχανικής συγκομιδής, προς το παρόν. Υπάρχουν λίγες ευφυείς αυτόματες τεχνολογίες συγκομιδής για αυτό το είδος καλλιέργειας, και οι περισσότερες από αυτές παραμένουν στο στάδιο της ανάπτυξης μηχανικών οργάνων [197] και της βελτιστοποίησης του συστήματος αυτόματου ελέγχου, τα οποία βρίσκονται ακόμα σε αναπτυσσόμενο στάδιο.

### **Ομαδοποίηση με Βάση την Ωριμότητα**

Η εκτίμηση της ωριμότητας των γεωργικών προϊόντων και η επιλογή των κατάλληλων μεθόδων συντήρησης αποτελούν τις προϋποθέσεις για να απολαμβάνουν οι καταναλωτές φρέσκα γεωργικά προϊόντα. Η διαδικασία ωρίμανσης των φρούτων συνοδεύεται συνήθως από αλλαγές στο χρώμα, το άρωμα, την υφή και το σχήμα. Οι αλλαγές αυτές είναι συνήθως σταδιακές, διακριτικές και μη αντιληπτές από τον άνθρωπο. Η χρήση τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να αντιληφθεί γρήγορα και με ακρίβεια αυτές τις αλλαγές που δεν είναι προφανείς στα μάτια των ανθρώπων, ώστε να κρίνει την ωριμότητα και τη φθορά των γεωργικών προϊόντων. Χρησιμοποιώντας τεχνητή νοημοσύνη, οι ερευνητές έχουν προτείνει διάφορες μεθόδους ανίχνευσης της ωριμότητας των φρούτων με βάση τον ήχο, το φως, το χρώμα και τη γεύση σε συνδυασμό με ευφυείς αλγόριθμους [199]. Η μέθοδος ανίχνευσης της ωριμότητας φρούτων με χρήση ακουστικών δονήσεων [200] αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα των προαναφερθέντων μεθόδων που βασίζονται στον ήχο- οι μέθοδοι ανίχνευσης με βάση το φως περιλαμβάνουν κυρίως φασματική τεχνολογία και τεχνολογία υπερφασματικής απεικόνισης [201]- οι μέθοδοι ανίχνευσης της ωρίμανσης φρούτων με βάση το χρώμα χρησιμοποιούν τεχνολογία εξαγωγής χαρακτηριστικών χρώματος [202] και δεν υπάρχει αμφιβολία ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν την ηλεκτρονική μύτη (electronic nose) [203] αποτελούν παράδειγμα προσέγγισης με βάση τη γεύση. Σε αυτό το στάδιο, η φασματική τεχνολογία και η τεχνολογία υπερφασματικής απεικόνισης εξακολουθούν να αποτελούν την επικρατούσα τάση. Ωστόσο, ο ακριβός εξοπλισμός περιορίζει την εφαρμογή και την ανάπτυξή τους σε μεγάλη κλίμακα, και η εκτίμηση της ωριμότητας των φρούτων με βάση φωτοδιόδους χαμηλού κόστους [204] μπορεί να γίνει μια πιο δημοφιλής κατεύθυνση στο μέλλον.



*Εικόνα 3.3.11 – Διαδικασία Διαχωρισμού Με Βάση το Χρώμα [205]*

### **Ποιοτικός Έλεγχος**

Η ποιότητα και η ασφάλεια των γεωργικών προϊόντων σχετίζονται άμεσα με την υγεία των ανθρώπων και ο έλεγχος της ποιότητάς τους χωρίζεται κυρίως σε δύο κατηγορίες: τον έλεγχο της περιεκτικότητας των συστατικών και τον έλεγχο των ζημιών. Αρχικά, για την ανίχνευση της περιεκτικότητας σε συστατικά, ο ευκολότερος τρόπος είναι να ανοιχτεί και να δεχθεί χημικό έλεγχο. Ωστόσο, λόγω της προστασίας των τροφίμων από χημικά και της βιώσιμης γεωργίας, τα τελευταία χρόνια, οι άνθρωποι επιδιώκουν τη φυσική μη καταστροφική δοκιμή. Λαμβάνοντας ως παράδειγμα την ανάλυση της γλυκύτητας των φρούτων, [206] χρησιμοποιείται ένα απλό φασματοσκοπικό σύστημα με έναν ταξινομητή βασισμένο στη μηχανική μάθηση που αναπτύχθηκε και εκπαιδεύτηκε για την ανίχνευση της γλυκύτητας των μήλων, με μέγιστη ακρίβεια 91,5% [207]. Σε ένα άλλο παράδειγμα για ταξινόμηση με βάση την γλυκύτητα του μάνγκο εφαρμόστηκαν χαμηλού κόστους (VIS-NIR) πολυφασματικοί αισθητήρες και ταξινομητές τυχαίου δάσους (RF). Επίσης, η μη καταστροφική ανίχνευση ζημιών στα φρούτα έχει μεγάλη σημασία καθώς η



ζημία των γεωργικών προϊόντων διακρίνεται σε εσωτερική ζημία και επιφανειακή ζημία. Η επιφανειακή ζημία μπορεί να ταξινομηθεί ως ταξινόμηση εμφάνισης των γεωργικών προϊόντων, οπότε η εσωτερική ζημία εισάγεται κυρίως εδώ. Οι παραδοσιακές φυσικές μέθοδοι περιλαμβάνουν τον μαγνητικό συντονισμό απεικόνισης (magnetic resonance imaging) [208], τον ακουστικό εντοπισμό [209], την τομογραφία με χρήση υπολογιστή [210] και λοιπά. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι είναι είτε πολύπλοκες στη λειτουργία, είτε ακριβές, είτε δεν είναι συμβατές με διαφορετικά είδη

φρούτων, οπότε δεν είναι κατάλληλες για παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές έχουν προτείνει την εφαρμογή αλγορίθμου βαθιάς μάθησης. Μόνο με τον προσδιορισμό της εσωτερικής ζημίας ενός μικρού αριθμού δειγμάτων για την εκπαίδευση του μοντέλου ταξινόμησης, η μηχανή μπορεί να προβλέψει γρήγορα και αξιόπιστα την ποιότητα ενός μεγάλου αριθμού φρούτων. Για παράδειγμα στη μη καταστροφική ανίχνευση των μαραμένων πυρήνων σε ξεφλουδισμένα καρύδια, [211] χρησιμοποιήθηκαν εικόνες καρυδιών και πληροφορίες βάρους σε συνδυασμό με την εκπαίδευση του αλγορίθμου μηχανικής μάθησης και επιτεύχθηκε ακρίβεια ταξινόμησης 97% με μόνο 0,001 μέσο χρόνο υπολογισμού.



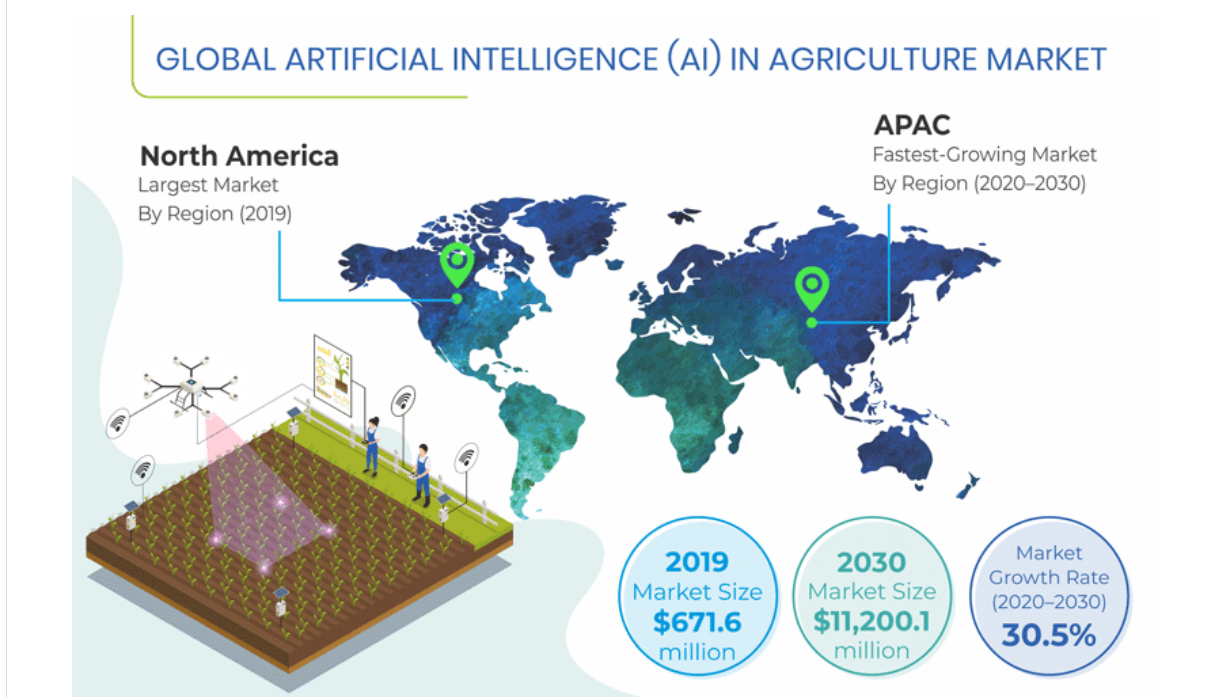
Εικόνα 3.3.12 – Διαδικασία Ελέγχου Ποιότητας με Χρήση Μηχανικής Μάθησης [212]

## Πωλήσεις Αγροτικών Προϊόντων

Η τελική εργασία των μεταπαραγωγικών σταδίων της γεωργίας είναι η πώληση των γεωργικών προϊόντων, τα οποία πρέπει να υποστούν επεξεργασία, συσκευασία, μεταφορά και πώληση. Κατά τη διαδικασία μεταφοράς, τα περισσότερα γεωργικά προϊόντα είναι ευάλωτα, γεγονός που οδηγεί αναπόφευκτα σε ορισμένες απώλειες. Οι άνθρωποι βασίζονται στην IoT ραδιοσυχνότητας τεχνολογία αναγνώρισης, μέσω της οποίας αποκτούν δυναμικά πληροφορίες για το προϊόν, έτσι ώστε οι διαχειριστές να μπορούν να παρακολουθούν ολόκληρη τη διαδικασία μεταφοράς σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να σχεδιαστεί αποτελεσματικά η ποσότητα αποθήκευσης και μεταφοράς του προϊόντος, να μειωθούν οι λειτουργικές δαπάνες και να αποφευχθούν οι απώλειες μεταφοράς.

Στην διαδικασία των πωλήσεων, η τεχνολογία τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να εφαρμοστεί για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την παραγωγή, την κατανάλωση, την αποθήκευση και την κυκλοφορία και τη σε βάθος ανάλυση ολόκληρης της αγοράς. Μπορεί να κατανοήσει αποτελεσματικά το τρέχον επίπεδο της γεωργικής ανάπτυξης, να αποτρέψει την απότομη

άνοδο ή πτώση και να προωθήσει πιο σταθερές συναλλαγές προϊόντων. Επιπλέον, το ηλεκτρονικό μάρκετινγκ εμπορίου για κινητά ή ηλεκτρονικούς υπολογιστές με εφαρμογές που έχουν κατασκευαστεί από τεχνητή νοημοσύνη και τεχνολογία IoT μπορεί να μεγιστοποιήσει την αποτελεσματικότητα των πόρων πληροφόρησης, να συμβάλει στην μείωση του κόστους παραγωγής και τη βελτίωση της σχέσης μεταξύ προμηθευτών και καταναλωτών. Ταυτόχρονα, με βάση IoT και την τεχνολογία κινητών δικτύων [213], η διαχείριση των πληροφοριών της διαδικασίας παραγωγής και κυκλοφορίας γεωργικών προϊόντων, η διαχείριση της ιχνηλασιμότητας της ποιότητας των γεωργικών προϊόντων [214], η διαχείριση των αρχείων παραγωγής γεωργικών προϊόντων (περιβάλλον προέλευσης, διαδικασία παραγωγής και ανίχνευση ποιότητας) και η δημιουργία συστήματος ιχνηλασιμότητας ποιότητας και ασφάλειας γεωργικών προϊόντων με βάση ιστοτιόπους και πλατφόρμες κινητής τηλεφωνίας [215] μπορούν να κάνουν εφικτή την ιχνηλασιμότητα ολόκληρης της ποιότητας και ασφάλειας των γεωργικών προϊόντων.



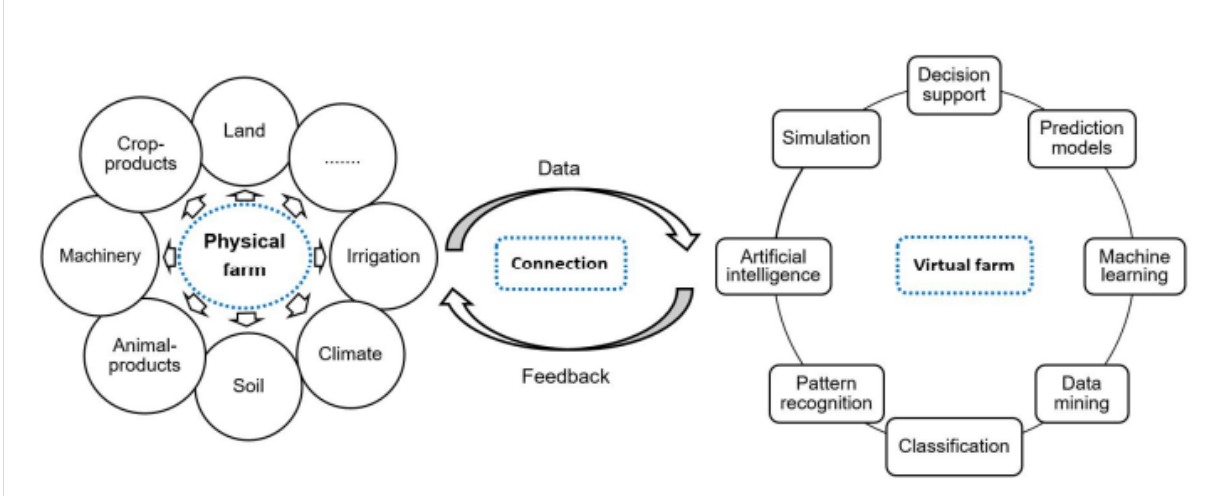
Εικόνα 3.3.13 – Απεικόνιση Τεχνητής Νοημοσύνης στον Αγροτικό Τομέα [216]

## **Κεφάλαιο 4ο: Εφαρμογή Digital Twin στον Γεωργικό Τομέα**

### **4.1 Βασικά Στοιχεία και Αρχιτεκτονική Ψηφιακού Δίδυμου**

Το πιο τυπικό και ευρέως αποδεκτό πλαίσιο ενός DT εξακολουθεί να αποτελείται από τρία κύρια μέρη: "φυσικός χώρος", "εικονικός χώρος" και "συνδέσεις μεταξύ αυτών των χώρων" [218]. Μεταξύ αυτών, ο φυσικός χώρος περιλαμβάνει φυσικά υλικά, αισθητήρες και ενεργοποιητές- ο εικονικός χώρος περιλαμβάνει πολυφυσικά, πολυκλιμακωτά, πιθανοτικά μοντέλα προσομοίωσης- και η σύνδεση μεταξύ τους επιτρέπει την μεταφορά δεδομένων μεταξύ των δύο. Με τη συνεχή επέκταση και αναβάθμιση των απαιτήσεων των εφαρμογών, τα DT αντιμετωπίζουν περισσότερες απαιτήσεις υπηρεσιών από διαφορετικούς τομείς, διαφορετικά επίπεδα χρηστών και διαφορετικές υπηρεσίες [219]. Ταυτόχρονα, η διασύνδεση όλων των πραγμάτων παρέχει τις προϋποθέσεις για την υλοποίηση της φυσικής αλληλεπίδρασης πληροφοριών και της ολοκλήρωσης δεδομένων του DT. Για να

διευκολυνθούν περαιτέρω εφαρμογές του DT σε περισσότερους τομείς, οι ερευνητές έχουν επεκτείνει το πλαίσιο DT τριών συνιστωσών. [220] Προστέθηκαν στο αρχικό πλαίσιο οι ενότητες "DT data fusion" και "service system", οι οποίες έχουν μόνο "φυσικό χώρο" και "εικονικό χώρο", και η σύνδεση μεταξύ τους επεκτάθηκε επίσης αναλόγως. Έχει προταθεί επίσης ένα πλαίσιο έξι συνιστωσών το οποίο αποτελείται από πέντε συνιστώσες ενεργοποίησης και μια διαδικασία έξι βημάτων. Το έργο τους ενσωματώνει τον "φυσικό χώρο" και τον "εικονικό χώρο": Οι "αισθητήρες" και οι "ενεργοποιητές" στα στοιχεία ενεργοποίησης, καθώς και οι διαδικασίες "ενέργειας", "δημιουργίας" και "επικοινωνίας" ανήκουν στον φυσικό χώρο, ενώ τα στοιχεία ενεργοποίησης "δεδομένα" και "ανάλυση", καθώς και οι διαδικασίες "άθροισης", "ανάλυσης" και "διορατικότητας" ανήκουν στον εικονικό χώρο. Ο ρόλος της "ολοκλήρωσης" είναι η σύνδεση του φυσικού και του εικονικού κόσμου.



Εικόνα 4.1.1 – Σχηματική Απεικόνιση Ψηφιακού Διδύμου στον Αγροτικό Τομέα [217]

Τα ψηφιακά δίδυμα υπάρχουν σε εικονική μορφή, η οποία δεν μπορεί μόνο να αντανακλά τα χαρακτηριστικά, τη διαδικασία συμπεριφοράς και απόδοσης των φυσικών αντικειμένων με ιδιαίτερα ρεαλιστικό τρόπο, αλλά και την παρακολούθηση, την αξιολόγηση σε πραγματικό χρόνο, και διαχείριση σε σουρεαλιστική μορφή. Η ικανότητά του να παρουσιάζει ένα σουρεαλιστικό είδωλο του αντικειμένου-στόχου φυσικής οντότητας βασίζεται στην υποστήριξη των ακόλουθων τεχνολογιών: υπολογιστές υψηλών επιδόσεων, προηγμένους αισθητήρες, ψηφιακή προσομοίωση, μοντελοποίηση υψηλής πιστότητας, ευφυής ανάλυση δεδομένων, παρουσίαση εικονικής πραγματικότητας κ.λπ. Με την κατασκευή ψηφιακών διδύμων, όχι μόνο η κατάσταση της υγείας της οντότητας-στόχου μπορεί να περιγραφεί τέλεια και σχολαστικά, αλλά και η βαθιά, πολυδιάστατη και πιθανολογική δυναμική αξιολόγηση της κατάστασης, η πρόβλεψη της ζωής και η ανάλυση του ρυθμού ολοκλήρωσης των εργασιών μπορούν να πραγματοποιηθούν μέσω της ενσωμάτωσης των δεδομένων και την ανάλυσή τους. Μέσω της συνεργασίας με την τεχνητή νοημοσύνη, το Διαδίκτυο, το Cloud Computing, την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων, και άλλων τεχνολογιών, το DT έχει δυναμική αξία εφαρμογής σε πολλούς τομείς που αφορούν τη χαρτογράφηση του φυσικού και εικονικού χώρου, τη σύντηξη και τη συνεργατική εξέλιξη. Το DT μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς, όπως η έξυπνη πόλη, οι κατασκευές, η ιατρική περίθαλψη, η γεωργία, οι εμπορευματικές μεταφορές, οι πλατφόρμες γεώτρησης, τα αυτοκίνητα, την αεροδιαστημική, και άλλα.

## 4.2 Εφαρμογές Digital Twin στην Γεωργία Ακριβείας

### Digital Twin για το Έδαφος και την Άρδευση

Η παρακολούθηση και η αξιολόγηση της ποιότητας του εδάφους για τη διατήρηση της παραγωγικότητας των φυτών αποτελεί τη βάση της στρατηγικής χρήσης της γης στις γεωργικές καλλιέργειες [221]. Η υγεία και η παραγωγικότητα των καλλιεργειών εξαρτάται από την ποιότητα και τις ιδιότητες του εδάφους. Λεπτομερέστερες πληροφορίες σχετικά με το γεωργικό έδαφος μπορεί να μειώσει την πιθανή χρήση χημικών λιπασμάτων και δόσεων φυτοφαρμάκων, επομένως βελτίωση των υπόγειων υδάτων, προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας.



*Εικόνα 4.2.1 – Απεικόνιση Συστήματος Άρδευσης [228]*

Επίσης υποστηρίζει τον καθορισμό της πυκνότητας των φυτών με πιο αποτελεσματικό τρόπο. Οι ψηφιακές τεχνολογίες σύμφωνα με τις τελευταίες έρευνες είναι σε θέση να κατανοήσουν και να μελετήσουν ολόένα και καλύτερα το έδαφος στη γεωργία. Οι αισθητήρες παρακολούθησης του εδάφους, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία, τα συστατικά και οι αισθητήρες ρύπων στο έδαφος παίζουν κρίσιμο ρόλο στην ψηφιακή γεωργία [222]. Για παράδειγμα, οι πληροφορίες για την υγρασία του εδάφους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της

άρδευσης σε γεωργικά χωράφια [223]. Επιπλέον, για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων της έξυπνης γεωργίας, η ψηφιακή χαρτογράφηση του εδάφους είναι σημαντική καθώς μπορεί να προσφέρει χωρικές πληροφορίες για το έδαφος με βάση επιτόπιες και εργαστηριακές έρευνες σε συνδυασμό με συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων για το έδαφος [224]. Οι προσεγγίσεις ψηφιακής εκτίμησης του εδάφους έχουν άμεσο αντίκτυπο στην απόδοση και την απόδοση των καλλιεργειών με τον εντοπισμό ζωνών που μπορεί να προκαλέσουν χαμηλή απόδοση των καλλιεργειών. Ψηφιακές εναλλακτικές μεθοδολογίες για την έρευνα του εδάφους και τον προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών του εδάφους θα μπορούσαν να έχουν τη δυνατότητα να ποσοτικοποιήσουν την τάση των γεωργικών εδαφικών συνθηκών [225].

Η πρόοδος της γνώσης και της τεχνολογίας (π.χ. ασύρματοι αισθητήρες, IoT, AI) στην ψηφιακή γεωργία θα μπορούσε να οδηγήσει σε ψηφιακά δίδυμα του εδάφους στη γεωργία. Η πρόσφατη ανάπτυξη των τεχνικών ψηφιακής χαρτογράφησης του εδάφους μπορεί να υποστηρίξει τα ψηφιακά δίδυμα με ψηφιακή αναπαράσταση της γνώσης που λαμβάνεται από το έδαφος με εικονικά μέσα [226]. Για παράδειγμα, η ψηφιακή χαρτογράφηση του εδάφους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της ποικιλίας του εδάφους σε ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιώντας πληροφορίες από σύνθετες εδαφικές μεταβολές σε συγκεκριμένο βάθος, χρόνο και ειδικές τοποθεσίες [225].

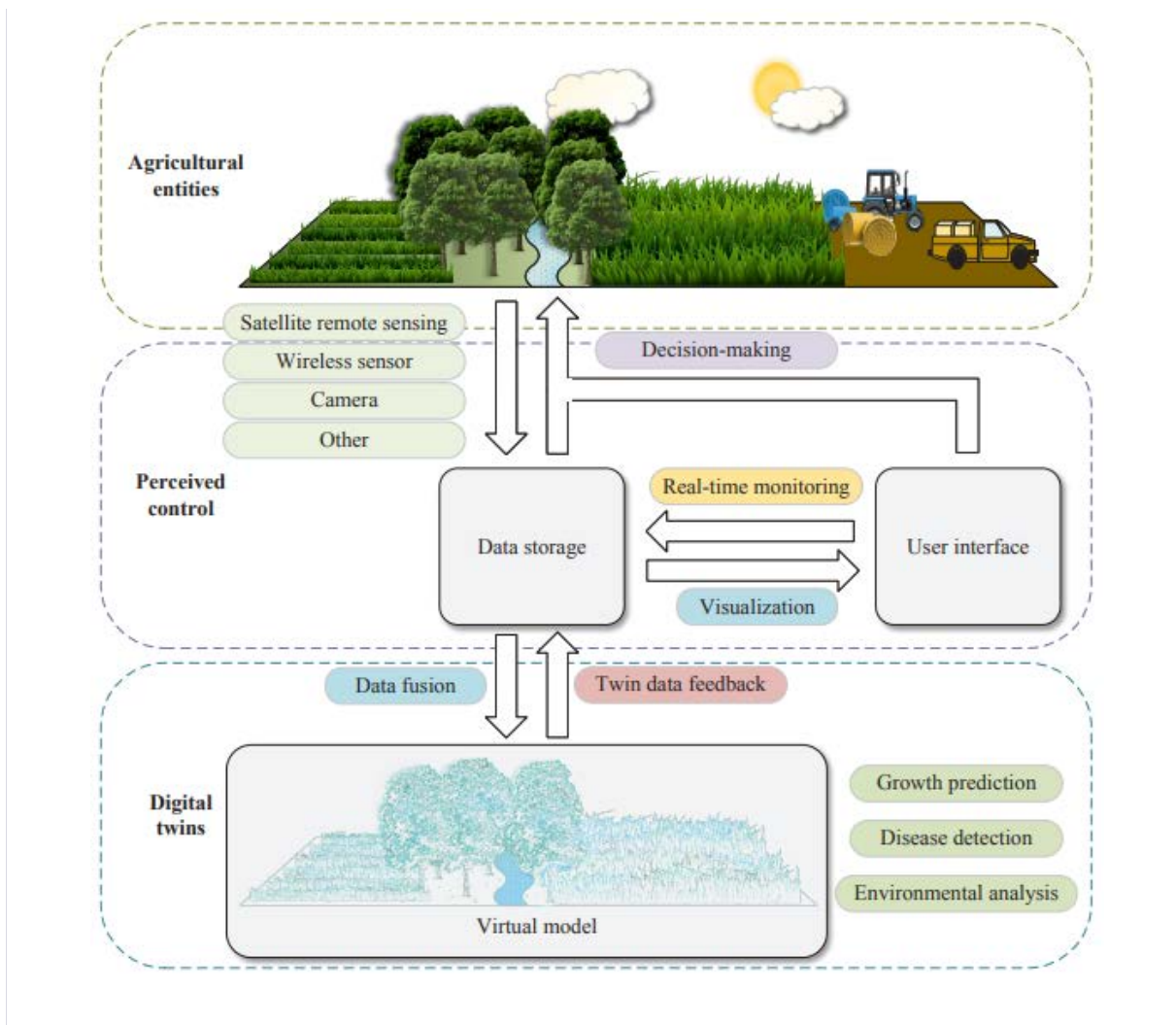
Για τη διαχείριση του εδάφους και της καλλιέργειας στην έξυπνη γεωργία, έχουν χρησιμοποιηθεί ψηφιακές τεχνολογίες για την κάλυψη των απαιτήσεων σχετικά με την ποιότητα του νερού άρδευσης, τις ιδιότητες του εδάφους και τη διαθεσιμότητα του νερού. Ασύρματα δίκτυα συστημάτων, IoT, edgecomputing, τοπικοί ελεγκτές με βάση τις καιρικές



συνθήκες και αισθητήρες εδάφους είναι μερικά από τα ψηφιακά εργαλεία που βασίζονται σε έξυπνα συστήματα άρδευσης. Τα αναφερόμενα εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ψηφιακό δίδυμο του εδάφους και των συστημάτων άρδευσης. Για παράδειγμα, [227] αναπτύχθηκε μια έννοια ψηφιακού διδύμου για έξυπνη διαχείριση του νερού στον γεωργικό τομέα. Πληροφορίες για τη θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους, της υγρασίας, της υγρασίας του εδάφους και του φωτισμού του περιβάλλοντος, καθώς και της γεωχωρικής θέσης συλλέγονται από αισθητήρες τοποθετημένους σε σημαντικές γεωργικές θέσεις. Ένα σύστημα IoT χρησιμοποιήθηκε για τη σύνδεση του νέφους και του φυσικού συστήματος. Σχεδιάστηκε ένα εικονικό περιβάλλον που περιλαμβάνει εργαλεία και μοντέλα λήψης αποφάσεων για να ενημερώνει τα δεδομένα που συλλέγονται από τη συσκευή σύνδεσης (το σύστημα IoT) και να στέλνει ανατροφοδότηση στο φυσικό σύστημα. Παρουσιάστηκε επίσης μια αρχιτεκτονική συστήματος ψηφιακού διδύμου που περιλαμβάνει συσκευές παρακολούθησης (π.χ. ανιχνευτής εδάφους, πληροφορίες για τις καιρικές συνθήκες, σύστημα άρδευσης, μηχανήματα, και άλλος εξοπλισμός) σε ένα φυσικό σύστημα (αγρόκτημα) που θα μπορούσε να χρησιμεύσει ως σύνδεση μεταξύ το φυσικό και το εικονικό σύστημα για την απεικόνιση δορυφορικών εικόνων και εικόνων από μη επανδρωμένα αεροσκάφη.

Σε άλλες μελέτες, για την αξιολόγηση και την πρόβλεψη των αναγκών των φυτών σε άρδευση και την υποστήριξη του σχεδιασμού άρδευσης και διανομής νερού, ένα digital twin για έξυπνη διαχείριση νερού αναπτύχθηκε από την [229]. Δεδομένα του φυσικού κόσμου (γεωργικός αγρός), όπως ο καιρός, τα λιπάσματα και ο τύπος του εδάφους, καθώς και πληροφορίες από αναπτυγμένα μοντέλα που προσομοιώνουν την συμπεριφορά του εδάφους και των καλλιεργειών θεωρήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για τον ψηφιακό δίδυμο. Το ψηφιακό δίδυμο αποτελείται επίσης από έναν πράκτορα εδάφους (soil agent) (περιλαμβάνει υδρολογικά μοντέλα και δεδομένα εδάφους), Crop Agent (περιλαμβάνει μοντέλα καλλιεργειών και δεδομένα εξάτμισης), και ένα Field Avatar, το οποίο είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση του αγρού, όπως γεωλογικά μοντέλα και δεδομένα καιρού [229]. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι πληροφορίες από το Soil Avatar και το Crop Avatar τροφοδοτούν το Field Avatar, και ένα σύστημα IoT χρησιμοποιείται για τον μετασχηματισμό των δεδομένων και τη σύνδεση μεταξύ του φυσικού και του εικονικού κόσμου.

Λόγω της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού, η διαχείριση του νερού και της ενέργειας, η αποθήκευση και η σωστή διανομή του νερού καθίστανται πιο σημαντικές για τους χρήστες νερού στους γεωργικούς τομείς, οι οποίες μπορούν να το διαχειρίζονται μέσω ενός συλλογικού συστήματος άρδευσης [230]. Ένα ψηφιακό δίδυμο των συστημάτων ύδρευσης σε συνδυασμό με μεγάλα δεδομένα μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο και την αβεβαιότητα της διαχείρισης του νερού, να διερευνήσει πρότυπα κατανάλωσης και να βελτιστοποιήσει τον προγραμματισμό λειτουργίας [231]. Επιπλέον, σε ένα συλλογικό σύστημα άρδευσης, η βελτίωση της αποδοτικότητας του νερού θα μπορούσε να συμβάλει στη μείωση των απωλειών νερού. Σε αυτό πλαίσιο, δημιουργήθηκε μια έννοια ψηφιακού διδύμου με τη χρήση επιτόπιων και εργαστηριακών δοκιμών ενός συλλογικού δικτύου αρδευτικού συστήματος για την αξιολόγηση της ενέργειας, των εγκαταστάσεων άντλησης, των απωλειών νερού και της χρήσης νερού με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα [232]. Η μεθοδολογία του ψηφιακού διδύμου που αναπτύχθηκε βασίστηκε σε πληροφορίες από το φυσικό σύστημα, δηλαδή δεδομένα από την υποδομή, αποκτηθείσες πληροφορίες μέσω τηλεμετρίας, δεδομένα και αναλύσεις από εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις πεδίου, δεδομένα IoT, ενεργειακού ισοζυγίου, υδατικού ισοζυγίου και υδραυλικού μοντέλου στο εικονικό σύστημα. Διαπιστώθηκε ότι το ψηφιακό δίδυμο του συστήματος διαχείρισης άρδευσης κατέστησε δυνατή την κατανόηση των διαδικασιών του συστήματος, τη συντήρηση και τις στρατηγικές διαχείρισης [231].



Εικόνα 4.2.2 – Σχηματικό Διάγραμμα Ψηφιακού Διδύμου στην Γεωργία Ακριβείας [11]

Ένα ψηφιακό δίδυμο των συστημάτων εδάφους και άρδευσης στην έξυπνη γεωργία επιτρέπει την ψηφιακή αναπαράσταση των πληροφοριών από το γεωργικό έδαφος και παρέχει προβλέψεις και θεμελιώδη κατανόηση των απαιτήσεων σε νερό και των συστατικών του εδάφους για τη γεωργία. Ανταλλαγή πληροφοριών από το έδαφος ως φυσικό σύστημα σε ένα εικονικό σύστημα με τη χρήση IoT, cloud, fog, και τεχνολογιών υπολογισμού στο ψηφιακό δίδυμο μπορεί να επιτρέψει την αξιολόγηση της κατάστασης του εδάφους και των συστημάτων άρδευσης. Ειδικότερα, η τεχνική υπολογισμού που αποθηκεύει και εκτελεί την επεξεργασία δεδομένων κοντά στις συσκευές παρακολούθησης του εδάφους και τις συσκευές άρδευσης μπορεί να βελτιώσει την απόδοση και να ξεπεράσει τα προβλήματα του συστήματος που ίσως υπάρχουν σε ένα cloud-based σύστημα. Επιπλέον, θα μπορούσε να προσφέρει διαφορετικές προτάσεις άρδευσης με βάση τις απαιτήσεις της καλλιέργειας οι οποίες δεν έχουν επιλυθεί ακόμη από τους ερευνητές.

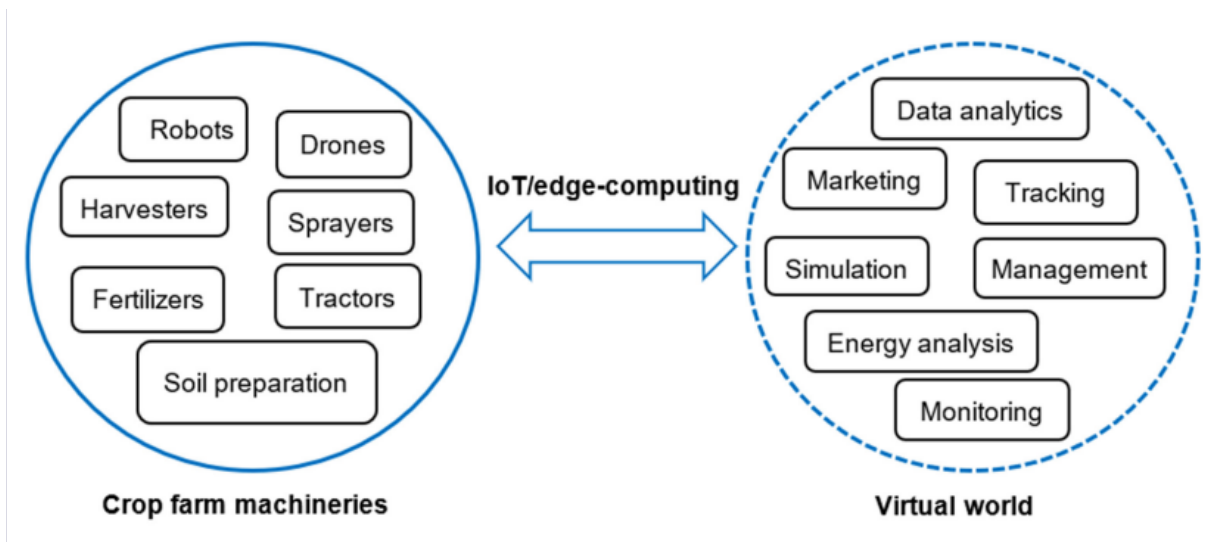
### Digital Twin για την Παραγωγή Σοδειάς

Η χρήση ψηφιακών και ICT (infrastructures like computers) εργαλείων στις τεχνολογίες παραγωγής καλλιεργείων, ιδίως των γεωργικών μηχανημάτων, π.χ. τρακτέρ, θεριζοαλωνιστικές μηχανές, λιπάσματα και ψεκαστήρες, παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση



της συνολικής αποδοτικότητας με τη μείωση του κόστους των καυσίμων, των λιπασμάτων, της ανθρώπινης εργασίας και των παραμέτρων που επηρεάζουν την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα της παραγωγής [233]. Η ψηφιοποίηση έχει εκσυγχρονίσει τις πολιτικές εφαρμογής και διαχείρισης των γεωργικών μηχανημάτων με τη χρήση συλλεγόμενων πληροφοριών και προηγμένων προσεγγίσεων ανάλυσης δεδομένων. Επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την ενίσχυση της χρήσης προηγμένων εργαλείων στην παραγωγή. Για παράδειγμα, με βάση την Ευρωπαϊκή Ένωση Γεωργικών Μηχανημάτων, ένα ψηφιακό γεωργικό μηχάνημα θα πρέπει να μπορεί να βοηθά και να υποστηρίζει τους οδηγούς στέλνοντας και λαμβάνοντας δεδομένα μέσω αισθητήρων και ICT εργαλείων, να επιτρέπει την καλύτερη και βέλτιστη χρήση των μηχανημάτων και η τεχνολογία θα πρέπει να υποστηρίζει την αυτοματοποιημένη λειτουργία των συσκευών [234].

Η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης, της ανάλυσης μεγάλων δεδομένων, των ασύρματων τεχνολογιών και των τεχνολογιών IoT έχουν οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές στον ρόλο της τεχνολογίας των γεωργικών εκμεταλλεύσεων προς την κατεύθυνση της ανάπτυξης αυτόνομων συστημάτων. Ο ρόλος των γεωργικών μηχανημάτων στην εφαρμογή της ψηφιακής γεωργίας αναφέρθηκε από το [232], καθώς δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες σε τυπικά και αυτόνομα γεωργικά μηχανήματα και μεταφέρονται μέσω ενός IoT δικτύου. Στη συνέχεια, οι πληροφορίες αναλύονται με ανάλυση, όπως τεχνητή νοημοσύνη, η ασαφής λογική, και ανάλυση μεγάλων δεδομένων για την υποστήριξη των αγροτών, των καταναλωτών και των αγορών [233]. Σε αυτό το πλαίσιο, ο συνδυασμός ψηφιακών εργαλείων με αυτόνομα μηχανήματα και ρομπότ θα μπορούσε να βοηθήσει τους αγρότες να κάνουν αποτελεσματικότερες πρακτικές και να βελτιώσουν την ποιότητα των προϊόντων [235]. Σήμερα, με την πρόοδο της ψηφιακής τεχνολογίας, η απεικόνιση σε πραγματικό χρόνο των συνθηκών του έξυπνου γεωργικού εξοπλισμού είναι δυνατή μέσω προσεγγίσεων ψηφιακού διδύμου [236]. Επιτρέπει την επαφή με το σύστημα (π.χ. μηχανήματα και ρομπότ), προσομοιώνει την κατάσταση του συστήματος και παρακολουθεί την συμπεριφορά και τη λειτουργία, καθώς και την κατάσταση συντήρησης των μηχανημάτων. Παρατηρούμε στην εικόνα 4.2.3 σχηματική αναπαράσταση ενός Digital Twin για την χρήση αγροτικών μηχανών.



Εικόνα 4.2.3 – Αρχιτεκτονική ενός DT με εφαρμογή σε Γεωργικές Τεχνολογίες [217]

Το digital twin στον σχεδιασμό και στην κατασκευή προϊόντων, όπως αγροτικά μηχανήματα, απαιτεί:

- Τις γεωμετρικές και φυσικές διαστάσεις του αντικειμένου (σχήμα, μέγεθος ,κ.α.)
- Λεπτομερείς πληροφορίες του προϊόντος για να είναι δυνατή η δυναμική απεικόνιση του αντικειμένου
- Ενσωμάτωση των γεωμετρικών και φυσικών πληροφοριών[237]

Τα DT δίνουν την δυνατότητα για μοντελοποίηση, σχεδιασμό, προσομοίωση και ανάπτυξη αγροτικών μηχανημάτων για την καλύτερη παραγωγικότητα και αποδοτικότητα, όσον αφορά την ενέργεια και την ισχύ που απαιτούνται για την λειτουργία τους. Για παράδειγμα, έχει αποδειχτεί πως η ολική ενέργεια που καταναλώνεται από τις μηχανές μπορεί να μοντελοποιηθεί σε επίπεδο ψηφιακού διδύμου, και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ενέργεια μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω. Στο γεωργικό πλαίσιο, [236] αναφέρεται ότι μια εμπορική [237] ανέφερε ότι μια εμπορική σε πραγματικό χρόνο, να παρακολουθεί την κατανάλωση ενέργειας, την οικονομική αποδοτικότητα της διαχείρισης των καλλιεργειών, και τις τροχιές των τρακτέρ λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές συνθήκες του αγροκτήματος. Έχει επίσης αναφερθεί ότι η χρήση ψηφιακών διδύμων θα μπορούσε ενδεχομένως να επηρεάσει την εκπαίδευση των ανειδίκευτων χειριστών θεριζοαλωνιστικών μηχανών και να οδηγήσει σε υψηλά μακροοικονομικά οφέλη [238].

Στο πλαίσιο των τεχνολογιών ψηφιακής γεωργίας, η ρομποτική, ως μια σημαντική τεχνολογία στις καλλιέργειες παραγωγής, έχει παίξει ουσιαστικό ρόλο στην ψηφιοποίηση και προσελκύει όλο και περισσότερη προσοχή τα τελευταία χρόνια. Για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας εφαρμογής της ρομποτικής, τη μείωση του κόστους και την αύξηση της ποιότητας και της αποδοτικότητας του προϊόντος, οι έννοιες του ψηφιακού διδύμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εικονικοποίηση του περιβάλλοντος του ρομπότ με την εισαγωγή ενός απομακρυσμένου λειτουργικού συστήματος [239]. Παρέχοντας δυνατότητες προσομοίωσης και απομακρυσμένης λειτουργίας και μοντελοποιώντας διάφορες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ρομπότ και του περιβάλλοντος με χρήση ψηφιακού διδύμου, η ακρίβεια, η απόδοση, και η ευελιξία μπορούν να ενισχυθούν και το κόστος του τελικού προϊόντος μπορεί να μειωθεί. [65]Έχουν αναλυθεί [240] αναλύθηκε αλληλεπιδραστικές συμπεριφορές ανθρώπου-ρομπότ

χρησιμοποιώντας μια πλατφόρμα ψηφιακών διδύμων. Το αναπτυγμένο από αυτούς DT συμβάλλει στη βελτίωση της λειτουργικής παραγωγικότητας και της άνεσης. Σε μια άλλη μελέτη, μια προσέγγιση ψηφιακού διδύμου προτάθηκε για να βοηθήσει τον απομακρυσμένο προγραμματισμό ενός ρομπότ [241]. Το σύστημα ψηφιακού διδύμου που αναπτύχθηκε αποτελείται από ένα ρομπότ (ως φυσικό αντικείμενο) και μια πλατφόρμα παιχνιδιών (ως εικονικό σύστημα) η οποία ήταν σε θέση να παρατηρεί την κίνηση του ρομπότ, να διευκολύνει τον προγραμματισμό σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, καθώς και να εισάγει ένα απομακρυσμένο λειτουργικό σύστημα για την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών πλατφορμών [242].

Στο γεωργικό πλαίσιο, μια προσέγγιση συστήθηκε από το [244] ότι η ανάπτυξη ενός συστήματος ψηφιακών διδύμων για τα γεωργικά ρομπότ μπορεί να βελτιώσει την προβλεπτική εξομίωση των οχημάτων, τον επιχειρησιακό προγραμματισμό, την ψηφιοποίηση, την οικονομική, περιβαλλοντική και κοινωνική βιωσιμότητα στη γεωργία. Επιπλέον, το ψηφιακό δίδυμο καθιστά δυνατή την αντιμετώπιση των κοινών προκλήσεων στον έλεγχο των εξαρτημάτων των ρομπότ στον τομέα της γεωργίας. Σε αυτό το πλαίσιο, μια ερευνητική ομάδα απέδειξε την δυνατότητα εφαρμογής του ψηφιακού διδύμου για μια επιτραπέζια έκδοση ενός γεωργικού ρομπότ [245] για τον έλεγχο του κινητήρα και την δυνατότητα εντοπισμού του. Εκτός αυτού, το ψηφιακό δίδυμο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της κίνησης και την παρακολούθηση του μηχανισμού ασφαλείας του ρομπότ [245]. Ωστόσο, το DT που ανέπτυξαν χρειάζεται διαφόρων ειδών βαθμονομήσεις για να εφαρμοστεί σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες.

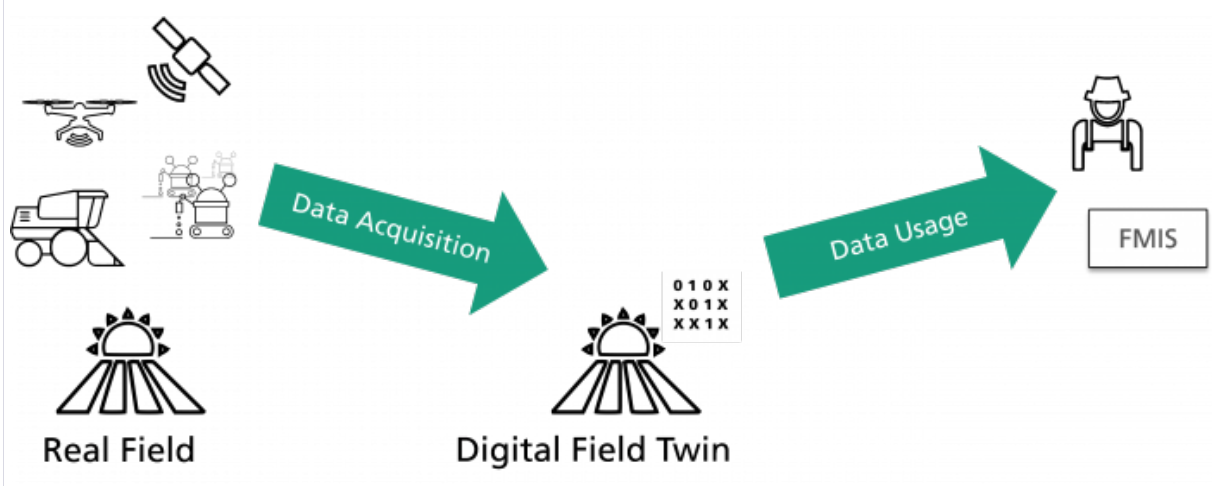


*Εικόνα 4.2.4 – Απεικόνιση Ενός Digital Twin σε Αγρόκτημα [243]*

Σε μια άλλη μελέτη, για την προσομοίωση της πολυπλοκότητας της διαδικασίας παραγωγής καλλιεργειών, της μεταβλητότητας των φυτών, του εδάφους, του περιβάλλοντος και των τεχνολογιών στον γεωργικό τομέα, εφαρμόστηκαν άλλες εφαρμογές του ψηφιακού διδύμου [246]. Τρία ρομπότ αγρού για διαφορετικές γεωργικές εφαρμογές χρησιμοποιήθηκαν για να αναπτυχθούν διαφορετικές μορφές ψηφιακού δίδυμου και να βελτιστοποιηθεί η αυτόνομη πλοήγηση με βάση αισθητήρες. Αναφέρεται ότι οι ιδέες που αναπτύχθηκαν θα μπορούσαν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την προετοιμασία πειραμάτων πεδίου και καλύτερη αξιολόγηση για τη χρήση και την τοποθέτηση των συστημάτων αισθητήρων προς την κατεύθυνση της επίδειξης και της εφαρμογής των ρομποτικών τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν [246]. Ενσωμάτωση των συστημάτων ψηφιακών διδύμων με τεχνολογίες και στρατηγικές διαχείρισης στη φυτική παραγωγή μπορεί να προσφέρει ένα νέο αέρα για την

ψηφιοποίηση στον γεωργικό τομέα.

Οι στρατηγικές διαχείρισης μπορούν να βελτιωθούν και να βελτιστοποιηθούν παρέχοντας αξιόπιστες προβλέψεις των βασικών παραμέτρων [247]. Τα συστήματα ψηφιακών διδύμων δεν μπορούν να λειτουργήσουν μόνο ως σύστημα διαχείρισης, αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να φέρουν επανάσταση στη διαχείριση των γεωργικών στρατηγικών [236]. Για παράδειγμα, η έννοια του ψηφιακού διδύμου εφαρμόστηκε σε ένα θερμοκήπιο για την ανίχνευση, ανάλυση και εξαγωγή της συμπεριφοράς των αγροτών [248]. Τα δεδομένα των αισθητήρων αναλύθηκαν με τη χρήση τεχνικών βαθιάς μάθησης για τη δημιουργία μοντέλων λήψης αποφάσεων για την αναπαραγωγή της εμπειρίας των εμπειρογνομόνων αγροτών και τη μεταφορά τους σε νέους αγρότες. Διαπιστώθηκε ότι η μονάδα ψηφιακού διδύμου που αναπτύχθηκε θα μπορούσε να βελτιώσει τις στρατηγικές ελέγχου και διαχείρισης στις καλλιέργειες [248]. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση κατανεμημένης αρχιτεκτονικής στο ψηφιακό δίδυμο μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία της μονάδας με τον κατάλληλο χειρισμό των πόρων [249]. Η έννοια του κατανεμημένου ψηφιακού διδύμου αναπτύχθηκε για το χειρισμό των πόρων από διαφορετικούς φορείς και πλατφόρμες στη γεωργία [250]. Αποτελείται από διαφορετικά στοιχεία, όπως είναι ενδιαφερόμενα μέρη, εφαρμογές στη γεωργία και τη διαχείριση γεωργικών εκμεταλλεύσεων, δεδομένα αισθητήρων, εργαλεία ανάλυσης και προσομοίωσης, εικονικό μοντέλο, IoT, και μητρώο πόρων, το οποίο καθιστά δυνατή τη διαλειτουργική και διακλαδική διαχείριση στο γεωργικό τοπίο [249].



Εικόνα 4.2.5 – Σχηματική Απεικόνιση Λειτουργίας ενός DT στον Γεωργικό τομέα [254]

Επιπλέον, η χρήση του συστήματος ψηφιακών διδύμων ως σύστημα λήψης αποφάσεων μπορεί να ωφελήσει και να υιοθετηθεί για εφαρμογές καλλιέργειών και βελτιστοποίησης των προϊόντων και του αγροτικού συστήματος με αποτέλεσμα αύξηση της απόδοσης. Ένα μοντέλο ψηφιακού διδύμου εφαρμόστηκε από τον [250] στη βιώσιμη γεωργία για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ποιότητας των προϊόντων, την προσαρμογή των περιβαλλοντικών συνθηκών, τον εντοπισμό προβλέψεων και σεναρίων λήψης αποφάσεων. Επιπλέον, μια νέα προσέγγιση βασισμένη σε παραδείγματα ψηφιακών διδύμων αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη της απόδοσης, της ποιότητας της βλάστησης, και της διάρκειας ανάπτυξης των φυτών [251]. Κατά συνέπεια, η ποιότητα της φυτικής παραγωγής θα μπορούσε να βελτιωθεί λόγω της λεπτομερούς ανάλυσης και του ελέγχου της ανάπτυξης των φυτών και της αποτελεσματικότητας των γεωργικών μονάδων θα μπορούσε να βελτιωθεί λόγω της αυτοματοποίησης των διαδικασιών λήψης αποφάσεων μέσω της αναπτυχθείσας έννοιας του



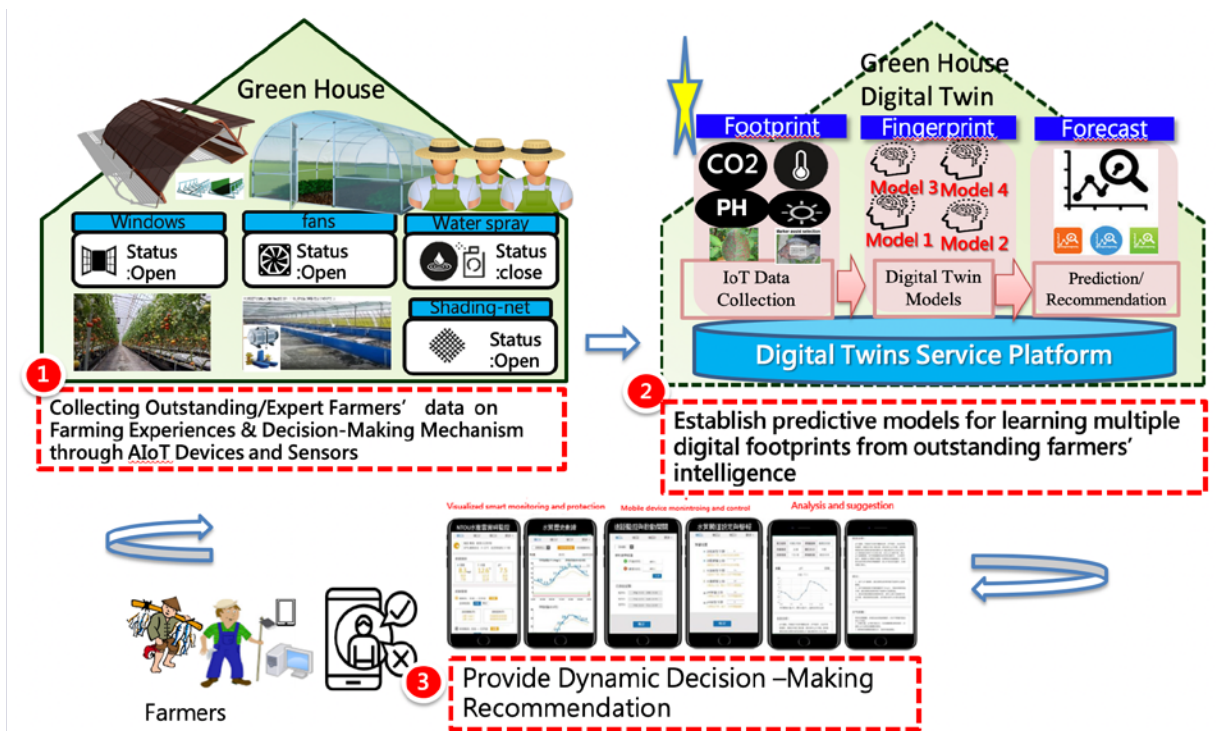
ψηφιακού δίδυμου. Το ψηφιακό δίδυμο μαζί με τα μοντέλα πρόβλεψης είναι σε θέση να παρέχουν ανατροφοδότηση στους αγρότες για ένα καλύτερο περιβάλλον λήψης αποφάσεων σε μια αναφερόμενη μελέτη [252]. Το προτεινόμενο από αυτούς σύστημα ψηφιακού δίδυμου αποτελείται από ένα σύστημα παρακολούθησης για τη συλλογή δεδομένων περιβαλλοντικών συνθηκών από ένα υπόγειο αγρόκτημα, καθώς και ανάλυση δεδομένων και τεχνικές μοντελοποίησης για τον εντοπισμό βασικών παραμέτρων, κρίσιμων τάσεων και πρόβλεψης λειτουργίας. Επιπλέον, το ψηφιακό δίδυμο ήταν σε θέση να βελτιστοποιήσει την παραγωγικότητα των καλλιεργειών σε ένα περιβάλλον θερμοκηπίου μέσω στρατηγικών ελέγχου του κλίματος και θεραπειών που σχετίζονται με διαχείριση των καλλιεργειών [253].

Οι πληροφορίες από τα μηχανήματα παραγωγής καλλιεργειών (π.χ. τρακτέρ, θεριζοαλωνιστικές μηχανές, ρομπότ) χρησιμοποιούνται στην έξυπνη γεωργία για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της αποδοτικότητας, τη μείωση των καυσίμων και την κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, τα DT συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από τις συσκευές και περιγράφουν συνεχώς τις καταστάσεις του φυσικού αντικειμένου. Αυτή η ικανότητα καθιστά δυνατή την πρόβλεψη και τη σύνταξη λύσεων με τη χρήση των πληροφοριών που συλλέγονται από τα γεωργικά μηχανήματα. Ως εκ τούτου, οι αναλύσεις μεγάλων δεδομένων σε συνδυασμό με μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης είναι σε θέση να ανιχνεύουν τις βλάβες στα μηχανήματα πριν ή σε πρώιμο στάδιο από την εκδήλωσή τους. Σε αυτό πλαίσιο, η χρήση σύγχρονων συστημάτων υπολογισμού μπορεί να μειώσει την καθυστέρηση που προκαλείται από τον περιορισμένο όγκο των μεταδιδόμενων δεδομένων και να παρέχουν πληροφορίες από τις μηχανές παραγωγής στην καλλιέργεια, όπως αυτόνομα ρομπότ, θεριζοαλωνιστικές μηχανές και ελκυστήρες, στο ψηφιακό δίδυμο.

Τα DT στη γεωργία μπορούν να αλλάξουν την αποδοτικότητα της παραγωγής, τη διαχείριση των γεωργικών μονάδων και τη βιωσιμότητα. Προηγμένα στατιστικά μοντέλα, μηχανική μάθηση και οι προσεγγίσεις ανάλυσης δεδομένων μπορούν να παρέχουν στους γεωργούς ακριβέστερες πληροφορίες για να προβούν σε καλύτερες αποφάσεις που δεν ήταν δυνατές στο παρελθόν. Με βάση το παρελθόν (ιστορικό) και την τρέχουσα συνεχή γνώση από τα δεδομένα των καλλιεργειών (αισθητήρες που αναπτύσσονται στο αγρόκτημα) και του περιβάλλοντος, τα συστήματα ψηφιακών δίδυμων παρέχουν πληροφορίες για τις μελλοντικές καταστάσεις του αγροκτήματος και προσφέρουν λύσεις για τη μετατροπή των συλλεγόμενων πληροφοριών σε χρήσιμες και εφαρμόσιμες γνώσεις για τη γεωργία ακριβείας.

### **Digital Twin στην Μετασυλλεκτική Επεξεργασία Τροφίμων**

Η μετασυλλεκτική διαδικασία είναι ένα στάδιο των γεωργικών προϊόντων μετά τη συγκομιδή μέχρι την κατανάλωση των προϊόντων, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει τη μεταφορά, την ξήρανση, την ψύξη, την αποθήκευση και την εμπορία. Μέσω προσεγγίσεων ψηφιακής γεωργίας, οι διαδικασίες μετά τη συγκομιδή θα μπορούσαν να επωφεληθούν από μείωση απωλειών, τη βελτίωση της παρακολούθησης και τη βελτιστοποίηση της επεξεργασίας των τροφίμων, των συνθηκών αποθήκευσης, της εμπορίας και της μεταφοράς. Οι ψηφιακές λύσεις επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της αλυσίδας εφοδιασμού, ώστε να αυξηθεί η ευρωστία και η ανθεκτικότητα της αλυσίδας [256] και να μειωθούν οι απώλειες τροφίμων. Η πλατφόρμα IoT υποστηρίζει τη μείωση των απωλειών τροφίμων κατά τη μετασυλλεκτική επεξεργασία [257] και την παρακολούθηση του προϊόντος μέσω της αλυσίδας εφοδιασμού τροφίμων. Για την επίτευξη της διατροφικής ασφάλειας η τεχνητή νοημοσύνη και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων επιτρέπουν την επεξεργασία, τη βελτιστοποίηση και τη διαχείριση δεδομένων στα στάδια μετά τη συγκομιδή των τροφίμων και των καλλιεργειών [258], μειώνοντας επίσης τη σπατάλη και βελτιώνοντας τη συνολική κερδοφορία [259]. Τα ICT προσφέρουν λύσεις για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των κριτηρίων ποιότητας των



Εικόνα 4.2.6 – Σχηματικό Παράδειγμα ενός Ψηφιακού Διδύμου σε Θερμοκήπιο [255]

τροφίμων και των γεωργικών προϊόντων κατά τη διάρκεια της μετασυλλεκτικής επεξεργασίας [260]. Ωστόσο, οι διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, οι παράγοντες επεξεργασίας και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του γεωργικού προϊόντος (π.χ. σχήμα, μέγεθος), περιβαλλοντικές παράμετροι (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία), χειρισμός, μεταφορά, και η αποθήκευση των προϊόντων επηρεάζουν την ποιότητα της μετασυλλεκτικής διαδικασίας [261].

Για να ξεπεραστούν αυτά τα ζητήματα και να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος, έχουν χρησιμοποιηθεί προσεγγίσεις ψηφιακών δίδυμων στη μετασυλλεκτική επεξεργασία για τη συνεχή παρακολούθηση των προϊόντων και την ενημέρωση κατά την διάρκεια των σταδίων επεξεργασίας [262]. Τα ψηφιακά δίδυμα, ως ένα ευρύτερο μέλος της οικογένειας της ψηφιακής γεωργίας θα μπορούσαν να ενισχύσουν τα αγροδιατροφικά συστήματα και να έχουν αντίκτυπο στις γνώσεις και τις δεξιότητες της διαχείρισης των γεωργικών επιχειρήσεων [263]. Το ψηφιακό δίδυμο στις μετασυλλεκτικές διεργασίες μπορεί να οριστεί ως μια ψηφιακή αναπαράσταση των συγκομισμένων γεωργικών προϊόντων με βάση τις πληροφορίες που συλλέγονται από τα προϊόντα. Σε αυτό το πλαίσιο, το [264] ανέφερε ότι η έννοια του ψηφιακού δίδυμου στην επεξεργασία τροφίμων μπορεί να περιλαμβάνει:

- Δεδομένα που συλλέγονται από ένα φυσικό σύστημα (διαδικασία επεξεργασίας τροφίμων) μέσω αισθητήρων που μετρούν ιδιότητες και μεταβλητές των προϊόντων και περιβαλλοντικές παραμέτρους μια IoT
- Πλατφόρμα που παρέχει επικοινωνία αισθητήρων, αποθήκευση δεδομένων και ανάλυση μεγάλων δεδομένων, υπολογιστές υψηλής απόδοσης και σύνδεση με τα στοιχεία του ψηφιακού δίδυμου
- Πλατφόρμα προσομοίωσης που χρησιμοποιεί δεδομένα εισόδου από το φυσικό σύστημα για τη βελτιστοποίηση, τη δοκιμή και την επικύρωση των μοντέλων, και παρέχει υποστήριξη αποφάσεων στον εικονικό κόσμο.



Προκειμένου να ωφεληθεί η επεξεργασία τροφίμων από την ανάπτυξη μοντέλων ψηφιακού διδύμου, είναι σημαντικό να συμπεριληφθούν ακριβείς πληροφορίες που αντιπροσωπεύουν τις διαδικασίες παραγωγής του προϊόντος, π.χ. τον εξοπλισμό, την εργασία, και να δημιουργηθούν ρεαλιστικά μοντέλα με όλα τα υπάρχοντα όρια και εμπόδια [265]. Σε μια μελέτη που αναφέρθηκε από [266], αναπτύχθηκε ένα ψηφιακό δίδυμο φρούτων μάνγκο για την προσομοίωση και την εξειδίκευση της θερμικής και της σχετικής βιοχημικής συμπεριφοράς του φρούτου μέσω μιας αλυσίδας εφοδιασμού μετά τη συγκομιδή. Προκειμένου να αναπτυχθεί η έννοια του ψηφιακού διδύμου, θεωρήθηκε η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος ως είσοδος, και οι πραγματικές συνθήκες της αλυσίδας εφοδιασμού μιμήθηκαν μέσα σε μηχανιστικά πεπερασμένα στοιχεία μοντέλων [266].

Επιπλέον, οι επιπτώσεις της υψηλότερης ταχύτητας του αέρα στη διάρκεια ζωής αποθήκευσης, στο μήκος της ψυκτικής αλυσίδας, και η θερμοκρασία του αέρα παράδοσης στην ποιότητα των φρούτων εξετάστηκαν στο ψηφιακό δίδυμο. Αναφέρθηκε ότι το ψηφιακό δίδυμο επιτρέπει την παρακολούθηση και την πρόβλεψη των εξαρτώμενων από τη θερμοκρασία φρούτων, τις απώλειες ποιότητας, τη βελτίωση της ψύξης και των διαδικασιών εφοδιασμού, κατά συνέπεια, μπορεί να μειώσει τις απώλειες τροφίμων [266]. Επιπλέον, αναφέρεται ότι το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να βοηθήσει τα κηπευτικά προϊόντα μετά τη συγκομιδή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των γεωργικών προϊόντων μέσω της ψυκτικής αλυσίδας [267]. Μπορεί επίσης να υποστηρίξει τους καταναλωτές τροφίμων καθώς και τους ιδιοκτήτες επιχειρήσεων τροφίμων για την παρακολούθηση των προϊόντων, την εφοδιαστική και τις αποφάσεις μάρκετινγκ, ωστόσο, η υπάρχουσα έννοια του ψηφιακού διδύμου πρέπει να βελτιωθεί με την εξέταση περισσότερων βιοχημικών και φυσικών χαρακτηριστικών [267]. Στο [268] προτάθηκε μια έννοια ψηφιακού διδύμου για την προμήθεια τροφίμων, με ανάλυση της αλυσίδας εφοδιασμού. Το ψηφιακό δίδυμο που ανέπτυξαν περιλαμβάνει: (I) ένα δίκτυο που βασίζεται στη γνώση από, π.χ., πελάτες, προμηθευτές και εργοστάσια, (II) ορισμένες παραμέτρους, π.χ. στην παραγωγή, μεταφορά, τις αποθήκες, την προμήθεια, το κόστος αποστολής και τις πολιτικές, (III) διάφορες λειτουργικές παραμέτρους, π.χ. ζήτηση, ποιότητα, αποθέματα-στόχοι και χωρητικότητα οχημάτων. Διαπιστώθηκε ότι το ψηφιακό δίδυμο που αναπτύχθηκε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση, την προσομοίωση και την ανάλυση των λειτουργιών και των αλλαγών απόδοσης στην αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων [268].

Σύμφωνα με το [258], το ψηφιακό δίδυμο στη μετασυλλεκτική διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως μηχανιστικό, στατιστικό και ευφές μοντέλο- ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι το μηχανιστικό μοντέλο DT που βασίζεται στη φυσική, μπορεί να αξιολογήσει την ποιότητα των νωπών γεωργικών προϊόντων καλύτερα από άλλα. Τα ψηφιακά δίδυμα που βασίζονται στη φυσική χρησιμοποιήθηκαν σε 331 αποστολές ψυκτικής αλυσίδας τεσσάρων φρούτων (αγγούρι, μελιτζάνα, φράουλα, βατόμουρο) στο [269]. Με βάση το ψηφιακό δίδυμο, διαπιστώθηκε ότι η ποιότητα των φρούτων μπορεί να επηρεαστεί (περίπου 43-85%) πριν την παράδοση στα καταστήματα. Η μετασυλλεκτική επεξεργασία έχει βελτιωθεί μέσω της εφαρμογής ψηφιακών λύσεων τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, η χρήση των ψηφιακών διδύμων λαμβάνει ολοένα και περισσότερη προσοχή στη μετασυλλεκτική επεξεργασία τροφίμων λόγω της μελλοντικής πρόβλεψης της ποιότητας του προϊόντος και της μείωσης του κόστους. Το ψηφιακό δίδυμο των μετασυλλεκτικών διεργασιών μπορεί να αναπτυχθεί για τη μοντελοποίηση, βελτιστοποίηση, αναπαράσταση και χαρακτηρισμός των παραμέτρων σχεδιασμού και λειτουργίας, όπως η ποιότητα, η ασφάλεια, τα συστατικά, η διάρκεια ζωής και η κατάσταση του προϊόντος, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη από τους ερευνητές σε μελλοντικές μελέτες.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Προκλήσεις των Τεχνολογιών IoT, ML και DT και Συμπεράσματα

### 5.1 IoT: Προκλήσεις και Συμπεράσματα

#### Οικονομικές Προκλήσεις

Στη γεωργική οικονομία, ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά είναι το χαμηλό ποσοστό κέρδους ενός επενδυτικού σχεδίου, το οποίο παρουσιάζει πολλούς κινδύνους από τις φυσικές συνθήκες. Το όφελος-κόστος μιας νέας τεχνολογίας που επιδιώκεται να αναπτυχθεί στη γεωργία θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά να υπολογίζεται προσεκτικά, ώστε να εξασφαλίζεται η αντιστάθμιση μεταξύ του κόστους εφαρμογής της τεχνολογίας και του δυναμικού κέρδους. Ως εκ τούτου, συζητάμε τις οικονομικές πτυχές που σχετίζονται με την εφαρμογή του IoT στην έξυπνη γεωργία.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κόστους που σχετίζονται με την εφαρμογή του IoT στη γεωργία. Τα χωρίσαμε σε κατηγορίες, συμπεριλαμβανομένων

- Το κόστος αρχικοποίησης του συστήματος
- Το κόστος λειτουργίας του συστήματος.

Το κόστος αρχικοποίησης του συστήματος περιλαμβάνει την αγορά υλικού (IoT συσκευές, πύλες, υποδομή σταθμού βάσης). Το κόστος λειτουργίας του συστήματος περιλαμβάνει τις υπηρεσίες, κόστος εγγραφής και το κόστος εργασίας για τη διαχείριση των συσκευών IoT. Επιπλέον, το πρόσθετο κόστος λειτουργίας περιλαμβάνει το κόστος που προκύπτει από την κατανάλωση ενέργειας, τη συντήρηση, την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των συσκευών IoT, των πυλών και των διακομιστών νέφους. Σύμφωνα με το [270], η επιτυχής ανάπτυξη των τεχνολογιών του IoT θα συμβεί μόνο εάν ο πελάτης επωφελείται (οι πελάτες πρέπει να γνωρίζουν τα οφέλη και τις δυνατότητες) που προσφέρουν τα συστήματα IoT, υπερβαίνουν τη φυσική τους αξία και το κόστος προστασίας της ιδιωτικής ζωής. Οι επιχειρήσεις που συμμετέχουν στο τομέα του IoT θα επωφεληθούν και θα επιτύχουν. Μπορούμε να περιγράψουμε αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιώντας αυτές τις δύο συνθήκες, ως εξής:

*Success of IoT Applications =  $V_{service} > C_{pri} + C_{user_h} + C_{pay}$ , Farmer Benefits*

*Και  $V_{info} + R_{pay} > C_{business_h}$ , Businesses Benefits*

Όπου το  $V_{service}$  είναι η τιμή που θα επιστραφεί από τις IoT υπηρεσίες

$C_{pri}$  το κόστος της ζημιάς στην ιδιωτικότητα

$C_{user_h}$  είναι το κόστος του εξοπλισμού

$C_{pay}$  είναι το κόστος των υπηρεσιών

$V_{info}$  είναι η τιμή των πληροφοριών που επιστρέφονται

$R_{pay}$  είναι οι άμεσες πληρωμές που λαμβάνονται

$C_{business_h}$  είναι το μοιρασμένο κόστος σε hardware και συντήρηση για την επιχείρηση

Σύμφωνα με τη γνώμη των χρηστών της υπηρεσίας (γεωργοί ή ιδιοκτήτες γεωργικών

μονάδων). Η εξίσωση (1) δείχνει ότι η αντιλαμβανόμενη αξία της υπηρεσίας για τον χρήστη (Vservice) πρέπει να είναι υψηλότερη από το σύνολο του κόστους, συμπεριλαμβανομένου: του κόστους της απώλειας της ιδιωτικής ζωής (Cpri), του εξοπλισμού και το κόστος υλικού που καταβάλλει ο χρήστης (Cuser h), και τις πληρωμές της υπηρεσίας (Cpay), ενώ η γνώμη του παρόχου της υπηρεσίας, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2), δείχνει ότι η λαμβανόμενη αξία των πληροφοριών (Vinfo) και οι λαμβανόμενες άμεσες πληρωμές (Rpay) πρέπει να είναι υψηλότερες από το κόστος υλικού και συντήρησης της επιχείρησης (CBusiness h).

Εξακολουθεί να υπάρχει ένα χάσμα μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών και των χρηστών των υπηρεσιών (αγρότες ή ιδιοκτήτες του αγροκτήματος), με αποτέλεσμα την αργή ανάπτυξη εφαρμογών IoT στην έξυπνη γεωργία. Σε ό,τι αφορά την οικονομική πτυχή, τα αποτελέσματα που αναλύθηκαν δείχνουν ότι η ανάγκη για μια πολιτική στήριξης από ρυθμιστικούς φορείς και κυβερνήσεις για να επιτραπεί στους παρόχους υπηρεσιών και στους χρήστες υπηρεσιών να χρησιμοποιήσουν εφαρμογές έξυπνης γεωργίας που βασίζονται στο IoT και βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο. Όπως συζητήθηκε στο [271], για την προώθηση της έξυπνης γεωργίας, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εκδώσει υποστηρικτικές οικονομικές πολιτικές, τη λεγόμενη ευρωπαϊκή ΚΑΠ (Κοινή Αγροτική Πολιτική), της οποίας ο ετήσιος προϋπολογισμός ανέρχεται σε περίπου 59 δισεκατομμύρια ευρώ και καταβάλλεται από τα έθνη της ΕΕ. Για να μπορέσει να εφαρμοστεί το IoT στον τομέα της έξυπνης γεωργίας, το κόστος των υπηρεσιών (Cpay) και το κόστος λειτουργίας και αρχικοποίησης του συστήματος IoT (Cuser h) πρέπει να βελτιώνεται διαρκώς και να βελτιστοποιηθεί για να μειωθεί το κόστος των υπηρεσιών IoT για τους γεωργούς.

Επιπλέον, οι IoT επιχειρήσεις (πάροχοι υπηρεσιών) πρέπει επίσης να μεγιστοποιήσουν την αξία των πληροφοριών που λαμβάνονται (Vinfo) για τη βελτίωση της κερδοφορίας των παρόχων υπηρεσιών. Στην πραγματικότητα, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να εκμεταλλευτούν εμπορικά τις πληροφορίες που λαμβάνουν (Vinfo) κατά την περίοδο παροχής υπηρεσιών για τις γεωργικές μονάδες, με στόχο την ενθάρρυνση της ανάπτυξης εφαρμογών IoT στην έξυπνη γεωργία. Σήμερα, αρκετοί πάροχοι πλατφορμών IoT επιτρέπουν δωρεάν εγγραφή και χρήση υπηρεσιών με ορισμένους περιοριστικούς όρους όσον αφορά τις υπηρεσίες τη λειτουργικότητα και την ικανότητα επεξεργασίας, τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών IoT και τον αριθμό των των αποθηκευμένων δεδομένων, ενώ οι premium λειτουργίες και υπηρεσίες επιβαρύνουν τους χρήστες με χρέωση. Επιπλέον, ένας από τους σημαντικούς παράγοντες που επιβραδύνουν την υιοθέτηση του IoT στη γεωργία είναι οι γνώσεις και η ικανότητα των γεωργών να χρησιμοποιούν συσκευές IoT. Στις ανεπτυγμένες χώρες, το ζήτημα αυτό μπορεί να επιλυθεί εύκολα λόγω της προσβασιμότητας των αγροτών στις νέες τεχνολογίες. Διαφορετικά, σε αναπτυσσόμενες χώρες, όπου η πλειονότητα των αγροτών στις αγροτικές περιοχές έχει πολύ περιορισμένη πρόσβαση σε προηγμένες τεχνολογίες, το ζήτημα αυτό αποτελεί σημαντική πρόκληση [272,273].

## **Τεχνικά Προβλήματα**

**Παρεμβολές:** Η ανάπτυξη τεράστιου αριθμού συσκευών IoT για την έξυπνη γεωργία μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές σε διάφορα συστήματα δικτύου, ιδίως σε ορισμένα δίκτυα IoT που χρησιμοποιούν μικρές ζώνες φάσματος, όπως ZigBee, Wi-Fi, Sigfox και LoRa (βλ. Πίνακα 2.3.1). Οι παρεμβολές μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση του συστήματος καθώς και να μειώσουν την αξιοπιστία των οικοσυστημάτων IoT. Τα IoT δίκτυα που χρησιμοποιούν γνωστική τεχνολογία για την επαναχρησιμοποίηση μη αδειοδοτημένων φασμάτων αυξάνουν το κόστος των συσκευών. Η έλευση του δικτύου 6G [274] θα επιτρέψει σε έναν τεράστιο αριθμό συσκευών να συνδεθεί στο Διαδίκτυο με εξαιρετικά υψηλή ταχύτητα πρόσβασης και εξαιρετικά μεγάλο εύρος ζώνης. Το πρόβλημα παρεμβολής των δικτύων IoT θα μπορέσει να

επιλυθεί πλήρως.

**Ασφάλεια και απόρρητο:** Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της εφαρμογής του IoT στην έξυπνη γεωργία είναι το πρόβλημα της ασφάλειας, συμπεριλαμβανομένης της προστασίας των δεδομένων και των συστημάτων από επιθέσεις στο Διαδίκτυο. Όσον αφορά την ασφάλεια του συστήματος, η περιορισμένη χωρητικότητα των συσκευών IoT οδήγησε σε πολύπλοκους αλγορίθμους κρυπτογράφησης που είναι αδύνατο να εφαρμοστούν στις IoT συσκευές. Ως αποτέλεσμα, τα συστήματα IoT μπορούν να υποστούν επίθεση μέσω του Διαδικτύου για την απόκτηση ελέγχου του συστήματος. Οι πύλες IoT δέχονται επίσης επιθέσεις μέσω άρνησης παροχής υπηρεσιών [275-277]. Επιπλέον, διακομιστές νέφους μπορούν να δεχτούν επίθεση μέσω παραποίησης δεδομένων για την εκτέλεση μη εξουσιοδοτημένων εργασιών που επηρεάζουν τις αυτόνομες διαδικασίες καλλιέργειας των γεωργικών μονάδων. Οι υποδομές νέφους μπορούν επίσης να ελεγχθούν από επιτιθέμενους [278,279]. Διάφορα ζητήματα λεπτομερούς προστασίας της ιδιωτικής ζωής των δεδομένων του IoT και των μέτρων ασφαλείας έχουν αναλυθεί [280-282]. Το ζήτημα της ασφάλειας των δεδομένων του IoT είναι ένα από τα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που επιβραδύνουν την υιοθέτηση του IoT στην έξυπνη γεωργία [283].

Όσον αφορά την ασφάλεια των δεδομένων, οι πληροφορίες που λαμβάνονται από τα συστήματα IoT στις γεωργικές μονάδες συλλέγονται, επεξεργάζονται και αξιοποιούνται εμπορικά από τους παρόχους υπηρεσιών σε διαφορετικό βαθμό. Ως εκ τούτου, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των πολιτικών αφορά την εγκυρότητα και τη νομική υπόσταση των αγροτικών δεδομένων [284]. Στην πραγματικότητα, τα δεδομένα αυτά έχουν μεγάλη αξία όταν συγκεντρώνονται και αναλύονται για γεωργικές δραστηριότητες μεγάλης κλίμακας. Κατά συνέπεια, χωρίς πολιτικές, τα δεδομένα απορρήτου και της ασφάλειας των γεωργικών εγκαταστάσεων μπορεί να επηρεάσουν το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα των γεωργών/ιδιοκτητών γεωργικών μονάδων. Η χρήση κρυπτογραφίας σε συνδυασμό με κλειδιά πρόσβασης είναι μια πιθανή λύση αυτού του προβλήματος. Τα κλειδιά θα μπορούσαν να διατίθενται με βάση μια τοπική ομάδα χρηστών και σε όσους συνέβαλαν στη βάση δεδομένων. Για περαιτέρω πολύπλοκες περιπτώσεις, ο ασφαλής πολυμερής υπολογισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπου η μέθοδος της ομομορφικής κρυπτογράφησης [285,286], ή η παρούσα μέθοδος σε συνδυασμό με την αλυσίδα μπλοκ [287], μπορούν να εφαρμοστούν με σκοπό την εξισορρόπηση της ιδιωτικότητας και της χρησιμότητας των δεδομένων.

Τα προβλήματα ασφάλειας των συστημάτων IoT θα αποτελέσουν ένα συναρπαστικό ερευνητικό θέμα και θα συγκεντρώσουν την προσοχή τόσο της ακαδημαϊκής όσο και της βιομηχανικής έρευνας. Μια σε βάθος έρευνα των απειλών και λύσεων για τη βελτίωση της ευρωστίας, της εμπιστοσύνης και της ιδιωτικότητας για τα μελλοντικά συστήματα IoT παρουσιάζεται στο [288].

**Αξιοπιστία:** Οι περισσότερες συσκευές IoT αναμένεται να αναπτυχθούν σε εξωτερικούς χώρους (σε χωράφια και αγροκτήματα). Τα σκληρά περιβάλλοντα εργασίας οδηγούν στην ταχεία υποβάθμιση της ποιότητας των συσκευών IoT και μπορεί να οδηγήσουν σε απροσδόκητες αστοχίες του κατασκευαστή. Η μηχανική ασφάλεια των συσκευών IoT και συστημάτων πρέπει να διασφαλίζεται ώστε να μπορούν να αντέχουν σε ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, υγρασία, βροχοπτώσεις και πλημμύρες [289]. Τα νέα υλικά και οι νέες τεχνολογίες πρέπει να συνεχίσουν να μελετώνται για τη βελτίωση της ανθεκτικότητας των συσκευών.

## Συμπεράσματα IoT

Στην τρέχουσα εργασία, παρουσιάστηκε μία γενική ιδέα του IoT και των μεγάλων δεδομένων (big data) στον αγροτικό τομέα. Μελετήθηκαν τυχόν προβλήματα από την εφαρμογή του IoT στην γεωργία ακριβείας. Πολλές έρευνες έχουν γίνει για τις εφαρμογές του IoT, με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας, την μείωση των εργατικών και την βελτίωση της απόδοσης της παραγωγής. Τα προνόμια από την εφαρμογή του IoT αναλύθηκαν. Επίσης, σημειώθηκε πως οι προκλήσεις που συναντιούνται μπορούν να ξεπεραστούν με σκοπό την επιτάχυνση της ανάπτυξης των IoT συστημάτων στην Γεωργία Ακριβείας. Όμως, υπάρχουν ακόμα κάποιες προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε τα IoT συστήματα να είναι οικονομικά για κάθε αγρότη και χρήστη, ακόμα και σε μικρομεσαίες επιχειρήσεις. Επίσης, οι τεχνολογίες ασφαλείας πρέπει να εξακολουθήσουν να βελτιώνονται, παρόλ'αυτα όμως, η εφαρμογή των IoT τεχνολογιών στον τομέα της γεωργίας ακριβείας είναι αναπόφευκτη. Με τις τεχνολογίες του IoT θα αυξηθεί η παραγωγικότητα, και θα έχει ως αποτέλεσμα πιο υγιή και 'πράσινα' προϊόντα, καλύτερη ανίχνευση της αλυσίδας παραγωγής, μείωση των χειρωνακτικών εργασιών κ.α. Από την άλλη, τονίσαμε επίσης πως υπάρχουν πολλές κατευθύνσεις στις οποίες μπορούν να κινηθούν τεχνολογίες όπως η ασφάλεια και οι επικοινωνία, στην εφαρμογή τους στο IoT. Το μέλλον της τεχνολογίας IoT φαίνεται λαμπρό και αυτή είναι μόλις η αρχή.

## 5.2 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση: Προκλήσεις και Συμπεράσματα

Οι δυνατότητες και οι εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης είναι αμέτρητες. Στην γεωργία ακριβείας μπορούν οι τεχνολογίες να χρησιμοποιηθούν σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Βοηθούν στην έξυπνη διαχείριση και στον ακριβή έλεγχο των διαδικασιών με αποτέλεσμα αύξηση της αποδοτικότητας και της παραγωγικότητας, της ποιότητας των προϊόντων καθώς και στην μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και της σπατάλης ενέργειας. Η εφαρμογή των τεχνολογιών δείχνει άριστη απόδοση και μεγάλες μελλοντικές δυνατότητες, έχοντας σημαντικό ρόλο για το μέλλον της αγροτικής βιωσιμότητας. Ταυτοχρόνως όμως, η τεχνητή νοημοσύνη και κατ'επέκταση η μηχανική μάθηση, συναντούν πολλές προκλήσεις όπως θα δούμε στα παρακάτω παραδείγματα.

- Πολλές μορφές τεχνητής νοημοσύνης δεν έχουν ολοκληρωθεί και εφαρμοστεί με τον κατάλληλο εξοπλισμό σε μεγάλη κλίμακα, με αποτέλεσμα τα έξυπνα γεωργικά συστήματα να χρειάζονται ακόμα βελτίωση. Από την άλλη, οι διαφορετικοί τύποι σοδειάς, με διαφορετικούς ρυθμούς ανάπτυξης, δεν επιτρέπουν στα μοντέλα ανάλυσης να είναι καθολικά, αλλά να διαφέρουν από μέρος σε μέρος, και ανάλογα τον σκοπό τους. Λόγω αυτού, αυξάνεται το κόστος, και δεν είναι δυνατό να εφαρμοστούν σε μεγαλύτερη κλίμακα. Οι έρευνες και τα πειράματα συνεχίζονται, ώστε οι αλγόριθμοι να αναπτυχθούν και οι αγρότες να είναι σε θέση να απολαύσουν τα προνόμια της τεχνητής νοημοσύνης όπου και να βρίσκονται.
- Η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης παρουσιάζει έλλειψη σε ότι αφορά την ανάλυση σε βάθος. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αγροτική παραγωγή είναι περίπλοκοι. Η περιοχή, οι εποχές, το είδος σοδειάς, το περιβάλλον παραγωγής, και οι διάφορες μέθοδοι λειτουργίας του αγροκτήματος καταλήγουν να επηρεάζουν τις διάφορες έξυπνες τεχνολογίες. Στο παρών στάδιο, οι περισσότερες έρευνες μένουν στο κομμάτι της απόκτησης και ανάλυσης δεδομένων σε επιφανειακό επίπεδο. Λείπει η λεπτομερής 'βαθιά' ανάλυση σε θέματα όπως οι αγροτικοί νόμοι, καθώς και τυχόν αποκλίσεις μεταξύ της εφαρμοζόμενης θεωρίας και της πραγματικότητας.



- Το παγκόσμιο επίπεδο της αυτονομίας στον αγροτικό τομέα, και της εντατικοποίησης της αυτονομίας αυτής, είναι ανομοιογενές. Υπάρχει λοιπόν μεγάλο χάσμα στις τεχνολογίες μεταξύ ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών. Το κύριο πρόβλημα βρίσκεται στο ότι οι αναπτυσσόμενες χώρες συναντούν προβλήματα ακόμα και στην βασική θεωρία, τους αλγορίθμους, στον βασικό εξοπλισμό που είναι αναγκαίος, οι επεξεργαστές που χρειάζονται, τα μεγάλα συστήματα και το λογισμικό που χρησιμοποιούνται από την τεχνητή νοημοσύνη στην γεωργία ακριβείας.
- Η τεχνολογία τεχνητής νοημοσύνης στη γεωργία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την υποστήριξη μεγάλου όγκου δεδομένων, και ο τρόπος απόκτησης πληροφοριών δεδομένων υψηλής ποιότητας είναι μία από τις προκλήσεις στο μέλλον. Εξόρυξη μεγάλων δεδομένων στη γεωργία είναι η διαδικασία εξαγωγής δυνητικά χρήσιμων γεωργικών πληροφοριών και των νόμων ανάπτυξης των καλλιεργειών από ένα μεγάλο αριθμό ελλειπών, θορυβωδών, ασαφών και τυχαίων γεωργικών δεδομένων. Επί του παρόντος, η τμηματοποίηση και η εξόρυξη δεδομένων γεωργικού διαδικτύου των πραγμάτων βρίσκονται ακόμη σε αρχικό στάδιο και τα ευφυή μοντέλα αλγορίθμων και οι βάσεις δεδομένων σε διάφορους γεωργικούς τομείς χρειάζονται επείγοντως επέκταση. Με τη συνεχή ενημέρωση και επέκταση των ευφύων αλγορίθμων, σε αυτό το στάδιο, ο όγκος των δεδομένων και το κόστος των δεδομένων αυξάνονται. Ταυτόχρονα, τα γεωργικά δεδομένα που λαμβάνονται στον πραγματικό κόσμο είναι περιορισμένα από τον κύκλο ανάπτυξης της καλλιέργειας, και τα προβλήματα των πολύπλοκων μεθόδων απόκτησης και των μεγάλων περιόδων απόκτησης είναι επίσης μια μεγάλη πρόκληση για τους ερευνητές.
- Περιορίζονται από παράγοντες όπως η συρρίκνωση της παγκόσμιας οικονομίας, οι περιορισμένες επιστημονικές και πολιτιστικές ανταλλαγές, η υποτονική ανάπτυξη υψηλής τεχνολογίας, η έλλειψη ταλέντων, οι ανεπαρκείς υποδομές, οι πολιτικές και οι κανονισμοί και επενδύσεις στη γεωργική επιστημονική έρευνα. Τα ταλέντα σε συναφείς τομείς που προσαρμόζονται στην ανάπτυξη της έξυπνης γεωργίας σταδιακά δεν μπορούν να ανταποκριθούν από την αυξανόμενη γεωργική πίεση. Αποτελεί επίσης μεγάλη πρόκληση η εξισορρόπηση του αντίκτυπου των δυσμενών παραγόντων στην εξαιρετικά ευφυή ανάπτυξη της βιώσιμης γεωργίας

### **Συμπεράσματα Μηχανικής Μάθησης**

Η μηχανική μάθηση στον τομέα της γεωργίας είναι πολύ χρήσιμη για την τεχνολογική καινοτομία και την έξυπνη γεωργία που βοηθά στην καλλιέργεια καλύτερης ποιότητας και υψηλότερη απόδοση με τους ελάχιστους διαθέσιμους πόρους και με πενιχρό κόστος. Οι βιομηχανίες εστιάζουν στη βελτίωση των προϊόντων που βασίζονται στη μηχανική μάθηση και δίνουν έμφαση στα δεδομένα εκπαίδευσης για τη γεωργία, τα οποία μπορούν να συλλεχθούν με τη χρήση αισθητήρων, μη επανδρωμένων αεροσκαφών και αυτόνομων οχημάτων. Με τα δεδομένα ανίχνευσης ML, τα συστήματα γεωργίας ακριβείας αναπτύσσονται σε πραγματικές μηχανές τεχνητής νοημοσύνης και παρέχουν καλύτερες προβλέψεις και λαμβάνουν τις βέλτιστες αποφάσεις για το απόλυτο μέλλον της παραγωγής. Η παρούσα εργασία παρέχει μια εικόνα των διαφόρων αλγορίθμων ML που χρησιμοποιούνται για τη γεωργία ακριβείας με τη βοήθεια ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Παρουσιάζεται ένα μοντέλο βασισμένο στη μηχανική μάθηση στο οποίο εφαρμόζονται αλγόριθμοι βασισμένοι στην μηχανική μάθηση για την ταξινόμηση, τις προβλέψεις και τις συστάσεις για την καλύτερη απόδοση των καλλιεργειών χωρίς να σπαταλώνονται οι φυσικοί πόροι.



### 5.3 Ψηφιακό Δίδυμο: Προκλήσεις και Συμπεράσματα

Ως τεχνολογία αιχμής, η τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου έχει λάβει ευρεία προσοχή από τις βιομηχανίες με σκοπό να φέρει την επανάσταση. Με γνώμονα τις τεχνολογικές ενημερώσεις και την ιστορική εμπειρία, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν σχεδόν να αντανakλούν όλες τις πτυχές των προϊόντων, των διαδικασιών και των υπηρεσιών. Ωστόσο, οι μελέτη διαπίστωσε ότι οι σημερινές δυνατότητες των ψηφιακών διδύμων στη γεωργία απέχουν πολύ από την τελειότητα και εξακολουθούν να υπάρχουν πολλές προκλήσεις στην ανάπτυξη των αγροτικών ψηφιακών διδύμων. Ακολουθούν προκλήσεις που συναντώνται στην εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων στον αγροτικό τομέα.

- Είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς ότι η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων βρίσκεται ακόμη σε σε νηπιακό και ανερχόμενο στάδιο στον γεωργικό τομέα και η τεχνολογία και τα εργαλεία πρέπει να αναπτυχθούν. Οι ερευνητές πρέπει να συλλέγουν και να συγχωνεύουν διάφορους τύπους δεδομένων για να μοντελοποιήσουν όλα τα διαφορετικά μέρη ενός γεωργικού αντικειμένου ή συστήματος από το μηδέν, το οποίο θα είναι μια πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία
- Πώς να διαμορφώσετε και να σχεδιάσετε γνωστικά ψηφιακά δίδυμα; Σε αυτό το στάδιο, αν και ορισμένες λειτουργίες χαμηλού επιπέδου μπορούν να υλοποιηθούν αυτόνομα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, πολλές δραστηριότητες λήψης αποφάσεων πρέπει ακόμη να ολοκληρώνονται με χειροκίνητες λειτουργίες που βασίζονται στην ανθρώπινη αλληλεπίδραση. Πώς να καταστεί δυνατή η αυθόρμητη και χωρίς παρέμβαση προσομοίωση χωρίς ανθρώπινο έλεγχο και απρόσκοπτη αλληλεπίδραση μεταξύ πολλαπλών μοντέλων είναι επίσης μια σημαντική πρόκληση που θα συναντήσουν μελλοντικές έρευνες.
- Τα DT προσφέρουν δυνατότητες προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο για τον κύκλο ζωής του προϊόντος και μπορεί ακόμη και να βοηθήσουν στην ενσωμάτωση ολόκληρης της αλυσίδας εφοδιασμού σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του. Ωστόσο, η σύνδεση των δεδομένων που συλλέγονται, συγκεντρώνονται και ανταλλάσσονται μεταξύ διαφορετικών προμηθευτών, κατασκευαστών και πελάτων σε έναν εικονικό χώρο, και η συγχώνευση μοντέλων ψηφιακών διδύμων που έχουν αναπτυχθεί με τη χρήση διαφορετικών αρχιτεκτονικών, τεχνολογιών DT, διεπαφών, πρωτοκόλλων επικοινωνίας, μοντέλων και δεδομένων, μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα διαλειτουργικότητας. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη διαλειτουργικότητας βάσει προτύπων για ψηφιακά δίδυμα εφαρμογών είναι αναμφίβολα μια άλλη σημαντική πρόκληση για την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων

### Συμπεράσματα Ψηφιακού Διδύμου στον Αγροτικό Τομέα

Η χρησιμοποίηση της ψηφιακής τεχνολογίας βοήθησε τους διαχειριστές γεωργικών αγροκτημάτων να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα, την απόδοση και να μειώσουν τις απώλειες. Υπάρχουν διάφοροι τύποι προτύπων ψηφιακής γεωργίας στη βιβλιογραφία που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως η επόμενη γενιά ψηφιοποίησης στον τομέα της γεωργίας. Τα αποτελέσματα αυτής της ανασκόπησης δείχνουν ότι τα ψηφιακά δίδυμα στη γεωργία και την επεξεργασία τροφίμων έχουν, μέχρι στιγμής, αξιοποιηθεί ελάχιστα στην έρευνα. Υπάρχουν αρκετές ερευνητικές προκλήσεις και ευκαιρίες σε διάφορα στάδια της ψηφιακής γεωργίας. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να αξιοποιηθούν ουσιαστικά για το έδαφος και την άρδευση, τις καλλιέργειες, τα ρομπότ και τα γεωργικά μηχανήματα, και την επεξεργασία τροφίμων μετά τη

συγκομιδή στον γεωργικό τομέα. Σε αυτό το πλαίσιο, οι περισσότερες από τις μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων λαμβάνοντας υπόψη ορισμένες παραμέτρους στους γεωργικούς τομείς. Η ανάπτυξη τεχνολογιών τελευταίας τεχνολογίας, π.χ, ΑΙ, προηγμένα μοντέλα στατιστικής και βελτιστοποίησης, ανάλυση μεγάλων δεδομένων και τρισδιάστατες προσομοιώσεις, προσφέρουν περαιτέρω δυνατότητες για τη βελτίωση της διαχείρισης των γεωργικών μονάδων. Με πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο και συνεχείς πληροφορίες σχετικά με τα γεωργικά στοιχεία, τα εικονικά μοντέλα μπορούν να προβλέψουν και να αντιμετωπίσουν αθέατα ζητήματα στους αγρούς. Μπορούν να υποστηρίξουν τους αγρότες να μειώσουν την οικονομική πίεση στον γεωργικό τομέα και τα εργασιακά ζητήματα, και να βοηθήσουν τους φορείς χάραξης πολιτικής που είναι υπεύθυνοι για την ασφάλεια των τροφίμων και την προστασία του περιβάλλοντος, προς την κατεύθυνση της ενίσχυσης του γεωργικού τομέα. Επιπλέον, διευκολύνει το έργο των ερευνητών που διερευνούν μεθόδους παρακολούθησης καλλιεργητικών μηχανημάτων, γεωργικών και μετασυλλεκτικών προϊόντων και μείωσης σπατάλης του νερού, των χημικών ουσιών, και τη χρήση ενέργειας στην ψηφιακή γεωργία. Αν και πολλά συστήματα ψηφιακών διδύμων στη μηχανική, τις κατασκευές και την υγεία έχουν αναπτυχθεί, πρέπει να γίνουν περαιτέρω προσπάθειες στο γεωργικό πλαίσιο για την ανάπτυξη συστημάτων ψηφιακών διδύμων που μπορούν να παρακολουθούν, να καταγράφουν και να αναλύουν δεδομένα, να προβλέπουν και να καθορίζουν την καλύτερη απόφαση για ψηφιακή διαχείριση της γεωργίας

## Βιβλιογραφία

1. [IoT Challenges](#)
2. [Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. \(2015\). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. IEEE Communications surveys & tutorials](#)
3. [Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. \(2016\). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. IEEE Wireless Communications](#)
4. [Ge, L., Han, B., & Chen, J. \(2018\). Low-power wide-area networks for the internet of things. IEEE Communications Magazine](#)
5. [Bishop, C. M. \(2006\). Pattern recognition and machine learning. New York: Springer.](#)
6. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep learning. Cambridge, MA: MIT Press.
7. [Tao, F., Qi, Q., Zhang, M., Zhong, R. Y., & Liu, A. \(2018\). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics.](#)
8. [Application of Remote Sensing in Precision Agriculture.](#)
9. [Internet of Things Applications in Precision Agriculture](#)
10. [Swati Goel \(2022\), Machine Learning Techniques for Precision Agriculture Using Wireless Sensor Networks](#)
11. [Artificial intelligence and digital twins in sustainable agriculture](#)
12. [IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges](#)
13. [Machine Learning Techniques for Precision Agriculture Using Wireless Sensor Networks](#)
14. Quy, V. K., Nam, V. H., Linh, D. M., Ngoc, L. A., & Gwanggil, J. (2022). Wireless Communication Technologies for IoT in 5G: Vision, Applications, and Challenges. \*Wireless Communications and Mobile Computing, 2022\*, 3229294.
15. Sinche, S., Raposo, D., Armando, N., Rodrigues, A., Boavida, F., Pereira, V., & Silva, J. S. (2020). A Survey of IoT Management Protocols and Frameworks. \*IEEE Communications Surveys & Tutorials, 22\*, 1168–1190.
16. Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. N. (2018). An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges. \*IEEE Internet of Things Journal, 5\*, 3758–3773.
17. Li, W., Logenthiran, T., Phan, V., & Woo, W. L. (2019). A Novel Smart Energy Theft System (SETS) for IoT-based Smart Home. \*IEEE Internet of Things Journal, 6\*, 5531–5539.
18. Shin, D., Yun, K., Kim, J., Astillo, P. V., Kim, J.-N., & You, I. (2019). A Security Protocol for Route Optimization in DMM-Based Smart Home IoT Networks. \*IEEE Access, 7\*, 142531–142550.
19. An, J. G., Le Gall, F., Kim, J., Yun, J., Hwang, J., Bauer, M., Zhao, M., & Song, J. S. (2019). Toward Global IoT-Enabled Smart Cities Interworking Using

- Adaptive Semantic Adapter. *\*IEEE Internet of Things Journal*, 6\*, 5753–5765
20. Cirillo, F., Gomez, D., Diez, L., Maestro, I. E., Gilbert, T. B. J., & Akhavan, R. (2020). Smart City IoT Services Creation through Large-Scale Collaboration. *\*IEEE Internet of Things Journal*, 7\*, 5267–5275.
  21. Ammad, M., Shah, M. A., Islam, S. U., Maple, C., Alaulamie, A. A., Rodrigues, J. J. P. C., Mussadiq, S., & Tariq, U. (2020). A Novel Fog-Based Multi-Level Energy-Efficient Framework for IoT-Enabled Smart Environments. *\*IEEE Access*, 8\*, 150010–150026.
  22. Metallidou, C. K., Psannis, K. E., & Egyptiadou, E. A. (2020). Energy Efficiency in Smart Buildings: IoT Approaches. *\*IEEE Access*, 8\*, 63679–63699.
  23. Quy, V. K., Nam, V. H., Linh, D. M., Ban, N. T., & Han, N. D. (2022). Communication Solutions for Vehicle Ad-hoc Network in Smart Cities Environment: A Comprehensive Survey. *\*Wireless Personal Communications*, 122\*, 2791–2815.
  24. Kiani, F., Seyyedabbasi, A., Nematzadeh, S., Candan, F., Çevik, T., Anka, F. A., Randazzo, G., Lanza, S., & Muzirafuti, A. (2022). Adaptive Metaheuristic-Based Methods for Autonomous Robot Path Planning: Sustainable Agricultural Applications. *\*Applied Sciences*, 12\*, 943.
  25. Patle, K. S., Saini, R., Kumar, A., & Palaparthi, V. S. (2022). Field Evaluation of Smart Sensor System for Plant Disease Prediction Using LSTM Network. *\*IEEE Sensors Journal*, 22\*, 3715–3725.
  26. Vangala, A., Das, A. K., Kumar, N., & Alazab, M. (2020). Smart Secure Sensing for IoT-Based Agriculture: Blockchain Perspective. *\*IEEE Sensors Journal*, 21\*, 17591–17607.
  27. Citoni, B., Fioranelli, F., Imran, M. A., & Abbasi, Q. H. (2019). Internet of Things and LoRaWAN-Enabled Future Smart Farming. *\*IEEE Internet of Things Magazine*, 2\*, 14–19.
  28. Kumar, R., Mishra, R., Gupta, H. P., & Dutta, T. (2021). Smart Sensing for Agriculture: Applications, Advancements, and Challenges. *\*IEEE Consumer Electronics Magazine*, 10\*, 51–56. Chang, Y.; Lai, Y. Campus Edge Computing Network Based on IoT Street Lighting Nodes. *IEEE Syst. J.* 2020, 14, 164–171.
  29. Sutjarittham, T., Habibi Gharakheili, H., Kanhere, S. S., & Sivaraman, V. (2019). Experiences with IoT and AI in a Smart Campus for Optimizing Classroom Usage. *\*IEEE Internet of Things Journal*, 6\*, 7595–7607.
  30. Rani, S., Ahmed, S. H., & Shah, S. C. (2019). Smart Health: A Novel Paradigm to Control the Chickungunya Virus. *\*IEEE Internet of Things Journal*, 6\*, 1306–1311.
  31. Zhou, Z., Yu, H., & Shi, H. (2020). Human Activity Recognition Based on Improved Bayesian Convolution Network to Analyze Health Care Data Using Wearable IoT Device. *\*IEEE Access*, 8\*, 86411–86418.
  32. Humayun, M., Jhanjhi, N., Hamid, B., & Ahmed, G. (2020). Emerging Smart Logistics and Transportation Using IoT and Blockchain. *\*IEEE Internet of Things Magazine*, 3\*, 58–62.
  33. Song, Y., Yu, F. R., Zhou, L., Yang, X., & He, Z. (2021). Applications of the Internet of Things (IoT) in Smart Logistics: A Comprehensive Survey. *\*IEEE Internet*

of Things Journal, 8\*, 4250–4274.

34. Shafique, K., Khawaja, B. A., Sabir, F., Qazi, S., & Mustaqim, M. (2020). Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends & Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios. *IEEE Access*, 8\*, 23022–23040.
35. United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2019). World Population Prospects 2019. Available online: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2019.html> (accessed on 7 May 2021).
36. Yang, X., Shu, L., Chen, J., Ferrag, M. A., Wu, J., Nurellari, E., & Huang, K. (2021). A Survey on Smart Agriculture: Development Modes, Technologies, and Security and Privacy Challenges. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8, 273–302.
37. 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.
38. Alfred, R., Obit, J. H., Chin, C. P.-Y., Haviluddin, H., & Lim, Y. (2021). Towards Paddy Rice Smart Farming: A Review on Big Data, Machine Learning, and Rice Production Tasks. *IEEE Access*, 9, 50358–50380.
39. Zikria, Y. B., Ali, R., Afzal, M. K., & Kim, S. W. (2021). Next-Generation Internet of Things (IoT): Opportunities, Challenges, and Solutions. *Sensors*, 21, 1174.
40. Kour, V. P., & Arora, S. (2020). Recent Developments of the Internet of Things in Agriculture: A Survey. *IEEE Access*, 8, 129924–129957.
41. Saad, A., Benyamina, A. E. H., & Gamatié, A. (2020). Water Management in Agriculture: A Survey on Current Challenges and Technological Solutions. *IEEE Access*, 8, 38082–38097.
42. Tyagi, S. K. S., Mukherjee, A., Pokhrel, S. R., & Hiran, K. K. (2020). An Intelligent and Optimal Resource Allocation Approach in Sensor Networks for Smart Agri-IoT. *IEEE Sensors Journal*, 21, 17439–17446.
43. Li, X., Pu, T., Li, L., & Ao, J. (2020). Enhanced Sensitivity of GaN-Based Temperature Sensor by Using the Series Schottky Barrier Diode Structure. *IEEE Electron Device Letters*, 41, 601–604.
44. Gopalakrishnan, S., Waimin, J., Raghunathan, N., Bagchi, S., Shakouri, A., & Rahimi, R. (2021). Battery-Less Wireless Chipless Sensor Tag for Subsoil Moisture Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 21, 6071–6082.
45. Udutalapally, V., Mohanty, S. P., Pallagani, V., & Khandelwal, V. (2020). sCrop: A Novel Device for Sustainable Automatic Disease Prediction, Crop Selection, and Irrigation in Internet-of-Agro-Things for Smart Agriculture. *IEEE Sensors Journal*, 21, 17525–17538.
46. Spachos, P., & Gregori, S. (2019). Integration of Wireless Sensor Networks and Smart UAVs for Precision Viticulture. *IEEE Internet Computing*, 23, 8–16.
47. Abdelnour, A., Buchin, F., Kaddour, D., & Tedjini, S. (2018). Improved Traceability Solution Based on UHF RFID for Cheese Production Sector. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2, 68–72.



48. Friha, O., Ferrag, M. A., Shu, L., Maglaras, L., & Wang, X. (2021). Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8, 718–752.
49. Farooq, M. S., Riaz, S., Abid, A., Abid, K., & Naeem, M. A. (2019). A Survey on the Role of IoT in Agriculture for the Implementation of Smart Farming. *IEEE Access*, 7, 156237–156271.
50. Mishra, D., Zema, N. R., & Natalizio, E. (2021). A High-End IoT Devices Framework to Foster Beyond-Connectivity Capabilities in 5G/B5G Architecture. *IEEE Communications Magazine*, 59, 55–61.
51. Javed, F., Afzal, M. K., Sharif, M., & Kim, B. (2018). Internet of Things (IoT) Operating Systems Support, Networking Technologies, Applications, and Challenges: A Comparative Review. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20, 2062–2100.
52. F. B., Ghosh, A., Kundu, P., Hazra, S., & Sengupta, N. (2021). Prototype Model Design of Automatic Irrigation Controller. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 9502217.
53. Wang, Y., Rajib, S. M. S. M., Collins, C., & Grieve, B. (2018). Low-Cost Turbidity Sensor for Low-Power Wireless Monitoring of Fresh-Water Courses. *IEEE Sensors Journal*, 18, 4689–4696.
54. El-Basioni, B. M. M., & El-Kader, S. M. A. (2020). Laying the Foundations for an IoT Reference Architecture for Agricultural Application Domain. *IEEE Access*, 8, 190194–190230.
55. Alam, M. M., Malik, H., Khan, M. I., Pardy, T., Kuusik, A., & Le Moullec, Y. (2018). A Survey on the Roles of Communication Technologies in IoT-Based Personalized Healthcare Applications. *IEEE Access*, 6, 36611–36631.
56. Chettri, L., & Bera, R. (2020). A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 7, 16–32.
57. Pal, A., & Kant, K. (2019). NFMI: Connectivity for Short-Range IoT Applications. *Computer*, 52, 63–67.
58. Collotta, M., Pau, G., Talty, T., Tonguz, O. K. (2018). Bluetooth 5: A Concrete Step Forward toward the IoT. *IEEE Communications Magazine*, 56, 125–131.
59. Bacco, M., Berton, A., Gotta, A., & Caviglione, L. (2018). IEEE 802.15.4 Air-Ground UAV Communications in Smart Farming Scenarios. *IEEE Communications Letters*, 22, 1910–1913.
60. Gente, R., Busch, S. F., Stubling, E.-M., Schneider, L. M., Hirschmann, C. B., Balzer, J. C., & Koch, M. (2016). Quality Control of Sugar Beet Seeds With THz Time-Domain Spectroscopy. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 6, 754–756.
61. Afsharinejad, A., Davy, A., & Naftaly, M. (2017). Variability of Terahertz Transmission Measured in Live Plant Leaves. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14, 636–638.
62. Wang, X., Zhang, J., Yu, Z., Mao, S., Periaswamy, S. C. G., & Patton, J. (2019). On Remote Temperature Sensing Using Commercial UHF RFID Tags. *IEEE Internet of Things Journal*, 6, 10715–10727.
63. Ali, S., Glass, T., Parr, B., Potgieter, J., & Alam, F. (2021). Low Cost Sensor

- with IoT LoRaWAN Connectivity and Machine Learning-Based Calibration for Air Pollution Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70, 5500511.
64. Joris, L., Dupont, F., Laurent, P., Bellier, P., Stoukatch, S., & Redouté, J. (2019). An Autonomous Sigfox Wireless Sensor Node for Environmental Monitoring. *IEEE Sensors Letters*, 3, 5500604.
  65. Popli, S., Jha, R. K., & Jain, S. (2019). A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Architecture, Application & Challenges. *IEEE Access*, 7, 16739–16776.
  66. Sundaram, J. P. S., Du, W., & Zhao, Z. (2020). A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22, 371–388.
  67. Xing, C., & Li, F. (2020). Unlicensed Spectrum-Sharing Mechanism Based on Wi-Fi Security Requirements Implemented Using Device to Device Communication Technology. *IEEE Access*, 8, 135025–135036.
  68. Jiang, X., Zhang, H., Yi, E. A. B., Raghunathan, N., Mousoulis, C., Chaterji, S., Peroulis, D., Shakouri, A., & Bagchi, S. (2021). Hybrid Low-Power Wide-Area Mesh Network for IoT Applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 8, 901–915.
  69. Lagen, S., Giupponi, L., Goyal, S., Patriciello, N., Bojovic, B., Demir, A., & Beluri, M. (2020). New Radio Beam-Based Access to Unlicensed Spectrum: Design Challenges and Solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22, 8–37.
  70. Shah, S. W. H., Mian, A. N., & Crowcroft, J. (2020). Statistical QoS Guarantees for Licensed-Unlicensed Spectrum Interoperable D2D Communication. *IEEE Access*, 8, 27277–27290.
  71. Lu, X., Petrov, V., Moltchanov, D., Andreev, S., Mahmoodi, T., Dohler, M. (2019). 5G-U: Conceptualizing Integrated Utilization of Licensed and Unlicensed Spectrum for Future IoT. *IEEE Communications Magazine*, 57, 92–98.
  72. Razavieh, A., Chen, Y., Ethirajan, T., Gu, M., Cimino, S., Shimizu, T., Hassan, M. K., Morshed, T., Singh, J., Zheng, W., et al. (2021). Extremely-Low Threshold Voltage FinFET for 5G mmWave Applications. *IEEE Journal of Electron Devices Society*, 9, 165–169.
  73. Patriciello, N., Lagén, S., Bojović, B., Giupponi, L. (2020). NR-U and IEEE 802.11 Technologies Coexistence in Unlicensed mmWave Spectrum: Models and Evaluation. *IEEE Access*, 8, 71254–71271.
  74. Mezzavilla, M., Polese, M., Zanella, A., Dhananjay, A., Rangan, S., Kessler, C., Rappaport, T. S., Zorzi, M. (2018). Public Safety Communications above 6 GHz: Challenges and Opportunities. *IEEE Access*, 6, 316–329.
  75. Kassim, M. R. M. (2020). IoT Applications in Smart Agriculture: Issues and Challenges. In *Proceedings of the IEEE Conference on Open Systems (ICOS)*, Kota Kinabalu, Malaysia, 17–19 November 2020; pp. 19–24.
  76. Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Gotsis, A., Wan, S., Sarigiannidis, P., Nikolaidis, S., Goudos, S. K. (2020). Smart Irrigation System for Precision Agriculture—The AREThOU5A IoT Platform. *IEEE Sensors Journal*, 21, 17539–17547.

77. López, I. D., Figueroa, A., Corrales, J. C. (2020). Multi-Dimensional Data Preparation: A Process to Support Vulnerability Analysis and Climate Change Adaptation. *IEEE Access*, 8, 87228–87242.
78. Bhat, S. A., & Huang, N. F. (2021). Big Data and AI Revolution in Precision Agriculture: Survey and Challenges. *IEEE Access*, 9, 110209–110222.
79. Roopaei, M., Rad, P., & Choo, K. R. (2017). Cloud of Things in Smart Agriculture: Intelligent Irrigation Monitoring by Thermal Imaging. *IEEE Cloud Computing*, 4, 10–15.
80. Zhang, X., Cao, Z., & Dong, W. (2020). Overview of Edge Computing in the Agricultural Internet of Things: Key Technologies, Applications, Challenges. *IEEE Access*, 8, 141748–141761.
81. Quy, V. K., Hau, N. V., Anh, D. V., & Ngoc, L. A. (2021). Smart healthcare IoT applications based on fog computing: Architecture, applications and challenges. *Complex Intelligent Systems*.
82. Kopishynska, O., Utkin, Y., Galych, O., Marenych, M., & Sliusar, I. (2020). Main Aspects of the Creation of Managing Information System at the Implementation of Precision Farming. In *Proceedings of the 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, Kyiv, Ukraine, 14–18 May 2020; pp. 404–410.
83. Soeparno, H., Perbangsa, A. S., & Pardamean, B. (2018). Best Practices of Agricultural Information System in the Context of Knowledge and Innovation. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)*, Jakarta, Indonesia, 3–5 September 2018; pp. 489–494.
84. Zhang, F., & Cao, N. (2019). Application and Research Progress of Geographic Information System (GIS) in Agriculture. In *Proceedings of the 2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, Istanbul, Turkey, 16–19 July 2019; pp. 1–5.
85. Sengupta, A., Debnath, B., Das, A., & De, D. (2021). FarmFox: A Quad-Sensor based IoT box for Precision Agriculture. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 10, 63–68.
86. Kaiyi, L., Hengyuan, K., Huansheng, M., & Fan, Z. (2019). Design of a New Generation of Weather Radar Intelligent Temperature and Humidity Monitoring System Based on ZigBee. In *Proceedings of the 2019 International Conference on Meteorology Observations (ICMO)*, Chengdu, China, 28–31 December 2019; pp. 1–3.
87. Dong, Y., Xu, F., Liu, L., Du, X., Ren, B., Guo, A., Geng, Y., Ruan, C., Ye, H., Huang, W., et al. (2020). Automatic System for Crop Pest and Disease Dynamic Monitoring and Early Forecasting. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 4410–4418.
88. Ghandar, A., Ahmed, A., Zulfiqar, S., Hua, Z., Hanai, M., & Theodoropoulos, G. (2021). A Decision Support System for Urban Agriculture Using Digital Twin: A Case Study with Aquaponics. *IEEE Access*, 9, 35691–35708.
89. Pasha, A. K., Mulyana, E., Hidayat, C., Ramdhani, M. A., Kurahman, O. T., & Adhipradana, M. (2018). System Design of Controlling and Monitoring on Aquaponic Based on Internet of Things. In *Proceedings of the 2018 4th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, Nusa Dua, Bali, Indonesia, 12–13 July 2018; pp.

- 1–5.
90. Lee, C., & Jhang, J. (2019). System Design for Internet of Things Assisted Urban Aquaponics Farming. In Proceedings of the 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), Osaka, Japan, 15–18 October 2019; pp. 986–987.
  91. Wei, Y., Li, W., An, D., Li, D., Jiao, Y., & Wei, Q. (2019). Equipment and Intelligent Control System in Aquaponics: A Review. *IEEE Access*, 7, 169306–169326.
  92. Marcu, A.-E., Suci, G., Olteanu, E., Miu, D., Drosu, A., & Marcu, I. (2019). IoT System for Forest Monitoring. In Proceedings of the 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Budapest, Hungary, 1–3 July 2019; pp. 629–632.
  93. Zou, W., Jing, W., Chen, G., Lu, Y., & Song, H. (2019). A Survey of Big Data Analytics for Smart Forestry. *IEEE Access*, 7, 46621–46636.
  94. Essa, S., Petra, R., Uddin, M. R., Suhaili, W. S. H., & Ilmi, N. I. (2020). IoT-Based Environmental Monitoring System for Brunei Peat Swamp Forest. In Proceedings of the 2020 International Conference on Computer Science and Its Application in Agriculture (ICOSICA), Bogor, Indonesia, 16–17 September 2020; pp. 1–5.
  95. Marx, A., & Tetteh, G. O. (2017). A Forest Vitality and Change Monitoring Tool Based on RapidEye Imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14, 801–805.
  96. Chaudhry, A. A., Mumtaz, R., Hassan Zaidi, S. M., Tahir, M. A., & Muzammil School, S. H. (2020). Internet of Things (IoT) and Machine Learning (ML) enabled Livestock Monitoring. In Proceedings of the 2020 IEEE 17th International Conference on Smart Communities: Improving Quality of Life Using ICT, IoT and AI (HONET), Charlotte, NC, USA, 14–16 December 2020; pp. 151–155.
  97. Yang, Y., Ren, R., & Johnson, P. M. (2020). VetLink: A Livestock Disease-Management System. *IEEE Potentials*, 39, 28–34.
  98. Ma, S., Yao, Q., Masuda, T., Higaki, S., Yoshioka, K., Arai, S., Takamatsu, S., Itoh, T. (2021). Development of Noncontact Body Temperature Monitoring and Prediction System for Livestock Cattle. *IEEE Sensors Journal*, 21, 9367–9376.
  99. Lee, G., Kim, M., Koroki, K., Ishimoto, A., Sakamoto, S. H., & Ieiri, S. (2019). Wireless IC Tag Based Monitoring System for Individual Pigs in Pig Farm. In Proceedings of the 2019 IEEE 1st Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), Osaka, Japan, 12–14 March 2019; pp. 168–170.
  100. Tradigo, G., Vizza, P., Veltri, P., Lambardi, P., Caligiuri, F. M., Caligiuri, G., & Guzzi, P. H. (2019). SISTABENE: An information system for the traceability of agricultural food production. In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM), San Diego, CA, USA, 18–21 November 2019; pp. 2304–2309.
  101. Wang, L., Xu, L., Zheng, Z., Liu, S., Li, X., Cao, L., Li, J., & Sun, C. (2021). Smart Contract-Based Agricultural Food Supply Chain Traceability. *IEEE Access*, 9, 9296–9307.
  102. Cui, P., Dixon, J., Guin, U., & Dimase, D. (2019). A Blockchain-Based

- Framework for Supply Chain Provenance. *IEEE Access*, 7, 157113–157125.
103. Abdulhussein, A. B., Hadi, A. K., & Ilyas, M. (2020). Design a Tracing System for a Seed Supply Chain Based on Blockchain. In *Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Engineering Technology and its Applications (IICETA)*, Najaf, Iraq, 6–7 September 2020; pp. 209–214.
  104. Kong, S., López-Salcedo, J. A., Wu, Y., & Kim, E. (2019). *IEEE Access Special Section Editorial: GNSS, Localization, and Navigation Technologies*. *IEEE Access*, 7, 131649–131652.
  105. Alatise, M. B., & Hancke, G. P. (2020). A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods. *IEEE Access*, 8, 39830–39846.
  106. Kim, J., Kim, S., Ju, C., & Son, H. I. (2019). Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications. *IEEE Access*, 7, 105100–105115.
  107. Zhou, K., Meng, Z., He, M., Hou, J., & Li, T. (2020). Design and Test of a Sorting Device Based on Machine Vision. *IEEE Access*, 8, 27178–27187.
  108. Kurtser, P., Ringdahl, O., Rotstein, N., Berenstein, R., Edan, Y. (2020). In-Field Grape Cluster Size Assessment for Vine Yield Estimation Using a Mobile Robot and a Consumer Level RGB-D Camera. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5, 2031–2038.
  109. Zhou, X., & Zhou, J. (2020). Data-Driven Driving State Control for Unmanned Agricultural Logistics Vehicle. *IEEE Access*, 8, 65530–65543.
  110. Favenza, A., Imam, R., DAVIS, F., Pini, M. (2019). Detecting water using UAV-based GNSS-Reflectometry data and Artificial Intelligence. In *Proceedings of the 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, Portici, Italy, 24–26 October 2019; pp. 7–12.
  111. Tripathy, P. K., Tripathy, A. K., Agarwal, A., Mohanty, S. P. (2021). MyGreen: An IoT-Enabled Smart Greenhouse for Sustainable Agriculture. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 10, 57–62.
  112. Geng, X., Zhang, Q., Wei, Q., Zhang, T., Cai, Y., Liang, Y., Sun, X. (2019). A Mobile Greenhouse Environment Monitoring System Based on the Internet of Things. *IEEE Access*, 7, 135832–135844.
  113. Fei, X., Xiao, W., Yong, X. (2021). Development of Energy Saving and Rapid Temperature Control Technology for Intelligent Greenhouses. *IEEE Access*, 9, 29677–29685.
  114. Subahi, A. F., Bouazza, K. E. (2020). An Intelligent IoT-Based System Design for Controlling and Monitoring Greenhouse Temperature. *IEEE Access*, 8, 125488–125500.
  115. Misra, N. N., Dixit, Y., Al-Mallahi, A., Bhullar, M. S., Upadhyay, R., Martynenko, A. (2020). IoT, Big Data and Artificial Intelligence in Agriculture and Food Industry. *IEEE Internet of Things Journal*, 1.
  116. Ullah, I., Fayaz, M., Naveed, N., Kim, D. (2020). ANN Based Learning to Kalman Filter Algorithm for Indoor Environment Prediction in Smart Greenhouse. *IEEE Access*, 8, 159371–159388.



117. Helm, J. M., Swiergosz, A. M., Haeberle, H. S., Karnuta, J. M., Schaffer, J. L., Krebs, V. E., Spitzer, A. I., Ramkumar, P. N. (2020). *Musculoskeletal Medicine*, 13, 69–76.
118. Liakos, K., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., Bochtis, D. (2018). *Sensors*, 18, 2674.
119. Van Klompenburg, T., Kassahun, A., Catal, C. (2020). *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105709.
120. Joaquín Gutiérrez, Juan Francisco Villa-Medina, Alejandra Nieto-Garibay, and Miguel Ángel Porta-Gándara (2013), *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(1), 166.
121. Konstantinos Liakos, Patrizia Busato, Dimitrios Moshou, Simon Pearson, and Dionysis Bochtis (2018), *Sensors*, 18(8), 2674.
122. Kirtan Jha, Aalap Doshi, Poojan Patel, and Manan Shah (2019), *Artificial Intelligence in Agriculture*.
123. Guleria, K., & Verma, A. K (2018), *International Journal of Pervasive Computing and Communications*.
124. Guleria, K., Verma, A. K., Goyal, N., Sharma, A. K., Benslimane, A., & Singh, A (2021), *Ad Hoc Networks*.
125. Badotra, S., & Panda, S. N (2019), *IIUM Engineering Journal*.
126. Xanthoula Eirini Pantazi, Dimitrios Moshou, Thomas Alexandridis, Rebecca L. Whetton, and Abdul Mounem Mouazen (2016), *Computers and Electronics in Agriculture*.
127. Maponya, M. G.; van Niekerk, A.; Mashimbye, Z. E. (2020), *Computers and Electronics in Agriculture*, 105164, 169.
128. Mandal, D.; Kumar, V.; Rao, Y. S. (2020), *Geocarto International*, 35.
129. Genze, N.; Bharti, R.; Grieb, M.; Schultheiss, S. J.; Grimm, D. G (2020), *Plant Methods*, 16, 157.
130. Y. Cai, K. Guan, D. Lobell, A. B. Potgieter, S. Wang, J. Peng, T. Xu, S. Asseng, Y. Zhang, L. You, and B. Peng (2019), *Agricultural and Forest Meteorology*, 274, 144–159.
131. Y. Feng, N. Cui, W. Hao, L. Gao, and D. Gong (2019), *Geoderma*, 338, 67–77.
132. Diez-Sierra and M. D. Jesus, *Journal of Hydrology*, 586, 124789 (2020).
133. M. Lazri, K. Labadi, J. M. Brucker, and S. Ameer, *Journal of Hydrology*, 584, 124705 (2020).
134. Y. Peng, Y. Xiao, Z. Fu, Y. Dong, Y. Zheng, H. Yan, and X. Li, *Journal of Cleaner Production*, 230, 365–377 (2019).
135. G.-J. Horng, M.-X. Liu, and C.-C. Chen, *IEEE Sensors Journal*, 20 (5), 2766–2781 (2020).
136. L. Kouadio, R. C. Deo, V. Byrareddy, J. F. Adamowski, S. Mushtaq, and V. P. Nguyen, *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 324–338 (2018).
137. Monisha Kaul M, Robert L, Hill H, Walthall C, *Agricultural System*, 85(1), 1–

- 18 (2005).
138. Dahikar MSS, Rode SV, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 2(1), 1–4 (2014).
  139. Veenadhari S, Mishra B, Singh CD, International Journal of Computer Applications, 27(7), 975–8887 (2011).
  140. [Digitalization of Forest using IoT.](#)
  141. [IoT-based tracking and tracing platform for prepackaged food supply chain.](#)
  142. Expert Systems in Artificial Intelligence (<https://www.javatpoint.com/expert-systems-in-artificial-intelligence>).
  143. Convolutional Neural Networks (CNN) (<https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/05/convolutional-neural-networks-cnn/>)
  144. Long Short-Term Memory (LSTM) Recurrent Neural Networks (<https://towardsdatascience.com/lstm-recurrent-neural-networks-how-to-teach-a-network-to-remember-the-past-55e54c2ff22e>).
  145. Deep Neural Networks (<https://www.bmc.com/blogs/deep-neural-network/>).
  146. NAGA SRINIVASARAO CHILAMKURTHY, OM JEE PANDEY, ANIRBAN GHOSH, LINGA REDDY CENKERAMADDI, AND HONG-NING DAI, Low-Power Wide-Area Networks: A Broad Overview of Its Different Aspects (2022).
  147. Jia XY, Cao YN, O'Connor D, Zhu J, Tsang DCW et al. (2021). Mapping soil pollution by using drone image recognition and machine learning at an arsenic-contaminated agricultural field.
  148. Chen YL, Wu BG, Chen D, Qi Y (2019). Using Machine Learning to Assess Site Suitability for Afforestation with Particular Species.
  149. Wilhelm RC, van Es HM, Buckley DH (2022). Predicting measures of soil health using the microbiome and supervised machine learning. *Soil Biology & Biochemistry*.
  150. Tao WC, Xie ZX, Zhang Y, Li JY, Xuan F et al. (2021). Corn Residue Covered Area Mapping with a Deep Learning Method Using Chinese GF-1 B/D High Resolution Remote Sensing Images Remote Sensing.
  151. Nie J, Wang N, Li J, Wang K, Wang H (2021). Meta-learning prediction of physical and chemical properties of magnetized water and fertilizer based on LSTM. *Plant Methods*.
  152. Wei GF, Li Y, Zhang ZT, Chen YW, Chen JY et al. (2020). Estimation of soil salt content by combining UAV-borne multispectral sensor and machine learning algorithms.
  153. Tseng D, Wang D, Chen C, Miller L, Song W et al. (2018). Towards Automating Precision Irrigation: Deep Learning to Infer Local Soil Moisture Conditions from Synthetic Aerial Agricultural Images.
  154. Zheng M, Zhang S, Zhang Y, Hu B (2021). Construct food safety traceability system for people's health under the internet of things and big data. García-Tejero IF, Durán-Zuazo VH, Muriel-Fernández JL, Rodríguez-Pleguezuelo CR (2011). *Water and Sustainable Agriculture*.

155. Zhao TX, Zhu Y, Ye M, Mao W, Zhang XP et al. (2020). Machine Learning Methods for Water Table Depth Prediction in Seasonal Freezing-Thawing Areas. Groundwater.
156. Chen HZ, Chen A, Xu LL, Xie H, Qiao HL et al. (2020b). A deep learning CNN architecture applied in smart near-infrared analysis of water pollution for agricultural irrigation resources.
157. Tigabu M, Daneshvar A, Wu P, Ma X, Oden PC (2020). Rapid and non-destructive evaluation of seed quality of Chinese fir by near-infrared spectroscopy and multivariate discriminant analysis.
158. Zeng F, Lu E, Qiu G, Lu H, Jiang B (2019). Single-Kernel FT-NIR Spectroscopy for Detecting Maturity of Cucumber Seeds Using a Multiclass Hierarchical Classification Strategy.
159. Xu XY, Gao P, Zhu XK, Guo WS, Ding JF et al. (2019). Design of an integrated climatic assessment indicator (ICAI) for wheat production: A case study in Jiangsu Province, China.
160. Paudel D, Boogaard H, de Wit A, Janssen S, Osinga S et al. (2021). Machine learning for large-scale crop yield forecasting.
161. Vaidya RB, Nalavade D, Kale K (2022). Hyperspectral Imagery for Crop yield estimation in Precision Agriculture using Machine Learning Approaches: A review.
162. Van Klompenburg T, Kassahun A, Catal C (2020). Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. Computers and Electronics in Agriculture.
163. Koirala A, Walsh KB, Wang Z, McCarthy C (2019). Deep learning– Method overview and review of use for fruit detection and yield estimation. Computers and Electronics in Agriculture.
164. McKinion JM, Lemmon HE (1985). Expert systems for agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 1.
165. Khalil AJ, Barhoom AM, Musleh MM, Abu-Naser SS (2019). Apple Trees Knowledge Based System.
166. Galala K (2019). Web-Based Expert System for Diagnosis of Date Palm Diseases. International Journal of Intelligent Computing Research.
167. Adi K, Isnanto R (2020). Rice crop management expert system with forwarding chaining method and certainty factor.
168. Hu HQ (2006). A study on question answering system using integrated retrieval method.
169. Nayyar A, Puri V (2016). Smart farming: IoT based smart sensors agriculture stick for live temperature and moisture monitoring using Arduino, cloud computing & solar technology.
170. Shahzadi R, Ferzund J, Tausif M, Suryani MA (2016). Internet of things based expert system for smart agriculture.
171. Sabzi S, Abbaspour-Gilandeh Y, Garcia-Mateos G (2018). A fast and accurate expert system for weed identification in potato crops using metaheuristic algorithms.
172. Hafezalkotob A, Hami-Dindar A, Rabie N, Hafezalkotob A (2018). A decision

- support system for agricultural machines and equipment selection: A case study on olive harvester machines.
173. Manuel J, David P, Noche EB, Cruz E, Lachica E (2020). Agricultural Geographic Information System for Pangasinan.
  174. Keerthana K, Karpagavalli S, Posonia AM (2018). Smart system monitoring agricultural land Using IoT.
  175. How Artificial Intelligence is Reinventing in Agricultural Sector (<https://www.tekshapers.com/blog/How-Artificial-Intelligence-is-Reinventing-in-Agricultural-Sector>).
  176. Brahimi M, Boukhalifa K, Moussaoui A (2017). Deep learning for tomato diseases: classification and symptoms visualization.
  177. Sahu CK, Sethy PK, Behera SK (2018). Sensing technology for detecting insects in a paddy crop field using optical sensor.
  178. Li Y, Yang JC (2020). Few-shot cotton pest recognition and terminal realization.
  179. Li Y, Nie J, Chao X (2020). Do we really need deep CNN for plant diseases identification?
  180. Li Y, Chao XW (2020). ANN-Based Continual Classification in Agriculture. Agriculture-Basel.
  181. Chen CJ, Huang YY, Li YS, Chang CY, Huang YM (2020a). An AIoT Based Smart Agricultural System for Pests Detection.
  182. Li Y, Chao XW (2021c). Semi-supervised few-shot learning approach for plant diseases recognition.
  183. Zeng MZ, Gao HY, Wan L (2021). Few-Shot Grape Leaf Diseases Classification Based on Generative Adversarial Network.
  184. Li Y, Yang JC (2021). Meta-learning baselines and database for fewshot classification in agriculture.
  185. Mukhtar H, Khan MZ, Khan MUG, Younis H (2021). Wheat Disease Recognition through One-shot Learning using Fields Images.
  186. Yasmeen U, Khan MA, Tariq U, Khan JA, Yar MAE et al. (2021). Citrus Diseases Recognition Using Deep Improved Genetic Algorithm.
  187. Li Y, Chao X (2021b). Toward sustainability: trade-off between data quality and quantity in crop pest recognition.
  188. Li Y, Chao X (2021a). Distance-Entropy: An effective indicator for selecting informative data.
  189. Yang J, Guo X, Li Y, Marinello F, Ercisli S et al. (2022a). A survey of few-shot learning in smart agriculture: developments, applications, and challenges.
  190. Nie J, Wang Y, Li Y, Chao XW (2022). Sustainable Computing in Smart Agriculture: Survey and Challenges.
  191. Zhao YS, Gong L, Huang YX, Liu CL (2016). A review of key techniques of vision-based control for harvesting robot.

192. Wang Y, Yang Y, Yang CH, Zhao HM, Chen GB et al. (2019). Endeffector with a bite mode for harvesting citrus fruit in random stalk orientation environment.
193. Yu Y, Zhang KL, Liu H, Yang L, Zhang DX (2020b). Real-time visual localization of the picking points for a ridge-planting strawberry harvesting robot.
194. Feng J, Zeng LH, He L (2019). Apple fruit recognition algorithm based on multi-spectral dynamic image analysis.
195. Kusumam K, Krajník T, Pearson S, Duckett T, Cielniak G (2017). 3D - vision based detection, localization, and sizing of broccoli heads in the field.
196. Gongal A, Amatya S, Karkee M, Zhang Q, Lewis K (2015). Sensors and systems for fruit detection and localization: A review.
197. Xiong JT, Lin R, Liu Z, He ZL, Tang LY et al. (2018). The recognition of litchi clusters and the calculation of picking point in a nocturnal natural environment.
198. Bahadirov G, Sultanov T, Umarov B, Bakhadirov K (2020). Advanced machine for sorting potatoes tubers.
199. How Artificial Intelligence is Reinventing in Agricultural Sector (<https://analyticsindiamag.com/machine-learning-can-now-help-farmers-choose-crops-ripe-for-harvesting/>).
200. Balbin JR, Alday JAI, Aquino CO, Quintana MFG (2018). Durio Zibethinus Ripeness Determination and Variety Identification Using Principal Component Analysis and Support Vector Machine.
201. Fadchar NA, Dela Cruz JC (2020). A Non-Destructive Approach of Young Coconut Maturity Detection using Acoustic Vibration and Neural Network.
202. Pu YY, Sun DW, Buccheri M, Grassi M, Cattaneo TMP et al. (2019). Ripeness Classification of Bananito Fruit (*Musa acuminata*, AA): a Comparison Study of Visible Spectroscopy and Hyperspectral Imaging.
203. Alfatni MSM, Shariff ARM, Ben Saaed OM, Albhbah AM, Mustapha A (2020). Colour Feature Extraction Techniques for Real Time System of Oil Palm Fresh Fruit Bunch Maturity Grading.
204. Jia WS, Liang G, Tian H, Sun J, Wan CH (2019). Electronic Nose-Based Technique for Rapid Detection and Recognition of Moldy Apples.
205. Giovenzana V, Civelli R, Beghi R, Oberti R, Guidetti R (2015). Testing of a simplified LED based vis/NIR system for rapid ripeness evaluation of white grape.
206. Fruit Vegetable Sorting using Artificial Intelligence Powered Machines (<https://www.maxinai.com/blog/2021/03/15/fruit-vegetable-sorting-using-artificial-intelligence-powered-machines>).
207. Tran NT, Phan QT, Nguyen CN, Fukuzawa M (2021). Machine Learning-Based Classification of Apple Sweetness with Multispectral Sensor.
- 208.
209. Thybo AK, Jespersen SN, Laerke PE, Stodkilde-Jorgensen HJ (2004). Nondestructive detection of internal bruise and spraing disease symptoms in potatoes using magnetic resonance imaging.
210. Yoshida T, Tasaka Y, Park HJ, Murai Y, Teramura H et al. (2018). Inner



- structure visualization of fresh fruits utilizing ultrasonic velocity profiler.
211. Meberg KR, Eide T, Haffner K, Kvaal K (2001). Quality measurements of ‘Summerred’ apples during storage by the use of computer tomography.
  212. Zhai ZQ, Jin ZH, Li JB, Zhang MY, Zhang RY (2020). Machine learning for detection of walnuts with shriveled kernels by fusing weight and image information.
  213. AI and ML Automate Visual Quality Inspection (<https://www.insight.tech/content/ai-and-ml-automate-visual-quality-inspection>).
  214. Zhou Z, Zhou Z (2012). Application of the internet of things in agriculture products supply chain management.
  215. Yang F, Wang K, Han Y, Qiao Z (2018). A cloud-based digital farm management system for vegetable production process management and quality traceability.
  216. Tian F (2017). A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things.
  217. Artificial Intelligence in Agriculture (<https://www.latentview.com/blog/artificial-intelligence-in-agriculture/>).
  218. Abozar Nasirahmadi, Oliver Hensel (2022). Toward the Next Generation of Digitalization in Agriculture Based on Digital Twin Paradigm.
  219. Grieves M (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication.
  220. Qi QL, Tao F, Hu TL, Anwer N, Liu A et al. (2021). Enabling technologies and tools for a digital twin.
  221. Tao WC, Xie ZX, Zhang Y, Li JY, Xuan F et al. (2021). Corn Residue Covered Area Mapping with a Deep Learning Method Using Chinese.
  222. Vil'cek, J.; Štefan, K. Integrated index of agricultural soil quality in Slovakia.
  223. Yin, H.; Cao, Y.; Marelli, B.; Zeng, X.; Mason, A.J.; Cao, C. Soil Sensors and Plant Wearables for Smart and Precision Agriculture.
  224. Basterrechea, D.A.; Rocher, J.; Parra, M.; Parra, L.; Marin, J.F.; Mauri, P.V.; Lloret, J. Design and Calibration of Moisture Sensor Based on Electromagnetic Field Measurement for Irrigation Monitoring.
  225. Söderström, M.; Sohlenius, G.; Rodhe, L.; Piikki, K. Adaptation of regional digital soil mapping for precision agriculture. *Precis. Agric.* 2016.
  226. Searle, R.; McBratney, A.; Grundy, M.; Kidd, D.; Malone, B.; Arrouays, D.; Stockman, U.; Zund, P.; Wilson, P.; Wilford, J.; et al. Digital soil mapping and assessment for Australia and beyond: A propitious future.
  227. Wadoux, A.M.C.; McBratney, A.B. Digital soil science and beyond.
  228. Alves, R.G.; Souza, G.; Maia, R.F.; Tran, A.L.H.; Kamienski, C.; Soininen, J.P.; Aquino, P.T.; Lima, F. (2022) A digital twin for smart farming.
  229. Irridesk: Precision Irrigation for Vineyard and Orchard Crops (<https://www.futurefarming.com/crop-solutions/irridesk-precision-irrigation-for-vineyard-and-orchard-crops/>).

230. Villani, G.; Castaldi, P.; Toscano, A.; Stanghellini, C.; Cinotti, T.S.; Maia, R.F.; Tomei, F.; Taumberger, M.; Zanetti, P.; Panizzi, S. Soil Water Balance Model CRITERIA-ID in SWAMP.
231. Cunha, H.; Loureiro, D.; Sousa, G.; Covas, D.; Alegre, H. A comprehensive water balance methodology for collective irrigation systems.
232. Pesantez, J.E.; Alghamdi, F.; Sabu, S.; Mahinthakumar, G.; Berglund, E.Z. Using a Digital Twin to Explore Water Infrastructure Impacts During the COVID-19 Pandemic.
233. Moreira, M.; Mourato, S.; Rodrigues, C.; Silva, S.; Guimarães, R.; Chibeles, C. Building a Digital Twin for the Management of Pressurised Collective Irrigation Systems.
234. Reis, Â.V.D.; Medeiros, F.A.; Ferreira, M.F.; Machado, R.L.T.; Romano, L.N.; Marini, V.K.; Francetto, T.R.; Machado, A.L.T. (2021) Technological trends in digital agriculture and their impact on agricultural machinery development practices.
235. CEMA.(2017) Digital Farming: What Does It Really Mean?
236. Rotz, S.; Gravely, E.; Mosby, I.; Duncan, E.; Finnis, E.; Horgan, M.; LeBlanc, J.; Martin, R.; Neufeld, H.T.; Nixon, A.; et al. Automated pastures and the digital divide: How agricultural technologies are shaping labor and rural communities.
237. Verdouw, C.N.; Kruize, J.W. Digital twins in farm management: Illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals.
238. Liu, Q.; Leng, J.; Yan, D.; Zhang, D.; Wei, L.; Yu, A.; Zhao, R.; Zhang, H.; Chen, X. Digital twin-based designing of the configuration, motion, control, and optimization model of a flow-type smart manufacturing system.
239. Alamin, K.; Vinco, S.; Poncino, M.; Dall’Ora, N.; Fraccaroli, E.; Quaglia, D. February. Digital Twin Extension with ExtraFunctional Properties.
240. Kampker, A.; Stich, V.; Jussen, P.; Moser, B.; Kuntz, J. Business Models for Industrial Smart Services–The Example of a Digital Twin for a Product-Service-System for Potato Harvesting.
241. Vlădăreanu, L.; Gal, A.I.; Melinte, O.D.; Vlădăreanu, V.; Iliescu, M.; Bruja, A.; Feng, Y.; Ciocîrlan, A. Robot Digital Twin towards Industry 4.0
242. Wang, Q.; Jiao, W.; Wang, P.; Zhang, Y. Digital Twin for Human-Robot Interactive Welding and Welder Behavior Analysis.
243. Garg, G.; Kuts, V.; Anbarjafari, G. Digital Twin for FANUC Robots: Industrial Robot Programming and Simulation Using Virtual Reality.
244. The Future of Farming: 7 Ways a Digital Twin Can Be Applied to Agriculture (<https://mentormate.com/blog/the-future-of-farming-7-ways-a-digital-twin-can-be-applied-to-agriculture/>).
245. Tsolakis, N.; Bechtsis, D.; Bochtis, D. AgROSos: A Robot Operating System Based Emulation Tool for Agricultural Robotics.
246. Linz, A.; Hertzberg, J.; Roters, J.; Ruckelshausen, A. “Digitale Zwillinge” als Werkzeug für die Entwicklung von Feldrobotern in landwirtschaftlichen Prozessen.
247. Ford, D.N.; Wolf, C.M. Smart Cities with Digital Twin Systems for Disaster Management.

248. Tsay, J.R.; Lu, C.T.; Tu, T.C. Application of Common Information Platform to Foster Data-Driven Agriculture in Taiwan. Food Agricultural Policy Platform Article.
249. Villalonga, A.; Negri, E.; Fumagalli, L.; Macchi, M.; Castaño, F.; Haber, R. Local Decision Making based on Distributed Digital Twin Framework.
250. Moshrefzadeh, M.; Machl, T.; Gackstetter, D.; Donaubaue, A.; Kolbe, T.H. Towards a Distributed Digital Twin of the Agricultural Landscape.
251. Monteiro, J.; Barata, J.; Veloso, M.; Veloso, L.; Nunes, J. Towards sustainable digital twins for vertical farming.
252. Skobelev, P.O.; Mayorov, I.V.; Simonova, E.V.; Goryanin, O.I.; Zhilyaev, A.A.; Tabachinskiy, A.S.; Yalovenko, V.V. Development of models and methods for creating a digital twin of the plant within the cyber-physical system for precision farming management.
253. Jans-Singh, M.; Leeming, K.; Choudhary, R.; Girolami, M. Digital twin of an urban-integrated hydroponic farm.
254. Chau, J.D.; Sanchez-Londono, D.; Barbieri, G. A Digital Twin Architecture to Optimize Productivity within Controlled Environment Agriculture.
255. Digital Twins in Agriculture (<https://www.iese.fraunhofer.de/blog/digital-twins-agriculture/>).
256. RD 100 2019 Winner - Digital Twin Solutions for Smart Farming (<https://www.rdworltonline.com/rd-100-2019-winner/digital-twin-solutions-for-smart-farming/>).
257. Lezoche, M.; Hernandez, J.E.; Del Mar Alemany Díaz, M.; Panetto, H.; Kacprzyk, J. Agri-food 4.0: A survey of the supply chains and technologies for future agriculture.
258. Purandare, H.; Ketkar, N.; Pansare, S.; Padhye, P.; Ghotkar, A. Analysis of post-harvest losses: An Internet of Things and machine learning approach.
259. Mishra, C.K.; Chakshu. Post-harvest crop management system using IoT and AI.
260. Mor, S.; Madan, S.; Prasad, K.D. Artificial intelligence and carbon footprints: Roadmap for Indian agriculture.
261. Onwude, D.I.; Chen, G.; Eke-Emezio, N.; Kabutey, A.; Khaled, A.Y.; Sturm, B. Recent Advances in Reducing Food Losses in the Supply Chain of Fresh Agricultural Produce.
262. Bekele, B. Review on Factors Affecting Postharvest Quality of Fruits.
263. Eppinger, T.; Longwell, G.; Mas, P.; Goodheart, K.; Badiali, U.; Aglave, R. Increase Food Production Efficiency Using the Executable Digital Twin (xDT).
264. Van Der Burg, S.; Kloppenburg, S.; Kok, E.J.; van der Voort, M. Digital twins in agri-food: Societal and ethical themes and questions for further research.
265. Verboven, P.; Defraeye, T.; Datta, A.K.; Nicolai, B. Digital twins of food process operations: The next step for food process models?
266. Koulouris, A.; Misailidis, N.; Petrides, D. Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food

ingredients and products.

267. Defraeye, T.; Tagliavini, G.; Wu, W.; Prawiranto, K.; Schudel, S.; Kerisima, M.A.; Verboven, P.; Bühlmann, A. Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains.
268. Defraeye, T.; Shrivastava, C.; Berry, T.; Verboven, P.; Onwude, D.; Schudel, S.; Bühlmann, A.; Cronje, P.; Rossi, R.M. Digital twins are coming: Will we need them in supply chains of fresh horticultural produce?
269. Burgos, D.; Ivanov, D. Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions.
270. Shoji, K.; Schudel, S.; Onwude, D.; Shrivastava, C.; Defraeye, T. Mapping the postharvest life of imported fruits from packhouse to retail stores using physics-based digital twins.
271. Turgut, D.; Boloni, L. Value of Information and Cost of Privacy in the Internet of Things.
272. Rousi, M.; Sitokonstantinou, V.; Meditskos, G.; Papoutsis, I.; Gialampoukidis, I.; Koukos, A.; Karathanassi, V.; Drivas, T.; Vrochidis, S.; Kontoes, C.; et al. Semantically Enriched Crop Type Classification and Linked Earth Observation Data to Support the Common Agricultural Policy Monitoring.
273. Ammad Uddin, M.; Ayaz, M.; Aggoune, E.-H.M.; Mansour, A.; Le Jeune, D. Affordable Broad Agile Farming System for Rural and Remote Area.
274. Joshi, A.; Dandekar, I.; Hargude, N.; Shrotri, A.P.; Dandekar, A.R. Application of Internet of the Things(IOT) for the Water Conservation and Entrepreneurship in the Rural Area.
275. De Lima, C.; Belot, D.; Berkvens, R.; Bourdoux, A.; Dardari, D.; Guillaud, M.; Isomursu, M.; Lohan, E.-S.; Miao, Y.; Barreto, A.N.; et al. Convergent Communication, Sensing and Localization in 6G Systems: An Overview of Technologies, Opportunities and Challenges.
276. Sandal, Y.S.; Pusane, A.E.; Kurt, G.K.; Benedetto, F. Reputation Based Attacker Identification Policy for Multi-Access Edge Computing in Internet of Things.
277. Wang, J.; Hao, S.; Wen, R.; Zhang, B.; Zhang, L.; Hu, H.; Lu, R. IoT-Praetor: Undesired Behaviors Detection for IoT Devices.
278. Jia, Y.; Zhong, F.; Alrawais, A.; Gong, B.; Cheng, X. FlowGuard: An Intelligent Edge Defense Mechanism against IoT DDoS Attacks.
279. Agrawal, N.; Tapaswi, S. Defense Mechanisms against DDoS Attacks in a Cloud Computing Environment: State-of-the-Art and Research Challenges.
280. Somani, G.; Gaur, M.S.; Sanghi, D.; Conti, M.; Rajarajan, M.; Buyya, R. Combating DDoS Attacks in the Cloud: Requirements, Trends, and Future Directions.
281. Wang, J.; Zhu, R.; Liu, S. A Differentially Private Unscented Kalman Filter for Streaming Data in IoT.
282. Yu, Y.; Ding, Y.; Zhao, Y.; Li, Y.; Zhao, Y.; Du, X.; Guizani, M. LRCoin: Leakage-Resilient Cryptocurrency Based on Bitcoin for Data Trading in IoT. *IEEE Internet Things J.*

283. Ali, I.; Kaur, S.; Khamparia, A.; Gupta, D.; Kumar, S.; Khanna, A.; Al-Turjman, F. Security Challenges and Cyber Forensic Ecosystem in IoT Driven BYOD Environment.
284. Neshenko, N.; Bou-Harb, E.; Crichigno, J.; Kaddoum, G.; Ghani, N. Demystifying IoT Security: An Exhaustive Survey on IoT Vulnerabilities and a First Empirical Look on Internet-Scale IoT Exploitations.
285. Chaterji, S.; DeLay, N.; Evans, J.; Mosier, N.; Engel, B.; Buckmaster, D.; Ladisch, M.R.; Chandra, R. Lattice: A Vision for Machine Learning, Data Engineering, and Policy Considerations for Digital Agriculture at Scale.
286. Jin, B.; Jiang, D.; Xiong, J.; Chen, L.; Li, Q. D2D Data Privacy Protection Mechanism Based on Reliability and Homomorphic Encryption.
287. Harn, L.; Hsu, C.-F.; Xia, Z.; He, Z. He Lightweight Aggregated Data Encryption for Wireless Sensor Networks (WSNs). *IEEE Sens. Lett.*
288. Jia, B.; Zhang, X.; Liu, J.; Zhang, Y.; Huang, K.; Liang, Y. Blockchain-Enabled Federated Learning Data Protection Aggregation Scheme With Differential Privacy and Homomorphic Encryption in IIoT.
289. Chen, L.; Thombre, S.; Jarvinen, K.; Lohan, E.S.; Alén-Savikko, A.; Leppakoski, H.; Bhuiyan, M.Z.H.; Bu-Pasha, S.; Ferrara, G.N.; Honkala, S.; et al. Robustness, Security and Privacy in Location-Based Services for Future IoT: A Survey.
290. Ballal, K.D.; Dittmann, L.; Ruepp, S.; Petersen, M.N. IoT Devices Reliability Study: Multi-RAT Communication.
291. GlobalSign "What is the Internet of Things (IoT) and How Does It Work?" (<https://www.globalsign.com/en-sg/blog/what-internet-things-and-how-does-it-work>)
292. Knoldus Blog "Know About Cloud Computing Architecture." (<https://blog.knoldus.com/know-about-cloud-computing-architecture/>)
293. AVSystem Blog "LPWAN - The Low Power Wide Area Network Explained." (<https://www.avsystem.com/blog/LPWAN/>)
294. Financial IT "Machine Learning and Its Revolutionary Impact on Financial Services." (<https://financialit.net/blog/financial/machine-learning-and-its-revolutionary-impact-financial-services>)
295. Esri "Digital Twin Technology Overview." (<https://www.esri.com/en-us/digital-twin/overview>)
296. Farming Paradise "A Guide to Precision Agriculture Farming." (<https://farmingparadise.com/precision-agriculture-farming-guide/>)
297. "ARMOR Doppler Weather Radar." ([https://en.wikipedia.org/wiki/ARMOR\\_Doppler\\_Weather\\_Radar](https://en.wikipedia.org/wiki/ARMOR_Doppler_Weather_Radar))
298. Shutterstock "Aquaponic Images." (<https://www.shutterstock.com/search/aquaponic>)
299. Krishi Jagran "IIIT-B & IIHRS IoT Autogrow System Boosts Precision Farming." (<https://krishijagran.com/news/iiit-b-iihrs-iot-autogrow-system-boosts-precision-farming/>)
300. Analytics Vidhya "Support Vector Machines (SVM) - A Complete Guide for



Beginners." (<https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/10/support-vector-machinessvm-a-complete-guide-for-beginners/>)

301. HackerEarth "A Tutorial on Decision Trees for Machine Learning." (<https://www.hackerearth.com/practice/machine-learning/machine-learning-algorithms/ml-decision-tree/tutorial/>)
302. JavaTpoint "Random Forest Algorithm in Machine Learning." (<https://www.javatpoint.com/machine-learning-random-forest-algorithm>)
303. Encyclopedia "Digital Twins in Agriculture." (<https://encyclopedia.pub/entry/17672>)
304. ResearchGate "Automatic Irrigation System with PV Solar Tracking." ([https://www.researchgate.net/publication/328916343\\_Automatic\\_irrigation\\_system\\_with\\_pv\\_solar\\_tracking](https://www.researchgate.net/publication/328916343_Automatic_irrigation_system_with_pv_solar_tracking))
305. Chem LibreTexts "Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)." ([https://chem.libretexts.org/Courses/Howard\\_University/Howard%3A\\_Physical\\_Chemistry\\_Laboratory/14\\_Fourier\\_Transform\\_Infrared\\_Spectroscopy\\_\(FTIR\)](https://chem.libretexts.org/Courses/Howard_University/Howard%3A_Physical_Chemistry_Laboratory/14_Fourier_Transform_Infrared_Spectroscopy_(FTIR)))