



Τμήμα Αγροτικής Ανάπτυξης,  
Αγροδιατροφής και  
Διαχείρισης Φυσικών Πόρων  
Εθνικό και Καποδιστριακό  
Πανεπιστήμιο Αθηνών



# Τεχνολογίες και τεχνικές για άρδευση ακριβείας Μπενής Ιωάννης



ANNA ΒΑΤΣΑΝΙΔΟΥ,

Επ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

Οκτώβριος 2023



Τμήμα Αγροτικής Ανάπτυξης,  
Αγροδιατροφής και  
Διαχείρισης Φυσικών Πόρων

Εθνικό και Καποδιστριακό  
Πανεπιστήμιο Αθηνών

## Τεχνολογίες και τεχνικές για άρδευση ακριβείας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΙΩΑΝΝΗ ΜΠΕΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. Άννα Βατσανίδου

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Άννα Βατσανίδου

Ναυσικά Παπαγεωργίου

Θοδωρής Ζαχαριάδης

ΨΑΧΝΑ, 2023

***"Στη μνήμη του αγαπημένου μου παππού  
Δημήτριου Μπενή,  
πηγή έμπνευσης και στήριξης  
καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής μου."***

Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών  
Τμήμα Αγροτικής Ανάπτυξης, Αγροδιατροφής και Διαχείρισης Φυσικών Πόρων  
Ιωάννης Μπενής  
© 2023 Με επιφύλαξη παντός Δικαιώματος

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς όλους όσους συνέβαλαν στην επιτυχή ολοκλήρωση της πτυχιακής μου εργασίας. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την τριμελή επιτροπή, η οποία απαρτίζεται από τις Επ. Καθηγήτριες, Άννα Βατσανίδου και Ναυσικά Παπαγεωργίου και τον Καθηγητή Θοδωρή Ζαχαριάδη, για την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθειά τους. Ιδιαίτερα θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην καθηγήτριά μου Άννα Βατσανίδου που ανέλαβε να με καθοδηγήσει και με την υποστήριξη και τις καθοριστικές συμβουλές της κατάφερα να ολοκληρώσω αυτό το σημαντικό για εμένα έργο. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αγαπητή μου οικογένεια για την ανεκτίμητη υποστήριξη και την αγάπη τους, χωρίς την οποία αυτό το επίτευγμα δεν θα ήταν ποτέ εφικτό. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους αξιότιμους καθηγητές μου για τις πολύτιμες γνώσεις, τις συμβουλές και την παρότρυνσή τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Η εμπειρία που απέκτησα από όλους ήταν εξαιρετικά ενθαρρυντική και συνέβαλε σημαντικά στην ακαδημαϊκή μου εξέλιξη. Τέλος, δεν μπορώ να μην εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τους συναδέλφους μου φοιτητές για τη συναδελφικότητά τους και την υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια του ταξιδιού μου ως φοιτητής.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η γεωργία, ως απόλυτα ζωτικός τομέας για την ανθρωπότητα, αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις στη σύγχρονη εποχή. Η παγκόσμια ανάπτυξη και η αυξανόμενη πληθυσμιακή πίεση απαιτούν από εμάς να επανεξετάσουμε την γεωργική δράση. Σήμερα, μεγάλη απειλή φαίνεται ότι δέχεται το νερό ένα αγαθό που είναι κοινής ωφελείας και απαραίτητο συστατικό των ζωντανών οργανισμών. Η προσβασιμότητα και αποτελεσματική χρήση του νερού αναδεικνύονται ως βασική ανάγκη στη γεωργία. Η διαθεσιμότητα νερού στην Ευρώπη, συνδυασμένη με τις ανάγκες της γεωργίας, απαιτεί σοφές πρακτικές. Από την επιφανειακή άρδευση μέχρι την υποεπιφανειακή, οι τεχνικές άρδευσης πρέπει να εξελιχθούν. Μια από τις προτεινόμενες λύσεις είναι η απόκτηση εξειδικευμένης γνώσης γύρω από τα συστήματα άρδευσης και η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών που μπορούν να αναδείξουν νέες προοπτικές. Ήρθε η στιγμή που πρέπει να εξερευνήσουμε περαιτέρω πώς αυτές οι τεχνικές μπορούν να αποτελέσουν βασικό εργαλείο για τη διασφάλιση βιώσιμης και αποδοτικής χρήσης του νερού στη γεωργία, εξασφαλίζοντας την ισορροπία μεταξύ ανθρώπινης ανάπτυξης και περιβαλλοντικής προστασίας. Στις μέρες μας με σύμμαχο την τεχνολογία που έχει εισέλθει όλο και περισσότερο στις ζωές μας, ανοίγουμε τον δρόμο της καινοτομίας. Μια από αυτές είναι η αναδείξει της γεωργία ακρίβειας που με τις ευφυείς τεχνολογίες επιφέρει ένα νέο επίπεδο ποιότητας και αποτελεσματικότητας έχοντας ως προτακτικές αρχές την έννοια της αειφορίας και της βιωσιμότητας. Καθώς προχωρούμε πέρα από την γεωργία ακρίβειας και εξετάζουμε τα αυτόματα και έξυπνα συστήματα άρδευσης, ανοίγεται ένας κόσμος πλήρης καινοτομιών. Οι ασύρματες τεχνολογίες και τα συστήματα λήψης αποφάσεων διαμορφώνουν μια επανάσταση στην διαχείριση της άρδευσης. Είναι η στιγμή να εξερευνήσουμε πώς αυτές οι εξελιγμένες πρακτικές μπορούν να ενισχύσουν την βιωσιμότητα της γεωργίας, δημιουργώντας ένα σύστημα αρδεύσεως που συνδυάζει αποτελεσματικότητα και προστασία για το περιβάλλον. Συνολικά, η εξέταση της γεωργίας και της άρδευσης αναδεικνύει την κρίσιμη σχέση μεταξύ των πρακτικών γεωργίας, της διαθεσιμότητας του νερού και της αειφορικής ανάπτυξης. Η προσαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών, όπως τα έξυπνα συστήματα άρδευσης και η γεωργία ακρίβειας, ανοίγει προοπτικές για βελτιωμένη απόδοση και βιωσιμότητα. Τονίζεται η ανάγκη εύρεσης ισορροπίας μεταξύ παραγωγικότητας, προστασίας του περιβάλλοντος και αποδοτικής χρήσης του νερού. Είναι καιρός να μεταβούμε στη λεγόμενη «πράσινη γεωργία» που εξασφαλίζει βιώσιμη παραγωγή, σεβόμενη το περιβάλλον και εξυπηρετώντας την ανθρωπότητα και την προστασία του πλανήτη μας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη της γεωργικής παραγωγής και η εξελισσόμενη ανάγκη για αποδοτική και βιώσιμη διαχείριση των πόρων έχουν οδηγήσει σε μια νέα εποχή εφαρμογής τεχνολογιών και τεχνικών άρδευσης υψηλής ακρίβειας. Η προοδευτική χρήση σύγχρονων τεχνολογιών, όπως οι αισθητήρες, οι αυτόματοι ελεγκτές, τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και οι προηγμένες μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων, έχει ανοίξει νέες προοπτικές για τη βελτιστοποίηση της υδροδότησης των καλλιεργειών. Η παρούσα πτυχιακή εργασία, αφού κάνει μια αναφορά στην αναγκαιότητα και σημαντικότητα του νερού ως φυσικού πόρου και της πρακτικής της άρδευσης στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, επιδιώκει να εξερευνήσει τις προηγμένες τεχνολογίες και τεχνικές που αναδεικνύουν την άρδευση ακριβείας ως κύριο στοιχείο της αειφορικής γεωργίας. Αναλύουμε την ενσωμάτωση των σύγχρονων τεχνολογιών, όπως οι αισθητήρες, οι αυτόματοι ελεγκτές και τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, στη διαχείριση του ύδατος για τη γεωργική διαδικασία. Με την εξερεύνηση αυτών των προηγμένων τεχνολογιών, στοχεύουμε στην προώθηση της αποτελεσματικής χρήσης τους, την εξοικονόμηση των πόρων, της μείωσης των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ενίσχυση της βιώσιμης γεωργικής παραγωγής.

## SUMMARY

The development of agricultural production and the growing need for efficient and sustainable resource management have led to a new era of applying high-precision irrigation technologies and techniques. The progressive use of modern technologies, such as sensors, automatic controllers, geographic information systems, and advanced data analysis methods, has enabled new prospects for optimizing crop irrigation. This undergraduate thesis aims to explore advanced technologies and techniques that highlight precision irrigation as a crucial element of sustainable agriculture. We analyze the integration of contemporary technologies, such as sensors, automatic controllers, and geographic information systems, in water management for agricultural processes. By exploring these advanced technologies, our goal is to promote their effective utilization, resource conservation, reduction of negative environmental impacts, and enhancement of sustainable agricultural production.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες.....	5
Πρόλογος.....	6
Περίληψη.....	7
SUMMARY.....	7
Πίνακας περιεχομένων.....	8
Πίνακας συντομογραφιών.....	10
Κατάλογος πινάκων.....	12
Κατάλογος εικόνων.....	12
Κατάλογος Εξισώσεων.....	13
Εισαγωγή.....	14
<b>1. Η σημασία των εισροών στη γεωργία.....</b>	<b>16</b>
1.1 Εισροές στον Γεωργικό Τομέα και η Ανάγκη Μείωσής τους.....	16
1.2 Αρνητικές Επιδράσεις των Γεωργικών Εισροών στο Οικοσύστημα.....	18
1.3 Μετάβαση σε μια πιο Αειφορική Γεωργία- ΣΒΑ.....	20
1.4 Η Σημαντικότητα του Νερού Ως Αγροτική Εισροή.....	21
1.4.1 Αειφορική γεωργία και νερό.....	22
<b>2. Το Νερό στη Γεωργία.....</b>	<b>24</b>
2.1 Η Διαθεσιμότητα Νερού στην Ευρώπη- Ανάγκες της Γεωργίας και Επιπτώσεις... ..	24
2.1.1 Η γεωργία χρειάζεται το νερό.....	25
2.1.2 Γεωργία ως ρυπαντής του νερού.....	27
2.2 Γεωργία και Χαρακτηριστικά Κατανάλωσης Νερού στην Ελλάδα.....	28
2.3 Υδατικό Αποτύπωμα.....	34
2.4 Ευρωπαϊκή και Ελληνική Νομοθεσία για το Νερό -Άρδευση.....	36
<b>3. Συστήματα και Τεχνικές Άρδευσης -Υπολογισμός αναγκών Άρδευσης.....</b>	<b>38</b>
3.1 Εφαρμοζόμενα συστήματα άρδευσης στην Ελλάδα.....	39
3.1.1 Επιφανειακή άρδευση.....	39
3.1.2 Άρδευση με Καταιονισμό.....	40
3.1.3 Άρδευση με Μέθοδο Στάγδην.....	41
3.1.4 Υποεπιφανειακή άρδευση.....	43
3.2 Υπολογισμός Αναγκών Άρδευσης.....	44
3.2.1 Εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration, ET).....	45
3.2.2 Μέθοδοι προσδιορισμού της εξατμισοδιαπνοής.....	47
3.2.3 Απευθείας Μέθοδοι μέτρησης ETc.....	50
3.3 Μέθοδοι Άρδευσης σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες.....	51
3.3.1 Άρδευση σε προκαθορισμένους χρόνους.....	51
3.3.2 Μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους.....	51
3.3.3 Μέτρηση υγρασίας υποστρώματος.....	51
3.3.4 Μέτρηση της απορρόφης του θρεπτικού διαλύματος.....	51
3.3.5 Άρδευση με βάση την ηλιακή ενέργεια.....	52
3.3.6 Άρδευση με βάση τη διαπνοή.....	52
3.4 Ελλειμματική Άρδευση.....	52
<b>4. Άρδευση Ακριβείας.....</b>	<b>53</b>
4.1 Γεωργία Ακριβείας-Ευφυής Τεχνολογίες.....	53

4.1.1	Κυκλικό Σύστημα Γεωργίας Ακριβείας – Ευφυής Τεχνολογίες.....	53
4.1.2	Πληροφοριακά Συστήματα Διαχείρισης Καλλιεργειών (FMIS) & Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (DSS) .....	57
4.1.3	Αυτοματισμοί και Τηλεμετρία .....	57
4.2	Η Άρδευση στη Γεωργία Ακριβείας .....	59
4.2.1	Οφέλη Άρδευσης Ακριβείας.....	60
4.2.2	Έξυπνα συστήματα Άρδευσης .....	60
5.	<b>Διεθνή βιβλιογραφία</b> .....	63
5.1	Ασύρματα Συστήματα Άρδευσης.....	63
5.2	Αυτόματα Συστήματα Άρδευσης με βάση IoT.....	68
5.3	Έξυπνα συστήματα άρδευσης .....	69
5.4	Συστήματα άρδευσης με βάση DSS.....	72
5.5	Λογισμικά και Συστήματα Λήψης Αποφάσεων άρδευσης ακριβείας.....	74
5.6	Εξειδικευμένα Λογισμικά & Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για Άρδευση Ακριβείας που δημιουργήθηκαν και χρησιμοποιούνται για την Ελλάδα.....	76
	<b>Συμπεράσματα</b> .....	79
6.	<b>Βιβλιογραφία</b> .....	80



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

Συντομογραφίες (Ελληνικά)	Επεξήγηση
ΑΕΠ	ΑΕΠ (Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν)
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΕΛΓΟ	Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός "Δήμητρα"
ΕΛΣΤΑΤ	ΕΛΣΤΑΤ Ελληνική Στατιστική Αρχή
ΕΟΠ	Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος
ΙΟΒΕ	Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών
ΚΓΠ	Κοινή Γεωργική Πολιτική
ΟΟΣΑ	Οργανισμό Οικονομική Συνεργασίας και Ανάπτυξης
ΠΑΑ	Πρόγραμμα Αγροτικής Ανάπτυξης
ΣΒΑ	Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης
ΓΑ	Γεωργίας Ακριβείας

Συντομογραφίες (Αγγλικά)	Επεξήγηση
AI	AI (Artificial Intelligence) Τεχνητή νοημοσύνη
ANFIS	Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems
DSS	Decision Support System (Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων)
DSSAT	DSSAT (The Decision Support System for Agrotechnology Transfer) Το Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων για Μεταφορά Αγροτεχνολογίας
EPIC	EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) Περιβαλλοντική Πολιτική Ολοκληρωμένο Κλίμα
EC	EC (European Commission) Ευρωπαϊκή Επιτροπή
ET	EvapoTranspiration (Εξατμισοδιαπνοή)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Διεθνής Οργάνωση Τροφίμων και Γεωργίας)
FMIS	FMIS (Financial Management Information Systems) Πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης καλλιεργειών
GSM	GSM (Global System for Mobile Communications) Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών
GIS	GIS (Geographic Information Systems) Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών
GPS	GPS (Global Positioning System) Παγκόσμιο Σύστημα Τοποθεσίας
ICT	ICT (Information and Communications Technology) Τεχνολογία Πληροφοριών και Επικοινωνιών
IGMS	IGMS (Intelligent Greenhouse Monitoring System) Ευφυές Σύστημα Παρακολούθησης Θερμοκηπίου

IoT	Internet of Things (Διαδίκτυο των Πραγμάτων)
IPCC	IPCC The Intergovernmental Panel on Climate Change (Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή)
Kc	Φυτικός συντελεστής καλλιέργειας
LISA	low input sustainable agriculture (Lisa) βιώσιμη γεωργία χαμηλών εισροών
MMS	MMS (multimedia messaging service) Υπηρεσία μηνυμάτων πολυμέσων
PAMS	PAMS (Precision Agriculture Monitoring System) Σύστημα Παρακολούθησης Γεωργίας Ακριβείας
PLSR	Partial Least Square Regression
RFID	RFID (Radio Frequency Identification) Αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων
SFT	SFT (Smart Farming Technologies) Τεχνολογίες Έξυπνης Γεωργίας
SIDSS	SIDSS (decision support system for managing irrigation in agriculture) Σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση της άρδευσης στη γεωργία
SMS	SMS (Short Message Service) Υπηρεσία σύντομων μηνυμάτων
VRA	VRA (Variable Rate Application) Μεταβλητή Δόση Εισροών
WFN	WFN( Water Footprint Network ) Δίκτυο Υδατικού Αποτυπώματος
WUE	water use efficiency (WUE) αποδοτικότητα στη χρήση του νερού
WSN	WSN (Wireless sensor network) Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1: Κατηγορίες μεγάλων υδάτινων ρύπων στη γεωργία και η σχετική συνεισφορά τους στα τρία βασικά συστήματα γεωργικής παραγωγής  
Πίνακας 2: Συνολική αρδευόμενη έκταση σε χιλιάδες στρέμματα, ΕΛΣΤΑΤ 2019  
Πίνακας 3: Έμμεσοι Μέθοδοι μέτρησης Εξατμισοδιαπνοής (Πηγή: Τσακίρης, 2004)  
Πίνακας 4: Λίστα Τεχνολογιών Έξυπνης Γεωργίας (Πηγή: Balafoutis et al, 2020)

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1-1: Κατηγορίες Αγροτικών Εισροών (Πηγή: Ανάλυση IOBE, 2020)  
Εικόνα 1-2: Αγροτικά εφόδια (Πηγή: Ανάλυση IOBE, 2020)  
Εικόνα 1-3: Οι 17 στόχοι της Βιώσιμης Ανάπτυξης (πηγή EC)  
Εικόνα 1-4: Υδρολογικός κύκλος νερού (<https://el.wikipedia.org/>)  
Εικόνα 1-5: Παγκόσμια κατανομή νερού (<https://el.wikipedia.org/>)  
Εικόνα 2-1: Υδατικό στρες στην Ευρώπη και μελλοντικές προβλέψεις (Πηγή World, Resource Institute, WRI, 2021)  
Εικόνα 2-2: Πηγές του πόσιμου νερού στην Ευρώπη (Πηγή: EurEau, 2021)  
Εικόνα 2-3: Share of irrigated areas in UAA by NUTS 2 regions, EU-28, 2016 (% of total UAA) (Πηγή: Eurostat 2016)  
Εικόνα 2-4: Αριθμός υδάτινων όγκων υπό σημαντική πίεση από την άντληση νερού άρδευσης για τη γεωργία (Πηγή: European Environmental Agency, EEA, 2018, 'WISE Water Framework Directive')  
Εικόνα 2-5: Χρήση νερού στην Ελλάδα (Πηγή: EASAC, 2010)  
Εικόνα 2-6: Ταξινόμηση του νερού στις υδατικές περιοχές της Ελλάδας (Πηγή: Kourgialas 2021)  
Εικόνα 2-7: Περιοχές της Ελλάδας που τείνουν σε ξηρικές κλιματικές συνθήκες (Πηγή: Kourgialas 2021)  
Εικόνα 2-8: Ετήσια βροχόπτωση σε mm (Πηγή: Πολύζος, 2022)  
Εικόνα 2-9: Δυναμικότητα των υπόγειων υδάτων των υδατικών περιοχών της Ελλάδας (Πηγή: Kourgialas 2021)  
Εικόνα 2-10: Προέλευση νερού άρδευσης στην ΕΕ-28, 2010 (Eurostat, 2016)  
Εικόνα 2-11: Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή στις μεσογειακές χώρες (Πηγή: Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας, ΕΤΥΜΠ, 2005)  
Εικόνα 2-12: Κατανάλωση νερού ανά κατηγορία χρήσης στα 14 υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας (Πηγή: Kourgialas 2021)  
Εικόνα 2-13: Εικονικό νερό διαφόρων τροφίμων (λίτρα νερού ανά κιλό προϊόντος) (Πηγή: WWF, Water Footprint Network)  
Εικόνα 2-14: Παγκόσμιο Υδατικό Αποτύπωμα (Πηγή: ΕΛΓΟ –  
Εικόνα 3-1: Παραδοσιακές και Σύγχρονες μέθοδοι άρδευσης (Πηγή: E. A. Abioye, et al, 2020)  
Εικόνα 3-2: Ανάγκες νερού άρδευσης μιας καλλιέργειας (FAO, 1986)  
Εικόνα 3-3: Επιφανειακά Συστήματα Άρδευσης (Πελετίδης, 2021)  
Εικόνα 3-4: Σχέδιο τυπικού συστήματος άρδευσης με καταιονισμό (Πελετίδης, 2021)  
Εικόνα 3-5: Σύστημα άρδευσης με σταγόνες  
Εικόνα 3-6: Διαβροχή εδάφους με σταλάκτες ανάλογα με τη σύσταση του εδάφους (Πηγή: Νάνος, 2009)  
Εικόνα 3-7: Παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή (Πηγή FAO, 1998)  
Εικόνα 3-8: Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (ΕΤο) (Πηγή: FAO, 1998)

Εικόνα 3-9: Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ή ανάγκη νερού της καλλιέργειας (Πηγή: FAO, 1998)

Εικόνα 3-10: Εξατμισοδιαπνοή υπό μη τυποποιημένες συνθήκες (ETc adj) (Πηγή: FAO, 1998)

Εικόνα 4-1: Η Κυκλική Διαδικασία της Γεωργίας Ακριβείας (Πηγή: Balafoutis et al, 2017)

Εικόνα 4-2: Έλεγχος άρδευση ακριβείας (Πηγή: Owino and Söffker, 2022)

Εικόνα 5-1Q Η σύνθεση του συστήματος ardeusi.gr (Πηγή: <https://about.ardeusi.gr>)

Εικόνα 5-2: Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων IRMA\_SYS (Πηγή: <https://irmasys.com>)

Εικόνα 5-3: Το σύστημα SynField (Πηγή: <https://www.synfield.gr>)

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Εξίσωση 1: Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας

Εξίσωση 2: Γενικό μέτρο έκφρασης της εξατμισοδιαπνοής

Εξίσωση 3: Η τροποποιημένη μέθοδος των Penman-Monteith κατά FAO 56 (Πηγή: FAO 1998)

Εξίσωση 4: Η μέθοδος Blaney and Criddle

Εξίσωση 5: Μέθοδος Hargreaves-Samani (1985)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργία είναι ένα σύνολο τεχνικών καλλιέργειας της γης, της εκτροφής των ζώων και ιχθύων με στόχο την παραγωγή φυτικών και ζωικών προϊόντων. Με την πιο απλή προσέγγιση του όρου θα λέγαμε ότι η γεωργία αναφέρεται στην καλλιέργεια της γης, ενώ με την ευρύτερη έννοια περιλαμβάνει και την κτηνοτροφία, την αλιεία, τις υδατοκαλλιέργειες και τη δασοκομία. Η γεωργία επομένως, θεωρείται μαζί με την κτηνοτροφία, την αλιεία και τις υδατοκαλλιέργειες τις δραστηριότητες του πρωτογενούς οικονομικού τομέα, ο οποίος αποτελεί έναν από τους βασικότερους τομείς ανάπτυξης και οικονομίας της χώρας μας με σκοπό την κάλυψη των αναγκών του ανθρώπου [1]. Επιδιώκεται η μεγιστοποίηση των αποδόσεων, δηλαδή της ποσότητας της παραγωγής, με ιδιαίτερη σημασία στις μέρες μας να δίνεται στην ποιότητα των προϊόντων, τη μείωση του κόστους και την ελαχιστοποίηση της ρύπανσης. Ο αγροτικός κλάδος χαρακτηρίζεται ως πολυδύναμος λόγω της δυνατότητας του να εξασφαλίζει ένα δίκαιο βιοτικό επίπεδο στον γεωργικό πληθυσμό και να διασφαλίζει αγροτικά προϊόντα σε λογικές τιμές για τους καταναλωτές. Ωστόσο η άσκηση της γεωργίας θα πρέπει να εφαρμόζεται με σύνεση και με σεβασμό στο περιβάλλον, ώστε να μην υπονομεύουμε το μέλλον των επομένων γενεών. Η εντατικοποίηση του γεωργικού τομέα στο βωμό του κέρδους με πρακτικές όπως η αλόγιστη χρήση φυσικών πόρων (μονοκαλλιέργεια, υπεράρδευση), η ανεξέλεγκτη εφαρμογή φυτοφάρμακων και η επιλογή υβριδίων φυτών με μεγάλες απαιτήσεις σε εισροές έχουν αρχίσει να δημιουργούν αρνητικές συνέπειες στο αγροτικό περιβάλλον (π.χ. υπογονιμότητα και διάβρωση εδαφών, αύξηση αερίων του θερμοκηπίου, εξάντληση αποθεμάτων νερού, κ.α.). Επομένως, η ορθή διαχείριση των φυσικών πόρων και η αειφορική χρήση των εισροών αποτελεί επιτακτική ανάγκη και τη μόνη αποδεκτή στρατηγική εφαρμογής της γεωργικής πρακτικής από την ευρωπαϊκή αγροτική πολιτική.

Η παρούσα πτυχιακή έχει ως στόχο να αναφέρει της τεχνολογίες και τεχνικές για άρδευση ακρίβειας που συμβάλλουν στην διαχείριση της υδροδότησης στον γεωργικό τομέα και παράλληλα της βιώσιμης αγροτικής ανάπτυξης.

Στο *Πρώτο Κεφάλαιο* εξερευνούμε τον κόσμο της γεωργίας, όπου βρίσκεται αντιμέτωπος με μια προκλητική ανάγκη, αυτή της *μείωσης των αρνητικών επιπτώσεων* των γεωργικών εισροών στο περιβάλλον. Από τον τρόπο που χρησιμοποιείται το νερό, μέχρι την ανάπτυξη μιας αειφορικής προσέγγισης της γεωργίας, εξετάζονται οι λύσεις για έναν βιώσιμο γεωργικό κλάδο. Εστιάζοντας στον τρόπο με τον οποίο το νερό διαδραματίζει κεντρικό ρόλο ως αγροτική εισροή, εξερευνούνται επιπλέον, οι πρακτικές για την αποτελεσματική χρήση και διαχείριση του νερού, καταλήγοντας έτσι στην αναγκαιότητα μιας Αειφορικής Γεωργίας, η οποία αναζητά την ισορροπία μεταξύ παραγωγικότητας και σεβασμού προς το περιβάλλον.

Στο *Δεύτερο Κεφάλαιο*, εξετάζεται η ανάπτυξη της γεωργίας και τη σημασία του νερού στην Ευρώπη και την Ελλάδα. Αναλύονται οι ανάγκες της γεωργίας για ύδατα και τις συνέπειες που προκύπτουν από την ανορθολογική χρήση του. Εξετάζεται η γεωργία ως παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα του νερού και οι πρακτικές που μπορούν να υιοθετηθούν για τη μείωση αρνητικών επιπτώσεων. Συγκεκριμένα, δίνεται έμφαση στον τρόπο με τον οποίο η γεωργία επηρεάζει τη διαθεσιμότητα του νερού και πώς μπορούμε να διαχειριστούμε αποτελεσματικά αυτήν τη σχέση. Αναλύονται τα χαρακτηριστικά της κατανάλωσης νερού στη γεωργία, ειδικά στην Ελλάδα και τονίζεται η σημασία του υδατικού αποτυπώματος. Τέλος, εξετάζεται η νομοθεσία σχετικά με το νερό και την άρδευση, τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε εθνικό επίπεδο.

Στο *Τρίτο Κεφάλαιο*, αναφέρονται τα διάφορα συστήματα και τεχνικές άρδευσης, αξιολογώντας τους υπολογισμούς των αναγκών άρδευσης. Αναλύεται η εφαρμογή διαφόρων συστημάτων άρδευσης στην Ελλάδα, όπως η επιφανειακή άρδευση, η άρδευση με καταιονισμό, και η υποεπιφανειακή άρδευση. Αναφέρεται ο υπολογισμός των αναγκών άρδευσης, εξετάζοντας το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής (EvapoTranspiration, ET) και τις μεθόδους προσδιορισμού της. Επιπλέον, περιγράφονται οι τεχνικές και πρακτικές άρδευσης, όπως η άρδευση σε προκαθορισμένους χρόνους, με τη βοήθεια της μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους, με τη μέτρηση υγρασίας εδάφους, με τη μέτρηση της ηλιακής ενέργειας, καθώς και η άρδευση με βάση τη διαπνοή. Τέλος, αναφέρεται η έννοια της ελλειμματικής άρδευσης.

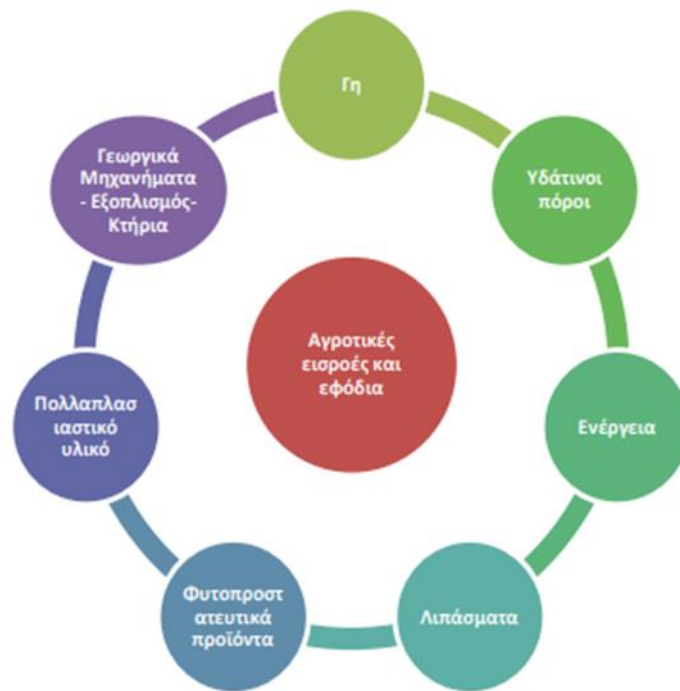
Το *Τέταρτο Κεφάλαιο* επικεντρώνεται στην άρδευση ακρίβειας και τις ευφυείς τεχνολογίες που εφαρμόζονται στη γεωργία. Αναλύεται το κυκλικό σύστημα γεωργίας ακρίβειας και οι σύγχρονες προηγμένες τεχνολογίες που βασίζονται σε πληροφορικά συστήματα, καθώς και εξετάζονται τα πλεονεκτήματα των συστημάτων διαχείρισης καλλιεργειών και των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων. Επιπρόσθετα αναφέρονται οι αυτοματισμοί και η τηλεμετρία στη γεωργία, εξετάζοντας πώς οι εξελιγμένες τεχνολογίες μπορούν να βελτιώσουν τη διαχείριση της άρδευσης. Αναλύονται τα οφέλη της άρδευσης ακρίβειας και τα έξυπνα συστήματα άρδευσης που βασίζονται σε προηγμένες τεχνολογίες, επιδιώκοντας τη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης στη γεωργία.

Κλείνοντας στο *Πέμπτο Κεφάλαιο*, διερευνάται η διεθνής βιβλιογραφία που αφορά την άρδευση ακρίβειας και επικεντρωνόμαστε στις προηγμένες τεχνολογίες που αναπτύσσονται για την αποτελεσματική διαχείριση του ύδατος στη γεωργία. Αναλύονται τα ασύρματα συστήματα άρδευσης, τα αυτόματα συστήματα άρδευσης βασισμένα σε τεχνολογία Internet of Things (IoT) και τα έξυπνα συστήματα άρδευσης. Επίσης, αναφέρονται τα συστήματα άρδευσης με βάση τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) και τους τρόπους με τους οποίους εφαρμόζονται σε πρακτικό επίπεδο. Τέλος, εξετάζονται το λογισμικό και τα συστήματα λήψης αποφάσεων για άρδευση ακρίβειας, επισημαίνοντας εξιδικευμένα λογισμικά και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί για την Ελλάδα.

## 1. Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΙΣΡΟΩΝ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

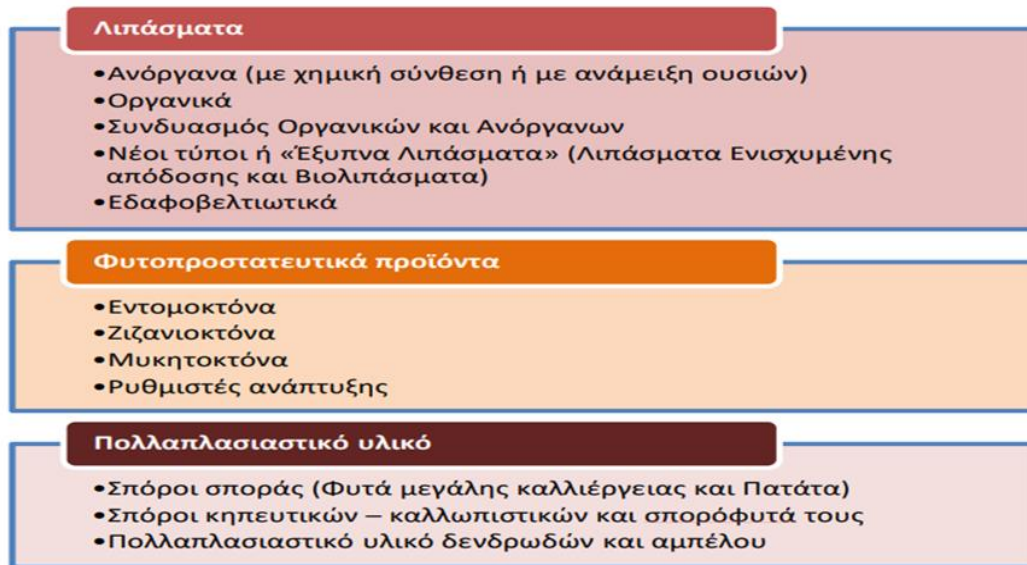
### 1.1 ΕΙΣΡΟΕΣ ΣΤΟΝ ΓΕΩΡΓΙΚΟ ΤΟΜΕΑ ΚΑΙ Η ΑΝΑΓΚΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥΣ

Σύμφωνα με το ίδρυμα οικονομικών & βιομηχανικών ερευνών [2] «οι εισροές στον αγροτικό τομέα είναι το σύνολο των υλικών πόρων που χρησιμοποιούνται κατά την διαδικασία παραγωγής αγροτικών προϊόντων και αποτελούν μαζί με την ανθρώπινη εργασία, τους συντελεστές της αγροτικής παραγωγής». Οι αγροτικές εισροές περιλαμβάνουν την καλλιεργούμενη γη (μαζί με το φυτικό και ζωικό κεφάλαιο), τα γεωργικά μηχανήματα και λοιπό εξειδικευμένο εξοπλισμό και κτήρια, τους απαραίτητους ενεργειακούς πόρους (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ηλεκτρική ενέργεια κ.ά.), τους υδάτινους πόρους, καθώς και τα αγροτικά εφόδια (Εικ. 1-1).



**Εικόνα 1-1: Κατηγορίες Αγροτικών Εισροών (Πηγή: Ανάλυση IOBE, 2020)**

Από τις σημαντικότερες εισροές στην ετήσια παραγωγική διαδικασία είναι η χρήση υδατικών πόρων και τα αγροτικά εφόδια (λιπάσματα, φυτοπροστατευτικά προϊόντα, πολλαπλασιαστικό υλικό) (Εικ. 1-2), τα οποία αποτελούν ένα αναπόσπαστο τμήμα των εισροών που χρησιμοποιούνται στην αγροτική παραγωγή.



Εικόνα 1-2: Αγροτικά εφόδια (Πηγή: Ανάλυση ΙΟΒΕ, 2020)

Σύμφωνα με τους [3], οι ανάγκες για την διατροφή του αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού προβλέπεται πως θα αυξήσουν τις απαιτήσεις για γεωργικά προϊόντα από 60% σε 110% στο χρονικό διάστημα μεταξύ του 2005 και 2050, επομένως και την ανάγκη σε εισροές και αγροτικά εφόδια. Η γεωργική παραγωγή όμως, ανά τον πλανήτη, είναι κατακερματισμένη ανάλογα με την περιοχή, το κλίμα και τις οικονομικές δυνατότητες κάθε χώρας. Μια πιθανή προσπάθεια ομογενοποίησης των καλλιεργειών σε όλον τον κόσμο θεωρείται αποτρεπτικά δύσκολη και οικονομικά ανέφικτη. Ως αποτέλεσμα της υπάρχουσας κατάστασης η παραγωγή συγκεκριμένων αγροτικών προϊόντων ανά περιοχή και μόνη διέξοδο την προμήθεια των υπόλοιπων μέσω εισαγωγών από άλλες χώρες [3]. Η άποψη αυτή ενισχύεται από την έρευνα της Διεθνούς Οργάνωσης Τροφίμων και Γεωργίας (FAO), η οποία έδειξε ότι η συνολική αξία του παγκόσμιου εμπορίου γεωργικών προϊόντων το 2020 έφτασε τα 1,5 τρισεκατομμύρια αμερικανικά δολάρια, ένας αριθμός που προβλέπεται να αυξηθεί, ενώ όπως τονίζεται είναι ήδη μία αύξηση της τάξης του 37,5% σε σχέση με τα δεδομένα του 2010 [4].

Η ανάγκη μείωσης των εισροών στην αγροτική παραγωγή εμφανίστηκε κυρίως ως απόρροια της ευαισθητοποίησης του πληθυσμού σε θέματα ασφάλειας τροφίμων, αλλά και περιβαλλοντικής ανησυχίας. Οι καλλιεργητικές πρακτικές που έχουν υιοθετηθεί παγκοσμίως αλλά και στην Ελλάδα, όπως η αλόγιστη χρήση φυτοφαρμάκων, η ολιστική εκμετάλλευση των εδαφικών και υδατικών πόρων και η εντατική χρήση των γεωργικών μηχανημάτων διαταράσσουν το περιβάλλον. Ανάμεσα σε όλους τους βιομηχανικούς τομείς, ο γεωργικός τομέας κατέχει την δεύτερη θέση στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη και την επικράτηση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Το 2018 οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από την γεωργία αποτελούσαν το 32% των εκπομπών από τον κλάδο παραγωγής τροφίμων [5]. Στην Ελλάδα το 2018 οι γεωργικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανέρχονταν σε 7,8 εκατ. τόνους ισοδυνάμων CO<sub>2</sub>, με αύξηση 2,5 % από το 2000, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 8 % των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ελλάδα και λιγότερο από το 2 % των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) από τη γεωργία [5].



Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων της κλιματικής αλλαγής έχει σχεδιαστεί η ευρωπαϊκή και εθνική στρατηγική που δίνει ιδιαίτερη σημασία στον κλάδο της γεωργίας και της δασοκομίας, δίνοντας προτεραιότητα δράσεων προσαρμογής και μετριασμού μέσω της διατήρησης και της βιώσιμης χρήσης των εδαφικών και υδατικών πόρων και των πρακτικών διαχείρισης της γης. Στην Ελλάδα αναμένεται μεγάλο μέρος της γεωργικής γης να έχει υψηλή ξηρασία λόγω της κλιματικής αλλαγής. Περιοχές όπως π.χ. Κρήτη, νησιά του Αιγαίου θα αντιμετωπίσουν τις αρνητικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, επηρεάζοντας τις καλλιέργειες των λαχανικών, ελιών και αραβοσίτου [5]. Η ορθή διαχείριση των υδατικών πόρων και η ενσωμάτωση της τεχνολογίας μπορεί να βοηθήσει στην προσαρμογή των καλλιεργειών στην κλιματική αλλαγή [6]. Η αειφόρος διαχείριση των φυσικών πόρων, συμπεριλαμβανομένου του νερού, είναι ένας από τους τρεις στόχους της Κοινής Γεωργικής Πολιτικής (ΚΓΠ) της περιόδου 2014-2020. Συγκεκριμένα το 2018 η Επιτροπή δημοσίευσε μια πρόταση για την επόμενη περίοδο 2023-2027, με εννέα συγκεκριμένους στόχους που περιλαμβάνουν την ενθάρρυνση βιώσιμης ανάπτυξης και αποτελεσματικής διαχείρισης φυσικών πόρων όπως το νερό, το έδαφος και αέρα [7]. Επιπλέον, εθνικά προγράμματα έχουν σχεδιαστεί υπό την σκέπη της Ευρωπαϊκής πολιτικής ώστε να προωθήσουν την αειφόρο ανάπτυξη της υπαίθρου (όπως το Πρόγραμμα Αγροτικής Ανάπτυξης (ΠΑΑ) για το διάστημα 2023-2027), στηρίζοντας δράσεις εξοικονόμησης ενέργειας, ορθής διαχείρισης υδάτων, την προώθηση χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την αύξησης εφαρμογής βιολογικής γεωργίας, την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, την πρόληψη των επιπτώσεων των καταστροφών (μεταξύ άλλων των δυσμενών κλιματικών φαινομένων), καθώς και τη συνεργασία για περιβαλλοντικές πρακτικές (συμπεριλαμβανομένης της έμφασης στην κλιματική αλλαγή/προσαρμογή).

## 1.2 ΑΡΝΗΤΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΕΙΣΡΟΩΝ ΣΤΟ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑ

Η εντατικοποίηση των εισροών (λιπασμάτων, φυτοφάρμακων, άρδευσης κ.α.) των προηγούμενων δεκαετιών δεν είχε μόνο ευεργετικά αποτελέσματα στη αύξηση της γεωργικής παραγωγής, αλλά παρουσίασε και μειονεκτήματα που τόσο άμεσα αλλά και έμμεσα, επηρέασαν τις ισορροπίες στο φυσικό και γεωργικό οικοσύστημα.

Στις μέρες μας η μείωση των εισροών στη γεωργία είναι αναγκαία για την αποφυγή αρνητικών επιδράσεων στον άνθρωπο, το περιβάλλον και τους ζωντανούς οργανισμούς. Διάφορες έρευνες έχουν δείξει πως η ανεξέλεγκτη εφαρμογή αζωτούχων λιπασμάτων και κοπριάς οδηγούν σε υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους (π.χ μείωση βασικών μικροοργανισμών του) αυξάνοντας την αλατότητα, την απορροή N σε υπόγεια ύδατα, αλλά και τις εκπομπές αέριων αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ) και άλλων οξειδίων του αζώτου, (N) ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , and  $\text{NO}_2$ ) από τα οποία η συνεισφορά του υποξειδίου του N ( $\text{N}_2\text{O}$ ) στο φαινόμενο του θερμοκηπίου θεωρείται πολύ σημαντική [8]. Αν και το N είναι ένα από τα σημαντικότερα χημικά στοιχεία που απαιτείται από τα φυτά για την ανάπτυξη τους, η μεγάλη περιεκτικότητα στο έδαφος σε νιτρική μορφή ( $\text{NO}_3$ ) είναι παράγοντας σοβαρής ρύπανσης (π.χ νιτρορύπανση) [9]. Με την υποβάθμισή του, το έδαφος γίνεται ακατάλληλο για την ανάπτυξη τόσο των φυτών, όσο και των μικροοργανισμών του. Αποτέλεσμα είναι τελικά η μείωση της συνολικής παραγωγής, η ακαταλληλότητα του εδάφους για μελλοντικές καλλιέργειες, και το μεγάλο κόστος αποκατάστασης της υγείας των εδαφών. Παρόμοια η ανεξέλεγκτη χρήση γεωργικών φαρμάκων οδηγεί στην συσσωρεύει των δραστικών χημικών συστατικών τους στο φυτό, το οποίο στην συνέχεια θα καταναλωθεί είτε από τον άνθρωπο είτε από ζώα.

Στο φυσικό περιβάλλον παρατηρούνται φαινόμενα όπως ρύπανση εδάφους, επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, ευτροφισμός, ρύπανση της ατμόσφαιρας και γενικότερα μεταβολές στο οικοσύστημα. Στο αγροτικό περιβάλλον η κακή διαχείριση των εισροών έχει επιπτώσεις στο έδαφος και την διαθεσιμότητα του νερού άρδευσης. Επίσης, οι επιπτώσεις των γεωργικών φαρμάκων στην ανθρώπινη υγεία είναι αποδεδειγμένες (δηλητηριάσεις, χρόνιες σοβαρές επιπτώσεις όπως, δερματικές ασθένειες, καρκίνο, βλάβες στο αναπνευστικό σύστημα και προσβολές στο κεντρικό νευρικό σύστημα-Parkinson και Alzheimer) [10].

### **Ρύπανση εδάφους**

Οι γεωργοί επικεντρώνονται κυρίως στην αύξηση της παραγωγής τους και συχνά αγνοούν τις επιπτώσεις που έχουν οι υπερβολικές συγκεντρώσεις αζωτούχων λιπασμάτων, οι οποίες δεν είναι εμφανή στην περίοδο μίας ή ακόμα και περισσότερων καλλιεργητικών περιόδων [11]. Η υπερβολική χορήγηση λιπασμάτων σε αγροτικές εκτάσεις επιδρά αρνητικά στην ισορροπία της θρεπτικής σύστασης του εδάφους. Τόσο τα ανόργανα όσο και τα οργανικά λιπάσματα είναι δυνατόν να προκαλέσουν αύξηση της οξύτητας του εδάφους, καθώς και να επηρεάσουν τη δυνατότητα απορρόφησης θρεπτικών συστατικών των φυτών από το έδαφος [11]. Επίσης, κάποια ανόργανα λιπάσματα, όπως τα φωσφορικά, έχουν υψηλή συσσώρευση βαρέων μετάλλων (αυξημένο κάδμιο) [12] ενώ άλλα που παράγονται από παραπροϊόντα της βιομηχανίας χάλυβα περιέχουν μεν τον απαραίτητο ψευδάργυρο για την ανάπτυξη των φυτών αλλά περιέχουν και συσσωρευμένα βαρέα μέταλλα, όπως ο μόλυβδος, αρσενικό, κάδμιο, χρώμιο, υδράργυρο και νικέλιο, τα οποία καθώς δεν αποικοδομούνται, παραμένουν συσσωρευμένα στο περιβάλλον [13].

### **Ρύπανση πόσιμου νερού και υπόγειων υδάτων**

Η ρύπανση των υδάτων από τη γεωργία έχει άμεσες αρνητικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Η χρήση νιτρικών λιπασμάτων στις καλλιέργειες έχει ως συνέπεια την αύξηση των νιτρικών ιόντων ( $\text{NO}_3^-$ ) στο έδαφος και λόγω της μεγάλης κινητικότητάς τους (έκλυση) στον υδροφόρο ορίζοντα. Σε ευαίσθητες ομάδες, όπως τα βρέφη η κατανάλωση νερού με αυξημένη περιεκτικότητα νερού σε νιτρικά ιόντα (άνω των 10 mg/L) οδηγεί σε συμπτώματα κυάνωσης με σοβαρές συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία. Επίσης συσσώρευση φυτοφαρμάκων στο νερό και στην τροφική αλυσίδα, με αποδεδειγμένες αρνητικές επιπτώσεις στον άνθρωπο, οδήγησε στην ευρεία απαγόρευση ορισμένων φυτοφαρμάκων ευρέος φάσματος και επίμονων φυτοφαρμάκων (όπως το DDT και πολλά οργανοφωσφορικά), ωστόσο ορισμένα τέτοια φυτοφάρμακα εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε φτωχότερες χώρες, προκαλώντας οξείες και πιθανές χρόνιες επιπτώσεις στην υγεία [14].

### **Ευτροφισμός**

Ο ευτροφισμός είναι μια κατάσταση υπερβολικής ανάπτυξης των φυκιών και άλλων υδρόβιων φυτών σε υδάτινα οικοσυστήματα, λόγω της υπερβολικής προσφοράς θρεπτικών στοιχείων όπως το άζωτο (N) και το φωσφόρο (P). Η επιβάρυνση των υδάτινων οικοσυστημάτων με N συσχετίζεται κυρίως με μη σημειακές πηγές ρύπανσης που κατά κύριο λόγο αφορούν πρακτικές της γεωργίας, με υπερβολική ροή αποβλήτων κοπριάς, λίπης, ελαίων κλπ. π.χ. στην κεντρική και δυτική Ευρώπη οι αγροτικές δραστηριότητες ευθύνονται για το 46-87% του συνολικού φορτίου N. Οι κυριότερες επιπτώσεις ανάπτυξης ευτροφικών συνθηκών είναι [15] :

- Αυξημένη βιομάζα θαλάσσιου φυτοπλαγκτού και επιφύτων
- Αλλαγές στην παραγωγή, βιομάζα και σύνθεση των ειδών των μακροφύκων
- Μειωμένη διαύγεια νερού
- Θάνατοι και απώλειες των βιοκοινωνιών των κοραλλιογενών υφάλων
- Αλλαγές στο pH και μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στην υδάτινη στήλη
- Αλλαγές στη σύνθεση των ζωικών ειδών
- Αυξημένη πιθανότητα για θανάτους σημαντικών ζωικών ειδών για την οικονομία

### Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Οι εκπομπές μεθανίου από καλλιεργήσιμες εκτάσεις (ιδιαίτερα καλλιέργειες ρυζιού) αυξάνονται με την χρήση αμμωνιακών λιπασμάτων. Οι εκπομπές αυτές συμβάλλουν σημαντικά στην κλιματική αλλαγή, καθώς το μεθάνιο είναι ένα από τα αέρια που συμβάλλουν στην δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η χρήση αζωτούχων λιπασμάτων συμβάλλει επίσης στο σχηματισμό ενός ακόμη αερίου του θερμοκηπίου, του υποξειδίου του Ν ( $N_2O$ ), του οποίου το αποτέλεσμα είναι περίπου 300 φορές πιο ισχυρό σε σχέση με ίδια ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα, ενώ το ίδιο αέριο συμβάλλει επίσης και στην καταστροφή της οζονόσφαιρας [8].

### 1.3 ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΣΕ ΜΙΑ ΠΙΟ ΑΕΙΦΟΡΙΚΗ ΓΕΩΡΓΙΑ- ΣΒΑ

Ο γεωργικός τομέας μεταβαίνοντας προς μια πιο αειφορική γεωργία αντιμετωπίζει τη μείωση των αγροτικών εισροών ως μία σημαντική πρόκληση. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Επιτροπή για το Περιβάλλον ως αειφόρος ανάπτυξη ορίζεται ως « μια ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να διακυβεύει την ικανότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν τις δικές τους ανάγκες» [16].

Η μείωση των εισροών μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής πρακτικών αειφόρου γεωργίας χαμηλών εισροών (LISA), εκτατικής ή παραδοσιακής γεωργίας, της βιολογικής γεωργίας και της γεωργίας ακρίβειας. Η μέχρι πρότινος εντατικοποίηση της γεωργίας με την χρήση συνθετικών αγροχημικών δημιούργησε επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, στην χλωρίδα – πανίδα και στο οικοσύστημα. Η μετάβαση σε ένα πιο βιώσιμο σύστημα δημιουργήθηκε από την ανάγκη να οδηγηθούμε σε καλλιεργητικά συστήματα αποδεκτά από το κοινωνικό σύνολο ως προς την οικονομική αλλά και περιβαλλοντική τους υπόσταση [17]. Η μετάβαση σε μια πιο αειφορική γεωργία θα επιτευχθεί μέσα στρατηγικές, προτάσεις και συμφωνίες της ΕΕ που θα ενισχύσει την ανθεκτικότητα των ευρωπαϊκών συστημάτων τροφίμων και γεωργίας. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) «είναι μια νέα αναπτυξιακή στρατηγική που αποσκοπεί στον μετασχηματισμό της ΕΕ σε μια δίκαιη και ευημερούσα κοινωνία που διαθέτει μια οικονομία σύγχρονη, ανταγωνιστική και αποδοτική ως προς τη χρήση των πόρων, στην οποία ως το 2050 θα έχουν μηδενιστεί οι καθαρές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου». [18]. Μια από τις βασικές στρατηγικές στο πλαίσιο της Πράσινης Συμφωνίας είναι η Στρατηγική από το «Αγρόκτημα στο Πιάτο» (Μάιο του 2020) με ορίζοντα το 2030, η οποία στοχεύει να κάνει τα συστήματα τροφίμων δίκαια, υγιεινά και φιλικά προς το περιβάλλον, αποτελώντας ταυτόχρονα το βασικό εργαλείο της ΕΕ για την επίτευξη των σχετικών με τη γεωργία στόχων βιώσιμης ανάπτυξης (ΣΒΑ) [18] (Εικ. 1-4).



Εικόνα 1-3: Οι 17 στόχοι της Βιώσιμης Ανάπτυξης (πηγή EC)

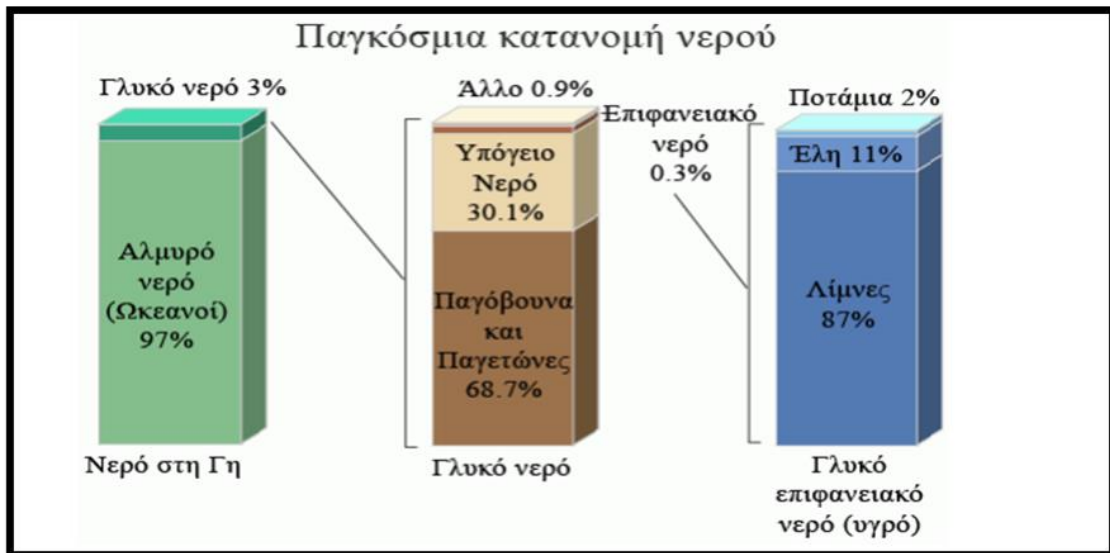
#### 1.4 Η ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΩΣ ΑΓΡΟΤΙΚΗ ΕΙΣΡΟΗ

Το νερό είναι ένας φυσικός πόρος, μοναδικός και αναντικατάστατος, απαραίτητος για την ύπαρξη όλων των ζώντων οργανισμών, συμπεριλαμβανομένου και του ανθρώπου. Το νερό και οι υδάτινοι πόροι γενικά, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της επιφάνειας της γης, στη ρύθμιση του κλίματος και της ισορροπίας των οικοσυστημάτων, καθώς βρίσκεται σε συνεχή κυκλική κίνηση μέσω της ατμόσφαιρας, της επιφάνεια της γης και του υπεδάφους (υδρολογικός κύκλος) (Εικ. 1-5).



Εικόνα 1-4: Υδρολογικός κύκλος νερού (<https://el.wikipedia.org/>)

Το νερό αποτελεί το 0,5% του βάρους της Γης, ενώ καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του πλανήτη μας (75%). Ωστόσο, μόνο το 3% αποτελεί γλυκό νερό και από αυτό μόνο το 0,3% είναι το επιφανειακό νερό (Εικ 1-6), ενώ για ανθρώπινη κατανάλωση (πόσιμο νερό) είναι μόνο το 1%.



Εικόνα 1-5: Παγκόσμια κατανομή νερού (<https://el.wikipedia.org/>)

Το νερό είναι ιδιαίτερης σημασία και στη γεωργία, καθώς συμβάλλει στη διατροφή του πλανήτη, στην παροχή μέσων διαβίωσης και στην οικοδόμηση ανθεκτικότητας σε ακραίες κλιματικές καταστάσεις. Ωστόσο, η βιώσιμη επίτευξη αυτών των στόχων απειλείται από την αυξανόμενη ζήτηση για τρόφιμα και φυτικές ίνες, από τη μη βιώσιμη χρήση των πόρων και τη συνεχώς αυξανόμενη αστάθεια και αλλαγή του κλίματος [19].

Το μεγαλύτερο μερίδιο στην παγκόσμια κατανάλωση νερού το κατέχει σήμερα η γεωργία, αν και οι αρδευόμενες εκτάσεις δεν ξεπερνούν το 20 % της γεωργικής έκτασης, καταναλώνουν περισσότερο από το 70% των υδάτινων πόρων, υποστηρίζοντας το 40% της παραγωγής τροφίμων και ζωοτροφών, αλλά και το 55% της αξίας παραγωγής [19]. Στην Ελλάδα και στις χώρες της Μεσογείου, η κατανάλωση νερού για τη γεωργία είναι κοντά στο 80-85% του νερού καλής ποιότητας [20]. Το νερό είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των φυτών και τη διατήρηση της παραγωγικότητας του εδάφους. Χρησιμοποιείται για την άρδευση των φυτών και την παροχή υγρασίας στο έδαφος, προκειμένου να διατηρείται η επιθυμητή παραγωγή. Η έλλειψη νερού μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στην γεωργική παραγωγή, καθώς η ξηρασία μπορεί να προκαλέσει μείωση της σοδειάς και απώλεια της παραγωγικότητας του εδάφους. Σήμερα η διαθεσιμότητα του νερού απειλείται από τη κλιματική αλλαγή, η οποία επηρεάζει το κύκλο του νερού στο περιβάλλον, με αυξημένο κίνδυνο ξηρασίας και πλημμυρών [21]. Σε παγκόσμιο επίπεδο η κατανάλωση νερού αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς λόγω της αύξησης του αριθμού των βιομηχανικών μονάδων, την αύξηση των καλλιεργουμένων εκτάσεων που χρησιμοποιούν τεχνικές εντατικοποίησης της άρδευσης για μεγαλύτερες αποδόσεις και της αύξησης του βιοτικού επιπέδου και των καταναλωτικών συνήθειων του πληθυσμού [22]. Η αειφόρος χρήση του νερού δηλαδή η χρήση του νερού με σύνεση και η ορθολογική διαχείριση του με σεβασμό στο περιβάλλον μπορούν να συμβάλουν στην μείωση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. [23].

#### 1.4.1 Αειφορική γεωργία και νερό

Ένα αειφορικό σύστημα διαχείρισης καλλιεργειών περιλαμβάνει πρακτικές που στοχεύουν στην αποτελεσματική χρήση των εισροών συμπεριλαμβανομένου του νερού. Συγκεκριμένα στην αειφορική διαχείριση του εδάφους σε σχέση με το νερό, χρησιμοποιούνται επιτολαιόριζες καλλιέργειες, δηλαδή καλλιέργειες με πυκνό ριζικό σύστημα μικρού εδαφικού βάθους, για μείωση της απορροής του νερού άρδευσης, αλλά και χρήση καλλιέργειας μικρής ανάπτυξης σε επικλινή εδάφη (όσο το δυνατόν οριζόντια με την κλίση του εδάφους) για να επιτυγχάνεται μείωση της διάβρωσης και συγκράτηση του νερού. Επιπλέον τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση του εδάφους σε σχέση με το νερό είναι να αυξήσουμε την οργανική ουσία στο έδαφος ώστε να αυξηθεί και η υδατοϊκανότητα του εδάφους. Η μείωση των απωλειών νερού μπορεί να επιτευχθεί με την με εφαρμογή της φυτοκάλυψης του εδάφους (mulching). Επιπλέον η καταστροφή των ζιζανίων αποτελεί μια ακόμη πρακτική που μειώνει τον ανταγωνισμό για το νερό, αυξάνοντας την διαθεσιμότητα του στα καλλιεργούμενα φυτά [24].

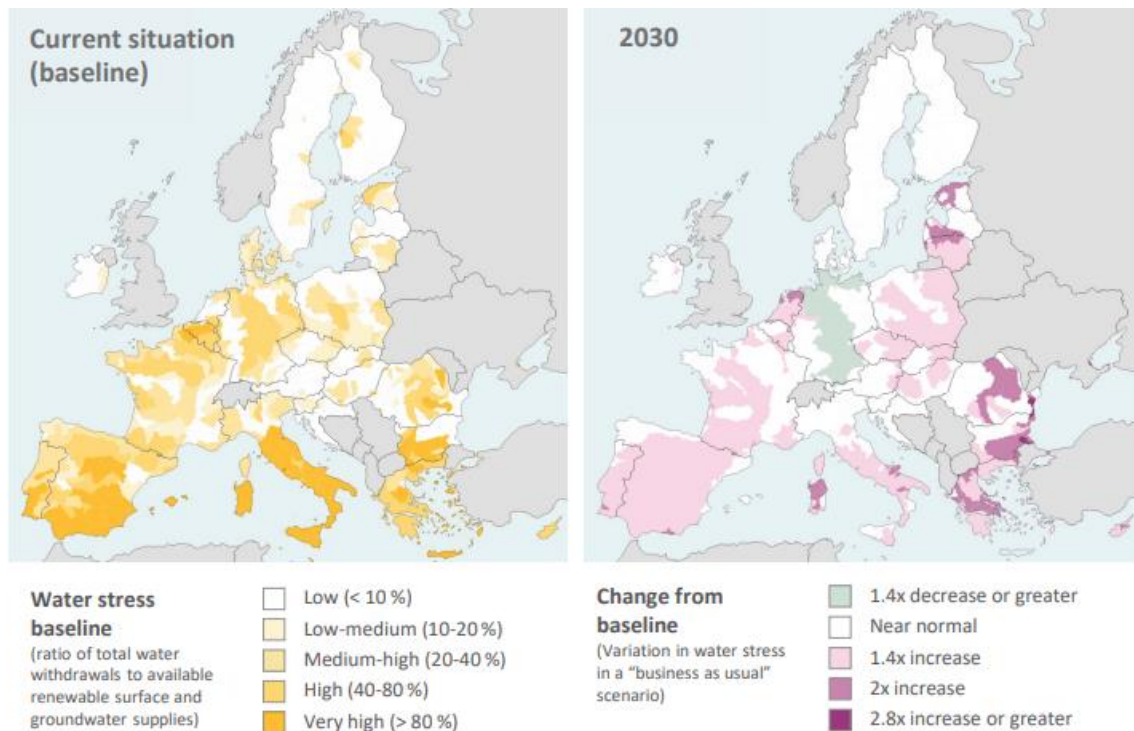
Η γεωργία, όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί τον κλάδο στον οποίο παρατηρούνται τα μεγαλύτερα ποσοστά κατανάλωσης νερού. Τα τελευταία χρόνια γίνονται εντατικές προσπάθειες για την αποτελεσματικότερη διαχείριση των περιορισμένων διαθέσιμων ποσοτήτων νερού (water use efficiency, WUE), το οποίο αποτελεί έναν από τους ΣΒΑ (WUE-SDG6.4) Η αποτελεσματική χρήση του νερού μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη οικονομική παραγωγικότητα (π.χ. απόδοση καλλιέργειας ή έσοδα) ανά μονάδα νερού, δηλαδή η παραγωγικότητα μπορεί να αυξηθεί χωρίς αλλαγή στο ποσοστό χρήσης νερού και να οδηγήσει σε αυξημένη WUE [25] άρδευση μέσω αειφορικών συστημάτων που συστήνονται τελευταία, όπως της γεωργίας ακριβείας στοχεύει στην αποτελεσματική χρήση νερού ταυτόχρονα όμως εξοικονομώντας σημαντική ποσότητα νερού σε κάθε εφαρμογή. Για παράδειγμα η άρδευση ακριβείας δίνει τη δυνατότητα στους γεωργούς να εφαρμόσουν στοχευμένη χρήση νερού, ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις των αγροκτημάτων και των καλλιεργειών τους.[26]

Η αειφορική γεωργία συνιστά μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που επιδιώκει τη βελτίωση της αποδοτικότητας στη χρήση του νερού και την προστασία του υδατικού περιβάλλοντος. Η άρδευση στο πλαίσιο της αειφορίας περιλαμβάνει την εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογικών συστημάτων άρδευσης που μειώνουν τις απώλειες νερού, τον προσαρμοσμένο σχεδιασμό της άρδευσης με βάση τα εδαφοκλιματικά χαρακτηριστικά και τις ανάγκες των καλλιεργειών, καθώς και την χρήση τεχνικών που απαιτούν λιγότερο νερό [24]. Επίσης, σημαντική είναι η εκπαίδευση των αγροτών για τον βέλτιστο σχεδιασμό της άρδευσης, αλλά και την προστασία των υδάτινων πόρων από τη ρύπανση από περίσσεια θρεπτικών ουσιών και φυτοφαρμάκων, εφαρμόζοντας βέλτιστες πρακτικές κατά τη χρήση τους [27].

## 2. ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

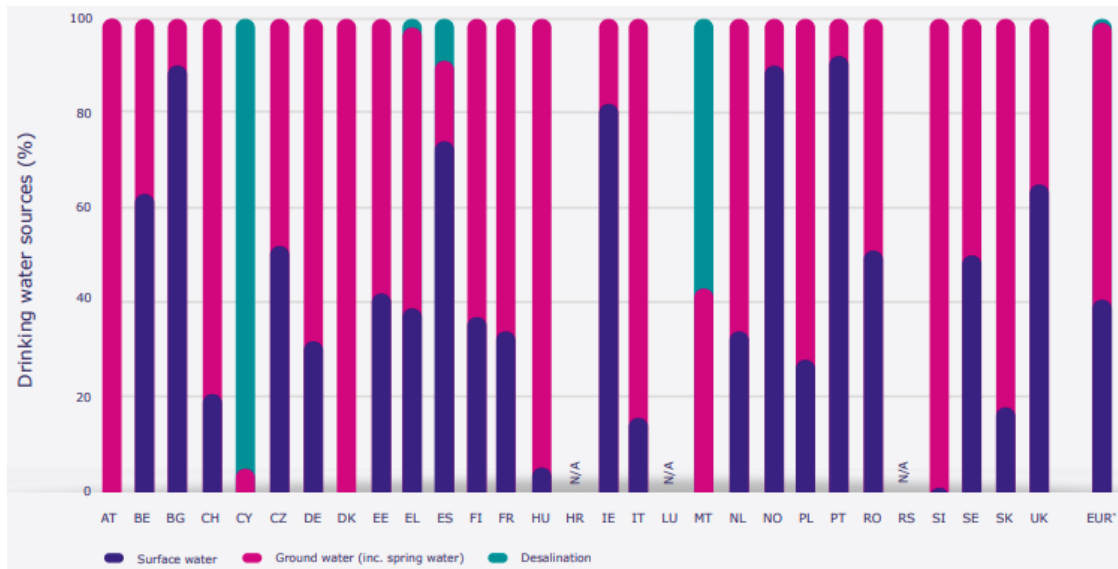
### 2.1 Η ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ- ΑΝΑΓΚΕΣ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

Σύμφωνα με την Παγκόσμια Τράπεζα [28] σημειώθηκε τα τελευταία 55 χρόνια μια κατά κεφαλήν μείωση κατά 17% σε πανευρωπαϊκό επίπεδο στους ανανεώσιμους υδάτινους πόρους. Αν και η αύξηση του πληθυσμού είναι ο κύριος λόγος αυτής της μείωσης, ωστόσο η πίεση από την οικονομική δραστηριότητα και η κλιματική αλλαγή επιδεινώνει την εποχική και ετήσια λειψυδρία σε μέρη της ΕΕ [23]. Η κλιματική αλλαγή, αποτυπώνοντας συχνότερα υψηλότερες μέσες θερμοκρασίες, περισσότερα ακραία καιρικά φαινόμενα (συμπεριλαμβανομένης της ξηρασίας), καθιστά το γλυκό νερό πιο σπάνιο στην ΕΕ. Η έκθεση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (ΕΟΠ) [29] για τη διαθεσιμότητα του νερού στην Ευρώπη παραθέτει ότι η νότια Ευρώπη αντιμετωπίζει τα σοβαρότερα προβλήματα λειψυδρίας, ωστόσο η πίεση στους υδάτινους πόρους άρχισε πλέον και σε ορισμένες περιοχές του Βορρά. Οι προβλέψεις δείχνουν ότι το υδατικό στρες είναι πιθανό να αυξηθεί σε σημαντικό τμήμα της ΕΕ έως το 2030 (Εικ 2-1).



**Εικόνα 2-1: Υδατικό στρες στην Ευρώπη και μελλοντικές προβλέψεις (Πηγή World, Resource Institute, WRI, 2021)**

Η κύρια πηγή του πόσιμου νερού, σύμφωνα με πρόσφατη έκθεση (2021) του ευρωπαϊκού οργανισμού EurEau για το πόσιμο νερό, φαίνεται να προέρχεται από τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες στις περισσότερες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Εικ. 2-2) [30], δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στην ορθή διαχείριση των υπόγειων υδάτων.



Εικόνα 2-2: Πηγές του πόσιμου νερού στην Ευρώπη (Πηγή: EurEau, 2021)

Σύμφωνα με την ίδια έκθεση του ΕΟΠ (2009) [29] τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η ΕΕ σε ό,τι αφορά τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των υδάτινων πηγών της είναι τα εξής:

- εξάντληση και υφαλμύριση (ανάμειξη “γλυκού” νερού με θαλασσινό) των υπόγειων υδάτων, λόγω της εντατικής και μη ελεγχόμενης εκμετάλλευσής τους
- ρύπανση που απειλεί το 20% των επιφανειακών υδάτων στην ΕΕ
- έντονες βροχοπτώσεις στον Βορρά, που αυξάνουν την πιθανότητα πλημμυρών
- μεγάλη πληθυσμιακή αύξηση λόγω του τουρισμού στον Νότο, που φέρνει αύξηση της ζήτησης τους θερινούς μήνες, όταν υπάρχει περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού

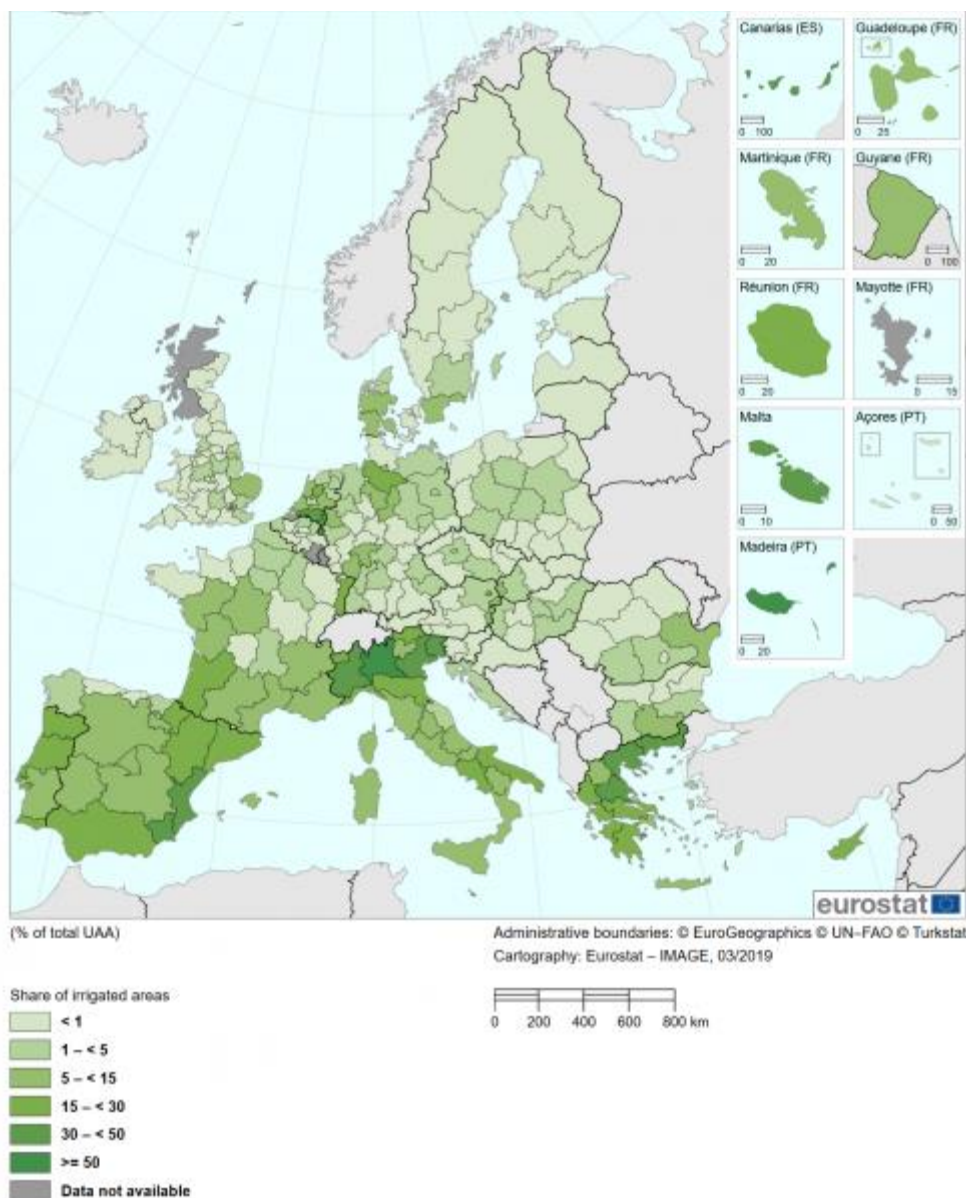
### 2.1.1 Η γεωργία χρειάζεται το νερό

Η αγροτική παραγωγή εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα νερού, όπως προαναφέρθηκε. Η άρδευση έχει πολλαπλά οφέλη για τους αγρότες, όπως η αύξηση της βιωσιμότητας, της απόδοσης και της ποιότητας των καλλιεργειών. Το νερό άρδευσης προέρχεται από ρυάκια, ποτάμια και λίμνες (επιφανειακά υδάτινα σώματα), πηγάδια, γεωτρήσεις (υπόγεια υδάτινα σώματα), και σε ορισμένες περιπτώσεις από συλλογή όμβριων υδάτων και ανακτημένα λύματα (έπειτα από επεξεργασία καθαρισμού). Περίπου το 6% της γεωργικής γης στην ΕΕ αρδεύτηκε το 2016, ενώ το πόσιμο νερό για τα ζώα αντιπροσωπεύει ένα μικρό ποσοστό γεωργικής χρήσης νερού [23]. Οι μεσογειακές χώρες είχαν το μεγαλύτερο ποσοστό της αρδεύσιμης έκτασης σε σχέση με τη συνολική καλλιεργήσιμη έκταση, όπου συγκεκριμένα η Μάλτα, η Ελλάδα η Κύπρος και η Ιταλία παρουσίασαν τα μεγαλύτερα ποσοστά 31,4%, 23,6%, 21% και 20,2% αντίστοιχα (Εικ. 2-3) [31]. Η αρδευόμενη γεωργία είναι, κατά μέσο όρο, τουλάχιστον δύο φορές πιο παραγωγική ανά μονάδα γης από τη βροχοδιαίτη γεωργία, επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερη εντατικοποίηση της παραγωγής και διαφοροποίηση των καλλιεργειών [19].

Τα συστήματα των υπόγειων υδάτων αποτελούν την κυρίαρχη δεξαμενή και απόθεμα γλυκού νερού στη Γη [32], όπως και παρέχουν την κύρια πηγή πόσιμου νερού για περίπου το ήμισυ του παγκόσμιου πληθυσμού [33]. Επιπλέον, όμως, αντιπροσωπεύουν και ένα αυξανόμενο μερίδιο για γεωργική χρήση που φτάνει περίπου στο 40% του χρησιμοποιούμενου νερού άρδευσης, καλύπτοντας λίγο λιγότερο από το 40% της αρδευόμενης γης παγκοσμίως



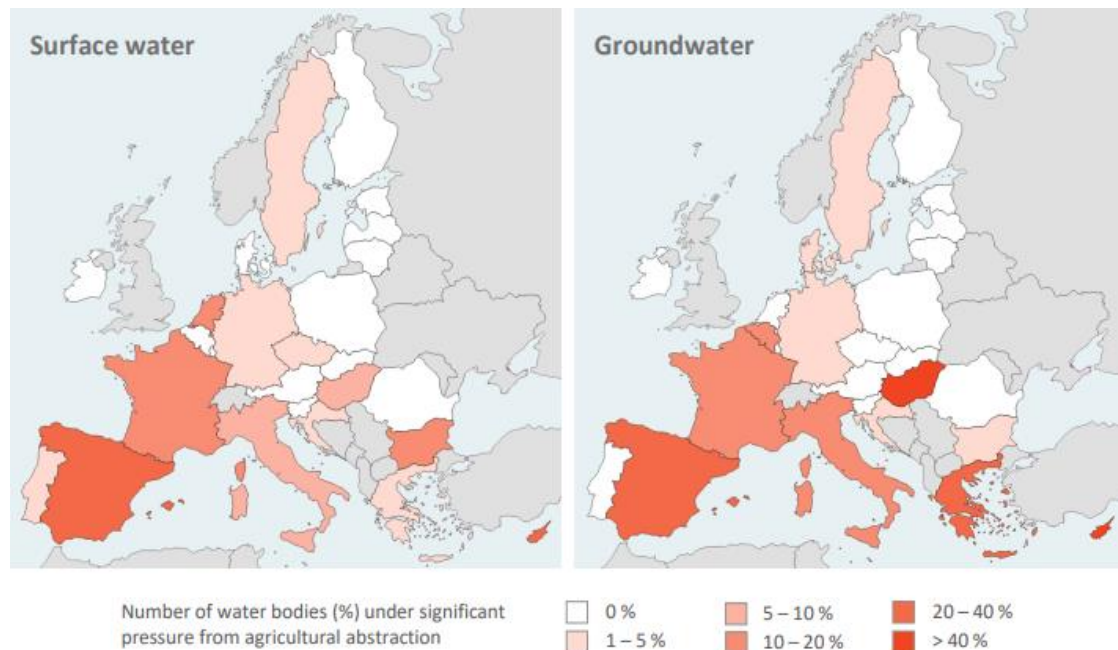
[34]. Περισσότερο από το 60% των αντλούμενων υπόγειων υδάτων καταναλώνεται από τη γεωργία σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές, παράγοντας το 40% της τροφής παγκοσμίως. [35]



**Εικόνα 2-3: Share of irrigated areas in UAA by NUTS 2 regions, EU-28, 2016 (% of total UAA) (Πηγή: Eurostat 2016)**

Μια πρόσφατη έκθεση του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος [36] παρουσιάζει τη γεωργία να είναι υπεύθυνη για το 24 % των αντλούμενων υδάτινων πόρων σε ολόκληρη την Ευρώπη, ενώ το 44% χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας το 21% για τα δημόσια συστήματα υδροδότησης και το 11% για τη βιομηχανία. Στη νότια Ευρώπη για παράδειγμα, η γεωργία απορροφά το 60% των συνολικών αντλούμενων υδάτινων πόρων, ενώ σε ορισμένες περιοχές το ποσοστό αυτό αγγίζει το 80% [36]. Συγκεκριμένα αναφέρει ότι τα τελευταία 30 χρόνια παρατηρήθηκε κάποια μείωση των πιέσεων για άντληση νερού, η οποία επιτεύχθηκε χάρη στην αύξηση της αποδοτικότητας στους πόρους χρήση. Επιπλέον αναφέρεται ότι η γεωργική χρήση νερού σε επίπεδο ΕΕ έχει μειωθεί κατά 28 % από το 1990, ενώ το πλεόνασμα Ν μειώθηκε κατά 10 % και η συγκέντρωση νιτρικών στα ποτάμια κατά 20 % από το 2000.

Ωστόσο, τα περαιτέρω κέρδη ήταν μέτρια τη δεκαετία του 2010 και οι πιέσεις συνεχίζονται και παραμένουν σε εξαιρετικά μη βιώσιμα επίπεδα. Το 2015, αναφέρθηκε στην Επιτροπή από τα κράτη μέλη η σημαντική πίεση των υδάτινων όγκων από την άντληση νερού από τη γεωργία [23] ( Εικ 2-4).



**Εικόνα 2-4: Αριθμός υδάτινων όγκων υπό σημαντική πίεση από την άντληση νερού άρδευσης για τη γεωργία (Πηγή: European Environmental Agency, EEA, 2018, 'WISE Water Framework Directive )**

### 2.1.2 Γεωργία ως ρυπαντής του νερού

Η γεωργία δεν επηρεάζει μόνο την ποσότητα του νερού, αλλά και την ποιότητά του. Αποτελεί σημαντικό παράγοντα ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, καθώς τα αγροκτήματα απορρίπτουν μεγάλες ποσότητες αγροχημικών, οργανική ύλη, υπολείμματα φυτοφαρμάκων, ιζήματα και αλατούχα νερά αποστράγγισης στα υδάτινα σώματα. Η ρύπανση των υδάτων που προκύπτει εγκυμονεί αποδεδειγμένους κινδύνους για τα υδάτινα οικοσυστήματα (π.χ. ευτροφισμός), την ανθρώπινη υγεία (π.χ. σύνδρομο μπλε-μωρού) και τις παραγωγικές δραστηριότητες [37].

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, το 38 % των υδάτινων όγκων είναι σε σημαντική πίεση από τη γεωργική ρύπανση [38]. Η υπερβολική άντληση ποσότητας νερού σε παράκτιες περιοχές μπορεί να προκαλέσει διείσδυση αλμυρού νερού στα υπόγεια ύδατα, όπως και η μειωμένη ροή νερού, ελαττώνει την αραιώση των ρύπων, συμβάλλοντας έτσι στην χαμηλή ποιότητα του νερού [23].

Η γεωργικές πιέσεις στην ποιότητα του νερού προέρχονται από τα συστήματα καλλιέργειας, κτηνοτροφίας και υδατοκαλλιέργειας, τα οποία έχουν εντατικοποιηθεί για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση τροφίμων που σχετίζονται με την αύξηση του πληθυσμού και τις αλλαγές στα διατροφικά πρότυπα (Πιν.1).

**Πίνακας 1: Κατηγορίες μεγάλων υδάτινων ρύπων στη γεωργία και η σχετική συνεισφορά τους στα τρία βασικά συστήματα γεωργικής παραγωγής (Πηγή: FAO, 2017)**

Pollutant category	Indicators/examples	Relative contribution by:		
		Crops	Livestock	Aquaculture
Nutrients	Primarily nitrogen and phosphorus present in chemical and organic fertilizers as well as animal excreta and normally found in water as nitrate, ammonia or phosphate	***	***	*
Pesticides	Herbicides, insecticides, fungicides and bactericides, including organophosphates, carbamates, pyrethroids, organochlorine pesticides and others (many, such as DDT, are banned in most countries but are still being used illegally and persistently)	***	-	-
Salts	E.g. ions of sodium, chloride, potassium, magnesium, sulphate, calcium and bicarbonate. Measured in water, either directly as total dissolved solids or indirectly as electric conductivity	***	*	*
Sediment	Measured in water as total suspended solids or nephelometric turbidity units – especially from pond drainage during harvesting	***	***	*
Organic matter	Chemical or biochemical oxygen-demanding substances (e.g. organic materials such as plant matter and livestock excreta), which use up dissolved oxygen in water when they degrade	*	***	**
Pathogens	Bacteria and pathogen indicators. E.g. Escherichia coli, total coliforms, faecal coliforms and enterococci	*	***	*
Metals	E.g. selenium, lead, copper, mercury, arsenic and manganese	*	*	*
Emerging pollutants	E.g. drug residues, hormones and feed additives	-	***	**

Η Ελλάδα αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα σχετικά με τα ύδατα, καθώς οι πόροι υδάτων, είτε επιφανειακοί είτε υπόγειοι, υποβάλλονται σε υψηλή πίεση λόγω της υπερβολικής χρήσης νερού (Εικ.2-4) και της ρύπανσης που προέρχεται από διάφορες πηγές, είτε αυτές είναι τοπικές είτε μη.

## 2.2 ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η ζήτηση και προσφορά νερού στη γεωργία είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα, καθώς το νερό παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση της καλλιέργειας και στην αύξηση των γεωργικών

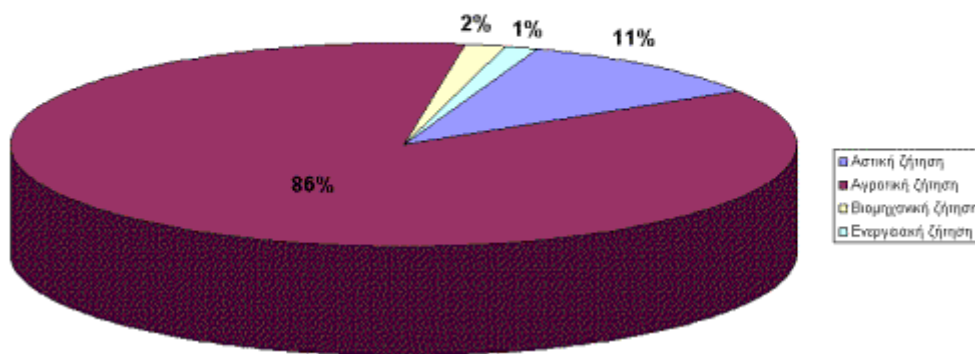
προϊόντων. Η προσφορά νερού στην γεωργία εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα υδάτων στην περιοχή, την ποιότητά του και τη δυνατότητα αποθήκευσης του. Η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για την άρδευση, από την άλλη, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:

- Οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή
- το είδος και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας,
- η ένταση της καλλιέργειας
- τα ειδικότερα χαρακτηριστικά του εδάφους και τα χαρακτηριστικά του νερού,
- το μέγεθος των αρδευόμενων εκτάσεων,
- ο βαθμός εκσυγχρονισμού των αρδευτικών δικτύων
- η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία άρδευσης και
- υιοθέτηση νέων τεχνικών (όπως η έξυπνη άρδευση)

αποτελούν παράγοντες που προσδιορίζουν την απαιτούμενη ποσότητα νερού χορήγησης στις καλλιέργειες. [39].

Στην Ελλάδα 8,3 δισ. κυβικά μέτρα νερού καταναλώνονται κάθε χρόνο, εκ των οποίων το 86% χρησιμοποιείται στη γεωργία, το 11% στην ύδρευση και το 3% στη βιομηχανία και την ενέργεια (Εικ. 2-5). Από το ποσοστό της αγροτικής χρήσης το 96% χρησιμοποιείται για άρδευση και από αυτό το 45% χάνεται σε απώλειες κατά τη μεταφορά του νερού, την εφαρμογή στον αγρό και λόγω υπεράρδευσης [21]. Την περίοδο 2011-2018, η κατανάλωση νερού στον γεωργικό τομέα αντιπροσώπευε το 82% του συνόλου του νερού (των γλυκών υδάτων) που αφαιρέθηκε από τα υπόγεια ύδατα της Ελλάδας, σημειώνοντας το υψηλότερο ποσοστό στον Οργανισμό Οικονομική Συνεργασίας και Ανάπτυξης, ΟΟΣΑ (OECD) [40].

Συνολική κατανομή της ζήτησης νερού στην Ελλάδα

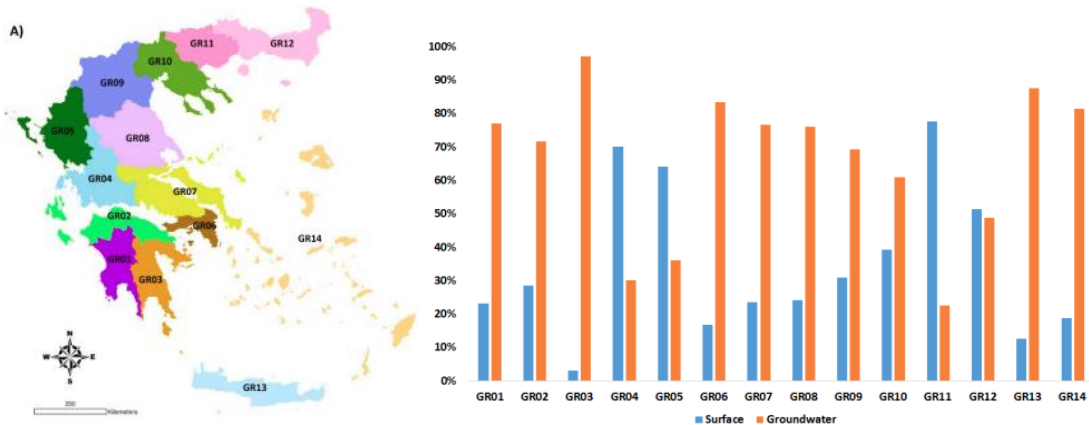


Εικόνα 2-5: Χρήση νερού στην Ελλάδα (Πηγή: EASAC, 2010)

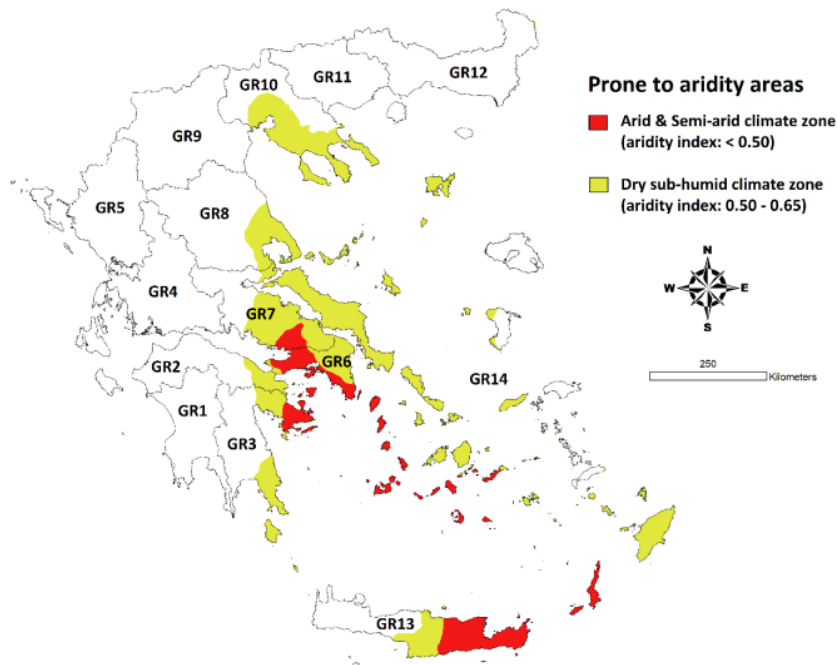
Μέχρι σήμερα η Mimikou (2005) [41] ήταν η πιο πρόσφατη έρευνα που αποτύπωνε μια γενική εικόνα των διαθέσιμων υδάτινων πόρων στην Ελλάδα, της χρήσης και κατανάλωσης του νερού χωρίς ποιοτικές και ποσοτικές λεπτομέρειες των υδάτινων όγκων (επιφανειακών και υπόγειων). Ωστόσο, το κενό αυτό καλύπτεται πλέον από τη χρονική και χωρική επικαιροποίηση της ποιότητας και ποσότητας των υδάτινων πόρων από τον Kourgiala (2021)[42].

Καθώς οι υπόγειοι υδροφόροι όγκοι αποτελούν την κύρια πηγή νερού στην Ελλάδα με μέσο ποσοστό κοντά στο 70% (Εικ. 2-6) λόγω της αλλαγής αρκετών περιοχών προς ξηρότερες κλιματικές συνθήκες (from humid class (> 1200 mm of rain/year), to dry-sub-humid and semi-

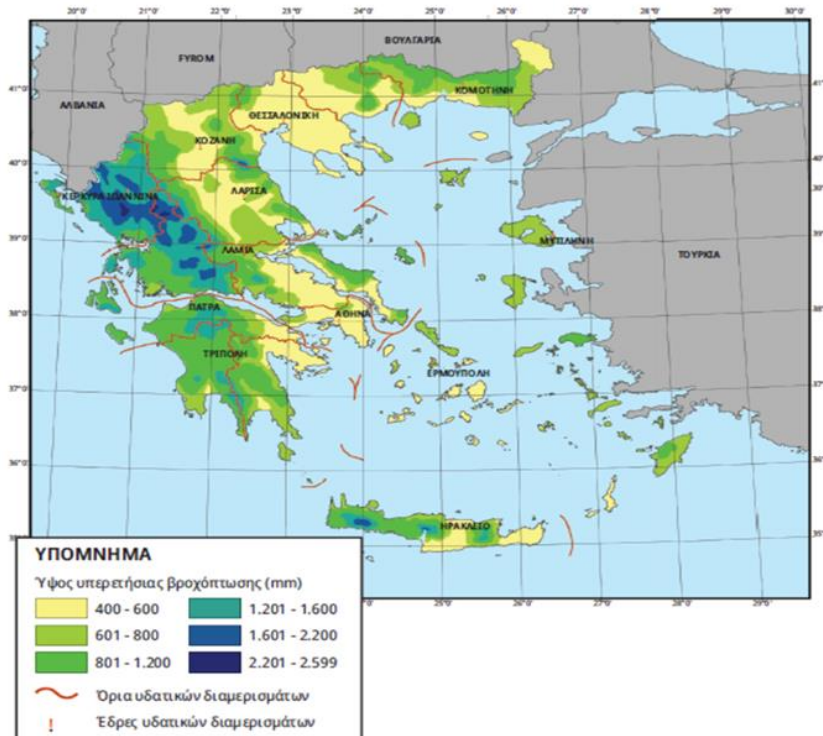
arid classes (400 to 1200 mm of rain/year, FAO, 1986), (Εικ. 2-7 & 2-8), είναι πολύ σημαντικό να ελέγχεται η δυναμικότητα των υπόγειων πηγών νερού [42]. Η ποσότητα της διαθέσιμων υπόγειων υδάτων εξαρτάται από τη διακύμανση της στάθμης των υπόγειων νερών. «Καλή ποσοτική κατάσταση» σημαίνει ότι οι υδατικοί πόροι είναι διαθέσιμοι προς εκμετάλλευση και δεν υπάρχει κίνδυνος εξάντλησης του υδροφόρου ορίζοντα, ενώ η αντίθετη περίπτωση χαρακτηρίζει το υπόγειο υδατικό σύστημα ως «κακή ποσοτική κατάσταση» (Εικ.2-9) [42].



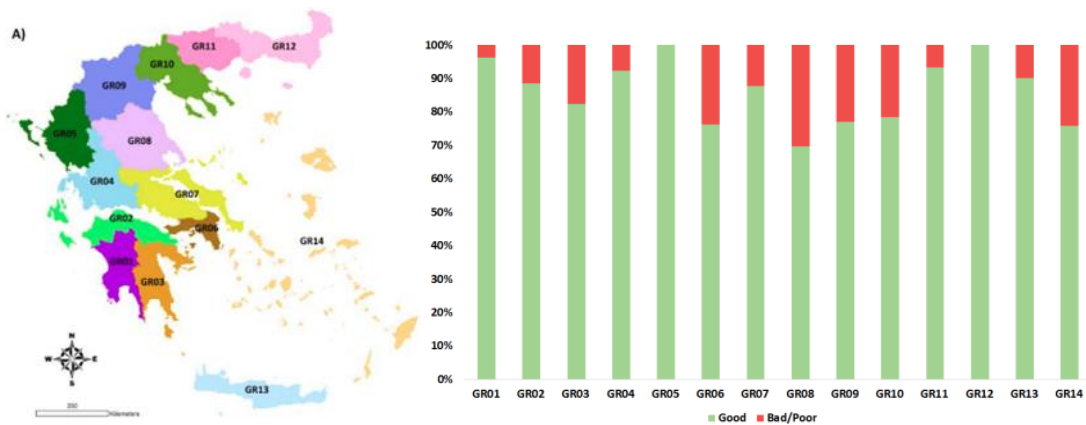
Εικόνα 2-6: Ταξινόμηση του νερού στις υδατικές περιοχές της Ελλάδας (Πηγή: Kourgialas 2021)



Εικόνα 2-7: Περιοχές της Ελλάδας που τείνουν σε ξηρικές κλιματικές συνθήκες (Πηγή: Kourgialas 2021)

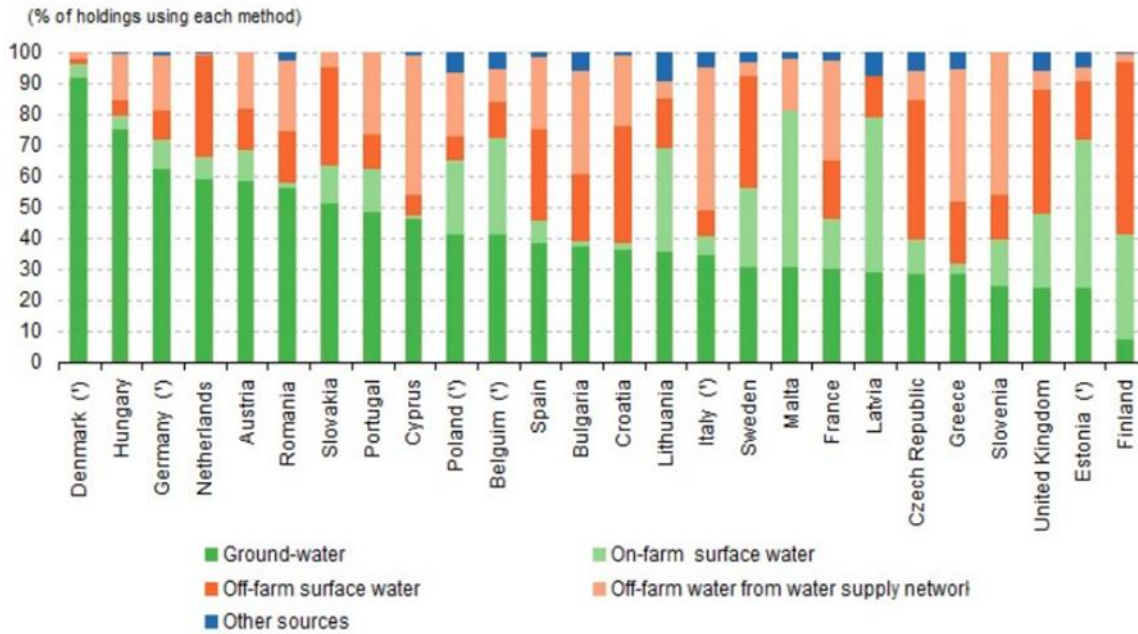


Εικόνα 2-8: Ετήσια βροχόπτωση σε mm (Πηγή: Πολύζος, 2022)



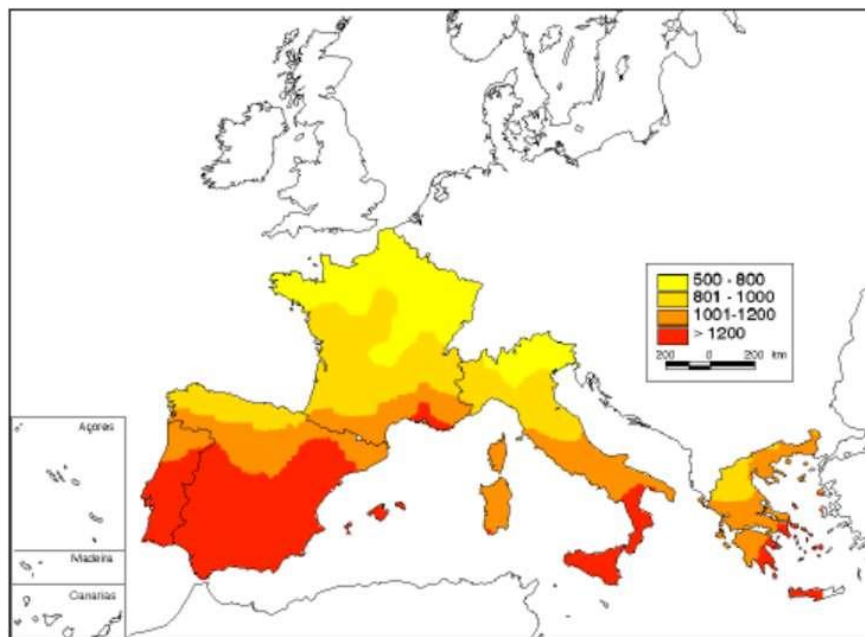
Εικόνα 2-9: Δυναμικότητα των υπόγειων υδάτων των υδατικών περιοχών της Ελλάδας (Πηγή: Kourgialas 2021)

Η γεωργία συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στην καταπόνηση των υπόγειων υδάτων [43] , ενώ η εντατική χρήση τους έχει προκαλέσει δραματική πτώση της στάθμης των υπόγειων υδάτων σε ορισμένες αγροτικές περιοχές (Εικ 2-10).



Εικόνα 2-10: Προέλευση νερού άρδευσης στην ΕΕ-28, 2010 (Eurostat, 2016)

Το υψηλό ποσοστό άντλησης υπόγειων υδάτων δικαιολογείται εν μέρει από τις κλιματολογικές συνθήκες της χώρας (υψηλότερες θερμοκρασίες, χαμηλότερες βροχοπτώσεις, άρα υψηλότερες υδατικές ανάγκες). Σε αντίθεση με τις βορειότερες χώρες της Ευρώπης, οι μεσογειακές χώρες έχουν περισσότερη ανάγκη την άρδευση, καθώς οι υψηλότερες θερμοκρασίες συντελούν σε υψηλότερη εξατμισοδιαπνοή στην θερινή περίοδο, ενώ οι βροχοπτώσεις είναι ελάχιστες με αποτέλεσμα οι περισσότερες καλλιέργειες να έχουν σημαντικές ανάγκες σε νερό [44] (Εικ. 2-11).



Εικόνα 2-11: Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή στις μεσογειακές χώρες (Πηγή: Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας, ΕΤΥΜΠ, 2005)

Σύμφωνα με την έκθεση της IPCC 2014, στην Ελλάδα προβλέπεται ότι οι μέσες ετήσιες θερμοκρασίες και η εξατμισοδιαπνοή θα αυξηθούν περισσότερο από ό,τι σε παγκόσμιο επίπεδο. Ιδιαίτερα, οι υψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού αναμένεται να αυξηθούν σημαντικά. Συγκεκριμένα, η Ελλάδα και η παγκόσμια μέση εξατμισοδιαπνοή αναμένεται να αυξηθεί κατά 9,65 χιλιοστά ανά δεκαετία και η παγκόσμια μέση αύξηση είναι περίπου 6,15 χιλιοστά ανά δεκαετία, κατά την περίοδο 2010-2099. [42].

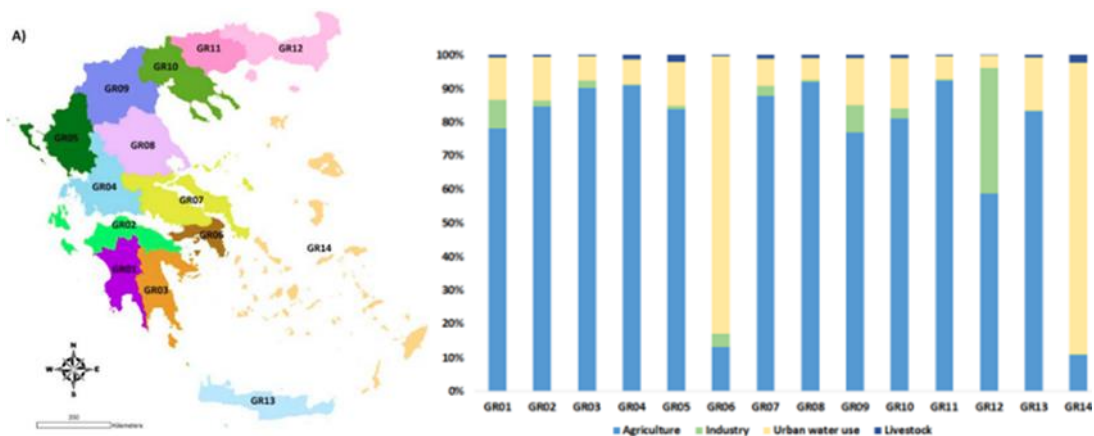
Ο Ελληνικός γεωργικός τομέας έχει γνωρίσει σημαντικό βαθμό βελτιώσεων από την δεκαετία του 1980. Ο κυριότερος παράγοντας που συνέβαλε στην ανάπτυξη του γεωργικού τομέα ήταν η διαθεσιμότητα του νερού, η οποία περιλαμβάνει μόνο το τελικό όγκου νερού που εφαρμόζεται κατά την άρδευση (65% του αρχικού όγκου νερού), καθώς ένα μεγάλο ποσό χάνεται λόγω εξάτμισης, διαρροών ή υπεράρδευσης (45%) [20].

Η συνολική γεωργική έκταση που αρδεύτηκε το 2019 στην Ελλάδα έφτανε περίπου το 37% της συνολικής γεωργικής χρήσης γης (Πιν.2) (ΕΛΣΤΑΤ, 2019), ενώ το 2020 το ποσοστό μειώθηκε στο 34 % της συνολικής γεωργικής χρήσης γης (ΕΛΣΤΑΤ, 2021)[45].

**Πίνακας 2: Συνολική αρδευόμενη έκταση σε χιλιάδες στρέμματα, ΕΛΣΤΑΤ 2019**

Κατηγορία καλλιέργειας	2018	2019	Μεταβολή (%) 2019/2018
<b>Συνολική καλλιεργούμενη γεωργική γη</b>	<b>32.216,8</b>	<b>32.165,4</b>	<b>-0,2</b>
Αρδευθείσες	12.278,7	11.853,3	-3,5

Τα ποσοστά κατανάλωσης νερού για τη γεωργία στα 14 διαμερίσματα της Ελλάδας κυμαίνονται μεταξύ 11-94% του συνόλου του νερού, με ένα μέσο όρο να φτάνει το 74%, υποδεικνύοντας ότι η γεωργία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής νερού στην Ελλάδα, με περιοχές όπως η Θεσσαλία και η Ανατολική Μακεδονία να καταναλώνουν τα μεγαλύτερα ποσοστά (Εικ. 2-11) [42]. Παρόμοια δεδομένα μας είχε δώσει η Eurostat (2016), όπου αναφέρει ότι η Κεντρική και Ανατολική Μακεδονία, και η Θεσσαλία παρουσίασαν το μεγαλύτερο ποσοστό άρδευσης [31]. Οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν και χαμηλότερα ποσά βροχόπτωσης, αφού τα υψηλότερα ποσά φυσικών κατακρημνίσεων λαμβάνει η Ήπειρος ακολουθούμενη από τη Δυτική Στερεά Ελλάδα και τη Δυτική Πελοπόννησο, ενώ οι περιοχές των νησιών του Αιγαίου και η Αττική έχουν τη χαμηλότερη βροχόπτωση [42].



**Εικόνα 2-12: Κατανάλωση νερού ανά κατηγορία χρήσης στα 14 υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας (Πηγή: Kourgialas 2021)**



Ο όγκος νερού που καταναλώνεται στην άρδευση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες. Σε περιοχές με ημι-ξηρικό, ξηροθερμικό κλίμα, όπως είναι οι περισσότερες μεσογειακές περιοχές τους καλοκαιρινούς μήνες, η μόνη πηγή νερού για την καλλιέργεια αποτελεί η άρδευση, σε αντίθεση με άλλες χώρες της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης όπου η συμπληρωματική άρδευση χρησιμοποιείται γενικά ως συμπλήρωμα των φυσικών κατακρημνίσεων και για τη βελτίωση της παραγωγής σε ξηρά καλοκαίρια, ιδίως όταν η ξηρή περίοδος εμφανίζεται σε ευαίσθητο στάδιο καλλιέργειας [46]. Η ετήσια βροχόπτωση αναμένεται να μειωθεί στις περισσότερες μεσογειακές περιοχές, καθώς και στην Ελλάδα, με τον ετήσιο αριθμό βροχοπτώσεων ημέρες μειώνονται [42].

### 2.3 ΥΔΑΤΙΚΟ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ

Το υδατικό αποτύπωμα ή αποτύπωμα νερού (WF) είναι ένας σύνθετος δείκτης κατανάλωσης νερού που αναπτύχθηκε από την Water Footprint Network (WFN) [47] που περιγράφει την κατανάλωση του επιφανειακού και υπόγειου νερού περιλαμβάνει ποσοτικά, ποιοτικά, γεωγραφικά και χρονικά στοιχεία και αποτελεί ένα νέο εργαλείο για την αειφορική διαχείριση των υδατικών πόρων. Το WF εξετάζει τόσο την άμεση όσο και έμμεση χρήση του νερού που καταναλώνεται για την παραγωγή προϊόντων και υπηρεσιών, είναι στενά συνδεδεμένο με την έννοια του εικονικού νερού και αντιπροσωπεύει το συνολικό όγκο φρέσκου νερού που έχει χρησιμοποιηθεί, καταναλωθεί και/ή ρυπανθεί [48]. Ο άρχισε να χρησιμοποιείται ως όρος από το 2002 και μπορεί να εκφραστεί σε επίπεδο ατομικής κατανάλωσης, σε επίπεδο ενός προϊόντος, ακόμα και ενός κράτους [48].

Το εικονικό νερό αντιπροσωπεύει την έμμεση κατανάλωση νερού, ενσωματώνεται στη συνολική κατανάλωση νερού και αφορά την ποσότητα νερού που απαιτείται για την παραγωγή τροφίμων ή προϊόντων της εφοδιαστικής αλυσίδας (Εικ 2-13).

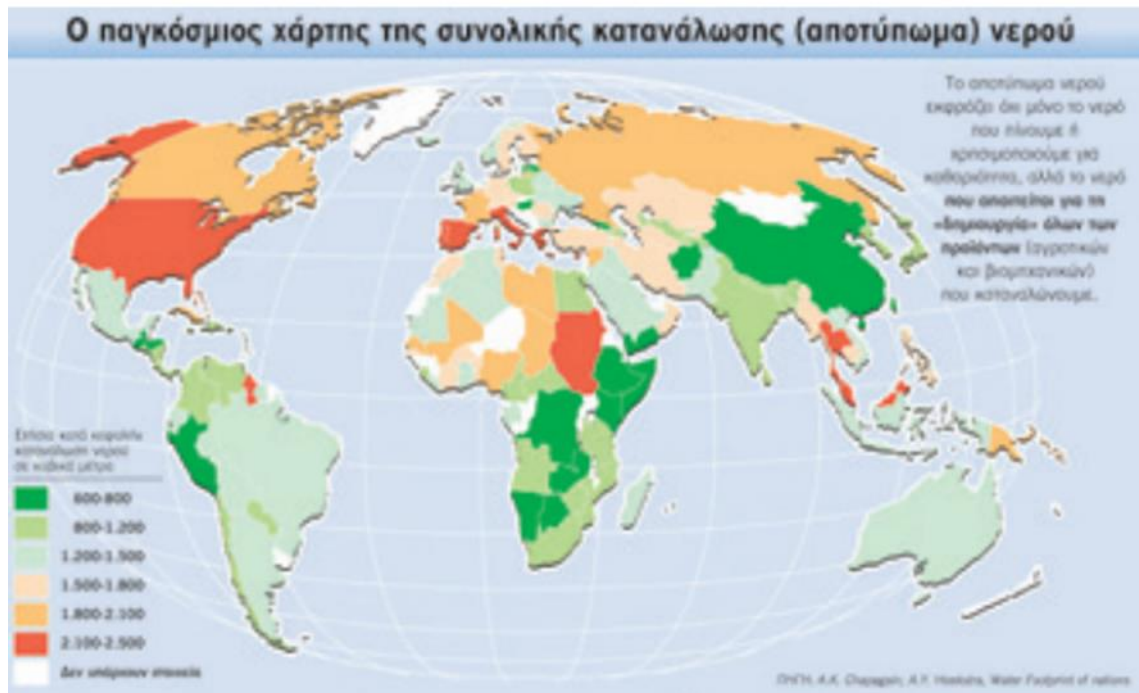
Υπάρχουν τρία είδη «Υδατικού Αποτυπώματος»: α) Το «Γαλάζιο» (Blue Water Footprint) που αναφέρεται στην κατανάλωση επιφανειακού και υπόγειου νερού που δεσμεύεται για την παραγωγή ενός προϊόντος, το «Πράσινο» (Green Water Footprint), που αναφέρεται στην κατανάλωση αποθηκευμένου νερού στο έδαφος ως υγρασία (κατανάλωση βρόχινου νερού) κατά την παραγωγή ενός προϊόντος και το «Γκρι» (Gray Water Footprint) που σχετίζεται με τη ρύπανση του νερού που προκύπτει από μια διεργασία και είναι ο όγκος του νερού που ρυπαίνεται κατά την παραγωγή ενός προϊόντος [48]. Το WF ενός προϊόντος είναι το αποτέλεσμα της ποσοτικοποίησης τριών υδατικών στοιχείων:  $WF = Wf_{blue} + Wf_{green} + Wf_{grey}$ . Συνεπώς, με την χρήση του δείκτη WF, εκτός από την ποσοτική αποτίμηση έχουμε και την ποιοτική εκτίμηση της ρύπανσης που μπορεί να προκληθεί, μετρώντας τους κινδύνους που οδηγούν σε ρύπανση του διαθέσιμου νερού [49].



Εικόνα 2-13: Εικονικό νερό διαφόρων τροφίμων (λίτρα νερού ανά κιλό προϊόντος) (Πηγή: WWF, Water Footprint Network)

Είναι αξιοσημείωτο ότι το «υδατικό αποτύπωμα» της Ελλάδας με μέση κατανάλωση 2.389 κυβικών μέτρων ανά κάτοικο, είναι το δεύτερο μεγαλύτερο διεθνώς μετά τις ΗΠΑ και διπλάσιο του παγκόσμιου μέσου όρου (1.243 κυβικά μέτρα/έτος/ κάτοικο) (Εικ. 2-14) [48].





**Εικόνα 2-14: Παγκόσμιο Υδατικό Αποτύπωμα (Πηγή: ΕΛΓΟ – [https://www.elgo.gr/images/pdf/publications/demeter\\_magazine/dmtr2p4-5.pdf](https://www.elgo.gr/images/pdf/publications/demeter_magazine/dmtr2p4-5.pdf))**

Από τους τέσσερις παράγοντες που καθορίζουν το ύψος του WF, σύμφωνα Hoekstra (2013) [50], οι δύο σχετίζονται με τη χρήση νερού στη γεωργία και αφορούν την επίδραση των κλιματικών συνθηκών, αν απαιτείται π.χ. σε μεγάλο ποσοστό άρδευση για την ανάπτυξη των καλλιεργειών και τον τρόπο παραγωγής στον αγροτικό τομέα, δηλ., το πόσο αποτελεσματικός είναι. Το μεγάλο WF της Ελλάδας αποδίδεται στην αυξημένη χρήση νερού για τη γεωργία (86%), στις απώλειες που παρουσιάζει το απαρχαιωμένο αρδευτικό και υδρευτικό δίκτυο της χώρας, αλλά και στη συνολική κακοδιαχείριση των υδατικών πόρων [48].

## 2.4 ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΝΕΡΟ -ΆΡΔΕΥΣΗ

Η προστασία των υφιστάμενων πηγών νερού άρδευσης, η αποκατάσταση πηγών που έχουν υποστεί υποβάθμιση και η εύρεση ή δημιουργία νέων πηγών έχουν βρεθεί στο επίκεντρο πολλών νομοθεσιών και κανονισμών σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο. Οι ευρωπαϊκές αυτές νομοθεσίες αφορούν μέτρα, όπως την δημιουργία κριτηρίων για την ποιότητα και ποσότητα χρήσης του νερού, αλλά και νόμους που να καλύπτουν όσον το δυνατό περισσότερο τους εθνικούς νόμους της κάθε χώρας της Ευρωπαϊκής Ένωσης [51].

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα 2000/60/ΕΚ, η οποία τέθηκε σε ισχύ το Δεκέμβριο του 2000, θέσπισε για πρώτη φορά το πλαίσιο για την προστασία των επιφανειακών, υπόγειων και παράκτιων / μεταβατικών υδάτων και αποτέλεσε την πρώτη συνολική προσπάθεια προστασίας και διαχείρισης των υδατικών πόρων, αλλά και το πιο βασικό θεσμικό εργαλείο που εισήχθη στον τομέα των υδατικών πόρων σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η Οδηγία 2000/60/ΕΚ θεσπίζει κανόνες για να σταματήσει η υποβάθμιση της κατάστασης των υδατικών συστημάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης και να επιτευχθεί «καλή κατάσταση» για τους ποταμούς, τις λίμνες και τα υπόγεια ύδατα της Ευρώπης έως το 2015. έχει

ως κύριο στόχο την μείωση των πιέσεων που δέχονται οι ευρωπαϊκοί υδάτινοι πόροι, αποβλέποντας σε μια αειφορική διαχείριση του νερού, όπως και της ποιότητας και προστασίας των υπόγειων, επιφανειακών και παράκτιων υδάτων της ΕΕ. Συγκεκριμένα ζητεί:

- προστασία όλων των μορφών υδάτων
- αποκατάσταση των οικοσυστημάτων μέσα και γύρω από αυτά τα υδατικά συστήματα·
- μείωση της ρύπανσης στα υδατικά συστήματα·
- διασφάλιση αειφόρου χρήσης των υδάτων από τα άτομα και τις επιχειρήσεις.

Η εναρμόνιση της οδηγίας πλαίσιο ήταν αρκετά δύσκολη, ώστε λίγα κράτη μέλη μπόρεσαν να τη μεταφέρουν στην εθνική τους νομοθεσία μέχρι την καταλυτική ημερομηνία το Δεκέμβριο του 2003. Η Ελλάδα προσπάθησε να ενσωματώσει τις απαιτήσεις της Οδηγίας 2000/60 στο ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο με τον νόμο Ν.3199/2003 (ΦΕΚ Α' 280/09.12.2003) περί της "Προστασίας και Διαχείρισης των Υδάτων" και παράλληλα να δημιουργήσει μακροπρόθεσμο σχεδιασμό για τη διαχείριση των υδατικών πόρων της. Οι αρμόδιοι φορείς για την εφαρμογή της είναι το υπουργείο Περιβάλλοντος, η Εθνική Επιτροπή Υδάτων, το Εθνικό Συμβούλιο Υδάτων, η Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων, οι Διευθύνσεις Υδάτων των Περιφερειών και το Περιφερειακό Συμβούλιο Υδάτων. Η εναρμόνιση των σπουδαιότερων θεμάτων της Οδηγίας γίνεται μετά την ψήφιση του Προεδρικού Διατάγματος 51/8.3.2007(Α' 54) που προσδιορίζει τα υδατικά διαμερίσματα στα οποία εντάσσει τα υδάτινα σώματα και το μητρώο προστατευόμενων περιοχών. Επίσης, το Π.Δ. προσδιορίζει τους περιβαλλοντικούς στόχους καθώς εκτιμά τις πιέσεις και τις προβλεπόμενες επιπτώσεις, προβαίνει σε οικονομικές αναλύσεις, κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης υδατικών διαμερισμάτων, σύνταξη και εφαρμογή προγραμμάτων παρακολούθησης, σύνταξη προγραμμάτων - μέτρων και δημοσιοποίηση των σχεδίων διαχείριση των υδατικών πόρων [52].

Οι νέοι αυτοί νόμοι καλύπτουν το πλήρες φάσμα όλων των γεωμορφολογικών, κλιματικών, εδαφικών παραγόντων που αφορούν την ποιότητα και την διαχείριση του νερού άρδευσης σε περιοχές όπου πραγματοποιείται άρδευση καλλιεργειών. Για παράδειγμα, στο επίπεδο του αγροκτήματος, η σωστή διαχείριση του νερού άρδευσης μπορεί να γίνει με την εγκατάσταση και χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων συλλογής, μεταφοράς και επεξεργασίας δεδομένων, όπως ατμοσφαιρική υγρασία και θερμοκρασία αέρα και εδάφους που θα αποτρέψει την υπεράρδευση [51], αλλά και η επαναχρησιμοποίηση του νερού από μη συμβατικές πηγές (όπως: α) ανακύκλωση στραγγιστικών νερών, δηλ των επιφανειακών και υπεδάφινων απορροών των αγρών κατά την άρδευση που συλλέγονται σε τάφρους, β) επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση λυμάτων, γ) συλλογή βρόχινων υδάτων) [53]. Το σχέδιο δράσης της ΕΕ για την κυκλική οικονομία, προβλέπει την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων στην γεωργία και τονίζει την πιθανή θετική συμβολή που αυτά θα μπορούσαν να είχαν τόσο στον γεωργικό τομέα της Ευρώπης, όσο και στην οικονομία της Ευρωπαϊκής Ένωσης καλύπτοντας το αρδευτικό έλλειμμα σε περιόδους αυξημένης ζήτησης νερού, αλλά και αντικατάστασης μέρους της χημικής λίπανσης, εξασφαλίζοντας τη γεωργική παραγωγή [7]. Στην Ελλάδα σήμερα η επιβολή συγκεκριμένων κανόνων χρήσης, που αφενός επιτρέπουν και κυρίως προτρέπουν τη διάθεση των επεξεργασμένων αστικών αποβλήτων για αρδευτικούς σκοπούς και αφετέρου προστατεύουν την υγεία των χρηστών-καλλιεργητών και των καταναλωτών των αγροτικών προϊόντων, αλλά και το περιβάλλον, με τελικό στόχο την αειφορία υπόκεινται πλέον στο νομοθετικό πλαίσιο της ΚΥΑ 145116/2011 (ΦΕΚ 354 /8-3-2011) [27].

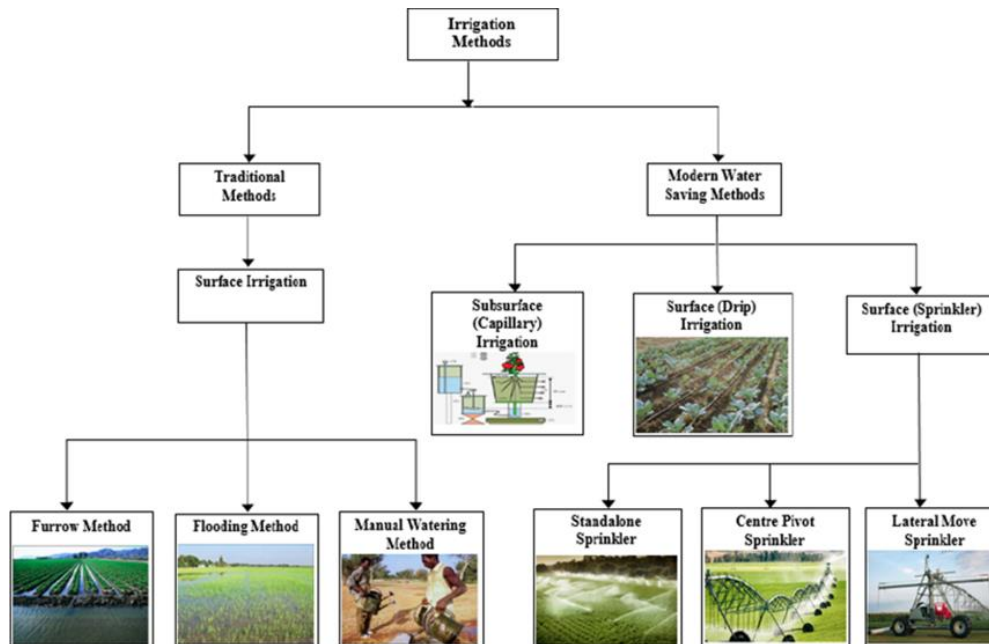
### 3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΆΡΔΕΥΣΗΣ -ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΑΓΚΩΝ ΆΡΔΕΥΣΗΣ

Η διαθεσιμότητα του νερού κατά την καλλιεργητική περίοδο, το είδος της καλλιέργειας και ο τρόπος άρδευσης διαφοροποιούν το κόστος άρδευσης και κατά συνέπεια το οικονομικό αποτέλεσμα της γεωργικής εκμετάλλευσης [27]. Ο υπολογισμός των αναγκών σε νερό άρδευσης παρέχει τη βάση για τον καθορισμό του χρονοδιαγράμματος άρδευσης, αλλά και του σχεδιασμού ενός προγράμματος άρδευσης.

Η γεωργία χρησιμοποιεί τον περισσότερο όγκο του διαθέσιμου νερού για τον πότισμα των φυτών. Τα τελευταία χρόνια, η γεωργική έρευνα ασχολείται με τον τρόπο βελτίωσης της αποδοτικότητας χρήσης του νερού στη γεωργική δραστηριότητα. Η απόδοση του νερού που χρησιμοποιείται για τον πότισμα είναι χαμηλή, λόγω απωλειών που υπάρχουν και φθάνουν σε ποσοστό μικρότερο του 65%. Η αποδοτικότητα στην εφαρμογή του νερού εξαρτάται από τις πρακτικές άρδευσης και από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού [53].

Στην Ελλάδα, όπου οι βροχοπτώσεις δεν είναι ικανοποιητικές για την κάλυψη των αναγκών των περισσότερων καλλιεργειών, η άρδευση αποτελεί αναγκαία πρακτική. Στο παρελθόν, δόθηκε μεγάλη έμφαση στην αύξηση της παραγωγικότητας μέσω της άρδευσης, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ποσότητα και η αποδοτικότητα της χρήσης του νερού. Ωστόσο, η έλλειψη κατάλληλου νερού προς άρδευση, ο ανταγωνισμός με άλλες χρήσεις όπως η ύδρευση και η βιομηχανία, καθώς και οι ανησυχίες για το περιβάλλον, έχουν οδηγήσει σε αλλαγή προσέγγισης. [54]. Για να επιτευχθεί αποτελεσματική άρδευση, πρέπει να διαχειριστούμε εξυπνότερα το νερό, ώστε να εξασφαλίσουμε τη βιωσιμότητα του.

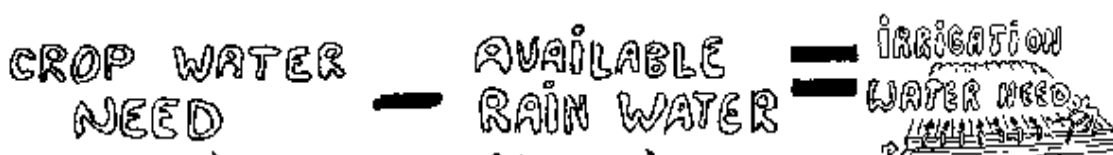
Πέρα από τη σωστή διαχείριση του νερού, απαιτούνται εξειδικευμένες τεχνικές και μεθοδολογίες άρδευσης που εξελίσσονται συνεχώς με τη χρήση νέων τεχνολογιών. Οι μέθοδοι άρδευσης που χρησιμοποιούνται χωρίζονται ανάλογα με τον τρόπο εφαρμογής του νερού σε **επιφανειακές μεθόδους** (κατάκλιση, λωρίδες, αυλάκια), σε **άρδευση με καταιονισμό** (μέθοδος τεχνητής βροχής) και σε **τοπικές μεθόδους άρδευσης ή μικροάρδρευση** (μέθοδος στάγδην). Επίσης μπορούν να διακριθούν σε παραδοσιακές και σύγχρονες. (Εικ.3-1).



Εικόνα 3-1: Παραδοσιακές και Σύγχρονες μέθοδοι άρδευσης (Πηγή: E.A. Abioye, et al, 2020)

Η επιφανειακή άρδευση ανήκει στις παραδοσιακές μεθόδους άρδευσης, ενώ η τεχνητή βροχή και η στάγδην στις πιο σύγχρονες μεθόδους. Οι τοπικές μέθοδοι άρδευσης, ανάλογα με το σχήμα της επιφάνειας του εδάφους που διαβρέχουν, διακρίνονται σε μεθόδους σημειακής διαβροχής (π.χ. συστήματα επιφανειακή ή υπόγεια στάγδην άρδευση), γραμμικής διαβροχής (π.χ. πορώδεις σωλήνες) ή κυκλικής διαβροχής (π.χ. μικροεκτοξευτήρες). Στις περιοχές της Ελλάδας με ημι-ξηρικό κλίμα, τείνουν να επικρατήσουν οι τοπικές μέθοδοι άρδευσης [53].

Στις ανάγκες νερού άρδευσης συμπεριλαμβάνονται κυρίως η ποσότητα του νερού που καταναλώνεται από τις καλλιέργειες (διαπνοή και σχηματισμός των ιστών και άλλες λειτουργίες), η ποσότητα που εξατμίζεται από το έδαφος ή τα υγρά μέρη του φυτού και οι απώλειες κατά την εφαρμογή του (απορροή, έκπλυση). Οι ανάγκες νερού άρδευσης υπολογίζονται αν από το ποσό των αναγκών σε νερό της καλλιέργειας αφαιρέσουμε και εκείνο του μέρους της βροχόπτωσης που χρησιμοποιείται από τα φυτά (αποτελεσματική βροχόπτωση) [55] (Εικ.3-2).



Εικόνα 3-2: Ανάγκες νερού άρδευσης μιας καλλιέργειας (FAO, 1986)

### 3.1 ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Το σύστημα άρδευσης είναι μια βασική γεωργική πρακτική όπου το νερό εφαρμόζεται τεχνητά στο έδαφος για την παροχή ελεγχόμενης ποσότητας νερού που είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη των φυτών και ανάπτυξη [56].

Στην Ελλάδα, το 10% γεωργικών εκτάσεων χρησιμοποιεί σύγχρονα συστήματα άρδευσης, όπως στάγδην, το 50%-55% των αρδευόμενων εκτάσεων αρδεύονται με τεχνητή βροχή, ενώ το 35%-40% των αρδευόμενων εκτάσεων αρδεύονται με βαρύτητα (κατάκλιση, ανοικτοί αύλακες, κ.λπ.) [27]. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέθοδοι άρδευσης που εφαρμόζονται σε αρόσιμες και πολυετείς καλλιέργειες (οπωρώνες).

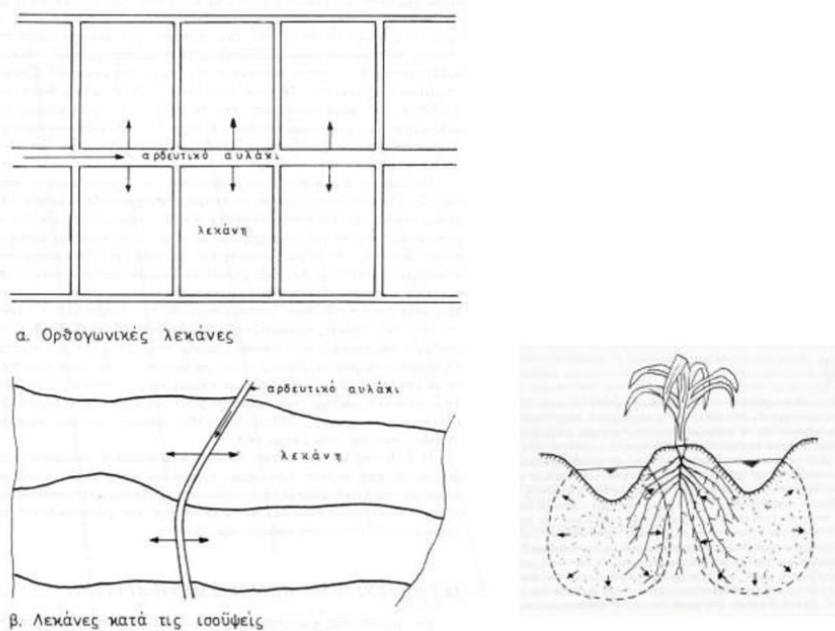
#### 3.1.1 Επιφανειακή άρδευση

Η παραδοσιακή επιφανειακή άρδευση είναι η παλαιότερη και πιο διαδεδομένη μέθοδος άρδευσης που εφαρμόστηκε σε όλο τον κόσμο [57]. Οι παραδοσιακών μέθοδοι επιφανειακής άρδευσης, όπως πότισμα με αυλάκι (furrow), με πλημμύρα (flooding), αλλά και το χειροκίνητο πότισμα (manual watering), είναι αυτές που χρησιμοποιούνται συνήθως από τους αγρότες. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι απαιτούν καλή ισοπέδωση της επιφάνειας του εδάφους για να διασφαλιστεί η επαρκής κατανομή του νερού ώστε να εμποδίσουν την αποστράγγιση του [58]. Επιπλέον, η εξοικονόμηση νερού αυτών των μεθόδων είναι χαμηλή, λόγω κυρίως των απωλειών νερού από τη διαδικασία της εξατμισμού, αλλά και του ανεξέλεγκτου όγκου άρδευσης [59] που συχνά οδηγεί σε επιφανειακή απορροή, βαθιά διήθηση, η οποία αυξάνει την τάση

έκπλυσης, μειώνει το επίπεδο των θρεπτικών ουσιών του εδάφους και οδηγεί σε μειωμένη απόδοση των καλλιεργειών [60].

Στην επιφανειακή άρδευση, η εφαρμογή του νερού πραγματοποιείται στην επιφάνεια της αρδευόμενης έκτασης ή καλλιέργειας [61]. Η άρδευση γίνεται από το υψηλότερο σημείο ή πλευρά της έκτασης που αρδεύεται και στην συνέχεια το νερό ρέει είτε ελεύθερα είτε ελεγχόμενα και φτάνει να καλύψει όλη την καλλιέργεια. Τα συστήματα επιφανειακής άρδευσης χρησιμοποιούνται κυρίως σε εδάφη με πολύ μικρές ή ακόμα και μηδενική κλίση (για την έκταση που είναι η καλλιέργεια) και σε εδάφη με μέτρια διηθητικότητα [62]. Αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα άρδευσης στην Ελλάδα και τον κόσμο, αλλά τα τελευταία χρόνια τείνει να αντικατασταθεί από πολύ πιο σύγχρονα συστήματα, όπως συστήματα ευφυούς άρδευσης [63]. Τα συστήματα επιφανειακής άρδευσης μπορεί να διακριθούν σε δύο κύριες κατηγορίες (Εικ. 3-3):

- στην άρδευση με αυλάκια (furrow irrigation), όπου οι καλλιέργεια είναι χωρισμένη σε γραμμές και το νερό που χρησιμοποιείται στην άρδευση περνά μέσα από αυλάκια που έχουν κατασκευαστεί μεταξύ των γραμμών των καλλιεργειών. Στην συνέχεια, το εφαρμοζόμενο νερό απορροφάται ως τριχοειδές νερό [61].
- στην μέθοδο της κατάκλισης (flood irrigation), η καλλιέργεια χωρίζεται σε λεκάνες με την κατασκευή αναχωμάτων σε όλες τις πλευρές. Μετά την εφαρμογή του νερού, από ένα ή πολλά σημεία πάνω στα αναχώματα, αυτό καλύπτει όλη την καλλιέργεια ως ένα επιθυμητό ύψος και έως ότου απορροφηθεί από το έδαφος [61].



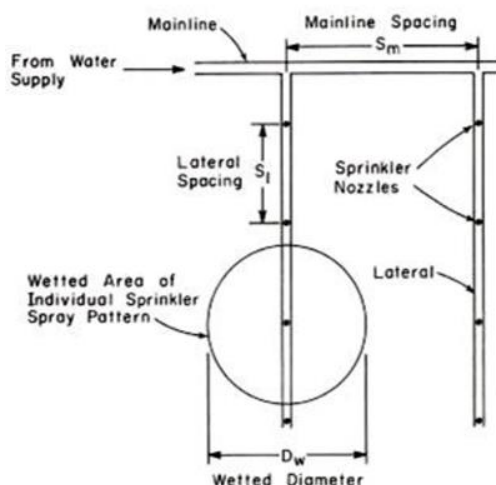
**Εικόνα 3-3: Επιφανειακά Συστήματα Άρδευσης (Πελετίδης, 2021)**

### 3.1.2 Άρδευση με Καταιονισμό

Η άρδευση με καταιονισμό, είναι ένας σύγχρονος τρόπος άρδευσης, γνωστός ως τεχνητή βροχή, μιμείται το φυσικό μοτίβο της βροχόπτωσης και πραγματοποιείται με τη χρήση μιας κεφαλής ψεκασμού και εκτεταμένου συστήματος σωληνώσεων για την εξασφάλιση μεγάλης περιοχής κάλυψης. Υπάρχουν αρκετοί τύποι άρδευσης με καταιονισμό, όπως η κεντρική

περιστροφή, ο αυτόνομος, γραμμικός και πλευρικός καταιονιστής (Εικ. 3-1). Η άρδευση με καταιονισμό σε αντίθεση με την επιφανειακή, είναι αποδοτικότερη σε καλλιέργειες με μεγάλη εδαφική κλίση [61]. Η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από την υψηλή της προσαρμοστικότητα. Το νερό διηθείται στο έδαφος κατακόρυφα υπό ακόρεστες συνθήκες, εξασφαλίζοντας ομοιόμορφη κατανομή στην καλλιέργεια χωρίς να εμφανίζει επιφανειακή απορροή και λίμνασμα νερού στην επιφάνεια.

Στην πιο απλή μορφή του ένα σύστημα άρδευσης με καταιονισμό, αποτελείται από ένα σύστημα άντλησης, ένα σύστημα μεταφοράς του νερού και ένα σύστημα διανομής [64] (Εικ. 3-4). Η αντλία υψηλής πίεσης είναι υπεύθυνη για την παροχή του αρδευσιμου νερού, ενώ ο σωλήνας είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ της αντλίας και της πηγής του νερού. Το δίκτυο μεταφοράς αποτελείται από έναν αριθμό αγωγών, συνήθως κατασκευασμένους από χάλυβα, αλλά στο εμπόριο υπάρχουν και αγωγοί κατασκευασμένοι από αλουμίνιο, πλαστικό. Οι αγωγοί αυτοί μεταφέρουν το νερό στις ποσότητες που απαιτούνται και στην επιθυμητή ποσότητα [64]. Πάνω στους τελευταίους αγωγούς βρίσκονται οι εκτοξευτές, οι οποίοι κατανέμουν το παρεχόμενο νερό με τον επιθυμητό τρόπο. Οι εκτοξευτήρες πρέπει πάντα να είναι προσαρμοσμένοι σε ένα ύψος που αντιστοιχεί στην αρδευόμενη καλλιέργεια. Στόχος όλων των παραπάνω είναι η παροχή του νερού με τρόπο ώστε να μηδενιστούν οι απώλειες που προέρχονται από την διήθηση [61]. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος λειτουργίας, καθώς απαιτεί πολλά εξαρτήματα και συντήρηση αυτών, και προμήθειες ενέργειας για το σύστημα αντλίας νερού, όπως λάδι κινητήρα και ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, κρίνεται ανεπαρκής όταν εφαρμόζεται σε περιβάλλον με θυελλώδεις ανέμους, λόγω του υψηλού ποσοστού απώλειας νερού από παρέκκλιση σταγονιδίων νερού ως αποτέλεσμα του ανέμου, αλλά και σε περιβάλλον με μεγάλες θερμοκρασίες, λόγω της εξάτμισης σταγονιδίων νερού [65].



**Εικόνα 3-4: Σχέδιο τυπικού συστήματος άρδευσης με καταιονισμό (Πελετίδης, 2021)**

### 3.1.3 Άρδευση με Μέθοδο Στάγδην

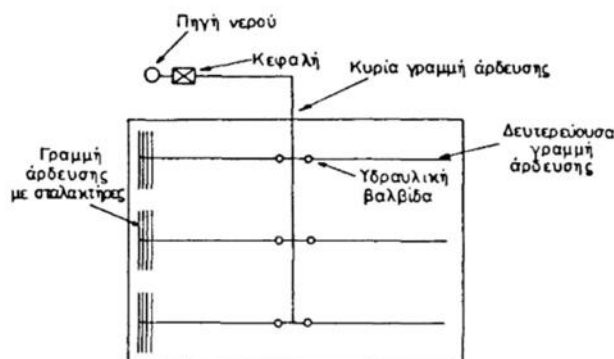
Η επιφανειακή στάγδην άρδευση είναι μια από τις σύγχρονες μεθόδους άρδευση που πετυχαίνει την απαιτούμενη εξοικονόμησης αρδευόμενου νερού, καθώς τροφοδοτεί αργά ανάλογα με τις ανάγκες του εδάφους και των φυτών το νερό μέσω στενών σωλήνων και



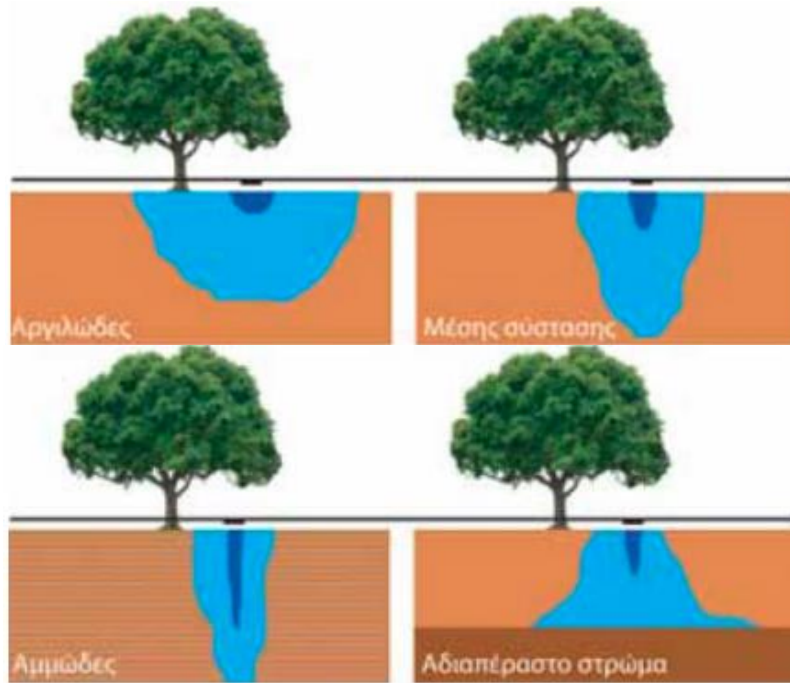
σταλάκτων, ώστε να φτάνει στο έδαφος κοντά στις ρίζες των φυτών σε μεγαλύτερες ή μικρότερες ποσότητες, ώστε οι απώλειες του νερού να περιορίζονται σε πολλές περιπτώσεις κάτω του 10% [61]. Αυτή η μέθοδος άρδευσης μειώνει το ρυθμό απώλειας νερού που συμβαίνει λόγω εξάτμισης από τον άνεμο και την υψηλή θερμοκρασία, όπως και λόγω της επιφανειακής απορροής [66]. Ωστόσο, για το σχεδιασμό και τη διαχείριση ενός επιφανειακού συστήματος στάγδην άρδευσης, απαιτούνται γνώσεις σχετικά με τα μοτίβα διαβροχής, της κατανομής του νερού, των αποστάσεων μεταξύ των σταλακτών, ώστε να αποφευχθεί η μεγάλη ποσότητα απώλειας νερού, λόγω της διαδικασίας της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους, αλλά και να επιτευχθεί μεγαλύτερη αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE) [67].

Η μέθοδος στάγδην χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρότερες καλλιέργειες και σε θερμοκήπια και είναι μια μέθοδος που μπορεί να αποφέρει μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα αν η διαχείριση του γίνεται μέσω αυτοματοποιημένων συστημάτων, όπου η έναρξη και παύση της άρδευσης, αλλά και η ακριβής παροχή του αρδευόμενου νερού, συνολικά μπορεί να επιφέρει αύξηση της αξιοποίηση του νερού σε ποσοστά 80% - 90% [61]. Προσφέρει την δυνατότητα να εφαρμόζεται σε περιοχές όπου θα ήταν αδύνατη η χρήση κάποιου άλλου συστήματος άρδευσης, όπως σε εδάφη με μεγάλη κλίση, όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κατάκλιση [61]. Ωστόσο ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το κόστος εγκατάστασης, παρόλο που το κόστος εργασίας και άντλησης είναι χαμηλότερο [61].

Τα συστήματα στάγδην άρδευσης αποτελούνται από μία πηγή τροφοδοσίας του νερού, μία κεφαλή και ένα σύστημα σωληνώσεων πάνω στους οποίους βρίσκονται οι σταλάκτες (Εικ.3-5). Η κεφαλή είναι υπεύθυνη για την ελεγχόμενη διανομή του νερού και σε πολλές περιπτώσεις περιλαμβάνει φίλτρα, συσκευές εφαρμογής λιπασμάτων, ρυθμιστές πίεσης και μετρητές ροής. Το σημαντικότερο όμως μέρος του στάγδην συστήματος άρδευσης είναι οι σταλάκτες, οι οποίοι κάνουν δυνατή μία μικρή και ομοιόμορφη εφαρμογή του νερού με την μορφή σταγόνων. Με τον τρόπο αυτό, το νερό εφαρμόζεται μόνο στην περιοχή του ριζοστρώματος, εκμηδενίζεται η επιφανειακή κίνησή του και διάβρωση εδάφους, ενώ εισέρχεται στο έδαφος και κινείται εν μέρει οριζόντια και ανάλογα τη σύσταση και το βάθος του εδάφους, περισσότερο ή λιγότερο βαθιά στο ριζόστρωμα [68] (Εικ.3-6).



Εικόνα 3-5: Σύστημα άρδευσης με σταγόνες



**Εικόνα 3-6: Διαβροχή εδάφους με σταλάκτες ανάλογα με τη σύσταση του εδάφους (Πηγή: Νάνος, 2009)**

### 3.1.4 Υποεπιφανειακή άρδευση

Έρευνα για την υπόγεια άρδευση διαπίστωσε ότι προσφέρει υψηλότερη εξοικονόμηση νερού και καλύτερη απόδοση (WUE) σε σύγκριση με τους τύπους της επιφανειακής άρδευσης [69] ; [70] ; [71]. Η υπόγεια άρδευση χρησιμοποιείται περισσότερο σε περιοχές με μεγάλα ύψη βροχοπτώσεων, καθώς το νερό της βροχής βοηθά στην ρύθμιση της στάθμης του υπόγειου νερού, όταν αυτό στραγγίζεται στο έδαφος και δεν είναι πλέον διαθέσιμο στα φυτά.

Στα συστήματα υπόγεια άρδευσης, οι σωλήνες είναι τοποθετημένοι σε ένα ορισμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια της γης που εξαρτάται από το είδος της καλλιέργειας, καθώς και τις χρησιμοποιούμενες πρακτικές. Επειδή στην επιφάνεια του εδάφους δεν συγκρατείται εύκολα η εδαφική υγρασία, ελαχιστοποιείται και η επιφανειακή εξάτμιση. Αν η επιφάνεια του εδάφους κρατηθεί ξηρή, οι καλλιεργητές θα μπορούν πολύ πιο εύκολα να πραγματοποιήσουν τις διάφορες εργασίες τους, αλλά ταυτόχρονα μειώνεται και η πιθανότητα εμφάνισης φυτικών ασθενειών, καθώς και διατηρείται η δομή, η υφή και συνεκτικότητα του εδάφους. Όλα τα προηγούμενα οδηγούν σε αποτελεσματικότερο αερισμό του εδάφους και καλύτερη διήθηση του βρόχινου νερού [72]. Επιπλέον πλεονεκτήματα από τη χρήση υπόγεια άρδευσης είναι [73]:

- ότι έχουν μεγαλύτερο κύκλο ζωής σε σύγκριση με άλλα αρδευτικά συστήματα, καθώς είναι προστατευμένο από τις καιρικές συνθήκες,
- μακροπρόθεσμα μειώνονται τα κόστη εργασίας και συντήρησης, ενώ αυξάνεται σημαντικά το ποσοστό απόσβεσης της αρχικής επένδυσης
- η χρήση τους δεν απαιτείται πραγματοποίηση εργασιών, όπως για παράδειγμα ισοπεδώσεις ή αυλακώσεις, πέραν της αρχικής εγκατάστασής του, ή αν θεωρηθεί απαραίτητο
- αποτρέπεται η ανάπτυξη ανεπιθύμητων φυτών, όπως ζιζάνια, με αποτέλεσμα να μειώνονται το κόστος παρέμβασης στην καλλιέργεια για την καταπολέμηση των φυτών αυτών.

Η υποεπιφανειακή τριχοειδής άρδευση είναι ένας τύπος υπόγειας άρδευσης που περιλαμβάνει την ρύθμιση της στάθμης του υπόγειου νερού με την χρήση κατάλληλων εργαλείων, ώστε να πετυχαίνει την σταδιακή παροχή νερού από μια πηγή απευθείας στην περιοχή της ρίζας χρησιμοποιώντας ένα τριχοειδές μέσο, όπως είναι τα φυτίλια, πορώδη κεραμικά και ροές [74] ; [75]. Η υποεπιφανειακή τριχοειδής διαδικασία άρδευσης λειτουργεί με βάση ένα αρνητικό πίεσης για τη μεταφορά νερού χρησιμοποιώντας την τριχοειδική διεπιφάνεια στη ζώνη της ρίζας του φυτού. Ερευνητικές εργασίες για την τριχοειδή άρδευση έχουν αποδείξει ότι το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι παρέχει μεγαλύτερη εξοικονόμηση νερού κατά την εφαρμογή της άρδευσης σε σύγκριση με άλλες μεθόδους [76] ; [77]. Ωστόσο, οι Fujimaki et al.[78] έχουν παρατηρήσει ότι η ανοδική κίνηση του νερού μέσω του τριχοειδούς μπορεί να συσσωρεύσει μη αναστρέψιμα άλατα στο μέσο καλλιέργειας των φυτών, αυξάνοντας έτσι την αλατότητα του χώματος, το οποίο μπορεί να μειωθεί μόνο όταν υπάρχει έκπλυση του μέσου με νερό. Ως εκ τούτου, ένα αποτελεσματικό σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου απαιτείται στην μέθοδος τριχοειδούς άρδευσης για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της αλατότητας του εδάφους.

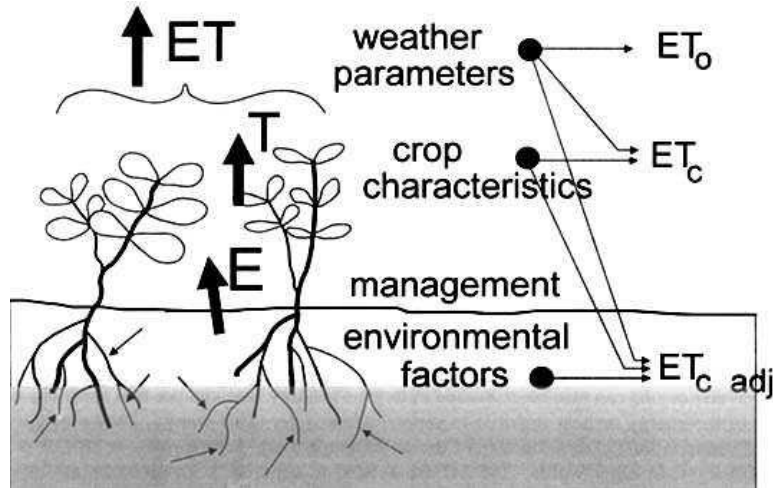
### 3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΑΓΚΩΝ ΆΡΔΕΥΣΗΣ

Ο όρος "ανάγκες νερού άρδευσης" αναφέρεται στην συνολική απαιτούμενη ποσότητα νερού για να ποτίσουμε τις αρδευόμενες καλλιέργειες, πέρα από το νερό που λαμβάνουν μέσω της βροχής για τη φυσιολογική τους ανάπτυξη. Συνήθως, το νερό για άρδευση χρησιμοποιείται για να συμπληρώσει ή να προσθέσει στο νερό που παρέχεται μέσω της βροχής. Σε περιοχές που είναι έρημες, ή κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων, όλο το νερό που απαιτείται για τις καλλιέργειες πρέπει να τους παρέχεται μέσω άρδευσης[55]. Οι ανάγκες νερού των καλλιεργειών καθορίζονται από την ποσότητα του νερού που χρειάζονται για να αντισταθμίσουν τις απώλειες νερού λόγω εξάτμισης. Με άλλα λόγια , είναι η ποσότητα νερού που απαιτείται για να εξασφαλίσουμε την ιδανική ανάπτυξη των καλλιεργειών.

Με τον όρο *εξατμισοδιαπνοή* (EvapoTranspiration, ET), νοείται η ποσότητα του νερού, που καταναλώνεται στη διαπνοή των φυτών και στην εξάτμιση των υγρών μερών του φυτού και του εδάφους κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης περιόδου [79]. *Διαπνοή* (*transpiration*), είναι το φαινόμενο της αποβολής του νερού με τη μετατροπή του νερού σε υδρατμούς στους πόρους, κυρίως των φύλλων. Τα φυτά αποβάλλουν με τη διαπνοή το 99,8 % του νερού που απορροφούν με τις ρίζες και μόνο το 0,2 % χρησιμοποιούν για την δημιουργία ιστών τους. Ο όρος *εξάτμιση* (*evaporation*) χρησιμοποιείται στην υδρολογία για να περιγράψει, τόσο φαινομενολογικά, όσο και ποσοτικά, τη μετατροπή του νερού από την υγρή στην αέρια φάση. Η βασική διαφορά της διαπνοής από την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες ή βρεγμένο έδαφος, έγκειται στο γεγονός ότι τα κύτταρα των φυτών ελέγχουν το ρυθμό της διαπνοής, μέσω της ρύθμισης των ανοιγμάτων των στομάτων τους [79]. Με τον όρο *υδατοκατανάλωση* (*water consumption*) των καλλιεργειών, νοείται η ολική ποσότητα που χρησιμοποιείται για τη διαπνοή των φυτών, την εξάτμιση από τις επιφάνειες φυτών και εδάφους καθώς και η ποσότητα νερού που χρειάζεται για κατασκευή των ιστών και του κορμού των φυτών. Η εξάτμιση και η διαπνοή συμβαίνουν ταυτόχρονα και δεν υπάρχει εύκολος τρόπος διάκρισης μεταξύ των δύο διεργασιών. Επομένως, το σύνολο των πραγματικών απωλειών νερού από την εξάτμιση εδαφών και από την διαπνοή της χλωρίδας αποδίδεται μαζικά με τον όρο *εξατμισοδιαπνοή* [79].

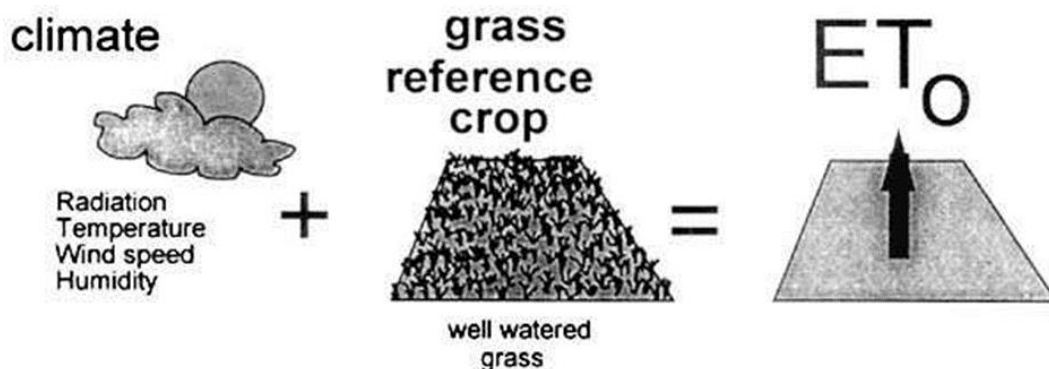
### 3.2.1 Εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration, ET)

Η εξατμισοδιαπνοή, ET, είναι το σύνολο της υγρασίας που απελευθερώνεται από τα φυτά και το έδαφος στον αέρα μέσω της διαπνοής και της εξάτμισης. Ο ρυθμός αυτός μετριέται συνήθως σε χιλιοστά (mm) ανά μονάδα χρόνου [80]. Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή, όπως οι κλιματικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά των φυτών, η διαχείριση και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες. (Εικ.3-7). Οι βασικοί παράγοντες του κλίματος που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση αυτού του ρυθμού βασισμένες σε αυτούς τους παράγοντες [80].



Εικόνα 3-7: Παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή (Πηγή: FAO, 1998)

Η επίδραση του κλίματος στις ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό δίνεται από την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ( $ET_0$  ή  $ET_r$ ). Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς αντιπροσωπεύει την εξατμισοδιαπνοή από μια μεγάλη περιοχή, καλυμμένη από πράσινο γρασίδι, ύψους 8 έως 15 cm, η οποία αναπτύσσεται ενεργά, σκιάζει πλήρως το έδαφος και η οποία δεν έχει έλλειψη νερού (Εικ.3-8).



Εικόνα 3-8: Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ( $ET_0$ ) (Πηγή: FAO, 1998)

Η επίδραση του φυτικού είδους της καλλιέργειας, του βάθους και της πυκνότητας του ριζικού συστήματος, του ποσοστού φυτοκάλυψης του εδάφους και του σταδίου ανάπτυξής της στις ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό, δίνεται από την εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών,  $ET_c$ , όπου υπό τυπικές συνθήκες αναφέρεται στις απαιτήσεις της εξάτμισης από καλλιέργειες σε μεγάλα χωράφια υπό βέλτιστες εδαφολογικές συνθήκες, άριστη διαχείριση και

περιβαλλοντικές συνθήκες, οι οποίες επιτυγχάνουν πλήρη παραγωγή, υπό τις δεδομένες κλιματολογικές συνθήκες. Η διαφοροποίηση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας  $ET_c$  από τη βασική εξατμισοδιαπνοή  $ET_0$  εκφράζεται από το φυτικό συντελεστή  $K_c$ , διαμορφώνοντας την παρακάτω Εξίσωση (Εικ. 3-9).

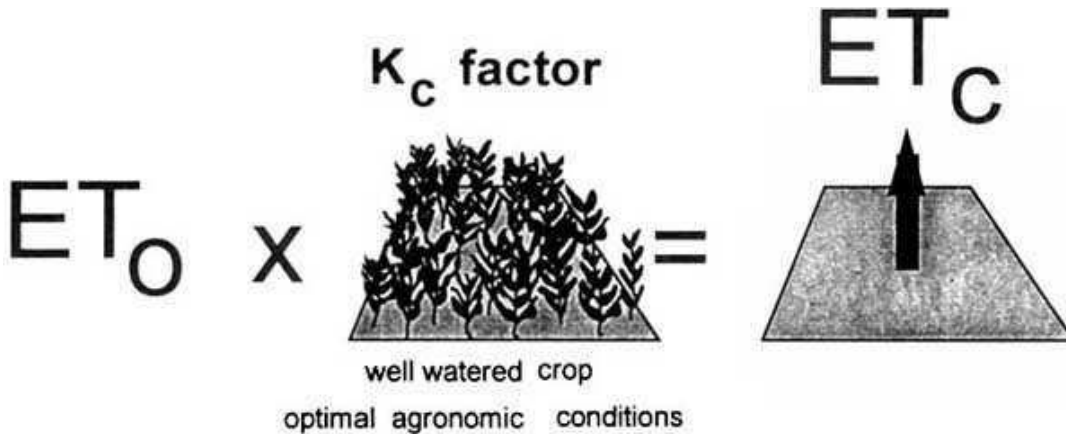
$$ET_0 \times K_c = ET_{crop}$$

**Εξίσωση 1: Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας**

Όπου,  $ET_{crop}$  = Εξατμισοδιαπνοή ή ανάγκες σε νερό καλλιέργειας (mm/day)

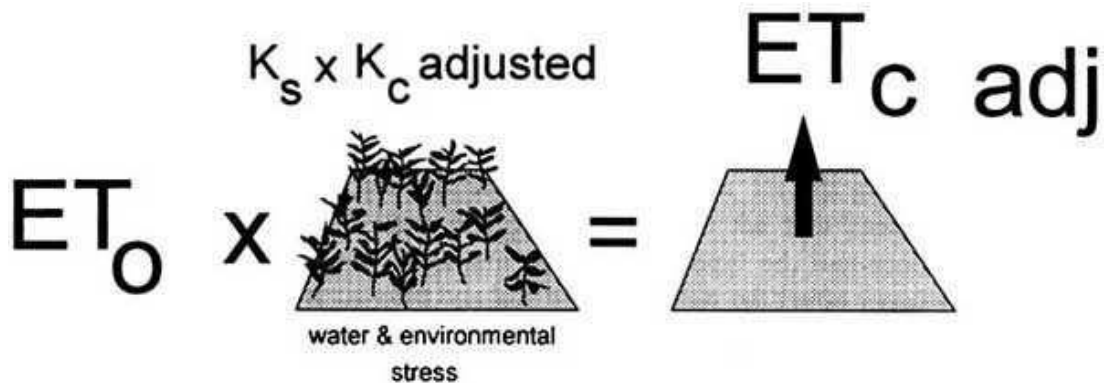
$K_c$  = Φυτικός συντελεστής καλλιέργειας

$ET_0$  = Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm/day)



**Εικόνα 3-9: Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ή ανάγκη νερού της καλλιέργειας (Πηγή: FAO, 1998)**

Όπου οι συνθήκες πεδίου διαφέρουν από τις τυπικές συνθήκες, απαιτούνται συντελεστές διόρθωσης για προσαρμογή  $ET_c$ . Η προσαρμογή αντανακλά την επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών των περιβαλλοντικών συνθηκών και διαχειριστικών πρακτικών στο χωράφι. Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας σε μη τυπικές συνθήκες υπολογίζεται χρησιμοποιώντας έναν συντελεστή υδατικού στρες  $K_s$  ή/και προσαρμόζοντας την  $K_c$  για όλα τα είδη άλλων ειδών στρες και περιβαλλοντικών περιορισμών στην εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών ( $ET_{c\ adj}$ ).



**Εικόνα 3-10: Εξατμισοδιαπνοή υπό μη τυποποιημένες συνθήκες ( $ET_{c\ adj}$ ) (Πηγή: FAO, 1998)**

Η εξατμισοδιαπνοή μετριέται σε χιλιοστόμετρα (mm) ανά μονάδα χρόνου και εκφράζεται ως το ύψος του νερού που χάνεται από μια επιφάνεια. Η  $ET$  υπολογίζεται με την πιο κάτω σχέση:

$$\text{Ύψος νερού (mm)} = \frac{\text{Όγκος νερού (m}^3\text{)}}{\text{Επιφάνεια (m}^2\text{)}} \times 1000$$

### Εξίσωση 2: Γενικό μέτρο έκφρασης της εξατμισοδιαπνοής

Στη γεωργική πρακτική μας ενδιαφέρει ο υπολογισμός της ποσότητας του νερού σε όγκο ( $\text{m}^3$ ). Σύμφωνα με την πιο πάνω σχέση η απώλεια νερού ενός χιλιοστού ( $1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}$ ), σε επιφάνεια ενός στρέμματος ( $1000 \text{ m}^2$ ) ισοδυναμεί με απώλεια νερού 1 κυβικού μέτρου ( $\text{m}^3$ ) [81].

#### 3.2.2 Μέθοδοι προσδιορισμού της εξατμισοδιαπνοής

Για να υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή (ETo) ή να εκτιμηθεί ακριβέστερα η εξατμισοδιαπνοή που χρειάζεται μια καλλιέργεια (ETc), υπάρχουν διάφοροι τρόποι. Ορισμένοι βασίζονται σε άμεσους τρόπους προσδιορισμού που γίνονται μετρήσεις απευθείας στον αγροτικό χώρο, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν έμμεσους τρόπους προσδιορισμού μέσω κλιματολογικών δεδομένων που αντιπροσωπεύουν τις κλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής. [81].

Τα λυσίμετρα είναι σημαντικά εργαλεία για την άμεση μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής και της υγρασίας του εδάφους. Τοποθετούνται στο έδαφος σε φυσικές συνθήκες και επιτρέπουν τη μέτρηση της εκροής νερού και της αλλαγής της υγρασίας του εδάφους. Η εξατμισοδιαπνοή προκύπτει από το ισοζύγιο νερού στο λυσίμετρο. [82]. Επιπλέον, ο προσδιορισμός της εδαφικής υγρασίας επιτρέπει την παρακολούθηση των αλλαγών της υγρασίας πριν και μετά από κάθε άρδευση, χρησιμοποιώντας διάφορα όργανα όπως νετρόνια, μέτρηση ανάκλασης ραδιοκυμάτων (TDR), τασίμετρα και αισθητήρες στον αγρό, ή με ανάλυση δειγμάτων σε εργαστήριο. Τα αποτελέσματα προσδιορίζονται σε συνάρτηση με το χρόνο, όπου και παριστάνονται γραφικά με καμπύλη από την οποία προσδιορίζεται η εξατμισοδιαπνοή [82].

Οι έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής μελετούν την επίδραση των κλιματικών στοιχείων μιας περιοχής στην υδατοκατανάλωση μιας καλλιέργειας. Διαχωρίζονται σε θεωρητικές και εμπειρικές, ενώ κάποιες τις συνδυάζουν. Διάφοροι έμμεσοι μέθοδοι προσδιορισμού που έχουν αναπτυχθεί παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πιν.3), όπου φαίνεται το μέγεθος ETo, ETc ή CU (= αναγκαία κατανάλωση που αφορά ένα ισότιμο όρο με την ETc) που προσδιορίζεται και οι κλιματικοί παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό. Οι σύνθετες μέθοδοι υπολογισμού της βασικής εξατμισοδιαπνοής οι οποίες συμπεριλαμβάνουν ένα μεγάλο αριθμό μετεωρολογικών παραμέτρων, θεωρούνται οι πλέον ακριβείς και η τροποποιημένη μέθοδος των Penman-Monteith κατά FAO56 [83] έχει αξιολογηθεί ως η πλέον αξιόπιστη.

Ανεξάρτητα, όμως, με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, για τον υπολογισμό της ETc, πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η ETo και εν συνεχεία να γίνει η εκτίμηση της υπό μελέτη καλλιέργειας χρησιμοποιώντας αντιπροσωπευτικό Kc ανάλογα με το στάδιο της βλαστικής περιόδου στο οποίο βρίσκεται.

Πίνακας 3: Έμμεσοι Μέθοδοι μέτρησης Εξατμισοδιαπνοής (Πηγή: Τσακίρης, 2004)

Μέθοδος	Θερμοκρασία	Υγρασία αέρα	Θερμ. ξηρού-υγρού θερμομέτρου	Διάρκεια ημέρας	Σχετική ηλιοφάνεια	Ακτινοβολία	Ταχύτητα ανέμου	Εξατμισμέτρο	Δεδομένα καλλιέργειας	Φυτικός συντελεστής	Συντελεστής εδάφους	Διορθωτικός συντελεστής	Βροχόπτωση	Αεροδυναμική αντίσταση	Μέγεθος που προσδιορίζουν
Blaney-Morin, 1942	x	x		x						x					ETc
Lowry-Johnson, 1942	x											x			ETc
Thornthwaite, 1943	x				x							x			ETc
Penman, 1948	x	x		x	x	x	x			x					ETo ή ETc
Blaney-Criddle, 1950	x			x						x					CU
Halstead, 1951	x	x	x	x											ETc
Haude, 1952			x	x			x			x					ETc
Turc, 1954	x	x		x	x	x	x					x			ETc
Turc-Langbein, 1954	x												x		ETo ή ETc
Halkias, 1955								x				x			CU
Thornthwaite-Mather, 1955	x				x	x					x	x	x		ETc
Van Bavel, 1956	x			x	x	x						x			ETc
Harggreaves, 1956	x	x		x						x					ETo ή ETc
Ivanof, 1957	x	x													ETc
Makkink, 1957	x					x									PET
Rijtema, 1957	x	x		x	x	x	x		x	x					ETc
Mellroy, 1961	x	x	x	x	x	x	x								ETc
Olivier, 1961	x	x	x		x	x					x		x		Ανάγκες ανά μονάδα επιφ.
Jensen-Haise, 1963	x			x	x	x				x		x			ETc
Christiansen, 1966	x	x			x	x	x					x			ETo
Dastane, 1967															ETc
Linacre, 1967	x	x		x	x	x	x		x						ETc
Τροποποιημένη Penman FAO, 1975	x	x		x	x	x	x					x			ETo
Τροποποιημένη Blaney-Criddle, 1977	x	x		x	x		x								ETo
Συνδ. Penman Monteith, FAO, 1990	x	x		x	x	x	x						x		ETo

Κάποιες από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες και διεθνώς αποδεκτές μέθοδοι εκτίμησης ETo παρουσιάζονται παρακάτω.

### 3.2.2.1 Η τροποποιημένη μέθοδος του Penman-Monteith

Το 1948, ο Penman εισήγαγε μια εξίσωση για την εκτίμηση της εξατμίσης από ανοιχτή υδάτινη επιφάνεια, χρησιμοποιώντας κλιματικούς παραμέτρους. Ωστόσο δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση της διαπνοής από την επιφάνεια των φύλλων. Ο Monteith (1975) εισήγαγε στη μέθοδο την επιφανειακή αντίσταση των στομάτων ( $r_s$ ) των φύλλων στην εξατμίσση, καταλήγοντας στην θεωρητική τροποποιημένη μέθοδος των Penman-Monteith κατά FAO 56, (1990) [83] η οποία συνιστάται ως η μοναδική μέθοδος για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ΕΤο και η οποία δίδεται από την εξίσωση 3 :

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

**Εξίσωση 3: Η τροποποιημένη μέθοδος των Penman-Monteith κατά FAO 56 (Πηγή: FAO 1998)**

Όπου,

ΕΤο, εξατμισοδιαπνοή αναφοράς [mm/ day],

$R_n$ , καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια της καλλιέργειας [ $MJ/ m^2 * day$  ],

$G$ , πυκνότητα εδαφικής θερμικής ροής [ $MJ /m^2 * day$ ],

$T$ , μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα στα 2 m ύψος [ $^{\circ}C$ ],

$u_2$ , ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m [ $m /s$ ],

$e_s$ , πίεση ατμών κορεσμού [kPa],

$e_a$ , πραγματική τάση ατμών [kPa],

$e_s - e_a$ , έλλειμμα πίεσης ατμών κορεσμού [kPa],

$D$ , κλίση καμπύλης τάσης ατμών [ $kPa /^{\circ}C$ ],

$\gamma$ , ψυχομετρική σταθερά [ $kPa/ ^{\circ}C$ ].

Πολλά πακέτα λογισμικού χρησιμοποιούν ήδη την εξίσωση Penman-Monteith του FAO για την αξιολόγηση της ΕΤο, όπως το CROPWAT, το λογισμικό του FAO για τον προγραμματισμό άρδευσης [80].

### 3.2.2.2 Η εμπειρική μέθοδος Blaney – Criddle

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας με την αρχική μορφή της μεθόδου Blaney and Criddle (1950) απαιτείται μόνο η μέση μηνιαία θερμοκρασία και το μέσο ποσοστό ωρών ημέρας που υπολογίζεται από γεωγραφικό πλάτος της περιοχής:

$$E_p = 0.254 * Kc * p(32 + 1.8T_a)$$

**Εξίσωση 4: Η μέθοδος Blaney and Criddle**

όπου:  $E_p$ : η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα

$Kc$  : συντελεστής καταναλωτικής χρήσης (φυτικός συντελεστής)

$T_a$ : θερμοκρασία σε  $^{\circ}C$

$p$  = ποσοστό (%) των ωρών ημέρας του συγκεκριμένου μήνα σε σχέση με το σύνολο των ωρών ημέρας του έτους, το οποίο αλλάζει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος.

Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα σε πολλές χώρες και ειδικότερα στην Ελλάδα για την εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών [84].



### 3.2.2.3 Μέθοδος Thornthwaite

Η εμπειρική μέθοδος του Thornthwaite είχε χρησιμοποιηθεί στην πράξη περισσότερο από κάθε άλλη, διεθνώς αλλά και στην Ελλάδα, λόγω των λιγοστών απαιτήσεών της σε δεδομένα εισόδου (μέση θερμοκρασία και σχετική υγρασία) αλλά και της παλαιότητας της (1948) [84].

### 3.2.2.4 Μέθοδος Priestley-Taylor (1972)

Το προτεινόμενο μοντέλο των Priestley και Taylor, 1972, είναι μια εμπειρική προσέγγιση της πιο θεωρητικής εξίσωσης του Penman, όπου απουσιάζει ο αεροδυναμικός όρος και γίνεται χρήση μόνο του ενεργειακού όρου πολλαπλασιαζόμενου με έναν συντελεστή  $\alpha$ . Είναι αρκετά διαδεδομένη, εύχρηστη και ικανοποιητικά ακριβής απλοποίηση της Penman.

### 3.2.2.5 Μέθοδος Hargreaves-Samani (1985)

Η μέθοδος αυτή, όπως προτείνεται τελευταία και από την “ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Task Committee-Appendix A” [85], μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη σχέση, συναρτήσει της διαφοράς μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας, της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας  $R_a$ : Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε περιοχές που δεν διατίθενται μετρήσεις ακτινοβολίας

$$ET_o = 0.0023(T_{max} - T_{min})^{0.5} * (T_m + 17.8)R_a,$$

#### Εξίσωση 5: Μέθοδος Hargreaves-Samani (1985)

όπου,

$ET_o$ : εξατμισοδιαπνοή αναφοράς [mm/day]

$T_{max}$ : μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία [°C].

$T_{min}$ : ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία [°C].

$T$ : μέση ημερήσια θερμοκρασία [°C].

$R_a$ : προσπίπτουσα ακτινοβολία στο όριο της ατμόσφαιρας [mm/day].

### 3.2.3 Απευθείας Μέθοδοι μέτρησης $ET_c$

Τεχνικές πεδίου, όπως υπολειμματικές μέθοδοι μέτρησης της ισορροπίας νερού-εδάφους, ο λόγος Bowen και συστήματα συνδιακύμανσης δινών (eddy covariance systems), αποτελούν άμεσες μετρήσεις  $ET_c$ , αλλά λαμβάνονται σε μικρή κλίμακα σε τοπικό περιβάλλον στο οποίο είναι εγκατεστημένα τα όργανα [86]. Μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του  $ET_c$  σε μεγάλη κλίμακα βασίζονται συχνά σε φυσικο-μαθηματική διαδικασία, δηλαδή μοντέλα προσομοίωσης ή αλγόριθμους τηλεπισκόπησης [86].

Οι τεχνικές τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση του  $ET$  αναπτύχθηκαν σχετικά πρόσφατα και βασίζονται στη χρήση του ενεργειακού ισοζυγίου που βασίζεται σε δορυφόρους. Ο METRIC (Mapping EvapoTranspiration with high Resolution and Internalized Calibration), είναι ένα μοντέλο εκτίμησης  $ET$  [87] και βασίζεται στο μοντέλο SEBAL (αλγόριθμοι επιφανειακής ενεργειακής ισορροπίας για ξηρά) [88]. Οι δορυφόροι μετρούν τακτικά την ανάκλαση της επιφάνειας ή/και τη θερμοκρασία επιφάνειας, αλλά κανένας δεν μετρά την περιεκτικότητα σε ατμούς στην κοντινή επιφάνεια. Επομένως, στο METRIC, το  $ET$  προσδιορίζεται από δορυφορικές εικόνες Landsat, εφαρμόζοντας ένα ενεργειακό ισοζύγιο στην επιφάνεια, όπου η

ενέργεια που καταναλώνεται από τη διεργασία ET υπολογίζεται ως υπόλοιπο της επιφανειακής ενέργειας στην εξίσωση ισορροπίας.

### 3.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΆΡΔΕΥΣΗΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ

---

Παρακάτω παρουσιάζονται σύντομα μέθοδοι και πρακτικές άρδευσης που ακολουθούνται, σε θερμοκηπιακές και υδροπονικές καλλιέργειες, σε κάποιες από τις οποίες απαιτείται ο ακριβής προσδιορισμός των αναγκών των καλλιεργειών με έγκυρες μεθοδολογίες ή υπολογισμούς με τη χρήση οργάνων και αισθητήρων.

#### 3.3.1 Άρδευση σε προκαθορισμένους χρόνους

---

Η άρδευση σε προκαθορισμένους χρόνους, αφορά ένα σταθερό πρόγραμμα όπου δίνεται άφθονο νερό εμπειρικά για να διασφαλιστεί η επάρκεια της υδροπονικής καλλιέργειας σε νερό [89]. Αν και αυτός ο τρόπος άρδευσης έχει εύκολη εφαρμογή, ωστόσο δε λαμβάνει υπόψη παράγοντες που επηρεάζουν τις μεταβολές στις υδατικές ανάγκες των φυτών, με αποτέλεσμα αρκετές φορές να γίνεται υπεράρδευση και σπατάλη, ενώ άλλες φορές να είναι ελλιπής, κυρίως συγκεκριμένες ώρες της ημέρας [89].

#### 3.3.2 Μέτρηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους

---

Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο υπόστρωμα απαιτεί να γίνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς η διαφορά μεταξύ EC μεταξύ υποστρώματος και νερού ή θρεπτικού διαλύματος τροφοδοσίας (υδροπονία) πρέπει να διατηρείται το πολύ μία με μιάμιση μονάδα μέτρησης [89]. Σε περίπτωση που η EC ξεπεράσει το παραπάνω όριο, επιβάλλεται να ξεκινήσει η άρδευση. Αν για παράδειγμα, ποτίζουμε με EC 2 dS/m και η αγωγιμότητα, η οποία μετριέται στο υπόστρωμα ξεπεράσει το 3-3,5 dS/m, πρέπει να επαναλάβουμε το πότισμα [89].

#### 3.3.3 Μέτρηση υγρασίας υποστρώματος

---

Η μέτρηση της υγρασίας υποστρώματος μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί με χρήση διηλεκτρικών αισθητήρων (TDR, FDR), κυρίως μέσω της ανάκλασης του ηλεκτρομαγνητικού σήματος [89]. Για να χρησιμοποιηθούν τασίμετρα ή αισθητήρες για τον έλεγχο της συχνότητας άρδευσης αυτό πρέπει να συνδυαστεί με ένα άλλο σύστημα ελέγχου της άρδευσης (π.χ. προκαθορισμένους χρόνους) για να αποφευχθεί η περίπτωση δυσλειτουργίας του συστήματος [89]. Η συνεχής καταγραφή της μεταβολής του βάρους του υποστρώματος, δίνει τη ακριβή εκτίμηση της υδατικής του κατάστασης.

#### 3.3.4 Μέτρηση της απορροής του θρεπτικού διαλύματος

---

Η μέθοδος αυτή καθορίζει την ποσότητα και διάρκεια άρδευσης. Για να διασφαλιστεί η επάρκεια άρδευσης και τα θρεπτικά στοιχεία στο περιβάλλον της ρίζας, σε κάθε άρδευση που εφαρμόζεται ένα ποσοστό περίπου 20-30% της ποσότητας θρεπτικού διαλύματος πρέπει να απορρέει [89]. Ένα κοινό σημείο συλλογής του θρεπτικού διαλύματος απορροής αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση, το οποίο μετράται άμεσα μετά από κάθε πότισμα. Είναι δυνατό να πραγματοποιείται καθημερινός έλεγχος του νερού άρδευσης, εάν από τον όγκο του

διαλύματος τροφοδοσίας αφαιρέσουμε τον όγκο του διαλύματος απορροής στο δοχείο συλλογής [89].

### 3.3.5 Άρδευση με βάση την ηλιακή ενέργεια

Η Άρδευση που βασίζεται στην καταγραφή της ηλιακής ενέργειας, βασίζεται σε μια τιμή αναφοράς, όπου όταν το άθροισμα της ηλιακής ενέργειας φθάσει την τιμή αυτή, ενεργοποιείται η άρδευση, ενώ η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε επόμενη άρδευση. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ενδεικτικά τιμές αθροιστικής ηλιακής ακτινοβολίας της τάξης των 140-180 J/cm<sup>2</sup> (1 Wh/m<sup>2</sup> = 0,36 J/cm<sup>2</sup>) [89]. Η τιμή αναφοράς αναπροσαρμόζεται κατόπιν ελέγχου του κλάσματος απορροής και μπορεί να συνδυάζεται με ένα άλλο σύστημα ελέγχου της άρδευσης (π.χ. προκαθορισμένους χρόνους), ιδιαίτερα τους χειμερινούς μήνες, όπου επικρατεί χαμηλή ηλιοφάνεια και λειτουργεί σύστημα θέρμανσης ή ακόμη και τους θερμούς μήνες όπου ενδέχεται να διενεργείται πότισμα και κατά τη διάρκεια της νύχτας [89].

### 3.3.6 Άρδευση με βάση τη διαπνοή

Είναι γνωστό ότι το 99% του νερού που απορροφάται από τα φυτά χάνεται με τη διαπνοή. Η αυτόματη άρδευση της καλλιέργειας είναι δυνατό να επιτευχθεί με την εκτίμηση της διαπνοής όπου κάθε αρδευτική δόση θα υπολογίζεται από τον όγκο νερού που απορροφούν τα φυτά μείον το κλάσμα της απορροής. Η εκτίμηση αυτή μπορεί να γίνει με κατάλληλη προσομοίωση (FAO, Penman-Monteith, Stanghellini), ωστόσο κάποιες φορές παρουσιάζει πρακτικές δυσκολίες. Σε τέτοιες περιπτώσεις συστήνεται ο συνδυασμός με ένα επικουρικό σύστημα ελέγχου της άρδευσης (π.χ. προκαθορισμένους χρόνους άρδευσης) [89].

## 3.4 ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΙΚΗ ΆΡΔΕΥΣΗ

Η μέθοδος της ελλειμματικής άρδευσης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε υπαίθριες είτε σε υπο κάλυψη καλλιέργειες και περιλαμβάνει την εφαρμογή μικρότερων ποσοτήτων νερού από εκείνες που πραγματικά απαιτούνται από την μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην αύξηση της αποτελεσματικότητας χρήσης του νερού, δηλαδή προσβλέπει σε ένα αυξημένο λόγο της ποσότητας παραγόμενου τελικού προϊόντος, μετρημένη σε κιλά, προς την συνολική ποσότητα νερού που απαιτήθηκε για την παραγωγή αυτών των προϊόντων, μετρημένη σε κυβικά. Η αύξηση της αποτελεσματικότητας επιτρέπει την αύξηση της παραγωγής τροφών με λιγότερο νερό [27]. Η ελλειμματική άρδευση αυξάνει προοδευτικά την αντοχή των φυτών σε ακραία φαινόμενα έλλειψης νερού, κάτι που είναι χρήσιμο κυρίως σε ξηρά εδάφη ή εδάφη με μικρή υδατοϊκανότητα [27].

Η ελλειμματική άρδευση είναι μια σημαντική στρατηγική για την αειφόρο γεωργία και τη διατήρηση των υδατικών πόρων, απαιτώντας όμως εκπαιδευμένο προσωπικό και εξειδικευμένα μοντέλα για την αποτελεσματική εφαρμογή της σε διάφορα αγροτικά περιβάλλοντα. [27]

## 4. ΑΡΔΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

### 4.1 ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ-ΕΥΦΥΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ

Η ικανοποίηση των αναγκών ενός συνεχόμενα αυξανόμενου πληθυσμού απαιτεί στις μέρες μας μια αειφορική διαχείριση των φυσικών πόρων, ώστε να αποφευχθεί η εξάντλησή τους. Η εύρεση νέων τεχνολογιών, ικανών να διαχειριστούν τις πιέσεις που δέχεται ο γεωργικός τομέας για αύξηση της γεωργικής παραγωγής, ενώ παράλληλα να διατηρεί ένα βιώσιμο επίπεδο στους φυσικούς πόρους και να προστατεύει το περιβάλλον, ήταν επιτακτική ανάγκη. Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογική επανάσταση που έχει περιέλθει και στον αγροτικό τομέα φαίνεται να προωθεί την αειφορική γεωργία όλο και περισσότερο, με κύριο εκπρόσωπο την Γεωργία Ακριβείας.

Η εφαρμογή της Γεωργίας Ακριβείας (ΓΑ) αφορά ένα σύνολο νέων τεχνολογιών, όπως, συστήματα εντοπισμού θέσης (GPS), γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS), συστήματα αισθητήρων, τηλεπισκόπηση, χαρτογράφηση ιδιοτήτων εδάφους και παραγωγής, ζώνες διαχείρισης και εφαρμογή μεταβλητών δόσεων εισροών, με σκοπό την αειφορική διαχείριση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων μέσω της αντιμετώπιση της παραλλακτικότητας των παραμέτρων ανάπτυξης οι οποίες επηρεάζουν την παραγωγή, όπως ο τύπος του εδάφους, το pH, τα θρεπτικά στοιχεία, η οργανική ουσία, το νερό, η στράγγιση κ.α. [90]. Στο επίκεντρο της ΓΑ είναι ο διαχωρισμός των αγροκτημάτων σε μικρότερα και πιο διαχειρίσιμα μέρη ή ζώνες, των οποίων η διαχείριση γίνεται ανάλογα με τις μοναδικές τους απαιτήσεις [91]. Η γεωργία ακριβείας αναφέρεται στην προσεκτική διαχείριση των αγρών, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές σε χώρο και χρόνο όσον αφορά το έδαφος, την ατμόσφαιρα και τα φυτά., χρησιμοποιώντας τεχνολογίες πληροφορίας και επικοινωνιών (ICT), ώστε να μειώσει σε κάθε επιμέρους ζώνη την επίδραση των παραμέτρων ανάπτυξης της καλλιέργειας [92]. Ο Stafford (2000), ένας από τους πρωτοπόρους ερευνητές της ΓΑ την ορίζει ως ένα σύστημα διαχείρισης των εκμεταλλεύσεων που στοχεύει στη βελτίωση της παραγωγικότητας και χρήσης των πόρων, είτε μέσω αυξημένων αποδόσεων είτε μέσω των μειωμένων εισροών και των δυσμενών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η γεωργία ακριβείας είναι χρήσιμη για τους αγρότες διότι επιτρέπει την ακριβή και αποδοτική χρήση των πόρων, μειώνοντας τα έξοδα και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, και επειδή η ιδέα παρέχει την καταγραφή των γεωργικών δραστηριοτήτων (ιχνηλασιμότητα) που απαιτούν ολοένα και περισσότερο οι καταναλωτές και η κεντρική Ευρωπαϊκή διοίκηση.

#### 4.1.1 Κυκλικό Σύστημα Γεωργίας Ακριβείας – Ευφυής Τεχνολογίες

Στα συστήματα ΓΑ τρία είναι τα βασικά στοιχεία που οδηγούν στην βελτιστοποίηση παραγωγής [90]:

- Ο εξοπλισμός
- Η γεωπονική γνώση
- Τα δεδομένα

Μέχρι σήμερα αυξημένη προσπάθεια έγινε κυρίως στην ανάπτυξη εξοπλισμού και ηλεκτρονικών συστημάτων. Σημαντικότερο μέρος όμως αποτελεί η συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, όπου οδηγεί στην ανεύρεση ζωνών διαχείρισης (management zones) εντός του

αγροτεμαχίου, τα οποία χαρακτηρίζονται από κοινά εδαφολογικά ή αγρονομικά χαρακτηριστικά [90].

Η ΓΑ είναι ένα κυκλικό σύστημα συλλογής δεδομένων (συνεχόμενων ετών) που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των καλλιεργειών και την αξιολόγηση των αποφάσεων. Τα δεδομένα αποθηκεύονται κάθε χρόνο σε μια βάση δεδομένων, τη ψηφιακή βιβλιοθήκη (database), για να χρησιμοποιηθούν ως ιστορικά δεδομένα (historical data) για μελλοντικές αποφάσεις [92]. Το κυκλικό σύστημα ΓΑ μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις επαναλαμβανόμενες φάσεις: 1) συλλογή δεδομένων, 2) ανάλυση δεδομένων, 3) διαχειριστικές αποφάσεις και εφαρμογές μεταβλητού ποσοστού (VRA) των εισροών, και 4) αξιολόγηση των διαχειριστικών αποφάσεων (Εικ. 4-1).



**Εικόνα 4-1: Η Κυκλική Διαδικασία της Γεωργίας Ακριβείας (Πηγή: Balafoutis et al, 2017)**

Για να εφαρμοστεί το κυκλικό σύστημα της ΓΑ είναι απαραίτητες μια σειρά από τεχνολογίες οι οποίες καλούνται Τεχνολογίες Έξυπνης Γεωργίας (Smart Farming Technologies, SFT), οι οποίες αποτελούν εμπορεύσιμες, προσιτές σε κόστος, και αξιόπιστες τεχνολογίες που εξοικονομούν χρόνο από τις γεωργικές πρακτικές και οι οποίες αποτελούν θέμα έρευνας της ΓΑ, των πληροφοριακών συστημάτων διαχείρισης καλλιεργειών (FMIS) και της ρομποτικής [92]. Το πλεονέκτημα τους σχετίζεται με την πιο αποτελεσματική εφαρμογή των εισροών (σπόρων, λιπασμάτων, αγροχημικών, άρδευσης, καυσίμων), της αύξησης της ταχύτητας με την οποία διεκπεραιώνονται οι εργασίες, της άνεσης και βελτίωση της προσαρμοστικότητας στο χωράφι [92].

Οι τεχνολογίες της έξυπνης γεωργίας διακρίνονται στις τρεις κατηγορίες [92]:

- 1) Στις τεχνολογίες συλλογής δεδομένων, όπου περιλαμβάνονται όλες οι τεχνολογίες για την καταγραφή και χαρτογράφηση του αγροκτήματος και των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας, τεχνολογίες πλοήγησης και τηλεπισκόπησης.
- 2) Στις τεχνολογίες ανάλυσης δεδομένων, λήψης αποφάσεων (decision making) και αξιολόγησης που βασίζονται είτε σε ένα απλό μοντέλο αποφάσεων Η/Υ είτε σε ένα πιο

περίπλοκο όπως είναι το πληροφοριακό σύστημα διαχείρισης αγροκτήματος (FMIS) που περιλαμβάνουν πολλές διαφορετικές μεταβλητές.

- 3) Στις τεχνολογίες ακριβούς εφαρμογής ΓΑ όπου γίνεται εφαρμογή των αποφάσεων εστιάζοντας στην διαφοροποιημένη εφαρμογή εισροών και στις τεχνολογίες καθοδήγησης

Υπάρχει μια σειρά τεχνολογιών που μπορούν να ταξινομηθούν σε κάθε κατηγορία SFT, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4 [92].

**Πίνακας 4: Λίστα Τεχνολογιών Έξυπνης Γεωργίας (Πηγή: Balafoutis et al, 2020)**

PA technologies	Main categories	System
Data acquisition technologies	GNSS technologies	Global navigation satellite systems (GNSS)
		Differential GNSS
		Real time kinematic (RTK) and Network RTK (NRTK)
		Wide area RTK (WARTK)
		Un-differenced GNSS
		Precise point positioning (PPP)
		Fast PPP (FPPP)
	Mapping technologies	Elevation maps
		Soil mapping
		Yield mapping
		Yield monitor display
	Data acquisition of environmental properties echnologies (Camera based imaging)	RGB cameras
		LIDAR sensors
		ToF (IR) cameras
		Light curtains
		Multi/hyper-spectral cameras
	Data acquisition of environmental properties technologies (NDVI Measurement)	Spectral sensors
		Fluorescence sensors
	Data acquisition of environmental properties technologies (Soil moisture sensors)	Frequency domain reflectometry (FDR)
		Time domain reflectometry (TDR)
		Amplitude domain reflectometry (Impedance)
		Phase transmission
		Time domain transmission
Tensiometers		
Gypsum blocks		
Granular matrix sensors		
Heat dissipation sensors		

(continued)

PA technologies	Main categories	System
	Machines and their properties	Travel speed sensor
		Tractor sensing systems using ISOBUS
		Unmanned aerial vehicles (UAVs)
		Unmanned ground vehicles (UGVs)
Data analysis & evaluation technologies		Farm management information system
		Software for whole farm management, forecasting and crop monitoring
Data analysis & evaluation technologies		Management zone delineation
		Decision support system
Precision application technologies	Guidance technology	Auto-guidance systems
		Control traffic farming
	Variable rate application	Variable-rate fertilizer application
		Variable-rate lime application
		Variable-rate manure application
		Variable-rate pesticide application (Map-based system)
		Variable-rate pesticide application (Real-time sensor based system)
		Boom height control
		Variable-rate planting/seeding
		Precision physical weeding
		Precision irrigation and irrigation scheduling

Σε παγκόσμιο επίπεδο, έχουν δημιουργηθεί εργαστήρια, τμήματα και κέντρα ΓΑ που ερευνούν τη δυνατότητα αύξησης της συνολικής παραγωγής, με ταυτόχρονη μείωση του κόστους παραγωγής και αποφυγής πρόκλησης αρνητικών επιδράσεων στο περιβάλλον. Οι περισσότεροι από τους παραγωγούς που κάνουν εφαρμογή ΓΑ έχουν παρατηρήσει αύξηση της ευκολίας αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών συνθηκών που απειλούν την παραγωγή [91]. Η χρήση της μάλιστα μαζί με τα πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης καλλιεργειών (FMIS) και τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (DSS), φαίνεται να κερδίζει την αποδοχή των αγροτών με αυξανόμενους ρυθμούς.

Η άρδευση ακριβείας (precision irrigation) αποτελεί ένα μέρος αυτών των συστημάτων, καθώς κάνει ακριβή εφαρμογή των αποφάσεών τους (μεταβλητή εφαρμογή εισροών, VRA), και η συνεισφορά της ως προς την μείωση της χρήσης του νερού, του κόστους και άλλων σημαντικών παραμέτρων αποδεικνύουν τη σημαντικότητα αυτής της μετάβασης στην εξέλιξη της γεωργίας.

#### 4.1.2 Πληροφοριακά Συστήματα Διαχείρισης Καλλιεργειών (FMIS) & Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (DSS)

---

Τα συστήματα FMIS και DSS, καθώς ανήκουν στη 2η κατηγορία των SFT- ανάλυση δεδομένων, λήψη αποφάσεων (decision making) και αξιολόγηση- αναλύουν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και ερμηνεύουν τα αποτελέσματα, ώστε να καταλήξουν σε σχετικές αποφάσεις.

Ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) είναι ένα διαδραστικό σύστημα που βασίζεται σε λογισμικό που χρησιμοποιείται για να βοηθήσει τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να συγκεντρώσουν χρήσιμες πληροφορίες από έναν συνδυασμό ακατέργαστων δεδομένων, εγγράφων και προσωπικών γνώσεων [86]. Στη γεωργία αναφέρεται στις αποφάσεις που λαμβάνονται από τον αγρότη για τη διαχείριση του αγροκτήματός του. Η ΓΑ συνδέεται άμεσα με τη λήψη αποφάσεων από τον αγρότη. Ένα DSS μπορεί να περιγραφεί ως παράδειγμα μετατροπής δεδομένων σε αποφάσεις [93]. Οι αποφάσεις που καλούνται να πάρουν οι παραγωγοί γίνονται όλο και πιο περίπλοκες. Η χρήση επομένως τέτοιων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων είναι καίριας σημασίας. Η εφαρμογή DSS στη γεωργία και το περιβάλλον έχει αυξηθεί ραγδαία την τελευταία δεκαετία, γεγονός που επιτρέπει την ταχεία αξιολόγηση των συστημάτων γεωργικής παραγωγής σε όλο τον κόσμο και τη λήψη αποφάσεων τόσο σε επίπεδο αγροκτήματος όσο και σε επίπεδο περιφέρειας, αν και υπάρχουν περιορισμοί για την επιτυχή υιοθέτηση της τεχνολογίας στη γεωργία [86]. Μία από τις σημαντικές εφαρμογές του DSS στη γεωργία είναι η διαχείριση του νερού τόσο σε επίπεδο αγροκτήματος όσο και σε επίπεδο ευρύτερης περιοχής.

Το Πληροφοριακό Σύστημα Διαχείρισης Καλλιεργειών (FMIS) ορίζεται ως ένα προγραμματισμένο σύστημα συλλογής, επεξεργασίας, αποθήκευσης και διάδοσης δεδομένων με τη μορφή που απαιτούνται για την εκτέλεση εργασιών και λειτουργιών στο αγρόκτημα [94]. Καθώς η γεωργία έχει γίνει πολύ περίπλοκη, ο τεράστιος όγκος δεδομένων που αποκτούνται από τις SFT πρέπει να αναλυθούν για να ληφθούν οι καλύτερες αποφάσεις διαχείρισης των καλλιεργειών. Το κλειδί της επιτυχίας είναι η πρόσβαση σε έγκαιρες πληροφορίες και η λήψη αποφάσεων στην επεξεργασία δεδομένων. Τα FMIS έχουν αυξηθεί σε πολυπλοκότητα μέσω της ενσωμάτωσης νέων τεχνολογιών, όπως εφαρμογές που βασίζονται στο διαδίκτυο και εφαρμογές για έξυπνα τηλέφωνα και ταμπλέτ [95]. Το FMIS μπορεί να καλύψει μεγάλο αριθμό λειτουργιών, όπως απογραφή, ημερολόγιο, ιχνηλασιμότητα, λειτουργίες διαχείρισης για συγκεκριμένες τοποθεσίες (site-specific management). Το FMIS θα μπορούσε να ταξινομηθεί σύμφωνα με τη λειτουργία που εξυπηρετεί. Υπάρχει λογισμικό διαθέσιμο για παρακολούθηση της καλλιέργειας, για διαχείριση ολόκληρης της εκμετάλλευσης, λογισμικό μόνο για ΓΑ, αλλά και εξειδικευμένο λογισμικό για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως προγραμματισμός άρδευσης, πρόγνωση ψεκασμού, ακριβείς καιρικές προβλέψεις [92].

#### 4.1.3 Αυτοματισμοί και Τηλεμετρία

---

Οι νέες τεχνολογίες της τηλεματικής, του αυτοματισμού, της πληροφορικής, καθώς και της τηλεπισκόπησης βελτιώνουν την άρδευση καλλιεργειών, εξοικονομούν υδατικούς πόρους, καλύτερη παραγωγή και μειωμένες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις [96]. Όλες αυτές οι τεχνολογικές καινοτομίες αναπτύχθηκαν στις πρόσφατες δεκαετίες, βασιζόμενες σε ψηφιακά πρότυπα. Αυτές μπορούν να εφαρμοστούν για να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με το πότε και



πόσο νερό πρέπει να χορηγηθεί για την άρδευση, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δεδομένα που συλλέγονται είναι αξιόπιστα και ενημερωμένα [96].

Η αυτόματη άρδευση που βασίζεται σε ενδείξεις υγρασίας υψηλής συχνότητας αισθητήρων εδάφους, εξοικονομεί την μισή ποσότητα νερού διατηρώντας παράλληλα μεγαλύτερη υγρασία σε σχέση με χειροκίνητα συστήματα άρδευσης [97]. Αργότερα, με την εξέλιξη της ασύρματης τεχνολογίας, η αυτόματη άρδευση χρησιμοποίησε ασύρματα συστήματα αισθητήρων για να καλύψει μεγάλες εκτάσεις αγροτικής γης, μειώνοντας το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των ασύρματων δικτύων. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από έναν κεντρικό δέκτη και πολλούς αισθητήρες (τρεις για υγρασία του εδάφους, τέσσερις για θερμοκρασία) και ένα σύστημα μετάδοσης ραδιοσυχνοτήτων (RFID). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι πληροφορίες από αυτούς τους αισθητήρες να χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν πότε και πόσο νερό χρειάζεται να δοθεί για την άρδευση σε πραγματικό χρόνο και σε συγκεκριμένη θέση [98]. Τα ασύρματα δίκτυα επιτρέπουν πρόσθετη χρήση δεδομένων και ανοίγουν νέες δυνατότητες για τον αυτοματισμό της άρδευσης στη γεωργία. Με τον συνδυασμό ποικίλων πληροφοριών όπως γεωγραφικά, μετεωρολογικά και κλιματικά δεδομένα, χρησιμοποιώντας λογισμικά λήψης αποφάσεων, επιτυγχάνεται μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση για τον αυτοματισμό της άρδευσης και τη βελτίωση της γεωργικής παραγωγής. [82].

Στα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης της αγροτικής παραγωγής, εστιάζουμε όχι μόνο στη μέτρηση των αλλαγών στις φυσικές παραμέτρους και φαινόμενα, αλλά και στον κωδικοποιημένο και αναλυτικό μεταφοράς αυτών των δεδομένων σε κατάλληλες πλατφόρμες επεξεργασίας. Αυτός ο μετασχηματισμός των δεδομένων συμβαίνει σε συγκεκριμένα σημεία, είτε μέσα είτε έξω από τις γεωργικές περιοχές, και οδηγεί στην αποστολή οδηγιών σε θέσεις όπου πρέπει να γίνει κάποια ενέργεια. Ολόκληρη αυτή η διαδικασία, που χρησιμοποιεί διάφορα ψηφιακά πρωτόκολλα, έχει εξελιχθεί ταχέως τις τελευταίες δεκαετίες και αποτελεί την τεχνολογική εξέλιξη γνωστή ως τηλεμετρία. Έτσι, με τηλεμετρία αναφερόμαστε στην επιστήμη της πληροφορικής που ασχολείται με τη μεταφορά δεδομένων μέτρησης φυσικών παραμέτρων από έναν σταθμό μέτρησης, εγκατεστημένο στην ύπαιθρο, σε έναν κεντρικό σταθμό [82]. Ένας σταθμός μέτρησης μπορεί να είναι μια συσκευή που μετρά διάφορες πληροφορίες, όπως πληροφορίες μετεωρολογικές, σεισμικές, θερμοκηπιακές, ή μπορεί να είναι ένας σύγχρονος αισθητήρας που μπορεί να μεταφέρει αυτές τις πληροφορίες σε έναν κεντρικό σταθμό βάσης [82]. Στα συστήματα τηλεμετρίας πραγματικού χρόνου οι μεταβολές των φυσικών φαινομένων καταγράφονται συνεχώς από τους σταθμούς μέτρησης και στην συνέχεια αποστέλλονται με κωδικοποιημένη μορφή στους κεντρικούς σταθμούς. Η αποτελεσματικότητα των συστημάτων αυτών είναι υψηλή, αλλά το βασικό τους μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος [82].

Για τη σωστή λειτουργία ενός αρκετά εκτεταμένου συστήματος άρδευσης θα πρέπει να εφαρμοστούν κάποιοι αυτοματισμοί, ή και αν δύναται, ολόκληρο σύστημα αυτοματοποιημένης άρδευσης. Για την επίτευξη αυτοματισμών στην άρδευση κρίνεται απαραίτητος ο γενικός έλεγχος από ένα σημείο της εγκατάστασης, με τη βοήθεια του οποίου θα ελέγχονται τηλεμετρικά τα συστήματα. Η συνεχής τηλεμετρική παρακολούθηση των συστημάτων από τον κεντρικό έλεγχο της άρδευσης θα εξασφαλίσει την εξοικονόμηση του αρδευομένου νερού, την ορθολογική κατανάλωση ρεύματος, την άμεση ανίχνευση ζημιών στο δίκτυο και συνεπώς τη γρήγορη αντιμετώπισή τους. Η αυτοματοποιημένη άρδευση εγγυάται τη μείωση της δαπάνης χρόνου και κόστους, συγκριτικά με το χειροκίνητο συμβατικό τρόπο άρδευσης, και αποσκοπεί στην αποτελεσματική άρδευση [82].

## 4.2 Η ΆΡΔΕΥΣΗ ΣΤΗ ΓΕΩΡΓΙΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Σε ένα συμβατικό, παραδοσιακό, σύστημα άρδευσης, οι αγρότες εφαρμόζουν ομοιόμορφη άρδευση στο αγρόκτημα χωρίς να λαμβάνουν υπόψη κλιματολογικές συνθήκες ή άλλες μεταβλητές στο χωράφι, όπως η εδαφική υγρασία ή την ανάγκη νερού της καλλιέργειας. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προκαλέσει υπερ-άρδευση σε ορισμένα μέρη του αγροκτήματος, υπό άρδευση σε άλλα και να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη υδατική καταπόνηση των φυτών, διαθέτοντας, επομένως, μικρότερη ικανότητα εξοικονόμησης νερού [99]; 100. Επιπλέον η συμβατική άρδευση γίνεται κατά κανόνα χειροκίνητα, ενώ οι περισσότεροι από τους εμπορικούς ελεγκτές άρδευσης που διατίθενται στην αγορά είναι προγραμματισμένοι να παρέχουν νερό σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, με βάση την εμπειρική γνώση της δυναμικής των μεταβλητών του καιρού, καθώς και των χαρακτηριστικών εδάφους και φυτών [101]. Άλλα ζητήματα στα συμβατικά συστήματα άρδευσης περιλαμβάνουν τη λειψυδρία λόγω της επίδρασης της ξηρασίας και της κλιματικής αλλαγής, της περιβαλλοντικής διαταραχής, της μη γραμμικής ανάπτυξης της δυναμικής των φυτών, της μεταβαλλόμενης δυναμικής του καιρού, της δυναμικής πρόσληψης νερού από τις καλλιέργειες των φυτών [102]. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα ζητήματα, υιοθετείται σήμερα η ιδέα της άρδευσης ακριβείας για βέλτιστη εξοικονόμηση νερού και καλύτερη απόδοση των καλλιεργειών.

Η άρδευση ακριβείας, ως κομμάτι της ΓΑ, αφορά την ενσωμάτωση τεχνολογιών πληροφοριών, επικοινωνίας και ελέγχου στη διαδικασία άρδευσης για να επιτευχθεί η βέλτιστη χρήση των υδάτινων πόρων με παράλληλη ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων [103]. Η άρδευση ακριβείας μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία μέθοδος παροχής της βέλτιστης ποσότητας νερού, σε μικρές ποσότητες, στην κατάλληλη χρονική στιγμή, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι ανάγκες των φυτών ως προς την εξατμισοδιαπνοή και τις μεταβολικές τους διαδικασίες. Ουσιαστικά στόχος της είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης της καλλιέργειας με την ελάχιστη ποσότητα νερού που μπορεί να εφαρμοστεί. Η τεχνολογία της άρδευσης ακριβείας, μαζί με την λίπανση ακριβείας, αποδεικνύονται αποτελεσματικά μέσα για να επιτευχθεί η πράσινη παγκόσμια γεωργία [104].

Η ακριβής διαχείριση της άρδευσης βασίζεται στην άντληση δεδομένων και πληροφοριών για τις συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας, τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους, τους κλιματικούς παράγοντες, αλλά και από την αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των παραγόντων. Τα δεδομένα συλλέγονται απευθείας από το αγρόκτημα με την βοήθεια αισθητήρων εδάφους (π.χ. για τον προσδιορισμό της υγρασίας και της θερμοκρασίας) και μετεωρολογικών σταθμών (κλιματικά δεδομένα), τα οποία δεδομένα μεταφέρονται είτε με ένα συνδεδεμένο δίκτυο αισθητήρων, είτε βασίζονται σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, ως αποτέλεσμα της υιοθέτησης τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT). Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την άρδευση όταν αυτή είναι απαραίτητη, χάρη στα δεδομένα που έχει ο παραγωγός στην διάθεσή του. Ωστόσο, η αποτελεσματική εφαρμογή της άρδευσης ακριβείας, απαιτεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) για την επεξεργασία και την ενοποίηση δεδομένων και πληροφοριών σε διαφορετικά επίπεδα [105].

#### 4.2.1 Οφέλη Άρδευσης Ακριβείας

---

Σε πολλές χώρες της Ευρώπης χρησιμοποιείται το κινούμενο πιστόλι βροχής για εφαρμογή της συμβατικής άρδευσης, ωστόσο είναι μέθοδος που απαιτεί υψηλή πίεση, άρα και ενέργεια, και υφίσταται υψηλές απώλειες λόγω αέρα. Όταν τα πιστόλια βροχής μπορούν να εξοπλιστούν με GPS με ηλιακό πάνελ, έλεγχο πίεσης και γωνίας ψεκασμού συνδεδεμένο με τηλεχειριστήριο μέσω διαδικτύου, τότε το πιστόλι βροχής μπορεί να σταματήσει αυτόματα ή εξ αποστάσεως εάν ο άνεμος γίνει πολύ δυνατός. Η αντικατάσταση ενός πιστολιού βροχής από πολυμπεκ ψεκασμού επιτρέπει ήδη ένα σημαντικό ποσό εξοικονόμηση νερού, ειδικά σε συνθήκες ανέμου. Επιπλέον, η πολύ χαμηλότερη πίεση για έναν ψεκασμό συνεπάγεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας. Ακόμη μεγαλύτερη εξοικονόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί με στάγδην άρδευση. Αυτό το σύστημα τροφοδοτεί απευθείας τη ριζική ζώνη και αποφεύγει τις απώλειες από τον άνεμο και την εξάτμιση του εδάφους. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι ένα σύστημα άρδευσης με σταγόνες μπορεί να ελεγχθεί εξ αποστάσεως επιτυγχάνοντας και ένα υψηλό επίπεδο αυτοματισμού σε συνδυασμό με παρακολούθηση εδάφους και νερού. Ο συνδυασμός των συστημάτων άρδευσης και της άρδευση ακριβείας μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερη διαχείριση του αρδευτικού συστήματος.

Έχουν επισημανθεί οφέλη από τη χρήση άρδευσης ακριβείας σε διάφορες έρευνες [104], [106]. Τα πιο σημαντικά αναφέρονται παρακάτω:

- εύκολη εγκατάσταση συστημάτων άρδευσης ακριβείας και δυνατότητα αυτοματοποιημένου ελέγχου της άρδευσης
- μείωση των εισροών, όπως λιπάσματα, λόγω μεγαλύτερης αποτελεσματικότητας της χρήσης τους μέσω στοχευμένης άρδευσης
- πιο αποτελεσματική διαχείριση των ζιζανίων, καθώς το έδαφος ποτίζεται μόνο γύρω από το καλλιεργούμενο φυτό και η ανεπιθύμητη βλάστηση δεν έχει αρκετή υγρασία.
- η ισορροπημένη άρδευση οδηγεί σε άριστη κατάσταση της καλλιέργειας καθ' όλη την καλλιεργητική περίοδο
- εξοικονόμηση νερού και κόστους
- μείωση ενέργειας και εργασίας, καθώς μέσω της αυτοματοποιημένης άρδευσης δεν απαιτούνται συνεχείς μετακινήσεις για τον έλεγχο ή το άνοιγμα-κλείσιμο της βαλβίδας, ενώ σε περίπτωση βλάβης οι ειδοποιήσεις στέλνονται απευθείας στον παραγωγό ή τον σύμβουλο.
- βελτίωση παραγωγικότητα χωραφίου και αυξημένες αποδόσεις.
- η συλλογή των δεδομένων από αισθητήρες, δορυφόρους και μετεωρολογικούς σταθμούς βοηθούν τους παραγωγούς να κατανοήσουν καλύτερα τις ανάγκες της καλλιέργειας με μεγαλύτερη ακρίβεια.
- απλοποιημένη διαχείριση αγροκτημάτων με λογισμικό ακριβείας άρδευσης.

#### 4.2.2 Έξυπνα συστήματα Άρδευσης

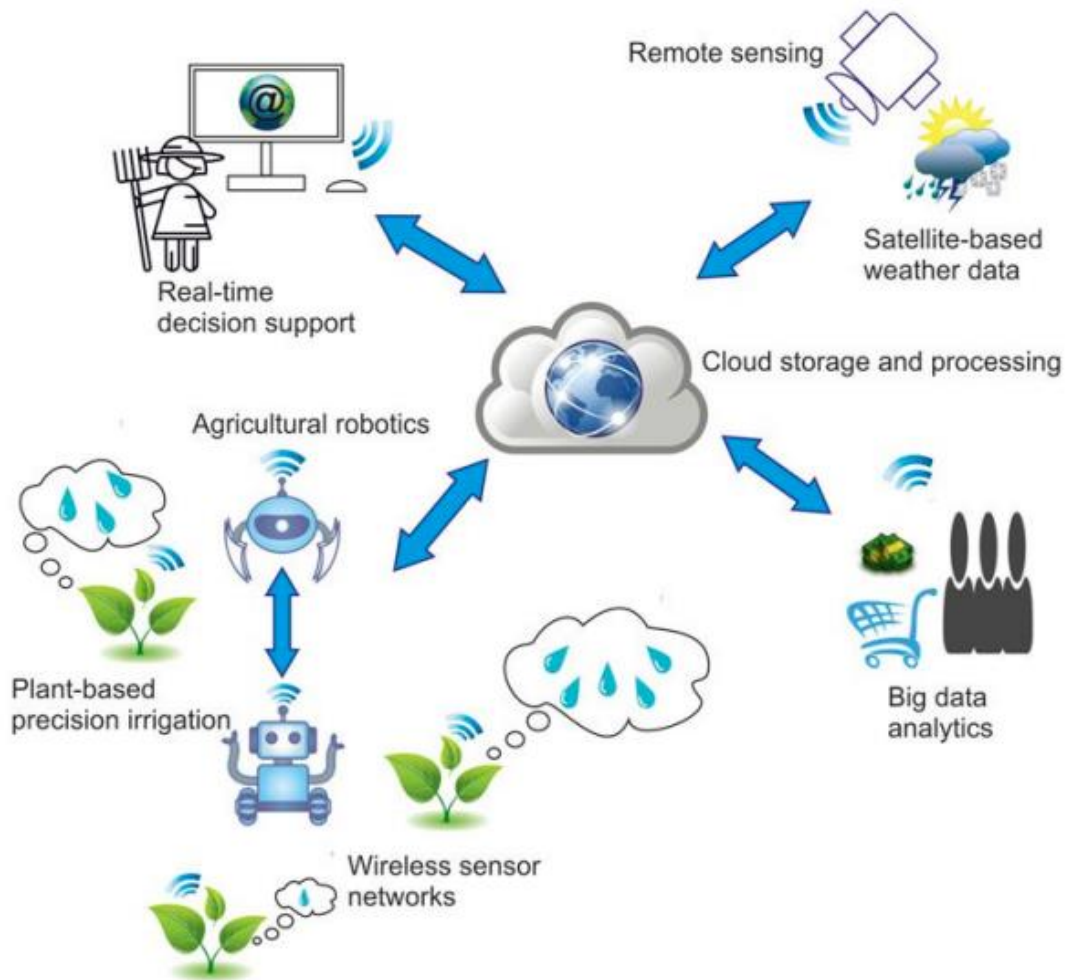
---

Η ακριβής άρδευση λαμβάνει υπόψη τη χωρική και χρονική διακύμανση του εδάφους, της δομής και των υδραυλικών ιδιοτήτων του, τις αντιδράσεις των φυτών στην έλλειψη νερού και τις μεταβολές των κλιματικών παραγόντων, μέσω αποτελεσματικής παρακολούθησης με μια

σειρά αισθητήρων που μπορούν πλέον να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), ακόμη και σε απόσταση από αγροτικές και κύρια τροφοδοτικά, ώστε να παρθούν καλύτερες αποφάσεις άρδευσης που δίνουν τη δυνατότητα επίτευξης υψηλής εξοικονόμηση νερού και βελτιωμένης απόδοσης καλλιεργειών [107]. Η έξυπνη άρδευση επιτρέπει τη δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης των βασικών μεταβλητών άρδευσης, όπως και την δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλων προγραμματισμένης άρδευσης αλλά και της απομακρυσμένης λειτουργίας του εξοπλισμού άρδευσης [108]. Οι νέες τεχνολογίες επιτρέπουν την αποστολή πληροφοριών στους χρήστες μέσω μηνυμάτων (SMS), (MMS) ή προβολής χαρτών μέσω έξυπνων τηλεφώνων και υπολογιστών [109].

Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει φέρει την ανάπτυξη προγραμμάτων Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence, AI). Η χρήση AI προσφέρει καινοτόμες λύσεις για την διαχείριση των αγροκτημάτων [92]. Οι αλγόριθμοι AI καθιστούν δυνατή την ανάλυση και την αναζήτηση αλληλεπιδράσεων σε μεγάλες ποσότητες δεδομένων που προκύπτουν από πολλούς αισθητήρες και παρακολουθώντας πολλές διαδικασίες. Δεδομένα από πολλαπλές πηγές θα πρέπει να συνδεθούν και να διευκολυνθεί η δια-λειτουργικότητα, ή η ευκολία μεταφοράς δεδομένων και ως επόμενο βήμα, οι αλγόριθμοι αυτοί θα κάνουν προτάσεις για λήψη απόφασης από τον αγρότη, ή και ακόμη θα εφαρμόζουν ορισμένες αποφάσεις ανεξάρτητα [110].

Χρησιμοποιώντας την AI μπορούμε να συνδυάσουμε πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες, μετεωρολογικές προβλέψεις και μοντέλα εδάφους- καλλιέργειας. Επιπλέον, είναι προσβάσιμες χωρικές πληροφορίες από μη επανδρωμένα αεροσκάφη και δορυφόρους [110]. Η AI μπορεί να συνδυάσει δεδομένα φυτών, εδάφους και καιρού λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική και χωρική μεταβλητότητα τους, με ακριβή δυναμικά μοντέλα ανάπτυξης έχοντας τη δυνατότητα να εξετάσει συγκεκριμένα σενάρια για τη διαχείριση του διαθέσιμου νερού, καθώς και τις προσδοκίες για την ποσοτική απόδοση και τον χρόνο συγκομιδής [111]. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το μέλλον του ελέγχου άρδευσης ακριβείας, με αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων σε υπολογιστικό νέφος, επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ αισθητήρων που βασίζονται σε φυτά, ευφυών παραγόντων (συμπεριλαμβανομένων των ρομπότ) που υποστηρίζονται από δεδομένα καιρού και αναλύσεις αγοράς (Εικ. 4-2).



Εικόνα 4-2: Έλεγχος άρδευση ακριβείας (Πηγή: Owino and Söffker, 2022)

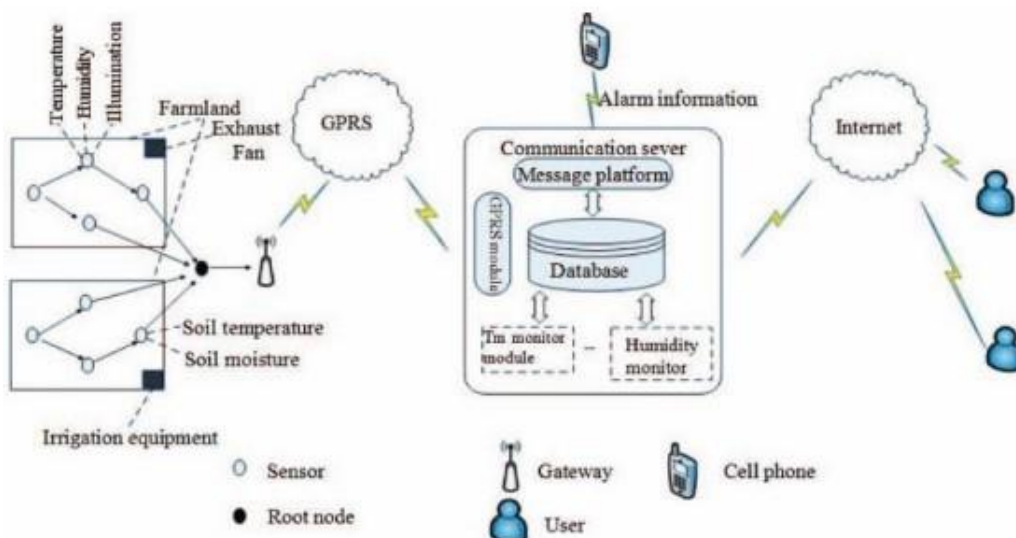
## 5. ΔΙΕΘΝΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότερες επιστημονικές δημοσιεύσεις έχουν επικεντρωθεί στην άρδευση ακριβείας. Καθώς οι ποσότητες νερού που χρησιμοποιούνται στην άρδευση ακριβείας έχουν στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας της άρδευσης (WUE), με ελάχιστη απώλεια νερού, οι μέθοδοι άρδευσης ακριβείας βασίζονται στην παρακολούθηση των παραγόντων που επηρεάζουν και καθορίζουν τις ποσότητες του νερού που θα εφαρμοστούν. Αυτοί οι παράγοντες μπορεί να είναι το έδαφος, η καλλιέργεια, οι κλιματικές συνθήκες, αλλά και το ίδιο το νερό άρδευσης.

### 5.1 ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΆΡΔΕΥΣΗΣ

#### Ασύρματο Δίκτυο αισθητήρων για Ακριβή Παρακολούθηση Γεωργίας - Wireless Sensor Network for Precise Agriculture Monitoring

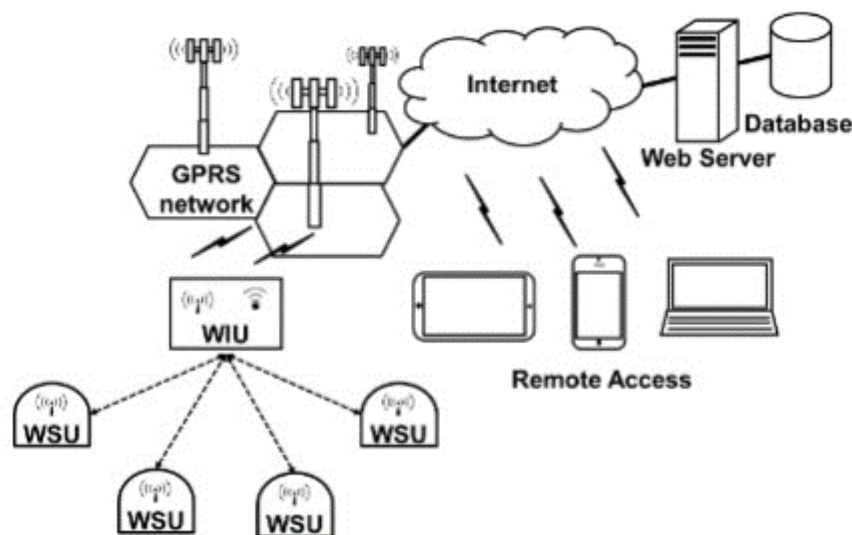
Η παρούσα έρευνα προτείνει, στο πλαίσιο της σύγχρονης γεωργίας ακριβείας, το «Σύστημα Παρακολούθησης της Γεωργίας Ακριβείας (PAMS)», δηλαδή τη δημιουργία ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων για εφαρμογή σε θερμοκηπιακή διαχείριση καλλιεργειών. Το PAMS συνδέει το δίκτυο των ασύρματων αισθητήρων, με πύλες και έναν διακομιστή επικοινωνίας (communication server). Οι αισθητήρες (κόμβος αισθητήρων τύπου NPUMote) τοποθετούνται σε ελεγχόμενες καλλιέργειες σε θερμοκήπια, συλλέγοντας σε πραγματικό χρόνο δεδομένα, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία [112]. Πραγματοποιείται ο συγχρονισμός στη λήψη και μετάδοση δεδομένων με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (χρήση πρόγραμματος Balance Low Power Time Synchronization). Τα δεδομένα αποστέλλονται από τους αισθητήρες στην πύλη που τα μεταφέρει στον διακομιστή επικοινωνίας (μέσω GPRS). Ο διαχειριστής μπορεί να παρακολουθεί απομακρυσμένα τις συνθήκες των καλλιεργειών, λαμβάνοντας πληροφορίες από τη βάση δεδομένων μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (Graphical User Interface, GUI). Όταν εντοπίζονται οι κατάλληλες συνθήκες, το σύστημα στέλνει εντολές για να ενεργοποιήσει ή να απενεργοποιήσει την αυτόματη άρδευση στον διακομιστή, όπως και μπορεί να ενεργοποιεί συναγερμούς για προειδοποιήσεις μέσω μεθόδων όπως (SMS). Οι αισθητήρες έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και αυτόματη οργάνωση για αξιόπιστη λειτουργία [112].



**Εικόνα 5-1: Η αρχιτεκτονική του PAMS (Πηγή: Li et al., 2011)**

**Αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης με χρήση ασύρματου δικτύου αισθητήρων και μονάδας GPRS - Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module**

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει ένα αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης που αποσκοπεί στην βελτιστοποίηση της χρήσης νερού στη γεωργία. Το σύστημα χρησιμοποιεί ασύρματους αισθητήρες που τοποθετούνται στις ρίζες των φυτών για τη μέτρηση υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους, με τεχνολογίας ZigBee (ZigBee, είναι ένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας) και λειτουργία χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Το λογισμικό παρέχει γραφική διεπαφή (GUI: είναι ένα είδος λογισμικού που επιτρέπει στους χρήστες να αλληλεπιδρούν με έναν υπολογιστή χρησιμοποιώντας γραφικά, όπως εικόνες, εικονίδια και κουμπιά, αντί για απλό κείμενο) για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και τον προγραμματισμό της άρδευσης με βάση τα δεδομένα υγρασίας και θερμοκρασίας [113]. Τα δεδομένα σχετικά με την υγρασία και τη θερμοκρασία του εδάφους συγκρίνονται με τις ελάχιστες και μέγιστες τους τιμές αντίστοιχα για να αποφασίσουν πότε θα ενεργοποιηθούν οι αντλίες άρδευσης κατά τη διάρκεια μιας επιθυμητής περιόδου [113]. Το σύστημα επίσης ενημερώνει το χειριστή μέσω ηλεκτρονικού μηνύματος (email) και μπορεί να λειτουργήσει αυτόματα σε περίπτωση απώλειας επικοινωνίας με τους αισθητήρες. Το συγκεκριμένο αυτοματοποιημένο σύστημα δοκιμάστηκε σε καλλιέργειες για 136 ημέρες και κατάφερε να εξοικονομήσει έως και 90% νερού σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους άρδευσης. Αυτό το σύστημα είναι ευέλικτο, βελτιώνει την βιωσιμότητα και μπορεί να επεκταθεί για χρήση σε μεγαλύτερες εκτάσεις θερμοκηπίων ή αγρούς. [113].



**Εικόνα 5-2: Δομή αυτοματοποιημένου συστήματος άρδευσης (Πηγή: Gutiérrez et al., 2014)**

**Υλοποίηση Αυτοματοποιημένου Συστήματος Άρδευσης - Implementation of an Automated Irrigation System**

Ο κύριος στόχος της επιστημονικής μελέτης ήταν ο σχεδιασμός και ανάπτυξη ενός συστήματος άρδευσης, στο οποίο η εφαρμογή της άρδευσης βασίζεται σε αυτοματοποιημένους αισθητήρες. Αυτό το σύστημα διακρίνεται σε δύο κύριες επί μέρους μονάδες. Τη μονάδα ανίχνευσης και τη μονάδα ελέγχου. Η μονάδα ελέγχου χρησιμοποιεί ένα

Arduino (το Arduino είναι μια ανοιχτού κώδικα πλατφόρμα ανάπτυξης υλικού (hardware) και λογισμικού (software) που μπορεί να προγραμματιστεί για να εκτελεί διάφορες λειτουργίες με βάση τον κώδικα που του δίνεται) για τον έλεγχο της λειτουργίας, ενώ η μονάδα ανίχνευσης περιλαμβάνει αισθητήρες, όπως αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας που τοποθετούνται τις ρίζες των φυτών, αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα (Digital Temperature And Humidity Sensor - DHT11) και αισθητήρες υγρασίας εδάφους (Soil Moisture Sensor -VH400) [114]. Οι μονάδες ανίχνευσης ανιχνεύουν με συνεχή παρακολούθηση και στέλνουν τα δεδομένα των αισθητήρων στην πλακέτα Arduino σε χρονικά διαστήματα των πέντε λεπτών, όπου εμφανίζονται σε μια οθόνη LCD, και συγκρίνονται με τα προκαθορισμένα όρια στη μονάδα μικροελεγκτή. Αν τα δεδομένα υπερβαίνουν την προγραμματισμένη κατώτατη τιμή, τότε στέλνεται ένα μήνυμα ειδοποίησης στο κινητό του διαχειριστή. Επιπλέον, μπορεί να επεκταθεί για να χρησιμοποιήσει ασύρματους κόμβους δικτύων αισθητήρων για τη μετάδοση δεδομένων και συστήματα βάσης δεδομένων που είναι υπεύθυνα για την μακροχρόνια ή βραχυχρόνια αποθήκευση των δεδομένων. Κύριες πηγές ηλεκτρικής τροφοδότησης των συστημάτων μπορεί να είναι ηλιακά πάνελ, καθιστώντας το οικονομικό και βιώσιμο. Το κύριο όφελος είναι η αυτόματη παρακολούθηση και διαχείριση της άρδευσης των φυτών, βελτιώνοντας την παραγωγή και εξοικονομώντας πόρους [114].

#### **Αυτόματος έλεγχος συστήματος άρδευσης σε ορυζώνα με χρήση WSN - Automatic control of irrigation system in paddy using WSN**

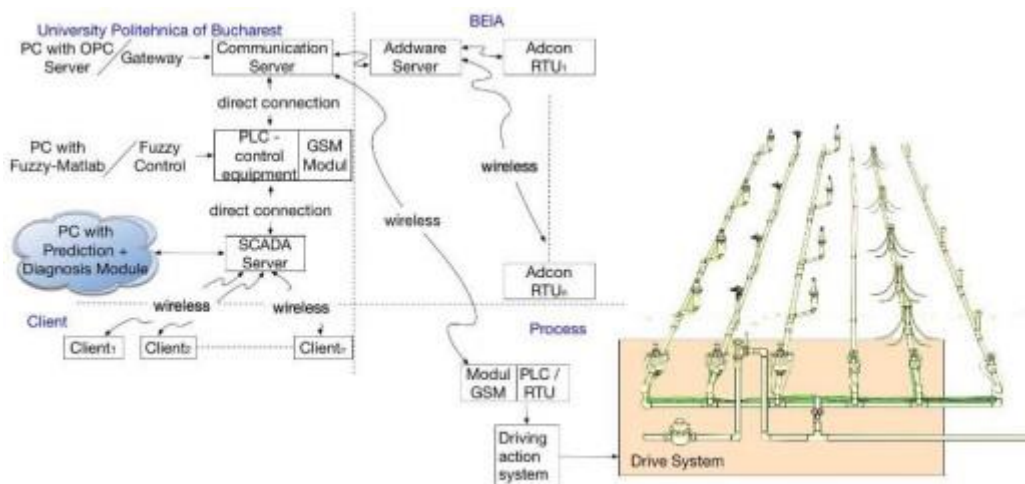
Οι Sathya *et al* (2016) πραγματοποίησαν μια μελέτη σε ορυζώνες με ένα σύστημα αυτοματοποίησης για τον έλεγχο της κατεύθυνσης στην οποία γίνεται η ροή του νερού. Το σύστημα αξιοποιεί μια ποικιλία αισθητήρες υγρασίας στις ρίζες των φυτών και αισθητήρες στάθμης νερού στα χωράφια. Ο σκοπός ήταν να ελέγχονται οι βαλβίδες που κατευθύνουν τη ροή του νερού με βάση τις ανάγκες των φυτών. Οι αισθητήρες αυτοί συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και οι τιμές τους συγκρίνονται με οριακές τιμές που έχουν οριστεί για το εκάστοτε φυτό. Με τη χρήση της τεχνολογίας ZigBee, τα δεδομένα μεταδίδονται σε έναν μικροελεγκτή PIC που εκτελεί τον έλεγχο των βαλβίδων. Ο μικροελεγκτής εκπέμπει σήματα στις βαλβίδες για να ρυθμίσει τη ροή του νερού ανάλογα με τις ανάγκες των φυτών [115]. Επιπλέον, το σύστημα χρησιμοποιεί έναν αισθητήρα βροχής που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους για τον έλεγχο της άρδευσης κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων. Ο μικροελεγκτής επίσης επικοινωνεί μέσω GSM για να αποστέλλει πληροφορίες στον διαχειριστή του συστήματος, όπως ο χρόνος που απαιτήθηκε για τη κάλυψη των χωραφιών. Το σύστημα λειτουργεί με ενσωματωμένο ηλιακό φωτοβολταϊκό πάνελ για την εξοικονόμηση ενέργειας και διαθέτει σύστημα διαχείρισης ισχύος μπαταρίας. Με την εφαρμογή αυτού του συστήματος, επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση μεγάλων ποσοτήτων νερού και ενέργειας, ενώ βελτιώνεται η ποιότητα των καλλιεργειών και η απόδοσή τους σε διάφορες καιρικές συνθήκες [115].

#### **Προηγμένες Στρατηγικές Ελέγχου Συστημάτων Άρδευσης - Advanced Control Strategies for Irrigation Systems**

Στην παρούσα έρευνα εξετάζονται οι βασικές παράμετροι που συνήθως παρακολουθούνται σε ένα σύστημα στο οποίο βασίζονται οι καλλιεργητές για την διαχείριση της άρδευσης των εκμεταλλεύσεων, όπως ο αέρας, η εξατμισοδιαπνοή, υγρασία του εδάφους, καθώς και η θερμοκρασία και υγρασία του αέρα. Κατά την διάρκεια της έρευνας παρουσιάζεται ένα



σύστημα αυτοματοποιημένης άρδευσης για αμπελώνες από την μεριά των κυβερνοφυσικών συστημάτων (CPS- cyber-physical systems), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ασαφούς ελέγχου (fuzzy control approach). Το CPS είναι ένας τύπος τεχνολογίας που συνδυάζει στοιχεία του κυβερνοχώρου, όπως λογισμικό, δίκτυα επικοινωνίας και τεχνολογία πληροφοριών, με φυσικά στοιχεία, όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές και ενσωματωμένες συσκευές. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν έναν αριθμό αισθητήρων για την συλλογή δεδομένων και πληροφοριών. Με τον τρόπο αυτό σταδιακά φτάνουν σε θέση να μπορούν να προσαρμοστούν πολύ εύκολα σε διαρκώς μεταβαλλόμενες καταστάσεις και μεταβάλλουν τη λειτουργικότητά τους με ανάλογο τρόπο [116]. Η στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιεί τη μέθοδο ασαφούς προσέγγισης (fuzzy approach) λαμβάνει υπόψη ότι η υγρασία του εδάφους επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του αέρα και την εξάτμιση. Εμφανίζει τις περιπτώσεις που τα φυτά παρουσιάζουν φυσιολογικές διαταραχές και συμπτώματα φυτικών ασθενειών [116]. Η χρήση της στρατηγικής ελέγχου με ασαφή προσέγγιση επιλέχθηκε λόγω της μη γραμμικότητας και της χρονικής μεταβολής της υγρασίας του εδάφους. Το αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης (Εικ. 5-3) αποτελείται από σταθμούς τηλεμετρίας, ένα σύστημα εποπτείας και συλλογής δεδομένων (σύστημα SCADA), ένα σταθμό απομακρυσμένης λειτουργίας (RTU) και τους ενεργοποιητές (actuators). Οι σταθμοί τηλεμετρίας είναι υπεύθυνοι για τον καθορισμό των αναγκών της άρδευσης, ενώ το σύστημα SCADA χρησιμοποιείται για την συνεχή συλλογή δεδομένων. Η μονάδα RTU μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα χρησιμοποιώντας ηλιακούς συλλέκτες και μπαταρίες. Χρησιμοποιείται για να συλλέγει δεδομένα για την απόκτηση των παραμέτρων του πεδίου και ελέγχου των ενεργοποιητών, οι οποίοι εκκινούν άμεσα την άρδευση των αμπελώνων. Παρακολουθεί την υγρασία, θερμοκρασία του εδάφους και του αέρα με ειδικούς ανιχνευτές μέτρησης και η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση της μεθόδου Penman-Monteith [116].



Εικόνα 5-3: Προτεινόμενο σύστημα αυτοματοποιημένης άρδευσης (Πηγή: Marinescu et al., 2017)

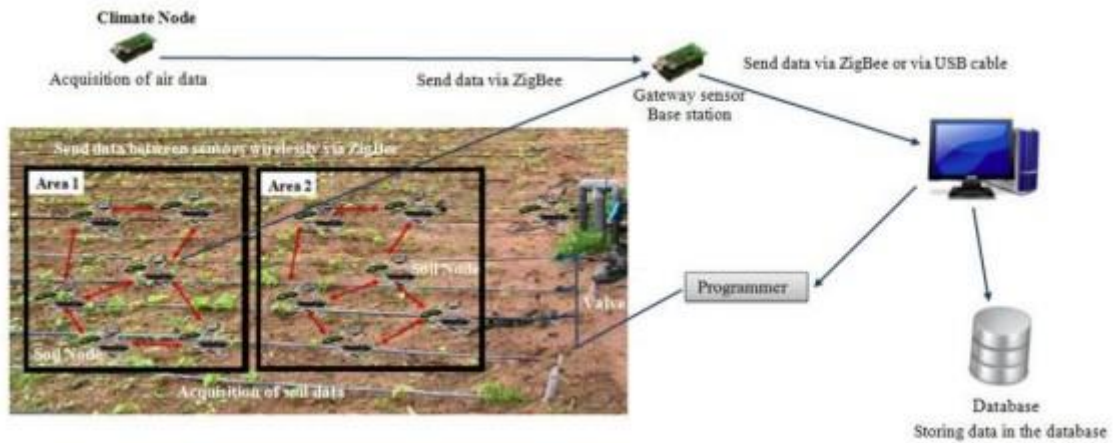
**Αυτόματο σύστημα άρδευσης με δημιουργία αρχείου καταγραφής δεδομένων - Automatic Irrigation System with Data Log Creation**

Σε μια άλλη μελέτη προτείνεται μια τεχνική για την αυτοματοποίηση του συστήματος άρδευσης χρησιμοποιώντας μια πλατφόρμα (Arduino Mega 2560 και GSM 800L) εφαρμογής για κινητά και καταγραφή δεδομένων θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα και εδάφους. Αυτοί οι

αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα που προβάλλονται σε μια LCD οθόνη που συνδέεται με το Arduino. Ο αισθητήρας υγρασίας εδάφους είναι σημαντικός, καθώς καθορίζει πότε πρέπει να ενεργοποιηθεί ο κινητήρας άρδευσης [117]. Επίσης, υπάρχει ο αισθητήρας θερμοκρασίας της καλλιέργειας που λειτουργεί σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Όλα τα δεδομένα που προέρχονται από τους διάφορους αισθητήρες μεταφέρονται και καταγράφονται σε μια ιστοσελίδα, η οποία έχει δημιουργηθεί κυρίως για την επίτευξη αυτοματοποίησης του συστήματος. Απαιτείται πρόσβαση στο σύστημα για διαχείριση της ιστοσελίδας η οποία παρουσιάζει τα χρονολογικά πιο πρόσφατα συλλεχθέντα δεδομένα των αισθητήρων, τη στάθμη νερού, καθώς και γενικές πληροφορίες, όπως για παράδειγμα την ακριβή ημερομηνία και ώρα της μέτρησης [117]. Επιπλέον, η μονάδα επικοινωνίας (GSM) στέλνει μηνύματα ειδοποίησης στο κινητό του διαχειριστή, ώστε να ενεργοποιηθεί ο κινητήρας άρδευσης όταν απαιτείται. Οι αισθητήρες ενημερώνουν την κεντρική μονάδα που περιμένει μια απάντηση από τον διαχειριστή, διαφορετικά συνεχίζει να καταγράφει. Όταν το επίπεδο υγρασίας είναι ικανοποιητικό, ο κινητήρας απενεργοποιείται, και ο διαχειριστής λαμβάνει ειδοποίηση για το τέλος της διαδικασίας. Με αυτό το σύστημα, οι αγρότες μπορούν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά την άρδευση των καλλιεργειών τους, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους [117].

#### **Ενοποίηση συστήματος άρδευσης με ασύρματα δίκτυα αισθητήρων: Πρωτότυπο και σύλληψη του ευφυούς συστήματος άρδευσης - Integration of Irrigation System with Wireless Sensor Networks: Prototype and Conception of Intelligent Irrigation System**

Στη συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάζεται ένα έξυπνο σύστημα άρδευσης που συνδυάζει τη στάγδην άρδευση με τη χρήση ασύρματων αισθητήρων. Η μέθοδος που επιλέχθηκε ήταν εκείνη της στάγδην άρδευσης ή άρδευσης με σταγόνες, καθώς η μέθοδος αυτή αποτελεί την πιο προσαρμόσιμη και αποδοτικότερη κατηγορία άρδευσης για ένα έξυπνο σύστημα. Το αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης αποσκοπεί στην εξοικονόμηση νερού, χρόνου και ενέργειας και στη βελτίωση της αποδοτικότητας της άρδευσης. Η εφαρμογή του πραγματοποιείται σε διαχωρισμένο αγρό (Εικ.5-4), καθιστώντας το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πιο αποτελεσματικό [118]. Οι αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των συνθηκών του εδάφους και του αέρα, λειτουργούν αυτόματα. Οι αισθητήρες συλλέγουν τα δεδομένα, τα οποία στην συνέχεια μεταφέρονται αυτόματα σε έναν κόμβο που έχει τον ρόλο του συντονιστή, ο οποίος τα επεξεργάζεται και τα αποθηκεύει σε μια βάση δεδομένων. Η ασύρματη τεχνολογία ZigBee (τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας) χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ των αισθητήρων στο πεδίο και του κόμβου συντονιστή. Τέλος, τα δεδομένα ελέγχονται ως προς τις οριακές τιμές των παραμέτρων, οι οποίες τροποποιούνται ανάλογα με την καλλιέργεια. Ανάλογα με τα αποτελέσματα ενεργοποιείται ή απενεργοποιείται αυτόματα, χωρίς παρέμβαση του παραγωγού, η άρδευση. Σε περίπτωση εμφάνισης φαινομένων ξηρασίας, για παράδειγμα, ενεργοποιείται η στάγδην άρδευση αυτόματα, αν οι τιμές των δεδομένων είναι χαμηλότερες από τα επιθυμητά όρια [118].



Εικόνα 5-4: Προτεινόμενο ασύρματο σύστημα άρδευσης (Πηγή: Hamami & Nassereddine, 2018)

## 5.2 ΑΥΤΟΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΆΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΙΟΤ

### Διαδικτυακή Παρακολούθηση ενός Αυτοματοποιημένου Συστήματος Υδρολίπανσης: Μια Εφαρμογή IoT - Web-based Monitoring of an Automated Fertigation System: An IoT Application

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται μια εφαρμογή της τεχνολογίας IoT σε ένα σύστημα αυτοματοποιημένης άρδευσης. Το διαδίκτυο επιτρέπει στους χρήστες να ελέγχουν και να παρακολουθούν το σύστημα, ενώ η επικοινωνία γίνεται μέσω κινητών τηλεφώνων ή του διαδικτύου. Το σύστημα περιλαμβάνει αισθητήρες υπερήχων, αισθητήρες βαλβίδων και αισθητήρα ηλεκτρικής αγωγιμότητας για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της άρδευσης και της λίπανσης. Οι χρήστες μπορούν να αλληλοεπιδρούν με το σύστημα και δύναται να προσαρμόσουν τις ρυθμίσεις και τα χρονοδιαγράμματα ανάλογα με τις ανάγκες τους. Η επικοινωνία με το σύστημα γίνεται εύκολα είτε μέσω ενσωματωμένου ασύρματου συστήματος, είτε μέσω του διαδικτύου, επιτρέποντας στους χρήστες να ελέγχουν την καλλιέργειά τους από απόσταση [119]

### Αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης και ασφάλειας των καλλιεργειών στη γεωργία με χρήση του Διαδικτύου των πραγμάτων - Automated irrigation and crop security system in agriculture using internet of things

Σε μια έρευνα των Agale & Gaikwad (2017) που πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον εργαστηρίου για αύξηση της αποτελεσματικότητας της άρδευσης, προτάθηκε ως λύση η συλλογή και ανάλυση δεδομένων αισθητήρων κάθε 10 δευτερόλεπτα από το περιβάλλον, όπως θερμοκρασίας, υγρασίας, και ακτινοβολίας, PIR, (παθητικός αισθητήρας υπέρυθρης ακτινοβολίας) μέσω της τεχνολογίας IoT. Αυτό επιτρέπει την αυτόματη παρακολούθηση και ρύθμιση της άρδευσης, εξοικονομώντας νερό και χρήματα. Η επιτυχημένη δοκιμή πρωτοτύπου κατέγραψε 92,24% ακρίβεια [120].

### 5.3 ΈΞΥΠΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

#### **Έξυπνο σύστημα άρδευσης με χρήση ασύρματου δικτύου αισθητήρων - Smart Irrigation System Using Wireless Sensor Network**

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός μοντέλου για ένα σύστημα άρδευσης που βασίζεται σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN). Το μοντέλο αφορά το σχεδιασμό μιας έξυπνης άρδευσης για ανίχνευση και έλεγχο της ροής του νερού σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με την κατάσταση της υγρασίας του εδάφους χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας Bluetooth για μεγιστοποίηση της ανάπτυξης των φυτών μαζί με εξοικονόμηση νερού. Στο σύστημα ο ελεγκτής χρήστης παρέχει πληροφορίες από την κάρτα λήψης (master) και διαβιβάζει τα δεδομένα των αισθητήρων (ως τρέχουσα παράμετρος της εγκατάστασης) μέσω της πλακέτας πομπού (slave). Τα δεδομένα αποθηκεύονται στον υπολογιστή ως αρχείο καταγραφής. Το σύστημα επαναλαμβάνει αυτήν τη διαδικασία με τον ελεγκτή να μεταφέρει τα δεδομένα στον υπολογιστή. Η εφαρμογή μπορεί να τρέχει είτε συνεχώς είτε όταν προκύπτει αποσύνδεση του ελεγκτή [121].

#### **Έξυπνη άρδευση με σταγόνες και λίπανση με χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων - Intelligent Drip Irrigation and Fertigation Using Wireless Sensor Networks**

Σε αυτό το άρθρο αναλύονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης τεχνολογίας πληροφορίας στη γεωργία. Παρουσιάζεται ένα σύστημα άρδευσης και λίπανσης που χρησιμοποιεί αισθητήρες και αυτοματοποίηση, βελτιώνοντας την παραγωγή σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Το πρώτο μέρος εστιάζει στον υπολογισμό της βέλτιστης ποσότητας νερού για τις καλλιέργειες, βελτιώνοντας την ακρίβεια της άρδευσης με βάση την εξατμισοδιαπνοή. Το δεύτερο στάδιο αφορά το σύστημα παρακολούθησης ροής νερού και ενεργοποίησης συναγερμού [122]. Ανιχνεύεται η εξέλιξη του νερού μέσω θετικής τάσης, ενημερώνοντας τον χειριστή για πιθανή διακοπή ροής κατά την άρδευση. Επίσης, παρουσιάζεται ένα σύστημα φόρτισης μπαταρίας και οκτώ επίπεδα ένδειξης νερού για βέλτιστη διαχείριση της άρδευσης. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε υπολογιστικό νέφος (cloud) για απομακρυσμένη πρόσβαση. Το σύστημα διατηρεί το νερό και εξοικονομεί ενέργεια, ενώ βελτιώνει την ποιότητα του εδάφους. Συνολικά, προσφέρει βέλτιστη ανάπτυξη με χαμηλό κόστος και υψηλή αξιοπιστία [122].

#### **Έξυπνο σύστημα άρδευσης παρακολούθησης και αυτοματοποίησης καλλιεργειών με βάση το IOT - IOT based Smart Crop-Field Monitoring And Automation Irrigation System**

Σε άλλο άρθρο [123] η έρευνα εστιάζει σε μεθόδους που στοχεύουν να κάνουν τη γεωργία έξυπνη χρησιμοποιώντας τεχνολογίες αυτοματισμού και IoT. Το Internet of Things επιτρέπει διάφορες χρήσεις όπως παρακολούθηση και επιλογή των καλλιεργειών, υποστήριξη στη λήψη αποφάσεων για την άρδευση και άλλες παρόμοιες εφαρμογές [123]. Το βασικό αντικείμενο του κειμένου είναι η προσπάθεια να αναπτυχθεί η καλλιέργεια με χαμηλή κατανάλωση νερού, εστιάζοντας στην ακριβή άρδευση με βάση τα δεδομένα των αισθητήρων. Τα δεδομένα συγκρίνονται με οριακές τιμές και ενεργοποιούν το σύστημα άρδευσης όταν απαιτείται. Η χρήση αυτού του συστήματος βελτιώνει τις καλλιέργειες και τη συνολική παραγωγή παρέχοντας στους αγρότες άμεσες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο επιτρέποντας τη λήψη σωστών αποφάσεων. [123].

### **Έξυπνο έλεγχο ενός υπόγειου συστήματος άρδευσης και λίπανσης - Intelligent command of an underground irrigation and fertilization system**

Η συγκεκριμένη μελέτη [124] παρουσιάζει μια λύση για τον έξυπνο έλεγχο ενός υπόγειου συστήματος άρδευσης και λίπανσης. Η άρδευση και η εφαρμογή χημικών λιπασμάτων (κυρίως N) μέσω υπόγειων συστημάτων είναι μια πολύ πιο αποτελεσματική μέθοδος για τις αγροτικές καλλιέργειες [124]. Το σύστημα αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία: μια πλατφόρμα αισθητήρων και έναν διακομιστή (server). Οι αισθητήρες παρακολουθούν παράγοντες όπως υγρασία, θερμοκρασία, και pH του εδάφους, και τα δεδομένα αποστέλλονται στον server. Το Waspmote είναι η μονάδα επεξεργασίας που διαχειρίζεται αυτά τα δεδομένα. Ο server χρησιμοποιεί έξυπνους αλγορίθμους για να δημιουργήσει βέλτιστες ακολουθίες άρδευσης και λίπανσης, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το είδος της καλλιέργειας, την ποιότητα του εδάφους, τον καιρό, και την παραγωγικότητα. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τον καλύτερο έλεγχο του τρόπου με τον οποίο γίνεται η άρδευση και η λίπανση βοηθώντας τους αγρότες να επιτύχουν μέγιστη απόδοση από τις καλλιέργειές τους [124].

### **Ένα έξυπνο σύστημα διαχείρισης άρδευσης βασισμένο στο IoT που χρησιμοποιεί μηχανική εκμάθηση και τεχνολογίες ανοιχτού κώδικα - An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies**

Σε άλλη έρευνα [125] που πραγματοποιήθηκε στο πεδίο οι επιστήμονες επισήμαναν ότι η ανεπάρκεια καθαρού νερού παγκοσμίως επιβάλλει την ανάγκη αποτελεσματικής διαχείρισής του. Το IoT προσφέρει λύσεις με αισθητήρες για παρακολούθηση και έξυπνη επεξεργασία δεδομένων. Αυτά τα έξυπνα συστήματα διαχείρισης της άρδευσης, βασισμένα στο IoT, μπορούν να βοηθήσουν στη βέλτιστη χρήση των υδάτινων πόρων στη γεωργία. Παρουσιάζεται ένα έξυπνο σύστημα ανοιχτού κώδικα που προβλέπει τις ανάγκες άρδευσης ενός χωραφιού, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία του εδάφους, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα, η υπεριώδης ακτινοβολία φωτός, μαζί με προγνωστικά δεδομένα καιρού από το Διαδίκτυο. Η νοημοσύνη του συστήματος βασίζεται σε έξυπνο αλγόριθμο που λαμβάνει υπόψη τα δεδομένα των αισθητήρων και προγνωστικά δεδομένα καιρού για το εγγύς μέλλον. Το πλήρες σύστημα έχει αναπτυχθεί σε πιλοτική κλίμακα, συλλέγοντας ασύρματα δεδομένα των αισθητήρων μέσω του υπολογιστικού νέφους (cloud) και παρέχοντας πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο μέσω διαδικτυακού συστήματος οπτικοποίησης και υποστήριξης αποφάσεων. Το σύστημα προβλέπει έλεγχο κλειστού βρόχου για την παροχή νερού, υλοποιώντας πλήρως αυτόνομο σύστημα άρδευσης. Η ακρίβεια της πρόβλεψης της υγρασίας του εδάφους είναι κρίσιμη και επαληθεύεται με ωριαία δεδομένα για τη θερμοκρασία και υγρασία του αέρα, τη θερμοκρασία και υγρασία του εδάφους καθώς και την υπεριώδη ακτινοβολία περίπου κάθε τρεις εβδομάδες. Η έρευνα προτείνει ένα έξυπνο σύστημα άρδευσης βασισμένο στο IoT, στοχευμένο στη βέλτιστη χρήση των υδάτινων πόρων για τις ανάγκες άρδευσης και γεωργίας [125].

### **Εφαρμογή Ευφυούς Ελέγχου σε Άρδευση Ακριβείας - Application of Intelligent Control in Precision Irrigation**

Σε μία έρευνα των [126] πραγματοποιήθηκε χρήση ανοιχτού συστήματος λογισμικού έξυπνης ασαφούς λογικής. Το πείραμα βασίστηκε σε προσομοιώσεις με συνεχείς προσαρμογές παραμέτρων, όπως για παράδειγμα των φυτών, του εδάφους και των καιρικών φαινομένων [126].

Οι [127] στην διάρκεια των μελετών τους έκαναν χρήση λογαρίθμου μηχανικής μάθησης (machine learning) για την ανάλυση δεδομένων που είχαν συλλεχθεί από ασύρματους αισθητήρες πεδίου, ώστε να μπορέσουν να σχηματίσουν ένα μοντέλο άρδευσης με βάση τις αναμενόμενες ποσότητες υγρασίας στο έδαφος. Ως μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν η υγρασία του εδάφους, καθώς και η θερμοκρασία του και το πέρας της έρευνας πραγματοποιήθηκε σε εργαστηριακές συνθήκες [127].

Μια έρευνα των [128] αναφέρθηκε στην σημαντικότητα της αποτελεσματικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων λόγω αυξημένου πληθυσμού, αστικοποίησης και κλιματικής αλλαγής. Η κακή διαχείριση του νερού για την άρδευση έχει επιπτώσεις όχι μόνο στην διαθεσιμότητα του, αλλά και στη γεωργική παραγωγή. Γι' αυτό, απαιτείται βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού, ενσωματώνοντας ένα σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου για τη διαδικασία της άρδευσης. Η προτεινόμενη προσέγγιση αποσκοπεί στην παροχή βιώσιμης λύσης μέσω αυτόματης παρακολούθησης και ελέγχου της διαδικασίας άρδευσης με χρήση του IoT. Η χρήση αλγορίθμων παλινδρόμησης συμβάλλει στην ακριβή πρόβλεψη της απαιτούμενης ποσότητας νερού για την ημερήσια άρδευση, βασιζόμενη σε δεδομένα αισθητήρων. Οι πληροφορίες που παράγονται διατίθενται μέσω εφαρμογής για κινητά, επιτρέποντας πρόσβαση στην τρέχουσα κατάσταση του γεωργικού πεδίου. Συνολικά, αυτή η εφαρμογή δικτύου αισθητήρων προάγει την ανίχνευση της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό και επιδιώκει την έξυπνη χρήση των υδάτινων πόρων, ενσωματώνοντας πλήρως το προτεινόμενο σύστημα IoT για βιώσιμη διαχείριση της άρδευσης [128].

#### **Σύστημα υδροπονίας που βασίζεται στο IoT χρησιμοποιώντας Deep Neural Networks - IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks**

Σε μία μελέτη τους οι [129] χρησιμοποίησαν ως τομείς παρακολούθησης για την άρδευση ακριβείας το νερό και τις καιρικές συνθήκες. Στο πλαίσιο της έρευνάς τους επικεντρώθηκαν σε φυσικούς παράγοντες, όπως στην θερμοκρασία, την υγρασία και τα επίπεδα της στάθμης του νερού, καθώς και σε χημικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα το pH, καθώς και την περιεκτικότητα του νερού σε θρεπτικά στοιχεία. Οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποίησαν, περιλάμβαναν συστήματα IoT/Machine Learning (Μηχανική Μάθηση). Οι αναλύσεις τους πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον και τα φυτά αναπτύχθηκαν υπό αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες με χρήση υδροπονίας. Ένα πρωτότυπο μελετήθηκε με την καλλιέργεια τομάτας ως περίπτωση, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως Arduino, Raspberry Pi3 και Tensor Flow [129].

#### **Έξυπνο σύστημα γεωργίας με υποστήριξη πρόγνωσης καιρού και πρόβλεψη καλλιεργειών - Intelligent Farming System with Weather Forecast Support and Crop Prediction**

Οι [130] προτείνουν ένα έξυπνο σύστημα άρδευσης στη γεωργία χρησιμοποιώντας ασύρματη επικοινωνία, προκειμένου να λυθούν τα προβλήματα των αγροτών. Το σύστημα παρέχει δεδομένα συγκομιδής από προηγούμενα έτη και προτάσεις καλλιεργειών από την κυβέρνηση βασιζόμενες σε προβλέψεις. Χρησιμοποιεί αισθητήρες για την παρακολούθηση της υγρασίας του εδάφους και προσαρμόζει την άρδευση ανάλογα με τις ανάγκες. Επιπλέον, υποστηρίζεται από προγνώσεις καιρού, αποτρέποντας την υπερβολική άρδευση σε περίπτωση βροχής. Η ανάλυση πρόβλεψης ποσότητας συγκομιδής γίνεται με χρήση μηχανικής εκμάθησης, βασιζόμενης στο SARIMAX "Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Exogenous

model" της python. Αυτό επιτρέπει στην κυβέρνηση να προτείνει τις κατάλληλες καλλιέργειες για σταθερή παραγωγή [130].

## 5.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ DSS

### **Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στην εφαρμογή γεωργίας ακριβείας - Wireless Sensor Network in Precision Agriculture Application**

Αυτή η μελέτη από τους [131] περιγράφει την ανάπτυξη ενός περιβαλλοντικά φιλικού, με χαμηλό κόστος και χρήσιμου συστήματος παρακολούθησης θερμοκηπίου, γνωστού ως Intelligent Greenhouse Monitoring System (IGMS), χρησιμοποιώντας ασύρματους αισθητήρες. Το σύστημα λειτουργεί ως διαδικτυακή εφαρμογή, προσφέροντας ευκολία, αξιοπιστία, και προσαρμοστικότητα. Το IGMS επιτρέπει την παρακολούθηση και τη διαχείριση του θερμοκηπίου, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με την καλλιέργεια, αρχεία δραστηριοτήτων, και ειδοποιήσεις για ενέργεια. Ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) χρησιμοποιεί δεδομένα από τον χρήστη και ειδικά μοντέλα για αυτόματες αποφάσεις. Η παρακολούθηση περιλαμβάνει θερμοκρασία, υγρασία αέρα, και υγρασία εδάφους, βελτιώνοντας την παραγωγή, την χρήση χημικών, την ποιότητα προϊόντων, εξοικονόμηση ενέργειας, και περιβαλλοντική προστασία. Αυτή η προσέγγιση παρέχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τα εδάφη και τις καλλιέργειες που θα βοηθήσουν τους αγρότες να λάβουν σωστές αποφάσεις [131].

### **Ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση της άρδευσης στη γεωργία - A decision support system for managing irrigation in agriculture**

Σε αυτήν την εργασία προτείνεται η ανάπτυξη ενός εξυπνότερου συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για την άρδευση στη γεωργία, (Smart Irrigation Decision Support System, SIDSS). Το SIDSS βασίζεται σε συνεχείς μετρήσεις του εδάφους και κλιματικών παραμέτρων από αρκετούς αυτόνομους κόμβους που αναπτύσσονται στον αγρό, για τον υπολογισμό των εβδομαδιαίων αναγκών άρδευσης των φυτειών. Αυτό επιτρέπει την προσαρμογή του συστήματος σε τοπικές διαταραχές και σφάλματα εκτίμησης, αποφεύγοντας συσσωρευτικά λάθη. Για την ακρίβεια των προβλέψεων, χρησιμοποιούνται δύο τεχνικές μηχανικής μάθησης, η PLSR (Partial Least Square Regression) και η ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference) Systems. Όταν εκπαιδεύεται σωστά, το SIDSS είναι σε θέση να προβλέπει τις απαιτήσεις άρδευσης των καλλιεργειών για κάθε νέα εβδομάδα. Το SIDSS επικυρώθηκε με πειραματισμό σε τρεις εμπορικές φυτείες εσπεριδοειδών στη νοτιοανατολική Ισπανία. Η απόδοση ελέγχθηκε σε σχέση με αποφάσεις που λαμβάνονται από έναν ειδικό γεωπόνο. Το σύστημα βελτίωσε την ακρίβεια σε σχέση με τη χρήση μόνο κλιματικών πληροφοριών. Επιπλέον, εξετάστηκε η δυνατότητα χρήσης του SIDSS ως γενικού εκτιμητή για νέες φυτείες χωρίς προηγούμενα δεδομένα (ιστορικά δεδομένα). Παρόλο που το σφάλμα αυξάνεται σε αυτήν την περίπτωση, δεν απαιτείται ιστορικό δεδομένων, κάτι που είναι πολύ χρήσιμο για νέες φυτείες [132].

**Βελτιστοποίηση της άρδευσης ακριβείας ενός αμπελώνα για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης του νερού και του κέρδους, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο κατανάλωσης νερού αμπέλου με γνώμονα τις αποφάσεις - Optimizing precision irrigation of**

### **a vineyard to improve water use efficiency and profitability by using a decision-oriented vine water consumption model**

Η έρευνα αυτή επιδιώκει να βελτιστοποιήσει την άρδευση σε έναν μεγάλο αμπελώνα χρησιμοποιώντας μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία που βασίζεται σε μοντέλα κατανάλωσης νερού αμπέλου και δεδομένα τηλεπισκόπησης. Στόχος είναι να επιτευχθεί ακριβής έλεγχος της άρδευσης παρά τη χωρική μεταβλητότητα στις ανάγκες νερού του αμπελώνα. Η ανάλυση δείχνει ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση νερού και ενέργειας, αυξάνοντας την απόδοση του αμπελώνα. Επιπλέον, η οικονομική ανάλυση δείχνει ότι η στρατηγική αυτή είναι κερδοφόρα, με σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων για τους αμπελοκαλλιεργητές. Οι ερευνητές προτείνουν την υιοθέτηση αυτής της στρατηγικής ακριβούς διαχείρισης άρδευσης, καθώς έχει συνολικά θετικές επιπτώσεις στην αγροτική παραγωγή [133].

### **Μια πειραματική σύγκριση του προγραμματισμού άρδευσης που βασίζεται στο IoT και της παραδοσιακής άρδευσης σε μια υποτροπική φάρμα λεμονιών που αρδεύεται με πλημμύρες - An Experimental Comparison of IoT-Based and Traditional Irrigation Scheduling on a Flood-Irrigated Subtropical Lemon Farm**

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της υπεράρδευσης, οι λύσεις του IoT χρησιμοποιούν δεδομένα αισθητήρων αγροκτημάτων σε πραγματικό χρόνο και έξυπνα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων. Αυτές οι έξυπνες λύσεις βελτιστοποιούν τη χρήση του νερού στη γεωργία. Η μελέτη αυτή επικεντρώθηκε σε ένα οπωρώνα λεμονιών περιοχή του Πακιστάν, όπου χρησιμοποίησε μια συσκευή IoT και ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) για να βελτιστοποιήσει τη διαχείριση του νερού. Το DSS βασίστηκε σε δεδομένα καιρού, δεδομένα αισθητήρων στο αγρόκτημα και πληροφορίες για τις καλλιέργειες και κατέληξε σε εντυπωσιακές εξοικονομήσεις νερού (περίπου 50%) και αυξημένη παραγωγή (περίπου 35%) σε σύγκριση με την παραδοσιακή άρδευση σε γειτονικό αγρόκτημα [134].

### **Εφαρμογή Γενικής Συμμετοχικής Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για τη Διαχείριση Άρδευσης για την περίπτωση Οινοποιητικού Αμπελιού στην Ήπειρο, Βορειοδυτική Ελλάδα - Application of a Generic Participatory Decision Support System for Irrigation Management for the Case of a Wine Grapevine at Epirus, Northwest Greece**

Σε μια πρόσφατη έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην Ελλάδα διερευνήθηκε η ανάπτυξη ενός λειτουργικού εργαλείου που υποστηρίζει αποφάσεις οι οποίες στοχεύουν στη βελτίωση της διαχείρισης της άρδευσης. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε ένα διαδικτυακό σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) για τη διαχείριση της άρδευσης που βασίζεται στις αρχές του εγγράφου 56 του FAO για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής (ET<sub>0</sub>), χωρίς να απαιτείται να εγκατασταθεί στο χωράφι ειδικό υλικό παρακολούθησης, δηλ αισθητήρες. Το συγκεκριμένο DSS αξιολογήθηκε σε οινοποιήσιμους αμπελώνες της Ηπείρου για δύο χρόνια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το DSS βελτίωσε την αποτελεσματικότητα του νερού στην παραγωγική διαδικασία (Crop Water Productivity, WPC) και έδωσε πιο ακριβείς εκτιμήσεις της υγρασίας του εδάφους σε σύγκριση με τη χρήση αισθητήρων. Επιπλέον, υπογραμμίζεται η αξία της χρήσης μετρητών νερού για την αποτελεσματική διαχείριση της άρδευσης και η ανάγκη πειραματικών πεδίων για την προσαρμογή στις ανάγκες της καλλιέργειας [135].



## 5.5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ

Σύμφωνα με τον Marco Brini (2023) [136] για την υποστήριξη της γεωργίας ακριβείας υπάρχουν λογισμικά άρδευσης χωρίς κόστος απόκτησης και ελεύθερη χρήση, τα κυριότερα από τα οποία αναφέρονται παρακάτω:

### **AquaCrop**

Το λογισμικό άρδευσης AquaCrop είναι ένα εξειδικευμένο εργαλείο που στοχεύει στην βελτιστοποίηση της διαχείρισης της άδρευσης στη γεωργία. Το κύριο του χαρακτηριστικό είναι η ικανότητά του να συνδυάζει δεδομένα από διάφορες πηγές, όπως μετρήσεις εδάφους και μετεωρολογικές πληροφορίες, προκειμένου να υπολογίσει τις βέλτιστες ανάγκες άρδευσης για τις καλλιέργειες. Το AquaCrop επιτρέπει την προσαρμογή στις τοπικές συνθήκες και τη διόρθωση πιθανών σφαλμάτων στις προβλέψεις, βελτιώνοντας την απόδοση της άρδευσης. Με αυτόν τον τρόπο, το AquaCrop συνεισφέρει στην αποτελεσματική και βιώσιμη γεωργία μέσω της βέλτιστης χρήσης των υδατικών πόρων [136] <https://www.fao.org/aquacrop/software/software-download/en>.

### **CROPWAT**

Το CROPWAT είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για γεωργούς και ερευνητές, αναπτύχθηκε από το FAO για τον υπολογισμό των απαιτήσεων σε νερό και τη διαχείριση της άρδευσης. Βασίζεται σε επιστημονικά δεδομένα και προσφέρει μια σειρά βασικών χαρακτηριστικών. Κεντρικό χαρακτηριστικό του είναι η δυνατότητά του να εκτελεί αναλύσεις βάσει δεδομένων σχετικών με το έδαφος, το κλίμα και τις καλλιέργειες, προκειμένου να προσδιορίσει τις βέλτιστες πρακτικές άρδευσης και τον σχεδιασμό χρονοδιαγραμμάτων άρδευσης με βάση την εξίσωση Penman - Monteith για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής (ET). Το CROPWAT επιτρέπει τον υπολογισμό των απαιτούμενων ποσοτήτων νερού για τη διατήρηση της αποδοτικότητας των καλλιεργειών, λαμβάνοντας υπόψη τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, το CROPWAT συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της χρήσης των υδατικών πόρων και στην προώθηση της αειφόρου γεωργίας [136] <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en>.

### **Irrigator Pro**

Το Irrigator Pro είναι ένα λογισμικό άρδευσης που προσφέρει αποτελεσματικές λύσεις για τη διαχείριση του νερού στη γεωργία. Ένα από τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι ο προηγμένος χρονοδιακόπτης που επιτρέπει στους χρήστες να προγραμματίσουν το πότε και πόσο νερό θα χορηγηθεί στα φυτά τους. Αυτό βοηθάει στην εξοικονόμηση νερού και στη βελτίωση της απόδοσης της άρδευσης. Επιπλέον, το Irrigator Pro παρέχει προηγμένες δυνατότητες παρακολούθησης των συνθηκών του εδάφους και του καιρού, επιτρέποντας στους χρήστες να λαμβάνουν αποφάσεις βασισμένες σε δεδομένα και αναλύσεις. Αυτό βοηθάει στην αποφυγή υπερβολικής άρδευσης και στη βελτίωση της ποιότητας του εδάφους. Το λογισμικό Irrigator Pro προσφέρει εύκολη πλοήγηση και χρήση, καθιστώντας το κατάλληλο για γεωργούς και αγρότες με διάφορα επίπεδα εμπειρίας στην τεχνολογία. Συνολικά, το λογισμικό αυτό αποτελεί μια πολύτιμη εργαλειοθήκη για την βελτίωση της διαχείρισης της άρδευσης στη γεωργία [136].

<https://irrigatorpro.org/>

### OpenSprinkler

Το OpenSprinkler είναι ένα αξιόπιστο λογισμικό άρδευσης που προσφέρει σημαντικά χαρακτηριστικά για την αποτελεσματική διαχείριση του νερού στον τομέα της γεωργίας. Ένα από τα βασικά του πλεονεκτήματα είναι η εξαιρετική του ευκολία χρήσης, που καθιστά τον χειρισμό του προσβάσιμο ακόμα και για χρήστες με περιορισμένη εμπειρία στην τεχνολογία. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του OpenSprinkler είναι η δυνατότητα προσαρμογής του προγράμματος άρδευσης σύμφωνα με τις ανάγκες των φυτών και των συνθηκών του περιβάλλοντος. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να δημιουργήσουν προσαρμοσμένα προγράμματα που εξοικονομούν νερό και ενισχύουν την υγεία των φυτών. Επιπλέον, διαθέτει λειτουργίες παρακολούθησης του καιρού και της υγρασίας του εδάφους, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για την λήψη αποφάσεων. Αυτό βοηθά στην πρόληψη της υπερβολικής ή ανεπαρκούς άρδευσης και βελτιώνει την απόδοση του συστήματος άρδευσης. Συνολικά, το OpenSprinkler αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για την βελτίωση της διαχείρισης της άρδευσης στη γεωργία [136] <https://opensprinkler.com/>.

### AquaCrop – OS

Το AquaCrop-OS αποτελεί ένα δωρεάν λογισμικό ανοιχτού κώδικα, βασισμένο στο μοντέλο αποτελεσματικότητας του νερού (WPC) των καλλιέργειων, γνωστό ως AquaCrop, που αναπτύχθηκε από τον FAO. Το AquaCrop-OS είναι διαθέσιμο σε γλώσσες προγραμματισμού Matlab/Octave και Python και αναβαθμίζει το μοντέλο AquaCrop. Αυτό το λογισμικό επιτρέπει την προσομοίωση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών σε σχέση με την ποσότητα του νερού, καλύπτοντας διάφορους τύπους καλλιεργειών και περιβαλλοντικές συνθήκες. Είναι σχεδιασμένο ειδικά για περιοχές όπου η διαθεσιμότητα νερού είναι περιοριστικός παράγοντας για τη γεωργική παραγωγή. Το AquaCrop-OS είναι χρήσιμο για επιστήμονες και επαγγελματίες στον τομέα και απαιτεί ελάχιστα δεδομένα εισόδου σε σύγκριση με άλλα παρόμοια μοντέλα. Αυτή η εφαρμογή εισάγει πολλά νέα χαρακτηριστικά, όπως υποστήριξη πολλαπλών λειτουργικών συστημάτων, πρόσβαση στον πηγαίο κώδικα για προσαρμογές και επεκτάσεις, δυνατότητα παράλληλης εκτέλεσης προσομοιώσεων και σύνδεση με άλλα μοντέλα μέσω Open Modeling Interface. Επιπλέον, παρέχει εκπαιδευτικούς πόρους για εκπαίδευση και ανάλυση πολιτικής, καθιστώντας το πολύτιμο εργαλείο για τη γεωργία και τη διαχείριση του νερού [136] <http://www.aquacropos.com/>.

### DSSAT

Το λογισμικό DSSAT αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για τη γεωργία, προσφέροντας ουσιαστική υποστήριξη στη διαχείριση της άρδευσης και την αναλυτική αξιολόγηση των καλλιεργειών. Ένα από τα βασικά του πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητά του να προσομοιώνει τις αγροτικές συνθήκες με βάση τα δεδομένα του εδάφους, του κλίματος και της καλλιέργειας, βοηθώντας τους γεωργούς να λαμβάνουν έναν πιο ενημερωμένο αποφασιστικό ρόλο στην άρδευση. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του DSSAT είναι η δυνατότητα να εκτελεί αναλύσεις αντοχής και ευαισθησίας που επιτρέπουν στους χρήστες να αξιολογήσουν την απόδοση των καλλιεργειών σε διάφορες συνθήκες άρδευσης και κλιματικές μεταβλητές. Επιπλέον, το λογισμικό παρέχει ευέλικτες επιλογές προγραμματισμού για τη διαχείριση της άρδευσης, επιτρέποντας την προσαρμογή στις ανάγκες της εκάστοτε καλλιέργειας. Συνολικά, το DSSAT αποτελεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για τους γεωργούς που αναζητούν βελτιωμένη

διαχείριση της άρδευσης και τη βέλτιστη απόδοση των καλλιεργειών τους [136] <https://dssat.net/>.

### SWAP

Το λογισμικό SWAP (Soil-Water-Atmosphere-Plant) δίνει την δυνατότητα διαχείρισης της άρδευσης στην γεωργία. Το πρωταρχικό του χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητά του να προσομοιώνει τις διάφορες διαδικασίες που συμβαίνουν στο έδαφος, το νερό, την ατμόσφαιρα και τα φυτά, προσφέροντας στους γεωργούς μια λεπτομερή εικόνα της διαθεσιμότητας του νερού και των συνθηκών ανάπτυξης. Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα του SWAP είναι η δυνατότητα πρόβλεψης της απόδοσης των φυτών βάσει των παραμέτρων άρδευσης, επιτρέποντας στους χρήστες να λαμβάνουν αποφάσεις βασισμένες σε δεδομένα και μοντέλα. Επιπλέον, το λογισμικό παρέχει επιλογές προσαρμογής των παραμέτρων άρδευσης, λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές συνθήκες και τις ανάγκες της καλλιέργειας [136] <https://www.swap.alterra.nl/>.

### EPIC

Το λογισμικό EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης παραγωγικότητας καλλιεργειών και διαχείρισης του εδάφους. Το EPIC αναπτύχθηκε για να εκτιμά την επίδραση της διάβρωσης σε περιβαλλοντικές πολιτικές και προσομοιώνει πολλαπλές καλλιέργειες, κάθε μια με μοναδικές παραμέτρους ανάπτυξης. Μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορες ποικιλίες φυτών και συστήματα διαχείρισης, προβλέποντας τις επιπτώσεις των διαχειριστικών αποφάσεων στο έδαφος, το νερό, τα θρεπτικά συστατικά και τη χρήση φυτοφαρμάκων. Συνολικά, το EPIC είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την προβληματική ανάλυση επιπτώσεων και τη διαχείριση των φυσικών πόρων και του περιβάλλοντος [136] <https://epicapex.tamu.edu/>.

## 5.6 ΕΞΙΔΕΙΚΥΜΕΝΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΆΡΔΕΥΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΗΘΗΚΑΝ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

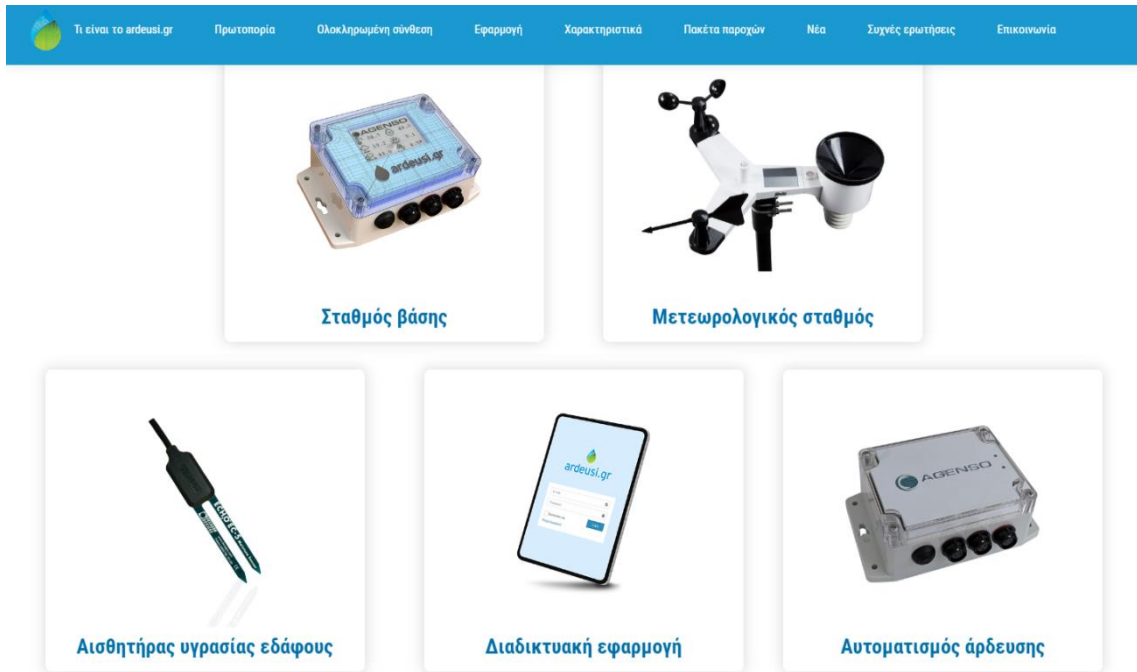
---

### Ardeusi

Το σύστημα Ardeusi είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα έξυπνης άρδευσης της εταιρείας AGENSO που στοχεύει να διευκολύνει τον παραγωγό παρέχοντας ακριβέστερη εφαρμογή της άρδευσης. Μέσω της διαδικτυακής εφαρμογής υπολογίζεται η ιδανική ποσότητα με βάση τις ανάγκες της καλλιέργειας, ενώ ένα σύνολο αισθητήρων που διαθέτει το σύστημα καθορίζει τις παραμέτρους άρδευσης σε πραγματικό χρόνο, δίνοντας λύση σε προβλήματα άρδευσης. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που προσφέρει το σύστημα είναι η δυνατότητα πλήρους αυτοματοποίησης της άρδευσης με απομακρυσμένο έλεγχο αντλιών ή ηλεκτροβανών, τόσο με χρονοπρογραμματισμό, όσο και με τις ανάγκες της καλλιέργειας χρησιμοποιώντας την τρέχουσα μέτρηση της υγρασίας εδάφους ή άλλων ποιοτικών χαρακτηριστικών της καλλιέργειας.

Η πρωτοπορία του ardeusi.gr βασίζεται στη χρήση τεχνολογιών βασισμένων στο IoT (Διαδίκτυο των Πραγμάτων) και αισθητήρων, δίνοντας τη δυνατότητα υπολογισμού της ιδανικής ποσότητας νερού άρδευσης για πολλαπλές καλλιέργειες ξεχωριστά και για διαφορετικά υποτεμάχια. Μέσω του ακριβούς προσδιορισμού των αναγκών εξασφαλίζεται η

μείωση του κόστους παραγωγής βελτιώνοντας παράλληλα την ποσότητα και την ποιότητα της παραγωγής (<https://about.ardeusi.gr>).

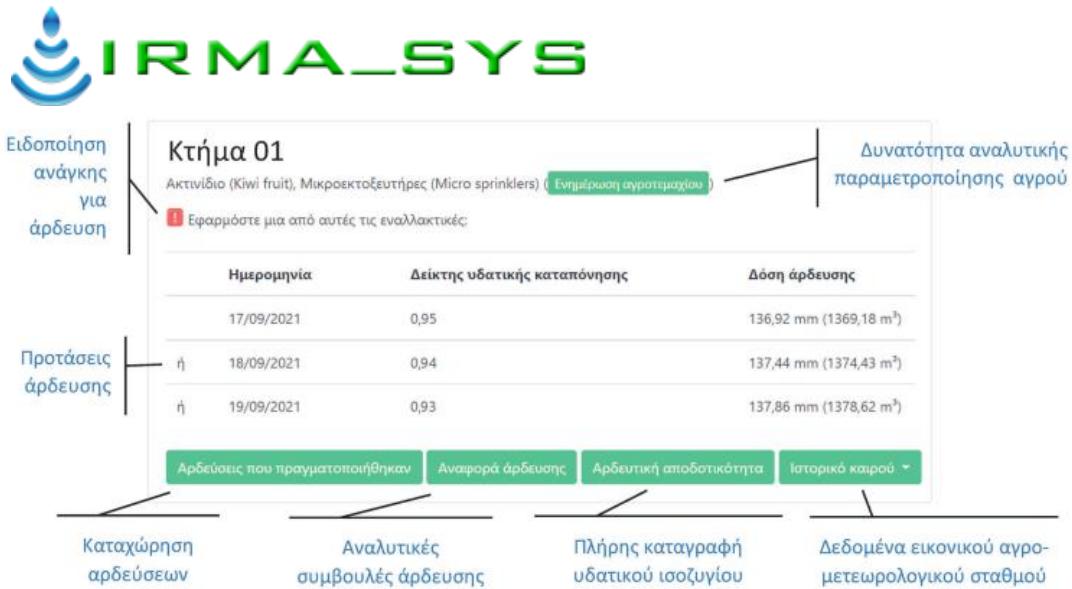


Εικόνα 5-5Q Η σύνδεση του συστήματος ardeusi.gr (Πηγή: <https://about.ardeusi.gr>)

## IRMA\_SYS

Το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων IRMA\_SYS αποτελεί μια προηγμένη λύση για την αποτελεσματική διαχείριση της άρδευσης στη γεωργία. Βασισμένο σε διεθνώς αναγνωρισμένα μοντέλα για τον υπολογισμό των αναγκών καλλιέργειών σε νερό, αποτελεί την ιδανική λύση για άμεση κάλυψη μεγάλων περιοχών χωρίς να απαιτεί εγκατάσταση εξοπλισμού στο χωράφι.

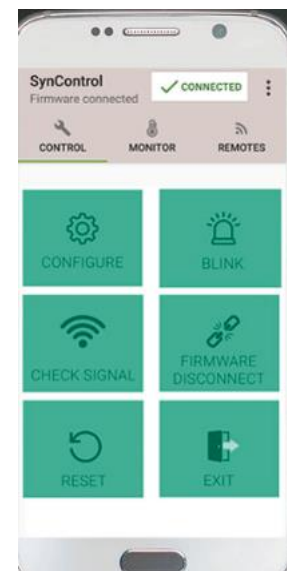
Το IRMA\_SYS είναι ένα εξελιγμένο σύστημα ευφυούς άρδευσης, το οποίο αξιοποιεί δωρεάν αγρο-μετεωρολογικά δεδομένα από το Δίκτυο Ανοιχτής Πληροφορίας Υδροσυστημάτων ([system.openhi.net](http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm)) και πρόβλεψη καιρού από το [openweathermap.org](http://openweathermap.org) και με βάση κατοχυρωμένη μεθοδολογία (OBI), δημιουργεί εικονικούς αγρο-μετεωρολογικούς σταθμούς για κάθε αγροτεμάχιο. Στην συνέχεια χρησιμοποιεί εξελιγμένα μοντέλα εξαμυσοδιαπνοής και υγρασίας εδάφους βασισμένα στα πρότυπα του FAO Irrigation and Drainage Paper 56 (<http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>), ώστε να παράγει συμβουλές άρδευσης προσαρμοσμένες σε κάθε αγροτεμάχιο και καλλιέργεια. Ενεργοποιώντας, επομένως, εικονικούς αγρο-μετεωρολογικούς σταθμούς για κάθε χωράφι της περιοχής, σε συνδυασμό με προβλέψεις καιρού (αξιοποιώντας δεδομένα τηλεμετρίας από αγρο-μετεωρολογικούς σταθμούς και υδρόμετρα), υπολογίζει τις ημερήσιες ανάγκες σε νερό λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους εδάφους, καλλιέργειας και αρδευτικής πρακτικής και παρέχει άμεσα, εύκολα και κατανοητά προτάσεις σχετικά με το πότε πρέπει να γίνει άρδευση και πόσο νερό να δοθεί. Το IRMA\_SYS παρέχει δυνατότητες απομακρυσμένης διαχείρισης και παρακολούθησης, ενώ διαθέτει σύστημα διαχείρισης δεδομένων για αποθήκευση, ανάλυση και αναφορές, προσφέροντας έτσι ολοκληρωμένη λύση για τους γεωργούς που επιθυμούν αποτελεσματική διαχείριση της άρδευσης και βελτιωμένη απόδοση της καλλιέργειάς τους (<https://irmasys.com>).



Εικόνα 5-6: Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων IRMA\_SYS (Πηγή: <https://irmasys.com>)

## SynField

Το SynField είναι η προηγμένη και ολοκληρωμένη λύση ευφυούς γεωργίας της Synelixis που δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης και απομακρυσμένου ελέγχου γεωργικών καλλιεργειών. Το SynField συνδυάζει ανάπτυξη λογισμικού και υλικού εξοπλισμού προσφέροντας καινοτόμες υπηρεσίες στο σύγχρονο αγρότη που βασίζονται στις τεχνολογίες της πληροφορίας, των τηλεπικοινωνιών και του cloud. Είναι μία ευέλικτη και οικονομική λύση που αναπτύχθηκε από τη Synelixis για εφαρμογές γεωργίας ακριβείας σε μικρές και μεγάλες γεωργικές εκμεταλλεύσεις. Προσφέρει άρδευση και λίπανση ακριβείας, διαχείριση νερού και δικτύου πίεσης, καθώς και πρόβλεψη ασθενειών για διάφορα είδη καλλιεργειών. Με το SynField μπορείτε να βελτιστοποιήσετε τις υπηρεσίες άρδευσης για να μειώσετε έως και 55% την κατανάλωση νερού. Επιπλέον, μπορείτε να στείλετε εντολές σε απομακρυσμένους SynField κόμβους για να ελέγξετε αυτοματισμούς άρδευσης, όπως ηλεκτροβάνες, αντλίες, διακόπτες κ.ά. (<https://www.synfield.gr>).



Εικόνα 5-7: Το σύστημα SynField (Πηγή: <https://www.synfield.gr>)

### Σύστημα OPIRIS

Το OPIRIS είναι ένα έξυπνο σύστημα προγραμματισμού της άρδευσης. Προσφέρει μια ολοκληρωμένη λύση στους χρήστες του για τη διαχείριση της άρδευσης υδροπονικών καλλιεργειών και οπωρώνων. Το σύστημα OPIRIS λαμβάνει υπόψη την καλλιέργεια, το μικροκλίμα του θερμοκηπίου, τις προβλέψεις του καιρού και το αποτέλεσμα της προηγούμενης εφαρμογής των αρδεύσεων προκειμένου οι αλγόριθμοι του συστήματος να υπολογίζουν το βέλτιστο πρόγραμμα άρδευσης της επόμενης ημέρας, το οποίο είτε αποστέλλεται στο χρήστη, είτε εφαρμόζεται αυτόματα στο σύστημα ελέγχου άρδευσης, χωρίς να απαιτείται η διόρθωση του προγράμματος ή διαφόρων συντελεστών από τον παραγωγό. Η απόδοση του συστήματος αξιολογήθηκε κατά τη διάρκεια περιόδου δοκιμών ενός έτους και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το OPIRIS είναι αρκετά ακριβές στις προβλέψεις αναγκών σε νερό των καλλιεργειών και ότι μπορούν να προτείνει με μεγάλη ακρίβεια το πρόγραμμα άρδευσης της επόμενης ημέρας. Η χρήση του συστήματος σε εμπορικά θερμοκήπια οδήγησε σε 100% αύξηση της αποτελεσματικότητας νερού και λιπασμάτων χωρίς καμία αρνητική επίδραση στην παραγωγικότητα των θερμοκηπίων. ([www.opiris.eu](http://www.opiris.eu)).

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά η γεωργία σήμερα αντιμετωπίζει προκλήσεις που συνδέονται με τη διαχείριση των υδατικών πόρων και της πρακτικής της άρδευσης, αλλά και των επιπτώσεων στο περιβάλλον από την ανορθολογική χρήση τους. Η ανάγκη για αειφόρο γεωργία και κατά συνέπεια αειφορική χρήση του νερού γίνεται ολοένα πιο επιτακτική.

Η παρούσα πτυχιακή εξετάζει διάφορες τεχνικές άρδευσης, συμπεριλαμβανομένης της άρδευσης ακρίβειας που βασίζεται σε προηγμένες τεχνολογίες IoT και συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για βέλτιστη διαχείριση των υδατικών πόρων, πιο αποτελεσματική άρδευση, και παράλληλα εξοικονόμηση νερού. Η εφαρμογή εξελιγμένων τεχνολογιών στην άρδευση, όπως α) εφαρμογή της τηλεμετρίας για τη μεταφορά των δεδομένων σε κεντρικό σταθμό λήψης αποφάσεων, β) εφαρμογή αυτοματισμών στην άρδευση που επιτρέπουν τη ρύθμιση του χρόνου και της ποσότητας εφαρμοζόμενου νερού, γ) την εισαγωγή έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης και διαχείρισης των καλλιεργειών αξιοποιώντας δεδομένα πολλαπλών πηγών όπως επίγεια ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τηλεπισκόπηση και δ) της τεχνητής νοημοσύνης και τα μεγάλα δεδομένα που επιτρέπουν την ανάλυση των πολλαπλών πηγών δεδομένων για να βελτιώσει τη διαχείριση της άρδευσης και να συμβάλει στη βιώσιμη γεωργία.

Συνοψίζοντας, είναι επιτακτική η ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη και εφαρμογή εξειδικευμένου λογισμικού και συστημάτων διαχείρισης των αγρών και υποστήριξης αποφάσεων των πρακτικών που εφαρμόζονται στην γεωργία και στον Ελλαδικό χώρο. Συγκεκριμένα η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών άρδευσης ακρίβειας και τεχνικών που συμβάλλουν στην βιώσιμη γεωργική ανάπτυξη θα βοηθήσουν στην αποτελεσματική διαχείριση του νερού στον γεωργικό τομέα.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κουτσούρης, Α.Ε & Σιάρδος, Γ.Κ. (2020). "Αειφορική γεωργία και ανάπτυξη"
2. Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών, ΙΟΒΕ (2020). Η συνεισφορά των εισροών στην αγροτική παραγωγή και το μέλλον του αγροτικού τομέα στην Ελλάδα
3. Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 108, 20260–20264.
4. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2020). Export value. Available at <http://www.fao.org/faostat/en/#home>.
5. Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο (2021). Κοινή γεωργική πολιτική και κλίμα. Οι εκπομπές γεωργικής προέλευσης παραμένουν αμείωτες, μολονότι το ήμισυ των δαπανών της ΕΕ για το κλίμα συνδέεται με τη γεωργία
6. Cveji, R., Cernič-Istenič, M., Honzak, L., Pecan, U., Železnika, r. Š., & Pintar, M. (2020). Farmers Try to Improve Their Irrigation Practices by Using Daily Irrigation Recommendations—The Vipava Valley Case, Slovenia. *Agronomy*, 10, 1238.
7. European Commission, COM (2018). Proposal for Regulation of The European Parliament and of the Council, 392 final 2018/0216(COD).
8. Sainju, U. M., Ghimire, R. & Pradhan, G. P. (2019). Nitrogen Fertilization I: Impact on Crop, Soil, and Environment. Intech Open books. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.86028>
9. Burt, T.P. (2013). Nitrogen Cycle. Durham University, Durham, UK. Elsevier: Encyclopedia of Ecology, 4(135-142).
10. Λουπάκη Ε., (2009). Φυτοπροστατευτικά Προϊόντα και Περιβάλλον με Έμφαση Στις Επιπτώσεις Στην Ανθρώπινη Υγεία. Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Ηράκλειου, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας Τμήμα ΘΕΚΑ.
11. Guo, Z., Li, W., Islam, U. M., Wang, Y., Zhang, Z., & Peng, X. (2022). Nitrogen fertilization degrades soil aggregation by increasing ammonium ions and decreasing biological binding agents on a Vertisol after 12 years. *Pedosphere*, 32(4), 629-636.
12. Suciú, N.A., De Vivo, R., Rizzati, N., & Capri, E. (2022). Cd content in phosphate fertilizer: Which potential risk for the environment and human health? *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 30, p.100392.
13. Gupta, D.K., Chatterjee, S., Datta, S., Veer, V., & Walther C. (2014). Role of phosphate fertilizers in heavy metal uptake and detoxification of toxic metals. *Chemosphere*, 108, (134-144)
14. European Commission (2021). Zero pollution: The Commission's report shows that greater efforts need to be made to address water nitrate pollution.
15. Φανουργάκης Ι. Παρασκευάς (2021). Μεταπτυχιακή Διατριβή Ελεγχόμενη Μυδοκαλλιέργεια ως Παράγοντας Αποφυγής Ευτροφισμού και Περιπτώσεων Ερυθρών Παλιρροιών σε Παράκτιες Περιοχές, Σχολή Γεωπονικών Επιστημών, Τμήμα Ζωικής Παραγωγής, Αλιείας & Υδατοκαλλιεργειών, Πανεπιστήμιο Πατρών
16. EUR-LEX, Sustainable development goals, <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/glossary/sustainable-development-goals.html>

17. Πολυράκης Θ. Γ. (2002). Περιβαλλοντική Γεωργία. Εκδόσεις Ψύχαλου
18. European Commission, The European Green Deal [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_el](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_el)
19. World Bank (2022) <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture>
20. European Academies Science Advisory Council, EASAC (2010). Groundwater in the Southern Member States of the EU: an assessment of current knowledge and future prospects- Report for Greece
21. ΕΕ (2023). [https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change\\_el](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_el)
22. Καλλιτσάρη, Χ. (2009). Μεταπτυχιακή Διατριβή: Κριτική Μελέτη Σχέσεων Απόδοσης Καλλιεργείων σε Συνάρτηση με τη Διαθεσιμότητα του Νερού στο Έδαφος. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Γεωπονική Σχολή, Τομέας Εργείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής.
23. European Court of Auditors, ECA, special report (2021): Sustainable water use in agriculture.
24. Χολιασμένου, Κ. (2011). Αειφορική Γεωργία, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Μεσολογγίου, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, Τμήμα Γεωργικής Μηχανολογίας και Υδάτινων Πόρων
25. Basso, B., & Ritchie, J. T. (2018). Evapotranspiration in high-yielding maize and under increased vapor pressure deficit in the US Midwest. *Agric. Environ. Lett.*, 3:170039. doi: 10.2134/aes2017.11.0039
26. Zhongwei L., Xiaochu L., Jianbin X. & Jinrui X. (2020). Water Allocation and Integrative Management of Precision Irrigation: A Systematic Review. *Water* 2020, 12, 3135; doi:10.3390/w12113135
27. Επί Γης (2017). Νερό και Γεωργία. Περιοδική Έκδοση για την Αγροτική Οικονομία από την Τράπεζα Πειραιώς, Τεύχος Νο10.
28. World Bank (2020). Renewable internal freshwater resources per capita (cubic meters) - European Union. Food and Agriculture Organization, AQUASTAT data [Renewable internal freshwater resources per capita \(cubic meters\) - European Union | Data \(worldbank.org\)](https://www.worldbank.org/en/indicators/SH.UW.RWVS.CV.EU)
29. EEA (2009). Water resources across Europe – confronting water scarcity and drought. No2/2009.
30. EurEau (2021). Europe’s Water in Figures <https://www.eureau.org/resources/publications>
31. Eurostat (2016) , [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agricultural\\_environmental\\_indicator\\_-\\_irrigation#Analysis\\_at\\_regional\\_level](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Agricultural_environmental_indicator_-_irrigation#Analysis_at_regional_level)
32. Foster, S.S.D. & Chilton P.J. (2003), “Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B. Biological Sciences* 358, no. 1440: 1957-1972.
33. Margat, J. & J. van der Gun (2013), *Groundwater around the World: A Geographic Synopsis*, CRC Press/Balkema, Taylor and Francis, London
34. OECD, (2017) *Groundwater Allocation: Managing Growing Pressures on Quantity and Quality*. <https://doi.org/10.1787/9789264281554-en>
35. Morris, B.L. et al. (2003), “Groundwater and its susceptibility to degradation: A global assessment of the problem of options for management”, *Early Warning and Assessment Report Series, RS. 03-3*, UNEP, Nairobi, Kenya.
36. EEA (2018). *European waters: Assessment of status and pressures*. EEA Report No 7/2018, ISSN 1977-8449.
37. UNEP (2016). *A snapshot of the world’s water quality: towards a global assessment*. Nairobi, United Nations Environment Programme (UNEP).
38. WWAP (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a sustainable world*. United Nations World Water Assessment Program (WWAP). Paris, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.



39. EPRS (2019). Irrigation in EU agriculture. European Parliamentary Research Service. Author: Rachele Rossi, PE 644.216 – December 2019.
40. Eurostat (2020), Annual freshwater abstraction by source and sector, [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV\\_WAT\\_ABS](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WAT_ABS)
41. Mimikou, M.A., (2005). Water resources in Greece: Present and future. Global NEST Journal, 7(3), 313-322.
42. Kourgialas, N.N. (2021). A critical review of water resources in Greece: The key role of 4 agricultural adaptation to climate-water effects
43. OECD (2015), Drying Wells, Rising Stakes: Towards Sustainable Agricultural Groundwater Use, OECD Studies on Water, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264238701-en>.
44. Intxaurrandieta, J.M. & Eguinoa, P. (2016). FLINT: Water usage, source and sustainability: Examples from the region of Navarra (Spain) and Greece. D5.20. Project for the European Commission.
45. ΕΛΣΤΑΤ (2021). Αποτελέσματα Απογραφής Γεωργίας – Κτηνοτροφίας, έτος αναφοράς 2020
46. Γεωργίου, Δ. (2019). Διπλωματική Εργασία «Διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης νερού από κανάλι συγκέντρωσης αγροτικών, βιομηχανικών και αστικών επεξεργασμένων και μη επεξεργασμένων, υγρών αποβλήτων για κάλυψη αρδευτικών αναγκών στην περιοχή δυτικά της Θεσσαλονίκης». Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
47. Hoekstra, A. Y., & Hung, P.Q. (2002). A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value Of Water Research Report SERIES No. 11. IHE DELF, The Netherlands.
48. ΕΛΓΟ (2013). Τριμηνιαία Έκδοση του Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού - Δήμητρα, Δρ Κωνσταντίνος Χατζουλάκης, 2013. Υδατικό αποτύπωμα – Εργαλείο στη διαχείριση των υδατικών πόρων, Τεύχος 2 (σελ 3)
49. Huang, H., Ouyang, W., Wu, H., Liu, H., Andrea, C. (2017). Long-term diffuse phosphorus pollution dynamics under the combined influence of land use and soil property variations. Sci. Total Environ. 579, 1894–1903
50. Hoekstra A Y. (2013). The water footprint of modern consumer society. London: Routledge
51. OECD, (2020). Water and Agriculture. agriculture policy brief.
52. Τάτσης, Λ. (2007). Κοινοτική Νομοθεσία για την Προστασία και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα. Συνέδριο Αγροτικής Οικονομίας, Αθήνα.
53. Αραμπατζής, Γ., Παναγόπουλος, Α., Πισινάρας, Β. & Χατζηγιαννάκης, Β. (2018). ΕΛΓΟ (2018). Χρήση του αρδευτικού νερού. Κλιματική Αλλαγή. Σίνδος, Θεσσαλονίκη: Έκδοση Ελληνικού Γεωργικού Οργανισμού ΔΗΜΗΤΡΑ. Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων.
54. Χατζουλάκης Κ., Μπερτάκη Μ. (2009). Ορθολογική Διαχείριση του νερού άρδευσης: Αναγκαιότητα για αειφόρο Αγροτική ανάπτυξη. Πρακτικά 23ου Συνεδρίου της Ελληνικής Εταιρείας της Επιστήμης των Οπωροκηπευτικών. ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. Ινστιτούτο Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών. Χανιά 2009. Τόμος 13. Τεύχος Α.σελ 20
55. FAO (1986). Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs. Authors: C. Brouwer and M. Heibloem. FAO publications
56. Oborkhale, L.I., Abioye A.E., Egonwa B.O., & Olalekan T. A. (2015). "Design and Implementation of Automatic Irrigation Control System". OSR Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE), 17(4), 99-111. e-ISSN: 2278-0661, p-ISSN: 2278-8727
57. Yonts, C.D. 1994. Surface irrigation. In: Encycl Agric Food Biol Eng., pp. 979–981. Yubin, Z., 2018. The control strategy and verification for precise water-fertilizer irrigation system. Chinese Automation Congress (CAC) 2018, 4288–4292.
58. Zhang, Xiaoping, Gu, Q., Bin, S., (2004). Water saving technology for paddy rice irrigation and its popularization in China. Irrigation Drain System 18 (4), 347–356. <https://doi.org/10.1007/s10795-004-2750-y>

59. Gillies, M. (2017). Modernisation of furrow irrigation in the sugar industry: final report 2014/079. Sugar Research Australia Ltd. Retrieved from <http://elibrary.sugarresearch.com.all>.
60. Adamala, S., Raghuvanshi, N.S., Mishra, A. (2014). Development of surface irrigation systems design and evaluation software (SIDES). Comput. Electron. Agric. 100, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.11.004>.
61. Πελετίδης Α.(2021). Συστήματα Διαδικτύου των Πραγμάτων με εφαρμογή στη Γεωργία Ακριβείας, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών
62. GAIAPEDIA, Επιφανειακή άρδευση, (τελευταία ενημέρωση 2015), [http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index.php/Επιφανειακή\\_άρδευση](http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index.php/Επιφανειακή_άρδευση)
63. Γκόφας, Ά.Π. (2016). Μέθοδοι Άρδευσης. <https://docplayer.gr/44494000-Epifaneiak-ardeysi-teinei-na-ekleipsei-ardeysi-mekataionismo-i-tehniti-vrohi-epikratei-pagkosmia.html>
64. GAIAPEDIA, Τεχνητή βροχή, (τελευταία ενημέρωση 2015) [http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index.php/Τεχνητή\\_βροχή](http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index.php/Τεχνητή_βροχή)
65. Zhu X.Y., Chikangaise P., Shi W.D., Chen W.H., & Yuan S.Q. (2018). Review of intelligent sprinkler irrigation technologies for remote autonomous system. Int J Agric & Biol Eng, 11(1), 23–30. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3557>.
66. Pramanik, S., Lai, S., Ray, R., & Patra, S.K. (2016). Effect of drip fertigation on yield, water use efficiency, and nutrients availability in banana in West Bengal, India. Commun Soil Sci Plant Anal., 47, 13–14. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1206560> 55.
67. Bajpai, A., & Kaushal, A. (2020). Soil moisture distribution under trickle irrigation: a review. In Press. Water Sci. Technol. Water Supply 1–12. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.005>
68. GAIAPEDIA, Πότισμα στάγδην, (τελευταία ενημέρωση 2015), [http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index.php/Πότισμα\\_στάγδην](http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index.php/Πότισμα_στάγδην)
69. Li, Q., Sugihara, T., Kodaira, M., & Shibusawa, S. (2018). Water use efficiency of precision irrigation system under critical water-saving condition. In: 14th International Conference on Precision Agriculture June, pp. 1–7. Montreal, Quebec, Canada.
70. Ohaba, Shukri, Qichen, Shibusawa, Kodaira, Osato, (2015). Adaptive control of capillary water flow under modified subsurface irrigation based on a SPAC model. In: Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture (ICPA 2015).
71. Shukri, B.Z.I.A., Shibusawa, S, Ohaba, M, Li, Q, Marzuki K, B (2014). Water uptake response of plant in subsurface precision irrigation system. Sci. Direct-Eng. Agriculture, Environ. Food, 6 (3), 128–134. [https://doi.org/10.1016/s1881-8366\(13\)80022-5](https://doi.org/10.1016/s1881-8366(13)80022-5).
72. Λιβανίου Ι. (2010). «Διαχείριση Νερού για Γεωργική Χρήση: Ανάγκες, Επικρατούσες Πρακτικές και Μέτρα Βελτιστοποίησης», Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
73. Sakellariou-Markantonaki M., Papaalexis D., Nakos N., & Papanikolaou C. (2007) “Effect of Modern Irrigation Methods on Growth and Energy Production of the Energy Plant Sorghum in Central Greece”, Agriculture Water Management, Volume 9, Issue 3, p.p. 181-189, 2007.
74. Semananda, N., Ward, J., & Myers, B. (2018). A semi-systematic review of capillary irrigation: the benefits, limitations, and opportunities. Horticulture 4 (3), 23. <https://doi.org/10.3390/horticulturae4030023>
75. Cai, Y., Wu, P., Zhang, L., Zhu, D., Chen, J., Wu, S., & Zhao, X. (2017). Simulation of soilwater movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter. Agric.Water Manage. 192, 244–25 (19). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.07.004>
76. Kamal, R., Muhammed, H.H., & Mojid, M.A., (2019). Two-dimensional modeling of water distribution under capillary wick irrigation system. Science & Technology, Pertanika J. Sci. & Technol. 27 (1): 205–223 (2019) Science, 27(1), 205–223. Retrieved from <http://www.pertanika.upm.edu.my/%0A>

77. Ferrarezi, R.S. & Testezlaf, R. (2016). Performance of wick irrigation system using self-compensating troughs with substrates for lettuce production. *J. Plant Nutr.*, 39(1), 147–161. <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.983127>.
78. Fujimaki, H., Inoue, M., Mamedov, A., Ikeguchi, N., & Nakai, R. (2018). Salinity management under a capillary-driven automatic irrigation system. *J. Arid Land Stud.* 118, 115–118.
79. Θεοχάρης Μ. (2015). Άρδεύσεις: Οι ανάγκες των φυτών σε νερό. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήματος Γεωπονίας Ιωαννίνων, πρώην ΤΕΙ Ηπείρου.
80. FAO (1998). Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Papers 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
81. Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, (2010). Οι υδατικές ανάγκες των αρδευόμενων καλλιεργειών. Έκδοση 9η. Λευκωσία, Κύπρος.
82. Τζουρμακλιώτης Β. (2013). Μεταπτυχιακή Διατριβή, Άρδευση Καλλιεργειών Εξ Αποστάσεως Με Αυτοματισμούς, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
83. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56
84. Παπαζαφειρίου, Ζ. (1998). Θεσσαλονίκη, «Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων», Εκδόσεις Ζήτη.
85. ASCE-ET (2000). <https://www.apogeeinstruments.com/content/EWRI-ASCE-Reference-ET-Appendices.pdf>
86. Rinaldi M. & He, Z. (2014). Decision Support Systems to Manage Irrigation in Agriculture. Book chapter in *Advances in Agronomy*, Volume 123, 229-279. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420225-2.00006-6>
87. Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133 (4), 380–394.
88. Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *J. Hydrol.* 212–213, 198–212
89. ΙΓΕ, Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών (2014). Εγχειρίδιο Υδροπονίας—Εκπαιδευτικό Κέντρο Υδροπονίας ΙΓΕ. Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος Κύπρου. ISBN 978-9963-50-261-5
90. Φούντας Σ. & Γέμτος Θ. (2015). Γεωργία Ακριβείας. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα. [www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr). ISBN: 978-960-603-135-9
91. Sadler E.J., & Russell G. (1997) – ‘The state of site-specific management for agriculture’, Madison WI USA.
92. Balafoutis, A. T., Bert Beck, Spyros Fountas, Zisis Tsiropoulos, Jürgen Vangeyte, Tamme Van Der Wal, I. Soto-Embodas, Manuel Gómez-Barbero, και Søren Marcus Pedersen. ‘Smart Farming Technologies – Description, Taxonomy and Economic Impact’. Στο *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*, επιμέλεια Søren Marcus Pedersen και Kim Martin Lind, 21–77. Progress in Precision Agriculture. Cham: Springer International Publishing, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68715-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68715-5_2).
93. McBratney, A.B., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. (2005) Future directions of precision agriculture. *Precis Agric* 6:7–23
94. Sørensen, G.C., Fountas, S., Nash, E., Pesonen, L., Bochtis, D, Pedersen, S.M., Basso, B., & Blackmore S.B. (2010) Conceptual model of a future farm management information system. *Comput Electron Agric* 72:37–47
95. Nikkila, R., Seilonen, I., & Koskinen, K. (2010) Software architecture for farm management information systems in precision agriculture. *Comput Electron Agric* 70(2):328–336

96. Μορόπουλος Ν., (2005). Αυτοματισμός, Τηλεμετρία και Πληροφορική. Νέες τεχνολογίες στη γεωργική παραγωγή και την αγροτική ανάπτυξη, ΤΕΕ, 13-15 Μαΐου, 2005
97. Dukes, M. D., Simonne, E. H., Davis, W. E., Studstill, D. W., & Hochmuth, R. (2003). Effect of sensor-based high frequency irrigation on bell pepper yield and water use. Proceedings of 2nd International Conference on Irrigation and Drainage, May 12-15, Phoenix, AZ., 665-674.
98. Vellidis, G., Tucker, M., Perry, C., Kvien, C., & Bednarz C. (2008). A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. Computers and Electronics in Agriculture, Volume 61, Issue 1, p. 44-50
99. Kumar, V. Vinoth, Ramasamy, R., Janarthanan, S., & VasimBabu, M. (2017). Implementation of IoT in smart irrigation system using arduino processor. Int. J. Civil Eng. Technol (IJCIET), 8 (10), 1304–1314. <http://http://www.iaeme.com/ijciet/issues.asp>
100. Say, S.M., Keskin, M., Sehri, M., Sekerli, Y.E., & Engineering, T., 2018. Adoption of precision agriculture technologies in developed and developing countries. In: International Science and Technology Conference (ISTEC). Berlin, Germany, vol. 8, pp. 7–15.
101. Lozoya, C., Mendoza, C., Mej, L., Mendoza, G., Bustillos, M., Arras, O., & Sol, L. (2014). Model predictive control for closed-loop irrigation. In: Preprints of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control, Cape Town, South Africa, pp. 4429–4434
102. Yusuke, S. (2018). Is Asia facing a coming water crisis? [https://doi.org/http://www.iiasa.ac.at/web/home/resources/publications/options/Is\\_Asia\\_facing\\_a\\_coming\\_water\\_crisis\\_.html](https://doi.org/http://www.iiasa.ac.at/web/home/resources/publications/options/Is_Asia_facing_a_coming_water_crisis_.html)
103. Zacepins, A., Stalidzans, E., & Meitalovs, J. (2012). Application of information technologies in precision agriculture. In: Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture (ICPA 2012).
104. Lu, Y., Liu, M., Li, C.; Liu, X., Cao, C., Li, X., & Kan, Z. (2022). Precision Fertilization and Irrigation: Progress and Applications. Agri-Engineering 4, 626–655. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4030041>
105. Miller, K.A., Luck, J.D., Heeren, D.M., Lo, T., Martin, D.L.; & Barker, J.B. (2018). A Geospatial Variable Rate Irrigation Control Scenario Evaluation Methodology Based on Mining Root Zone Available Water Capacity. *Precis. Agric.* 19, 666–683. [CrossRef]
106. Abioye, E.A., Abidin, M.S.Z., Mahmud, M.S.A., Buyamin, S., Ishak, M.H.I., Rahman, M.K.I.A., Otuoze, A.O., Onotu, P., & Ramli, M.S.A. (2020). A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture* 173, 105441.
107. Capraro, F., Tosetti, S., Rossomando, F., Mut, V., (2018). Web-based system for the remote monitoring and management of precision irrigation: a case study in an Arid Region of Argentina. *Sensors MDPI*. <https://doi.org/10.3390/s18113847>
108. Liang Z.W., Liu X. C., Xiao J. R., Liu, C. H. (2021). Review of conceptual and systematic progress of precision irrigation. *Int J Agric & Biol Eng*, 14(4): 20–31.
109. Zia, H., Rehman, A., Harris, N.R., Fatima, S., & Khurram, M. (2021). An Experimental Comparison of IoT-Based and Traditional Irrigation Scheduling on a Flood-Irrigated Subtropical Lemon Farm. *Sensors*, 21, 4175. <https://doi.org/10.3390/s21124175>
110. STOA (2023). Panel for the Future of Science and Technology. Artificial intelligence in the agri-food sector. European Parliamentary Research Service
111. Owino, L. & Söffker, D. (2022). How much is enough in watering plants? State-of-the-art in irrigation control: Advances, challenges, and opportunities with respect to precision irrigation. *Frontiers in Control Engineering*, 3. <https://doi.org/10.3389/fcteg.2022.982463>

112. Li, S., Cui, J., & Li, Z. (2011). Wireless Sensor Network for Precise Agriculture Monitoring, Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, IEEE
113. Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gándara, M. Á. (2014). Automated Irrigation System Using a Wireless Sensor Network and GPRS Module, Transactions on Instrumentation and Measurement, IEEE
114. Udathu, R., & Hency, Dr. V. B. (2015), Implementation of an Automated Irrigation System, International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication systems (ICIIECS), IEEE
115. Sathya, A., Arthi, B., Giridharan, S., Karvendan, M., & Kishore, J. (2016) , Automatic control of irrigation system in paddy using WSN, International Conference on Technological Innovations in ICT For Agriculture and Rural Development (TIAR 2016), IEEE
116. Marinescu, T., Arghira, N., Hossu, D., Fagarasan, I., Stamatescu, I., Calofir, V., & Iliescu, S. (2017). Advanced Control Strategies for Irrigation Systems, International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IEEE.
117. Shrivastava, A., & Rajesh, M. (2018). Automatic Irrigation System with Data Log Creation, International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT 2018), IEEE
118. Hamami, L., & Nassereddine, B. (2018). Integration of Irrigation System with Wireless Sensor Networks: Prototype and Conception of Intelligent Irrigation System, World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2018 Vol I), San Francisco, USA
119. Abidin, Z.S.A.H., & Ibrahim, S.N. (2015). Web-based Monitoring of an Automated Fertigation System: An IoT Application, 12th Malaysia International Conference on Communications (MICC), IEEE
120. Agale, R.R. & Gaikwad, D.P. (2017). Automated irrigation and crop security system in agriculture using internet of things. In: International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA). IEEE, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCUBEA.2017.8463726>.
121. Ammri, A. S., & Ridah, S. (2014). Smart Irrigation System Using Wireless Sensor Network, International AI- Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 3 Issue 1
122. Mohanraj, I., Gokul, V., Ezhilarasie, R., & Umamakeswari, A. (2017). Intelligent Drip Irrigation and Fertigation Using Wireless Sensor Networks, Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR), IEEE
123. Rao, R.N., & Sridha, B. (2018). IoT based Smart Crop-Field Monitoring and Automation Irrigation System, Second International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), IEEE
124. Ionescu, L. M., Mazăre, A. G., Șerban, G., Visan, D., & Lita, A. I. (2018). Intelligent command of an underground irrigation and fertilization system, International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), IEEE
125. Goap, A., Sharma, D., Shukla, A.K., & Rama Krishna, C. (2018). An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. Comput. Electron. Agric. 155 (May), 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.040>.
126. Izzuddin, T.A., Johari, M.A., Rashid, M.Z.A., & Jali, M.H. (2018). Smart irrigation using fuzzy logic method. ARPN J. Eng. Appl. Sci. 13 (2), 517–522.
127. Shekhar, Y., Dagur, E., Mishra, S., Tom, R.J. & Veeramanikandan, M. (2017). Intelligent IoT based automated irrigation system. Int. J. Appl. Eng. Res. 12 (18), 7306–7320 <https://doi.org/0000-0001-5145-510X>.

128. Anusha, K. S., Surendra, A., Mohan, A., Kirthika, M. V., & N. (2017). Internet of things based smart irrigation using regression algorithm. <https://doi.org/10.1109/ICICT1..8342819>.
129. Mehra, M., Saxena, S., Sankaranarayanan, S., Tom, R.J., & Veeramanikandan, M., (2018). IoT based hydroponics system using deep neural networks. *Comput. Electron. Agriculture* 155 (October), 473–486. <https://doi.org/S0168169918311839>.
130. Shandilya, U. & Khanduja, V. (2020). Intelligent Farming System with Weather Forecast Support and Crop Prediction, 5th International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS), IEEE
131. Kassim, M.R.M., Mat, I., Harun, A.N. (2014). Wireless Sensor Network in Precision Agriculture Application, Ministry of Science, Technology and Innovation (MIMOS)
132. Navarro-Hellín, H., Martínez-del-Rincon, J., Domingo-Miguel, R., Soto-Valles, F., & Torres-Sánchez, R. (2016). A decision support system for managing irrigation in agriculture.
133. Bellvert, J., Mata, M., Vallverdú, X., Paris, C., & Marsal, J. (2021). Optimizing precision irrigation of a vineyard to improve water use efficiency and profitability by using a decision-oriented vine water consumption model.
134. Zia, H., Rehman, A., Harris, N. R., Fatima, S., & Khurram, M. (2021). An Experimental Comparison of IoT-Based and Traditional Irrigation Scheduling on a Flood-Irrigated Subtropical Lemon Farm.
135. Tsirogiannis, I. L., Malamos, N., & Baltzoi, P. (2023). Application of a Generic Participatory Decision Support System for Irrigation Management for the Case of a Wine Grapevine at Epirus, Northwest Greece
136. Marko Brini , (2023). Digital Agriculture: free irrigation software [https://www.researchgate.net/publication/369031265\\_Digital\\_Agriculture\\_free\\_irrigation\\_software](https://www.researchgate.net/publication/369031265_Digital_Agriculture_free_irrigation_software)