



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ανάπτυξη αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση  
άρδευσης στη Γεωργία Ακρίβειας βασισμένων σε  
τεχνικές Μηχανικής Μάθησης



**ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΜΟΥΣΤΑΚΑΤΟΣ**

**A.E.M:720**

**Επιβλέπων Καθηγητής: ΛΟΥΤΑ ΜΑΛΑΜΑΤΗ**

Κοζάνη, Μάρτιος 2023





HELLENIC DEMOCRACY  
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA  
SCHOOL OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL  
& COMPUTER ENGINEERING

Development of algorithms for  
irrigation optimization in  
Precision Agriculture based on  
Machine Learning technique

THESIS

---

**MOUSTAKATOS ANASTASIOS**

**SUPERVISOR:** LOUTA MALAMATI

Substitute teacher

KOZANI/MARCH/2023





## **ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ**

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο "Ανάπτυξη αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση άρδευσης στη Γεωργία Ακρίβειας βασισμένων σε τεχνικές Μηχανικής Μάθησης" καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Λούτα Μαλαματή αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Ονοματεπώνυμο Φοιτητή & Επιβλέποντα, Έτος, Πόλη

Copyright (C) Μουστακάτος Αναστάσιος, Λούτα Μαλαματή, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: \_\_\_\_\_



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το νερό είναι ένας απαραίτητος φυσικός πόρος για την ανθρώπινη διαβίωση αλλά και για πολυάριθμες κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες όπως είναι: η αγροτική και βιομηχανική παραγωγή, η ύδρευση, η αναψυχή, οι μεταφορές και η παραγωγή ενέργειας. Ωστόσο, οι υδάτινοι πόροι δεν είναι απεριόριστοι αλλά πεπερασμένοι και η διαχείριση τους αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα, καθώς είναι υψίστης σημασίας κυρίως σε χώρες με λειψυδρία. Το θέμα αυτό επηρεάζει παράλληλα και την γεωργία διότι μεγάλη ποσότητα νερού αφιερώνεται σε αυτή τη χρήση. Οι πιθανές συνέπειες της υπερθέρμανσης του πλανήτη οδηγούν στην αναζήτηση μέτρων προσαρμογής για να εξασφαλιστεί η αειφόρος διαθεσιμότητα του νερού και η βέλτιστη χρήση του για την παραγωγή γεωργικών ειδών διατροφής.

Η τρέχουσα επανάσταση του Internet, τα κινητά τηλέφωνα, οι machine to machine (M2M) τεχνολογίες συνδυαστικά με τη παγκόσμια πληθυσμιακή αύξηση και τις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες για κατανάλωση τροφίμων οδήγησαν πρόσφατα στην υιοθέτηση λύσεων τεχνολογίας πληροφοριών σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις γης στο πλαίσιο γεωργικών προσεγγίσεων ακριβείας. Υπάρχουν τεχνολογίες που βασίζονται στο διαδίκτυο πραγμάτων (Internet of Things, IoT) και στους ασύρματους αισθητήρες δικτύου (Wireless sensor network, WSN), οι οποίες αποτελούνται από αισθητήρες και συσκευές επικοινωνίας, εν μέρει ή πλήρως θαμμένες στο έδαφος, για ανίχνευση της υγρασίας και παρακολούθησης της ποιότητας του εδάφους σε πραγματικό χρόνο. Αυτό το νέο πρότυπο διευκολύνει την απρόσκοπτη επικοινωνία αισθητήρων, μηχανημάτων και συστημάτων ευφυούς άρδευσης με το πολύπλοκο κοινωνικό δίκτυο καλλιεργητών, γεωπόνων και συμβούλων καλλιεργειών μέσω Διαδικτύου.

Αυτή η διπλωματική εργασία έχει σαν στόχο την παρουσίαση αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης και αξιολόγησης των δεδομένων με εφαρμογή στο πεδίο της Γεωργικής Μηχανικής για την αναβάθμιση της αρδευτικής διαδικασίας, την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση των αγροτικών προϊόντων καθώς και τον έλεγχο της υγείας των καλλιεργειών. Γίνεται μια επισκόπηση των βασικών τεχνολογιών IoT και της χρήσης αλγορίθμων που αφορούν τη βελτιστοποίηση της άρδευσης μέσα από μηχανισμούς εξοικονόμησης νερού, λαμβάνοντας υπ' όψιν παραμέτρους σχετικές με την ιδιομορφία του εδάφους, την ποσότητα και την ποιότητα του νερού, τις μετεωρολογικές προβλέψεις και τις καιρικές συνθήκες. Τέλος, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη εφαρμογή και την αξιολόγηση αυτών των τεχνολογιών

## **Abstract**

Water is an essential natural resource for human subsistence and for numerous social and economic activities such as agricultural and industrial production, water supply, recreation, transport and energy production. However, water resources are not unlimited but finite and their management is an important issue as they are of paramount importance, especially in countries with water scarcity. This issue also affects agriculture because a large amount of water is devoted to this use. The potential consequences of global warming are leading to the search for adaptation measures to ensure the sustainable availability of water and its optimal use for agricultural food production.

The current revolution of the Internet, mobile phones, and machine to machine (M2M) technologies combined with global population growth and ever increasing food consumption needs have recently led to the adoption of information technology solutions on arable land in the context of precision agriculture approaches. There are Internet of Things (IoT) and Wireless sensor network (WSN) based technologies, which consist of sensors and communication devices, partially or fully buried in the soil, to detect moisture and monitor soil quality in real-time. This new standard facilitates the seamless communication of sensors, machinery and intelligent irrigation systems with the complex social network of farmers, agronomists and crop advisors via the Internet.

This thesis aims to present AI algorithms and data evaluation algorithms with application in the field of Agricultural Engineering for irrigation process upgrading, automated parcelling of agricultural products and crop health monitoring. An overview is given of the basic IoT technologies and the use of algorithms related to the optimization of irrigation through water saving mechanisms, taking into account parameters related to soil specificity, water quantity and quality, meteorological forecasts and weather conditions. Finally, the results obtained from the application and evaluation of these technologies will be presented.



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους βοήθησαν να πραγματοποιηθεί η εργασία αυτή. Ιδιαίτερα θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κ. Λούτα Μαλαμάτη, για τη βοήθεια και τη συμπαράσταση της.

Επίσης, θέλω να πω ευχαριστώ στην οικογένειά μου που ήταν πάντα δίπλα μου και στηρίζει τους στόχους μου.

Κοζάνη, Μάρτιος 2023

## Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	<b>iii</b>
<b>Λίστα Συντομογραφιών / Ακρωνυμίων</b> .....	<b>vii</b>
<b>Κατάλογος Γραφημάτων</b> .....	<b>x</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων</b> .....	<b>xi</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων</b> .....	<b>xii</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Internet of Things (IoT)</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1 Τι είναι το IoT</b> .....	<b>3</b>
1.1.1 Ιστορική αναδρομή .....	3
1.1.2 Ορισμοί του IoT .....	4
<b>1.2 Μοντέλα επικοινωνίας</b> .....	<b>9</b>
1.2.1 Συσκευή προς συσκευή (Device-to-Device) .....	9
1.2.2 Συσκευή προς υπηρεσία νέφους (Device-to-Cloud) .....	10
1.2.3 Συσκευή προς δίαυλο επικοινωνίας (Device-to-Gateway) .....	11
1.2.4 Back-End μοντέλο ανταλλαγής δεδομένων (Back-End Data-Sharing) .....	12
<b>1.3 Τεχνολογίες συνδεσιμότητας</b> .....	<b>13</b>
1.3.1 Radio-frequency identification (RFID) .....	14
1.3.2 Institute of Electrical and Electronics Engineers 802.15.4 (IEEE 802.15.4) .....	16
1.3.3 Zensys Wave (Z-Wave) .....	16
1.3.4 Long Term Evolution (LTE).....	16
1.3.5 Long Range (LoRa) .....	17
1.3.6 Near-Field Communication (NFC).....	17
1.3.7 Ultra-Wide Band (UWB) .....	18
1.3.8 Machine to Machine (M2M) .....	18
1.3.9 IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN).....	19
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Γεωργία</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1 Γεωργία Ακρίβειας</b> .....	<b>21</b>
2.1.1 Φυτοπροστασία της καλλιέργειας μέσω Ευφυούς Γεωργίας.....	27
2.1.2 Ζώνες Διαχείρισης στην Ευφυή Γεωργία .....	27
2.1.3 Οφέλη της Ευφυούς Γεωργίας .....	29
2.1.4 Εφαρμογές Global Positioning System (GPS) στην Ευφυή Γεωργία .....	30
2.1.5 Μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Drones).....	31
<b>2.2 Τεχνολογία Blockchain</b> .....	<b>33</b>
2.2.1 Πιθανές εφαρμογές στη Γεωργία Ακρίβειας.....	35

2.2.2 Blockchain και αγροτική παραγωγή.....	36
2.2.3 Blockchain: Μια καινοτόμα τεχνολογία που ακόμα εξελίσσεται .....	39
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Υδάτινοι Πόροι .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1 Άρδευση Ακριβείας .....</b>	<b>42</b>
3.1.1 Βελτιωμένα Συστήματα Άρδευσης (Β.Σ.Α) .....	47
3.1.2 Πρακτικά Μέτρα για Καλύτερη Διαχείριση και εξοικονόμηση νερού.....	49
3.1.3 Χρηματοδοτικά εργαλεία και ευφυής άρδευση .....	49
3.1.4 Επαναχρησιμοποίηση των Λυμάτων .....	51
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Τεχνητή Νοημοσύνη .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα .....</b>	<b>53</b>
<b>4.2 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι .....</b>	<b>55</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης Χρήσης του Αρδευτικού Νερού.....</b>	<b>58</b>
<b>5.1 Υπηρεσία ευφυούς άρδευσης Gaiasense.....</b>	<b>58</b>
5.1.1 Τεχνολογική υποδομή .....	58
5.1.2 Αλγόριθμος Εφαρμογής .....	59
5.1.3 Αποτίμηση Απόδοσης.....	59
<b>5.2 FIGARO Project.....</b>	<b>60</b>
5.2.1 Τεχνολογική υποδομή .....	60
5.2.2 Αλγόριθμος Εφαρμογής .....	61
5.2.3 Εκτέλεση του Αλγορίθμου.....	62
5.2.4 Αποτίμηση Απόδοσης.....	63
<b>5.3 Επίδραση διαφόρων μεθόδων έξυπνης άρδευσης στο φυτό Ηλίανθο.....</b>	<b>64</b>
5.3.1 Τεχνολογική υποδομή .....	64
5.3.2 Αλγόριθμος Εφαρμογής .....	66
5.3.3 Αποτίμηση Απόδοσης.....	67
<b>5.4 Επίδραση μεθόδων έξυπνης άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή δύο (2) ποικιλιών Σόγιας.....</b>	<b>71</b>
5.4.1 Τεχνολογική υποδομή και Αλγόριθμος Εφαρμογής .....	71
5.4.2 Αποτίμηση Απόδοσης.....	73
<b>5.5 Διαχείριση Αρδευτικού Νερού μέσω απλών Συμβουλών Άρδευσης.....</b>	<b>77</b>
5.5.1 Τεχνολογική υποδομή .....	77
5.5.2 Εφαρμογή Αλγορίθμου .....	82
Πρώτο (1 <sup>ο</sup> ) παράδειγμα: Καλλιέργεια καλαμποκιού και άρδευση με αυλάκια.....	82
Δεύτερο (2 <sup>ο</sup> ) παράδειγμα: Καλλιέργεια Μηδικής και καταιονισμός.....	82
Τρίτο (3 <sup>ο</sup> ) παράδειγμα: Οπωρώνας μηλιάς και στάγδην άρδευση .....	83
5.5.3 Αποτίμηση Απόδοσης.....	84
<b>5.6 Βελτιστοποίηση δικτύων άρδευσης με την εφαρμογή του αλγορίθμου Αποικίας Μυρμηγκιών ..</b>	<b>85</b>
5.6.1 Τεχνολογική υποδομή .....	85
5.6.2 Αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών (ACO) .....	86
5.6.3 Εκτέλεση Αλγορίθμου .....	90

5.6.4 Αποτίμηση Απόδοσης.....	93
<b>5.7 Διαχείριση αρδευτικών δικτύων με τη χρήση της μεθόδου VIKOR.....</b>	<b>94</b>
5.7.1 Τεχνολογική υποδομή .....	94
5.7.2 Εκτέλεση Αλγορίθμου .....	96
5.7.3 Αποτίμηση Απόδοσης.....	101
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Μηχανισμός εκτίμησης αρδευτικών αναγκών στο φυτό Ηλίανθο .....</b>	<b>103</b>
<b>6.1 Υπολογισμός της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας.....</b>	<b>105</b>
<b>6.2 Μέθοδος FAO Penman-Monteith .....</b>	<b>106</b>
6.2.1 Εκτίμηση $R_n$ μέσω προσπίπτουσας ακτινοβολίας $R_s$ .....	108
6.2.2 Εκτίμηση $R_n$ μέσω πραγματικής ηλιοφάνειας $n$ .....	109
6.2.3 Υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ( $E_{To}$ ), με ανεπαρκή μετεωρολογικά δεδομένα (σχέση του Hargreaves).....	109
<b>6.3 Φυτικοί συντελεστές <math>K_c</math>.....</b>	<b>110</b>
<b>6.4 Ωφέλιμη βροχή <math>P_e</math> .....</b>	<b>110</b>
<b>6.5 Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής υπό συνθήκες υπόγειας στάγδην άρδευσης <math>E_{Tt}</math>.....</b>	<b>111</b>
<b>6.6 Εφαρμογή μηχανισμού εκτίμησης αρδευτικών αναγκών - Αποτελέσματα .....</b>	<b>112</b>
<b>6.7 Αποτίμηση μηχανισμού εκτίμησης αρδευτικών αναγκών .....</b>	<b>120</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>121</b>
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>123</b>

---

## Λίστα Συντομογραφιών / Ακρωνυμίων

---

6LoWPAN	IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks
ACO	Ant Colony Optimization Algorithm / Αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών
A.H.P.	Analytical Hierarchy Process
AI	Artificial intelligence
AI IoT	Artificial intelligence and Internet of Things
ANOVA	Analysis of Variance
AS	Ant System
BTC	Bitcoin
CAGR	Compound Annual Growth Rate
DGPS	Differential GPS
DM	Decision Makers
DSM	Deep Soil Moisture
EA	Evolutionary Algorithms / Εξελικτικοί Αλγόριθμοι
et al.	and others
EP	Evolutionary Programming
EPC	Electronic Product Code
ES	Evolution Strategies
ET	Evapotranspiration
FA	Firefly Algorithm / Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας
FAO	Food and Agriculture Organization
FC	Field Capacity
FIGARO	Flexible and Precise Irrigation Platform to Improve Farm Scale Water Productivity
FMS	Farm Management System
FP7	Seventh Framework Program
GA	Genetic Algorithms
GAEZ	Global Agro-Ecological Zones
GP	Genetic Programming
GPS	Global Positioning System
ha	hectare (Εκτάριο)
HA	Hybrid Algorithms / Υβριδικοί Αλγόριθμοι
HAN	Home Area Network

HWSD	Harmonized World Soil Database
IAB	Internet Architecture Board
IoS	Internet of Services
IoT	Internet of Things
IPv6	Internet Protocol version 6
ITU	International Telecommunication Union
LAI	Leaf Area Index
LAM	Lower Allowable Moisture
LP	Linear Programming
LoRa	Long Range
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to machine
MAC	Medium Access Control
MCDM	Multiple Criteria Decision Making
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NFC	Near-Field Communication
PAR	Photosynthetically active radiation
RD	Rooting Depth
RFID	Radio Frequency Identification
RMM	Remote Monitoring and Management
ROM	Read Only Memory
SMS	Short Message Service
SOA	Service-oriented architecture
USM	Useful Soil Moisture
UWB	Ultra-Wide Band
VIKOR	<b>V</b> ise <b>K</b> riterijumska <b>O</b> ptimizacija I <b>K</b> ompromisno <b>R</b> esenje (in Serbian Language) multi-criteria optimization and compromise solution (in English Language)
VoIP	Voice over Internet Protocol
WORM	Write Once and Read Many memory
WSN	Wireless sensor network
Z-Wave	Zensys Wave
Αγ.	Αγίου
Β.Σ.Α	Βελτιωμένα Συστήματα Άρδευσης
Γ.Ο.Ε.Β.	Γενικός Οργανισμός Εγγείων Βελτιώσεων

Γ.Π.	Γραμμικός Προγραμματισμός
Γ.Π.Α	Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
δηλ.	δηλαδή
ΙΕΘ	Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων (πρώην Ινστιτούτο Εδαφολογίας Θεσσαλονίκης)
κ.α. / κ.ά.	και άλλα
κ.τ.λ. / κ.λπ.	και τα λοιπά / και λοιπά
ΚΑΠ	Κοινή Αγροτική Πολιτική
ΚΥΑ	Κοινή Υπουργική Απόφαση
π.χ	παραδείγματος χάριν
Π.Α.	Πολυκριτηριακή Ανάλυση
Π.Λ.Γ.	πρώην Λίμνης Γιαννιτσών
στρ. /στρμ.	στρέμμα
Σ.Π.	Συμβιβαστικός Προγραμματισμός
Τ.Ο.Ε.Β.	Τοπικός Οργανισμός Εγγείων Βελτιώσεων
ΤΝ	Τεχνητή Νοημοσύνη
ΤΝΔ	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα
Χ.Κ.Ε	Χαρακτηριστική Καμπύλη του Εδάφους

---

## Κατάλογος Γραφημάτων

---

Γράφημα 1.	Διακύμανση Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς (ET <sub>o</sub> ) .....	112
Γράφημα 2.	Διακύμανση Εξατμισοδιαπνοής Καλλιέργειας (ET <sub>c</sub> ) .....	113
Γράφημα 3.	Διακύμανση ύψους Βροχής (sumP) .....	113
Γράφημα 4.	Διακύμανση θερμοκρασίας περιβάλλοντος (avgT) .....	114
Γράφημα 5.	Διακύμανση Εξατμισοδιαπνοής υπο συνθήκες Στάγδην Άρδευσης (ET <sub>t</sub> ) .....	115
Γράφημα 6.	Διακύμανση καθαρού ύψους Άρδευσης (IR <sub>n</sub> ) .....	115
Γράφημα 7.	Σύγκριση ύψους Άρδευσης, σχετικής Υγρασίας και ύψους Βροχής .....	116
Γράφημα 8.	Διακύμανση Πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής (ET) .....	117
Γράφημα 9.	Σύγκριση Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς, Πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής, ύψους Βροχής .....	118
Γράφημα 10,11.	Συνολικά αποτελέσματα μηχανισμού εκτίμησης αρδευτικών αναγκών .....	119



---

## Κατάλογος Εικόνων

---

Εικόνα 1.	GLOBAL GAP (Σύνολο προτύπων για ορθές γεωργικές πρακτικές) .....	2
Εικόνα 2.	Σχέση μεταξύ των τριών πτυχών του IoT .....	6
Εικόνα 3.	Μετατροπή του Διαδικτύου από προ-Διαδίκτυο σε IoT .....	7
Εικόνα 4.	Προβολή αριθμού συσκευών που σχετίζονται με το Διαδίκτυο (2015–2025 ) .....	8
Εικόνα 5.	Αναδυόμενες τεχνολογίες .....	9
Εικόνα 6.	Μοντέλο επικοινωνίας Device-To-Device .....	10
Εικόνα 7.	Μοντέλο επικοινωνίας Device-To-Cloud .....	11
Εικόνα 8.	Μοντέλο επικοινωνίας Device-To-Gateway .....	12
Εικόνα 9.	Μοντέλο επικοινωνίας Back-End-Data-Sharing .....	13
Εικόνα 10.	Τεχνολογίες Επικοινωνίας του IoT .....	13
Εικόνα 11.	Λειτουργία RFID .....	14
Εικόνα 12.	Σήμα από ετικέτα RFID (backscatter method) .....	15
Εικόνα 13.	Ενσωμάτωση αυτόνομης ρομποτικής στη γεωργία .....	22
Εικόνα 14.	Αισθητήρες καταγραφής της υγρασίας του εδάφους .....	30
Εικόνα 15.	Το blockchain ως ακολουθία κατακερματισμένων μπλοκ .....	34
Εικόνα 16.	Διαχείριση κτηματολογίου με χρήση τεχνολογίας blockchain .....	35
Εικόνα 17.	Περιπτώσεις χρήσης του Blockchain στη γεωργία ακριβείας .....	36
Εικόνα 18.	Μοντέλο έξυπνης καλλιέργειας θερμοκηπίου με βάση το blockchain .....	38
Εικόνα 19.	Το σύστημα blockchain σε λειτουργία .....	40
Εικόνα 20.	Αναγκαιότητα Εξοικονόμησης Αγροτικού Νερού .....	43
Εικόνα 21.	Εκτοξευτήρες νερού χαμηλής παροχής .....	47
Εικόνα 22.	Ευφυής Άρδευση .....	52
Εικόνα 23.	Βασικά στάδια εξέλιξης της Τεχνητής Νοημοσύνης .....	53
Εικόνα 24.	Δομή τεχνητού νευρώνα .....	54
Εικόνα 25.	Θέση των Εξελικτικών Αλγορίθμων στο χώρο της Υπολογιστικής Νοημοσύνης.....	56
Εικόνα 26.	Εκτέλεση του Αλγορίθμου (FIGARO) .....	62
Εικόνα 27.	Αποτίμηση Απόδοσης Αλγορίθμου .....	63
Εικόνα 28.	Διάταξη μεταχειρίσεων και επαναλήψεων στο πειραματικό αγροτεμάχιο .....	65
Εικόνα 29.	Κλιματικά δεδομένα για τις καλλιεργητικές περιόδους 2011 και 2012 .....	68
Εικόνα 30.	Συνολική ποσότητα νερού (m <sup>3</sup> /στρ.) που εφαρμόστηκε κατά την άρδευση για κάθε μεταχείριση.	69
Εικόνα 31.	Ύψος φυτών (cm) και διάμετρος κεφαλών (cm) .....	69
Εικόνα 32.	Τελική παραγωγή σπόρου (kg/στρ.) ανά μεταχείριση .....	70
Εικόνα 33.	Παρουσίαση μεταβολών των χαρακτηριστικών του φυτού: ύψος, LAI και ολικό ξηρό βάρος .....	76
Εικόνα 34.	Κεντρικό γραφικό περιβάλλον του λογισμικού άρδευσης .....	78
Εικόνα 35.	Διαδικασία εντοπισμού της συντομότερης διαδρομής προς την τροφή .....	86
Εικόνα 36.	Αναπαράσταση του δικτύου εφαρμογής .....	90
Εικόνα 37.	Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET <sub>c</sub> .....	105
Εικόνα 38.	Η χρήση νερού στην Ελληνική γεωργία είναι πάνω από τον μέσο όρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης .....	122

---

## Κατάλογος Πινάκων

---

Πίνακας 1.	Κατηγορίες RFID .....	15
Πίνακας 2.	Διαφορά συχνοτήτων και απόστασης που καλύπτονται από διάφορες τεχνολογίες, που χρησιμοποιούνται στο IoT για επικοινωνία .....	20
Πίνακας 3.	Κύριες IoT τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για συστήματα άρδευσης .....	44,45,46
Πίνακας 4.	Τελικά Αποτελέσματα 1ης Καλλιεργητικής Περιόδου .....	63
Πίνακας 5.	Στοιχεία αποτελεσμάτων ANOVA (Prob>F) .....	73
Πίνακας 6.	Αποτελέσματα σύγκρισης μέσων όρων με τη μέθοδο της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς στις περιπτώσεις αλληλεπίδρασης .....	74
Πίνακας 7.	Αναλυτικά οι παραγωγές των δύο (2) υβριδίων Σόγιας .....	75
Πίνακας 8.	Επιλεγμένες διάμετροι του βέλτιστου δικτύου και υπολειπόμενα φορτία στους κόμβους με τη μέθοδο του αλγορίθμου ACO .....	92
Πίνακας 9.	Τιμές ποσότητας φερομόνης κάθε πιθανής διαμέτρου των αγωγών .....	92
Πίνακας 10.	Βαθμονόμηση με τη μέθοδο A.H.P. ....	98
Πίνακας 11.	Μητρώο απόφασης .....	99
Πίνακας 12.	Ιδιοδιανύσματα βαρών $w_j$ .....	99
Πίνακας 13.	Ιεράρχηση με τη χρήση της μεθόδου VIKOR .....	100

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωργία είναι μια από τις σπάνιες βιομηχανίες όπου η τεχνολογία δεν έχει γίνει αποδεκτή σε μεγάλη κλίμακα, ένας από τους κυριότερους λόγους για αυτό είναι η κακή οικονομική κατάσταση των αγροτών στις περισσότερες αναπτυσσόμενες χώρες, π.χ. Ινδία.

Η έλλειψη των γεωργικών προϊόντων παγκοσμίως θα αυξάνεται μέρα με τη μέρα εξαιτίας δύο σημαντικών παραγόντων, του υπερπληθυσμού και της αστικοποίησης. Η μεγάλη πληθυσμιακή αύξηση χρειάζεται και περίσσεια γης για ανάπτυξη, έχει δηλαδή οδηγήσει στο φαινόμενο όπου πολλά αγροτικά εδάφη μετατρέπονται σε μη γεωργικά πεδία για την επέκταση υποδομών κοντά στις αστικές περιοχές. Ουσιαστικά με την πάροδο του χρόνου η αγροτική περιοχή ελαττώνεται σημαντικά, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της αγροτικής παραγωγής. Για να ξεπεραστεί αυτή η κατάσταση, η μόνη λύση είναι να αυξηθεί η παραγωγικότητα των καλλιεργειών χρησιμοποιώντας με σύνεση τους διαθέσιμους πόρους. Για αυτό το λόγο έχει εξελιχθεί και έχουν βρει σημαντική αποδοχή σε οικουμενικό παγκόσμιο επίπεδο οι αρχές που προεβεί η Γεωργία Ακριβείας. [1]

Η Γεωργία Ακριβείας είναι εξελιγμένη μορφή της παραδοσιακής γεωργίας και αποτελεί μια προσέγγιση στην οποία οι γεωργικές καλλιέργειες τροφοδοτούνται με τη βέλτιστη ποσότητα των πόρων που απαιτούνται, για ακριβή χρονική διάρκεια. Η παραδοσιακή διαδικασία άρδευσης, είναι μια τυπική πρακτική ποτίσματος που βασίζεται στο χρόνο (ο αγρότης άρδευε την καλλιέργεια ανά τακτά χρονικά διαστήματα, σύμφωνα με την εμπειρία του και συνήθως για λίγες ημέρες). Το πρόβλημα με αυτή την πρακτική είναι ότι μερικές φορές δημιουργούνται συνθήκες κορεσμού, πράγμα που οδηγεί σε σπατάλη νερού, αύξηση του κόστους παραγωγής και πιθανή καταστροφή της ίδιας της καλλιέργειας.

Για να ξεπεραστεί ένα τέτοιο ζήτημα, παρουσιάζονται αισθητήρες ανίχνευσης υγρασίας που καταγράφουν την περιεκτικότητα της στο έδαφος, μαθηματικές προσομοιώσεις για την πρόβλεψη του καιρού τοπικά που σε συνδυασμό με την ορθή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έχουν σαν αποτέλεσμα το βέλτιστο πότισμα και γενικότερα την καλή υγεία της καλλιέργειας. Όπως με την υγρασία του εδάφους, έτσι και ο φωτισμός μαζί με τη σχετική υγρασία (υγρασία περιβάλλοντος) γύρω από το φυτό είναι βασικοί παράγοντες για τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης και γενικότερα τη συνολική απόδοση μιας καλλιέργειας. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας στο περιβάλλον του θερμοκηπίου είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος (οι καλλιέργειες αναπτύσσονται καλύτερα όταν μπορούμε να τους παρέχουμε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας για ορισμένο χρονικό διάστημα). Κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ο ψυχρότερος αέρας βρίσκεται πάντα στο κάτω μέρος του φυτού (ο κρύος αέρας είναι βαρύτερος), οπότε αν η θερμοκρασία πέσει πολύ χαμηλά, τότε μπορεί να βλάψει τα φύλλα του φυτού. Η αντοχή του ξυλώδους ιστού, στο στέλεχος του φυτού, εξαρτάται και από

τον έλεγχο της κυκλοφορίας του αέρα στο θερμοκήπιο, αυτό βοηθά επίσης στη μείωση της ανάπτυξης μυκήτων στην καλλιέργεια. Επομένως, η υψηλή ποιότητα και η αυξημένη αποδοτικότητα μιας καλλιέργειας εξαρτάται από τον έλεγχο όλων αυτών των παραμέτρων.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, έχει σαν αντικειμενικό σκοπό την ανάλυση των βασικών τεχνολογιών IoT και την ενσωμάτωσή τους στη Γεωργία Ακρίβειας περιθωριοποιώντας παράλληλα τις παραδοσιακές καλλιεργητικές πρακτικές. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, παρατίθενται αλγόριθμοι που βελτιστοποιούν την άρδευση, προτείνεται η τεχνική ταξινόμησης μοτίβου νευρωνικών δικτύων (neural-network) [2], για την ανάλυση της περιεκτικότητας της υγρασίας του εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη τις μετεωρολογικές προβλέψεις και την ιδιομορφία του περιβάλλοντος γενικότερα.



**Εικόνα 1. GLOBAL GAP (Σύνολο προτύπων για ορθές γεωργικές πρακτικές) [3]**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Internet of Things (IoT)

## 1.1 Τι είναι το IoT

Η επικοινωνία στα μέσα της δεκαετίας του '80 επιτυγχάνονταν είτε μέσω φωνής, με τη βοήθεια των τηλεφωνικών γραμμών, είτε μέσω αλληλογραφίας, με ανταλλαγή επιστολών. Με το πέρασμα του χρόνου και με τη συνδρομή του Διαδικτύου η επικοινωνία απέκτησε μια νέα πλατφόρμα και παράλληλα νέες δυνατότητες, όπως το Voice over Internet Protocol (VoIP) [4]. Στη σημερινή εποχή έχει επεκταθεί κατά πολύ η έννοια του Διαδικτύου και πλέον συμπεριλαμβάνεται σε αυτή η έννοια του IoT [5]. Το IoT ή διαδίκτυο πραγμάτων στα Ελληνικά, αποτελεί ένα δίκτυο επικοινωνίας ενός πολύ μεγάλου αριθμού συσκευών όπως οικιακών συσκευών, οχημάτων καθώς και οποιοδήποτε αντικείμενο το οποίο επιτρέπει τη σύνδεση και την ανταλλαγή δεδομένων με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών μέσων με τα οποία είναι εξοπλισμένο (αισθητήρες, δυνατότητα σύνδεσης σε δίκτυο). Η βασική ιδέα του IoT είναι η ικανότητα σύνδεσης ηλεκτρονικών συσκευών μεταξύ τους (local network) ή η ικανότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο (global network). Η Τεχνολογία IoT εισχωρεί σταδιακά στην καθημερινότητα του ανθρώπου πράγμα το οποίο δημιουργεί την ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για την απόκτηση του. Ωστόσο, η χρήση αυτής της τεχνολογίας δημιουργεί ζητήματα, αντιπαραθέσεις και προκλήσεις (ασφάλεια, προστασία προσωπικών δεδομένων κλπ.) που πρέπει να αναλυθούν προσεκτικά και να αντιμετωπιστούν με σοβαρότητα προκειμένου να εξασφαλιστούν όλα τα παραπάνω οφέλη. Σήμερα αρκετοί ερευνητικοί οργανισμοί και επιχειρήσεις έχουν παρουσιάσει τις πιθανές επιπτώσεις ανάπτυξης του IoT στο Διαδίκτυο και την οικονομία για τα επόμενα πέντε με δέκα χρόνια. Υπάρχουν προβλέψεις που υποστηρίζουν ότι έως το 2025 θα διασυνδέονται μεταξύ τους μέχρι 100 δισεκατομμύρια συσκευές με μεγάλες επιδράσεις στην οικονομία [6].

### 1.1.1 Ιστορική αναδρομή

Ο Βρετανός επιστήμονας Kevin Ashton, [7], [8] είναι ο πρώτος που χρησιμοποίησε το 1999 τον όρο “Διαδίκτυο των πραγμάτων” (IoT), ο οποίος περιγράφει ένα περιβάλλον στο οποίο μέσω αισθητήρων πολλά διαφορετικά “αντικείμενα” θα μπορούν να διασυνδεθούν στο Διαδίκτυο. Ο όρος επινοήθηκε από τον Ashton για να δώσει έμφαση στη δυναμική των συστημάτων ταυτοποίησης με χρήση της ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency Identification (RFID)) [9], που χρησιμοποιούνται από εταιρικές εφοδιαστικές αλυσίδες, για την καταμέτρηση και την παρακολούθηση των εμπορευμάτων χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Σήμερα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων αναφέρεται σε σενάρια στα οποία συσκευές και αντικείμενα συνδέονται στο Διαδίκτυο ώστε να μπορούν να μοιράζονται πληροφορίες και πόρους. Αν και η έκφραση “Διαδίκτυο των πραγμάτων” θεωρείται καινούρια, ο έλεγχος και η διαχείριση συσκευών μέσω δικτύου με χρήση υπολογιστών

εφαρμόζεται αρκετές δεκαετίες. Περίπου από την αρχή της δεκαετίας του 1980, υπήρχαν στο εμπόριο συστήματα για τον έλεγχο μετρητών ηλεκτρικού ρεύματος από απόσταση με τη χρήση τηλεφώνου. Στη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, εμφανίστηκαν οι "machine-to-machine, (M2M)" [10] επιχειρήσεις που έδωσαν τη δυνατότητα στις βιομηχανικές εφαρμογές για τον έλεγχο και την ορθή λειτουργία των εξοπλισμών να εξαπλωθούν. Πολλές από αυτές τις προτάσεις M2M, ήταν βασισμένες σε κλειστά δίκτυα αποκλειστικού σκοπού ή σε δίκτυα προσαρμοσμένα σε ειδικά βιομηχανικά πρότυπα, αντί για το πρωτόκολλο Internet (IP) [11] που είναι βασισμένο στα πρότυπα του Διαδικτύου.

Το IoT σαν ιδέα εισήχθη από τα εργαστήρια Auto-ID της Massachusetts Institute of Technology (MIT) στα τέλη του 1989. Εντούτοις, η πρώτη εφαρμογή IoT αναπτύχθηκε το 1999 και ήταν η καφετιέρα Trojan Room [12]. Στο ίδιο έτος, αναπτύχθηκε η πρώτη συσκευή στον κόσμο που ελέγχεται από το Διαδίκτυο (IP-enabled), μια τοστιέρα [13] που θα μπορούσε να ενεργοποιείται εξ αποστάσεως. Στα χρόνια που πέρασαν δημιουργήθηκαν και άλλα "πράγματα" με δυνατότητα ελέγχου μέσω IP, συμπεριλαμβανομένου ενός μηχανήματος αυτόματης πώλησης αναψυκτικών στις ΗΠΑ, στο Πανεπιστήμιο Carnegie Mellon και μία καφετιέρα στο Ηνωμένο Βασίλειο, στο Πανεπιστήμιο του Cambridge (ήταν στο Διαδίκτυο έως το 2001). [14] [15]

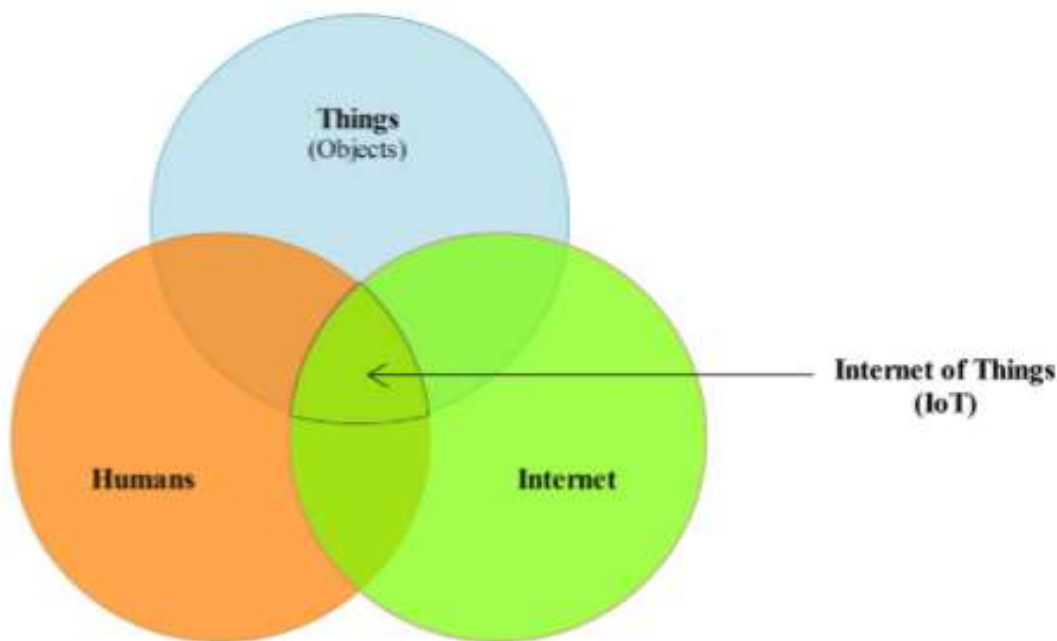
Αυτές οι συσκευές έκαναν την αρχή και μέσω της έρευνας για την ανάπτυξη των "έξυπνων αντικείμενων", βοήθησαν να δημιουργηθούν τα θεμέλια για το Διαδίκτυο των πραγμάτων όπως το γνωρίζουμε σήμερα.

### **1.1.2 Ορισμοί του IoT**

Σήμερα, παρόλο που για το Διαδίκτυο των πραγμάτων υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον παγκόσμια, ένας διεθνώς αποδεκτός ορισμός για τον όρο αυτό δεν υπάρχει. Διαφορετικές ομάδες χρησιμοποιούν διαφορετικούς ορισμούς για να περιγράψουν ή να επικροτήσουν συγκεκριμένες τάσεις για το τι σημαίνει IoT και τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του. Μερικοί ορισμοί προσδιορίζουν την έννοια του Διαδικτύου ή του Internet Protocol (IP), ενώ άλλοι δεν το κάνουν. Κάποιοι από τους πιο διαδεδομένους ορισμούς, αναφορικά με το IoT, είναι οι παρακάτω:

- Internet Architecture Board (IAB) [16]  
 “Ο όρος «Διαδίκτυο των πραγμάτων» (IoT) υποδηλώνει μια τάση όπου ένας μεγάλος αριθμός ενσωματωμένων συσκευών χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες επικοινωνίας που προσφέρονται από τα πρωτόκολλα του Διαδικτύου. Πολλές από αυτές τις συσκευές, που συχνά αποκαλούνται «έξυπνα αντικείμενα», δεν λειτουργούν άμεσα από τον άνθρωπο, αλλά υπάρχουν ως συνιστώσες σε κτίρια ή οχήματα, ή είναι διασκορπισμένα στο περιβάλλον.”
- International Telecommunication Union (ITU) [17]  
 “Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT): Μια παγκόσμια υποδομή για την κοινωνία της πληροφορίας, που επιτρέπει προηγμένες υπηρεσίες μέσω της διασύνδεσης (φυσικών και εικονικών) πραγμάτων με βάση την υφιστάμενη και την σε εξέλιξη διαλειτουργικότητα των τεχνολογιών της πληροφορίας και της επικοινωνίας. 1<sup>η</sup> Σημείωση- Μέσω της αξιοποίησης των δυνατοτήτων αναγνώρισης, καταγραφής δεδομένων, την επεξεργασία και την επικοινωνία, το IoT κάνει πλήρη χρήση των πραγμάτων έτσι ώστε να προσφέρουν υπηρεσίες σε όλα τα είδη των εφαρμογών, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι οι απαιτήσεις της ασφάλειας και της προστασίας της ιδιωτικής ζωής πληρούνται. 2<sup>η</sup> Σημείωση- Από μια ευρύτερη προοπτική, το IoT μπορεί να γίνει αντιληπτό ως ένα όραμα με τεχνολογικές και κοινωνικές επιπτώσεις.”
- IEEE Communications Magazine [18]  
 “Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) αποτελεί ένα πλαίσιο στο οποίο όλα τα πράγματα έχουν μια αντιπροσώπευση και μια παρουσία στο Internet. Πιο συγκεκριμένα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων έχει ως στόχο να προσφέρει νέες εφαρμογές και υπηρεσίες γεφυρώνοντας το φυσικό και τον εικονικό κόσμο, στον οποίο οι Machine-to-Machine (M2M) επικοινωνίες αντιπροσωπεύουν τη βασική επικοινωνία που επιτρέπει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πραγμάτων και των εφαρμογών στο cloud.” [19]
- Wikipedia [20]  
 “Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) είναι το δίκτυο των φυσικών αντικειμένων ή «πραγμάτων», ενσωματωμένο με ηλεκτρονικά, λογισμικό, αισθητήρες και συνδεσιμότητα έτσι ώστε να μπορέσει να επιτευχθεί η μεγαλύτερη αξία και η καλύτερη εξυπηρέτηση μέσω ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ του κατασκευαστή, του χειριστή ή/και άλλων συνδεδεμένων συσκευών. Κάθε πράγμα είναι μοναδικά αναγνωρίσιμο μέσω του ενσωματωμένου συστήματος, αλλά είναι σε θέση να συνεργάζεται με την υφιστάμενη υποδομή του Διαδικτύου.”

Στην Εικόνα 2 απεικονίζεται το IoT σαν το κοινό σημείο μεταξύ τριών πτυχών (Αντικείμενα – Άνθρωποι – Διαδίκτυο). Με τη παρέλευση του χρόνου και την ταχύτατη ανάπτυξη του Διαδικτύου, δημιουργήθηκαν πολλοί εξειδικευμένοι όροι για να περιγράψουν την λειτουργία του και τα στάδια εξέλιξης του. Το πρώτο στάδιο ήταν το Pre-Internet [21], και ήταν επικεντρωμένο στο μέσο διασύνδεσης, όπου η επικοινωνία ήταν δυνατή μέσω σταθερής τηλεφωνικής γραμμής ή/και υπηρεσίας σύντομων μηνυμάτων (SMS). Αργότερα το μέσο επικοινωνίας αναβαθμίστηκε και με συσκευές κινητής τηλεφωνίας. Το δεύτερο στάδιο ήταν το Internet of content, το οποίο επικεντρώθηκε στο περιεχόμενο του μηνύματος. Αναπτύχθηκε η ικανότητα αποστολής μηνυμάτων μεγάλου όγκου με τη χρήση emails που ήταν ικανά να συνδυάσουν συνημμένα, πληροφορίες, ψυχαγωγία, κλπ. Το τρίτο στάδιο αφορούσε το Internet of Services (IoS) [22], στην έννοια αυτή περικλείεται οτιδήποτε είναι απαραίτητο για τη χρήση εφαρμογών λογισμικού που διατίθεται σαν διαδικτυακή υπηρεσία. Το IoS επικεντρώθηκε σε ηλεκτρονικές εφαρμογές όπως το ηλεκτρονικό εμπόριο, εφαρμογές λογισμικού όπως το Facebook, το Orkut, το Skype, το YouTube, κ.λπ.



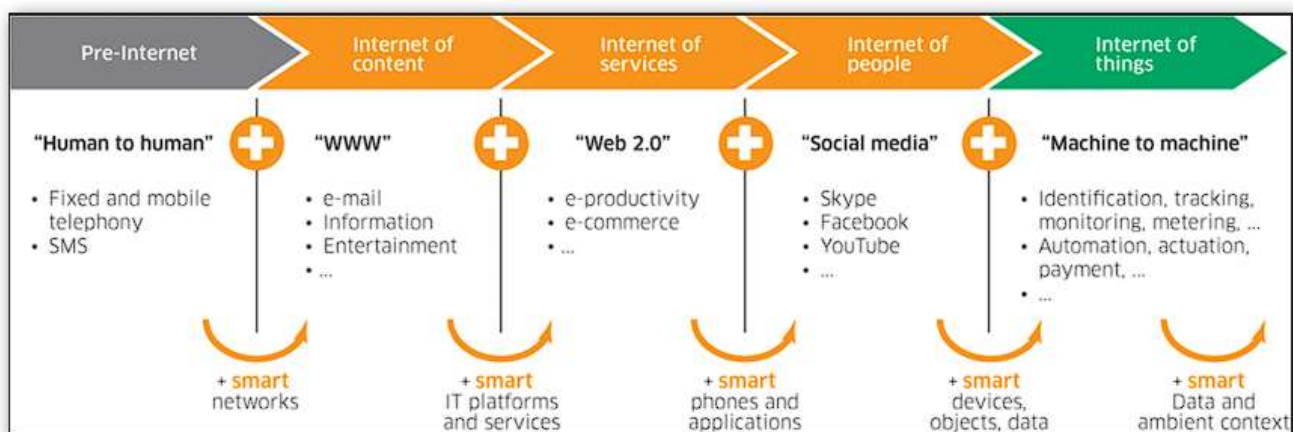
**Εικόνα 2. Σχέση μεταξύ των τριών πτυχών του IoT [23]**

Σήμερα, το IoT θεωρείται η αιχμή της τεχνολογίας. Για το λόγο αυτό βρίσκεται σε συνεχή αναβάθμιση και βελτίωση. Η λειτουργική πτυχή που έχει τη δυνατότητα διασύνδεσης συσκευών μέσω Διαδικτύου επιτρέποντας σε διαφορετικές συσκευές τη δυνατότητα για τη μεταξύ τους επικοινωνία έτσι ώστε να εκτελούν μια σειρά δραστηριοτήτων όπως κατευθύνονται/προγραμματίζονται σύμφωνα με το σχεδιασμό και τις λειτουργικές δυνατότητες διαφόρων αντικειμένων.



Οι ερευνητές επιχειρούν να συνδυάσουν τις έννοιες της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI, artificial intelligence) [24] με τις συσκευές IoT ώστε να έχουν τη δυνατότητα για λήψη των κατάλληλων αποφάσεων και εκτέλεση ενεργειών χωρίς την παρέμβαση των ανθρώπων. Ίσως να μην είναι εσφαλμένος ο ορισμός της επερχόμενης φάσης ως Διαδίκτυο των πραγμάτων που υποστηρίζεται από Τεχνητή Νοημοσύνη (AI IoT) [25].

Η μετατροπή του Διαδικτύου από προ-Διαδίκτυο σε IoT απεικονίζεται στην Εικόνα 3.

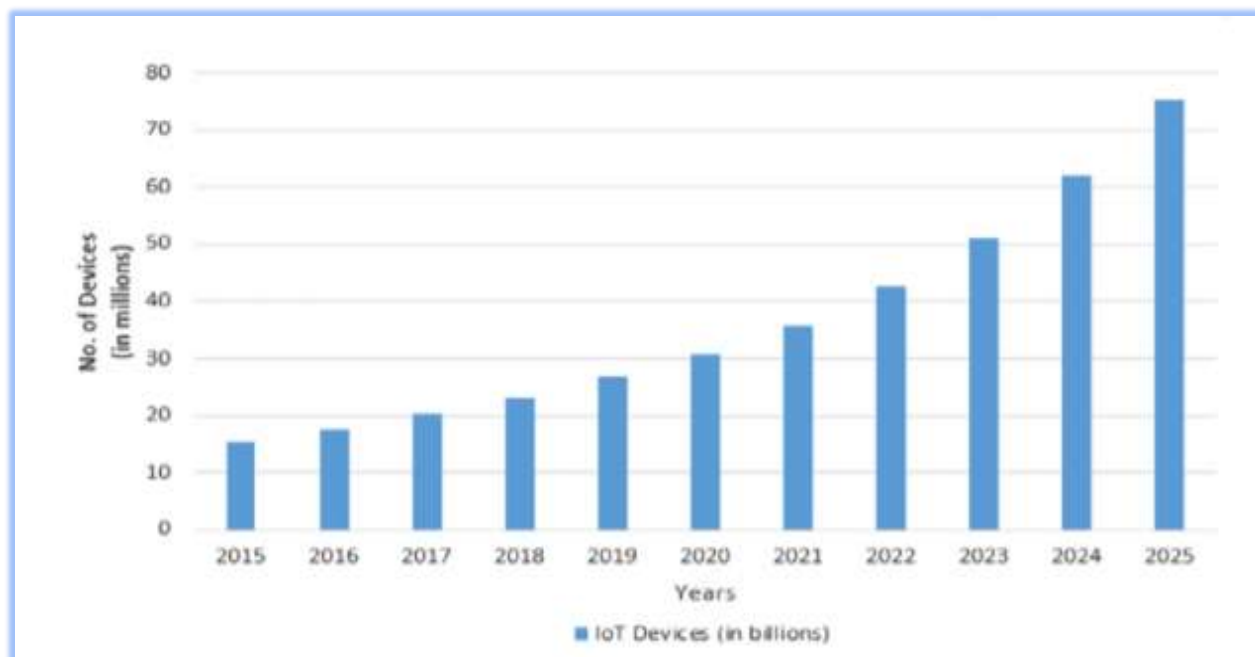


**Εικόνα 3. Μετατροπή του Διαδικτύου από προ-Διαδίκτυο σε IoT [23]**

Σήμερα, πολλές πτυχές της καθημερινότητας μας διαχειρίζονται από έξυπνες συσκευές που μας βοηθούν να οργανώνουμε τη ζωή μας πιο αποτελεσματικά. Το διαδίκτυο έχει αναλάβει τον έλεγχο δισεκατομμυρίων συσκευών που είναι εφοδιασμένες με αισθητήρες, υπολογιστική ισχύ και λογισμικό. Αυτές οι συσκευές παράγουν τεράστιο όγκο δεδομένων που υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία για τη λήψη καλύτερων αποφάσεων. Έως το έτος 2025 εκτιμάται ότι περίπου 39 δισεκατομμύρια έξυπνες συσκευές συνδεδεμένες με το διαδίκτυο θα χρησιμοποιούνται παγκοσμίως, πρόκειται δηλαδή, για τρεις (3) συνδεδεμένες συσκευές κατά μέσο όρο για κάθε άνθρωπο στον πλανήτη. Εκτιμάται επίσης, σύμφωνα με αποτελέσματα έρευνας που διεξήγαγε η εταιρεία McKinsey, ότι μέχρι το έτος 2030 το IoT θα μπορούσε να παράγει αξία 5,5 έως 12,6 τρισεκατομμύρια δολάρια παγκοσμίως. [26], [27]

Αυτό δημιουργεί προσδοκίες για την περαιτέρω βελτίωση των τεχνολογιών επικοινωνίας και την ανακάλυψη καινούριων μεθόδων για συγχρονισμό των νεότερων ή αναβαθμισμένων συσκευών με αισθητήρες μέσω Διαδικτύου. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη προϊόντων και όλα έχουν διαφορετικές ικανότητες να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτή είναι μια μεγάλη πρόκληση για το IoT, γιατί χρειάζεται όλα τα προϊόντα να έχουν τη δυνατότητα να συνεργάζονται, ωστόσο, μπορεί να είναι εσφαλμένη η άμεση αξιολόγηση των λειτουργικών δυνατοτήτων του IoT, προτού κατανοήσουμε πλήρως τις αλλαγές και τις εξελίξεις στον τομέα του. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η έρευνα για το IoT είναι ένας τομέας που ενδιαφέρει και τον

ακαδημαϊκό κόσμο αλλά και τη βιομηχανική παραγωγή, τα αποτελέσματα απεικονίζουν την ανάγκη για συνεχή εξεύρεση νέων τρόπων, για τη διασύνδεση διαφορετικών συσκευών μέσω Διαδικτύου μέσω εξειδικευμένων αισθητήρων. Σήμερα η ιδέα αυτή θεωρείται κατευθυντήριοις χάρτης πορείας για την ανάπτυξη πολλών κοινωνικών τομέων π.χ. Έξυπνα σπίτια, Ασφάλεια και έλεγχος Περιβάλλοντος, Ιατρική και Υγειονομική περίθαλψη, Γεωργία, Εκτροφή και ανεξάρτητη Διαβίωση είναι λίγοι από αυτούς. Στην Εικόνα 4 απεικονίζεται η ραγδαία αύξηση των συσκευών που συνδέονται μέσω Διαδικτύου τα τελευταία χρόνια.



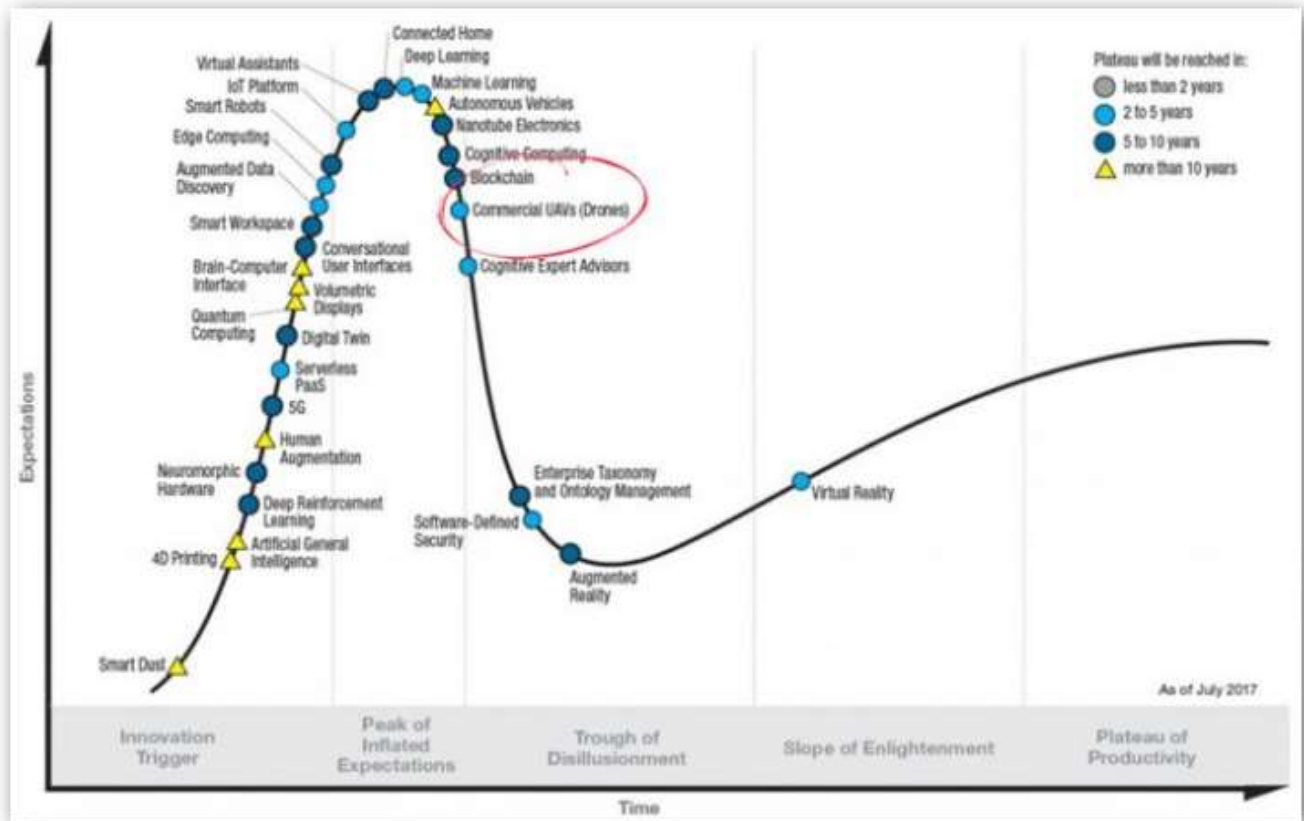
**Εικόνα 4. Προβολή αριθμού συσκευών που σχετίζονται με το Διαδίκτυο (2015–2025) [23]**

Το Gartner's Hype Cycle είναι μια γραφική παρουσίαση που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιείται και ανήκει στην αμερικανική εταιρεία έρευνας, παροχής συμβουλών και τεχνολογίας πληροφοριών Gartner για να αναπαραστήσει την ωριμότητα, την υιοθέτηση και την κοινωνική εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνολογιών [28] [29]. Ο κύκλος της διαφημιστικής εκστρατείας ισχυρίζεται ότι παρέχει μια γραφική και εννοιολογική παρουσίαση της ωριμότητας των αναδυόμενων τεχνολογιών μέσω πέντε (5) φάσεων:

- Τεχνολογική καινοτομία.
- Κορύφωση των διογκωμένων προσδοκιών.
- Δεξαμενή Απογοήτευσης.
- Διαφώτιση (πως η τεχνολογία μπορεί να ωφελήσει την επιχείρηση).
- Πεδίο Παραγωγικότητας.

Ο κύκλος Hype της Gartner's Information Technology [30] για το έτος 2018 αποκαλύπτει ότι η πλατφόρμα IoT βρίσκεται στην κορυφή του διαγράμματος σε σχέση με τις μέγιστες διογκωμένες προσδοκίες, που ξεκίνησε μέσω μιας ώθησης καινοτομίας και έφτασε στο

μέγιστο επίπεδο προσδοκίας. Το ποσοστό εξάρτησης σε συνδυασμό με τις διαρκώς αυξανόμενες προσδοκίες προωθούν έρευνες για ενδελεχή μελέτη νεότερων εξελίξεων. Στην Εικόνα 5 απεικονίζονται οι αναδυόμενες τεχνολογίες σύμφωνα με την έκθεση Gartner's Hype Cycle.



Εικόνα 5. Αναδυόμενες τεχνολογίες [31]

## 1.2 Μοντέλα επικοινωνίας

Οι συσκευές IoT χρησιμοποιούν διαφορετικά μοντέλα επικοινωνίας για να συνομιλούν μεταξύ τους. Το Συμβούλιο Αρχιτεκτονικής του Διαδικτύου (Internet Architecture Board, IAB) [32] κυκλοφόρησε ένα έγγραφο τον Απρίλιο του 2015 που περιγράφει τέσσερα μοντέλα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν οι συσκευές για να επικοινωνούν μεταξύ τους. Τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε μοντέλου παρουσιάζονται παρακάτω.

### 1.2.1 Συσκευή προς συσκευή (Device-to-Device)

Το επικοινωνιακό μοντέλο device-to-device [32] αναφέρετε σε δύο (2) ή περισσότερες συσκευές που μπορούν να συνδεόταν μέσω πολλών τύπων δικτύων, να επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς διακομιστή (server) και χρησιμοποιούν πρωτόκολλα όπως Bluetooth, Z-Wave και ZigBee, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.



**Εικόνα 6. Μοντέλο επικοινωνίας Device-To-Device [33]**

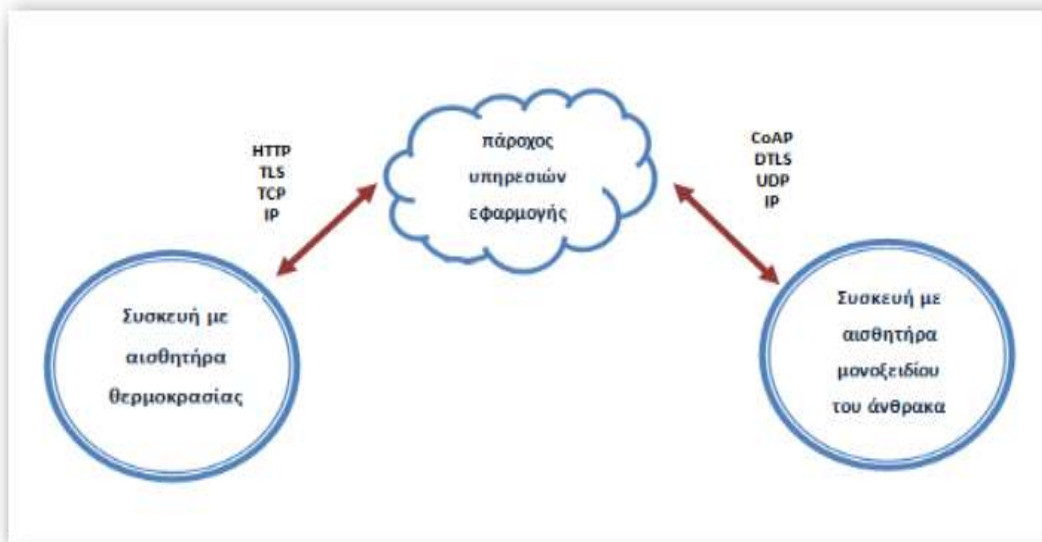
Επιτρέπει σε συσκευές που χρησιμοποιούν ίδιο πρωτόκολλο επικοινωνίας να ανταλλάσσουν δεδομένα και πληροφορίες.

Το συγκεκριμένο μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται σε συστήματα οικιακού αυτοματισμού, δηλαδή για συσκευές που χρειάζονται για την επικοινωνία τους χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και χρησιμοποιούν μικρά πακέτα δεδομένων. Με την απευθείας σύνδεση των συσκευών και της μικρής εμβέλειας τους το μοντέλο συνδεσιμότητας Device to Device εγγυάται μια σίγουρη ασφάλεια.

### **1.2.2 Συσκευή προς υπηρεσία νέφους (Device-to-Cloud)**

Το επικοινωνιακό μοντέλο Device-to-Cloud είναι όταν μια συσκευή συνδέεται απευθείας σε μια υπηρεσία cloud για την ανταλλαγή δεδομένων και τη διαχείριση της ανταλλαγής μηνυμάτων.

Αυτός ο τρόπος σύνδεσης στο Διαδίκτυο χρησιμοποιεί υπάρχοντα κανάλια επικοινωνίας, όπως ενσύρματο Ethernet ή Wi-Fi, για να δημιουργήσει μια σύνδεση μεταξύ της συσκευής και του Διαδικτύου. Αυτή η σύνδεση στη συνέχεια συνδέεται με μια υπηρεσία cloud. Το μοντέλο απεικονίζεται στην Εικόνα 7.

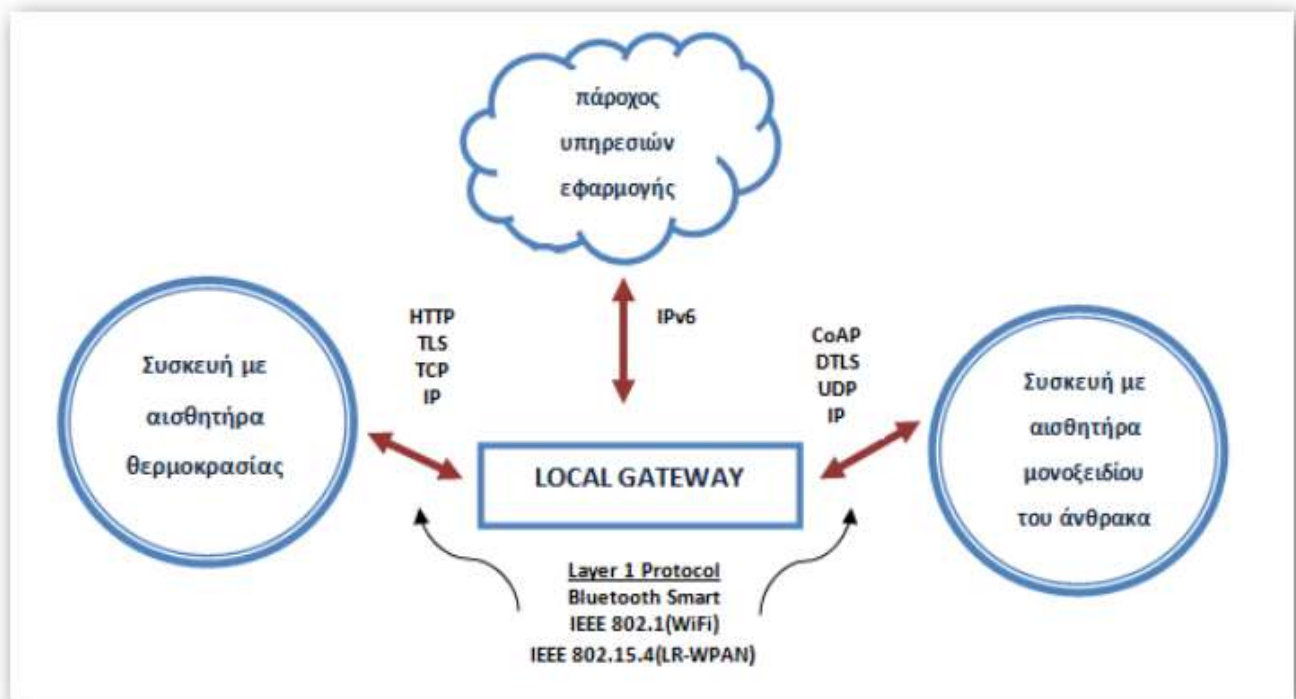


**Εικόνα 7. Μοντέλο επικοινωνίας Device-To-Cloud [33]**

Το επικοινωνιακό μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται από μερικές διάσημες καταναλωτικές συσκευές IoT, όπως ο θερμοστάτης εκμάθησης από τη Nest Labs και η SmartTV της Samsung. Αυτές οι συσκευές στέλνουν δεδομένα σε μια βάση δεδομένων cloud, ώστε να υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με την ενέργεια που καταναλώνει ένα σπίτι. Με τον τρόπο αυτό ένας θερμοστάτης είναι προσβάσιμος από το χρήστη από απόσταση, επιτρέπει επίσης ενημερώσεις λογισμικού για τον θερμοστάτη. Με το μοντέλο Device-to-Cloud, η ίδια η συσκευή αναβαθμίζεται επειδή έχει πρόσβαση σε πρόσθετες λειτουργίες και υπηρεσίες από το cloud.

### 1.2.3 Συσκευή προς διάυλο επικοινωνίας (Device-to-Gateway)

Στο επικοινωνιακό μοντέλο Device-to-Gateway ή Device-to-application-layer-Gateway (ALG), η συσκευή IoT συνδέεται με μια υπηρεσία ALG για να αποκτήσει πρόσβαση στο cloud. Το μοντέλο Device-to-Gateway διαθέτει εφαρμογές που λειτουργούν ως μεσολαβητής μεταξύ συσκευών και υπηρεσιών νέφους, παρέχοντας ασφάλεια και άλλες λειτουργίες. Το μοντέλο απεικονίζεται στην Εικόνα 8.



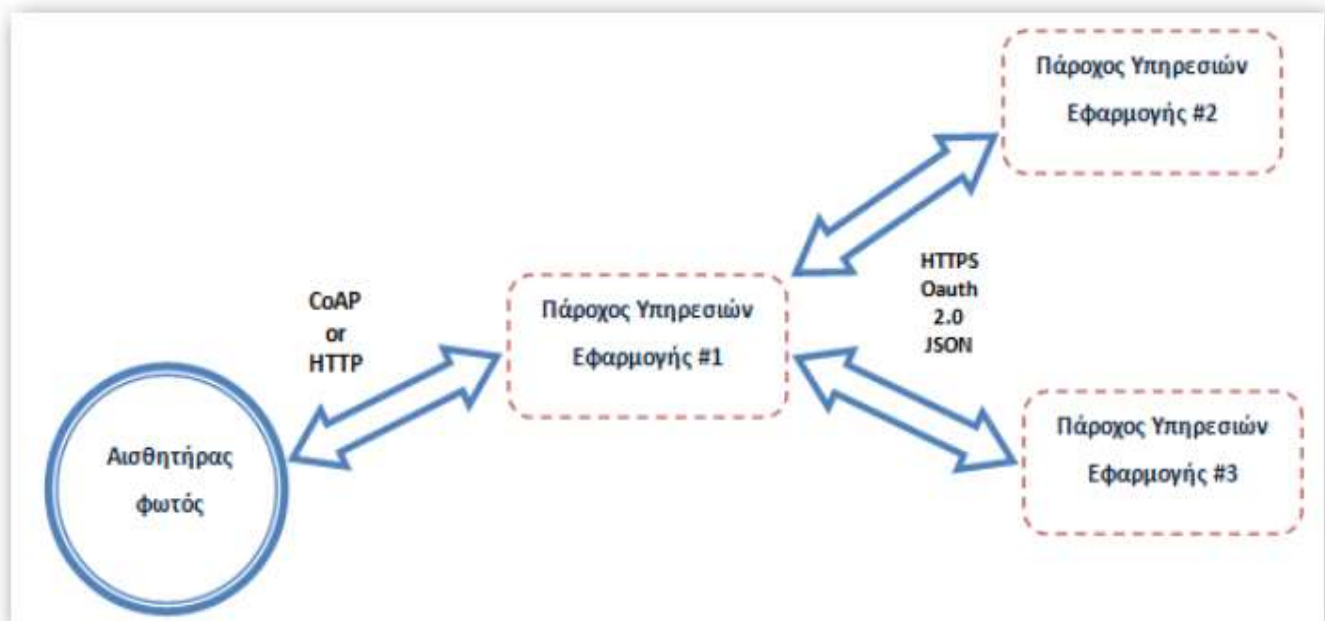
**Εικόνα 8. Μοντέλο επικοινωνίας Device-To-Gateway [33]**

Τα smartphone χρησιμοποιούν ένα μοντέλο επικοινωνίας που ονομάζεται Device-to-Gateway. Αυτό το μοντέλο επιτρέπει στα smartphone να εκτελούν εφαρμογές που επικοινωνούν με συσκευές IoT και μεταφέρουν δεδομένα σε μια υπηρεσία cloud. Τα smartphone λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ της συσκευής και του διαδικτύου. Αυτό βοηθά τη συσκευή να αποκτήσει πρόσβαση σε υπηρεσίες που βασίζονται σε τεχνολογίες νέφους στις οποίες δεν θα μπορούσε να έχει πρόσβαση από μόνη της. Αυτό το μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται για τη σύνδεση νέων smart συσκευών με ένα υπάρχον σύστημα. Αυτή η προσέγγιση έχει ένα μειονέκτημα στο ότι είναι πολύπλοκη και δαπανηρή η ανάπτυξη του συστήματος και των εφαρμογών.

#### **1.2.4 Back-End μοντέλο ανταλλαγής δεδομένων (Back-End Data-Sharing)**

Το επικοινωνιακό μοντέλο Back-End Data-Sharing είναι ένας τρόπος επικοινωνίας με μια υπηρεσία νέφους για εξαγωγή και ανάλυση δεδομένων έξυπνου αντικειμένου. Το μοντέλο επικοινωνίας Device-to-Cloud είναι ένας τρόπος για τις συσκευές IoT να στέλνουν δεδομένα μόνο σε έναν πάροχο υπηρεσιών εφαρμογών. Η αρχιτεκτονική Back-End Data-Sharing επιτρέπει στις συσκευές IoT να μοιράζονται δεδομένα μεταξύ τους, έτσι ώστε τα δεδομένα να μπορούν να αναλυθούν και να συγκεντρωθούν. Αυτό δίνει επίσης τη δυνατότητα στους χρήστες να μετακινούν τα δεδομένα τους μεταξύ συσκευών IoT χωρίς να χρειάζεται να ανησυχούν για τυχόν προβλήματα. Το μοντέλο επικοινωνίας απεικονίζεται στην Εικόνα 9.



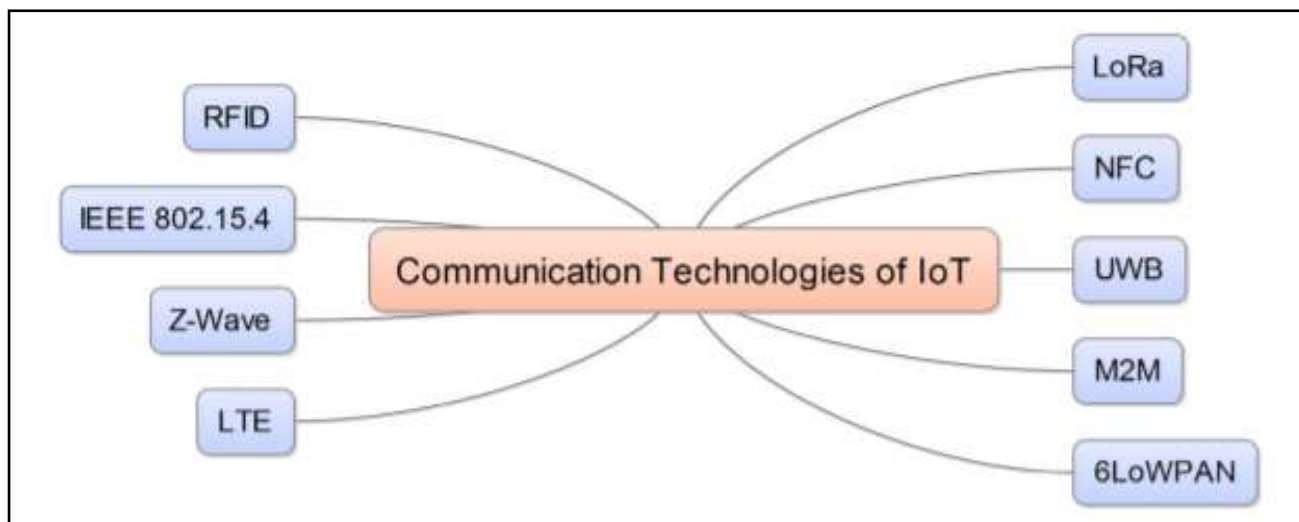


**Εικόνα 9. Μοντέλο επικοινωνίας Back-End-Data-Sharing [33]**

Η αρχιτεκτονική του μοντέλου αυτού είναι μια προσέγγιση για την επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ αυτών των back-end συστημάτων.

### 1.3 Τεχνολογίες συνδεσιμότητας

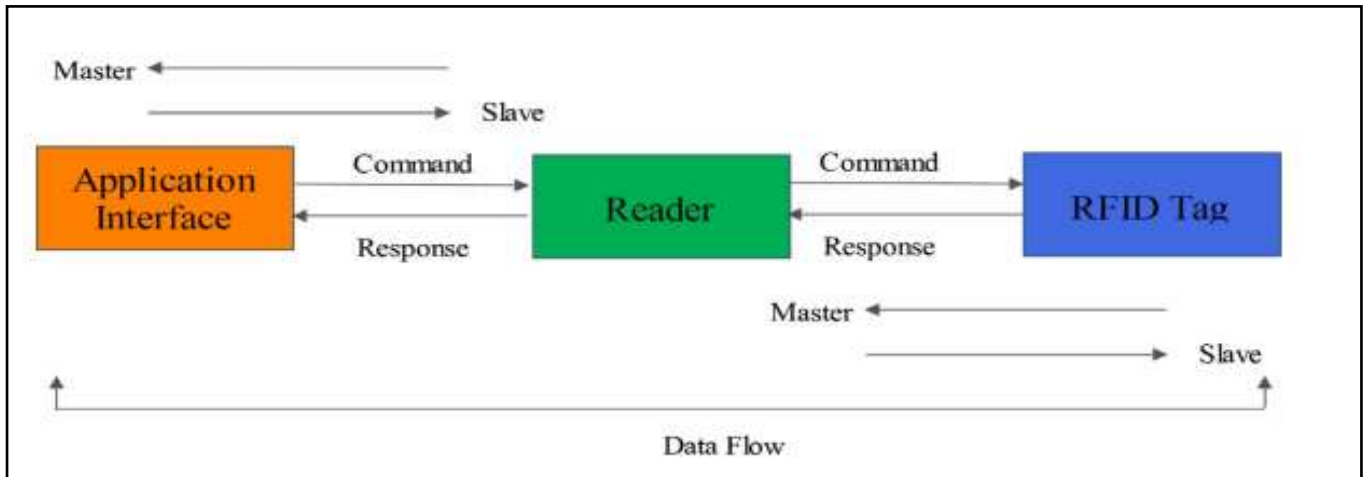
Οι τεχνολογίες συνδεσιμότητας πρέπει να λειτουργούν ως υποδομή για τη σύνδεση των smart συσκευών, οι οποίες θα πρέπει να λειτουργούν σωστά υπό αυστηρές προδιαγραφές σχεδιασμού. Αυτές οι προδιαγραφές περιλαμβάνουν την ενεργειακή απόδοση, το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, την κάλυψη, την καθυστέρηση και τον τρόπο διαχείρισης του θορύβου από τη συσκευή. Διαφορετικοί τύποι τεχνολογίας χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες από μερικά MHz έως δεκάδες GHz. Αυτές οι συχνότητες χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς τύπους σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Σημαντικές τεχνολογίες επικοινωνίας στο IoT απεικονίζονται στην Εικόνα 10.



**Εικόνα 10. Τεχνολογίες Επικοινωνίας του IoT [23]**

### 1.3.1 Radio-frequency identification (RFID)

Το σύστημα RFID (Ταυτοποίηση ραδιοσυχνοτήτων) αποτελείται από έναν ή περισσότερους αναγνώστες και πολλές ετικέτες RFID [34]. Οι ετικέτες RFID χαρακτηρίζονται από μια συγκεκριμένη διεύθυνση και εφαρμόζονται σε αντικείμενα. Χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία ραδιοσυχνοτήτων για τη μεταφορά δεδομένων που σχετίζονται με ένα αντικείμενο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.

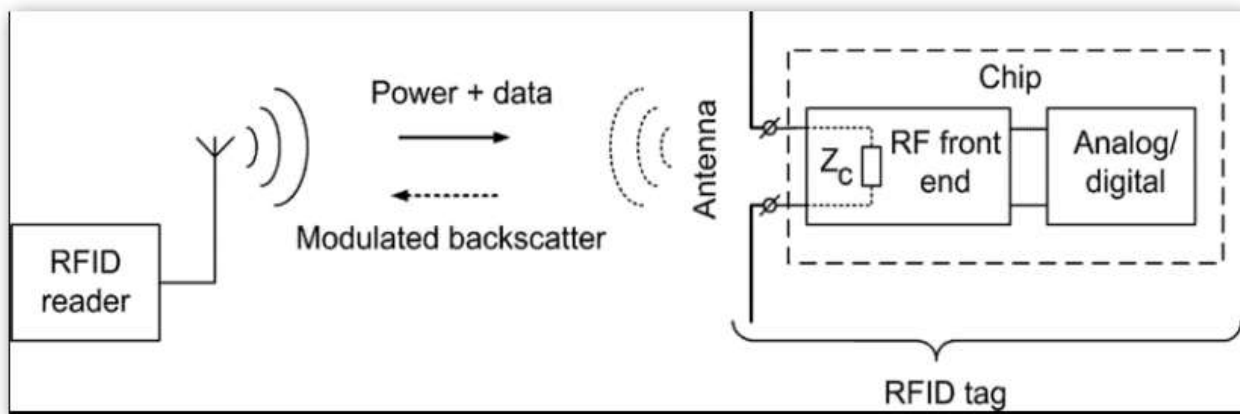


**Εικόνα 11. Λειτουργία RFID [23]**

Το RFID επιτρέπει την παρακολούθηση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να χρειάζεται ανθρώπινη οπτική επαφή. Οι ετικέτες RFID κατηγοριοποιούνται σε τρεις (3) τύπους ανάλογα με τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ των ετικετών και των αναγνώστων.

- **Ενεργές ετικέτες:** (Active Reader Passive Tag (ARPT)), χρησιμοποιούνται συχνότερα για επικοινωνιακούς σκοπούς. Αυτές οι ετικέτες δεν διαθέτουν ενσωματωμένα τροφοδοτικά, επομένως συλλέγουν την ενέργεια που απαιτείται για την αποστολή δεδομένων από το σήμα ερωτήματος που αποστέλλεται από τον αναγνώστη RFID.
- **Παθητικές ετικέτες:** (Passive Reader Active Tag (PRAT)), σε αυτή την κατηγορία ο αναγνώστης είναι παθητικός και λαμβάνει το σήμα από τις ενεργές ετικέτες που λειτουργούν με μπαταρία.
- **Ημι-παθητικές ετικέτες:** (Semi Passive Tag), σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι ετικέτες RFID που έχουν μπαταρία αλλά επικοινωνούν με έναν αναγνώστη χρησιμοποιώντας backscatter (Εικόνα 12), όπως μια παθητική ετικέτα χωρίς μπαταρία. Η μπαταρία χρησιμοποιείται συνήθως για την τροφοδοσία ενός αισθητήρα και για τη λειτουργία του κυκλώματος στο τσιπ.





**Εικόνα 12. Σήμα από ετικέτα RFID (backscatter method) [35]**

Οι ετικέτες RFID διαθέτουν ένα τσιπ που μπορεί να περιέχει διαφορετικούς τύπους μνήμης. Το τσιπ έχει μια μνήμη μόνο για ανάγνωση (ROM) που αποθηκεύει το αναγνωριστικό της ετικέτας και μια εγγράψιμη μνήμη που αποθηκεύει δεδομένα που μπορεί να διαβάσει η ετικέτα. Το τσιπ διαθέτει επίσης μνήμη Write Once και Read Many (WORM) που μπορεί να αποθηκεύσει δεδομένα πολλές φορές. Αυτό είναι χρήσιμο για την αποθήκευση δεδομένων ασφαλείας, με μοναδικό σειριακό αριθμό.

Αντίθετα, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που μπορούν να αποθηκεύσουν δεδομένα έχουν μια ετικέτα που τοποθετείται στην ακτίνα ενός αναγνώστη. Αυτή η ετικέτα περιέχει πληροφορίες για το κύκλωμα. Αυτός ο τύπος κυκλώματος είναι πιο ευέλικτος από αυτά που δεν μπορούν να αποθηκεύσουν δεδομένα, επειδή μπορούν να τροποποιηθούν και να προστεθούν σε αυτά. Ορισμένα κυκλώματα, που ονομάζονται κυκλώματα "WORM", προγραμματίζονται από τον οργανισμό που τα χρησιμοποιεί, αλλά δεν μπορούν να επανεγγραφούν.

Ο ηλεκτρονικός κωδικός προϊόντος (Electronic Product Code, EPC) [36] είναι το πιο κοινό σύνολο δεδομένων που αποθηκεύονται σε μια ετικέτα. Τα EPC κωδικοποιούνται σε ετικέτες RFID, εξαιτίας των οποίων τα αντικείμενα μπορούν να εντοπιστούν και να αναγνωριστούν μοναδικά. Οι ετικέτες RFID κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις (4) διαφορετικούς τύπους όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1. Κατηγορίες RFID [37]**

RFID type	RFID operating frequency
Low frequency (LF)	125 – 134 kHz
High frequency (HF)	13.56 MHz
Ultra high frequency (UHF)	860 – 960 MHz
Microwave frequency	2.45 GHz

### **1.3.2 Institute of Electrical and Electronics Engineers 802.15.4 (IEEE 802.15.4)**

Το IEEE 802.15.4 [38] είναι ένα τεχνικό πρότυπο που καθορίζει τη λειτουργία ασύρματων προσωπικών δικτύων χαμηλού ρυθμού μετάδοσης Low-Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN). Είναι μια τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης χαμηλού κόστους και πολύ χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για συσκευές που λειτουργούν με μπαταρίες. Παρέχει επικοινωνίες σε αποστάσεις έως δέκα (10) μέτρα και με μέγιστους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων 250 kbit/s. Οι κόμβοι αισθητήρων σε αυτό το δίκτυο χρησιμοποιούν μια ζώνη συχνοτήτων χωρίς άδεια για να επικοινωνούν μεταξύ τους. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 καθορίζει τις απαιτήσεις φυσικού επιπέδου και επιπέδου MAC [39] για συσκευές που συμμορφώνονται με τα πρότυπα. Οι εφαρμογές του IEEE 802.15.4 επεκτείνονται σε πολλούς τομείς κάποιοι από τους οποίους είναι τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τα έξυπνα σπίτια με τις αυτοματοποιημένες λειτουργίες.

### **1.3.3 Zensys Wave (Z-Wave)**

Το Z-Wave [39] είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιείται κυρίως για οικιακούς αυτοματισμούς (Home Area Network, HAN), αποκτήθηκε από την Silicon Labs το 2018. Στην Ευρώπη, λειτουργεί στα 868,42 MHz, ενώ στον Καναδά και τις ΗΠΑ χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 908,42 MHz για επικοινωνία. Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται σε έξυπνα σπίτια και δίνει την δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου σε συσκευές όπως, συστήματα ασφαλείας, θερμοστάτες, κλειδαριές και αυτόματες γκαραζόπορτες. Ένα σύστημα Z-Wave ελέγχεται μέσω του Διαδικτύου από tablet ή υπολογιστή ή και ακόμα μέσω ενός ασύρματου μπρελόκ. Η χρήση του παρέχει δύο (2) σημαντικά πλεονεκτήματα: την αυξημένη εμβέλεια και τη μειωμένη παρεμβολή. Μέσω του πρωτοκόλλου Z-Wave τα σήματα ταξιδεύουν σε ζώνες με λιγότερο συνωστισμό με αποτέλεσμα να μην προκύπτουν αρκετές παρεμβολές. Η συγκεκριμένη συχνότητα φορέα σημαίνει ότι η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων είναι χαμηλότερη. Το Z-Wave υποστηρίζει μικρότερα δίκτυα πλέγματος με έως και 232 συσκευές, κάτι που είναι υπεραρκετό για τις περισσότερες εφαρμογές.

### **1.3.4 Long Term Evolution (LTE)**

LTE [40] ονομάζεται μια ασύρματη τεχνολογία τέταρτης γενιάς (4G), που αναπτύσσεται από τον οργανισμό The 3rd Generation Partnership Project (3GPP) η οποία αυξάνει χωρητικότητα και ταχύτητα δικτύου για τηλέφωνα και άλλες συσκευές κινητής τηλεφωνίας συγκρινοντάς την με την τεχνολογία τρίτης γενιάς (3G). Θα χρησιμοποιεί τα δίκτυα GSM/EDGE και UMTS/HSPA σε συνδυασμό με νέες τεχνικές διαμόρφωσης θα αυξηθούν η χωρητικότητα και η ταχύτητα του δικτύου. Το LTE αποτελεί εξέλιξη του GSM/UMTS. Στόχος αυτού του έργου είναι η βελτίωση της απόδοσης των δικτύων με τη χρήση καινοτόμων

ψηφιακών τεχνικών. Το LTE (Long Term Evolution) είναι ένας διαφορετικός τύπος δικτύου που λειτουργεί σε διαφορετικό εύρος συχνοτήτων από τα παλαιότερα δίκτυα. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να μεταφέρει δεδομένα πολύ πιο γρήγορα από τα παλαιότερα δίκτυα. Το εύρος ζώνης του σήματος φορέα μπορεί να κυμαίνεται από 1,4 MHz έως 20 MHz, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποστολή δεδομένων και φωνής μέσω δικτύων παλαιότερης τεχνολογίας όπως το GSM και το UMTS. Η απλούστερη αρχιτεκτονική έχει σχεδιαστεί για να κοστίζει λιγότερο στη λειτουργία..

### **1.3.5 Long Range (LoRa)**

Το LoRa [41] είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας που μπορεί να στείλει μηνύματα έως και δέκα χιλιόμετρα μακριά, με πολύ μικρή ισχύ. Εφευρέθηκε από τη Semtech το 2012 και χρησιμοποιείται σε διάφορα μέρη του κόσμου ανάλογα με το ποια ζώνη συχνοτήτων είναι η καταλληλότερη για την περιοχή. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το LoRa λειτουργεί στην περιοχή των 915 MHz, ενώ στην Ευρώπη χρησιμοποιεί τη συχνότητα των 868 MHz. Επιπλέον, το LoRa χρησιμοποιείται επίσης σε άλλες περιοχές σε όλο τον κόσμο, συμπεριλαμβανομένων των 169MHz και 433MHz..

Η τεχνολογία LoRa της Semtech χρησιμοποιείται σε πολλές έξυπνες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης ενέργειας, της μείωσης των φυσικών πόρων, του ελέγχου της ρύπανσης, της αποδοτικότητας των υποδομών και άλλων.

Το LoRa είναι ένας τύπος ασύρματης τεχνολογίας που δεν απαιτεί σύνδεση δικτύου όπως άλλες τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας. Αυτό το καθιστά ευκολότερο και φθηνότερο στη χρήση, γι' αυτό μερικές φορές χρησιμοποιείται σε μικρότερα δίκτυα.

### **1.3.6 Near-Field Communication (NFC)**

Το NFC (Επικοινωνία κοντινού πεδίου) [42] αποτελεί μια πρότυπη τεχνολογία συνδεσιμότητας παρόμοια με το RFID. Είναι μια μικρής εμβέλειας ασύρματη τεχνολογία που λειτουργεί σε αποστάσεις περίπου τέσσερα (4) εκατοστά. Πάντα υπάρχει ένας αποστολέας και ένας δέκτης. Το NFC θεωρείται ως ένα μοναδικό είδος συσκευής ραδιοεπικοινωνίας που ενεργοποιείται σε φορητές συσκευές και επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ δύο συσκευών, ενώ μπορεί να χειριστεί πολύ περισσότερα δεδομένα σε σχέση με την τεχνολογία RFID.

Από τεχνική άποψη, το NFC λειτουργεί εντός αδειοδοτημένης ζώνης ραδιοσυχνοτήτων 13,56 MHz. Το εύρος λειτουργίας εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της κεραίας μέσα στη συσκευή. Το NFC είναι ένας ασύρματος σύνδεσμος μικρής εμβέλειας, χαμηλής ισχύος που αναπτύχθηκε από το RFID και μπορεί να μεταφέρει μικρές ποσότητες δεδομένων μεταξύ δύο συσκευών που βρίσκονται κοντά. Σε αντίθεση με το Bluetooth, δεν απαιτείται ανάλυση

πριν από την πραγματική μεταφορά δεδομένων. Το NFC είναι τεχνολογία που επιτρέπει σε δύο έξυπνα αντικείμενα την επικοινωνία μεταξύ τους, και αυτό δεν μπορεί να γίνει από απόσταση.

Η τεχνολογία NFC συνεισφέρει στο να γίνει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) πιο πρακτικό και χρήσιμο. Επιτρέπει στην σύνδεση έξυπνων αντικειμένων ασύρματα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, όπως πληρωμές, έκδοση εισιτηρίων, έξυπνες κάρτες και ανταλλαγή δεδομένων. Η τεχνολογία NFC είναι κοινή σε κινητά τηλέφωνα, τα οποία διαθέτουν επεξεργαστή, πρόσβαση στο διαδίκτυο και διαδραστική διεπαφή (πληκτρολόγιο και οθόνη αφής).

### **1.3.7 Ultra-Wide Band (UWB)**

Το UWB είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας το οποίο χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για να επιτρέπει στις συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους. Είναι παρόμοια τεχνολογία με το Bluetooth αλλά πιο αξιόπιστη, ακριβής και αποτελεσματική. Μεταδίδει δεδομένα σε μικρές αποστάσεις και προσδιορίζει με ακρίβεια τη θέση υπολογίζοντας το χρόνο που χρειάζεται για να ταξιδέψει ένας ραδιοπαλμός μεταξύ των συσκευών. Η UWB τεχνολογία χρησιμοποιείται σε εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές για τον καθορισμό αποστάσεων ανάμεσα σε αντικείμενα, στην ανίχνευση αντικειμένων και καταστάσεων δια μέσου οικοδομών, σε συστήματα ασφαλείας και σε ιατρικά συστήματα. Επίσης εφαρμόζεται σε τηλεοράσεις, στο internet, στους υπολογιστές, σε κανάλια εγγραφής και ραντάρ, σε ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και φορητά ασύρματα τοπικά δίκτυα και σε κρυπτογραφημένες επικοινωνίες.

### **1.3.8 Machine to Machine (M2M)**

Ο όρος “Μηχανή σε μηχανή” (M2M) [43] αναφέρεται στις άμεσες ασύρματες ή ενσύρματες επικοινωνίες μεταξύ συσκευών, είτε πρόκειται για υπολογιστές, ενσωματωμένους επεξεργαστές, έξυπνους αισθητήρες, ενεργοποιητές είτε πρόκειται για συσκευές κινητών τηλεφώνων, έτσι ώστε να μπορούν να ανταλλάσσονται πληροφορίες και να εκτελούνται λειτουργίες χωρίς ανθρώπινη βοήθεια. Η χρήση της επικοινωνίας M2M αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό τα τελευταία χρόνια. Για παράδειγμα, οι ερευνητές προέβλεψαν ότι μέχρι το έτος 2025, θα υπάρχουν 2,8 δισεκατομμύρια ασύρματες συνδεδεμένες συσκευές (εξαιρούνται τα κινητά τηλέφωνα). Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται ευρέως σε μεταποιητικά και βιομηχανικά περιβάλλοντα, κυρίως στους τομείς της ιατρικής, του εμπορίου και της ασφάλισης. Υπάρχουν συνολικά πέντε (5) βασικά στοιχεία της τεχνικής επικοινωνίας M2M: Ανίχνευση, Ετερογενής πρόσβαση, Επεξεργασία πληροφοριών, Εφαρμογές και Υπηρεσίες.

Το M2M είναι μια δομή που αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:

- Συσκευή M2M: Μια συσκευή ικανή να απαντήσει σε αιτήματα δεδομένων που περιέχει.
- Δίκτυο περιοχής M2M (τομέας συσκευής): Παρέχετε δυνατότητα σύνδεσης μεταξύ συσκευών M2M και πυλών M2M.
- M2M Gateway: Χρησιμοποιεί δυνατότητες M2M για να διασφαλίσει ότι οι συσκευές M2M λειτουργούν και διασυνδέονται μέσω ενός δικτύου επικοινωνίας.
- Δίκτυα Επικοινωνίας M2M (Τομέας Δικτύου): Επικοινωνίες μεταξύ των πυλών M2M και των εφαρμογών M2M.
- Εφαρμογές M2M: Είναι το ενδιάμεσο επίπεδο όπου τα δεδομένα περνούν από διάφορες υπηρεσίες εφαρμογών και χρησιμοποιούνται από τις συγκεκριμένες μηχανές επεξεργασίας επιχειρήσεων.

### **1.3.9 IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN)**

Το 6LoWPAN [44] είναι ένα πρωτόκολλο δικτύου στο οποίο καθορίζονται μηχανισμοί ενθυλάκωσης και συμπίεσης κεφαλίδων (encapsulation and header compression mechanisms). Λόγω του μεγάλου εύρους στη ζώνη συχνοτήτων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλαπλές πλατφόρμες επικοινωνίας, συμπεριλαμβανομένων των Ethernet, Wi-Fi, 802.15.4 και ISM sub-1GHz. Στόχος του 6LoWPAN είναι η αποστολή και η παραλαβή των IPv6 (πρωτόκολλο Internet έκδοση 6) πακέτων από τα προσωπικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα από τα δίκτυα τα οποία βασίζονται στο IEEE 802.15.4.

Είναι ένα απλό χαμηλού κόστους επικοινωνιακό δίκτυο το οποίο επιτρέπει ασύρματη συνδεσιμότητα στις εφαρμογές με περιορισμένη ενέργεια. Αποτελείται από συσκευές χαμηλού κόστους και χαμηλής ενέργειας. Οι συσκευές στο δίκτυο δουλεύουν μαζί με σκοπό να συνδέσουν το φυσικό περιβάλλον με τις εφαρμογές πραγματικού κόσμου, για παράδειγμα, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η συγκεκριμένη τεχνολογία εφαρμόζεται κυρίως σε “έξυπνα σπίτια” ή σε συστήματα αυτοματισμού κτιρίων, παρέχει έναν βασικό μηχανισμό μεταφοράς και διαχείρισης πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών με χαμηλό κόστος, μέσω ασύρματης υποδομής χαμηλής ισχύος.

Στον Πίνακα 2 απεικονίζονται οι διαφορές μεταξύ των προαναφερθέντων τεχνολογιών επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στο IoT (βάσει προτύπου, έτους ανακάλυψης, ταχύτητας αποστολής/λήψης δεδομένων, μέτρα εμβέλειας και εύρος συχνότητας λειτουργίας σε MHz).

**Πίνακας 2. Διαφορά συχνοτήτων και απόστασης που καλύπτονται από διάφορες τεχνολογίες, που χρησιμοποιούνται στο IoT για επικοινωνία [45]**

Technology	Standard	Year of discovery	Downlink/Uplink	Range (in meters)	Operating frequency (in MHz)
RFID	Wireless	1973	100 kbps	2	0.125-5876
IEEE 802.15.4	6LoWPAN	2003	250 kbps	30	826 & 915
Z-Wave	Wireless	2013	100 kbit/s	30	868.42 & 908.42
LTE	3GGP, LTE and 4G	1991	100 Mbps	35	400-1900
LoRa	Wireless	2012	0.3 37.5(kb/s)	3000 - 5000	169, 433 & 868 (Europe) & 915 (North America)
NFC	ISO 18092	2004	106, 212 or 424Kbits	< 0.2	13.56
UBW	IEEE 802.15.3	2002	11 – 55 Mbps	10 - 30	2400
M2M	Open to all communication protocols	1973	50 – 150 Mbps	5 – 20	1 - 20
6LoWPAN	Wireless	2006	250 kbps	30	915

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Γεωργία**

Η Γεωργία είναι η διαδικασία διαχείρισης της γης και των καλλιεργειών για την παραγωγή τροφίμων. Περιλαμβάνει την καλλιέργεια φυτών και τη συγκομιδή των προϊόντων τους, όπως δημητριακά, φρούτα και λαχανικά. Μερικές φορές αναφέρεται και στην καλλιέργεια φυκιών στη θάλασσα. Στη Γεωργία περιλαμβάνονται επίσης η διαδικασία συλλογής και η αρχική επεξεργασία αυτών των προϊόντων. Θεωρείται τμήμα της ελαφριάς βιομηχανίας, επειδή παράγει προϊόντα άμεσης χρήσης από τον άνθρωπο και τα ζώα ή προορίζονται σαν εναλλακτική πηγή ενέργειας ως βιοκαύσιμα.

Η γεωργία είναι ένα σύστημα που προσπαθεί να προσαρμοστεί και να λειτουργήσει σε ένα περιοριστικό περιβάλλον στο οποίο οι ιδανικές συνθήκες δεν είναι πάντα διαθέσιμες. Το έδαφος, η εργασία και το κεφάλαιο αποτελούν συντελεστές παραγωγής οι οποίοι δεν βρίσκονται πάντα σε επάρκεια. Το βέλτιστο αποτέλεσμα στην Γεωργία είναι δύσκολο να επιτευχθεί διότι μια σειρά από εξωγενείς παράγοντες όπως μορφολογία εδάφους, μετεωρολογικές συνθήκες, η ανάπτυξη και η ανθεκτικότητα στα φυτοφάρμακα των εχθρών και των ασθενειών των καλλιεργειών λειτουργούν περιοριστικά.

### **2.1 Γεωργία Ακριβείας**

Αποτελεί εξέλιξη της κλασικής γεωργίας που χρησιμοποιεί τεχνολογία πληροφοριών μέσω της οποίας διασφαλίζεται ότι οι καλλιέργειες και το έδαφος λαμβάνουν την κατάλληλη ποσότητα στο κατάλληλο χρόνο για μέγιστη παραγωγικότητα και υγεία.

Η γεωργία ακριβείας είναι επίσης γνωστή ως δορυφορική γεωργία ή διαχείριση καλλιεργειών συγκεκριμένης περιοχής. Έχει στόχο να διασφαλίσει την αποδοτικότητα, τη βιωσιμότητα και την προστασία του περιβάλλοντος μέσω αλλαγών στις παραδοσιακές τεχνικές και τις μεθοδολογίες εκτέλεσης γεωργικών δραστηριοτήτων.

Αντίθετα με τις παραδοσιακές μεθόδους αγροτικής παραγωγής, όπου τα αγροτεμάχια αντιμετωπίζονται συνολικά, με ίδιες ιδιότητες και γονιμότητα εδάφους, παρόμοια υγρασία εδάφους, πληθυσμούς καταστροφικών ζιζανίων και χαρακτηριστικά φυτών, η γεωργία ακριβείας ομαδοποιεί τα αγροτεμάχια, σε σχέση με την ομοιομορφία που εμφανίζουν, κατορθώνοντας έτσι να εναρμονισθεί με την πραγματικότητα.





Τα συστήματα Ευφυούς Γεωργίας κατατάσσονται σε τρεις (3) βασικές κατηγορίες:

- **Πληροφοριακά συστήματα ελέγχου:** Συστήματα για αυτόματη συλλογή, επεξεργασία, αποθήκευση και μετάδοση δεδομένων σε κατάλληλους δέκτες για υλοποίηση αυτοματοποιημένων εργασιών.
- **Γεωργία Ακριβείας:** Σύστημα διαχείρισης αγροτικών εκτάσεων με εφαρμογή το έτος 1990 και το οποίο βασίστηκε στις δυνατότητες του Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System, GPS) [48]. Σε αντίθεση με τη συμβατική γεωργία η οποία θεωρεί ενιαία τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τις ανάγκες των φυτών δίνει τη δυνατότητα στον αγρότη να μεταβάλλει την καλλιεργητική τακτική που εφαρμόζει ανά τμήμα του αγρού ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψιν τις πραγματικές ανάγκες του αγροκτήματος.
- **Γεωργικοί αυτοματισμοί και ρομποτική:** Εφαρμογή αυτοματισμών, προγραμματιστικών ελέγχων και τεχνητής νοημοσύνης σε κάθε επιμέρους τμήμα της γεωργικής παραγωγής.

Οι εφαρμογές Ευφυούς Γεωργίας δεν έχουν σαν αποκλειστικό στόχο τα μεγάλα γεωργικά εδάφη. Από τα οφέλη τους μπορούν να επωφεληθούν και μικρότερες αγροτικές επιχειρήσεις με σκοπό την αύξηση της κερδοφορίας και την βελτίωση της ανταγωνιστικότητάς τους. Ο πρωτογενής τομέας της γεωργίας ενισχύεται από την ευφυή γεωργία η οποία έχει κερδίσει τον σεβασμό του καταναλωτή προσφέροντας ποιότητα και ποσότητα με χαμηλότερες τιμές στα προϊόντα. Ταυτόχρονα ευνοείται και το περιβάλλον με την ορθή διαχείριση πόρων, όπως το νερό, υιοθέτηση βέλτιστων αγροτικών πρακτικών και μειωμένη χρήση φυτοφαρμάκων.

Οι ερευνητές που εργάζονται στον τομέα της Γεωργίας Ακριβείας έχουν διατυπώσει θεωρίες και εφαρμόζουν πρακτικές που ενσωματώνουν έξυπνες συσκευές προκειμένου να αξιολογήσουν τις παραμέτρους που συμβάλλουν στην ανάπτυξη των φυτών και σύμφωνα με τις παρατηρήσεις, εκτελούνται οι γεωργικές δραστηριότητες.

Μερικές από τις σπουδαιότερες μελέτες αναφορικά με αυτόν τον τομέα είναι οι παρακάτω:

- Οι ερευνητές με τη μελέτη τους [49], προέβλεψαν τα οφέλη από την εκτέλεση γεωργικών δραστηριοτήτων στο πλαίσιο μιας τεχνολογίας θερμοκηπίου. Ιδιαίτερα τονίστηκε τη σημασία της ενσωμάτωσης του ελέγχου διαμέσου δικτύων πληροφοριών. Προτάθηκε ένα πλαίσιο που συνδυάζει ένα Σύστημα Απομακρυσμένης Παρακολούθησης (Remote Monitoring and Management, RMM) [50] μέσω Διαδικτύου αξιοποιώντας ασύρματες επικοινωνίες. Η μελέτη των δεδομένων που προέκυψαν, έδειξε ότι το θερμοκήπιο που εφαρμόζει IoT τεχνολογίες

λειτουργεί αποδοτικότερα (καλή ανάπτυξη και υγεία των φυτών) από τα παραδοσιακά θερμοκήπια ή τα ανοιχτά πεδία (open fields).

- Οι συγγραφείς στην ερευνά τους [51], επισημαίνουν ότι το Διαδίκτυο των πραγμάτων μεταμόρφωσε τον αγροτικό τομέα και επέτρεψε στους αγρότες να ανταγωνίζονται με επιτυχία τα τεράστια προβλήματα που αντιμετωπίζουν. Οι εφαρμογές που εξετάζονται αφορούν την ανίχνευση των καλλιεργειών, τη χαρτογράφηση και την παρακολούθηση του προτύπου των καλλιεργειών, τη διαχείριση και τον έλεγχο με τη βοήθεια αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων και παρακολούθησης του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο. Χρησιμοποιήθηκαν ασύρματοι αισθητήρες χαμηλής ισχύος για τη καλύτερη συνδεσιμότητα, λειτουργική απόδοση και απομακρυσμένη διαχείριση. Η μελέτη των δεδομένων που προέκυψαν έδειξε ότι η ασφάλεια είναι η κύρια απειλή στις εφαρμογές IoT και πρέπει να βελτιωθεί μέσω του κατάλληλου ελέγχου πρόσβασης, της εμπιστευτικότητας των δεδομένων και του ελέγχου ταυτότητας χρήστη.
- Η μελέτη [52], τονίζει τη σημασία των γεωργικών συστημάτων ακριβείας στη βελτίωση των γεωργικών δραστηριοτήτων. Στη μελέτη αυτή έχει προταθεί ένα έξυπνο Σύστημα Διαχείρισης Γεωργίας (Smart Farm Management System, FMS).
- Η μελέτη [53], ανέδειξε τα ζητήματα που αφορούν τη γεωργία. Επικεντρώθηκε στα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο γεωργικός εκσυγχρονισμός και πρότεινε την χρήση τεχνολογιών IoT και τεχνικών υπολογιστικού νέφους για την εκτέλεση γεωργικών δραστηριοτήτων. Οι τεχνολογίες Service-oriented Architecture (SOA) [54] και RFID ενσωματώθηκαν επίσης στη μελέτη.  
Το SOA είναι ένα αρχιτεκτονικό μοντέλο για την εφαρμογή χαλαρών συζευγμένων εφαρμογών που βασίζονται σε υπηρεσίες. Πολλοί καταναλωτές μπορούν να καταναλώνουν μία μόνο υπηρεσία και το αντίστροφο.
- Ο ερευνητής στη μελέτη του [55], απεικόνισε την έλευση των τεχνικών Wireless sensor network (WSN) [56] που οδηγούν την έρευνα στον τομέα της γεωργίας σε νέα κατεύθυνση. Η μελέτη ανέδειξε πιθανές εφαρμογές WSN σε συνδυασμό με διάφορες προκλήσεις και θέματα που έχουν σχέση με την ανάπτυξη του WSN, για βελτιωμένη γεωργία.
- Η μελέτη [57], τονίζει τις δυνατότητες της χρήσης Φωτοσυνθετικών αισθητήρων Ενεργής Ακτινοβολίας (Photosynthetically Active Radiation, PAR) [58].  
Η φωτοσυνθετικά Ενεργή Ακτινοβολία (PAR) είναι η ποσότητα φωτός η οποία είναι διαθέσιμη για φωτοσύνθεση από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς. Είναι φως στην περιοχή μήκους κύματος από 400 έως 700 νανόμετρα (nm). Μεταβάλλεται αναλόγως την εποχή και ποικίλλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την ώρα της

ημέρας. Τα επίπεδα της είναι μεγαλύτερα το καλοκαίρι και κυρίως τις μεσημεριανές ώρες.

Σύμφωνα με τη μελέτη μέσω της χρήσης Φωτοσυνθετικών αισθητήρων Ενεργής Ακτινοβολίας ενισχύονται σημαντικά οι πιθανές επιδόσεις της τεχνολογίας WSN για μη καταστρεπτική επιτόπια αξιολόγηση του δείκτη Leaf Area Index (LAI) [59]. Η μελέτη έχει σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιρροές, όπως η άμεση ηλιακή ακτινοβολία και τα φαινόμενα σκέδασης (πολλαπλή ανάκλαση) με την αναβάθμιση αισθητήρων και τη χρήση εφαρμογών που βασίζονται σε απλοποιημένα μοντέλα μετάδοσης φωτός με τη βοήθεια θόλων.

- Οι ερευνητές στη μελέτη τους [60], αναπτύσσουν και δοκιμάζουν μια πλατφόρμα δικτύου αισθητήρων/ενεργοποιητών χαμηλού κόστους, που βασίζεται στο Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), ενσωματώνοντας πρωτόκολλα διασύνδεσης μηχανής με μηχανή (M2M) και ανθρώπου-μηχανής (Human-Machine). Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκε ένα θερμοκήπιο υδροπονικής φυτικής παραγωγής πλήρως ελεγχόμενο από ένα δίκτυο αισθητήρων και της τεχνολογίας IoT. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι IoT τεχνολογίες και τα πρότυπα επικοινωνίας έξυπνων αντικειμένων μπορούν να συνδυαστούν για να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη της γεωργίας ακριβείας.
- Η μελέτη [61], έχει σαν σκοπό τη διαχείριση του τεράστιου όγκου δεδομένων απόδοσης καλλιεργειών με τη βοήθεια αναδυόμενων τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων, όπως συσκευές IoT (π.χ. ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, συνδεδεμένοι μετεωρολογικοί σταθμοί, κάμερες και έξυπνα τηλέφωνα (smartphones)). Επιπλέον, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός του SmartFarmNet [62], μιας πλατφόρμας βασισμένης στο IoT με δυνατότητα αυτόματης συλλογής δεδομένων από το περιβάλλον, το έδαφος, λίπανσης και άρδευσης. Το SmartFarmNet μπορεί να ενσωματώσει σχεδόν οποιαδήποτε συσκευή IoT, συμπεριλαμβανομένων αισθητήρων εμπορίου, καμερών, μετεωρολογικών σταθμών κ.λπ., και να αποθηκεύσει τα δεδομένα τους στο cloud για ανάλυση απόδοσης και αξιολόγησης τους.
- Οι ερευνητές στο επιστημονικό τους άρθρο [63], τόνισαν τη σημασία των διαφόρων τεχνικών που είναι διαθέσιμες στη γεωργία ακριβείας για να βοηθήσουν τους αγρότες να διαχειριστούν τη χωρική και χρονική μεταβλητότητα της καλλιέργειας και του εδάφους σε μια γεωργική έκταση προκειμένου να αυξηθεί η κερδοφορία, να βελτιστοποιηθεί η απόδοση και η ποιότητα ενώ ταυτόχρονα να μειωθεί το κόστος. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης προσφέρουν πολλαπλά οφέλη ενώ ταυτόχρονα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν οδηγοί για την περαιτέρω διάδοση των τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας και της επιστημονικής έρευνας.

- Η μελέτη [64], επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη πρακτικών εργασιών, που κυμαίνονται από τη πρόβλεψη συγκομιδής έως και την ανακατασκευή δεδομένων αισθητήρων που είτε λείπουν είτε έχουν παράξει λανθασμένα αποτελέσματα. Αξιοποιώντας και συγκρίνοντας διάφορες τεχνικές μηχανικής μάθησης προτείνονται κατευθύνσεις για νέες προσπάθειες και επενδύσεις. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έδειξε πώς υπάρχουν περιθώρια για καινοτομία, ενώ ταυτόχρονα υποστηρίζονται αιτήματα και ανάγκες που προέρχονται από εταιρείες που επιθυμούν μια βιώσιμη και βελτιστοποιημένη γεωργική βιομηχανική επιχείρηση, επενδύοντας όχι μόνο στην τεχνολογία, αλλά και στη γνώση και στο εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό. Η μελέτη απεικονίζει επίσης πώς οι παραγωγικές εταιρείες (μεγάλης ή μικρής κλίμακας, δημόσιες ή ιδιωτικές) αναζητούν την αύξηση της κερδοφορίας μέσω της μείωσης του κόστους, αναζητώντας κατάλληλους τρόπους εκμετάλλευσης δεδομένων που καταγράφονται και διατίθενται συνεχώς με σκοπό να πετύχουν τους υποκειμενικούς τους στόχους. Η μελέτη πρότεινε τη χρήση μοντέλων Neural network, Linear model [65] and Polynomial Regression Machine Learning [66] για τη λήψη αποφάσεων και το χειρισμό δεδομένων.
- Στο άρθρο [67], τονίζεται ότι η ταχεία ανάπτυξη της χρήσης έξυπνων κινητών τηλεφώνων στις αναπτυσσόμενες γεωργικές χώρες είχε πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες εναλλακτικές λύσεις όσον αφορά την πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικές με τη γεωργία. Επιπλέον επισημαίνεται ότι οι περισσότεροι αγρότες πρότειναν τη χρήση smartphones για την απόκτηση πληροφοριών σχετικά με υλικοτεχνική υποστήριξη και κάλυψη άλλων γεωργικών αναγκών στα μέσα της παραγωγικής περιόδου.

### 2.1.1 Φυτοπροστασία της καλλιέργειας μέσω Ευφυούς Γεωργίας

Η Ευφυή Γεωργία εγγυάται τη σωστή φυτοπροστασία μιας καλλιέργειας προτείνοντας μία συγκεκριμένη διαδικασία:

- Δημιουργία εδαφικών και κλιματικών ζωνών (έδαφος με κοινά χαρακτηριστικά και μικροκλίμα) έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα παρατήρησης επικίνδυνων αλλαγών ή φαινομένων και άμεση αντιμετώπισή τους.
- Τοποθέτηση τηλεμετρικών φακών στις ζώνες, για μέτρηση της υγρασίας τόσο του αέρα όσο και του εδάφους, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της κατάστασης των φυτών, που δίνουν την δυνατότητα της αναγνώρισης των ασθενειών και των εχθρών της καλλιέργειας με μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Τοποθέτηση παγίδων σε επιλεγμένα σημεία του αγρού.
- Άμεση διενέργεια μετρήσεων από τον αρμόδιο Γεωργικό Σύμβουλο.
- Προσαρμογή κατάλληλου μοντέλου φυτοπροστασίας στην έκταση που φιλοξενεί το συγκεκριμένο σύστημα.

### 2.1.2 Ζώνες Διαχείρισης στην Ευφυή Γεωργία

Ένα σύστημα ευφυούς γεωργίας στηρίζεται στη διαμόρφωση ζωνών διαχείρισης, οι οποίες έχουν ως στόχο την εφαρμογή των εισροών (φυτοφάρμακα, λιπάσματα, αρδευτικό νερό) ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε ζώνης. Τα βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν οι ζώνες διαχείρισης είναι:

- Διαχρονικότητα.
- Ευκολία στην εφαρμογή ορίων.
- Συσχέτιση με την παραγωγή.
- Χαμηλό κόστος δημιουργίας.

Η δημιουργία των ζωνών διαχείρισης βασίζεται στην αξιολόγηση όλων των διαθέσιμων πληροφοριών για τον αγρό, όπως:

- Ιδιότητες του εδάφους.
- Διαχειριστικές δυνατότητες του παραγωγού.
- Πιθανό κέρδος.

Ο αριθμός των ζωνών διαχείρισης ενός αγρού εξαρτάται από:

- Το μέγεθος του.
- Την παραλλακτικότητα του.

Το ελάχιστο μέγεθος των ζωνών διαχείρισης καθορίζεται από τη δυνατότητα διαφοροποίησης των εισροών σε έναν αγρό από τον παραγωγό. Αυτό συνήθως εξαρτάται από τον μέγεθος του εξοπλισμού που χρησιμοποιεί. Αντίθετα τα περιθώρια του αγρού

καθορίζουν το μέγιστο μέγεθος των ζωνών διαχείρισης. Για τη δημιουργία των ζωνών διαχείρισης χρησιμοποιούνται διάφορες πληροφορίες όπως φαίνεται παρακάτω:

- Αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες του αγρού με βλάστηση και χωρίς βλάστηση.
- Περίγραμμα του αγρού.
- Τοπογραφικοί, εδαφικοί και χάρτες παραγωγής.
- Δείκτες βλάστησης.
- Δεδομένα από εδαφολογικές αναλύσεις.
- Ελάχιστο μέγεθος ζώνης.
- Ανωμαλίες του αγρού.
- Πιθανές προσβολές από έντομα.
- Περιοχές στράγγισης.

Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθούν στοιχεία αναφορικά με το ιστορικό του αγρού όπως:

- Θέσεις παλαιών δρόμων, κτισμάτων.
- Χάρτες που δείχνουν τη διέλευση των οχημάτων στο παρελθόν.
- Καλλιέργειες και λίπανση των προηγούμενων ετών.
- Κάλυψη άρδευσης.
- Περιοχές του αγρού που συγκρατούν μεγάλη υγρασία.
- Περιοχές του αγρού που έχουν υποστεί διάβρωση.

Οι γνώσεις που χρειάζονται για τη δημιουργία ζωνών διαχείρισης είναι:

- Αγρονομικές.
- Διαχειριστικές και οικονομικές.
- Ιστορικό του αγρού.
- Δυνατότητες και περιορισμοί αναφορικά με τη χρήση του εξοπλισμού.

### 2.1.3 Οφέλη της Ευφυούς Γεωργίας

- **Χαμηλότερο κόστος παραγωγής:** Η αυτοματοποιημένη διαδικασία διαχείρισης τόσο της φυτικής όσο και της ζωικής παραγωγής έχει σαν αποτέλεσμα το χαμηλότερο κόστος παραγωγής.
- **Αυξημένη παραγωγή:** Η αποτελεσματικότερη φύτευση σε συνδυασμό με την αύξηση της φυτοπροστασίας από την χρήση κατάλληλων προϊόντων και η συγκομιδή αυξάνουν τις αποδόσεις.
- **Καλύτερη ποιότητα:** Η ολοκληρωμένη γνώση των διαδικασιών παραγωγής και της ποιότητας δίνουν την δυνατότητα στους παραγωγούς να προσαρμόζουν και να ενισχύουν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των προϊόντων τους καθώς και τη θρεπτική τους αξία.
- **Ευφυής λίπανση:** Η ακριβής παροχή των θρεπτικών στοιχείων (μακροστοιχείων, μικροστοιχείων, ιχνοστοιχείων) [68], την κατάλληλη χρονική περίοδο και με συγκεκριμένο τρόπο, αποτελεί στόχο της ευφυούς γεωργίας. Η δημιουργία οδηγιών για λίπανση ακριβείας στους παραγωγούς απαιτεί σωστή δειγματοληψία του εδάφους και εργαστηριακή ανάλυση του (pH, οργανική ουσία, μακροστοιχείων και ιχνοστοιχείων).
- **Ευφυής φυτοπροστασία:** Δίνεται η δυνατότητα στον παραγωγό να γνωρίζει, για κάθε τμήμα του αγρού, αν υπάρχουν οι προϋποθέσεις για την ανάπτυξη κάποιας ασθένειας ή προσβολής από κάποιο καταστροφικό για την παραγωγή εχθρό.
- **Άρδευση Ακριβείας:** Τα δεδομένα υγρασίας από αισθητήρες εδάφους και από την πρόγνωση του καιρού δίνουν την δυνατότητα για μείωση στην κατανάλωση αρδευτικού νερού. Η αποτελεσματική λήψη μέτρων και ενεργειών από τον παραγωγό σε συνδυασμό με τις κατάλληλες συμβουλές από γεωπόνους μπορεί να οδηγήσει σε ορθολογική χρήση του αρδευτικού νερού. Η διατήρηση της παραγωγής σε υψηλά επίπεδα, απαιτεί τη γνώση σχετικά με τις επιπτώσεις της έλλειψης νερού στην καλλιέργεια, τον εντοπισμό των σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας που είναι ευαίσθητα σε νερό και δίνει την δυνατότητα εφαρμογής ελλειμματικής άρδευσης, η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιόδους λειψυδρίας.



**Εικόνα 14. Αισθητήρες καταγραφής της υγρασίας του εδάφους [69]**

#### **2.1.4 Εφαρμογές Global Positioning System (GPS) στην Ευφυή Γεωργία**

Στην Ευφυή Γεωργία, η γνώση της κίνησης ενός οχήματος στον αγρό σε πραγματικό χρόνο είναι ιδιαίτερα σημαντική, αυτό υλοποιείται μέσω του συστήματος GPS το οποίο είναι ένα παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης, σταθερού ή κινούμενου στόχου, το οποίο στηρίζεται σε πληροφορίες που λαμβάνονται σύγχρονα από εικοσιτέσσερις δορυφόρους, εφοδιασμένους με εξειδικευμένες συσκευές εντοπισμού που ονομάζονται πομποδέκτες GPS.

Οι πομποδέκτες αυτοί μεταδίδουν αναλυτικές πληροφορίες σχετικές με τη ακριβή θέση κάποιου γεωγραφικού σημείου όπως: υψόμετρο και εάν κινείται ταχύτητα και κατεύθυνση. Υπάρχουν αρκετές εφαρμογές GPS που χρησιμοποιούνται στην Ευφυή Γεωργία όπως:

- Κατασκευή περιγράμματος αγρών.
- Παρακολούθηση καλλιεργειών.
- Σύνδεση με τα σημεία του αγρού.
- Δημιουργία εδαφικών χαρτών.
- Χαρτογράφηση παραγωγής.

Ο εξοπλισμός αποτελείται από έναν δέκτη GPS ή Differential GPS (DGPS) [70], έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή (συνήθως φορητό) για αποθήκευση των πληροφοριών και ειδική εφαρμογή για τη υλοποίηση και εμφάνιση χαρτών.

Το όχημα που κινείται στον αγρό χρησιμοποιείται σαν βάση για το δέκτη GPS και την κεραία του. Για να δημιουργήσει περίγραμμα του αγρού ο καλλιεργητής οδηγεί το όχημα και καταγράφει τα δεδομένα GPS στο αποθηκευτικό μέσο.



Με την ίδια διαδικασία καταγράφονται κατά τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου οι προβληματικές περιοχές (ζιζάνια, ασθένειες ή προβλήματα με τροφοπενίες [71]). Με τον τρόπο αυτό ο καλλιεργητής έχει τη δυνατότητα να εφαρμόσει τα κατάλληλα αγροχημικά [72] ή να φροντίσει με άλλο τρόπο τη καλλιέργεια σε μεταγενέστερο χρόνο.

Για τη χαρτογράφηση του εδάφους, λαμβάνονται δείγματα και καταγράφεται η θέση τους από το GPS και αφού γίνει η εργαστηριακή ανάλυση τους, δημιουργούνται οι ανάλογοι χάρτες. Για τη χαρτογράφηση της παραγωγής, το GPS σε συνεργασία με κατάλληλους αισθητήρες μπορεί να παρακολουθεί την παραγωγή σε κάθε σημείο του αγρού και να δημιουργήσει τους αντίστοιχους χάρτες.

Το GPS μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για την πλοήγηση και την ασφαλή μετακίνηση ενός οχήματος στον αγρό. Στην Ευφυή Γεωργία εφαρμόζονται αυτόματα συστήματα πλοήγησης τα οποία έχουν τη δυνατότητα να διατηρούν διάφορα μέσα (τρακτέρ, φορτηγά ακόμα και αεροπλάνα) σε ασφαλείς παράλληλες διαδρομές στον αγρό χωρίς να αφήνουν κενά ή επικαλύψεις μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό, δίνεται η δυνατότητα εφαρμογής χημικών στις καλλιέργειες χωρίς την ύπαρξη κενών ή επικαλύψεων που οδηγούν σε υπερ-εφαρμογές με συνέπεια την καταστροφή των φυτών και τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

### **2.1.5 Μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Drones)**

Η χρήση της τεχνολογίας των Drones [73], κάνει την ευφυή γεωργία “εξυπνότερη”. Τα συγκεκριμένα αεροχήματα έχουν τη δυνατότητα να δίνουν πληροφορίες για τη δομή και τη γεωγραφία του εδάφους στους αγρότες, συλλέγοντας δεδομένα από ένα πεδίο με τη χρήση συστήματος 3D χαρτογράφησης.

Τα drones ή αλλιώς πολυκόπτερα είναι μη επανδρωμένα ιπτάμενα τηλεχειριζόμενα οχήματα με πετούν αυτόνομα. Μερικά από αυτά είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες θερμότητας και έχουν την ικανότητα να εντοπίζουν την υγρασία και να ενημερώνουν άμεσα τους αγρότες για την άρδευση κάποιας περιοχής.

Η κάμερα που φέρουν έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει μία λήψη ανά δευτερόλεπτο, την αποθηκεύει προσωρινά στη μνήμη και την αποστέλλει σε σταθμό εδάφους με χρήση τηλεμετρίας [74].

Υπάρχουν drones πολλαπλών χρήσεων τα οποία δίνουν στους αγρότες ολοκληρωμένη εικόνα για την υγεία των καλλιεργειών τους χάρη στο Κανονικοποιημένο Δείκτη Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) [75].

Επιπλέον τα drones τραβώντας εικόνες της παρατηρούμενης περιοχής έχουν τη δυνατότητα να δίνουν στους αγρότες πληροφορίες για την κατάσταση των καλλιεργειών τους σε πραγματικό χρόνο.

Μπορούν ακόμα να ειδοποιήσουν τον αγρότη άμεσα για παράσιτα και μολύνσεις της καλλιέργειας του δίνοντας του τη δυνατότητα έγκαιρη αντιμετώπιση του προβλήματος.

Τα φυτοφάρμακα παρόλο που αποδεδειγμένα αποτελούν κίνδυνο για το περιβάλλον, πολλές φορές είναι η μόνη επιλογή που έχουμε για την προστασία των καλλιεργειών.

Η χρήση των drones για ψεκασμό χημικών ουσιών βοηθάει το περιβάλλον και τους ίδιους τους καλλιεργητές διότι αυτά τα αεροχήματα έχουν την ικανότητα να κατανεύμουν τις χημικές ουσίες που μεταφέρουν με ακρίβεια και ομοιομορφία [76].

## 2.2 Τεχνολογία Blockchain

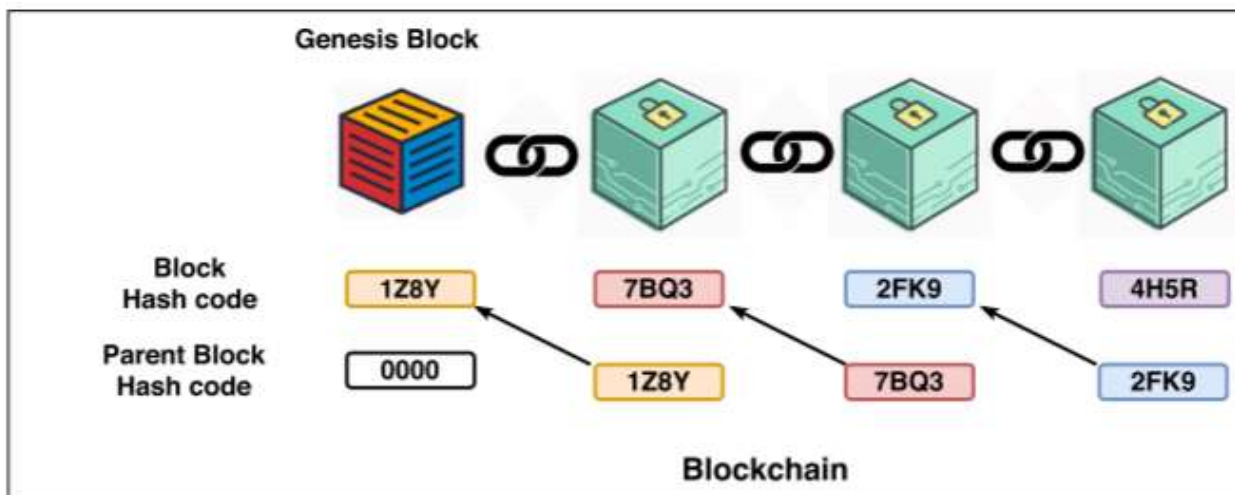
Η θεωρία της τεχνολογίας Blockchain διατυπώθηκε από τον "Satoshi Nakamoto" [77] το 2008 με σκοπό να λειτουργήσει ως δημόσιο βιβλίο των συναλλαγών με ψηφιακά νομίσματα Bitcoins (BTC) [78].

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2018/843, σχετικά με την πρόληψη της χρησιμοποίησης του χρηματοπιστωτικού συστήματος για τη νομιμοποίηση εσόδων από παράνομες δραστηριότητες ή για τη χρηματοδότηση της τρομοκρατίας, το εικονικό νόμισμα θεωρείται ως μια ψηφιακή αναπαράσταση αξίας που δεν εκδίδεται από κεντρική τράπεζα ή δημόσια Αρχή ούτε έχει την εγγύησή τους, δεν συνδέεται κατ' ανάγκη με νομίμως κυκλοφορούν νόμισμα και δεν διαθέτει το νομικό καθεστώς νομίσματος ή χρήματος, όμως γίνεται αποδεκτή ως μέσο συναλλαγής από φυσικά ή νομικά πρόσωπα και μπορεί να μεταφέρεται, να αποθηκεύεται ή να διακινείται ηλεκτρονικά.

Οι τεχνολογίες blockchain μας δίνουν την δυνατότητα για αναδιοργάνωση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί η οικονομία, λόγω του κατανεμημένου και ασφαλούς τρόπου διενέργειας των ηλεκτρονικών συναλλαγών. Βρίσκει εφαρμογή σχεδόν σε όλους τους κλάδους της κοινωνίας και τα πεδία της οικονομίας όπως για παράδειγμα τον γεωργικό τομέα.

Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα λογιστικό κατάλογο, είτε δημόσιο είτε ιδιωτικό, ο οποίος είναι κατανεμημένος (distributed ledger) και στον οποίο όλες οι συναλλαγές ή τα δεδομένα συσχετίζονται μεταξύ τους σε συνδεδεμένα μπλοκ δεδομένων. Αυτό τα καθιστά πρακτικά αμετάβλητα και αδιαμφισβήτητα από όλους τους κατανεμημένους κόμβους (Nodes) στους οποίους έχει γίνει η ενημέρωση του καταλόγου.

Τα μπλοκ αυτά είναι κρυπτογραφημένα με τον αλγόριθμό SHA-256, ο οποίος κρυπτογραφεί μαθηματικά και κατακερματίζει την πληροφορία του μπλοκ με μη αναστρέψιμο τρόπο (one way encryption) [79], επιστρέφοντας πάντα ένα σταθερό αποτέλεσμα, ανεξάρτητα από τον όγκο των δεδομένων που έχουν καταχωρηθεί, είτε είναι ένας χαρακτήρας είτε το κείμενο ενός ολόκληρου βιβλίου.



**Εικόνα 15. Το blockchain ως ακολουθία κατακερματισμένων μπλοκ [80]**

Έστω ότι έχουμε μια αλυσίδα μπλοκ δεδομένων, η οποία αποτελείται από 10.000 μπλοκ, και αφαιρούμε ένα μπλοκ, είτε γιατί θέλουμε να αλλάξουμε τα δεδομένα συναλλαγών ενός μπλοκ, είτε γιατί θέλουμε να αρνηθούμε την ύπαρξη μιας ολόκληρης συναλλαγής, τότε αναγκαστικά θα συμβούν τα παρακάτω:

- Αδυναμία επαλήθευσης της αλυσίδας, λόγω της ύπαρξης ασυμφωνίας καθώς οι συναλλαγές στο μπλοκ δε θα ταιριάζουν με την ταυτότητα του (κάθε μπλοκ χαρακτηρίζεται με συγκεκριμένη τιμή hash value [81] που το καθιστά μοναδικό).
- Έχοντας σαν δεδομένο ότι σε μία αλυσίδα υπάρχει αλληλουχία μεταξύ των μπλοκ δεδομένων που την αποτελούν, αν αφαιρέσουμε ένα μπλοκ τότε αυτή η αλληλουχία παύει να υφίσταται και θα πρέπει να υπολογιστούν ξανά οι ταυτότητες των μπλοκ ολόκληρης της αλυσίδας, έτσι ώστε να συνδέονται με τη σωστή αλληλουχία. Πρόκειται για μία εξαιρετικά δύσκολη, χρονοβόρα και ταυτόχρονα ενεργοβόρα διαδικασία, πράγμα το οποίο την καθιστά πρακτικά αδύνατη. Επιπλέον είναι απαραίτητη η διενέργεια της ενημέρωσης όλων των κόμβων στους οποίους διαμοιράζεται η λίστα με τις συναλλαγές καθώς και η ψηφιακή πιστοποίηση των συναλλαγών από όλα τα μέρη.

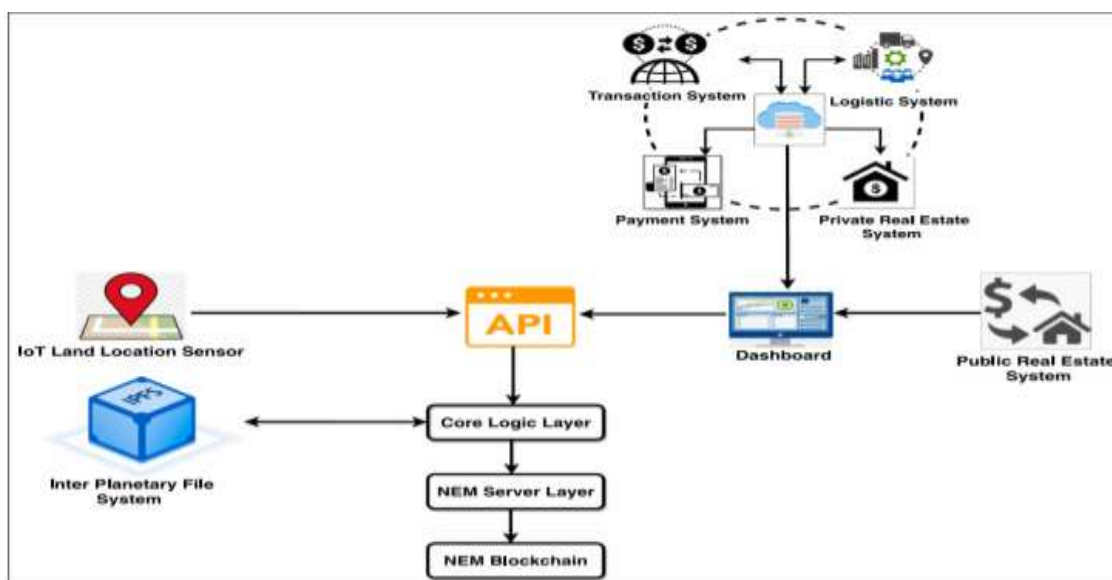
Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω διαδικασίες, συμπεραίνουμε ότι μέσω των blockchains μπορούμε να διενεργήσουμε ασφαλείς και γρήγορες συναλλαγές.

### 2.2.1 Πιθανές εφαρμογές στη Γεωργία Ακρίβειας

Επειδή πολύς λόγος γίνεται αναφορικά με τα blockchains και την εφαρμογή τους στο γεωργικό τομέα, δημιουργείται το ερώτημα εάν η πρακτική εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας θα καταφέρει να αποδώσει τελικά πραγματική αξία στους καλλιεργητές της γης.

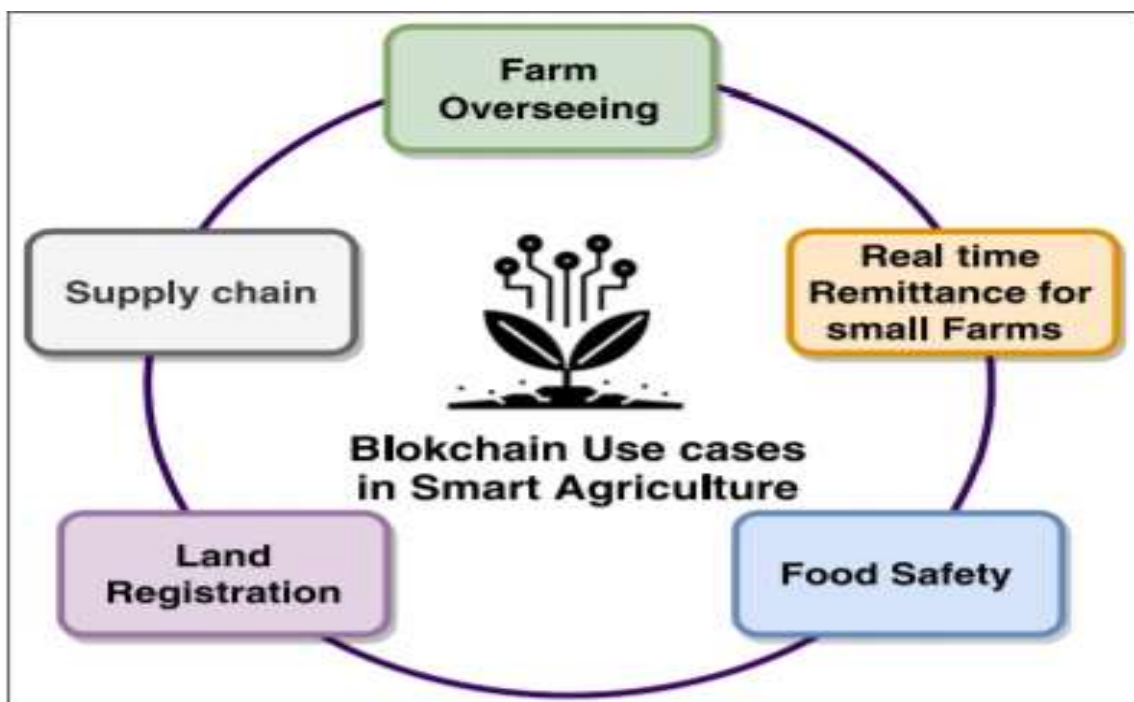
Η τεχνολογία Blockchain αποτελεί ένα ισχυρό τύπο ασφαλούς βάσης δεδομένων. Είναι στην πραγματικότητα ένας κατάλογος που αποτελείται από λογαριασμούς και συναλλαγές που τροποποιούνται εύκολα με τη χρήση των σωστών κλειδιών, αλλά από τη στιγμή που έχει γραφτεί μια συναλλαγή είναι σχεδόν αδύνατο να αλλαχθεί. Μπορούμε να θεωρήσουμε το blockchain ως ένα τρόπο ιδιαίτερος ασφαλή για τη διαχείριση (καταγραφή, πιστοποίηση, μεταφορά) περιουσιακών στοιχείων χωρίς να χρειάζεται η παρέμβαση τράπεζας ή άλλου μεσάζοντα (Land registration).

Στο γεωργικό τομέα, το blockchain υπόσχεται μια ασφαλή διαχείριση της αγροτικής περιουσίας (κτήματα, συμβάσεις, συμβόλαια, εμπορικές συναλλαγές). Για την καταγραφή των δεδομένων που τους αφορούν οι αγρότες σήμερα χρησιμοποιούν και μια σειρά από διάφορες τεχνολογίες όπως λογισμικό ή εφαρμογές. Το blockchain αντίθετα, ελαχιστοποιεί το κόστος τήρησης βιβλίων ή αρχείων και γενικότερα της διατήρησης πολλαπλών συστημάτων καταγραφής εξοικονομώντας χρόνο και ενέργεια δίνοντας επιπλέον αξία στην αλυσίδα γεωργίας.



Εικόνα 16. Διαχείριση κτηματολογίου με χρήση τεχνολογίας blockchain [80]

Το blockchain οδηγεί τους αγρότες στη σύγχρονη γεωργία, παρέχοντας την τεχνολογική υποδομή για υλοποίηση πράγματος όπως η ψηφιοποίηση, η αυτοματοποίηση και η παρακολούθηση του γεωργικού τομέα και της αγροτικής περιουσίας ειδικότερα.



Εικόνα 17. Περιπτώσεις χρήσης του Blockchain στη γεωργία ακριβείας [80]

### 2.2.2 Blockchain και αγροτική παραγωγή

- *Διαφάνεια και αποτελεσματικότητα στην ανιχνευσιμότητα*

Το blockchain μπορεί εύκολα να θεωρηθεί ως μια τεχνολογία λογιστικών φύλλων αποτελώντας έτσι ένα αποτελεσματικό εργαλείο μέσω του οποίου μπορούμε να επαληθεύσουμε την απόδειξη για την ύπαρξη των πλήρη αρχείων, της ιδιοκτησίας ή της προέλευσης των ανταλλασσόμενων πληροφοριών. Ο υπολογισμός της γραμμής ποιότητας διαφόρων προϊόντων αποτελεί παράδειγμα των προηγούμενων δίνοντας τη δυνατότητα για συνολική ιχνηλασιμότητα αποθηκεύοντας δεδομένα σχετικά με τον τόπο παραγωγής, την αποθήκευση και τη μεταφορά του προϊόντος με τρόπο τέτοιο ώστε να μην μπορεί να παραβιαστεί, επιτρέποντας τη γρήγορη επαναφορά στην πηγή του προβλήματος. Το blockchain διευκολύνει επίσης τις ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο μέσω της διασύνδεσης του με τα συνδεδεμένα αντικείμενα, όπως για παράδειγμα τη δημιουργία συναγερμού (alert) για έγκαιρη επέμβαση και αποφυγή πιθανών απωλειών για τη μη τήρηση της καθορισμένης θερμοκρασίας.

- *Πιστοποίηση προϊόντων*

Με την υλοποίηση εφαρμογών υπολογιστών που εκτελούνται αυτόματα μόλις πληρούνται ορισμένα κριτήρια (έξυπνα συμβόλαια), η τεχνολογία υπόσχεται να μειώσει δραστικά τις καθυστερήσεις που παρατηρούνται στις διαδικασίες να ελαχιστοποιήσει το κόστος και να αυτοματοποιήσει τους ελέγχους. Ο στόχος είναι να

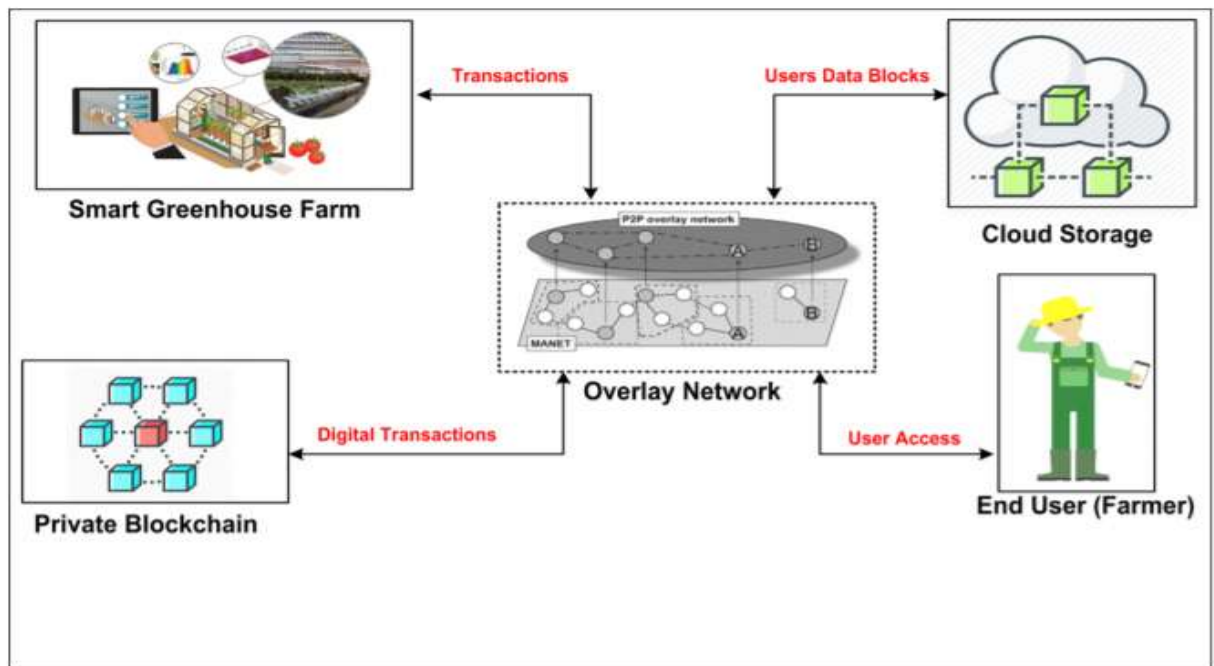
αποκατασταθεί η εμπιστοσύνη του κοινού μεταφέροντας αυτή την ιχνηλασιμότητα σε όλη τη διαδρομή προς τον καταναλωτή.

- *Γρήγορες συναλλαγές*

Στόχος είναι να ολοκληρώνονται όλες οι αγροτικές συναλλαγές μέσω μόνο μιας πλατφόρμας. Με μια συναλλαγή που θα περιλαμβάνει πλήρες σύνολο ψηφιοποιημένων εγγράφων συγγραφής και υποχρεώσεων με αυτόματη αντιστοίχιση δεδομένων, αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο την επικάλυψη καθηκόντων και τους μη αυτοματοποιημένους ελέγχους. Εάν κάποτε υλοποιηθούν όλα τα παραπάνω θα έχουμε επιτύχει μείωση του χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων, παρακολούθησή τους σε πραγματικό χρόνο και ελαχιστοποίηση του κινδύνου μιας πιθανής απάτης λόγω της μη χρήσης μετρητών.

- *Smart farming*

Το blockchain εφαρμόζεται σε εργασίες που αποτελούνται από πληθώρα δεδομένων τα οποία θα πρέπει να οργανωθούν ορθά και να διαχειριστούν αποτελεσματικά για να έχουμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Λόγω του αποκεντρωμένου τύπου διαχείρισης αρχείων που διαθέτουν οποιοσδήποτε ενημερώσεις γίνονται μέρος του ημερολογίου και κάθε συμμετέχουσα συσκευή λαμβάνει την ενημερωμένη εγγραφή. Ακόμη και για συσκευές που βρίσκονται εκτός του αγρού ή δεν έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο, οι τυχόν αλλαγές θα συγχρονιστούν άμεσα μόλις η συσκευή ανακτήσει πρόσβαση στο διαδίκτυο. Το blockchain επιπλέον έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί και άλλους τύπους αρχείων, όπως αρχεία κατάστασης αισθητήρων ή εξοπλισμού. Αυτό σημαίνει ότι ένας καλλιεργητής μπορεί σε πραγματικό χρόνο να έχει εικόνα σχετικά με το ποια μηχανήματα είναι διαθέσιμα για εργασία, ποια θα χρειαστούν συντήρηση και ποια βρίσκονται σε επιδιόρθωση. Υπάρχει η δυνατότητα, μέσω του blockchain, να δοθεί πρόσβαση για ενημέρωση της κατάστασης, μόλις ένα μέρος του μηχανήματος επισκευασθεί. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα μηχανισμό ανταλλαγής δεδομένων ο οποίος λειτουργεί για μεγάλες επιχειρήσεις οι οποίες έχουν πολλαπλές δραστηριότητες, διαφορετικά είδη εξοπλισμού που βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες και καταστάσεις επισκευής.



Εικόνα 18. Μοντέλο έξυπνης καλλιέργειας θερμοκηπίου με βάση το blockchain [80]

- Ποιοτικός έλεγχος του τελικού προϊόντος

Για την παρακολούθηση της πορείας της παραγωγής ενός αγροτικού προϊόντος καταγράφεται πληθώρα δεδομένων σχετικά με τη φυτοπροστασία, την άρδευση, την λίπανση κ.α. Όλα αυτά τα δεδομένα αποθηκεύονται και συνδέονται μαζί σε ένα ψηφιακό βιβλίο το οποίο ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο. Για τη δημιουργία τέτοιων κατακευματισμένων βιβλίων, παρόμοιων με το blockchain, γίνονται διάφορες προσπάθειες οι οποίες αποσκοπούν στη δημιουργία και τη λειτουργία μιας παγκόσμιας βάσης δεδομένων με απώτερο στόχο τη ψηφιοποίηση, αυτοματοποίηση, τον ποιοτικό έλεγχο και την τήρηση γεωργικών αρχείων με δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες, για την άμεση παρακολούθηση από τους καλλιεργητές.

Σήμερα στη γεωργία συμβαίνουν πολλά από τα παραπάνω επιτρέποντας στους καλλιεργητές να παρέχουν ακριβή άρδευση βασισμένη σε μετεωρολογικές προβλέψεις, λίπανση προσαρμοσμένη στη ποιότητα του εδάφους και μέτρα για την στοχευμένη καταπολέμηση των παρασίτων.



### **2.2.3 Blockchain: Μια καινοτόμα τεχνολογία που ακόμα εξελίσσεται**

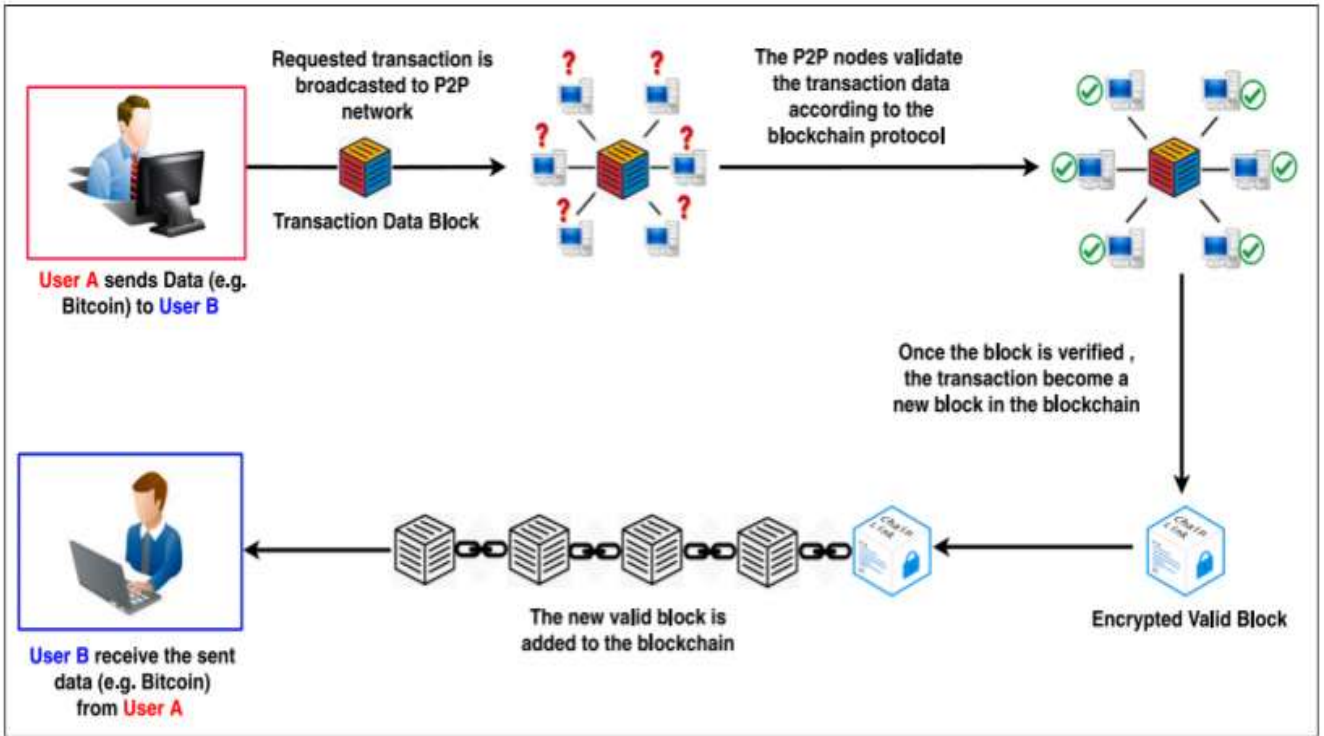
Πρόκειται για μια τεχνολογία που δημιουργεί ασφαλείς βάσεις δεδομένων δρώντας στο παρασκήνιο. Το λογισμικό των blockchains και οι εφαρμογές που τα χρησιμοποιούν φαίνονται ίδια με αυτά που ήδη χρησιμοποιούνται από άλλα λογισμικά.

Η διαφορά είναι πως το blockchain δίνει τη δυνατότητα νέων επιλογών αναφορικά με τη συλλογή και την αυτοματοποίηση της διαχείρισης των δεδομένων. Ταυτόχρονα αποτελεί και μηχανισμό ασφαλείας και ελέγχου της ορθότητας των δεδομένων και των διαδικασιών σε μία αλυσίδα παραγωγής.

Η υιοθέτηση blockchain στην έξυπνη γεωργία και στην αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων προβλέπεται να αυξηθεί 48.1% έως το 2023 - Compound Annual Growth Rate (CAGR) [82]. Η χρήση blockchain στην αγορά της αλυσίδας εφοδιασμού εκτιμάται ότι ήταν 133 εκατομμύρια δολάρια το έτος 2020 και προβλέπεται να φτάσει τα 948 εκατομμύρια δολάρια έως το έτος 2025 (Report Linker, 2020) [83].

Οι πιθανές χρήσεις του στο γεωργικό τομέα είναι πολλές, οι βασικές προϋποθέσεις για να γίνει αυτό, είναι:

- Κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του blockchain και των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η εφαρμογή του, συγκριτικά με υφιστάμενα συστήματα.
- Το blockchain λειτουργεί σωστά μόνο αν όλοι οι κρίκοι της αλυσίδας που το αποτελούν αποφασίζουν και ενεργούν συλλογικά για την εξέλιξη της
- Μέχρι και σήμερα το blockchain διέπτετε από ασαφές νομικό πλαίσιο.
- Η αποτελεσματική λειτουργία της τεχνολογίας blockchain θα πρέπει να αποδειχθεί στην πορεία και μέσα από μια ευρεία κλίμακα χρηστών.



Εικόνα 19. Το σύστημα blockchain σε λειτουργία [80]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Υδάτινοι Πόροι

Το νερό αποτελεί έναν πολύτιμο, ανανεώσιμο αλλά και περιορισμένο φυσικό πόρο. Είναι απαραίτητο τόσο για τη συνέχεια της ζωής όσο και για την παραγωγή τροφίμων. Από τους κυριότερους καταναλωτές νερού είναι οι αγροτικές καλλιέργειες, καθώς ένα ποσοστό από 45% έως 85% του συνόλου της κατανάλωσης νερού χρησιμοποιείται από τον αγροτικό τομέα. Φαινόμενα όπως αυτά της συνεχιζόμενης ανομβρίας και ξηρασίας, εξαιτίας και της κλιματικής αλλαγής, συμβάλουν στην περαιτέρω αύξηση της κατανάλωσης νερού από τη γεωργία. Στην Ελλάδα σήμερα κάθε αρδευόμενο στρέμμα απαιτεί κατά μέσο όρο περίπου 380 m<sup>3</sup> νερού, όγκος που μπορεί να φτάνει και τα 580 m<sup>3</sup>/στρέμμα σε μερικές περιοχές της χώρας [84]. Τις επόμενες δεκαετίες, η ανθρωπότητα θα πρέπει να βρει τρόπους για να αντιμετωπίσει την ανάγκη για αύξηση της παγκόσμιας φυτικής παραγωγής, που ίσως και να διπλασιαστεί, λόγω του αύξησης του πληθυσμού έως το 2050.

Σήμερα η άρδευση αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία της γεωργίας. Γνωρίζοντας ότι χρήση του νερού αλλά και το μέγεθος της διαθέσιμη γης για καλλιέργειες δεν είναι απεριορίστα καταλαβαίνουμε ότι δεν υπάρχουν πλέον μεγάλες πιθανότητες για νέα αρδευτικά έργα ή επέκταση της καλλιεργήσιμης γης. Καθώς η χρήση του αρδευτικού νερού συνεχίζει να αυξάνεται ενώ η αποτελεσματικότητα της εξακολουθεί να είναι μικρότερη του 65%, οι αγρότες θα πρέπει να παράγουν περισσότερα με λιγότερο νερό. Αυτό σημαίνει αύξηση της αποτελεσματικότητας του τρόπου χρήσης του νερού το οποίο θα έχει ως αποτέλεσμα να παράγονται περισσότερα “προϊόντα ανά σταγόνα” [85].

Αυτό επιτυγχάνεται μέσα από την ορθολογική διαχείριση του αρδευτικού νερού και την επιπρόσθετη χρήση νερού χαμηλής ποιότητας, όπως επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, για άρδευση. Η αειφόρος χρήση των υδατικών πόρων είναι ταυτόχρονα και μια υποχρέωση των καλλιεργητών γης στα πλαίσια της πολλαπλής συμμόρφωσης [86], η οποία συμβάλλει στη βιωσιμότητα της γεωργίας στην Ευρωπαϊκή ήπειρο.

Η αλόγιστη χρήση του αρδευτικού νερού μπορεί να οδηγήσει σε υπεράντληση και περαιτέρω επιβάρυνση του περιβάλλοντος με αρκετούς τρόπους, μερικοί από τους οποίους είναι:

- **Έκπλυση θρεπτικών στοιχείων:** Η υπερβολική χρήση αρδευτικού νερού οδηγεί στην μετατόπιση των θρεπτικών στοιχείων που υπάρχουν στο εδάφος, σε στρώματα που βρίσκονται χαμηλότερα από τη ριζόσφαιρα των φυτών, στερώντας τους έτσι απαραίτητα στοιχεία για την ανάπτυξη τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάγκη επιπλέον λίπανσης και κόστους για τον παραγωγό.

- **Μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα:** Τα θρεπτικά στοιχεία που δεν παρακρατούνται από τις ρίζες των φυτών καταλήγουν στα υπόγεια ύδατα προκαλώντας τη μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα. Το πρόβλημα γίνεται σοβαρότερο με στοιχεία όπως το άζωτο δημιουργώντας τη γνωστή νίτρο-ρύπανση.
- **Διάβρωση του εδάφους:** Η υπερβολική άρδευση κυρίως σε κατηφορικά εδάφη, σε συνδυασμό με την απογύμνωση των περιοχών, λόγω π.χ. της εξαντλητικής γεωργίας, οδηγούν σε διάβρωση του εδάφους και υποβάθμιση της καλλιεργήσιμης γης.
- **Αυξημένος κίνδυνος προσβολής της καλλιέργειας:** Η αύξηση της υγρασίας του εδάφους βοηθάει την ανάπτυξη εδαφομυκήτων οι οποίοι προσβάλουν τις καλλιέργειες, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα στην παραγωγή.
- **Η Νιτρορύπανση:** [87] Είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα της επίπτωσης της περίσσειας νερού, καθώς αφορά τη μετακίνηση από το έδαφος των νιτρικών στο υπέδαφος. Συνήθως, το φαινόμενο οφείλεται στη χρήση υπερβολικής ποσότητας νερού κατά το πότισμα των καλλιεργειών, σε συνδυασμό με την υπερβολική χρήση αζωτούχων λιπασμάτων, όπως για παράδειγμα στην καλλιέργεια εσπεριδοειδών.

Εργαλεία υποστήριξης λήψης αποφάσεων έχουν αναπτυχθεί από πολλούς ερευνητές [88] [89] με σκοπό να συμβάλλουν στην αύξηση της παραγωγικότητας των καλλιεργειών και στη βελτίωση της αποδοτικότητας της χρήσης των αρδευτικών συστημάτων.

Σημαντικό παράγοντα για την προστασία των καλλιεργειών αποτελεί επίσης η έγκαιρη και έγκυρη πρόγνωση ακραίων ή έντονων καιρικών φαινομένων. [90] [91]

### 3.1 Άρδευση Ακριβείας

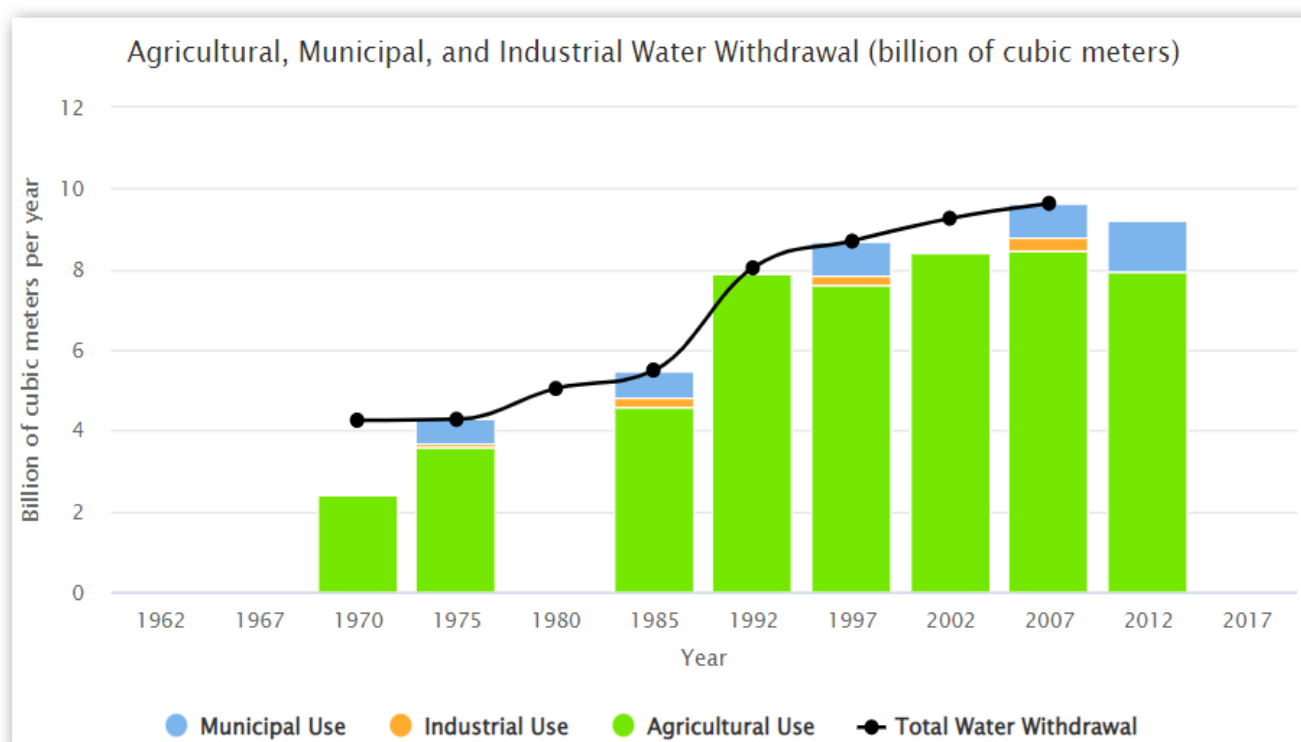
Πρόκειται για μια μέθοδο υπολογισμού της ακριβής ποσότητας του νερού που χρειάζεται μια καλλιέργεια καθώς και του χρόνου παροχής του. Αυτό γίνεται με την βοήθεια τεχνολογικών και επιστημονικών εργαλείων. Δίνει την δυνατότητα στον αγρότη να καταλάβει το πότε και πόσο νερό πρέπει να παρέχει με βάση τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας του. Στην άρδευση ακριβείας το νερό και τα θρεπτικά συστατικά πηγαίνουν κατευθείαν στις ρίζες του φυτού.

Η Ευφυής άρδευση είναι ένας τρόπος για τη εφαρμογή της βέλτιστης ποσότητας νερού με στόχο το κέρδος του αγρότη και τη προστασία του περιβάλλοντος. Αυτό γίνεται με τη χρήση οργάνων για τη μέτρηση της υγρασίας στο έδαφος και την εφαρμογή εξειδικευμένων μοντέλων άρδευσης προσαρμοσμένων στην καλλιέργεια και στις ιδιαιτερότητες της περιοχής.

Ένα σύστημα άρδευσης ακριβείας παρακολουθεί απομακρυσμένα τα επίπεδα υγρασίας του εδάφους και προσαρμόζει ανάλογα την ποσότητα του νερού άρδευσης που θα παρέχει στις καλλιέργειες. Αυτό το σύστημα λαμβάνει υπόψη τις τρέχουσες καιρικές συνθήκες όπως τη θερμοκρασία και την υγρασία, τη πρόγνωση του καιρού και την ανάπτυξη της καλλιέργειας για να βεβαιωθεί ότι παρέχει τη σωστή ποσότητα νερού.

Οι συμβουλές άρδευσης είναι προσαρμοσμένες στον τύπο και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, τις συνθήκες που επικρατούν στον αγρό, τις μετεωρολογικές προβλέψεις, το διαθέσιμο αρδευτικό νερό και το σύστημα εφαρμογής του, κ.α. Επιπλέον, για καλλιέργειες που βρίσκονται σε έδαφος που είναι ιδιαίτερα ξηρό οι καλλιεργητές θα μπορούν να λάβουν μια προειδοποίηση σχετικά με μια πιθανή ξηρασία. Εάν προβλέπονται έντονα καιρικά φαινόμενα, θα τους δοθούν συγκεκριμένες οδηγίες για το τι πρέπει να κάνουν.

Η αγροτική παραγωγή παγκοσμίως χρησιμοποιεί πολύ μεγάλες ποσότητες νερού, στη χώρα μας υπολογίζεται περίπου 84% της συνολικής κατανάλωσης. Η άρδευση υπολογίζοντας τις τοπικές μετρήσεις υγρασίας εδάφους δεν λαμβάνει υπόψη το συνολικό διαθέσιμο νερό στην ευρύτερη περιοχή. Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται άρδευση και όταν δεν χρειάζεται πραγματικά. Πειραματικές εργασίες έδειξαν ότι είναι δυνατή η εξοικονόμηση νερού έως και 30% [92]. Η άρδευση ακριβείας μπορεί να εφαρμοσθεί από τους αγρότες συνολικά ή από μια ευρύτερη ομάδα αγροτών συγκεκριμένων περιοχών ή ακόμα και από μικρή ομάδα αγροτών.



Εικόνα 20. Αναγκαιότητα Εξοικονόμησης Αγροτικού Νερού [93]

**Πίνακας 3. Κύριες IoT τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για συστήματα άρδευσης [94]**

Group	Technology	Frequency Bands	Max. Data Rate
Wireless Personal Area Networks	IEEE 802.15.1-Bluetooth	2400 - 24835 MHz	Up to 3 Mbps
	BLE (Bluetooth Low-Energy)	2400 – 24835 GHz	Up to 2 Mbps
RFID	Radio Frequency Identification (RFID)	Low Frequency: 125 or 134.2 kHz	UHF:Up to 640 kbps
		High Frequency: 13.56 MHz	
		Ultra High Frequency: 868-956 MHz	
		Microwaves: 2.45	
Mesh Protocols	Zigbee	868-868.6 MHz, 902-9286 MHz, 2400 MHz	Up to 250 kbps
	Z-Wave	865.2 MHz, 869 MHz, 868.40 MHz, 868.42 MHz, 869.85 MHz,	Up to 100 kbps
		908.4 MHz, 908.42 MHz, 916 MHz, 919.8 MHz, 921.4 MHz, 919-923 MHz,	
		920-923 MHz, 920-925 MHz, 922-926 MHz	
	Thread	Global: 2400-2500 MHz	Up to 250 kbps
		America, Australia: 902-928 MHz	
Europe: 868-868.6 MHz			
WiFi	IEEE 802.11a	5725-5875 MHz	Up to 54 Mbps
	IEEE 802.11b	2400-2500 MHz	Up to 11 Mbps
	IEEE 802.11g	2400-2500 MHz	Up to 54 Mbps
	IEEE 802.11n	2400-2500 MHz, 5725-5875 MHz	Up to 600 Mbps
	IEEE 802.11ac	2400-2500 MHz, 5725-5875 MHz	Up to 3.56 Gbps
	IEEE 802.11ah	AH All Countries: 2400-2500 MHz, 5725-5875 MHz	Up to 40 Mbps
		AH Europe: 863-868 MHz	
		AH USA: 902-928 MHz	
		AH China: 755-787 MHz	
		AH Japan: 916.5-927.5 MHz	
AH Korea: 917.5-923.5 MHz			
AH Singapore: 866-869 MHz, 920-925 MHz			
Low-Power Wide Area Network (LPWAN)	NarrowBand IoT (NB-IoT)	Global: 1950 MHz, 2140 MHz, 1747.5 MHz, 1842.5 MHz, 897.5 MHz, 942.5 MHz, 455 MHz, 465 MHz	200 Kbps
		EMEA: 847 MHz, 806 MHz, 453.5 MHz, 463.5 MHz	
		EU: 725.5 MHz, 780.5 MHz	

<p>Low-Power Wide Area Network (LPWAN)</p>	<p>NarrowBand IoT (NB-IoT)</p>	<p>North America Region: 1880 MHz, 1960 MHz, 1732.5 MHz, 2132.5 MHz, 836.5 MHz, 881.5 MHz, 707.5 MHz, 737.5 MHz, 782 MHz, 751 MHz, 793 MHz, 763 MHz, 710 MHz, 740 MHz, 1882.5 MHz, 1962.5 MHz, 831.5 MHz, 876.5 MHz, 1745 MHz, 2155 MHz, 1702.5 MHz, 2007,5 MHz, 680.5 MHz, 634.5 MHz, 1448.5 MHz, 1496.5 MHz, 707 MHz, 737 MHz</p> <p>APAC: 725.5 MHz, 780.5 MHz, 452.5 MHz, 462.5 MHz</p> <p>Japan: 1437.9 MHz, 1485.9 MHz, 822.5 MHz, 867.5 MHz, 837.5 MHz, 882.5 MHz, 1455.4 MHz, 1503.4 MHz</p>	
<p>Long Term Evolution-Machine Type Communication (LTE-M)</p>	<p>Global: 1950 MHz, 2140 MHz, 1747.5 MHz, 1842.5 MHz, 897.5 MHz, 942.5 MHz, 455 MHz, 465 MHz</p> <p>EMEA: 2535 MHz, 2655 MHz, 847 MHz, 806 MHz, 453.5 MHz, 463.5 MHz</p> <p>EU: 725.5 MHz, 780.5 MHz</p> <p>North America Region: 1880 MHz, 1960 MHz, 1732.5 MHz, 2132.5 MHz, 836.5 MHz, 881.5 MHz, 707.5 MHz, 737.5 MHz, 782 MHz, 751 MHz, 793 MHz, 763 MHz, 710 MHz, 740 MHz, 1882.5 MHz, 1962.5 MHz, 831.5 MHz, 876.5 MHz, 1745 MHz, 2155 MHz, 1702.5 MHz, 2007,5 MHz, 680.5 MHz, 634.5 MHz, 1448.5 MHz, 1496.5 MHz, 707 MHz, 737 MHz</p> <p>APAC: 452.5 MHz, 462.5 MHz, 725.5 MHz, 780.5 MHz</p> <p>China: TDD, 1900 MHz, TDD, 2350 MHz</p> <p>Japan: 1437.9 MHz, 1485.9 MHz, 822.5 MHz, 867.5 MHz, 837.5 MHz, 882.5 MHz, 1455.4 MHz, 1503.4 MHz</p>	<p>Upload peak rate of 5 Mbps</p> <p>Download peak rate of 10 Mbps</p>	
<p>Extended coverage GSM (EC-GSM)</p>	<p>Global: 385 MHz, 395 MHz, 415 MHz, 425 MHz, 454 MHz, 464 MHz,</p>	<p>Downlink Peak Data Rate:</p>	

Extended coverage GSM (EC-GSM)	482.4 MHz, 492.4 MHz, 707.2 MHz, 737.2 MHz, 785.2 MHz, 755.2 MHz, 813.7 MHz, 858.7 MHz	70 kbps (GSMK), 240 kbps (8PSK)  Uplink Peak Data Rate: 70 kbps (GSMK), 240 kbps (8PSK)
	APAC & EMEA: 897 MHz, 942 MHz	
	Caribbean, LATAM & North America Region: 836.5 MHz, 881.5 MHz, 1880 MHz, 1960 MHz	
	ITU Region 1 & 3: 902.5 MHz, 947.5 MHz, 895.5 MHz, 940.5 MHz, 1747.5 MHz, 1842.5 MHz	
Sigfox	RC1: 868.130 MHz, 869.525 MHz	100 or 600 bps
	RC2: 902.200 MHz, 905.200 MHz	
	RC3: 923.200 MHz, 922.200 MHz	
	RC4: 920.800 MHz, 922.300 MHz	
	RC5: 923.300 MHz, 922.300 MHz	
	RC6: 865.200 MHz, 866.200 MHz	
LoRa-Low Power Wide Area Network (LoRaWAN)	Europe: 870 MHz, 863 MHz, 434 MHz, 433 MHz	0.3 to 50 kbps
	India: 867 MHz, 865 MHz	
	Region 2-America, Greenland, Easter Pacific Islands: 928 MHz, 902 MHz	
	Australia, New Zealand: 928 MHz, 915 MHz	
	China: 510 MHz, 470 MHz, 787 MHz, 779 MHz	
	Hong Kong: 925 MHz, 920 MHz	
	Taiwan: 928 MHz, 922 MHz	
	South Korea: 923 MHz, 920 MHz	
	Japan: 928 MHz, 920 MHz	
	Singapore, Thailand, Vietnam: 925 MHz, 920 MHz	
Brunei, Cambodia, Indonesia, Laos: 925 MHz, 923 MHz		
MIOTY	868 MHz	



### 3.1.1 Βελτιωμένα Συστήματα Άρδευσης (Β.Σ.Α)

Τα σύγχρονα συστήματα άρδευσης χρησιμοποιούνται στη γεωργία τα τελευταία τριάντα (30) χρόνια, κυρίως για την άρδευση των καλλιεργειών που έχουν μεγάλη αξία, όπως τα λουλούδια θερμοκηπίων. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των σταγόνων λόγω του σχετικά ψηλού κόστους εγκατάστασης. Με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη της τεχνολογίας το κόστος εγκαταστάσεων μειώθηκε και η άρδευση με τη χρήση σταγόνων, των μίνι ψεκαστήρων (minisprinklers) [95] και των εκτοξευτήρων χαμηλής παροχής επεκτάθηκε και χρησιμοποιήθηκε και σε φθηνότερες καλλιέργειες όπως αυτές των λαχανικών.



**Εικόνα 21. Εκτοξευτήρες νερού χαμηλής παροχής [96]**

Οι καλλιεργητές σήμερα, έχουν υιοθετήσει σε μεγάλο βαθμό τα σύγχρονα συστήματα άρδευσης. Η τεχνολογία που εισάγεται ελέγχεται διεξοδικά από το Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών με σκοπό την αξιολόγηση των διαφόρων συστημάτων στις ιδιαίτερες συνθήκες που χαρακτηρίζουν την εκάστοτε περιοχή, για να έχει τη δυνατότητα να επιλέξει την κατάλληλη μέθοδο άρδευσης για κάθε καλλιέργεια.

#### **Πλεονεκτήματα των Β.Σ.Α.**

- Εξοικονόμηση αρδευτικού νερού: Επειδή ποτίζεται μικρή επιφάνεια χώματος επιτυγχάνονται αποδόσεις έως και 80% υψηλότερες σε σχέση με παραδοσιακές μεθόδους άρδευσης.
- Αύξηση της παραγωγής: Εφαρμόζοντας σύγχρονες μεθόδους άρδευσης, η ρίζα των φυτών παραμένει υγρή και αποφεύγεται η εναλλαγή πίεσης. Επιπρόσθετα, μέσω του

νερού άρδευσης μεταφέρονται κατάλληλα λιπάσματα (fertigation) [97], όταν και όπου απαιτούνται.

- Δυνατότητα χρήσης αγρών που είναι ακατάλληλοι για άρδευση με παραδοσιακές μεθόδους (π.χ. εδάφη με μεγάλες ανωφέρειες).
- Δυνατότητα χρήσης νερού υποβαθμισμένης ποιότητας (υφάλμυρο). Με την άρδευση με τη μέθοδο των σταγόνων ή των minisprinklers, διατηρείται υψηλή υγρασία στο χώμα η οποία διαλύει το αλάτι που προστίθεται.
- Εξοικονόμηση χρημάτων από το κόστος αγοράς, συναρμολόγησης, συντήρησης των αντλιών και την καταβολή των εργατικών που απαιτούνται.
- Με τη χρήση εξειδικευμένων συστημάτων όπως: αυτόματες βαλβίδες μέτρησης, ηλεκτρονικούς υπολογιστές, αισθητήρες υγρασίας κ.λ.π απαιτούνται λιγότερες ώρες εργασίας και παρουσίας στο χωράφι.

### **Μειονεκτήματα των Β.Σ.Α**

- Για την εγκατάσταση ενός σύγχρονου συστήματος άρδευσης απαιτείται μια επένδυση υψηλού κόστους από 2.200 μέχρι 7.000 δολάρια ανά εκτάριο (ha). Αν πρόκειται για συστήματα εκτοξευτήρων χαμηλής παροχής ή minisprinklers το κόστος είναι μικρότερο από αυτό απαιτείται για συστήματα στάγδην άρδευσης [98] .
- Η ύπαρξη υψηλού ποσοστού χλωρίου και αλατιού στο νερό, προκαλεί τις λευκές κηλίδες στα φύλλα των φυτών που εμποδίζουν την αύξηση και την ποσότητα παραγωγή τους. Η μέθοδος της στάγδην άρδευσης ή χαμηλά minisprinklers γωνίας πρέπει να χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που το νάτριο ή η συγκέντρωση χλωρίου στο νερό άρδευσης υπερβαίνει 3 meq/l. Αυτό αποτρέπει τα προβλήματα που δημιουργούνται στις ευαίσθητες καλλιέργειες, όταν κατά τη διαδικασία άρδευσης υγραίνεται το φύλλωμά τους.
- Η εφαρμογή χαμηλής ποιότητας νερού προκαλεί φράξιμο ή κλείσιμο των σταγόνων. Απαιτείται πολύ καλό φιλτράρισμα και χρήση υγρών απόφραξης.

### 3.1.2 Πρακτικά Μέτρα για Καλύτερη Διαχείριση και εξοικονόμηση νερού

- Διατήρηση όλου του εξοπλισμού σε καλή κατάσταση για ελάχιστες απώλειες.
- Εφαρμογή νερού με τη χρήση ωραρίων άρδευσης για την ικανοποίηση των πραγματικών αναγκών των φυτών.
- Άρδευση με βάση τα μετεωρολογικά φαινόμενα της περιοχής (π.χ ένταση ανέμου, υψηλές θερμοκρασίες).
- Πρόβλεψη κάλυψης των ανοικτών υπαίθριων δεξαμενών για μικρότερη εξάτμιση.
- Αποτροπή της ανεξέλεγκτης βλάστησης μέσω της ελεγχόμενης εφαρμογής αζωτούχων λιπάνσεων.
- Αποψίλωση των δέντρων που δεν αποδίδουν και μείωση των καρποφόρων βλαστών.
- Αξιοποίηση του βρόχινου νερού. Αναβάθμιση των θερμοκηπιακών μονάδων για συλλογή του νερού της βροχής μέσω των σκεπών τους και μεταφορά του σε δεξαμενές για αρδευτική χρήση.
- Επιδίωξη φύτευσης καλλιεργειών με μικρές υδατικές ανάγκες. Η πατάτα π.χ. περιέχει νερό σε ποσοστό 80%. Μείωση των αναγκών σε νερό μιας καλλιέργειας με μεταφορά της βλαστικής της περιόδου, όπου αυτό είναι δυνατό.
- Χρήση νερών κακής ποιότητας (υφάλμυρα) σε καλλιέργειες που είναι ανθεκτικές και φύονται σε αμμώδη εδάφη με μεγάλη διαπερατότητα..

### 3.1.3 Χρηματοδοτικά εργαλεία και ευφυής άρδευση

Η Κοινή Αγροτική Πολιτική (ΚΑΠ) [99], μαζί με την ευαισθησία που παρουσιάζουν οι καταναλωτές σήμερα για θέματα συνυφασμένα με την ορθή διαχείριση και την προστασία του περιβάλλοντος, αποτέλεσαν τον βασικό κορμό με τον οποίο οραματίστηκαν, υλοποιήθηκαν και αναπτύσσονται οι δομές της ευρωπαϊκής πολιτικής αναφορικά με τα οικοσυστήματα, το περιβάλλον και την προστασία τους γενικότερα. Παρουσιάστηκαν λοιπόν, χρηματοδοτικά εργαλεία με τα οποία οριοθετούνται βραχυπρόθεσμα ή μακροπρόθεσμα οι ενέργειες που πρέπει να γίνουν μέσω της ΚΑΠ για την υλοποίησή τους. Οι βασικότερες δράσεις του **Προγράμματος Αγροτικής Ανάπτυξης** που έχουν στόχο τον έλεγχο και την εξασφάλιση της ποιότητας και της ποσότητας του αρδευτικού νερού είναι οι εξής:

- **Δράση 10.1.4** [100] «**Μείωση της ρύπανσης του νερού από γεωργική δραστηριότητα**»: Έχει σαν στόχο προστασία της ποιότητας του νερού από νιτρικά ιόντα και γενικότερα από οποιαδήποτε ρυπογόνα εισροή (φωσφορικά ιόντα, φυτοφάρμακα κ.α.)
- **Δράση 10.1.8** [101] «**Εφαρμογή της Μεθόδου Σεξουαλικής Σύγχυσης των Μικρολεπιδόπτερων (ΚΟΜΦΟΥΖΙΟ)**»: Έχει σαν στόχο τη σταδιακή αντικατάσταση των χημικών με τα οποία αντιμετωπίζονται τα μικρολεπιδόπτερα, αναβαθμίζοντας με τον τρόπο αυτό την ποιότητα των υδατικών πόρων και συμβάλλοντας ταυτόχρονα

στην ανάκαμψη της βιοποικιλότητας στα φυτά (π.χ. αμπελώνες) στα οποία θα εφαρμοστεί.

- **Μέτρο 11** [102] «**Βιολογικές Καλλιέργειες**»: Έχει στόχο μειώνοντας τους ρύπους να παρέχει δημόσια αγαθά που βοηθούν στην προστασία του περιβάλλοντος γενικότερα και ειδικότερα του νερού.
- **Δράση 4.1.2** [103] «**Υλοποίηση επενδύσεων που συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ύδατος**»: Ίσως η σημαντικότερη δράση του Προγράμματος Αγροτικής Ανάπτυξης (ΠΑΑ), με στόχο την προστασία του νερού επιδιώκοντας τα παρακάτω:
  - Την ανάκαμψη, τη συντήρηση και την ενίσχυση των οικοσυστημάτων που συνδέονται με τη γεωργία μέσω της οικονομικής διαχείρισης των αποθεμάτων νερού.
  - Με την εισαγωγή στη γεωργία σύγχρονων συστημάτων άρδευσης επιτυγχάνεται η αποδοτικότερη η χρήση του νερού και των φυσικών πόρων γενικότερα.
  - Με τη καλύτερη διαχείριση του αγροτικού νερού επιτυγχάνεται η βελτίωση των παραμέτρων του περιβαλλοντικού προφίλ των γεωργικών εκμεταλλεύσεων.
  - Την αύξηση της ανταγωνιστικότητας των ελληνικών γεωργικών εκμεταλλεύσεων μέσω της αύξησης των επενδύσεων με στόχο τον εκσυγχρονισμό τους.
- Χρήση Συμβουλευτικών Υπηρεσιών του Υπομέτρου 2.1: [104] Προσφέρει οικονομική κάλυψη για παροχή τεχνικής υποστήριξης και εξειδικευμένων οδηγιών στους καλλιεργητές, αναφορικά με την αειφόρο διαχείριση των υδάτινων πόρων, για να εφαρμοσθούν αποτελεσματικά τα επενδυτικά σχέδια και να γίνουν κατανοητά και υλοποιήσιμα όσα απορρέουν από την Οδηγία «Πλαίσιο για τα Νερά» [105].

Για πρώτη φορά αναγνωρίζεται η σημασία της ευφυούς γεωργίας και στη διαχείριση των υδάτινων πόρων, ορίζοντας την Άρδευση Ακρίβειας κλειδί για την επίτευξη των παραπάνω στόχων. Σκοπεύοντας στην αύξηση της απόδοσης των συστημάτων άρδευσης, θα στηριχθούν επενδύσεις οι οποίες θα πληρούν τις προϋποθέσεις τις περιβαλλοντικής νομοθεσίας και θα εφαρμοστούν ολοκληρωμένες λύσεις έξυπνης γεωργίας, ώστε οι αγρότες να μπορούν να διαχειρίζονται καλύτερα τις καλλιέργειες και τους πόρους τους. Στο γενικότερο πλαίσιο της **αποδοτικής χρήσης του αρδευτικού νερού** η ενημέρωση των καλλιεργητών για τη σημασία των υδατικών πόρων και την ορθολογική διαχείριση τους στη γεωργία είναι μονόδρομος, γεγονός το οποίο θα εντείνεται διαρκώς λόγω και της κλιματικής αλλαγής.

### 3.1.4 Επαναχρησιμοποίηση των Λυμάτων

Ένας κατάλληλος και ταυτόχρονα οικονομικός τρόπος για την αύξηση των υπαρχόντων πόρων νερού είναι τα επεξεργασμένα αστικά και βιομηχανικά λύματα, ιδιαίτερα εάν συγκριθούν με τις ακριβές εναλλακτικές όπως για παράδειγμα την αφαλάτωση ή την ανάπτυξη νέων έργων υδατικών πόρων όπως τα φράγματα και οι ταμιευτήρες.

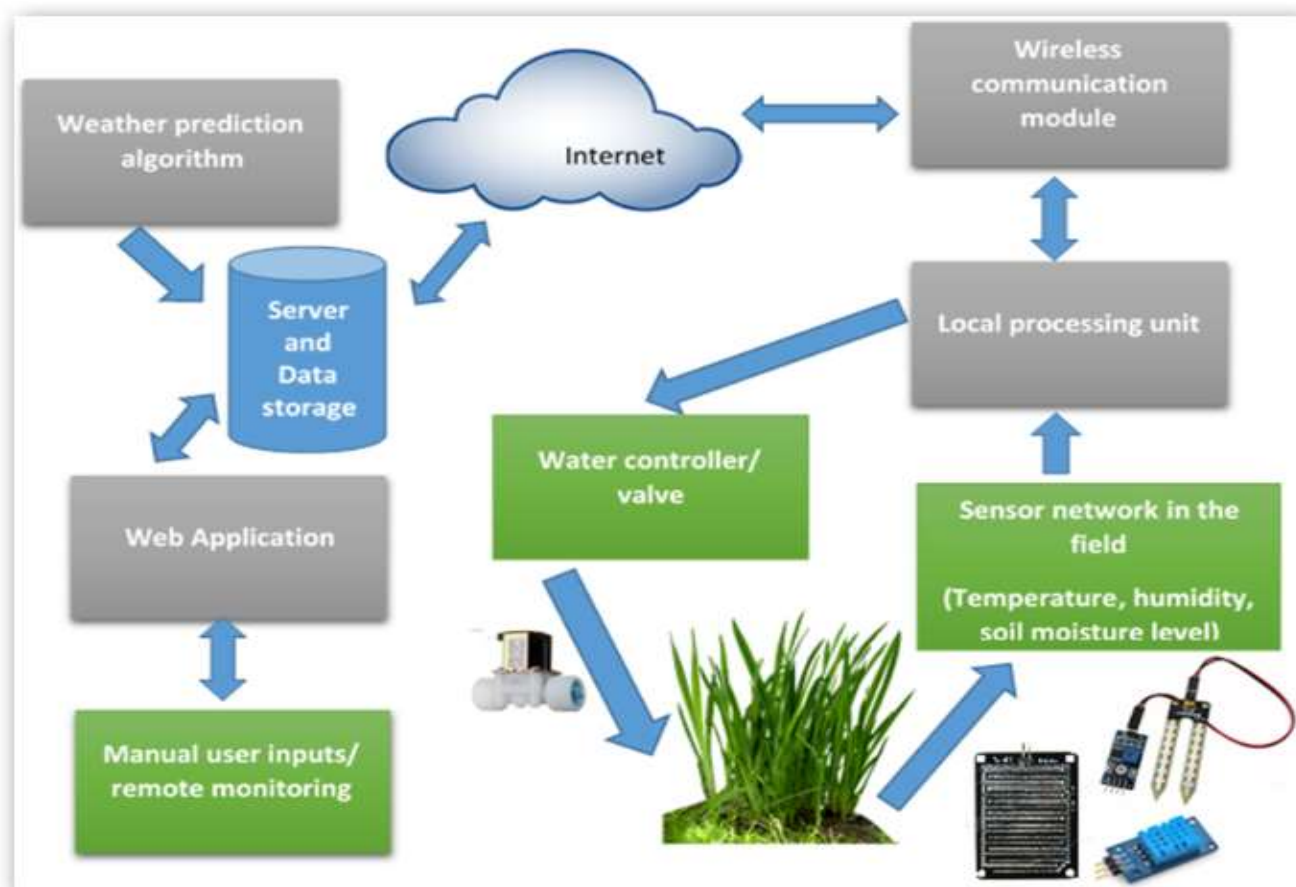
Ένα αρκετά σημαντικό και νέο σκεπτικό για την επαναχρησιμοποίηση του νερού είναι η προσέγγιση “fit-to-purpose”, δηλαδή η παραγωγή ανακτημένου νερού τέτοιας ποιότητας η οποία θα πληροί τις ανάγκες των τελικών χρηστών, όπως για παράδειγμα το νερό επαναχρησιμοποίησης για άρδευση να είναι κατάλληλο για την καλλιέργεια εφαρμογής. Η αγροτική άρδευση είναι μακράν ο μεγαλύτερος χρήστης νερού στον κόσμο, αντιπροσωπεύοντας το 70% της συνολικής χρήσης, υπερβαίνοντας κατά 1000% κάθε άλλη. Όταν το συνολικό νερό μιας περιοχής αδυνατεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση (αστική και αγροτική), τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί τουλάχιστον δύο φορές. Πρώτα για αστική χρήση και μετά, αφού εφαρμοσθεί κάποια επεξεργασία, να χρησιμοποιηθεί για άρδευση καλλιεργειών. Σήμερα υπάρχουν αρκετά συστήματα που διαθέτουν ανακτημένο νερό για χρήση στις καλλιέργειες. Στις προηγμένες χώρες, η διάθεση των λυμάτων γίνεται συχνά με την εφαρμογή τους στο έδαφος για την κάλυψη των αναγκών άρδευσης. Όμως, απαιτείται η διάκριση της άρδευσης σε περιορισμένη και απεριόριστη, βάσει των φυτειών που πρόκειται να αρδευτούν καθώς και του τρόπου εφαρμογής του διαθέσιμου νερού, έτσι ώστε να εξλειφθούν οι κίνδυνοι για τη δημόσια υγεία.

- **Η περιορισμένη άρδευση** εφαρμόζεται σε εκτάσεις όπου η δημόσια πρόσβαση δεν αναμένεται, δασικά οικοσυστήματα, κτηνοτροφικές και βιομηχανικές καλλιέργειες, εκτάσεις πρασίνου, συστοιχίες δέντρων και καλλιέργειες που τα παραγόμενα προϊόντα πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία πριν καταναλωθούν. Απαραίτητη προϋπόθεση για την περιορισμένη άρδευση είναι η επεξεργασία των λυμάτων μέσω της δευτεροβάθμιας βιολογικής επεξεργασίας. Σε περιπτώσεις χρήσης επιφανειακών ταμιευτήρων, όπου τα λύματα πρόκειται να παραμείνουν επί μακρό χρονικό διάστημα, απαραίτητη είναι η προηγμένη επεξεργασία τους για την αφαίρεση αζώτου και φωσφόρου. Απαγορεύεται η διάθεση του νερού με τη μέθοδο του καταιονισμού (άρδευση με τεχνητή βροχή).
- **Η απεριόριστη άρδευση** εφαρμόζεται σε καλλιέργειες των οποίων τα προϊόντα συνήθως καταναλώνονται ωμά όπως φρούτα, λαχανικά, εσπεριδοειδή, κ.α. Στη περίπτωση αυτή επιτρέπεται η εφαρμογή νερού και μέσω της μεθόδου του καταιονισμού. Βασική προϋπόθεση για την απεριόριστη άρδευση είναι η επεξεργασία των λυμάτων μέσω της δευτεροβάθμιας βιολογικής επεξεργασίας η οποία απαραίτητα πρέπει να

ακολουθείται από τριτοβάθμια και απολύμανση. Και σε αυτή τη περίπτωση η αφαίρεση αζώτου και φωσφόρου κρίνεται απαραίτητη.

Σοβαρούς προβληματισμούς αναφορικά με τη δημόσια υγεία εγείρει η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων για αρδευτικές και υδρευτικές χρήσεις. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι βασικό κριτήριο για τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης λυμάτων είναι η προστασία της δημόσιας υγείας μέσω του κατάλληλου ελέγχου των παθογόνων μικροοργανισμών. Σημαντικό είναι επίσης να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως η προστασία του περιβάλλοντος και το οικονομικό κόστος που απαιτείται για τη διενέργεια κατάλληλων επιδημιολογικών ερευνών και τη λήψη των απαραίτητων μέτρων για τη σωστή επεξεργασία των λυμάτων και την ασφαλή διάθεσή τους.

Στην Ελλάδα, το θεσμικό πλαίσιο που καθορίζει την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων είναι η ΚΥΑ 145116/2011 [106] όπως αυτή τροποποιήθηκε με την ΚΥΑ 191002/2013 [107].



Εικόνα 22. Ευφυής Άρδευση [108]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Τεχνητή Νοημοσύνη

### 4.1 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Η Μάθηση θεωρείται μια από τις σπουδαιότερες ιδιότητες της ευφυούς ανθρώπινης συμπεριφοράς και οι ερευνητές τεχνητής νοημοσύνης (TN) [109] εργάζονται συνεχώς για να δημιουργήσουν συστήματα υπολογιστών που μπορούν να μάθουν. Αυτή η διαδικασία, γνωστή ως «Μηχανική Εκμάθηση» (Machine Learning) [110], επιτρέπει στους υπολογιστές να βελτιώσουν την απόδοσή τους με βάση την εμπειρία.

Η Μηχανική Μάθηση στοχεύει στη δημιουργία μηχανών που μπορούν να μάθουν ή να βελτιώσουν την απόδοσή τους μέσω της χρήσης προηγούμενης γνώσης και εμπειρίας.

Με την διάδοση του διαδικτύου και του τεράστιου όγκου πληροφορίας που διακινείται και αποθηκεύεται σε αυτό, αναπτύχθηκε μεγάλος αριθμός συστημάτων τα οποία υλοποιούν αλλά και βασίζονται σε τεχνικές της TN και συγκεκριμένα υβριδικών συστημάτων μηχανικής μάθησης, που συγχωνεύουν τεχνολογίες έμπειρων συστημάτων με αλγόριθμους ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic), νευρωνικά δίκτυα και εξελικτικούς αλγορίθμους.

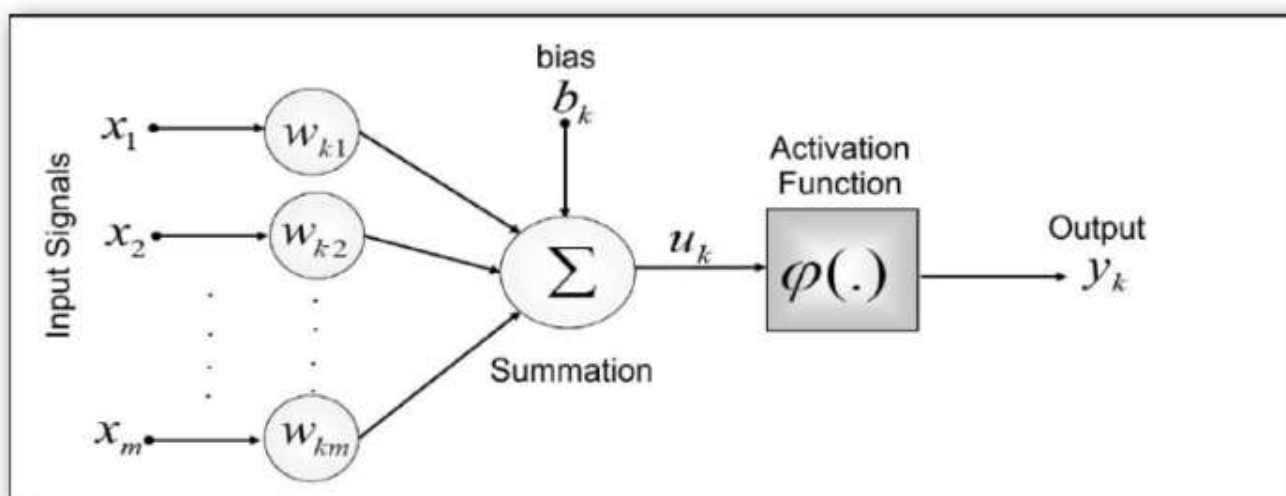
Τέτοια συστήματα θεωρούνται οι ευφυείς πράκτορες (intelligent agents) [111], οι μηχανές έξυπνης αναζήτησης (intelligent search machines), τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για εξόρυξη δεδομένων (data mining systems) [112], τα συμβουλευτικά συστήματα (recommender systems) [113] και τα συστήματα περιρρέουσας νοημοσύνης (ambient intelligence systems) [114].



**Εικόνα 23. Βασικά στάδια εξέλιξης της Τεχνητής Νοημοσύνης [115]**

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ), είναι ένας από τους βασικούς πυλώνες της Υπολογιστικής Νοημοσύνης. Τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα αποτέλεσαν την πηγή έμπνευσης τους καθώς και η προσπάθεια για εξομοίωση της ανθρώπινης σκέψης στη

διαδικασία διαχείρισης και ολοκλήρωσης πολυσύνθετων προβλημάτων. Πρόκειται δηλαδή για υπολογιστικά μοντέλα, τα οποία εμπνευσμένα από τα νευρικά συστήματα των ζώντων οργανισμών, προσπαθούν με τη διασύνδεση πολλαπλών επεξεργαστικών μονάδων (τεχνητούς νευρώνες) να εξασφαλίσουν κα συντηρήσουν τη γνώση. Όπως ο βιολογικός νευρώνας έτσι και ο τεχνητός είναι μια μονάδα επεξεργασίας πληροφορίας, και διαθέτει εισόδους και εξόδους. Μέσω της εισόδου μεταφέρονται προηγούμενα υπολογιστικά αποτελέσματα ή πληροφορίες στη μονάδα επεξεργασίας. Εκεί διενεργείται εκ νέου υπολογισμός και το αποτέλεσμα που προκύπτει διαβιβάζεται σε συνδεδεμένες μονάδες επεξεργασίας (συνάψεις). Στην Εικόνα 24 απεικονίζεται η δομή ενός τεχνητού νευρώνα.



**Εικόνα 24. Δομή τεχνητού νευρώνα [116]**

Τα Τεχνητών Νευρωνικά Δίκτυα χαρακτηρίζονται από:

- **Εμπειρική προσαρμοστικότητα.** Οι εσωτερικές δικτυακές παράμετροι, για παράδειγμα τα βάρη, προσαρμόζονται με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από επάλληλες δοκιμές, δηλαδή γνώση μέσω της εμπειρίας.
- **Μαθησιακή ικανότητα.** Με τη χρήση μεθόδων μάθησης, αναλόγως της εφαρμογής, πετυχαίνουμε καλύτερη δικτυακή απόδοση.
- **Ικανότητα διεύρυνσης.** Με την ολοκλήρωση μιας μεθόδου εκμάθησης, το δίκτυο είναι σε θέση να παράγει αποτελεσματικές και σωστές λύσεις σε περιπτώσεις που δεν καλύπτονται από τα δεδομένα εκπαίδευσης..
- **Οργάνωση δεδομένων.** Δυνατότητα του δικτύου για ομαδοποίηση δεδομένων, διαφόρων εφαρμογών, με κοινά χαρακτηριστικά.
- **Ανοχή σφαλμάτων.** Δικτυακή διαθεσιμότητα σε περιπτώσεις δυσλειτουργίας ή αδυναμίας μερών του, λόγω του πλήθους ενεργών διασυνδέσεων μεταξύ των επεξεργαστικών μονάδων.



- **Κατανεμημένη αποθήκευση.** Η γνώση που αποκτάται από το συνολικό δίκτυο, κατά την διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος, αποθηκεύεται στους τεχνητούς νευρώνες του συστήματος, ώστε να υπάρχει δικτυακή διαθεσιμότητα σε περιπτώσεις που μερικοί από αυτούς τεθούν εκτός λειτουργίας.
- **Ευχέρεια προτυποποίησης.** Οι αρχιτεκτονικές των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων προτυποποιούνται εύκολα και μετά τη μαθησιακή διαδικασία, μπορούν με τη διενέργεια βασικών μαθηματικών πράξεων να δημιουργήσουν άμεσα αποτελέσματα. Οι εφαρμογές των ΤΝΔ κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες: την *Πρόβλεψη*, την *Αναγνώριση Προτύπων* και την *Ταξινόμηση*. Για τη χρήση ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δίκτυο (ΤΝΔ) απαιτείται προηγούμενη εκπαίδευση του για να αποκτήσει γνώση. Η απόκτηση γνώσης (μάθηση) έγκειται στον καθορισμό κατάλληλων συντελεστών βαρών, έτσι ώστε το ΤΝΔ να διενεργεί τους ζητούμενους υπολογισμούς διαμέσου αλγορίθμων που ονομάζονται αλγόριθμοι εκπαίδευσης. Οι συντελεστές βάρους παίζουν σημαντικό ρόλο ο οποίος προσομοιάζεται με αποθήκευση γνώσης, η οποία διατίθεται με τη μορφή παραδειγμάτων. Έτσι τα νευρωνικά δίκτυα αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους, δηλαδή το φυσικό μοντέλο παροχής δεδομένων. Η εκπαίδευση ενός Νευρωνικού Δικτύου μπορεί να γίνει είτε με επίβλεψη είτε χωρίς επίβλεψη, η εκπαίδευση με επίβλεψη έχει ως στόχο στη μείωση του σφάλματος εξόδου κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο.

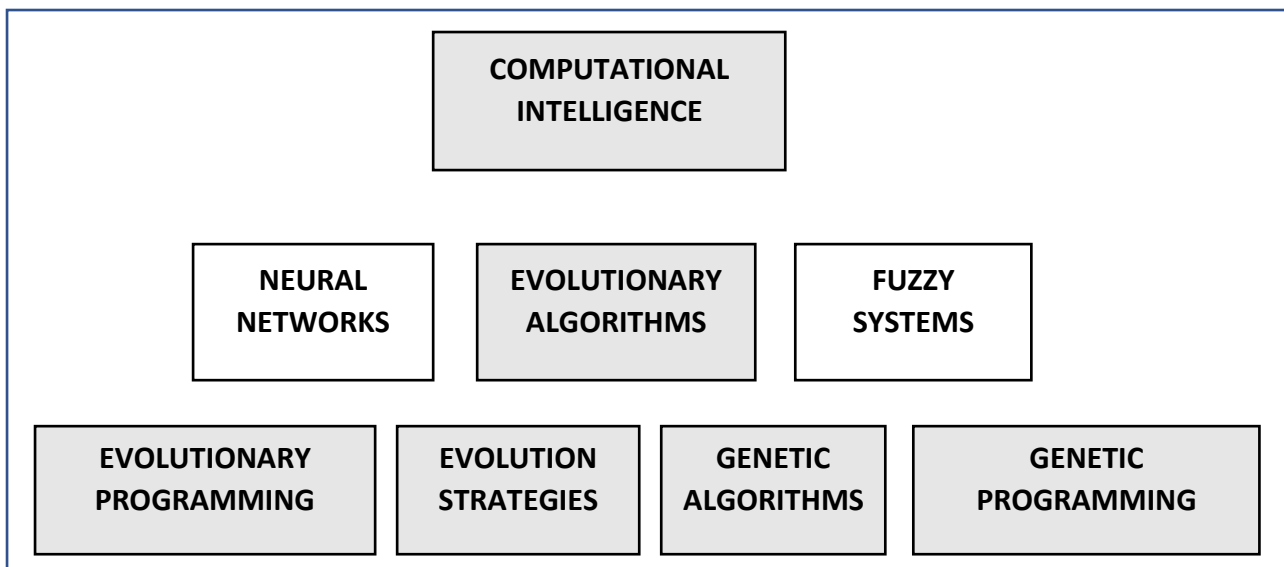
## 4.2 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms, EA) είναι ένας ευρέως γνωστός και ταχύτατα αναπτυσσόμενος, την τελευταία δεκαετία, τομέας της Υπολογιστικής Νοημοσύνης, που επιτυγχάνει την επίλυση πολλών προβλημάτων μηχανικής μάθησης όπως πρόβλεψης, κατηγοριοποίησης καθώς και προβλημάτων βελτιστοποίησης. Είναι στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης που βασίζονται σε ευρετικές μεθόδους που είναι εμπνευσμένες και προσπαθούν να μιμηθούν τη διαδικασία της εξέλιξης των έμβιων οργανισμών [117].

Στις εξελικτικές τεχνικές υπάγονται αρκετές διαφορετικές μέθοδοι που έχουν σχεδόν ταυτόσημες αρχές λειτουργίας. Στη κατηγορία των Εξελικτικών Αλγορίθμων ανήκουν:

- Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms, GA).
- Γενετικός Προγραμματισμός (Genetic Programming, GP).
- Εξελικτικές Στρατηγικές (Evolution Strategies, ES).
- Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming, EP).

Είναι ταχύτεροι στην διεκπεραίωση πολύπλοκων προβλημάτων από τους κλασικούς αλγόριθμους Βελτιστοποίησης. Η θέση που καταλαμβάνουν στο τομέα της Υπολογιστικής Νοημοσύνης (Computational Intelligence) φαίνεται στην Εικόνα 25.



**Εικόνα 25. Θέση των Εξελικτικών Αλγορίθμων στο χώρο της Υπολογιστικής Νοημοσύνης [118]**

Οι ΕΑ εφαρμόζονται σε δυναμικά συστήματα με πιθανότητα μεταβλητότητας στόχου και περιορισμούς προβλήματος σε σχέση με το χρόνο. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται επιτυχώς σε περιπτώσεις ασυνέχειας χώρου αναζήτησης (χαοτικός με πολλά ακρότατα) και γενικά δίνουν βέλτιστες λύσεις εκεί που οι κλασικές μέθοδοι επίλυσης δεν τα καταφέρνουν ικανοποιητικά.

Οι ΕΑ λειτουργούν σε ένα σύνολο από πιθανές λύσεις, εφαρμόζοντας τον κανόνα “ επιβίωση του βέλτιστου”, ώστε να δημιουργούν βέλτιστες λύσεις ή βέλτιστες προσεγγίσεις στη λύση. Οι ΕΑ λειτουργούν με βάση την εξομοίωση των εξελικτικών διαδικασιών και προσπαθούν να τηρούν τις βασικές αρχές που διέπουν την φυσική εξέλιξη. Οι αρχές αυτές είναι:

- Αναπαραγωγή.
- Τυχαία Μετάλλαξη.
- Ανταγωνισμός.
- Επιλογή των ατόμων του πληθυσμού για εξέλιξη.

Η διασύνδεση του πραγματικού κόσμου με τον κόσμο των εξελικτικών αλγορίθμων, διαμέσου γέφυρας μεταξύ του αρχικού πλαισίου του προβλήματος και του χώρου επίλυσης προβλημάτων όπου διενεργείται η εξέλιξη, είναι το αρχικό στάδιο για τον προσδιορισμό ενός εξελικτικού αλγόριθμου.

Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί σε πραγματικά προβλήματα με πολύ καλά αποτελέσματα καθώς η δομή τους παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης υπολογιστικά δύσκολων προβλημάτων με μικρό υπολογιστικό φόρτο. Ενδεικτικά, αναφέρονται μερικοί τομείς που οι μέθοδοι αυτοί έχουν εφαρμοστεί: *Διοικητική επιστήμη, Χρηματοοικονομική λήψη αποφάσεων, Διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας, Πρόβλεψη ζήτησης.*

Τα Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks) και οι Εξελικτικοί αλγόριθμοι εμφανίζουν πολλά σημεία αλληλεπίδρασης. Ο συνδυασμός αυτών των δυο μας οδηγεί σε Υβριδικούς αλγόριθμους (Hybrid Algorithms, HA) πιο αποτελεσματικούς και πιο ακριβείς, οι οποίοι αποτελούν εξελιγμένες μεθόδους που στηρίζονται σε τακτικές οι οποίες συνδυάζουν διαφορετικές μεθοδολογίες προερχόμενες από τους χώρους της μαθηματικής επιστήμης, της στατιστικής επιστήμης ή να συνδυάζουν τεχνικές για να επιλύσουν επιμέρους τμήματα ενός ευρύτερου προβλήματος.

Παράδειγμα υβριδικού εξελικτικού αλγορίθμου αποτελεί ο αλγόριθμος Πυγολαμπίδας (Firefly Algorithm, FA) [119] ο οποίος βασίζεται στο μοτίβο που ακολουθεί η λάμψη των πυγολαμπίδων ή τη στρατηγική μετακίνησης τους στο χώρο. Όσον αφορά τις τεχνολογικές εφαρμογές του αλγορίθμου ενδεικτικά αναφέρονται η ρομποτική, η επεξεργασία εικόνας και ο σχεδιασμός κεραιών και προβολών.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης Χρήσης του Αρδευτικού Νερού**

Για την επιτυχία μιας εφαρμογής ευφυούς άρδευσης απαιτείται γνώση των ειδικών συνθηκών του χωραφιού, σωστός υπολογισμός της επιθυμητής ποσότητας αρδευτικού νερού, εκτέλεση της εντολής ποτίσματος και τελικά ορθή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας αυτής.

### **5.1 Υπηρεσία ευφυούς άρδευσης Gaiasense**

Το μοντέλο άρδευσης gaiasense [120] βασίζεται στη παραδοχή ότι τμήματα αγρών με παρεμφερή χαρακτηριστικά (είδος καλλιέργειας, σύσταση εδάφους, μέθοδος άρδευσης) έχουν και παραπλήσιες υδατικές ανάγκες. Συνεπώς, είναι δυνατό να εφαρμοσθεί σε όλα τα αγροτεμάχια μιας περιοχής με κοινά χαρακτηριστικά, παρόμοιο μοντέλο άρδευσης.

Η εφαρμογή της υπηρεσίας του gaiasense σε μεγάλες εκτάσεις με παρεμφερή χαρακτηριστικά, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους και του απαιτούμενου χρόνου με ταυτόχρονη αύξηση του παραγόμενου προϊόντος.

#### **5.1.1 Τεχνολογική υποδομή**

Η πλατφόρμα gaiasence αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα υπηρεσιών οι οποίες βασίζονται στον μετεωρολογικό σταθμό gaiatron (έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία NEUROPUBLIC [121]) και τους αισθητήρες με τους οποίους διασυνδέεται (αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας, ατμοσφαιρικούς αισθητήρες) μέσω του οποίου υποστηρίζεται η πλήρως αυτοματοποιημένη άρδευση μιας καλλιέργειας.

Με τη βοήθεια των αισθητήρων αυτών συλλέγονται πληροφορίες σχετικές με την υγρασία και τη θερμοκρασία του εδάφους του αγρού αλλά και απαραίτητα μετεωρολογικά και κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής.

Τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί, αναλύονται και επεξεργάζονται από το σύστημα το οποίο με την χρήση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης και την εφαρμογή εξειδικευμένων μοντέλων άρδευσης δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο εφαρμογής ποτίσματος για το συγκεκριμένου αγρό.

Το μοντέλο αυτό αποστέλλεται ασύρματα στο τηλεμετρικό σταθμό που έχει εγκατασταθεί στο αγροτεμάχιο εξασφαλίζοντας έτσι την διαχείριση της άρδευσης χωρίς να απαιτείται η παρουσία του παραγωγού στο χωράφι.

Τέλος, αφού ολοκληρωθεί η άρδευση, αξιολογούνται τα αποτελέσματα με τη καταγραφή της υγρασίας του εδάφους από εξειδικευμένους αισθητήρες.

### 5.1.2 Αλγόριθμος Εφαρμογής

- **Πρώτο (1<sup>ο</sup>) στάδιο:** Στην περιοχή εφαρμογής επιλέγεται ένα αγροτεμάχιο και εγκαθίσταται ο σταθμός gaiatron, μέσω του οποίου θα καταγράφονται διάφορα μετεωρολογικά δεδομένα και η υγρασία του εδάφους.
- **Δεύτερο (2<sup>ο</sup>) στάδιο:**
  - Διενεργείται εδαφολογική ανάλυση του αγροτεμαχίου.
  - Καταγράφονται με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού τα επιμέρους στοιχεία που αφορούν την καλλιέργεια (μέθοδος ποτίσματος, ποικιλία, αποστάσεις μεταξύ των φυτών, κ.α).
  - Με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού καταγράφονται λεπτομερώς και όλες οι εργασίες που διενεργούνται στον αγρό (συχνότητα άρδευσης, εφαρμογές λιπασμάτων, κ.α.).
  - Επικουρικά και μόνο αν θεωρηθεί απαραίτητο, διενεργούνται αναλύσεις για να διαπιστωθεί η ποιότητα του νερού άρδευσης.
  - Με τη χρήση ειδικών οργάνων και από εξειδικευμένο προσωπικό διενεργούνται μετρήσεις συγκεκριμένων παραμέτρων των φυτών για να διαπιστωθεί η υδατική κατάσταση τους. Χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό για την καταχώρηση αυτών των μετρήσεων.
- **Τρίτο (3<sup>ο</sup>) στάδιο:** Με το πέρας της αρδευτικής περιόδου, εξειδικευμένο προσωπικό επεξεργάζεται και αξιολογεί όλα τα στοιχεία για την εκπόνηση συγκεκριμένου μηχανισμού άρδευσης.
- **Τέταρτο (4<sup>ο</sup>) στάδιο:** Η ίδια διαδικασία διενεργείται και την επόμενη καλλιεργητική περίοδο για περαιτέρω επεξεργασία και πιθανής αναβάθμισης του μηχανισμού άρδευσης, ενώ ταυτόχρονα ξεκινά η αποστολή εξειδικευμένων οδηγιών στους καλλιεργητές μέσω σύντομων γραπτών μηνυμάτων (Short message Service ,SMS).

### 5.1.3 Αποτίμηση Απόδοσης

Με τη χρήση συγκεκριμένου μηχανισμού άρδευσης για κάθε καλλιέργεια, επιτυγχάνουμε σημαντική **μείωση του κόστους** (οικονομικό, όγκος νερού, χρόνος που απαιτείται). Παράλληλα, η βελτιστοποίηση της χρήσης νερού συμβάλλει θετικά και σε άλλες καλλιεργητικές εργασίες, όπως η λίπανση και η φυτοπροστασία.

## 5.2 FIGARO Project

Το έργο “Flexible and Precise Irrigation Platform to Improve Farm Scale Water Productivity” (FIGARO) [122] είναι ένα πανευρωπαϊκό ερευνητικό έργο στα πλαίσια του Seventh Framework Program (FP7) [123], το οποίο έχει σαν στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας του νερού, μέσω της ανάπτυξης μιας πλατφόρμας άρδευσης ακριβείας που δίνει την δυνατότητα στους καλλιεργητές να επωφεληθούν από τις εξελίξεις αιχμής στην τεχνολογία άρδευσης.

Η πλατφόρμα FIGARO εφαρμόζεται σε καλλιέργειες που έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε νερό με σκοπό να βελτιώσει την αποδοτικότητα χρήσης του νερού, σε επίπεδο αγροκτήματος.

### 5.2.1 Τεχνολογική υποδομή

Η πλατφόρμα έχει εφαρμοστεί για τρία (3) χρόνια σε έντεκα (11) διαφορετικές αγροτικές τοποθεσίες, που βρίσκονται σε διαφορετικές χώρες, κλίματα, εδάφη και καλλιέργειες. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι το σύστημα είναι αποτελεσματικό και με μεγάλο δυνητικό όφελος για τους καλλιεργητές.

Ο Food and Agriculture Organization (FAO) [124] φιλοξενεί βάσεις δεδομένων και λογισμικό τελευταίας τεχνολογίας για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των πολλών μεταβλητών που απαιτούνται για τη διασφάλιση της επισιτιστικής ασφάλειας με παράλληλη ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Όλα τα αυτόνομα μοντέλα λογισμικού και άλλα εργαλεία του FAO μπορούν να ληφθούν δωρεάν, για χρήση απευθείας στο πεδίο ή για βοήθεια σε ερευνητικά έργα.

Οι βασικές βάσεις δεδομένων και τα μοντέλα λογισμικού περιλαμβάνουν:

- **AQUASTAT:** [125] Το παγκόσμιο σύστημα πληροφοριών νερού του FAO.
- **AQUACROP:** [126] Ένα από τα κορυφαία μοντέλα λογισμικού παραγωγικότητας καλλιεργειών-νερού.
- **AQUAMAPS:** [127] Παγκόσμια χωρική βάση δεδομένων για το νερό και τη γεωργία.
- **Global Agro-Ecological Zones (GAEZ):** [128] Παγκόσμιες Αγροοικολογικές Ζώνες.
- **Harmonized World Soil Database (HWSD):** [129] Η εναρμονισμένη παγκόσμια βάση δεδομένων εδάφους, με 15.000 μονάδες χαρτογράφησης εδάφους, που συνδυάζει τις υπάρχουσες περιφερειακές και εθνικές ενημερώσεις πληροφοριών εδάφους παγκοσμίως.

## 5.2.2 Αλγόριθμος Εφαρμογής

Δημιουργία συστήματος λήψης αποφάσεων, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της χρήσης του αρδευτικού νερού σε επίπεδο αγροτικής καλλιέργειας.

Μία νέα στρατηγική άρδευσης κατά την οποία αρδεύουμε το καλλιεργούμενο φυτό ανάλογα με τις ανάγκες του, με στόχο να αυξήσουμε την παραγωγικότητα του χρησιμοποιούμενου νερού.

Γίνεται χωροθέτηση του αγροτεμαχίου μελέτης προκειμένου να εξεταστεί:

- Η χρήση νερού από ένα χαρακτηριστικό αγρότη.
- Οι διαφορές της άρδευσης με καταιονισμό από την άρδευση με σταγόνα.
- Η αποδοτικότητα της ελλειμματικής άρδευσης.

Άρδευση Ακριβείας σημαίνει ότι ποτίζουμε την κατάλληλη στιγμή, παρέχοντας την κατάλληλη ποσότητα νερού, με το κατάλληλο τρόπο, στην κατάλληλη θέση.

Έτσι, αυξάνουμε την παραγωγικότητα του νερού εξασφαλίζοντας τους υδατικούς πόρους της περιοχής ενώ ταυτόχρονα μειώνουμε το κόστος άρδευσης και ενέργειας.

Επιπλέον στην άρδευση ακριβείας πρέπει οπωσδήποτε να λάβουμε υπόψη:

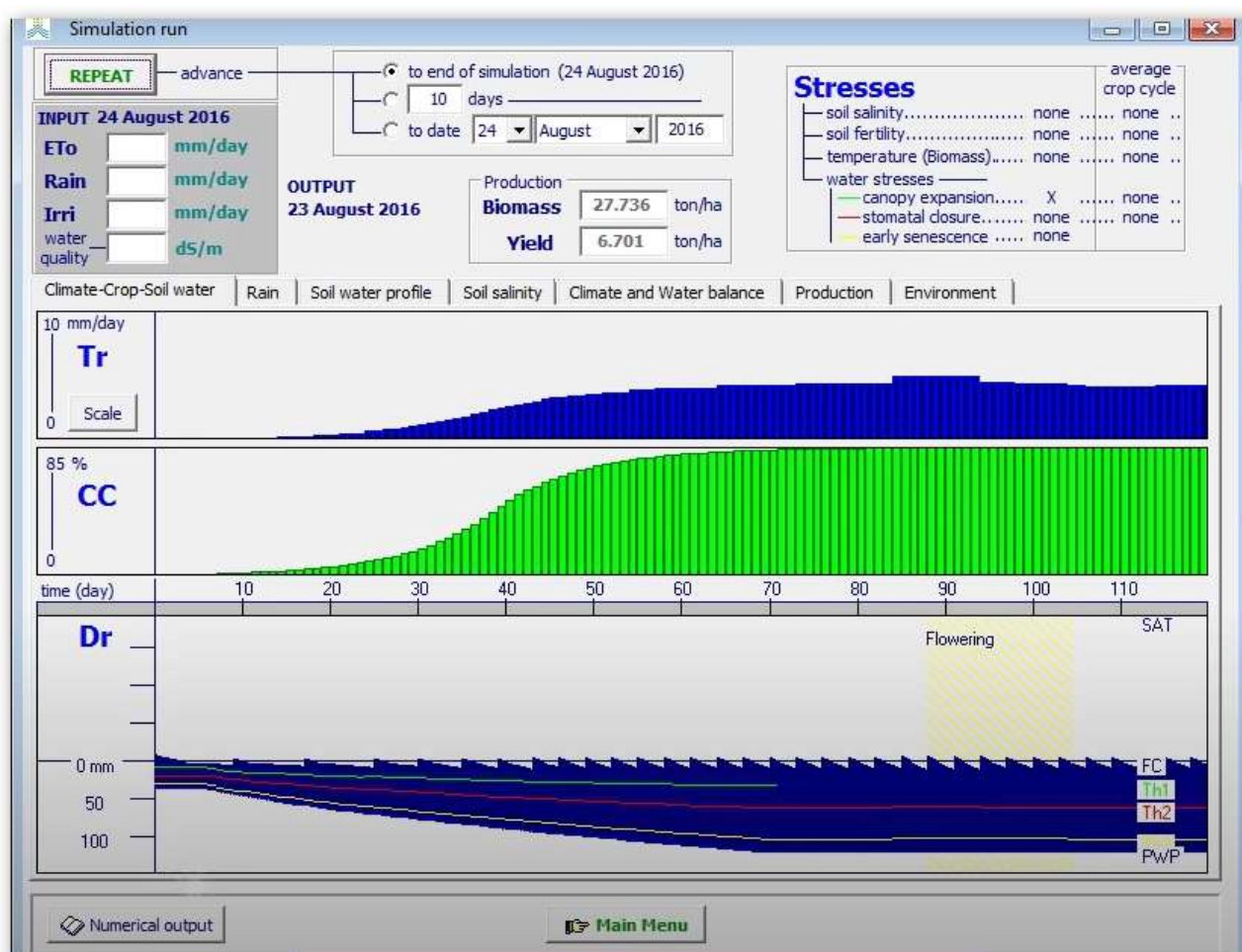
- Τις μετεωρολογικές προβλέψεις της βροχόπτωσης στη περιοχή της καλλιέργειας.
- Τις απώλειες σε νερό μέσω της εξατμισοδιαπνοής [130] (απελευθέρωση νερού υπό μορφή υδρατμών τόσο μέσω της φυσικής εξάτμισης όσο και μέσω της διαπνοής).
- Τα χαρακτηριστικά του εδάφους αναφορικά με την κατακράτηση νερού και τέλος το στάδιο της ανάπτυξης της καλλιέργειας.

Άρδευση Ακριβείας σε τέσσερα (4) στάδια:

- **Πρώτο (1<sup>ο</sup>) στάδιο:**
  - Εδαφολογική ανάλυση για το προσδιορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών του εδάφους από την επιφάνεια έως και το ένα (1) μέτρο.
  - Χημική ανάλυση εδάφους για το προσδιορισμό της απαιτούμενης λίπανσης.
- **Δεύτερο (2<sup>ο</sup>) στάδιο:** Πρόβλεψη καιρού τοπικά για τις επόμενες εκατό είκοσι (120) ώρες (πέντε ημέρες). Με τον τρόπο αυτό προβλέπεται η βροχόπτωση και η εξατμισοδιαπνοή, πληροφορίες αναγκαίες για την άρδευση ακριβείας.
- **Τρίτο (3<sup>ο</sup>) στάδιο:** Μέτρηση της υγρασίας σε διάφορες θέσεις και βάθη με κατάλληλους εδαφικούς αισθητήρες υγρασίας.
- **Τέταρτο (4<sup>ο</sup>) στάδιο:** Μετρήσεις ρυθμού ανάπτυξης φυτού με το SunScan (Canopy Analysis System) [131] – όργανο προσδιορισμού του Leaf Area Index (LAI) [132].

### 5.2.3 Εκτέλεση του Αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε καλλιέργεια Βαμβακιού (είναι φυτό με αυξημένες απαιτήσεις σε νερό και είναι μία ευρέως διαδεδομένη καλλιέργεια καθώς καταλαμβάνει το 13% περίπου της συνολικά καλλιεργούμενης έκτασης στον Ελλαδικό χώρο).



Εικόνα 26. Εκτέλεση του Αλγορίθμου (FIGARO) [133]

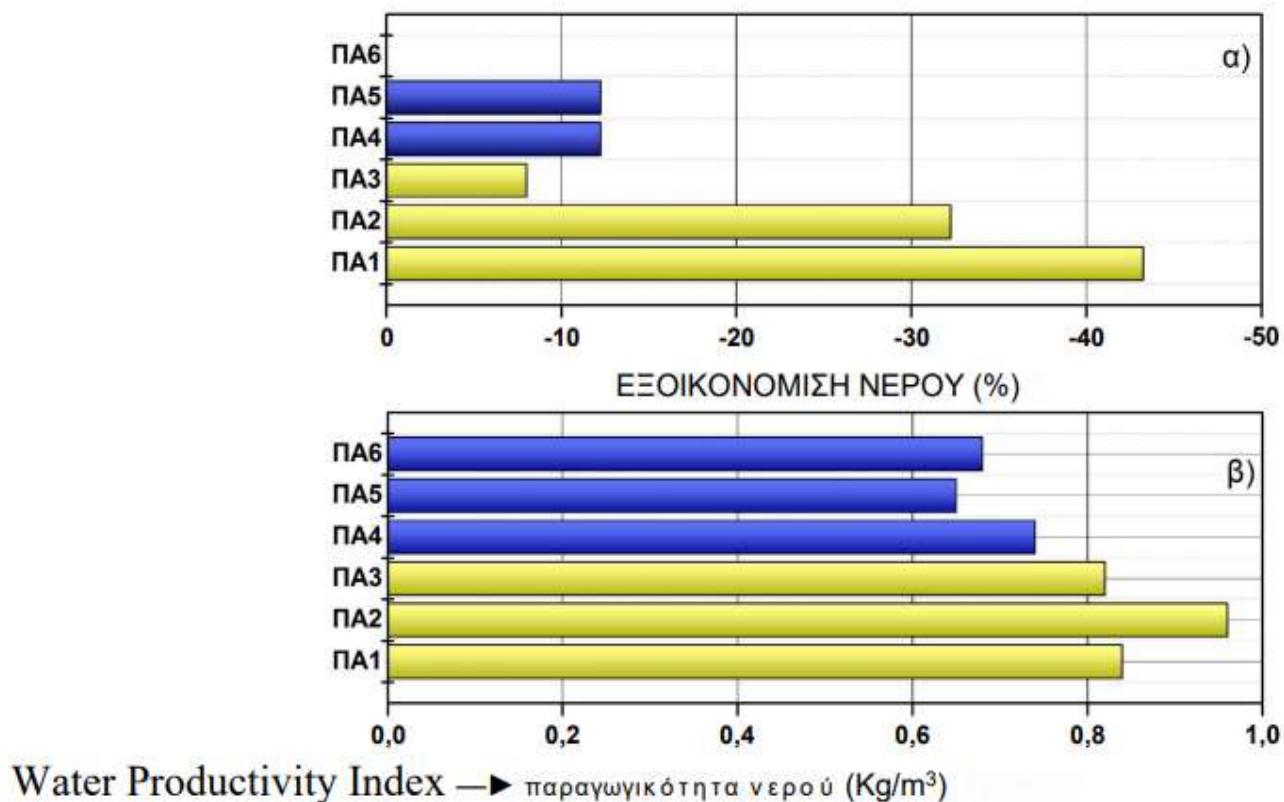


Πίνακας 4. Τελικά Αποτελέσματα 1<sup>ης</sup> Καλλιεργητικής Περιόδου [133]

Διαχείριση	Τρόπος Άρδευσης	Άρδευση (m <sup>3</sup> /στρ)	Πραγματική Παραγωγή (kg/στρέμμα)			Προβλεπόμενη Παραγωγή (kg/στρέμμα)
			1 <sup>ο</sup> χέρι	2 <sup>ο</sup> χέρι	Σύνολο	
Ελλειματική	Σταγόνα	227	303	36,4	340	425,3
Ακριβείας	Σταγόνα	271	363,6	66,7	430	452,1
Εμπειρική	Σταγόνα	368	394	54,5	448	482,6
Ελλειματική	Καταιονισμός	341	321	73	394	377,5
Ακριβείας	Καταιονισμός	351	285	61	345,5	377,5
Εμπειρική	Καταιονισμός	400	321	73	394	434,6

#### 5.2.4 Αποτίμηση Απόδοσης

Εφαρμοσμένη Άρδευση Ακριβείας σε καλλιέργεια ποτιστικού βαμβακιού μέσω της σύζευξης μετεωρολογικών μοντέλων και μοντέλων ανάπτυξης καλλιεργειών.



Εικόνα 27. Αποτίμηση Απόδοσης Αλγορίθμου [134]

Το πείραμα έδειξε ότι:

- Είναι δυνατό να διαχειριστούμε αποδοτικότερα την άρδευση λαμβάνοντας υπόψη την βραχυπρόθεσμη μετεωρολογική πρόβλεψη, τις μετρήσεις εδαφικής υγρασίας και την εκτιμώμενη απαίτηση σε νερό του φυτού με βάση τη φάση ανάπτυξής του.
- Η άρδευση με σταγόνα συμβάλει σημαντικά στην αύξηση της παραγωγικότητας του νερού. Η αποδοτικότητα όμως του συστήματος αυξάνεται περαιτέρω εάν συνδυάσουμε άρδευση με σταγόνα και άρδευση ακριβείας.
- Η εμπειρική άρδευση και η άρδευση ακριβείας έδωσαν περίπου την ίδια παραγωγή. Με την εμπειρική όμως άρδευση χρησιμοποιήθηκαν 100 m<sup>3</sup> νερού ανά στρέμμα περισσότερα. Με δεδομένο ότι για την άρδευση 100 στρεμμάτων βαμβακιού απαιτείται μία μέση άντληση 60.000 m<sup>3</sup>, η εξοικονόμηση νερού που επιτεύχθηκε αντιστοιχεί στο νερό 850 γεωτρήσεων. Στην ευρύτερη περιοχή της Ανατ. Μακεδονίας και Θράκης καλλιεργούνται 500.000 στρέμματα ποτιστικό βαμβάκι, η εξοικονόμηση 100 m<sup>3</sup> νερού ανά στρέμμα για την ίδια παραγωγή, αντιστοιχεί σε 50 εκατομμύρια m<sup>3</sup> νερού ανά περίοδο.

### **5.3 Επίδραση διαφόρων μεθόδων έξυπνης άρδευσης στο φυτό Ηλίανθο**

Ο ηλίανθος ο ετήσιος (*Helianthus annuus*) είναι μονοετές εαρινό φυτό, που καλλιεργείται κυρίως για τους σπόρους του και το λάδι (ηλιέλαιο) που περιέχουν. Εξαιτίας των ελαιούχων σπόρων του θεωρείται ενεργειακό φυτό από το οποίο μετά από επεξεργασία προκύπτει βιοντίζελ (υγρό βιοκαύσιμο από ζωικά λίπη ή φυτικά έλαια το οποίο είτε αντικαθιστά το συμβατικό ντίζελ είτε προστίθεται σε αυτό). Στόχος του έξυπνου αλγορίθμου που ακολουθεί είναι η εξοικονόμηση νερού μέσω του σωστού προγραμματισμού των αρδεύσεων με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της ενεργειακής ωφέλειας της καλλιέργειας.

#### **5.3.1 Τεχνολογική υποδομή**

Η επίδραση από την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων άρδευσης στην καλλιέργεια ηλίανθου μελετήθηκε σε πειραματικό αγροτεμάχιο που βρίσκεται στο Βελεστίνο κατά το έτος 2012. Το έδαφος του πειραματικού αγρού είναι ίλυο-αργιλοπηλώδες, το PH του είναι 7,8 και η οργανική ουσία 0,97% και υφίσταται διαρκής διάβρωση εξαιτίας της κλίσης του.

Το πειραματικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Πλήρων Τυχαιοποιημένων Ομάδων με δύο (2) μεταχειρίσεις και τέσσερις (4) επαναλήψεις (Εικόνα 28).

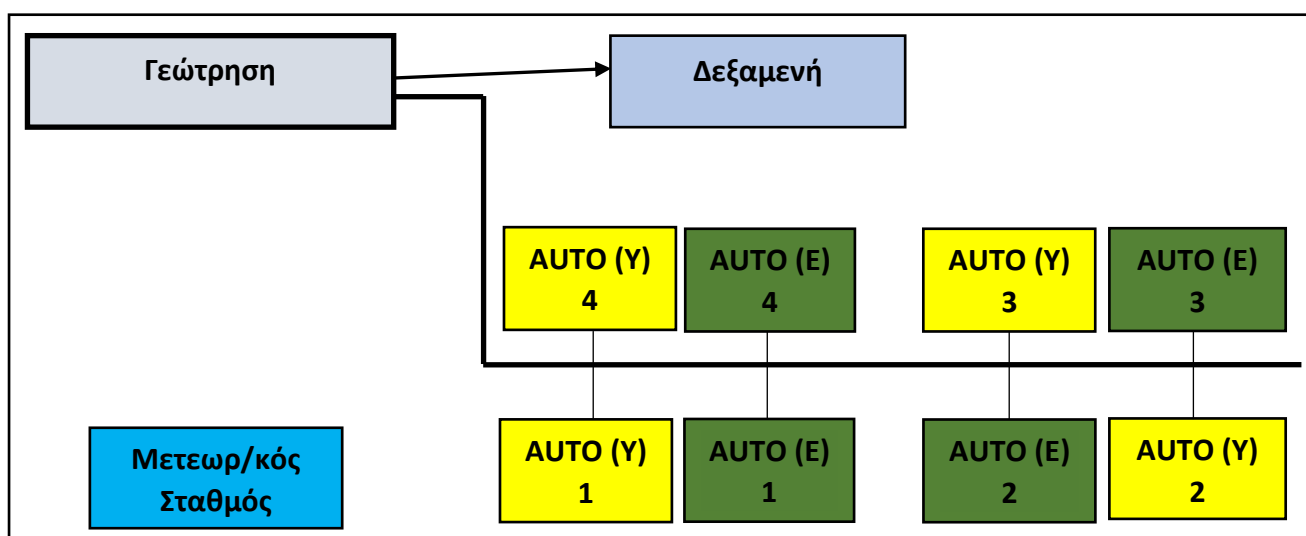
Οι μεταχειρίσεις ήταν:

- Η επιφανειακή στάγδην άρδευση, όπου για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων χρησιμοποιήθηκε το αυτόματο εξατμισόμετρο (AUTO (E)).

- Η υπόγεια στάγδην άρδευση, όπου για τον προγραμματισμό των άρδεύσεων χρησιμοποιήθηκε το αυτόματο εξατμισόμετρο (AUTO (Υ)).

Από τις ενδείξεις του εξατμισόμετρου προέκυψαν οι ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό. Η ποσότητα άρδευσης που εφαρμόστηκε, και στις δύο μεταχειρίσεις, ήταν ίση με το 100% των αναγκών σε νερό.

Για ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο η ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε ήταν ίση με το σύνολο του νερού από την άρδευση και από τις βροχοπτώσεις. Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε επιφάνεια 56 m<sup>2</sup>.



**Εικόνα 28. Διάταξη μεταχειρίσεων και επαναλήψεων στο πειραματικό αγροτεμάχιο [135]**

Οι σταλακτηφόροι σωλήνες του επιφανειακού δικτύου εφαρμογής ήταν κατασκευασμένοι από πολυαιθυλένιο με διάμετρο 20 mm. Ήταν αυτοκαθαριζόμενοι και αυτορυθμιζόμενοι, με παροχή 2,3 l/h και η απόσταση μεταξύ τους ήταν 80 cm. Ο ίδιος τύπος σταλακτηφόρου σωλήνα χρησιμοποιήθηκε και για το υπόγειο σύστημα στάγδην άρδευσης και εγκαταστάθηκε σε βάθος 45 cm από την επιφάνεια του εδάφους με τη χρήση ειδικού υπεδαφοθέτη.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε φίλτρο δίσκων, το οποίο ήταν εμβαπτισμένο στην ουσία trifluralin [136], για την αποτροπή της εισχώρηση ριζών κατά τη διακοπή της άρδευσης στο σύστημα.

Η σπορά της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκε το πρώτο δεκαήμερο του μήνα Απριλίου, με την ποικιλία ηλιάνθου PR64A63 της PIONEER.

Κάθε πειραματικό τεμάχιο είχε έξι (6) σειρές σποράς, οι σειρές είχαν 80 cm απόσταση μεταξύ τους και τα φυτά είχαν περίπου 12 cm απόσταση μεταξύ τους. Σε καμία μεταχείριση δεν εφαρμόστηκε λίπανση ενώ σε όλες τις μεταχειρίσεις εφαρμόστηκαν οι ίδιες καλλιεργητικές φροντίδες.

### 5.3.2 Αλγόριθμος Εφαρμογής

Η εξάτμιση, η οποία είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των αναγκών άρδευσης της καλλιέργειας, μετρήθηκε με τη μέθοδο του εξατμισιμέτρου τύπου A, το οποίο είναι μια κυλινδρική λεκάνη γαλβανισμένου χάλυβα που έχει διάμετρο 121 cm και βάθος 25,4 cm.

Σε αυτή περιέχεται νερό η επιφάνεια του οποίου πρέπει να παραμένει από τα 5 cm έως τα 7,5 cm κάτω από το χείλος της.

Οι μετρήσεις του βάθους του νερού στη λεκάνη γίνονται με τη χρήση σταθμήμετρου ακίδα. Οι ενδείξεις αυτές αντιπροσωπεύουν την εξάτμιση από τη λεκάνη σε mm/day. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του οργάνου είναι η διατήρηση της στάθμης του νερού στο επίπεδο των 7,5 cm από το χείλος της λεκάνης. Οπότε όταν η επιφάνεια του νερού έφτανε στο όριο των 7,5 cm πραγματοποιούνταν εκ νέου πλήρωση του οργάνου. Ο τακτικός καθαρισμός και η ανανέωση του νερού, ώστε να μην θολώνει, θεωρείται επίσης αναγκαίος.

Σε καθημερινή βάση και σε συγκεκριμένη ώρα λαμβάνονταν ενδείξεις εξάτμισης μέσω του οργάνου, οι οποίες πολλαπλασιαζόμενες με το συντελεστή διόρθωσης του εξατμισιμέτρου  $K_{pan}$  έδιναν σαν αποτέλεσμα την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς  $ET_0$ . Η τιμή του  $K_{pan}$  για την συγκεκριμένη περιοχή είχε προσδιοριστεί στο 0,8 [137].

Δηλαδή,  $ET_0 = K_{pan} * E_{pan}$  (mm/day).

Εν συνεχεία, πολλαπλασιάζοντας την τιμή της  $ET_0$  με το φυτικό συντελεστή της καλλιέργειας  $K_c$ , λαμβάνουμε τη πραγματική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ( $ET_c$ ).

Δηλαδή,  $ET_c = ET_0 * K_c$  (mm).

Στην επιφανειακή και στην υπόγεια στάγδην άρδευση, η λειτουργία του συστήματος του αυτόματου εξατμισιμέτρου βασίζεται στη μέθοδο του εξατμισιμέτρου τύπου A, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας μέτρησης στάθμης νερού, ο WL1 [138] και συνεπώς για τη λήψη της ένδειξης εξάτμισης, την έναρξη και την λήξη της άρδευσης δεν απαιτείται η φυσική παρουσία του χειριστή.

Ο αισθητήρας κατέγραφε τη μεταβολή στη τιμή του ηλεκτρικού δυναμικού στο διάτρητο σωλήνα εντός της λεκάνης του εξατμισιμέτρου (στην οποία ήταν τοποθετημένος) και η οποία μεταφέρονταν στο Data logger και μετατρέπονταν μέσω εξίσωσης σε mm νερού που υπήρχαν στη λεκάνη.

Στο Data Logger ορίσαμε ως εντολή, να αθροίζει τη διαφορά των ημερήσιων τιμών εξάτμισης και στη περίπτωση που το άθροισμα έφτανε τα τριάντα (30) mm να δίνεται εντολή σε Relay για την έναρξη της άρδευσης.

Το όριο των τριάντα (30) mm καθορίστηκε έτσι ώστε η άρδευση να είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με την πρακτική δόση άρδευσης, όπως αυτή υπολογίστηκε με βάση τις υδροδυναμικές

παραμέτρους του εδάφους του πειραματικού αγρού (υδατοϊκανότητα, σημείο μόνιμης μάρανσης, φαινόμενο ειδικό βάρος εδάφους), το βάθος ριζοστρώματος της καλλιέργειας, την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή αναφοράς.

Η διακοπή της άρδευσης ορίστηκε να γίνεται όταν συμπληρώνονταν συγκεκριμένος αριθμός ωρών που σχετίζονταν με την ωριαία παροχή νερού των σταλακτήρων, την ισαποχή τους επί της γραμμής άρδευσης και την ισαποχή των σταλακτηφόρων μεταξύ των γραμμών άρδευσης.

Για τη συλλογή των μετεωρολογικών δεδομένων τοποθετήθηκε σε απόσταση 50 m από το πειραματικό αγρό αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός (MetosCompact, της εταιρείας Pessl Instruments GmbH) [139]. Αυτός ο μετεωρολογικός σταθμός έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς με τη μέθοδο Penman – Monteith [140], η οποία χρησιμοποιήθηκε επικουρικά για τον έλεγχο αξιοπιστίας των μετρήσεων από το εξατμισόμετρο τύπου A, λαμβάνοντας πάντα υπόψη τη διαφορετικότητα των μεθόδων.

Κάθε δώδεκα (12) λεπτά καταγράφονταν η θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) και η σχετική υγρασία του αέρα (%), η βροχόπτωση (mm), η ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{Wm}^{-2}$ ) και η ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους ( $\text{m s}^{-1}$ ).

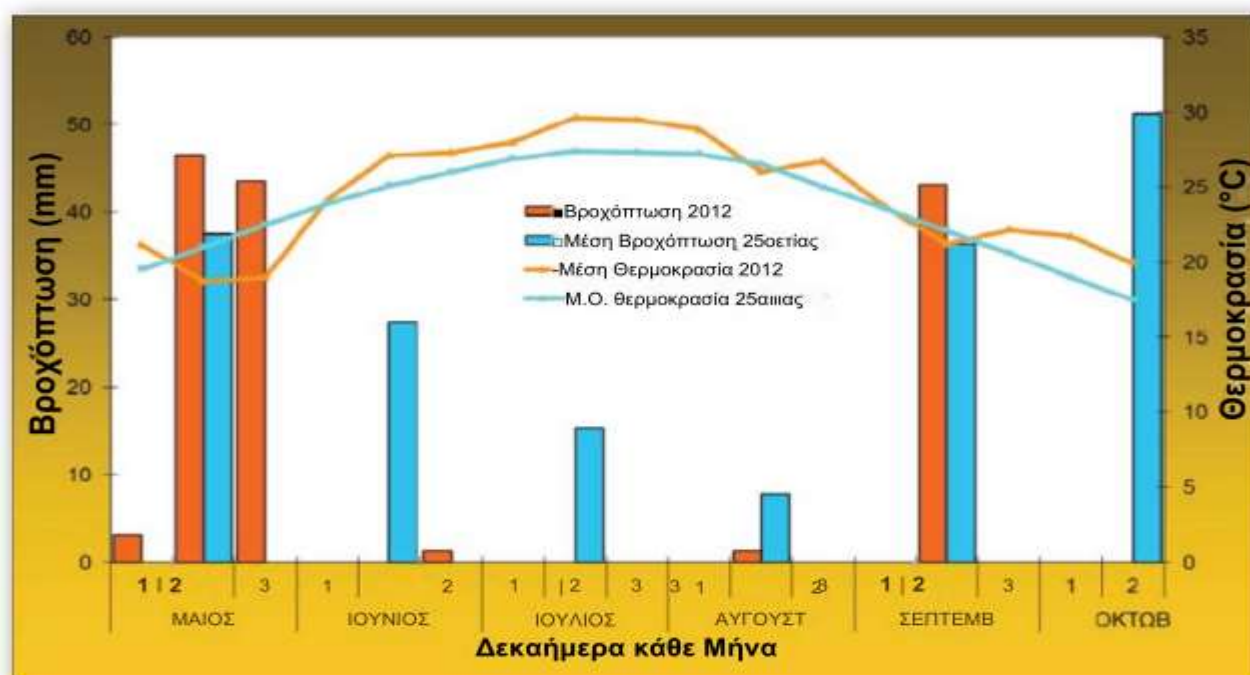
Η επεξεργασία των δεδομένων, που προέκυψαν από τις μετρήσεις των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας, διενεργήθηκε από το στατιστικό πακέτο SPSS version 18 [141]. Η κατάταξη των μέσων όρων έγινε με την εφαρμογή του πολλαπλού τεστ Duncan [142].

Μετρήσεις της εξέλιξης του ύψους των φυτών και της διαμέτρου των κεφαλών πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Οι μετρήσεις αυτές διενεργούνταν κάθε εβδομάδα και λαμβάνονταν από τις δύο μεσαίες γραμμές σποράς κάθε πειραματικού τεμαχίου. Με αυτή την πρακτική, αποφεύγεται η αλληλεπίδραση με γειτονικές γραμμές σποράς και γειτονικά πειραματικά τεμάχια. Η τελική παραγωγή σπόρου προσδιορίστηκε με καταστροφική δειγματοληψία των φυτών που αντιστοιχούσαν σε ένα (1)  $\text{m}^2$  από τις δύο (2) μεσαίες σειρές των μεταχειρίσεων. Από την τελική παραγωγή σπόρου και μετά από εργαστηριακή ανάλυση, προέκυψε η παραγωγή ενέργειας (βιοντίζελ) που αποτελούσε και τον κύριο στόχο της έρευνας.

### 5.3.3 Αποτίμηση Απόδοσης

Τα κλιματικά δεδομένα (ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας) της καλλιεργητικής περιόδου 2012 όπως καταγράφηκαν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό παρουσιάζονται στην Εικόνα 29, σε σχέση με τις αντίστοιχες μέσες τιμές των τελευταίων είκοσι πέντε (25) ετών. Η βροχόπτωση συμβολίζεται με τις μπάρες ενώ με τις γραμμές

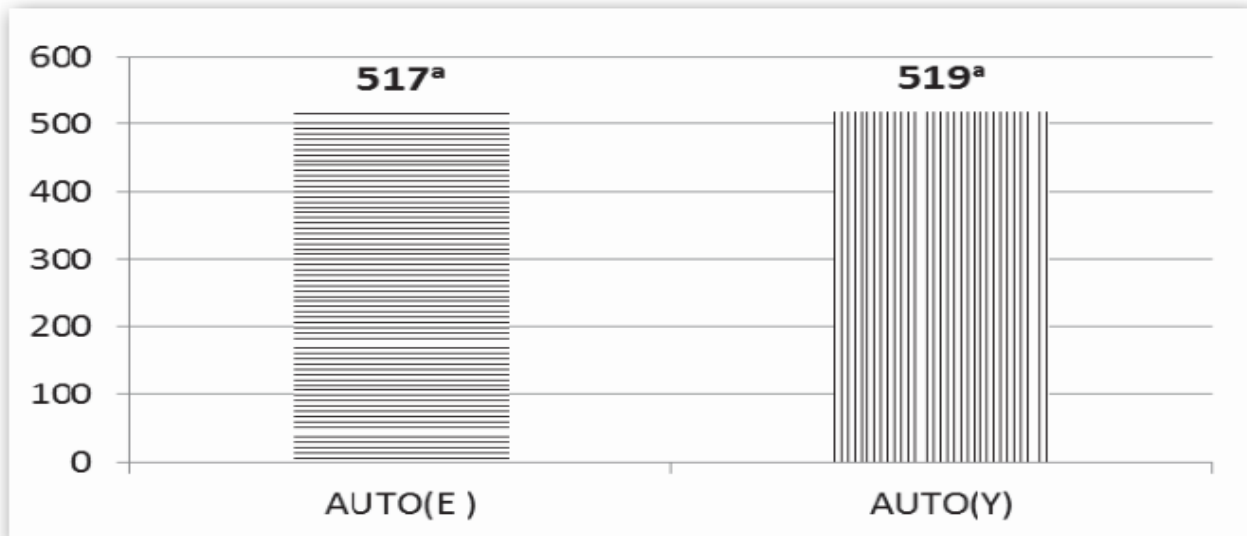
συμβολίζεται η θερμοκρασία. Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 29, η υψηλότερη τιμή βροχόπτωσης σημειώθηκε το δεύτερο δεκαήμερο του μήνα Μαΐου κατά την καλλιεργητική περίοδο του 2012 και ήταν 46,50 mm.



**Εικόνα 29. Κλιματικά δεδομένα για τις καλλιεργητικές περιόδους 2011 και 2012 [135]**

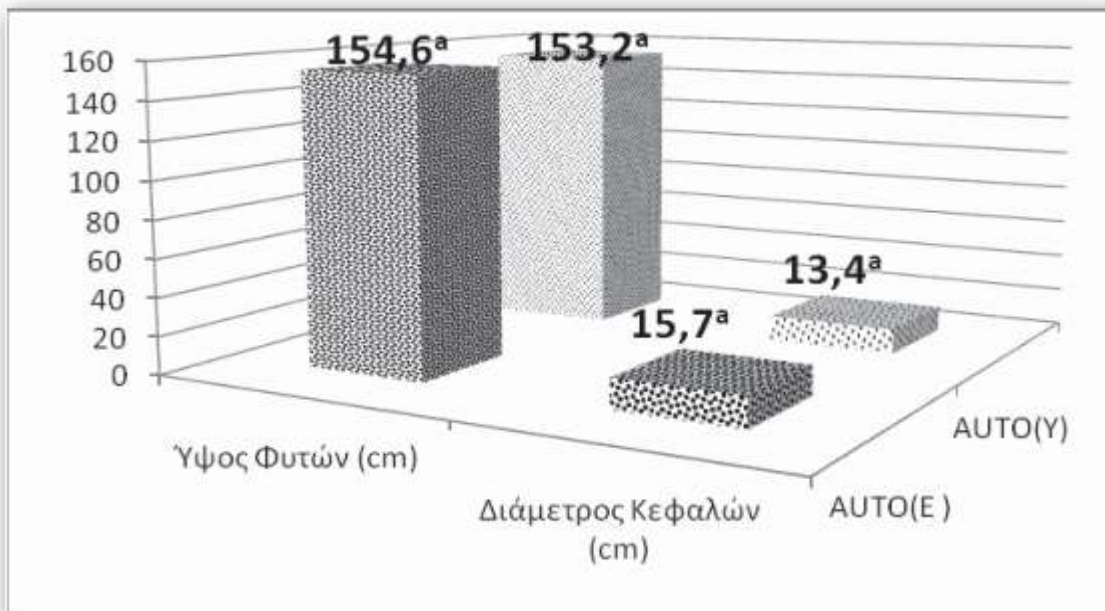
Ο συνολική ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε για άρδευση στις δύο μεταχειρίσεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 30. Επιπλέον, εκτός από την ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου με στάγδην άρδευση, στην Εικόνα 30 συμπεριλαμβάνεται και η άρδευση με καταιονισμό που πραγματοποιήθηκε μετά την ολοκλήρωση της σποράς και τη χημική ζιζανιοκτονία. Στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου του 2012, ως προς την ποσότητα νερού που εφαρμόστηκε για άρδευση δεν παρουσιάστηκαν διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% μεταξύ των μεταχειρίσεων.

### Συνολική ποσότητα νερού (m<sup>3</sup>/στρέμμα)



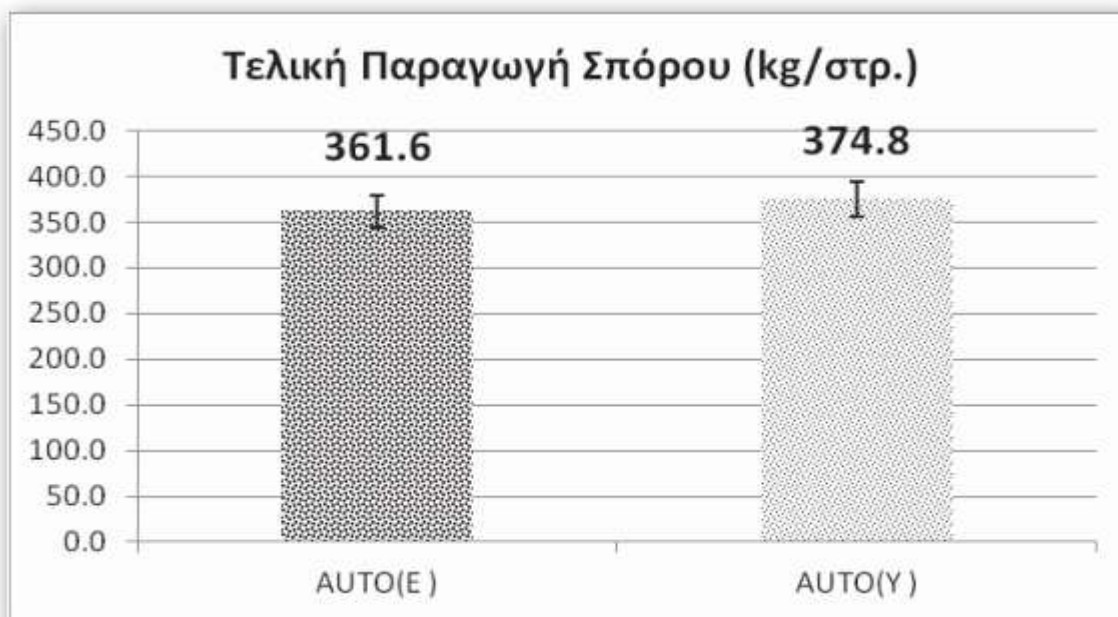
**Εικόνα 30. Συνολική ποσότητα νερού (m<sup>3</sup>/στρ.) που εφαρμόστηκε κατά την άρδευση για κάθε μεταχείριση [135]**

Δεν παρατηρήθηκαν διαφορές, σχετικά με το ύψος φυτών της καλλιέργειας σε επίπεδο σημαντικότητας 5% μεταξύ των μεταχειρίσεων, αν και η AUTO(E) παρουσίασε μία τάση υπεροχής. Στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2012, δεν παρατηρήθηκαν επίσης διαφορές σε επίπεδο σημαντικότητας 5% μεταξύ των μεταχειρίσεων, ως προς τη διάμετρο των κεφαλών, ενώ μια μικρή τάση υπεροχής παρουσίασε η AUTO(E), όπως βλέπουμε και στην Εικόνα 31.



**Εικόνα 31. Ύψος φυτών (cm) και διάμετρος κεφαλών (cm) [135]**

Κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2012, την υψηλότερη παραγωγή σπόρου (374,8 kg/στρ.) παρουσίασε η μεταχείριση AUTO(Y) (Εικόνα 32), ενώ δεν παρουσιάστηκε διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας 5%.



**Εικόνα 32. Τελική παραγωγή σπόρου (kg/στρ.) ανά μεταχείριση [135]**

Ο ηλίανθος είναι ένα ενεργειακό φυτό που παρουσιάζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα, καθώς υγρά βιοκαύσιμα είναι δυνατό να παραχθούν από το σπόρο του, ενώ από τα φύλλα και το στέλεχος του στερεά καύσιμα. Φαίνεται να αποτελεί μία εναλλακτική καλλιέργεια για την παραγωγή βιοντίζελ με προοπτικές μελλοντικά, στην Ελλάδα.

Στη συγκεκριμένη έρευνα μελετήθηκαν δύο μέθοδοι στάγδην άρδευσης με αυτοματισμό (AUTO(E) και AUTO(Y)).

Με τη χρήση των μεθόδων αυτών μειώνεται η σπατάλη νερού, καθώς εφαρμόζοντας ακριβώς την απαιτούμενη ποσότητα νερού για την κάλυψη των αναγκών της καλλιέργειας, παρατηρείται βελτιστοποίηση της χρήσης του. Πραγματοποιώντας μόνο τις απαιτούμενες αρδεύσεις αποφεύγεται η επιπλέον σπατάλη ενέργειας ενώ ταυτόχρονα μειώνονται οι μετακινήσεις του παραγωγού από και προς το αγροτεμάχιο με αποτέλεσμα να μειώνονται και οι εργατοώρες για την άρδευση.

Συνεπώς, προτείνεται η αρδευόμενη καλλιέργεια του ηλίανθου στην Ελλάδα, χρησιμοποιώντας για τον προγραμματισμό της άρδευσης τη μέθοδο του αυτόματου εξατμισιμέτρου. Θετικό, θα μπορούσε να θεωρηθεί επίσης το αποτέλεσμα συνδυασμού της με τη μέθοδο της υπόγειας στάγδην άρδευσης, διότι με το συνδυασμό αυτό, παρατηρείται μια ελαφρά τάση υπεροχής ως προς τη παραγωγή σπόρου.



## **5.4 Επίδραση μεθόδων έξυπνης άρδευσης στην ανάπτυξη και παραγωγή δύο (2) ποικιλιών Σόγιας**

Η Σόγια (Glycinemax) [143], είναι φυτό με σπουδαία οικονομική σημασία, γιατί έχει πλούσιο σε πρωτεΐνη σπόρο ο οποίος χρησιμοποιείται για κατανάλωση από τον άνθρωπο και τα ζώα. Από τη σόγια παρασκευάζεται σήμερα ένας μεγάλος αριθμός διαφορετικών προϊόντων τα οποία καταναλώνει ο άνθρωπος μεταξύ των οποίων υποκατάστατα κρέατος, τυριών, γάλακτος, κακάο, βουτύρου, κ.α.

Σε κλίματα σαν της Ελλάδας, ο σωστός προγραμματισμός της άρδευσης είναι απαραίτητος, για σταθερά υψηλές παραγωγές, ακόμα και όταν το νερό είναι άμεσα διαθέσιμο για άρδευση σε ικανοποιητικές ποσότητες. Βασίζεται σε μετεωρολογικές προβλέψεις και μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας.

Στόχος του έξυπνου αλγορίθμου που θα εφαρμοστεί παρακάτω αποτελεί η συγκριτική αξιολόγηση της ανάπτυξης και της παραγωγής δύο (2) υβριδίων σόγιας. Ενός πρώιμου (PR91M10) και ενός όψιμου (PR92B63), σε σπόρο και σε λάδι, όταν αυτά υπόκεινται σε πέντε (5) μεταχειρίσεις, κανονικής και ελλειμματικής (100%, 75%, 50%, 25%, 0%) άρδευσης αντίστοιχα.

### **5.4.1 Τεχνολογική υποδομή και Αλγόριθμος Εφαρμογής**

Το πείραμα διεξήχθη σε αγρό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (Γ.Π.Α), στη περιοχή της Αλιάρτου (Κωπαϊδικό πεδίο) κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου 2014.

Εφαρμόστηκε σχέδιο υποδιαιρεμένων τεμαχίων (splitplot) (χρησιμοποιείται όταν κάποιος παράγοντες στο πείραμά μας είναι πολύ δύσκολο ή αδύνατο να τυχαιοποιηθούν σε μικρές περιοχές ή όταν παράγοντες που τυχοποιούνται εύκολα προστίθενται στο πείραμα ενώ αυτό έχει ήδη αρχίσει), με τέσσερις (4) επαναλήψεις, πέντε (5) κύριες επεμβάσεις (100%, 75%, 50%, 25%, 0%) και δύο (2) υποεπεμβάσεις (PR91M10 - PR92B63).

Ο πειραματικός αγρός χωρίστηκε σε σαράντα (40) πειραματικά τεμάχια μεγέθους 9 m<sup>2</sup> το κάθε ένα. Στις 30 Μαΐου 2014, σπάρθηκαν στα πειραματικά τεμάχια τα δύο (2) υβρίδια σόγιας PR91M10 και PR92B63.

Εφαρμόστηκαν πέντε (5) διαφορετικές μεταχειρίσεις άρδευσης:

- Η πλήρης (100%) άρδευση.
- Τρεις (3) ελλειμματικές (75%, 50%, 25%) αρδεύσεις.
- Η μηδενική (0%) άρδευση, η οποία από την έναρξη των μεταχειρίσεων και έπειτα δεν αρδεύτηκε καθόλου.

Ο προγραμματισμός της άρδευσης έγινε με εφαρμογή ημερήσιου ισοζυγίου νερού και στοιχεία από τα αποτελέσματα της εφαρμογής προσομοίωσης άρδευσης ISAREG [144], η

οποία χρησιμοποίησε μετεωρολογικά δεδομένα των τεσσάρων (4) τελευταίων ετών (2011 έως και 2014).

Τα μετεωρολογικά δεδομένα προήλθαν από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής του Γ.Π.Α. που ήταν εγκατεστημένος στον πειραματικό αγρό.

Η σπορά διενεργήθηκε με το χέρι σε πέντε (5) σειρές ανά τεμάχιο με αποστάσεις ίσες με 75 cm μεταξύ των γραμμών και 25 cm επί της γραμμής.

Η άρδευση πραγματοποιήθηκε με το σύστημα στάγδην.

Για τη ρύθμιση των μεταχειρίσεων, πέντε (5) ηλεκτροβάννες συνδέθηκαν στον κεντρικό αγωγό (Φ25 mm) του δικτύου, ενώ σταλακτηφόροι αγωγοί διαμέτρου 16 mm (με αυτορυθμιζόμενους σταλακτήρες παροχής 4,5 l/h ανά 33 cm), επιλέχθηκαν για το δίκτυο εφαρμογής.

Έγιναν πέντε (5) μεταχειρίσεις άρδευσης για κάθε υβρίδιο. Το νερό, το οποίο εφαρμόστηκε κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου ανέρχεται:

- για την 100% μεταχείριση στα 185 mm (πλήρης άρδευση),
- για την 75% μεταχείριση ήταν 139 mm,
- για την 50% μεταχείριση ήταν 93 mm,
- για την 25% μεταχείριση ήταν 46 mm.

Τα φυτά της μηδενικής μεταχείρισης δεν αρδεύτηκαν καθόλου. Το έδαφος από πλευράς μηχανικής σύστασης μετά από δειγματοληψία και ανάλυση χαρακτηρίστηκε ως αργιλώδες (C).

Το ύψος των φυτών μετριούνταν περιοδικά, περίπου κάθε δεκαπέντε (15) ημέρες. Στη συνέχεια με καταστροφικές δειγματοληψίες μετρήθηκε ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) και το ξηρό βάρος των φυτών, σε τρία (3) φυτά ανά πειραματικό τεμάχιο.

Οι δειγματοληψίες που παρακάτω θα χαρακτηρίζονται ως 1η, 2η, 3η, 4η πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχα σε 32, 47, 60 και 74 ημέρες μετά τη σπορά.

Η συγκομιδή της πρώιμης ποικιλίας PR91M10 έγινε 98 ημέρες μετά τη σπορά (5/9/2014) ενώ η συγκομιδή της όψιμης ποικιλίας PR92B63 έγινε 115 ημέρες μετά τη σπορά (22/9/2014).

Σε κάθε πειραματικό τεμάχιο συγκομίστηκαν εννέα (9) φυτά στα οποία μετρήθηκαν το ολικό ξηρό βάρος του φυτού, το ξηρό βάρος των σπόρων, το ξηρό βάρος στελεχών, ο αριθμός

σπόρων, ο αριθμός λοβών, η περιεκτικότητα των σπόρων σε λάδι και της ολικής πρωτεΐνης σε ποσοστό % της ξηράς ουσίας.

Η ελαιοπεριεκτικότητα μετρήθηκε με εκχύλιση με πετρελαϊκό αιθέρα σύμφωνα με τη μέθοδο AOAC 920.39 [145], προσαρμοσμένη στο πρωτόκολλο της εταιρείας FOSS. Ο προσδιορισμός της ολικής πρωτεΐνης έγινε σύμφωνα με τη μέθοδο Kjeldahl [146], μετά από χώνευση των δειγμάτων με καταλύτη Se, σύμφωνα με την μέθοδο του AOAC 2001.11 [147] και την εφαρμογή AN3001 της εταιρείας FOSS για τα μηχανήματα Block.

Η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων (Ανάλυση Διακύμανσης ή Ανάλυση Διασποράς, ANOVA) έγινε με την εφαρμογή JMP8.

#### 5.4.2 Αποτίμηση Απόδοσης

Ορισμένα στοιχεία από τα αποτελέσματα της ANOVA για τα χαρακτηριστικά της παραγωγής των δύο (2) υβριδίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Ειδικότερα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σύμφωνα με το στατιστικό κριτήριο F από το οποίο προκύπτει αν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές για τα εν λόγω χαρακτηριστικά (Prob>F).

**Πίνακας 5. Στοιχεία αποτελεσμάτων ANOVA (Prob>F) [148]**

Πηγή Πα- ραλλακτικό- τητας	Αριθμός Σπόρων	Αριθμός Λοβών	ζ. Βάρος Στελέχους	ζ. Βάρος Σπόρων	ζ. Βάρος Φυτού	Ελαιοπερι- εκτικότητα σπόρων	Περιεκτικό- τητα σε πρωτεΐνες
Υβρίδιο	< ,0001*	< ,0001*	0,0105*	< ,0001*	< ,0001*	< ,0001*	< ,0001*
Επέμβαση	< ,0001*	< ,0001*	< ,0001*	< ,0001*	< ,0001*	0,4324	0,6917
Υβρίδιο χ Επέμβαση	< ,0001*	< ,0001*	0,0010*	< ,0001*	< ,0001*	< ,0001*	0,0002*

Σημ. \* σημαίνει ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά σε επίπεδο σημαντικότητας 95%

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ υβριδίων και επέμβασης, για τα χαρακτηριστικά:

- Αριθμός σπόρων ανά φυτό.
- Αριθμός λοβών ανά φυτό.
- Ξηρό βάρος στελέχους του φυτού.
- Ξηρό βάρος σπόρων ανά φυτό.
- Ολικό ξηρό βάρος φυτού.
- Ελαιοπεριεκτικότητα σε ποσοστό % της ξηράς ουσίας των σπόρων ανά φυτό.
- Περιεκτικότητα πρωτεϊνών σε ποσοστό % της ξηράς ουσίας των σπόρων ανά φυτό.

Επομένως κρίνεται σκόπιμο να γίνει σύγκριση των αντιστοιχών μέσων όρων και με τη μέθοδο της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Από πλευράς χαρακτηριστικών της παραγωγής, σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 5 για όλα τα στοιχεία της παραγωγής υπήρξε αλληλεπίδραση μεταξύ των υβριδίων και των επεμβάσεων. Για τα στοιχεία της ελαιοπεριεκτικότητας και των πρωτεϊνών στην επέμβαση δεν υπήρξε στατιστικά σημαντική διαφορά.

**Πίνακας 6. Αποτελέσματα σύγκρισης μέσων όρων με τη μέθοδο της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς στις περιπτώσεις αλληλεπίδρασης [148]**

Μεταχείριση	Αριθμός Σπόρων	Αριθμός Λοβών	Ξ. Βάρος Στελέχους (γρ.)	Ξ. Βάρος Σπόρων (γρ.)	Ξ. Βάρος Φυτού (γρ.)	Ελαιοπεριεκτικότητα Σπόρων (% της ξηράς ουσίας)	Περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες (% της ξηράς ουσίας)
PR92B63 100%	477,4167 a	226,0000 a	42,7081 a	79,5636 a	156,8161 a	18,9700 f	35,6688 c,d
PR92B63 75%	361,8333 b	175,5833 b	32,6308 b	57,2511 b	117,1172 b	19,1050 f	35,1013 e
PR92B63 50%	354,9722 b	165,2500b,c	26,6408 c	50,5980 c	101,7944 c	18,7100 g	35,2613 d,e
PR92B63 25%	222,7222c,d	110,7500d,e	17,2697d,e	32,1297 e	66,1969 e	19,0575 f	34,9025 e
PR92B63 0%	195,2777d,e	94,7222 e,f	13,9803 e	26,5386e,f	54,5347 f	19,9125 d	33,8900 f
PR91M10 100%	322,5139 b	148,8889 c	33,2522 b	46,7217 c	105,1900 c	20,8650 b	36,7275 b
PR91M10 75%	254,6944 c	126,0556 d	29,7958b,c	38,3869 d	90,3744 d	21,3700 a	36,8263 b
PR91M10 50%	211,9167d,e	100,6944 e	26,8892 c	30,9189 e	74,8400 e	19,9250 d	37,7100 a
PR91M10 25%	218,3889c,d	101,8056 e	18,5211 d	30,3075 e	65,6750 e	20,3175 c	36,0350 c
PR91M10 0%	172,3333 e	78,8056 f	13,4114 e	23,0050 f	49,3242 f	19,4725 e	36,0000 c

Σημ. Μεταχειρίσεις που δεν ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα παρουσιάζουν σημαντική διαφορά.

Μετά τη στατιστική επεξεργασία με τη μέθοδο της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς και σύμφωνα με τα στοιχεία του Πίνακα 6 για τις περιπτώσεις που υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ υβριδίων και μεταχειρίσεων, προκύπτει ότι, σε όλα τα στοιχεία παραγωγής το όψιμο υβρίδιο PR92B63 δείχνει μεγαλύτερη αντοχή στην ξηρασία από το πρώιμο υβρίδιο PR91M10 εκτός από την ελαιοπεριεκτικότητα και την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες.

Όπως φαίνεται λοιπόν από τα στοιχεία του Πίνακα 6, η όψιμη ποικιλία PR92B63 παρουσιάζει μικρότερη περιεκτικότητα σε λάδι και πρωτεΐνες από την πρώιμη ποικιλία PR91M10. Μεταξύ των επεμβάσεων παρατηρούνται διαφορές στους μέσους όρους για όλα τα στοιχεία παραγωγής εκτός της ελαιοπεριεκτικότητας και της περιεκτικότητας των πρωτεϊνών στις οποίες δεν παρατηρούνται στατιστικά σημαντικές διαφορές εντός του κάθε υβριδίου.

Στην Εικόνα 33 παρουσιάζονται οι μεταβολές στα χαρακτηριστικά: ύψος φυτού, LAI και ολικό ξηρό βάρος φυτού, όπως αυτά προσδιορίστηκαν από τις τέσσερις (4) δειγματοληψίες, για τα δύο (2) υβρίδια και τις πέντε (5) μεταχειρίσεις άρδευσης.

Κατά την τρίτη (3<sup>η</sup>) δειγματοληψία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 33, είναι φανερή η υπεροχή του όψιμου υβριδίου PR92B63 έναντι του πρώιμου υβριδίου PR91M10 στον δείκτη φυλλικής επιφάνειας και στην τέταρτη (4<sup>η</sup>) δειγματοληψία και στα τρία (3) χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν (LAI, ολικό ξηρό βάρος και ύψος φυτού).

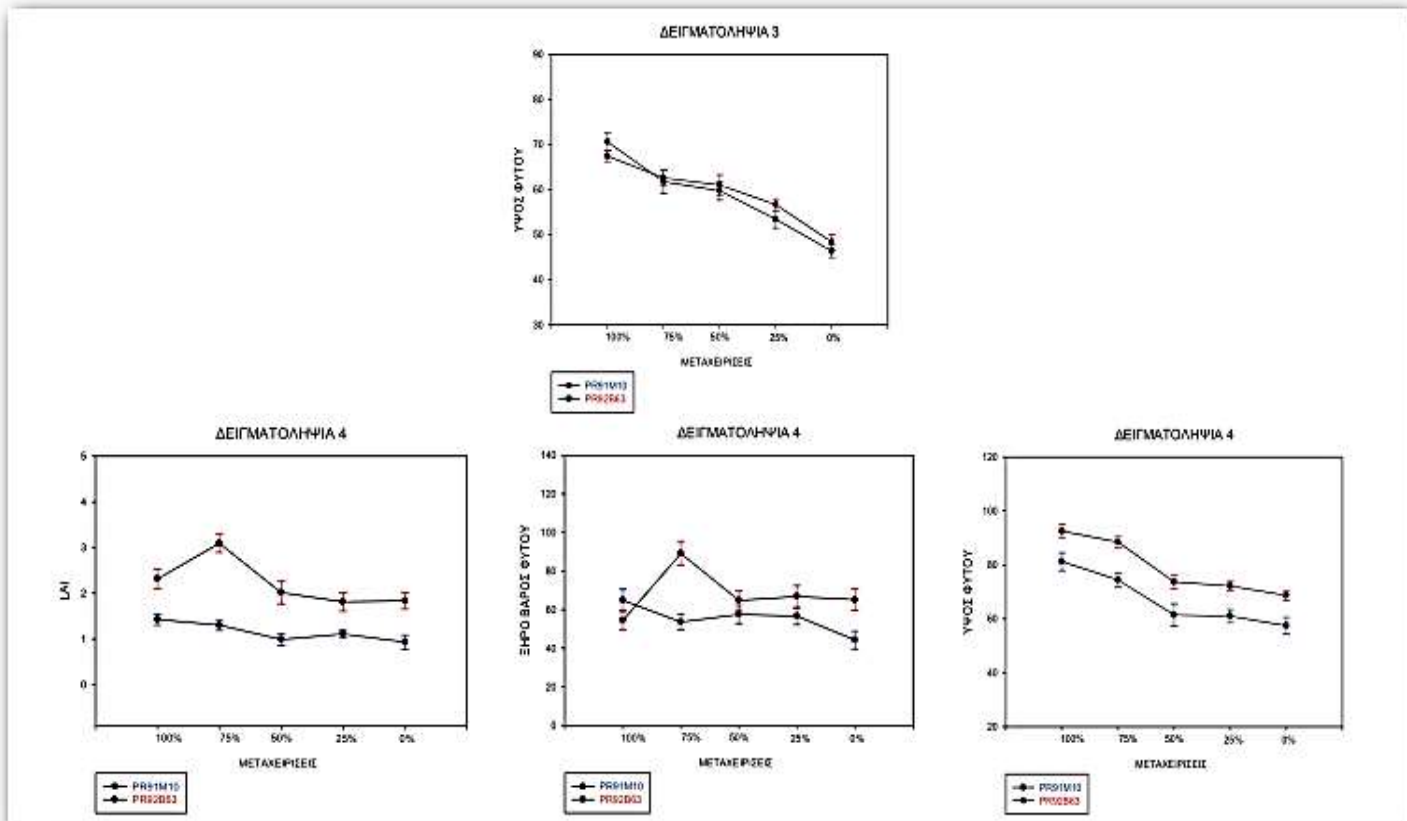
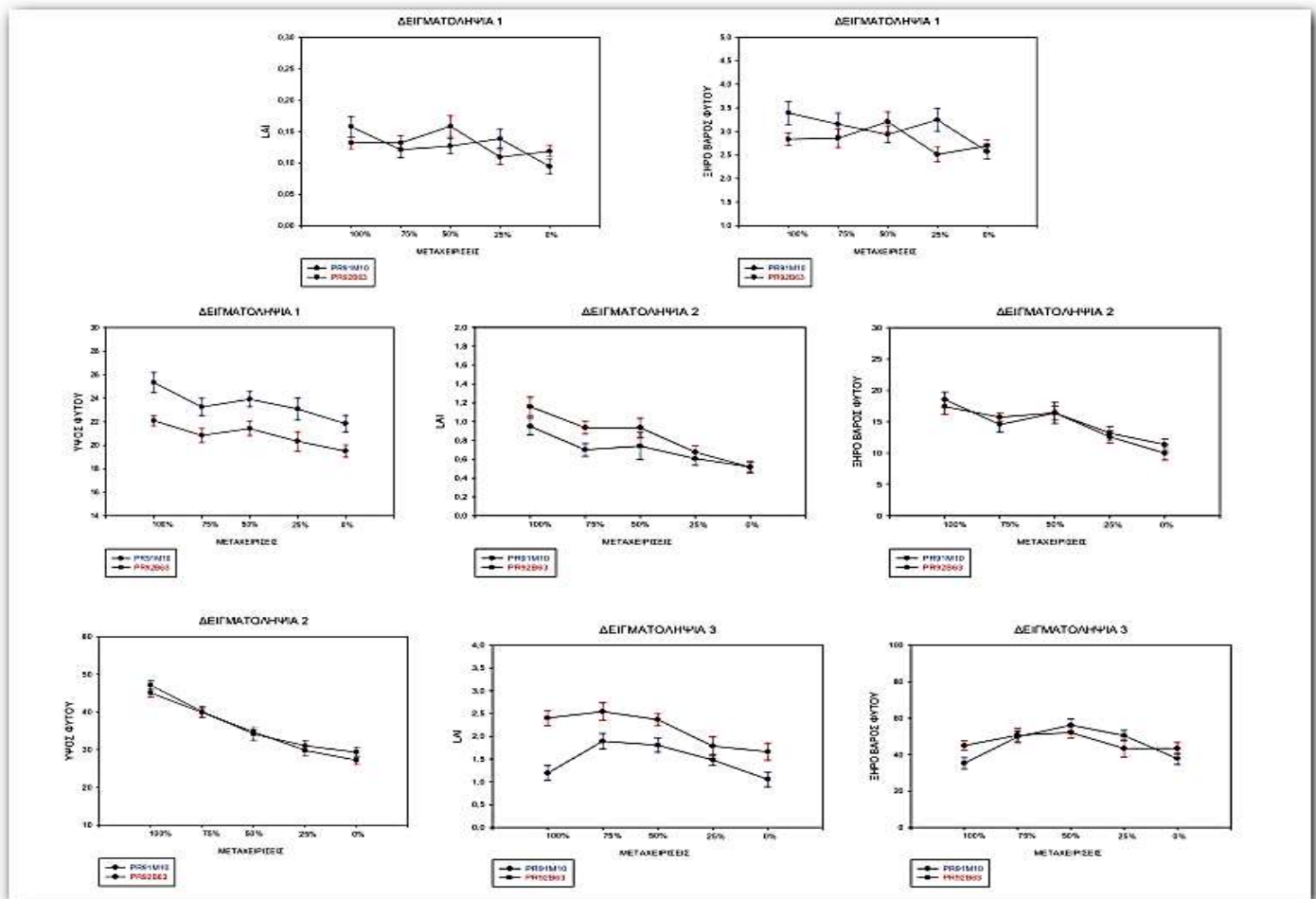
Επισημαίνεται ότι η μεταχείριση 75% κατά την τρίτη (3<sup>η</sup>) και τέταρτη (4<sup>η</sup>) δειγματοληψία δείχνει σημαντική διαφορά από τις άλλες μεταχειρίσεις στη μέτρηση του LAI ενώ στην τέταρτη (4<sup>η</sup>) δειγματοληψία και για το ολικό ξηρό βάρος του φυτού, το οποίο δεν φαίνεται να επηρεάζει, όπως λογικά θα περιμέναμε, αντίστοιχα τα στοιχεία παραγωγής (Πίνακας 6).

Στην ελλειμματική άρδευση, πιο ευαίσθητο, από τα δύο υβρίδια PR92B63 και PR91M10, είναι το πρώιμο υβρίδιο PR91M10, όπως αυτό προκύπτει από τη σύγκριση των μέσων όρων για τα στοιχεία των δειγματοληψιών και των στοιχείων παραγωγής. Επίσης και για τις πέντε (5) υδατικές μεταχειρίσεις και στις δύο (2) ποικιλίες παρουσιάστηκε η μείωση των στοιχείων παραγωγής.

**Πίνακας 7. Αναλυτικά οι παραγωγές των δύο (2) υβριδίων Σόγιας [148]**

πρώιμη ποικιλία PR91M10		όψιμη ποικιλία PR92B63	
Υδατική μεταχείριση	Παραγωγή	Υδατική μεταχείριση	Παραγωγή
100%	311 kg/στρμ.	100%	530 kg/στρμ.
75%	256 kg/στρμ.	75%	382 kg/στρμ.
50%	206 kg/στρμ.	50%	337 kg/στρμ.
25%	202 kg/στρμ.	25%	214 kg/στρμ.
0%	153 kg/στρμ.	0%	177 kg/στρμ.

Σαν συμπέρασμα προκύπτει ότι, η παραγωγή επηρεάζεται αρνητικά από την ελλειμματική άρδευση σε όλα τα επίπεδα.



Εικόνα 33. Παρουσίαση μεταβολών των χαρακτηριστικών του φυτού: ύψος, LAI και ολικό ξηρό βάρος, όπως προσδιορίστηκαν από τις τέσσερις δειγματοληψίες, για τα δύο υβρίδια και τις πέντε μεταχειρίσεις άρδευσης (οι ράβδοι αντιπροσωπεύουν το τυπικό σφάλμα σε κάθε σημείο) [148]

## **5.5 Διαχείριση Αρδευτικού Νερού μέσω απλών Συμβουλών Άρδευσης**

Η έντονη αστάθεια των κλιματικών συνθηκών, η οποία επηρεάζει και την διαθεσιμότητα των υδατικών αποθεμάτων, έχει φέρει τους χρήστες του αρδευτικού νερού αντιμέτωπους με νέες προκλήσεις, που αφορούν τη διαχείριση του νερού και κατ' επέκταση την αγροτική παραγωγή. Η βέλτιστη διαχείριση των υδατικών πόρων στη γεωργία, αφορά στην εξοικονόμηση και αποτελεσματική χρήση του νερού σε συνδυασμό με τη διατήρηση υψηλών αποδόσεων των αρδευομένων καλλιεργειών, την ελαχιστοποίηση του κόστους άρδευσης και την προστασία του περιβάλλοντος.

Το υφιστάμενο καθεστώς στον τομέα των αρδεύσεων χαρακτηρίζεται από έλλειψη στρατηγικής και προγραμματισμού (χρήση επιφανειακών μεθόδων άρδευσης) και έχει ως συνέπεια τη μεγάλη σπατάλη νερού. Η αειφορική (ως αειφόρος χαρακτηρίζεται η ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τη δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιούν τις δικές τους ανάγκες) διαχείριση του αρδευτικού νερού με σκοπό την εξοικονόμηση και την αποτελεσματική χρήση του αποτελεί μονόδρομο.

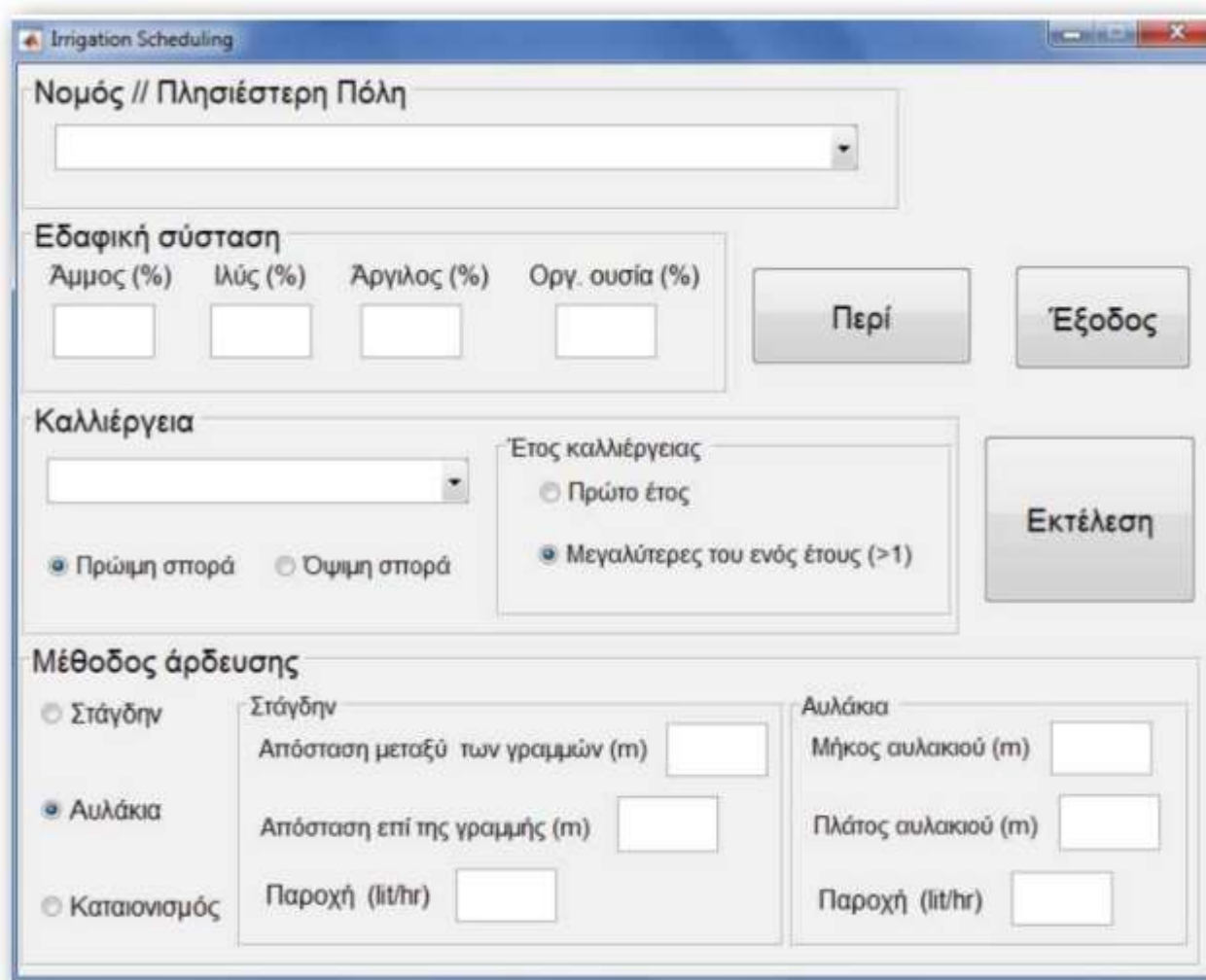
Θα αναπτυχθεί ένα μοντέλο το οποίο με τη βοήθεια ενός λογισμικού (δημιουργήθηκε από το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων) για τη διαχείριση του αρδευτικού νερού, μέσω απλών συμβουλών άρδευσης στον σύγχρονο παραγωγό. Το λογισμικό αυτό λαμβάνει υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εδάφους, της καλλιέργειάς και τις μέσες μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής.

### **5.5.1 Τεχνολογική υποδομή**

Το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων (πρώην Ινστιτούτο Εδαφολογίας Θεσ/κης, ΙΕΘ) [149] πραγματοποιεί κάθε έτος περισσότερες από 3000 αναλύσεις εδαφών για περίπου 1500 παραγωγούς και δέκα (10) αγροτικούς συνεταιρισμούς. Επιπλέον, παρέχει με τη χρήση ειδικού λογισμικού που αναπτύχθηκε στο ΙΕΘ, συμβουλές ορθολογικής λίπανσης. Το λογισμικό αυτό λαμβάνει ως δεδομένα τις φυσικές ιδιότητες του αγρού και τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων πριν την καλλιεργητική περίοδο (αποτελέσματα εδαφολογικής ανάλυσης) και παρέχει “συμβουλευτική λίπανση” δηλαδή υπολογίζει τη δόση λίπανσης, την εποχή και τον τρόπο εφαρμογής των μικρό/μακροστοιχείων.

Το ΙΕΘ επιδιώκει την επέκταση συμβουλών προς τους αγρότες και σε άλλους τομείς, όπως είναι ο τομέας της ορθολογικής άρδευσης. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα λογισμικό το οποίο λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες του εδάφους, τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, τα μέσα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής και την μέθοδο άρδευσης και προτείνει την αθροιστική δόση άρδευσης για κάθε μήνα της βλαστικής περιόδου, το μέσο εύρος άρδευσης και τη διάρκεια της άρδευσης.

Το λογισμικό είναι φιλικό στο χρήστη (έχει αναπτυχθεί σε παραθυρικό περιβάλλον) και μπορεί να εγκατασταθεί με ευκολία σε ένα προσωπικού υπολογιστή, ανεξάρτητα από το λειτουργικό σύστημα που έχει εγκατεστημένο. Ο χρήστης επιλέγει την περιοχή και το είδος της καλλιέργειας, το σύστημα άρδευσης και εισάγει τα ποσοστά άμμου, ιλύος, αργίλου και οργανικής ουσίας του εδάφους (προκύπτουν από εδαφολογική ανάλυση). Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται η σελίδα με το κεντρικό γραφικό περιβάλλον του λογισμικού άρδευσης.



**Εικόνα 34. Κεντρικό γραφικό περιβάλλον του λογισμικού άρδευσης [150]**

Στο λογισμικό, οι συμβουλές άρδευσης λαμβάνουν υπόψη τον προγραμματισμό των αρδεύσεων για όλη τη βλαστική περίοδο σε συνδυασμό με τα μέσα μετεωρολογικά δεδομένα. Το αποθηκευμένο ύψος νερού στο έδαφος για κάθε ημέρα υπολογίζεται από την εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου:

$$SM_i = SM_{i-1} + (ET - P_e - IR)_i \text{ όπου } SM_{LAM} < SM_i \leq SM_{FC} \quad (1)$$

όπου **SM<sub>i</sub>** είναι το αποθηκευμένο ύψος νερού στο έδαφος την ημέρα **i**, **SM<sub>i-1</sub>** είναι το νερό την προηγούμενη ημέρα (**i-1**), **IR<sub>i</sub>**, είναι το ύψος του νερού άρδευσης, **P<sub>ei</sub>** είναι το ύψος του νερού της βροχής, **ET<sub>i</sub>** είναι η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, **SM<sub>LAM</sub>** είναι το αποθηκευμένο



νερό στο επίπεδο της ελάχιστης επιτρεπόμενης υγρασίας εδάφους και  $SM_{FC}$  το νερό στο επίπεδο της υδατοϊκανότητας (όλες οι τιμές είναι σε mm). Για την κάλυψη των αναγκών σε νερό των φυτών, το  $SM_i$  πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερο του  $SM_{LAM}$ . Σε διαφορετική περίπτωση, όταν το  $SM_i$  γίνει ίσο με το  $SM_{LAM}$ , το λογισμικό προτείνει άρδευση με ύψος νερού ίσο προς την ωφέλιμη υγρασία που υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$USM_i = (SM_{FC} - SM_{LAM})RD_i = [SM_{FC} - F(SM_{FC} - SM_{pwp})]RD_i \quad (2)$$

το  $USM_i$  (Useful Soil Moisture) προκύπτει εάν από την ωφέλιμη υγρασία αφαιρέσουμε τη δόση άρδευσης,  $SM_{pwp}$  είναι το αποθηκευμένο νερό στο σημείο μόνιμης μάρανσης,  $RD_i$  είναι το βάθος του ριζοστρώματος (την ημέρα  $i$  που εφαρμόζεται η άρδευση (όλες οι τιμές είναι σε mm) και  $F$  είναι ο συντελεστής ωφελιμότητας.

Μετά την εφαρμογή της άρδευσης, ξεκινά εκ νέου ένας κύκλος υπολογισμού του ύψους του εδαφικού νερού μέχρι την επόμενη άρδευση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται όλη την καλλιεργητική περίοδο, διαμορφώνοντας έτσι το πρόγραμμα άρδευσης. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζεται το σύνολο του αρδευτικού νερού που πρέπει να εφαρμοστεί σε κάθε άρδευση για κάθε μήνα της βλαστικής περιόδου.

Για να προσδιορίσουμε την δόση άρδευσης  $USM_i$ , είναι απαραίτητη προϋπόθεση η εκτίμηση της ογκομετρικής υγρασίας στην υδατοϊκανότητα,  $\theta_{FC}$ , και στο σημείο μόνιμης μάρανσης,  $\theta_{pwp}$ , που υπολογίζονται από την εξίσωση της χαρακτηριστικής καμπύλης του εδάφους (Χ.Κ.Ε) που έχει προταθεί από τον van Genuchten: [151]

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)[1 + (\alpha|h|)^n]^{-(1-1/n)} \quad (3)$$

όπου  $\theta_r$  ( $cm^3cm^{-3}$ ) είναι η υπολειμματική υγρασία,  $\theta_s$  ( $cm^3cm^{-3}$ ) είναι η υγρασία στον κορεσμό,  $h$  (cm) είναι το ύψος πίεσης του εδάφους,  $\alpha$  ( $cm^{-1}$ ) και  $n$  είναι εμπειρικές παράμετροι.

Οι παράμετροι αυτές προσδιορίζονται είτε άμεσα με μετρήσεις στο εργαστήριο, είτε έμμεσα με πεδοσυναρτήσεις μέσω μετρήσιμων φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους όπως η κοκκομετρική σύσταση και η οργανική ουσία.

Οι πεδοσυναρτήσεις που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό για να συνδέσουν το έδαφος της καλλιέργειας με τις παραμέτρους της Χ.Κ.Ε έχουν προταθεί από ερευνητές [152] και είναι της μορφής:

$$\theta_s = 0.838 - 0.283p_b + 0.0013(\%clay) \quad r^2 = 0.849 \quad (4)$$

$$\theta_r = 0.015 + 0.005(\%clay) + 0.014(\%OC) \quad r^2 = 0.702 \quad (5)$$

$$\ln(\alpha) = -2.486 + 0.025(\%sand) - 0.351(\%OC) - 2.617p_b - 0.023 (\%clay) \quad r^2= 0.621 \quad (6)$$

$$\ln(n) = 0.053 - 0.009(\%sand) - 0.013(\%clay) + 0.00015(\%sand)^2 \quad r^2= 0.556 \quad (7)$$

όπου  $p_b$  ( $gcm^{-3}$ ) η φαινομένη πυκνότητα του εδάφους, ( $\%OC$ ) το ποσοστό του περιεχομένου οργανικού άνθρακα, ( $\%silt$ ) το ποσοστό της ιλύος (λάσπη), ( $\%clay$ ) το ποσοστό της αργίλου και ( $\%sand$ ) το ποσοστό της άμμου. Η φαινομένη πυκνότητα του εδάφους υπολογίζεται με την πεδοσυνάρτηση των Manrique and Jones [153] ως εξής:

$$p_b = 1.510 - 0.113(\%OC) \quad r^2= 0.412 \quad (8)$$

Τα ποσοστά  $\%sand$ ,  $\%silt$ ,  $\%clay$  και  $\%OC$  που προκύπτουν από την εδαφολογική ανάλυση, εισάγονται στο λογισμικό από το χρήστη για την περαιτέρω εκτίμηση των  $\theta_{FC}$  (σε  $h_{FC} = -100$  cm ή  $-330$  cm ή  $-500$  cm ανάλογως της υψής του εδάφους) και  $\theta_{pwp}$  (σε  $h_{pwp} = -15000$  cm).

Το λογισμικό άρδευσης περιέχει εκτεταμένες βάσεις δεδομένων με τα χαρακτηριστικά τριάντα επτά (37) καλλιεργειών (8 μεγάλες καλλιέργειες, 15 δένδρωδεις και 14 οπωροκηπευτικά). Συγκεκριμένα περιλαμβάνει: [154] [155]

- τους φυτικούς συντελεστές
- τα στάδια ανάπτυξης
- τους συντελεστές ωφελιμότητας
- ημερομηνίες πρώιμης και όψιμης σποράς
- το μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος για κάθε καλλιέργεια

Οι φυτικοί συντελεστές,  $K_c$ , χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας από την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς [155].

Η λογιστική συνάρτηση που ακολουθεί περιγράφει την ημερήσια ανάπτυξη του ριζικού συστήματος από ως εξής:

$$RD_i = RD_{max} \{1 + \alpha \cdot \exp[-\beta \cdot (i - i_{max})]\}^{-1} \quad (9)$$

όπου  $RD_i$  είναι το βάθος του ριζοστρώματος την ημέρα  $i$ ,  $RD_{max}$  είναι το μέγιστο βάθος του ριζοστρώματος την ημέρα  $i_{max}$ ,  $\alpha$  και  $\beta$  είναι παράμετροι προσαρμογής.

Για κάθε καλλιέργεια, τα  $i_{max}$ ,  $\alpha$  και  $\beta$ , τα οποία έχουν προκύψει με τη θεώρηση ότι το αρχικό βάθος ριζοστρώματος είναι 100 mm και ότι έχει αναπτυχθεί πλήρως στο πρώτο τρίτο της βλαστικής περιόδου, εισάγονται στις βάσεις δεδομένων του λογισμικού. Αντιθέτως, το βάθος ριζοστρώματος πολυετών καλλιεργειών (δένδρωδεις καλλιέργειες και μηδική) θεωρείται σταθερό μετά το πρώτο έτος και δίνεται στις βάσεις δεδομένων.

Το λογισμικό λαμβάνει υπόψη τρία (3) από τα πιο διαδεδομένα συστήματα άρδευσης στον Ελλαδικό χώρο, αυτά είναι:

- **Στάγδην άρδευση.**
- **Άρδευση με αυλάκια.**
- **Καταιονισμός.**

Στην περίπτωση της άρδευσης με αυλάκια η διάρκεια της άρδευσης υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$T_i = 60 \cdot (d_n \cdot W \cdot L) \cdot Q_u^{-1} \quad (10)$$

όπου  $T_i$  είναι η διάρκεια άρδευσης (min),  $L$  είναι το μήκος του αυλακιού (m),  $W$  είναι το πλάτος του αυλακιού (m),  $Q_u$  είναι η παροχή ( $l\cdot h^{-1}$ ) και  $d_n$  είναι η δόση άρδευσης (mm).

Στην περίπτωση της στάγδην άρδευσης η εφαρμογή του νερού προσεγγίζεται μονοδιάστατα με τη θεώρηση ότι το ισοδύναμο νερό των σταλακτήρων διέρχεται από ένα μόνο σημείο λόγω συμμετρίας.

Η διάρκεια άρδευσης υπολογίζεται από την σχέση (10) όπου  $Q_u$  είναι η παροχή του σταλακτήρα ( $l\cdot h^{-1}$ ),  $L$  είναι η απόσταση μεταξύ των σταλακτήρων επί τον αγωγό εφαρμογής (m) και  $W$  είναι η απόσταση μεταξύ των αγωγών εφαρμογής (m).

Οι πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά του συστήματος άρδευσης παρέχονται από τον παραγωγό στο χρήστη του λογισμικού οποίος και τα καταχωρεί.

Στην περίπτωση του καταιονισμού, τα αποτελέσματα του λογισμικού περιορίζονται μόνο στη δόση άρδευσης. Για τον υπολογισμό της διάρκειας άρδευσης, κατά τον καταιονισμό, απαιτούνται χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος όπως πίεση λειτουργίας, ταχύτητα μετακίνησης εκτοξευτήρα, ζώνη διαβροχής, κ.λπ., πληροφορίες που πολύ σπάνια γνωρίζουν οι παραγωγοί, καθώς αποτελούν εξειδικευμένα χαρακτηριστικά.

Οι βάσεις δεδομένων, που χρησιμοποιεί το λογισμικό άρδευσης, περιέχουν πληροφορίες για τη μέση μηνιαία αθροιστική εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και βροχόπτωση για 5900 περιοχές της Ελλάδος (πόλεις, κωμοπόλεις και χωριά ανά Νομό).

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς έχει υπολογιστεί με τη μέθοδο FAO-56 Penman-Monteith [156], από μέσα μετεωρολογικά δεδομένα της περιόδου 1950-2000.

Οι τιμές της βροχόπτωσης (όχι η ωφέλιμη), οι οποίες έχουν προκύψει από τα ίδια δεδομένα, χρησιμοποιούνται αυτούσιες. Όταν επιλέγει μια περιοχή από τον χρήστη του λογισμικού, οι μέσες μηνιαίες αθροιστικές τιμές της εξατμισοδιαπνοής και της βροχόπτωσης, της περιοχής, κατανέμονται ισόποσα στους αντίστοιχους μήνες της βλαστικής περιόδου.

## 5.5.2 Εφαρμογή Αλγορίθμου

Ο Αλγόριθμος εφαρμόστηκε στα παρακάτω παραδείγματα:

### Πρώτο (1<sup>ο</sup>) παράδειγμα: Καλλιέργεια καλαμποκιού και άρδευση με αυλάκια

Παραγωγός ο οποίος επιθυμεί να λάβει συμβουλές άρδευσης για καλλιέργεια καλαμποκιού υπό άρδευση με αυλάκια, πρέπει να παρέχει στο χρήστη του λογισμικού συγκεκριμένες πληροφορίες οι οποίες αφορούν την περιοχή της καλλιέργειας, την εποχή σποράς και το σύστημα άρδευσης δηλαδή μήκος αυλακιού, πλάτος αυλακιού και παροχή νερού.

Έστω ότι η περιοχή βρίσκεται στο Νομό Θεσσαλονίκης και είναι η Νέα Μεσημβρία, η σπορά είναι πρώιμη, η παροχή είναι  $Q_u = 3600 \text{ l h}^{-1}$ , το μήκος του αυλακιού είναι  $L = 250 \text{ m}$  και το πλάτος του αυλακιού είναι  $W = 0.80 \text{ m}$ .

Ο χρήστης του λογισμικού επιλέγει την περιοχή, το καλαμπόκι σαν τιμή στο πεδίο καλλιέργεια, την πρώιμη σπορά, το σύστημα άρδευσης με αυλάκια, καταχωρεί εν συνεχεία τα χαρακτηριστικά του αρδευτικού συστήματος και από την εδαφολογική ανάλυση που έχει προηγηθεί στο έδαφος του συγκεκριμένου αγρού, εισάγει τις τιμές **άμμος%**=16%, **ιλύς%**=51%, **άργιλος%**=33% και **Οργ. Ουσία**=1.2%.

Οι πληροφορίες που ανακτώνται από τις βάσεις δεδομένων είναι τα στάδια ανάπτυξης του καλαμποκιού που είναι 25, 40, 60 και 25 ημέρες, ο **φυτικός συντελεστής  $K_c$  του καλαμποκιού** που είναι 0.3, 1.15 και 0.35, το  $F = 0.55$ , το  $RD_{max} = 750 \text{ mm}$ , τα  $\alpha$  και  $\beta$  που είναι 0.0002 και 0.2620, αντίστοιχα.

Κατά την εκτέλεση του λογισμικού προτείνεται η εφαρμογή 427 mm ύψους αρδευτικού νερού, που κατανέμονται σε 142, 214 και 71 mm κατά τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, αντίστοιχα, με μέσο εύρος άρδευσης 16 ημέρες και διάρκεια άρδευσης 237 min για την κάλυψη των αναγκών των φυτών σε νερό.

### Δεύτερο (2<sup>ο</sup>) παράδειγμα: Καλλιέργεια Μηδικής και καταιονισμός

Παραγωγός που επιθυμεί να λάβει συμβουλές άρδευσης για καλλιέργεια μηδικής (πολυετής τριφύλλι) υπό άρδευση με καταιονισμό (εκτόξευση νερού με τη μορφή σταγόνων), πρέπει να παρέχει στο χρήστη του λογισμικού απλές πληροφορίες σχετικά με την περιοχή και την ηλικία της καλλιέργειας.

Έστω ότι η περιοχή βρίσκεται στο Νομό Θεσσαλονίκης και είναι η Νέα Μεσημβρία, πρόκειται για το έτος εγκατάστασης της μηδικής, με πρώιμη σπορά.

Το λογισμικό λαμβάνει υπόψη τέσσερεις (4) κοπές της μηδικής με στάδια ανάπτυξης 10, 30, 25 και 10 ημέρες για την πρώτη (1<sup>η</sup>) κοπή και 5, 10, 10, και 5 ημέρες για τις υπόλοιπες τρεις (3) κοπές.

Οι πληροφορίες που ανακτώνται από τις βάσεις δεδομένων είναι ο **φυτικός συντελεστής  $K_c$  της μηδικής** που είναι 0.4, 1.20 και 1.15 και για τις τέσσερις κοπές, το  **$F = 0.55$** , το  **$RD_{max} = 1000$  mm**, τα  **$\alpha$**  και  **$\beta$**  που είναι 0.0001 και 0.2740, αντίστοιχα.

Ο χρήστης του λογισμικού επιλέγει την περιοχή, την καλλιέργεια μηδικής, πρώιμη σπορά, το πρώτο έτος για την ηλικία της πολυετούς καλλιέργειας και ως σύστημα άρδευσης τον καταιονισμό.

Τέλος, καταχωρεί τις τιμές από τα αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης που έχει προηγηθεί στο έδαφος του αγρού **άμμος% = 16%**, **ιλύς% = 51%**, **άργιλος% = 33%** και **Οργ. Ουσία = 1.2%**.

Κατά την εκτέλεση του λογισμικού προτείνεται η εφαρμογή 455 mm ύψους αρδευτικού νερού σε όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου κατανεμημένα κατά 91, 182, 91 και 91 mm το Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο, αντίστοιχα.

### **Τρίτο (3<sup>ο</sup>) παράδειγμα: Οπωρώνας μηλιάς και στάγδην άρδευση**

Παραγωγός επιθυμεί να λάβει συστάσεις αποδοτικότερης άρδευσης για καλλιέργεια οπωρώνα μηλιάς που είναι διατεταγμένος σε γραμμική παλμέτα πυκνής φύτευσης 1.5 x 3.5 m. Σε αυτό το σχήμα η καλλιέργεια υποστηρίζεται από πασσάλους και σύρματα. Τα δέντρα φυτεύονται σε κοντινή απόσταση και τα κλαδιά τους μπλέκονται στα σύρματα, ώστε να σχηματίσουν ένα ανοιχτό σχήμα κατά μήκος των συρμάτων. Πλεονεκτήματα αυτού του σχήματος είναι ταχύτητα κλαδέματος, ταχύτητα συγκομιδής, γρήγορη ανάπτυξη και ποιότητα καρπού λόγω της ηλιοφάνειας.

Έστω ότι η καλλιέργεια βρίσκεται στην περιοχή του Δήμου Βελβεντού του Νομού Κοζάνης, αρδεύεται με στάγδην άρδευση και βρίσκεται στο τέταρτο (4<sup>ο</sup>) έτος ανάπτυξης.

Ο παραγωγός πρέπει να παρέχει στο χρήστη του λογισμικού πληροφορίες σχετικές με την περιοχή, την ηλικία της δενδρώδους καλλιέργειας και το σύστημα άρδευσης. Ο χρήστης του λογισμικού επιλέγει την περιοχή, την καλλιέργεια μηλιάς, μεγαλύτερο του ενός έτους για την ηλικία της πολυετούς καλλιέργειας και στάγδην άρδευση.

Καταχωρούνται στο λογισμικό τα χαρακτηριστικά του συστήματος στάγδην άρδευσης που είναι η παροχή των σταλακτήρων,  **$Q_u = 8$  lh<sup>-1</sup>**, η απόσταση μεταξύ των σταλακτήρων επί τον αγωγό εφαρμογής,  **$L = 1.5$  m**, και η απόσταση μεταξύ των αγωγών εφαρμογής,  **$W = 3.5$  m**. Τέλος, καταχωρούνται οι τιμές από τα αποτελέσματα της εδαφολογικής ανάλυσης **άμμος% = 16%**, **ιλύς% = 51%**, **άργιλος% = 33%** και **Οργ. Ουσία = 1.2%**.

Οι πληροφορίες που ανακτώνται από τις βάσεις δεδομένων είναι τα βλαστικά στάδια των δενδρωδών καλλιεργειών που συμπίπτουν με τις ημέρες των μηνών Μαΐου, Ιουνίου, Ιουλίου,

Αυγούστου και Σεπτεμβρίου, δηλαδή 31, 30, 31, 31, και 30 με σύνολο 153 ημερών βλαστικής περιόδου.

Ο **φυτικός συντελεστής  $K_c$**  της μηλιάς είναι 0.60, 0.85, 1.00, 0.85 και 0.80, για τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο αντίστοιχα και θεωρείται ότι η βλαστική περίοδος ξεκινά από την πρώτη (1<sup>η</sup>) Μαΐου.

Το μέγιστο βάθος του ριζικού συστήματος το οποίο θεωρείται σταθερό μετά το πρώτο (1<sup>ο</sup>) έτος είναι 500 mm.

Ο συντελεστής ωφελιμότητας της μηλιάς είναι 0.50.

Κατά την εκτέλεση του λογισμικού προτείνεται η εφαρμογή 367 mm ύψους αρδευτικού νερού για όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, κατανεμημένα κατά 73, 147, 110 και 37 mm τον Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο, αντίστοιχα. Το μέσο εύρος άρδευσης είναι δώδεκα (12) ημέρες και η διάρκεια άρδευσης για την κάλυψη των αναγκών των δένδρων σε νερό είναι σταθερή και ίση προς 443 min.

### **5.5.3 Αποτίμηση Απόδοσης**

Η άρδευση είναι ο κύριος καταναλωτής νερού στον αγροτικό τομέα, με δεδομένη όμως τη μείωση των παγκόσμιων αποθεμάτων νερού και σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος του, επιβάλλεται η ορθολογική χρήση του με την ανάπτυξη και τη χρήση μεθόδων για τον επιστημονικό προγραμματισμό των αρδεύσεων. Πολύτιμα εργαλεία για τη διαχείριση της γεωργικής γης, στον τομέα των αρδεύσεων αλλά και στον τομέα των λιπάνσεων, έχουν αναπτυχθεί από το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων. Με τη βοήθεια του λογισμικού παροχής συμβουλών άρδευσης, ο παραγωγός μπορεί να λάβει εξειδικευμένες συμβουλές άρδευσης για συγκεκριμένο αγροτεμάχιο, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της καλλιέργειας του, πραγματοποιώντας μόνο μια απλή εδαφολογική ανάλυση και παρέχοντας βασικά στοιχεία για το αρδευτικό σύστημα που χρησιμοποιεί.

Οι συμβουλές άρδευσης αφορούν τη μηνιαία δόση, τη μέση ποσότητα και τη μέση διάρκεια άρδευσης, όπως αυτά προκύπτουν από μέσα μετεωρολογικά δεδομένα.

Σημειώνεται ότι ανεξάρτητα από τις συμβουλές άρδευσης, οι παραγωγοί θα πρέπει να προσαρμόζουν τις εφαρμογές των αρδεύσεων και το σύνολο του μηνιαίου αρδευτικού νερού, ανάλογα με τις κατά τόπο επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες.

Το λογισμικό μπορεί να αναπτυχθεί περαιτέρω ώστε να έχει τη δυνατότητα παροχής συμβουλών άρδευσης σε πραγματικό χρόνο και με αυτόματο τρόπο (π.χ. μέσω SMS).

## 5.6 Βελτιστοποίηση δικτύων άρδευσης με την εφαρμογή του αλγορίθμου Αποικίας Μυρμηγκιών

Τα τελευταία χρόνια, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που ενσωματώνουν ευρετικούς μηχανισμούς έχουν μεγάλη αποδοχή και εφαρμογή σε πολλούς τομείς έρευνας. Αν και στις περισσότερες περιπτώσεις οδηγούν σε πολύ καλά αποτελέσματα δεν χρησιμοποιούνται σε υπό πίεση δίκτυα άρδευσης. Θα εφαρμοσθεί ένας Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization Algorithm, ACO) [157] αποσκοπώντας στην οικονομική βελτιστοποίηση της επιλογής διαμέτρων ενός υπό πίεση αρδευτικού δικτύου βαρύτητας.

### 5.6.1 Τεχνολογική υποδομή

Το πρόβλημα περιγράφεται από μία αντικειμενική συνάρτηση, μέσω της οποίας αναζητούμε την ελάχιστη τιμή και έχει τη μορφή:

$$F(\varphi) = \min \sum_{i=1}^n DC_{\varphi_j} \times L_i \quad (11)$$

όπου:  $n$  θεωρείται ο αριθμός των αγωγών και των κόμβων απόφασης,  $DC_{\varphi_j}$  το κόστος ανά μέτρο μήκους της πιθανής διαμέτρου  $\varphi_j$  σε ευρώ ανά μέτρο και  $L_i$  το μήκος του αγωγού  $i$  σε μέτρα. Για τη άρτια υδραυλική λειτουργία του δικτύου πρέπει να ισχύει:

- Η αποδεκτή ταχύτητα ροής του νερού στους αγωγούς,  $V_i$ , πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των ορίων  $V_{max}$  και  $V_{min}$ .
- Η διάμετρος των αγωγών του δικτύου,  $D_i$ , πρέπει να ελαττώνεται από τα ανάντη (μέρη που βρίσκονται στην πάνω πλευρά) προς τα κατόντη (μέρη που βρίσκονται στην κάτω πλευρά).
- Στους κόμβους πέρατος των αγωγών,  $H_i$  σε  $m$ , το φορτίο που υπολείπεται πρέπει να παίρνει θετικές τιμές ή τιμή μηδέν (0), δηλαδή:

$$H_i = Z_0 - Z_i - H_{min,i} - \sum_{i=1}^k \Delta H_i \geq 0 \quad (12)$$

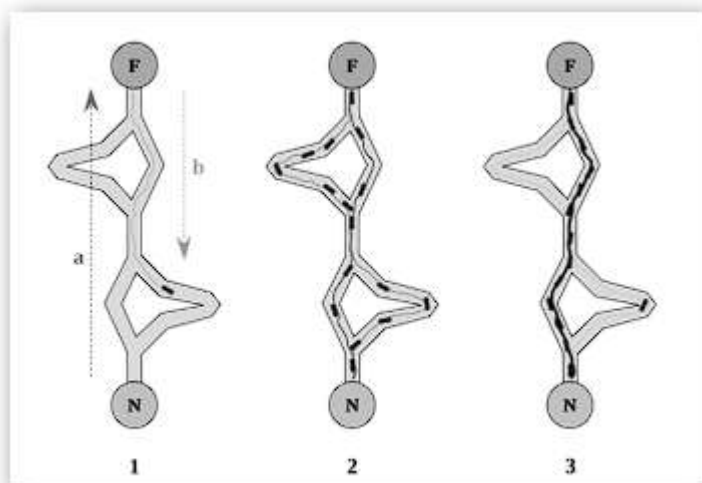
όπου:  $Z_0$  και  $Z_i$  είναι τα υψόμετρα της δεξαμενής και του κόμβου  $i$  αντίστοιχα,  $H_{min,i}$  το ελάχιστο φορτίο που απαιτείται στον κόμβο  $i$  και

$$\sum_{i=1}^k \Delta H_i$$

το σύνολο των απωλειών φορτίου στους αγωγούς από την αρχή του δικτύου μέχρι τον κόμβο  $i = k$ .

### 5.6.2 Αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών (ACO)

Οι Αλγόριθμοι ACO έχουν εμπνευστεί από τη συμπεριφορά των πραγματικών μυρμηγκιών και συγκεκριμένα από τον τρόπο που επιλέγουν τη συντομότερη διαδρομή για να φτάσουν στην τροφή τους (χρησιμοποιούν ίχνη φερομόνης σαν εναλλακτική μορφή επικοινωνίας). Ο όρος «φερομόνη» παράγεται από τις Ελληνικές λέξεις «φέρω» και «εμού», άρα φερομόνη είναι η ουσία που μεταφέρει / οδηγεί εμένα προς ή από κάτι. Στην Εικόνα 35 φαίνεται η διαδικασία μέσω της οποίας τα μυρμήγκια χρησιμοποιούν την αυξημένη συγκέντρωση φερομόνης για να εντοπίσουν την μικρότερη διαδρομή προς την τροφή τους.



**Εικόνα 35. Διαδικασία εντοπισμού της συντομότερης διαδρομής προς την τροφή των πραγματικών μυρμηγκιών [158]**

Στην εκκίνηση της διαδικασίας, η πιθανότητα επιλογής για όλες τις διαμέτρους είναι η ίδια, πρόκειται για μία επαναληπτική μέθοδο τα βασικά βήματα της οποίας είναι:

- Σε κάθε σημείο απόφασης, από το σύνολο των πιθανών επιλογών επιλέγεται μία.
- Στις πιθανές επιλογές διενεργείται ενημέρωση της φερομόνης, υλοποιείται από δύο επιμέρους διαδικασίες:
  - Διαδικασία εξάτμισης φερομόνης.
  - Διαδικασία προσθήκης φερομόνης.
- Με κριτήριο τις τιμές φερομόνης υπολογίζεται η βέλτιστη λύση.

Κάθε επανάληψη ολοκληρώνεται όταν όλα τα μυρμήγκια θα έχουν καταφέρει να παράξουν μια λύση.

Στο πρόβλημα που εξετάζουμε, οι διάμετροι των αγωγών αποτελούν τις πιθανές εναλλακτικές επιλογές, ενώ οι κόμβοι που ορίζουν την αρχή κάθε αγωγού είναι τα σημεία απόφασης.



Σε κάθε αγωγό, η πιθανότητα επιλογής για κάθε μία από τις πιθανές διαμέτρους διατυπώθηκε από τους ερευνητές [159] και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_{i,j}^k(t) = [\tau_{i,j}(t)]^\alpha \cdot (n_{i,j})^\beta / \sum_{i,j} [\tau_{i,j}(t)]^\alpha \cdot (n_{i,j})^\beta \quad (13)$$

$p_{i,j}^k(t)$  είναι η πιθανότητα επιλογής της διαμέτρου  $j$  για τον αγωγό  $i$  κατά την επανάληψη  $t$  από το μυρμήγκι  $k$ ,  $\tau_{i,j}(t)$  είναι η συγκέντρωση φερομόνης στη πιθανή διάμετρο  $j$  του αγωγού  $i$  στην επανάληψη  $t$ ,  $n_{i,j}$  είναι ευρετικός παράγοντας που προκρίνει επιλογές χαμηλότερου κόστους και είναι αντίστοιχος με την παροχή όρασης σε αληθινά μυρμήγκια γι αυτό και ονομάζεται ορατότητα. Η τιμή του υπολογίζεται σαν το αντίστροφο του κόστους,  $c_{i,j}$ , της πιθανής διαμέτρου:

$$n_{i,j} = 1/c_{i,j} \quad (14)$$

Οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$ , αξιολογούν την επίδραση της ποσότητας φερομόνης και της ορατότητας αντίστοιχα στην απόφαση κάθε ενός μυρμηγκιού.

- Αν  $\alpha \gg \beta$ , τότε η επιλογή του αλγορίθμου βασίζεται κυρίως στις πληροφορίες που εκφράζει η φερομόνη,
- ενώ αν  $\beta \gg \alpha$ , τότε οι φθηνότερες εναλλακτικές προκρίνονται κυρίως από τον αλγόριθμο, αδιαφορώντας για την ποιότητα της τελικής λύσης.

Αφού ολοκληρωθεί η επανάληψη διενεργείται η εξάτμιση της φερομόνης στις πιθανές διαμέτρους κάθε αγωγού. Αυτή γίνεται μέσω της παραμέτρου  $\rho$ , που ονομάζεται παράγοντας εξάτμισης, σύμφωνα με τη σχέση [159]:

$$\tau_{i,j}(t+1) = \rho \cdot \tau_{i,j}(t) \quad (15)$$

όπου:  $\tau_{i,j}(t+1)$  είναι η τιμή φερομόνης που προκύπτει από την εφαρμογή της εξάτμισης και  $\tau_{i,j}(t)$  είναι η τιμή που είχε η φερομόνη προτού εφαρμοσθεί η εξάτμιση.

Η παράμετρος  $\rho$  κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1 ( $0 \leq \rho \leq 1$ ). Μέσω της εξάτμισης αγνοούνται οι λιγότερο καλές λύσεις ενώ προκρίνονται οι καλύτερες. Για τιμές του  $\rho \rightarrow 1$ , η ποσότητα φερομόνης που εξατμίζεται είναι μικρή, με μικρότερη ταχύτητα σύγκλισης και ενδελεχή εξερεύνηση εύρους λύσεων. Για τιμές του  $\rho \rightarrow 0$ , μεγαλύτερη ποσότητα φερομόνης εξατμίζεται με γρηγορότερη σύγκλιση, προκρίνονται όμως και μη βέλτιστες λύσεις [160].

Στον αρχικό αλγόριθμο ACO (Ant System, AS) [161], η προσθήκη φερομόνης γίνεται στις διαμέτρους της λύσης κάθε μυρμηγκιού που λαμβάνει μέρος στη διαδικασία και υπολογίζεται από τη σχέση που διατυπώθηκε από τους ερευνητές [159] [162], η οποία είναι:

$$\Delta\tau_{i,j}^k = \begin{cases} R & , \text{όταν η πιθανή διάμετρος ανήκει στη λύση του μυρμηγκιού } k \\ \frac{R}{f(\varphi)^k} & \\ 0 & , \text{σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (16)$$

όπου:  $R$  είναι ο παράγοντας προσθήκης φερομόνης ο οποίος έχει σταθερή τιμή. Το  $f(\varphi)^k$  είναι το αξία της λύσης του μυρμηγκιού  $k$  σε ευρώ.

Η καλή λύση και η ποσότητα φερομόνης είναι έννοιες αλληλοεξαρτώμενες, δηλαδή όσο καλύτερη είναι η λύση που υπολογίζεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα φερομόνης που παράγεται από το μυρμηγκί που την υλοποίησε. Από μόνη της, η τιμή του παράγοντα  $R$  δεν θεωρείται σημαντική, καθώς σύμφωνα με τους ερευνητές [160] συσχετίζεται με την αρχική τιμή φερομόνης  $\tau_0$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tau_0 = R\sqrt{n \times NO_{avg}} / f(\varphi)^{n^*} \quad (17)$$

όπου:  $R/f(\varphi)^{n^*}$  η μεταβολή στη ποσότητα φερομόνης,  $f(\varphi)^{n^*}$  το κόστος μιας περίπτωση βέλτιστης λύσης σε €,  $n$  ο αριθμός των αγωγών και  $NO_{avg}$  ο μέσος όρος των πιθανών επιλογών σε κάθε αγωγό.

Σύμφωνα με ερευνητές [160], ο αριθμός  $m$  των μυρμηγκιών που παίρνουν μέρος στην υλοποίηση της λύσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$m = n\sqrt{NO_{avg}} \quad (18)$$

Τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την λύση του προβλήματος ενός ακτινωτού αρδευτικού δικτύου με τον αλγόριθμο ACO είναι:

- Οι παροχές των αγωγών.
- Απαιτητές πιέσεις στους κόμβους.
- Διαθέσιμες διαμέτροι του εμπορίου και το κόστος τους ανά μέτρο μήκους.
- Για κάθε αγωγό, οι απώλειες φορτίου κάθε πιθανής διαμέτρου.
- Μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα ροής στους αγωγούς.
- Μήκη των αγωγών και τα υψόμετρα των κόμβων.

Όταν οι παροχές των αγωγών είναι άγνωστες, εκτιμώνται με τη βοήθεια του πρώτου (1<sup>ο</sup>) τύπου του Clément [163].

Όταν οι παροχές δεν είναι άγνωστες, σε κάθε αγωγό εκτιμάται η ταχύτητα ροής για κάθε πιθανή διάμετρο καθώς και οι ανάλογες απώλειες φορτίου μέσω της σχέσης των Hazen Williams [164].

Στο αρχή του αλγορίθμου υπολογίζεται η αρχική τιμή φερομόνης  $\tau_0$  σε κάθε πιθανή διάμετρο για όλους τους αγωγούς μέσω της σχέσης (17) καθώς και το σύνολο των μυρμηγκιών που θα απαρτίσουν την αποικία ο οποίος υπολογίζεται με τη σχέση (18).

Η πιθανότητα  $\rho_{i,j}^k$  να επιλεγεί κάθε μία διάμετρος, από το σύνολο των πιθανών διαμέτρων, υπολογίζεται από τη σχέση (13), στην αρχή της διαδικασίας είναι ίδια για όλες τις πιθανές διαμέτρους. Για όλους τους αγωγούς, τα μυρμηγκία επιλέγουν τυχαία διαμέτρους δημιουργώντας το καθένα μία λύση.

Μόλις ένα μυρμηγκι ολοκληρώσει την διαδικασία επιλογής, διενεργείται υδραυλικός έλεγχος, για να εξακριβωθεί εάν ικανοποιούνται οι περιορισμοί, της υδραυλικής λειτουργίας του δικτύου.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το συνολικό κόστος του δικτύου.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται  $m$  φορές ( $m$  είναι ο αριθμός των μυρμηγκιών που απαρτίζουν την αποικία) και αποθηκεύεται η καλύτερη λύση της επανάληψης.

Επόμενο βήμα είναι η ενημέρωση του ίχνους φερομόνης (με τις διαδικασίες εξατμισμού ή προσθήκης φερομόνης) που πρόκειται να έχει επίδραση, στις επιλογές των πιθανών διαμέτρων των αγωγών του δικτύου, της επόμενης επανάληψης.

Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο, μόνο το μυρμηγκι που υλοποίησε τη βέλτιστη λύση της επανάληψης επιτρέπεται να συμμετέχει στη διαδικασία προσθήκης της φερομόνης. Οπότε, η τιμή φερομόνης στις διαμέτρους κάθε αγωγού του δικτύου διαμορφώνεται από τη σχέση:

$$\tau_{i,j}(t+1) = \rho \cdot \tau_{i,j}(t) + \Delta\tau_{i,j}^k \quad (19)$$

Μετά την ολοκλήρωση των επαναλήψεων ξεκινά η διαδικασία εκτίμησης και εξαγωγής της τελικής λύσης. Για κάθε αγωγό επιλέγεται η πιθανή διάμετρος στην οποία τα μυρμηγκία έχουν αφήσει τη μεγαλύτερη ποσότητα φερομόνης. Με αυτές τις διαμέτρους εκτιμάται το τελικό κόστος του δικτύου.

Αφού ολοκληρωθεί ο αλγόριθμος ACO, συμπληρωματικά εκτελείται μια αυτόνομη διαδικασία, η οποία προσπαθεί να εκμεταλλευτεί την ύπαρξη πιθανού πλεονάσματος φορτίου στους κόμβους. Ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Στα πέρατα διενεργείται έλεγχος των υπολειπόμενων φορτίων. Σε περίπτωση ύπαρξης επαρκών υπολειπόμενων φορτίων, γίνεται επιλογή μικρότερης διαμέτρου και διαμερισμός του μήκος του αγωγού μεταξύ των δύο διαμέτρων, για να τείνει το διαθέσιμο φορτίο στο μηδέν.

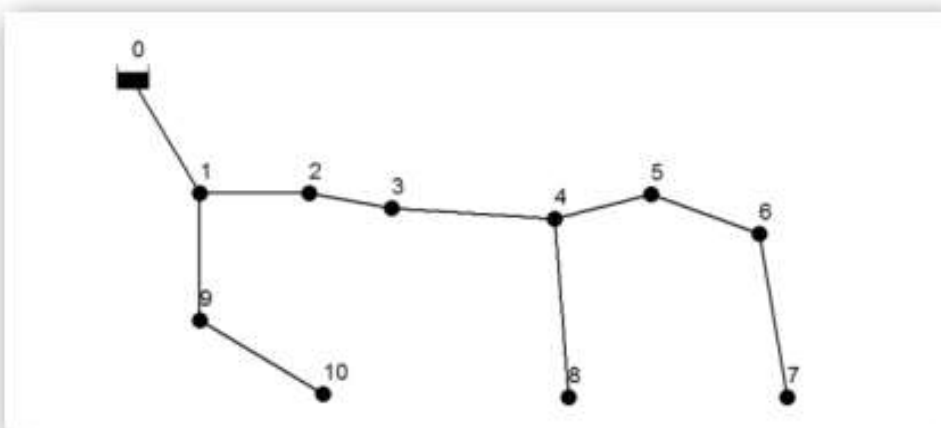
- Εάν στον αγωγό του πέρατος έχει ήδη επιλεγεί η μικρότερη διαθέσιμη διάμετρος αλλά υπάρχει υπολειπόμενο φορτίο, ελέγχεται ο αμέσως προηγούμενος αγωγός, η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου βρεθεί ένας αγωγός, η διάμετρός του οποίου να μπορεί να μειωθεί για να εκμεταλλευτεί το φορτίο.
  - Στον πρώτο άμεσα διαθέσιμο από τους μεγάλους αγωγούς της αρχικής λύσης, επιλέγεται μικρότερη διάμετρος, έως ότου τα διαθέσιμα φορτία στα πέρατα γίνουν ίσα με το μηδέν.
  - Προκρίνεται ο συνδυασμός διαμέτρων που βελτίωσε τη λύση περισσότερο.
- Η βιβλιογραφική έρευνα έδειξε ότι ο διαμερισμός των αγωγών σε δύο (2) διαμέτρους δεν χρησιμοποιείται. Εδώ, εφαρμόστηκε αυτή η διαδικασία για τη διενέργεια σύγκρισης με τη μέθοδο του γραμμικού προγραμματισμού (Linear programming, LP) [165], που είναι μια τεχνική μαθηματικής μοντελοποίησης βέλτιστου καταμερισμού των πόρων ενός συνόλου ανταγωνιστικών απαιτήσεων (επίτευξη του καλύτερου αποτελέσματος).

### 5.6.3 Εκτέλεση Αλγορίθμου

Το δίκτυο στο οποίο εφαρμόστηκε η μέθοδος βελτιστοποίησης με τον αλγόριθμο ACO είναι βασισμένο σε ένα δίκτυο που παρουσιάστηκε από ερευνητές [166] και το οποίο έχει τροποποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξηθεί η δυσκολία επίλυσης του.

Το φορτίο στην κεφαλή είναι εξήντα (60) m, η μικρότερη απαιτητή πίεση στα υδροστόμια είναι τριάντα πέντε (35) m και η παροχή τους είναι έξι (6) l/s.

Όλοι οι κόμβοι που προσδιορίζουν το τέλος των αγωγών έχουν ένα (1) υδροστόμιο. Επειδή πρόκειται για μικρό δίκτυο, σαν παροχή για κάθε αγωγό θεωρήθηκε το άθροισμα των παροχών των κατάντη υδροστομιών που τροφοδοτούνται από αυτόν. Το σχέδιο του δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 36.



Εικόνα 36. Αναπαράσταση του δικτύου εφαρμογής [158]

Απαραίτητη προϋπόθεση για να εφαρμοσθεί ο αλγόριθμος είναι ο υπολογισμός των τιμών των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\rho$ . Για τον λόγο αυτό προηγήθηκε μία ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity Analysis) [167]. Ανάλυση ευαισθησίας είναι ο έλεγχος των αλλαγών στις παραμέτρους προβλημάτων Γραμμικού προγραμματισμού (Γ.Π.) και η διαπίστωση του επηρεασμού τις τελικής λύσης από τις αλλαγές αυτές. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυση αυτής, οι βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους  $\alpha$ ,  $\beta$ , και  $\rho$  ήταν  $\alpha = 0.8$ ,  $\beta = 0$  και  $\rho = 0.98$ . Επειδή όπως προαναφέραμε το δίκτυο είναι μικρό και άρα σχετικά εύκολη η επίλυση του, η παραμέτρους  $\beta$  είναι ίση με μηδέν (0), αφού η χρήση του ευρετικού παράγοντα  $\eta_{i,j}$  δεν είναι απαιτητή. Ο αριθμός των μυρμηγκιών, που πήραν μέρος στην υλοποίηση της λύσης, προκύπτει από τη σχέση δεκαοκτώ (18) και είναι  $m = 28$ . Από τη σχέση δεκαεπτά (17) για  $R = 10^6$ , προκύπτει η αρχική τιμή της φερομόνης  $\tau_0 = 90$ .

Ο αλγόριθμος με τις συγκεκριμένες τιμές, για τις παραπάνω παραμέτρους, έδωσε το βέλτιστο κόστος των **96.916 €**. Σε συνολικά εκατό (100) εκτελέσεις η βέλτιστη τιμή βρέθηκε στις ενενήντα εννέα (99), με μέσο χρόνο εκτέλεσης 0.039 sic. Η σύγκλιση στο κόστος αυτό παρουσιαζόταν στην εβδομήντα τρία (73) επανάληψη κατά μέσο όρο, η πρώτη παρουσίαση της βέλτιστης λύσης ήταν στην επανάληψη είκοσι τρία (23).

Οι τελικές διαμέτροι που επιλέγησαν για κάθε αγωγό καθώς και τα τελικά φορτία στους κόμβους παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Οι τελικές τιμές της φερομόνης σε όλες τις πιθανές διαμέτρους κάθε αγωγού παρουσιάζονται στον Πίνακα 8 και αφορούν σε μία (1) τυχαία εκτέλεση με τις τιμές των προαναφερθέντων παραμέτρων και εκατό πενήντα (150) επαναλήψεις.

Στη συνέχεια ακολούθησε εφαρμογή της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού και ήταν γνωστό από την αρχή ότι θα δώσει βέλτιστη λύση με συνδυασμό δύο (2) διαμέτρων σε κάποιους αγωγούς. Για την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Lingo [168], το οποίο έχει σχεδιαστεί για τη δημιουργία και την επίλυση μοντέλων βελτιστοποίησης. Επειδή η μέθοδος επιστρέφει δεκαδικές τιμές στο αντίστοιχο μήκος των διπλών διαμέτρων, όπου αυτές επιλέγονται, η λύση πρέπει να διορθωθεί. Το βέλτιστο κόστος που υπολογίστηκε ήταν **94.409 €**. Μετατρέποντας τη λύση του γραμμικού προγραμματισμού σε λύση ενιαίων διαμέτρων, η κατάληξη είναι ίδια με τη λύση που έδωσε ο αλγόριθμος ACO, δηλ. **96.916 €**.

**Πίνακας 8. Επιλεγμένες διαμέτροι του βέλτιστου δικτύου και υπολειπόμενα φορτία στους κόμβους με τη μέθοδο του αλγορίθμου ACO [158]**

Αγωγός	Διάμετρος (mm)	Κόμβος	Υπολειπόμενο φορτίο (m)
1	226.2	1	8.72
2	180.8	2	7.04
3	180.8	3	6.75
4	180.8	4	6.66
5	144.6	5	4.26
6	126.6	6	0.53
7	99.4	7	0.002
8	99.4	8	5.02
9	113	9	7.81
10	99.4	10	3.35

**Πίνακας 9. Τιμές ποσότητας φερομόνης κάθε πιθανής διαμέτρου των αγωγών [158]**

Αγωγός	Διάμετροι εμπορίου (mm)							
	81.4	99.4	113	126.6	144.6	180.8	203.4	226.2
1	0	0	0	0	0	0	13.5	485.4
2	0	0	0	0	0	484	14.9	4.3
3	0	0	0	0	4.3	489.3	9.6	4.3
4	0	0	0	0	4.3	494.5	4.3	4.3
5	0	0	4.3	7.3	486.8	9.2	4.3	0
6	0	4.3	5.2	483.5	14.5	0	0	0
7	4.3	486	12.9	0	0	0	0	0
8	5.7	488.4	9.1	0	0	0	0	0
9	0	4.3	488.9	9.5	4.8	0	0	0
10	4.3	485.9	13	0	0	0	0	0

Η λύση του γραμμικού προγραμματισμού, χρησιμοποιώντας δύο (2) διαμέτρους σε κάποιους αγωγούς, εκμεταλλεύεται το πλεόνασμα φορτίου. Ανάλογο αποτέλεσμα έχει και η χρήση της αυτόνομης διαδικασίας τοπικής βελτίωσης που εφαρμόστηκε στη λύση του αλγορίθμου ACO, όπως αυτή περιγράφηκε στη σελίδα 90. Το κόστος που υπολογίστηκε

ήταν ελάχιστα μικρότερο από αυτό που υπολογίστηκε μέσω του γραμμικού προγραμματισμού, **94.406 €**, βελτιωμένο κατά 2.6% από την αρχική λύση.

Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι μία μέθοδος βελτιστοποίησης κόστους σωληνωτών δικτύων άρδευσης αρκετά ικανοποιητική παρόλο που δεν προτείνονται μέθοδοι που υλοποιούν λύσεις με διαχωρισμό αγωγών σε δύο (2) διαμέτρους από τη βιβλιογραφία.

Έτσι, στα πλαίσια της αξιολόγησης της δυναμικής του αλγόριθμου ACO, επιλέχτηκε για σύγκριση ο γραμμικός προγραμματισμός.

Τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά, δεδομένου ότι το δίκτυο που βελτιστοποιήθηκε έχει πολύ περιορισμένο εύρος εφικτών λύσεων λόγω του μεγέθους του και δεν επιτρέπει μεγάλες διαφορές μεταξύ των μεθόδων.

#### **5.6.4 Αποτίμηση Απόδοσης**

Στα συλλογικά δίκτυα υπό πίεση για άρδευση, η μέθοδος βελτιστοποίησης με χρήση του αλγόριθμου αποικίας μυρμηγκιών (ACO) δεν τυγχάνει εφαρμογής.

Εφαρμόζοντας αυτή τη μέθοδο βελτιστοποίησης σε ένα δίκτυο μικρού μεγέθους, δείξαμε πως ο αλγόριθμος ACO υλοποιεί λύσεις ισοδύναμες με αυτές που παράγει ο γραμμικός προγραμματισμός. Οι λύσεις που δίνει ο γραμμικός προγραμματισμός όμως είναι παρόμοιες με τις λύσεις που δίνουν οι υπόλοιπες κλασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης.

Όταν οι αγωγοί είχαν σε όλο το μήκος τους ίδια διάμετρο, η μέθοδος ACO έδωσε σαν αποτέλεσμα υψηλότερο κόστος από ότι ο γραμμικός προγραμματισμός, ο οποίος όμως διαμοίρασε κάποιους αγωγούς σε δύο (2) τμήματα διαφορετικών διαμέτρων.

Τελικά, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο (2) λύσεων, δηλαδή της μεθόδου ACO με διαχωρισμό των αγωγών σε δύο (2) διαμέτρους και της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού με ενιαία διάμετρο, διαπιστώσαμε ότι αυτά ήταν πανομοιότυπα.

## 5.7 Διαχείριση αρδευτικών δικτύων με τη χρήση της μεθόδου VIKOR

Σύμφωνα με ερευνητές [169] [170], στον Ελλαδικό χώρο, υπάρχουν λίγα οργανωμένα συλλογικά δίκτυα άρδευσης, τα οποία χαρακτηρίζονται από παλαιότητα και κυρίως από ξεπερασμένη τεχνολογία ενώ κατά το σχεδιασμό τους δεν λήφθηκαν υπόψη παράγοντες σχετικοί τόσο με την οικονομία του νερού όσο και με την προστασία του περιβάλλοντος. Στην πλειονότητα τους έχουν κατασκευαστεί κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1960.

Για την ανάπτυξη ενός σχεδίου διαχείρισης του αρδευτικού νερού και τη βελτίωση των αρδευτικών δικτύων απαιτείται η γνώση ενός συνόλου από παραμέτρους, οι οποίες θα βοηθήσουν στην ποιοτική και ποσοτική προστασία των υδατικών πόρων.

Ο σχεδιασμός και η διαχείριση ενός αρδευτικού δικτύου χαρακτηρίζεται από:

- Έλλειψη βεβαιότητας που οδηγεί συχνά σε αστοχίες.
- Πολύπλοκη βάση σχεδιασμού (κλίμα, έδαφος, υψόμετρο) και αρκετές φορές πολυεπίπεδους στόχους.
- Δυστοκία καθορισμού ατόμων ή ομάδων που συνεισφέρουν στη λήψη απόφασης.

Σύμφωνα με ερευνητές [171] ο σχεδιασμός και η διαχείριση ενός αρδευτικού δικτύου επιπλέον χαρακτηρίζεται από εναλλακτικές λύσεις με ιδιαίτερη δομή που συνδυάζουν περισσότερες της μιας στοιχειώδεις δράσεις και χρονικούς ορίζοντες σχεδιασμού.

### 5.7.1 Τεχνολογική υποδομή

Έχουν διατυπωθεί από ερευνητές [172] [173] πολλές μέθοδοι συμβιβαστικού προγραμματισμού (Σ.Π.), σύμφωνα με τον οποίες μπορεί να εκτιμηθεί η απόσταση της εξεταζόμενης λύσης από την ιδεατή ή μία πολύ καλή λύση, και χρησιμοποιούνται για την επίλυση ενός προβλήματος πολυκριτηριακής ανάλυσης (Π.Α.) (Multiple Criteria Decision Making, MCDM). Η Π.Α. βασίζεται στη διαπίστωση ότι η επίλυση πολύπλοκων και ιδιαίτερα σημαντικών προβλημάτων λήψης αποφάσεων δεν είναι δυνατό να πραγματοποιείται μέσω μιας μονόπλευρης και μονοδιάστατης ανάλυσης. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος έγινε χρήση της μεθόδου VIKOR [174] που είναι μια μορφή Σ.Π. η οποία εισάγει τον δείκτη κατάταξης με βάση το μέτρο της “εγγύτητας” στην ιδανική λύση και αναπτύχθηκε από τον Opricovic Serafim [175]. Σύμφωνα με τους ερευνητές [176] [177] [178] [179], μέσω της μεθόδου VIKOR, τίθεται προς επίλυση το εξής πρόβλημα:

$$mco_i \{ (f_{ij}(F_i), i = 1, \dots, m), j = 1, \dots, n \} \quad (20)$$

Όπου **mco** είναι ο τελεστής της διαδικασίας MCDM για την επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής δραστηριότητας, **m** είναι ο αριθμός όλων των δυνατών εναλλακτικών



δραστηριοτήτων,  $F_i$  είναι η εναλλακτική δραστηριότητα  $i$ ,  $f_{i,j}$  είναι η τιμή του κριτηρίου  $j$  για την εναλλακτική  $F_i$  και τέλος  $n$  είναι ο συνολικός αριθμός των κριτηρίων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω καθορίζεται το μητρώο απόφασης (Decision matrix):

$$\begin{array}{c}
 X_1 \quad X_2 \dots \dots \dots X_n \\
 \left[ \begin{array}{cccc}
 F_1 & f_{11} & f_{12} & \dots \dots \dots f_{1n} \\
 F_2 & f_{21} & f_{22} & \dots \dots \dots f_{2n} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots \dots \dots \dots \\
 F_m & f_{m1} & f_{m2} & \dots \dots \dots f_{mn}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Ο αλγόριθμος συμβιβαστικής κατάταξης VIKOR ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- Υπολογίζεται η καλύτερη και η χειρότερη τιμή από όλες τις τιμές που αντιστοιχούν στα κριτήρια  $x_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ .

$$f_j^* = \max_i f_{ij}, \quad f_j^- = \min_i f_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

Οι τιμές αυτές προσδιορίζονται για την περίπτωση οφέλους ενώ όσο αφορά την περίπτωση κόστους δίνεται η δυνατότητα να αντιστρέψουμε τη φορά της κλίμακας έχοντας πάλι τους ίδιους συμβολισμούς.

- Υπολογίζονται οι τιμές  $S_i = L_1$ ,

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (22)$$

και  $R_i = L_\infty$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$

$$R_i = \max_j \left[ w_j \frac{f_j^* - f_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \right], \quad (23)$$

Όπου  $w_j$  είναι τα βάρη των κριτηρίων που εκφράζουν τις προτιμήσεις των αποφασιζόντων (Decision Makers, DM).

- Υπολογίζονται οι τιμές  $Q_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , μέσω της σχέσης:

$$Q_i = v \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - v) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*}, \quad (24)$$

όπου,  $S^* = \min_i S_i$ ,  $S^- = \max_i S_i$ ,  $R^* = \min_i R_i$ ,  $R^- = \max_i R_i$  το  $v$  αποτελεί το βάρος της στρατηγικής της μέγιστης ωφέλειας του συνόλου, ενώ το  $1-v$  αποτελεί το βάρος της ελάχιστης ατομικής διαφοράς.

- Οι τιμές των S,R και Q ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά. Με τον τρόπο αυτό ιεραρχούνται οι εναλλακτικές δραστηριότητες. Τα αποτελέσματα συνιστούν τρεις (3) στήλες κατάταξης (Πίνακας 13).
- Η εναλλακτική δραστηριότητα  $F_{(1)}$ , προτείνεται ως συμβιβαστική λύση. Είναι η καλύτερα κατατασσόμενη εναλλακτική δραστηριότητα ως προς το μέτρο της Q (ελάχιστο), εφόσον ικανοποιούνται οι δύο (2) συνθήκες που ακολουθούν:
  - Αποδεκτό όφελος.  
 $Q(F^{(2)} - F^{(1)}) \geq DQ$ , όπου  $F_{(2)}$  είναι η εναλλακτική που κατετάγη δεύτερη στη στήλη της Q, και  $DQ = 1/(m-1)$ .
  - Αποδεκτή ευστάθεια στη λήψη απόφασης.  
 Η  $F_{(1)}$  πρέπει επίσης να είναι η εναλλακτική δραστηριότητα που κατετάγη πρώτη και ως προς τα μέτρα S και R. Η συμβιβαστική λύση αυτή είναι ευσταθής στη διαδικασία της λήψης απόφασης που έχει σαν στρατηγική τη μέγιστη ωφέλεια του συνόλου (για  $v > 0.5$ ) ή τη συναίνεση (για  $v \approx 0.5$ ) ή την άρνηση (για  $v < 0.5$ ). Το  $v$  αποτελεί το βάρος της στρατηγικής της λήψης απόφασης της μέγιστης ωφέλειας του συνόλου.

### 5.7.2 Εκτέλεση Αλγορίθμου

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στη πεδιάδα της Θεσσαλονίκης και αποτελείται από δέκα έξι (16) αρδευτικά δίκτυα τα οποία στη συνέχεια παρουσιάζονται με το όνομα του Τοπικού Οργανισμού Εγγείων Βελτιώσεων (Τ.Ο.Ε.Β.) και συγκεκριμένα:

<b>F<sub>1</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Αγ. Αθανασίου
<b>F<sub>2</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Ακρολίμνης
<b>F<sub>3</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Βραχιάς
<b>F<sub>4</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Βρυσακίου
<b>F<sub>5</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Ζερβοχωρίου
<b>F<sub>6</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Κλειδιού
<b>F<sub>7</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Κορυφής
<b>F<sub>8</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Μαλγάρων
<b>F<sub>9</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Νησιού (Α')
<b>F<sub>10</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Ξεχασμένης
<b>F<sub>11</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Πρασινάδας
<b>F<sub>12</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Σταυρού
<b>F<sub>13</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Τρικάλων
<b>F<sub>14</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Χαλάστρας

<b>F<sub>15</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο Χαλκηδόνας
<b>F<sub>16</sub></b>	Αρδευτικό δίκτυο της Τέως Λίμνη Γιαννιτσών

Σημείωση: Το Αρδευτικό δίκτυο της Τέως Λίμνη Γιαννιτσών περιλαμβάνει τους Τ.Ο.Ε.Β Αλεξάνδρειας, Γιαννιτσών, Καρυώτισσας, Κρύας Βρύσης, Μικρού Μοναστηριού, Νησιού (Β'), Παλαιού Σκυλιτσίου και Σχοινά.

Η εξεύρεση της ιδανικής λύσης στο πρόβλημα απαιτεί τη θέσπιση κριτηρίων τα οποία πρέπει για το κάθε σενάριο να καλύπτουν ταυτόχρονα δύο σκέλη αξιολόγησης, δηλαδή το οικονομικό - περιβαλλοντικό σκέλος αλλά και το παραγωγικό - κοινωνικό σκέλος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τα παρακάτω βασικά κριτήρια:

<b>C<sub>1</sub></b>	Ο όγκος του αρδευτικού νερού που παροχετεύεται από το Γενικό Οργανισμό Εγγείων Βελτιώσεων (Γ.Ο.Ε.Β.) στην καλλιεργητική περίοδο ανά στρέμμα.
<b>C<sub>2</sub></b>	Η μέση παραγωγικότητα, με βάση τις καλλιέργειες, ανά στρέμμα.
<b>C<sub>3</sub></b>	Το κόστος παραγωγής των καλλιεργειών ανά στρέμμα.
<b>C<sub>4</sub></b>	Οι δαπάνες των διενεργηθέντων έργων συντήρησης και αποκατάστασης των αρδευτικών δικτύων ανά στρέμμα.
<b>C<sub>5</sub></b>	Η μηχανική σύσταση του κάθε αρδευτικού δικτύου, η οποία επηρεάζει την ικανότητα του να συγκρατεί νερό αλλά και θρεπτικά στοιχεία. Επιπλέον η μηχανική σύσταση δίνει πληροφορίες για την κατεργασία των εδαφών αλλά και για πιθανά προβλήματα άρδευσης και λίπανσης.
<b>C<sub>6</sub></b>	Η δυνατότητα διάθεσης των παραγόμενων προϊόντων, δηλαδή η φυσική διακίνηση των προϊόντων από την παραγωγή τους μέχρι και την παράδοση τους τον τελικό καταναλωτή.

Επισημάνση: Τα δεδομένα, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των κριτηρίων, είναι από το έτος 1988 έως το έτος 2010.

Στη συγκεκριμένη έρευνα τα βάρη αξιολογήθηκαν μέσω της διαδικασίας προσδιορισμού της εντάσεως του ενδιαφέροντος, σύμφωνα με τη θεωρία του Saaty, Analytical Hierarchy Process (A.H.P.), η οποία είναι μια μέθοδος οργάνωσης και ανάλυσης πολύπλοκων αποφάσεων, χρησιμοποιώντας μαθηματικά και ψυχολογία [180]. Η ίδια διαδικασία αδιαστατοποίησης και υπολογισμού των ιδιοδιανυσμάτων, εφαρμόστηκε τόσο για τις εναλλακτικές δραστηριότητες όσο και για τα βάρη ( $w_i$ ), η οποία και παρουσιάζεται στον Πίνακα 10. Ο χειρότερος δυνατός βαθμός είναι το ένα (1) ενώ το εννέα (9) είναι ο μέγιστος βαθμός του πίνακα. Στην περίπτωση που εμπεριέχεται και οικονομική διάσταση, στο εξεταζόμενο κριτήριο, η παραπάνω κλίμακα μπορεί να εφαρμοστεί και με αντίστροφη έννοια.

Η αντικειμενοποίηση των σταθμιστικών βαρών και των κριτηρίων ήταν ο βασικός λόγος που χρησιμοποιήθηκε η βαθμονόμηση αυτή.

**Πίνακας 10. Βαθμονόμηση με τη μέθοδο A.H.P. [181]**

Αριθμητική βαθμονόμηση	Λογική βαθμονόμηση
9	εξαιρετικής προτίμησης
8	σθεναρά εξαιρετική προτίμηση
7	πολύ δυνατή προτίμηση
6	έντονα σε πολύ μεγάλο βαθμό προτίμηση
5	δυνατή προτίμηση
4	μέτρια έντονα προτίμηση
3	μέτρια προτίμηση
2	σχεδόν μέτρια προτίμηση
1	σχεδόν προτιμητέο

Τα σύμβολα **I** και **J** αποτελούν τα σύνολα των διαφορετικών εναλλακτικών δραστηριοτήτων και διαφορετικών κριτηρίων αντίστοιχα. Ο **F(I,J)** είναι πίνακας ο οποίος δείχνει τη βαθμολόγηση της κάθε εναλλακτικής δραστηριότητας ως προς τα διάφορα κριτήρια.

Έπειτα από τη δημιουργία του μητρώου απόφασης ακολουθεί η διαδικασία αδιαστατοποίησης του κάθε κριτηρίου. Δημιουργείται ένας πίνακας για κάθε κριτήριο και ανά ζεύγη συγκρίνονται οι εναλλακτικές δραστηριότητες (αρδευτικά δίκτυα), ως προς τη σπουδαιότητα τους (ενδιαφέρον). Θα ισχύει λοιπόν ότι τα διαγωνικά στοιχεία του εκάστοτε κριτηρίου θα είναι ίσα με το ένα (1) και επομένως, το μητρώο που δημιουργείται θα είναι ένα συμμετρικοαντίστροφο μητρώο. Εν συνεχεία, μετά τη δημιουργία του παραπάνω μητρώου ακολουθεί ο υπολογισμός του ιδιοδιανυσματος του κάθε κριτηρίου. Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία δημιουργείται το αδιάστατο μητρώο απόφασης και για τα υπόλοιπα κριτήρια.

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζεται σε μορφή ιδιοδιανυσμάτων το αδιάστατο μητρώο απόφασης για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Επισημαίνεται ότι για τα κριτήρια  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  και  $C_6$ , ισχύει η αντίστροφη κλίμακα αξιολόγησης της μεθόδου A.H.P. Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται τα ιδιοδιανύσματα των βαρών. Η ιεράρχηση των εναλλακτικών προτάσεων έγινε κατόπιν υποδείξεων του αποφασίζοντος, μέσω του οποίου καθορίζεται η προτίμηση ή η προτεραιότητα της κάθε εναλλακτικής πρότασης σε σχέση με τα εναλλακτικά κριτήρια.

**Πίνακας 11. Μητρώο απόφασης [182]**

	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>	<b>C<sub>4</sub></b>	<b>C<sub>5</sub></b>	<b>C<sub>6</sub></b>
<b>F<sub>1</sub></b>	0.0106	0.0276	0.0494	0.1916	0.1564	0.1495
<b>F<sub>2</sub></b>	0.0646	0.1096	0.0096	0.0165	0.0220	0.0098
<b>F<sub>3</sub></b>	0.0140	0.0202	0.0709	0.1247	0.0909	0.0718
<b>F<sub>4</sub></b>	0.0375	0.0903	0.0355	0.0537	0.0377	0.0308
<b>F<sub>5</sub></b>	0.1768	0.1528	0.0139	0.0144	0.0195	0.0086
<b>F<sub>6</sub></b>	0.0186	0.0093	0.0273	0.0488	0.0335	0.1223
<b>F<sub>7</sub></b>	0.0910	0.0382	0.1137	0.0452	0.0810	0.0361
<b>F<sub>8</sub></b>	0.0125	0.0130	0.0317	0.1072	0.1260	0.1010
<b>F<sub>9</sub></b>	0.0467	0.0653	0.0903	0.0414	0.0172	0.0261
<b>F<sub>10</sub></b>	0.0300	0.1259	0.0121	0.0383	0.0293	0.0172
<b>F<sub>11</sub></b>	0.1051	0.0461	0.0603	0.0353	0.0711	0.0534
<b>F<sub>12</sub></b>	0.0530	0.1957	0.0176	0.0325	0.0151	0.0797
<b>F<sub>13</sub></b>	0.1340	0.0112	0.1823	0.0297	0.0460	0.0454
<b>F<sub>14</sub></b>	0.0083	0.0241	0.0241	0.1393	0.1159	0.1301
<b>F<sub>15</sub></b>	0.0248	0.0170	0.1318	0.0203	0.0957	0.0939
<b>F<sub>16</sub></b>	0.1727	0.0538	0.1294	0.0612	0.0427	0.0243

**Πίνακας 12. Ιδιοδιανύσματα βαρών w<sub>j</sub> [182]**

<b>W<sub>1</sub></b>	<b>W<sub>2</sub></b>	<b>W<sub>3</sub></b>	<b>W<sub>4</sub></b>	<b>W<sub>5</sub></b>	<b>W<sub>6</sub></b>
0.39	0.17	0.22	0.07	0.05	0.11

Ο αλγόριθμος [183], που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του βέλτιστου αρδευτικού δικτύου, της μεθόδου VIKOR, ο οποίος λειτουργεί σε περιβάλλον Visual Fortran, έχει χρησιμοποιηθεί και σε παλαιότερες εφαρμογές με αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στον Πίνακα 13 παρουσιάζεται η απόσταση των εναλλακτικών δραστηριοτήτων από το ιδεατό αρδευτικό δίκτυο για τις παραμέτρους  $\rho = 1$  και  $\rho = \infty$ . Στον αλγόριθμο, ο προσδιορισμός της τιμής  $\rho = \infty$ , υλοποιείται θέτοντας το  $\rho = K$  (όπου το  $K$  είναι ίσο με μια μεγάλη τιμή) έτσι ώστε να ισχύει:

$$\lim_{\rho \rightarrow K} (L\rho) = L^\infty \quad \text{Στη συγκεκριμένη έρευνα το } \rho \text{ τίθεται ίσο με την τιμή } 25 \text{ (} L_{25} \rightarrow L^\infty \text{).}$$

**Πίνακας 13. Ιεράρχηση με τη χρήση της μεθόδου VIKOR [182]**

	<b>S</b>	<b>R</b>	<b>Q</b>
<b>F<sub>1</sub></b>	0.707	0.385	0.829
<b>F<sub>2</sub></b>	0.784	0.260	0.673
<b>F<sub>3</sub></b>	0.789	0.377	0.903
<b>F<sub>4</sub></b>	0.795	0.322	0.805
<b>F<sub>5</sub></b>	0.482	0.215	0.257
<b>F<sub>6</sub></b>	0.855	0.366	0.954
<b>F<sub>7</sub></b>	0.603	0.199	0.358
<b>F<sub>8</sub></b>	0.821	0.380	0.944
<b>F<sub>9</sub></b>	0.742	0.301	0.707
<b>F<sub>10</sub></b>	0.829	0.340	0.876
<b>F<sub>11</sub></b>	0.625	0.166	0.319
<b>F<sub>12</sub></b>	0.664	0.287	0.593
<b>F<sub>13</sub></b>	0.452	0.168	0.135
<b>F<sub>14</sub></b>	0.798	0.390	0.938
<b>F<sub>15</sub></b>	0.712	0.352	0.771
<b>F<sub>16</sub></b>	0.396	0.219	0.000

Σύμφωνα με τον Πίνακα 13, στον οποίο παρουσιάζεται η κατάταξη κατά VIKOR, η σειρά κατάταξης είναι η ακόλουθη:

$$F_{16} > F_{13} > F_5 > F_{11} > F_7 > F_{12} > F_2 > F_9 > F_{15} > F_4 > F_1 > F_{10} > F_3 > F_{14} > F_8 > F_6.$$

Οι δύο (2) συνθήκες της μεθόδου, δηλαδή το αποδεκτό όφελος και η αποδεκτή ευστάθεια στη λήψη απόφασης είναι αληθείς και πληρούν τις προϋποθέσεις διότι:

$$Q(F^{(2)} - F^{(1)}) \geq DQ \Rightarrow (0.276-0) > 1/(16-1) = 0.067$$

και επιπλέον σύμφωνα με τη δεύτερη συνθήκη οι κατατάξεις των S και R συμπίπτουν με την κατάταξη της Q.

Το ενοποιημένο δίκτυο πρώην Λίμνης Γιαννιτσών (Π.Λ.Γ.) είναι το βέλτιστο αρδευτικό δίκτυο (εναλλακτική δραστηριότητα 16), ακολουθεί το αρδευτικό δίκτυο Τρικάλων (εναλλακτική δραστηριότητα 13). Τα χειρότερα όλων στην κατάταξη, με σειρά από το κακό στο χειρότερο είναι το αρδευτικό δίκτυο Χαλάστρας (εναλλακτική δραστηριότητα 14), το αρδευτικό δίκτυο Μαργάρων (εναλλακτική δραστηριότητα 8) και τέλος το αρδευτικό δίκτυο Κλειδιού

(εναλλακτική δραστηριότητα 6) έχοντας πολύ μικρή διαφορά βαθμών αξιολόγησης μεταξύ τους.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι στην αξιολόγηση αυτή τα κριτήρια που κυριαρχούν είναι:

- το αρδευτικό νερό το οποίο παροχετεύεται από τον Γ.Ο.Ε.Β. Θεσσαλονίκης - Λαγκαδά ( $w_1$  κριτήριο),
- η παραγωγικότητα των καλλιεργειών ( $w_2$  κριτήριο),
- οι πραγματικές δαπάνες της κάθε καλλιέργειας ( $w_3$  κριτήριο).

Το 78% του συνολικού αθροίσματος των βαρών προέρχεται από τα τρία (3) αυτά κριτήρια, ενώ από μόνο του το βάρος του κριτηρίου  $w_1$  αποτελεί το 39% του συνόλου.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι μόνο στο αρδευτικό δίκτυο Π.Λ.Γ. εφαρμόζεται άρδευση με καταιονισμό, μικροάρδευση και άρδευση με σταγόνα, οι οποίες υπερέχουν σε σχέση με την κατανάλωση νερού και τις απώλειες ως προς τα ανοικτά αρδευτικά δίκτυα, συμπεραίνουμε ότι τα αποτελέσματα του προγράμματος ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Επιπρόσθετα, με δεδομένο ότι ο χρόνος κατασκευής των αντλιοστασίων που αποτελούν το ενοποιημένο αρδευτικό δίκτυο Π.Λ.Γ. είναι μεταγενέστερος από το χρόνο κατασκευής των αντλιοστασίων του θαλάσσιου μετώπου (Κλειδιού, Μαλγάρων και Χαλάστρας) προκύπτει ότι παρόλο που ο αριθμός των αντλιοστασίων που περιέχονται στο Π.Λ.Γ. είναι μεγαλύτερος σε σχέση με την υπόλοιπη πεδιάδα, εντούτοις αυτά, λόγω μικρής παλαιότητας, έχουν μικρότερο κόστος συντήρησης και πολύ μικρό κύκλο εργασιών.

### **5.7.3 Αποτίμηση Απόδοσης**

Τα ανοικτά αρδευτικά δίκτυα τα οποία δημιουργήθηκαν στην Ελλάδα, κατά τις δεκαετίες του '60 και '70, ήταν πρωτοποριακής τεχνολογίας και λειτουργίας. Με την πάροδο όμως του χρόνου και τη ραγδαία ανάπτυξη της επιστήμης, της τεχνολογίας και της αυτοματοποίησης θεωρούνται πλέον ξεπερασμένα και σήμερα το κόστος για τη συντήρησή τους είναι "ασήκωτο" από τους Τ.Ο.Ε.Β.

Εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος της μεθόδου VIKOR ο οποίος έχει στόχο την επιλογή του βέλτιστου αρδευτικού δικτύου μέσα από ένα σύνολο εναλλακτικών δραστηριοτήτων και σε σύγκριση με ένα πλήθος κριτηρίων τα οποία μπορεί να είναι και αλληλοσυγκρουόμενα.

Σαν αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι ο εντοπισμός του πλησιέστερου αρδευτικού δικτύου στο θεωρητικά ιδανικό αρδευτικό δίκτυο, δηλαδή αυτό που έχει την καλύτερη αξιολόγηση ως προς τα κριτήρια που έχουν τεθεί.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του προγράμματος αναδεικνύεται η σημασία της παραμέτρου  $\rho$  για την τελική κατάταξη των λύσεων. Ειδικά στη μέθοδο VIKOR η λύση αποτελεί ένα σταθμισμένο γραμμικό συνδυασμό της κανονικοποιημένης  $L_1$  νόρμας και της κανονικοποιημένης  $L_\infty$  νόρμας.

Το αρδευτικό δίκτυο της πρώην Λίμνης Γιαννιτσών ήταν ιεραρχικά το βέλτιστο αρδευτικό δίκτυο ( $Q = 0$ ) με αρκετή διαφορά από το δεύτερο που ήταν το αρδευτικό δίκτυο των Τρικάλων ( $Q = 0.135$ ). Με δεδομένο ότι το Π.Λ.Γ. αποτελείται από δίκτυα υπό πίεση με κλειστούς αγωγούς και είναι χρονικά μεταγενέστερο όλων των άλλων δικτύων, τα οποία εκτός του ότι θεωρούνται παλαιά και έχουν μεγάλες δαπάνες συντήρησης είναι συγχρόνως δίκτυα βαρύτητας με ανοικτούς αγωγούς και επομένως παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες αρδευτικού νερού, το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν και αυτό που αναμενόταν.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Μηχανισμός εκτίμησης αρδευτικών αναγκών στο φυτό Ηλίανθο

Η οικονομική χρήση του αρδευτικού νερού μέσω του σωστού προγραμματισμού της διαδικασίας άρδευσης σε συνδυασμό με τον ορθό υπολογισμό των υδατικών αναγκών της καλλιέργειας του ηλίανθου, αποτελεί στόχο του έξυπνου αλγορίθμου που θα αναλυθεί λεπτομερώς παρακάτω.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην Κοζάνη, σε αγροτεμάχιο το οποίο χωρίστηκε σε τρία (3) τμήματα προκειμένου να μελετηθεί περαιτέρω η ανάπτυξη του ηλίανθου σε διαφορετικές συνθήκες. Το πρώτο τμήμα του αγρού ποτίζεται με ανακτημένο νερό από το βιολογικό καθαρισμό, το δεύτερο με συμβατικό νερό και το τρίτο είναι ξερικό.

Αναπτύχθηκε μηχανισμός εκτίμησης αρδευτικών αναγκών, ο οποίος εκτελείται καθημερινά και ανάλογα με τα αποτελέσματα που επιστρέφει καθορίζεται η δόση άρδευσης που θα εφαρμοσθεί στην καλλιέργεια. Έχουν τοποθετηθεί στην επιφάνεια του χωραφιού, σε βέλτιστα σημεία (τα οποία προέκυψαν από μελέτη που προηγήθηκε) ασύρματοι αισθητήρες και ενεργοποιητές υψηλής ενεργειακής αυτονομίας, οι οποίοι επιτρέπουν τη λήψη μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και τη δημιουργία αυτοματισμών. Ο μηχανισμός εκτίμησης λειτουργεί με βάση τιμές που συλλέγονται στιγμιαία (δηλ. την ώρα που τρέχει ο αλγόριθμος) από τους αισθητήρες αυτούς και εφαρμόζεται τόσο για το τμήμα του αγρού που ποτίζεται με συμβατικό νερό όσο και για το τμήμα του αγρού που ποτίζεται με ανακτημένο νερό, καθώς είναι διαφορετικής έκτασης και έχουν εγκατασταθεί σε αυτά διαφορετικά συστήματα αισθητήρων.

Συγκεκριμένα, για την εκτίμηση των αρδευτικών αναγκών ελέγχεται η τιμή της εδαφικής υγρασίας **THITA**, που μετράει ο αισθητήρας έτσι ώστε να μην πέσει κάτω από τιμή της ελάχιστης επιτρεπόμενης υγρασίας **LAM** (Lower allowable moisture). Ελέγχεται εάν ισχύει η συνθήκη:

$$THITA (\% \text{ κ.ο.}) \leq LAM (\% \text{ κ.ο.}) \quad (25)$$

Στην περίπτωση που η παραπάνω συνθήκη ισχύει ο αγρός θα πρέπει να ποτιστεί έτσι ώστε η εδαφική υγρασία να ανέλθει στη τιμή της υδατοϊκανότητας FC (Field Capacity) δηλαδή στην ικανότητα συγκράτησης του νερού από το έδαφος, στην αντίθετη περίπτωση το πότισμα αναβάλλεται (μόνο για την συγκεκριμένη ημέρα) και ο αλγόριθμος θα πρέπει εκτελεστεί ξανά την επόμενη ημέρα την ίδια ώρα.

Επιπλέον ελέγχεται καθημερινά το βάθος ριζοστρώματος **RD** (Rooting Depth) (mm) του φυτού λαμβάνοντας υπόψιν την ημέρα ανάπτυξης του φυτού έτσι ώστε να υπολογιστεί η δόση άρδευσης (mm) που απαιτείται να εφαρμοσθεί στον αγρό. Αναφορικά με την ποσότητα

άρδευσης  $IR_n$  που απαιτείται, στην περίπτωση που χρειάζεται να ποτιστεί ο αγρός, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$IR_n = ((FC * RD_i) - (THITA * RD_i)) / Ef \quad (26)$$

όπου  $RD_i$  είναι το βάθος ριζοστρώματος της ημέρας  $i$  και  $Ef$  είναι η αποδοτικότητα άρδευσης.

Αφού υπολογιστεί η ποσότητα άρδευσης που απαιτείται, υπολογίζονται οι δυνητικές ώρες κατά τις οποίες πρέπει να αρδευτεί ο αγρός. Οι ώρες υπολογίζονται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Διάρκεια άρδευσης (hr)} = \frac{IR_n(\text{mm})}{\text{Διηθητικότητα εδάφους } \left(\frac{\text{mm}}{\text{hr}}\right)} \quad (27)$$

Συγχρόνως, υπολογίζονται οι πραγματικές ώρες που πρέπει να αρδευτεί το χωράφι σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{Διάρκεια άρδευσης (hr)} = \frac{IR_n(\text{mm}) * \text{Εμαδό άρδευσης (στρ)}}{\text{Άθροισμα της παροχής λειτουργίας των σταλακτήρων}} \quad (28)$$

Η σχέση αυτή υπολογίζεται τόσο για το τμήμα του αγρού που ποτίζεται με συμβατικό νερό όσο και για το τμήμα του αγρού που ποτίζεται με ανακτημένο νερό καθώς τα δύο (2) τμήματα έχουν διαφορετική έκταση και περιέχουν διαφορετικό αριθμό σταλακτήρων.

Τα κυβικά νερού ανά ώρα υπολογίζονται σύμφωνα με τον αριθμό και το μήκος των αγωγών, τον αριθμό των σταλακτήρων ανά αγωγό καθώς και την παροχή του κάθε σταλακτήρα.

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός, για κάθε ημέρα, της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (ET), η οποία είναι η απώλεια του νερού που επιτυγχάνεται με την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους και των φυτών με τη συνδυασμένη απώλεια νερού μέσω της φυτοκόμης (διαπνοή). Για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, που παρουσιάζει ο αγρός, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του υδατικού ισοζυγίου, η οποία είναι ένας έμμεσος τρόπος υπολογισμού της όταν δεν υπάρχει άρδευση. Επίσης και η επιφανειακή απορροή με τη βαθιά διήθηση θεωρηθείτε αμελητέα.

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή  $ET$  (mm/day), υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$ET = P + DSW \quad (29)$$

όπου  $P$  είναι το ύψος της ενεργού βροχόπτωσης (mm) και  $DSW$  (Deep soil moisture) είναι η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας (mm).

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε παρουσιάζει τα μειονεκτήματα του χαμηλού επιπέδου ακρίβειας των μετρήσεων της εδαφικής υγρασίας και της δυσκολίας εκτίμησης της ET κατά την περίοδο μιας βροχόπτωσης.

## 6.1 Υπολογισμός της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας

Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ( $ET_c$ ) εκφράζει τις καλλιεργητικές ανάγκες σε νερό και είναι το σύνολο του νερού που χρησιμοποιεί μία καλλιέργεια λαμβάνοντας υπόψιν τις πραγματικές συνθήκες του χωραφιού και την υγρασία του εδάφους.

Η  $ET_c$  παράγεται αν πολλαπλασιάσουμε την  $ET_o$  (ορίζεται ως ο ρυθμός εξάτμισης υποθετικής καλλιέργειας αναφοράς ύψους 0.12 m, σταθερής συνολικής αντίστασης επιφάνειας 70 sec/m και συντελεστή ανάκλασης της καλλιέργειας και της επιφάνειας του εδάφους (albedo) 0.23) επί ένα “φυτικό συντελεστή”,  $K_c$  (Crop coefficient), που είναι συγκεκριμένος για κάθε καλλιέργεια και υπολογίζεται πειραματικά βάση σταδίου ανάπτυξης αν πρόκειται για ετήσια καλλιέργεια ή με βάση το μήνα αν πρόκειται για δενδρώδη καλλιέργεια.

Η τιμή του φυτικού συντελεστή είναι μεταβαλλόμενη μέσα στη βλαστική περίοδο. Σύμφωνα με τα ανωτέρω έχουμε τη σχέση:

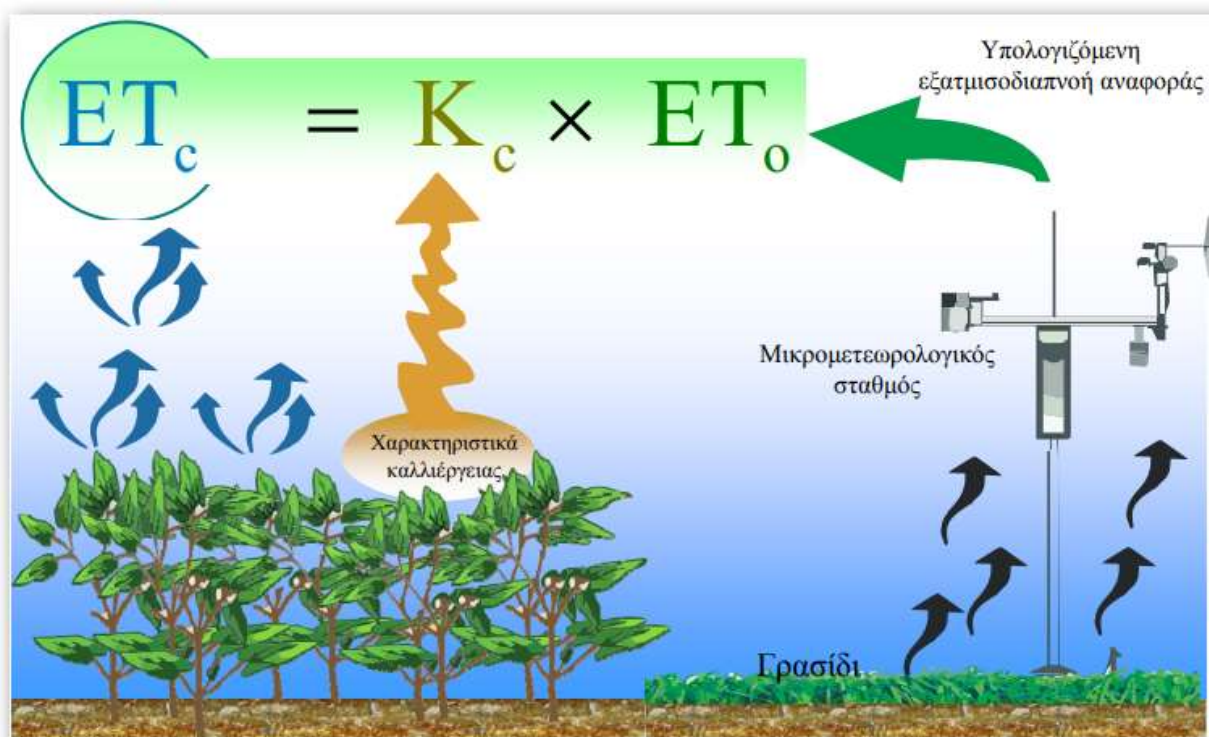
$$ET_c = K_c * ET_o \quad (30)$$

Όπου:

$ET_c$  η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας,

$ET_o$  η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς,

$K_c$  ο φυτικός συντελεστής.



Εικόνα 37. Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας  $ET_c$  [184]

## 6.2 Μέθοδος FAO Penman-Monteith

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς  $ET_0$  θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος FAO Penman-Monteith [185]. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η οποία χρησιμοποιείται για 24ωρες εκτιμήσεις της  $ET_0$ , για δεδομένα ημέρας ή μηνιαίου μέσου όρου, η εξίσωση που χρησιμοποιούμε είναι :

$$ET_0 = \left[ 0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_a - e_d) \right] [\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]^{-1} \text{ (mm/day)} \quad (31)$$

οι παράμετροι της σχέσης (31) εκτιμούνται σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$e_a = 0.611 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right), \text{ (kPa)} \quad (32)$$

$$e_d = e_a \frac{RH_{\text{mean}}}{100}, \text{ (kPa)} \quad (33)$$

$$\lambda = 2.501 - (2.361 * 10^{-3}) * T, \text{ (MJ*Kg}^{-1}\text{)} \quad (34)$$

$$\gamma = 0.00163 \frac{P^{*0.1}}{\lambda}, \text{ (kPa}^*0 \text{ C}^{-1}\text{)} \quad (35)$$

$$\Delta = \frac{4099e_a}{(T+237.3)^2}, \text{ (kPa}^*0\text{C}^{-1}\text{)} \quad (36)$$

$$G = 0.38(T_i - T_{i-1}), \text{ (MJ/m}^2\text{day)} \quad (37)$$

$$R_s = \left[ \alpha + \beta \frac{n}{N} \right] R_A, \text{ (MJ/m}^2\text{day)} \quad (38)$$

$$R_{ns} = 0.77R_s, \text{ (MJ/m}^2\text{day)} \quad (39)$$

$$R_A = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s], \text{ (MJ/m}^2\text{day)} \quad (40)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}, \text{ (MJ/m}^2\text{day)} \quad (41)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) = 1 + 0.33 \cos(0.0172J), \quad (42)$$

$$J = \left(\frac{275M}{9} - 30 + D\right) - 2, \quad (43)$$

$$\delta = 0.4093 \sin\left(\frac{2\pi J}{365} 1.39\right) = 0.4093 \sin(0.0172J - 1.39), \text{ (rad)} \quad (44)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta), \text{ (rad)} \quad (45)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s, \text{ (ώρες)} \quad (46)$$

$$R_{nl} = \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right) \left(0.34 - 0.14e_d^{1/2}\right) \sigma \cdot \frac{T_{kmin}^4 + T_{kmax}^4}{2}, \text{ (MJ/m}^2\text{day)} \quad (47)$$

$$R_{so} = (0.75 + 2 * 10^{-5}Z)R_A, \text{ (MJ/m}^2\text{day)} \quad (48)$$

$$u_2 = u_z \left(\frac{z}{z_0}\right)^{0.2}, \text{ (m/sec)} \quad (49)$$

και όπου:

<b>ET<sub>o</sub></b>	Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm/day).
<b>T</b>	Μέση θερμοκρασία σε ύψος 2m (°C).
<b>e<sub>a</sub></b>	Πίεση κορεσμένων υδρατμών στη μέση θερμοκρασία (kPa).
<b>e<sub>d</sub></b>	Πραγματική πίεση υδρατμών της ατμόσφαιρας που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του σημείου δρόσου (kPa).
<b>e<sub>a</sub> - e<sub>d</sub></b>	Έλλειμμα πίεσης κορεσμένων υδρατμών σε ύψος 2m (kPa).
<b>RH<sub>mean</sub></b>	Μέση σχετική υγρασία σε ύψος 2m (%).
<b>Δ</b>	Κλίση της καμπύλης στη σχέση πίεσης κορεσμού υδρατμών και θερμοκρασίας (kPa*°C <sup>-1</sup> ).
<b>P</b>	Ατμοσφαιρική πίεση (mbar).
<b>Z</b>	Υψόμετρο (m).
<b>γ</b>	Ψυχομετρική σταθερά (kPa*°C <sup>-1</sup> ).
<b>λ</b>	Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (MJ/Kg <sup>-1</sup> ).
<b>R<sub>n</sub></b>	Καθαρή ακτινοβολία (MJ/m <sup>2</sup> day).
<b>R<sub>ns</sub></b>	Καθαρή μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m <sup>2</sup> day).
<b>R<sub>nl</sub></b>	Καθαρή μεγάλου μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m <sup>2</sup> day).
<b>R<sub>s</sub></b>	Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m <sup>2</sup> day).
<b>R<sub>A</sub></b>	Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m <sup>2</sup> day).
<b>n</b>	Πραγματική ηλιοφάνεια (ώρες).
<b>N</b>	Θεωρητική ηλιοφάνεια (ώρες).
<b>G<sub>sc</sub></b>	Ηλιακή σταθερά (0.082MJ/m <sup>2</sup> min).
<b>dr</b>	Σχετική απόσταση γης-ηλίου.
<b>J</b>	Αριθμός της ημέρας του έτους.
<b>M</b>	Αριθμός του μήνα.
<b>D</b>	Αριθμός ημέρας του μήνα.
<b>ω<sub>s</sub></b>	Ηλιακή γωνία (rad).
<b>φ</b>	Γεωγραφικό πλάτος.
<b>δ</b>	Ηλιακή απόκλιση.
<b>R<sub>so</sub></b>	Μικρού μήκους κύματος ανέφελης ημέρας ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m <sup>2</sup> day).
<b>σ</b>	Σταθερά των Stefan-Boltzman (4.903*10 <sup>-9</sup> MJ/K <sup>4</sup> m <sup>2</sup> day).
<b>T<sub>κ</sub></b>	Μέση θερμοκρασία (°K).
<b>G</b>	Κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας προς το έδαφος (MJ/m <sup>2</sup> day).

$u_2$	Μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος δύο (2) μέτρα.
$u_z$	Μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος z μέτρα.
<b>900</b>	Συντελεστής της καλλιέργειας αναφοράς.
<b>0.34</b>	Συντελεστής της ταχύτητας του ανέμου για την καλλιέργεια αναφοράς.
$T_i$	Μέση θερμοκρασία σε ύψος 2m της ίδιας ημέρας (°C).
$T_{i-1}$	Μέση θερμοκρασία σε ύψος 2m της προηγούμενης ημέρας (°C).
$\alpha, \beta$	Συντελεστές που παίρνουν συγκεκριμένες τιμές για διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Αν δεν υπάρχουν μετρήσεις, προτείνονται οι τιμές: $\alpha = 0.25$ και $\beta = 0.50$ .

Για την εκτέλεση της μεθόδου αυτής είναι απαιτητές οι άμεσες μετρήσεις ορισμένων παραμέτρων ή ο προσδιορισμός τους μέσω των προηγούμενων εξισώσεων.

Για να υπολογίσουμε την εξατμισοδιαπνοή, απαραίτητες κλιματικές παράμετροι είναι η θερμοκρασία, η ταχύτητα ροής του αέρα, ο μέσος όρος της σχετική υγρασίας και η καθαρή ακτινοβολία.

Σύμφωνα με ερευνητές [186], στην περίπτωση ανυπαρξίας μετρήσεων της  $R_n$ , μπορούμε να την υπολογίσουμε μέσω:

- της τιμής που έχει η προσπίπτουσα ακτινοβολία  $R_s$ ,
- της τιμής που έχει η πραγματική ηλιοφάνεια  $n$ .

### 6.2.1 Εκτίμηση $R_n$ μέσω προσπίπτουσας ακτινοβολίας $R_s$

1. Τιμές  $R_s$
2.  $R_{ns} = 0.77R_s$
3.  $J = \left( \frac{275M}{9} - 30 + D \right) - 2$
4.  $d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) = 1 + 0.33 \cos(0.0172J)$
5.  $\delta = 0.4093 \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39\right) = 0.4093 \sin(0.0172J - 1.39)$
6. Γεωγραφικό πλάτος σε rad
7.  $\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta)$
8.  $R_A = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s]$
9.  $R_{so} = (0.75 + 2 * 10^{-5}Z)R_A$
10.  $R_{nl} = \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right) \left(0.34 - 0.14e_d^{1/2}\right) \sigma \cdot \frac{T_{kmin}^4 + T_{kmax}^4}{2}$
11.  $R_n = R_{ns} - R_{nl}$

## 6.2.2 Εκτίμηση $R_n$ μέσω πραγματικής ηλιοφάνειας $n$

1. Τιμές  $n$
2.  $j = \left( \frac{275M}{9} - 30 + D \right) - 2$
3.  $d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi j}{365}\right) = 1 + 0.33 \cos(0.0172j)$
4.  $\delta = 0.4093 \sin\left(\frac{2\pi j}{365} 1.39\right) = 0.4093 \sin(0.0172j - 1.39)$
5. Γεωγραφικό πλάτος σε rad
6.  $\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta)$
7.  $N = \frac{24}{\pi} \omega_s$
8.  $R_A = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s]$
9.  $R_{so} = (0.75 + 2 * 10^{-5}Z)R_A$
10.  $\alpha$  και  $\beta$  για την αντίστοιχη περιοχή
11.  $R_s = \left[ \alpha + \beta \frac{n}{N} \right] R_A$
12.  $R_{ns} = 0.77R_s$
13.  $R_{nl} = \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \left( 0.34 - 0.14e_d^{1/2} \right) \sigma \cdot \frac{T_{kmin}^4 + T_{kmax}^4}{2}$
14.  $R_n = R_{ns} - R_{nl}$

## 6.2.3 Υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ( $ET_o$ ), με ανεπαρκή μετεωρολογικά δεδομένα (σχέση του Hargreaves)

Σε περίπτωση ανυπαρξίας τιμών για  $R_n$ ,  $R_s$  και  $n$ , αλλά έχουμε μετρημένες τιμές για  $T_{max}$  (υψηλές ημερήσιες θερμοκρασίες) και  $T_{min}$  (χαμηλές νυχτερινές θερμοκρασίες), μπορούμε να υπολογίσουμε την προσπίπτουσα ακτινοβολία  $R_s$  μέσω της σχέσης του Hargreaves ως εξής:

$$R_s = K_{R_s} * R_A * \sqrt{T_{max} - T_{min}}, \text{ (MJ/m}^2\text{day)} \quad (50)$$

Η τετραγωνική ρίζα της διαφοράς θερμοκρασίας έχει μεγάλη σχέση με την καθημερινή ηλιακή ακτινοβολία συγκεκριμένης θέσης. Στις ηπειρωτικές περιοχές, ο εμπειρικός συντελεστής προσαρμογής  $K_{R_s}$  έχει διαφορετική τιμή από τις παράκτιες. Σε ηπειρωτικές περιοχές είναι ίσος με 0.16, ενώ στις παράκτιες είναι ίσος με 0.19.

Μόλις εκτιμηθεί η  $R_s$ , ακολουθεί ο υπολογισμός της  $R_n$  (παρ. 6.2.1) και τέλος μέσω της εξίσωσης FAO Penman-Monteith υπολογίζεται η  $ET_o$ .

### 6.3 Φυτικοί συντελεστές $K_c$

Ο υπολογισμός των υδατικών αναγκών διαφόρων καλλιεργειών, όπως αυτές εκφράζονται από την εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας  $ET_c$ , προκύπτει από τον συνδυασμό της χρήσης των φυτικών συντελεστών,  $K_c$ , και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς,  $ET_o$ . Ο υπολογισμός των φυτικών συντελεστών προκύπτει από τη σχέση:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (51)$$

όπου  $K_c$  είναι ο φυτικός συντελεστής καθορισμένης καλλιέργειας, ορισμένης ανάπτυξης και που φύεται σε έδαφος συγκεκριμένων συνθηκών υγρασίας. Οι φυτικοί συντελεστές μεταβάλλονται κατά τη βλαστική περίοδο, προσδιορίζονται πειραματικά και εκφράζουν τις επιπτώσεις που έχουν στη μετατόπιση υδρατμών, θερμότητας και της ανακλαστικότητας του φυλλώματος ή αλλαγή μεγέθους στη φυτική επιφάνεια, στο ύψους των φυτών, στο ποσοστό εδαφικής κάλυψης και στην αντίσταση του φυλλώματος. Συσχετίζουν την  $ET_c$  με την  $ET_o$  μιας ορισμένης καλλιέργειας.

### 6.4 Ωφέλιμη βροχή $P_e$

Η ωφέλιμη βροχή είναι η ποσότητα από την ολική βροχή που αποθηκεύεται στη ζώνη του ριζοστρώματος που βρίσκεται στο έδαφος και μέσω της οποίας ικανοποιούνται οι υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας. Κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου αποθηκεύεται στο έδαφος ένα ποσοστό της ωφέλιμης βροχής το οποίο είναι εξαρτώμενο από τη περιοδικότητα, τον όγκο, τη διάρκεια και την ένταση της υδατόπτωσης, την κατάσταση και της αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους κατά το χρόνο πτώσης του υετού [187]. Η αυξημένη εξατμισοδιαπνοή και η μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους έχουν ως συνέπεια την αύξηση της ωφέλιμης βροχής σαν ποσοστό της ολικής βροχής.

Η Soil Conservation Service, USDA (1970) [188] παρουσίασε μια σχέση μέσω της οποίας είναι δυνατός ο υπολογισμός της μέσης μηνιαίας ωφέλιμης βροχής ( $P_e$ ), από τις μέσες τιμές της μηνιαίας ολικής βροχόπτωσης ( $P_t$ ) και της μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας ( $ET_c$ ) καθώς και του αποδεκτού υποβιβασμού της εδαφικής υγρασίας έως την επόμενη άρδευση ( $D$ ). Η σχέση αυτή είναι:

$$P_e = f(D)[1.25P_t^{0.824} - 2.93]10^{0.00095ET_c} \quad (52)$$

οι τιμές των  $P_e$ ,  $P_t$  και  $ET_c$  είναι σε mm ανά μήνα.



Το  $f(D)$  ισούται με τη μονάδα όταν το  $D$  ισούται με 75 mm. Για όλες τις άλλες τιμές του  $D$ , το  $f(D)$  υπολογίζεται από:

$$f(D) = 0.53 + 0.0116D - 9.94 \times 10^{-5}D^2 + 2.32 \times 10^{-7}D^3 \quad (53)$$

### 6.5 Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής υπό συνθήκες υπόγειας στάγδην άρδευσης ETt

Οι υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας, όπως αυτές εκφράζονται μέσω της εξατμισοδιαπνοής, πρέπει να καλύπτονται από την άρδευση με σταγόνες. Υπάρχουν πολλές καλλιέργειες που μέσω της άρδευσης υγραίνεται το σύνολο της επιφάνειας τους η οποία δεν καλύπτεται ολόκληρη από το φύλλωμά, ιδιαίτερα σε οπωρώνες με μικρά σε ηλικία δέντρα. Αυτό έχει σαν συνέπεια σημαντικό μέρος του νερού να αφαιρείται από τον αγρό μέσω της εξάτμισης από το ακάλυπτο έδαφος και μέσω της διαπνοής από τα ζιζάνια που αναπτύσσονται μεταξύ των δέντρων.

Εφαρμόζοντας άρδευση με σταγόνες περιορίζονται αυτές οι απώλειες σε μεγάλο ποσοστό γιατί δεν υγραίνεται συνολικά ο αγρός αλλά μόνο ένα μέρος του εδάφους, δυσχεραίνοντας με τον τρόπο αυτό την ανάπτυξη των ζιζανίων, λόγω της ξηρότητας μεγάλου μέρους του αγρού. Άρα η διαπνοή της καλλιέργειας καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό της ET .

Η ET κάτω από συνθήκες στάγδην άρδευσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$ET_t = ET_c \frac{P_c}{85}, \quad \frac{P_c}{85} \leq 1 \quad (54)$$

όπου  $ET_t$  η εξατμισοδιαπνοή κάτω από συνθήκες στάγδην άρδευσης,  $ET_c$  η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και  $P_c$  είναι το ποσοστό της επιφάνειας του εδάφους που σκιάζει το φύλλωμα της καλλιέργειας. Ο τιμές των  $ET_t$  και  $ET_c$  είναι σε mm/ημέρα.

Η επιφανειακή στάγδην άρδευση είναι μικρότερη από 2% έως 5% από την εξατμισοδιαπνοή υπό συνθήκες υπόγειας στάγδην άρδευσης (πιο μεγάλη διαπνοή και ταυτόχρονα πιο μικρή εξάτμιση) επομένως υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

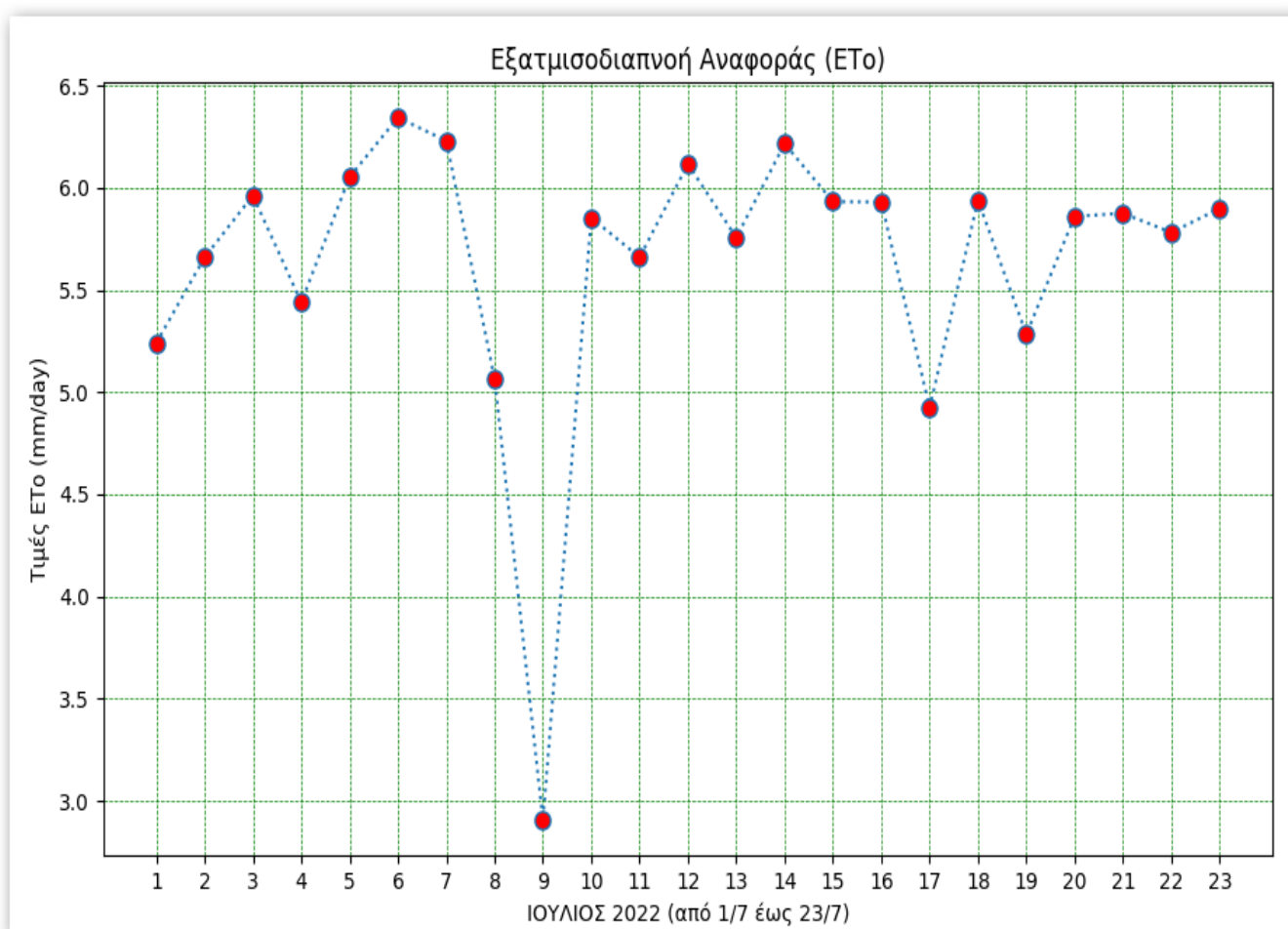
$$ET_t = p * ET_c \quad (55)$$

όπου  $p$  είναι το ποσοστό εδαφικής υγρασίας.

## 6.6 Εφαρμογή μηχανισμού εκτίμησης αρδευτικών αναγκών - Αποτελέσματα

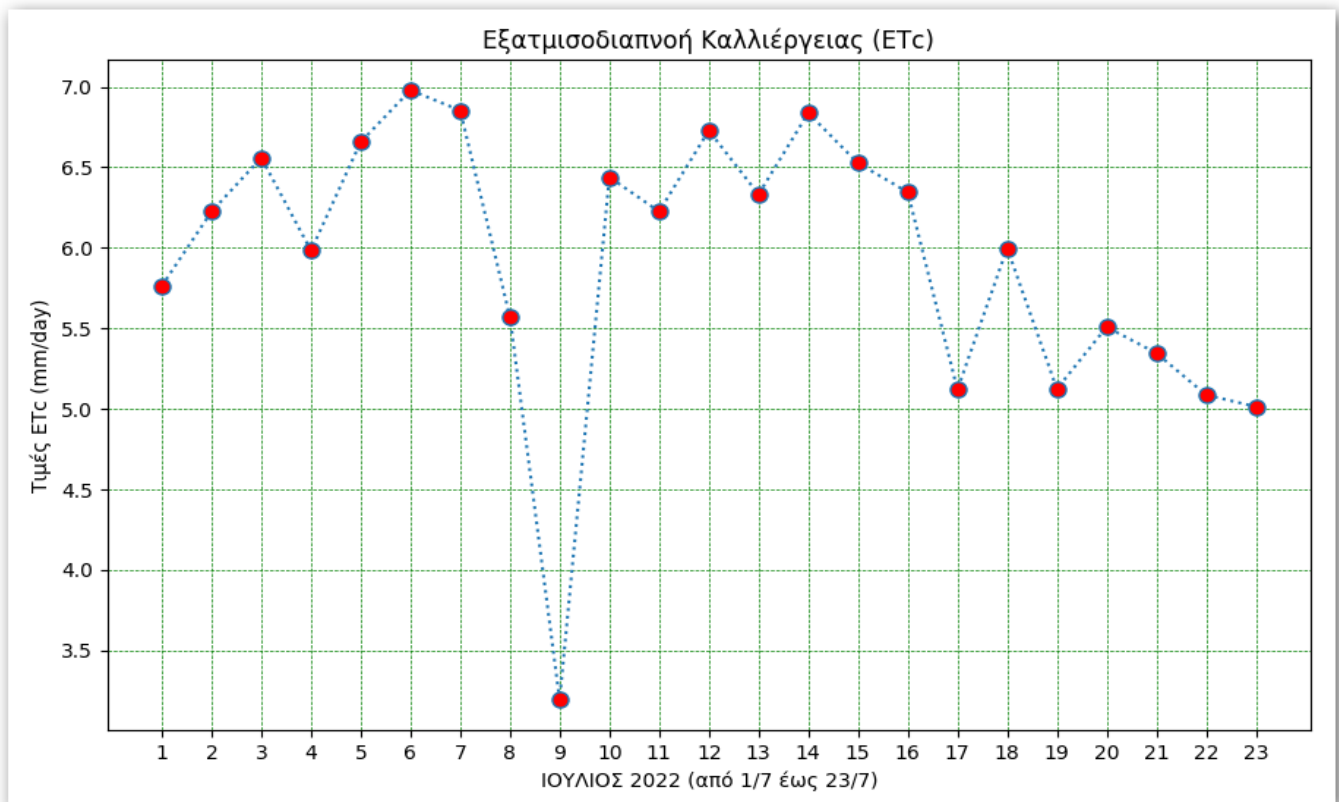
Το διάστημα από την 1<sup>η</sup> έως και την 23<sup>η</sup> Ιουλίου 2022, για το τμήμα του αγρού που ποτίζεται με ανακτημένο νερό από το βιολογικό καθαρισμό, εφαρμόστηκε ο μηχανισμός εκτίμησης αρδευτικών αναγκών ο οποίος εκτελέστηκε σε καθημερινή βάση και σε συγκεκριμένη ώρα, 21:00.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μηχανισμού παρουσιάζονται με την μορφή των γραφημάτων που ακολουθούν:



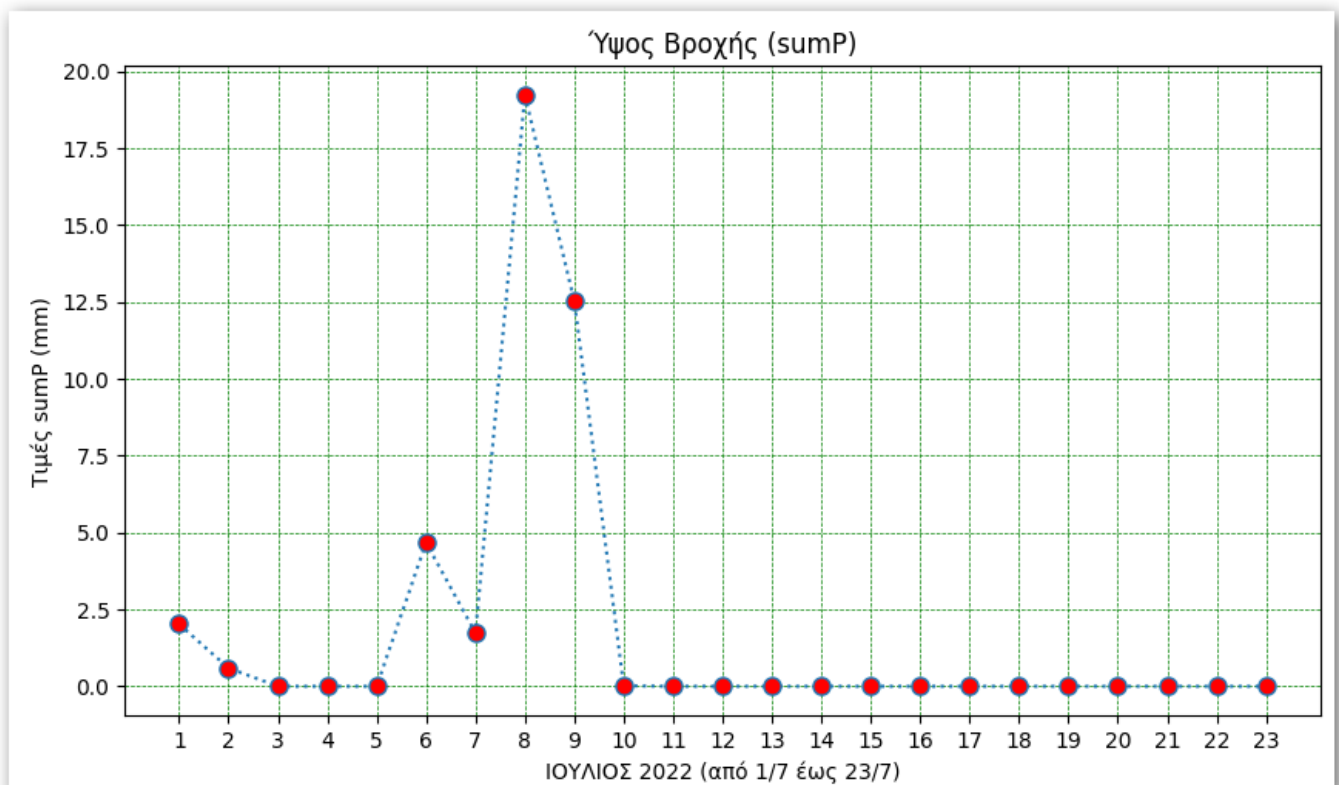
**Γράφημα 1.** Διακύμανση Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς (ETo)

Παρουσιάζονται τα δεδομένα της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς (ETo) όπως αυτά προέκυψαν από τις μετρήσεις αισθητήρων και τους 24ωρους υπολογισμούς μέσω της μεθόδου FAO Penman-Monteith, που αποτελεί μέρος του μηχανισμού εκτίμησης αρδευτικών αναγκών, για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.



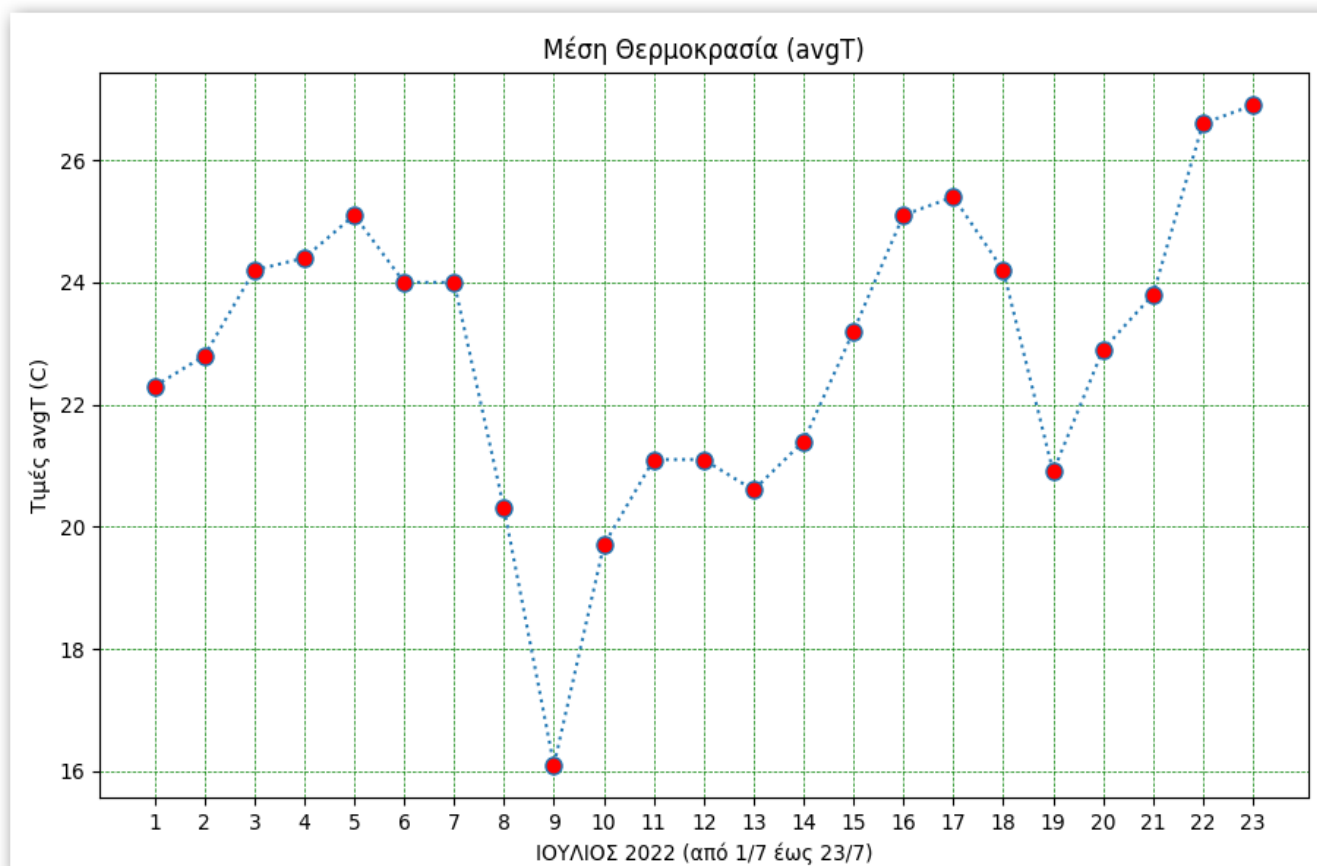
**Γράφημα 2.** Διακύμανση Εξατμισοδιαπνοής Καλλιέργειας (ETc)

Παρουσιάζονται τα δεδομένα της Εξατμισοδιαπνοής Καλλιέργειας (ETc) όπως αυτά προέκυψαν από το πολλαπλασιασμό της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς (ETo) με τον φυτικό συντελεστή (Kc) του Ηλιάνθου.



**Γράφημα 3.** Διακύμανση ύψους Βροχής (sumP)

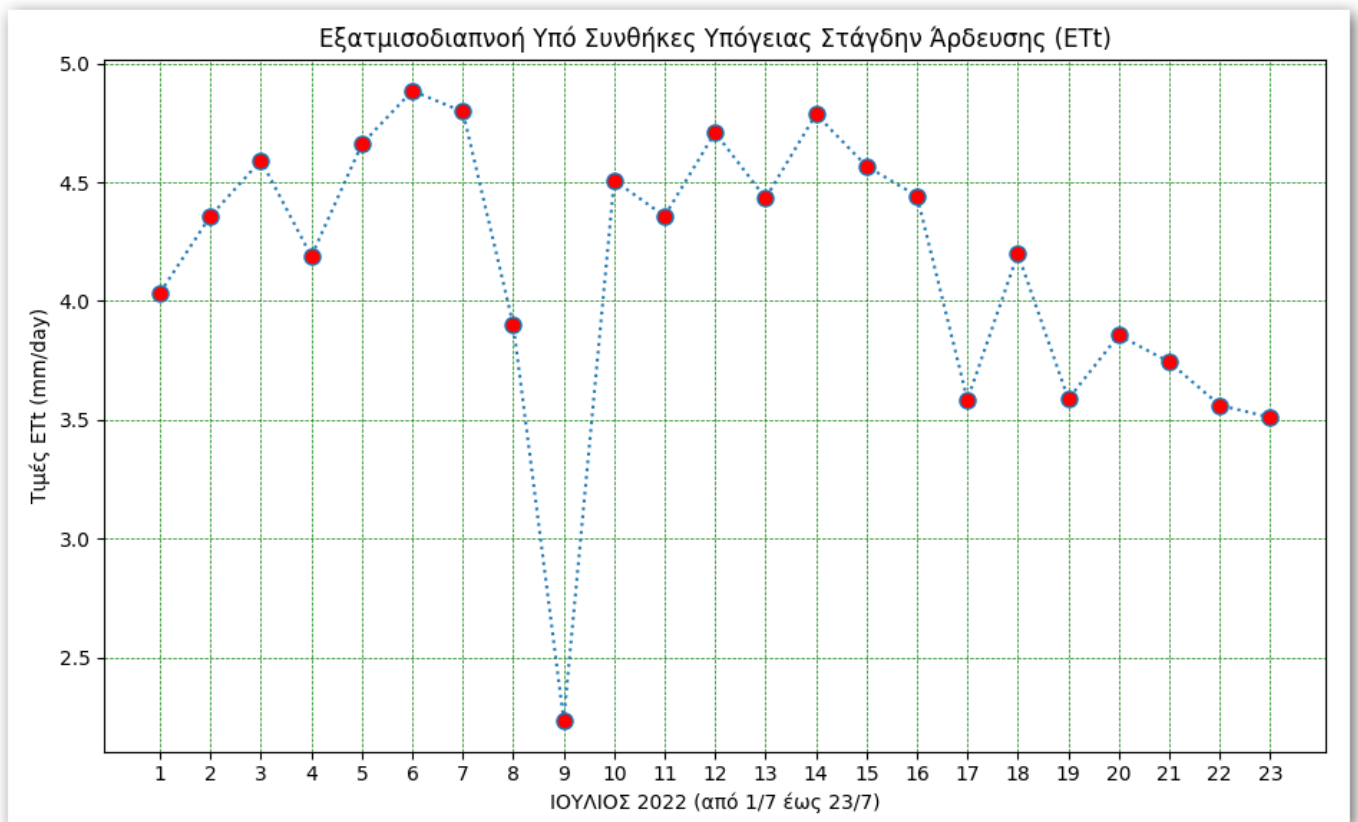
Παρουσιάζονται τα δεδομένα της βροχόπτωσης (sumP) όπως αυτά μετρήθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό που είναι εγκατεστημένος στον αγρό. Σημειώνεται ότι το ποσό της βροχόπτωσης που καταλήγει σε ωφέλιμη βροχή είναι διαφορετικό και επομένως θα παρουσιαστεί η βροχόπτωση που σημειώθηκε στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.



**Γράφημα 4.** Διακύμανση θερμοκρασίας περιβάλλοντος (avgT)

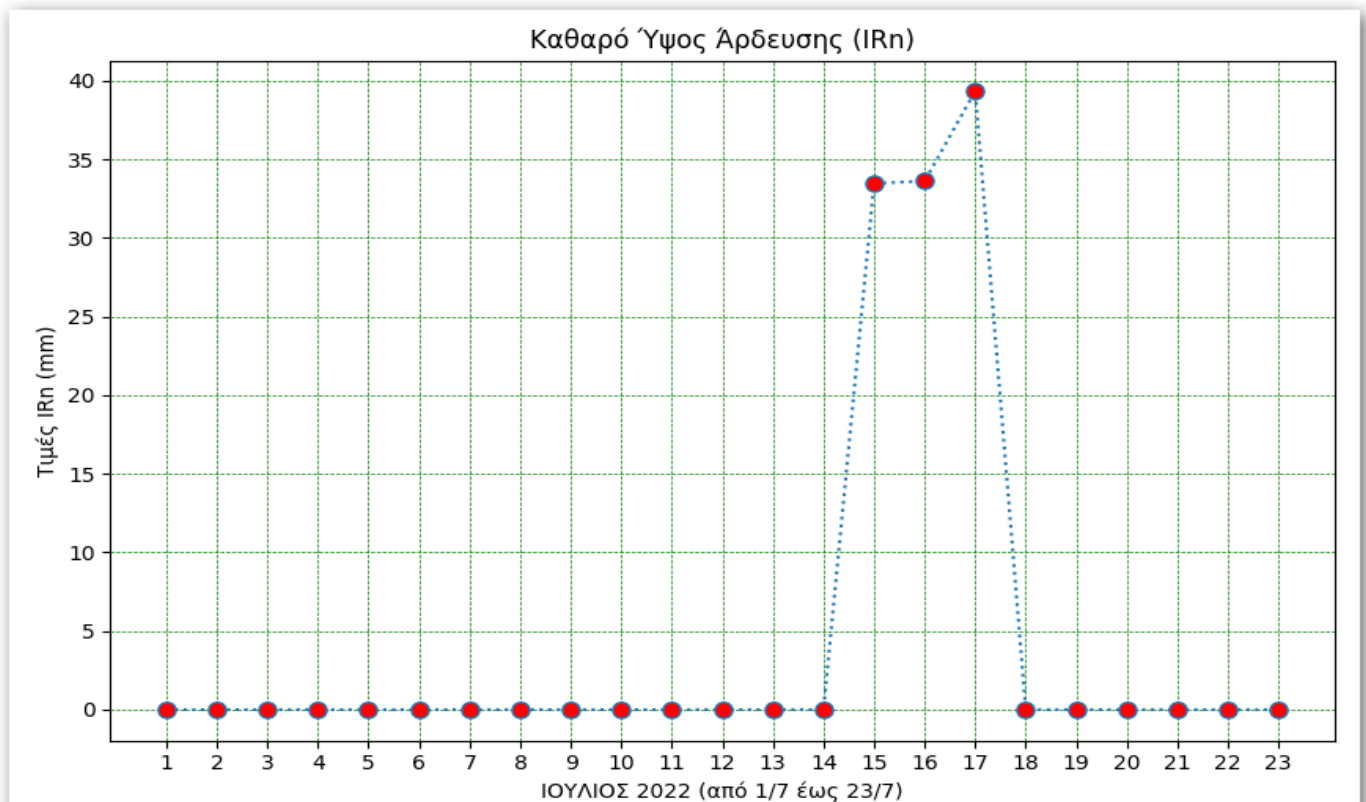
Παρουσιάζονται τα δεδομένα της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (avgT), για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, όπως αυτά μετρήθηκαν από τους αισθητήρες θερμοκρασίας που είναι εγκατεστημένοι στο τμήμα του αγρού για το οποίο εφαρμόσθηκε ο μηχανισμός εκτίμησης αρδευτικών αναγκών.

Η εξατμισοδιαπνοή επηρεάζεται από κλιματικούς παράγοντες όπως την βροχόπτωση και τη θερμοκρασία και ακολουθεί τις μεταβολές τους όπως φαίνεται και στα γραφήματα.



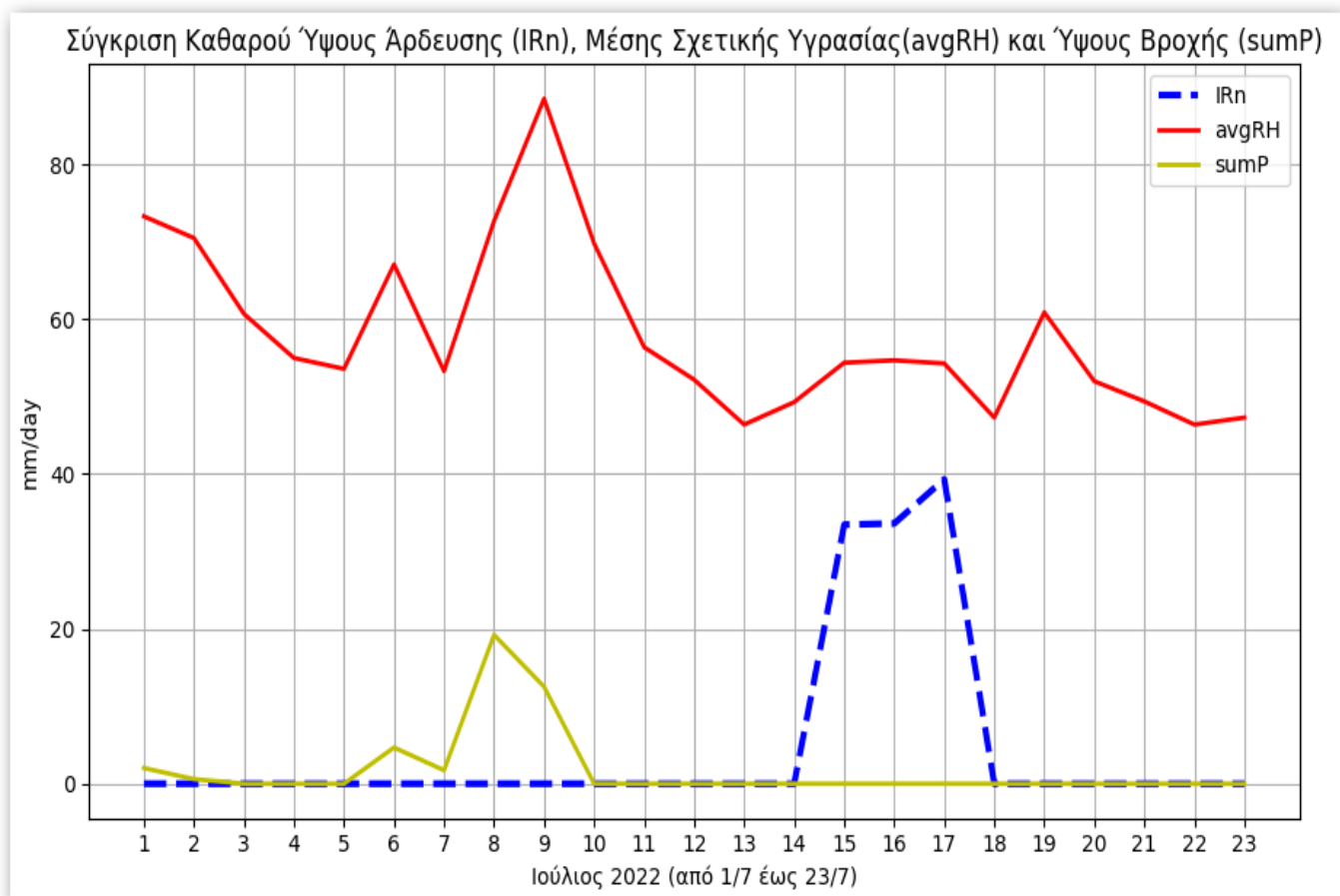
**Γράφημα 5.** Διακύμανση Εξατμισοδιαπνοής υπό συνθήκες Στάγδην Άρδευσης (ETt)

Παρουσιάζονται τα δεδομένα της Εξατμισοδιαπνοής υπό συνθήκες στάγδην Άρδευσης (ETt) όπως αυτά προέκυψαν από το γινόμενο της Εξατμισοδιαπνοής Καλλιέργειας (ETc) με το ποσοστό ύγρανσης του εδάφους ( $\rho$ ), το οποίο μετρήθηκε από εγκατεστημένους αισθητήρες.



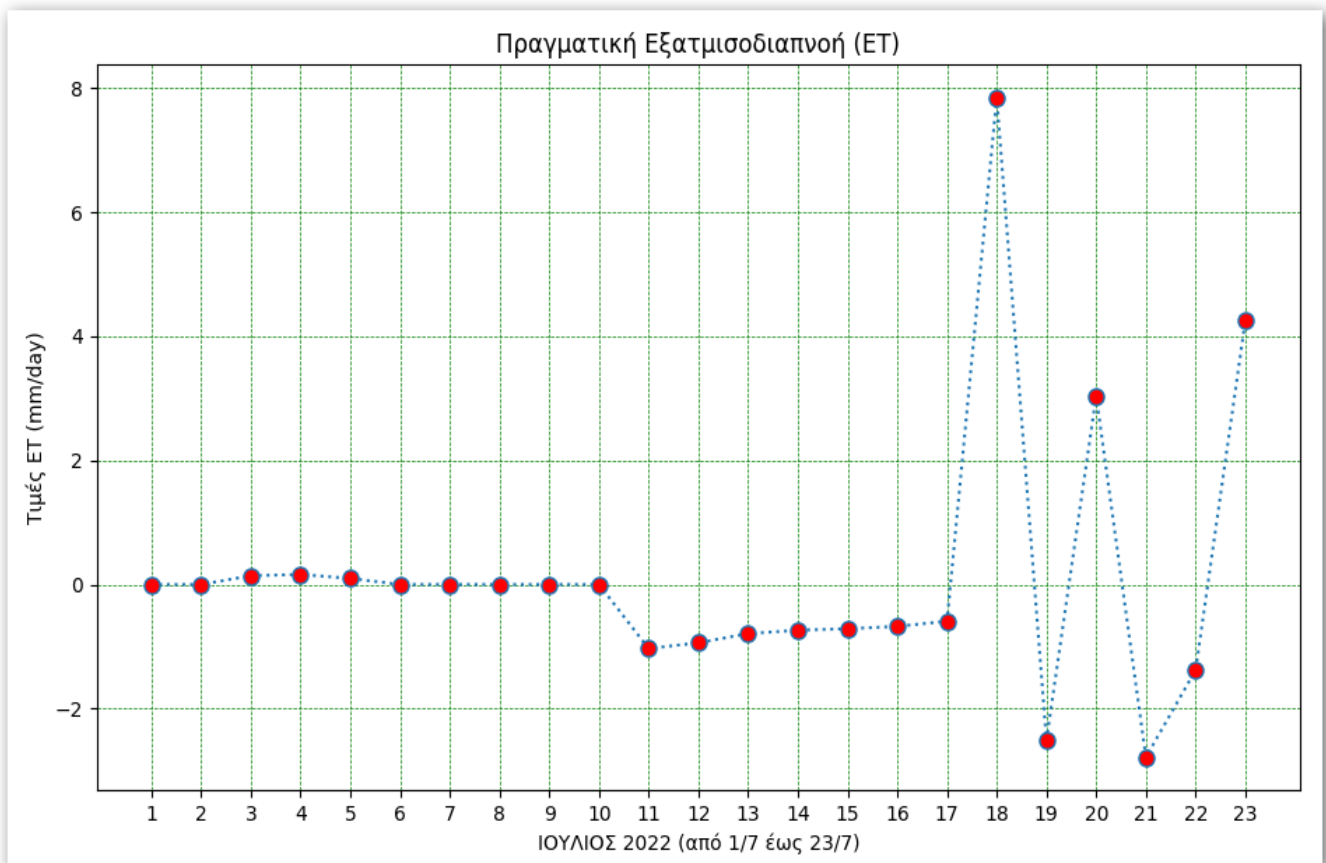
**Γράφημα 6.** Διακύμανση καθαρού ύψους Άρδευσης (IRn)

Παρουσιάζονται δεδομένα που αφορούν το καθαρό ύψος Άρδευσης (IRn), λαμβάνοντας υπόψιν όμως ότι η άρδευση του χωραφιού δεν πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον μηχανισμό αλλά διενεργούνταν ανεξάρτητα, ξεκινώντας νωρίτερα από την ώρα εφαρμογής του μηχανισμού, γι αυτό και παρατηρείται ο μικρός αριθμός ημερών για τις οποίες απαιτείται να αρδευτεί ο αγρός.



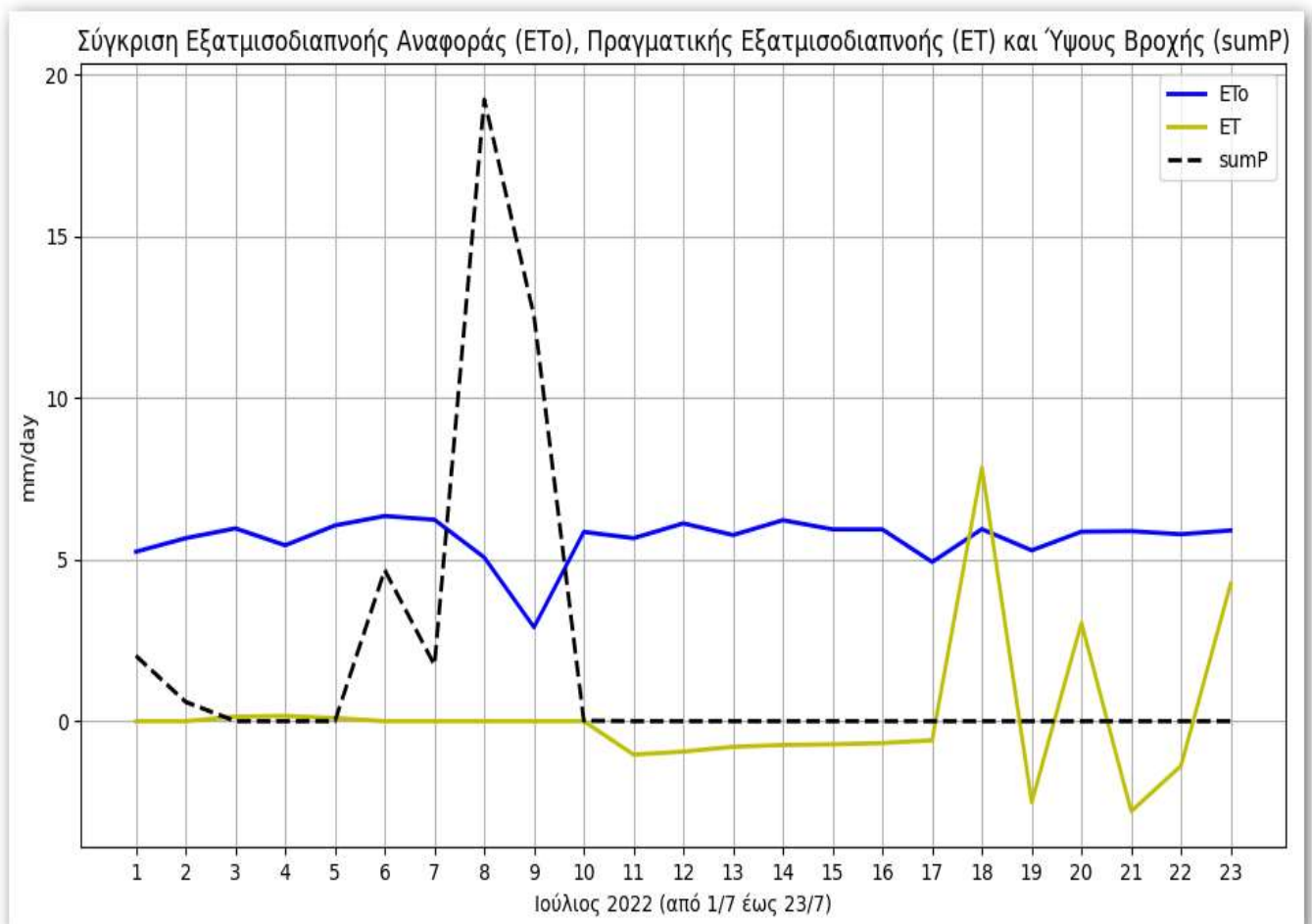
**Γράφημα 7.** Σύγκριση ύψους Άρδευσης, σχετικής Υγρασίας και ύψους Βροχής

Παρουσιάζονται σε γράφημα δεδομένα τα οποία αφορούν το καθαρό ύψος Άρδευσης (IRn), τη μέση σχετική Υγρασία (avgRH) και το ύψος Βροχής (sumP), όπως αυτά προκύπτουν από τις μετρήσεις των αισθητήρων και την ανεξάρτητη, από τον μηχανισμό, άρδευση του αγρού.



**Γράφημα 8.** Διακύμανση Πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής (ET)

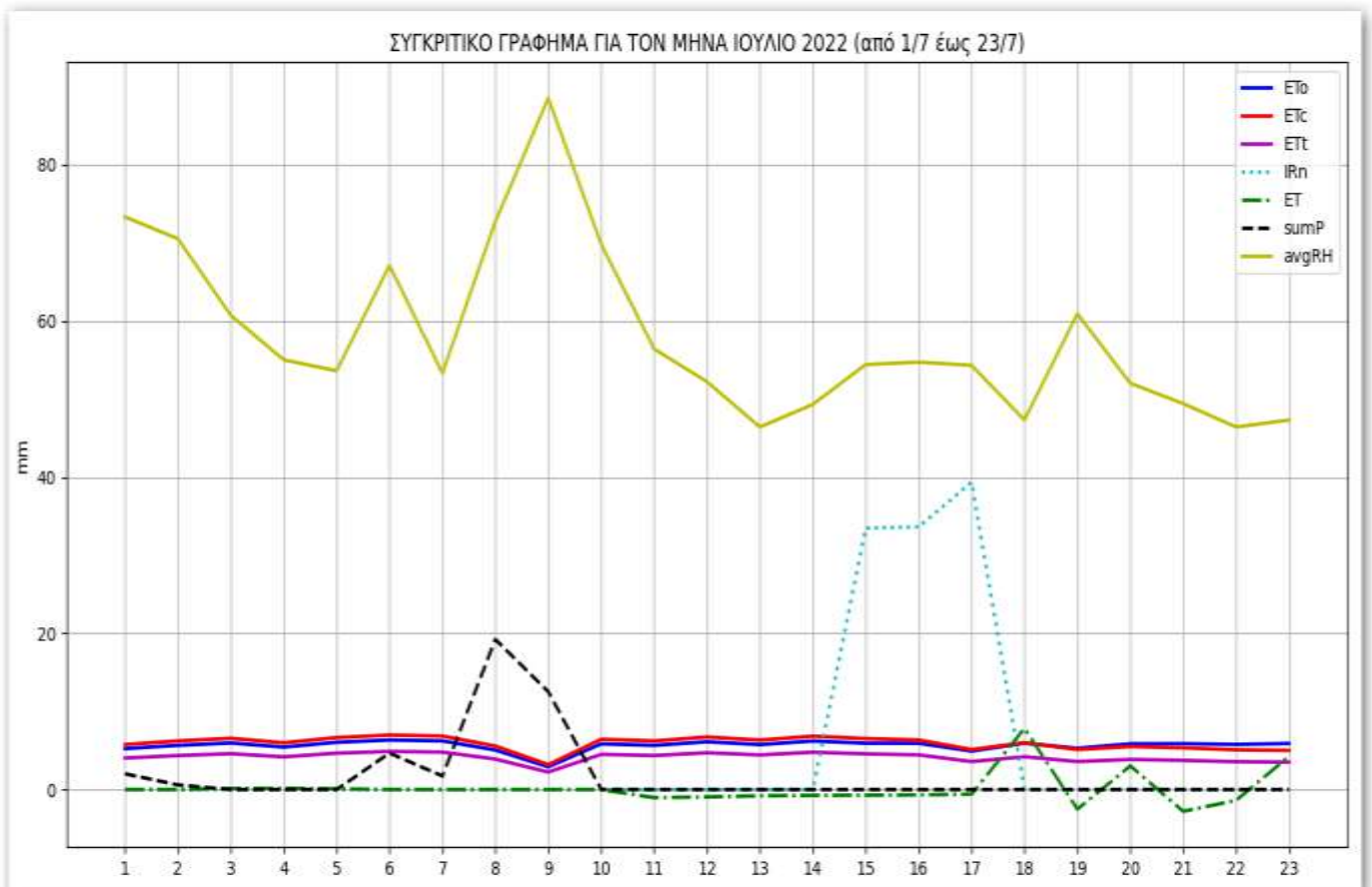
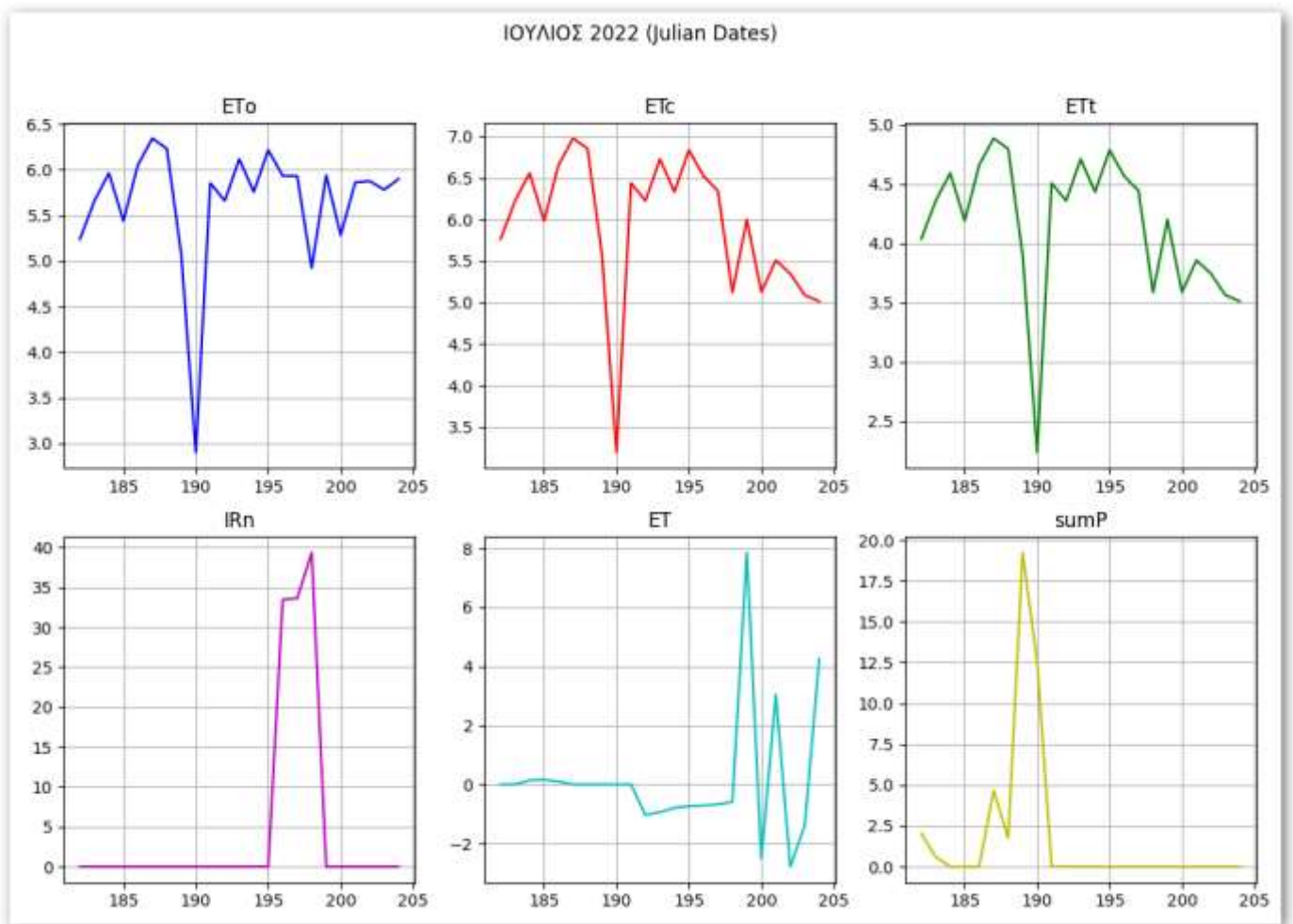
Παρουσιάζονται δεδομένα που αφορούν την Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή (ET), τα οποία προκύπτουν από τον μηχανισμό εκτίμησης αρδευτικών αναγκών και δείχνουν την πραγματική ποσότητα του νερού που αφαιρείται από τον αγρό, εξαιτίας δύο διαδικασιών που ενεργούν συνδυαστικά, αυτές είναι η εξάτμιση και η διαπνοή.



**Γράφημα 9.** Σύγκριση Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς (ETo), Πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής (ET) και ύψους Βροχής

Παρουσιάζονται δεδομένα τα οποία αφορούν την Εξατμισοδιαπνοή Αναφοράς (ETo), την Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή (ET) και το ύψος Βροχής (sump), όπως αυτά προκύπτουν από τις μετρήσεις των αισθητήρων και τον μηχανισμό εκτίμησης αρδευτικών αναγκών για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.





**Γράφημα 10, 11.** Συνολικά αποτελέσματα μηχανισμού εκτίμησης αρδευτικών αναγκών

## 6.7 Αποτίμηση μηχανισμού εκτίμησης αρδευτικών αναγκών

Η μείωση των παγκόσμιων αποθεμάτων νερού σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος του νερού άρδευσης, καθιστούν επιβεβλημένο τον προγραμματισμό των αρδεύσεων με σκοπό την ορθολογική χρήση του νερού. Είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των αναγκών σε αρδευτικό νερό με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια π.χ. αξιολόγηση δεδομένων από αγρομετεωρολογικούς σταθμούς, εφαρμόζοντας φυτικούς συντελεστές, εκτίμηση της αποθηκευτικής ικανότητας σε νερό του χωραφιού, χρήση αισθητήρων εδαφικής υγρασίας, κ.α.

Με τη βοήθεια του μηχανισμού εκτίμησης αρδευτικών αναγκών, που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό, ο οποίος επεξεργάζεται ένα μεγάλο όγκο δεδομένων (είτε με απευθείας μέτρηση κάποιων παραμέτρων, είτε με υπολογισμό επιμέρους εξισώσεων) ένας παραγωγός μπορεί να λάβει συμβουλές άρδευσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του αγρού του (υψόμετρο, έδαφος, μέγεθος, είδος καλλιέργειας) παρέχοντας μόνο βασικά στοιχεία για το αρδευτικό του σύστημα.

Οι συμβουλές άρδευσης αφορούν τη ημερήσια δόση άρδευσης, το μέσο εύρος και τη διάρκεια άρδευσης, όπως αυτά προκύπτουν από ημερήσια μετεωρολογικά και κλιματικά δεδομένα. Για να υπολογίσουμε με ακρίβεια την εξατμισοδιαπνοή μέσω της μεθόδου FAO Penman-Monteith πρέπει να υπάρχουν μετρημένες τιμές της θερμοκρασίας, της ταχύτητας του ανέμου σε συγκεκριμένο ύψος, του μέσου όρου της σχετική υγρασίας και της καθαρής ακτινοβολίας.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο εξορθολογισμός της διαχείρισης του αρδευτικού νερού στον αγροτικό τομέα είναι επιτακτική ανάγκη. Οι παραδοσιακά εφαρμοζόμενες αρδευτικές πρακτικές καθώς και οι υπάρχουσες υποδομές αδυνατούν να καλύψουν το υδάτινο έλλειμα, το οποίο αυξάνει μέρα με τη μέρα εξαιτίας και της κλιματικής αλλαγής. Το πρόβλημα εντείνεται περαιτέρω από την επιμονή των αγροτών να δραστηριοποιούνται με καλλιέργειες που έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε νερό.

Το συνολικά διαθέσιμο νερό πρέπει να ικανοποιεί ταυτόχρονα δύο χρήσεις: Τις ανάγκες ύδρευσης του πληθυσμού των πόλεων και τις υδατικές ανάγκες των καλλιεργειών, οπότε είναι σημαντικό να υπάρχει ισορροπία στην κατανάλωση μεταξύ αυτών των χρήσεων. Τα υδατικά αποθέματα όμως εξαντλούνται και από ένα μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων, οι οποίες αντλούν νερό που βρίσκεται σε μεγάλα βάθη προκειμένου να ικανοποιήσουν τις ανάγκες των καλλιεργειών.

Έχοντας σα δεδομένο ότι σε αρκετές χώρες το νερό άρδευσης κοστίζει πολύ, η μη βέλτιστη χρήση του έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση στην τιμή του τελικού προϊόντος λόγω της αύξησης του κόστους παραγωγής. Η χρέωση για την κατανάλωση αρδευτικού νερού πρέπει να είναι σύμφωνη με τον όγκο νερού που καταναλώθηκε και όχι με το μέγεθος του αγρού που αρδεύτηκε. Συμπληρωματικά θα πρέπει να δίνονται κίνητρα στους καταναλωτές που προσπαθούν να εξοικονομήσουν νερό ενώ αντίθετα να αποθαρρύνονται οι σπάταλοι χρήστες νερού. Το νερό είναι ένας ζωτικός, ανανεώσιμος φυσικός πόρος και επομένως η αειφόρος διαχείριση του, με σκοπό την εξοικονόμηση και την αποτελεσματική χρήση του, αποτελεί μονόδρομο.

Η περιβαλλοντική διάσταση της διαχείρισης του αρδευτικού νερού προβάλλεται και μέσα από τις πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης σύμφωνα με τις πρόσφατες ανακοινώσεις της στο πλαίσιο της Πράσινης Συμφωνίας, όπως η στρατηγική “Από το Αγρόκτημα στο Πιάτο” [189]. Σύμφωνα με αυτές τονίζεται η ανάγκη για έξυπνη γεωργία, μείωση στη χρήση χημικών προστατεύοντας ταυτόχρονα τους φυσικούς πόρους.

Εκσυγχρονίζοντας τους παραδοσιακούς μηχανισμούς άρδευσης, σύμφωνα με τους οποίους οι καλλιεργητές πότιζαν εμπειρικά έχοντας ως μέτρο την διαθεσιμότητα του νερού, με τη συνδρομή των τεχνολογιών IoT στη συλλογή των απαραίτητων στοιχείων, την εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης της άρδευσης, τους μηχανισμούς εξοικονόμησης νερού και την αξιοποίηση των ερευνητικών αποτελεσμάτων μπορούμε να γνωρίζουμε σε πραγματικό

χρόνο τις υδατικές ανάγκες μιας καλλιέργειας και να τις καλύπτουμε με ακρίβεια, έτσι ώστε να αποφεύγουμε την άσκοπη χρήση νερού, αυτού του πολύτιμου για τη ζωή φυσικού πόρου.

## ΕΛΛΑΔΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Home » Business » Agriculture » Greek Agriculture Water Use Way Over EU Average

### Greek Agriculture Water Use Way Over EU Average

Business Agriculture Society Environment by Ergasia Αθανασίου  
June 23, 2016



According to studies conducted by the Greek Institute of Geology and Mineral Exploration Management (IGMEM), Greece uses the highest percentage of its water on crop irrigation, compared to other Mediterranean countries such as [Portugal](#) and Spain. Although water shortage is not a problem for the time being in Greece, 86% of its water is pumped into agriculture, whereas the EU average is just 24%.



**Εικόνα 38. Η χρήση νερού στην Ελληνική γεωργία είναι πάνω από τον μέσο όρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης [190]**

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Πηγή: ΑΠΕ - ΜΠΕ, “Πολλαπλά οφέλη από το σύστημα ευφυούς γεωργίας ‘gaiasense,’” *Capital (capital.gr)*, Feb. 2018, Accessed: Oct. 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.capital.gr/oikonomia/3270777/pollapla-ofeli-apo-to-sustima-eufuous-georgias-gaiasense>
- [2] D. Kriesel, “A Brief Introduction to Neural Networks,” 2007. [http://www.dkriesel.com/en/science/neural\\_networks](http://www.dkriesel.com/en/science/neural_networks) (accessed Oct. 23, 2022).
- [3] “A Trademark and Set of Standards for Good Agricultural Practices -- Putting Food Safety and Sustainability on the Map,” *GLOBALG.A.P. (globalgap.org)*, 1977. [https://www.globalgap.org/uk\\_en](https://www.globalgap.org/uk_en) (accessed Nov. 18, 2022).
- [4] C. Booth, “Chapter 2: IP Phones, Software VoIP, and Integrated and Mobile VoIP,” *Libr Technol Rep*, vol. 46, no. 5, pp. 11–19, Jul. 2010.
- [5] K. Patel, S. Petel, P. Scholar, and C. Salazar, “Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges,” *International journal of engineering science and computing*, vol. 6, no. 5, May 2016.
- [6] Δ. Μπουναρτζή and Β. Μ. Ισλαμάι, “Ασφάλεια και ιδιωτικότητα στο διαδίκτυο των πραγμάτων,” ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, 2019.
- [7] By Admin, “Kevin Ashton May Change the World,” *RFID Journal*, Apr. 2002, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.rfidjournal.com/kevin-ashton-may-change-the-world-2>
- [8] G. Jayavardhana, B. Rajkumar, M. Slaven, and P. Marimuthu, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013.
- [9] R. Want, “An Introduction to RFID Technology,” *IEEE Pervasive Comput*, vol. 5, no. 1, pp. 25–33, Jan. 2006, doi: 10.1109/MPRV.2006.2.
- [10] N. Pandey, “Machine-to-Machine Communication (M2M),” *ResearchGate*, Jan. 2016, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/291337307\\_M2M\\_communication\\_concept](https://www.researchgate.net/publication/291337307_M2M_communication_concept)
- [11] V. Cerf and R. Kahn, “A Protocol for Packet Network Intercommunication,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 637–648, May 1974, doi: 10.1109/TCOM.1974.1092259.
- [12] “The Trojan Room Coffee Machine,” *Department of Computer Science and Technology (cst.cam.ac.uk)*. <https://www.cl.cam.ac.uk/coffee/coffee.html> (accessed Oct. 23, 2022).
- [13] J. Romkey and S. Hackett, “The Internet Toaster,” *Internet Legends & Myths (livinginternet.com)*. [https://livinginternet.com/i/ia\\_myths\\_toast.htm](https://livinginternet.com/i/ia_myths_toast.htm) (accessed Oct. 23, 2022).
- [14] J. Zsarnay, D. Nichols, and I. Durham, “The ‘Only’ Coke Machine on the Internet,” *Carnegie Mellon’s School of Computer Science (cs.cmu.edu)*. [https://www.cs.cmu.edu/~coke/history\\_long.txt](https://www.cs.cmu.edu/~coke/history_long.txt) (accessed Nov. 20, 2022).

- [15] Quentin Stafford- Fraser, "The Trojan Room Coffee Pot," *Department of Computer Science and Technology (cst.cam.ac.uk)*, May 1995.  
<https://www.cl.cam.ac.uk/coffee/qsf/coffee.html> (accessed Nov. 20, 2022).
- [16] H. Tschofenig, J. Arkko, D. Thaler, and D. McPherson, "Architectural Considerations in Smart Object Networking," Mar. 2015. doi: 10.17487/rfc7452.
- [17] S. L. Jun and L. Haihua, "Overview of the Internet of things," *ITU-T Recommendations*, Jun. 2012, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available:  
<https://handle.itu.int/11.1002/1000/11559>
- [18] IEEE.org, "IoT and the Environment," *IEEE Communications Society*, Mar. 2021.  
<https://www.comsoc.org/publications/magazines/ieee-internet-things-magazine/cfp/iot-and-environment> (accessed Oct. 23, 2022).
- [19] L. M. Vaquero, L. Rodero-Merino, J. Caceres, and M. Lindner, "It's probable that you've misunderstood 'Cloud Computing' until now," *Sigcomm Comput. Commun. Rev*, vol. 39, no. 1, pp. 50–55, Dec. 2008, doi: 10.1145/1496091.1496100.
- [20] the free encyclopedia Wikipedia, "Internet of things."  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Internet\\_of\\_things](https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things) (accessed Nov. 20, 2022).
- [21] S. Ruthfield, "The Internet's History and Development from Wartime Tool to the Fish-Cam," *Crossroads*, vol. 2, no. 1, pp. 2–4, Sep. 1995, doi: 10.1145/332198.332202.
- [22] J. Soriano *et al.*, *Internet of Services*, vol. 7768. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-41569-2\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41569-2_14)
- [23] A. Khanna and S. Kaur, "Internet of Things (IoT), Applications and Challenges: A Comprehensive Review," *Wireless Personal Communications 2020 114:2*, vol. 114, no. 2, pp. 1687–1762, May 2020, doi: 10.1007/S11277-020-07446-4.
- [24] J. Schmidhuber, "Deep Learning in Neural Networks: An Overview," *Neural Networks*, vol. 61, pp. 85–117, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.
- [25] By Vinugayathri, "AI and IoT Blended - What It Is and Why It Matters?," *CLARION TECHNOLOGIES (clariontech.com)*, 2020, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available:  
<https://www.clariontech.com/blog/ai-and-iot-blended-what-it-is-and-why-it-matters>
- [26] Z-Team, "50 δισεκατομμύρια συσκευές συνδεδεμένες στο Διαδίκτυο έως το 2030," *ZΑΡΙΦΟΠΟΥΛΟΣ (Υπηρεσίες Ασφαλείας & Ελέγχου)*, Jun. 05, 2019.  
<https://zarifopoulos.com/ecosystem-internet-things-numbers/> (accessed Nov. 23, 2022).
- [27] Newsroom, "IoT: Στου δρόμου τα μισά...," *STARTUPPER (startupper.gr)*, Nov. 2022, Accessed: Nov. 23, 2022. [Online]. Available: <https://startupper.gr/news/95990/iot-stou-dromou-ta-misa/>
- [28] Gartner, "Gartner Hype Cycle," *Gartner (gartner.com)*.  
<https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle> (accessed Nov. 23, 2022).
- [29] M. Steinert and L. J. Leifer, "Scrutinizing Gartner's hype cycle approach," *PICMET 2010 TECHNOLOGY MANAGEMENT FOR GLOBAL ECONOMIC GROWTH*, pp. 1–13, Jul. 2010, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/224182916>

- [30] D. Henton and K. Held, "The dynamics of Silicon Valley: Creative destruction and the evolution of the innovation habitat," *Social Science Information*, vol. 52, no. 4, pp. 539–557, Dec. 2013, doi: 10.1177/0539018413497542.
- [31] "Drones no longer hip according to latest Gartner hype cycle," *Drone watch (dronewatch.nl)*, Sep. 27, 2017. <https://www.dronewatch.nl/2017/09/27/drones-niet-meer-hip-volgens-laatste-gartner-hype-cycle/> (accessed Oct. 26, 2022).
- [32] A. Asadi, Q. Wang, and V. Mancuso, "A Survey on Device-to-Device Communication in Cellular Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 1801–1819, Apr. 2014, doi: 10.1109/COMST.2014.2319555.
- [33] Α. Παπασταθοπούλου, "INTERNET OF THINGS," Τ.Ε.Ι Δυτικής Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη, 2017.
- [34] G. Z. González, "Radio Frequency Identification (RFID) Tags and Reader Antennas Based on Conjugate Matching and Metamaterial Concepts," Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, 2013.
- [35] K. V. S. Rao, P. V. Nikitin, and S. F. Lam, "Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application," *IEEE Trans Antennas Propag*, vol. 53, no. 12, pp. 3870–3876, Dec. 2005, doi: 10.1109/TAP.2005.859919.
- [36] D. L. Brock, "The Electronic Product Code (EPC)," Jan. 2001.
- [37] Z. Z. Li, "Characterization and Performance Analysis of UHF RFID Tag for Environmental Sensing Applications," University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 2012. Accessed: Nov. 18, 2022. [Online]. Available: <https://rfid4u.com/rfid-frequency/>
- [38] D. Gascón, *Security in 802.15.4 and ZigBee networks*. 2009. Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <http://sensor-networks.org/index.php?page=0823123150>
- [39] C. K. Nkuba, S. Kim, S. Dietrich, and H. Lee, "Riding the IoT Wave with VFuzz: Discovering Security Flaws in Smart Homes," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 1775–1789, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3138768.
- [40] M. Rumney, Ed., *LTE and the evolution to 4G wireless: Design and measurement challenges*, 1st Edition. Agilent Technologies, 2009.
- [41] M. Chiani and A. Elzanaty, "On the LoRa Modulation for IoT: Waveform Properties and Spectral Analysis," *IEEE Internet Things J*, vol. 6, no. 5, p. 772, Oct. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2919151.
- [42] T. Kasper, D. Carluccio, and C. Paar, *An embedded system for practical security analysis of contactless smartcards*, vol. 4462 LNCS. Workshop in Information Security Theory and Practices 2007, Heraklion, Crete, Greece: Springer Verlag, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-72354-7\_13.
- [43] V. Galetić, I. Bojić, M. Kušek, G. Ježić, S. Dešić, and D. Huljениć, "Basic principles of Machine-to-Machine communication and its impact on telecommunications industry," in *Proceedings of the 34th International Convention MIPRO*, 2011, pp. 380–385.
- [44] N. Kushalnagar, K. and G. Montenegro, and C. P. P. Schumacher, "IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals," *RFC*, vol. 4919, pp. 1–12, Aug. 2007, doi: 10.17487/rfc4919.

- [45] A. Khanna and S. Kaur, "Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture," *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier B.V., p. 225, Feb. 01, 2019. doi: 10.1016/j.compag.2018.12.039.
- [46] Farmacon Team, "Εξυπνη γεωργία σημαίνει αυτοματοποιημένη και συνδεδεμένη γεωργία," *Thrakika Ekkokkistiria S.A.(thrakika.gr)*, May 2018, Accessed: Oct. 26, 2022. [Online]. Available: <https://thrakika.gr/en/post/print/exyprnh-gewrgia-shmainei-aytomatopoihmenh-kai-syndedemenh-gewrgia-XD?p=1>
- [47] Sciforce, "Smart Farming: The Future of Agriculture," *iot for all (iotforall.com)*, Jun. 2020, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.iotforall.com/smart-farming-future-of-agriculture>
- [48] C. J. Hegarty and E. Chatre, "Evolution of the Global Navigation Satellite System (GNSS)," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 12, pp. 1902–1917, Dec. 2008, doi: 10.1109/JPROC.2008.2006090.
- [49] J. Zhao, J. Zhang, Y. Feng, and J. Guo, "The study and application of the IOT technology in agriculture," in *2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, Jul. 2010, vol. 2, pp. 462–465. doi: 10.1109/ICCSIT.2010.5565120.
- [50] Southmayd Vernon, "What is RMM?," *Connectwise (connectwise.com)*, Jun. 2022, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.connectwise.com/blog/rmm/what-is-rmm>
- [51] S. F. Khan and M. Y. Ismail, "An investigation into the challenges and opportunities associated with the application of Internet of Things (IoT) in the agricultural sector-A review," *Journal of Computer Science*, vol. 14, no. 2, pp. 132–143, Sep. 2017, doi: 10.3844/JCSSP.2018.132.143.
- [52] A. Kaloxylos *et al.*, "Farm management systems and the Future Internet era," *Comput Electron Agric*, vol. 89, pp. 130–144, Nov. 2012, doi: 10.1016/J.COMPAG.2012.09.002.
- [53] T. Fan, "Smart Agriculture Based on Cloud Computing and IOT," *Journal of Convergence Information Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 210–216, Jan. 2013, doi: 10.4156/JCIT.VOL8.ISSUE2.26.
- [54] M. Park, "8 Principles of Service-Oriented Architecture: Is SOA Dead?," *MuleSoft Blog (mulesoft.com)*, Oct. 2022, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://blogs.mulesoft.com/digital-transformation/soa-principles/>
- [55] S. M. N. S. R. Tamoghna Ojha, "Wireless Sensor Networks for Agriculture: The State-of-the-Art in Practice and Future Challenges," vol. 118, pp. 66–84, Accessed: Nov. 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169915002379>
- [56] M. Bilal and S. G. Kang, "An Authentication Protocol for Future Sensor Networks," *Sensors*, vol. 17, no. 5, p. 979, Apr. 2017, doi: 10.3390/s17050979.
- [57] J. Bauer, B. Siegmann, T. Jarmer, and N. Aschenbruck, "On the potential of Wireless Sensor Networks for the in-situ assessment of crop leaf area index," *Comput Electron Agric*, vol. 128, pp. 149–159, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.COMPAG.2016.08.019.
- [58] H. Poorter *et al.*, "A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance," *New Phytologist*, vol. 223, no. 3, pp. 1073–1105, Apr. 2019, doi: 10.1111/nph.15754.



- [59] D. J. Watson, "Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties and within and between years," *Ann Bot*, vol. 11, no. 1, pp. 41–76, 1947, doi: 10.1093/oxfordjournals.aob.a083148.
- [60] F. J. Ferrández-Pastor, J. M. García-Chamizo, M. Nieto-Hidalgo, J. Mora-Pascual, and J. Mora-Martínez, "Developing Ubiquitous Sensor Network Platform Using Internet of Things: Application in Precision Agriculture," *Sensors 2016, Vol. 16, Page 1141*, vol. 16, no. 7, p. 1141, Jul. 2016, doi: 10.3390/S16071141.
- [61] P. P. Jayaraman, A. Yavari, D. Georgakopoulos, A. Morshed, and A. Zaslavsky, "Internet of Things Platform for Smart Farming: Experiences and Lessons Learnt," *MDPI Open Access Journals*, vol. 16, no. 11, p. 1884, Nov. 2016, doi: 10.3390/S16111884.
- [62] "SmartFarmNet (A Special Purpose Network For Farmers)," *SFN Smart Farm Net -- connecting farms for future prosperity (smartfarmnet.com)*, 2019. <https://www.smartfarmnet.com/> (accessed Oct. 23, 2022).
- [63] M. Paustian and L. Theuvsen, "Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers," *Precision Agriculture 2016 18:5*, vol. 18, no. 5, pp. 701–716, Dec. 2016, doi: 10.1007/S11119-016-9482-5.
- [64] F. Balducci, D. Impedovo, and G. Pirlo, "Machine Learning Applications on Agricultural Datasets for Smart Farm Enhancement," *Machines 2018, Vol. 6, Page 38*, vol. 6, no. 3, p. 38, Sep. 2018, doi: 10.3390/MACHINES6030038.
- [65] M. B. Priestley, *Non-linear and non-stationary time series analysis*. Academic Press, 1988.
- [66] J. D. Gergonne, "The application of the method of least squares to the interpolation of sequences," *Historia Mathematica*, vol. 1, no. 4, pp. 439–447, 1974, doi: 10.1016/0315-0860(74)90034-2.
- [67] M. A. A. Hamad, M. E. S. Eltahir, A. E. M. Ali, A. M. Hamdan, and A. A. H. Elsafi, "Efficiency of Using Smart-Mobile Phones in Accessing Agricultural Information by Smallholder Farmers in North Kordofan – Sudan," *Preprints (Basel)*, pp. 1–20, Sep. 2018, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.preprints.org/manuscript/201809.0044/v1>
- [68] "Τα Θρεπτικά Στοιχεία του Εδάφους (Μακροστοιχεία - Ιχνοστοιχεία)," *Γεωπονικό Κέντρο Αθηνών (geponikokentro.com)*, 2022. <https://www.geponikokentro.com/index.php/en/useful/42-xrisima/ixnostoixeia> (accessed Oct. 23, 2022).
- [69] AGRO SYSTEMS, "Αισθητήρες καταγραφής της υγρασίας του εδάφους," *ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ- ΟΡΓΑΝΑ ΓΙΑ ΑΓΡΟΤΕΣ - ΛΙΠΑΣΜΑΤΑ (lambrinos.gr)*. <https://www.lambrinos.gr/--cutt> (accessed Oct. 26, 2022).
- [70] C. KEE, B. W. PARKINSON, and P. AXELRAD, "Wide Area Differential GPS," *Navigation*, vol. 38, no. 2, pp. 123–145, Jun. 1991, doi: 10.1002/j.2161-4296.1991.tb01720.x.
- [71] open eclass - ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ, "Διατροφικοί Παράγοντες - Οι διαταραχές που προκύπτουν από την έλλειψη θρεπτικών στοιχείων," Αθήνα, Nov. 2020.
- [72] "Agrochemicals," *Sust Chem Consulting (systchem.gr)*, 2022. <https://sustchem.gr/en/agrochemicals/> (accessed Oct. 23, 2022).

- [73] A. Καρίεβα, “Το Παρόν Και Το Μέλλον Των Drones,” *Power Politics -- ΑΜΥΝΑ & ΑΣΦΑΛΕΙΑ, ΚΟΙΝΩΝΙΑ & ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΣ (powerpolitics.eu)*, Jan. 2017, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://powerpolitics.eu/το-παρόν-και-το-μέλλον-των-drones/>
- [74] R. P. Mihajlow and A. Ivanova, “DRONE VIDEO CAPTURE – A NEW METHOD IN PRECISION AGRICULTURE,” *ANNUAL JOURNAL OF TECHNICAL UNIVERSITY OF VARNA, BULGARIA*, vol. 3, pp. 32–38, Dec. 2019, Accessed: Nov. 21, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.tu-varna.bg/handle/123456789/117>
- [75] H. Nouri *et al.*, “NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands,” *Science of The Total Environment*, vol. 584–585, pp. 11–18, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.130.
- [76] N. Berberovic and R. van Hooijdonk, “No ‘game of drones:’ The serious future of unmanned aerial vehicles in agriculture,” *AgriTech Tomorrow (Agricultural Technology and Precision Farming)*, Jan. 2017, Accessed: Dec. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.agritechtomorrow.com/article/2017/07/no-‘game-of-drones-the-serious-future-of-unmanned-aerial-vehicles-in-agriculture/10134/>
- [77] N. Jovial, “Saga of Satoshi Nakamoto - the bitcoin creator,” *TheWeek (theweek.com)*, Nov. 2017, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.theweek.in/news/biz-tech/saga-satoshi-nakamoto-the-bitcoin-creator.html>
- [78] J. Al-Jaroodi and N. Mohamed, “Blockchain in Industries: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 36500–36515, Mar. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2903554.
- [79] “One-way encryption,” *Citizendium-The Citizen’s Compendium (en.citizendium.org)*, May 2022, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: [https://en.citizendium.org/wiki/One-way\\_encryption](https://en.citizendium.org/wiki/One-way_encryption)
- [80] M. Torky and A. E. Hassanein, “Integrating blockchain and the internet of things in precision agriculture: Analysis, opportunities, and challenges,” *Comput Electron Agric*, vol. 178, p. 105476, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105476.
- [81] S. Dolev, L. Lahiani, and Y. Haviv, “Unique permutation hashing,” *Theor Comput Sci*, vol. 475, pp. 59–65, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.tcs.2012.12.047.
- [82] F. JASON and M. JULIUS, “Compound Annual Growth Rate (CAGR) - Formula and Calculation,” *Investopedia*, Oct. 10, 2022. <https://www.investopedia.com/terms/c/cagr.asp> (accessed Oct. 23, 2022).
- [83] “Blockchain in Agriculture and Food Supply Chain Market by Application, Provider, Organization Size And Region - Global Forecast to 2025,” *ReportLinker*, p. 176, Nov. 2020, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.reportlinker.com/p05581101/Blockchain-in-Agriculture-Market-Application-Provider-Organization-Size-And-Region-Global-Forecast-to.html>
- [84] Β. Αποστολοπούλου, “‘Ευφυής Γεωργία, άκου την καλλιέργεια σου’: Ευφυής γεωργία και άρδευση,” *ypaithros.gr*, Jul. 2020, Accessed: Nov. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.ypaithros.gr/eyfyis-georgia-akou-kalliergeia-sou-meros-4o-eyfyis-georgia-ardeysi/>

- [85] J. M. Monaghan *et al.*, “More ‘crop per drop’: Constraints and opportunities for precision irrigation in European agriculture,” *J Sci Food Agric*, vol. 93, no. 5, pp. 977–980, Mar. 2013, doi: 10.1002/JSFA.6051.
- [86] Agriculture and rural development, “Πολλαπλή συμμόρφωση,” *European Commission (agriculture.ec.europa.eu)*. [https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/income-support/cross-compliance\\_el](https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/income-support/cross-compliance_el) (accessed Oct. 23, 2022).
- [87] “Νιτρορύπανση,” *Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (ypen.gov.gr)*. <https://ypen.gov.gr/perivallon/ydatikoι-poroι/nitrorypansi/> (accessed Oct. 23, 2022).
- [88] Κ. Χατζουλάκης, *Η Άρδευση των καλλιεργειών*. ΑΓΡΟΤΥΠΟΣ Α.Ε., 2019.
- [89] E. Fereres and M. A. Soriano, “Deficit irrigation for reducing agricultural water use,” *J Exp Bot*, vol. 58, no. 2, pp. 147–159, Jan. 2007, doi: 10.1093/JXB/ERL165.
- [90] M. Anadranistakis, K. Lagouvardos, V. Kotroni, and H. Elefteriadis, “Correcting temperature and humidity forecasts using Kalman filtering: Potential for agricultural protection in Northern Greece,” *Atmos Res*, vol. 71, no. 3, pp. 115–125, Aug. 2004, doi: 10.1016/J.ATMOSRES.2004.03.007.
- [91] K. Papagiannaki, K. Lagouvardos, V. Kotroni, and G. Papagiannakis, “Agricultural losses related to frost events: Use of the 850 hPa level temperature as an explanatory variable of the damage cost,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, no. 9, pp. 2375–2381, Sep. 2014, doi: 10.5194/NHESS-14-2375-2014.
- [92] Β. Κανάκας *et al.*, “Πρακτικές ορθολογικής άρδευσης: Τα προβλήματα & η σωστή διαχείριση του νερού,” *ypaithros.gr*, Apr. 2018, Accessed: Nov. 21, 2022. [Online]. Available: <https://www.ypaithros.gr/ekdoseis/praktikes-orthologikis-ardeusis-ston-agrotiko-tomea/>
- [93] “Greece Water Use, Resources and Precipitation,” *worldometer (worldometers.info)*, 2017, Accessed: Oct. 26, 2022. [Online]. Available: <https://www.worldometers.info/water/greece-water/>
- [94] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, “IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture,” *Sensors*, vol. 20, no. 4, pp. 23–25, 2020, doi: 10.3390/s20041042i.
- [95] C. Brouwer and A. Goffeau, “CHAPTER 5. SPRINKLER IRRIGATION,” *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (fao.org)*, 1985, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/s8684e/s8684e06.htm>
- [96] “Sprinklers in vineyard - Italy,” *Wikimedia Commons (commons.wikimedia.org)*, Aug. 2004, Accessed: Oct. 26, 2022. [Online]. Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6a/10\\_Sprinklers\\_in\\_vineyard\\_-\\_Trentino-Alto\\_Adige%2C\\_Italy.jpg/640px-10\\_Sprinklers\\_in\\_vineyard\\_-\\_Trentino-Alto\\_Adige%2C\\_Italy.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6a/10_Sprinklers_in_vineyard_-_Trentino-Alto_Adige%2C_Italy.jpg/640px-10_Sprinklers_in_vineyard_-_Trentino-Alto_Adige%2C_Italy.jpg)
- [97] K. Elhindi, S. El-Hendawy, E. Abdel-Salam, A. Elgorban, and M. Ahmed, “Impacts of fertigation via surface and subsurface drip irrigation on growth rate, yield and flower quality of *Zinnia elegans*,” *Bragantia*, vol. 75, no. 1, pp. 96–107, Jan. 2016, doi: 10.1590/1678-4499.176.

- [98] “Πότισμα στάγδην,” *gaiia ΕΠΙΧΕΙΡΕΙΝ (gaiapedia.gr)*, Jul. 2015, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: [http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index.php/Πότισμα\\_στάγδην](http://www.gaiapedia.gr/gaiapedia/index.php/Πότισμα_στάγδην)
- [99] “Κοινή Αγροτική Πολιτική,” *Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (minagric.gr)*. <http://www.minagric.gr/index.php/el/the-ministry-2/agricultural-policy/koinagrotopolitik> (accessed Oct. 23, 2022).
- [100] “Δράση 10.1.4 - Μείωση της ρύπανσης του νερού - ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ (ΠΑΑ) 2014 - 2020,” *ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ (ΠΑΑ) 2014 - 2020 (agrotikianaptixi.gr)*, 2020. <http://www.agrotikianaptixi.gr/el/content/drasi-1014-meiosi-tis-rypansis-toy-neroy> (accessed Oct. 23, 2022).
- [101] “Μέτρο 10 «Γεωργοπεριβαλλοντικά και Κλιματικά Μέτρα» Δράση 10.1.08 «Εφαρμογή της μεθόδου σεξουαλικής σύγχυσης των μικρολεπιδοπτερω (Κομφούζιο)»,” *ΟΠΕΚΕΠΕ (Οργανισμός Πληρωμών και Ελέγχου Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων) (opekere.gr)*, 2020. <https://www.opekere.gr/paa-gr/2014-2020/2623-10-10-1-08> (accessed Oct. 23, 2022).
- [102] “Μέτρο 11 Βιολογικές καλλιέργειες,” *ΟΠΕΚΕΠΕ (Οργανισμός Πληρωμών και Ελέγχου Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων) (opekere.gr)*, 2020. <https://www.opekere.gr/paa-gr/2014-2020/2626-metro-11-viologikes-kalliergeies> (accessed Oct. 23, 2022).
- [103] “Δράση 4.1.2 - Υλοποίηση επενδύσεων που συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ύδατος | ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ (ΠΑΑ) 2014 - 2020,” *Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (agrotikianaptixi.gr)*. <http://www.agrotikianaptixi.gr/el/content/drasi-412-ylopoiisi-ependyseon-poy-symvalloy-n-stin-exoikonomisi-ydatos> (accessed Oct. 23, 2022).
- [104] “Υπομέτρο 2.1 - Χρήση συμβουλευτικών υπηρεσιών | ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ (ΠΑΑ) 2014 - 2020,” *Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων (agrotikianaptixi.gr)*, 2021. <http://www.agrotikianaptixi.gr/el/content/ypometro-21-hrisi-symvoyleytikon-ypiresion> (accessed Oct. 23, 2022).
- [105] “Σχέδια Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών - Θεσμικό Πλαίσιο,” *Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (wfdver.ypeka.gr)*. <http://wfdver.ypeka.gr/el/management-plans-gr/legislation-gr/> (accessed Oct. 23, 2022).
- [106] “Κοινή Υπουργική Απόφαση 145116/2011 - ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011 (Κωδικοποιημένη) - Απόβλητα,” *Τράπεζα Πληροφοριών Νομοθεσίας (.e-nomothesia.gr)*, 2011. <https://www.e-nomothesia.gr/kat-periballon/apobleta/kya-145116-2011.html> (accessed Oct. 23, 2022).
- [107] “Υ.Α. οικ. 191002/2013 (ΦΕΚ 2220/Β` 9.9.2013),” *ΕΛ.ΙΝ.Υ.Α.Ε. (Ελληνικό Ινστιτούτο Υγιεινής και Ασφάλειας της Εργασίας) (elinyae.gr)*, Sep. 09, 2013. <https://www.elinyae.gr/ethniki-nomothesia/ya-oik-1910022013-fek-2220b-992013> (accessed Oct. 23, 2022).
- [108] H. G. C. R. Laksiri, J. V. Wijayakulasooriya, and H. A. C. Dharmagunawardhana, “Design and Development of an IoT Based Intelligent Controller for Smart Irrigation,” *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 105–115, Sep. 2019, Accessed: Oct. 26, 2022. [Online]. Available: <http://pubs.sciepub.com/ajeee/7/4/4/index.html#Figure1>

- [109] I. Vlahavas, P. Kefalas, N. Bassiliades, F. Kokkoras, and I. Sakellariou, *Artificial Intelligence*, 4th edition. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ, 2020.
- [110] S. Fleer, A. Moringen, R. L. Klatzky, and H. Ritter, "Learning efficient haptic shape exploration with a rigid tactile sensor array," *PLoS One*, vol. 15, no. 1, p. e0226880, Jan. 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0226880.
- [111] M. Burgin and G. Dodig-Crnkovic, "A Systematic Approach to Artificial Agents," *Cornel University*, Feb. 2009, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/0902.3513>
- [112] M. C. Lovell, "Data Mining," *Rev Econ Stat*, vol. 65, no. 1, p. 1, Feb. 1983, doi: 10.2307/1924403.
- [113] Z. Z. Darban and M. H. Valipour, "GHRS: Graph-based hybrid recommendation system with application to movie recommendation," *Expert Syst Appl*, vol. 200, p. 116850, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.eswa.2022.116850.
- [114] D. J. Cook, J. C. Augusto, and V. R. Jakkula, "Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities," *Pervasive Mob Comput*, vol. 5, no. 4, pp. 277–298, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.pmcj.2009.04.001.
- [115] Κ. Γεωργούλη, "ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ - Μια Εισαγωγική προσέγγιση," Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015. Accessed: Oct. 26, 2022. [Online]. Available: [http://repfiles.kallipos.gr/html\\_books/93/00e-introduction.html](http://repfiles.kallipos.gr/html_books/93/00e-introduction.html)
- [116] M. R. Veronez, S. Florêncio de Souza, M. T. Matsuoka, A. Reinhardt, and R. Macedônio da Silva, "Regional Mapping of the Geoid Using GNSS (GPS) Measurements and an Artificial Neural Network," *Remote Sens (Basel)*, vol. 3, no. 4, pp. 668–683, Mar. 2011, doi: 10.3390/rs3040668.
- [117] P. A. Vikhar, "Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects," in *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*, Dec. 2016, pp. 261–265. doi: 10.1109/ICGTSPICC.2016.7955308.
- [118] Σ. Λυκοθανάσης, "Introduction to Genetic Programming," Πάτρα, 2018.
- [119] Σ. Πρωτούλης, "Σχεδιασμός και Ανάπτυξη του Αλγορίθμου Πυγολαμπίδας (Firefly Algorithm) για την επίλυση του προβλήματος Flexible Job-Shop Scheduling Problem," Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2015.
- [120] "gaiasense - Ελληνικό σύστημα υπηρεσιών ευφυούς γεωργίας," *gaiasense by NEUROPUBLIC (gaiasense.gr)*. <https://www.gaiasense.gr/home> (accessed Nov. 25, 2022).
- [121] "Intelligent systems for intelligent growth," *NEUROPUBLIC (neuropublic.gr)*. <https://www.neuropublic.gr> (accessed Oct. 23, 2022).
- [122] "FIGARO:Flexible and Precise Irrigation Platform to Improve FaRm Scale Water Productivity. (1/10/2012 - 30/9/2016)," *European Commission -- CORDIS - EU research results (cordis.europa.eu)*. <https://cordis.europa.eu/project/id/311903> (accessed Nov. 25, 2022).
- [123] "Seventh framework programme of the European Community for research and technological development including demonstration activities (FP7 1/1/2007 - 31/12/2013)," *European Commission -- CORDIS - EU research results*

- (*cordis.europa.eu*). <https://cordis.europa.eu/programme/id/FP7> (accessed Oct. 23, 2022).
- [124] FAOSTAT, “Food and agriculture data,” *Food and Agriculture Organization of the United Nations (fao.org)*. <https://www.fao.org/faostat/en/#home> (accessed Oct. 23, 2022).
- [125] AQUASTAT, “FAO’s Global Information System on Water and Agriculture,” *Food and Agriculture Organization of the United Nations (fao.org)*. <https://www.fao.org/aquastat/en/> (accessed Oct. 23, 2022).
- [126] AquaCrop, “the crop-water productivity model,” *Food and Agriculture Organization of the United Nations (fao.org)*. <https://www.fao.org/aquacrop> (accessed Oct. 23, 2022).
- [127] AQUASTAT, “AQUAMAPS - Land & Water,” *Food and Agriculture Organization of the United Nations (data.apps.fao.org/aquamaps)*. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/aquamaps/en/> (accessed Oct. 23, 2022).
- [128] G. Fischer and H. van Velthuizen, “Global Agro-Ecological Zones (GAEZ),” *International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)*, Jan. 2012. <https://iiasa.ac.at/models-and-data/global-agro-ecological-zones> (accessed Nov. 25, 2022).
- [129] G. Fischer, F. Nachtergaele, S. Prieler, H. T. van Velthuizen, L. Verelst, and D. Wiberg, “Harmonized world soil database v1.2,” *Food and Agriculture Organization of the United Nations (fao.org)*, 2008, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>
- [130] “Transpiration - The Water Cycle,” *USGS science for a changing world (delfinamazoncruises.com)*, Dec. 2016, Accessed: Nov. 26, 2022. [Online]. Available: <https://www.delfinamazoncruises.com/wp-content/uploads/2015/12/watercycletranspiration.html>
- [131] “SunScan Canopy Analysis System,” *Delta-T Devices (delta-t.co.uk)*, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://delta-t.co.uk/product/sunscan/>
- [132] S. Trimble, “The Importance of Leaf Area Index (LAI) in Environmental and Crop Research,” *CID Bio-Science (cid-inc.com)*, Oct. 2020, Accessed: Nov. 26, 2022. [Online]. Available: <https://cid-inc.com/blog/the-importance-of-leaf-area-index-in-environmental-and-crop-research/>
- [133] Γ. Συλαίος, “Διαχείριση Φυσικών Πόρων και Οικοσυστημάτων II,” Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Κομοτηνή, 2017.
- [134] I. Tsakmakis *et al.*, “Operational Precise Irrigation for Cotton Cultivation through the Coupling of Meteorological and Crop Growth Models,” *Water Resources Management*, vol. 31, no. 1, pp. 563–580, Jan. 2017, doi: 10.1007/s11269-016-1548-7.
- [135] E. Karatasiou and C. Papanikolaou, “The Effect of Different Irrigation Methods in Biodiesel Production from Sunflower,” *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, vol. 5, no. 2, 2016, doi: 10.4172/2168-9768.1000166.
- [136] “Initial List of Hazardous Air Pollutants with Modifications,” *EPA - United States Environmental Protection Agency (epa.gov)*, Jan. 05, 2022. <https://www.epa.gov/haps/initial-list-hazardous-air-pollutants-modifications> (accessed Oct. 23, 2022).

- [137] Χ. Παπανικολάου, “Σύγχρονα συστήματα άρδευσης και εξοικονόμηση νερού,” ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ, ΒΟΛΟΣ, 2006.
- [138] “LTV-WL1 Water Leak and Temperature Sensor,” *Searchable FCC ID Database -- The information resource for all wireless device applications filed with the FCC (fccid.io)*, Apr. 2018, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://fccid.io/OMOLTV-WL1/User-Manual/User-manual-3810056>
- [139] “MetosCompact weather station,” *METOS by Pessl Instruments (metos.at)*. <https://metos.at/> (accessed Oct. 23, 2022).
- [140] T. Howell and S. S. Evett, “The Penman-Monteith method,” *USDA Agricultural Research Service (ars.usda.gov)*, Apr. 2004, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=163834>
- [141] “SPSS Software,” *IBM SPSS software -- Bridge the gap between data science and data understanding (ibm.com)*. <https://www.ibm.com/spss> (accessed Oct. 23, 2022).
- [142] J. P. Shaffer, “A semi-Bayesian study of Duncan’s Bayesian multiple comparison procedure,” *J Stat Plan Inference*, vol. 82, no. 1–2, pp. 197–213, Dec. 1999, doi: 10.1016/S0378-3758(99)00042-7.
- [143] “Glycine max (L.) Merr,” *Pl@ntNet (identify.plantnet.org)*, 2023, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: [https://identify.plantnet.org/el/prota/species/Glycine%20max%20\(L.\)%20Merr./data](https://identify.plantnet.org/el/prota/species/Glycine%20max%20(L.)%20Merr./data)
- [144] L. S. Pereira, P. R. Teodoro, P. N. Rodrigues, and J. L. Teixeira, “Irrigation Scheduling Simulation: The Model Isareg,” 2003, pp. 161–180. doi: 10.1007/978-94-010-0129-8\_10.
- [145] AOAC International, “AOAC Official Method 920.39,” 2000.
- [146] “Kjeldahl Method,” *ScienceDirect (sciencedirect.com)*, 2016, Accessed: Nov. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/kjeldahl-method>
- [147] AOAC International, “AOAC Official Method 2001.11,” 2002.
- [148] C. Vamvakoulas, I. Argyrokastritis, Y. Papatheohari, and S. Alexandris, “EVALUATION OF AQUACROP MODEL FOR EXPERIMENTAL DATA OF SOYBEAN IN CENTRAL GREECE,” Dec. 2019.
- [149] “Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων,” *ΤΜΗΜΑ ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΑΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ (ssi.swri.gr)*, 2022. <http://ssi.swri.gr/index.php/el/> (accessed Oct. 23, 2022).
- [150] E. Lekakis and F. Papadopoulos, *SITE SPECIFIC AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT WITH THE USE OF AN IRRIGATION WATER ADVISORY SOFTWARE*. 2015.
- [151] M. Th. van Genuchten, “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, no. 5, pp. 892–898, Sep. 1980, doi: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- [152] X. Zhang, O. Wendroth, C. Matocha, and J. Zhu, “Estimating Soil Hydraulic Conductivity at the Field Scale With a State-Space Approach,” *Soil Sci*, vol. 184, no. 3, pp. 101–111, Jun. 2019, doi: 10.1097/SS.0000000000000253.

- [153] L. A. Manrique and C. A. Jones, "Bulk Density of Soils in Relation to Soil Physical and Chemical Properties," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 55, no. 2, p. 476, Mar. 1991, doi: 10.2136/sssaj1991.03615995005500020030x.
- [154] Ζ. Γ. Παπαζαφειρίου and Δ. Μ. Παπαμιχαήλ, "Συστήματα αρδεύσεων," Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 1996.
- [155] R. Allen, L. Pereira, and D. Raes, *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Rome, Italy, 1998. Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- [156] L. Zotarelli, M. D. Dukes, C. C. Romero, K. W. Migliaccio, and K. T. Morgan, "Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method) 1," 2015. Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Step-by-Step-Calculation-of-the-Penman-Monteith-1-Zotarelli-Dukes/8c7a164802368a05710ade7acc0f38d9b136f8be>
- [157] M. Birattari, P. Pellegrini, and M. Dorigo, "On the Invariance of Ant Colony Optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 11, no. 6, pp. 732–742, Dec. 2007, doi: 10.1109/TEVC.2007.892762.
- [158] Π. Κανάκης, Δ. Παπαμιχαήλ, and Π. Γεωργίου, "ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ," ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ, Θεσσαλονίκη, 2016.
- [159] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 26, no. 1, pp. 29–41, Feb. 1996, doi: 10.1109/3477.484436.
- [160] A. C. Zecchin, A. R. Simpson, H. R. Maier, and J. B. Nixon, "Parametric Study for an Ant Algorithm Applied to Water Distribution System Optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 9, no. 2, pp. 175–191, Apr. 2005, doi: 10.1109/TEVC.2005.844168.
- [161] M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Coloni, "Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process," Milano, 1991.
- [162] H. Maier *et al.*, "Ant Colony Optimization for design of water distribution systems," *J Water Resour Plan Manag*, vol. 129, no. 3, pp. 200–209, 2003.
- [163] Ζ. Κατσίμπα, "ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ, ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΑΣΥΝΕΧΟΥΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΟΥ ΛΑΒΥΕ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ CORAM. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΑΡΔΕΥΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΒΑΣΙΛΩΝ ΗΜΑΘΙΑΣ," ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 2009.
- [164] "Hazen-Williams Formula," *WayBackMachine (web.archive.org)*. <https://web.archive.org/web/20080822051759/http://docs.bentley.com/en/HMFlowMaster/FlowMasterHelp-06-05.html> (accessed Dec. 01, 2022).
- [165] G. B. Dantzig and N. T. Springer, *Linear Programming*. New York: Springer-Verlag, 1997. doi: 10.1007/b97672.
- [166] Χ. Τζιμόπουλος, *Γεωργική Υδραυλική - Συλλογικά αρδευτικά δίκτυα με καταιονισμό, Τόμος II*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 1995.
- [167] Χ. Γκόκος and Γ. Φουτσιτζή, "Ανάλυση ευαισθησίας - Επιχειρησιακή Έρευνα," Ιωάννινα, 2018.



- [168] “LINGO - Optimization Modeling Software for Linear, Nonlinear, and Integer Programming,” *LINDO SYSTEMS INC (lindo.com)*, 2022. <https://www.lindo.com/index.php/products/lingo-and-optimization-modeling> (accessed Oct. 23, 2022).
- [169] Κ. Κωνσταντινίδης, *Τα Εγγειοβελτιωτικά Έργα στην Πεδιάδα Θεσσαλονίκης*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γεωτεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 1989.
- [170] Β. Π. Μπαλιώτη, “Διαχείριση αρδευτικών δικτύων με τη βοήθεια του γραμμικού προγραμματισμού. Εφαρμογή στο αρδευτικό δίκτυο γέφυρας,” *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη*, 2009. doi: 10.26262/heal.auth.ir.124675.
- [171] O. C. Netto, É. Parent, and L. Duckstein, “Multicriterion Design of Long-Term Water Supply in Southern France,” *J Water Resour Plan Manag*, vol. 122, no. 6, pp. 403–413, Nov. 1996, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:6(403).
- [172] M. Zeleny, “Multiple criteria decision making: eight concepts of optimality,” *Human Systems Management*, vol. 17, pp. 97–107, 1998, doi: 10.3233/HSM-1998-17203.
- [173] P.-L. Yu, *Multiple-Criteria Decision Making*. Boston, MA: Springer US, 1985. doi: 10.1007/978-1-4684-8395-6.
- [174] M. K. Sayadi, M. Heydari, and K. Shahanaghi, “Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers,” *Appl Math Model*, vol. 33, no. 5, pp. 2257–2262, May 2009, doi: 10.1016/j.apm.2008.06.002.
- [175] S. Opricovic, “Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems,” Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 1988.
- [176] S. Opricovic and G.-H. Tzeng, “Multicriteria Planning of Post-Earthquake Sustainable Reconstruction,” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 17, no. 3, pp. 211–220, May 2002, doi: 10.1111/1467-8667.00269.
- [177] S. Opricovic, “A Compromise Solution in Water Resources Planning,” *Water Resources Management*, vol. 23, no. 8, pp. 1549–1561, Jun. 2009, doi: 10.1007/s11269-008-9340-y.
- [178] S. Opricovic and G.-H. Tzeng, “Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS,” *Eur J Oper Res*, vol. 156, no. 2, pp. 445–455, Jul. 2004, doi: 10.1016/S0377-2217(03)00020-1.
- [179] S. Opricovic and G.-H. Tzeng, “Extended VIKOR method in comparison with outranking methods,” *Eur J Oper Res*, vol. 178, no. 2, pp. 514–529, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2006.01.020.
- [180] E. H. Forman and S. I. Gass, “The Analytic Hierarchy Process—An Exposition,” *Oper Res*, vol. 49, no. 4, pp. 469–486, Aug. 2001, doi: 10.1287/opre.49.4.469.11231.
- [181] Δ. Ζορμπά, “Πολυκριτηριακή ανάλυση με χρήση της μεθόδου VIKOR σε αρδευτικά δίκτυα της πεδιάδας Θεσσαλονίκης,” *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Τομέας Συγκοινωνιακών και Υδραυλικών Έργων*, 2014. doi: 10.12681/eadd/34920.
- [182] D. Zormpa, C. Tzimosopoulos, C. Evangelides, and M. Sakellariou, “MULTIPLE CRITERIA DECISION MAKING USING VIKOR METHOD. APPLICATION IN IRRIGATION NETWORKS IN THE THESSALONIKI PLAIN,” pp. 3–5, Sep. 2015.

- [183] Β. Παπαδόπουλος and Χ. Τζιμόπουλος, *Ασαφής λογική Με εφαρμογές στις επιστήμες του μηχανικού*. Εκδόσεις Ζήτη, 2013.
- [184] S. Alexandris, "Εξατμισοδιαπνοή-Εναποτρίπωση," Athens, 2003.
- [185] Σ. Χρηστάκης, "Διερεύνηση σχεδιασμού υπόγειας στάγδην άρδευσης και προγραμματισμού αρδεύσεων της ελιάς Χαλκιδικής," Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη, 2009.
- [186] Δ. Μ. Παπαμιχαήλ and Π. Ε. Γεωργίου, "Βασικές αρχές και πρακτική των αρδεύσεων. Διδακτικές σημειώσεις," Θεσσαλονίκη, 2005.
- [187] Ζ. Παπαζαφειρίου, *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 1999.
- [188] S. C. S. USDA, *Irrigation water requirements. Tech. Release No 21 (rev.)*. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division, 1970.
- [189] "Από το αγρόκτημα στο πιάτο," *Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (consilium.europa.eu)*, Nov. 2022, Accessed: Oct. 23, 2022. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/from-farm-to-fork/>
- [190] E. Adamantopoulou, "Greek Agriculture Water Use Way Over EU Average," *Greek Reporter (greekreporter.com)*, Mar. 2014, Accessed: Oct. 26, 2022. [Online]. Available: <https://greekreporter.com/2014/03/19/greek-agriculture-water-use-way-over-eu-average/>