



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μελέτη & Ανάπτυξη Ψηφιακού Διδύμου Εδάφους.



Φοιτητής: ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΑΜ: 50107104

Επιβλέπων Καθηγητής

ΠΥΡΟΜΑΛΛΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Research & Development of a Soil's Digital Twin



Student: GIANNAKOPOULOS NIKOLAOS
Registration Number: 50107104

Supervisor

PIROMALIS DIMITRIOS
Associate Professor

ATHENS-EGALEO, OCTOBER 2023

Πυρομάλης Δημήτριος Αναπληρωτής Καθηγητής	Βόκας Γεώργιος Καθηγητής	Καμινάρης Σταύρος Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ,
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 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 Γιαννακόπουλος Νικόλαος του Ιωάννη με αριθμό μητρώου 50107104 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.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 12/10/2024 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών

ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ



(Υπογραφή φοιτητή)

{Σελίδα αφιέρωσης (προαιρετικά)}

{Σελίδα ευχαριστιών (προαιρετικά)}

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναλύονται ορισμένοι βασικοί όροι για το έδαφος και τα στοιχεία που το απαρτίζουν, καθώς και τα είδη των εδαφών που υπάρχουν. Έπειτα, αντικείμενο της εργασίας ήταν το πότισμα ακριβείας και γενικότερα το πως αυτό έχει επηρεάσει τον σύγχρονο κόσμο και την κοινωνία, καθώς και διάφορα παραδείγματα από έρευνες σε διάφορα μέρη της υδρογείου και τους κανονισμούς που θα πρέπει να ακολουθηθούν. Τέλος, αναπτύχθηκαν κώδικες προγραμμάτων στο διαδραστικό περιβάλλον του MATLAB, καθώς και διαγράμματα ροής στο εργαλείο SIMULINK, με στόχο την επίλυση του προβλήματος της εξοικονόμησης του νερού και με ποιες τεχνολογίες μπορεί αυτό το θέμα να εξαλειφεί.

Λέξεις – κλειδιά

Έδαφος, Τύποι εδάφους, Άρδευση ακριβείας, MATLAB, SIMULINK, Ψηφιακό Δίδυμό

Abstract

In this thesis, some basic terms for the soil and the elements that make it up, as well as the types of soil that exist, are analyzed. Then, the topic was precision irrigation and in general how it has affected the modern world and society, as well as various examples from research in different parts of the globe and the regulations that must be followed. Finally, program codes were developed in the interactive environment of MATLAB, as well as flowcharts in the SIMULINK tool, with the aim of solving the problem of water conservation and with which technologies this issue can be eliminated.

Keywords

Soil, Types of Soil, Precision Irrigation, , MATLAB, SIMULINK, Digital Twin

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	12
Κατάλογος Εικόνων	12
Αλφαβητικό Ευρετήριο	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	14
Σκοπός και στόχοι	14
Μεθοδολογία	15
Καινοτομία	15
Δομή 15	
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Ανάλυση εδάφους και ορισμοί	16
1.1 Βασικοί ορισμοί	16
1.1.1 Εδαφολογία	16
1.1.2 Εδαφογένεση.....	16
1.2 Συστατικά του εδάφους	16
1.2.1 Στερεή φάση του εδάφους	17
1.2.2 Υγρή φάση του εδάφους	17
1.2.3 Ανόργανα συστατικά εδάφους	17
1.3 Ορυκτά	18
1.3.1 Πρωτογενή ορυκτά	18
1.3.2 Δευτερογενή ορυκτά	18
1.4 Πετρώματα	18
1.4.1 Πυριγενή πετρώματα.....	18
1.4.2 Ιζηματογενή πετρώματα.....	19
1.4.3 Μεταμορφωσιγενή ή κρυσταλλοσχιτώδη πετρώματα	19
1.5 Αποσάθρωση Ορυκτών και Πετρωμάτων	20
1.5.1 Φυσική αποσάθρωση	20
1.5.2 Χημική αποσάθρωση	20
1.6 Οργανικά συστατικά του εδάφους	21
1.7 Ζωντανοί οργανισμοί του εδάφους	21
1.7.1 Εδαφική χλωρίδα	21
1.7.2 Εδαφική πανίδα.....	22
1.8 Πηγές και σύσταση οργανικής ουσίας	22
1.9 Νερό του εδάφους	23
1.9.1 Υδατοχωρητικότητα εδάφους	23
1.10 Αέρας του εδάφους	24
1.11 Φυσικές ιδιότητες του εδάφους	24
1.11.1 Κοκκομετρική σύσταση του εδάφους.....	24
1.11.2 Δομή του εδάφους	25
1.12 Κατηγορίες συσσωματωμάτων	26
1.12.1 Σχηματισμός και σταθερότητα συσσωματωμάτων	26
1.13 Χημικές ιδιότητες του εδάφους	27
1.13.1 Ανταλλαγή κατιόντων	27
1.13.2 Ρυθμιστική ικανότητα και pH του εδάφους	28
1.14 Εδαφολογικό προφίλ και ορίζοντες	29
1.15 Ταξινόμηση των εδαφών	32
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Άρδευση ακριβείας και λειτουργία	37
2.1 Εισαγωγή στην άρδευση ακριβείας	37
2.2 Η ανάγκη για άρδευση ακριβείας	37
2.3 Συνιστώσες της άρδευσης ακριβείας	38

2.4	Πλεονεκτήματα της άρδευσης ακριβείας	38
2.4.1	Μειονεκτήματα άρδευσης ακριβείας.....	38
2.5	Η σημασία του τύπου εδάφους στην άρδευση ακριβείας	39
2.6	Υγρασία του εδάφους και ανάπτυξη των φυτών	39
2.6.1	Ο ρόλος της εδαφικής υγρασίας.....	39
2.6.2	Περιεκτικότητα σε εδαφική υγρασία και υγεία των φυτών	40
2.7	Τύποι εδάφους και ικανότητα συγκράτησης υγρασίας	40
2.8	Υδατική καταπόνηση και αντίδραση των φυτών	40
2.9	Άρδευση προσαρμοσμένη στις ανάγκες των φυτών	40
2.10	Εξασφάλιση βιώσιμης ανάπτυξης	40
2.11	Καινοτομίες για την αξιολόγηση της υγρασίας του εδάφους	41
2.12	Αισθητήρες υγρασίας εδάφους	41
2.13	Τηλεπισκόπηση	41
2.14	Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	41
2.15	Συστήματα ανάλυσης δεδομένων και υποστήριξης αποφάσεων	42
2.16	Πλεονεκτήματα και προκλήσεις	42
2.17	Στρατηγικές άρδευσης προσαρμοσμένες στον τύπο του εδάφους	42
2.18	Προγραμματισμός άρδευσης με βάση το συγκεκριμένο έδαφος	43
2.18.1	Αμμώδη εδάφη: συχνή και ελεγχόμενη άρδευση	43
2.18.2	Πηλώδη εδάφη: σταθερότητα και ευελιξία.....	43
2.18.3	Αργιλώδη εδάφη: έλεγχος της άρδευσης	43
2.19	Τεχνολογική ακρίβεια	43
2.20	Εκτιμήσεις για συγκεκριμένες καλλιέργειες	44
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Επίδραση άρδευσης ακριβείας στον σύγχρονο κόσμο	45
3.1	Εισαγωγή	45
3.2	Προβλήματα στην γεωργία ακριβείας	47
3.3	Μέθοδοι καταπολέμησης προβλημάτων που προκύπτουν:	48
3.3.1	Άρδευση με σταγόνες (Drip irrigation)	49
3.3.2	Αισθητήρες υγρασίας εδάφους:.....	52
3.3.3	Άρδευση με μεταβλητό ρυθμό	55
3.3.4	Ελεγκτές βάσει καιρού.....	58
3.3.5	Micro-Sprinkles (Μίκρο-Ψεκαστές)	60
3.4	Αρμόδιοι Οργανισμοί	63
3.5	Έρευνες και αποτελέσματα	63
4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: Ανάπτυξη ψηφιακού διδύμου στο MATLAB και SIMULINK	65
4.1	Εισαγωγή	65
4.2	Τι είναι το ψηφιακό δίδυμο εδάφους	65
4.2.1	Από τι αποτελείται ένα ψηφιακό δίδυμο εδάφους.....	65
4.3	Ενσωμάτωση MATLAB- SIMULINK	66
4.3.1	Τι είναι το MATLAB και πως λειτουργεί.....	67
4.3.2	Τι είναι το SIMULINK και πως λειτουργεί.....	68
4.4	Κατηγοριοποίηση εδαφών	70
4.4.1	Με βάση το pH τους	70
4.4.2	Με βάση το ποσοστό υγρασίας τους.....	71
4.4.3	Με βάση την σύσταση των ορυκτών τους	72
4.5	Κατηγοριοποίηση εδαφών σε αμμώδη, πηλώδη και αργιλώδη	73
4.5.1	Αμμώδη εδάφη	73
4.5.2	Πηλώδη εδάφη	74
4.5.3	Αργιλώδη εδάφη.....	74
4.6	Flow Chart συνολικού κώδικα κατηγοριοποίησης εδαφών	76
4.6.1	Flow Chart της συνάρτησης Value	77
4.6.2	Flow Chart της συνάρτησης SoilType	78
4.7	Συνολικός κώδικας κατηγοριοποίησης εδαφών	78
4.7.1	Επεξήγηση κώδικα	80

4.8	Διάγραμμα Ροής στο Simulink	81
4.8.1	Στοιχεία που απαρτίζουν το μοντέλου Simulink	81
4.9	Τελικό Σύστημα στο Simulink	87
4.10	Παράδειγμα του Συστήματος	87
4.10.1	Παράδειγμα του Συστήματος με ενίσχυση	90
5	Συμπεράσματα	92
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές		93
Παράρτημα Α		100
Παράρτημα Β		100
Παράρτημα Γ		100

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1. Αμμώδη εδάφη [24]

Πίνακας 1.2. Πηλώδη εδάφη [24]

Πίνακας 1.3. Αργιλώδη εδάφη [24]

Πίνακας 1.4. Ταξινόμηση εδαφών με βάση το World Reference Base(WRB)[31]

Πίνακας 1.5. Ιδιότητες οριζόντων εδάφους[32]

Πίνακας 4.1. Επίδραση του PID στη συμπεριφορά του συστήματος κλειστού βρόγχου[80]

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα Εξώφυλλου: “Digital twin in Agriculture - STABILITY,” *STABILITY*, Dec. 29, 2020. (<https://www.stability.co/digital-twin-in-agriculture/>)

Εικόνα 1.1. Σχηματική απεικόνιση του εδάφους ως συστήματος τριών φάσεων (https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/TGH222/Lecture_1_Ardeuseis_2019.pdf)[16]

Εικόνα 1.2. Μηχανική σύσταση του εδάφους (http://www.teidasoponias.gr/site/news/xtra/morfologia/fisikes_idiotites_edafous.pdf) [23]

Εικόνα 1.3. Βαθμός οξύτητας εδάφους – pH εδάφους ([terraGIS Soil \(unsw.edu.au\)](http://terraGIS_Soil.unsw.edu.au)) [27]

Εικόνα 1.4. Εδαφικοί ορίζοντες (<https://ts.sch.gr/repo/online-packages/gym-chimeia-bc/chemistry/common/doyouknow/chapt4/soillayers.htm>) [28]

Εικόνα 1.5. Παγκόσμια βάση αναφοράς για τους πόρους εδάφους (<https://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>) [30]

Εικόνα 2.1. Άρδευση ακριβείας (<https://eos.com/blog/precision-irrigation/>)[36]

Εικόνα 3.1. Άρδευση με σταγόνες (<https://earth.works/drip-irrigation-systems-fight-back-against-the-texas-heat/>) [49]

Εικόνα 3.2. Αισθητήρας υγρασίας οικιακής χρήσης(<https://gardenerspath.com/gear/tools-and-supplies/soil-moisture-meter>) [54]

Εικόνα 3.3. Μίκρο-Ψεκαστήρες (<https://www.agrico.co.za/irrigation-solutions/drip-micro-irrigation/>) [60]

Εικόνα 4.1 MathWorks (<https://www.mathworks.com/>) [67]

Εικόνα 4.2. Flow Chart Συνολικού κώδικα [76]

Εικόνα 4.3. Flow Chart συνάρτησης Value [77]

Εικόνα 4.4. Flow Chart συνάρτησης SoilType [78]

Εικόνα 4.5 Απεικόνιση PID Controller

(https://en.wikipedia.org/wiki/Proportional%20%93integral%20%93derivative_controller) [83]

Εικόνα 4.6 Μαθηματική σχέση PID Controller

(https://en.wikipedia.org/wiki/Proportional%20%93integral%20%93derivative_controller) [83]

Εικόνα 4.7 Αισθητήρας υγρασίας εδάφους με αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα(<https://store.ncd.io/product/soil-moisture-sensor-analog-digital/>) [84]

Εικόνα 4.8. Υποσύστημα για την μετατροπή του αισθητήρα υγρασίας εδάφους [84]

Εικόνα 4.9. Αισθητήρας pH εδάφους (<https://www.renkeer.com/product/soil-ph-sensor/>) [85]

Εικόνα 4.10. Υποσύστημα για την τιμή του αισθητήρα pH εδάφους[85]

Εικόνα 4.11. Αισθητήρας NPK εδάφους (<https://www.renkeer.com/product/soil-npk-sensor/>) [86]

Εικόνα 4.12. Υποσύστημα για την τιμή των NPK του εδάφους [86]

Εικόνα 4.13. Συνολικό Υποσύστημα για τον υπολογισμό του επιπέδου του νερού[87]

Εικόνα 4.14.Απεικόνιση πλήρους συστήματος[87]

Εικόνα 4.15.Αποτέλεσμα της πραγματικής τιμής του νερού[88]

Εικόνα 4.16. Αποτέλεσμα της απαιτούμενης τιμής του νερού μετά τον PID Controller [88]

Εικόνα 4.17. Κυματομορφή Χρόνου (σε Δευτερόλεπτα) - Τιμής νερού[89]

Εικόνα 4.18. Αποτέλεσμα της απαιτούμενης τιμής του νερού με ενίσχυση πριν τον PID Controller [90]

Εικόνα 4.19. Κυματομορφή Χρόνου (σε Δευτερόλεπτα) - Τιμής νερού με ενίσχυση[90]

Αλφαβητικό Ευρετήριο

WRB: Word Reference Base

pH: potential of Hydrogen

IoT: Internet Of Things

MATLAB: MATrix LABoratory

PID Controller: Proportional, Integral, Derivative Controller

NPK : Nitrogen(N), Phosphorus(P), Potassium(K)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε έναν κόσμο όπου η παγκόσμια οικονομία βρίσκεται σε κρίση, καθώς και οι βιώσιμοι πόροι, η ανάγκη για την άρδευση ακριβείας αναδεικνύεται ως μια κρίσιμη απάντηση, αντιμετωπίζοντας τους αυξανόμενους περιορισμούς νερού και την ανάγκη τροφοδοσίας ενός αυξανόμενου πληθυσμού. Η ικανότητά του να ρυθμίζει με ακρίβεια την εφαρμογή του νερού και την παράδοση λιπασμάτων στις καλλιέργειες έχει τη δυνατότητα να εξοικονομήσει νερό ενώ αυξάνει τη γεωργική παραγωγή. Η περίπλοκη σχέση μεταξύ της σύνθεσης του εδάφους και των γεωργικών πρακτικών είναι κρίσιμη για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η άρδευση ακριβείας μπορεί να αλλάξει την τρέχουσα γεωργία. Το έδαφος, ο ακρογωνιαίος λίθος της γεωργίας, εμφανίζεται σε διάφορες μορφές, καθεμία από τις οποίες έχει μοναδικές ιδιότητες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών και τη συγκράτηση του νερού. Η άρδευση ακριβείας, συνδυάζοντας τεχνολογία και γεωργία, όχι μόνο αντιμετωπίζει το πιεστικό ζήτημα της βιωσιμότητας του νερού, αλλά ευθυγραμμίζεται επίσης με τους ευρύτερους στόχους της αειφόρου ανάπτυξης, διασφαλίζοντας ότι η γεωργία παραμένει βιώσιμη, παραγωγική και περιβαλλοντικά υπεύθυνη για τις μελλοντικές γενιές. Αυτή η επισκόπηση προετοιμάζει τον αναγνώστη για μια πιο εις βάθος εξέταση του πώς λειτουργεί η άρδευση ακριβείας, οι πολυάριθμες προσεγγίσεις της και η επαναστατική επιρροή που μπορεί να έχει στην παγκόσμια γεωργία.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η άρδευση ακριβείας είναι απαραίτητη στη σύγχρονη γεωργία λόγω μιας σειράς, καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός συνεχίζει να αυξάνεται, αυξάνεται και η ζήτηση για παραγωγή τροφίμων, επιβαρύνοντας τεράστια τα αποθέματα νερού. Τα παραδοσιακά συστήματα άρδευσης οδηγούν συχνά σε αναποτελεσματική κατανάλωση νερού, με αποτέλεσμα τη σπατάλη και την περιβαλλοντική επιβάρυνση. Η άρδευση ακριβείας, από την άλλη πλευρά, αντιμετωπίζει αυτό το ζήτημα παρέχοντας την κατάλληλη ποσότητα νερού, θρεπτικών ουσιών και άλλων πόρων απευθείας στις ρίζες των φυτών. Δηλαδή, βελτιστοποιεί την κατανομή των πόρων, μειώνει τη σπατάλη νερού και βελτιώνει την ανάπτυξη των καλλιεργειών χρησιμοποιώντας καινοτόμο τεχνολογία, όπως αισθητήρες υγρασίας εδάφους, επεξεργασία δεδομένων καιρού και ελεγχόμενα συστήματα άρδευσης. Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή και τα απροσδόκητα καιρικά φαινόμενα θέτουν απαραίτητο τον ακριβή έλεγχο άρδευσης για να διασφαλιστεί ότι οι καλλιέργειες λαμβάνουν την κατάλληλη ενυδάτωση παρά τις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες.

Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της εργασίας είναι η ανάλυση του όρου άρδευση ακριβείας, διερευνώντας αρχικά, ευρύτερα το έδαφος και την σημασία του και δημιουργώντας κατάλληλα προγράμματα και διαγράμματα ροής για την κατηγοριοποίηση του εδάφους και αφετέρου τον υπολογισμό τόσο της κατάλληλης ποσότητας του νερού σύμφωνα με αυτό, για την καλύτερη και πιο εφικτή εξοικονόμηση των υδάτινων πόρων, θέμα που μαστίζει την σύγχρονη εποχή, λόγω της μείωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Μεθοδολογία

Αρχικά αναλύθηκε το έδαφος με σκοπό την εμβάθυνση και κατανόησή του. Έτσι, όταν ζητήθηκε η ανάπτυξη ενός μοντέλου άρδευσης ακριβείας, να ήταν γνωστές οι απαραίτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν. Αφού έγιναν αυτά, αναπτύχθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού MATLAB και έπειτα διάγραμμα ροής στο SIMULINK, από τα οποία μπορούν να αντληθούν αρκετές πληροφορίες.

Καινοτομία

Πρωτόγνωρα χαρακτηριστικά της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι ο υπολογισμός του χρόνου της απαραίτητης ποσότητας νερού για την καλλιέργεια των φυτών με βάση τον τύπο του εδάφους.

Δομή

Κεφάλαιο 1: Ανάλυση εδάφους και ορισμοί

Κεφάλαιο 2: Άρδευση Ακριβείας και λειτουργία

Κεφάλαιο 3: Επίδραση άρδευση ακριβείας στον σύγχρονο κόσμο

Κεφάλαιο 4: Ανάπτυξη ψηφιακού διδύμου στο MATLAB και SIMULINK

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Ανάλυση εδάφους και ορισμοί

Έδαφος είναι η διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στη λιθόσφαιρα και την ατμόσφαιρα. Λειτουργεί ως φίλτρο μέσα από το οποίο διέρχονται το νερό και διάφορες άλλες ουσίες, συμμετέχει στην ανταλλαγή αερίων με την ατμόσφαιρα, συνορεύει με την υδρόσφαιρα, την οποία επηρεάζει και επηρεάζεται από την αυτήν και, τέλος, λαμβάνει μέρος στην κατανομή της ενέργειας που προσλαμβάνει το σύστημα από τον ήλιο, ρυθμίζοντας τις τυχόν απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας του συστήματος.

Το έδαφος αποτελεί στήριγμα για τα φυτά, ενώ παράλληλα, τα προμηθεύει με το απαραίτητο νερό και θρεπτικά στοιχεία (ανόργανα και οργανικά). Ακόμη, συγκρατεί μέρος των ανόργανων στοιχείων, όπως είναι το υδρογόνο, το οξυγόνο, το κάλιο, το άζωτο, το ασβέστιο, ο φώσφορος, ο σίδηρος, ο χαλκός κ.α., τα οποία απελευθερώνονται κατά το στάδιο της αποσάθρωσης των πετρωμάτων σε μορφή διαλυτή, λίγο πριν αυτά απολήξουν στις λίμνες, τα ποτάμια και τους ωκεανούς. Επιπλέον, στο έδαφος διαβιούν πολυάριθμοι οργανισμοί, όπως μικροοργανισμοί, μύκητες και μικρά ζώα [1]. Οι μικροοργανισμοί αυτοί έχουν πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς, αποικοδομούν φυτικά υλικά, συμβάλλοντας στην ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών του οικοσυστήματος, γεγονός που καθιστά ικανή τη συνέχιση της ζωής.

Ως έδαφος, λοιπόν, μπορεί να οριστεί το στρώμα από οργανικά και ανόργανα υλικά, το οποίο καλύπτει την χερσαία επιφάνεια της γης, και δημιουργήθηκε από την αποσάθρωση (αποσύνθεση) πετρωμάτων και ορυκτών, υπό την επίδραση φυσικών, χημικών και βιολογικών φαινομένων.

1.1 Βασικοί ορισμοί

1.1.1 Εδαφολογία

Ο όρος «εδαφολογία» αναφέρεται στην επιστήμη, η οποία ασχολείται με την ταξινόμηση, την χαρτογράφηση και τον σχηματισμό των εδαφών, με την μελέτη της γονιμότητάς τους, τις φυσικές, χημικές, βιολογικές και μορφολογικές τους ιδιότητες, καθώς και τη διαχείρισή τους, που αποσκοπούν στη γεωργική παραγωγή.

1.1.2 Εδαφογένεση

Ο όρος «εδαφογένεση» αναφέρεται σε μια σειρά διεργασιών και περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

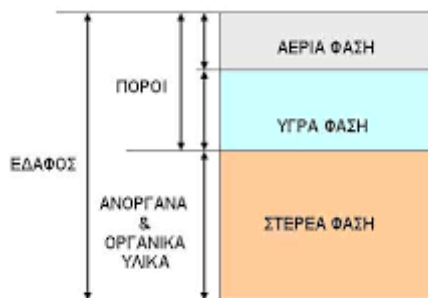
1. Την αποσύνθεση (αποσάθρωση) των πετρωμάτων και των ορυκτών (μητρικό υλικό)
2. Την ανασύνθεση ορυκτών (δευτερογενών), κατά κύριο λόγο μέσω χημικών ενώσεων των υδροξειδίων και των οξυυδροξειδίων του πυριτίου και αργιλίου με κατιόντα
3. Την μετακίνηση διαφόρων συστατικών που προκύπτουν, κυρίως, κατά την αποσάθρωση

Ως αποτέλεσμα, το έδαφος που σχηματίζεται είναι πολύ πιο σταθερό και πλούσιο σε θρεπτικά στοιχεία, και διαφέρει από τη σύσταση του μητρικού υλικού στις διάφορες ιδιότητές του – φυσικές, χημικές, βιολογικές, μορφολογικές [2].

1.2 Συστατικά του εδάφους

Το έδαφος απαρτίζεται από [3].:

- Ανόργανα Στερεά Συστατικά σε ποσοστό 45%
- Οργανικά Στερεά Συστατικά σε ποσοστό 5%
- Νερό και Αέρα σε ποσοστό 50%

ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ
ΩΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΡΙΩΝ ΦΑΣΕΩΝ

Εικόνα 1.1. Σχηματική απεικόνιση του εδάφους ως συστήματος τριών φάσεων

1.2.1 Στερεή φάση του εδάφους

Τα ανόργανα συστατικά μπορεί να χαρακτηριστούν, ανάλογα με το μέγεθός τους, ως άμμος, ιλύς και άργιλος. Η αναλογία αυτών των τριών στοιχείων, ορίζει την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους, η οποία επηρεάζει τις ιδιότητες των εδαφών και καθορίζει το μέγεθος και το σχήμα των πόρων εντός των οποίων κινείται ο αέρας και το νερό.

Η οργανική ουσία ή χούμος του εδάφους, δημιουργείται κατά την αποσάθρωση των φυτικών υπολειμμάτων που γίνεται με τη βοήθεια μικροοργανισμών και οδηγεί, τελικά, στην απελευθέρωση θρεπτικών στοιχείων. Η ύπαρξη του χούμου επιτρέπει την συγκράτηση μεγαλύτερου ποσού νερού και θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος [4].

1.2.2 Υγρή φάση του εδάφους

Ο όρος «εδαφικό διάλυμα» αναφέρεται στην υγρή φάση και αφορά στο νερό που εισέρχεται στο έδαφος μετά από άρδευση ή βροχή. Η κοκκομετρική σύσταση του εδάφους και η φύση της αργίλου, έχουν κύριο ρόλο στην ποσότητα διαλύματος που τελικά θα εισέλθει στο έδαφος και επηρεάζει ορισμένες φυσικές ιδιότητες των εδαφών, για παράδειγμα τη συνεκτικότητά τους. Ο κυριότερος ρόλος, ωστόσο, είναι η παροχή του απαραίτητου νερού και θρεπτικών συστατικών για την ανάπτυξη τους [5].

1.2.3 Ανόργανα συστατικά εδάφους

Τα ανόργανα συστατικά του εδάφους προκύπτουν από την αποσάθρωση των ορυκτών και των πετρωμάτων από το μητρικό υλικό. Παραδείγματος χάριν, η αποσύνθεση μητρικού υλικού πλούσιου σε ανθρακικό ασβέστιο συμβάλλει στη δημιουργία εδαφών που είναι πλούσια σε ασβέστιο, αλλά φτωχά σε άλλα θρεπτικά στοιχεία, με αποτέλεσμα την μερική ή και ολική απουσία βλάστησης, ανάλογα με τον βαθμό αποσάθρωσης. Σε αντίθεση, κατά την αποσύνθεση μητρικού υλικού ιζηματογενών πετρωμάτων τα οποία έχουν σχηματιστεί κάτω από υδάτινες μάζες και είναι πλούσια σε θρεπτικά στοιχεία, σπάνια παρουσιάζουν τέτοιες ελλείψεις και είναι πλούσια σε βλάστηση.

1.3 Ορυκτά

Τα ορυκτά ορίζονται ως ομοιογενή φυσικά συστατικά του στερεού φλοιού της γης και παρουσιάζουν ορισμένες φυσικές, χημικές και κρυσταλλικές ιδιότητες. Ανάλογα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες δημιουργήθηκαν, διακρίνονται σε «πρωτογενή», τα οποία προέρχονται από την πήξη του μάγματος και σε «δευτερογενή», τα οποία σχηματίζονται από την ελευθέρωση χημικών στοιχείων που προέρχονται από τα πρωτογενή ορυκτά, και με την επίδραση του νερού που είναι εμπλουτισμένο με διοξείδιο του άνθρακα, συμβάλλουν στην ανασύνθεση τους σε νέες χημικές ενώσεις [6].

1.3.1 Πρωτογενή ορυκτά

Κείμενο. Τα σημαντικότερα πρωτογενή ορυκτά, από τα οποία προκύπτουν τα δευτερογενή, είναι τα πυριτικά. Ορισμένα από αυτά είναι:

- Τα νησοπυριτικά (π.χ. ολιβίνης)
- Τα σοροπυριτικά (π.χ. ακερμανίτης)
- Τα κυκλοπυριτικά (π.χ. τουρμαλίνης)
- Τα ινοπυριτικά (π.χ. αυγίτης, κεροστίλβης)
- Τα φυλλοπυριτικά (π.χ. μοσχοβίτης, βιοτίτης)
- Τα τεκτοπυριτικά (π.χ. χαλαζίας, ορθόκλαστο, αλβίτης, ανορθίτης)

1.3.2 Δευτερογενή ορυκτά

Σημαντικά δευτερογενή ορυκτά είναι:

- Ο απατίτης (αποτελεί πηγή φωσφόρου για τα φυτά)
- Ο αιματίτης (συντελεί στον χρωματισμό των εδαφών)

Επιπλέον, στα ιζηματογενή πετρώματα συναντάται ο ασβεστίτης και ο δολομίτης. Τα σημαντικότερα, όμως, είναι αυτά που περιέχονται στην άργιλο [7].

1.4 Πετρώματα

Τα πετρώματα ορίζονται ως μορφολογικά αυτοτελή ανομοιογενή συστατικά του στερεού φλοιού της γης, με καθορισμένη ορυκτολογική σύσταση. Ανάλογα με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες δημιουργήθηκαν διακρίνονται σε «πυριγενή», «ιζηματογενή» και «μεταμορφωσιγενή» ή «κρυσταλλοσχιστώδη».

1.4.1 Πυριγενή πετρώματα

Ως πυριγενή πετρώματα χαρακτηρίζονται εκείνα που έχουν σχηματιστεί από την πήξη του μάγματος. Ανάλογα με το βάθος σχηματισμού τους, καθώς και την σύσταση τους σε ορυκτά, εκείνα που σχηματίστηκαν σε μεγάλο βάθος ονομάζονται «πλουτώνεια» ή «πλουτωνείτες» ή «βαθυγενή», εκείνα που σχηματίστηκαν σε μικρό βάθος ονομάζονται «φλεβίτες», ενώ όταν το μάγμα φθάνει στην επιφάνεια της γης και στερεοποιείται, σχηματίζει τους «ηφαιστίτες» ή «ηφαιστειογενή πετρώματα» ή «έκχυτα πετρώματα».

Ακόμη, ανάλογα με το μέγεθος και τον τρόπο σύνδεσης των ορυκτών που αποτελούνται, ο ιστός στους πλουτωνίτες όπου οι κρύσταλλοι των ορυκτών είναι ευμεγέθεις ονομάζεται «γρανιτικός» (κοκκώδης), ενώ στους ηφαιστίτες όπου οι κρύσταλλοι είναι μικροσκοπικοί, ο ιστός τους ονομάζεται «πορφυριτικός» (λεπτόκοκκος).

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα πετρώματα που είναι πλούσια σε χαλαζία (π.χ. γρανίτης), αναφέρονται ως όξινα και, συνήθως, έχουν ανοικτό χρώμα και πυκνότητα κατά μέσο όρο ίση με $2,7 \text{ g/cm}^3$. Αντίθετα, τα πετρώματα που είναι πλούσια σε σιδηρομαγνήσιο (π.χ. αυγίτης, ολιβίνης), αναφέρονται ως βασικά και είναι σκουρόχρωμα και με μεγαλύτερη πυκνότητα ίση με $3,3 \text{ g/cm}^3$.

1.4.2 Ιζηματογενή πετρώματα

Ως ιζηματογενή πετρώματα χαρακτηρίζονται εκείνα που έχουν σχηματιστεί υπό την επίδραση, κυρίως, του νερού στο στερεό φλοιό της γης και αποτελούν τα αφθονότερα πετρώματα στην επιφάνεια της (καλύπτουν τα $\frac{3}{4}$ της γης). Το νερό, αποσυνθέτει και διαβρώνει τα πυριγενή και τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα, εν συνεχεία μεταφέρει τα προϊόντα που προκύπτουν και τα εναποθέτει σε χαμηλότερα σημεία, τα οποία μετά από μεγάλες πιέσεις που δέχονται, σκληραίνουν και γίνονται πιο συμπαγή.

Τα ιζήματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: 1) στα μηχανικά ή κλαστικά ιζήματα 2) στα χημικά ιζήματα 3) στα οργανικά ιζήματα.

Σημαντικότερο ιζηματογενές πέτρωμα αποτελεί ο ασβεστόλιθος, ο οποίος ανήκει στα χημικά ιζήματα, και συναντάται σε αφθονία στην Ελλάδα. Επίσης, η μάργα αποτελεί άλλο ένα ιζηματογενές πέτρωμα, σχηματίζεται από άργιλο, είναι πλούσια σε ανθρακικό ασβέστιο και αποσυντίθεται εύκολα. Τα κροκαλοπαγή και τα λατυποπαγή (κλαστικά ιζήματα), καθώς, και η τύρφη (οργανικά ιζήματα) είναι ακόμη μερικά ιζηματογενή πετρώματα.

1.4.3 Μεταμορφωσιγενή ή κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα

Ως μεταμορφωσιγενή πετρώματα χαρακτηρίζονται εκείνα που έχουν σχηματιστεί μετά από την μετατροπή των πυριγενών και των ιζηματογενών πετρωμάτων, μέσα από φυσικές ή και χημικές διαδικασίες και με την επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης. Όταν οι συνθήκες μετατροπής είναι ήπιες, τότε ως αποτέλεσμα είναι η απλή σκλήρυνση των πετρωμάτων και η εύκολη αναγνώριση της προέλευσής τους. Αντίθετα, όταν οι συνθήκες μετατροπής είναι πολύ έντονες, στην αρχή έχει ως αποτέλεσμα την τήξη και, εν συνεχεία, την ανακρυστάλλωση των ορυκτών που σχηματίζουν το πέτρωμα, καθιστώντας αδύνατο τον προσδιορισμό της προέλευσής τους [8].

Ορισμένα μεταμορφωσιγενή πετρώματα είναι:

- Οι «γενεύσιοι», οι οποίοι προέρχονται από την μετατροπή των πυριγενών και των ιζηματογενών πετρωμάτων, ορθογενεύσιοι και παραγενεύσιοι, αντίστοιχα.
- Τα «μάρμαρα», τα οποία προέρχονται από την μετατροπή των ασβεστόλιθων.
- Οι «φυλλίτες», οι οποίοι σχηματίζονται κάτω από μεγάλες πιέσεις και προέρχονται από αργιλικά ιζήματα.
- Οι «σχιστόλιθοι», οι οποίοι προήλθαν από λάβα ή αργιλικά ιζήματα και χαρακτηρίζονται από την σχιστότητά τους (σπάνε εύκολα κατά τα επίπεδα φύλλωσης).

1.5 Αποσάθρωση Ορυκτών και Πετρωμάτων

Ως αποσάθρωση νοείται η αποσύνθεση-διαφοροποίηση που συμβαίνει στα ορυκτά και τα πετρώματα κατά την έκθεσή τους σε διάφορες συνθήκες, με αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους των τεμαχιδίων τους, την απελευθέρωση διαφόρων στοιχείων, και την ανασύσταση ορυκτών. Η αποσάθρωση μπορεί να είναι φυσική ή και χημική [9].

1.5.1 Φυσική αποσάθρωση

Ως φυσική αποσάθρωση χαρακτηρίζεται ο μηχανικός κατατεμαχισμός των ορυκτών και των πετρωμάτων, απουσία μεταβολών στη χημική τους σύσταση. Τρόποι με τους οποίους επιτυγχάνεται η φυσική αποσάθρωση περιλαμβάνουν τους εξής:

- Η Διαστολή, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τον σχηματισμό ρωγμών και χασμάτων στα πετρώματα.
- Η Θερμοκρασία, η οποία και αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη συστολή και τη διαστολή της επιφάνειας των πετρωμάτων και άρα τον σχηματισμό ρωγμών και χασμάτων.
- Το Νερό, το οποίο «εγκλωβίζεται» στις σχισμές των πετρωμάτων και στις χαμηλές θερμοκρασίες παγώνει, με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του και άρα την αύξηση της πίεσης που ασκείται στα πετρώματα και τα ορυκτά, οδηγώντας έτσι στον κατατεμαχισμό τους.
- Οι Ρίζες των φυτών, οι οποίες διακλαδίζονται μέσα στις σχισμές των πετρωμάτων, και με την σταδιακή αύξηση τους ασκούν πιέσεις σε αυτά (σ.σ. τα πετρώματα), με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η συνοχή τους και να θρυμματίζονται σε μικρότερα κομμάτια.

1.5.2 Χημική αποσάθρωση

Ως χημική αποσάθρωση χαρακτηρίζεται η διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλεται η χημική σύσταση των πετρωμάτων και των ορυκτών, που έχει ως συνέπεια τον σχηματισμό νέων ενώσεων. Κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στη χημική αποσάθρωση είναι: το Νερό, το Διοξείδιο του Άνθρακα και το Οξυγόνο, μέσω διαφόρων διεργασιών όπως [10]:

- Η Διάλυση, κατά την οποία το νερό προσβάλλει τα ευδιάλυτα άλατα, όπως είναι το αλάτι και η γύψος, με αποτέλεσμα την αποσάθρωση των πετρωμάτων που είναι πλούσια στα εν λόγω ευδιάλυτα άλατα.
- Η Υδρόλυση, κατά την οποία παρατηρείται αντίδραση του νερού με τα ευδιάλυτα και τα δυσδιάλυτα συστατικά των πετρωμάτων, με αποτέλεσμα αυτά να διασπώνται και να απελευθερώνονται τα συστατικά τους, τα οποία σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να ανακρυσταλλωθούν ή να απομακρυνθούν μέσω του νερού.
- Η Όξινη υδρόλυση, κατά την οποία παρατηρείται αντίδραση του νερού με τα συστατικά των πετρωμάτων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ωστόσο εδώ είναι απαραίτητη η παρουσία ιόντων υδρογόνου.
- Η Οξειδωση, κατά την οποία διάφορα στοιχεία που περιέχονται στα ορυκτά, όπως είναι για παράδειγμα ο σίδηρος, το μαγγάνιο κ.α., οξειδώνονται από το οξυγόνο με την παρουσία νερού και μικροοργανισμών. Έτσι, μεταβάλλεται το σθένος των στοιχείων και προκαλούνται ανακατατάξεις στον κρύσταλλο, με αποτέλεσμα την χαλάρωση των δεσμών.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθούν τα **απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία** για τα φυτά, τα οποία απελευθερώνονται κατά την αποσάθρωση των πετρωμάτων και των ορυκτών, τα οποία είναι τα ακόλουθα [11]:

1. Άνθρακας (C), Υδρογόνο (H), Οξυγόνο (O), τα οποία προσλαμβάνονται από την ατμόσφαιρα και το νερό.
2. Άζωτο (N), Φώσφορος (P), Κάλιο (K), Ασβέστιο (Ca), Μαγνήσιο (Mg), Θείο (S), τα οποία προσλαμβάνονται από το έδαφος (μακροθρεπτικά ή μακροστοιχεία).
3. Σίδηρος (Fe), Μαγγάνιο (Mn), Ψευδάργυρος (Zn), Χλώριο (Cl), Μολυβδαίνιο (Mo), Χαλκός (Cu), Βόριο (B), Νικέλιο (Ni), τα οποία προσλαμβάνονται από το έδαφος (μικροθρεπτικά ή μικροστοιχεία).
4. Κοβάλτιο (Co), Νάτριο (Na), Πυρίτιο (Si), τα οποία προσλαμβάνονται και αυτά από το έδαφος και αποτελούν ωφέλιμα στοιχεία.

1.6 Οργανικά συστατικά του εδάφους

Μεγάλη σημασία, εκτός από τα ανόργανα συστατικά που περιέχονται στο έδαφος, παρουσιάζουν τα οργανικά συστατικά του εδάφους, καθώς αποτελούν τη μοναδική φυσική πηγή αζώτου, θείου και φωσφόρου, χωρίς την προσθήκη λιπασμάτων. Προάγουν, επίσης, τη συγκράτηση θρεπτικών συστατικών και νερού, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της γονιμότητας των εδαφών.

Ταυτόσημη έννοια με την οργανική ουσία είναι ο χούμος του εδάφους. Η οργανική ουσία, προκύπτει από την αποσύνθεση φυτικών και ζωικών οργανισμών, καθώς, και από τα υπολείμματα και απορρίμματα που αφήνουν πίσω τους. Η ποσότητα οργανικής ουσίας που περιέχεται στα εδάφη είναι αποτέλεσμα τριών, κυρίως, παραγόντων – των εδαφοκλιματικών συνθηκών, της προστιθέμενης οργανικής ουσίας και του συστήματος γεωργικής εκμετάλλευσης.

Στην Ελλάδα το ποσοστό οργανικής ουσίας που περιέχεται στα εδάφη είναι μεταξύ 1 και 2,5%.

1.7 Ζωντανοί οργανισμοί του εδάφους

Το έδαφος αποτελεί σπίτι για πολυάριθμους μικροοργανισμούς, οι οποίοι δεν είναι ορατοί με γυμνό μάτι. Ανήκουν στο φυτικό βασίλειο, είναι κατώτεροι οργανισμοί και επιτελούν το σημαντικό έργο της αποσύνθεσης των φυτικών και ζωικών υπολειμμάτων. Για την αποσύνθεση απαιτείται ενέργεια, η οποία προκύπτει από την οξείδωση του άνθρακα και την επιστροφή του στην ατμόσφαιρα με τη μορφή διοξειδίου του άνθρακα, ενώ παράλληλα, απελευθερώνονται και διάφορα άλλα στοιχεία, όπως είναι το άζωτο, το θείο, ο φώσφορος και τα μέταλλα.

Οι οργανισμοί που λαμβάνουν μέρος στο πολύπλοκο φαινόμενο της αποσύνθεσης, διακρίνονται στην εδαφική χλωρίδα και πανίδα του εδάφους [12].

1.7.1 Εδαφική χλωρίδα

Η εδαφική χλωρίδα περιλαμβάνει τα βακτήρια, τους μύκητες, τους ακτινομύκητες και τα φύκη, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω:

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

- Βακτήρια – αποτελούν μονοκύτταρους αερόβιους και αναερόβιους μικροοργανισμούς, οι οποίοι είναι ιδιαίτερος πολυάριθμοι στη ριζόσφαιρα (στην περιοχή μεταξύ της ρίζας του φυτού και του εδάφους). Ως επί το πλείστον, τα βακτήρια είναι ετερότροφα και σαπρόφυτα, λαμβάνουν, δηλαδή, την τροφή τους από νεκρούς ή θνήσκοντες ιστούς.
- Μύκητες – αποτελούν πολυκύτταρους αερόβιους μικροοργανισμούς, ετερότροφους και σαπρόφυτους, οι οποίοι συμμετέχουν στην ανοργανοποίηση και τη χουμοποίηση των οργανικών ενώσεων, διαμέσου της αποσύνθεσης φυτικών και ζωικών υλικών. Λαμβάνουν μέρος στη σύνθεση διαφόρων οργανικών οξέων, όπως είναι το κιτρικό οξύ, το οξικό οξύ κ.α., στη σύνθεση φουλβικών οξέων, ενώ συμμετέχουν και στον μετασχηματισμό των ορυκτών του εδάφους.
- Ακτινομύκητες – αποτελούν μονοκύτταρους μικροοργανισμούς, οι οποίοι είναι, κυρίως, αερόβιοι, ετερότροφοι και σαπρόφυτοι. Διαφοροποιούνται από τους μύκητες, λόγω της μεγάλης ευαισθησίας που παρουσιάζουν στις χαμηλές τιμές pH (ιδανική τιμή pH από 6 έως 7,5). Οι ακτινομύκητες προσδίδουν μία χαρακτηριστική οσμή χώματος και μούχλας.
- Φύκη – αποτελούν αυτότροφους, φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς, οι οποίοι δρουν κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Η ανάπτυξή τους επηρεάζεται, κυρίως, από το pH, την υγρασία, τη θερμοκρασία, την ποσότητα και τον τύπο της οργανικής ύλης, καθώς και τις συνθήκες αερισμού.

Γενικά, οι υψηλές θερμοκρασίες και ο καλός αερισμός, συμβάλλουν στην αυξημένη δραστηριότητα όλων των μικροοργανισμών, εκτός από τους αναερόβιους.

1.7.2 Εδαφική πανίδα

Η εδαφική πανίδα περιλαμβάνει την μακροπανίδα, την μεσοπανίδα και την μικροπανίδα και θα αναλυθούν παρακάτω :

- Μακροπανίδα – αφορά ζώα, τα οποία ζουν μόνιμα ή για ένα χρονικό διάστημα της ζωής τους, σε στοές του εδάφους, όπως είναι για παράδειγμα τα τρωκτικά (τυφλοπόντικες).
- Μεσοπανίδα – αφορά ασπόνδυλα ζώα, όπως είναι τα αρθρόποδα, τα έντομα και οι γαιοσκώληκες. Οι γαιοσκώληκες είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι, καθώς από το πεπτικό τους σύστημα περνάνε μεγάλες ποσότητες χώματος και αποβάλλονται περιττώματα που είναι πλούσια σε φώσφορο, κάλιο, άζωτο και άλλες θρεπτικές ουσίες, οι οποίες αυξάνουν τη γονιμότητα των εδαφών. Επιπλέον, σχηματίζουν στοές στο πέρασμά τους, με αποτέλεσμα να προάγεται ο αερισμός του εδάφους και η αποστράγγισή του.
- Μικροπανίδα – σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνονται οι νηματώδεις (τύπος σκουληκιών) και τα πρωτόζωα. Οι νηματώδεις είναι εξαιρετικά πολυάριθμοι και υπάρχουν στα περισσότερα εδάφη. Τα πρωτόζωα αποτελούν απλούς μονοκύτταρους ζωικούς μικροοργανισμούς, οι οποίοι τρέφονται με βακτήρια, άλγη και άλλους μικροοργανισμούς.

1.8 Πηγές και σύσταση οργανικής ουσίας

Οι σημαντικότερες πηγές οργανικής ουσίας προέρχονται από υπολείμματα φυτών, φύλλων, βλαστών, σιτηρών, καθώς επίσης, και από την προσθήκη κοπριών, λιπασμάτων, κομποστών κ.α.

Οι οργανικές ενώσεις φυτικών υπολειμμάτων διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

1. Υδατάνθρακες. Αποτελούν περισσότερο από το 50% της ξηρής οργανικής ουσίας, ενώ περιλαμβάνουν τα σάκχαρα, το άμυλο, τις κυτταρίνες και τις ημικυτταρίνες.
2. Λιγνίνη. Αποτελούν το 10 με 40% της ξηρής οργανικής ουσίας και είναι το κύριο συστατικό των κυτταρικών τοιχωμάτων.
3. Αζωτούχες ενώσεις. Αποτελούν λιγότερο από το 20% της ξηρής οργανικής ουσίας, ενώ περιλαμβάνουν αμινοξέα, πρωτεΐνες, νουκλεϊνικά οξέα κ.α.

Τέλος, περιλαμβάνονται διάφορα λίπη και ρητίνες σε ποσοστό μικρότερο του 1 με 10% της ξηρής οργανικής ουσίας.

1.9 Νερό του εδάφους

Το νερό αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα που συμβάλλει στην αποσάθρωση των πετρωμάτων, των ορυκτών και την αποσύνθεση της οργανικής ουσίας, εμπλουτίζοντας το έδαφος με τα θρεπτικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη και διαβίωση των φυτών.

Η κίνηση του νερού στο έδαφος επιτυγχάνεται: 1) μέσω της βαρύτητας προς τα κάτω και 2) μέσω της μύζησης («μύζηση» ορίζεται ως η συνισταμένη όλων των δυνάμεων που συμμετέχουν στη συγκράτηση του νερού του εδάφους από τη στερεή του φάση) προς όλες τις πιθανές κατευθύνσεις.

Η πρόσληψη του νερού από τα φυτά συντελείται από ποικίλους παράγοντες. Ο σημαντικότερος από αυτούς είναι οι ρίζες των φυτών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, τόσο περισσότερη είναι η αξιοποίηση-απορρόφηση του νερού.

1.9.1 Υδατοχωρητικότητα εδάφους

Ο όρος «υδατοχωρητικότητα» του εδάφους, αναφέρεται στη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατήσει το έδαφος, μετά από άρδευση ή βροχή. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες:

- Την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους – όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα του εδάφους σε λεπτόκοκκα συστατικά, όπως για παράδειγμα ίλυ, άργιλο, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ποσότητα νερού που συγκρατείται από το έδαφος.
- Τη δομή του εδάφους – όσο περισσότερο αυξάνεται το μικροπορώδες του εδάφους, τόσο περισσότερο αυξάνεται η ποσότητα του νερού που συγκρατείται από το έδαφος.
- Το ποσοστό της οργανικής ουσίας – όταν αυξάνεται η περιεκτικότητα της οργανικής ουσίας του εδάφους, αυξάνεται και η ποσότητα του νερού που συγκρατείται από αυτό, λόγω της μεγάλης ειδικής επιφάνειάς του.
- Τη φύση των κolloειδών – ο χούμος συγκρατεί μεγαλύτερο ποσοστό νερού από ότι η άργιλος, ενώ από τα ορυκτά της αργίλου, αυτά που παρουσιάζουν διογκούμενο κρυσταλλικό πλέγμα συγκρατούν μεγαλύτερη ποσότητα νερού, σε σχέση με αυτά που παρουσιάζουν μη διογκούμενο κρυσταλλικό πλέγμα.
- Το είδος των προσροφημένων κατιόντων – η ποσότητα νερού που συγκρατείται από το έδαφος διαφέρει ανάλογα με τον βαθμό αφυδάτωσης των κατιόντων.

1.10 Αέρας του εδάφους

Ο αέρας του εδάφους είναι υπεύθυνος για την αναπνοή των ριζών των φυτών, καθώς και των μικροοργανισμών του εδάφους. Καταλαμβάνει τον ίδιο χώρο με το νερό, επομένως, ένα έδαφος που είναι κορεσμένο με νερό στερείται αέρα (εκτός μιας ελάχιστης ποσότητας που βρίσκεται διαλυμένη στο εδαφικό διάλυμα), σε αντίθεση με ένα ξηρό έδαφος, όπου όλο το πορώδες του περιέχεται από αέρα.

«**Αεροχωρητικότητα**» του εδάφους, ονομάζεται η περιεκτικότητα ενός εδάφους σε αέρα όταν βρίσκεται στο σημείο της υδατοχωρητικότητας, και εξαρτάται από την κοκκομετρική του σύσταση. Η αεροχωρητικότητα είναι, περίπου, 40% στα αμμώδη εδάφη, 20% στα πηλώδη εδάφη και 10% στα αργιλώδη εδάφη.

Όσο μεγαλώνει το βάθος, τόσο μεγαλώνει η συγκέντρωση του εδαφικού αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα και δυσκολεύει η ανανέωση του. Ακόμη, τον χειμώνα που αυξάνονται οι βροχές και το νερό που καταλήγει στα εδάφη, καθώς και οι χαμηλές θερμοκρασίες που επικρατούν, δυσκολεύουν την ανανέωση του αέρα, και έτσι, αυξάνεται η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα.

Η κίνηση του αέρα στο έδαφος επιτυγχάνεται μέσω της διάχυσης, που οφείλεται στη διαφορά των μερικών πιέσεων του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος. Στην ατμόσφαιρα, η μερική πίεση του οξυγόνου είναι υψηλότερη, ενώ του διοξειδίου του άνθρακα χαμηλότερη, σε αντίθεση με την μερική πίεση του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα που επικρατούν στο έδαφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να εξισορροπούνται οι μερικές πιέσεις μεταξύ της ατμόσφαιρας και του εδάφους, καθώς διευκολύνεται η μετακίνηση του οξυγόνου από την ατμόσφαιρα στο έδαφος και του διοξειδίου του άνθρακα από το έδαφος στην ατμόσφαιρα.

1.11 Φυσικές ιδιότητες του εδάφους

Οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους είναι εκείνες που διαμορφώνουν τη συμπεριφορά και την αντίδραση του εδάφους, σε σχέση με το περιβάλλον, τα φυτά και τη μηχανική του κατεργασία. Κυρίως, επηρεάζεται: 1) από την κοκκομετρική σύσταση και 2) τη δομή του εδάφους [13].

1.11.1 Κοκκομετρική σύσταση του εδάφους

Ένα έδαφος μπορεί να αποτελείται από πέτρες, χαλίκια ή ακόμα και μικρά τεμαχίδια, τα οποία δεν είναι ορατά με το μάτι. Τα μικρά αυτά τεμαχίδια, συχνά, συνενώνονται μεταξύ τους και με άλλα μεγαλύτερα, σχηματίζοντας τα «συσσωματώματα».

Για την καλύτερη κατανόηση τους, αυτά ταξινομούνται με βάση το μέγεθός του σε ομάδες, οι οποίες ονομάζονται «κλάσματα κοκκομετρικής σύστασης», και περιλαμβάνουν τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Την άμμο, η οποία έχει μικρή ειδική επιφάνεια και έτσι είναι αδύνατον να συγκρατήσει νερό και θρεπτικά στοιχεία
2. Την ίλυ, η οποία έχει μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια από την άμμο και μικρότερη από την άργιλο
3. Την άργιλο, η οποία έχει μεγάλη ειδική επιφάνεια και έτσι διευκολύνει τη συγκράτηση μεγάλης ποσότητας νερού και θρεπτικών στοιχείων



Εικόνα 1.2. Μηχανική σύσταση του εδάφους

1.11.2 Δομή του εδάφους

Ανάλογα με τη συγκέντρωση των τριών προαναφερθέντων κλασμάτων (άμμος, ίλος, άργιλος) στη λεπτή γη, δηλαδή σε έδαφος που έχει περάσει από κόσκινο, διακρίνονται 12 κατηγορίες κοκκομετρικής σύστασης, τα οποία και θα αναλυθούν στους παρακάτω πίνακες [14]:

Αμμώδη ή Ελαφρά εδάφη	1) Αμμώδη (sand)	Κυρίαρχο στοιχείο η άμμος. Ενώ αερίζονται καλά και θερμαίνονται εύκολα, δεν συγκρατούν πολύ νερό και θρεπτικά συστατικά. Με τακτική λίπανση και πότισμα με μικρές δόσεις νερού μπορεί να γίνουν παραγωγικά. Είναι εύκολα στην κατεργασία τους και τα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν λόγω της μειωμένης αντίστασης που συναντούν.
	2) Πηλοαμμώδη (loamy sand)	

Πίνακας 1.1. Αμμώδη έδαφη

Πηλώδη ή Μέσης σύστασης εδάφη	1) Αμμοπηλώδη (sandy loam)	Συνυπάρχουν ισόποσα, περίπου, και τα τρία κλάσματα (άμμος, ίλος, άργιλος). Εμφανίζουν ενδιάμεσες ιδιότητες και αποτελούν ιδανική επιλογή για γεωργική εκμετάλλευση.
	2) Πηλώδη (loam)	
	3) Ιλοσηλώδη (silt loam)	
	4) Ιλώδη (silt)	
	5) Αμμοαργιλοπηλώδη (sand clay loam)	
	6) Αργιλοπηλώδη (clay loam)	
	7) Ιλοαργιλοπηλώδη (silty clay loam)	

Πίνακας 1.2. Πηλώδη έδαφη

Αργιλώδη ή Βαρέα εδάφη	1) Αμμοαργιλώδη (sandy clay)	Κυρίαρχο στοιχείο η άργιλος. Δεν αερίζονται καλά, ούτε θερμαίνονται εύκολα, ωστόσο συγκρατούν πολύ νερό και θρεπτικά συστατικά. Η κατεργασία τους, συνήθως, είναι δύσκολη και εξαρτάται από το ορυκτό που βρίσκεται σε αφθονία στην άργιλο.
	2) Πλυοαργιλώδη (silty clay)	
	3) Αργιλώδη (clay)	

Πίνακας 1.3. Αργιλώδη εδάφη

1.12 Κατηγορίες συσσωματωμάτων

Ανάλογα με το σχήμα τους, τα συσσωματώματα, διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες [15]:

- Τα **κυβοειδή (blocky) συσσωματώματα**, έχουν τρεις ίσους άξονες μεταξύ τους και μήκος 1 μέχρι 10cm. Απαντώνται, κυρίως, στο υπέδαφος. Παραλλαγή τους αποτελούν τα **κοκκώδη (granular) συσσωματώματα**, που απαντούν στο επιφανειακό στρώμα και μήκος 1 μέχρι 10mm. Σε περίπτωση που είναι και πορώδη, τότε ονομάζονται **κοκκώδη με πόρους (crumbly)**.
- Τα **πλακοειδή (platy) συσσωματώματα**, εμφανίζονται με τη μορφή επάλληλων φύλλων, ενώ παρουσία ζουν κακές φυσικές ιδιότητες, καθώς είναι δύσκολη η μεταφορά νερού και αέρα.
- Τα **πρισματικά (prismatic) συσσωματώματα**, έχουν μεγαλύτερο κατακόρυφο άξονα και μήκος 10cm. Στα υποβαθμισμένα νατριομένα εδάφη, τα συσσωματώματα εμφανίζουν στυλοειδή μορφή (**στυλοειδή συσσωματώματα**) και αποτελούν κύρια δομικά συστατικά του Β ορίζοντα των νατριομένων εδαφών.

1.12.1 Σχηματισμός και σταθερότητα συσσωματωμάτων

Ο σχηματισμός και η σταθερότητα των συσσωματωμάτων είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων, που αναλύονται παρακάτω:

- **Την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους** – η συμμετοχή και των τριών κλασμάτων κοκκομετρικής σύστασης (άμμος, ίλος, άργιλος) είναι απαραίτητη για τον σχηματισμό σταθερών συσσωματωμάτων, ωστόσο μεγάλη σημασία έχει η συγκέντρωση αργίλου, λόγω της μεγάλης ειδικής επιφάνειας της. Για παράδειγμα, εδάφη που είναι πλούσια σε καολινίτη και ένυδρα οξείδια, σχηματίζουν συσσωματώματα υψηλής σταθερότητας.
- **Τις συνθήκες που προάγουν τη θρόμβωση της αργίλου** – οι χαμηλές τιμές pH, η μεγάλη συγκέντρωση ιόντων, όπως είναι τα ιόντα ασβεστίου κ.α., συμβάλλουν στη θρόμβωση της αργίλου, που είναι απαραίτητη για τον σχηματισμό συσσωματωμάτων.
- **Τα προσροφημένα κατιόντα** – σε εδάφη πλούσια σε ιόντα ασβεστίου ή και αργιλίου η σταθερότητα των συσσωματωμάτων είναι αυξημένη, λόγω του ότι προάγουν την θρόμβωση της αργίλου, σε αντίθεση με τα εδάφη που είναι πλούσια σε ιόντα νατρίου, όπου η σταθερότητα τους είναι πολύ μικρή, λόγω του τεμαχισμού της αργίλου.
- **Τα συνδετικά και συγκολλητικά υλικά** – η παρουσία συνδετικών και συγκολλητικών στοιχείων, όπως είναι τα ένυδρα οξείδια, τα υδροξείδια του σιδήρου και αργιλίου, το ανθρακικό ασβέστιο και

άλλες ουσίες διάσπασης της οργανικής ουσίας, συμβάλλουν στο σχηματισμό σταθερών συσσωματωμάτων.

- **Την πήξη και τήξη του νερού του εδάφους** – όταν επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες, το νερό που περιέχεται στο έδαφος πήζει. Το νερό αυτό μετακινείται από περιοχές με υψηλότερο δυναμικό προς τον παγοκρύσταλλο, με αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου του παγοκρυστάλλου, και τη συμπίεση του εδάφους. Έτσι, η πήξη του νερού και η συμπίεση του εδάφους, συμβάλλουν στο σχηματισμό συσσωματωμάτων.
- **Τους επαναλαμβανόμενους κύκλους διαβροχής και ξήρανσης** – η εναλλαγή μεταξύ διαβροχής και ξήρανσης του εδάφους, που οδηγούν σε θρυμματισμό λόγω διόγκωσης της αργίλου και συγκόλληση λόγω συρρίκνωσης της αργίλου, αντίστοιχα, οδηγούν στο σχηματισμό νέων συσσωματωμάτων και την καταστροφή υπαρχόντων.
- **Τη μηχανική επεξεργασία (κατεργασία) του εδάφους** – η όχι πολύ συχνή κατεργασία του εδάφους με ελαφριά μηχανήματα, προάγει τη δημιουργία συσσωματωμάτων, σε αντίθεση με τη συχνή κατεργασία του με βαριά μηχανήματα, η οποία οδηγεί στην καταστροφή της οργανικής ουσίας, ενώ, παράλληλα, φέρνει στην επιφάνεια συσσωματώματα, τα οποία, όμως, καταστρέφονται λόγω της διάβρωσης που υφίστανται από τη βροχή.
- **Την οργανική ουσία** – κατά το στάδιο της αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας παράγονται και ελευθερώνονται διάφορες συγκολλητικές ουσίες, όπως είναι οι πολυσακχαρίτες, οι οποίες ευνοούν στο σχηματισμό και τη σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων. Επιπλέον, οι μικροοργανισμοί και οι μύκητες που βρίσκονται στο έδαφος, διασπούν την οργανική ουσία, με αποτέλεσμα την παραγωγή ουσιών, όπως αναφέρθηκαν παραπάνω.
- **Τους γαιοσκώληκες** – με το πέρασμά τους συμπιέζουν τα τεμαχίδια του εδάφους ενώ, ακόμη, με την διέλευση από το πεπτικό τους σύστημα, οργανικών και ανόργανων συστατικών, τα οποία εμπλουτίζονται σε θρεπτικά στοιχεία και στη συνέχεια αποβάλλονται και αναμειγνύονται με τα υπόλοιπα συστατικά του εδάφους, μέσω των περιττωμάτων, συμμετέχουν στον σχηματισμό σταθερών συσσωματωμάτων.
- **Το σύστημα των ριζών των φυτών** – η ανάπτυξη των ριζών στο έδαφος ασκεί πίεση στα στερεά τεμαχίδια, και, παράλληλα, προσλαμβάνουν το νερό που βρίσκεται στο έδαφος, συμβάλλοντας στη συρρίκνωση, και έτσι, στο σχηματισμό συσσωματωμάτων.

1.13 Χημικές ιδιότητες του εδάφους

Οι χημικές ιδιότητες τους εδάφους, αφορούν τη στερεή και την υγρή του φάση, και σε συνδυασμό με τις φυσικές του ιδιότητες, επιδρούν στην παραγωγικότητά του. Οι σπουδαιότερες χημικές ιδιότητες περιλαμβάνουν, την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, καθώς και, τη ρυθμιστική ικανότητα και pH του εδάφους [16].

1.13.1 Ανταλλαγή κατιόντων

Η ανταλλαγή κατιόντων είναι από τις σπουδαιότερες, ίσως, χημικές ιδιότητες των εδαφών. Κατιόντα, όπως είναι τα ιόντα ασβεστίου, καλίου, μαγνησίου κ.α., παραμένουν στην επιφάνεια των αρνητικά φορτισμένων κολλοειδών τεμαχιδίων, και ανταλλάσσονται με κατιόντα του εδαφικού διαλύματος. Αυτή η δυναμική ισορροπία ανάμεσα στα κατιόντα της στερεής φάσης και του εδαφικού διαλύματος, συμβάλλει στη μείωση της απώλειας, αλλά και στον εφοδιασμό, θρεπτικών στοιχείων μέσω του νερού κατά την έκπλυση.

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

Όταν τα εδάφη υπόκεινται σε παρατεταμένα διαστήματα έκπλυσης, τότε αυτά χάνουν μεγάλο μέρος του ανταλλάξιμου ασβεστίου και μαγνησίου. Αντίθετα, όταν υπόκεινται σε ελεγχόμενη έκπλυση, υπάρχει αφθονία σε ασβέστιο και μαγνήσιο.

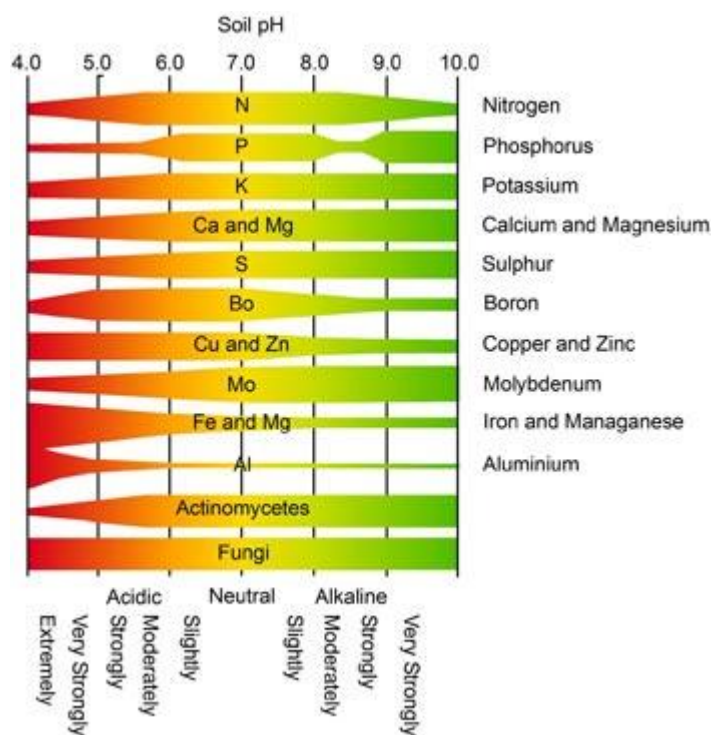
Εδάφη πλούσια σε ιόντα υδρογόνου και αργιλίου χαρακτηρίζονται ως όξινα, ενώ εδάφη που είναι πλούσια σε ιόντα νατρίου, καλίου, ασβεστίου και μαγνησίου χαρακτηρίζονται ως αλκαλικά.

Ο εμπλουτισμός του εδαφικού διαλύματος με διάφορες χημικές ουσίες, μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προσθήκης χημικών λιπασμάτων, της αποσάθρωσης πετρωμάτων και ορυκτών, καθώς και, της αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας.

1.13.2 Ρυθμιστική ικανότητα και pH του εδάφους

Η ρυθμιστική ικανότητα αφορά στην ιδιότητα των ασθενών όξινων ή βασικών διαλυμάτων και των αλάτων τους, να διατηρούν αμετάβλητο το pH τους κατά την προσθήκη σε αυτά ιόντων υδρογόνου (H^+) ή υδροξειδίου (OH^-) [17].

Υδατικά διαλύματα, στα οποία η συγκέντρωση μεταξύ ιόντων υδρογόνου και υδροξειδίου βρίσκονται σε ισορροπία, έχουν ουδέτερη αντίδραση και $pH=7$. Όταν υπερσχύουν τα ιόντα υδρογόνου, έχουν όξινη αντίδραση και $pH<7$, ενώ όταν υπερσχύουν τα ιόντα υδροξειδίου, έχουν αλκαλική αντίδραση και $pH>7$.



Εικόνα 1.3. Βαθμός οξύτητας-pH εδάφους

Τα όξινα εδάφη, τα οποία, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση ιόντων υδρογόνου από ότι ιόντα υδροξειδίου και $pH<7$, εφοδιάζονται με ιόντα υδρογόνου από το διοξείδιο του άνθρακα, τα οργανικά και ανόργανα οξέα και την υδρόλυση των ιόντων αργιλίου. Άλλες πηγές υδρογόνου αποτελούν: 1) τα χημικά λιπάσματα με όξινα χαρακτηριστικά, όπως είναι εκείνα που περιέχουν θειϊκή αμμωνία, 2) η βροχή, ιδιαίτερα, σε βιομηχανικές περιοχές, η οποία χαρακτηρίζεται για την οξύτητά της, ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, ΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας με διοξείδιο του θείου (SO_2) και 3) το ριζικό σύστημα των φυτών, το οποίο ανταλλάσσει βασικά κατιόντα που είναι χρήσιμα για τη θρέψη τους και ελευθερώνει ιόντα υδρογόνου στο εδαφικό διάλυμα.

Τα αλκαλικά εδάφη, τα οποία έχουν μεγαλύτερη συγκέντρωση ιόντων υδροξειδίου από ότι ιόντα υδρογόνου και $\text{pH} > 7$, είναι αποτέλεσμα της αυξημένης συγκέντρωσης αλάτων, όπως είναι το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), το ανθρακικό μαγνήσιο (MgCO_3) ή το ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3). Η αυξημένη τιμή του pH οφείλεται στον εμπλουτισμό του εδαφικού διαλύματος με ιόντα υδροξειδίου, τα οποία ελευθερώνονται μετά από την υδρόλυση των αλάτων ή των προσροφημένων βασικών κατιόντων.

Η τιμή του pH , παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για το έδαφος. Το όξινο pH μπορεί να σημαίνει ότι το έδαφος είναι προϊόν όξινων πυριγενών πετρωμάτων, όπως είναι για παράδειγμα ο γρανίτης, ή ότι προέρχεται από περιοχές με συχνές βροχοπτώσεις, όπου τα βασικά κατιόντα έχουν εκπλυθεί. Μία άλλη εξήγηση μπορεί να είναι ότι το έδαφος έχει εμπλουτιστεί με οξινοποιά λιπάσματα, όπως είναι η θειϊκή αμμωνία, για μεγάλο χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να έχει μειωθεί η ρυθμιστική του ικανότητα.

Από την άλλη, το αλκαλικό pH μπορεί να σημαίνει ότι το έδαφος είναι προϊόν βασικών πυριγενών πετρωμάτων, όπως είναι για παράδειγμα ο βασάλτης, ή από ιζηματογενή πετρώματα, όπως είναι για παράδειγμα ο ασβεστόλιθος. Επίσης, μπορεί να σημαίνει ότι προέρχεται από περιοχές με ξηρό κλίμα και είναι πλούσιο σε ανθρακικό ασβέστιο. Εάν το pH είναι πάνω από 8,5 τότε το έδαφος είναι νατριωμένο, και μπορεί να προέρχεται από περιοχές όπου συγκεντρώνεται το νερό ή εναποθέτει τα άλατά του, όπως για παράδειγμα στις κοιλάδες και τις λίμνες, ή ότι είναι κοντά σε θάλασσα ή είναι καλλιεργήσιμες εκτάσεις που κάποτε ήταν καλυμμένες από θάλασσα. Ακόμη, μπορεί να είναι αποτέλεσμα της πότισης με νερό που περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις νατρίου.

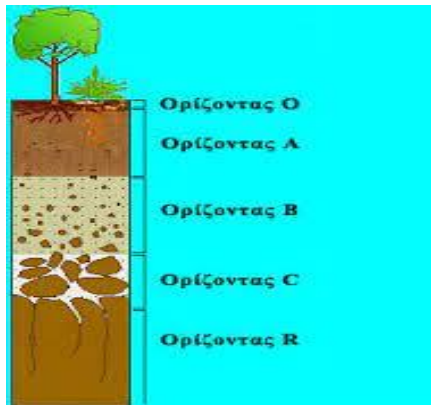
Εν κατακλείδι, ιδανικό pH για την καλλιέργεια των εδαφών μπορεί να θεωρηθεί μία τιμή της τάξεως του 5,5 μέχρι 8,4 όπου είναι ιδανική για την διαλυτότητα των μικροθρεπτικών και φωσφορικών στοιχείων. Οποιαδήποτε τιμή πάνω ή κάτω από το 5,5 ή 8,4, αντίστοιχα, μπορεί να είναι τοξική και να έχει δυσμενείς συνέπειες στην παραγωγικότητα των εδαφών.

Όταν το έδαφος είναι πλούσιο σε ανθρακικό ασβέστιο και έχει αλκαλικό pH , η λύση είναι η επιλογή ποικιλιών που είναι ανθεκτικές σε αυτές τις υψηλές τιμές και είναι ικανά να αναπτυχθούν σε αυτές τις συνθήκες.

Όταν το έδαφος έχει αλκαλικό pH , η λύση είναι η ασβέστωση του εδάφους, με την προσθήκη ασβεστίου ή δολομίτη σε μορφή σκόνης, τα οποία οδηγούν στην αύξηση του.

1.14 Εδαφολογικό προφίλ και ορίζοντες

Ο όρος «εδαφολογικό προφίλ» αναφέρεται στην κατακόρυφη τομή του εδάφους (εδαφοτομή), ξεκινώντας από την επιφάνεια του και απολήγοντας στο μητρικό υλικό. Η μελέτη και η ανάλυση του εδαφολογικού προφίλ, μπορεί να αναδείξει, ακόμη, σημαντικές πληροφορίες για την παραγωγικότητα του εδάφους, καθώς αυτό μπορεί να ελεγχθεί έως το σημείο που φθάνουν οι ρίζες των φυτών, περίπου μέχρι βάθος 1,5 m. Σε μία εδαφοτομή, διακρίνονται εμφανείς παράλληλες ζώνες μέσα στο έδαφος, οι οποίες ονομάζονται «γενετικοί ορίζοντες», και διαφέρουν ως προς το χρώμα, τη σύστασή τους, την περιεκτικότητα σε νερό και ρίζες φυτών κ.α. Διακρίνονται τέσσερις τύποι οριζόντων, οι οποίοι συμβολίζονται με τα κεφαλαία γράμματα O, A, B και C, καθώς επίσης και η στρώση του μητρικού πετρώματος, η οποία συμβολίζεται με το γράμμα R [18].



Εικόνα 1.4. Εδαφικοί Ορίζοντες

Ο – Οργανικός ορίζοντας, με περιεκτικότητα σε οργανική ουσία σε σχέση με την περιεκτικότητα σε άργιλο, μεγαλύτερη από 20-30%.

Α – Ανόργανος ορίζοντας, που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους ή κάτω από τον Ο ορίζοντα και περιέχει μεγάλη ποσότητα οργανικής ουσίας. Απουσιάζουν άργιλος, σίδηρος, αργίλιο, είναι εμπλουτισμένοι, ωστόσο, σε χαλαζία ή άλλα στοιχεία της αποσάθρωσης της άμμου και της ιλύος. Διακρίνεται από τον ανοικτότερο χρωματισμό του σε σχέση με τον Β ορίζοντα. Ονομάζεται και «ελουβιακός» ορίζοντας, που σημαίνει εκπλυνόμενος, λόγω της μετακίνησης των προαναφερόμενων στοιχείων.

Β – Ανόργανος ορίζοντας, που σχηματίζεται αμέσως μετά τον Α ορίζοντα, πλούσιος σε άργιλο, σίδηρο, αργίλιο και οργανική ουσία που προέρχονται από τον Α. Διακρίνεται από τον εντονότερο χρωματισμό του σε σχέση με τον Α ορίζοντα. Ονομάζεται και «λλουβιακός» ορίζοντας, που σημαίνει συσσωρεύσεως, λόγω της υποδοχής των προαναφερόμενων στοιχείων.

С – Ανόργανος ορίζοντας, που μερικές φορές μπορεί να ομοιάζει με το μητρικό υλικό και έχει υποστεί αλλοιώσεις, λόγω της δράσης των εδαφογενετικών παραγόντων (αποσάθρωση).

R – Δεν αποτελεί ορίζοντα. Αναφέρεται στο μητρικό υλικό από το οποίο προκύπτει το υπερκείμενο έδαφος. Στις περιπτώσεις στις οποίες το έδαφος έχει δημιουργηθεί από υλικό που μετακινήθηκε από άλλη περιοχή, διακρίνονται λιθολογικές ασυνέχειες, και μπροστά από το γράμμα R γράφονται και λατινικοί αριθμοί (iiR, iiiR κ.τ.λ.).

Οι ορίζοντες διαίρονται σε υποορίζοντες, οι οποίοι τους αποδίδουν επιπλέον χαρακτηριστικά γνωρίσματα, και αναφέρονται παρακάτω:

Ο₁ – Οργανικός ορίζοντας, του οποίου η οργανική ουσία δεν έχει αποσάθωθεί πλήρως, με αποτέλεσμα να αναγνωρίζεται εύκολα η προέλευσή της.

Ο₂ – Οργανικός ορίζοντας, του οποίου η αποσάθρωση της οργανικής ουσίας βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο, με αποτέλεσμα να μην αναγνωρίζεται εύκολα η προέλευσή της.

Α₁ – Ανόργανος επιφανειακός ορίζοντας, που αποτελείται από χούμο, οργανική και ανόργανη ουσία. Έχει πιο σκούρο χρώμα από τον υποορίζοντα Α₂.

Α₂ – Είναι ο «ελουβιακός» ορίζοντας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όπου συντελείται η μετακίνηση των διαφόρων στοιχείων. Έχει πιο ανοικτό χρώμα από τον υποορίζοντα Α₁ και τον υποορίζοντα Β₂.

Α₃ – Ανόργανος μεταβατικός ορίζοντας, ενδιάμεσα στον Α και τον Β ορίζοντα, όπου υπερσχύουν τα χαρακτηριστικά του Α ορίζοντα. Δεν είναι υποχρεωτική η παρουσία του.

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

B₁ – Ανόργανος μεταβατικός ορίζοντας, ενδιάμεσα στον A και τον B ορίζοντα, όπου υπερσχύουν τα χαρακτηριστικά του B ορίζοντα. Δεν είναι υποχρεωτική η παρουσία του.

B₂ – Είναι ο «ιλλουβιακός» ορίζοντας, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στον οποίο απολήγουν τα συστατικά που προέρχονται από τον A₂ ορίζοντα. Έχει πιο σκούρο χρώμα από τον υποορίζοντα A₂.

B₃ – Ανόργανος μεταβατικός ορίζοντας, ενδιάμεσα στον B και τον C ορίζοντα, όπου υπερσχύουν τα χαρακτηριστικά του B ορίζοντα.

Εκτός από τα κεφαλαία γράμματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορεί να χρησιμοποιηθούν από δίπλα και πεζά γράμματα, που υποδηλώνουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Αυτά είναι:

a – Υποδηλώνει την προχωρημένη αποσύνθεση οργανικής ουσίας, μη πλήρως χουμοποιημένη

b – Υποδηλώνει θαμμένο εδαφικό ορίζοντα

g – Υποδηλώνει ισχυρά φαινόμενα οξειδοαναγωγής

k (ca) – Υποδηλώνει τη συγκέντρωση δευτερογενούς ανθρακικού ασβεστίου

m – Υποδηλώνει τη τσιμεντοποίηση των συστατικών

p – Υποδηλώνει ότι ο ορίζοντας είναι διαταραγμένος λόγω οργώματος

q – Υποδηλώνει τη συσσώρευση χαλαζία

s – Υποδηλώνει τη συσσώρευση οξειδίων και ένυδρων οξειδίων σιδήρου και αργιλίου

t – Υποδηλώνει τη συσσώρευση αργίλου

y (cs) – Υποδηλώνει τη συσσώρευση γύψου

z (sa) – Υποδηλώνει τη συσσώρευση ευδιάλυτων αλάτων

1.15 Ταξινόμηση των εδαφών

Υπάρχουν, εδώ και χρόνια, αρκετά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση των εδαφών.



Εικόνα 1.5. Παγκόσμια βάση αναφοράς για τους πόρους εδάφους

Πρώτο ήταν εκείνο που αναπτύχθηκε από τον Dokuchaev το 1886, ο οποίος διέκρινε τα εδάφη, ανάλογα με τις ιδιότητές τους σε κανονικά, μεταβατικά και μη κανονικά [19].

Ακολούθησαν πολλά ακόμα, όπως εκείνο του Sibirtsev το 1895, με το οποίο διέκρινε τα εδάφη ανάλογα με τον βαθμό ωριμότητας σε ζωνικά, ενδοζωνικά και σε αζωνικά.

Το Παλαιό Αμερικανικό Σύστημα των Thorp και Smith το 1949 διέκρινε τα εδάφη με βάση το κλίμα, τη βλάστηση και διάφορα ποσοτικά χαρακτηριστικά σε ζωνικά, ενδοζωνικά και αζωνικά.

Το Soil Taxonomy το 1975 και η μεταγενέστερη έκδοσή του το 1999, συμπεριέλαβαν στην ταξινόμησή τους εδάφη που προέκυψαν από ηφαιστειακή δραστηριότητα και από ψυχρές περιοχές.

Το σύστημα FAO/UNESCO που δημιουργήθηκε, αρχικά, το 1961 και μεταγενέστερα με νέες εκδόσεις, το 1975 και το 2006, πρότεινε την ταξινόμηση των εδαφών με βάση την ύπαρξη και τον καθορισμό των διαγνωστικών οριζόντων.

Το 1998 στη Γαλλία, υιοθετήθηκε παγκοσμίως ένα κοινό σύστημα ταξινόμησης, το World Reference Base (WRB), του οποίου οι τάξεις θα παρουσιαστούν στον πίνακα παρακάτω:

HISTOSOLS (HS)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα histic ή folic, όπου απουσιάζει ο ορίζοντας andic ή vitric
CRYOSOLS (CR)	Τα εδάφη με έναν ή περισσότερους ορίζοντες cryic έως 100 cm
ANTHROSOLS	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα όπως hortie, irrigric, plaggic ή terric, πάχους

(AT)	έως 50 cm, ή έναν υπερκείμενο ορίζοντα anthraquic με έναν ορίζοντα hydragric από κάτω
LEPTOSOLS (LP)	Τα εδάφη με σκληρό πέτρωμα στα πρώτα 25cm ή που περιέχουν πάνω από 40% ανθρακικό ασβέστιο στα πρώτα 25cm ή λιγότερο από 10% λεπτή γη σε βάθος 75cm και άνω, χωρίς άλλους διαγνωστικούς ορίζοντες εκτός από έναν ορίζοντα mollic, ochric, umbric, yermic ή vertic
VERTISOLS (VR)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα vertic στα πρώτα 100cm, όπου μετά τα 20cm και για ακόμη 100 cm περιέχουν όλοι οι ορίζοντες 30% και άνω άργιλο, ενώ εμφανίζουν και ρωγμές, οι οποίες συστέλλονται και διαστέλλονται ανάλογα με την πρόσληψη και αποβολή νερού
FLUVISOLS (FL)	Τα εδάφη τα οποία σε βάθος 25 έως 50 cm περιέχουν αλλουβιακές αποθέσεις και στερούνται διαγνωστικών οριζόντων, εκτός από έναν ορίζοντα histic, mollic, ochric, takyric, umbric, yermic, salic ή sulfuric
SOLONCHAKS (SC)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα salic που ξεκινάει στα πρώτα 50 cm και στερούνται διαγνωστικών οριζόντων, εκτός από έναν ορίζοντα histic, mollic, ochric, takyric, yermic, calcic, cambic, duric, gypsic ή vertic
GLEYSOLS (GL)	Τα εδάφη με gleyic ιδιότητες στα πρώτα 50 cm και στερούνται διαγνωστικών οριζόντων, εκτός από έναν ορίζοντα histic, mollic, ochric, takyric, umbric, andic, calcic, cambic, gypsic, plinthic, salic, sulfuric ή vitric σε βάθος 100 cm
ANDOSOLS (AN)	Τα εδάφη με έναν vitric ή andic ορίζοντα στα πρώτα 25 cm και στερούνται διαγνωστικών οριζόντων, εκτός από έναν ορίζοντα histic, fulvic, melanic, mollic, umbric, ochric, duric ή cambic
PODZOLS (PZ)	Τα εδάφη με έναν spodic ορίζοντα στα πρώτα 200 cm κάτω από έναν albic, histic, umbric ή ochric ορίζοντα ή έναν ορίζοντα anthropogenic πάχους λιγότερο από 50 cm
PLINTHOSOLS (PT)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα petroplinthic στα πρώτα cm ή έναν ορίζοντα plinthic στα πρώτα 100 cm και βρίσκεται κάτω από έναν albic ή ορίζοντα stagnic
FERRALSOLS (FR)	Τα εδάφη με ορίζοντα ferralic φτάνουν σε βάθος 25 έως 200 cm και δεν εμφανίζουν έναν nitic ορίζοντα σε βάθος 100 cm
SOLONETZ (SN)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα natric στα πρώτα 100 cm
PLANOSOLS (PL)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα ελουβιακό με ευκρινές κατώτατο όριο στα πρώτα 100 cm χωρίς albeluvic διαφοροποίηση
CHERNOZEMS (CH)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα mollic που απουσιάζει ένας petrocalcic ορίζοντα σε βάθος 25 έως 100 cm και εμφανίζουν δευτερογενή συσσώρευση ανθρακικών μετά από 50 cm
KASTANOZEMS (KS)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα mollic με δευτερογενή συσσώρευση ανθρακικών στα 100 cm και δεν έχουν άλλους διαγνωστικούς ορίζοντες εκτός από έναν argic, calcic, cambic, gypsic ή vertic ορίζοντα
PHAEZEMS	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα mollic και βαθμό κορεσμού (με 1M NH ₄ OAc)

(PH)	πάνω από 50% και βάθος 25 έως 100 cm, με lithic ή paralithic επαφή ή έναν ορίζοντα petrocalcic και δεν έχουν άλλους διαγνωστικούς ορίζοντες εκτός από έναν albic, argic, cambic ή vertic ορίζοντα
GYPSISOLS (GY)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα gypsic ή petrogypsic στα πρώτα 100cm ή πάνω από 15% γύψου στα πρώτα 100 cm και δεν έχουν άλλους διαγνωστικούς ορίζοντες εκτός από έναν ochric ή cambic ορίζοντα, έναν ορίζοντα argic με γύψο ή ανθρακικό ασβέστιο, έναν vertic ορίζοντα ή έναν calcic ή petrocalcic ορίζοντα, κάτω από έναν gypsic ορίζοντα
DURISOLS (DU)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα duric ή petroduric στα πρώτα 100cm
CALCISOLS (CL)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα calcic ή petrocalcic στα πρώτα 100 cm και δεν έχουν άλλους διαγνωστικούς ορίζοντες εκτός από έναν ochric ή cambic ορίζοντα και έναν argic ασβεστούχο ορίζοντα και έναν ορίζοντα vertic ή gypsic κάτω από έναν petrocalcic ορίζοντα
ALBELUVISOLS (AB)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα argic στα πρώτα 100 cm με ακανόνιστο άνω όριο, λόγω μιας albeluvic προσθήκης στον argic ορίζοντα
ALISOLS (AL)	Τα εδάφη με έναν argic ορίζοντα με IAK (με 1M NH ₄ OAc) πάνω από 24 cmol _c kg ⁻¹ και alic ιδιότητες από 25 έως 100 cm, ενώ απουσιάζουν διαγνωστικοί ορίζοντες εκτός από έναν ochric, umbric, albic, andic, ferric, nitic, plinthic ή vertic ορίζοντα
NITISOLS (NT)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα nitic στα πρώτα 100 cm και απουσιάζουν διαγνωστικοί ορίζοντες εκτός από έναν ferric, plinthic ή vertic ορίζοντα στα πρώτα 100 cm
ACRISOLS (AC)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα argic με IAK (με 1M NH ₄ OAc) κάτω από 24 cmol _c kg ⁻¹ σε βάθος 100 έως 200 cm και βαθμό κορεσμού από βάσεις κάτω από 50% σε βάθος 25 έως 100cm
LUVISOLS (LV)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα argic με IAK (με 1M NH ₄ OAc) ίση ή πάνω από 24 cmol _c kg ⁻¹
LIXISOLS (LX)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα argic
UMBRISOLS (UM)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα umbric και απουσιάζουν διαγνωστικοί ορίζοντες εκτός από έναν anthropedogenic ή albic ή cambic ορίζοντα πάχους κάτω από 50 cm
CAMBISOLS (CM)	Τα εδάφη με έναν ορίζοντα cambic ή mollic με βαθμό κορεσμού από βάσεις κάτω από 50% ή έναν andic, vertic ή vitric ορίζοντα σε βάθος 25 έως 100 cm ή έναν plinthic, petroplinthic ή salic ορίζοντα που ξεκινάει στα 50 με 100 cm
ARENOSOLS (AR)	Τα εδάφη με πηλοαμμώδη υφή ή σε βάθος 100 cm ή με έναν plinthic, petroplinthic ή salic ορίζοντα σε βάθος 50 έως 100 cm και ποσοστό λίθων >35% σε βάθος 100 cm, ενώ απουσιάζουν διαγνωστικοί ορίζοντες εκτός από έναν ochric, yermic ή albic ορίζοντα ή έναν plinthic, petroplinthic ή salic ορίζοντα σε βάθος πάνω από 50 cm ή έναν argic ή spodic ορίζοντα σε βάθος πάνω από 200 cm

REGOSOLS (RG)	Τα εδάφη που δεν είναι δυνατό να καταταχθούν σε κάποια από τις προηγούμενες ομάδες
--------------------------	--

Πίνακας 1.4. Ταξινόμηση εδαφών με βάση το World Reference Base(WRB)

Οι ιδιότητες των οριζόντων αναλύονται στον παρακάτω πίνακα:

Albic	Είναι ανοιχτόχρωμος ορίζοντας που απουσιάζει η άργιλος και τα οξειδία του σιδήρου
Andic	Ορίζοντας που έχει σχέση με ηφαιστειακά υλικά
Anthraquic	Όμοια με τον anthropedogenic. Έχει σχηματιστεί μετά από μακροχρόνια καλλιέργεια
Anthropedogenic	Ορίζοντας που έχει σχηματιστεί μετά από μακροχρόνια καλλιέργεια
Argic	Ορίζοντας πλούσιος σε άργιλο σε σχέση με τον υπερκείμενο
Calcic	Ορίζοντας με δευτερογενή συσσώρευση ανθρακικού ασβεστίου
Cambic	Ορίζοντας που διαφοροποιείται πολύ σε σχέση με τον υποκείμενο
Chernic	Ειδικού τύπου mollic ορίζοντας
Cryic	Ορίζοντας μονίμως παγωμένος
Duric	Ορίζοντας με τσιμεντοποιημένα υλικά
Ferralic	Ορίζοντας που σχηματίστηκε κάτω από έντονες συνθήκες αποσάθρωσης
Ferric	Ορίζοντας πλούσιος σε συσσωματώματα σιδήρου
Folic	Ορίζοντας μικρού πάχους από οργανικά υλικά
Fragic	Φυσικός ορίζοντας, μη τσιμεντοποιημένος, με καλό πορώδες
Fulvic	Λεπτός, σκουρόχρωμος ορίζοντας από αλλοφανή
Gypsic	Ορίζοντας με δευτερογενή συσσώρευση γύψου
Histic	Επιφανειακός ορίζοντας με οργανικά υλικά
Hydragric	Όμοια με τον anthropedogenic. Έχει σχηματιστεί μετά από μακροχρόνια καλλιέργεια
Hortic	Όμοια με τον anthropedogenic. Έχει σχηματιστεί μετά από μακροχρόνια καλλιέργεια
Iragric	Όμοια με τον anthropedogenic. Έχει σχηματιστεί μετά από μακροχρόνια καλλιέργεια
Melanic	Λεπτός, επιφανειακός και σκουρόχρωμος ορίζοντας από αλλοφανή
Mollic	Σκουρόχρωμος επιφανειακός ορίζοντας, με μεγάλο βαθμό κορεσμού από βάσεις

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

Natric	Ορίζοντας πλούσιος σε άργιλο και ανταλλάξιμο νάτριο
Nitic	Ορίζοντες με λαμπερές επιφάνειες από ιλλουβιακή άργιλο
Ochric	Επιφανειακός ορίζοντας με λεπτές διαστρώσεις και χαμηλή συγκέντρωση σε οργανική ουσία
Petrocalcic	Τσιμεντοποιημένος calcic ορίζοντας
Petroduric	Κοκκινόχρωμος τσιμεντοποιημένος ορίζοντας με διοξείδιο του πυριτίου
Petrogypsic	Τσιμεντοποιημένος ορίζοντας με δευτερογενή συσσώρευση γύψου
Petroplinthic	Συμπαγής ορίζοντας που απουσιάζει οργανική ουσία
Plaggic	Όμοια με τον anthropedogenic. Έχει σχηματιστεί μετά από μακροχρόνια καλλιέργεια
Plinthic	Ορίζοντας με καολινιτική άργιλο που είναι πλούσια σε σίδηρο και φτωχή σε χούμο
Salic	Επιφανειακός ορίζοντας πλούσιος σε άλατα
Spodic	Ορίζοντας με ιλλουβιακή συσσώρευση οργανικής ουσίας
Sulfuric	Πολύ όξινος ορίζοντας
Takyric	Ορίζοντας σε ξηρά εδάφη που υπόκεινται σε κατάκλιση
Terric	Όμοια με τον anthropedogenic. Έχει σχηματιστεί μετά από μακροχρόνια καλλιέργεια
Umbric	Λεπτός, επιφανειακός ορίζοντας πλούσιος σε οργανική ουσία
Vertic	Ορίζοντας πλούσιος σε άργιλο και διογκούμενο κρυσταλλικό πλέγμα
Vitric	Ορίζοντας πλούσιος σε ηφαιστειακό γυαλί
Yermic	Ορίζοντας με συσσώρευση θραυσμάτων λίθων

Πίνακας 1.5. Ιδιότητες οριζόντων εδάφους

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Άρδευση ακριβείας και λειτουργία



Εικόνα 2.1. Άρδευση ακριβείας

2.1 Εισαγωγή στην άρδευση ακριβείας

Η άρδευση ακριβείας έχει αναπτυχθεί ως μια έξυπνη προσέγγιση για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού στη γεωργία. Αυτό το κεφάλαιο επικεντρώνεται στη θεμελιώδη σχέση μεταξύ των συστημάτων άρδευσης ακριβείας και των τύπων του εδάφους. Η σωστή διαχείριση του νερού είναι απαραίτητη όχι μόνο για τη διατήρηση των υδατινών πόρων, αλλά και για την εξασφάλιση της ιδανικής ανάπτυξης των φυτών. Τα συστήματα ύδρευσης ακριβείας λαμβάνουν υπόψη μεταβλητές όπως η διατήρηση του νερού, το πορώδες και η διεισδυτικότητα και οι μεθοδολογίες του συστήματος ύδρευσης προσαρμόζονται ώστε να ανταποκρίνονται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ξεχωριστών ειδών εδάφους [20].

Οι προοδευτικές αγροτικές επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν την πρόκληση της παραγωγής υψηλότερων αποδόσεων για τη διατροφή ενός αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού, ενώ ταυτόχρονα αντιμετωπίζουν τις ανησυχίες για την λειψυδρία και τις φυσικές επιπτώσεις. Τα πλαίσια νερού ακριβείας έχουν αναπτυχθεί ως μια εφευρετική πορεία δράσης που προσπαθεί να ικανοποιήσει αυτούς τους φαινομενικά αντικρουόμενους στόχους. Σε καμία περίπτωση δεν μοιάζουν με τις συνήθεις τεχνικές πλαίσιο νερού που μεταφέρουν το νερό ισότιμα στο πεδίο, τα πλαίσια νερού ακριβείας χρησιμοποιούν καινοτόμες εξελίξεις και πληροφορίες για να μεταφέρουν το νερό ακριβώς εκεί και όταν απαιτείται.

2.2 Η ανάγκη για άρδευση ακριβείας

Το νερό αποτελεί ένα περιορισμένο αγαθό και η συνετή χρήση του αποτελεί σημαντικό ζήτημα για την κηπουρική και την κοινωνία. Οι τακτικές προσαρμογές του συστήματος ύδρευσης οδηγούν συχνά σε σπατάλη χρήσης του νερού λόγω μεταβλητών όπως η απώλεια νερού, η απορροή και το υπερβολικό πότισμα. Αυτές οι ρυθμίσεις δεν οδηγούν μόνο σε σπατάλη του νερού, αλλά επιπλέον μειώνουν την ποιότητα του εδάφους λόγω του φιλτραρίσματος των λιπασμάτων και των φυτοφαρμάκων και προκαλούν μόλυνση του νερού.

Η άρδευση ακριβείας ξεπερνά αυτές τις προκλήσεις με μια εστιασμένη, καθοδηγούμενη από δεδομένα προσέγγιση. Με την κατανόηση των χαρακτηριστικών των ειδών εδάφους, των αναγκών σε νερό και της ροής των κλιματικών συνθηκών, οι γεωπόνοι μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση του νερού. Η προσέγγιση αυτή αυξάνει τις αποδόσεις, μειώνει τη σπατάλη νερού, ελαχιστοποιεί τις φυσικές επιπτώσεις και τελικά συμβάλλει στην ανάπτυξη των αγροτικών οικονομιών.

2.3 Συνιστώσες της άρδευσης ακριβείας

Τα συστήματα της άρδευσης ακριβείας δεν είναι μια λύση που ταιριάζει σε όλους, αλλά ένας συνδυασμός ανάπτυξης μεθοδολογίας και λογικής κατανόησης. Τα περισσότερα από τα συστατικά στοιχεία έχουν είναι:

- **Έλεγχος του εδάφους:** Η επιτακτική ανάγκη να ερευνάνται η ακριβής μέτρηση των επιπέδων υγρασίας του εδάφους, της θερμοκρασίας και άλλων σχετικών παραμέτρων. Οι αισθητήρες εδάφους και οι πίνακες ελέγχου παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για τη λήψη αποφάσεων στα συστήματα ύδρευσης.
- **Πρόγνωση του καιρού:** Τα συστήματα παροχής νερού λαμβάνουν υπόψη τους τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες. Η γνώση του πότε αναμένονται βροχοπτώσεις επιτρέπει στους αγρότες να τροποποιούν κατάλληλα τα σχέδια του συστήματος ύδρευσης και να αποφεύγουν την υπερβολική άρδευση.
- **Ανάλυση δεδομένων:** Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τους αισθητήρες εδάφους, τα κλιματικά στοιχεία και τα στάδια ανάπτυξης του περιβλήματος αναλύονται για τη δημιουργία εκπαιδευμένων μεθοδολογιών του συστήματος άρδευσης. Οι εξελιγμένες αναλύσεις μπορούν να αποφασίσουν την ιδανική επανάληψη και ποσότητα του συστήματος ύδρευσης.
- **Πλαίσια αυτοματισμού και ελέγχου:** Η καινοτομία της ρομποτικής επιτρέπει τον έλεγχο των συστημάτων άρδευσης από απόσταση. Οι έξυπνοι ελεγκτές τροποποιούν την παροχή νερού με βάση πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για να διασφαλίσουν τη μεταφορά της κατάλληλης ποσότητας νερού στα φυτά.

2.4 Πλεονεκτήματα της άρδευσης ακριβείας

Το σύστημα άρδευσης ακριβείας διαθέτει μια σειρά πλεονεκτημάτων που υπερβαίνουν τα αποθεματικά κεφάλαια νερού:

- **Βελτίωση αποδοτικότητας του νερού:** Εφαρμόζοντας το νερό, όταν και όπου απαιτείται, ελαχιστοποιείται η σπατάλη και εξοικονομούνται πολύτιμα περιουσιακά στοιχεία.
- **Αυξημένη παραγωγικότητα των καλλιεργειών:** Το σύστημα άρδευσης ακριβείας μπορεί να βελτιώσει τις αποδόσεις επεξεργασίας και να δημιουργήσει πολύ καλύτερης ποιότητας προϊόντα.
- **Περιβαλλοντικά οφέλη:** Η μειωμένη απορροή νερού και η διήθηση φυτοφαρμάκων οδηγεί σε ένα πιο ευεργετικό βιολογικό σύστημα και βελτιωμένη ποιότητα νερού.
- **Εξοικονόμηση ενέργειας:** Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας εξοικονομούν την ενέργεια πιο αποτελεσματικά, επειδή μειώνουν τις σπατάλες άντλησης και μεταφοράς νερού.
- **Εξοικονόμηση εργασίας:** Τα μηχανογραφημένα συστήματα μειώνουν την ανάγκη για χειρωνακτική εργασία κατά την παρατήρηση και την εφαρμογή του συστήματος.

2.4.1 Μειονεκτήματα άρδευσης ακριβείας

Παρά την πληθώρα των πλεονεκτημάτων της άρδευσης ακριβείας, υπάρχουν και αρκετά σημαντικά μειονεκτήματα που πρέπει να αναφερθούν:

- **Κόστος εφαρμογής:** Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας μπορεί να είναι ακριβά στην εγκατάσταση.
- **Συντήρηση και επισκευές:** Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας απαιτούν τακτική συντήρηση για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία τους.
- **Κατανάλωση ενέργειας:** Η χρήση αντλιών και συστημάτων ελέγχου, μπορεί να είναι ενεργοβόρα.
- **Πολυπλοκότητα:** Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας μπορεί να είναι πολύπλοκα στη δημιουργία και λειτουργία τους, ειδικά για αγρότες με περιορισμένη τεχνική εξειδίκευση.

- **Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:** Η άρδευση ακριβείας, εάν δεν διαχειρίζεται σωστά, μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική άντληση υπόγειων υδάτων ή αναποτελεσματική χρήση του νερού, βλάπτοντας σημαντικά τα τοπικά οικοσυστήματα.
- **Εναισθησία στις καιρικές συνθήκες:** Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας απαιτούν συχνές προσαρμογές με βάση τις μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες και τις ανάγκες των καλλιεργειών.

Ωστόσο, πολλές από αυτές τις προκλήσεις μπορούν να ελαχιστοποιηθούν ή να ξεπεραστούν με κατάλληλο σχεδιασμό, επενδύσεις, εκπαίδευση και συνεχή διαχείριση. Εάν εφαρμοστεί αποτελεσματικά, η άρδευση ακριβείας μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη όσον αφορά την εξοικονόμηση του νερού, τη αύξηση της απόδοσης των καλλιεργειών και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων [21].

2.5 Η σημασία του τύπου εδάφους στην άρδευση ακριβείας

Οι διάφοροι τύποι εδάφους έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες συγκράτησης νερού και ικανότητες αποβλήτων. Η κατανόηση αυτών των ιδιοτήτων του εδάφους είναι βασική για τη δημιουργία αποτελεσματικών σχεδίων συστημάτων άρδευσης. Τα εδαφικά είδη ταξινομούνται σε γενικές γραμμές ως αμμώδη, πηλώδη, αργιλώδη και συνδυασμοί αυτών. Κάθε είδος εδάφους παρουσιάζει συγκεκριμένες προκλήσεις για τη διαχείριση του συστήματος άρδευσης.

2.6 Υγρασία του εδάφους και ανάπτυξη των φυτών

Η εδαφική υγρασία είναι ένας επιτακτικός παράγοντας που καθορίζει την ευημερία, την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυτών. Η διατηρητή υγρασία μέσα στο έδαφος επηρεάζει συγκεκριμένα τις φυσιολογικές μορφές των φυτών, όπως η πρόσληψη συμπληρωμάτων, η φωτοσύνθεση και σε γενικές γραμμές η ανάπτυξη. Στο ακριβές σύστημα άρδευσης, η κατανόηση της πολύπλοκης σχέσης μεταξύ της εδαφικής υγρασίας και της ανάπτυξης των φυτών είναι θεμελιώδης για τον σχεδιασμό βιώσιμων διαδικασιών του συστήματος ύδρευσης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της εδαφικής υγρασίας και της ανάπτυξης των φυτών εξαρτάται από το είδος του εδάφους [22]:

- Σε αμμώδη εδάφη, απαιτείται συχνή άρδευση για τη διατήρηση ικανοποιητικών επιπέδων υγρασίας για την ανάπτυξη των φυτών.
- Σε πηλώδη εδάφη, τα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν με λιγότερες επισκέψεις άρδευσης, αλλά η διάρκεια και η κλιμάκωση του συστήματος ύδρευσης πρέπει να εξισορροπείται ανάλογα με τις προϋποθέσεις των φυτών.
- Σε αργιλώδη εδάφη, τα σχέδια του συστήματος άρδευσης πρέπει να καθορίζονται προσεκτικά για να αποφεύγεται η υφαλμύρωση, η οποία μπορεί να περιορίσει την ανάπτυξη των ριζών και να οδηγήσει σε κατανάλωση οξυγόνου.

2.6.1 Ο ρόλος της εδαφικής υγρασίας

Το έδαφος λειτουργεί ως αποθήκη για το νερό που αποβάλλουν τα φυτά από τις ρίζες τους. Το νερό αποτελεί τη βάση για διάφορες βιοχημικές αντιδράσεις εντός του φυτικού σώματος και διευκολύνει τη μεταφορά συμπληρωμάτων από το έδαφος στα διάφορα μέρη του φυτού. Η επαρκής υγρασία μέσα στο χώμα κάνει τη διαφορά στη διατήρηση της πίεσης των φυτικών κυττάρων και διατηρεί το στέλεχος και τις απολήξεις σταθερά και όρθια. Γενικά, η εδαφική υγρασία λειτουργεί ως ρυθμιστής της θερμοκρασίας και επηρεάζει το μικρόκλιμα γύρω από τις ρίζες των φυτών.

2.6.2 Περιεκτικότητα σε εδαφική υγρασία και υγεία των φυτών

Η ιδανική μετάβαση της υγρασίας του εδάφους εξαρτάται από το είδος του φυτού και το έδαφος. Η ανεπαρκής εδαφική υγρασία προκαλεί διάταση του νερού και παρεμπόδιση της ανάπτυξης. Από την άλλη πλευρά, η υπερβολική εδαφική υγρασία μπορεί να οδηγήσει σε κακές συνθήκες του οξυγόνου στους πόρους του εδάφους, ασφυξία και αποσύνθεση των ριζών και άλλες ασθένειες. Τα κατάλληλα συστήματα άρδευσης επιτρέπουν τη διατήρηση της υγρασίας του εδάφους στην ιδανική τιμή για την εξασφάλιση της αποτελεσματικής ανάπτυξης και των αποδόσεων.

2.7 Τύποι εδάφους και ικανότητα συγκράτησης υγρασίας

Τα διάφορα είδη εδάφους έχουν διαφορετική ικανότητα συγκράτησης υγρασίας. Τα αμμώδη εδάφη έχουν εκτεταμένα σωματίδια και μεγάλα κενά, με αποτέλεσμα να δυσκολεύονται να συγκρατήσουν την υγρασία και να εξαντλούνται γρήγορα. Τα πηλώδη εδάφη έχουν μεγάλη προσαρμογή μεταξύ της διαρροής και της διατήρησης του νερού. Τα αργιλώδη εδάφη έχουν καλύτερα σωματίδια και μικρότερα κενά, έτσι ώστε να συγκρατούν περισσότερο νερό, αλλά μπορεί να γίνουν υδαρή. Στο ακριβές σύστημα άρδευσης, αυτές οι ιδιότητες του εδάφους λαμβάνονται υπόψη κατά τη λήψη απόφασης για το σχέδιο του συστήματος.

2.8 Υδατική καταπόνηση και αντίδραση των φυτών

Η υδατική καταπόνηση εμφανίζεται όταν στα φυτά δεν παρέχεται επαρκής ποσότητα νερού. Ως αντίδραση στην πίεση του νερού, τα φυτά μπορούν να πλησιάσουν τους στοματικούς τους πόρους για να μειώσουν την κακή κατάσταση του νερού μέσω της διαπνοής. Αυτό ρυθμίζει κατάλληλα το νερό ενώ περιορίζει την πρόσληψη διοξειδίου του άνθρακα που απαιτείται για τη φωτοσύνθεση. Αυτή η εύθραυστη προσαρμογή υπογραμμίζει τη σημασία της διατήρησης της ιδανικής εδαφικής υγρασίας για την καλή ανταλλαγή αερίων και γενικά για την συνολική ευημερία των φυτών [23].

2.9 Άρδευση προσαρμοσμένη στις ανάγκες των φυτών

Το σύστημα παροχής νερού ακριβείας χρησιμοποιεί πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες εδαφικής υγρασίας για να προσαρμόζει τα σχέδια του συστήματος στις ιδιαίτερες ανάγκες των συγκεκριμένων καλλιεργειών. Με την κατανόηση των απαιτήσεων της υγρασίας των ξεχωριστών καλλιεργειών και της ικανότητας συγκράτησης υγρασίας των διαφόρων τύπων εδάφους, οι αγρότες μπορούν να βελτιστοποιήσουν το χρονοδιάγραμμα και την επανάληψη του συστήματος άρδευσης [24]. Αυτή η προσέγγιση εγγυάται ότι τα φυτά λαμβάνουν το νερό που χρειάζονται για να αναπτυχθούν, ενώ ελαχιστοποιείται η σπατάλη νερού.

2.10 Εξασφάλιση βιώσιμης ανάπτυξης

Η ορθότητα του συστήματος άρδευσης δεν μεγιστοποιεί μόνο τις αποδόσεις επεξεργασίας, αλλά συμβάλλει επίσης στη διατηρήσιμη κηπουρική [25]. Αποτρέπει την υπερβολική άρδευση και την υφαλμύρωση, βοηθάει στην αποφυγή της απορροής συμπληρωμάτων και χημικών στις πηγές νερού και ελαχιστοποιεί τη φυσική βλάβη. Επιπλέον, το κατάλληλο σύστημα άρδευσης μετριάζει τα υδάτινα αποθέματα, μια εξαιρετικά ζωτικής σημασίας άποψη σε περιοχές που αντιμετωπίζουν έλλειψη νερού.

Η σχέση μεταξύ της υγρασίας του εδάφους και της ανάπτυξης των φυτών είναι σύνθετη και πολύπλευρη. Η επαρκής υγρασία του εδάφους μπορεί να είναι προϋπόθεση για υγιείς και ωφέλιμες καλλιέργειες. Το σύστημα άρδευσης ακριβείας εγγυάται ότι τα φυτά λαμβάνουν το κατάλληλο ποσό νερού τη σωστή στιγμή. Λαμβάνοντας υπόψη τα ποικίλα χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων εδάφους και τις απαιτήσεις υγρασίας των ξεχωριστών φυτών, οι μεθοδολογίες συστημάτων νερού ακριβείας ανοίγουν το δρόμο για την οικονομική κηπουρική .

2.11 Καινοτομίες για την αξιολόγηση της υγρασίας του εδάφους

Η καινοτομική ανάπτυξη έχει οδηγήσει σε σύγχρονες διαδικασίες για την ακριβή αξιολόγηση της υγρασίας του εδάφους. Τόσο οι επίγειοι όσο και οι απομακρυσμένοι αισθητήρες υγρασίας του εδάφους παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για τα επίπεδα υγρασίας. Αυτοί οι αισθητήρες υποστηρίζουν την επιλογή πλαισίου νερού με βάση τα δεδομένα, ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή ποσότητα νερού στα φυτά την κατάλληλη στιγμή.

Οι κινητήρες δόμησης έχουν φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο εξετάζεται και παρατηρείται η υγρασία του εδάφους. Οι συμβατικές τεχνικές εκτίμησης της υγρασίας του εδάφους εξαρτιόνταν από την οπτική αξιολόγηση, τις χειροκίνητες δοκιμές και τα δύσχρηστα όργανα μέτρησης. Η εξελιγμένη καλλιέργεια χρησιμοποιεί μια σειρά από σύγχρονες βελτιώσεις και αισθητήρες που παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και επιτρέπουν τον ακριβή, καθοδηγούμενο από δεδομένα προσδιορισμό του πλαισίου νερού.

2.12 Αισθητήρες υγρασίας εδάφους

Οι αισθητήρες υγρασίας του εδάφους προσφέρουν βοήθεια δίνοντας ακριβείς και πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την περιεκτικότητα της υγρασίας του εδάφους [26]. Αυτοί οι αισθητήρες τοποθετούνται σε διάφορα βάθη του εδαφικού προφίλ για να επιτρέπουν την αντίληψη των γωνιών υγρασίας. Διαφορετικά είδη αισθητήρων είναι προσβάσιμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν τενσιόμετρα, αισθητήρες χωρητικότητας και αισθητήρες ανακλασιμετρίας χώρου χρόνου (TDR) [27]. Αυτοί οι αισθητήρες μετράνε την υγρασία του εδάφους σε διάφορα επίπεδα και μεταδίδουν τα δεδομένα αυτά ειδικά σε ένα κεντρικό σύστημα ή στον εξοπλισμό του αγρότη [28].

2.13 Τηλεπισκόπηση

Οι καινοτομίες της τηλεπισκόπησης χρησιμοποιούν τακτικά ακολουθιακούς συμβολισμούς για να παρέχουν μια ευρύτερη άποψη σχετικά με τα επίπεδα υγρασίας του εδάφους σε μια μεγαλύτερη περιοχή. Αυτές οι στρατηγικές χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα για να προσδιορίσουν τις διηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους, οι οποίες σχετίζονται με την ουσία της εδαφικής υγρασίας [29]. Οι πληροφορίες απρόσιτης ανίχνευσης μπορούν να προσφέρουν βοήθεια στους γεωπόνους για την αναγνώριση προτύπων, χωρικών ποικιλιών και πιθανών περιοχών ανησυχίας σε σχέση με την υγρασία του εδάφους [30][31].

2.14 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

Τα πρωτοποριακά πλαίσια συστημάτων άρδευσης ακριβείας χρησιμοποιούν ασύρματα συστήματα αισθητήρων για τη συλλογή και τη μετάδοση πληροφοριών από διαφορετικές εστίες εντός του αγρού[32]. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από διάσπαρτους αισθητήρες που επικοινωνούν ασύρματα και παρέχουν ολοκληρωμένο έλεγχο των επιπέδων υγρασίας του εδάφους σε πραγματικό χρόνο [33]. Τα δεδομένα αυτά διαμορφώνουν την προϋπόθεση για έξυπνες επιλογές συστημάτων ύδρευσης και εγγυώνται ότι το νερό παρέχεται ακριβώς εκεί και όταν απαιτείται [34].

2.15 Συστήματα ανάλυσης δεδομένων και υποστήριξης αποφάσεων

Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τους αισθητήρες υγρασίας του εδάφους και άλλες πηγές προετοιμάζονται και αναλύονται χρησιμοποιώντας εξελιγμένα μέσα έρευνας πληροφοριών. Αυτές οι συσκευές προσφέρουν βοήθεια στους γεωπόνους να μεταφράσουν τα δεδομένα, να προσδιορίσουν τα σχέδια και να κάνουν εκπαιδευμένες επιλογές και μεθοδολογίες συστημάτων άρδευσης ακριβείας [35]. Τα πλαίσια υποστήριξης επιλογών συνδυάζουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο με στοιχεία για το κλίμα, σχέδια ανάπτυξης περιποίησης και πληροφορίες που έχουν καταγραφεί για τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών του συστήματος ύδρευσης [36].

2.16 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις

Η ενσωμάτωση της καινοτομίας στην αξιολόγηση της υγρασίας του εδάφους έχει μερικά κομβικά σημεία που αναφέρονται παρακάτω:

- **Ακρίβεια:** Οι σημερινοί αισθητήρες παρέχουν ακριβείς πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την υγρασία του εδάφους, δίνοντας τη δυνατότητα ακριβούς διαχείρισης του συστήματος ύδρευσης.
- **Αποτελεσματικότητα:** Η λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων μπορεί να ελαχιστοποιήσει την υπερβολική άρδευση και να βελτιώσει την ικανότητα χρήσης του νερού.
- **Βιωσιμότητα:** Το σύστημα άρδευσης ακριβείας συμβάλλει στη βιώσιμη γεωργία, αποφεύγοντας τη σπατάλη νερού.

Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις, όπως το εισαγωγικό κόστος εγκατάστασης, οι προϋποθέσεις υποστήριξης και οι πιθανές εξειδικευμένες δυσλειτουργίες. Οι γεωπόνοι πρέπει να συνεισφέρουν με τους σωστούς αισθητήρες, να εγγυώνται την κατάλληλη λειτουργία τους και να επιβλέπουν αποτελεσματικά τη διαλεύκανση των πληροφοριών.

Αυτά τα εξελιγμένα όργανα παρέχουν στους γεωπόνους σημαντικά δεδομένα σχετικά με τη ροή της υγρασίας του εδάφους, επιτρέποντάς τους να δημιουργήσουν εκπαιδευμένες επιλογές για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού και την αύξηση της αποδοτικότητας της λειτουργίας. Αξιοποιώντας τους αισθητήρες υγρασίας του εδάφους, την απρόσιτη ανίχνευση, τα απομακρυσμένα συστήματα και την ανάλυση πληροφοριών, το σύστημα άρδευσης ακριβείας είναι ένα απαραίτητο βήμα προς την κατεύθυνση της οικονομικής και αποτελεσματικής γεωργικής χώνευσης. Η ακόλουθη περιοχή μιλάει για το πώς οι διαδικασίες του συστήματος νερού ακριβείας μπορούν να προσαρμοστούν σε συγκεκριμένα είδη εδάφους για να ενισχύσουν την εξατομικευμένη και ιδανική διαχείριση του νερού.

2.17 Στρατηγικές άρδευσης προσαρμοσμένες στον τύπο του εδάφους

Το σύστημα άρδευσης ακριβείας προσαρμόζει τις διαδικασίες του συστήματος ύδρευσης σύμφωνα με το είδος του εδάφους. Αυτός ο χειρισμός απαιτεί μεγάλη κατανόηση των ιδιοτήτων του εδάφους και του τρόπου με τον οποίο συνδέονται με το νερό. Συνδέοντας πληροφορίες για την υγρασία του εδάφους από αισθητήρες, οι γεωπόνοι μπορούν να επικαιροποιήσουν σχέδια συστημάτων άρδευσης που βελτιστοποιούν τη χρήση του νερού, ενώ παράλληλα υποστηρίζουν την ευημερία των φυτών [37].

Αναγνωρίζοντας ότι μια προσέγγιση που ταιριάζει σε όλους δεν θα λειτουργήσει, το σύστημα άρδευσης ακρίβειας στοχεύει στη βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των εδαφών και τις ιδιαίτερες ικανότητές τους να συγκρατούν νερό [38].

2.18 Προγραμματισμός άρδευσης με βάση το συγκεκριμένο έδαφος

Το σύστημα άρδευσης ακρίβειας αναγνωρίζει ότι τα διακριτά είδη εδάφους έχουν διαφορετικές ιδιότητες διατήρησης και διαρροής νερού. Αυτή η κατανόηση διαμορφώνει την προϋπόθεση για τον προγραμματισμό ύδρευσης με βάση το συγκεκριμένο έδαφος. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά ταχείας ξήρανσης και διατήρησης του νερού κάθε εδάφους, οι γεωπόνοι μπορούν να μεταβάλλουν την επανάληψη και τον όγκο νερού, ώστε να διατηρούν τα ιδανικά επίπεδα υγρασίας του εδάφους για την ανάπτυξη των φυτών [39].

2.18.1 Αμμώδη εδάφη: συχνή και ελεγχόμενη άρδευση

Τα αμμώδη εδάφη εξαντλούνται γρήγορα και έτσι απαιτούν πιο επισκέψιμο σύστημα άρδευσης, για να αποφεύγεται η πίεση του νερού στα φυτά. Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή τεράστιων ποσοτήτων νερού σε ένα ενιαίο σύστημα ύδρευσης μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματική απορροή και σπάταλη εισβολή νερού [40].

2.18.2 Πηλώδη εδάφη: σταθερότητα και ευελιξία

Τα πηλώδη εδάφη έχουν μεγάλη προσαρμογή μεταξύ της διαρροής και της διατήρησης της υγρασίας. Το ακριβές σύστημα άρδευσης των πηλωδών εδαφών είναι εξαιρετικά προσαρμοστικό λόγω της άμεσης διατήρησης και της αργής εισβολής του νερού [41].

2.18.3 Αργιλώδη εδάφη: έλεγχος της άρδευσης

Τα αργιλώδη εδάφη συγκρατούν περισσότερο νερό, αλλά υπάρχει επιπλέον πιθανότητα υφαλμύρωσης. Η υπερβολική υγρασία σε αργιλώδη εδάφη μπορεί να περιορίσει την ανάπτυξη των ριζών και να οδηγήσει σε έλλειψη οξυγόνου. Το λεπτό υδατικό σύστημα των αργιλικών εδαφών περιλαμβάνει προσεκτικά ελεγχόμενο πότισμα, ώστε να επιτραπεί στο άφθονο νερό να εξαντληθεί από το έδαφος. Αυτό απαιτεί μια εύθραυστη προσαρμογή μεταξύ της αποφυγής της υφαλμύρωσης και της πρόβλεψης της διάτασης του νερού [42].

2.19 Τεχνολογική ακρίβεια

Η τεχνολογική ακρίβεια παίζει καθοριστικό ρόλο στην εκτέλεση προσαρμοσμένων τεχνικών συστημάτων νερού. Οι αισθητήρες υγρασίας του εδάφους ελέγχουν αδιάκοπα τα διάφορα επίπεδα υγρασίας του εδάφους και παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για να κατευθύνουν τις επιλογές του συστήματος άρδευσης. Τα πλαίσια διερεύνησης πληροφοριών και υποστήριξης επιλογών προετοιμάζουν αυτά τα δεδομένα και δημιουργούν ιδανικά σχέδια συστημάτων άρδευσης, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του εδάφους, τα κλιματικά στοιχεία και τις ανάγκες του κάθε εδάφους [43].

2.20 Εκτιμήσεις για συγκεκριμένες καλλιέργειες

Εκτός από το είδος του εδάφους και το είδος της καλλιέργειας που αναπτύσσεται, επηρεάζει επίσης τη διαδικασία του συστήματος άρδευσης. Οι διάφορες καλλιέργειες απαιτούν ξεχωριστά ποσά νερού σε ξεχωριστά στάδια ανάπτυξης. Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας λαμβάνουν υπόψη αυτές τις ειδικές για τις καλλιέργειες προοπτικές, ώστε να διασφαλίσουν ότι το νερό μεταφέρεται όταν και όπου απαιτείται περισσότερο.

Λαμβάνοντας υπόψη τη διακριτή ικανότητα συγκράτησης νερού και τα χαρακτηριστικά διαρροής των αμμωδών, αργιλωδών και αργιλικών εδαφών, οι αγρότες μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση του νερού και να προωθήσουν την υγιή ανάπτυξη των φυτών. Το ακριβές σύστημα άρδευσης συνδυάζει την τεχνολογία, την έρευνα των πληροφοριών και την αγροτική πληροφόρηση για να εγγυηθεί τη βιώσιμη διαχείριση του νερού και να αυξήσει την αποδοτικότητα της γεωργίας με αμελητέες φυσικές επιπτώσεις.

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Επίδραση άρδευσης ακριβείας στον σύγχρονο κόσμο

3.1 Εισαγωγή

Με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, η άρδευση ακριβείας έχει αναδειχθεί ως μια μεταρρυθμιστική πρακτική που επαναπροσδιορίζει τον τρόπο διαχείρισης και αξιοποίησης των υδάτινων πόρων στον τομέα της σύγχρονης γεωργίας. Σε μια εποχή που χαρακτηρίζεται από αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό, περιβαλλοντικές ανησυχίες και ανάγκη για βιώσιμη χρήση των πόρων, η άρδευση ακριβείας αποτελεί φάρο καινοτομίας [44]. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους άρδευσης που συχνά οδηγούν σε άχρηστη χρήση νερού και οικολογική υποβάθμιση, η άρδευση ακριβείας αξιοποιεί προηγμένες τεχνολογίες για να προσαρμόσει τη διανομή του νερού ακριβώς στις ανάγκες των καλλιεργειών. Συνδυάζοντας την τέχνη της γεωπονίας με την ακρίβεια της λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων, η άρδευση ακριβείας προσφέρει μια παραδειγματική αλλαγή που υπόσχεται τη βελτιστοποίηση των αποδόσεων των καλλιεργειών, τη εξοικονόμηση του νερού, τη βελτίωση της υγείας του εδάφους και τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Ακολουθούν ορισμένοι τομείς με τους οποίους η άρδευση ακριβείας έχει επηρεάσει τον κόσμο και τους συγκεκριμένους τομείς [45]:

- **Γεωργία:**

Η άρδευση ακριβείας έχει φέρει επανάσταση στη σύγχρονη γεωργία προσφέροντας εξοικονόμηση στη χρήση του νερού και βελτιώνοντας τις αποδόσεις των καλλιεργειών [46]. Μερικές από τις θετικές επιπτώσεις περιλαμβάνουν:

1. **Εξοικονόμηση νερού:** Οι τεχνολογίες ακριβείας άρδευσης, όπως η στάγδην άρδευση και η μικροάρδευση, έχουν μειώσει σημαντικά τη σπατάλη νερού, παρέχοντας νερό απευθείας στις ρίζες των φυτών, ελαχιστοποιώντας την εξάτμιση και την απορροή.
2. **Αυξημένες αποδόσεις καλλιεργειών:** Παρέχοντας στις καλλιέργειες τη σωστή ποσότητα νερού τη σωστή στιγμή, τα συστήματα άρδευσης ακριβείας εξασφαλίζουν βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης, με αποτέλεσμα βελτιωμένες αποδόσεις και ποιότητα των καλλιεργειών.
3. **Αποδοτικότητα πόρων:** Η άρδευση ακριβείας ελαχιστοποιεί τη χρήση νερού, λιπασμάτων και ενέργειας, οδηγώντας σε εξοικονόμηση κόστους για τους αγρότες και σε μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.
4. **Προσαρμογή στο κλίμα:** Η άρδευση ακριβείας επιτρέπει στους αγρότες να προσαρμοστούν στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες, βελτιστοποιώντας τη διανομή του νερού με βάση τα ποικίλα καιρικά πρότυπα και τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.
5. **Υγεία του εδάφους:** Η διατήρηση των σωστών επιπέδων υγρασίας του εδάφους μέσω άρδευσης ακριβείας βοηθά στη διατήρηση της δομής του εδάφους, αποτρέποντας τη διάβρωση και την υποβάθμιση.
6. **Απομακρυσμένη παρακολούθηση:** Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας που βασίζονται στο IoT προσφέρουν απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχο, επιτρέποντας στους αγρότες να διαχειρίζονται την άρδευση από απόσταση χρησιμοποιώντας smartphone ή υπολογιστές.

- **Προστασία του περιβάλλοντος:**

Η άρδευση ακριβείας έχει θετικές επιπτώσεις στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα και διατήρηση[47]:

1. **Μειωμένη ρύπανση του νερού:** Με την ελαχιστοποίηση της απορροής και της έκπλυσης, η άρδευση ακριβείας αποτρέπει τη μόλυνση των υδάτινων σωμάτων από περίσσεια λιπασμάτων και χημικών ουσιών.
2. **Ενεργειακή απόδοση:** Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους άρδευσης με πλημμύρες, η άρδευση ακριβείας απαιτεί λιγότερη ενέργεια, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την κατανάλωση ενέργειας.

- **Τεχνολογία και Καινοτομία:**

Η άρδευση ακριβείας έχει οδηγήσει στην καινοτομία και την τεχνολογική πρόοδο σε διάφορους τομείς:

1. **Τεχνολογία αισθητήρων:** Η ανάπτυξη προηγμένων αισθητήρων και συσκευών IoT για την παρακολούθηση της υγρασίας του εδάφους, των καιρικών συνθηκών και της υγείας των φυτών έχει επιταχυνθεί από τη ζήτηση για άρδευση ακριβείας.
2. **Ανάλυση δεδομένων:** Η άρδευση ακριβείας παράγει μεγάλες ροές δεδομένων, ενισχύοντας την ανάπτυξη των αναλυτικών στοιχείων δεδομένων και των εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση των πρακτικών άρδευσης.

- **Οικονομική ανάπτυξη:**

Η άρδευση ακριβείας συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη με διάφορους τρόπους:

1. **Αγροτική παραγωγικότητα:** Οι βελτιωμένες αποδόσεις των καλλιεργειών μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένο εισόδημα για τους αγρότες και σε ενισχυμένη επισιτιστική ασφάλεια.
2. **Δημιουργία θέσεων εργασίας:** Η ανάπτυξη των τεχνολογιών άρδευσης ακριβείας μπορεί να οδηγήσει σε ευκαιρίες απασχόλησης στην κατασκευή, την έρευνα και την εφαρμογή.

- **Έρευνα και Ακαδημία:**

Η άρδευση ακριβείας έχει ωθήσει την έρευνα σε διάφορους τομείς:

1. **Γεωργικές Επιστήμες:** Οι ερευνητές μελετούν τις επιπτώσεις διαφορετικών τεχνικών άρδευσης ακριβείας σε διάφορες καλλιέργειες και τύπους εδάφους.
2. **Μηχανική:** Η άρδευση ακριβείας απαιτεί διεπιστημονική συνεργασία μεταξύ γεωργικών και μηχανικών κλάδων για την ανάπτυξη καινοτόμων ιδεών και λύσεων.

- **Παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια:**

Καθώς ο παγκόσμιος πληθυσμός συνεχίζει να αυξάνεται, η άρδευση ακριβείας μπορεί να διαδραματίσει ζωτικό ρόλο στη διασφάλιση της παγκόσμιας επισιτιστικής ασφάλειας βελτιστοποιώντας τη γεωργική παραγωγή.

Η ποσότητα νερού που μπορεί να εξοικονομήσει η άρδευση ακριβείας ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος των καλλιεργειών που καλλιεργούνται, οι μέθοδοι άρδευσης που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως, οι κλιματικές συνθήκες της περιοχής και οι ειδικές τεχνικές άρδευσης ακριβείας που εφαρμόζονται. Ωστόσο, η άρδευση ακριβείας είναι γενικά γνωστή για την ικανότητά της να μειώνει σημαντικά τη χρήση νερού σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους άρδευσης.

3.2 Προβλήματα στην γεωργία ακριβείας

Παρόλο που τα συστήματα γεωργίας ακριβείας έχουν πολλά οφέλη, υπάρχουν και μερικά προβλήματα τα οποία δημιουργούνται με την χρήση των συστημάτων αυτών. Τα προβλήματα αυτά επηρεάζουν τόσο τους αγρότες όσο και την οικονομία της κοινωνίας, η οποία καταναλώνει αρκετά χρήματα με σκοπό την καλύτερη και πιο αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων αυτών. Μερικά από τα προβλήματα που υπάρχουν είναι [48]:

- **Αρχικό κόστος επένδυσης και συντήρηση βλαβών:** Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι το υψηλό αρχικό κόστος που σχετίζεται με την εγκατάσταση συστημάτων άρδευσης ακριβείας. Η αγορά εξειδικευμένου εξοπλισμού, όπως αισθητήρων, ελεγκτών και τεχνολογίας αυτοματισμού, κατά πάσα πιθανότητα μπορεί να είναι ακριβή. Αυτό το κόστος μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο για τους αγρότες μικρότερης κλίμακας ή για εκείνους με περιορισμένες οικονομικές δυνατότητες. Η τακτική συντήρηση είναι θεμελιώδης, καθώς συμβάλλει στη διασφάλιση της συνεχούς λειτουργικότητας τέτοιων συστημάτων. Οι αγρότες μπορεί να αντιμετωπίσουν προκλήσεις στην εύρεση εξειδικευμένων τεχνικών για επισκευές ή μπορεί να δυσκολευτούν με το κόστος και τον χρόνο που απαιτείται για τη συντήρησή τους.
- **Τεχνική πολυπλοκότητα:** Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας είναι τεχνολογικά προηγμένα και συχνά απαιτούν τεχνογνωσία για σωστή εγκατάσταση και συντήρηση. Οι αγρότες μπορεί να αντιμετωπίσουν προκλήσεις όσον αφορά την κατανόηση και την αποτελεσματική χρήση της τεχνολογίας. Τεχνικές βλάβες ή δυσλειτουργίες του συστήματος μπορεί να διαταράξουν τα προγράμματα άρδευσης και να επηρεάσουν την υγεία του εδάφους και κατ' επέκταση των καλλιεργειών.
- **Τροφοδοσία και συνδεσιμότητα:** Η συνεχής και αξιόπιστη πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια και ίντερνετ μπορεί να είναι προβληματική σε αγροτικές περιοχές. Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας βασίζονται συχνά σε αυτούς τους πόρους για την αυτοματοποίηση και τη μετάδοση δεδομένων. Ασυνεπή ζητήματα τροφοδοσίας ή συνδεσιμότητας μπορεί να διαταράξουν τη λειτουργία του συστήματος καθώς και την αξιοπιστία του.
- **Ακρίβεια και αξιοπιστία αισθητήρα:** Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας εξαρτώνται από αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την υγρασία του εδάφους, τις καιρικές συνθήκες και την υγεία των καλλιεργειών. Η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα αυτών των αισθητήρων μπορεί να ποικίλλει, οδηγώντας σε ανακριβή δεδομένα και σε σπάταλες ή αναξιόπιστες πρακτικές.
- **Συμβατότητα και ενοποίηση με παλαιότερο εξοπλισμό:** Η ενσωμάτωση συστημάτων άρδευσης ακριβείας με τις υπάρχουσες αγροτικές υποδομές και πρακτικές διαχείρισης μπορεί να είναι πρόκληση. Ενδέχεται να προκύψουν προβλήματα συμβατότητας κατά την προσπάθεια σύνδεσης μιας νέας τεχνολογίας με ξεπερασμένο εξοπλισμό ή συστήματα λογισμικού.
- **Διαχείριση υδάτινων πόρων:** Παρόλο που τα συστήματα άρδευσης ακριβείας έχουν σχεδιαστεί για τη βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού, η ακατάλληλη εγκατάσταση ή χρήση μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική άρδευση ή σπατάλη νερού. Σε ορισμένες περιοχές, οι κανονισμοί για τη διαθεσιμότητα και την κατανομή νερού μπορούν επίσης να δημιουργήσουν προκλήσεις για την αποτελεσματική χρήση αυτών των συστημάτων.
- **Διαχείριση και ασφάλεια δεδομένων:** Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας παράγουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων που σχετίζονται με τις συνθήκες της καλλιέργειας, τον καιρό και τις πρακτικές των συστημάτων αυτών. Οι αγρότες ενδέχεται να αντιμετωπίσουν δυσκολίες στη διαχείριση και την

αξιοποίηση αυτών των δεδομένων, ιδίως όσον αφορά την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο.

- **Περιβαλλοντικές επιπτώσεις:** Ενώ η άρδευση ακριβείας μπορεί να μειώσει τη χρήση νερού και χημικών, η ακατάλληλη διαχείριση ή η κακή ευθυγράμμιση με τους περιβαλλοντικούς στόχους μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες, όπως η αλάτωση του εδάφους ή η μόλυνση των υδάτινων σωμάτων.

3.3 Μέθοδοι καταπολέμησης προβλημάτων που προκύπτουν:

Τα προβλήματα του συστήματος άρδευσης ακριβείας μπορούν να εξαλειφθούν ή να μετριαστούν χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό προληπτικών βημάτων, τεχνολογικών επιδιορθώσεων και τεχνικών διαχείρισης ήχου. Ακολουθούν μερικοί τρόποι επίλυσης και μείωσης προβλημάτων στην άρδευση ακριβείας [49]:

- **Διαδικασίες συντήρησης και βαθμονόμησης:**

Για να διατηρηθεί η ακρίβεια στον υπολογισμό της υγρασίας του εδάφους, τις καιρικές συνθήκες και άλλα χαρακτηριστικά, βαθμονομείτε συχνά τους αισθητήρες και τον εξοπλισμό. Η καθιέρωση ενός αυστηρού προγράμματος συντήρησης, εγγυάται ότι όλοι οι αισθητήρες, οι αντλίες και οι ελεγκτές του συστήματος άρδευσης ακριβείας βρίσκονται σε καλή κατάσταση λειτουργίας.

- **Διαχείριση και ανάλυση δεδομένων:**

Η δημιουργία ενός ισχυρού συστήματος διαχείρισης δεδομένων εξασφαλίζει την ορθή αποθήκευση και ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται, καθώς, και τη βελτίωση του μακροπρόθεσμου σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων.

- **Τοποθέτηση και ποιότητα αισθητήρα:**

Για την λήψη ακριβών δεδομένων σχετικά με την υγρασία του εδάφους και άλλα σημαντικά στοιχεία είναι επιβεβλημένη η χρήση αισθητήρων υψηλού διαμετρήματος στο χωράφι σε κατάλληλες θέσεις.

- **Αποτελεσματικές τεχνικές άρδευσης:**

Η υιοθέτηση μεθόδων άρδευσης όπως η στάγδην άρδευση, και τα συστήματα άρδευσης μεταβλητού ρυθμού (VRI) χρησιμοποιούνται για την τροποποίηση των ποσοστών εφαρμογής νερού με βάση τις μοναδικές απαιτήσεις των διαφόρων πεδίων, μειώνουν τη σπατάλη νερού παρέχοντας νερό απευθείας στη ζώνη της ρίζας.

- **Ενοποίηση με Δεδομένα Καιρού:**

Η προσαρμογή των προγραμμάτων άρδευσης ανάλογα με τις επικείμενες καιρικές συνθήκες, μετά από ενσωμάτωση των μετεωρολογικών προβλέψεων και δεδομένων καιρού σε πραγματικό χρόνο, βοηθούν στη λήψη αποφάσεων, καθώς, γίνονται πιο ακριβείς οι προβλέψεις για τις απαιτήσεις των καλλιεργειών σε νερό, χρησιμοποιώντας μοντέλα εξατμισοδιαπνοής (ET) με βάση τις καιρικές συνθήκες[50].

- **Παρακολούθηση και αξιολόγηση σε πραγματικό χρόνο:**

Η παρακολούθηση σε συχνή βάση για το πώς η άρδευση ακριβείας επηρεάζει τις γεωργικές αποδόσεις, την κατανάλωση πόρων και τις οικονομικές συνέπειες, βοηθά στην αξιολόγηση του συστήματος.

Οι αγρότες μπορούν να ελαχιστοποιήσουν τα προβλήματα και να μεγιστοποιήσουν τα πλεονεκτήματα αυτών των συστημάτων αιχμής χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές και διατηρώντας μια σύγχρονη προσέγγιση στη διαχείριση ακριβείας της άρδευσης, η οποία τελικά οδηγεί σε υψηλότερες αποδόσεις των καλλιεργειών, διατήρηση των πόρων και οικονομική βιωσιμότητα. Πιο συγκεκριμένα το μεγαλύτερο πρόβλημα που υπάρχει αφορά την εξοικονόμηση του νερού. Παρακάτω φαίνονται οι τρόποι που βοηθούν στην εξοικονόμηση νερού σύμφωνα με την άρδευση ακριβείας:

- **Άρδευση με σταγόνες:** Η άρδευση με σταγόνες είναι μια κοινή μέθοδος άρδευσης ακριβείας που παρέχει νερό απευθείας στη ριζική ζώνη του φυτού. Αυτή η μέθοδος μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικές ποσότητες νερού σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους εναέριας άρδευσης. Έχει τη δυνατότητα να μειώσει τη χρήση νερού από 50% έως 80% [51] [52].
- **Αισθητήρες υγρασίας εδάφους:** Τα συστήματα άρδευσης ακριβείας που χρησιμοποιούν αισθητήρες υγρασίας εδάφους μπορούν να προσδιορίσουν τα ακριβή επίπεδα υγρασίας στο έδαφος και να ποτίζουν μόνο όταν είναι απαραίτητο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση νερού από 20% έως 50% σε σύγκριση με τα σταθερά προγράμματα άρδευσης [53] [54] .
- **Άρδευση με μεταβλητό ρυθμό:** Οι τεχνολογίες γεωργίας ακριβείας μπορούν να δημιουργήσουν σχέδια άρδευσης με βάση τις παραλλαγές στους τύπους εδάφους, την τοπογραφία και τις ανάγκες των καλλιεργειών σε ένα χωράφι. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση νερού, η οποία δνητικά κυμαίνεται από 20% έως 60% [55].
- **Ελεγκτές βάσει καιρού:** Συστήματα άρδευσης ακριβείας που χρησιμοποιούν δεδομένα καιρού για να προσαρμόσουν τα χρονοδιαγράμματα άρδευσης με βάση τις συνθήκες σε πραγματικό χρόνο μπορούν να εξοικονομήσουν νερό αποφεύγοντας την περιττή άρδευση κατά τις περιόδους βροχών. Αυτά τα συστήματα μπορούν να επιτύχουν εξοικονόμηση νερού κατά από περίπου 20% έως 50% [56].
- **Micro-sprinklers:** Οι μικρο-ψεκαστήρες έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν νερό πιο αποτελεσματικά από τα παραδοσιακά συστήματα sprinkler. Μπορούν να εξοικονομήσουν νερό σε σύγκριση με τους εναέριους ψεκαστήρες, με πιθανή εξοικονόμηση που κυμαίνεται από 60% έως 90% [57].

3.3.1 Άρδευση με σταγόνες (Drip irrigation)



Εικόνα 3.1. Άρδευση με σταγόνες

Κατευθύνοντας το νερό απευθείας στη ζώνη της ρίζας με ρυθμισμένο και στοχευμένο τρόπο, η άρδευση με σταγόνες, γνωστό και ως στάγδην άρδευση, είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος για την ενυδάτωση των φυτών. Παρακάτω φαίνονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που πρέπει να γνωρίζει κάποιος για την άρδευση με σταγόνες [58] [59] [60][61] [62]:

➤ Οι Λειτουργίες της άρδευσης με σταγόνες:

- Μια σειρά εκπομπών (γνωστοί και ως σταλάκτες), σωλήνες, βαλβίδες και σωληνώσεις αποτελούν συστήματα άρδευσης με σταγόνες.
- Μέσω μικροσκοπικών, προσεκτικά τοποθετημένων εκπομπών, οι οποίοι απελευθερώνουν νερό αργά και σκόπιμα, γενικά ως σταγόνες ή μια σταθερή σταγόνα, παρέχεται νερό στα φυτά.
- Οι εκπομποί τοποθετούνται στρατηγικά κατά μήκος των καλλιεργειών ή κοντά στη βάση κάθε φυτού, επιτρέποντας στο νερό να απορροφηθεί από το έδαφος ακριβώς γύρω από τη ζώνη της ρίζας.

➤ Τα πλεονεκτήματα της είναι:

- Αποδοτικότητα νερού: Η άρδευση με σταγόνες χρησιμοποιεί τη λιγότερη δυνατή ποσότητα νερού, αποτρέποντας την απορροή ή την εξάτμιση.
- Μειωμένη ανάπτυξη ζιζανίων: Δεδομένου ότι το νερό στοχεύει στη ζώνη της ρίζας, η ανάπτυξη ζιζανίων μεταξύ των σειρών είναι λιγότερο πιθανή.
- Καλύτερη υγεία των φυτών: Τα φυτά είναι πιο υγιή και λιγότερο επιρρεπή σε ασθένειες όταν τα επίπεδα υγρασίας είναι σταθερά και υπό έλεγχο.
- Βελτιωμένη παροχή θρεπτικών συστατικών: Τα λιπάσματα μπορούν να εγχυθούν στο σύστημα, διασφαλίζοντας την ακριβή παροχή θρεπτικών ουσιών στα φυτά.
- Πρόληψη της διάβρωσης του εδάφους: Η στάγδην άρδευση μειώνει τη διάβρωση του εδάφους σε σύγκριση με τις μεθόδους επιφανειακού ποτίσματος.
- Διατήρηση των πόρων: Η άρδευση με σταγόνες εξοικονομεί νερό, ενέργεια και εργασία σε σύγκριση με άλλες μεθόδους άρδευσης.

➤ Εξαρτήματα του συστήματος άρδευσης με σταγόνες είναι:

- Οι πομποί και οι σταλάκτες είναι τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την παροχή νερού στα φυτά. Διατίθενται σε διάφορες ποικιλίες, όπως inline, button και micro-sprinklers.
- Σωλήνες: Οι σωλήνες του συστήματος μεταφέρουν το νερό από την πηγή στους πομπούς.
- Φίλτρα: Τα φίλτρα απομακρύνουν τα σωματίδια και τα σκουπίδια από το νερό για να μην φράξουν οι εκπομποί.
- Ρυθμιστές πίεσης: Οι ρυθμιστές πίεσης διατηρούν σταθερή τη ροή και την πίεση στο σύστημα. Η ροή του νερού στο σύστημα ελέγχεται από βαλβίδες, οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν χειροκίνητα ή αυτόματα.
- Προστατευτικά αντίστροφης ροής: Αυτά τα εργαλεία εμποδίζουν το νερό να ρέει πίσω στην κύρια παροχή, προστατεύοντας την πηγή νερού από τη ρύπανση.

➤ Θέματα σχεδιασμού και εγκατάστασης:

Για τη δημιουργία ενός επιτυχημένου συστήματος στάγδην άρδευσης απαιτείται σωστός σχεδιασμός. Ο τύπος της καλλιέργειας, το είδος του εδάφους, η κλίση και η πηγή νερού είναι όλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι γραμμές στάλαξης πρέπει να κατασκευάζονται στο κατάλληλο βάθος για να διασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή του νερού. Η διαμόρφωση του συστήματος θα πρέπει να διασφαλίζει ότι όλοι οι εκπομποί έχουν ίση πίεση και ροή. Για την καλύτερη λειτουργία, είναι απαραίτητη η τακτική συντήρηση, όπως είναι ο καθαρισμός του συστήματος και ο έλεγχος για εμπόδια.

➤ Τύποι άρδευσης με σταγόνες:

Οι εκπομποί τοποθετούνται στην επιφάνεια του εδάφους για να δημιουργήσουν επιφανειακή σταγόνα.

- Subsurface Drip: Σταγονίδια που είναι κρυμμένα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.
- Ταινία σταγόνας: Μια επίπεδη ταινία με ενσωματωμένους εκπομπούς που χρησιμοποιείται συνήθως για καλλιέργειες σε σειρά.
- Σωλήνες πομπού σταγόνων: Για την κηπουρική και τον εξωραϊσμό, χρησιμοποιούνται ευρέως οι σωλήνες με πομπούς που τοποθετούνται σε συγκεκριμένα σημεία.

➤ Επεκτάσεις άρδευσης με σταγόνες:

Οι χρονοδιακόπτες και οι ελεγκτές βοηθούν στην αυτοματοποίηση του προγράμματος ποτίσματος.

- Έγχυση λιπάσματος: Αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή λιπασμάτων ή θρεπτικών ουσιών στο σύστημα.
- Εκπομποί αντιστάθμισης πίεσης: Εξασφαλίζει την ίση κατανομή του νερού σε έδαφος με κλίση.

➤ Συντήρηση και αντιμετώπιση προβλημάτων:

- Τακτικός έλεγχος για εμπόδια σε πομπούς, φίλτρα και σωληνώσεις.
- Έκπλυση του συστήματος σε τακτική βάση για την εξάλειψη των ιζημάτων και των διαφόρων καταλοίπων .
- Έλεγχος του συστήματος για διαρροές και σπασμένα εξαρτήματα.
- Προσαρμογή του ρυθμού ροής και του χρόνου, ανάλογα τις εποχιακές και ειδικές απαιτήσεις της εγκατάστασης.

➤ Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα:

- Η στάγδην άρδευση εξοικονομεί νερό και είναι επομένως μια οικολογικά ευεργετική επιλογή άρδευσης.
- Βοηθά στη διατήρηση των υδάτινων πόρων και στη μείωση της ενέργειας που απαιτείται για την άντληση και την παράδοση.
- Η άρδευση κατά σταγόνες είναι μια ευέλικτη και αποτελεσματική μέθοδος παροχής νερού και θρεπτικών συστατικών στα φυτά, καθιστώντας την εξαιρετική επιλογή για μια ποικιλία εφαρμογών που κυμαίνονται από μικροσκοπικούς κήπους έως μεγάλες γεωργικές εκτάσεις. Είναι ένα ζωτικό εργαλείο για βιώσιμες γεωργικές τεχνικές και τεχνικές εξωραϊσμού λόγω της ικανότητάς του να εξοικονομεί νερό, να ενισχύει την υγεία των φυτών και να αυξάνει τις αποδόσεις των καλλιεργειών.

➤ Κόστος μιας τέτοιας εφαρμογής:

Το κόστος ενός συστήματος στάγδην άρδευσης ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με διάφορες πτυχές, συμπεριλαμβανομένης της ποσότητας της προς άρδευση έκτασης, της πολυπλοκότητας του συστήματος, του τύπου των καλλιεργειών ή των φυτών που θα ποτιστούν και της ποιότητας των εξαρτημάτων που επιλέγονται. Ακολουθούν ορισμένα εύρη τιμών και εκτιμήσεις κόστους για διάφορους τύπους συστημάτων άρδευση με σταγόνες [63] [64]:

- Συστήματα άρδευσης με σταγόνες για κήπους ή αγροκτήματα μικρής κλίμακας:

Ένας βασικός κήπος ή ένα σύστημα μικρής κλίμακας για την άρδευση ενός κήπου στην πίσω αυλή, παρτέρια με λουλούδια ή ένα μικρό μπάλωμα λαχανικών θα κοστίσει μεταξύ 40€ και 200€. Σωλήνες,

πομποί, συνδέσεις, πασσάλους και ένα βασικό συγκρότημα φίλτρου/ρυθμιστή περιλαμβάνονται συνήθως σε αυτήν την τιμή.

- Συστήματα άρδευσης με σταγόνες για εξωραϊσμό:

Μια μεγαλύτερη εργασία τοπίου, όπως το πότισμα ενός μεγαλύτερου κήπου, θάμνων ή διαμορφωμένης αυλής, μπορεί να κοστίσει 200€ έως 1.000€ ή και περισσότερο. Ο αριθμός των εγκαταστάσεων, η πολυπλοκότητα της διάταξης, ο τύπος των εκπομπών που χρησιμοποιούνται και η αναγκαιότητα για επιπλέον εξαρτήματα όπως χρονόμετρα ή ελεγκτές θα επηρεάσουν το κόστος.

- Συστήματα άρδευσης με σταγόνες για καλλιέργειες ή γεωργία:

Το κόστος των γεωργικών συστημάτων άρδευσης με σταγόνες που χρησιμοποιούνται σε καλλιέργειες σε σειρά ή σε μεγάλες γεωργικές εκτάσεις μπορεί να ποικίλλει σημαντικά. Ανάλογα τα κριτήρια, όπως το μέγεθος του χωραφιού, η ποικιλία των καλλιεργειών, οι συνθήκες του εδάφους και η ανάγκη για εξειδικευμένο εξοπλισμό, το κόστος μπορεί να κυμαίνεται από 1.000€ έως 3.000€ ανά στρέμμα ή και περισσότερο. Τα εξαρτήματα υψηλής ποιότητας, όπως οι εκπομποί αντιστάθμισης πίεσης και τα συστήματα φιλτραρίσματος, μπορεί να είναι πιο ακριβά, αλλά μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση.

- Συστήματα άρδευσης με σταγόνες για θερμοκήπια ή φυτώρια:

Λόγω της πολυπλοκότητάς τους και της απαίτησης για ακριβή έλεγχο, τα συστήματα στάγδην άρδευσης για εμπορικά θερμοκήπια ή φυτώρια μπορεί να είναι αρκετά ακριβά. Ανάλογα με το μέγεθος της επιχείρησης, τον αριθμό των φυτών και την ποσότητα του απαιτούμενου αυτοματισμού, το κόστος ανά στρέμμα μπορεί να κυμαίνεται από 3.000€ έως 10.000€ ή περισσότερο.

- Προσαρμοσμένα και ακριβά συστήματα:

Τα ειδικά σχεδιασμένα συστήματα στάγδην άρδευσης με προηγμένους αυτοματισμούς, αισθητήρες και εξειδικευμένα εξαρτήματα μπορεί να κοστίζουν χιλιάδες ευρώ ανά στρέμμα ή περισσότερο.

3.3.2 Αισθητήρες υγρασίας εδάφους:

Οι αισθητήρες υγρασίας είναι κρίσιμοι στις προσπάθειες εξοικονόμησης νερού μέσα σε συστήματα άρδευσης ακριβείας. Αυτοί οι αισθητήρες προορίζονται για την αξιολόγηση των επιπέδων υγρασίας του εδάφους σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση των τεχνικών άρδευσης. Όλα όσα πρέπει να γνωρίζει κανείς για τους αισθητήρες υγρασίας και την εξοικονόμηση νερού σε συστήματα άρδευσης ακριβείας είναι [65] [66] :

➤ Συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο:

Οι αισθητήρες υγρασίας παρακολουθούν συνεχώς την περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, σε διάφορα βάθη και σημεία σε όλο το χωράφι. Αυτοί οι αισθητήρες καταγράφουν δεδομένα για τις πραγματικές συνθήκες υγρασίας στη ζώνη της ρίζας, επιτρέποντας τη λήψη ακριβών αποφάσεων ποτίσματος με βάση τα τρέχοντα επίπεδα υγρασίας του εδάφους.

➤ Αυξάνει την ακρίβεια στην άρδευση:

Οι αισθητήρες υγρασίας επιτρέπουν στους παραγωγούς να εφαρμόζουν νερό ακριβώς όταν και όπου χρειάζεται, παρέχοντας πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η ακρίβεια εξαλείφει την υπερ-άρδευση,

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

που είναι ένα τυπικό πρόβλημα στις παραδοσιακές τεχνολογίες άρδευσης, οι οποίες παρέχουν νερό με βάση ένα προκαθορισμένο χρονοδιάγραμμα και όχι τις πραγματικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας.

➤ Αποφυγή υπερβολικής άρδευσης:

Η υπερβολική άρδευση μπορεί να οδηγήσει σε σπατάλη νερού, απόπλυση θρεπτικών ουσιών, διάβρωση του εδάφους και μολύνσεις των ριζών των φυτών. Οι αισθητήρες υγρασίας βοηθούν στην πρόληψη της υπερβολικής άρδευσης, ενεργοποιώντας το πότισμα όταν τα επίπεδα υγρασίας του εδάφους πέφτουν κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο, διασφαλίζοντας έτσι ότι τα φυτά λαμβάνουν νερό μόνο όταν είναι απαραίτητο.

➤ Μειώνει την λειψυδρία:

Οι αποδόσεις και η ποιότητα των καλλιεργειών ενδέχεται να υποφέρουν ως αποτέλεσμα της υπο-άρδευσης. Οι αισθητήρες υγρασίας βοηθούν τους παραγωγούς να αποφύγουν το υπο-πότισμα ειδοποιώντας τους για ξηρές συνθήκες εδάφους, επιτρέποντας την έγκαιρη άρδευση για τη διατήρηση των κατάλληλων επιπέδων υγρασίας.

➤ Ρυθμιζόμενα όρια:

Οι αισθητήρες υγρασίας μπορούν να διαμορφωθούν με ρυθμιζόμενα όρια υγρασίας για να καλύπτουν τις ανάγκες ορισμένων καλλιεργειών και τύπων εδάφους. Αυτή η προσαρμοστικότητα εγγυάται ότι η άρδευση προσαρμόζεται στις συγκεκριμένες απαιτήσεις διαφορετικών καλλιεργειών και σταδίων ανάπτυξης.

➤ Αυτοματοποιημένη ενοποίηση συστήματος:

Οι αισθητήρες υγρασίας μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα άρδευσης ακριβείας που είναι αυτοματοποιημένα. Όταν τα επίπεδα υγρασίας πέφτουν κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, το σύστημα άρδευσης μπορεί να ξεκινήσει αυτόματα, επιτρέποντας μια γρήγορη αντίδραση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του εδάφους.

➤ Εξοικονόμηση νερού:

Οι αισθητήρες υγρασίας αποτελούν σημαντικό μέρος των μέτρων εξοικονόμησης νερού. Βοηθούν στη διατήρηση του νερού αποφεύγοντας την υπερβολική του χρήση. Η εξοικονόμηση νερού μπορεί να είναι σημαντική, ειδικά σε περιοχές όπου το νερό είναι σπάνιο ή υπάρχει ξηρασία.

➤ Εξοικονόμηση ενέργειας:

Η άρδευση ακριβείας, που γίνεται δυνατή από αισθητήρες υγρασίας, μειώνει την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την άντληση και τη διανομή του νερού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας, η οποία είναι επωφελής τόσο από οικονομική όσο και από περιβαλλοντική άποψη.

➤ Βελτίωση ποιότητας καλλιεργειών και καρπών:

Η διατήρηση των ιδανικών επιπέδων υγρασίας του εδάφους σε σταθερή βάση με αισθητήρες υγρασίας συμβάλλει σε υγιέστερα φυτά με μεγαλύτερες αποδόσεις και υψηλότερης ποιότητας προϊόντα.

➤ Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα:

Η χρήση αισθητήρων υγρασίας στην άρδευση ακριβείας, ενθαρρύνει την υπεύθυνη χρήση του νερού, ενώ μειώνει τον κίνδυνο μόλυνσης του νερού από την απορροή και την έκπλυση λιπασμάτων.

➤ Κόστος ενός τέτοιο αισθητήρα:

Η τιμή ενός αισθητήρα υγρασίας ποικίλλει σημαντικά με βάση μια σειρά κριτηρίων, όπως το είδος του αισθητήρα, η ποιότητά του, η μάρκα και η λειτουργικότητά του. Ακολουθούν ορισμένα πρόχειρα εύρη τιμών για διάφορους τύπους αισθητήρων υγρασίας:

- Αισθητήρες για την υγρασία του εδάφους οικιακής χρήσης:



Εικόνα 3.2. Αισθητήρας υγρασίας οικιακής χρήσης

Οι αισθητήρες υγρασίας εδάφους για οικιακούς κήπους και εφαρμογές μικρής κλίμακας μπορεί να κοστίζουν από 5€ έως και 50€ ανά αισθητήρα. Αυτοί οι αισθητήρες είναι συχνά απλοί, παρέχοντας μια στοιχειώδη ένδειξη των επιπέδων υγρασίας του εδάφους, αλλά στερούνται από εξελιγμένη λειτουργικότητα ή ακρίβεια.

- Αισθητήρες υγρασίας εδάφους μεσαίου μήκους:

Οι αισθητήρες υγρασίας εδάφους μεσαίας κατηγορίας χρησιμοποιούνται για εμπορικούς εξωραϊσμούς ή μικρές γεωργικές επιχειρήσεις και κυμαίνονται περίπου σε τιμή από 50€ έως 200€ ανά αισθητήρα. Αυτοί οι αισθητήρες παρέχουν συχνά μεγαλύτερη ακρίβεια, ανθεκτικότητα και χαρακτηριστικά όπως προσαρμόσιμες ρυθμίσεις βάθους και συμβατότητα με αυτοματοποιημένα συστήματα ποτίσματος.

- Αισθητήρες υγρασίας εδάφους επαγγελματικής ποιότητας:

Οι αισθητήρες υγρασίας εδάφους επαγγελματικής ποιότητας, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για μεγάλης κλίμακας συστήματα γεωργίας, έρευνας και άρδευσης ακριβείας, μπορεί να κοστίζουν 200€ έως 1.000 € ή περισσότερο ανά αισθητήρα. Αυτοί οι αισθητήρες είναι υψηλής ακρίβειας και μπορεί να περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όπως η ασύρματη επικοινωνία, η καταγραφή δεδομένων και η δια- λειτουργικότητα με πολύπλοκα συστήματα διαχείρισης άρδευσης.

Οι αισθητήρες αυτοί είναι ίδιοι, οι μόνες διαφορές τους είναι οι ιδιότητες που έχει ο κάθε αισθητήρας, όπως για παράδειγμα για επαγγελματική χρήση οι αισθητήρες μπορούν να συνδέονται στο διαδίκτυο, τα προγράμματα που υποστηρίζουν, και φυσικά το πλήθος των αισθητήρων που χρειάζονται για την εφαρμογή. Για αυτόν τον λόγο αυξάνεται και το κόστος.

Συμπερασματικά, οι αισθητήρες υγρασίας είναι χρήσιμα εργαλεία σε συστήματα άρδευσης ακριβείας, βοηθώντας τους παραγωγούς στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης νερού, στη διατήρηση των πόρων και στη βελτίωση της υγείας και των αποδόσεων των καλλιεργειών. Αυτοί οι αισθητήρες βοηθούν τους παραγωγούς να λαμβάνουν έγκαιρες και έγκυρες αποφάσεις, δίνοντας πληροφορίες για την υγρασία του εδάφους σε πραγματικό χρόνο, οδηγώντας τελικά σε πιο βιώσιμες και αποτελεσματικές γεωργικές εργασίες.

3.3.3 Άρδευση με μεταβλητό ρυθμό

Η άρδευση με μεταβλητό ρυθμό, επίσης γνωστή ως Variable Rate Irrigation (VRI), είναι μια εξελιγμένη τεχνολογία άρδευσης ακριβείας που μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τις προσπάθειες εξοικονόμησης νερού στη γεωργία. Όσα πρέπει να γνωρίζει κάποιος για το πώς η άρδευση με μεταβλητό ρυθμό συμβάλλει στην εξοικονόμηση νερού είναι εδώ [68] [69]:

- Ορισμός του Variable Rate Irrigation (VRI):

Το VRI είναι μια τεχνική που επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο των ρυθμών εφαρμογής του νερού άρδευσης σε διάφορες ζώνες ή τμήματα ενός χωραφιού. Τα συστήματα VRI μπορούν να αλλάξουν τη ροή του νερού με βάση συγκεκριμένα κριτήρια όπως ο τύπος εδάφους, η τοπογραφία, ο τύπος καλλιέργειας και δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες, παρέχοντας ομοιόμορφα νερό με σταθερό ρυθμό.

- Εξατομικευμένη εφαρμογή νερού:

Τα συστήματα VRI επιτρέπουν στους παραγωγούς να προσαρμόζουν την άρδευση του νερού στις συγκεκριμένες απαιτήσεις κάθε χωραφιού. Αυτή η τροποποίηση εγγυάται ότι το νερό παρέχεται εκεί που απαιτείται περισσότερο, ενώ αποφεύγεται η υπερβολική ή υπο-άρδευση σε συγκεκριμένες ζώνες.

- Βασικά πλεονεκτήματα εξοικονόμησης νερού:

Το VRI μειώνει την υπερβολική άρδευση περιορίζοντας την άσκοπη χρήση νερού σε περιοχές με μεγαλύτερα επίπεδα υγρασίας ή όπου δεν απαιτείται. Το VRI συμβάλλει στην αύξηση της υγείας και των

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

αποδόσεων των καλλιεργειών, ενώ μειώνει τη σπατάλη νερού, διατηρώντας τα ιδανικά επίπεδα υγρασίας του εδάφους.

➤ Παράγοντες VRI που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

Κατά την επιλογή των ποσοστών εφαρμογής νερού, τα συστήματα VRI μπορούν να λάβουν υπόψη μια ποικιλία κριτηρίων, όπως:

- Περιεκτικότητα της υγρασίας του εδάφους
- Τύπος και υφή του εδάφους
- Τοπογραφία και υψόμετρο
- Είδος καλλιέργειας και στάδιο ανάπτυξης

➤ Ενσωμάτωση αισθητήρων:

Το VRI συχνά ενσωματώνει δεδομένα από πολλούς αισθητήρες, όπως αισθητήρες υγρασίας εδάφους, μετεωρολογικούς σταθμούς και δεδομένα τοπογραφίας, για να επιτύχει ακριβή άρδευση. Οι αισθητήρες συλλέγουν συνεχώς δεδομένα, επιτρέποντας στο σύστημα να αλλάζει τους ρυθμούς εφαρμογής νερού σε πραγματικό χρόνο.

➤ Κόστος-αποτελεσματικότητα:

Ενώ τα συστήματα VRI μπορεί να έχουν αρχικά έξοδα, η πιθανή εξοικονόμηση νερού και οι αυξημένες γεωργικές αποδόσεις μπορούν να οδηγήσουν σε μακροπρόθεσμα οφέλη κόστους. Η μειωμένη κατανάλωση νερού μπορεί να οδηγήσει σε φθηνότερους λογαριασμούς νερού και εξοικονόμηση ενέργειας από την άντληση νερού.

➤ Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα:

Το VRI συμβάλλει στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της άρδευσης, όπως η απορροή νερού και η διάβρωση του εδάφους. Βοηθά στην πρόληψη της έκπλυσης θρεπτικών και χημικών ουσιών σε υδάτινα σώματα, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα του νερού.

➤ Βελτιώσεις απόδοσης και ποιότητας καλλιεργειών:

Η εφαρμογή νερού ακριβείας με VRI προάγει τη βέλτιστη ανάπτυξη των καλλιεργειών, με αποτέλεσμα υψηλότερες αποδόσεις και ποιότητα καλλιέργειας. Η μείωση του υδατικού στρες οδηγεί σε καλύτερες, πιο εύρωστες καλλιέργειες.

➤ Πιθανές δυσκολίες:

Η εφαρμογή VRI απαιτεί σχολαστική προετοιμασία, συμπεριλαμβανομένης της ακριβούς χαρτογράφησης των χαρακτηριστικών του πεδίου και της επιλογής του κατάλληλου εξοπλισμού. Παρόλο που η αρχική επένδυση και το κόστος συνεχούς συντήρησης μπορεί να είναι σημαντικό, οι πιθανές εξοικονομήσεις και τα πλεονεκτήματα συχνά ξεπερνούν αυτές τις δαπάνες.

➤ Παρακολούθηση και προσαρμογή:

Απαιτείται συνεχής παρακολούθηση και προσαρμογή των συστημάτων VRI για να εξασφαλιστεί ότι θα συνεχίσουν να λειτουργούν σωστά. Οι καλλιεργητές θα πρέπει να βαθμονομούν και να τροποποιούν το σύστημα σε τακτική βάση για να λάβουν υπόψη τις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

➤ Κόστος εφαρμογής:

Το κόστος ενός συστήματος άρδευσης μεταβλητού ρυθμού (VRI) ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με διάφορες πτυχές, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους του αρδευόμενου χωραφίου, της πολυπλοκότητας του συστήματος, της ποιότητας των εξαρτημάτων και του όγκου του αυτοματισμού. Ακολουθούν ορισμένα εύρη τιμών για συστήματα VRI [70] [71]:

- Βασικό σύστημα VRI για μικρά πεδία:

Ένα απλό σύστημα VRI μπορεί να κοστίζει μεταξύ 2.000€ και 5.000€ για εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως οικιακούς κήπους ή μικρές εμπορικές περιοχές. Απλοί ελεγκτές, βαλβίδες ελέγχου ροής και περιορισμένος αριθμός ακροφυσίων μεταβλητού ρυθμού χαμηλού κόστους μπορούν να περιλαμβάνονται σε αυτά τα συστήματα.

- Γεωργικά συστήματα VRI μεσαίου κλίμακας:

Τα συστήματα VRI μεσαίας εμβέλειας με μεγαλύτερες δυνατότητες μπορεί να κοστίζουν από 10.000 € έως 30.000 € ανά άξονα ή ζώνη σε μεγαλύτερα γεωργικά περιβάλλοντα, όπως χωράφια ή οπωρώνες. Αυτά τα συστήματα παρέχουν περισσότερο έλεγχο και ευελιξία, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητας αλλαγής των ρυθμών παροχής νερού με βάση χαρακτηριστικά όπως ο τύπος εδάφους και οι απαιτήσεις της καλλιέργειας.

- Προσαρμοσμένα και High-End συστήματα VRI:

Συστήματα VRI υψηλής τεχνολογίας που κατασκευάζονται για μεγάλα εμπορικά αγροκτήματα ή τεράστια στρέμματα μπορεί να κοστίζουν έως και 100.000 € ή περισσότερο ανά άξονα ή ζώνη. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν συχνά τεχνολογία αιχμής, όπως πολύπλοκα δίκτυα αισθητήρων, ενσωμάτωση GPS και αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου.

- Λειτουργία και συντήρηση:

Τα συστήματα VRI απαιτούν συνεχή συντήρηση, η οποία περιλαμβάνει βαθμονόμηση, αντικατάσταση αισθητήρα και αναβαθμίσεις λογισμικού. Η ηλεκτρική ενέργεια και η συνδεσιμότητα δεδομένων μπορεί επίσης να έχει λειτουργικά έξοδα, ειδικά για πολύπλοκα συστήματα.

Τέλος, το Variable Rate Irrigation (VRI) είναι ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό στα συστήματα άρδευσης ακριβείας που μπορεί να ενισχύσει τις προσπάθειες εξοικονόμησης νερού προσαρμόζοντας τα ποσοστά παροχής νερού στις μεμονωμένες απαιτήσεις διαφορετικών τμημάτων ενός χωραφίου. Ενθαρρύνει την αποτελεσματική χρήση του νερού, βελτιώνει την υγεία και τις αποδόσεις των καλλιεργειών και συμβάλλει στη διασφάλιση της υπεύθυνης διαχείρισης των υδάτινων πόρων και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας στη γεωργία.

3.3.4 Ελεγκτές βάσει καιρού

Οι ελεγκτές που βασίζονται στις καιρικές συνθήκες αποτελούν θεμελιώδεις στοιχεία των συστημάτων άρδευσης ακριβείας και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις πρωτοβουλίες εξοικονόμησης νερού. Αυτοί οι ελεγκτές, βοηθάνε τα προγράμματα άρδευσης και βελτιστοποιούν την κατανάλωση νερού με βάση τις πληροφορίες και τις προβλέψεις καιρού σε πραγματικό χρόνο. Όλες οι βασικές πληροφορίες που πρέπει να γνωρίζει κάποιος για τους ελεγκτές που βασίζονται στις καιρικές συνθήκες σε συστήματα άρδευσης ακριβείας αναλύονται παρακάτω [72] [73] :

➤ Δεδομένα καιρού σε πραγματικό χρόνο:

Οι ελεγκτές που βασίζονται στον καιρό συλλέγουν πληροφορίες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η βροχόπτωση σε πραγματικό χρόνο από τοπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς ή πηγές διαδικτύου. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν τον ελεγκτή να κάνει εμπειριστατωμένες κρίσεις σχετικά με το πότε και πόσο νερό πρέπει να εφαρμόζεται στο τοπίο ή το χωράφι.

➤ Ακριβής προγραμματισμός άρδευσης:

Οι ελεγκτές που βασίζονται στον καιρό, μπορούν να αναβάλουν ή να μειώσουν την άρδευση εάν προβλέπεται βροχή ή να αυξήσουν την άρδευση κατά τη διάρκεια θερμών και ξηρών περιόδων για να διατηρήσουν τα επίπεδα υγρασίας του εδάφους ιδανικά.

➤ Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής (ET):

Πολλοί ελεγκτές που βασίζονται στις καιρικές συνθήκες χρησιμοποιούν μοντέλα εξατμισοδιαπνοής (ET) για να εκτιμήσουν την ποσότητα του νερού που χάνεται από την εξάτμιση και τη διαπνοή από τα φυτά. Οι υπολογισμοί που βασίζονται στο ET βοηθούν στον προσδιορισμό των ακριβών αναγκών σε νερό του τοπίου ή των καλλιεργειών κάθε συγκεκριμένη ημέρα.

➤ Πλεονεκτήματα εξοικονόμησης νερού:

Οι ελεγκτές που βασίζονται στα καιρικά φαινόμενα βοηθούν στην πρόληψη της υπερ-άρδευσης, η οποία αποτελεί σημαντική πηγή σπατάλης νερού στα παραδοσιακά συστήματα άρδευσης. Αυτοί οι ελεγκτές ενισχύουν την εξοικονόμηση νερού αλλάζοντας την άρδευση για να ανταποκρίνονται στις πραγματικές απαιτήσεις νερού των φυτών. Τέλος, μειώνοντας τη σπατάλη νερού, μπορούν να οδηγήσουν σε φθηνότερους λογαριασμούς νερού για οικιακούς πελάτες και χαμηλότερα λειτουργικά έξοδα για γεωργικούς και εμπορικούς χρήστες.

➤ Αποφυγή μόλυνσης του εδάφους:

Οι ελεγκτές με βάση τις καιρικές συνθήκες μπορούν να βοηθήσουν στην αποφυγή του κορεσμού του εδάφους και της υπερχειλίσης, αναβάλλοντας την άρδευση στα φυτά όταν τα επίπεδα υγρασίας του εδάφους είναι ήδη επαρκή λόγω της πρόσφατης βροχής. Αυτό προστατεύει τα φυτά και μειώνει τον κίνδυνο μόλυνσεων των ριζών.

➤ Απομακρυσμένος έλεγχος και παρακολούθηση:

Πολλοί ελεγκτές που βασίζονται στον καιρό είναι προσβάσιμοι και ελεγχόμενοι μέσω εφαρμογών για κινητά ή διαδικτυακών διεπαφών. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στους αγρότες και τους γενικούς χρήστες να κάνουν αλλαγές σε πραγματικό χρόνο στα προγράμματα άρδευσης από οπουδήποτε, βελτιστοποιώντας έτσι την κατανάλωση νερού.

➤ Βελτιωμένη υγεία και απόδοση των φυτών:

Η άρδευση με βάση τις καιρικές συνθήκες υποστηρίζει πιο υγιή φυτά με ενισχυμένη ανοχή σε καταπονήσεις όπως η ξηρασία και οι ασθένειες, με αποτέλεσμα υψηλότερες αποδόσεις και ποιότητα της καλλιέργειας.

➤ Κόστος εφαρμογής

Η τιμή ενός ελεγκτή άρδευσης με βάση τις καιρικές συνθήκες ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με μια ποικιλία παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένης της μάρκας, του μοντέλου, των χαρακτηριστικών και του αριθμού των ζωνών ή των σταθμών που μπορεί να λειτουργήσει. Ακολουθούν μερικά παραδειγματικά εύρη τιμών για ελεγκτές άρδευσης βάσει των καιρικών συνθηκών[74]:

- Βασικοί ελεγκτές μικρών κατοικιών:

Οι βασικοί ελεγκτές για μέτρια οικιακά τοπία και κήπους συνήθως κοστίζουν μεταξύ 100€ και 200€. Αυτοί οι ελεγκτές διαχειρίζονται συνήθως έναν μικρό αριθμό ζωνών (π.χ. 4 έως 6) και παρέχουν σημαντικές λειτουργίες προγραμματισμού με βάση τις καιρικές συνθήκες.

- Ελεγκτές μεσαίας κατηγορίας κατοικιών:

Οι Ελεγκτές μεσαίας κατηγορίας κυμαίνονται από 200€ έως 500 € για μεγαλύτερες κατοικίες ή εξωτερικής χρήσεως μικρών επιχειρήσεων. Αυτοί οι ελεγκτές έχουν συχνά πιο εξελιγμένα χαρακτηριστικά, όπως συμβατότητα με αισθητήρες υγρασίας εδάφους, σύνδεση εφαρμογών για κινητά και ικανότητα χειρισμού μεγαλύτερου αριθμού ζωνών (π.χ. 8 έως 12).

- Γεωργικοί και εμπορικής χρήσης ελεγκτές:

Το κόστος των ελεγκτών που κατασκευάζονται για μεγάλα εμπορικά τοπία, γεωργικές περιοχές μπορεί να αλλάξει σημαντικά. Το κόστος ενός ελεγκτή άρδευσης μπορεί να κυμαίνεται από 500€ έως μερικές χιλιάδες ευρώ ή και περισσότερο, ανάλογα με την χωρητικότητά του, τα χαρακτηριστικά και την πολυπλοκότητα του συστήματος άρδευσης που διαχειρίζεται. Οι προηγμένες επιλογές προγραμματισμού, η απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχος, η συνδεσιμότητα με διάφορους αισθητήρες και μετεωρολογικούς σταθμούς, είναι κοινά χαρακτηριστικά των εμπορικών ελεγκτών υψηλής ποιότητας.

Συμπερασματικά, οι ελεγκτές που βασίζονται στις καιρικές συνθήκες μπορούν να βοηθήσουν δραματικά στην εξοικονόμηση του νερού σε εφαρμογές άρδευσης ακριβείας. Τα πλεονεκτήματα τους βοηθάνε τόσο τους αγρότες όσο και το πεδίο εφαρμογής. Αποτελούν σημαντικά στοιχεία τέτοιων συστημάτων, τα οποία μπορούν να ενοποιηθούν με άλλα εξαρτήματα που απαρτίζουν μια εφαρμογή άρδευσης ακριβείας, όπως αισθητήρες υγρασίας.

3.3.5 Micro-Sprinkles (Μίκρο-Ψεκαστές)



Εικόνα 3.3. Μίκρο-Ψεκαστήρες

Οι μικρο-ψεκαστήρες, επίσης γνωστοί ως μικρο-ψεκαστές ή μικρο-αρδευτές, είναι ένας τύπος άρδευσης που χρησιμοποιεί μικρές κεφαλές καταιονισμού για την παροχή νερού στα φυτά με τη μορφή λεπτών σταγονιδίων. Οι μικρο-ψεκαστήρες μπορούν να βοηθήσουν στις προσπάθειες εξοικονόμησης νερού σε συστήματα άρδευσης ακριβείας. Η επιρροή των μικρο-ψεκαστήρων στην εξοικονόμηση νερού αναλύονται παρακάτω [75] [76] [77]:

➤ Ειδική εφαρμογή νερού:

Προορίζονται να στέλνουν νερό απευθείας στις ρίζες των φυτών, μειώνοντας τη σπατάλη νερού λόγω υπερβολικού ψεκασμού ή απορροής. Μπορούν να βελτιώσουν την κατανομή του νερού στοχεύοντας με ακρίβεια την περιοχή όπου τα φυτά χρειάζονται νερό.

➤ Οι απώλειες εξάτμισης μειώνονται:

Σε αντίθεση με τις τεχνικές επιφανειακής άρδευσης, εκκενώνουν νερό κοντά στο έδαφος, περιορίζοντας την έκθεση του νερού στον αέρα και τις απώλειες εξάτμισης. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι πολύ ωφέλιμο σε ζεστές και ξηρές συνθήκες.

➤ Ομοιόμορφη διανομή νερού:

Συμβάλλουν για την ομοιόμορφη κατανομή του νερού σε όλη την αρδευόμενη περιοχή. Η ομοιομορφία αυτή, μειώνει τον κίνδυνο λειψυδρίας και υπερ-άρδευσης αντίστοιχα, διασφαλίζοντας ότι όλα τα φυτά λαμβάνουν επαρκή και σταθερή ποσότητα νερού.

➤ Μεταβλητοί ρυθμοί ροής:

Πολλοί μικρο-ψεκαστές έχουν ρυθμιζόμενους ρυθμούς ροής και μοτίβα, επιτρέποντας στους χρήστες να προσαρμόσουν την εφαρμογή του νερού στις ακριβείς απαιτήσεις διαφορετικών καλλιεργειών ή ζωνών σε ένα χωράφι.

➤ Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας:

Λειτουργούν συχνά σε χαμηλότερες πιέσεις και ρυθμούς ροής από τα παραδοσιακά συστήματα καταιονιστήρων, μειώνοντας την ενέργεια που καταναλώνεται από την άντληση νερού.

➤ Καλύτερος έλεγχος της υγρασίας του εδάφους:

Τα Συστήματα άρδευσης ακριβείας με μικρο-ψεκαστήρες μπορούν να συνδεθούν με αισθητήρες υγρασίας εδάφους και μετεωρολογικά δεδομένα για τη βελτίωση των προγραμμάτων άρδευσης. Αυτή η διασύνδεση βοηθά στη διατήρηση των κατάλληλων επιπέδων υγρασίας του εδάφους, μειώνοντας τη σπατάλη νερού.

➤ Ανθεκτικότητα και αντοχή στην ξηρασία:

Όταν διαχειρίζονται σωστά, τα συστήματα μικροψεκασμού μπορούν να βοηθήσουν τα φυτά να δημιουργήσουν βαθύτερα, ριζικά συστήματα, καθιστώντας τα πιο ανθεκτικά στην ξηρασία.

➤ Μείωση της διάβρωσης του εδάφους:

Η λεπτή και ρυθμιζόμενη παροχή νερού από μικρο-ψεκαστήρες μειώνει τη διάβρωση του εδάφους, προστατεύοντας την ακεραιότητα του φυτικού εδάφους.

➤ Περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα:

Οι ψεκαστήρες αυτοί συμβάλλουν στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα εξοικονομώντας υδάτινους πόρους και μειώνοντας τον κίνδυνο μόλυνσης του νερού που προκαλείται από την απορροή και την έκπλυση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων.

➤ Συντήρηση και παρακολούθηση:

Οι μικρο-ψεκαστήρες απαιτούν τακτική συντήρηση για την αποφυγή μπλοκαρίσματος και τη διασφάλιση της συνεχούς λειτουργίας. Η διατήρηση της συνεχούς εξοικονόμησης νερού απαιτεί παρακολούθηση του συστήματος για διαρροές, φθορά ακροφυσίων και άλλες ανησυχίες.

➤ Πλεονεκτήματα για την υγεία και την απόδοση των καλλιεργειών:

Οι μικρο-ψεκαστήρες βοηθούν στη διατήρηση της υγρασίας του εδάφους, δημιουργώντας υγιέστερα φυτά με υψηλότερες αποδόσεις και ποιότητα καλλιέργειας.

➤ Επεκτασιμότητα:

Επειδή οι ψεκαστήρες αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ποικίλες εφαρμογές, που κυμαίνονται από μικροσκοπικούς κήπους έως τεράστια γεωργικά χωράφια, είναι ευέλικτοι και προσαρμόσιμοι σε μια ποικιλία εφαρμογών.

➤ Κόστος εφαρμογής:

Το κόστος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από μια σειρά παραμέτρων, όπως είναι η μάρκα, η ποιότητα, η περιοχή κάλυψης, η πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και οι μοναδικές ανάγκες του συστήματος άρδευσης. Ακολουθούν μερικά πρόχειρα δείγματα τιμών για τις χρήσεις των μικρο-ψεκαστήρων [78]:

- Για το σπίτι:

Το κόστος ενός βασικού κιτ μικροψεκαστών κατάλληλο για μικρούς οικιακούς κήπους ή παρτέρια με λουλούδια μπορεί να κυμαίνεται από 1 € έως 5 € ανά κεφαλή. Σε αυτά τα κιτ περιλαμβάνονται συχνά η κεφαλή του μικροκαταιονιστή, οι πασσάλτοι ή οι ανυψωτήρες και η σωλήνωση.

- Οικιακής χρήσης μεσαίας εμβέλειας :

Οι μικρο-ψεκαστήρες μεσαίου επιπέδου για μεγαλύτερα οικιακά τοπία ή μικρές εμπορικές ιδιοκτησίες κοστίζουν γενικά από 5 έως 20 € ανά κεφαλή. Αυτά τα συστήματα μπορεί να έχουν μεγαλύτερες επιλογές προσαρμογής και κάλυψης, καθώς και επιπλέον αξεσουάρ όπως φίλτρα και ρυθμιστές πίεσης.

- Για Εμπορική και Γεωργική Χρήση:

Το κόστος των συστημάτων αυτών που κατασκευάζονται για μεγαλύτερης κλίμακας γεωργικές ή εμπορικές χρήσεις μπορεί να διαφέρει πολύ. Το κόστος μιας κεφαλής, τέτοιας εφαρμογής, μπορεί να κυμαίνεται από 10€ έως 50€ ή περισσότερο, ανάλογα με παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα του συστήματος, η ποιότητα του εξαρτήματος και το επιθυμητό επίπεδο προσαρμογής.

- Αντικατάσταση και συντήρηση:

Εξαιτίας φθοράς, οι κεφαλές ενδέχεται να απαιτούν συντήρηση ή αντικατάσταση με την πάροδο του χρόνου.

Συμπερασματικά, οι μικρο-ψεκαστήρες ή είναι μια αποτελεσματική προσέγγιση άρδευσης που μπορεί να μειώσει δραστικά τη χρήση νερού σε συστήματα άρδευσης ακριβείας. Αποτελούν ζωτικό εργαλείο για τη βιώσιμη γεωργία και τη διαχείριση του τοπίου λόγω της ικανότητάς τους να διανέμουν το νερό με ακρίβεια στη ζώνη των ριζών, να μειώνουν τις απώλειες εξάτμισης και να ενθαρρύνουν την αποτελεσματική διαχείριση της υγρασίας του εδάφους.

3.4 Αρμόδιοι Οργανισμοί

Οι κυβερνητικοί κανονισμοί, τα βιομηχανικά πρότυπα και οι βέλτιστες πρακτικές που προωθούνται από οργανισμούς και επαγγελματίες της γεωργίας χρησιμοποιούνται συχνά για τον καθορισμό των κανόνων και των κατευθυντήριων γραμμών για συστήματα άρδευσης ακριβείας. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές βοηθούν στη διασφάλιση της αποτελεσματικής και κατάλληλης εφαρμογής της άρδευσης ακριβείας. Ακολουθούν μερικοί από τους σημαντικότερους οργανισμούς και παράγοντες που βοηθούν στη θέσπιση κανόνων και των κανονισμών για τα συστήματα άρδευσης ακριβείας:

- **Κυβερνητικές Γεωργικές Υπηρεσίες:** Σε ομοσπονδιακό, πολιτειακό και τοπικό επίπεδο, οι κυβερνητικές υπηρεσίες και υπηρεσίες γεωργίας θέτουν συχνά κανόνες και κανονισμούς σχετικά με τη χρήση του νερού και τη προστασία του περιβάλλοντος στη γεωργία. Αυτοί οι οργανισμοί μπορούν να θεσπίσουν κατευθυντήριες γραμμές για μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, δικαιώματα νερού και μεθόδους άρδευσης.
- **Οργανισμοί προστασίας του περιβάλλοντος:** Προκειμένου να διαφυλαχθούν τα οικοσυστήματα και η ποιότητα των υδάτων, οι περιβαλλοντικές οργανώσεις ενδέχεται να συμμετέχουν στη ρύθμιση των μεθόδων άρδευσης.
- **Αρχές διαχείρισης υδάτινων πόρων:** Μπορούν να θεσπίσουν κατευθυντήριες γραμμές για την κατανομή και τη χρήση του νερού σε περιοχές όπου οι υδάτινοι πόροι είναι περιορισμένοι ή υπόκεινται σε αυστηρούς κανονισμούς.
- **Ενώσεις Γεωργικής Βιομηχανίας:** Για μια ποικιλία γεωργικών εργασιών, συμπεριλαμβανομένης της άρδευσης, οι ενώσεις και οι οργανισμοί της γεωργικής βιομηχανίας συχνά παράγουν βέλτιστες πρακτικές και συστάσεις. Αυτές οι ομάδες θα μπορούσαν να παρέχουν συμβουλές για βιώσιμες πρακτικές, διαχείριση νερού και επιλογή εξοπλισμού.
- **Ερευνητικά ιδρύματα:** Ιδρύματα γεωργικής έρευνας, πανεπιστήμια και υπηρεσίες επέκτασης διεξάγουν έρευνα για τις τεχνολογίες και τις πρακτικές άρδευσης. Δημοσιεύουν ευρήματα και συστάσεις που μπορούν να παρέχουν οδηγίες για την άρδευση ακριβείας.
- **Κατασκευαστές και Προμηθευτές:** Οι εταιρείες που παράγουν εξοπλισμό και τεχνολογία άρδευσης ακριβείας μπορούν να παρέχουν οδηγίες και βέλτιστες πρακτικές για την εγκατάσταση, την λειτουργία και την συντήρηση των προϊόντων τους.
- **Διεθνείς Οργανισμοί:** Ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας του ΟΗΕ (FAO) συχνά εκδίδουν κατευθυντήριες γραμμές και προτάσεις για τη διαχείριση του νερού και τις βιώσιμες γεωργικές μεθόδους, συμπεριλαμβανομένης της άρδευσης ακριβείας.
- **Επεκτάσεις Τοπικών Αγροτικών Συνεταιρισμών:** Οι τοπικές υπηρεσίες αγροτικής επέκτασης και οι συνεταιριστικές οργανώσεις μπορούν να παρέχουν σεμινάρια, μαθήματα και συμβουλές προσαρμοσμένες στις απαιτήσεις και τις συνθήκες των αγροτών στην περιοχή τους.

Είναι σημαντικό για τους αγρότες και άλλους επαγγελματίες της γεωργίας να παραμείνουν ενημερωμένοι σχετικά με τους νόμους και τους κανονισμούς που ισχύουν για τη συγκεκριμένη περιοχή και τους τύπους των καλλιεργειών τους. Εκτός από τη διασφάλιση ηθικής και βιώσιμης γεωργίας, η τήρηση αυτών των κανονισμών συμβάλλει στη μεγιστοποίηση των πλεονεκτημάτων των συστημάτων άρδευσης ακριβείας, ενώ παράλληλα μειώνει τις πιθανές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και τους υδάτινους πόρους.

3.5 Έρευνες και αποτελέσματα

Μια ερευνητική ομάδα από το αγροτικό πανεπιστήμιο του Πεκίνου της Κίνας, αποφάσισε να διερευνήσει το πώς η άρδευση ακριβείας μπορεί να βοηθήσει στην εξοικονόμηση του νερού και την μεγιστοποίηση της

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

παραγωγής καρπών της χώρας. Χρησιμοποιώντας ένα βέλτιστο μοντέλο νευρωνικού δικτύου, κατάφεραν να προβλέψουν την απαιτούμενη ποσότητα νερού που χρειάζονται οι καλλιέργειες αγρού, ώστε να μην υπάρξει άσκοπη και κακόβουλη χρήση υδάτινων πόρων.

Αρχικά, φύτεψαν έναν σπόρο από καλαμπόκι στον πειραματικό σταθμό του Τόνγκζου, πόλη του Πεκίνου, όπου η συγκομιδή του έγινε από 18 Μαΐου έως τις 24 Σεπτεμβρίου. Η ένταση του φωτός, η υγρασία του εδάφους, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους καθώς και η θερμοκρασία του αέρα ήταν καθοριστικά στοιχεία του συστήματος, καθώς αποτέλεσαν νευρώνες, για την δημιουργία του νευρωνικού δικτύου.

Στον πίνακα 2, αναγράφονται αναλυτικά οι καθημερινές τιμές δειγμάτων του Μαΐου, έπειτα την κανονικοποίηση τους. Εύκολα διακρίνεται ότι, η ημέρα της υψηλότερης απαιτούμενης ποσότητας νερού είναι η εικοστή ένατη(29). Με την ένταση του φωτός να είναι κοντά στην μέση τιμή, την υγρασία του εδάφους στην υψηλότερη τιμή του πίνακα και την θερμοκρασία του αέρα στους 29.4 βαθμούς Κελσίου, η απαιτούμενη ποσότητα νερού είναι 236mm.

Στην συνέχεια, συλλέξαν καινούργιες τιμές από τον Ιούλιο(Πίνακας 4), όπου η καλλιέργεια βρίσκεται στο μέγιστο καλύτερο σημείο της, και παρατήρησαν ότι οι προβλέψεις ήταν αρκετά ακριβείς. Όπως φαίνεται, ένα σημαντικό ποσοστό των πραγματικών μετρήσεων είναι πολύ κοντά στις προβλεπόμενες. Αυτό αντικατοπτρίζει και τον συντελεστή συνάφειας R^2 , ο οποίος έχει μια πολύ καλή τιμή κοντά στο 1 (0.963), όπως επίσης και ότι το μέσο σχετικό σφάλμα ήταν 2,11%, όπως διακρίνεται και στο διάγραμμα 10.

Συμπερασματικά, η έρευνα αυτή είχε σκοπό την ανάδειξη ενός πολύ σοβαρού προβλήματος της σημερινής εποχής, καθώς η σταδιακή άνοδος της θερμοκρασίας, έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη απαίτηση νερού στην καλλιέργεια και παραγωγή των αγρών. Παίρνοντας πειραματικές τιμές και Δημιουργώντας το κατάλληλο νευρωνικό δίκτυο, οι ερευνητές κατάφεραν να φτιάξουν ένα μοντέλο, το οποίο απεικονίζει το πως με την πάροδο του χρόνου μπορεί να υπολογιστεί η απαιτούμενη ποσότητα του νερού από το έδαφος. Με την έρευνα αυτή, καθώς και με τον συνδυασμό των υπόλοιπων τεχνολογιών, θα μπορούσε να υπολογιστεί η σωστή χρήση των υδάτινων πόρων των καλλιεργειών, με στόχο την μείωση της άσκοπης υπερ-ύδρευση των αγρών, καθώς και την αποφυγή της λειψυδρίας, αίτια τα οποία θα μπορούσαν να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα στους αγρότες και γενικά στην αγροοικονομία [79].

Μια άλλη έρευνα, έδειξε το πως η παραγωγικότητα του νερού συμβάλλει στην καλλιέργεια ενός είδους κρεμμυδιού χρησιμοποιώντας την άρδευση με σταγόνες και σάπια φύλλα σε μια ημιάνυδρη τροπική περιοχή της Κολομβίας. Το πείραμα αυτό έλαβε μέρος στο αγροτικό ερευνητικό κέντρο της Μοτιλόνιας, το οποίο ανήκει στην αγροτική ερευνητική ομοσπονδία της Κολομβίας. Η ομάδα αυτή δημιούργησε πέντε διαφορετικές καταστάσεις(T1-T5), όπου η ποσότητα του νερού μειωνόταν ανά 20%. Οι μελέτες πραγματοποιήθηκαν σε ελεγχόμενο θερμοκήπιο για τον αποκλεισμό της βροχής, ώστε να είναι πιο ξεκάθαρη η απόκριση του φυτού. Το έδαφος στη συγκεκριμένη μελέτη βρέθηκε ότι ανήκε στην κατηγορία των αμμωδών εδαφών. Οι σπόροι του κρεμμυδιού, φυτεύτηκαν στις 4 Οκτωβρίου του 2022 στο πειραματικό θερμοκήπιο.

Τα αποτελέσματα, όπως ήταν αναμενόμενο, έδειξαν ότι όταν το φυτό λάμβανε το 100% (T1) της ποσότητας του νερού που χρειαζόταν, το ύψος και ο όγκος του μεγάλωνε με την πάροδο των ημερών. Ενώ όταν μειωνόταν αυτό το ποσοστό(T2,T3,T4,T5), τα χαρακτηριστικά αυτά του κρεμμυδιού μειωνόταν δραματικά. Η απρεπής διαχείριση ποσότητας του νερού είχε σαν αποτέλεσμα το κρεμμύδι να είναι κακής ποιότητας.

Συμπερασματικά, το πείραμα είχε σκοπό να αναδείξει ότι, για την σωστή και ωφέλιμη ποιότητα των αγροτικών προϊόντων, στο συγκεκριμένο παράδειγμα το κρεμμύδι, είναι αναγκαία η σωστή διαχείριση των υδάτινων πόρων ανάλογα με το έδαφος στο οποίο λαμβάνει χώρα η εφαρμογή [80].

Τα παραδείγματα αυτά, είχαν ως απώτερο σκοπό να αναδείξουν τα προβλήματα που μπορούν να υπάρξουν σε μια καλλιέργεια. Η σωστή χρήση των υδάτινων πόρων αλλά και άλλα στοιχεία, όπως η ένταση του φωτός, η υγρασία του εδάφους, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους καθώς και η θερμοκρασία του αέρα είναι θεμελιώδεις συστατικά για την κατάλληλη παραμετροποίηση ενός συστήματος άρδευσης ακριβείας.

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: Ανάπτυξη ψηφιακού διδύμου στο MATLAB και SIMULINK

4.1 Εισαγωγή

Ξεπερνώντας τα όρια της άρδευσης ακριβείας, η εμφάνιση εδαφικών ψηφιακών διδύμων σηματοδοτεί μια κομβική αλλαγή στη σύγχρονη γεωργία. Η άρδευση ακριβείας, με την ακρίβεια και την αποδοτικότητα των πόρων, έχει ήδη κάνει σημαντικά βήματα για την ενίσχυση των γεωργικών πρακτικών. Ωστόσο, η φυσική εξέλιξη, μας οδηγεί στον συναρπαστικό κόσμο των ψηφιακών διδύμων του εδάφους, όπου η τεχνολογία, τα δεδομένα και η τεχνητή νοημοσύνη συγκλίνουν για να δημιουργήσουν τεχνολογικά αντίγραφα των οικοσυστημάτων του εδάφους μας [81]. Αυτά τα ψηφιακά αντίγραφα του εδαφικού περιβάλλοντος αποτελούνται, όχι μόνο από τα επίπεδα υγρασίας αλλά και μια σειρά από δυναμικές παραμέτρους του εδάφους, παρέχοντας στους αγρότες μια ολιστική κατανόηση των αγρών τους.

4.2 Τι είναι το ψηφιακό δίδυμο εδάφους

Το ψηφιακό δίδυμο ενός εδάφους είναι ένα εξελιγμένο υπολογιστικό μοντέλο που αναπαράγει και προσομοιώνει τις πραγματικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά μιας συγκεκριμένης περιοχής εδάφους ή ενός ολόκληρου γεωργικού αγρού. Αυτό το ψηφιακό αντίγραφο περιλαμβάνει αρκετά δεδομένα, όπως είναι γεωγραφικές πληροφορίες, ιδιότητες του εδάφους, μετρήσεις αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο, δεδομένα του καιρού και λεπτομέρειες καλλιέργειας [82]. Χρησιμοποιώντας αυτές τις διαφορετικές πηγές δεδομένων και ενσωματώνοντας προηγμένες τεχνικές μοντελοποίησης, το ψηφιακό δίδυμο ενός εδάφους παρέχει μια δυναμική και ακριβή αναπαράσταση του εδαφικού περιβάλλοντος. Σκοπός του είναι να βοηθήσει τους αγρότες και τους διαχειριστές της γης στη λήψη αποφάσεων βάσει των αποτελεσμάτων, σχετικά με τη διαχείριση του εδάφους και των καλλιεργειών. Αυτή η τεχνολογία, επιτρέπει την αποτελεσματική παρακολούθηση της υγείας του εδάφους, των επιπέδων υγρασίας, την περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά και άλλων ζωτικών παραμέτρων, προσφέροντας βελτιστοποιημένες πρακτικές άρδευσης. Τέλος, το ψηφιακό δίδυμο ενός εδάφους παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη της σύγχρονης γεωργίας, στην ενίσχυση της αποδοτικότητας των πόρων και στην προώθηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών σε ένα διαρκώς αναπτυσσόμενο γεωργικό τοπίο [83].

4.2.1 Από τι αποτελείται ένα ψηφιακό δίδυμο εδάφους

Μερικά από τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν ένα ψηφιακό δίδυμο είναι:

- **Γεωγραφικά δεδομένα:** Ενσωματώνει γεωχωρικά δεδομένα, όπως είναι οι χάρτες τύπου εδάφους, η τοπογραφία και συντεταγμένες του GPS, για να οπτικοποιήσει με ακρίβεια τη φυσική τοποθεσία.
- **Δεδομένα αισθητήρα:** Δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από διάφορους αισθητήρες που τοποθετούνται στο χωράφι, όπως οι αισθητήρες υγρασίας εδάφους, οι αισθητήρες θερμοκρασίας και οι αισθητήρες θρεπτικών ουσιών.
- **Δεδομένα καιρού και κλίματος:** Λαμβάνει υπόψη τις μετεωρολογικές προβλέψεις και τα δεδομένα του κλίματος της περιοχής για τη μοντελοποίηση της επίδρασης των καιρικών συνθηκών στο εδαφικό περιβάλλον.
- **Ιδιότητες εδάφους:** Πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες του εδάφους, όπως η υφή, η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, το pH και τα επίπεδα θρεπτικών ουσιών.

- **Στοιχεία καλλιέργειας:** Δεδομένα σχετικά με τον τύπο της καλλιέργειας που χρησιμοποιείται στο χωράφι, τα στάδια ανάπτυξής της και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της, ενσωματώνονται συχνά για την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων καλλιέργειας-εδάφους.
- **Αλγόριθμοι μοντελοποίησης:** Προηγμένοι αλγόριθμοι μοντελοποίησης και προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο το έδαφος θα ανταποκριθεί σε αλλαγές στις εισροές όπως η άρδευση, η λίπανση ή οι πρακτικές καλλιέργειας.
- **Οπτικοποίηση:** Τα εργαλεία οπτικοποίησης και οι πίνακες ελέγχου επιτρέπουν στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με το ψηφιακό δίδυμο, παρέχοντας μια σαφή και πλήρη εικόνα των συνθηκών του εδάφους και των συστάσεων του.

4.3 Ενσωμάτωση MATLAB- SIMULINK

Η μελέτη και η ερμηνεία των εδαφών είναι θεμελιώδεις για την αντιμετώπιση πολυάριθμων πραγματικών προκλήσεων, που εκτείνονται από τη γεωργική παραγωγικότητα έως τον σχεδιασμό χρήσης γης. Η σύνθεση του εδάφους, η υφή και η περιεκτικότητα σε υγρασία είναι μερικοί μόνο από τους κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών, το φιλτράρισμα του νερού, ακόμη και τη σταθερότητα της υποδομής.

Η κατανόηση των μοναδικών χαρακτηριστικών των εδαφών και η αποτελεσματική κατηγοριοποίησή τους είναι ζωτικής σημασίας για διάφορες εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο, που κυμαίνονται από τη γεωργία έως την περιβαλλοντική παρακολούθηση. Οι ποικίλες φυσικές και χημικές ιδιότητες των εδαφών, όπως η περιεκτικότητα σε υγρασία, τα επίπεδα pH και η σύσταση των ορυκτών, παίζουν καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της λειτουργικότητας τους για διαφορετικούς σκοπούς. Για τον εξορθολογισμό αυτής της διαδικασίας, το MATLAB, μια ισχυρή πλατφόρμα προγραμματισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη μιας προσαρμοσμένης λύσης. Με τη κατάλληλη διασύνδεση του με αναλογικούς αισθητήρες που καταγράφουν δεδομένα χαρακτηριστικών εδάφους, το MATLAB μπορεί να επεξεργαστεί και να αναλύσει τις συλλεγόμενες πληροφορίες. Αξιοποιώντας συγκεκριμένες τεχνικές ταξινόμησης, ο κώδικας MATLAB μπορεί στη συνέχεια να κατηγοριοποιήσει έξυπνα τα εδάφη με βάση τα χαρακτηριστικά τους, παρέχοντας μια γρήγορη και αυτοματοποιημένη μέθοδο αναγνώρισης και διαφοροποίησης διαφόρων τύπων εδάφους. Αυτή η ενοποίηση των ιδιοτήτων του εδάφους του πραγματικού κόσμου και των υπολογιστικών δυνατοτήτων του MATLAB, αποτελεί παράδειγμα μιας ισχυρής προσέγγισης για την ενημέρωση της λήψης αποφάσεων σε τομείς που εξαρτώνται από τον χαρακτηρισμό του εδάφους.

Η συνέργεια μεταξύ της επιστήμης του εδάφους και του MATLAB, αποτελεί παράδειγμα του συνδυασμού της επιστημονικής κατανόησης και της τεχνολογικής ικανότητας. Η ικανότητα του MATLAB να χειρίζεται δεδομένα, να εκτελεί περίπλοκους υπολογισμούς και να οπτικοποιεί τα αποτελέσματα δίνει τη δυνατότητα σε ερευνητές, γεωπόνους και περιβαλλοντικούς επιστήμονες να αντλήσουν ουσιαστικές γνώσεις από τον τεράστιο και περίπλοκο κόσμο των εδαφών. Γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ των χαρακτηριστικών του εδάφους του πραγματικού κόσμου και της υπολογιστικής ανάλυσης, αυτή η προσέγγιση όχι μόνο επιταχύνει τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, αλλά επίσης θέτει τα θεμέλια για καινοτόμες εξελίξεις σε διάφορους τομείς που βασίζονται στην κατανόηση των εδαφών και των πολύπλευρων χαρακτηριστικών τους.



Εικόνα 4.1 MathWorks

Στον διαρκώς εξελισσόμενο κόσμο της τεχνολογίας και της επιστημονικής έρευνας, το MATLAB έχει αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της υπολογιστικής ανάλυσης και των εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο [84]. Το MATLAB, συντομογραφία του "Matrix Laboratory", είναι μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου, μέσω διαδραστικού περιβάλλοντος που επιτρέπει σε μηχανικούς, ερευνητές και επιστήμονες να εκτελούν ένα ευρύ φάσμα εργασιών, που κυμαίνονται από ανάλυση και οπτικοποίηση δεδομένων έως ανάπτυξη σύνθετων αλγορίθμων. Ενώ οι δυνατότητες του καλύπτουν ποικίλους τομείς, ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματά του έγκειται στην ικανότητά του, να λειτουργεί τόσο σε υπολογιστική ανάλυση εκτός σύνδεσης όσο και σε εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο.

Στον πυρήνα του, το MATLAB έχει σχεδιαστεί για να χειρίζεται αριθμητικούς υπολογισμούς και πίνακες με ευκολία. Αυτή η βασική του λειτουργία, επιτρέπει στους χρήστες να εκτελούν πολύπλοκους υπολογισμούς αποτελεσματικά, καθιστώντας το ιδιαίτερα χρήσιμο για πεδία όπου σύνθετες μαθηματικές πράξεις είναι ενσωματωμένες [85]. Το συντακτικό της γλώσσας αυτής, είναι ευκολονόητο με τη χρήση μαθηματικών συμβόλων, διευκολύνοντας την απρόσκοπτη μετάβαση από τις μαθηματικές έννοιες στην πραγματική εφαρμογή κώδικα. Αυτή η πτυχή είναι ιδιαίτερα επωφελής σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα, καθώς το MATLAB μπορεί να χρησιμεύσει ως εργαλείο μάθησης που προωθεί τους μαθητές στη λογική προγραμματισμού, ενώ παράλληλα τους βοηθά να κατανοήσουν περίπλοκες μαθηματικές έννοιες.

Η εκτεταμένη βιβλιοθήκη ενσωματωμένων λειτουργιών και οι εργαλειοθήκες του, ενισχύουν περαιτέρω τις δυνατότητες του, καλύπτοντας διάφορους τομείς όπως η επεξεργασία σήματος, η ανάλυση εικόνας, η μηχανική μάθηση και τα συστήματα αυτόματου ελέγχου, παρέχοντας προκατασκευασμένες λειτουργίες και αλγόριθμους που διεκπεραιώνουν τις διαδικασίες ανάπτυξης. Οι χρήστες μπορούν να αξιοποιήσουν αυτά τα εργαλεία για να δημιουργήσουν εξελιγμένες εφαρμογές, χωρίς να χρειάζεται να δυσκολευτούν ιδιαίτερα. Επιπλέον, οι ισχυρές δυνατότητες σχεδίασης της πλατφόρμας επιτρέπουν την οπτική αναπαράσταση κατατοπιστικών γραφημάτων, διαγραμμάτων και δεδομένων, ενισχύοντας τη σαφήνεια των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

Σε σενάρια πραγματικού χρόνου, το MATLAB λειτουργεί διαφορετικά. Ο κώδικας συχνά, πρέπει να είναι βελτιστοποιημένος για να χειρίζεται εισερχόμενα δεδομένα καθώς φτάνουν σε συνεχή ροή. Αυτό απαιτεί προσεκτική διαχείριση της μνήμης, αποδοτικούς αλγόριθμους και καλή κατανόηση των περιορισμών υλικού. Τεχνικές, όπως η αποθήκευση στην προσωρινή μνήμη και η παράλληλη επεξεργασία καθίστανται θεμελιώδης σημασίας για να διασφαλιστεί ότι η εφαρμογή παραμένει λειτουργική και ότι μπορεί να συμβαδίσει με τον ρυθμό των εισερχόμενων δεδομένων. Για παράδειγμα, σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν δεδομένα αισθητήρων, όπως η ρομποτική ή η περιβαλλοντική παρακολούθηση, η ικανότητα επεξεργασίας μετρήσεων αισθητήρων εν κινήσει, μπορεί να είναι κρίσιμη για τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Κατά συνέπεια, ο ρόλος του MATLAB τόσο στην υπολογιστική ανάλυση όσο και στις εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο είναι εμβληματικός ως προς την προσαρμοστικότητα και την ευελιξία του. Η επάρκειά του στο χειρισμό πολύπλοκων μαθηματικών πράξεων, σε συνδυασμό με την πλούσια βιβλιοθήκη συναρτήσεων, το καθιστούν απαραίτητο σε διάφορους επιστημονικούς και μηχανικούς κλάδους, ενώ η μετάβαση σε σενάρια πραγματικού χρόνου εισάγει μοναδικές προκλήσεις και παρέχει πρόληψη σε τυχόν προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθούν στον πραγματικό κόσμο. Το σύνολο εργαλείων του MATLAB, συμπεριλαμβανομένων των δυνατοτήτων Simulink και δημιουργίας κώδικα, εξοπλίζει τους χρήστες να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά αυτές τις προκλήσεις [86]. Είτε χρησιμοποιείται για ανάλυση δεδομένων

μετά το συμβάν είτε για λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, χρησιμεύει ως μια ισχυρή πλατφόρμα που ενώνει μαθηματικές έννοιες, ικανότητα κωδικοποίησης και διασύνδεση υλικού, σε έναν διαρκώς αναπτυσσόμενο τεχνολογικό κόσμο.

4.3.2 Τι είναι το SIMULINK και πως λειτουργεί

Στον τομέα της μηχανικής, όπου κυριαρχούν περίπλοκα συστήματα και οι δυναμικές συμπεριφορές, το SIMULINK έχει αναδειχθεί ως ένα καινοτόμο εργαλείο που έχει φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο οι μηχανικοί μοντελοποιούν, προσομοιώνουν και αναλύουν δυναμικά συστήματα. Το SIMULINK, είναι ένα περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού που αναπτύχθηκε από τη MathWorks. Παρέχει μια οπτική πλατφόρμα που χρησιμοποιείται για την κατασκευή και την προσομοίωση διασυνδεδεμένων μπλοκ, που αντιπροσωπεύουν τα στοιχεία ενός συστήματος. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στους μηχανικούς και τους ερευνητές, να απεικονίζουν ολοκληρωμένα ένα τεράστιο φάσμα συστημάτων, από απλούς βρόγχους ελέγχου έως πολύπλοκα συστήματα πολλαπλών τομέων [87]. Με την κοινή επικοινωνία μεταξύ τους και τις ισχυρές δυνατότητες προσομοίωσης, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιτάχυνση της τεχνολογίας και στη βελτιστοποίηση των σχεδίων σε διάφορες βιομηχανίες.

Στο επίκεντρο της λειτουργικότητας του, βρίσκεται η αναπαράσταση των μπλοκ διαγραμμάτων, όπου κάθε μπλοκ αντιστοιχεί σε μια μαθηματική ή λογική πράξη που καθορίζει συλλογικά τη συμπεριφορά του συστήματος. Αυτή η οπτική προσέγγιση παρουσιάζει μια αξιοσημείωτη απόκλιση από τον παραδοσιακό προγραμματισμό που βασίζεται σε κείμενο, καθιστώντας τη μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων πιο προσιτή σε μηχανικούς και ερευνητές. Με μια διεπαφή drag-and-drop (μεταφοράς και απόθεσης) για τη συναρμολόγηση μπλοκ και τη δημιουργία συνδέσεων, επίσης, απλοποιεί τη διαδικασία κατασκευής περίπλοκων μοντέλων. Οι χρήστες μπορούν να κατασκευάσουν ένα μοντέλο συνδέοντας μπλοκ που αντιπροσωπεύουν αισθητήρες, ελεγκτές, ενεργοποιητές και άλλων διαφόρων στοιχείων, δημιουργώντας μια συλλογική αναπαράσταση της συμπεριφοράς του συστήματος.

Η απρόσκοπτη ενσωμάτωση του Simulink με το MATLAB και οι θεμελιώδεις υπολογιστικές του δυνατότητες είναι ένας άλλος ακρογωνιαίος λίθος της λειτουργίας του. Η δυνατότητα ενσωμάτωσης συναρτήσεων του MATLAB σε μπλοκ του Simulink επιτρέπει στους χρήστες να συνδυάζουν απρόσκοπτα προσαρμοσμένο κώδικα και γραφικά στοιχεία [88]. Αυτή η δυνατότητα παρέχει στους μηχανικούς την ευελιξία να ενσωματώνουν εξειδικευμένους αλγόριθμους, υπολογισμούς ή προσαρμοσμένες συναρτήσεις απευθείας στα μοντέλα τους, συγχωνεύοντας τα οπτικά πλεονεκτήματα του με την αναλυτική ικανότητα του MATLAB.

Μία από τις πιο σημαντικές πτυχές του είναι η επάρκεια του για οπτικοποίηση συστημάτων πολλαπλών τομέων. Το Simulink υπερέρχει στη απεικόνιση τέτοιων διεπιστημονικών συστημάτων, προσφέροντας ένα ολοκληρωμένο σύνολο ενσωματωμένων βιβλιοθηκών και εργαλείων προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένους τομείς. Αυτή η ικανότητα όχι μόνο επιταχύνει τη διαδικασία σχεδιασμού, αλλά ενθαρρύνει επίσης μια βαθύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αλληλεπιδρούν διαφορετικά στοιχεία σε ένα σύνθετο σύστημα.

Χρησιμοποιώντας αριθμητικούς λύτες, μπορεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά των μοντέλων με την πάροδο του χρόνου, αποκαλύπτοντας πληροφορίες σχετικά με τις παροδικές αποκρίσεις, τη σταθερότητα και άλλα κρίσιμα χαρακτηριστικά. Οι ερευνητές μπορούν να εξετάσουν πώς ένα σύστημα αντιδρά σε διάφορες εισόδους, επιτρέποντάς τους να βελτιώσουν επαναληπτικά τα σχέδια και να προβλέψουν τη συμπεριφορά του συστήματος πριν από τη φυσική εφαρμογή. Για παράδειγμα, στην αεροδιαστημική μηχανική, το Simulink μπορεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά ενός συστήματος ελέγχου πτήσης, βοηθώντας τους μηχανικούς να προσαρμόσουν τους αλγόριθμους ελέγχου και να προβλέψουν την απόκριση του αεροσκάφους υπό διαφορετικές συνθήκες, όλα αυτά χωρίς να φύγουν από το εικονικό περιβάλλον.

Όσον αφορά τη δοκιμή και την επικύρωση σε πραγματικό χρόνο, οι δυνατότητες προσομοίωσης Hardware-In-The-Loop (HIL) του SIMULINK είναι κρίσιμης σημασίας. Το HIL επιτρέπει στους μηχανικούς να διασυνδέουν τα μοντέλα τους με φυσικά στοιχεία υλικού, όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές και ελεγκτές, δημιουργώντας ένα περιβάλλον δοκιμών κλειστού βρόχου που μιμείται στενά τις πραγματικές συνθήκες. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα πολύτιμη για την επαλήθευση αλγορίθμων ελέγχου, τη δοκιμή ενσωματωμένων συστημάτων και την επικύρωση στοιχείων υλικού πριν από την ανάπτυξη του πραγματικού συστήματος. Με την ενσωμάτωση της προσομοίωσης με το πραγματικό υλικό, γεφυρώνεται το χάσμα μεταξύ εικονικού σχεδιασμού και πρακτικής υλοποίησης, διασφαλίζοντας ότι τα αναπτυγμένα συστήματα λειτουργούν όπως προβλέπεται σε σενάρια πραγματικού κόσμου [89].

Οι ερευνητές πρέπει να λάβουν υπόψη παράγοντες όπως η κατάλληλη επιλογή λύτη, η σωστή αριθμητική σταθερότητα και η υπολογιστική απόδοση για να εξασφαλίσουν ότι οι προσομοιώσεις αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια την πραγματικότητα. Επιπλέον, η διαχείριση πολύπλοκων μοντέλων μπορεί να γίνει δύσκολη, ειδικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διασυνδεδεμένων μπλοκ. Η σωστή οργάνωση, διασύνδεση και τεκμηρίωση καθίστανται απαραίτητη ανάγκη για τη διατήρηση της αναγνωσιμότητας και της κατανόησης του μοντέλου.

Ως αποτέλεσμα, ο ρόλος του στη μηχανική δεν είναι τίποτα λιγότερο από μετασχηματιστικός. Παρέχοντας μια οπτική πλατφόρμα για δυναμική μοντελοποίηση και προσομοίωση συστήματος, δίνει την δυνατότητα στους μηχανικούς να αντιμετωπίζουν πολύπλοκα προβλήματα με σαφήνεια και σιγουριά. Η προσέγγισή του με μπλοκ διαγράμματα απλοποιεί την κατασκευή περίπλοκων μοντέλων, ενώ η ενσωμάτωσή του με το MATLAB διευκολύνει την προσαρμοσμένη ανάλυση και την ανάπτυξη αλγορίθμων. Με δυνατότητες που καλύπτουν τη απεικόνιση πολλών τομέων, την προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο και την επικύρωση των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο, εξοπλίζει τους ερευνητές με μια ευέλικτη εργαλειοθήκη για καινοτομία, βελτιστοποίηση και εξέλιξη. Παρά τις προκλήσεις του, το εργαλείο αυτό παραμένει σημαντικός λίθος στη σύγχρονη μηχανική, ενισχύοντας τη βαθιά κατανόηση των δυναμικών συστημάτων και οδηγώντας στην πρόοδο σε αμέτρητους κλάδους.

Μεταβαίνοντας από τον δυναμικό κόσμο του SIMULINK στον τομέα της ανάλυσης εδάφους, οι αρχές της υπολογιστικής απεικόνισης και προσομοίωσης βρίσκουν μια νέα εφαρμογή στην κατηγοριοποίηση διαφορετικών τύπων εδαφών με βάση τα μοναδικά τους χαρακτηριστικά. Ακριβώς όπως τα μπλοκ διαγράμματα του, αποτυπώνουν την αλληλεπίδραση των στοιχείων μέσα σε ένα δυναμικό σύστημα, ενώ, ένας σχολαστικά κατασκευασμένος κώδικας MATLAB μπορεί να ξεδιαλύνει τα περίπλοκα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τα εδάφη σε πραγματικό χρόνο. Αξιοποιώντας τη δύναμη των αριθμητικών υπολογισμών και των δυνατοτήτων επεξεργασίας δεδομένων του MATLAB, οι ερευνητές και οι περιβαλλοντικοί επιστήμονες μπορούν να σχεδιάσουν έναν κώδικα που ερμηνεύει δεδομένα εδάφους που συλλέγονται από αισθητήρες και εφαρμόζει αλγόριθμους που βοηθούν στην ταξινόμηση και στο διαχωρισμό των εδαφών σε ξεχωριστές κατηγορίες.

4.4 Κατηγοριοποίηση εδαφών

4.4.1 Με βάση το pH τους

Η διαίρεση του εδάφους με βάση το pH του είναι κρίσιμη για την ταξινόμηση του εδάφους, καθώς επηρεάζει άμεσα τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων θρεπτικών συστατικών και τη συνολική υγεία των φυτών. Το pH του εδάφους μετρά την οξύτητα ή την αλκαλικότητα του εδαφικού διαλύματος, με τιμές κάτω από 7 να υποδηλώνουν οξύτητα και τιμές πάνω από 7 να υποδηλώνουν αλκαλικότητα. Τα εδάφη συνήθως κατηγοριοποιούνται σε τρεις κύριες ομάδες: όξινο, ουδέτερο και αλκαλικό. Τα όξινα εδάφη, συχνά στερούνται βασικά θρεπτικά συστατικά όπως ασβέστιο και μαγνήσιο και μπορεί να οδηγήσουν σε κακή ανάπτυξη των φυτών. Τα ουδέτερα εδάφη, με pH κοντά στο 7, θεωρούνται γενικά βέλτιστα για τις περισσότερες καλλιέργειες, καθώς διευκολύνουν τη βέλτιστη πρόσληψη θρεπτικών στοιχείων. Ενώ τα εδάφη με τιμές πάνω από 7, ενδέχεται να περιέχουν υπερβολικά επίπεδα μετάλλων όπως ασβέστιο και νάτριο, επηρεάζοντας τη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών, προκαλώντας τοξικότητα στα φυτά. Η διαίρεση του εδάφους με βάση το pH του, είναι κρίσιμη για την επιλογή κατάλληλων καλλιεργειών για συγκεκριμένους τύπους εδαφών, καθώς και για τον προσδιορισμό της ανάγκης για τροποποιήσεις που ρυθμίζουν τη οξύτητα, όπως ο ασβέστης ή το θείο, ώστε να δημιουργηθεί ένα περιβάλλον που ευνοεί την υγιή ανάπτυξη των φυτών και επιτυχείς γεωργικές πρακτικές.

4.4.1.1 Κώδικας που διαφοροποιεί τους ποικίλους τύπους εδάφους σύμφωνα με το pH τους.

```
% Initialize the analog input
analogIn = analoginput('pH Sensor');
addchannel(analogIn, 1); % Add channels as needed
% Sample soil data
soils = {};
numofSoils = length(soilNs);
% Define pH ranges for classification
acidic = [0, 6.5];
neutral = [6.6, 7.3];
alkaline = [7.4, 14];
% Initialize arrays to store categorized soils
acidicSoils = {};
neutralSoils = {};
alkalineSoils = {};
% Read pH values from analog input and categorize soils
for i = 1:numSoils
    % Simulate reading pH from analog input (replace with actual reading)
    pH = simulateAnalogRead(analogIn);
    if pH >= acidic(1) && pH <= acidic(2)
        acidicSoils{end+1} = soils{i};
    elseif pH >= neutral(1) && pH <= neutral(2)
        neutralSoils{end+1} = soils{i};
    elseif pH >= alkaline(1) && pH <= alkaline(2)
        alkalineSoils{end+1} = soils{i};
    else
        disp(['pH value for ', soils{i}, ' is out of the defined ranges.']);
    end
end
% Display categorized soils
disp('Acidic Soils:');
```

```

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους
disp(acidicSoils);
disp('Neutral Soils:');
disp(neutralSoils);
disp('Alkaline Soils:');
disp(alkalineSoils);
% Terminate the process of reading
stop(analogIn);
% Simulated analog read function
function pH = simulateAnalogRead(analogIn)
    % Simulate pH measurement in the range of 0 to 14
    pH = 0 + (14 - 0) * analogIn;
end

```

4.4.2 Με βάση το ποσοστό υγρασίας τους

Η ταξινόμηση του εδάφους με βάση την πυκνότητα υγρασίας παίζει καθοριστικό ρόλο στη γεωτεχνική μηχανική και στις κατασκευές. Αυτή η προσέγγιση χωρίζει τα εδάφη σε διακριτές καταστάσεις – ξηρά, μέτρια και υγρά – με βάση την περιεκτικότητα σε υγρασία και την αντίστοιχη πυκνότητά τους. Τα ξηρά εδάφη έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία και είναι χαλαρά συσκευασμένα, με αποτέλεσμα συχνά κακή συνοχή και μειωμένη φέρουσα ικανότητα. Τα μέτρια εδάφη επιτυγχάνουν μια ισορροπία, με βέλτιστη υγρασία που επιτρέπει καλύτερη συμπίεση και βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Τα εδάφη αυτά προτιμώνται συνήθως για κατασκευαστικά έργα λόγω της σταθερότητας και της συμβατικότητάς τους. Τα υγρά εδάφη έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία και μπορεί να γίνουν υπερβολικά κορεσμένα, οδηγώντας σε μειωμένη αντοχή στη διάτμηση και πιθανή αστάθεια. Κατηγοριοποιώντας τα εδάφη σε αυτές τις καταστάσεις πυκνότητας υγρασίας, οι μηχανικοί μπορούν να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τις μεθόδους συμπίεσης, το σχεδιασμό θεμελίωσης και τις τεχνικές σταθεροποίησης του εδάφους, διασφαλίζοντας ότι τα κατασκευαστικά έργα χτίζονται σε σταθερά και ασφαλή θεμέλια.

4.4.2.1 Κώδικας που διαφοροποιεί τους διάφορους τύπους εδάφους σύμφωνα με την πυκνότητα υγρασίας τους.

```

% Initialize the analog input
analogIn = analoginput('Moisture Sensor');
addchannel(analogIn, 1); % Add channels as needed
% Sample soil data
soils = {};
numofSoils = length(soilNames);
% Define moisture ranges for classification
dry = [0, 30];
moderate = [31, 60];
wet = [61, 100];
% Initialize arrays to store categorized soils
drySoils = {};
moderateSoils = {};
wetSoils = {};
% Read moisture values from analog input and categorize soils
for i = 1:numSoils
    % Simulate reading moisture from analog input
    moisture = simulateAnalogRead(analogIn);

```

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

```
if moisture >= dry (1) && moisture <= dry (2)
    drySoils{end+1} = soils{i};
elseif moisture >= moderate (1) && moisture <= moderate (2)
    moderateSoils{end+1} = soils{i};
elseif moisture >= wet (1) && moisture <= wet (2)
    wetSoils{end+1} = soils{i};
else
    disp(['Moisture value for ', soils{i}, ' is out of the defined ranges.']);
end
end
% Display categorized soils
disp('Dry Soils:');
disp(drySoils);
disp('Moderate Soils:');
disp(moderateSoils);
disp('Wet Soils:');
disp(wetSoils);
% Terminate the process of reading
stop(analogIn);
% Simulated analog read function
function moisture = simulateAnalogRead(analogIn)
    % Simulate moisture measurement (%)
    moisture = 0 + (100 - 0) * rand();
end
```

4.4.3 Με βάση την σύσταση των ορυκτών τους

Η ταξινόμηση του εδάφους με βάση τη σύνθεση των ορυκτών είναι βασική για την κατανόηση της γεωλογικής προέλευσης και των ιδιοτήτων των διαφορετικών τύπων εδάφους. Τα εδάφη μπορούν να χωριστούν σε διακριτές κατηγορίες ανάλογα με την κυρίαρχη ορυκτή σύστασή τους. Για παράδειγμα, εδάφη πλούσια σε χαλαζία, άστριο και μαρμαρυγία. Η διαίρεση των εδαφών με βάση τη σύνθεση των ορυκτών βοηθά τους γεωλόγους, τους γεωπόνους και τους σχεδιαστές γης στον εντοπισμό της προέλευσης του εδάφους, στην πρόβλεψη των ιδιοτήτων και στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τη χρήση γης, την επιλογή των καλλιεργειών και την περιβαλλοντική διαχείριση.

4.4.3.1 Κώδικας που διαφοροποιεί τους πολλαπλούς τύπους εδάφους σύμφωνα με την σύσταση των ορυκτών τους.

```
% Initialize the analog input
analogIn = analoginput('Mineral Content');
addchannel(analogIn, 1); % Add channels as needed
% Sample soil data
soils = {};
numSoils = length(soils)
% Define mineral composition ranges for classification
lowMineral = [0, 30];
mediumMineral = [31, 60];
highMineral = [61, 100];
```



```

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους
% Initialize arrays to store categorized soils
lowMineralSoils = {};
mediumMineralSoils = {};
highMineralSoils = {};
% Read mineral content values from analog input and categorize soils
for i = 1:numSoils
    % Simulate reading mineral content from analog input
    mineralContent = simulateAnalogRead(analogIn);
    if mineralContent >= lowMineral (1) && mineralContent <= lowMineral (2)
        lowMineralSoils{end+1} = soils{i};
    elseif mineralContent >= mediumMineral (1) && mineralContent <= mediumMineral (2)
        mediumMineralSoils{end+1} = soils{i};
    elseif mineralContent >= highMineral (1) && mineralContent <= highMineral (2)
        highMineralSoils{end+1} = soils{i};
    else
        disp(['Mineral content value for ', soils{i}, ' is out of the defined
ranges.']);
    end
end
% Display categorized soils
disp('Low Mineral Content Soils:');
disp(lowMineralSoils);
disp('Medium Mineral Content Soils:');
disp(mediumMineralSoils);
disp('High Mineral Content Soils:');
disp(highMineralSoils);
% Terminate the process of reading
stop(analogIn);
% Simulated analog read function
function mineralContent = simulateAnalogRead(analogIn)
    % Simulate mineral content measurement in the range of 0 to 100
    mineralContent = 0 + (100 - 0) * analogIn;
end

```

4.5 Κατηγοριοποίηση εδαφών σε αμμώδη, πηλώδη και αργιλώδη

4.5.1 Αμμώδη εδάφη

Το pH, η υγρασία και η περιεκτικότητα σύστασης των ορυκτών των αμμωδών εδαφών μπορεί να ποικίλλει ευρέως ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τη γεωγραφική θέση και τους συγκεκριμένους παράγοντες που επηρεάζουν το έδαφος. Ωστόσο, υπάρχουν μερικές γενικές μετρήσεις που σχετίζονται συχνά με αμμώδη εδάφη:

- **Εύρος pH:** Τα αμμώδη εδάφη μπορεί να έχουν pH που κυμαίνεται από όξινο έως ουδέτερο. Μπορεί τυπικά να κυμαίνεται από περίπου 5,0 έως 7,0. Όξινα αμμώδη εδάφη (με pH κάτω του 7) μπορεί να βρεθούν σε περιοχές με έκπλυση ορυκτών λόγω βροχοπτώσεων, ενώ ουδέτερα αμμώδη εδάφη (με pH περίπου 7) μπορεί να επικρατούν σε περιοχές όπου η έκπλυση ορυκτών είναι λιγότερο έντονη.
- **Ποσοστό υγρασίας:** Τα αμμώδη εδάφη είναι γνωστά για την εξαιρετική τους αποστράγγιση και τη χαμηλότερη ικανότητα συγκράτησης νερού λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους σωματιδίων. Αυτό

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

σημαίνει ότι τα αμμώδη εδάφη έχουν συχνά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία σε σύγκριση με άλλους τύπους εδάφους. Η περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με παράγοντες όπως οι βροχοπτώσεις, οι πρακτικές άρδευσης και οι ρυθμοί εξάτμισης. Μπορεί να έχουν περιεκτικότητα σε υγρασία που κυμαίνεται από περίπου 3% έως 15% ή μεγαλύτερη, ανάλογα με τις συνθήκες.

- **Περιεκτικότητα σε ορυκτά:** Τα αμμώδη εδάφη έχουν συνήθως χαμηλότερη περιεκτικότητα σε μέταλλα και θρεπτικά συστατικά σε σύγκριση με άλλους τύπους εδάφους όπως πηλώδη ή αργιλώδη εδάφη. Το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων τους οδηγεί σε μειωμένη επιφάνεια για κατακράτηση ορυκτών και μεταλλικών στοιχείων. Ωστόσο, τα αμμώδη εδάφη μπορούν ακόμα να περιέχουν απαραίτητα μέταλλα που απαιτούνται για την ανάπτυξη των φυτών. Η περιεκτικότητα σε ορυκτά μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με το μητρικό υλικό και τους γεωλογικούς παράγοντες της περιοχής. Τροποποιήσεις όπως η προσθήκη οργανικής ύλης ή λιπασμάτων μπορεί να είναι απαραίτητες για την αύξηση της διαθεσιμότητας ορυκτών σε αμμώδη εδάφη.

4.5.2 Πηλώδη εδάφη

Τα πηλώδη εδάφη είναι γνωστά για την ισορροπημένη τους σύνθεση από σωματίδια άμμου, ιλύος και αργίλου, η οποία παρέχει ένα ευέλικτο και γόνιμο καλλιεργητικό μέσο για ένα ευρύ φάσμα φυτών. Ακολουθούν τα γενικά εύρη για το pH, την υγρασία και την περιεκτικότητα σύστασης ορυκτών που συχνά σχετίζονται με πηλώδη εδάφη:

- **Εύρος pH:** Τα πηλώδη εδάφη είναι συνήθως κοντά στο ουδέτερο εύρος pH. Το επίπεδο pH των πηλωδών εδαφών μπορούν να κυμαίνονται από ελαφρώς όξινο έως ελαφρώς αλκαλικό, αλλά συνήθως βρίσκεται γύρω από το ουδέτερο. Δηλαδή, το εύρος pH για πηλώδη εδάφη είναι συνήθως μεταξύ 6,0 και 7,5.
- **Ποσοστό υγρασίας:** Τα πηλώδη εδάφη έχουν καλή ικανότητα συγκράτησης νερού ενώ προσφέρουν επίσης αποτελεσματική αποστράγγιση. Λόγω της ισορροπημένης σύνθεσής τους, μπορούν να συγκρατούν νερό χωρίς να παρουσιάζουν υφαλμύρωση. Η περιεκτικότητα σε νερό ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες, οι μέθοδοι άρδευσης και το τοπικό κλίμα. Τυπικά, η περιεκτικότητα σε νερό των πηλωδών εδαφών κυμαίνεται από περίπου 20% έως 40%, ανάλογα με τις συνθήκες.
- **Περιεκτικότητα σε μεταλλικά στοιχεία:** Η περιεκτικότητα σε ανόργανα άλατα των πηλωδών εδαφών είναι συνήθως μέτρια, προσφέροντας καλή ισορροπία βασικών θρεπτικών συστατικών για την ανάπτυξη των φυτών. Η ειδική περιεκτικότητα σε ορυκτά μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως η γεωλογική σύνθεση της περιοχής και οι γεωργικές πρακτικές. Μπορεί να χρειαστούν τροποποιήσεις για την προσαρμογή των επιπέδων θρεπτικών συστατικών, αλλά τα πηλώδη εδάφη έχουν συχνά μια φυσική ικανότητα να υποστηρίζουν την ανάπτυξη των φυτών λόγω της σύνθεσής τους.

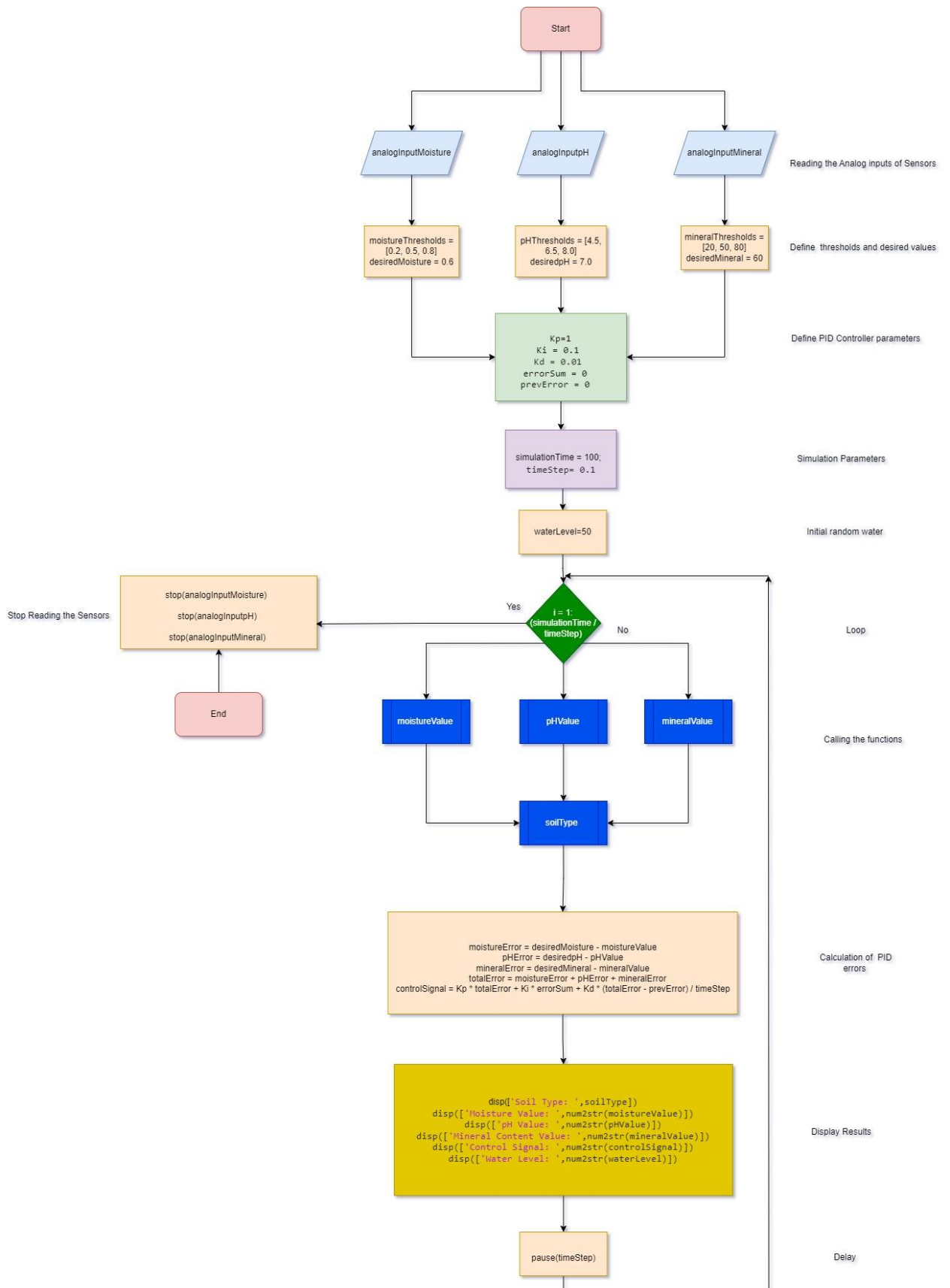
4.5.3 Αργιλώδη εδάφη

Τα αργιλώδη εδάφη έχουν χαρακτηριστικές ιδιότητες λόγω του μεγέθους των λεπτών σωματιδίων και των υψηλών δυνατοτήτων συγκράτησης νερού και θρεπτικών συστατικών. Ακολουθούν τα γενικά εύρη

για το pH, την υγρασία και την περιεκτικότητα σε ανόργανα άλατα που συχνά σχετίζονται με αργιλώδη εδάφη:

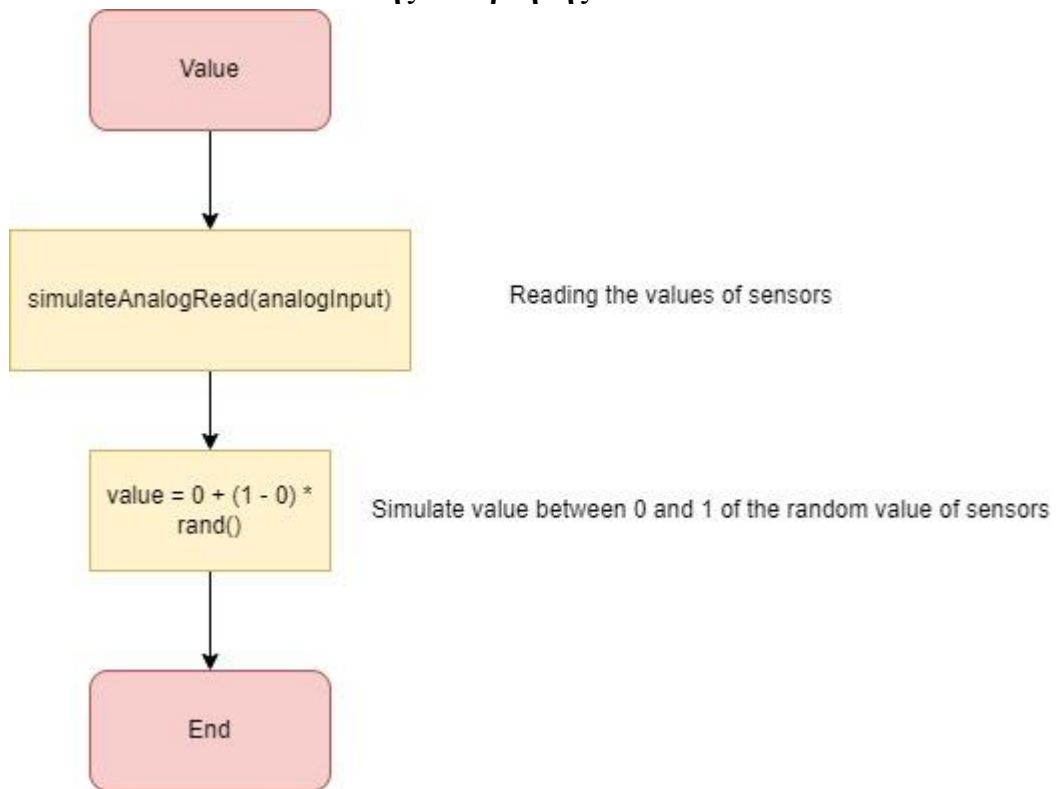
- **Εύρος pH:** Το εύρος pH των αργιλικών εδαφών είναι ευρύ και περιλαμβάνει τόσο όξινα όσο και αλκαλικά εδάφη. Κυμαίνεται από ελαφρώς όξινο έως ελαφρώς αλκαλικό. Το εύρος, για τα αργιλικά εδάφη κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5,5 και 8,0, αλλά μπορεί να υπερβαίνει αυτό το εύρος ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες και παράγοντες.
- **Ποσοστό υγρασίας:** είναι γνωστά για την υψηλή τους ικανότητα συγκράτησης νερού. Τα λεπτά σωματίδια τους τους επιτρέπουν να συγκρατούν αποτελεσματικά το νερό, αλλά μπορούν επίσης να συμπιεστούν και να διαβραχούν εάν δεν διαχειρίζονται σωστά. Η περιεκτικότητα σε υγρασία στα αργιλώδη εδάφη μπορεί να ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με τον καιρό, την αποστράγγιση και το τοπικό κλίμα. Γενικά, τα αργιλώδη εδάφη μπορεί να έχουν περιεκτικότητα σε υγρασία που κυμαίνεται από περίπου 25% έως 50% ή μεγαλύτερη, ανάλογα με τις συνθήκες.
- **Περιεκτικότητα σε ορυκτά:** Τα αργιλώδη εδάφη έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε ανόργανα άλατα σε σύγκριση με τα αμμώδη εδάφη, αλλά το μέγεθος των λεπτών σωματιδίων τους τα κάνει επίσης επιρρεπή στη συμπίεση και τον περιορισμό της ανάπτυξης των ριζών. Η περιεκτικότητα σε ορυκτά μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τη γεωλογική σύνθεση της περιοχής και τις γεωργικές πρακτικές. Ενώ τα αργιλώδη εδάφη περιέχουν φυσικά καλή ποσότητα θρεπτικών συστατικών, η πυκνή δομή τους μπορεί να εμποδίσει τη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών για τα φυτά.

4.6 Flow Chart συνολικού κώδικα κατηγοριοποίησης εδαφών

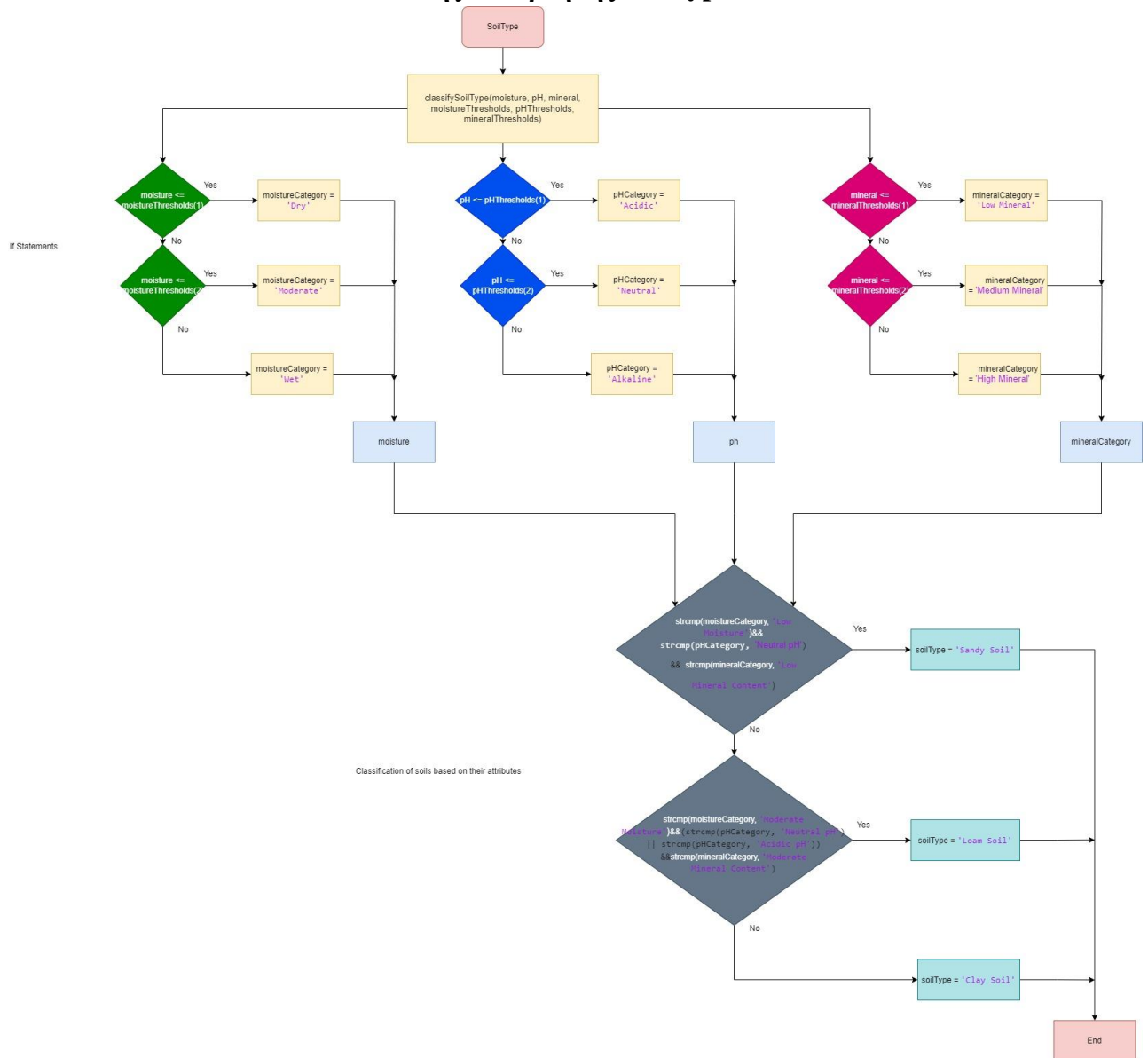


Εικόνα 4.2. Flow Chart Συνολικού κώδικα

4.6.1 Flow Chart της συνάρτησης Value



Εικόνα 4.3. Flow Chart συνάρτησης Value



Εικόνα 4.4. Flow Chart συνάρτησης SoilType

4.7 Συνολικός κώδικας κατηγοριοποίησης εδαφών

```

% Initialize the analog inputs
analogInputMoisture = analoginput(' Moisture Sensor');
addchannel(analogInputMoisture, 1);
analogInputpH = analoginput('pH Sensor');
addchannel(analogInputpH, 2);
analogInputMineral = analoginput('Mineral Content Sensor');
addchannel(analogInputMineral, 3);
% Define soil attribute thresholds
moistureThresholds = [0.2, 0.5, 0.8]; % examples of moisture thresholds(%)
pHThresholds = [4.5, 6.5, 8.0]; % examples of pH thresholds
mineralThresholds = [20, 50, 80]; % examples of mineral content thresholds
% Setpoint random values for desired attributes
desiredMoisture = 0.6;
desiredpH = 7.0;
desiredMineral = 60;

```

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

```
% Define PID controller parameters
Kp = 1; % Proportional gain
Ki = 0.1; % Integral gain
Kd = 0.01; % Derivative gain
% Initialize variables for PID controller
errorSum = 0; % Integral term accumulation
prevError = 0; % Previous error for derivative term
% Simulation parameters
simulationTime = 100; % Total simulation time
timeStep = 0.1; % Time step for simulation
% Initialize water level
waterLevel = 50; % Initial random water level
% Loop
for i = 1:(simulationTime / timeStep)
    % Simulate reading analog sensor values
    moistureValue = simulateAnalogRead(analogInputMoisture);
    pHValue = simulateAnalogRead(analogInputpH);
    mineralValue = simulateAnalogRead(analogInputMineral);
    % Categorize soil based on attributes
    soilType = classifySoilType(moistureValue, pHValue, mineralValue, ...
        moistureThresholds, pHThresholds, mineralThresholds);
    % Calculate errors for PID controller
    moistureError = desiredMoisture - moistureValue;
    pHError = desiredpH - pHValue;
    mineralError = desiredMineral - mineralValue;
    % Calculate total error for PID control
    totalError = moistureError + pHError + mineralError;
    % Calculate control signal using PID controller
    controlSignal = Kp * totalError + Ki * errorSum + Kd * (totalError - prevError) /
timeStep;
    % Update water level based on control signal
    waterLevel = waterLevel + controlSignal;
    % Update integral term and previous error for PID controller
    errorSum = errorSum + totalError * timeStep;
    prevError = totalError;
    % Display results
    disp(['Soil Type: ', soilType]);
    disp(['Moisture Value: ', num2str(moistureValue)]);
    disp(['pH Value: ', num2str(pHValue)]);
    disp(['Mineral Content Value: ', num2str(mineralValue)]);
    disp(['Control Signal: ', num2str(controlSignal)]);
    disp(['Water Level: ', num2str(waterLevel)]);
    % Add necessary delay or loop timing
    pause(timeStep);
end
% Terminate the process of reading the sensors
stop(analogInputMoisture);
stop(analogInputpH);
stop(analogInputMineral);
% Simulated analog read function
function value = simulateAnalogRead(analogInput)
    value = 0 + (1 - 0) * rand(); % Simulate value between 0 and 1
end
% Function to classify soil type based on attributes
function soilType = classifySoilType(moisture, pH, mineral, moistureThresholds,
pHThresholds, mineralThresholds)
    if moisture <= moistureThresholds(1)
        moistureCategory = 'Dry';
```

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

```
elseif moisture <= moistureThresholds(2)
    moistureCategory = 'Moderate';
else
    moistureCategory = 'Wet';
end
if pH <= pHThresholds(1)
    pHCategory = 'Acidic';
elseif pH <= pHThresholds(2)
    pHCategory = 'Neutral';
else
    pHCategory = 'Alkaline';
end
if mineral <= mineralThresholds(1)
    mineralCategory = 'Low Mineral';
elseif mineral <= mineralThresholds(2)
    mineralCategory = 'Medium Mineral';
else
    mineralCategory = 'High Mineral';
end
if strcmp(moistureCategory, 'Low Moisture') &&
    strcmp(pHCategory, 'Neutral pH') &&
    strcmp(mineralCategory, 'Low Mineral Content')
    soilType = 'Sandy Soil';
elseif strcmp(moistureCategory, 'Moderate Moisture') &&
    (strcmp(pHCategory, 'Neutral pH') || strcmp(pHCategory, 'Acidic pH')) &&
    strcmp(mineralCategory, 'Moderate Mineral Content')
    soilType = 'Loam Soil';
else
    soilType = 'Clay Soil';
end
end
```

4.7.1 Επεξήγηση κώδικα

Ο παραπάνω κώδικας συμβάλλει στην διαφοροποίηση των ποικίλων τύπων εδαφών με βάση τα διαφορετικά στοιχεία που αποτελείται, όπως είναι η υγρασία, το pH και τα συστατικά του. Ο κώδικας χωρίζεται σε τρία κομμάτια, το κυρίως πρόγραμμα, και τις δύο συναρτήσεις, Value και SoilType.

Κυρίως Πρόγραμμα:

Στο κυρίως πρόγραμμα, αρχικά διαβάζονται οι από τους τρεις αισθητήρες, οι αναλογικές τιμές τους και στην συνέχεια θέτονται τα όρια και οι επιθυμητές τιμές για τον διαχωρισμό των εδαφών. Στην συνέχεια, ρυθμίζονται οι παράμετροι για τον PID Controller, καθώς και οι χρόνοι προσομοίωσης. Έπειτα, δημιουργεί μια επανάληψη η οποία θα τελειώσει όταν θα ολοκληρωθεί ο χρόνος διάρκειας της διαδικασίας. Η επανάληψη αυτή, καλεί δύο συναρτήσεις, την Value και την SoilType, μέσω των οποίων υπολογίζει το σφάλμα της επιθυμητής τιμής με την πραγματική. Τέλος, εμφανίζει στην οθόνη τα αποτελέσματα και σταματάει να διαβάζει τις τιμές των αισθητήριων οργάνων.

Συνάρτηση Value:

Η συνάρτηση αυτή, δέχεται σαν είσοδο τις αναλογικές τιμές των αισθητήρων και επιστρέφει την τιμή σε 0 και 1.

Συνάρτηση SoilType:

Η συνάρτηση αυτή, δέχεται σαν είσοδο τις τιμές των αισθητήρων μετά την επεξεργασία της συνάρτησης Value καθώς και τους πίνακες ορίων της υγρασίας, του pH και των συστατικών. Έπειτα, προχωρά στον κατηγοριοποίηση των εδαφών με βάση τα στοιχεία τους. Τέλος συγκρίνει τις κατηγορίες με τις προδιαγραφές των εδαφών και τα διαχωρίζει σε αμμώδες, πηλώδες και αργιλώδες και επιστρέφει την κατηγορία του εδάφους.

4.8 Διάγραμμα Ροής στο Simulink

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, το Simulink χρησιμεύει ως καμβάς για τον σχεδιασμό προηγμένων δίδυμων. Τα στοιχεία που μιλούν για τις ιδιότητες του εδάφους, τις κλιματικές πληροφορίες, τα δεδομένα περιποίησης και τα πλαίσια του συστήματος νερού συνδέονται μεταξύ τους για να παρέχουν ένα περιβάλλον τετραγωνικού γραφήματος που αναδημιουργεί ένα συνολικό πλαίσιο. Η δομή και η ροή της επίδειξης αντικατοπτρίζει τις μορφές του πραγματικού κόσμου, ενθαρρύνοντας μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση των στοιχείων εδάφους-φυτών-νερού.

Η κατασκευή μιας συνολικής παράστασης Simulink για το μηχανογραφημένο δίδυμο του συστήματος νερού ακρίβειας απαιτεί διαφορετικά εξαρτήματα και ευφυή. Παρακάτω θα μπορούσε να είναι μια αποσαφηνισμένη απεικόνιση του τρόπου κατασκευής μιας θεμελιώδους μηχανογραφημένης δίδυμης παράστασης Simulink που εστιάζει στα στοιχεία υγρασίας του εδάφους και στο σχεδιασμό του συστήματος νερού.

4.8.1 Στοιχεία που απαρτίζουν το μοντέλου Simulink

Για την δημιουργία ενός μοντέλου Simulink εκτός από τα υποσυστήματα που θα χρησιμοποιηθούν, είναι απαραίτητη η χρήση και ορισμένων βασικών μπλοκ όπως είναι:

- **Input Block:** είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να αναφέρεται σε οποιοδήποτε μπλοκ που παρέχει σήμα εισόδου ή δεδομένα στο σύστημα που μοντελοποιείται. Τα μπλοκ εισόδου αποτελούν θεμελιώδες μέρος των μοντέλων Simulink, καθώς αντιπροσωπεύουν τα εξωτερικά σήματα, τις διαταραχές ή τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υπό ανάλυση συστήματος.

Μερικά γνωστά μπλοκ εισόδου είναι:

1. **Constant Block:** Παρέχει μια σταθερή αριθμητική τιμή ως είσοδο στο μοντέλο σας. Συχνά χρησιμοποιείται για τον καθορισμό σταθερών παραμέτρων ή αρχικών συνθηκών.
2. **Step Block:** Δημιουργεί ένα σήμα εισόδου βήματος, επιτρέποντάς σας να προσομοιώνετε ξαφνικές αλλαγές ή διαταραχές που μοιάζουν με βήματα στο σύστημά σας.
3. **Sine Wave Block:** Παράγει ένα ημιτονοειδές σήμα εισόδου, το οποίο είναι χρήσιμο για τη μοντελοποίηση περιοδικών διακυμάνσεων ή αρμονικών διαταραχών στο σύστημά σας.
4. **Ramp Block:** Παράγει ένα γραμμικά αυξανόμενο ή μειούμενο σήμα εισόδου με την πάροδο του χρόνου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση γραμμικών ράμπων ή χρονικά μεταβαλλόμενων εισόδων.

5. **Pulse Generator Block:** Παράγει μια είσοδο παλμού ή ορθογώνιας κυματομορφής, επιτρέποντάς σας να προσομοιώνετε εισόδους τύπου παλμών ή ενεργοποίησης-απενεργοποίησης.

- **Gain block:** είναι ένα θεμελιώδες δομικό στοιχείο που χρησιμοποιείται για την κλίμακα ή τον πολλαπλασιασμό ενός σήματος εισόδου με έναν σταθερό παράγοντα. Επιτρέπει να προσαρμόσετε το πλάτος ή το κέρδος ενός σήματος στο μοντέλο Simulink σας. Το μπλοκ κέρδους αναπαρίσταται ως ένα ορθογώνιο μπλοκ με ένα βέλος εισόδου στη μία πλευρά και ένα βέλος εξόδου στην άλλη, τυπικά επισημασμένο με μια τιμή κέρδους ή μια μαθηματική έκφραση.

Ορισμένες συνήθειες περιπτώσεις χρήσης για τα Gain Block είναι:

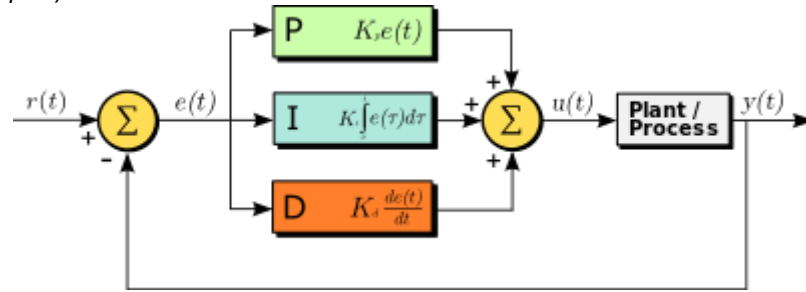
1. **Ενίσχυση:** Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε ένα μπλοκ κέρδους για να ενισχύσετε ή να εξασθενήσετε ένα σήμα πολλαπλασιάζοντάς το με έναν σταθερό συντελεστή. Αυτό γίνεται συχνά για να ρυθμίσετε το μέγεθος ενός σήματος ελέγχου ή μιας ένδειξης αισθητήρα.
2. **Κλιμάκωση:** Τα μπλοκ κέρδους, είναι χρήσιμα για την κλιμάκωση φυσικών μονάδων. Για παράδειγμα, μπορείτε να μετατρέψετε μια ένδειξη αισθητήρα σε βολτ σε μέτρα εφαρμόζοντας έναν κατάλληλο συντελεστή κλίμακας.

- **Output Block:** χρησιμοποιείτε διάφορους τύπους μπλοκ για πρόσβαση ή οπτικοποίηση των εξόδων του μοντέλου. Ο τρόπος εξαγωγής και εμφάνισης δεδομένων εξόδου εξαρτάται από τους συγκεκριμένους στόχους μοντελοποίησης και προσομοίωσης. Ακολουθούν ορισμένες συνήθειες μέθοδοι πρόσβασης και εμφάνισης εξόδων στο Simulink:

1. **Scope Block:** Το μπλοκ πεδίου είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Εμφανίζει σήματα και τις κυματομορφές των σημάτων αυτών κατά την προσομοίωση.
2. **Workspace Block:** Το Workspace επιτρέπει να αποθηκεύετε δεδομένα προσομοίωσης στον χώρο εργασίας του MATLAB, όπου μπορείτε να τα αναλύσετε ή να τα οπτικοποιήσετε περαιτέρω. Αυτό το μπλοκ είναι χρήσιμο για την εξαγωγή αποτελεσμάτων προσομοίωσης για μετα-επεξεργασία.
3. **Display block:** Ανάλογα με τη φύση των δεδομένων εξόδου, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε διάφορα μπλοκ εμφάνισης, όπως το Display, Display Block και Display Data Log. Αυτά τα μπλοκ παρέχουν επιλογές για την προσαρμογή της μορφής και την παρουσίαση των δεδομένων εξόδου.

- **PID controller block:** Τέλος, για να γίνει ο έλεγχος και ο σωστός καταμερισμός του νερού, έτσι ώστε να μην υπάρχει ούτε λειψυδρία αλλά ούτε και υφαλμύρωση, θα χρησιμοποιηθεί ένας PID Controller. Ο PID Controller (ή αλλιώς proportional–integral–derivative controller) είναι ένας ελεγκτής τριών ορών που δουλεύει σε ένα σύστημα κλειστού βρόγχου. Ο ελεγκτής αυτός είναι ευρέως γνωστός και χρησιμοποιείται σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου και σε εφαρμογές που απαιτούν ακριβή και βελτιστοποιημένο αυτόματο έλεγχο.

Πρακτικά, ο PID Controller υπολογίζει συνεχώς μια τιμή σφάλματος $e(t)$ ως τη διαφορά μεταξύ ενός επιθυμητού σημείου ρύθμισης (R) και μιας μετρούμενης μεταβλητής διεργασίας (Y) και εφαρμόζει μια διόρθωση που βασίζεται σε αναλογικούς (Proportional), ολοκληρωτικούς (Integral) και διαφορικούς (Derivative) όρους, εξ' ου και το όνομα PID [90].



Εικόνα 4.5. Απεικόνιση του PID Controller

Η συνάρτηση μεταφοράς του PID ελεγκτή έχει την ακόλουθη μορφή :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Εικόνα 4.6. Μαθηματική σχέση PID Controller

Όπου K_p = Αναλογικό κέρδος , K_i = Ολοκληρωτικό κέρδος και K_d = Διαφορικό κέρδος.

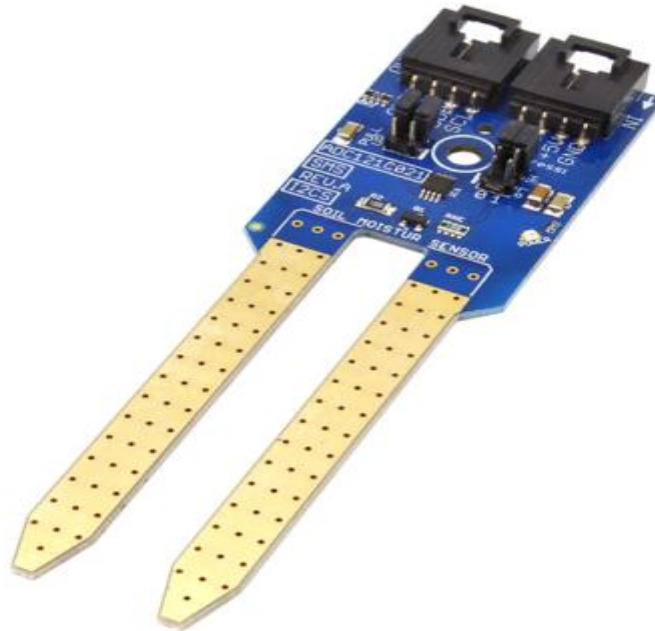
Επίδραση του PID στη συμπεριφορά του συστήματος κλειστού βρόχου

Τύπος Ελεγκτή	Χρόνος Αποκατάστασης	Μόνιμο Σφάλμα	Χρόνος Ανόδου	Υπερύψωση
P	Μικρή Αλλαγή	Μείωση	Μείωση	Αύξηση
I	Αύξηση	Εξάλειψη	Μείωση	Αύξηση
D	Μείωση	Μικρή Αλλαγή	Μικρή Αλλαγή	Μείωση

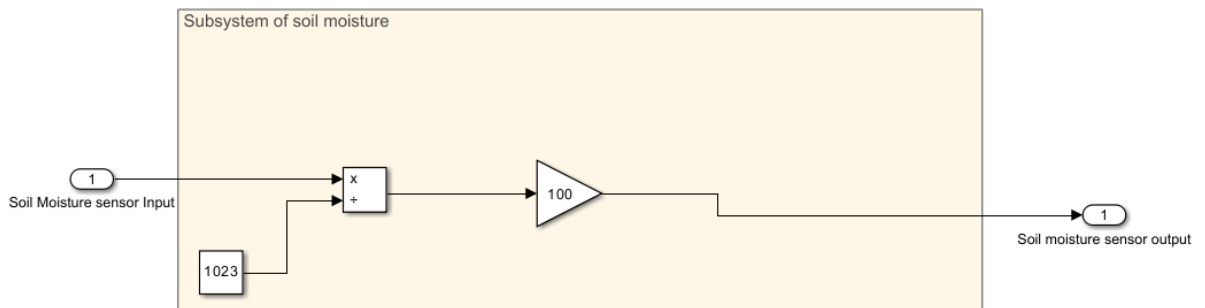
Πίνακας 4.1. Επίδραση του PID στη συμπεριφορά του συστήματος κλειστού βρόχου

Για την προσομοίωση του συνολικού μοντέλου στο Simulink, θα χρησιμοποιηθούν τα προαναφερόμενα μπλοκ, με τα οποία θα δημιουργηθούν τα παρακάτω υποσυστήματα:

- Ένα υποσύστημα το οποίο θα χρησιμεύει για την μετατροπή του αισθητήρα υγρασίας εδάφους. Θα δέχεται σαν είσοδο την τιμή που μετράει ο αισθητήρας, θα την διαιρεί με τον μέγιστο αριθμό, ο οποίος είναι 1023, και θα το πολλαπλασιάζει επί 100, για να είναι σε μορφή ποσοστιαίου αριθμού. Εάν η τιμή του αισθητήρα είναι 1000 ή μεγαλύτερη από αυτήν, τότε ο αισθητήρας δεν βρίσκεται στο έδαφος ή ο αισθητήρας είναι αποσυνδεδεμένος. Όταν η τιμή του είναι μεγαλύτερη από 600 αλλά μικρότερη από 1000 τότε το έδαφος είναι στεγνό, ενώ αν είναι από 370 έως 600 τότε το έδαφος είναι υγρό. Τέλος, εάν η τιμή του αισθητήρα είναι μικρότερη από 370, τότε ο αισθητήρας βρίσκεται στο νερό.



Εικόνα 4.7. Αισθητήρας υγρασίας εδάφους με αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα

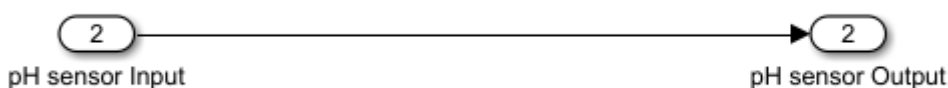


Εικόνα 4.8. Υποσύστημα για την μετατροπή του αισθητήρα υγρασίας εδάφους.

- Ένα υποσύστημα το οποίο θα χρησιμεύει για την μετατροπή του pH του εδάφους. Θα δέχεται σαν είσοδο την τιμή που μετράει ο αισθητήρας. Η τιμή του pH κυμαίνεται από 3 έως 9 και χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της οξύτητας ενός εδάφους. Εδάφη των οποία η τιμή του pH είναι μικρότερη από 7 χαρακτηρίζονται ως όξινα, ενώ διαλύματα με pH μεγαλύτερο από 7 χαρακτηρίζονται αλκαλικά. Τέλος, τα εδάφη με pH κοντά στο 7 ονομάζονται ουδέτερα και είναι τα πιο χρήσιμα στην γεωργία.

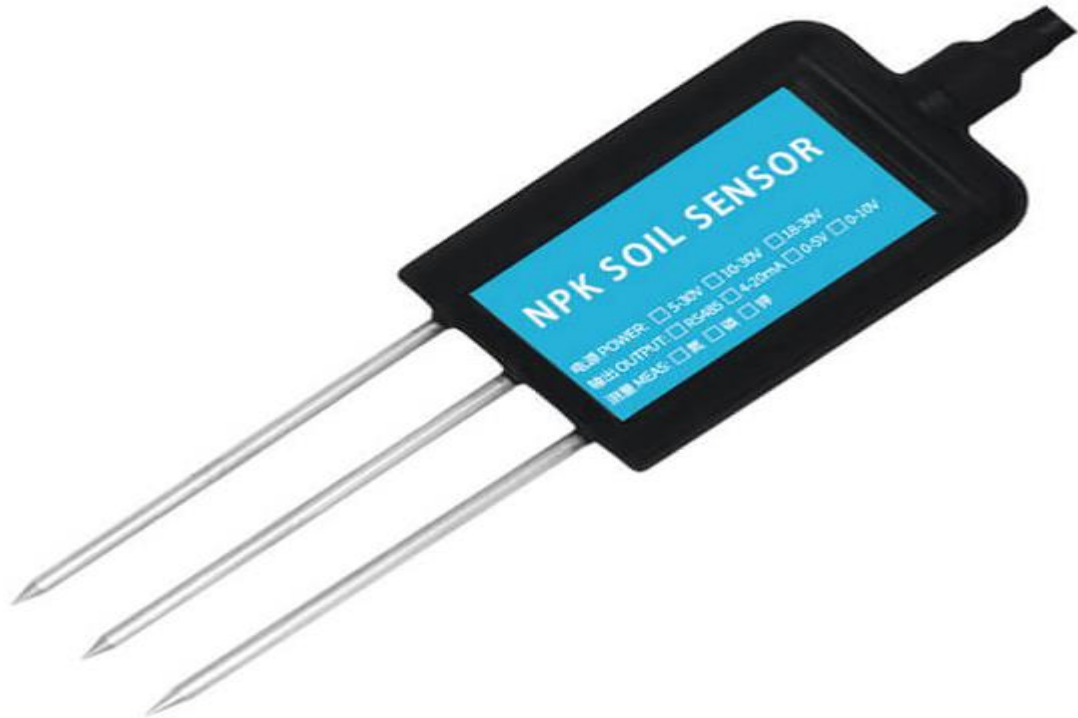


Εικόνα 4.9. Αισθητήρας pH εδάφους

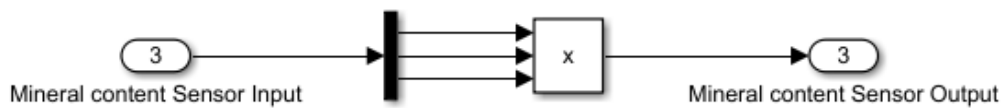


Εικόνα 4.10 Υποσύστημα για την τιμή του αισθητήρα pH εδάφους.

- Ένα υποσύστημα το οποίο θα χρησιμεύει για την απεικόνιση των συστατικών του εδάφους. Θα δέχεται σαν είσοδο τις τιμές που μετράει ο αισθητήρας. Ο αισθητήρας NPK εδάφους είναι χρήσιμος για την ανίχνευση της περιεκτικότητας των θρεπτικών συστατικών όπως είναι το άζωτο, φώσφορο και κάλιο στο έδαφος και την κρίση για το κατά πόσο είναι γόνιμο το έδαφος, διευκολύνοντας έτσι τη συστηματική αξιολόγηση της κατάστασης του. Το εύρος του αισθητήρα αυτού είναι από 0 έως 1999 mg/kg. Μπορεί να θαφτεί στο έδαφος για μεγάλο χρονικό διάστημα, είναι ανθεκτικό στη μακροχρόνια ηλεκτρόλυση, έχει αντοχή στη διάβρωση και είναι εντελώς αδιάβροχο. Οι αισθητήρες NPK χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση της περιεκτικότητας σε μεταλλικά στοιχεία και είναι αρκετά σημαντικοί στους τομείς της γεωργία ακριβείας, στην έρευνα του εδάφους και στην καλλιέργεια των φυτών.

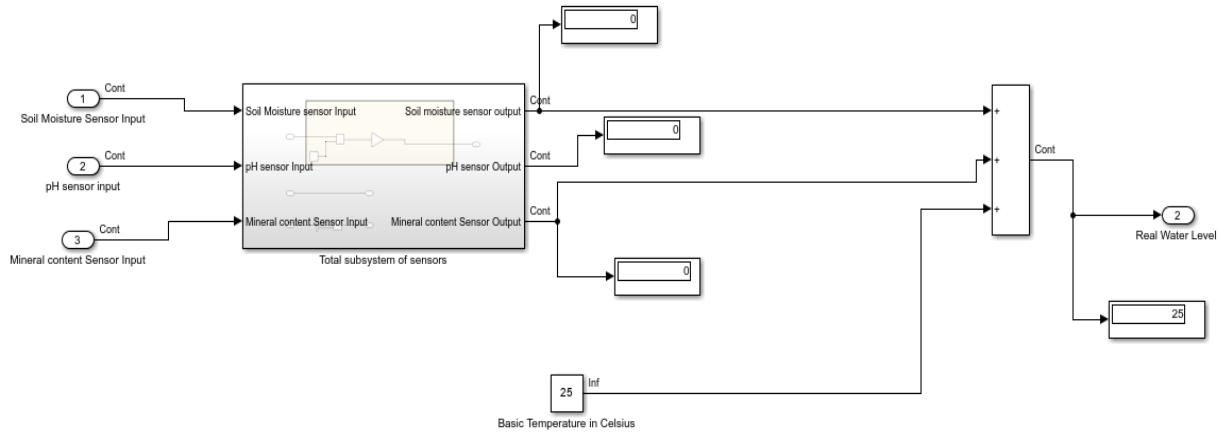


Εικόνα 4.11. Αισθητήρας NPK εδάφους



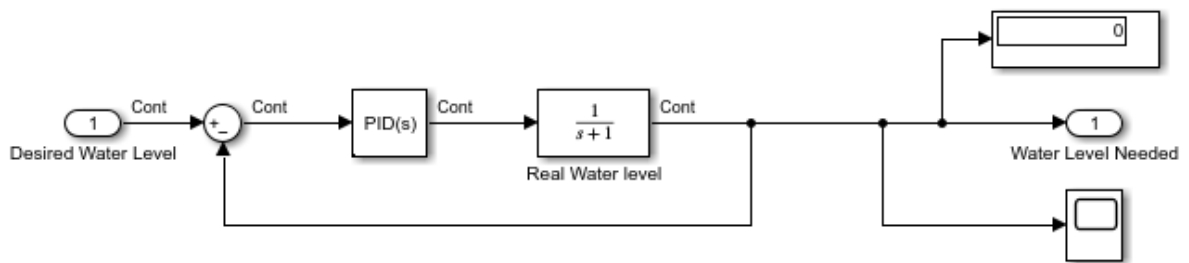
Εικόνα 4.12. Υποσύστημα για την τιμή των NPK του εδάφους.

Στην συνέχεια, λαμβάνοντας τις εξόδους και από τους τρεις αυτούς αισθητήρες, θα φτιαχτεί άλλο ένα υποσύστημα το οποίο, μέσω των τιμών αυτών θα υπολογίζει την ποσότητα του νερού που έχει εκείνη την στιγμή το έδαφος με θερμοκρασία 25°C κατά μέσο όρο.



Εικόνα 4.13. Συνολικό Υποσύστημα για τον υπολογισμό του επιπέδου του νερού.

4.9 Τελικό Σύστημα στο Simulink



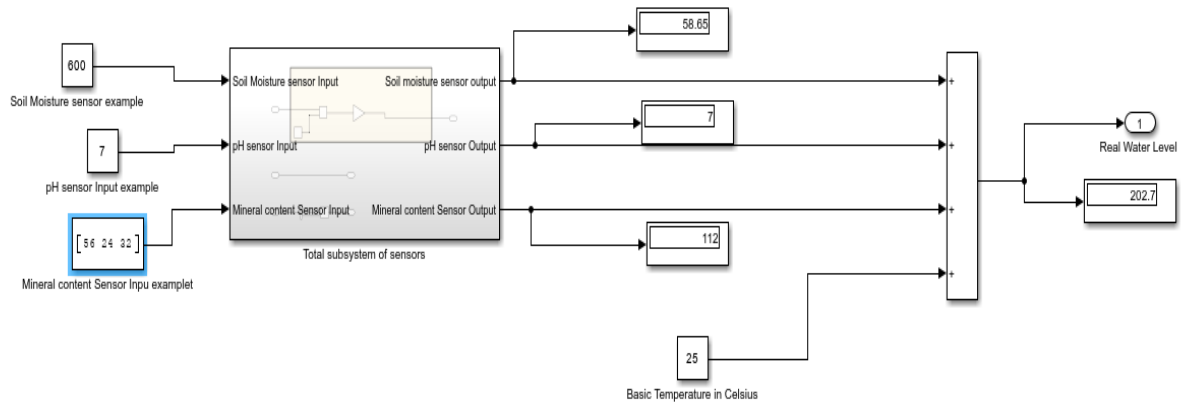
Εικόνα 4.14. Απεικόνιση πλήρους συστήματος

Το παραπάνω μοντέλο αναπαριστά το πως θα ήταν ένα τέτοιο μοντέλο σε μια πραγματική χρόνο. Δεν είναι η δυνατή η αληθινή πρόβλεψη, καθώς το μοντέλο αυτό είναι μια προσομοίωση και δεν έχει τις πραγματικές μετρήσεις από μια τέτοια εφαρμογή.

4.10 Παράδειγμα του Συστήματος.

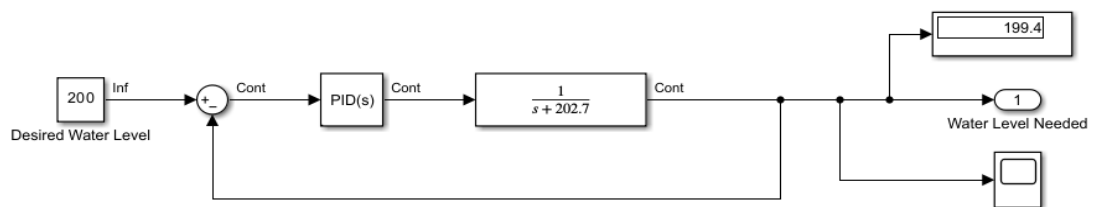
Για την ανάδειξη αποτελέσματος του συστήματος αυτού, θα εισαχθούν τυχαίες τιμές, όπως φαίνονται παρακάτω:

Ψηφιακό Δίδυμο Εδάφους

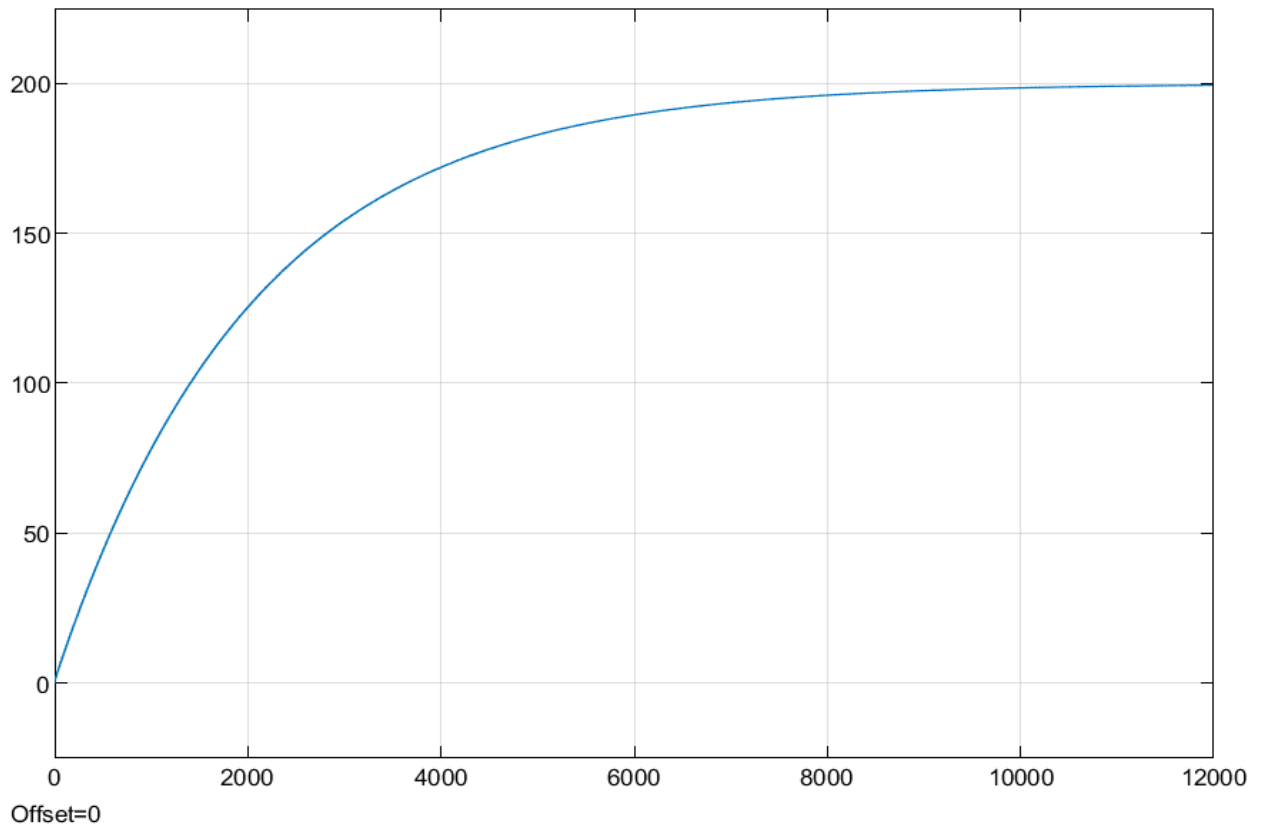


Εικόνα 4.15. Αποτέλεσμα της πραγματικής τιμής του νερού

Έπειτα, το αποτέλεσμα αυτό θα εισαχθεί στο υποσύστημα που αναγράφει Previous Value of Subsystem. Άρα, ακολουθεί το παρακάτω μοντέλο:



Εικόνα 4.16. Αποτέλεσμα της απαιτούμενης τιμής του νερού μετά τον PID Controller



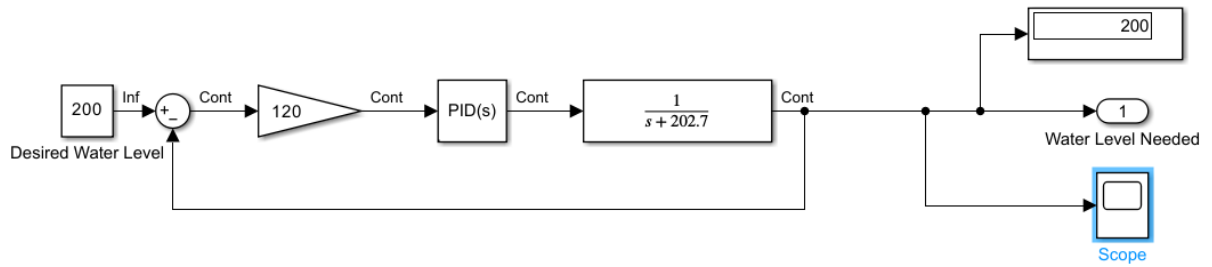
Εικόνα 4.17. Κυματομορφή Χρόνου (σε Δευτερόλεπτα) - Τιμές νερού

Σχόλια:

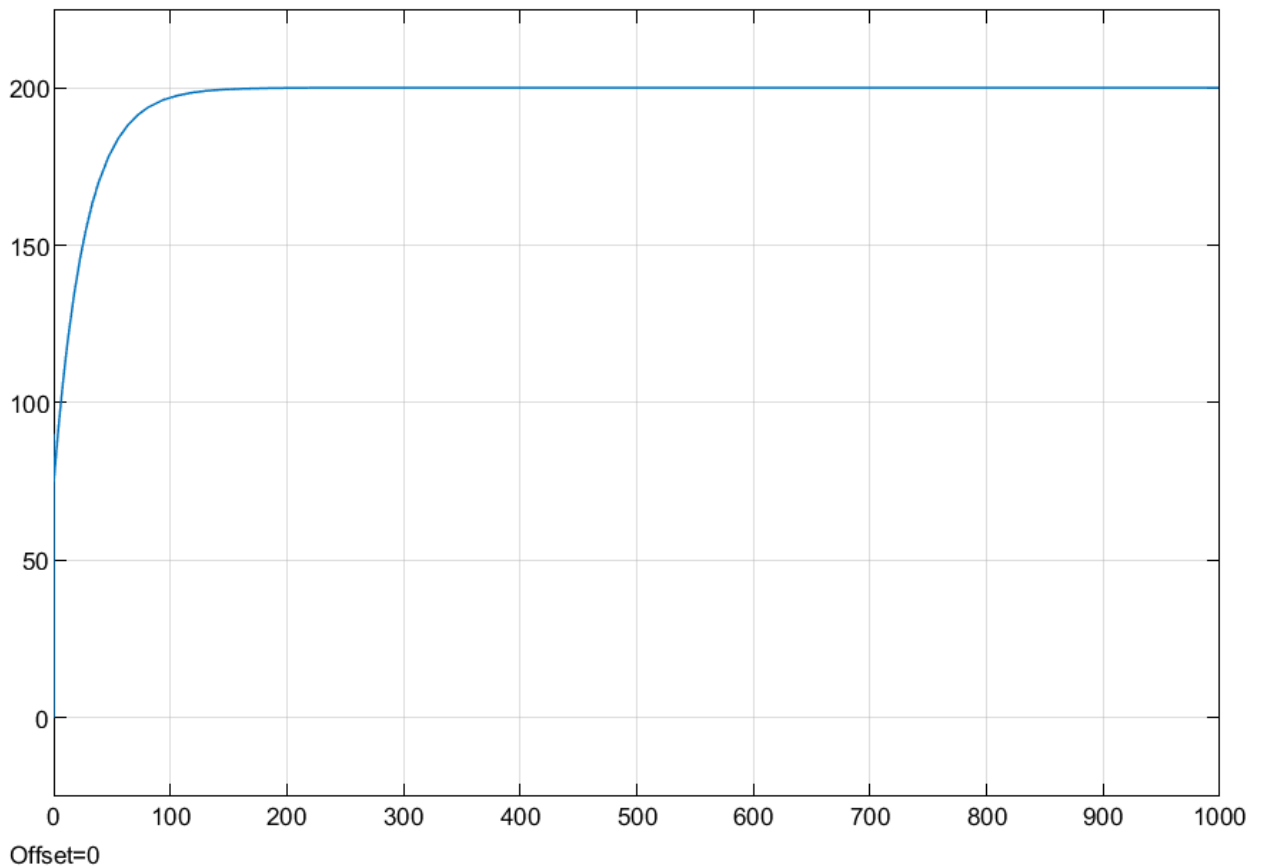
Παρατηρούμε ότι μετά από 12000 δευτερόλεπτα ο ελεγκτής PID φέρνει την τιμή του σφάλματος αρκετά κοντά στην επιθυμητή. Μια τέτοια διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα, για την πιο γρήγορη εξυπηρέτηση, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια ενίσχυση η οποία θα γλύτωνε αρκετό χρόνο.

Υπενθυμίζεται ότι το σύστημα αυτό θέτει την κατάλληλη στάθμη νερού με βάση το pH, την υγρασία και τα μεταλλικά συστατικά του κάθε τύπου εδάφους σε φυσιολογικές συνθήκες θερμοκρασίας, για παράδειγμα, στους 25°C.

4.10.1 Παράδειγμα του Συστήματος με ενίσχυση



Εικόνα 4.18. Αποτέλεσμα της απαιτούμενης τιμής του νερού με ενίσχυση πριν τον PID Controller



Εικόνα 4.19. Κυματομορφή Χρόνου (σε Δευτερόλεπτα) - Τιμής νερού με ενίσχυση

Σχόλια:

Μπορεί κάλλιστα να παρατηρηθεί ότι, με την χρήση ενίσχυσης ο απαιτούμενος χρόνος του ελεγκτή για να προσφέρει μια τιμή κοντά στην επιθυμητή, μειώνεται δραματικά. Ήδη κίολας από τα 100 δευτερόλεπτα έχουμε την τιμή του νερού που χρειάζεται.

5 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η συμμετοχή του εδάφους στη γεωργία είναι σημαντική και ποικίλη, καθώς επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη των καλλιεργειών, την παραγωγικότητα και τη συνολική βιωσιμότητα. Λειτουργεί ως κρίσιμη δεξαμενή θρεπτικών συστατικών, ως μέσο για την αγκύρωση των ριζών, ως ρυθμιστής της κατακράτησης και της αποστράγγισης του νερού και ως προαγωγός του αερισμού και της μικροβιακής δραστηριότητας. Για τις αποτελεσματικές γεωργικές τεχνικές είναι κρίσιμο να προσαρμόζονται οι εδαφικές συνθήκες, ώστε να ανταποκρίνονται στις ιδιαίτερες απαιτήσεις των καλλιεργειών.

Η κατανόηση των διαφορών στο pH, την υγρασία και την περιεκτικότητα σε μεταλλικά στοιχεία μεταξύ των διαφόρων τύπων εδάφους είναι θεμελιώδης για την αποτελεσματική διαχείριση της γης και την επιτυχή καλλιέργεια της. Τα αμμώδη εδάφη, που χαρακτηρίζονται από την ταχεία αποστράγγιση και τη χαμηλότερη κατακράτηση θρεπτικών ουσιών, απαιτούν συχνότερη άρδευση και συμπλήρωση θρεπτικών ουσιών. Τα πηλώδη εδάφη, με τις ισορροπημένες ιδιότητές τους, υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα καλλιεργειών και θεωρούνται ιδανικά για πολλές γεωργικές εφαρμογές. Αντίθετα, τα αργιλώδη εδάφη διατηρούν την υγρασία και τα θρεπτικά συστατικά αλλά απαιτούν προσεκτική διαχείριση του νερού για να αποφευχθεί η συμπύκνωση και η υπερχειλίση. Οι χαρακτηριστικές τιμές του pH αυτών των εδαφών, επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα θρεπτικών ουσιών και την υγεία των φυτών, υπογραμμίζοντας τη σημασία των εδαφικών δοκιμών και των τροποποιήσεων για τη διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών.

Η άρδευση ακριβείας, μια τεχνολογία γεωργικής ανάπτυξης, αποτελεί απόδειξη του μεταρρυθμιστικού δυναμικού της τεχνολογίας στη σύγχρονη γεωργία. Με την σωστή παροχή νερού στα φυτά με βάσει τις συγκεκριμένες ανάγκες τους, η άρδευση ακριβείας βελτιστοποιεί τη χρήση του νερού, αυξάνει τις αποδόσεις των καλλιεργειών και ελαχιστοποιεί τη σπατάλη νερού. Αυτή η τεχνική αξιοποιεί τη δύναμη της ανάλυσης δεδομένων, των αισθητήρων και του αυτοματισμού για να δημιουργήσει ένα βιώσιμο και αποτελεσματικό σύστημα ποτίσματος που συμβαδίζει με την αυξανόμενη ζήτηση για παραγωγή τροφίμων σε έναν κόσμο που πλήττεται από σοβαρό κίνδυνο έλλειψης νερού.

Η ενσωμάτωση αυτών των χαρακτηριστικών του εδάφους στην κωδικοποίηση και την ανάπτυξη αλγορίθμων είναι απαραίτητη για το σύστημα νερού ακριβείας. Η δημιουργία λογισμικού που ενσωματώνει δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο, μετεωρολογικές προβλέψεις και απαιτήσεις φυτών επιτρέπει δυναμικές και προσαρμοστικές στρατηγικές άρδευσης. Οι αλγόριθμοι μπορούν να σχεδιαστούν για να αναλύουν τα επίπεδα υγρασίας, να αξιολογούν τις ανάγκες σε θρεπτικά συστατικά και να προβλέπουν τον βέλτιστο χρόνο άρδευσης. Με την κωδικοποίηση του συστήματος αυτού, οι καινοτόμοι γεωργικής τεχνολογίας συμβάλλουν στην αποτελεσματικότερη χρήση του νερού, στη βελτιωμένη παραγωγικότητα των καλλιεργειών και στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Καθώς ο κόσμος αντιμετωπίζει αυξανόμενες προκλήσεις που σχετίζονται με τη λειψυδρία και την επισιτιστική ασφάλεια, η άρδευση ακριβείας και οι συναφείς τεχνολογίες παρέχουν μια πολλά υποσχόμενη πορεία προς ένα πιο ανθεκτικό και παραγωγικό γεωργικό μέλλον.

Το MATLAB και το SIMULINK, δύο εξέχοντα εργαλεία στη μηχανική και την επιστημονική έρευνα, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην προώθηση της τεχνολογίας άρδευσης ακριβείας. Οι υπολογιστικές δυνατότητες του MATLAB επιτρέπουν την ανάλυση πολύπλοκων συνόλων δεδομένων από αισθητήρες που παρακολουθούν την υγρασία του εδάφους, τις καιρικές συνθήκες και την ανάπτυξη των φυτών. Το SIMULINK, με τα χαρακτηριστικά προσομοίωσης και μοντελοποίησης, βοηθά στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων ελέγχου άρδευσης πριν από την εφαρμογή σε πραγματικό κόσμο. Η συνεργασία μεταξύ τους δίνει τη δυνατότητα σε ερευνητές και μηχανικούς να αναπτύξουν εξελιγμένους αλγόριθμους άρδευσης ακριβείας και στρατηγικές ελέγχου που διασφαλίζουν τη βέλτιστη διανομή νερού στα φυτά, οδηγώντας σε βιώσιμες γεωργικές πρακτικές, καθώς και στην εξοικονόμηση των υδάτινων πόρων, πρόβλημα που πλήττει την βιωσιμότητα και την οικονομία μια σύγχρονης κοινωνίας.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] “What is Soil? | Natural Resources Conservation Service,” *Natural Resources Conservation Service*. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/education-and-teaching-materials/what-is-soil>
- [2] J. C. Dijkerman, “Pedology as a science: The role of data, models and theories in the study of natural soil systems,” *Geoderma*, vol. 11, no. 2, pp. 73–93, Mar. 1974, doi: 10.1016/0016-7061(74)90009-3.
- [3] “Soil Management.” https://www.ctahr.hawaii.edu/mauisoil/a_comp.aspx
- [4] G. J. Churchman, “Soil phases: the inorganic solid phase,” in *Cambridge University Press eBooks*, 2006, pp. 23–44. doi: 10.1017/cbo9780511535802.004.
- [5] “Soil Liquid Phase Composition - 1st Edition,” May 21, 2001. <https://shop.elsevier.com/books/soil-liquid-phase-composition/snakin/978-0-444-50675-7>
- [6] M. Kleber and M. G. Johnson, “Advances in Understanding the Molecular Structure of Soil Organic Matter,” in *Elsevier eBooks*, 2010, pp. 77–142. doi: 10.1016/s0065-2113(10)06003-7.
- [7] Madhu, “Difference Between Primary and Secondary Minerals,” *Compare the Difference Between Similar Terms*, Mar. 24, 2020. <https://www.differencebetween.com/difference-between-primary-and-secondary-minerals/>
- [8] Christina Martinez “Types of Rocks and Soil,” *Sciencing*, Mar. 02, 2019. <https://sciencing.com/types-rocks-soil-6659814.html>
- [9] “Difference Between Chemical and Physical Weathering,” *Sciencing*, Mar. 02, 2019. <https://sciencing.com/difference-between-chemical-physical-weathering-5827944.html>
- [10] “Chemical Weathering | Definition, Types & Examples - Video & Lesson Transcript | Study.com,” *study.com*. <https://study.com/academy/lesson/what-is-chemical-weathering-definition-process-examples.html>
- [11] Hassan R. El-Ramady, T.A. Alshaal, M. Amer, É. Domokos-Szabolcsy, N. Elhawat, J. Prokisch, and M. F. Eri. “Soil Quality and Plant Nutrition,” *ResearchGate*, Oct. 12, 2014. https://www.researchgate.net/publication/268747111_Soil_Quality_and_Plant_Nutrition
- [12] T. R. Lartey, “Dynamics of Soil Flora and Fauna in Biological Control of Soil Inhabiting Plant Pathogens,” *Plant Pathology Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 125–142, Apr. 2006, doi: 10.3923/ppj.2006.125.142.
- [13] Pedro A. Sanchez. “Soil Physical Properties,” in *Cambridge University Press eBooks*, 2019, pp. 134–175. doi: 10.1017/9781316809785.008.
- [14] J. M. Moreno-Maroto and J. Alonso-Azcárate, “Evaluation of the USDA soil texture triangle through Atterberg limits and an alternative classification system,” *Applied Clay Science*, vol. 229, p. 106689, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.clay.2022.106689.

- [15] J. R. Nimmo, “Aggregation: Physical Aspects,” in *Elsevier eBooks*, 2013. doi: 10.1016/b978-0-12-409548-9.05087-9.
- [16] S. Tiwari, “Physical & Chemical Properties of Soil,” *Agriculture Wale*, Jun. 2023, [Online]. Available: <https://www.agriculturewale.com/physical-chemical-properties-of-soil/>
- [17] Y. Zhang, W. Wu, and H. Liu, “Factors affecting variations of soil pH in different horizons in hilly regions,” *PLOS ONE*, vol. 14, no. 6, p. e0218563, Jun. 2019, doi: 10.1371/journal.pone.0218563.
- [18] G. Sposito, “Soil | Definition, Importance, Types, Erosion, Composition, & Facts,” *Encyclopedia Britannica*, Sep. 08, 2023. <https://www.britannica.com/science/soil>
- [19] P. Schad, “World Reference Base for Soil Resources,” in *Elsevier eBooks*, 2017. doi: 10.1016/b978-0-12-409548-9.10496-8.
- [20] K. Sergieieva, “Precision Irrigation Methods And Their Management,” *EOS Data Analytics*, Aug. 31, 2023. <https://eos.com/blog/precision-irrigation/>
- [21] M. N. Anjum, M. J. M. Cheema, F. Hussain, and R. Wu, “Precision irrigation,” in *Elsevier eBooks*, 2023, pp. 85–101. doi: 10.1016/b978-0-443-18953-1.00007-6.
- [22] A. Tajer, “How Soil Moisture Can Affect Your Plant's Growth,” *Greenway Biotech, Inc.*, Jan. 29, 2020. <https://www.greenwaybiotech.com/blogs/gardening-articles/how-soil-moisture-affects-your-plants-growth>
- [23] T. C. Hsiao, “Plant Responses to Water Stress,” *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 24, no. 1, pp. 519–570, Jun. 1973, doi: 10.1146/annurev.pp.24.060173.002511.
- [24] O. Adeyemi, I. G. Grove, S. Peets, and T. Norton, “Advanced Monitoring and Management Systems for Improving Sustainability in Precision Irrigation,” *Sustainability*, vol. 9, no. 3, p. 353, Feb. 2017, doi: 10.3390/su9030353.
- [25] D. Gelerter, “Precision Irrigation Gives Growers 3 Massive Advantages,” *Farm21*, Apr. 2023, [Online]. Available: <https://www.farm21.com/precision-irrigation-3-advantages/>
- [26] D. Gelerter, “Capacitive Soil Moisture Sensors: A Comprehensive Overview,” *Farm21*, May 2023, [Online]. Available: <https://www.farm21.com/overview-of-capacitive-soil-moisture-sensors/>
- [27] J. Pytka, P. Budzynski, M. Kamiński, T. Lyszczuk, and J. Józwick, “Application of the TDR Soil Moisture Sensor for Terramechanical Research,” *Sensors*, vol. 19, no. 9, p. 2116, May 2019, doi: 10.3390/s19092116.
- [28] H. Eller and A. Denoth, “A capacitive soil moisture sensor,” *Journal of Hydrology*, vol. 185, no. 1–4, pp. 137–146, Nov. 1996, doi: 10.1016/0022-1694(95)03003-4.

- [29] D. J. Mulla, “Geostatistics, Remote Sensing and Precision Farming,” *Novartis Foundation Symposium*, pp. 100–119, Sep. 2007, doi: 10.1002/9780470515419.ch7.
- [30] “Applying remote sensing in precision farming-a case study in Yucheng,” *IEEE Conference Publication / IEEE Xplore*, Sep. 01, 2010. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5665531>
- [31] P. K. Mani, A. Mandal, S. Biswas, B. Sarkar, T. Mitran, and R. S. Meena, “Remote Sensing and Geographic Information System: A Tool for Precision Farming,” in *Springer eBooks*, 2020, pp. 49–111. doi: 10.1007/978-981-15-6864-0_2.
- [32] Kassim, M. R. M., Mat, I., & Harun, A. N. “Wireless Sensor Network in precision agriculture application,” *IEEE Conference Publication / IEEE Xplore*, Jul. 01, 2014. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6878963>
- [33] D. Thakur, Y. Kumar, A. Kumar, and P. K. Singh, “Applicability of Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture: A Review,” *Wireless Personal Communications*, vol. 107, no. 1, pp. 471–512, Apr. 2019, doi: 10.1007/s11277-019-06285-2.
- [34] M. Keshtgari and A. Deljoo, “A Wireless Sensor Network Solution for Precision Agriculture Based on Zigbee Technology,” *Wireless Sensor Network*, vol. 04, no. 01, pp. 25–30, Jan. 2012, doi: 10.4236/wsn.2012.41004.
- [35] “Big Data and Decision Support Systems for Precision Agriculture,” *Frontiers*. <https://www.frontiersin.org/research-topics/50942/big-data-and-decision-support-systems-for-precision-agriculture>
- [36] R. Torres-Sánchez, H. Navarro-Hellín, A. Guillamón, R. San-Segundo, M. C. Ruiz-Abellón, and R. D. Miguel, “A Decision Support System for Irrigation Management: Analysis and Implementation of Different Learning Techniques,” *Water*, vol. 12, no. 2, p. 548, Feb. 2020, doi: 10.3390/w12020548.
- [37] T. D. Kelly, T. Foster, and D. M. Schultz, “Assessing the value of adapting irrigation strategies within the season,” *Agricultural Water Management*, vol. 275, p. 107986, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.agwat.2022.107986.
- [38] A. Dobermann and P. F. White, “Strategies for nutrient management in irrigated and rainfed lowland rice systems,” in *Springer eBooks*, 1999, pp. 1–26. doi: 10.1007/978-94-011-5078-1_1.
- [39] S. Dabach, N. Lazarovitch, J. Šimůnek, and U. Shani, “Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status,” *Irrigation Science*, vol. 31, no. 1, pp. 27–36, May 2011, doi: 10.1007/s00271-011-0289-x.
- [40] Z. Ladányi, K. Barta, V. Blanka, and B. Pálffy, “Assessing Available Water Content of Sandy Soils to Support Drought Monitoring and Agricultural Water Management,” *Water Resources Management*, vol. 35, no. 3, pp. 869–880, Jan. 2021, doi: 10.1007/s11269-020-02747-6.
- [41] B. D. Anaba *et al.*, “Soil texture and watering impact on pot recovery of soil-stripped oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings,” *Heliyon*, vol. 6, no. 10, p. e05310, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05310.

- [42] R. E. Schattman *et al.*, “Effects of irrigation scheduling approaches on soil moisture and vegetable production in the Northeastern U.S.A.,” *Agricultural Water Management*, vol. 287, p. 108428, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.agwat.2023.108428.
- [43] CRC for Irrigation Futures, “A scoping study on measuring and monitoring tools and technology for precision irrigation : University of Southern Queensland Repository.” <https://research.usq.edu.au/item/9x9xq/a-scoping-study-on-measuring-and-monitoring-tools-and-technology-for-precision-irrigation>
- [44] R. G. Perea, A. Daccache, J. A. R. Díaz, E. C. Poyato, and J. W. Knox, “Modelling impacts of precision irrigation on crop yield and in-field water management,” *Precision Agriculture*, vol. 19, no. 3, pp. 497–512, Aug. 2017, doi: 10.1007/s11119-017-9535-4.
- [45] L. Ye *et al.*, “Precision Fertilization and Irrigation: Progress and Applications,” *AgriEngineering*, vol. 4, no. 3, pp. 626–656, Jul. 2022, doi: 10.3390/agriengineering4030041.
- [46] M. Farjad, “Role of Precision Irrigation Methods in Modern Farming,” *GeoPard Agriculture*, Aug. 2023, [Online]. Available: <https://geopard.tech/blog/role-of-precision-irrigation-methods-in-modern-farming/>
- [47] D. E. Chami, J. W. Knox, and A. Daccache, “Assessing the financial and environmental impacts of precision irrigation in a humid climate,” *Horticultural Science*, vol. 46, no. No. 1, pp. 43–52, Mar. 2019, doi: 10.17221/116/2017-hortsci.
- [48] J. Zhang *et al.*, “Challenges and opportunities in precision irrigation decision-support systems for center pivots,” *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 5, p. 053003, Apr. 2021, doi: 10.1088/1748-9326/abe436.
- [49] A. E. Abioye *et al.*, “Precision Irrigation Management Using Machine Learning and Digital Farming Solutions,” *AgriEngineering*, vol. 4, no. 1, pp. 70–103, Feb. 2022, doi: 10.3390/agriengineering4010006.
- [50] “Managing Pests in Gardens: Irrigation scheduling using evapotranspiration (ET)—UC IPM.” <https://ipm.ucanr.edu/PMG/GARDEN/ENVIRON/evap.html>
- [51] M. Aziz *et al.*, “A Sustainable Irrigation System for Small Landholdings of Rainfed Punjab, Pakistan,” *Sustainability*, vol. 13, no. 20, p. 11178, Oct. 2021, doi: 10.3390/su132011178.
- [52] “Drip Irrigation,” Aug. 05, 2014. <https://web.uri.edu/safewater/protecting-water-quality-at-home/sustainable-landscaping/drip-irrigation/>
- [53] “Soil Moisture–Based Control Technologies | WaterSense | US EPA.” https://19january2017snapshot.epa.gov/www3/watersense/products/soil_moisture_based_technologies.html
- [54] Z. Bordeau, “Save Water With Soil Moisture Sensing - Toro Grounds for Success,” *Toro Grounds for Success*, Jul. 19, 2018. <https://www.torogroundsforsuccess.com/irrigation/save-water-with-soil-moisture-sensing/>

- [55] Mary, “Some important facts about Variable-Rate Irrigation,” *GeoPard Agriculture*, Jun. 2023, [Online]. Available: <https://geopard.tech/blog/some-important-facts-about-variable-rate-irrigation/>
- [56] A. Williams, H. Fuchs, and C. D. Whitehead, “Estimates of Savings Achievable from Irrigation Controller,” Mar. 2014. doi: 10.2172/1129575.
- [57] I. Usman *et al.*, “Performance Evaluation of Micro Sprinkler Irrigation System in Tunnel Farms and Open Area Conditions,” *ResearchGate*, Feb. 23, 2021. https://www.researchgate.net/publication/349519640_Performance_Evaluation_of_Micro_Sprinkler_Irrigation_System_in_Tunnel_Farms_and_Open_Area_Conditions#fullTextFileContent
- [58] V. F. Bralts, D. M. Edwards, and I.-P. Wu, “Drip Irrigation Design and Evaluation Based on the Statistical Uniformity Concept,” in *Advances in irrigation*, 1987, pp. 67–117. doi: 10.1016/b978-0-12-024304-4.50005-5.
- [59] Y. Wang *et al.*, “Effect of Drip Irrigation on Soil Water Balance and Water Use Efficiency of Maize in Northwest China,” *Water*, vol. 13, no. 2, p. 217, Jan. 2021, doi: 10.3390/w13020217.
- [60] M. A. Najafabadi, R. F. Nafchi, H. Salami, H. R. Vanani, and K. Ostad-Ali-Askari, “Effect of different managements with drip irrigation (tape),” *Applied Water Science*, vol. 13, no. 2, Dec. 2022, doi: 10.1007/s13201-022-01847-5.
- [61] A. M. Haile, “Smallholder Drip Irrigation Technology,” *BioOne Complete*, Feb. 2003, doi: 10.1659/0276-4741(2003)023.
- [62] K. Chomsang, M. Morokuma, S. Agarie, and M. Toyota, “Effect of using drip irrigation on the growth, yield and its components of soybean grown in a low rainfall region in Japan,” *Plant Production Science*, vol. 24, no. 4, pp. 466–480, Mar. 2021, doi: 10.1080/1343943x.2021.1893607.
- [63] M. Selzer, “How Much Does Drip Irrigation Cost in 2023?,” *Lawn Care Blog | Lawn Love*, Jan. 2023, [Online]. Available: <https://lawnlove.com/blog/drip-irrigation-cost/>
- [64] A. Geiger, “How Much Does Drip Irrigation Cost?,” *Lawnstarter*, Jan. 2023, [Online]. Available: <https://www.lawnstarter.com/blog/cost/drip-irrigation-cost/>
- [65] D. Gelerter, “Sensor for Soil Moisture: The 1st Key to Precision Farming Success,” *Farm21*, Apr. 2023, [Online]. Available: <https://www.farm21.com/sensor-for-soil-moisture-the-precision-farming-key/>
- [66] M. Q. Aringo, C. G. Martinez, O. G. Martinez, and V. B. Ella, “Development of Low-cost Soil Moisture Monitoring System for Efficient Irrigation Water Management of Upland Crops,” *IOP Conference Series*, vol. 1038, no. 1, p. 012029, Jun. 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1038/1/012029.
- [67] X. Hui *et al.*, “Assessing water distribution characteristics of a variable-rate irrigation system,” *Agricultural Water Management*, vol. 260, p. 107276, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.agwat.2021.107276.
- [68] C. B. Hedley, I. Yule, M. P. Tuohy, and I. Vogeler, *Key Performance Indicators for Variable Rate Irrigation Implementation on Variable Soils*. 2009. doi: 10.13031/2013.27439.

- [69] V. Sharma and S. Irmak, “Economic comparisons of variable rate irrigation and fertigation with fixed (uniform) rate irrigation and fertigation and pre-plant fertilizer management for maize in three soils,” *Agricultural Water Management*, vol. 240, p. 106307, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.agwat.2020.106307.
- [70] “Variable Rate Technology in Precision Agriculture | News by BIS Research,” *Bis Research*. <https://bisresearch.com/news/applications-of-variable-rate-technology-in-precision-agriculture-at-different-stages-of-farming>
- [71] “Water-Efficient Technology Opportunity: Advanced Irrigation Controls,” *Energy.gov*. <https://www.energy.gov/femp/water-efficient-technology-opportunity-advanced-irrigation-controls>
- [72] “Weather-Based Irrigation Controllers | US EPA,” *US EPA*, May 09, 2023. <https://www.epa.gov/watersense/weather-based-irrigation-controllers>
- [73] M. Melody, “RESOURCES FOR OUTDOOR WATER USE DETERMINATION,” Jun. 13, 2014. <https://escholarship.org/uc/item/78r1j3dt>
- [74] Kevin Gorman ‘Advantageirr’, “How Much Do Irrigation Controllers Cost?,” *Advantage Irrigation*, Aug. 2023, [Online]. Available: <https://advantageirr.com/how-much-do-irrigation-controllers-cost/>
- [75] M. Kumar, R. V. Adake, and K. S. Reddy, “Development of green energy based micro-sprinkler irrigation system for small holdings of SAT region,” *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 7, p. 100433, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100433.
- [76] M. Zhang *et al.*, “The layout measures of micro-sprinkler irrigation under plastic film regulate tomato soil bacterial community and root system,” *Frontiers in Plant Science*, vol. 14, Mar. 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1136439.
- [77] H. S. Ghazzawy, A. E. E. Sobaih, and Mansour, “The Role of Micro-Irrigation Systems in Date Palm Production and Quality: Implications for Sustainable Investment,” *Agriculture*, vol. 12, no. 12, p. 2018, Nov. 2022, doi: 10.3390/agriculture12122018.
- [78] S. Bahr, “How Much Does a Sprinkler System Cost in 2023?,” *Lawnstarter*, Jun. 2023, [Online]. Available: <https://www.lawnstarter.com/blog/cost/sprinkler-system-price/>
- [79] Y. Peng *et al.*, “Precision irrigation perspectives on the sustainable water-saving of field crop production in China: Water demand prediction and irrigation scheme optimization,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 230, pp. 365–377, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.347.
- [80] C. A. Terán-Chaves, L. Montejo-Nuñez, C. C. C. Cordero, and S. M. Polo-Murcia, “Water Productivity Indices of Onion (*Allium cepa*) under Drip Irrigation and Mulching in a Semi-Arid Tropical Region of Colombia,” *Horticulturae*, vol. 9, no. 6, p. 632, May 2023, doi: 10.3390/horticulturae9060632.
- [81] J. Trauer, S. Schweigert-Recksiek, C. Engel, K. Spreitzer, and M. B. Zimmermann, “WHAT IS A DIGITAL TWIN? – DEFINITIONS AND INSIGHTS FROM AN INDUSTRIAL CASE STUDY IN TECHNICAL PRODUCT DEVELOPMENT,” *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, vol. 1, pp. 757–766, May 2020, doi: 10.1017/dsd.2020.15.

- [82] M. Mashaly, “Connecting the Twins: A Review on Digital Twin Technology & its Networking Requirements,” *Procedia Computer Science*, vol. 184, pp. 299–305, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.03.039.
- [83] D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, and B. Hicks, “Characterising the Digital Twin: A systematic literature review,” *Cirp Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 29, pp. 36–52, May 2020, doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- [84] “What Is MATLAB?,” *MATLAB & Simulink*. <https://www.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [85] M. H. Trauth, “Introduction to MATLAB,” in *Springer eBooks*, 2007, pp. 11–28. doi: 10.1007/978-3-540-72749-1_2.
- [86] “Data Science,” *MATLAB & Simulink*. <https://www.mathworks.com/solutions/data-science.html>
- [87] “Simulink - Simulation and Model-Based Design.” <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- [88] R. Halicioglu, L. C. Dulger, and A. T. Bozdana, “Modelling and Simulation Based on Matlab/Simulink: A Press Mechanism,” *Journal of Physics*, vol. 490, p. 012053, Mar. 2014, doi: 10.1088/1742-6596/490/1/012053.
- [89] “Mastering SIMULINK 2 : Dabney, James : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive,” *Internet Archive*, 1998. https://archive.org/details/masteringsimulin0000dabn_r415
- [90] T. Yuldashev and A. Solovev, “Basics of PID Controllers: Design, Applications, Advantages & Disadvantages,” *Integra Sources*, Sep. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.integrasources.com/blog/basics-of-pid-controllers-design-applications/>

Παράρτημα Α

K.Sinanis, “Εδαφολογία,” Dec. 19, 2021. <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/8013>

Παράρτημα Β

K. Sinanis, “Εργαστηριακές ασκήσεις εδαφολογίας,” Feb. 17, 2016. <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/3500>

Παράρτημα Γ

S. Fountas, “Γεωργία ακριβείας,” Feb. 06, 2016. <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/2670>