

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών
Υπολογιστών

Ανάπτυξη δικτύου αισθητήρων έξυπνης γεωργίας

Θεοδώρου Δημήτριος (ΑΜ: 1331)

1ος Επιβλέπων Καθηγητής: Αγγελίδης Παντελεήμων

2ος Επιβλέπων Καθηγητής: Γκάλφας Νικόλαος

16 Σεπτεμβρίου 2022

Περίληψη

Το αντικείμενο μελέτης στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ήταν η μελέτη και κατασκευή ενός συστήματος έξυπνης γεωργίας. Αρχικά έγινε μία ιστορική αναδρομή και είδαμε την εξέλιξη τέτοιων συστημάτων στον χρόνο. Αναλύθηκαν διάφορου τύπου αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε τέτοια συστήματα, οι μικροελεγκτές και οι διάφορες διατάξεις δικτύου. Ακόμα είδαμε τα διάφορα πρωτόκολλα μικρής και μεγάλης εμβέλειας όσο και τα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής.

Τέλος το πειραματικό μέρος αυτής της εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός δικτύου αισθητήρων για γεωργία ακριβείας δηλαδή πως διάφοροι αισθητήρες, οι οποίοι παίρνουν διάφορες μετρήσεις όπως θερμοκρασία, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση κτλ., μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε τα δεδομένα τους να συλλεχθούν, να αποθηκευτούν, να οπτικοποιηθούν και να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με στοιχεία τα οποία εισάγονται από τους χρήστες έτσι ώστε να ληφθούν αποφάσεις οι οποίες επηρεάζουν την ανάπτυξη και την απόδοση μίας καλλιέργειας.

Οι αισθητήρες επικοινωνούν χρησιμοποιώντας την τεχνολογία LoRa (Long Range), που αποτελεί ένα καινοτόμο ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Η διαχείριση και αποκωδικοποίηση των πακέτων δεδομένων των αισθητήρων γίνεται με την χρήση της πλατφόρμας του διαδικτύου των πραγμάτων The Things Network ή TTN για συντομία. Και έπειτα με την βοήθεια του Node-Red, ενός εργαλείου ανάπτυξης βασισμένο στη ροή για οπτικό προγραμματισμό για τη σύνδεση συσκευών υλικού και διαδικτυακών υπηρεσιών ως μέρος του διαδικτύου των πραγμάτων, πραγματοποιείται η προ επεξεργασία και η αποθήκευση σε μια σχεσιακή βάση δεδομένων MySQL. Από εκεί στο επόμενο στάδιο τα δεδομένα επεξεργάζονται και οπτικοποιούνται σε μία πλατφόρμα στο διαδίκτυο όπου μπορούν γεωργοί να παρακολουθούν την ανάπτυξη της καλλιέργειάς τους.

Λέξεις κλειδιά: Έξυπνη γεωργία, Αισθητήρες, LoRa, Διαδίκτυο των πραγμάτων.

Abstract

The scope of this diploma thesis was the study and development of a system of smart agriculture. Initially there was a historical retrospective and we saw the evolution of such systems in time. Various types of sensors used in such systems, microcontrollers and various network layouts were analyzed. We also saw the various short- and long-range protocols as well as the application-level protocols.

Finally, the experimental part of this thesis was the development of a network of sensors for precision agriculture, i.e. how various sensors, which take numerous measurements such as temperature, humidity, atmospheric pressure, etc., can be used so that their data can be collected, stored, visualized and used; in combination with data entered by users in order to make decisions that affect the growth and yield of a crop.

Sensors communicate using the LoRa (Long Range) protocol, which is an innovative long-range wireless communication protocol with low power consumption. Sensor data packets are managed and decoded using the "The Things Network" platform or TTN for short, and then the pre-processing and storing of data is accomplished in a MySQL relational database with the use of Node-Red, which is a tool based on visualized programming, connecting hardware and internet services as a part of Internet of Things (IoT). Afterwards, data is processed and visualized on an internet platform where farmers and agronomists can monitor the development of their cultivation.

Keywords: Smart Agriculture, Sensors, LoRa, Internet of Things.

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

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

“Ανάπτυξη δικτύου αισθητήρων έξυπνης γεωργίας”

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 & Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη των μελών του Τμήματος

κ. Αγγελίδη Παντελεήμων και κ. Γκάλφα Νικόλαου

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) Θεοδώρου Δημήτριος, Αγγελίδης Παντελεήμων, Γκάλφας Νικόλαος, 2022, Κοζάνη.

Υπογραφή Φοιτητή



Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Έξυπνη Γεωργία	1
1.1 Ιστορική αναδρομή & εξέλιξη	1
1.2 Γεωργία ακριβείας	2
1.3 Αυτοματοποίηση & υφιστάμενη κατάσταση	4
1.4 Η αντίληψη των Ελλήνων γεωργών αναφορικά με την έξυπνη γεωργία	15
Κεφάλαιο 2. Συστήματα έξυπνης γεωργίας	21
2.1 Αισθητήρες πεδίου	21
2.1.1 Αισθητήρες θερμοκρασίας	21
2.1.2 Αισθητήρες υγρασίας εδάφους.....	27
2.1.3 Αισθητήρες υγρασίας ατμόσφαιρας	31
2.1.4 Αισθητήρες pH.....	33
2.1.5 Αισθητήρες έντασης φωτός.....	35
3.1.6 Αισθητήρες ηλιακής ακτινοβολίας	36
3.1.7 Αισθητήρες διοξειδίου του άνθρακα	37
3.1.8 Αισθητήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας.....	38
2.2 Μικροελεγκτές.....	39
2.3 Διατάξεις δικτύωσης.....	42
2.3.1 Επικοινωνία των αισθητήρων εντός δικτύου	42
2.3.2 Πύλες δικτύου	44
Κεφάλαιο 3. Τεχνολογίες δικτύων στην έξυπνη γεωργία	46
3.1 Πρωτόκολλα δικτύωσης	46
3.1.1 Πρωτόκολλα δικτύωσης μικρής εμβέλειας	46
3.1.1.1 RFID.....	46
3.1.1.2 NFC.....	48
3.1.1.3 Bluetooth / BLE	49
3.1.1.4 Zigbee	50
3.1.1.5 Thread.....	52
3.1.1.6 Z-Wave.....	53
3.1.2 Πρωτόκολλα δικτύωσης μεγάλης εμβέλειας	55

3.1.2.1 Ασύρματες τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών.....	55
3.1.2.2 Narrow Band Internet of Things – NB-IoT.....	57
3.1.2.3 Wi-Fi.....	58
3.1.2.4 LoRa WAN	59
3.1.2.5 Sigfox.....	60
3.1.2.6 Wi-SUN.....	62
3.1.2.7 Weightless	63
3.2 Πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής.....	64
3.2.1 Message Queue Telemetry Transport –MQTT.....	64
3.2.2 Constrained Application Protocol –CoAP.....	65
3.2.3 eXtensible Messaging and Presence Protocol –XMPP	66
3.2.4 Data Distribution Service –DDS.....	67
Κεφάλαιο 4. Ανάπτυξη δικτύου αισθητήρων έξυπνης γεωργίας.....	69
4.1 Υλικά & μέθοδοι	69
4.1.1 Αισθητήρες	69
4.1.2 Συνδεσμολογία Hardware	74
4.1.3 Κώδικας μικροεπεξεργαστή	76
4.1.4 LoRaWAN Gateways	88
4.1.5 The Things Network (TTN)	90
4.1.6 MQTT explorer	92
4.1.7 Node-Red	93
4.1.8 Βάση Δεδομένων	99
4.1.9 Ιστοσελίδα	105
Επίλογος	111
Βιβλιογραφία.....	112
Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.....	112
Ελληνική Βιβλιογραφία	117
Ηλεκτρονικές πηγές.....	117

Κεφάλαιο 1. Έξυπνη Γεωργία

1.1 Ιστορική αναδρομή & εξέλιξη

Από τα αρχαία χρόνια μέχρι και τις μέρες μας, έχουν σημειωθεί αρκετές επαναστάσεις στην αγροτική ανάπτυξη. Οι αρχαίοι πολιτισμοί της Αιγύπτου και της Ελλάδας συνετέλεσαν την πρώτη ιστορικά γεωργική επανάσταση. Οι αιγυπτιακοί πάπυροι αποτελούν αποδεικτικό της ανάπτυξης συστημάτων άρδευσης ήδη από το 6,000 π.Χ. Τόσο οι αρχαίοι πολιτισμοί της Αιγύπτου όσο και της Ελλάδας ανέπτυξαν πλήθος γεωργικών μηχανημάτων όπως, για παράδειγμα, το τύμπανο και οι αντλίες. Η δεύτερη αγροτική επανάσταση σημειώνεται κατά τον 17ο αιώνα και ακολουθεί την πτώση της φεουδαρχίας στην Ευρωπαϊκή ήπειρο (Ahmed et al., 2020).

Η τρίτη αγροτική επανάσταση, αποκαλούμενη αλλιώς και «Πράσινη Επανάσταση» σημειώθηκε κατά την περίοδο 1930 - 1960. Αυτή χαρακτηρίζεται από την χρησιμοποίηση ορυκτών λιπασμάτων για την αύξηση της Γεωργικής παραγωγής καθώς και από την εντατικοποιημένη χρησιμοποίηση φυτοπροστατευτικών ουσιών, με την παράλληλη ανάπτυξη ποικίλων γεωργικών μηχανημάτων. Η τετάρτη αγροτική επανάσταση, η οποία συντελέστηκε κατά τη διάρκεια 2000 - 2022, αποτελεί σημαντικότερη ανάπτυξη στις τεχνολογίες των επικοινωνιών και της πληροφορίας (ΤΠΕ) και στην τεχνητή νοημοσύνη. Η εν λόγω τεχνολογίες προσφέρουν τη δυνατότητα του εξ' αποστάσεως ελέγχου του γεωργικού εξοπλισμού, καθιστώντας ευκολότερη αυτή τη διαδικασία, σε περιπτώσεις όπου τα ρομπότ χρησιμοποιούνται σε γεωργικές δραστηριότητες, όπως η συγκομιδή και το βοτάνισμα, καθώς και η λίπανση ή η παρακολούθηση του σταδίου ανάπτυξης μιας καλλιέργειας με τη χρησιμοποίηση drones (Μπαρμπάκης, 2022).

Η έξυπνη γεωργία αποτελεί μία τεχνολογική επανάσταση η οποία βασίζεται στη χρησιμοποίηση εξοπλισμού ο οποίος έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί σε δίκτυο παράλληλα με τη χρησιμοποίηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things –IoT) και της

τεχνητής νοημοσύνης στη διαχείριση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Μέσω της χρησιμοποίησης των τεχνολογιών της έξυπνης γεωργίας καθίσταται ευκολότερη για τον παραγωγό η αντιμετώπιση πλήθους προβλημάτων τα οποία σχετίζονται με την παραγωγή των καλλιεργειών, εφόσον έτσι δίνεται η δυνατότητα της παρακολούθησης των διαφόρων μεταβολών των κλιματικών παραγόντων και των χαρακτηριστικών του εδάφους. Αυτό συντελείται με την σύζευξη του κατάλληλου γεωργικού εξοπλισμού με το Δίκτυο, για την αυτοματοποίηση της λειτουργίας του, καθώς και με τη χρησιμοποίηση συζευγμένων στο Δίκτυο drones. Η βασική ιδέα της έξυπνης γεωργίας είναι η βελτιστοποίηση των γεωργικών πρακτικών με στόχο την μεγιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής αλλά και την προστασία του περιβάλλοντος μέσω της αποφυγής εσφαλμένης ή άτοπης χρησιμοποίησης των λιπασμάτων και των φυτοπροστατευτικών ουσιών. (Μπαρμπάκης, 2022).

1.2 Γεωργία ακριβείας

Η γεωργία ακριβείας αποτελεί μία καινοτόμο γεωργική πρακτική της οποίας η ανάπτυξη εντοπίζεται στην περίοδο της δεκαετίας του 1980. Η αφετηρία των ερευνητικών δραστηριοτήτων στο πλαίσιο της γεωργίας ακριβείας εντοπίζεται στην ανάπτυξη μετρητών απόδοσης, πλεγμάτων δειγματοληψίας εδάφους, εδαφικών αισθητήρων, συστημάτων προσδιορισμού θέσης και τεχνολογιών μεταβλητού ρυθμού, σε πανεπιστημιακά ιδρύματα των ΗΠΑ και της Ευρώπης. Από το μέσον της δεκαετίας του 1980 η γεωργία ακριβείας ενσωμάτωσε τη χρησιμοποίηση του πρώτου παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού (Global Positioning System –GPS), με την βοήθεια του οποίου κατασκευάστηκαν χάρτες σε εφαρμογές με ελεγχόμενη κυκλοφορία μέσω της χρησιμοποίησης συστημάτων κινηματικής πραγματικού χρόνου (Real Time Kinematic – RTK) και μη-επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles –UAV) εξοπλισμένων με συστήματα GPS και ηλεκτρονικές κάμερες για την επίβλεψη των καλλιεργητικών δραστηριοτήτων (Pedersen & Lind, 2017). Έξυπνα συστήματα όπως οι μετρητές απόδοσης σιτηρών και οι ελεγκτές μεταβλητού ρυθμού καταστάθηκαν διαθέσιμα στο εμπόριο περί τις αρχές της δεκαετίας του 1990 (Zhang & Pierce, 2016).

Πίνακας 1. Ιστορική εξέλιξη της γεωργίας ακριβείας (Pedersen & Lind, 2017)

1970 – 1980	Εισαγωγή του GPS ως τεχνολογίας γενικού σκοπού
	Πρώτος μετρητής απόδοσης καλλιέργειας σε θεριζοαλωνιστική μηχανή
1984	Κατασκευάστηκαν οι πρώτοι χάρτες απόδοσης (με GPS)
1991	Οι χάρτες εφαρμογής (βασισμένοι σε GIS) εισήχθησαν, και η πρώτη προσπάθεια με τεχνολογία μεταβλητού ρυθμού
1995 – 1998	Συστήματα ανίχνευσης εδάφους και δορυφορικά/εναέρια για την μέτρηση της κατάστασης της καλλιέργειας (περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη)
1992 – 2002	Εισαγωγή μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας εδάφους και αεροφωτογραφιών/δορυφορικών εικόνων για τη μέτρηση της κατάστασης καλλιέργειας
2000	Εισαγωγή των συστημάτων κινηματικής πραγματικού χρόνου που εφαρμόζονται στη γεωργία
2000 – 2002	Πρώτη προσπάθεια με συστήματα ανίχνευσης ζιζανίων και συστήματα σποράς ακριβείας
2003	Εισαγωγή της αυτόματης καθοδήγησης οχημάτων στη γεωργία
2008	Εφαρμογή των πρώτων ελεγχόμενων συστημάτων κυκλοφορίας μεταξύ των γεωργών
	Εισαγωγή μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων για χάρτες εφαρμογής
2015	Εισαγωγή πρώτων ρομποτικών συστημάτων σε καλλιέργειες/κηπουρική υψηλής αξίας

Κατά την πάροδο των ετών στον τομέα της γεωργίας έχει εισαχθεί πλήθος καινοτόμων τεχνολογιών και έχουν υιοθετηθεί πολλά μηχανήματα με στόχο την αύξηση της απόδοσης των γεωργικών εκμεταλλεύσεων. Το Πεδίο καθώς και η παρακολούθηση της ευρωστίας των γεωργικών εκμεταλλεύσεων συνιστούν θεμέλιους λίθους για την βελτιστοποίηση της απόδοσης των καλλιεργειών, τόσο ως προς την ποσότητα όσο και ως προς την ποιότητα. Τα τεχνολογικά επιτεύγματα που καταγράφονται στον τομέα της γεωργίας τα τελευταία έτη έχουν οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγής και τις απόδοσης των καλλιεργειών. Ένα ποσοστό της τάξης του 70% του διαθέσιμου στον άνθρωπο γλυκού νερού παγκοσμίως διοχετεύεται στην κάλυψη των αναγκών στον τομέα της γεωργίας. Επί παραδείγματι, με τη χρησιμοποίηση των αισθητήρων εδαφικής υγρασίας η πρακτική των αρδεύσεων και η

χρησιμοποίηση του νερού μπορούν να βελτιστοποιηθούν στο μέγιστο (Zhang & Pierce, 2016).

Με την τεχνολογική εξέλιξη των συστημάτων GPS των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information Systems –GIS), της τηλεπισκόπησης και των τεχνολογιών αισθητήρων, ο γεωργικός κόσμος παρουσίασε μία ταχύτατη ανάπτυξη στις γεωργικές τεχνολογίες ακριβείας, ήδη από το μέσον της δεκαετίας του 1990. Το πρώτο διεθνές συνέδριο με θεματική την γεωργία ακριβείας έλαβε χώρα το 1992. Τα έτη 1997 και 2005 συνήλθαν τα πρώτα ευρωπαϊκά και ασιατικά συνέδρια με την ίδια θεματική. Από τότε και έπειτα οι τεχνολογίες της γεωργίας ακριβείας αποτέλεσαν κύρια θεματολογία σε πλήθος επιστημονικών περιοδικών που σχετίζονται με τον τομέα της γεωργίας, σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα εν λόγω συνέδρια καθώς και οι επιστημονικές εργασίες, τα επιστημονικά περιοδικά και τα βιβλία διαμορφώνουν το πλαίσιο και τις προϋποθέσεις για την διάδοση καινοτόμων ερευνών και ανακαλύψεων στο ταχύτατα αναπτυσσόμενο πεδίο της γεωργίας ακριβείας (Zhang & Pierce, 2016). Στις μέρες μας έχουν εμφανιστεί καινοτόμα συστήματα πλοήγησης, με πολλά ακόμη παρόμοια συστήματα να βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης και της βελτιστοποίησης για μελλοντική εφαρμογή, τα οποία δυνητικά μπορούν να λειτουργήσουν σε συνεργασία με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα GPS (Λαλούσης, 2019). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται σχηματικά η εξέλιξη της γεωργίας ακριβείας, από την δεκαετία του 1970 μέχρι και το έτος 2015.

1.3 Αυτοματοποίηση & υφιστάμενη κατάσταση

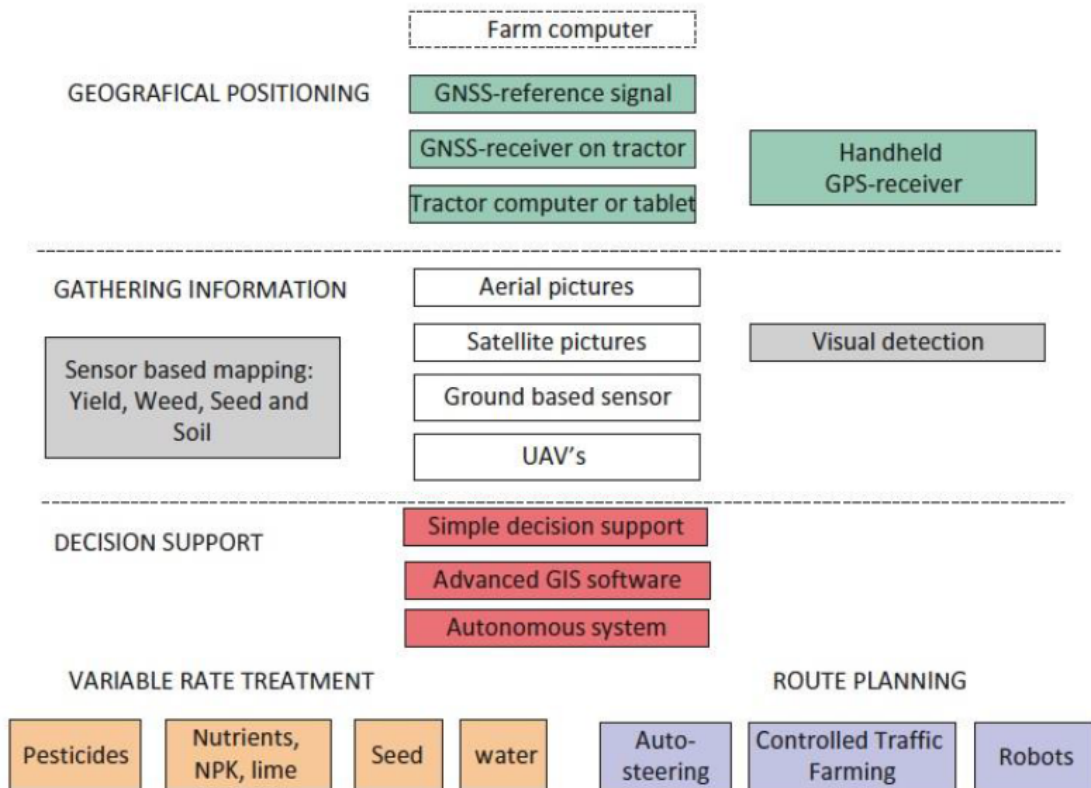
Πλήθος ομοιοτήτων εντοπίζονται μεταξύ της στρατηγικής διεκπεραίωσης των εργασιών στον τομέα της γεωργίας ακριβείας και στον τομέα των βιομηχανικών αυτοματισμών. Κύριος στόχος της γεωργίας ακριβείας αποτελεί η αυτοματοποιημένη διεκπεραίωση των γεωργικών εργασιών και η παράλληλη βελτιστοποίηση αυτών, καθώς και η αύξηση του βαθμού απόδοσης των γεωργικών εκμεταλλεύσεων αλλά και ο καλύτερος έλεγχος της χορήγησης των λιπασμάτων. Αυτή η τελευταία συνιστώσα είναι εξαιρετικά ουσιώδης, λαμβάνοντας υπόψιν τις επιπτώσεις της βιομηχανικής γεωργίας στο περιβάλλον. Επί παραδείγματι, εάν η ποσότητα και η χρονική στιγμή εφαρμογής των λιπασμάτων είναι ακατάλληλα, αυτό ενδεχομένως να έχει κάποια θετική επίδραση στις καλλιέργειες αλλά

είναι βέβαιο ότι θα έχει μία πολύ μεγάλη επίπτωση στο περιβάλλον, εξαιτίας του σχηματισμού διαφόρων οξειδίων του αζώτου. Επιπρόσθετα η εδαφική υποβάθμιση δύναται να ελαχιστοποιηθεί, μέσω του περιορισμού της χρησιμοποίησης βαρέων μηχανημάτων μονάχα στις περιπτώσεις στις οποίες αυτή κρίνεται απαραίτητη. Οι ανωτέρω αναφερθείσες συνιστώσες επηρεάζουν σημαντικά τον παράγοντα του κόστους, καθώς η ελαχιστοποιημένη χρησιμοποίηση λιπασμάτων και βαρέων μηχανημάτων συνεπάγεται άμεση μείωση του κόστους παραγωγής (Piotrowski et al., 2016).

Στον τομέα της αρόσιμης γεωργικής δραστηριότητας οι τεχνολογίες διατήρησης δεδομένων προσφέρουν τη δυνατότητα τροφοδότησης των χρηστών με καινούργιες γνώσεις αλλά και με μία ενημερωμένη γνώση της υφιστάμενης κατάστασης, με ένα ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο ενδεδειγμένης παρακολούθησης του χώρου και του χρόνου. Συμβάλλουν στον σαφή προσδιορισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξη και την απόδοση των φυτών, η οποία είναι εξέχουσας σημασίας στο πλαίσιο μιας βιώσιμης γεωργικής εκμετάλλευσης. Μέσω μιας εξειδικευμένης διαχείρισης τοποθεσίας, οι τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) διαδραματίζουν καταλυτικό ρόλο στην προστασία των γεωργικών πόρων και τελικά στην βελτιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής. Επιπρόσθετα, η γενική παρακολούθηση των καλλιεργειών με τη χρησιμοποίηση του IoT συμβάλλει δραστικά στην βελτιστοποίηση των διαφόρων μοντελοποιήσεων απόδοσης καθώς και στην αξιοπιστία των προβλέψεων των εν λόγω μοντέλων. Σε μία συνολική εικόνα, η τέταρτη γεωργική επανάσταση, και ιδιαίτερα η υιοθέτηση της χρησιμοποίησης του διαδικτύου στον γεωργικό τομέα, συνιστά βασικό παράγοντα που καθιστά εφικτή την αυτοματοποίηση πλήθους εργασιών και διαδικασιών και την παράλληλη υποστήριξη τους με σημαντικότερες καινούργιες πληροφορίες (Bauer & Aschenbruck, 2018).

Ως διαχειριστικό εργαλείο, η γεωργία ακριβείας συνίσταται στα εξής τέσσερα στοιχεία: τον *γεωγραφικό εντοπισμό (GPS)*, την *συλλογή πληροφοριών*, την *υποστήριξη των αποφάσεων* και την *θεραπεία μεταβλητού ρυθμού*. Ως πέμπτο στοιχείο μπορεί να λογιστεί η *χαρτογράφηση των αποδόσεων*, η οποία προσφέρει στον γεωργό την παρακολούθηση του πραγματικού αποτελέσματος από ποικίλες εισροές δεδομένων. Ακόμη, το πέμπτο αυτό στοιχείο αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο του παρέχει τη δυνατότητα συλλογής πληροφοριών

που αφορούν στις αποδόσεις προηγούμενων περιόδων στον αγρό, τα οποία δύνανται να χρησιμοποιηθούν υποστηρικτικά στη λήψη αποφάσεων για την κατάρτιση των μελλοντικών στρατηγικών εισόδου. Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται οι σχέσεις μεταξύ των διαφόρων Συστημάτων και τεχνολογιών των οποίων η χρήση υιοθετείται στον τομέα της Γεωργίας ακριβείας ξεκινώντας από τα συστήματα γεωγραφικού προσδιορισμού και προχωρώντας μέχρι την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων, την εισαγωγή μεταβλητού ρυθμού και την χάραξη διαδρομής.



Σχήμα 1. Συστήματα & τεχνολογίες που υιοθετούνται στον τομέα της γεωργία ακριβείας (Pedersen & Lind, 2017)

Η γεωργία ακριβείας αποτελεί ένα βροχωτό σύστημα συλλογής δεδομένων το οποίο υιοθετείται για την βελτιστοποίηση της διαχείρισης των καλλιεργειών και της λήψης αποφάσεων, με τη διαδικασία αυτή να συνεχίζεται στα μελλοντικά έτη. Κάθε έτος, οι συλλεγόμενες πληροφορίες αποθηκεύονται σε βάσεις δεδομένων και χρησιμοποιούνται ως υπόβαθρο για την λήψη μελλοντικών αποφάσεων. Το εν λόγω σύστημα διακριτοποιείται στην *συλλογή δεδομένων*, στην *ανάλυση δεδομένων*, στις *στρατηγικές διαχείρισης* και στις *εφαρμογές μεταβλητού ρυθμού (Variable-Rate Applications –VRA) των δεδομένων εισόδου*, στην *αξιολόγηση των αποφάσεων διαχείρισης* και στην *εκκίνηση του καινούργιου κύκλου* (Pedersen & Lind, 2017).

Η αυτοματοποιημένη εφαρμογή της Γεωργίας ακριβείας προϋποθέτει τα κάτωθι τέσσερα βασικά βήματα (Zhang & Pierce, 2016):

- (1) *Προσδιορισμός της χωρικής μεταβλητότητας.* Απαίτηση ύπαρξης αισθητήρων εδάφους, συστημάτων GPS και συστημάτων τηλεανίχνευσης, με σκοπό την όσο το δυνατόν λεπτομερέστερη χαρτογράφηση των αποδόσεων των καλλιεργειών, των εδαφικών χαρακτηριστικών, της κατανομής των παρασίτων και λοιπών καιρίων μεταβλητών οι οποίες επηρεάζουν τις συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας. Απαραίτητες για την αποτελεσματική συλλογή δεδομένων εισόδου κρίνονται οι συσκευές λήψης δεδομένων που φέρουν αισθητήρες πεδίου και συστήματα GPS.
- (2) *Ανάλυση δεδομένων και λήψη αποφάσεων.* Τα συστήματα ανάλυσης χωρικών δεδομένων συμπεριλαμβανομένων του GIS και της τηλεπισκόπησης κρίνονται απαραίτητα για τη διαχείριση των δεδομένων εισόδου καθώς και των δεδομένων από έταιρες πηγές, όπως οι τοπογραφικοί χάρτες και οι χάρτες εδάφους. Οι στατιστικές και η γεωστατιστικές μέθοδοι κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των δεδομένων και στην διακριτοποίηση των μορφών της χωρικής μεταβλητότητας στις μετρούμενες παραμέτρους και στις σχέσεις μεταξύ αυτών. Οι εκτάσεις χωρίζονται είτε σε ακανόνιστου σχήματος διαχειριστικές ζώνες είτε σε κελιά τακτικών γραμμών, με σκοπό η διαχείριση να γίνεται με γνώμονα τη χωρική μεταβλητότητα του αγρού. Απαραίτητος είναι ο

καθορισμός των βέλτιστων διαχειριστικών σχεδίων που αφορούν στις γεωργικές εισροές για κάθε ζώνη η κελί διαχείρισης, επί τη βάσει των ιδιαίτερων συνθηκών που επικρατούν σε αυτά. Αυτό το εγχείρημα ενδέχεται να απαιτεί την κατάρτιση μιας ομάδας εμπειρογνομόνων οι οποίοι θα έχουν την δυνατότητα να αξιοποιήσουν τις γνώσεις των γεωργών και των γεωπόνων με βιολογικά, οικονομικά και καλλιεργητικά μοντέλα, με σκοπό την βέλτιστη λήψη αποφάσεων.

(3) *Εφαρμογή των αποφάσεων διαχείρισης.* Οι ελεγκτές μεταβλητού ρυθμού κρίνονται απαραίτητοι για την εφαρμογή ποικίλων εισόδων στις επιλεγμένες τοποθεσίες με τα σωστά νούμερα, τα οποία στηρίζονται είτε σε διαγράμματα ειδικών για κάθε τοποθεσία εφαρμογών είτε σε δεδομένα πραγματικού χρόνου από αισθητήρες πεδίου.

(4) *Αξιολόγηση του οικονομικού και περιβαλλοντικού οφέλους.* Η γεωργία ακριβείας παρέχει τη δυνατότητα αύξησης των οικονομικών αποδόσεων και ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Εντούτοις εισάγει την απαίτηση επενδύσεων σε καινούργιο εξοπλισμό αλλά και σε χρόνο. Για την ευκολότερη εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας, ουσιώδους σημασίας κρίνεται η τεκμηρίωση των οικονομικών και περιβαλλοντικών οφελών των γεωργικών εργασιών ακριβείας.

Για την εφαρμογή του ανωτέρω αναφερθέντος βροχωτού συστήματος στην γεωργία ακριβείας καθίσταται απαραίτητη η χρησιμοποίηση μιας ομάδας τεχνολογιών υπό την ονομασία "τεχνολογίες έξυπνης γεωργίας (Smart Farming Technologies –SFT)". Οι εν λόγω τεχνολογίες συνίστανται σε διαθέσιμες στο εμπόριο, προσιτές και αξιόπιστες τεχνολογίες, οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα εξοικονόμησης χρόνου και έχουν υπόβαθρο την ακαδημαϊκή έρευνα στο πεδίο της γεωργίας ακριβείας, στα πληροφοριακά συστήματα αγροτικής διαχείρισης (Farm Management Information Systems –FMIS), στους γεωργικούς αυτοματισμούς και στην ρομποτική. Τα οφέλη αυτών των τεχνολογιών εντοπίζονται στην πιο αποτελεσματική εφαρμογή των γεωργικών εισροών (σπόροι, λιπάσματα, φυτοπροστατευτικές ουσίες, υδατικοί πόροι, καύσιμα και εργασία), στην

υψηλή ταχύτητα εργασίας, στην άνεση και στην υψηλή ευελιξία στο πεδίο. Η βροχωτή διαδικασία παραγωγής υλοποιείται με την συλλογή και την ανάλυση δεδομένων, με την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των δεδομένων αυτών για την χάραξη στρατηγικών και την με ακρίβεια εφαρμογή των διεργασιών στον αγρό. Οι τεχνολογίες έξυπνης γεωργίας διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες οι οποίες, όπως αναλύθηκε ανωτέρω, εντοπίζονται στο βροχωτό σύστημα της έξυπνης γεωργίας (Pedersen & Lind, 2017):

- *Τεχνολογίες συλλογής δεδομένων.* Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει το σύνολο των τεχνολογιών τηλεπισκόπησης, χαρτογράφησης, πλοήγηση και προσδιορισμού θέσης.
- *Τεχνολογίες ανάλυσης δεδομένων και αξιολόγησης.* Σε αυτή την κατηγορία εντοπίζεται ένα εύρος τεχνολογιών, με διακύμανση από απλά υπολογιστικά μοντέλα λήψης αποφάσεων μέχρι και σύνθετα συστήματα διαχείρισης και λήψης αποφάσεων, τα οποία λαμβάνουν υπόψιν τους πλήθος μεταβλητών μεγάλης ετερογένειας.
- *Τεχνολογίες εφαρμογής ακριβείας.* Σε αυτήν την κατηγορία περιλαμβάνεται το σύνολο των τεχνολογιών εφαρμογής, με τις τεχνολογίες εφαρμογής και καθοδήγησης με μεταβλητό ρυθμό να παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Οι τεχνολογίες εφαρμογής ακριβείας αποτελούν μία τεχνολογική κατηγορία έξυπνης γεωργίας, η οποία συμπεριλαμβάνει τεχνολογίες που υιοθετούνται για την υλοποίηση των αποφάσεων που λαμβάνονται μετά το στάδιο της συλλογής πληροφοριών οι οποίες αφορούν στην κατάσταση των καλλιεργειών. Αυτές διακρίνονται σε (Pedersen & Lind, 2017):

- *Τεχνολογίες εφαρμογής μεταβλητού ρυθμού:* Αυτές οι τεχνολογίες αξιοποιούν τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες του πεδίου ώστε σε κάθε στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας να εφαρμόζονται οι κατάλληλες πρακτικές. Αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμες ειδικά σε αγρούς με έδαφος που παρουσιάζει ανομοιογένεια στην συνολική του έκταση.
- *Άρδευση ακριβείας:* Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση της πρακτικής των αρδεύσεων, λαμβάνοντας υπόψιν το υδατικό ισοζύγιο στον αγρό και την αποτελεσματικότερη χρησιμοποίηση του αρδευτικού νερού για την κάλυψη των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών.
- *Ζιζανιοκτονία ακριβείας:* Το κύριο μέλημα όσον αφορά στην αντιμετώπιση των εχθρών των καλλιεργειών είναι να συντελείται η απομάκρυνση των ζιζανίων με το ελάχιστο κόστος για τις καλλιέργειες. Για τον σκοπό αυτό είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση συστημάτων εντοπισμού ακριβείας.
- *Καθοδήγηση μηχανών:* Τα αυτοματοποιημένα συστήματα καθοδήγησης των γεωργικών μηχανημάτων παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, αφού αυτά καθιστούν εφικτό για τα μηχανήματα να εργάζονται σε ευθύγραμμες πορείες. Με τον τρόπο αυτό μεγιστοποιούνται οι αποδόσεις των καλλιεργειών μέσω της ελαχιστοποίησης των περιττών διαδρομών και των νεκρών χρόνων και της συνεπαγόμενης οικονομίας σε καύσιμη ύλη.

Η γεωργία ακριβείας εγκολπώνει τους τομείς των γεωργικών επιστημών, των πληροφοριακών και επικοινωνιακών τεχνολογιών και των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης λήψης αποφάσεων σε ένα έξυπνο αγρόκτημα (Odara et al., 2015). Η κυρίαρχη ιδέα στην οποία στηρίζεται η γεωργία ακριβείας είναι ο προσδιορισμός της μεταβλητότητας εντός του πεδίου και η επίτευξη της αποτελεσματικής διαχείρισης αυτής. Ειδικότερα, στην γεωργία ακριβείας υιοθετείται η χρήση ενός πλήθους ηλεκτρονικών αισθητήρων πεδίου συνδυαστικά με τεχνολογίες χωρικής πληροφόρησης (GPS, GIS, τηλεπισκόπηση, κ.α.), με σκοπό την χαρτογραφική

αποτύπωση της εδαφικής μεταβλητότητας αλλά και της μεταβλητότητας των καλλιεργειών στην οριοθετημένη περιοχή ενδιαφέροντος και, παράλληλα, την βελτιστοποίηση της διαχείρισης των γεωργικών εισροών (σπόροι, υδατικοί πόροι, λιπάσματα, φυτοπροστατευτικές ουσίες, κ.α.) στις ιδιαίτερες συνθήκες που εντοπίζονται ανά τομέα εντός του πεδίου, με στόχο την μεγιστοποίηση του κέρδους των γεωργικών εκμεταλλεύσεων και, παράλληλα, την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Zhang & Pierce, 2016).

Απαραίτητη κρίνεται η χρησιμοποίηση συστημάτων ανίχνευσης πραγματικού χρόνου για την ευρύτερη εφαρμογή της Γεωργίας ακριβείας. Στο εμπόριο υπάρχει ένα διαθέσιμο πλήθος ημι-αυτοματοποιημένων καθώς και πλήρως αυτοματοποιημένων συσκευών για τους περισσότερους από τους τομείς των γεωργικών εργασιών (εμβολιασμός, σπορά, φύτευση, συγκομιδή, διαλογή, μεταποίηση, συσκευασία, διαχείριση ζώων, κ.α.). Εντούτοις, τα συστήματα που χρησιμοποιούνται σήμερα συνεχίζουν να παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα ως προς την ευελιξία και την αποδοτικότητα, την παρακολούθηση του πεδίου και των γεωργικών εγκαταστάσεων σε πραγματικό χρόνο, το μεγάλο κόστος του φορέα εκμετάλλευσης και τις κεφαλαιακές επενδύσεις (Λαλούσης, 2019).

Αναφορικά με την εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας, έχουν σημειωθεί αρκετές προσπάθειες για την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση των γεωργικών μεταβλητών αλλά μέχρι και σήμερα δεν έχει παρατηρηθεί ικανοποιητική πρόοδος για τη συλλογή τους από το πεδίο. Οι περισσότερες αναφορές που αναφέρονται σε παρακολούθηση των θρεπτικών ουσιών αφορούν κατά κύριο λόγο σε υδροπονικά συστήματα, στα οποία δεν υπεισέρχεται ο παράγοντας του εδάφους και στα οποία παρακολουθούνται μονάχα οι περιβαλλοντικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία. Προς το παρόν, η μοναδική γεωργική παράμετρος για την οποία υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο από αισθητήρες στο έδαφος είναι η εδαφική υγρασία, για την οποία όμως απαιτείται προηγουμένως βαθμονόμηση των αισθητήρων ξεχωριστά, στον εκάστοτε τύπο μηχανικής σύστασης του υπό παρακολούθηση εδάφους. Ως εκ τούτου την κύρια τροχοπέδη για την εφαρμογή της γεωργίας ακριβείας αποτελεί η ανάπτυξη συστημάτων ανίχνευσης για την σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση της εδαφικής ποιότητας, για δεδομένες προδιαγραφές του συστήματος (Marios & Georgiou, 2017).

Στις μέρες μας, εντοπίζονται δύο κύρια εμπόδια τα οποία πρέπει να υπερπηδηθούν για την επίτευξη της ευρύτερης εφαρμογής της γεωργίας ακριβείας. Το πρώτο εμπόδιο αφορά στην χαρτογραφική αποτύπωση μεγάλου δείγματος εδαφών, καλλιεργειών, φυτών, και περιβαλλοντικών παραμέτρων στο πεδίο, η οποία οδηγεί σε υπερπληθώρα δεδομένων τα οποία είναι δύσκολο να διαχειριστούν από τον γεωργό. Έτσι, δημιουργείται η απαίτηση για ανάπτυξη συστημάτων ενσωμάτωσης δεδομένων και αυτοματοποιημένων συστημάτων λήψης αποφάσεων. Το δεύτερο εμπόδιο αφορά στην άντληση δεδομένων για τις διάφορες εδαφικές, καλλιεργητικές, φυτικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους, η οποία είναι διαθέσιμη, εντούτοις κοστοβόρα και εντατική, καθώς η πλειονότητα εξ' αυτών των παραμέτρων απαιτούν δειγματοληψία εδάφους και ανάλυση στο εργαστήριο (Marios & Georgiou, 2017).

Στην γεωργία ακριβείας υπάρχει πληθώρα διαφορετικών τύπων παραμέτρων, οι οποίες σχετίζονται με τη γεωργική δραστηριότητα, όπως η περιβαλλοντική υγρασία και θερμοκρασία, τα κατακρημνίσματα και η εδαφική υγρασία, μεταξύ των διαφορετικών πεδίων. Βάσει αυτών των παραμέτρων μπορεί να διεξαχθεί ανάλυση αναφορικά με την αποτελεσματικότητα χρησιμοποίησης των απαιτούμενων πόρων (σπόροι, ύδατα, λιπάσματα, φυτοπροστατευτικές ουσίες, κ.α.) σε κάθε αγρό. Με τον τρόπο αυτό, η γεωργία ακριβείας μπορεί να επιστρατευτεί για την μεγιστοποίηση του κέρδους, την διασφάλιση της ποιότητας των γεωργικών προϊόντων και την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων (Mekala & Viswanathan, 2017).

Οι εφαρμογές της γεωργίας ακριβείας παρέχουν τα μέσα για **(α)** την καταπολέμηση των εχθρών και των ασθενειών των φυτών, με την εφαρμογή του κατάλληλου είδους και ποσότητας φυτοπροστατευτικών ουσιών και λιπασμάτων στην απαιτούμενη χρονική στιγμή, **(β)** την επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης αρδευτικής αποδοτικότητας, μέσω της χορήγησης των απαιτούμενων για την κάλυψη των αναγκών των φυτών ποσοτήτων νερού μονάχα όταν αυτές είναι απαραίτητες, **(γ)** την ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, εφόσον είναι διαθέσιμη η γνώση για τον χρόνο εφαρμογής μιας φυτοπροστατευτικής ουσίας ώστε αυτή να προκαλεί την αποτελεσματική εξουδετέρωση επιβλαβών παρασίτων και ασθενειών με την παράλληλη ελαχιστοποίηση της χρήσης της

εκάστοτε φυτοπροστατευτικής ουσίας και **(δ)** την παραγωγή γεωργικών προϊόντων υψηλής αξίας, από μη-τοξικές, ασφαλείς και υγιείς καλλιέργειες (Khattab et al., 2016).

Η γεωργία ακριβείας συνιστά μία μέθοδο διαχείρισης των καλλιεργειών η οποία επιστρατεύει την τεχνολογία της πληροφορίας, τον δορυφορικό προσδιορισμό θέσης, την τηλεπισκόπηση και το πλέον κατάλληλο πλήθος δεδομένων για την βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας των γεωργικών εισροών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις όποιες ενδεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αποτελεί συνδυασμό τεχνολογιών και ζητημάτων όπως οι τεχνολογίες μεταβλητού ρυθμού, τα συστήματα καθοδήγησης οχημάτων, την ποιότητα των προϊόντων και τα περιβαλλοντικά ζητήματα. Οι τεχνολογίες οι οποίες υιοθετούνται στην γεωργία ακριβείας κάνουν κατά κύριο λόγο χρήση των πληροφοριών που αφορούν στην χωροχρονική μεταβλητότητα των συντελεστών των καλλιεργειών και του εδάφους με σκοπό την εφαρμογή διαφορετικής επεξεργασίας ,προσαρμοσμένης στις χωροχρονικές παραμέτρους του εκάστοτε πεδίου (Λαλούσης, 2019).

Τα τελευταία έτη έχει αναπτυχθεί πλήθος εφαρμογών οι οποίες βασίζονται στις πρόσφατες τεχνολογίες, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things –IoT), τα δεδομένα μεγάλου όγκου (Big Data), οι τεχνολογίες νέφους (cloud) και η κινητή υπολογιστική. Στις μέρες μας ο κόσμος κινείται προς τις “έξυπνες” έννοιες, όπως τα έξυπνα τηλέφωνα, τα έξυπνα σπίτια, τα έξυπνα σχολεία, τα έξυπνα αγροκτήματα, κ.α. Στον τομέα της γεωργίας, εξαιτίας της ελλιπούς συντήρησης οι καλλιέργειες καταστρέφονται, προξενώντας σοβαρότατες απώλειες για τον γεωργό. Η παρακολούθηση των περιβαλλοντικών παραμέτρων δεν αποτελεί επαρκή μέθοδο για την βελτιστοποίηση της απόδοσης μιας καλλιέργειας. Υπάρχουν έτερες παράμετροι οι οποίες επηρεάζουν την παραγωγικότητα σε υπερβολικό βαθμό. Σε αυτές περιλαμβάνονται η επέλαση παθογόνων και παρασίτων τα οποία πρέπει να ελέγχονται με εφαρμογή των κατάλληλων φυτοπροστατευτικών ουσιών στην εκάστοτε καλλιέργεια. Ακόμη, τα πτηνά και έτερα άγρια ζώα επιτίθενται στις καλλιέργειες κατά το στάδιο της συγκομιδής. Ως εκ τούτου, οι γεωργοί καλούνται να αντιμετωπίσουν πλήθος προβλημάτων, τόσο κατά το στάδιο της ανάπτυξης μιας καλλιέργειας όσο και κατά το στάδιο της συγκομιδής (Rajeswari et al., 2017).

Το διαδίκτυο των πραγμάτων (internet of Things –IoT) παρέχει τη δυνατότητα επέκτασης στην γεωργία ακριβείας με έξυπνους και καταναμημένους αισθητήρες και τεχνολογίες οι οποίες συνεργάζονται μεταξύ τους και οι οποίες στις μέρες βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε έτερους τομείς της βιομηχανίας καθώς και στους αυτοματισμούς των κτιρίων. Η εν λόγω επέκταση συναντάται συχνά υπό τον όρο «έξυπνη Γεωργία» και περιλαμβάνει το σύνολο των σταδίων, από την άντληση και αποθήκευση δεδομένων από αισθητήρες πεδίου μέχρι την επεξεργασία αυτών των δεδομένων, την αποθήκευση και την ανάλυση. Ακόμη, τα αποτελέσματα των αναλύσεων δύναται να καταστούν ορατά από τα συστήματα διασύνδεσης IoT και από τα συστήματα εξαγωγής αποφάσεων που αφορούν στις ζωοτροφές, με στόχο την βοήθεια των γεωργών στο να λάβουν τις βέλτιστες και βιώσιμότερες αποφάσεις (Bauer & Aschenbruck, 2018).

Εξαιτίας της προσχώρησης του IoT στον γεωργικό τομέα, η κλασική γεωργία μετατρέπεται σταδιακά σε έξυπνη γεωργία. Το IoT ελαχιστοποιεί την απαίτηση για ανθρώπινη εργασία, παρέχοντας την δυνατότητα της εξ' αποστάσεως παρακολούθησης της ανάπτυξης των καλλιεργειών και των περιβαλλοντικών συνθηκών. Το IoT επιστρατεύει τη χρησιμοποίηση των δικτύων ασύρματων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks –WSN) ως τον θεμέλιο λίθο για την συλλογή πληροφοριών για τις εν λόγω εφαρμογές παρακολούθησης και ελέγχου. Το σύστημα παρακολούθησης αποτελείται από συσκευές οι οποίες φέρουν ένα πλήθος διάφορων αισθητήρων, με σκοπό την καταγραφή ποικίλων παραμέτρων του πεδίου όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η εδαφική υγρασία κ.α. και παρέχει την δυνατότητα του διαμοιρασμού αυτών των δεδομένων με τις υπόλοιπες συσκευές. Το IoT παρέχει βοήθεια στους γεωργούς μέσω της παρακολούθησης των διαφόρων σταδίων ανάπτυξης των καλλιεργειών, των εχθρών και των ασθενειών και της εκτίμησης των αποδόσεων των καλλιεργειών, προσφέροντας την δυνατότητα βελτιωμένων δυνατοτήτων επεξεργασίας μέσω του διαδικτύου στις, κατά κύριο λόγο, ελαχίστων δυνατοτήτων, μικρής κατανάλωσης και μικρού κόστους συσκευές (Heble et al., 2018).

Η χρησιμοποίηση των WSN στο πλαίσιο της γεωργίας ακριβείας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αποδοτικότητας και της παραγωγικότητας και ως εκ τούτου του κέρδους πλήθους συστημάτων γεωργικής παραγωγής. Τα δεδομένα για τις περιβαλλοντικές

παραμέτρους δύναται να συλλεχθούν εξ' αποστάσεως, σε πραγματικό χρόνο, και να μεταβιβαστούν στα συστήματα επεξεργασίας πληροφοριών για την ανακάλυψη προβλημάτων, την αποθήκευση δεδομένων και την χάραξη στρατηγικών αντιμετώπισης. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την κλασσική γεωργική προσέγγιση, κατά την οποία η λήψη των αποφάσεων γίνεται βάσει κάποιας υποθετικής μέσης κατάστασης, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν αντανακλά την πραγματικότητα (Khattab et al., 2016). Η προστασία των καλλιεργειών είναι υψίστης σημασίας. Ως εκ τούτου αναδύεται η ανάγκη παρακολούθησης των δεδομένων τα οποία ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Με σκοπό την άμεση αντιμετώπιση των προβλημάτων που εμφανίζονται στις καλλιέργειες, η συλλογή των δεδομένων επιβάλλεται να συντελείται με «έξυπνο» τρόπο και όχι με χειροκίνητες μεθόδους. Για την επίτευξη αυτού του στόχου επιβάλλεται η χρησιμοποίηση των WSN. Προς το παρόν τα WSN χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών, όπως η διαχείριση της ποιότητας του νερού, η συλλογή δεδομένων, η παρακολούθηση των σταδίων παραγωγής στις βιομηχανίες, κ.α. (Sahitya et al., 2016).

1.4 Η αντίληψη των Ελλήνων γεωργών αναφορικά με την έξυπνη γεωργία

Η εξάπλωση της έξυπνης γεωργίας και της γεωργίας ακριβείας αποτελεί κύριο στόχο της αγροτικής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το άμεσο μέλλον. Πέρα από τις προβλέψεις της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (ΚΑΠ), τον Απρίλιο του 2019 υπεγράφη από 23 μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέσα σε αυτά και η Ελλάδα, η απόφαση συνεργασίας για «ένα έξυπνο και βιώσιμο ψηφιακό μέλλον για την Ευρωπαϊκή γεωργία και την ύπαιθρο», επικυρώνοντας τις σημαντικές προσπάθειες που μέλεται να λάβουν χώρα σε αυτόν τον τομέα. Αντίστοιχες πρωτοβουλίες, σε πολιτικό επίπεδο, σημειώνονται και στην Ελλάδα, με χαρακτηριστικότερα τα παραδείγματα του «Τριμερούς Μνημονίου Συνεργασίας για την Γεωργία Ακριβείας» μεταξύ του Υπουργείου Ψηφιακής Πολιτικής, του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης και του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, που υπεγράφη το 2018 και το πόνημα «Ψηφιακός Μετασχηματισμός του Γεωργικού Τομέα», το οποίο βρίσκεται σε στάδιο συζήτησης. Στις Ευρωπαϊκές χώρες αναμένεται

έως και το 2025 να εγκατασταθούν περισσότερα από 16 εκατομμύρια συσκευών που επιστρατεύουν της τεχνολογίας αισθητήρων και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things –IoT), συγκριτικά με τα 7.8 εκατομμύρια που σημειώθηκαν κατά το έτος 2017. Την ίδια στιγμή, το σύστημα «Κοπέρνικος» προβλέπεται να βοηθήσει τις προσπάθειες για περαιτέρω προώθηση των εν λόγω τεχνολογιών στο πλαίσιο των ευρωπαϊκών γεωργικών εκμεταλλεύσεων, παρέχοντας υπηρεσίες χαρτογραφικής αποτύπωσης και συλλογής δεδομένων από το πεδίο (Αμπατζίδης, 2019).

Ακόμη, το πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης «Ορίζοντας 2020» έχει υποστηρίξει οικονομικά το θεματικό δίκτυο έξυπνης γεωργίας «Smart AKIS», ένα πόνημα το οποίο προωθείται από την Ευρωπαϊκή Σύμπραξη Καινοτομίας «Γεωργική Παραγωγικότητα και Βιωσιμότητα» (EIP - AGRI). Η συγκεκριμένη σύμπραξη, η οποία αποτελεί πρωτοβουλία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, υποστηρίζει την καινοτομία τους τομείς της γεωργίας και της δασοκομίας ώστε αυτοί να γίνουν βιώσιμοι και παραγωγικοί, αντιμετωπίζοντας επαρκώς τις σύγχρονες προκλήσεις, όπως η μεγάλη μεταβλητότητα των τιμών του εμπορίου, η αλλαγή του κλίματος, η επίταση του ανταγωνισμού στο εμπόριο και η αυστηροποίηση του πλαισίου περιβαλλοντικής ρύθμισης. Το «Smart AKIS», το οποίο αποτελεί το ευρωπαϊκό θεματικό δίκτυο που αφορά στην έξυπνη γεωργία, υποστηρίζεται από 13 εταίρους με δραστηριότητα σε 8 μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ακαδημαϊκούς φορείς, γεωργικούς συνεταιρισμούς και εταιρείες συμβουλευτικής υποστήριξης). Στην διαδικτυακή πλατφόρμα γίνεται αναλυτική παρουσίαση περισσότερων από 1,500 εφαρμογών έξυπνης γεωργίας οι οποίες εφαρμόζονται προς το παρόν από γεωργούς και λοιπούς επαγγελματίες που δραστηριοποιούνται στον τομέα της γεωργίας, αλλά και πολυπληθή συνεργατικά και διαδραστικά έργα καινοτομίας. Ακόμη, η εν λόγω πλατφόρμα διαθέτει 50 συνδέσμους με επιχειρήσεις και 700 ενεργούς χρήστες. Αξίζει σημείωσης ότι η σύμπραξη EIP-AGRI παρέχει χρηματοδότηση σε ακόμη 10 θεματικά δίκτυα τα οποία έχουν έμμεση σχέση με εφαρμογές της έξυπνης γεωργίας (λ.χ. έξυπνη παραγωγή γάλακτος 4D4F, διαμεσολάβηση καινοτομίας στον τομέα της γεωργίας) (Αμπατζίδης, 2019).

Στον ελλαδικό χώρο, η σημαντικότερη, ενδεχομένως, πρωτοβουλία προς το παρόν στον τομέα της έξυπνης γεωργίας είναι το σύστημα έξυπνης γεωργίας «Gaiasense», το οποίο

αποτελεί ένα καινοτόμο σύστημα παροχής συμβουλευτικών υπηρεσιών στους γεωργούς όσον αφορά στην χρησιμοποίηση των σύγχρονων τεχνολογιών, στο πλαίσιο της γεωργίας ακριβείας, σε πλήθος γεωργικών εργασιών (λ.χ. πρακτική των αρδεύσεων, εφαρμογή λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων φυτοπροστατευτικών ουσιών). Το εν λόγω εργαλείο διαθέτει περισσότερους από 200 σταθμούς οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε διάφορες περιοχές ανά την Ελλάδα και στους οποίους λαμβάνει χώρα η συλλογή δεδομένων που αφορούν στις γεωργικές εκμεταλλεύσεις και στις καλλιεργητικές εργασίες, παρέχοντας υποστήριξη στις σημαντικότερες για την Ελλάδα καλλιέργειες (λ.χ. ελιές, βαμβάκι, ροδάκινα και σταφύλια). Κατά την περίοδο των δύο πρώτων ετών της πιλοτικής εφαρμογής του εν λόγω συστήματος έχουν σημειωθεί υπολογίσιμα οικονομικά οφέλη για τους παραγωγούς, όχι μόνο εξαιτίας της ελάττωσης του κόστους παραγωγής αλλά και εξαιτίας της βελτιστοποίησης της παραγωγικής αποδοτικότητας – παράγοντες οι οποίοι, ανάλογα με την καλλιέργεια, παρουσιάζουν μία διακύμανση μεταξύ 18% και 36%. Το αντίτιμο για την συμμετοχή στο σύστημα «Gaiasense» είναι ιδιαίτερα μικρό και δεν απαιτεί σημαντικό κεφάλαιο. Εξαιτίας αυτού, το συγκεκριμένο σύστημα συνιστά μία πολύ σημαντική ευκαιρία για τους γεωργούς της Ελλάδας οι οποίοι θέλουν να επιτύχουν βελτιστοποίηση των προϊόντων παραγωγής τους μέσω της χρησιμοποίησης συστημάτων έξυπνης γεωργίας (Αμπατζίδης, 2019).

Σε επίπεδο έρευνας, το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών εργάζεται επάνω σε μία σειρά τεχνολογιών έξυπνης γεωργίας. Επί παραδείγματι, το έργο «Gates-game» συνιστά μία πρωτοβουλία του πανεπιστημίου η οποία απευθύνεται σε επαγγελματίες του γεωργικού τομέα. Το «Gates-game» αποτελεί ένα ηλεκτρονικό σύστημα το οποίο παρέχει πληροφορίες στους χρήστες αναφορικά με τις διαθέσιμες τεχνολογίες της έξυπνης γεωργίας, παρέχοντας πληροφόρηση για τις ενδεχόμενες επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην οικονομία διαφόρων καλλιεργητικών πρακτικών. Ακόμη, το σύστημα «Optima» βρίσκεται προς το παρόν σε στάδιο ανάπτυξης και έχει σχέση με τη χρησιμοποίηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας οι οποίες αφορούν στην διαχείριση των μηχανημάτων ψεκασμού και στην ελαχιστοποίηση των εισροών σε φυτοπροστατευτικές ουσίες και λοιπούς χημικούς παράγοντες. Επίσης, η εταιρεία AgroKnow έχει αναλάβει τον συντονισμό του ευρωπαϊκού προγράμματος BigDataGrapes, το οποίο επιστρατεύει τις τεχνολογίες των μεγάλων δεδομένων (Big Data) και της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial

Intelligence –AI) για την εκλογή και την διαχείριση των καλλιεργειών αμπέλου, με στόχο την υιοθέτηση των κατάλληλων αποφάσεων και καλλιεργητικών πρακτικών για τις εν λόγω καλλιέργειες. Στο ίδιο πλαίσιο, το πρόγραμμα «Apollo», με την εταιρεία Draxis σε συντονιστικό ρόλο, συλλέγει δεδομένα από τους δορυφόρους του προγράμματος «Κοπέρνικος» και παρέχει σχετικά δεδομένα τους γεωργούς. Επί του παρόντος το πρόγραμμα «Apollo» εφαρμόζεται στην περιοχή των Γιαννιτσών, σε καλλιέργειες αραβοσίτου και βάμβακος, με ιδιαίτερος θετικά αποτελέσματα (Αμπατζίδης, 2019).

Το Ελληνικό Ινστιτούτο Βιοοικονομίας και Αγροτεχνολογίας του ΕΚΕΤΑ λαμβάνει μέρος στην πρωτοβουλία EUXDAT, η οποία λαμβάνει χρηματοδότηση από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα «Ορίζοντας 2020» και υιοθετεί τεχνολογίες μεγάλων δεδομένων (Big Data) για την αποτελεσματική χρησιμοποίηση μετεωρολογικών και λοιπόν δεδομένων από μη-επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Unmanned Aerial Vehicles –UAV), από δορυφόρους, από αισθητήρες πεδίου και από συστήματα τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Inteligence –AI). Πιλοτική εφαρμογή του εν λόγω προγράμματος λαμβάνει χώρα σε αγροκτήματα της Χαλκιδικής. Μία ομάδα έρευνας του πανεπιστημίου Κρήτης έλαβε μέρος το πρόγραμμα Recare, του οποίου στόχος είναι η υιοθέτηση σύγχρονων Τεχνολογιών Πληροφορίας και Επικοινωνίας (ΤΠΕ) Για την αποδοτικότερη διαχείριση του αγρού και για την εφαρμογή άρδευσης των καλλιεργειών από εναλλακτικές πηγές. Ήδη από το 2017 στην Κρύα Βρύση Πέλλας λαμβάνει χώρα ένα καινοτόμο πρόγραμμα έξυπνης γεωργίας με την βοήθεια του Αγροτικού Συνεταιρισμού Αμπελοπαραγωγών, που βρίσκεται σε συνεργασία με την Αμερικανική Γεωργική Σχολή και με το Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. Σε έναν αγρό 600 στρεμμάτων έχει γίνει εγκατάσταση αυτοματοποιημένων μετεωρολογικών σταθμών που υιοθετούν τις τεχνολογίες των αισθητήρων συνδυαστικά με τις τεχνολογίες της κινητής τηλεφωνίας, με αποτέλεσμα την κατά 50% ελάττωση των εξόδων για λιπάσματα και φυτοπροστατευτικές ουσίες (Αμπατζίδης, 2019).

Δύο ακόμη προγράμματα του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, το «Magic», που αφορά στην καλλιέργεια βιομηχανικών φυτών σε εδάφη τα οποία έχουν υποστεί υποβάθμιση, και το «Panacea», το οποίο αφορά στην καλλιέργεια ειδών που δεν προορίζονται για τροφική κατανάλωση, προωθούν αντίστοιχες καινοτομίες στον τομέα

της γεωργικής παραγωγής. Συνολικά στον ελλαδικό χώρο λαμβάνουν χώρα ποικίλες πρωτοβουλίες για την επιστράτευση της έξυπνης γεωργίας και της γεωργίας ακριβείας στον γεωργικό τομέα, με αξιοσημείωτα έως τώρα αποτελέσματα στις περιοχές οι οποίες έχουν επιλεγεί για την εφαρμογή των σχετικών προγραμμάτων, με την ως ένα βαθμό αξιοποίηση των ευρωπαϊκών προγραμμάτων έρευνας και χρηματοδότησης των οποίων ο αριθμός έχει αυξηθεί κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών. Εντούτοις, στο μεγαλύτερο ποσοστό των ακόμη κατακερματισμένων γεωργικών εκμεταλλεύσεων στον ελλαδικό χώρο, οι τεχνολογίες της έξυπνης γεωργίας δεν έχουν υιοθετηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό και το εν λόγω πεδίο βρίσκεται ακόμη σε πολύ πρωτογενές στάδιο (Αμπατζίδης, 2019).

Βάσει των αποτελεσμάτων της ερευνητικής εργασίας του Αμπατζίδη (2019) διαπιστώνεται ότι ο βαθμός επιστράτευσης των τεχνολογιών της έξυπνης γεωργίας και της γεωργίας ακριβείας στον ελλαδικό χώρο είναι ιδιαίτερα χαμηλός, όπως έχει διαπιστωθεί και για την πλειονότητα των ευρωπαϊκών χωρών. Παρά το γεγονός ότι η συντριπτική πλειοψηφία του ερευνητικού δείγματος διαθέτει κάποιες γνώσεις αναφορικά με τις τεχνολογίες έξυπνης γεωργίας, αυτές έχουν υιοθετηθεί ελάχιστα, επί του πρακτέου, από τους Έλληνες γεωργούς, με τη μόνη εξαίρεση να εντοπίζεται στα αυτοματοποιημένα συστήματα άρδευσης. Εντούτοις, το ενδιαφέρον των Ελλήνων γεωργών για την υιοθέτηση τεχνολογιών γεωργίας ακριβείας σε μελλοντικό χρόνο σημειώνεται σημαντικά έντονο, λαμβάνοντας υπόψιν την υψηλού βαθμού συνειδητοποίηση των ποικίλων ωφελειών που συνεπάγεται η υιοθέτηση των τεχνολογιών αυτών. Αξίζει σημείωσης το γεγονός ότι η πλειονότητα των γεωργών, αφού έλαβαν μέρος στην εν λόγω έρευνα, πιστεύουν πως τα συστήματα έξυπνης γεωργίας μπορούν να έχουν καλύτερη εφαρμογή σε μεγάλες εκμεταλλεύσεις συμβατικών καλλιεργειών αλλά και στον τομέα της κτηνοτροφίας. Όντως, έχει διαπιστωθεί ότι αυτής της μορφής οι γεωργικές εκμεταλλεύσεις αποτελούν καταλληλότερους υποψηφίους για την εφαρμογή των τεχνολογιών της έξυπνης γεωργίας, παρέχοντας την δυνατότητα απόδοσης μεγαλύτερων ωφελειών όσον αφορά στην αποδοτικότητα της παραγωγής και στην ελαχιστοποίηση του κόστους (Αμπατζίδης, 2019).

Αναφορικά με τα οφέλη των τεχνολογιών έξυπνης γεωργίας, εκείνα που φαίνεται να είναι μεγαλύτερη σημαντικότητας, με βάση την ερευνητική εργασία του Αμπατζίδη

(2019), αφορούν στην ελάττωση του κόστους εργασίας, στην αντιμετώπιση των κινδύνων στην παραγωγική διαδικασία και στην περιβαλλοντική προστασία, βάσει των αντίστοιχων ρυθμιστικών προβλέψεων. Εντούτοις, η αναγνώριση των εν λόγω οφελών δεν είναι από μόνη της αρκετή για την υιοθέτηση των τεχνολογιών έξυπνης γεωργίας, αφού ιδιαίτερης σημαντικότητας είναι τα εμπόδια που αναφέρονται από τους Έλληνες γεωργούς, με τα κυριότερα από αυτά να εντοπίζονται στην μη δυνατότητα πρόσβασης σε πληροφόρηση, στην μικρή ανάπτυξη της ελληνικής αγοράς σε αυτόν τον τομέα και στην απουσία των απαραίτητων οικονομικών πόρων και κεφαλαίων (Αμπατζίδης, 2019).

Εν κατακλείδι, οι δημογραφικοί και οργανωσιακοί παράγοντες που παρουσιάζονται να επιδρούν στην αναγνώριση των στόχων, των οφελών και των εμποδίων των τεχνολογιών της έξυπνης γεωργίας εμπερικλείουν το μορφωτικό επίπεδο των γεωργών και το είδος των καλλιεργειών, αφού οι λοιποί παράγοντες που μελετήθηκαν στην ερευνητική εργασία του Αμπατζίδη (2019) δεν παρουσίασαν σημαντική στατιστική συσχέτιση. Ειδικότερα, στο πλαίσιο της εν λόγω εργασίας, διαπιστώθηκε πώς οι γεωργοί που διαθέτουν υψηλότερο μορφωτικό επίπεδο αναγνωρίζουν σε μεγαλύτερη έκταση τα προκύπτοντα οφέλη από την εφαρμογή τεχνολογιών έξυπνης γεωργίας στον αγρό. Ακόμη, διαπιστώθηκε πως οι γεωργοί μικρών οικογενειακών αγροτικών εκμεταλλεύσεων δεν λαμβάνουν υπόψιν τους σε σημαντικό βαθμό τους στόχους που δύναται να εξυπηρετήσει η έξυπνη γεωργία, επικυρώνοντας την άποψη ότι το μέγεθος των γεωργικών εκμεταλλεύσεων διαδραματίζει καίριο ρόλο στην υιοθέτηση των εν λόγω τεχνολογιών. Τέλος, Παρά το γεγονός ότι ο παράγοντας της ηλικίας δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντική επίδραση στις ανωτέρω αναφερθείσες αντιλήψεις των γεωργών, στην εν λόγω έρευνα διαπιστώθηκε πως οι γεωργοί ηλικίας μικρότερης των 25 ετών αναγνωρίζουν σε μεγαλύτερη έκταση τα οφέλη της έξυπνης γεωργίας, παρατήρηση που υποδηλώνει και υψηλότερη πρόθεση υιοθέτησης των αντίστοιχων τεχνολογιών (Αμπατζίδης, 2019).

Κεφάλαιο 2. Συστήματα έξυπνης γεωργίας

2.1 Αισθητήρες πεδίου

2.1.1 Αισθητήρες θερμοκρασίας

Οι ερευνητές Imtiaz Jaya & Hossain (2018) έκαναν χρήση του αισθητήρα θερμοκρασίας και υγρασίας «DHT22», ο οποίος διαθέτει επαρκώς μικρό μέγεθος, έχει χαμηλό κόστος και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Η συσκευή αυτή ενσωματώνει έναν υγρασιακό αισθητήρα χωρητικού τύπου, έναν αντιστάτη thermistor, του οποίου η τιμή καθορίζεται από την θερμοκρασία, και έναν μονό μικροεπεξεργαστή ο οποίος μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μια βαθμονομημένη ψηφιακή έξοδο η οποία φέρει πληροφορίες και την θερμοκρασία και την υγρασία. Το ψηφιακό σήμα του αισθητήρα καλύπτει μεγάλο εύρος μετάδοσης (περί τα 20 m), γεγονός το οποίο τον καθιστά ιδιαίτερα αξιόπιστο. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας αποτελεί ιδανική επιλογή για θερμοκρασιακές αντισταθμίσεις μεγάλου εύρους (-40°C – 80°C) και ανιχνεύει την σχετική υγρασία σε εύρος 0-100% με αρκετά υψηλή ακρίβεια (απόκλιση 0.5°C και 2.0-5.0% υγρασίας). Όταν ο αισθητήρας είναι ενεργοποιημένος παραμένει σε κατάσταση χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης έως ότου κάποιος εξωτερικός παράγοντας τον θέσει σε ενεργή κατάσταση λειτουργίας. Λειτουργεί δίνοντας μία μέτρηση 2 δευτερόλεπτα (Λαλούσης, 2019).



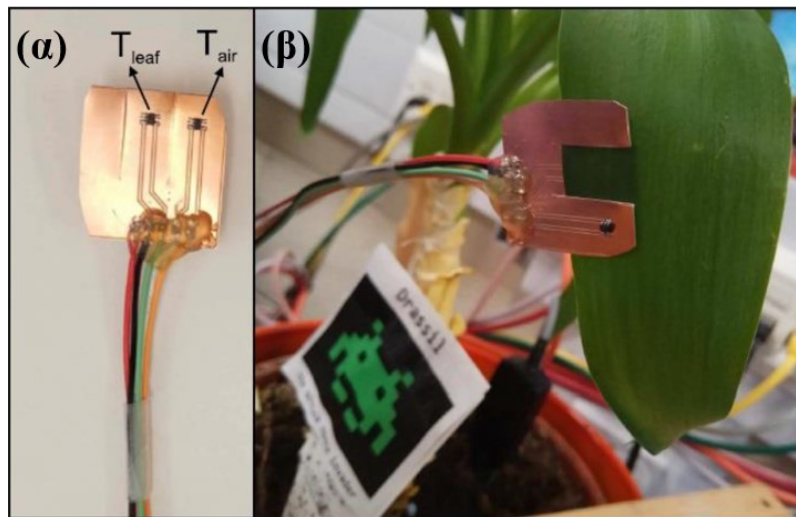
Εικόνα 1. Αισθητήρας θερμοκρασίας & υγρασίας DHT22 (Imtiaz Jaya & Hossain, 2018)

Οι ερευνητές Heble et al. (2018) και Pooja et al. (2017) έκαναν χρήση του αισθητήρα σχετικής υγρασίας και περιβαλλοντικής θερμοκρασίας «DHT11», ο οποίος, όπως και ο αισθητήρας DHT22, είναι ένας αισθητήρας με χαμηλό κόστος που μεταδίδει τα δεδομένα μέσω ιδιωτικού (proprietary) ενσύρματου πρωτοκόλλου επικοινωνίας, παρέχοντας στον χρήστη την δυνατότητα να παρακολουθεί τις επικρατούσες στο πεδίο συνθήκες οποιαδήποτε στιγμή που το κρίνει απαραίτητο.

Οι ερευνητές Heble et al. (2018) έκαναν επίσης χρήση των αντιστατών τύπου thermistor 10.0 kΩ για να παρακολουθήσουν την εδαφική θερμοκρασία. Με τον κατάλληλο σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου μορφοποίησης σήματος, επιτυγχάνεται υψηλότερη ακρίβεια και ευαισθησία σε ένα θερμοκρασιακό εύρος (15-45°C).

Οι ερευνητές Daskalakis et al. (2018) κατασκεύασαν μία αισθητηριακή πλακέτα στην οποία έκαναν χρήση δύο αναλογικών θερμοκρασιακών αισθητήρων «LMT84», οι οποίοι κατασκευάζονται από την εταιρεία Texas Instruments (Εικόνα 2α). Έκαστος αισθητήρας συνδέεται ξεχωριστά με την τροφοδοσία και έχει κατανάλωση 5.4 μΑ στα 1.8 V και η μετρητική τους ακρίβεια παρουσιάζει μια απόκλιση της τάξης των 0.4°C. Η πρωτότυπη διάταξη που κατασκεύασαν οι ερευνητές παρουσιάζεται στην Εικόνα 2β. Οι αισθητήρες αυτοί μετρούν την περιβαλλοντική θερμοκρασία (Εικόνα 3β - αισθητήρας επάνω στο

φύλλο του φυτού) καθώς και την θερμοκρασία του φυτού (Εικόνα 3β - αισθητήρας κάτω από το φύλλο του φυτού).



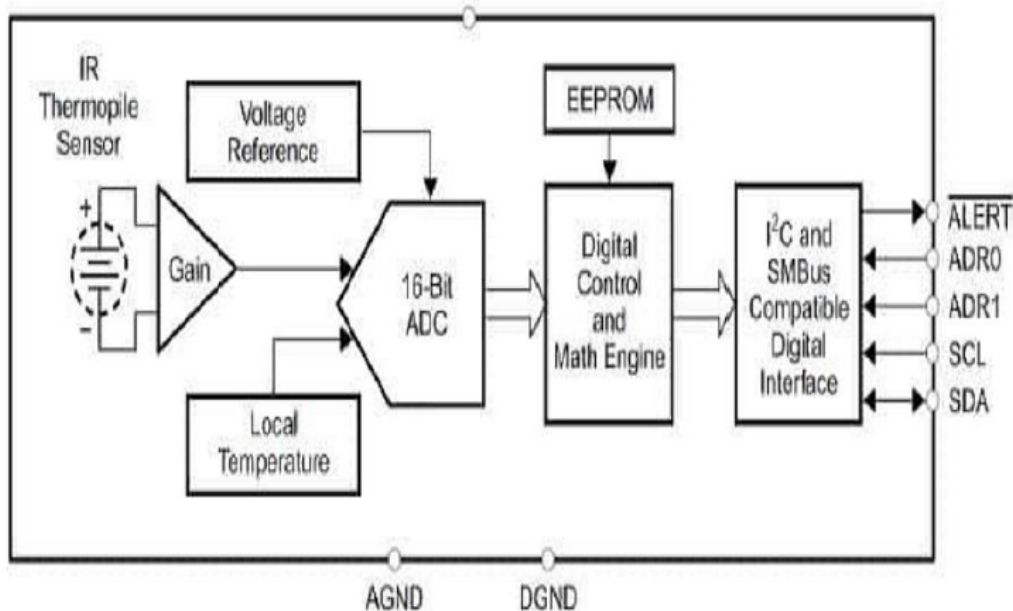
Εικόνα 2. (α) οι θερμοκρασιακοί αισθητήρες LMT84, (β) η πλακέτα των Daskalakis et al. (2018)

Οι ερευνητές Krishna et al. (2017) έκαναν χρήση του θερμοκρασιακού και υγρασιακού αισθητήρα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3. Η τοποθέτηση του αισθητήρα έγινε σε σημείο το οποίο δεν εκτίθεται απευθείας στην ηλιακή ακτινοβολία, διότι στην αντίθετη περίπτωση θα λαμβάνονταν εσφαλμένα δεδομένα.



Εικόνα 3. Θερμοκρασιακός – υγρασιακός αισθητήρας

Οι ερευνητές Prathibha et al. (2017) έκαναν χρήση του θερμοκρασιακού αισθητήρα θερμοστήλης – υπέρυθρης ακτινοβολίας «TMP007», ο οποίος ενσωματώνει έναν μαθηματικό υπολογιστή. Ο αισθητήρας αυτός, του οποίου το ηλεκτρονικό διάγραμμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 4, απορροφά θερμική ενέργεια από αντικείμενα, σε ένα εύρος απορρόφησης 4.0 -16.0 μm .



Εικόνα 4. Ηλεκτρονικό διάγραμμα θερμοκρασιακού αισθητήρα TMP007 (Prathibha et al., 2017)

Ο θερμοκρασιακός αισθητήρας «LM35» (Εικόνα 5) συνιστά ένα microchip με μεγάλη ακρίβεια του οποίου η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά ανάλογα με την θερμοκρασία, με τάση εξόδου 10.0 mV/°C. Εξαιτίας αυτού παρουσιάζει συγκριτικό πλεονέκτημα προς τους αισθητήρες των οποίων η βαθμονόμηση έχει γίνει στην θερμοκρασιακή κλίμακα Kelvin, Αφού δεν απαιτείται η αφαίρεση υψηλής σταθερής τάσης από την έξοδο για την μετατροπή των μετρήσεων σε τιμές της επιθυμητής θερμοκρασιακής κλίμακας Celsius. Ο εν λόγω αισθητήρας δεν παρουσιάζει απαίτηση εξωτερικής βαθμονόμησης για να επιτύχει την τυπική ακρίβεια, απόκλισης 0.25°C, όσον αφορά σε θερμοκρασίες δωματίου και την τυπική ακρίβεια απόκλισης 0.75°C Όσον αφορά το πλήρες θερμοκρασιακό εύρος (-55.0°C - +150.0°C). Η τροφοδοσία του

σχεδιασμός του τον καθιστά ανθεκτικό σε μακροχρόνια χρήση. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα «THERM200» παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

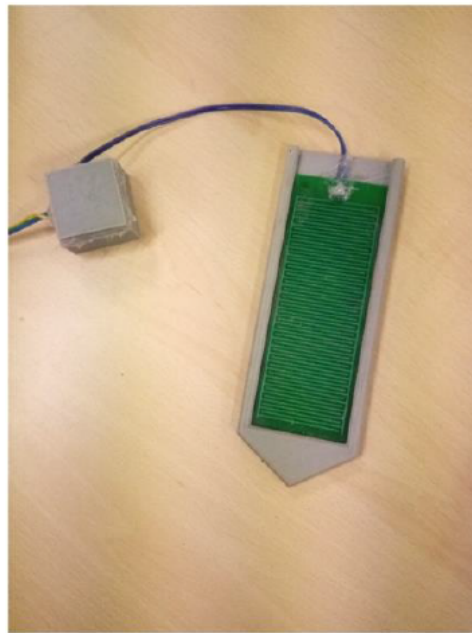
Πίνακας 2. Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του θερμοκρασιακού αισθητήρα THERM200 (Wasson et al., 2017)

THERM200 Temperature Sensor Probe	
Τάση τροφοδοσίας	3.2V – 20V (DC)
Χρόνος από την εκκίνηση ως τη σταθερή έξοδο	2sec
Αντίσταση εξόδου	100Kohm
Θερμοκρασία λειτουργίας	-40°C – 95°C
Εύρος τάσης εξόδου	0 – 2.43V (γραμμικά ως προς την θερμοκρασία)
Εξίσωση θερμοκρασίας βάσει της τάσης εξόδου	Volt * 41.67 - 40
Ακρίβεια	±0.5°C
Μήκος καλωδίου	3m

Ο θερμοκρασιακός αισθητήρας «THERM200» λειτουργεί σε ένα θερμοκρασιακό εύρος -40.0°C – +95.0°C, με ακρίβεια τυπικής απόκλισης της τάξης του 0.125°C. Διαθέτει μία απλής μορφής διεπαφή 3 καλωδίων (είσοδος, έξοδος & γείωση) λειτουργώντας με τάση εισόδου συνεχούς ρεύματος εύρους 3.3 - 20 V και τάση εξόδου εύρους 0.0 – 3.0 V, η οποία αντιστοιχεί σε θερμοκρασιακό εύρος -40.0°C – 95°C, αντίστοιχα. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της εδαφικής θερμοκρασίας, αποστέλλοντας τα δεδομένα μέσω Ταυτοποίησης Μέσω Ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency IDentification –RFID) (Wasson et al., 2017).

2.1.2 Αισθητήρες υγρασίας εδάφους

Οι ερευνητές Heble et al. (2018) επισημαίνουν ότι η εδαφική υγρασία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την φυτική ανάπτυξη. Ως εκ τούτου, η βελτιστοποίηση των πρακτικών άρδευσης είναι μία από τις σημαντικότερες προτεραιότητες και μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρησιμοποίησης των τεχνολογιών της έξυπνης γεωργίας. Οι αισθητήρες εδαφικής υγρασίας διαδραματίζουν καίριο ρόλο σε αυτού του είδους τα συστήματα. Αυτού του τύπου οι αισθητήρες παρέχουν ικανοποιητική ακρίβεια και διάρκεια ζωής συγκριτικά με το κόστος πώλησής τους. Η προαναφερθείσα ομάδα ερευνητών κατασκεύασε έναν αισθητήρα εδαφικής υγρασίας ο οποίος παρουσιάζει δομή καθετήρα, όμοια με εκείνη ενός δια-ψηφιακού μετατροπέα (Inter-Digital Transducer –IDT), με τα δυο του ηλεκτρόδια να σχηματίζουν έναν πυκνωτή, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6. Αισθητήρας εδαφικής υγρασίας (Heble et al., 2018)

Οι ερευνητές Krishna et al. (2017) έκαναν χρήση ενός αισθητήρα εδαφικής υγρασίας για την παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας περιμετρικά των φυτών. Ο αισθητήρας που

χρησιμοποίησαν οι ερευνητές διαθέτει δύο ηλεκτρόδια τύπου καθετήρα, για την διαπέραση του εδαφικού στρώματος, και μετατρέπουν την μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση σε επίπεδο εδαφικής υγρασίας. Τα υψηλά επίπεδα εδαφικής υγρασίας καθιστούν τη διέλευση του ρεύματος ευκολότερη διαμέσου του εδάφους, ενώ τα χαμηλά επίπεδα εδαφικής υγρασίας προκαλούν ελάττωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Στην Εικόνα 7 απεικονίζεται ένας τυπικός αισθητήρας εδαφικής υγρασίας που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα των ανωτέρω αναφερθέντων ερευνητών. Όμοια, οι ερευνητές Rao & Sridhar (2018) καθώς και οι ερευνητές Sowmiya et al. (2017) έκαναν χρήση ενός αισθητήρα εδαφικής υγρασίας υψηλής ακριβείας (Εικόνα 8), ο οποίος φέρει δύο ηλεκτρόδια τύπου καθετήρα τα οποία βυθίζονται στο έδαφος και μετρούν το επίπεδο εδαφικής υγρασίας με αντίστοιχο τρόπο.



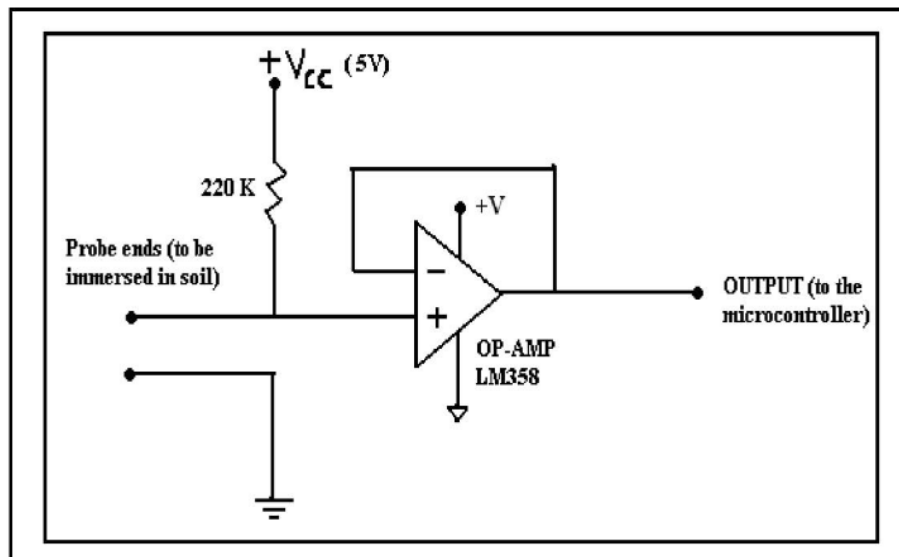
Εικόνα 7. Αισθητήρας εδαφικής υγρασίας (Krishna et al., 2017)

Οι ερευνητές Ashifuddin Mondal & Rehena (2018) έκαναν χρήση του αισθητήρα εδαφικής υγρασίας «VL95», τον οποίον συνέδεσαν με τον μικροεπεξεργαστή Arduino. Ο εν λόγω αισθητήρας στηρίζεται στην ίδια αρχή λειτουργίας με τους προαναφερθέντες αισθητήρες, δηλαδή σε δύο ηλεκτρόδια τύπου καθετήρα τα οποία τοποθετούνται μέσα στο έδαφος και μετρούν το επίπεδο εδαφικής υγρασίας μέσω του προσδιορισμού της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του εδάφους.



Εικόνα 8. Αισθητήρας εδαφικής υγρασίας (Rao & Sridhar, 2018)

Οι ερευνητές Santoshkumar & Udaykumar (2015) κατασκεύασαν το σύστημα που χρησιμοποίησαν στην εργασία τους χρησιμοποιώντας τον τελεστικό ενισχυτή (operational amplifier) «LM358», ο οποίος μεταβιβάζει τις μετρούμενες τιμές σε έναν μικροεπεξεργαστή Arduino. Το ηλεκτρονικό διάγραμμα αυτού του αισθητήρα εδαφικής υγρασίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9. Ηλεκτρονικό διάγραμμα αισθητήρα εδαφικής υγρασίας

Οι ερευνητές Wasson et al. (2017) έκαναν χρήση του υγρασιακού αισθητήρα υψηλής συχνότητας «VH400». Ο εν λόγω αισθητήρας έχει κατά πολύ ευνοϊκότερη θέση, συγκρινόμενος με άλλους υγρασιακούς αισθητήρες, εφόσον έχει εξαιρετικά μεγάλη απόδοση, πολύ μικρότερο μέγεθος και πολύ καλή μετρητική ακρίβεια. Η τάση στην έξοδο του αισθητήρα είναι ανάλογη του επιπέδου εδαφικής υγρασίας και δεν επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε άλατα του εδαφικού νερού. Το σύνολο των δεδομένων που αντλούνται και αφορούν στο επίπεδο της εδαφικής υγρασίας πέριξ των φυτών μεταφέρονται ηλεκτρονικά, μέσω του συστήματος Ταυτοποίησης Μέσω Ραδιοσυχνότητας (Radio Frequency Identification –RFID), ώστε όταν αυτά διαβάζονται από τον RFID αποκωδικοποιητή να μπορούν να επιστρατευτούν οι απαιτούμενες ενέργειες για την διαμόρφωση των βέλτιστων υγρασιακών συνθηκών. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του υγρασιακού αισθητήρα «VH400» παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του υγρασιακού αισθητήρα VH400 (Wasson et al., 2017)

VH400 Sensor	
Κατανάλωση ενέργειας	< 7mA
Τάση τροφοδοσίας	3.4V – 20V (DC)
Χρόνος από την εκκίνηση ως τη σταθερή έξοδο	400ms
Αντίσταση εξόδου	100kohm
Θερμοκρασία λειτουργίας	-50°C – 75°C
Ακρίβεια	> 1%
Έξοδος	0V – 3V σχετιζόμενο με την υγρασία

2.1.3 Αισθητήρες υγρασίας ατμόσφαιρας

Οι ερευνητές Krishna et al. (2017) έκαναν χρήση ενός υγρασιακού αισθητήρα (Εικόνα 10) στο πλαίσιο της ερευνητικής τους μελέτης για τον προσδιορισμό του βαθμού κορεσμού του ατμοσφαιρικού αέρα σε υδρατμούς. Ο εν λόγω υγρασιακός αισθητήρας μετράει με υψηλή ακρίβεια τον βαθμό κορεσμού του ατμοσφαιρικού αέρα, κάνοντας μετατροπή της υγρασιακής τιμής σε τάση ηλεκτρικού ρεύματος. Οι μετρούμενες τιμές εμφανίζονται σε μικρού μεγέθους οθόνη υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Display –LCD).



Εικόνα 10. Υγρασιακός αισθητήρας (Krishna et al., 2017)

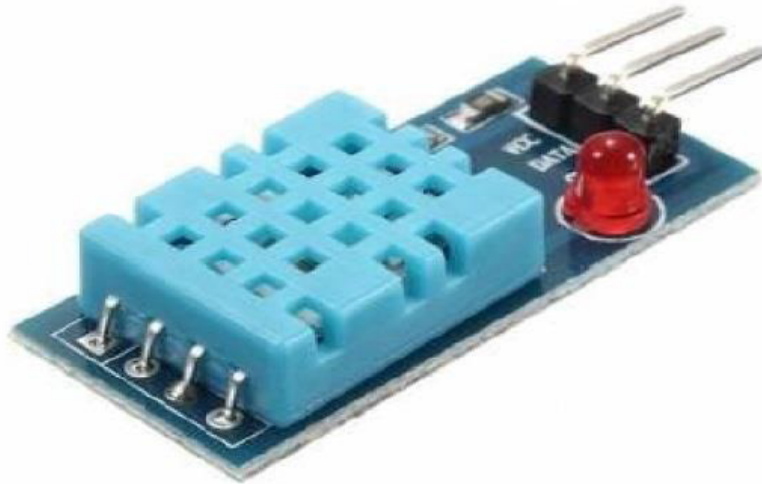
Οι ερευνητές Prathibha et al. (2017) έκαναν χρήση του ψηφιακού υγρασιακού αισθητήρα «HDC1010», ο οποίος δίνει μετρήσεις υψηλής ακριβείας για το επίπεδο της περιβαλλοντικής υγρασίας, καταναλώνοντας ελάχιστη ενέργεια. ο εν λόγω αισθητήρας παρουσιάζει απόλυτη σταθερότητα σε υψηλά υγρασιακά επίπεδα και, παράλληλα, μεγάλη ανθεκτικότητα στο χώμα, στη σκόνη και στους λοιπούς στερεούς ρύπους που συναντώνται στο περιβάλλον. Ο αισθητήρας αυτός διαθέτει μη-πτητική μνήμη (non-volatile) στην οποία αποθηκεύονται οι συντελεστές τυποποίησης. Ακόμη, είναι συμβατός με τον διάλογο επικοινωνίας I2C.

Οι ερευνητές Sowmiya et al. (2017) επισημαίνουν πως τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός αισθητήρα υγρασίας (Εικόνα 11) αποτελούν: η ακρίβεια της μέτρησης, η επαναληψιμότητα (ίδια αποτελέσματα σε ίδιες συνθήκες), η πολυετής σταθερότητα, το μέγεθος και το κοστολόγιο. Ο αισθητήρας καταγράφει την τιμή της περιεχόμενης στον αέρα υγρασίας και την αποθηκεύει ώστε αυτή να ληφθεί υπόψη κατά τη διαδικασία εφαρμογής λίπανσης στις καλλιέργειες.



Εικόνα 11. Υγρασιακός αισθητήρας (Sowmiya et al., 2017)

Ο αισθητήρας σχετικής υγρασίας «HH10D» (Εικόνα 12), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε από την ομάδα ερευνητών Ananthi et al. (2017), λειτουργεί με βαθμονόμηση 2 σημείων, χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα πυκνωτικού τύπου για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης και της χαμηλότερης ενεργειακής κατανάλωσης. Ο αισθητήρας αυτός είναι χωρητικού τύπου και διαθέτει μετατροπέα CMOS, ο οποίος μετατρέπει την πυκνότητα σε συχνότητα, καθώς και μία μνήμη EEPROM, η οποία χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των παραγόντων βαθμονόμησης. Εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του ο αισθητήρας αυτός έχει τη δυνατότητα να αντιδρά τάχιστα στις μεταβολές της υγρασίας.



Εικόνα 12. Υγρασιακός αισθητήρας HH10D (Ananthi et al., 2017)

2.1.4 Αισθητήρες pH

Οι ερευνητές Krishna et al. (2017) επισημαίνουν πως η τιμή του εδαφικού pH αποτελεί έναν παράγοντα ο οποίος διαδραματίζει καίριο ρόλο στην ανάπτυξη των καλλιεργειών. Για αυτόν τον λόγο η παρακολούθηση της τιμής του μπορεί να δώσει τα απαιτούμενα στοιχεία για την επιστράτευση κατάλληλων πρακτικών με στόχο την διατήρηση του εδαφικού pH στη βέλτιστη για την εκάστοτε καλλιέργεια τιμή. Οι ερευνητές έκαναν χρήση του αισθητήρα pH που παρουσιάζεται στην Εικόνα 13.

Οι ερευνητές Sowmiya et al. (2017) χρησιμοποίησαν έναν αισθητήρα για τον προσδιορισμό της τιμής του εδαφικού pH, ο οποίος μετράει σε ένα εύρος τιμών 0.0 - 14.0 και παρουσιάζεται στην Εικόνα 14.

Οι ερευνητές Ananthi et al. (2017) έκαναν χρήση ενός αναλογικού αισθητήρα μέτρησης του εδαφικού pH, με στόχο να διαπιστώσουν αν το έδαφος είναι όξινο ή αλκαλικό (Εικόνα 15). Ο εν λόγω αναλογικός αισθητήρας είναι εξειδικευμένα σχεδιασμένος για να συνεργάζεται με μικροεπεξεργαστές Arduino, έχει εύκολη σύνδεση και πολύ ικανοποιητικά χαρακτηριστικά. Ακόμη, διαθέτει φωτεινή ένδειξη ισχύος LED και δυνατότητα σύνδεσης μέσω BCN.



Εικόνα 13. Αισθητήρας εδαφικού pH (Krishna et al., 2017)



Εικόνα 14. Αισθητήρας εδαφικού pH (Sowmiya et al., 2017)



Εικόνα 15. Αισθητήρας εδαφικού pH (Ananthi et al., 2017)

2.1.5 Αισθητήρες έντασης φωτός

Οι ερευνητές Heble et al. (2018) έκαναν χρήση του αισθητήρα φωτεινής έντασης BH1750, ο οποίος μετράει σε ένα εύρος 1.0 – 65,535 lux. Ο εν λόγω αισθητήρας διαθέτει πολύ μικρό μέγεθος και δυνατότητα επικοινωνίας μέσω διαύλου I2C.

Οι ερευνητές Sowmiya et al. (2017) μελέτησαν έναν φωτοελεγχόμενο φωτοαντιστάτη (Εικόνα 16), του οποίου η ηλεκτρική αντίσταση ελαττώνεται ανάλογα με την αύξηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ο αντιστάτης αυτός είναι κατασκευασμένος από μεγάλης αντοχής ημιαγωγούς. Ένας αισθητήρας φωτός κάνει την μετατροπή της φωτεινής έντασης σε ηλεκτρικό σήμα στην έξοδο του αντιστάτη, ο οποίος ανιχνεύει την φωτεινή ακτινοβολία του περιβάλλοντος και μεταφέρει τα δεδομένα στον μικροεπεξεργαστή.

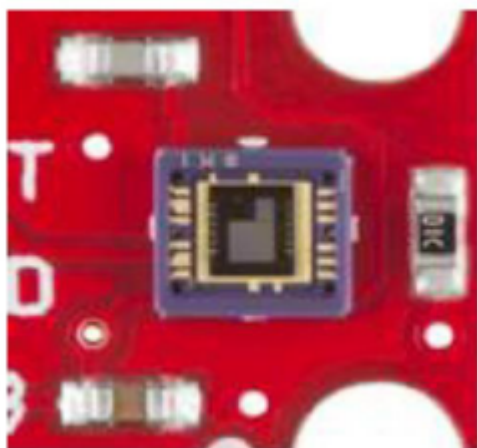


Εικόνα 16. Αισθητήρας φωτεινής έντασης (Sowmiya et al., 2017)

3.1.6 Αισθητήρες ηλιακής ακτινοβολίας

Οι ερευνητές Heble et al. (2018) έκαναν χρήση του αισθητήρα ηλιακής ακτινοβολίας «6450 TSR», ο οποίος κατασκευάζεται από την εταιρεία Davis Instruments και μετράει ηλιακή ακτινοβολία φάσματος 300 – 1,100 nm.

Οι ερευνητές (Krishna et al., 2017) έκαναν χρήση ενός αισθητήρα υπεριώδους ακτινοβολίας, ο οποίος εντοπίζει την υπεριώδη ακτινοβολία και βάσει της έντασης αυτής, την μετατρέπει σε τάση ηλεκτρικού ρεύματος. Ο εν λόγω αισθητήρας διαθέτει εσωτερικό ενισχυτή και παρέχει την δυνατότητα εύκολης σύνδεσης με εξωτερικά ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Ο αισθητήρας αυτός κάνει αποτελεσματικότερη ανίχνευση του φωτός στο εύρος 280 – 390 nm. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται ο αισθητήρας υπεριώδους ακτινοβολίας που χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές.



Εικόνα 17. Αισθητήρας υπεριώδους ακτινοβολίας (Krishna et al., 2017)

3.1.7 Αισθητήρες διοξειδίου του άνθρακα

Όπως αναφέρουν και οι ερευνητές Heble et al. (2018), το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί σημαντικότατο παράγοντα στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης των φυτών. Για τον λόγο αυτό, έκαναν χρήση του στερεού αισθητήρα διοξειδίου του άνθρακα «CMD4161A» της εταιρίας Figaro, του οποίου η λειτουργία στηρίζεται σε ηλεκτρολύτες και παρέχει υψηλής ακριβείας μετρήσεις και προσιτό κοστολόγιο. Ο εν λόγω αισθητήρας διαθέτει ένα ενσωματωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα θέρμανσης και ρύθμισης σήματος.

Σύμφωνα με τους ερευνητές Krishna et al. (2017), ένας τυπικός αισθητήρας διοξειδίου του άνθρακα παρέχει μέτρηση των επιπέδων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα μέσω του προσδιορισμού της υπέρυθρης ακτινοβολίας η οποία απορροφάται από τα μόρια του διοξειδίου του άνθρακα. Ο αισθητήρας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 18 διαθέτει δύο λειτουργίες: μία λειτουργία χαμηλού εύρους (0.0 – 10,000 ppm) και μία λειτουργία υψηλού εύρους (0.0 – 100,000 ppm).



Εικόνα 18. Αισθητήρας διοξειδίου του άνθρακα (Krishna et al., 2017)

3.1.8 Αισθητήρες υπέρυθρης ακτινοβολίας

Οι ερευνητές Krishna et al. (2017) έκαναν χρήση αισθητήρων παθητικής υπέρυθρης ακτινοβολίας (Passive InfraRed –PIR) για να ανιχνεύσουν κινούμενους στόχους οι οποίοι εκπέμπουν θερμότητα. Με την χρησιμοποίηση αυτών των αισθητήρων σε περίπτωση που κάποιο θηλαστικό ή πτηνό παρουσίαζε μεγάλη εγγύτητα στις καλλιέργειες, αυτό εντοπιζόταν μέσω της χρησιμοποίησης των εν λόγω αισθητήρων και απωθούνταν από τον αγρό, μέσω της χρησιμοποίησης ενός εξειδικευμένου ηλεκτρονικού κυκλώματος εκφοβισμού πτηνών. Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται ο εν λόγω αισθητήρας PIR.



Εικόνα 19. Αισθητήρας PIR (Krishna et al., 2017)

2.2 Μικροελεγκτές

Οι ερευνητές Adriano et al. (2018) έκαναν χρήση των μικροελεγκτών «Momote001» και «CC2650MODA», οι οποίοι στηρίζονται στην αρχιτεκτονική System on Chip (SoC) του «CC2650», ο οποίος κατασκευάζεται από την εταιρεία Texas Instruments και διαθέτει ραδιο-επαφή πολλαπλών πρωτοκόλλων, τα οποία υποστηρίζονται από Bluetooth χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (Bluetooth Low-Energy –BLE), και το IEEE802.15.4. Αμφότεροι οι μικροελεγκτές διαθέτουν ενσωματωμένες κεραίες και απαιτείται ο προγραμματισμός τους με την κατάλληλη στοίβα πρωτοκόλλου για την χρησιμοποίησή τους. Ο μικροελεγκτής «Momote001» κατασκευάζεται από ένα ανοιχτό πρόγραμμα υλικού (open-hardware project) και ο μικροελεγκτής «CC2650MODA» κατασκευάζεται από την εταιρεία Texas Instruments.

Οι ερευνητές Imtiaz Jaya & Hossain (2018) έκαναν χρήση του μικροελεγκτή «ESP8266-12», ο οποίος υποστηρίζει δικτύωση Wi-Fi και έχει την δυνατότητα ενσωμάτωσης σε άλλο hardware (λ.χ. μετατροπέας TTL σε USB), με σκοπό της σύνθεσης μιας ανοιχτού λογισμικού πλατφόρμας IoT, της «NodeMCU». Ο εν λόγω μικροελεγκτής διαθέτει είσοδο-έξοδο (IO), όμοια με τον μικροελεγκτή Arduino, και παρέχει την δυνατότητα προγραμματισμού σε διάφορες γλώσσες προγραμματισμού, το οποίο τον καθιστά πολύ βολικό στην χρήση. Ο «ESP8266-12» αποτελεί ένα ασύρματο ολοκληρωμένο υψηλής αρχιτεκτονικής SoC, το οποίο παρέχει χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και μικρό μέγεθος. Διαθέτει έναν ιδιαίτερα συμπαγή σχεδιασμό, ο οποίος ενσωματώνει την ολοκληρωμένη στοίβα πρωτοκόλλου TCP/IP και είναι σε θέση να υποστηρίξει μία εφαρμογή ή να αναλάβει τις Wi-Fi λειτουργίες ενός άλλου μικροελεγκτή. Ως εκ τούτου, παρέχεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης του είτε αυτόνομα είτε ως υποστηρικτικού παράγοντα των Wi-Fi δυνατοτήτων κάποιας άλλης συσκευής. Η αρχιτεκτονική του βασίζεται στην ενεργειακή εξοικονόμηση και διαθέτει λειτουργικό πραγματικού χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, για την επίτευξη της ελάχιστης δαπανώμενης ενέργειας διαθέτει τρεις συνθήκες λειτουργίας (ενεργή, σε ύπνο & σε βαθύ ύπνο). Ακόμη, η στοίβα πρωτοκόλλου που χρησιμοποιεί περιλαμβάνει ποικίλα πρωτόκολλα (UDP, Websocket, MQTT, κ.α.) τα οποία έχουν σχεδιαστεί για μεταβίβαση μικρού όγκου δεδομένων, μικρή καθυστέρηση και χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Η διάταξη

Wi-Fi που διαθέτει παρέχει την δυνατότητα χρησιμοποίησης σε ένα δίκτυο αισθητήρων, στο οποίο ο μικροελεγκτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κόμβος αλλά και ως πύλη δικτύου. Το τελευταίο προκύπτει από την δυνατότητα λειτουργίας ως ασύρματος σταθμός, που παρέχει ο μικροελεγκτής «ESP8266-12», με την σύνδεση του σε ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης, αλλά και από την δυνατότητα λειτουργίας του ως σημείο πρόσβασης, επιτρέποντας σε άλλες συσκευές με δυνατότητες Wi-Fi να μπορούν να συνδεθούν σε αυτόν, καθιστώντας τον εξαιρετικό για την χρησιμοποίησή του ως πύλη δικτύου.

Οι ερευνητές Jiajin et al. (2014) έκαναν χρήση του μικροελεγκτή «Bluno Arduino» ως ασύρματο κομβικό αισθητήρα, εξαιτίας της ευκολίας χρήσης του, του χαμηλού του κόστους, της χαμηλής ενεργειακής του κατανάλωσης και των τυποποιημένων χαρακτηριστικών και γλώσσας προγραμματισμού που διαθέτει. Ο «Bluno Arduino» διαθέτει ενσωματωμένο ολοκληρωμένο TICCC2540 για την υποστήριξη Bluetooth v.4.0, παρέχοντας την δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μέσω Bluetooth χαμηλής ενέργειας (BLE). Ο «Bluno Arduino» χρησιμοποιήθηκε από τους ερευνητές για την απρόσκοπτη διασύνδεση με τις μονάδες αντίληψης και ελέγχου (θερμοκρασιακός & υγρασιακός αισθητήρας, αισθητήρας φωτός, αισθητήρας εδαφικής υγρασίας, ηλεκτρονόμος, κ.α.) εξαιτίας του ότι διαθέτει την δυνατότητα παροχής μιας πλούσιας βάσης δεδομένων για την σύνδεση με αυτά τα στοιχεία και τον σχεδιασμό υψηλού επιπέδου εφαρμογών WSN.

Οι ερευνητές Bauer & Aschenbruck (2018) έκαναν χρήση μιας διάταξης αισθητήρων χαμηλού κόστους, η οποία είναι συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE802.15.4 και βασίζεται στην πλατφόρμα «TelosB», ως κομβικό στοιχείο σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Η εν λόγω διάταξη διαθέτει τρεις ενσωματωμένους αισθητήρες μέτρησης περιβαλλοντικών παραμέτρων (θερμοκρασία, υγρασία & φωτεινή ακτινοβολία). Με την χρησιμοποίηση κατάλληλων φίλτρων και αλγορίθμων, η διάταξη αυτή παρέχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση ενεργής ακτινοβολίας φωτοσύνθεσης (Photosynthetically Active Radiation –PAR), οι οποίες παρέχουν την δυνατότητα για αξιόπιστες εκτιμήσεις που αφορούν στον δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Index –LAI). Σημειώνεται ότι

μεγαλύτερο πλήθος εξωτερικών αισθητήρων μπορεί να συνδεθεί σε αυτήν την πλατφόρμα χρησιμοποιώντας τον δίαυλο I2C και την διεπαφή GPIO.

Οι ερευνητές Krishna et al. (2017) έκαναν χρήση του μικροεπεξεργαστή Raspberry Pi 2 Model B, στον οποίο εγκατέστησαν το λειτουργικό σύστημα Raspbian, το οποίο στηρίζεται στην έκδοση Debian του λειτουργικού Linux και έχει υποστεί βελτιστοποίηση για την προσαρμογή του στην πλακέτα Raspberry Pi. Ο εν λόγω μικροεπεξεργαστής έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υψηλή απόδοση για την συνδυαστική του χρήση με ποικίλους αισθητήρες, πράγμα που τον καθιστά μία εξαιρετική επιλογή για ενσωμάτωση σε συστήματα IoT. Ο ίδιος μικροεπεξεργαστής χρησιμοποιήθηκε και από την ομάδα ερευνητών Khattab et al. (2016) με σκοπό την συλλογή δεδομένων από αισθητήρες πεδίου και την προώθηση αυτών στο επόμενο επίπεδο της αρχιτεκτονικής του. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει ο εν λόγω μικροεπεξεργαστής είναι η δυνατότητά του να εργάζεται είτε τροφοδοτούμενος από μπαταρία είτε τροφοδοτούμενος από ρεύμα δικτύου, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε περίπτωσης.

Οι ερευνητές Prathibha et al. (2017) έκαναν χρήση του μικροεπεξεργαστή «CC3200» ως βασικό στοιχείο του συστήματος που προτείνουν, το οποίο περιλαμβάνει μικροελεγκτή, δικτυακό επεξεργαστή (NetWork Processor –NWP) και διεπαφή Wi-Fi. Αποτελεί μία φορητή συσκευή χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, παρέχοντας την δυνατότητα λειτουργίας με μπαταρίες, η οποία παρέχει ασφάλεια και ταχεία σύνδεση. Στην εν λόγω πλακέτα υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης ποικίλων αισθητήρων μέτρησης συνθηκών πεδίου (θερμοκρασία, υγρασία, κ.α.) καθώς και κάμερα για την παρακολούθηση του αγρού, ώστε ο ενδιαφερόμενος να μπορεί να παρακολουθεί τους αισθητήρες. Ο μικροεπεξεργαστής «CC3200» αποτελεί τον πρώτο μικροεπεξεργαστή υψηλής απόδοσης με δυνατότητα διεπαφής Wi-Fi. Έχει πλήρη στοίβα δικτύου η οποία βασίζεται στα πρωτόκολλα IEEE802.11b/g/n. Ο τρόπος λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή και η κατανάλωση ενέργειας που τον χαρακτηρίζει, επιτρέπει τον προγραμματισμό του με κώδικα διαμέσου του υποσυστήματος δικτύου.

2.3 Διατάξεις δικτύωσης

2.3.1 Επικοινωνία των αισθητήρων εντός δικτύου

Η ομάδα των Adriano et al. (2018) έκαναν χρήση του στοιχείου επικοινωνίας LoRa «RN2903», το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρεία Microchip, διαθέτει μικροελεγκτή που κάνει χρήση της στοίβας πρωτοκόλλου LoRaWAN και διαθέτει την δυνατότητα επικοινωνίας με εξωτερικές συσκευές διαμέσου σειριακής διεπαφής με προκαθορισμένες εντολές. Για να επιτευχθεί επικοινωνία απαραίτητη είναι η χρήση εξωτερικής κεραίας. Η ίδια ομάδα ερευνητών έκανε χρήση του ολοκληρωμένου στοιχείου Sigfox «SFM11R2D», του οποίου το chipset κατασκευάζεται από την εταιρεία On Semiconductors και το οποίο έχει ταλαντωτή κρυστάλλου, ο οποίος ελέγχεται από την θερμοκρασία (Temperature Compensated crystal Oscillator –TCXO) ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη σταθερότητα συχνότητας, αλλά και θύρα σειριακής επικοινωνίας.

Η ομάδα των Oliveira et al. (2017) έκανε χρήση του στοιχείου «XBee Series 2», το οποίο έχει σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί με πρωτόκολλο Zigbee και το οποίο προσαρμόζεται στις ανάγκες της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης καθώς και του χαμηλού κόστους. Η μονάδα αυτή χρειάζεται ελάχιστη ενέργεια για να λειτουργήσει και αποδίδει αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των συνδεδεμένων στο δίκτυο συσκευών. Ο εν λόγω μικροελεγκτής λειτουργεί στο πλαίσιο του ελεύθερου βιομηχανικού, επιστημονικού και ιατρικού (Industrial, Scientific and Medical –ISM) εύρους συχνοτήτων των 2.4GHz.

Η ομάδα των ερευνητών Anupriya et al. (2016) έκανε χρήση του μικροελεγκτή «CC2538», της εταιρείας Texas Instruments, του οποίου η λειτουργία στηρίζεται στο πρότυπο IEEE802.15.4, καθώς και του ολοκληρωμένου CC1200, στο ολοκληρωμένο κύκλωμα πομπού - δέκτη. Ο μικροελεγκτής «CC2538» έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται πολύπλοκες δικτυακές στοίβες, με ασφαλή, ταχεία και αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μέσω IP. Βασίζεται στην αρχιτεκτονική SoC και διαθέτει μνήμη Flash 512K καθώς και ασύρματη διεπαφή IEEE802.15.4. Οι διάφορες λειτουργίες του

μικροελεγκτή ελέγχονται με τη χρησιμοποίηση ενός επεξεργαστή «ARM Cortex M3», με μνήμη RAM 32KB. Ο εν λόγω μικροελεγκτής βρίσκει χρήση σε ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών, όπως τα δίκτυα IEEE802.15.4, η έξυπνη ενέργεια Zigbee, ο έξυπνος φωτισμός, κ.α. Το «CC1200» μεταφέρει δεδομένα στο εύρος συχνοτήτων sub-GHz. Ο μικροελεγκτής «CC2538» και ο πομποδέκτης «CC1200» μπορούν να συζευχθούν διαμέσου των γραμμών SPI, που διαθέτουν, με σειριακή μεταβίβαση των δεδομένων μεταξύ τους. Το ολοκληρωμένο «CC1200» αποτελεί έναν πομποδέκτη που διαθέτει ένα microchip για λειτουργία χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, σε χαμηλή τάση, καθιστώντας το οικονομικά αποδοτικό σε ασύρματη επικοινωνία. Η μονάδα αυτή έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί κυρίως στο εύρος ISM sub-GHz και υποστηρίζει το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4g. Ο έλεγχος των κυρίαρχων λειτουργικών παραμέτρων γίνεται μέσω διεπαφής SPI. Ο εν λόγω πομποδέκτης έχει τη δυνατότητα να παρέχει πολύ υψηλή ευαισθησία δέκτη (-123 dBm στα 1.2kbps και -109dBm στα 50 kbps). Σε βέλτιστη ενεργειακή κατανάλωση μπορεί να ανέλθει μέχρι και τα 1.25 Mbps. Με τον συνδυασμό των δύο αυτών μονάδων απολαμβάνονται τα πλεονεκτήματα του μικροελεγκτή «CC1538» στο πλαίσιο της επεξεργασίας των δεδομένων και του «CC1200» στο πλαίσιο της μεταφοράς των δεδομένων. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των δύο microchip.

Πίνακας 4. Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των microchip CC1538 και CC1200 (Anupriya et al., 2016)

CC2538	CC1200
<ul style="list-style-type: none"> - Μετάδοση σε ενεργή κατάσταση – 24mA - Λήψη σε ενεργή κατάσταση – 20mA - Ευαισθησία - -97dBm - Διαθέτει 32 ακίδες που υποστηρίζουν SPI, UART και I2C συνδέσεις - 32kB RAM, 512/256/128kB μνήμη flash - Εμβέλεια μετάδοσης έως 100m - Εφαρμογές: ευφυή δίκτυα και δίκτυα οικιακής περιοχής, ευφυή συστήματα φωτισμού, αυτοματισμοί κτιρίων, κλπ. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ρεύμα μετάδοσης – 36mA - Ρεύμα λήψης – 2.1mA - Ευαισθησία – 109dBm (στα 50kbps), 123dBm (στα 1.2 kbps) - Ρυθμός δεδομένων έως 1.25Mbps - Συμβατό με το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4g - Περιλαμβάνει 16/32 CRC και τεχνικές “λευκανσης δεδομένων” (whitening techniques) - Εφαρμογές: έξυπνοι μετρητές, βιομηχανική παρακολούθηση, ασύρματα συστήματα ασφαλείας και συναγερμού.

2.3.2 Πύλες δικτύου

Η ομάδα των Rzepecki et al. (2018) έκανε χρήση του συνοριακού δρομολογητή με πρωτόκολλο Thread, ο οποίος αποτελεί μία δικτυακή πύλη μεταξύ του ασύρματου δικτύου Thread και του δικτύου τοπικής περιοχής (Local Area Network –LAN). Η ομάδα χρησιμοποίησε τον συνοριακό δρομολογητή της Nordic Semi. Το εν λόγω σύστημα χρησιμοποιεί τον μικροεπεξεργαστή «Raspberry Pi 3 model B (RPi)» και το ολοκληρωμένο σύνολο προεπισκόπησης ανάπτυξης (Preview Development Kit –PDK) «nRF52840». Ο εν λόγω δρομολογητής ελέγχεται από διανομή Linux OpenWRT. Η συσκευή έχει ενσωματωμένη διεπαφή IEEE 802.15.4 και αναλαμβάνει την μεταφορά των δεδομένων μέσα στο δίκτυο. Η πλακέτα συνδέεται με τον μικρό επεξεργαστή RPi διαμέσου του πρωτοκόλλου Spinel με τη χρησιμοποίηση σύνδεσης USB. Το hardware και το software της πλακέτας αποτελεί μία πλήρη υλοποίηση της στοίβας πρωτοκόλλου Thread. Ο διακομιστής του Πρωτοκόλλου Περιορισμένης Εφαρμογής (Constrained Application Protocol –CoAP) λειτουργεί στον συνοριακό δρομολογητή. Το πρωτόκολλο CoAP δεν απαιτεί μεγάλη μνήμη, τρέχει μέσω UDP και παρέχει αξιοπιστία στο δίκτυο. Εξαιτίας των απαιτητικών συνθηκών λειτουργίας στις οποίες μπορεί να βρεθεί το εν λόγω σύστημα, καθίσταται ζωτικής σημασίας η χρησιμοποίηση του σωστού μηχανισμού επιβεβαιώσεων.

Η ομάδα των ερευνητών Heble et al. (2018) έκαναν χρήση μιας διαδικτυακής πύλης LoRa με στόχο την αποφυγή χρησιμοποίησης καλωδίων στα συστήματα έξυπνης γεωργίας. Η εν λόγω δικτυακή πύλη LoRa έχει χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και μεγάλης εμβέλειας τεχνική διαμόρφωσης σήματος. Ως δικτυακή πύλη χρησιμοποιήθηκε η αναπτυξιακή πλακέτα LoRa «Feather 32u4» της εταιρείας Adafruit. Η εν λόγω αναπτυξιακή πλακέτα διαθέτει τον πομποδέκτη LoRa «SX1276» της εταιρείας Semtech, ο οποίος λειτουργεί στο εύρος συχνοτήτων ISM, στα 868 MHz. Θεωρείται από τους ερευνητές πως με την εκτεταμένη διάδοση της χρησιμοποίησης του πρωτοκόλλου LoRa θα ελαττωθεί πολύ περισσότερο το απαιτούμενο κεφάλαιο για την κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος.

Η ομάδα των ερευνητών Ashifuddin Mondal & Rehena (2018) έκαναν χρήση ενός μικροεπεξεργαστή Arduino για την ασύρματη αποστολή δεδομένων των μετρούμενων από αισθητήρες παραμέτρων του πεδίου στον εξυπηρετητή νέφους της πλατφόρμας ThingSpeak. Για την ασύρματη επικοινωνία χρησιμοποίησαν το στοιχείο Wi-Fi «ESP8266», το οποίο συνδέεται στο δίκτυο μέσω συγκεκριμένης δικτυακής πύλης για την επικοινωνία του με το νέφος. Το εν λόγω στοιχείο μπορεί να παρέχει πρόσβαση σε οποιονδήποτε μικροελεγκτή σε ασύρματα δίκτυα, ενώ διαθέτει ενσωματωμένο έναν ιδιαίτερο ισχυρό επεξεργαστή με δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων, ο οποίος παρέχει την δυνατότητα αποστολή στον συλλεγόμενων δεδομένων σε απομακρυσμένους εξυπηρετητές.

Κεφάλαιο 3. Τεχνολογίες δικτύων στην έξυπνη γεωργία

3.1 Πρωτόκολλα δικτύωσης

3.1.1 Πρωτόκολλα δικτύωσης μικρής εμβέλειας

3.1.1.1 RFID

Το RFID (Αναγνώριση Μέσω Ραδιοσυχνοτήτων - Radio Frequency IDentification) αποτελεί μία συνεχώς εξελισσόμενη τεχνολογία, η οποία υιοθετεί την χρησιμοποίηση ραδιοκυμάτων για τον εντοπισμό αντικειμένων. Σε ένα παθητικό σύστημα RFID η κεραία ετικετών εντοπίζει την ενέργεια από το πεδίο ραδιοκυμάτων που παράγεται από τον αναγνώστη RFID. Ένας μικροεπεξεργαστής και ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα ραδιοσυχνοτήτων ανατροφοδοτεί με δεδομένα τον αναγνώστη. Η εν λόγω τεχνολογία αποτελεί μία ενδεχόμενη λύση για την υλοποίηση ενός κόμβου αισθητήρων σε περιπτώσεις που οι μπαταρίες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η τεχνολογία RFID στηρίζεται στην αρχή της επαναληπτικής ανταπόκρισης ραδιοσυχνοτήτων (radio recurrence correspondence), η οποία λαμβάνει χώρα με την μετάδοση δεδομένων μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και ολοκληρώνεται με την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την πηγή, ο αντίκτυπος της οποίας μπορεί να εμφανιστεί στο σημείο λήψης, το οποίο ενδέχεται να απέχει μεγάλη απόσταση από την πηγή, η οποία με την σειρά της αναγνωρίζει και μεταδίδει τα δεδομένα. Σε κάθε αυτόνομο σύστημα (λ.χ. αντικείμενο, ζωντανό οργανισμό, κλπ) καταχωρείται ένα μοναδικό νούμερο. Ένα σύστημα RFID παρέχει την δυνατότητα ταυτοποίησης ενός επιθυμητού αντικειμένου χωρίς την ανάγκη για άμεση επαφή ή χωρίς την αναγκαιότητα της παραμονής του αντικειμένου σε οπτική γωνία. Αυτό συμβάλλει στην ταχύτερη συντέλεση της διαδικασίας, εφόσον δεν προκύπτει ανάγκη τοποθέτησης της ετικέτας ή του αναγνώστη σε συγκεκριμένο σημείο. Το RFID αποτελεί μία μορφή ασύρματης επικοινωνίας που κάνει χρήση ραδιοκυμάτων για τον προσδιορισμό της θέσης και την παρακολούθηση διαφόρων αντικειμένων. Το σύστημα χρησιμοποιεί ετικέτες και αναγνώστες τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ραδιοσυχνοτήτων. Οι τεχνολογίες RFID χαμηλής συχνότητας

συνεπάγονται και μικρή εμβέλεια εκπομπής, ενώ οι τεχνολογίες RFID υψηλής συχνότητας συνεπάγονται υψηλότερη εμβέλεια εκπομπής. Τα στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται ένα σύστημα RFID περιγράφονται παρακάτω (Λαλούσης, 2019):

- Ετικέτα RFID (αναμεταδότης). Ο κυρίαρχος ρόλος της ετικέτας RFID είναι η εκπομπή και η λήψη ραδιοσυχνοτήτων με σκοπό την αλληλογραφία. Η ετικέτα ενδέχεται να είναι ενεργού ή παθητικού τύπου. Στην ενεργού τύπου ετικέτα βρίσκεται ενσωματωμένο ένα κύκλωμα ελέγχου, ενώ στην παθητικού τύπου ετικέτα αξιοποιείται η ισχύς των ραδιοσυχνοτήτων που εκπέμπει ο αναγνώστης RFID. Για τον λόγο αυτό, οι παθητικού τύπου ετικέτες είναι οικονομικότερες συγκριτικά με τις ενεργού τύπου ετικέτες. Οι ετικέτες RFID είναι διαθέσιμες στο εμπόριο σε πλήθος σχημάτων, μεγεθών και δυνατοτήτων.
- Αναγνώστης RFID. Ο ρόλος του αναγνώστη είναι να διαβάσει ή να εγγράφει δεδομένα στην ετικέτα. Όταν ένας αναμεταδότης εισέρχεται στην ηλεκτρομαγνητική περιοχή του αναγνώστη, αυτός ανιχνεύει το σήμα ενεργοποίησης που προέρχεται από τον αναγνώστη. Ο αναγνώστης αποκωδικοποιεί τις πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες στο microchip του αναμεταδότη και κάνει μετάδοση των πληροφοριών αυτών σε ένα κεντρικό σύστημα.
- Κεραία RFID. Η κεραία απαρτίζεται από ένα πηνίο και από το αντίστοιχο δίκτυο. Ρόλος της είναι η εκπομπή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που παράγονται από τον αναγνώστη και η λήψη των σημάτων ραδιοσυχνότητας από τον αναμεταδότη. Ένα σύστημα RFID μπορεί να σχεδιαστεί με τρόπο τέτοιο ώστε είτε το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο να διατηρείται συνεχόμενα είτε αυτό να ενεργοποιείται από αισθητήρες.

3.1.1.2 NFC

Η επικοινωνία κοντινού πεδίου (Near Field Communication –NFC) αποτελεί μία τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας κοντινής εμβέλειας, η οποία στηρίζεται στην αρχιτεκτονική της τεχνολογίας RFID. Η NFC αποτελεί έναν συνδυασμό των τεχνολογιών RFID και της κινητής τηλεφωνίας, η οποία βασίζεται στο φαινόμενο της μαγνητικής επαγωγής για την επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ δύο συσκευών, όταν αυτές διαθέτουν την εν λόγω τεχνολογία και βρίσκονται σε μικρή μεταξύ τους απόσταση. Η εν λόγω τεχνολογία ξεκίνησε ως μία απλή συγχώνευση των τεχνολογιών RFID και δικτύου, εντούτοις έχει πλέον μετατραπεί σε ένα ραγδαία αναπτυσσόμενο σύνολο τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας κοντινής εμβέλειας (συνηθέστερα έως και 10 cm). Η τεχνολογία NFC έχει σχεδιαστεί ώστε να παρέχει ασφαλή επικοινωνία με μεταφορά μικρού όγκου δεδομένων μεταξύ δύο συσκευών, λειτουργώντας σε ένα εύρος συχνοτήτων κοντά στα 13.56 MHz. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανταλλαγή δεδομένων, για την πρόσβαση σε περιεχόμενο και για την χρήση υπηρεσιών μεταξύ δύο συσκευών που διαθέτουν την τεχνολογία αυτή, υπό την προϋπόθεση ότι οι δύο αυτές συσκευές έχουν μεγάλη εγγύτητα μεταξύ τους, εξαλείφοντας την ανάγκη χρησιμοποίησης καλωδίου για την επίτευξη της επικοινωνίας μεταξύ των δύο συσκευών. Η τεχνολογία NFC στηρίζεται σε ένα πρότυπο εκκίνησης και στόχου, στο πλαίσιο του οποίου ο εκκινητής παράγει ένα μικρής εμβέλειας μαγνητικό πεδίο που τροφοδοτεί τον στόχο, εξαλείφοντας έτσι την απαίτηση για τροφοδοσία του στόχου από κάποια πηγή ενέργειας. Αυτή η μορφή επικοινωνίας ονομάζεται διαφορετικά και «παθητική επικοινωνία» και υιοθετείται με στόχο την ανάγνωση και την εγγραφή πληροφοριών σε μικρού μεγέθους και οικονομικές RFID ετικέτες, στα 13.56 MHz. Η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων στο πλαίσιο της τεχνολογίας NFC παρουσιάζει διακύμανση στο εύρος 106 - 424 kbps (Bojan et al., 2014; Shobha et al., 2016).

Κατά την λειτουργία του συστήματος NFC, ένας παλμός αποστέλλεται στο NFC microchip της συσκευής, ο ηλεκτρισμός περνάει μέσω του NFC microchip και αυτό δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Εξαιτίας του παραγόμενου αυτού μαγνητικού πεδίου, ένα έτερο μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται μέσω επαγωγής σε μία άλλη συσκευή η οποία δεν διαθέτει δική της τροφοδοσία (αναμεταδότης). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή

ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τον αναμεταδότη, το οποίο έρχεται σε αλληλεπίδραση με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που παράγεται από την τροφοδοτούμενη συσκευή, που φέρει το NFC microchip (Shobha et al., 2016).

Στην τεχνολογία NFC η επικοινωνία λαμβάνει χώρα είτε ενεργητικά είτε παθητικά. Η ενεργή συσκευή παράγει το αρχικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και τροφοδοτείται αυτόνομα από ρεύμα, ενώ η παθητική συσκευή τροφοδοτείται μέσω ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής από την ενεργή συσκευή. Οι συσκευές NFC έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν είτε σε λειτουργία ανάγνωσης και εγγραφής, είτε σε λειτουργία διομότιμης επικοινωνίας, είτε σε λειτουργία εξομοίωσης κάρτας. Οι εν λόγω τρόποι λειτουργίας στηρίζονται στα πρότυπα ISO/IEC 18092 NFCIP-1 και ISO/IEC 14443 (Shobha et al., 2016).

3.1.1.3 Bluetooth / BLE

Το Bluetooth αποτελεί ένα τεχνολογικό πρότυπο ασύρματων επικοινωνιών το οποίο στηρίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.1 για την μεταφορά δεδομένων μέσω ραδιοκυμάτων μικρού μήκους κύματος, σε μικρές σχετικά αποστάσεις (8.0 - 10.0 m), με σχετικά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Η διαχείριση της τεχνολογίας Bluetooth γίνεται από την ομάδα ειδικών συμφερόντων Bluetooth (Special Interest Group –SIG), η οποία διαθέτει περισσότερα από 25,000 μέλη στους τομείς της τηλεπικοινωνίας, της πληροφορικής, της δικτύωσης και των ηλεκτρονικών συσκευών. Η χρησιμοποίηση ραδιοκυμάτων μικρού μήκους κύματος συντελεί στην ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Λειτουργεί σε ένα εύρος συχνοτήτων 2.4 - 2.485 MHz, με ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων της τάξης του 1 Mbps, υιοθετώντας το σύστημα μετάδοσης αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplex -TDD) και παρέχοντας τη δυνατότητα σύνδεσης πολλών συσκευών (Λαλούσης, 2019).

Η τεχνολογία Bluetooth ενδείκνυται για την εφαρμογή της συστήματα έξυπνης Γεωργίας εξαιτίας της χαμηλής ενεργειακής της κατανάλωσης καθώς και της χαμηλής δικτυακής καθυστέρησης που παρουσιάζει. Εξαιτίας της ευρείας χρήσης της τεχνολογίας Bluetooth, οι συσκευές που την ενσωματώνουν μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο

της έξυπνης γεωργίας και είναι εύκολα προσβάσιμες στο εμπόριο. Επίσης, η εν λόγω τεχνολογία διαθέτει το συγκριτικό πλεονέκτημα ότι είναι άμεσα συμβατή με τα έξυπνα κινητά, επιτρέποντας τη χρησιμοποίησή της από τους χρήστες χωρίς την απαίτηση ύπαρξης κάποιου προσαρμογέα δικτύου ή κάποιας δικτυακής πύλης (Λαλούσης, 2019).

Το BLE αποτελεί ένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας στο οποίο σχεδιάστηκε το 2010 στο πλαίσιο της προδιαγραφής Bluetooth 4.0. Διαθέτει τα απαραίτητα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για την πλειονότητα των εφαρμογών IoT –χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, χαμηλό κοστολόγιο και μικρή εμβέλεια– ενώ αξιοποιείται ευρέως σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος ελέγχου και παρακολούθησης (βιομηχανικοί και οικιακοί αυτοματισμοί, ψυχαγωγία). Το BLE υιοθετεί τη χρησιμοποίηση ραδιοκυμάτων μικρής εμβέλειας, καταναλώνοντας ελάχιστη ισχύ, με στόχο την μακροβιότερη λειτουργία (ακόμη και για σειρά ετών) των συσκευών συγκριτικά με προηγούμενες εκδόσεις Bluetooth. Λειτουργεί σε ένα εύρος ισχύος εκπομπής 0.01 - 10.0 mW (Λαλούσης, 2019).

Το BLE λειτουργεί στο εύρος ISM, στα 2.4 GHz και χρησιμοποιεί 40 κανάλια με απόσταση συχνότητας 2 MHz μεταξύ των καναλιών. Το BLE ταξινομεί τα δεδομένα σε μικρές μονάδες τις οποίες εν συνεχεία μεταδίδει μέσω επικοινωνίας ραδιοκυμάτων. Λειτουργεί σε πολύ γρήγορες συνδέσεις και ως εκ τούτου ο χρόνος μεταφοράς των δεδομένων ελαχιστοποιείται. Οι συσκευές που χρησιμοποιούν την τεχνολογία BLE παραμένουν σε λειτουργία αναμονής για το σύνολο του χρονικού διαστήματος λειτουργίας του, εκτός από εκείνο το χρονικό διάστημα κατά το οποίο γίνεται η ανταλλαγή των δεδομένων (Λαλούσης, 2019).

3.1.1.4 Zigbee

Το Zigbee αποτελεί μία προδιαγραφή για ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής (Wireless Personal Area Networks –WPAN) η οποία στηρίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και λειτουργεί στις συχνότητες 868 MHz και 2.4 GHz, καθώς και στο εύρος συχνοτήτων 902 - 928 MHz. Το Zigbee αποτελεί ένα διεθνές πρότυπο το οποίο σχεδιάστηκε και συντηρείται από τον οργανισμό «Zigbee Alliance», ο οποίος μετρά

περισσότερες από 70 εταιρείες – μέλη. Καθορίζει τον τρόπο ασφαλούς και αξιόπιστης επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών που είναι συνδεδεμένες σε ασύρματα δίκτυα χαμηλού ρυθμού μετάδοσης προσωπικής περιοχής (Low-Rate Wireless Personal Area Networks – LR-WPAN), στη βάση του προτύπου IEEE 802.15.4. Σκοπός του Zigbee είναι η ανάπτυξη εφαρμογών ανίχνευσης και ελέγχου στο πλαίσιο συστημάτων IoT (λ.χ. έξυπνη γεωργία, βιομηχανικοί αυτοματισμοί, κ.α.). Το Zigbee εκτός από το επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσου (MAC) συμπληρωματικά καθορίζει τα επίπεδα δικτύου και εφαρμογής, καθιστώντας την ασύρματη επικοινωνία ιδιαίτερα αποτελεσματική εξαιτίας της τοπολογίας δικτύου πλέγματος η οποία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στο πλαίσιο του σχεδιασμού των δικτύων. Το Zigbee υλοποιεί ασύρματη επικοινωνία χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και χαμηλής ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων (20 - 250 kbps) σε δίκτυα WPAN, στα οποία οι συσκευές τοποθετούνται σε μεταξύ τους αποστάσεις 10 - 75 m. Το πλήθος των κόμβων σε ένα δίκτυο Zigbee μπορεί να ανέλθει περίπου στους 65,000 (Sahitya et al., 2016).

Οι συσκευές Zigbee κατηγοριοποιούνται σε τρεις τύπους - συντονιστής, δρομολογητής και τελική συσκευή- με κάθε μία να εκτελεί ξεχωριστές λειτουργίες (Sahitya et al., 2016):

- **Συντονιστής.** Έχει την δυνατότητα επικοινωνίας και ελέγχου του συνόλου των συσκευών που είναι συνδεδεμένες στο ασύρματο δίκτυο. Η εργασία του συντονιστή είναι η συλλογή δεδομένων από το σύνολο των κόμβων, τα οποία έχει την δυνατότητα να αποθηκεύει σε μία βάση δεδομένων, καθώς και η ανάθεση του αναγνωριστικού δικτύου προσωπικής περιοχής.
- **Δρομολογητής.** Έχει τη δυνατότητα συλλογής και διαβίβασης των δεδομένων από τους κόμβους, καθώς και της επικοινωνίας με τον συντονιστή αλλά και με την τελική συσκευή, συνεισφέροντας έτσι στην ανάπτυξη του δικτύου και στην δρομολόγηση των δεδομένων μέσα σε αυτό. Επίσης έχει την δυνατότητα ενίσχυσης της ισχύος του σήματος.

- **Τελική συσκευή.** Τροφοδοτείται από αυτόνομη πηγή και έχει την δυνατότητα υποστήριξης λειτουργιών χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. Έχει την δυνατότητα επικοινωνίας μονάχα με τον δρομολογητή αλλά όχι με τον συντονιστή ή με άλλη τελική συσκευή. Μεταδίδει τα δεδομένα στον δρομολογητή, τα οποία μετά την συλλογή τους προωθούνται στον συντονιστή ή σε άλλο δρομολογητή.

Ένα δίκτυο WPAN Zigbee απαρτίζεται από μονάχα έναν συντονιστή και έναν ή περισσότερους δρομολογητές ή τελικές συσκευές. Κάθε συσκευή έχει μοναδική και εξατομικευμένη διεύθυνση και PAN ID. Τρεις τύποι τοπολογίας συναντώνται στα δίκτυα Zigbee –Αστέρας, Συστάδα Δένδρου (Cluster Tree) και Πλέγμα (Sahitya et al., 2016).

Η χρήση του Zigbee μπορεί να υιοθετηθεί εύκολα για την παρακολούθηση των καλλιεργειών στο πλαίσιο της έξυπνης γεωργίας, εξαιτίας της χρησιμοποίησης μεγάλου πλήθους αισθητήρων οι οποίοι τροφοδοτούνται από μπαταρία. Οι κόμβοι αισθητήρων Zigbee σχηματίζουν ένα κλιμακώσιμο και χαμηλής ισχύος δίκτυο, συνηθέστερα μέσω της χρησιμοποίησης τοπολογίας πλέγματος, το οποίο λειτουργεί σε συχνότητα 2.4 GHz. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες, όπως η στάθμη των υδάτων, η θερμοκρασία και η εδαφική υγρασία, συλλέγονται συνεχώς από τον αγρό και αποστέλλονται σε έναν σταθμό βάσης διαμέσου μιας δικτυακής πύλης (Deerika & Rajapirian, 2016).

3.1.1.5 Thread

Το Thread αποτελεί ένα ανοιχτό πρότυπο για αξιόπιστη, κλιμακούμενη, οικονομική και χαμηλής ενεργειακής απαίτησης, ασύρματη επικοινωνία από σημείο σε σημείο, η οποία ξεκίνησε από τον οργανισμό Thread Group. Το Thread βασίζεται στο πρωτότυπο επικοινωνίας IEEE 802.15.4, το οποίο είναι σχεδιασμένο για χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης WPAN δίκτυα, τα οποία λειτουργούν σε ταχύτητες 250 kbps και στο εύρος συχνοτήτων 2.4 GHz. Στηρίζεται στην τεχνολογία δικτύου πλέγματος χαμηλής ισχύος IPv6, η οποία έχει την δυνατότητα να διαχειρίζεται μέχρι και 250 κόμβους, με υψηλό βαθμό κρυπτογράφησης και ταυτοποίησης. Ένα πλεονέκτημα που διαθέτει η τεχνολογία

IPv6 είναι η αμεσότητα της επικοινωνίας με εξωτερικούς εξυπηρετητές, υπηρεσίες νέφους, προσωπικούς υπολογιστές ή κινητά τηλέφωνα, που δίνει τη δυνατότητα για την εύκολη διασύνδεση του δικτύου πλέγματος Thread με εταίρα δίκτυα, όπως τοπικά δίκτυα, αλλά και με το διαδίκτυο. Ακόμη, το δίκτυο πλέγματος Thread δεν αφήνει ανοιχτά ενδεχόμενα αποτυχίας εξαιτίας της αυτοεπιδιορθωτικής ικανότητάς του σε περίπτωση οποιουδήποτε προβλήματος, κάνοντας μεταφορά των δεδομένων μέσω άλλων διαθέσιμων διαύλων. Παρά την μη παροχή επιπέδου εφαρμογής, το Thread διαθέτει παροχή βασικών υπηρεσιών εφαρμογών, όπως η ανταλλαγή μηνυμάτων μέσω UDP και τα μηνύματα πολλαπλής διανομής (multi-cast) και παρέχει την δυνατότητα χρησιμοποίησης επιπέδων εφαρμογών που επιτρέπουν την αλληλεπίδραση των συσκευών μέσω διαδικτύου (λ.χ. UDP, πρωτόκολλο CoAp) (Azoidou et al., 2018; Rzepecki et al., 2018; Vangimalla & El-Sharkawy, 2018).

Η μελέτη περίπτωσης που παρουσίασε η ομάδα των ερευνητών Rzepecki et al. (2018) απέδειξε πως η συνδεσιμότητα πλέγματος του Thread αποτελεί μία αξιόπιστη λύση όσον αφορά σε συστήματα μετρήσεων χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, χαμηλού κόστους και μη-πραγματικού χρόνου. Το ελάττωμα της εν λόγω τεχνολογίας εντοπίζεται στη λειτουργία του εύρους συχνοτήτων 2.4 GHz. Τα σήματα του εν λόγω μήκους κύματος υπόκεινται εύκολα σε παραμόρφωση από άλλες συσκευές που κάνουν χρήση ραδιοσυχνοτήτων και βρίσκονται σε κοντινή απόσταση. Επιπρόσθετα, το εύρος συχνοτήτων των 2.4 GHz χάνει την ένταση του όταν διέρχεται διαμέσου κοινών δομικών υλικών, όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα.

3.1.1.6 Z-Wave

Το Z-Wave αποτελεί ένα ιδιωτικό πρωτόκολλο, ιδιοκτησία της Sigma Designs, το οποίο προωθείται από την κοινοπραξία «Z-Wave Alliance». Το Z-Wave αποτελεί και αυτό, με την σειρά του, μία πρωτοποριακή τεχνολογία στην ασύρματη επικοινωνία μικρής εμβέλειας, αφού διαθέτει μία αξιόπιστη μέθοδο για χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης ασύρματη ταυτόχρονη επίβλεψη μεγάλου πλήθους συσκευών. Αποτελεί ένα ασύρματο πρωτόκολλο το οποίο αφορά κυρίως σε συστήματα IoT, με βέλτιστη εφαρμογή σε

συστήματα οικιακών αυτοματισμών. Ένα δίκτυο Z-Wave κάνει χρήση ενός ελεγκτή με σκοπό τον έλεγχο όλων των ασύρματων συσκευών. Ο εν λόγω ελεγκτής έχει την δυνατότητα να λειτουργεί παράλληλα ως δικτυακή πύλη που παρέχει σε έναν χρήστη την δυνατότητα να ελέγχει Z-Wave συσκευές από το smartphone ή από το laptop του, μέσω internet ή μέσω κάποιου τοπικού δικτύου (Linh An & Kim, 2018).

Το Z-Wave δεν αποτελεί ένα πρωτόκολλο το οποίο είναι συμβατό με IP, όπως το Wi-Fi. Ως εκ τούτου, οι Z-Wave συσκευές δεν έχουν την δυνατότητα της απευθείας σύνδεσης στο διαδίκτυο ή σε άλλες ευρείας χρήσης συσκευές (smartphones, laptops, κ.α.). Για την υπερπήδηση αυτού του εμποδίου, το Z-Wave επιστρατεύει ως λύση την χρησιμοποίηση μιας διαδικτυακής πύλης για την προώθηση πληροφοριών από το δίκτυο Z-Wave προς τα δίκτυα IP και αντίστροφα (Z/IP). Η δικτυακή πύλη Z/IP αποτελεί μία τεχνολογία firmware η οποία παρέχει την δυνατότητα σε οποιαδήποτε συνδεδεμένη σε ένα δίκτυο Z-Wave συσκευή να καθίσταται άμεσα προσβάσιμη διαμέσου του Internet, επικοινωνώντας μέσω IP (Linh An & Kim, 2018).

Το πρωτόκολλο Z-Wave λειτουργεί σε ένα εύρος συχνοτήτων μικρότερων του 1.0 GHz, κοντά στα 900 MHz. Έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει, προσεγγιστικά, έως και 232 δικτυακούς κόμβους. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο βοηθητικός δέκτης συχνής ακρόασης (Frequently Listening Receiver Slave –FLiRS) επιτυγχάνει ενεργειακή εξοικονόμηση η οποία επιτρέπει επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης, χρησιμοποιώντας μοναδική τεχνολογία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, και ως εκ τούτου μία συσκευή μπορεί να μεταβαίνει μεταξύ κατάστασης ύπνου και κατάστασης λειτουργίας μέσα σε χρονικό διάστημα 1 δευτερολέπτου. Για τον λόγο αυτό, τα δίκτυα Z-Wave συνιστούν κατάλληλους υποψηφίους για εφαρμογές IoT μικρής εμβέλειας (Popli et al., 2019).

3.1.2 Πρωτόκολλα δικτύωσης μεγάλης εμβέλειας

3.1.2.1 Ασύρματες τεχνολογίες κινητών επικοινωνιών

Στο παρελθόν, η πλειονότητα των εφαρμογών που απαιτούσαν χαμηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε μεγάλο εύρος έκαναν χρήση των κυψελοειδών δικτύων. Ο συγκεκριμένος τύπος δικτύου παρέχει στους χρήστες πλήθος υπηρεσιών. Πριν από την εμφάνιση τεχνολογιών δικτύου ευρείας ζώνης και χαμηλής ισχύος (Low-Power Wide-Area Network –LPWAN), τα κυψελοειδή δίκτυα παρείχαν τις τεχνολογίες GSM, GPRS, EDGE, 3G & 4G. Σήμερα, οι τεχνολογίες 3G & 4G έχουν στόχο την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης και την υψηλών ποσοστών μεταφορά δεδομένων για εφαρμογές πολυμέσων στους χρήστες. Το GPRS (γνωστή και υπό την ονομασία «2.5G») αποτελεί μία τεχνολογία στο πλαίσιο των τηλεπικοινωνιών, η οποία προσφέρει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων 56 - 114 kbps, με εμβέλεια μέχρι και 26 km. Τα στοιχειώδη μειονεκτήματα της τεχνολογίας GPRS αποτελούν η μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση και το υψηλό κόστος συντήρησης. Αντίθετα, τα δίκτυα LPWAN προσφέρουν μεγάλης εμβέλειας επικοινωνία (μέχρι και 50 km) με ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση και πολύ χαμηλότερο κόστος συντήρησης. Ακόμη, η δικτυακή χωρητικότητα του GPRS περιορίζεται στο πλήθος των διαθέσιμων καναλιών επικοινωνίας, σε αντίθεση με τα δίκτυα LPWAN, τα οποία επιτυγχάνουν βελτιστοποίηση των διαθέσιμων καναλιών που καταχωρούνται σε μία συγκεκριμένη διαδικτυακή πύλη, ώστε να προσφέρουν κάλυψη σε ένα πολύ μεγάλο πλήθος τελικών συσκευών από μία μονάχα δικτυακή πύλη. Από μία ευρύτερη σκοπιά, τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των δικτύων LPWAN, ως προς τα δίκτυα GPRS, αποτελούν οι ενεργειακή απόδοση, η ευρύτητα της κάλυψης και η υψηλή κλιμακωσιμότητα για χαμηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων (Λαλούσης, 2019).

Η κάλυψη ευρείας περιοχής, που προσφέρουν τα κυψελοειδή δίκτυα, αποτελεί τον βασικό λόγο της ευρείας υιοθέτησης τεχνολογιών 2G & 3G, όσον αφορά στην επικοινωνία μεταξύ μηχανών (Machine to Machine –M2M). Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες κυψελοειδής τεχνολογίες δεν μπορούν να επιτύχουν ικανοποιητικά υψηλή ενεργειακή απόδοση ώστε να προσφέρουν μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταριών. Η

πολυπλοκότητα και το κοστολόγιο των συσκευών που συνεργάζονται με κυψελοειδή δίκτυα είναι υψηλού βαθμού, εξαιτίας της δυνατότητάς τους να αντιμετωπίζουν πολύπλοκες κυματομορφές, υπηρεσίες φωνής, δεδομένα υψηλού ρυθμού μετάδοσης και κείμενο. Οι τεχνολογίες 3G «Universal Mobile Telecommunications Systems» (UMTS) και «High Speed Packet Access» (HSPA) είναι ενεργειακά λιγότερο αποδοτικές και περισσότερο κοστοβόρες, συγκριτικά με τις τεχνολογίες 2G. Οι δυνατότητες των τεχνολογιών 3G είναι πολύ μεγαλύτερες από τις τυπικές απαιτήσεις μεγάλου πλήθους εφαρμογών IoT με χαμηλές προδιαγραφές και, συνεπώς, προτιμώνται σπανιότερα για τέτοιου είδους εφαρμογές. Εντούτοις οι τεχνολογίες 3G έχουν αποδειχθεί αρκετά δημοφιλείς σε πλήθος απαιτητικών εφαρμογών M2M, όπως εκείνες που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, εξαιτίας του μεγάλου εύρους απαιτούμενων ταχυτήτων δεδομένων (Λαλούσης, 2019).

Οι εφαρμογές έξυπνης γεωργίας αποτελούν έναν ταχέως εξελισσόμενο κλάδο στις σύγχρονες κοινωνίες. Η χρησιμοποίηση των ήδη υπάρχοντων δικτύων 3G & 4G αποτελεί ένα υπολογίσιμο πλεονέκτημα στο πλαίσιο της έξυπνης γεωργίας. Επιτυγχάνει εξοικονόμηση χρόνου, όσον αφορά στην εγκατάσταση και στην ρύθμιση των συσκευών, ενώ παράλληλα συμβάλλει στην ολοκληρωμένη ανάπτυξη των εφαρμογών του IoT στον τομέα της γεωργίας (Λαλούσης, 2019).

Όταν το κύριο ζήτημα σε μία εφαρμογή είναι η κάλυψη ευρείας περιοχής, οι τεχνολογίες μεγάλης εμβέλειας αποτελούν την ιδανική λύση. Παράλληλα, όταν υπάρχει απαίτηση για μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων και επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, το «Long Term Evolution» (LTE), οι τεχνολογίες 4G, καθώς και οι μελλοντικές εκδόσεις της, αποτελούν το πιο κατάλληλο πρότυπο στο πλαίσιο των εφαρμογών γεωργίας ακριβείας, έστω και αν η διαθεσιμότητα τους δεν μπορεί να εξασφαλιστεί σε αγροτικές περιοχές. Οι ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων στα δίκτυα 4G είναι της τάξης των 100 Mbps. Οι χρήστες μπορούν εύκολα και ασφαλώς να χρησιμοποιούν smartphones που λειτουργούν σε δίκτυα 4G για συστήματα πληροφοριών και γεωργικές εφαρμογές διαδικτύου. Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο των δικτύων 4G περιλαμβάνουν την πολυπλεξία ορθογώνιας διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing –OFDM), το λογισμικό ραδιοσυστημάτων, την έξυπνη

κεραία, την μέθοδο πολλαπλών εισόδων και εξόδων (Multi-Input Multi-Output - MIMO) και τα ασύρματα δίκτυα IP (Λαλούσης, 2019).

3.1.2.2 Narrow Band Internet of Things – NB-IoT

Το Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) αποτελεί μία τεχνολογία στενής ζώνης, η οποία σχεδιάστηκε από την κοινοπραξία 3GPP και διατέθηκε στο πλαίσιο του Release-13, περί τα μέσα του 2016. Είναι μία καινοτόμα τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης η οποία έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης στο πρότυπο LTE, στο πλαίσιο της οποίας έχει αφαιρεθεί η παράδοση (handover), η συνένωση παρόχων (carrier aggregation), οι μετρήσεις παρακολούθησης ποιότητας καναλιού και η διπλή συνδεσιμότητα. Το NB-IoT λειτουργεί στις ίδιες συχνότητες που χρησιμοποιεί το LTE και κάνει χρησιμοποίηση των διαμορφώσεων QPSK και BPSK. Αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη μαζική τεχνολογία ευρείας ζώνης και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης (Low-Power Wide-Area -LPWA) για την συλλογή δεδομένων στο πλαίσιο εφαρμογών χαμηλού ρυθμού δεδομένων. Το NB-IoT έχει στόχο την ευελιξία ανάπτυξης, την αύξηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών, το χαμηλό κόστος, την απλούστευση των συσκευών, την υποστήριξη μεγάλου πλήθους συσκευών χαμηλών ρυθμών μεταφοράς δεδομένων καθώς και την επέκταση της κάλυψης του σήματος. Το NB-IoT έχει σχεδιαστεί στη βάση των λειτουργιών του LTE, εντούτοις έχουν αφαιρεθεί αρκετές λειτουργίες, με στόχο την διατήρηση αυτού του προτύπου όσο το δυνατόν απλούστερο, για την ελάττωση του κόστους των χρησιμοποιούμενων συσκευών καθώς και για την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης (Λαλούσης, 2019).

Το NB-IoT δεν είναι συμβατό με το δίκτυο 3G, εντούτοις μπορεί να συνεργάζεται με GSM, GPRS και LTE. Το NB-IoT μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μία απλή αναβάθμιση λογισμικού, ανώτερα από την υπάρχουσα υποδομή LTE. Για την λειτουργία του, απαιτεί ένα εν ενεργεία υφιστάμενο κυψελοειδές δίκτυο και ως εκ τούτου δεν υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησής του σε απομακρυσμένες περιοχές. Ο σχεδιασμός του φυσικού επιπέδου, του επιτρέπει να ταιριάζει σε εύρος συχνοτήτων 200 kHz, το οποίο χρησιμοποιείται εξίσου από την ανερχόμενη και από την κατεχόμενη ζεύξη. Αυτό

επιτρέπει στο NB-IoT να αναπτύσσεται αυτόνομα στο σήμα του GSM και του LTE εντός ζώνης (in-band) ή στην ζώνη φύλαξης (guard-band). Το NB-IoT έχει στόχο την κάλυψη 164 dB και την εξυπηρέτηση μέχρι και 50,000 συσκευών ανά κυψέλη, με δυνατότητα κλιμάκωσης της υπάρχουσας χωρητικότητας ανάλογα με την προσθήκη μεγαλύτερου πλήθους φερόντων NB-IoT. Το NB-IoT υιοθετεί πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiple Access –FDMA) μονού φέροντος, σε ανερχόμενη ζεύξη, και OFDMA σε κατεχόμενη ζεύξη. Η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων είναι της τάξης των 250 kbps στο πλαίσιο της πολυτονικής κατεχόμενης επικοινωνίας και της τάξης των 20 kbps στο πλαίσιο της μονοτονικής ανερχόμενης επικοινωνίας. Για απώλεια σύζευξης 164 dB, η ασύρματη επικοινωνία με τη χρησιμοποίηση του NB-IoT έχει την δυνατότητα να παρατείνει την διάρκεια ζωής των μπαταριών έως και 10 έτη, όταν η κατά μέσο όρο μετάδοση δεδομένων είναι της τάξης των 200 bytes/day (Λαλούσης, 2019).

3.1.2.3 Wi-Fi

Ένα ασύρματο δίκτυο τοπικής περιοχής (Wireless Local Area Network –WLAN ή Wi-Fi) βασισμένο στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.11, αποτελεί ένα σύστημα ανταλλαγής δεδομένων το οποίο έχει σχεδιαστεί να παρέχει πρόσβαση στο δίκτυο ανεξαρτήτως της θέσης, με τη χρησιμοποίηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του φάσματος των ραδιοκυμάτων. Στον τομέα της γεωργίας, το Wi-Fi παρέχει την δυνατότητα ασύρματης σύνδεσης για την άντληση δεδομένων από ποικίλους αισθητήρες πεδίου, εφόσον ο συγκεκριμένος τύπος ασύρματης σύνδεσης είναι πολύ απλούστερος και εύκολος στην εγκατάσταση και στην ρύθμιση. Σε γενικές γραμμές, το Wi-Fi αποτελεί μία από τις βασικότερες μορφές ασύρματης δικτύωσης σε δίκτυα προσωπικής περιοχής. Το Wi-Fi έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την παροχή υψηλού ρυθμού ανταλλαγής δεδομένων (έως και 150 Mbps), με πάρα πολύ μικρή καθυστέρηση, σε ένα τοπικό δίκτυο (έως 100 m). Το Wi-Fi παρέχει μεγάλη αποτελεσματικότητα στην μετάδοση ροής δεδομένων (streaming) και δεδομένων πολυμέσων. Εντούτοις, η εν λόγω τεχνολογία είναι αρκετά δαπανηρή σε όρους ενεργειακής κατανάλωσης, αντίθετα με τις τεχνολογίες LPWAN. Η εμβέλεια του Wi-Fi καλύπτει μικρές περιοχές, σε αντίθεση με τα δίκτυα LPWAN, τα οποία

παρέχουν την δυνατότητα για ένα τεράστιο πλήθος ασύρματων συνδέσεων σε μία ευρεία περιοχή, με παράλληλη ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση (Λαλούσης, 2019).

3.1.2.4 LoRa WAN

Η τεχνολογία LoRa WAN αποτελεί μία υλοποίηση των δικτύων LPWAN, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο των εφαρμογών IoT έξυπνης γεωργίας. Όμοια με τα υπόλοιπα δίκτυα LPWAN, παρέχει υψηλή ενεργειακή απόδοση και κάλυψη δικτύου, εφαρμογή σε απομακρυσμένες περιοχές καθώς και λειτουργία σε μη εξουσιοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων. Τα δίκτυα LoRa WAN χρησιμοποιούν μία στοίβα πρωτοκόλλου μεγάλης εμβέλειας (Long Range –LoRa) σε φυσικό επίπεδο, που ορίζεται από την σύμπραξη «LoRa Alliance». Το LoRa WAN από αποτελεί ένα πρότυπο επιπέδου ζεύξης δεδομένων που τοποθετείται ανώτερα από το πρότυπο φυσικού επιπέδου LoRa. Χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LoRa WAN αποτελούν ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, η σχετικά απλή δομή καθώς και οι διαφορετικές λειτουργίες σε διαφορετικές εφαρμογές. Έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως μία εξαιρετική λύση σε επίπεδο ασύρματης επικοινωνίας σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε αγρούς, εξαιτίας της δυνατότητας μεταφοράς δεδομένων σε μεγάλη εμβέλεια. Τα χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου LoRa WAN παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 (Λαλούσης, 2019).

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου LoRa WAN (Ayoub et al.)

Specification	LoRa Technology Support
Standard	LoRa Alliance
Operational Frequencies	Unlicensed ISM band 868, 915 MHz
Modulation	Chirp spread spectrum (CSS)
Coverage Range (Km)	2 – 5 (urban) / 15 (rural)
Data Rate (kbps)	0.3 – 50 (EU) / 0.9 – 100 (US)
Topology	Star

Η τεχνολογία LoRa WAN αποτελεί μία τεχνική διασποράς φάσματος (spread spectrum technique), που επιτρέπει την μεταφορά δεδομένων σε εξαιρετικά χαμηλό ρυθμό προς έναν κόμβο του δικτύου, παρέχοντας την δυνατότητα μεταφοράς των δεδομένων σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις, της τάξης των δεκάδων χιλιομέτρων σε ανοιχτούς χώρους. Η τεχνολογία LoRa WAN μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε επικοινωνία από σημείο σε σημείο (Point to Point –P2P) μεταξύ κόμβων (Λαλούσης, 2019).

Το LoRa WAN διαθέτει ενσωματωμένο επίπεδο ασφαλείας και παρέχει την δυνατότητα κάλυψης εκτάσεων μέχρι και εκατοντάδων τετραγωνικών μέτρων. Έχει ελάχιστες απαιτήσεις σε συντήρηση και ιδιαίτερα χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, χαρακτηριστικά τα οποία το καθιστούν τον ιδανικό υποψήφιο για την διαχείριση τεράστιου πλήθους αισθητήρων που λειτουργούν με μπαταρίες και μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα σύστημα. Το LoRa WAN χρησιμοποιεί μη αδειοδοτημένα κανάλια ραδιοσυχνότητας σε φάσμα μικρότερο του 1.0 GHz (169 MHz, 433 MHz, 868 MHz στις Ευρωπαϊκές χώρες και 915 MHz στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής) με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μεταξύ 0.3 – 50.0 kbps σε στενές ζώνες μέχρι 125 KHz. Το σημαντικότερο μειονέκτημα του LoRa WAN αποτελεί το μέγιστο μέγεθος του πακέτου, το οποίο δεν μπορεί να ξεπερνάει τα 222 bytes, όσον αφορά σε πακέτα των οποίων η προώθηση γίνεται μέσω αναμεταδότη, ή τα 242 bytes, όσον αφορά σε πακέτα τα οποία αποστέλλονται απευθείας από ένα τελικό σημείο σε μία δικτυακή πύλη. Επιπρόσθετα, η καθυστέρηση στην μετάδοση των δικτύων LoRa WAN παρουσιάζει μία διακύμανση 60.0 - 1,250 ms (Λαλούσης, 2019).

3.1.2.5 Sigfox

Το SigFox αποτελεί μία τεχνολογία η οποία λειτουργεί στο μη αδειοδοτημένο εύρος συχνοτήτων κάτω του 1.0 GHz, προσφέροντας ασύρματη σύνδεση LPWAN από σημείο σε σημείο (P2P). Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή απαιτεί οικονομική συνδρομή από τον χρήστη. Αποτελεί ένα δικτυακό πρωτόκολλο που κατασκευάστηκε από την ομώνυμη γαλλική εταιρεία, στοχευμένα για εφαρμογές IoT. Σε αντίθεση με το δίκτυο κινητών τηλεπικοινωνιών, που αποτελεί μία αρχιτεκτονική δικτύου βασισμένη σε IP διευθύνσεις,

η τεχνολογία SigFox χρησιμοποιεί μία αρχιτεκτονική που βασίζεται στα μηνύματα, παρέχοντας μία σειρά πλεονεκτημάτων όπως η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, τα χαμηλά κοστολόγια των συσκευών, το χαμηλό κοστολόγιο συνδεσιμότητας, καθώς και η μεγάλη εμβέλεια και η ευκολία στην επικοινωνία (Λαλούσης, 2019).

Η λειτουργία του SigFox βασίζεται στις υπηρεσίες νέφους και στο ALOHA, εισάγοντας εντούτοις στον περιορισμό στο μέγιστο πλήθος μηνυμάτων που μπορεί να αποστείλει κάποια συσκευή. Η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων (100- 600 bps) είναι η χαμηλότερη, στο πλαίσιο των τεχνολογιών LPWA, και ως εκ τούτου εισάγεται ο περιορισμός του πλήθους των πιθανών περιπτώσεων χρήσης της τεχνολογίας SigFox. Η εν λόγω τεχνολογία χρησιμοποιεί την τεχνική του πολύ στενού εύρους ζώνης (Ultra Narrow Band –UNB) και σε φυσικό επίπεδο κάνει χρήση ενός μοτίβου επανάληψης πλαισίου στον χρόνο και στην συχνότητα, το οποίο ελαττώνει την επίδραση των παρεμβολών. Το εν λόγω πρότυπο, το οποίο συναντάται υπό την ονομασία «πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου και τυχαίας συχνότητας» (Random Frequency and Time Division Multiple Access –RFTDMA), αποτελεί ένα πρότυπο το οποίο βασίζεται στο ALOHA δίχως προκαταρκτική ανίχνευση καναλιού, το οποίο σημαίνει ότι η πρόσβαση των κόμβων είναι τυχαία και δίχως περιορισμούς στην ασύρματη επικοινωνία και στους τομείς χρόνου και συχνότητας. Το μειονέκτημα της τεχνολογίας SigFox εντοπίζεται στο ότι η επανάληψη της εκπομπής μιας συσκευής ενδέχεται να επιβάλει ορισμένους περιορισμούς κλιμακώσεως σε ορισμένη χρονική στιγμή. Τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας SigFox παρουσιάζονται στον Πίνακα 6 (Λαλούσης, 2019).

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά της τεχνολογίας SigFox (Ribeiro et al., 2018)

Χαρακτηριστικά	Περιοχές		
	FCC	ETSI	ARIB
Εύρος ζώνης καναλιού	600 Hz	100 Hz	
Συχνότητες λειτουργίας – ISM – Sub-GHz	902-928 MHz	863-870 MHz	
Ρυθμός μετάδοσης	600 bps	100 bps	
Μέγιστη ισχύς μετάδοσης τερματικού	22dBm	14 dBm	
Μέγιστη ισχύς μετάδοσης σταθμού βάσης	30dBm	26 dBm	
Ευαισθησία σταθμού βάσης	-136 dBm	-142 dBm	
Διαμόρφωση	D-BPSK στην ανερχόμενη ζεύξη, GFSK στην κατερχόμενη		
Τεχνική πρόσβασης μέσου	RFTDMA		

3.1.2.6 Wi-SUN

Το Wi-SUN (Wireless Smart Ubiquitous Network) αποτελεί μία τεχνολογία στο πλαίσιο των δικτύων LPWAN, η οποία στηρίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και έχει σχεδιαστεί κυρίως για επικοινωνία Internet of Things - Machine to Machine (IoT/M2M). Ως εκ τούτου, διαθέτει τα χαρακτηριστικά της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, της υποστήριξης αμφίδρομης μετάδοσης πολλαπλών βημάτων και της αυτόνομης λειτουργίας. Τα κύρια χαρακτηριστικά της τεχνολογίας Wi-SUN είναι η μεγάλη αξιοπιστία μετάδοσης και η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, αφήνοντας εκτός την μεγάλη χωρητικότητα μνήμης, ώστε να υπάρχει η βέλτιστη προσαρμογή στις συσκευές IoT που λειτουργούν με μπαταρίες (Λαλούσης, 2019).

Το Wi-SUN αποτελεί μία βιώσιμη λύση για την εγκατάσταση συστημάτων IoT ευρείας περιοχής (wide area), τα οποία καλύπτουν τις απαιτήσεις για χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, για κάλυψη μεγάλης εμβέλειας, για μέσο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, για χαμηλό κόστος κατασκευής, για μικρό μέγεθος και για ελάχιστη καθυστέρηση δικτύου. Επιπλέον, η υποστήριξη αμφίδρομης επικοινωνίας αποτελεί προαπαιτούμενο για τον εξ' αποστάσεως χειρισμό των συσκευών (Λαλούσης, 2019).

Τα συστήματα Wi-SUN στηρίζονται στο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4.g, το οποίο χρησιμοποιεί την Γκαουσιανή διαμόρφωση μετατόπισης συχνότητας (Gaussian Frequency Shift Keying -GFSK), ώστε να επιτρέπει στους ραδιοπομπούς την χρησιμοποίηση υψηλής απόδοσης, μη-γραμμικών ενισχυτών και να χρησιμοποιεί το εύρος συχνοτήτων των 900 MHz, στην πλειονότητα των περιοχών εφαρμογής, για την επίτευξη ικανοποιητικών χαρακτηριστικών μετάδοσης. Χαρακτηριστικό της τεχνολογίας Wi-SUN είναι το ωφέλιμο φορτίο των 250 bytes και ο υψηλότερος από 50 kbps ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (Λαλούσης, 2019).

3.1.2.7 Weightless

Το Weightless αποτελεί ένα εξελισσόμενο πρωτόκολλο για επικοινωνία Machine to Machine (M2M), το οποίο χρησιμοποιεί την ασύρματη τεχνολογία λευκών διαστημάτων (Whitespace). Σε εφαρμογές εξωτερικού χώρου διαθέτει εμβέλεια κάλυψης μέχρι και 10 km, ενώ σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου η εμβέλειά του υποβιβάζεται στα 5 km. Η ομάδα ειδικών συμφερόντων (Special Interest Group –SIG) Weightless έχει σχεδιάσει τρία ανοιχτά πρότυπα LPWA, το καθένα με τα δικά του χαρακτηριστικά, το δικό του εύρος λειτουργίας και την δική του ενεργειακή κατανάλωση. Τα εν λόγω πρότυπα είναι τα: Weightless-W, Weightless-N και Weightless-P, τα οποία έχουν την δυνατότητα λειτουργίας σε αδειοδοτημένο αλλά και σε μη αδειοδοτημένο εύρος συχνοτήτων. Στο πλαίσιο της λειτουργίας του δικτύου Weightless, ο σταθμός βάσης λογίζεται ως κυρίαρχη συσκευή (Master) ενώ οι τελικοί κόμβοι λογίζονται ως εξαρτημένες συσκευές (Slave). Το σύνολο των σημαντικών πληροφοριών αποθηκεύονται στον εξυπηρετητή, όπου παράλληλα λαμβάνει χώρα ο έλεγχος ταυτότητας με το τερματικό, όταν πραγματοποιείται σύνδεση για πρώτη φορά. Όμοια με το LoRa WAN, το σύνολο των πρωτοκόλλων Weightless κάνει χρήση κρυπτογράφησης συμμετρικών κλειδιών (κρυπτογράφηση AES - 128bit - P2P) με σκοπό την εξακρίβωση της ταυτότητας των τελικών συσκευών αλλά και την πληρότητα των δεδομένων εφαρμογής (Λαλούσης, 2019).

3.2 Πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής

3.2.1 Message Queue Telemetry Transport –MQTT

Η μεταφορά τηλεμετρίας ουράς μηνυμάτων (Message Queue Telemetry Transport – MQTT) αποτελεί ένα από τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα πελάτη-εξυπηρετητή, το οποίο στηρίζεται στην δημοσίευση-εγγραφή. Σχεδιάστηκε από τις εταιρείες IBM και Arcom (Eurotech) το 1999 και η ανάδειξη του ως πρωτόκολλο πραγματοποιήθηκε από την μη-κερδοσκοπική σύμπραξη OASIS. Το MQTT υλοποιεί διασυνδέσεις ενσωματωμένων συσκευών και δικτύων με εφαρμογές και μεσολογισμικά. Οι βασικές αρχές σχεδιασμού του MQTT υποστηρίζουν ένα απλό μοντέλο μηνυμάτων δημοσίευσης-εγγραφής. Η σύνδεση υλοποιείται μέσω της χρησιμοποίησης ενός μηχανισμού δρομολόγησης (ένα>ένα, ένα>πολλά, πολλά>πολλά), αναδεικνύοντας το MQTT ως ένα εξαιρετικό πρωτόκολλο διασύνδεσης στο πλαίσιο των εφαρμογών IoT και της επικοινωνίας M2M. Το κυριότερο χαρακτηριστικό του εν λόγω πρωτοκόλλου είναι η ελαχιστοποίηση της κυκλοφορίας στο δίκτυο με την ελάττωση επιβάρυνσης μεταφοράς και ανταλλαγής πρωτοκόλλων. Επιπρόσθετα, διαθέτει έναν μηχανισμό κοινοποίησης στις περιπτώσεις εμφάνισης μη φυσιολογικών καταστάσεων (Λαλούσης, 2019).

Μέσω του μοτίβου δημοσίευσης-εγγραφής που χρησιμοποιεί το MQTT, παρέχεται μεταβατική ευελιξία και απλότητα στην υλοποίηση. Το MQTT αποτελεί κατάλληλη επιλογή για την διασύνδεση συσκευών περιορισμένων πόρων, που χρησιμοποιούν μη αξιόπιστους ή χαμηλού εύρους ζώνης συνδέσμους. Αποτελεί ένα από τα ώριμα πρωτόκολλα τα οποία καλύπτουν τις υπάρχουσες ανάγκες στο πλαίσιο του IoT και των περιορισμένων και κινητών εφαρμογών, καθώς διαθέτει πλήρη εξοπλισμό και ευκολία υλοποίησης μεσαζόντων μηνυμάτων, με χαμηλό δικτυακό αποτύπωμα και με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Το MQTT αποτελεί εξαιρετική επιλογή για μεγάλου μεγέθους δίκτυα με μικρές συσκευές, επιτρέποντας την παρακολούθηση ή τον έλεγχο μέσω του διαδικτύου. Ο σχεδιασμός του δεν έχει γίνει με γνώμονα την μεταφορά από συσκευή σε συσκευή, ούτε τα δεδομένα πολυεκπομπής (multicast) σε μεγάλο πλήθος δεκτών.

Αποτελεί ένα πρωτογενές πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων, με λίγες δυνατότητες ελέγχου (Λαλούσης, 2019).

Η διαμόρφωση του MQTT έχει γίνει στη βάση του πρωτοκόλλου TCP, Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι το πρωτόκολλο TCP προσφέρει αξιοπιστία σε επίπεδο μεταφοράς, το MQTT έχει ενσωματωμένο δικό του μηχανισμό αναμετάδοσης στο επίπεδο εφαρμογής, δίνοντας έτσι την δυνατότητα για αξιόπιστες υπηρεσίες (Λαλούσης, 2019).

3.2.2 Constrained Application Protocol –CoAP

Η ομάδα Constrained RESTful Environments (CoRE) κατασκεύασε το πρωτόκολλο περιορισμένης εφαρμογής (CoAP), που αποτελεί ένα πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογής σχεδιασμένο για το IoT, το οποίο στηρίζεται στην μεταφορά αναπαράστασης κατάστασης (REpresentational State Transfer -REST) πάνω από την λειτουργία του HTTP. Αρχικά, ο σχεδιασμός του εν λόγω πρωτοκόλλου έγινε για την κάλυψη των επικοινωνιακών αναγκών στο πλαίσιο εφαρμογών M2M, εντούτοις, με τις δικτυακές πύλες και τους διακομιστές υψηλού επιπέδου, εισχώρησε στο IoT. Το CoAP αποτελεί ένα ελαφρύ πρωτόκολλο που διαθέτει βασικούς μηχανισμούς δικτυακής αξιοπιστίας και η προεπιλεγμένη του λειτουργία είναι με UDP. Εντούτοις, δεν περιορίζεται στο UDP, αφού κανάλια όπως τα TCP, DTLS και SMS έχουν την δυνατότητα εφαρμογής πάνω στο πρωτόκολλο CoAP. Το πρωτόκολλο αυτό διαθέτει έναν μηχανισμό επιβεβαιώσεων μηνυμάτων, χρονική περίοδο λήξης καθώς και αναμετάδοση στην περίπτωση απώλειας κάποιου πακέτου (Λαλούσης, 2019).

Το CoAP αποτελεί ένα επικοινωνιακό πρωτόκολλο ένα>ένα, για τη μεταφορά καταστασιακών πληροφοριών μεταξύ πελάτη και διακομιστή διαμέσου του διαδικτύου, με την χρησιμοποίηση του UPD, το οποίο αποδεικνύεται επαρκές μονάχα σε περιορισμένα περιβάλλοντα (περιορισμένοι κόμβοι χαμηλών δυνατοτήτων μνήμης RAM ή CPU και δίκτυα του τύπου WPAN). Το πρωτόκολλο CoAP έχει σχεδιαστεί με στόχο την ελάττωση των επιβαρύνσεων, την βελτιστοποίηση του τρόπου παράδοσης των πακέτων και την απλούστευση της εργασίας, κάνοντας χρήση απλού τύπου διεπαφής με το HTTP.

Ακόμη, το πρωτόκολλο CoAP πληροί εξειδικευμένες απαιτήσεις, όπως η υποστήριξη πολυεκπομπής (multicast), το εξαιρετικά χαμηλό κόστος και η απλότητα λειτουργίας, και ως εκ τούτου αποτελεί ιδανική λύση για εφαρμογές M2M, αφού με βάση αυτές υλοποιήθηκε ο σχεδιασμός του. Τέλος, το πρωτόκολλο CoAP τροποποιεί κάποιες λειτουργίες HTTP με στόχο την κάλυψη των απαιτήσεων του IoT, όπως η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και η λειτουργία υπό την παρουσία συνδέσμων που φέρουν απώλειες ή θόρυβο (Λαλούσης, 2019).

3.2.3 eXtensible Messaging and Presence Protocol –XMPP

Το επεκτάσιμο πρωτόκολλο μηνυμάτων και παρουσίας (eXtensible Messaging and Presence Protocol –XMPP) αποτελεί ένα πρότυπο IETF άμεσων μηνυμάτων, το οποίο αναπτύχθηκε από την κοινότητα Jabber για την υποστήριξη ενός ανοιχτού, ασφαλούς, δίχως ανεπιθύμητα μηνύματα και αποκεντρωμένου πρωτοκόλλου ανταλλαγής μηνυμάτων. Αποτελεί ένα ευρέως γνωστό πρωτόκολλο, το οποίο χρησιμοποιείται σε όλα τα δίκτυα. Οι ανάγκες των εφαρμογών IoT αντιμετωπίζονται πολύ αποτελεσματικά με το πρωτόκολλο XMPP, αφού αυτό υποστηρίζει μικρά μηνύματα και χαμηλή καθυστέρηση. Ως εκ τούτου, το πρωτόκολλο XMPP αποτελεί μία πολύ καλή επιλογή για επικοινωνία στο πλαίσιο του IoT. Το XMPP χαρακτηρίζεται από μία κατανεμημένη αρχιτεκτονική πελάτη-διακομιστή και από ένα επικοινωνιακό πρωτόκολλο TCP, το οποίο κάνει χρήση της επεκτάσιμης γλώσσας σήμανσης (Extensible Markup Language -XML), υλοποιώντας έτσι μεταφορά δεδομένων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο μεταξύ δύο η και περισσότερων συνδέσεων. Υλοποιεί ταυτοτικό έλεγχο απλής αυθεντικοποίησης και επιπέδου ασφαλείας (Simple Authentication and Security Layer -SASL) και διαθέτει ενσωματωμένη κρυπτογράφηση ασφαλείας επιπέδου μεταφοράς (Transport Layer Security -TLS). Το πρωτόκολλο XMPP διευκολύνει τις σχεδόν σε πραγματικό χρόνο λειτουργίες μεταξύ των εξυπηρετητών, παρέχοντας παράλληλα ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, πέραν της ανταλλαγής άμεσων μηνυμάτων, όπως η συνομιλία με πολλά μέλη, οι φωνητικές κλήσεις, οι βιντεοκλήσεις, καθώς και η χρήση του σε ελαφρύ μεσολογισμικό. Το XMPP καθιστά εφικτή την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών υπολογιστών, μέσω της αποστολής άμεσων

μηνυμάτων στο διαδίκτυο, ανεξαρτήτως του χρησιμοποιούμενου λειτουργικού συστήματος. Ακόμη, δίνει την δυνατότητα στις εφαρμογές άμεσων μηνυμάτων να υλοποιούν ταυτοτικό έλεγχο, έλεγχο πρόσβασης, προστασία της ιδιωτικότητας, κρυπτογράφηση μεταξύ των hop, αλλά και τις καθιστά συμβατές με άλλα πρωτόκολλα (Λαλούσης, 2019).

3.2.4 Data Distribution Service –DDS

Η υπηρεσία διανομής δεδομένων (Data Distribution Service –DDS) αποτελεί ένα πρωτόκολλο δημοσίευσης-εγγραφής για επικοινωνία σε εφαρμογές M2M σε πραγματικό χρόνο. Έχει σχεδιαστεί από την ομάδα διαχείρισης αντικειμένων (Object Management Group –OMG). Αντίθετα με έτερα πρωτόκολλα δημοσίευσης-εγγραφής, όπως το MQTT, το πρωτόκολλο DDS στηρίζεται σε αρχιτεκτονική δίχως μεσάζοντα, η οποία ταιριάζει με τους περιορισμούς που τίθενται για την σε-πραγματικό-χρόνο επικοινωνία στο πλαίσιο των εφαρμογών IoT και M2M και χρησιμοποιεί δεδομένα πολυεκπομπής, με στόχο την βελτιστοποίηση της ποιότητας επικοινωνίας και την μεγάλη αξιοπιστία στις εφαρμογές. Παρέχει συνδεσιμότητα χαμηλής καθυστέρησης, ιδανική αξιοπιστία και μία κλιμακωτή αρχιτεκτονική, η οποία απαιτείται για τις εφαρμογές IoT (Λαλούσης, 2019).

Εξαιτίας του γεγονότος ότι το πρωτόκολλο DDS είναι αποκεντρωμένο, παρατηρείται ελευθερία από σημεία συμφόρησης, η οποία παρέχει υψηλή δυνατότητα ελεγχόμενης, αξιόπιστης και συνεπούς μετάδοσης δεδομένων. Η χαλαρά συνδεδεμένη αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου DDS το καθιστά δυναμικά κλιμακώσιμο. Το DDS διαθέτει την δυνατότητα αυτόματης ανίχνευσης των καινούργιων συσκευών που προστίθενται στο δίκτυο, καθώς και την δυνατότητα διαλειτουργικότητας και, ως εκ τούτου, εφαρμόζεται σε διαφορετικά λειτουργικά συστήματα και γλώσσες προγραμματισμού. Αναφορικά με το επίπεδο μεταφοράς, το πρωτόκολλο DDS έχει την δυνατότητα να εκτελεστεί σε πολλαπλά επίπεδα μεταφοράς, όπως σε UDP και σε κοινόχρηστη μνήμη. Ακόμη, μπορεί να υλοποιηθεί με την υποστήριξη επικοινωνιών της μορφής ένα>ένα, ένα>πολλά, πολλά>πολλά και πολλά>ένα και, ως εκ τούτου, το πρωτόκολλο DDS καθίσταται

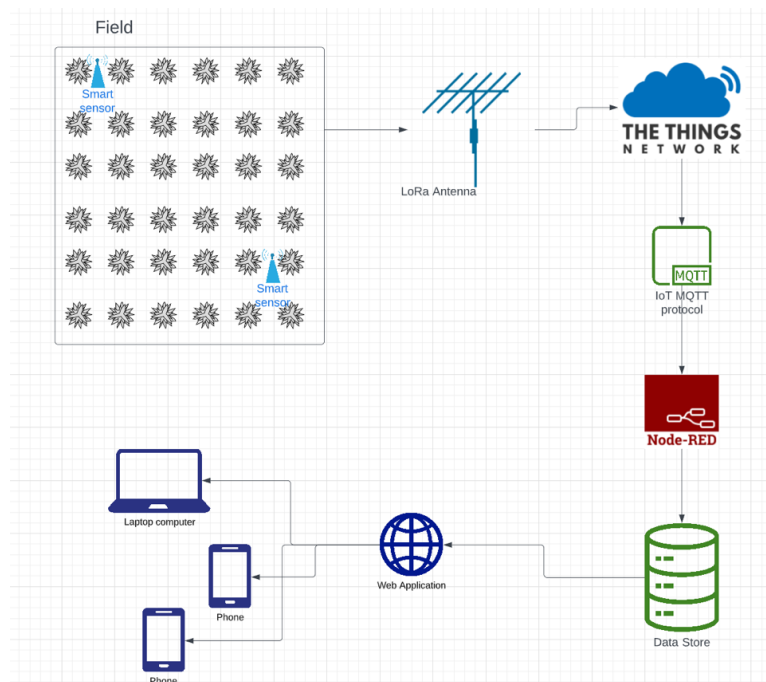
εξαιρετική επιλογή για την αντιμετώπιση των επικοινωνιακών απαιτήσεων που παρουσιάζουν τα συστήματα IoT (Λαλούσης, 2019).

Κεφάλαιο 4. Ανάπτυξη δικτύου αισθητήρων έξυπνης γεωργίας

4.1 Υλικά & μέθοδοι

4.1.1 Αισθητήρες

Στην Εικόνα 20 αποτυπώνεται η γενική παρουσίαση του συστήματος. Στον αγρό υπάρχουν τοποθετημένοι ορισμένοι αισθητήρες οι οποίοι συνδέονται σε έναν μικροεπεξεργαστή, ο οποίος, με την σειρά του, μεταδίδει δεδομένα που λαμβάνονται από μία κεραία LoRa και μεταφέρονται στο The Things Network. Εκεί γίνεται το decode και από εκεί, μέσω του πρωτοκόλλου MQTT, τα δεδομένα μεταφέρονται στο Node Red, όπου συντελείται ο διαχωρισμός του πακέτου και η αποθήκευση των δεδομένων σε πίνακες μίας σχεσιακής SQL βάσης δεδομένων. Τέλος, με την χρησιμοποίηση μίας ιστοσελίδας γίνεται οπτικοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται και, συνδυαστικά με τα δεδομένα καιρού και τις πληροφορίες που εισάγουν οι χρήστες, γίνεται διαχείριση και εποπτεία της καλλιέργειας από γεωργούς και διαχειριστές.



Εικόνα 20

Αναλυτικότερα, για την ανίχνευση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες και ο μικροεπεξεργαστής που παρατίθενται κάτωθι:

1. Αισθητήρας Θερμοκρασίας DS18B20 Αδιάβροχος (Εικόνα 21).

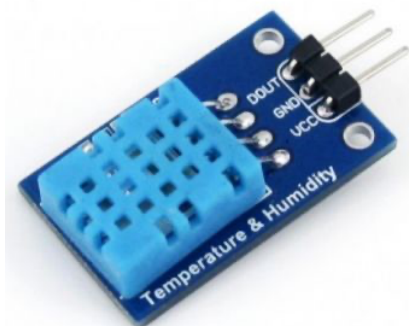


Εικόνα 21

Ο DS18B20 με ψηφιακή έξοδο 1-Wire της εταιρίας Dallas. Το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο μετράει είναι από -55°C έως $+125^{\circ}\text{C}$, με ανάλυση 9-12 bits και ακρίβεια $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (-10°C έως $+85^{\circ}\text{C}$). Κάθε αισθητήρας DS18B20 έχει ένα μοναδικό σειριακό αριθμό απο 64-bit ο οποίος δίνει την δυνατότητα να συνδεθούν πολλοί αισθητήρες πάνω στο ίδιο "καλώδιο" bus. Η τροφοδοσία κυμαίνεται μεταξύ 3.0V - 5.5V DC. Συμβατός με τις περισσότερες

αναπτυξιακές πλακέτες, όπως Arduino και Raspberry. Συνήθως για την σύνδεση με μικροεπεξεργαστή απαιτείται μια αντίσταση $4.7\text{K}\Omega$. Ο αισθητήρας είναι τοποθετημένος μέσα σε ένα μεταλλικό περίβλημα. Το μεταλλικό περίβλημα έχει διάμετρο 7.0 mm και μήκος περίπου 26.0 mm. Το συνολικό του μήκος (συμπεριλαμβανομένου του σύρματος) είναι 160.0 cm. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τέτοιοι αισθητήρες για την μέτρηση της θερμοκρασίας σε δύο διαφορετικά βάθη – στα 50.0 cm και στα 100.0 cm.

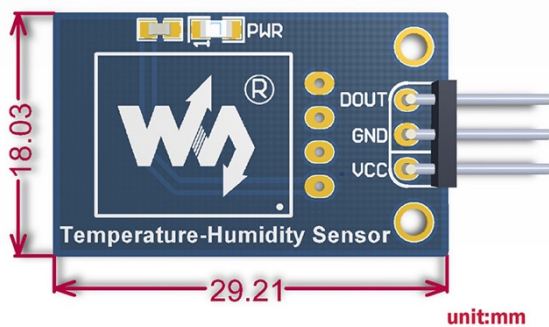
2. Waveshare Αισθητήρας Θερμοκρασίας-Υγρασίας DHT11 (Εικόνα 22).



Εικόνα 22

Ο DHT11 με ψηφιακή έξοδο 1-Wire. Το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο μετράει είναι από 0°C έως $+50^{\circ}\text{C}$, με ακρίβεια $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (0°C έως $+50^{\circ}\text{C}$), το εύρος υγρασίας στο οποίο μετράει είναι 20%RH έως 90%RH (25°C), με ακρίβεια $\pm 5\%RH$ (0 έως $+50^{\circ}\text{C}$). Η τροφοδοσία κυμαίνεται μεταξύ 3.3V έως 5.5V DC. Συμβατός με τις περισσότερες αναπτυξιακές πλακέτες,

όπως Arduino και Raspberry. Οι διαστάσεις του, φαίνονται στην Εικόνα 22.



Εικόνα 23

3. Waveshare Αισθητήρας Υγρασίας Εδάφους (Εικόνα 24).

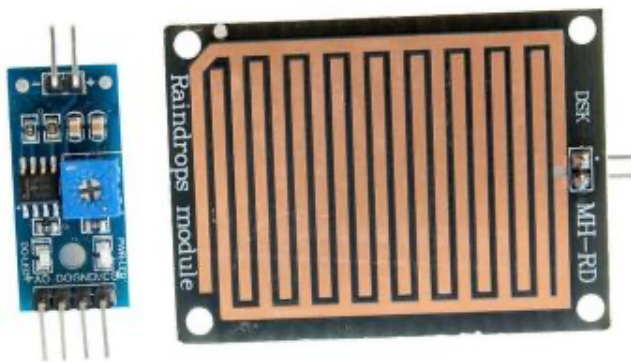


Εικόνα 24

Ο αισθητήρας υγρασίας εδάφους είναι σχεδιασμένος να ομοιάζει με πιρούνι, με σκοπό να διευκολύνεται η εισαγωγή του στο έδαφος. Η τάση εξόδου ενισχύεται όταν αυξάνεται το επίπεδο της εδαφικής υγρασίας. Η τροφοδοσία κυμαίνεται μεταξύ 2.0V - 5.0V. Συνδέεται αναλογικά.

Συμβατός με τις περισσότερες αναπτυξιακές πλακέτες, όπως Arduino και Raspberry. Οι διαστάσεις του είναι 20.0mm x 51.0mm.

4. Αισθητήρας Βροχής

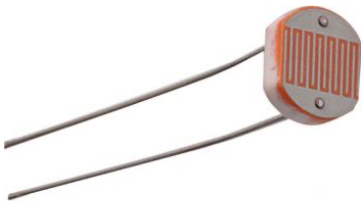


Εικόνα 25

Ο αισθητήρας βροχής χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει την υγρασία στα φυλλώματα του φυτού. Έχει την δυνατότητα να ανιχνεύσει μικρές ποσότητες νερού ή πάγου στην επιφάνεια του αισθητήρα, για εφαρμογές υγρασίας φύλλων.

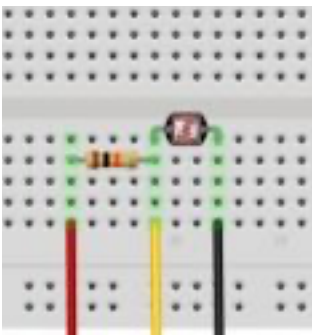
Η τάση λειτουργίας του είναι 5.0V. Η έξοδος είναι είτε ψηφιακή (0 – 1), είτε αναλογική (0 – 1024). Το ποτενσιόμετρο ρυθμίζει την ευαισθησία του αισθητήρα. Ακόμη, χρησιμοποιεί έναν συγκριτή ευρείας τάσης LM393. Το σήμα εξόδου σύγκρισης αποτελεί καθαρή κυματομορφή. Διαθέτει οπές μπουλονιών, για εύκολη εγκατάσταση. Το μέγεθος της PCB πλακέτας είναι μικρό: 3.2cm x 1.4cm.

5. Φωτοαντίσταση



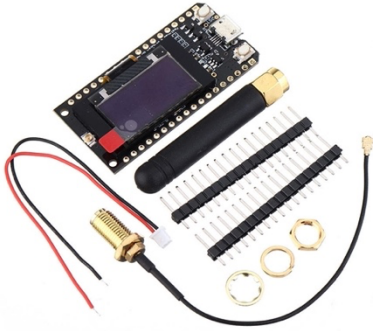
Εικόνα 26

Η φωτοαντίσταση (Εικόνα 26) είναι ένας μεταβλητός αντιστάτης, του οποίου η τιμή της αντίστασης οποίας μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός επάνω σε αυτόν. Πρόκειται για έναν αναλογικό αισθητήρα, για την προσομοίωση του επί τοις εκατό ποσοστού του φωτός που προσπίπτει επάνω στα φύλλα κατά την διάρκεια της μέρας. Αντίσταση στο φως: 0-20Kohm. Αντίσταση στο σκοτάδι: 1MOhm (Ελάχιστη) Διαστάσεις: 2.0 x 4.0 x 5.0 mm. Για να μπορέσουμε να λάβουμε μετρήσεις, απαιτείται η χρησιμοποίηση μίας αντίστασης 10.0 kOhm, όπως αυτή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 27.



Εικόνα 27

6. Αναπτυξιακή πλακέτα TTGO LORA32 868Mhz SX1276 ESP32 with OLED Display.



Εικόνα 28

Όλοι οι ανωτέρω αναφερόμενοι αισθητήρες συνδέθηκαν σε μία αναπτυξιακή πλακέτα. Για την εν λόγω υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε ένα TTGO LORA32 868Mhz SX1276 ESP32 with OLED Display (Εικόνα 28). Η συγκεκριμένη αναπτυξιακή πλακέτα χρησιμοποιεί ένα ESP32 chip, που είναι ιδανικό για το προγραμματιστικό περιβάλλον

Arduino. Ακόμη, χρησιμοποιεί ένα SX1276 chip για την μετάδοση LoRa στα 868Mhz και, τέλος, μια OLED οθόνη η οποία δεν χρησιμοποιείται στο παρόν πείραμα.

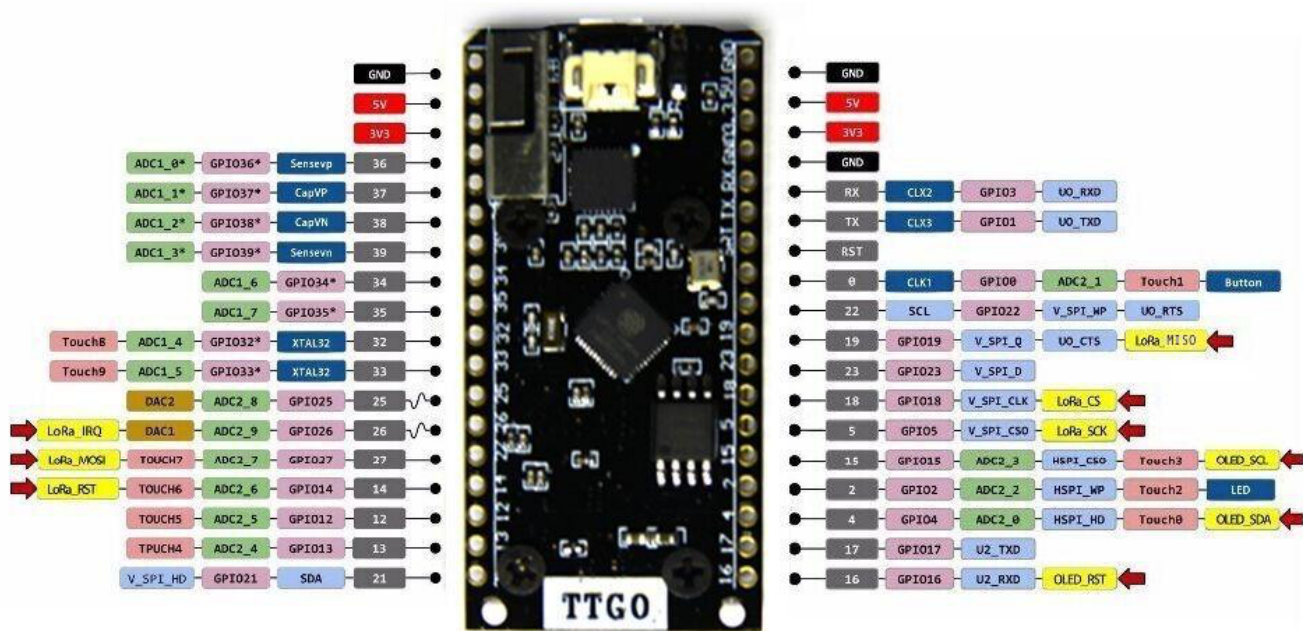
Για την τροφοδοσία χρησιμοποιήθηκαν δύο μπαταρίες Λιθίου 18650 3.6V 3400mAh - Samsung INR18650 (Εικόνα 27), συνδεδεμένες σε σειρά, με στόχο την αύξηση της τάσης στα 7.2 V, και ένας 5V regulator, με στόχο την ρύθμιση της τάσης στα 5V.



Εικόνα 29

4.1.2 Συνδεσμολογία Hardware

Στην Εικόνα 30 απεικονίζονται αριθμημένοι οι ακροδέκτες του μικροεπεξεργαστή.



Εικόνα 30

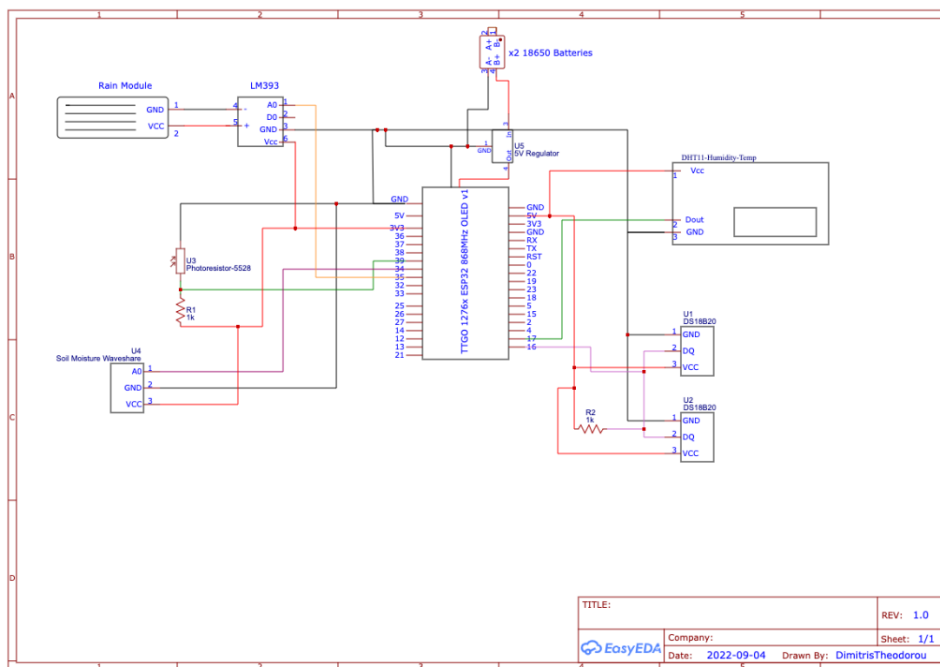
Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται οι συνδέσεις των αισθητήρων με την αναπτυξιακή πλακέτα.

Πίνακας 5. Συνδέσεις των αισθητήρων με την αναπτυξιακή πλακέτα.

Όνομα Αισθητήρα	Ακροδέκτης Αισθητήρα	Ακροδέκτης Μικροεπεξεργαστή	Τύπος σύνδεσης
Αισθητήρας Θερμοκρασίας DS18B20 Αδιάβροχος	Κόκκινος (Vcc)	5V	Αναλογική
	Μαύρος (GND)	GND	
	Άσπρος (DQ)	16	
Waveshare Αισθητήρας	Vcc	5V	Ψηφιακή
	GND	GND	

Θερμοκρασίας- Υγρασίας DHT11	Dout	17	
Waveshare Αισθητήρας Υγρασίας Εδάφους	Vcc	3.3V	Αναλογική
	GND	GND	
	Aout	34	
Αισθητήρας Βροχής	Vcc	3.3V	Αναλογική
	GND	GND	
	Aout	35	
	Dout	-	
Φωτοαντίσταση (Εικόνα 8)	Κόκκινος (Vcc)	3.3V	Αναλογική
	Μαύρος (GND)	GND	
	Κίτρινος	39	

Στο σχέδιο της Εικόνας 31 φαίνονται αναλυτικότερα οι συνδέσεις των αισθητήρων και της τροφοδοσίας με την αναπτυξιακή πλακέτα.



Εικόνα 31

Για τον προγραμματισμό του μικροεπεξεργαστή και των αισθητήρων χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο ανοικτού λογισμικού Arduino IDE (Εικόνα 32), στο οποίο γράφεται ένα πρόγραμμα σε γλώσσα C ή C++. Το Arduino IDE συνοδεύεται από μια βιβλιοθήκη λογισμικού η οποία ονομάζεται «Wiring» και η οποία καθιστά πλήθος κοινών λειτουργιών εισόδου/εξόδου πολύ ευκολότερες. Ορίστηκαν δύο λειτουργίες, για την υλοποίηση ενός προγράμματος κυκλικής εκτέλεσης:

-`setup()`: μία συνάρτηση η οποία τρέχει μία φορά, στην αρχή του προγράμματος, και οποία αρχικοποιεί τις ρυθμίσεις

-`loop()`: μία συνάρτηση η οποία καλείται συνέχεια, έως ότου η πλακέτα απενεργοποιηθεί



Εικόνα 32

4.1.3 Κώδικας μικροεπεξεργαστή

Για τον αισθητήρα θερμοκρασίας DS18B20 χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη DallasTemperature.h και για την επίτευξη της σύνδεσης δύο αισθητήρων σε έναν ακροδέκτη (pin) του μικροεπεξεργαστή χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη OneWire.h.

Αρχικά υλοποιούνται ορισμένες αρχικοποιήσεις για το pin που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας:


```
// Data wire is plugged into pin -ground temperature sensor
#define ONE_WIRE_BUS 16
// Setup a oneWire instance to communicate with any OneWire devices (not just
Maxim/Dallas temperature ICs)
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
// Pass our oneWire reference to Dallas Temperature.
DallasTemperature sensors(&oneWire);
```

Έπειτα γίνεται η εκκίνηση του αισθητήρα:

```
sensors.begin();
```

και λήψη των τιμών της θερμοκρασίας:

```
Serial.print("Requesting temperatures...");
sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get temperatures
Serial.println("DONE");
float ground_temp_50cm = sensors.getTempCByIndex(0);
float ground_temp_100cm = sensors.getTempCByIndex(1);
```

Για τον Waveshare αισθητήρα θερμοκρασίας - υγρασίας DHT11, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη dht11.h.

Υλοποιείται αρχικοποίηση αντικειμένου, αρχικοποίηση για το pin που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας:

```
dht11 DHT11;
//Constants
#define DHT11_PIN 17 // DHT 11 (AM2302) - what pin we're connected to "Air
temp-humidity sensor"
```


και λήψη των τιμών της θερμοκρασίας και της υγρασίας:

```
int chk = DHT11.read(DHT11_PIN);

//Read data and store it to variables
float air_humidity = (float)DHT11.humidity;
float air_temp =(float)DHT11.temperature;
```

Για τον Waveshare αισθητήρα υγρασίας εδάφους δεν ήταν απαραίτητη η χρήση κάποιας βιβλιοθήκης.

Υλοποιείται αρχικοποίηση του pin που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας:

```
#define MOST_GND 34 // ground moisture sensor
```

και λήψη των τιμών υγρασίας σε ποσοστό (%). Εξαιτίας του ότι ο αισθητήρας είναι συνδεδεμένος στην τάση 3.3V, λαμβάνει τιμές από 0 (στεγνός) έως 4095 (υγρός) και επομένως απαιτείται να γίνει υποδιαίρεση στην κλίματα 0 έως 100:

```
float moist_sensor = analogRead(MOST_GND);
float moist_ground = map(moist_sensor, 0, 4095, 0, 100);
```

Για τον αισθητήρα βροχής δεν ήταν απαραίτητη η χρήση κάποιας βιβλιοθήκης.

Υλοποιείται αρχικοποίηση του pin που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας:

```
#define MOST_LEAF 35 // leaf weatness sensor
```

και λήψη των τιμών υγρασίας σε ποσοστό (%). Εξαιτίας του ότι ο αισθητήρας είναι συνδεδεμένος στην τάση 3.3V, λαμβάνει τιμές από 0(υγρός) έως 4095 (στεγνός) και επομένως απαιτείται να γίνει υποδιαίρεση στην κλίματα 0 έως 100:

```
// read the sensor
float sensorReading = analogRead(MOST_LEAF);
//Serial.println(sensorReading);
float range = map(sensorReading, 0, 4095, 100, 0);
float leaf_weatness = range;
```

Για την φωτοαντίσταση δεν ήταν απαραίτητη η χρήση κάποιας βιβλιοθήκης.

Υλοποιείται αρχικοποίηση του pin που χρησιμοποιεί ο αισθητήρας:

```
#define LIGHT_LEAF 39 // Photorezistor
```

και λήψη των τιμών φωτεινότητας σε ποσοστό (%). Εξαιτίας του ότι ο αισθητήρας είναι συνδεδεμένος στην τάση 3.3V λαμβάνει τιμές από 0 (σκοτάδι) έως 4095 (φως) και επομένως απαιτείται να γίνει υποδιαίρεση στην κλίματα 0 έως 100:

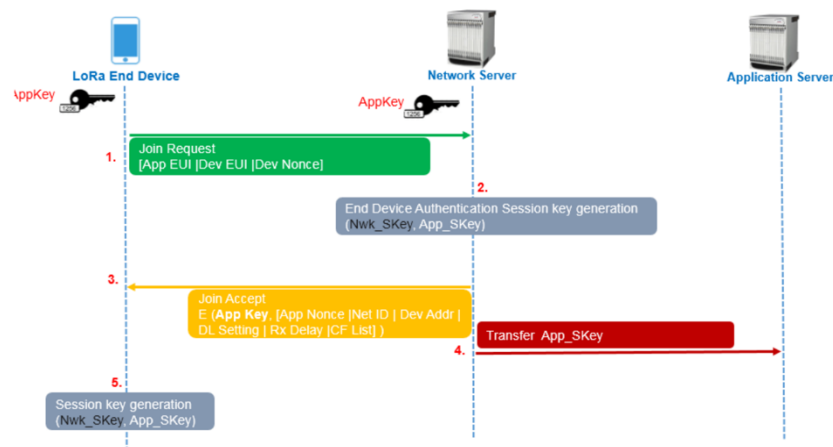
```
float photo_sensor = analogRead(LIGHT_LEAF);
float leaf_light = map(photo_sensor, 0, 4095, 0, 100);
```

Στην συνέχεια υλοποιείται η μετατροπή και η σύνθεση των τιμών σε ένα αλφαριθμητικό (string):

```
String air_humidity1 = String(air_humidity, 2);
String air_temp1 = String(air_temp, 2);
String ground_temp_50cm1 = String(ground_temp_50cm, 2);
String ground_temp_100cm1 = String(ground_temp_100cm, 2);
String moist_ground1 = String(moist_ground, 2);
String leaf_weatness1 = String(leaf_weatness, 2);
String leaf_light1 = String(leaf_light , 2);
```

```
String Packet = String( air_humidity1 + "/" + air_temp1 + "/" + ground_temp_50cm1 +
"/" + ground_temp_100cm1 + "/" + moist_ground1 + "/" + leaf_weatness1 + "/" +
leaf_light1 );
```

Για την σύνδεση (join) συσκευών στο TTS υπάρχουν δύο τρόποι –το «Over The Air Activation» (OTAA) και το «Activation By Personalization» (ABP). Στη λειτουργία OTAA (Εικόνα 33), μια τελική συσκευή επικοινωνεί με το διακομιστή δικτύου για να εκτελέσει την διαδικασία ενεργοποίησης, η οποία ονομάζεται «Διαδικασία σύνδεσης». Σύμφωνα με τις προδιαγραφές LoRa, η λειτουργία OTAA χρησιμοποιείται όταν μια τελική συσκευή έχει ήδη αναπτυχθεί ή επαναφέρεται. η τελική συσκευή διαθέτει DevEUI, AppEUI και AppKey, τα οποία είναι απαραίτητα για τη διαδικασία σύνδεσης. Στο Εικόνα 33 παρουσιάζεται η διαδικασία ένταξης.



Εικόνα 33

Εναλλακτικά, το ABP είναι ο τρόπος με τον οποίο μια τελική συσκευή μπορεί να ανήκει σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο LoRa χωρίς να εκτελεί διαδικασία σύνδεσης υπό ορισμένες συνθήκες. Στη λειτουργία ABP, η τελική συσκευή δεν διαθέτει DevEUI, AppEUI και AppKey, τα οποία είναι απαραίτητα για τη διαδικασία σύνδεσης. Η ενεργοποίηση μιας τελικής συσκευής μέσω εξατομίκευσης συνεπάγεται ότι το DevAddr και τα τέσσερα

κλειδιά συνεδρίας FNwk_SIntKey, SNwk_SIntKey, Nwk_SEncKey και App_SKey αποθηκεύονται απευθείας στην τελική συσκευή αντί να προέρχονται από το DevEUI, το AppEUI, το AppKey και το NwkKey κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σύνδεσης.

Ακόμη, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη lmic.h και hal/hal.h για την αποστολή των πακέτων στο The Things Stack (TTS) και τροποποιήθηκε το παράδειγμα που προσφέρει η ίδια η βιβλιοθήκη ώστε να καλύπτει τις ανάγκες του πειράματος. Έτσι, ο κώδικας είναι αυτός που παρατίθεται παρακάτω.

Ο τρόπος σύνδεσης που επιλέχθηκε ήταν ο OTAA και τα κλειδιά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν εκδόθηκαν από το TTS server με τον τρόπο που φαίνονται στο κεφάλαιο 4.1.5

Για τα στοιχεία της αυθεντικοποίησης στο TTS:

```
static const u1_t
PROGMEM APPEUI[8]={ 0xff, 0xfe, 0x01, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 }; //Must
fill with your own appeui, in format lsb
void os_getArtEui (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, APPEUI, 8);}

static const u1_t
PROGMEM DEVEUI[8]={ 0x18, 0xE3, 0x0C, 0xFF, 0xF5, 0xFC, 0x00, 0x00 }; //Must
fill with your own deveui, in format lsb
void os_getDevEui (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, DEVEUI, 8);}

static const u1_t ///Must fill with your own appkey, in format msb
PROGMEM APPKEY[16] = { 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00,
0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 };
void os_getDevKey (u1_t* buf) { memcpy_P(buf, APPKEY, 16);}
```

Για την αρχικοποίηση του pin που χρησιμοποιεί το LoRa chip:

```

#define SCK 5 // GPIO5 -- SX1278's SCK
#define MISO 19 // GPIO19 -- SX1278's MISO
#define MOSI 27 // GPIO27 -- SX1278's MOSI
#define SS 18 // GPIO18 -- SX1278's CS
#define RST 14 // GPIO14 -- SX1278's RESET
#define DIO 26 // GPIO26 -- SX1278's IRQ(Interrupt Request)
#define BAND 868E6

const lmic_pinmap lmic_pins = {
    .nss = 18,
    .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
    .rst = 14,
    .dio = { /*dio0*/ 26, /*dio1*/ 33, /*dio2*/ 32 }
};

```

Την ενεργοποίηση του chip:

```

// LMIC init
os_init();
// Reset the MAC state. Session and pending data transfers will be discarded.
LMIC_reset();
// Disable link check validation
LMIC_setLinkCheckMode(0);
// TTN uses SF9 for its RX2 window.
LMIC.dn2Dr = DR_SF9;
// Set data rate and transmit power for uplink (note: txpow seems to be ignored by the
library)LMIC_setDrTxpow(DR_SF7,14);

```

Τέλος, για την σύνδεση της συσκευής, την αποστολή του πακέτου και τον έλεγχο αυτών των διαδικασιών:

```
static uint8_t mydata[49];
static osjob_t sendjob;
// Schedule TX every this many seconds (might become longer due to duty cycle
limitations).

const unsigned TX_INTERVAL = 60;

static void printHex2(unsigned v) {
    v &= 0xff;
    if (v < 16)
        Serial.print('0');
        Serial.print(v, HEX);
}

static void do_send(osjob_t* j){

    char buff[49];
    String Packet = Sensor_reading_print();
    Serial.println(Packet);
    Packet.toCharArray(buff, 49);

    for(int i=0; i<49; i++) mydata[i] = buff[i];

    // Check if there is not a current TX/RX job running
    if (LMIC.opmode & OP_TXRXPEND) Serial.println(F("OP_TXRXPEND, not
sending"));
}
```

```

else { // Prepare upstream data transmission at the next possible time.
    LMIC_setTxData2(1, mydata, sizeof(mydata)-1, 0);
    Serial.println(F("Sending uplink packet..."));
    // Next TX is scheduled after TX_COMPLETE event.
}

void onEvent (ev_t ev) {
    Serial.print(os_getTime());
    Serial.print(": ");

    switch(ev) {
        case EV_SCAN_TIMEOUT:
            Serial.println(F("EV_SCAN_TIMEOUT"));
            break;
        case EV_BEACON_FOUND:
            Serial.println(F("EV_BEACON_FOUND"));
            break;
        case EV_BEACON_MISSED:
            Serial.println(F("EV_BEACON_MISSED"));
            break;
        case EV_BEACON_TRACKED:
            Serial.println(F("EV_BEACON_TRACKED"));
            break;
        case EV_JOINING:
            Serial.println(F("EV_JOINING"));
            break;
        case EV_JOINED:
            Serial.println(F("EV_JOINED"));
            {
                u4_t netid = 0;
                devaddr_t devaddr = 0;
            }
        }
    }
}

```

```

    u1_t nwkKey[16];
    u1_t artKey[16];
    LMIC_getSessionKeys(&netid, &devaddr, nwkKey, artKey);
    Serial.print("netid: ");
    Serial.println(netid, DEC);
    Serial.print("devaddr: ");
    Serial.println(devaddr, HEX);
    Serial.print("AppSKey: ");
    for (size_t i=0; i<sizeof(artKey); ++i) {
        if (i != 0)
            Serial.print("-");
        printHex2(artKey[i]);
    }
    Serial.println("");
    Serial.print("NwkSKey: ");
    for (size_t i=0; i<sizeof(nwkKey); ++i) {
        if (i != 0)
            Serial.print("-");
        printHex2(nwkKey[i]);
    }
    Serial.println();
}

// Disable link check validation (automatically enabled
// during join, but because slow data rates change max TX
LMIC_setLinkCheckMode(0);
break;

case EV_JOIN_FAILED:
    Serial.println(F("EV_JOIN_FAILED"));
    break;

case EV_REJOIN_FAILED:
    Serial.println(F("EV_REJOIN_FAILED"));

```



```

    break;
case EV_TXCOMPLETE:
    Serial.println(F("EV_TXCOMPLETE (includes waiting for RX windows)"));
    if (LMIC.txrxFlags & TXRX_ACK)
        Serial.println(F("Received ack"));
    if (LMIC.dataLen) {
        Serial.print(F("Received "));
        Serial.print(LMIC.dataLen);
        Serial.println(F(" bytes of payload"));

    }
    break;
case EV_LOST_TSYNC:
    Serial.println(F("EV_LOST_TSYNC"));
    break;
case EV_RESET:
    Serial.println(F("EV_RESET"));
    break;
case EV_RXCOMPLETE:
    // data received in ping slot
    Serial.println(F("EV_RXCOMPLETE"));
    break;
case EV_LINK_DEAD:
    Serial.println(F("EV_LINK_DEAD"));
    break;
case EV_LINK_ALIVE:
    Serial.println(F("EV_LINK_ALIVE"));
    break;
case EV_TXSTART:
    Serial.println(F("EV_TXSTART"));
    break;

```

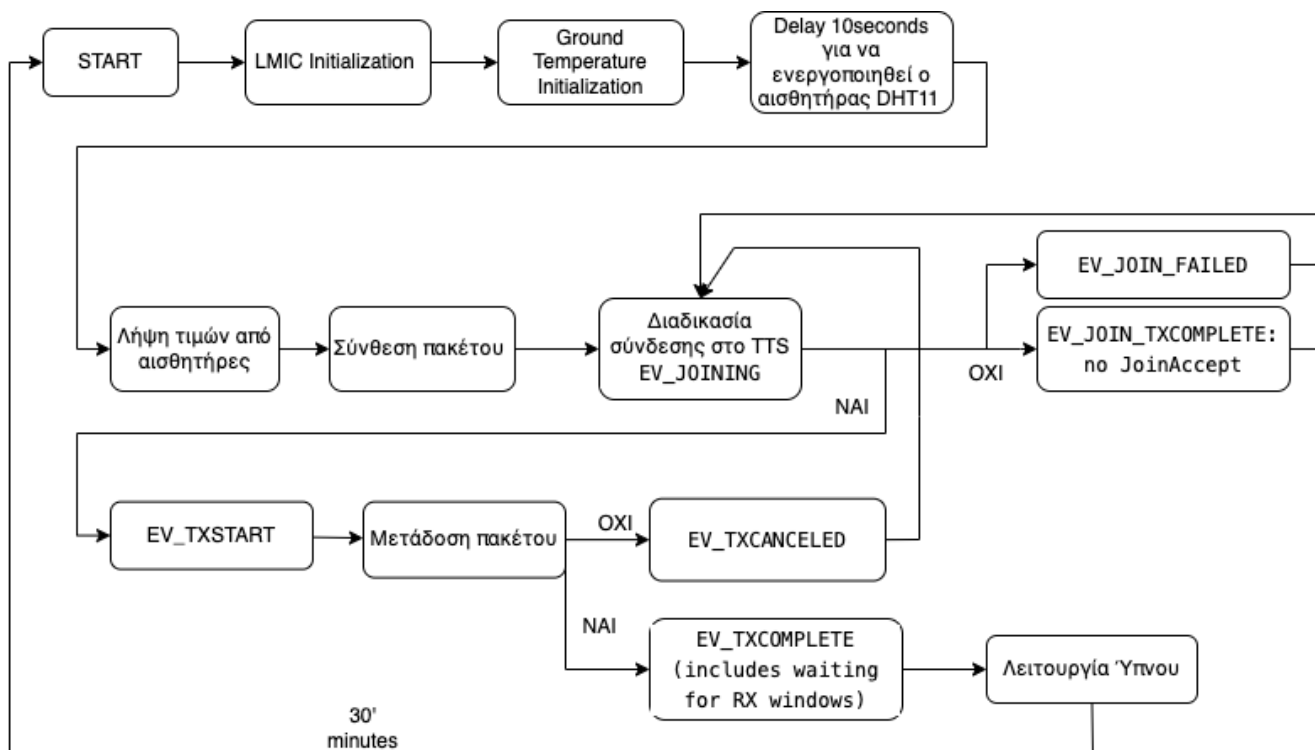
```
case EV_TXCANCELED:
    Serial.println(F("EV_TXCANCELED"));
    break;
case EV_RXSTART:
    /* do not print anything -- it wrecks timing */
    break;
case EV_JOIN_TXCOMPLETE:
    Serial.println(F("EV_JOIN_TXCOMPLETE: no JoinAccept"));
    break;
default:
    Serial.print(F("Unknown event: "));
    Serial.println((unsigned) ev);
    break;
}
}
```

Επιπρόσθετα, για την εξοικονόμηση ενέργειας μετά την επιτυχή αποστολή του πακέτου, ο μικροεπεξεργαστής εισέρχεται σε κατάσταση ύπνου (sleep mode) για 30 λεπτά.

```
esp_sleep_enable_timer_wakeup(1800000000);
Serial.println("Setup ESP32 to sleep for every Half Hour");

Serial.println("Going to sleep now");
delay(1000);
Serial.flush();
esp_deep_sleep_start();
```

Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται διαγραμματικά η διαδικασία που εκτελείται στον μικροεπεξεργαστή:

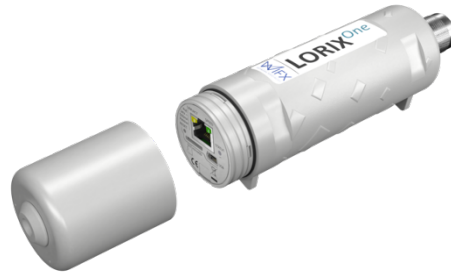


Εικόνα 34

4.1.4 LoRaWAN Gateways

Για τα gateways μελετηθήκαν δύο λύσεις –μια για εσωτερική χρήση και μία για εξωτερική χρήση. Αμφότερες οι λύσεις προτείνονται από το TTN.

Η λύση για την εξωτερική χρήση αφορά στο gateway Wifx LORIX One (Εικόνα 35). Η τροφοδοσία της είναι 24 Vdc μέσω παθητικού Power over Ethernet (PoE). Η μέγιστη κατανάλωση ενέργειας είναι 3.0 Watt. Η θερμοκρασία περιβάλλοντος λειτουργίας είναι από -30 έως +55 °C . Τέλος, χρησιμοποιεί μία 5 dBi εξωτερική κεραία με μήκος 500mm και με IP65.



Εικόνα 35

Για την εσωτερική χρήση μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε το THE THINGS INDOOR GATEWAY (Εικόνα 36). Διαθέτει συμπαγή σχεδιασμό, για μεταφορά, και έχει την δυνατότητα να ενεργοποιείται μέσω πολλαπλών επιλογών τροφοδοσίας, τόσο με βύσματα τοίχου όσο και με βύσματα USB τύπου C, με κατανάλωση 900 mA. Διαθέτει ενσωματωμένη πολυκατευθυντική κεραία, για οικιακή χρήση. Η θερμοκρασία λειτουργίας από 0 έως 40°C.

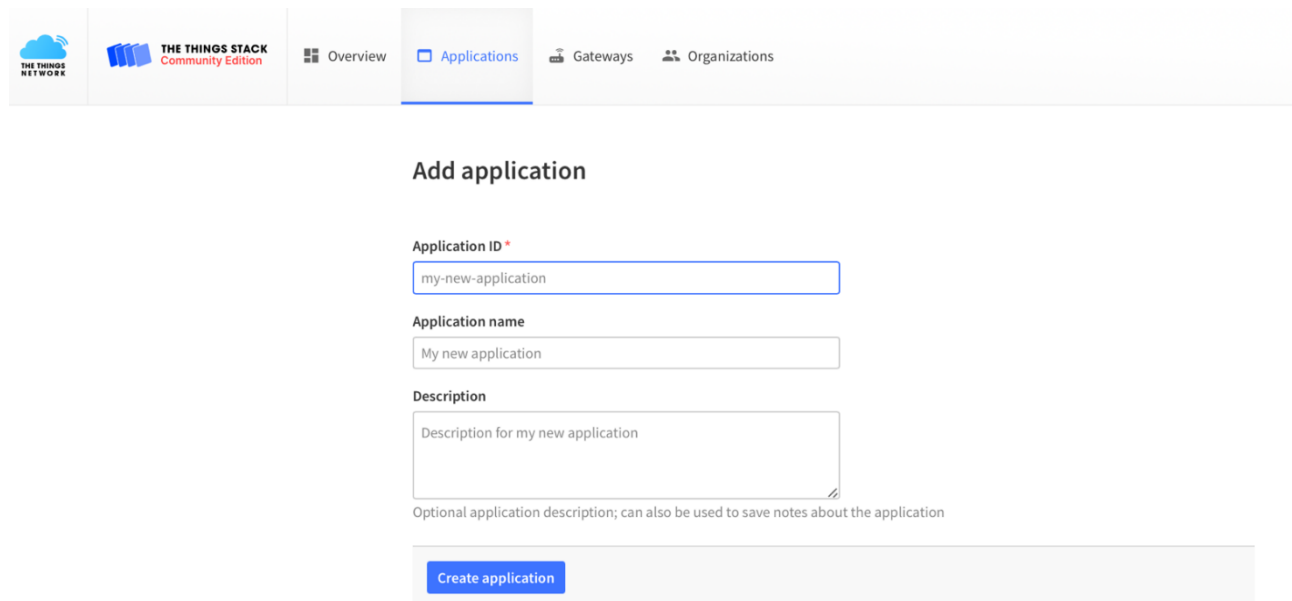


Εικόνα 36

4.1.5 The Things Network (TTN)

Το The Things Network παρέχει ένα σύνολο ανοικτών εργαλείων και ένα παγκόσμιο, ανοικτό δίκτυο, στο οποίο δημιουργήθηκε η εφαρμογή IoT με χαμηλό κόστος και με μέγιστη ασφάλεια. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο «The Things Stack» (TTS), το οποίο αποτελεί έναν ανοικτού κώδικα διακομιστή δικτύου LoRaWAN, που είναι κατάλληλος για παγκόσμιες, γεωγραφικά κατανεμημένες, δημόσιες και ιδιωτικές αναπτύξεις, καθώς και για μικρά, τοπικά δίκτυα. Η αρχιτεκτονική ακολουθεί το μοντέλο αναφοράς δικτύου LoRaWAN, με σκοπό την συμμόρφωση των προτύπων και την διαλειτουργικότητα. Δημιουργήθηκε ένας δωρεάν λογαριασμός στην πλατφόρμα και έπειτα ακολούθησαν τα βήματα για την δημιουργία του application και την εγγραφή του αισθητήρα στο δίκτυο.

Αρχικά, ξεκινήσαμε με την δημιουργία του application συμπληρώνοντας τα απαραίτητα στοιχεία της φόρμας (Εικόνα 37).



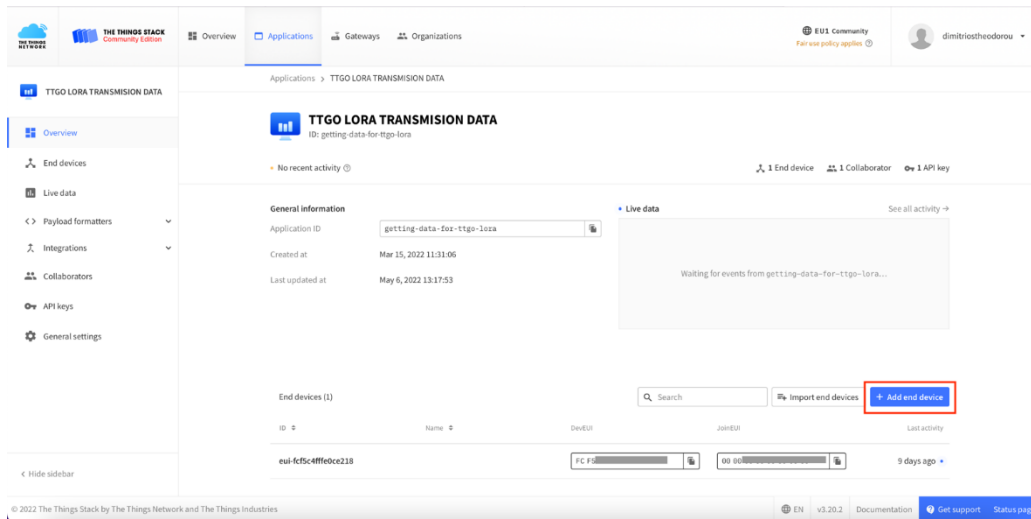
The screenshot shows the 'Add application' form in the The Things Stack Community Edition interface. The navigation bar at the top includes the TTN logo, 'THE THINGS STACK Community Edition', and menu items for 'Overview', 'Applications' (which is active), 'Gateways', and 'Organizations'. The form itself has the following fields:

- Application ID ***: A text input field containing 'my-new-application'.
- Application name**: A text input field containing 'My new application'.
- Description**: A larger text area containing 'Description for my new application'.

Below the description field, there is a note: 'Optional application description; can also be used to save notes about the application'. At the bottom of the form is a blue button labeled 'Create application'.

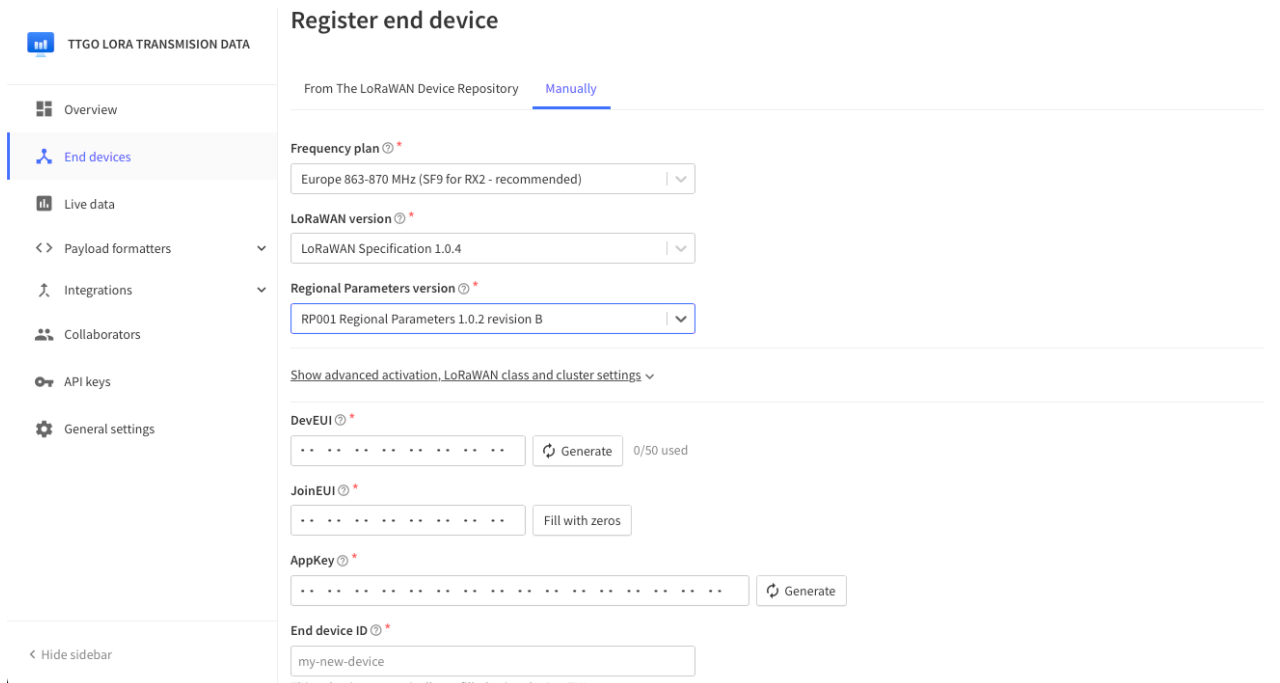
Εικόνα 37

Στην συνέχεια, αφού δημιουργήθηκε η εφαρμογή, προχωρήσαμε στην εγγραφή της συσκευής (Εικόνα 38).



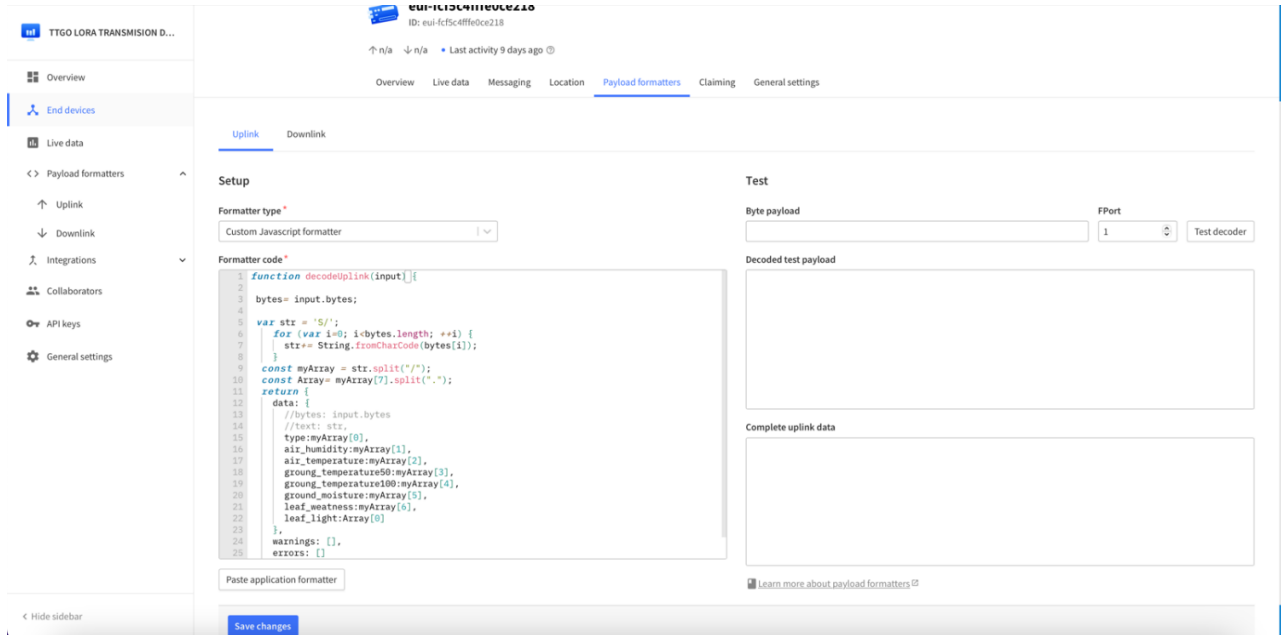
Εικόνα 38

Θέσαμε τις ρυθμίσεις που παρουσιάζονται στην Εικόνα 39 και αφορούν στην συχνότητα λειτουργίας του αισθητήρα, στην έκδοση του LoRaWAN και στις παραμέτρους περιοχής. Ακόμη, πήραμε τα κλειδιά τα οποία εισαγάγαμε στον κώδικα του μικροεπεξεργαστή και ορίσαμε ένα όνομα για την συσκευή μας.



Εικόνα 38

Τέλος, για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε το πακέτο έπρεπε να το αποκωδικοποιήσουμε. Για τον σκοπό αυτόν χρησιμοποιήθηκε ο Payload Formatter (Εικόνα 39). Επίσης το πακέτο χωρίστηκε και αποθηκεύτηκε στις αντίστοιχες μεταβλητές.



Εικόνα 39

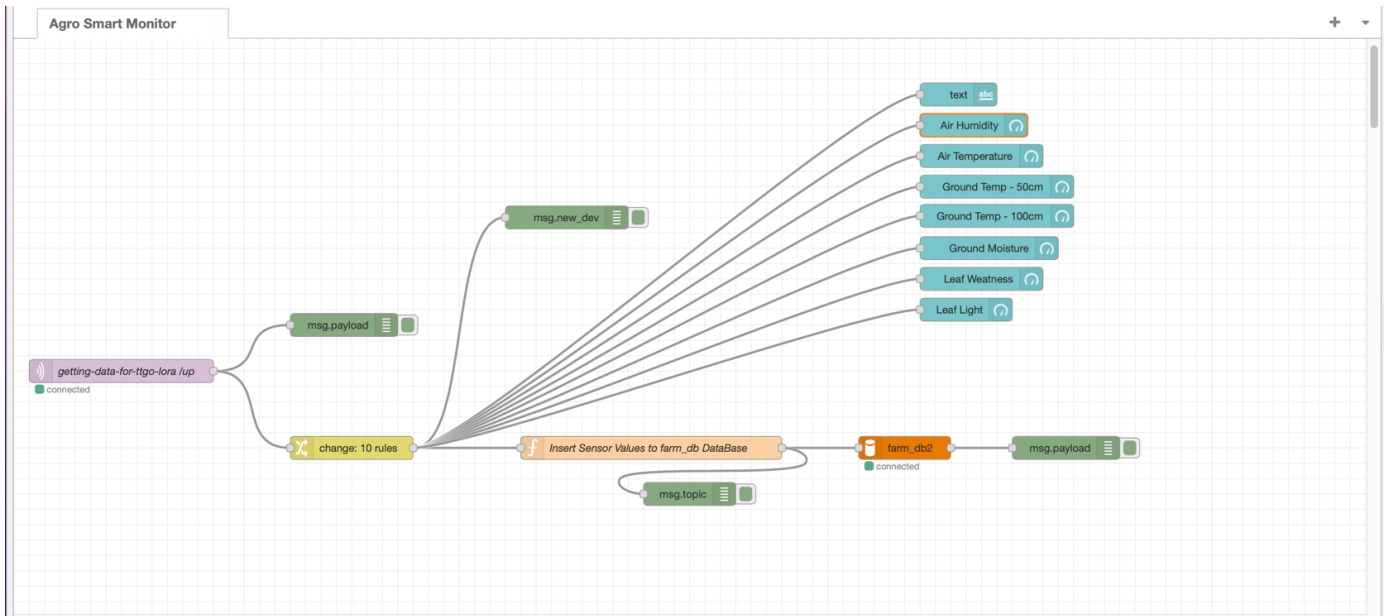
Εν συνεχεία, χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο MQTT για την μεταφορά του πακέτου. Το MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) αποτελεί ένα ελαφρύ πρωτόκολλο δικτύου για επικοινωνία από μηχανή σε μηχανή (M2M).

4.1.6 MQTT explorer

Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιήθηκε διότι λειτουργεί ως ένας MQTT client, παρέχοντάς μας την δυνατότητα να διερευνήσουμε ποιά πακέτα θα μπορούσαμε να λάβουμε από τον public server του TTN. (Εικόνα 40)

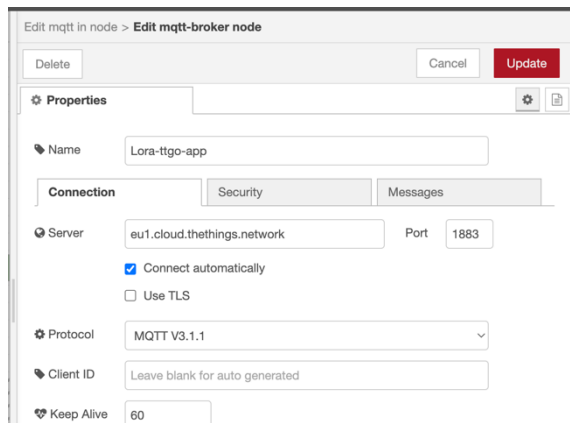


Εικόνα 41



Εικόνα 42

Αναλυτικότερα, σε πρώτη φάση χρησιμοποιήθηκε ο κόμβος MQTT για να μπορέσει να

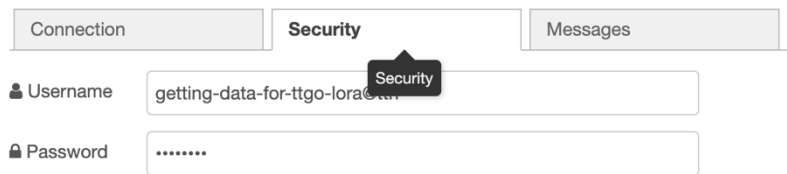


Εικόνα 43

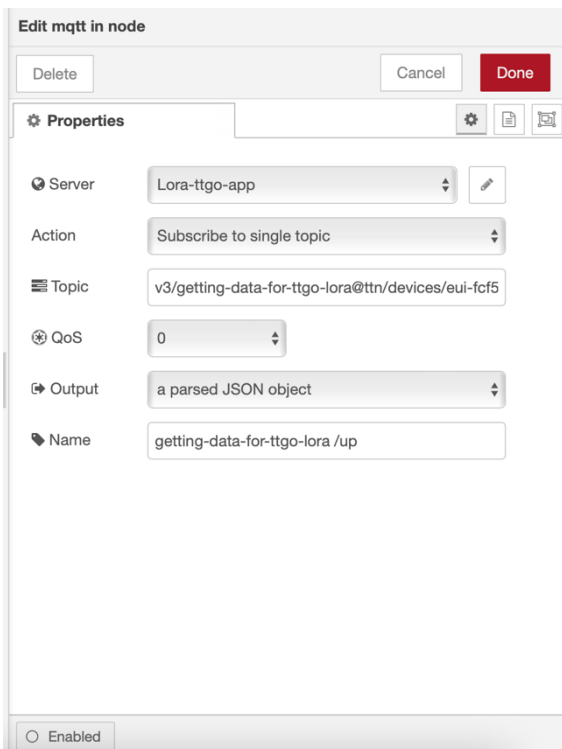
ληφθεί το πακέτο. Πρώτο βήμα ήταν η σύνδεση με τον MQTT Broker του TTS, όπου εισαγάγαμε τον server στον οποίο γίνεται host eu1.cloud.thethings.network, την πόρτα που είναι διαθέσιμη (1883) και την έκδοση του broker (v3.1.1), σύμφωνα με το documentation που παρέχεται από το TTS (Εικόνα 43). Συνδεθήκαμε με τα απαραίτητα στοιχεία εισόδου

χρησιμοποιώντας ως όνομα χρήστη το όνομα του application στο TTS και ως κωδικό το App KEY το οποίο δημιουργείται από το TTS (Εικόνα 44). Με τον τρόπο αυτόν, καταφέραμε να κάνουμε εγγραφή (subscribe) στην ροή εισερχόμενων δεδομένων (upstream traffic) χρησιμοποιώντας το παρακάτω topic και μεταβάλλοντάς το με τρόπο κατάλληλο, ώστε να μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για την δική μας εφαρμογή:

v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/up.

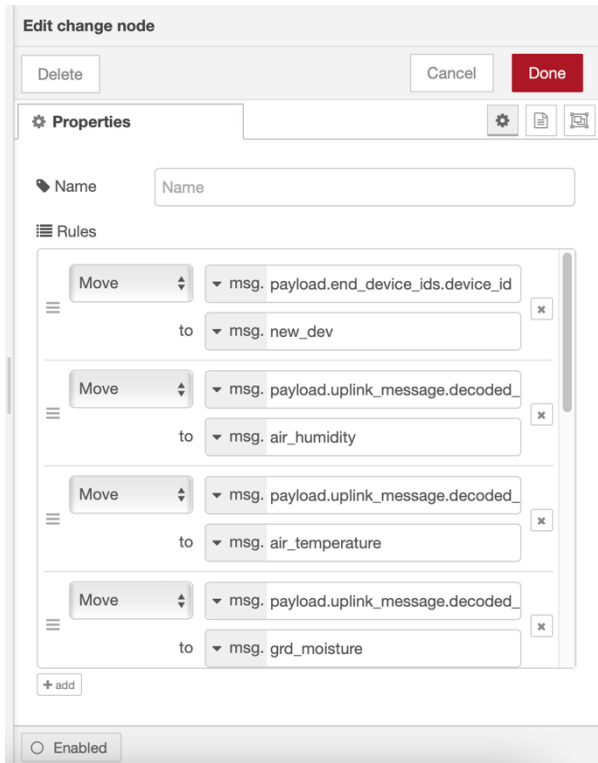


Εικόνα 44



Εικόνα 45

Η απάντηση που λαμβάνουμε είναι ένα json αντικείμενο (Εικόνα 45).



Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας τον κόμβο change (Εικόνα 46) από το πακέτο (json αντικείμενο) κάνουμε διαλογή των χρήσιμων για εμάς πληροφοριών, δηλαδή των τιμές που λαμβάνουν οι αισθητήρες και το timestamp (την χρονική στιγμή λήψης του πακέτου).

Εικόνα 46

Ακολούθως, χρησιμοποιήθηκε ένας κόμβος συνάρτησης (function node) για να μπορέσει να μεταβληθεί η τιμή του timestamp, έτσι ώστε να ταιριάζει σε εκείνη της περιοχής που βρίσκεται ο αισθητήρας και για να συνταχθεί το ερώτημα SQL, ώστε να μπορέσουν να εισαχθούν τα δεδομένα στην βάση και, τέλος, να γίνεται ανανέωση της τελευταίας χρονικής στιγμής κατά την οποία ο αισθητήρας ήταν ενεργός.

```
//correct 3hour deference in timestamp
var t = msg.V_timestamp[11]+msg.V_timestamp[12];
const array_d = [['00','03'],['01','04'],['02','05'],['03','06'],['04','07'],
['05','08'],['06','09'],['07','10'],['08','11'],['09','12'],['10','13'],['11','14'],
['12','15'],['13','16'],['14','17'],['15','18'],['16','19'],['17','20'],['18','21'],
['19','22'],['20','23'],['21','00'],['22','01'],['23','02']];
for(var i=0;i<24;i++){
if(t == array_d[i][0]){
var new_hour = array_d[i][1];
break;
}
}
```

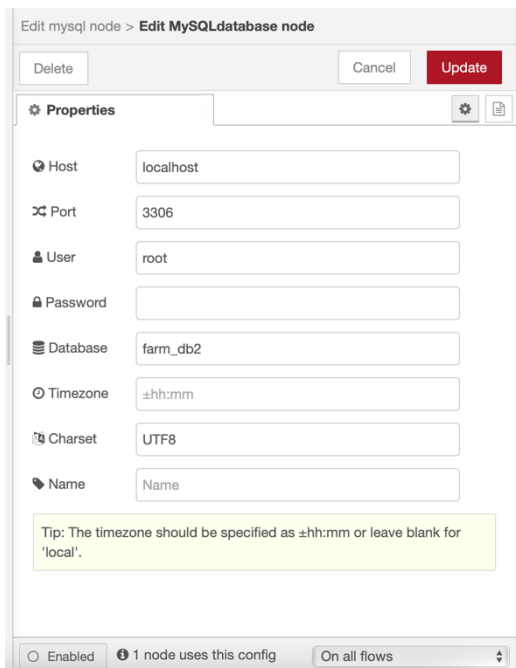
```

//timestamp format yyyy-mm-dd hh:mm:ss
var new_timestamp = msg.V_timestamp[0] + msg.V_timestamp[1] +
msg.V_timestamp[2] +msg.V_timestamp[3]+msg.V_timestamp[4]
+msg.V_timestamp[5]+msg.V_timestamp[6]+msg.V_timestamp[7]+msg.V_timestamp
[8]+msg.V_timestamp[9]+ " " + new_hour +msg.V_timestamp[13]
+msg.V_timestamp[14]+msg.V_timestamp[15]+msg.V_timestamp[16]+msg.V_timesta
mp[17]+msg.V_timestamp[18] ;

msg.topic = "INSERT INTO `s_values`(`ID_V`, `DEVICE`, `HUMIDITY_AIR`,
`TEMPERATURE_AIR`, `MOISTURE_GRD`, `TEMPERATURE_GRD_50CM`,
`TEMPERATURE_GRD_100CM`, `LEAF_WEATNESS`, `PHOTOSENSOR`, `V_Timestamp`)"
+"VALUES ( NULL,""+ msg.new_dev +"";""+
msg.air_humidity+"";""+msg.air_temperature+"";""+msg.grd_moisture+"";""+msg.grd_t
emp50+"";""+msg.grd_temp100+"";""+msg.leaf_weatness+"";""+msg.leaf_light+"";""+
new_timestamp +"""); UPDATE sensor SET LAST_ACTIVE= CURRENT_TIMESTAMP
WHERE ID_DEVICE =""+ msg.new_dev +"";";

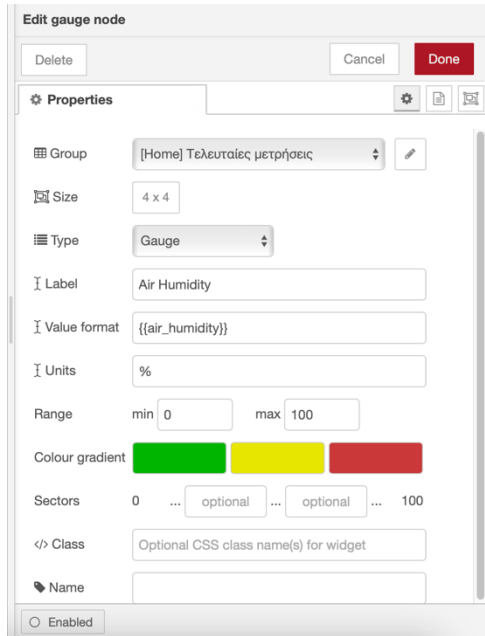
return msg;

```



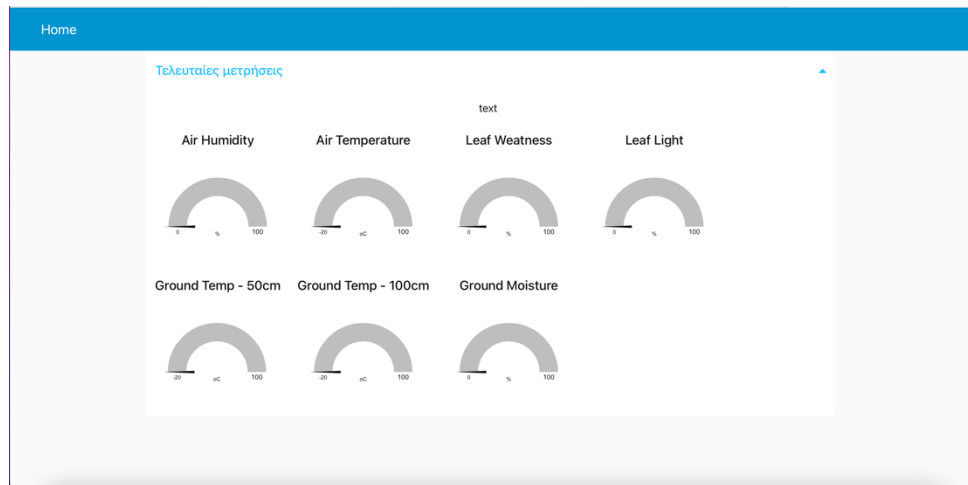
Εικόνα 47

Σε επόμενο βήμα έγινε χρήση ενός κόμβου mysql ώστε να μπορέσουν να σταλούν τα δεδομένα και εν συνεχεία να μπορέσουν να αποθηκευτούν, ώστε να οπτικοποιηθούν, σε επόμενη φάση. Η σύνδεση στην βάση είναι απλή, αφού χρειάζονται μονάχα ορισμένα βασικά στοιχεία όπως ο host, η πόρτα, το όνομα χρήστη, ο κωδικός πρόσβασης, το όνομα της βάσης και, τέλος, η κωδικοποίηση των χαρακτήρων (Εικόνα 47).



Εικόνα 48

Τέλος με την χρησιμοποίηση του επιπλέον εργαλείου (extension) dashboard, που προσφέρει το Node-Red, δημιουργήθηκε μία διεπαφή χρήστη (interface) για να μπορεί να ελεγχθεί οπτικά η ορθότητα των τιμών που θα εισαχθούν στην βάση. Χρησιμοποιήθηκαν 7 κόμβοι gauge για τις τιμές των αισθητήρων και αρχικοποιήθηκαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 48, και 1 κόμβος text για το όνομα του αισθητήρα. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 49.

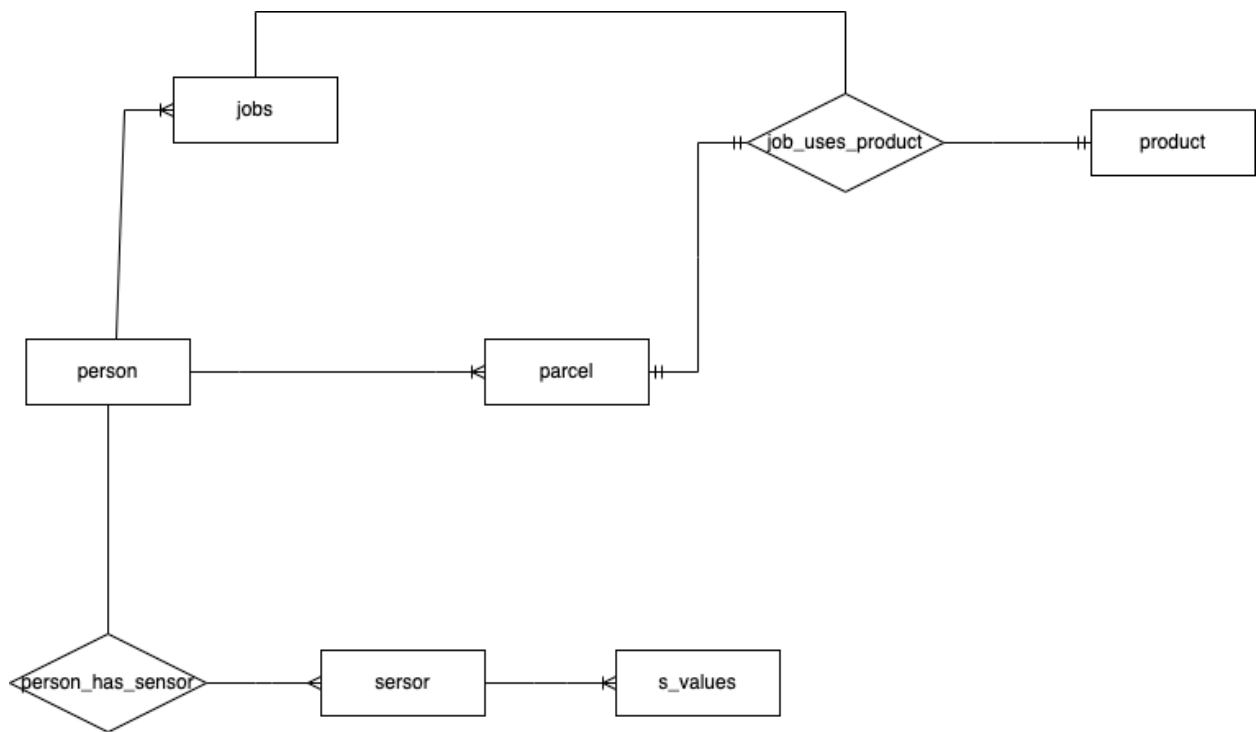


Εικόνα 49

Για την υλοποίηση της βάσης δεδομένων και της ιστοσελίδας έγινε χρησιμοποίηση του cross-platform, Apache, MySQL, PHP and Perl (XAMPP).

4.1.8 Βάση Δεδομένων

Στην Εικόνα 50 παρουσιάζονται οι οντότητες και οι συσχετίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της βάσης δεδομένων.



Εικόνα 50

Στους πίνακες που ακολουθούν, αναλύονται τα στοιχεία και οι μεταβλητές των οντοτήτων και των συσχετίσεων.

Όνομα πίνακα: person				
Όνομα μεταβλητής	ID_AFM	NAME	SURNAME	COMPANY_NAME
Τύπος μεταβλητής	varchar(10)	varchar(30)	varchar(30)	varchar(30)
Ιδιότητα μεταβλητής	Κύριο Κλειδί	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα
Περιγραφή	Αριθμός Φορολογικού Μητρώου	Όνομα	Επίθετο	Επωνυμία εταιρίας
Όνομα μεταβλητής	TYPE_OF_BUSSNESS	PHONE	EMAIL	CITY
Τύπος μεταβλητής	varchar(50)	varchar(10)	varchar(40)	varchar(30)
Ιδιότητα μεταβλητής	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα
Περιγραφή	Δραστηριότητα εταιρίας	Τηλέφωνο	Ηλεκτρονικό ταχυδρομείο	Πόλη
Όνομα μεταβλητής	ADDRESS	TK	DOY	USERNAME
Τύπος μεταβλητής	varchar(30)	varchar(5)	varchar(30)	varchar(30)
Ιδιότητα μεταβλητής	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα
Περιγραφή	Διεύθυνση	Ταχυδρομικός κώδικας	Δημόσια Οικονομική Υπηρεσία	Όνομα χρήστη
Όνομα μεταβλητής	PASSWORD	STATUS	CITYID_OWA	
Τύπος μεταβλητής	varchar(30)	varchar(10)	varchar(10)	
Ιδιότητα μεταβλητής	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	
Περιγραφή	Κωδικός πρόσβασης	Ιδιότητα (χρήστης/διαχειριστής)	Κωδικός περιοχής για το Open Weather	

Όνομα πίνακα: sensor				
Όνομα μεταβλητής	ID_DEVICE	TYPE`	LONGITUDE	LAST_ACTIVE
Τύπος μεταβλητής	varchar(30)	varchar(10)	varchar(30)	timestamp
Ιδιότητα μεταβλητής	Κύριο Κλειδί	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα
Περιγραφή	Αναγνωριστικό συσκευής από TTS	Τύπος	Γεωγραφικό μήκος	Τελευταία χρονική στιγμή που ήταν ενεργός
Όνομα μεταβλητής	LATITUDE			
Τύπος μεταβλητής	varchar(30)			
Ιδιότητα μεταβλητής	Απλή Ιδιότητα			
Περιγραφή	Γεωγραφικό πλάτος			

Όνομα πίνακα: product				
Όνομα μεταβλητής	ID	NAME	DESCRIPTION	COMPANY
Τύπος μεταβλητής	varchar(11)	varchar(50)	longtext	varchar(50)
Ιδιότητα μεταβλητής	Κύριο Κλειδί	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα
Περιγραφή	Κωδικός προϊόντος	Όνομα	Περιγραφή προϊόντος	Κατασκευάστρια εταιρία
Όνομα μεταβλητής	CROP_USED_IN	PRICE		
Τύπος μεταβλητής	varchar(30)	float		
Ιδιότητα μεταβλητής	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα		
Περιγραφή	Καλλιέργεια	Τιμή		

Όνομα πίνακα: parcel				
Όνομα μεταβλητής	ID	LOCATION	CROP	ID_AFM2
Τύπος μεταβλητής	int(11)	varchar(40)	varchar(30)	varchar(10)
Ιδιότητα μεταβλητής	Κύριο Κλειδί	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Ξένο κλειδί
Περιγραφή	Κωδικός αγροτεμαχίου	Τοποθεσία	Καλλιέργεια	Αριθμός Φορολογικού Μητρώου
Όνομα μεταβλητής	MORGEN			
Τύπος μεταβλητής	float			
Ιδιότητα μεταβλητής	Απλή Ιδιότητα			
Περιγραφή	Έκταση (Στρέμματα)			

Όνομα πίνακα: jobs				
Όνομα μεταβλητής	ID	TYPE	J_TIMESTAMP	J_STATUS
Τύπος μεταβλητής	int(11)	varchar(30)	date	varchar(30)
Ιδιότητα μεταβλητής	Κύριο Κλειδί	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα
Περιγραφή	Κωδικός εργασίας	Τύπος	Ημερομηνία	Κατάσταση
Όνομα μεταβλητής	ID_AFM	NOTE	URGERNCY	
Τύπος μεταβλητής	varchar(10)	text	varchar(30)	
Ιδιότητα μεταβλητής	Ξένο κλειδί	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	
Περιγραφή	Αριθμός Φορολογικού Μητρώου	Σημείωση	Σπουδαιότητα	

Όνομα πίνακα: s_value				
Όνομα μεταβλητής	ID_V	DEVICE	HUMIDITY_AIR	TEMPERATURE AIR
Τύπος μεταβλητής	int(11)	varchar(30)	float	float
Ιδιότητα μεταβλητής	Κύριο Κλειδί	Ξένο κλειδί	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα
Περιγραφή	Αριθμός μέτρησης	Αναγνωριστικό συσκευής από TTS	Υγρασία αέρα	Θερμοκρασία αέρα
Όνομα μεταβλητής	TEMPERATURE GRD_50CM	TEMPERATURE GRD_100CM	LEAF_WEATNESS	PHOTOSENSOR
Τύπος μεταβλητής	float	float	float	float
Ιδιότητα μεταβλητής	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα
Περιγραφή	Θερμοκρασία εδάφους στα 50 εκατοστά βάθος	Θερμοκρασία εδάφους στα 100 εκατοστά βάθος	Υγρασία φυλλώματος	Τιμή φωτεινότητας
Όνομα μεταβλητής	MOISTURE_GRD	V_Timestamp		
Τύπος μεταβλητής	float	timestamp		
Ιδιότητα μεταβλητής	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα		
Περιγραφή	Υγρασία εδάφους	Χρονική στιγμή που λήφθηκε η τιμή		

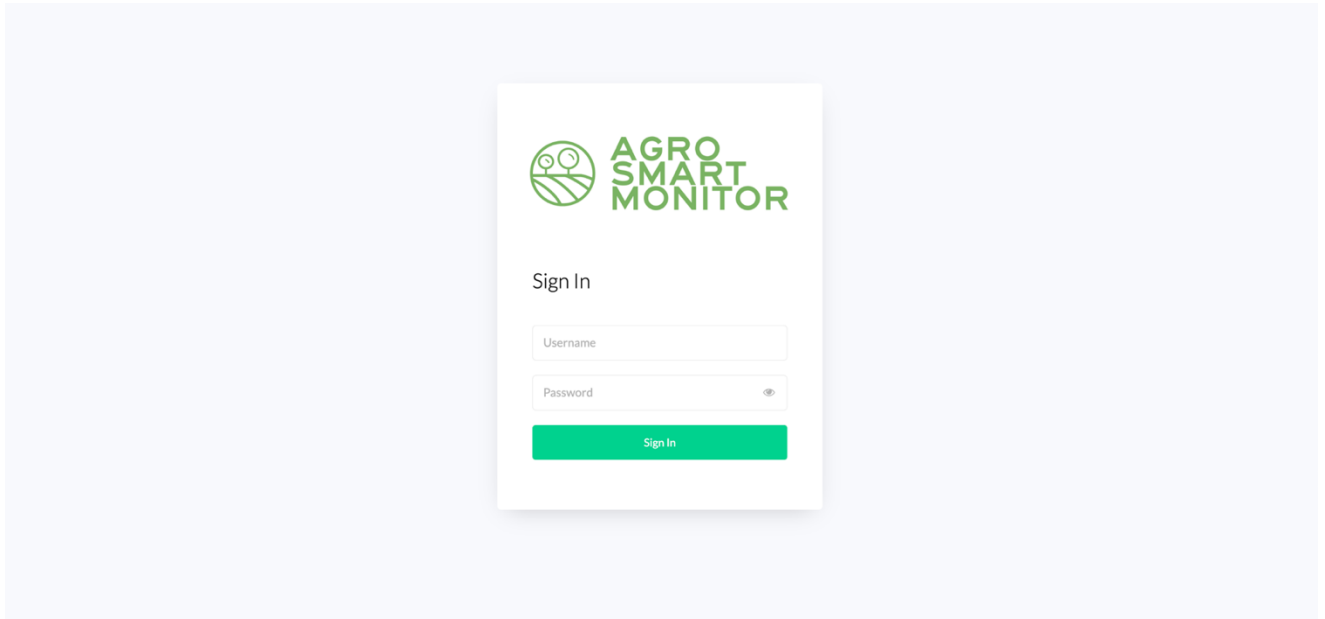
Όνομα πίνακα: person_has_sensor				
Όνομα μεταβλητής	ID_DEV	ID_P		
Τύπος μεταβλητής	varchar(10)	varchar(10)		
Ιδιότητα μεταβλητής	Ξένο κλειδί	Ξένο κλειδί		
Περιγραφή	Αναγνωριστικό συσκευής από TTS	Αριθμός Φορολογικού Μητρώου		

Όνομα πίνακα: jobs_uses_product				
Όνομα μεταβλητής	ID_PRODUCT	ID_JOBS	AMOUNT	COST
Τύπος μεταβλητής	int(11)	int(11)	int(11)	float
Ιδιότητα μεταβλητής	Ξένο κλειδί	Ξένο κλειδί	Απλή Ιδιότητα	Απλή Ιδιότητα
Περιγραφή	Κωδικός προϊόντος	Κωδικός εργασίας	Αριθμός προϊόντων	Κόστος
Όνομα μεταβλητής	TOTAL_COST	ID_PARCEL		
Τύπος μεταβλητής	float	int(11)		
Ιδιότητα μεταβλητής	Απλή Ιδιότητα	Ξένο κλειδί		
Περιγραφή	Συνολικό κόστος	Κωδικός αγροτεμαχίου		

4.1.9 Ιστοσελίδα

Για το πείραμα αυτής της εργασίας δημιουργήθηκαν δύο διαπεφές –μία για τους χρήστες (γεωργούς) και μία για τους διαχειριστές του συστήματος.

Αρχικά, οι χρήστες συνδέονται με τα διαπιστευτήρια τους (Εικόνα 51).



Εικόνα 51



Για τον χάρτη χρησιμοποιήθηκε το OpenStreetMap, το οποίο είναι ένας χάρτης με ελεύθερη άδεια, ο οποίος αναπτύσσεται από μια κοινότητα εθελοντών που συνεισφέρουν και διατηρούν δεδομένα σχετικά με δρόμους, μονοπάτια, καφετέριες, σιδηροδρομικούς σταθμούς, και πολλά περισσότερα, σε όλον τον κόσμο.

Εικόνα 52

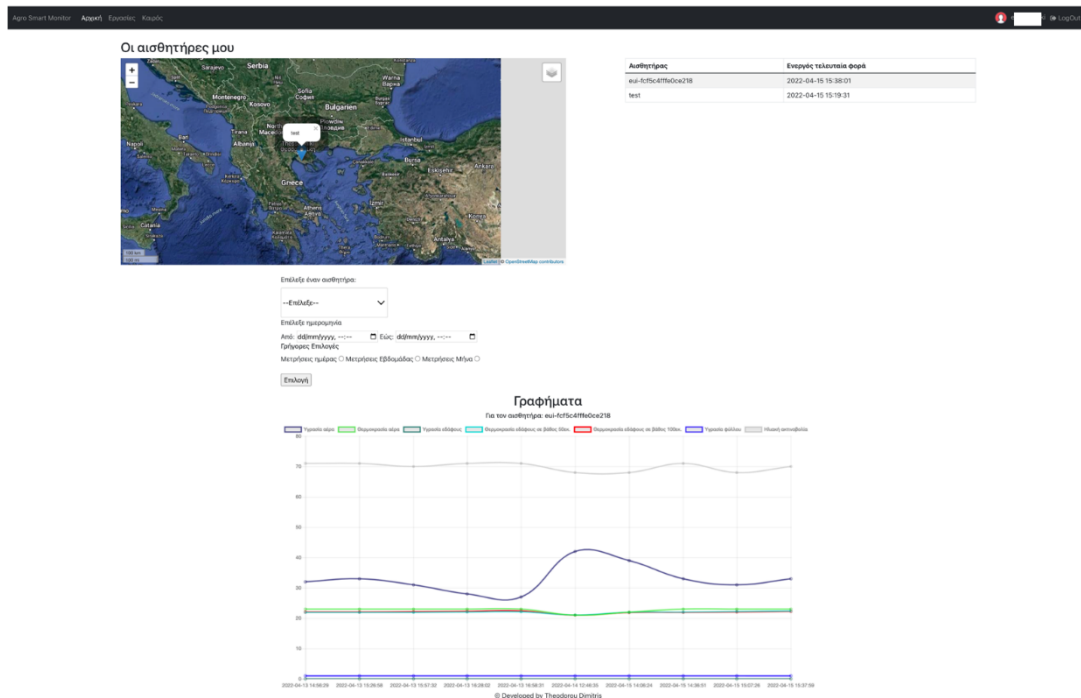


Chart.js

Για την απεικόνιση διαγραμμάτων στην ιστοσελίδα, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη charts.js, η οποία αποτελεί μια δωρεάν JavaScript βιβλιοθήκη.

Εικόνα 53

Στην αρχική σελίδα του χρήστη (γεωργού) εμφανίζονται στον χάρτη αριστερά οι τοποθεσίες με τους αισθητήρες, ενώ ο πίνακας δεξιά δείχνει πότε ήταν τελευταία φορά ενεργός ο κάθε αισθητήρας. Από τις επιλογές στην μέση, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον αισθητήρα του οποίου τις τιμές θέλει να δει, το διάστημα για το οποίο θέλει να δει τιμές και, με την χρήση των γρήγορων επίλογών, μπορεί να επιλέξει κάποια προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Με το πάτημα του πλήκτρου «Επιλογή» στην περιοχή «Γραφήματα», εμφανίζονται τα αποτελέσματα (Εικόνα 54).



Εικόνα 54

Στην σελίδα «Εργασίες» ο γεωργός μπορεί να εισάγει τις εργασίες που εκτελεί στον αγρό, ώστε να μπορεί να διατηρεί ηλεκτρονικό αρχείο και να προγραμματίζει τις εργασίες που πρέπει να γίνουν μελλοντικά (Εικόνα 55).

Εύρεση εργασίας:
 Επίλεξε κατάσταση: --Επίλεξε--
 Επίλεξε σπουδαιότητα: --Επίλεξε--
 Επίλεξε ημερομηνία:
 Από: dd/mm/yyyy
 Έως: dd/mm/yyyy

Δημιουργία εργασίας:
 Επίλεξε ημερομηνία: dd/mm/yyyy
 Επίλεξε τύπο εργασίας: --Επίλεξε--
 Επίλεξε αγροτεμάχιο: --Επίλεξε--
 Επίλεξε κατάσταση: --Επίλεξε--
 Επίλεξε σπουδαιότητα: --Επίλεξε--
 Καλλιέργεια:
 Επίλεξε προϊόν που χρησιμοποιήθηκε: Τιμή/μτ.: 0 €
 Εισάγετε ποσότητα προϊόντος:
 Εισάγετε κόστος εργασίας:

Οι εργασίες μου

Ημερομηνία	Εργασία	Αγροτεμάχιο	Κατάσταση	Σπουδαιότητα	Προϊόν που χρησιμοποιήθηκε	Κόστος προϊόντος	Κόστος εργασίας	Συνολικό κόστος	Σημείωση(από εταιρία)
2022-05-15	ΛΙΠΑΝΣΗ	ΕΛΙΕΣ - ΝΕΑ ΣΙΛΛΑΤΑ 14στρ.	ΕΓΙΝΕ	ΧΑΜΗΛΗ	YaraLiva TROPICOTE	50	50	150	

© Developed by Theodorou Dimitris

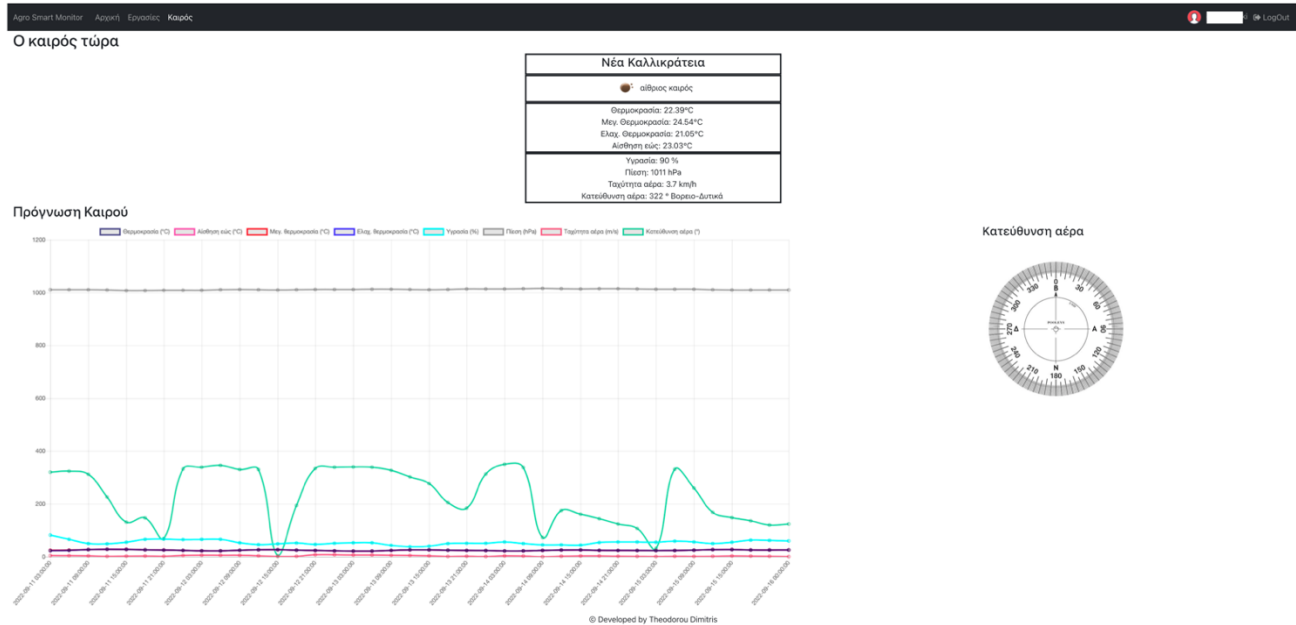
Εικόνα 55



Εικόνα 56

Για τα δεδομένα καιρού και τις προβλέψεις χρησιμοποιήθηκε το Application Programming Interface (API) OpenWeather, στην δωρεάν έκδοση του οποίου προσφέρονται 60 κλήσεις/λεπτό, 1,000,000 κλήσεις/μήνα και η παροχή των δεδομένων καιρού εκείνης της στιγμής, καθώς και προβλέψεις ανά 3 ώρες, για 5 μέρες.

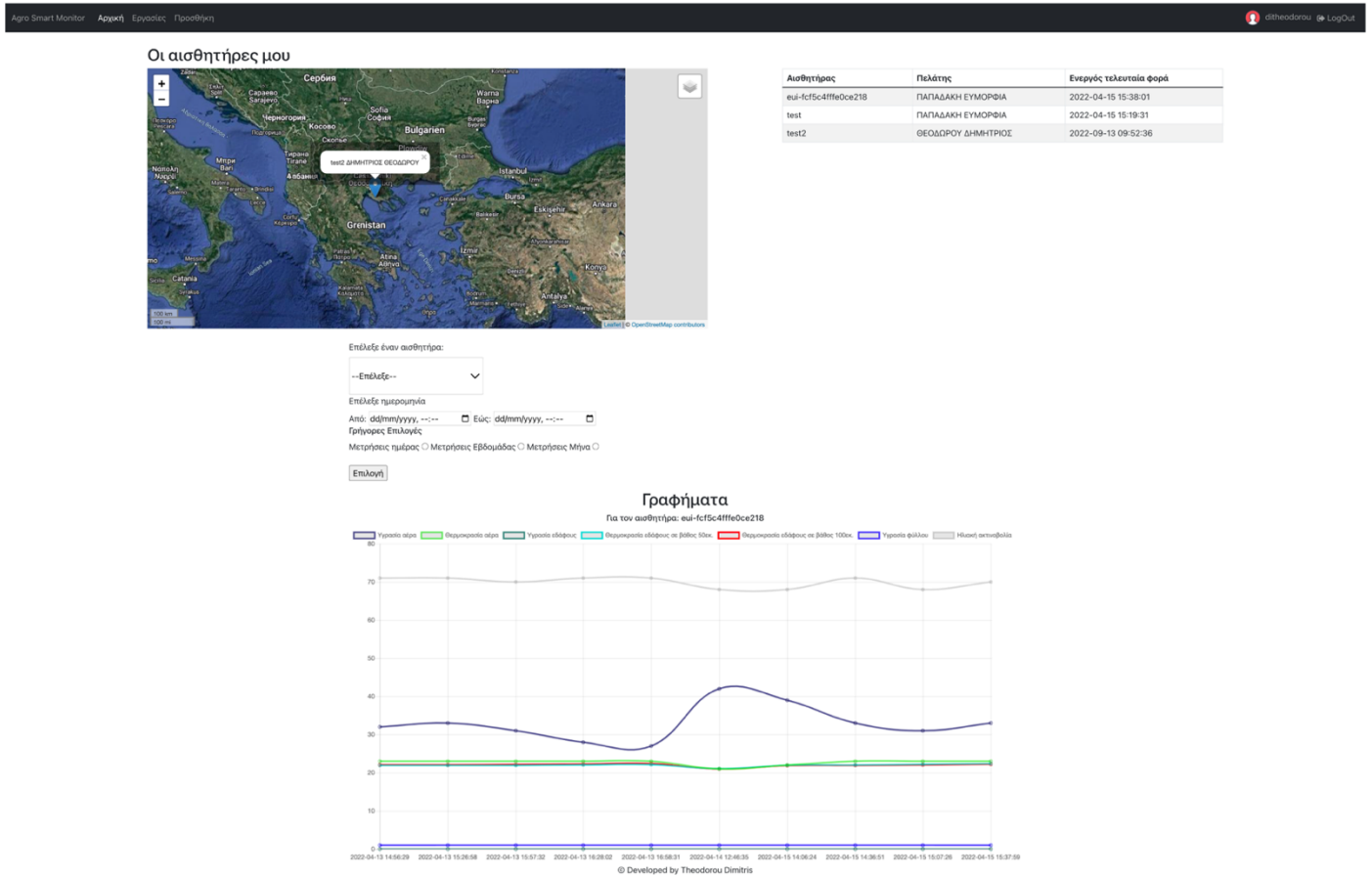
Στην σελίδα «Καιρός» (Εικόνα 57), ο γεωργός μπορεί να δει τον καιρό κατά την χρονική στιγμή της αναζήτησης, καθώς και προβλέψεις για τις επόμενες ημέρες, ώστε να προγραμματίσει τις προς εκτέλεση στον αγρό εργασίες.



Εικόνα 57

Στην αρχική σελίδα του *διαχειριστή* (Εικόνα 58), στον χάρτη, που βρίσκεται στην αριστερή πλευρά, εμφανίζονται οι τοποθεσίες με τους αισθητήρες καθώς και οι κάτοχοι του κάθε αισθητήρα. Στον πίνακα που βρίσκεται στην δεξιά πλευρά (Εικόνα 58) αναγράφονται το όνομα του κάθε αισθητήρα και το όνομα του κατόχου του, καθώς και πληροφορίες για την τελευταία χρονική στιγμή κατά την οποία ο κάθε αισθητήρας ήταν ενεργός. Από τις επιλογές, στο κεντρικό μέρος της ιστοσελίδας (Εικόνα 58), ο διαχειριστής έχει την δυνατότητα να επιλέξει τον αισθητήρα του οποίου τις τιμές θέλει να δει, το χρονικό διάστημα για το οποίο θέλει να δει τιμές και, με την χρησιμοποίηση των γρήγορων επιλογών, έχει την δυνατότητα να επιλέξει κάποια προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα.

Με το πάτημα του πλήκτρου «Επιλογή», στην περιοχή «Γραφήματα», εμφανίζονται τα αποτελέσματα.



Εικόνα 58

Στην σελίδα «Εργασίες» (Εικόνα 59), ο διαχειριστής μπορεί να εισάγει τις εργασίες που πιστεύει ότι πρέπει να εκτελεστούν σε μελλοντικό χρόνο, στον αγρό του κάθε αγρότη - χρήστη και έχει την δυνατότητα διατήρησης ηλεκτρονικού αρχείου.

Agro Smart Monitor Αρχική Εργασίες Προσθήκη
ditheodorou Logout

Εύρεση εργασίας:

Επέλεξε κατάσταση: Επέλεξε σπουδαιότητα:

Επέλεξε ημερομηνία: Από: Εώς:

🔍 Εύρεση

Δημιουργία εργασίας:

Επέλεξε ημερομηνία:

Επέλεξε τύπο εργασίας: Επέλεξε Πελάτη: Επέλεξε αγροτεμάχιο: Επέλεξε κατάσταση: Επέλεξε σπουδαιότητα:

Καλλιέργεια: Επέλεξε προϊόν που χρησιμοποιήθηκε: Εισάγετε ποσότητα προϊόντος: Εισάγετε κόστος εργασίας: Εισάγετε σημείωση:

✅ Δημιουργία

Οι εργασίες μου

	Ημερομηνία	Εργασία	Αγροτεμάχιο	Πελάτης	Κατάσταση	Σπουδαιότητα	Προϊόν που χρησιμοποιήθηκε	Κόστος προϊόντος	Κόστος εργασίας	Συνολικό κόστος	Σημείωση(από εταιρία)
	2022-04-12		ΕΛΙΕΣ - ΝΕΑ ΣΙΛΛΑΤΑ 14στρ.	801324922	ΕΓΙΝΕ	ΜΕΤΡΙΑ	YaraLiva TROPICOTE	50	1000		
	2022-05-15	ΛΙΠΑΝΣΗ	ΕΛΙΕΣ - ΝΕΑ ΣΙΛΛΑΤΑ 14στρ.	044513687	ΕΓΙΝΕ	ΧΑΜΗΛΗ	YaraLiva TROPICOTE	50	50	150	
	2022-09-14	ΡΑΝΤΙΣΜΟΣ	Αμπέλι - ΝΕΑ ΚΑΛΛΙΚΡΑΤΕΙΑ 28στρ.	801324922	ΣΕ ΕΞΕΛΙΞΗ	ΥΨΗΛΗ	YaraMila COMPLEX	1	50	53	ΣΥΜΑΝΤΙΚΟ
	2022-09-15	ΛΙΠΑΝΣΗ	ΕΛΙΕΣ - ΝΕΑ ΣΙΛΛΑΤΑ 14στρ.	044513687	ΔΕΝ ΕΓΙΝΕ	ΧΑΜΗΛΗ	YaraLiva TROPICOTE	50	57	207	ΝΑ ΓΙΝΕΙ ΕΓΚΑΙΡΑ

© Developed by Theodorou Dimitris

Εικόνα 59

Τέλος, στην σελίδα «Προσθήκη», ο διαχειριστής έχει τις δυνατότητες της δημιουργίας καινούργιων πελατών, του συσχετισμού ενός πελάτη με έναν αισθητήρα, καθώς και της εισαγωγής καινούργιων προϊόντων στην βάση (Εικόνα 60).

Agro Smart Monitor Αρχή Εγγραφή Προσθήκη @theodorou LogOut

Δημιουργία πελάτη

ΑΔΜ: Όνομα: Επώνυμο: Επωνυμία Εταιρίας:

Δραστηριότητα Εταιρίας:

Τηλέφωνο: E-mail:

Πόλη: Διεύθυνση: Τ.Κ.: Δ.Ο.Υ.:

Username: Password:

Κουτιόκινη πόλη στο OpenWeather:
 --Επίλεξε--

Εισαγωγή αισθητήρα σε πελάτη

Αναγνωριστικό αισθητήρα από TTS: Τύπος Αισθητήρα: --Επίλεξε--

Επίλεξε Πελάτη: 044513687 - ΕΥΜΟΡΦΗ ΠΑΠΑΔΑΚΗ

Γεωγραφικό πλάτος: Ευρυσσασμό μήκος:

Εισαγωγή καινούριου προϊόντος

Όνομα προϊόντος: Περιγραφή:

Εταιρία Κατασκευής: Τιμή: Καλλέργεια:

© Developed by Theodorou Dimitris

Εικόνα 60

Επίλογος

Συνοψίζοντας, με το πέρας αυτής της διπλωματικής επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός συστήματος αρκετά ευέλικτου έτσι ώστε να μπορεί να τροποποιηθεί στις ιδιαίτερες ανάγκες του κάθε γεωργού και της κάθε καλλιέργειας. Η ευελιξία αυτή επιτυγχάνεται με την εύκολη προσαρμογή του μικροελεγκτή με διάφορους αισθητήρες έτσι ώστε να συλλέγονται πληθώρα δεδομένων. Αυτό έχει ως σκοπό, την επίλυση προβλημάτων και την άμεση επέμβαση στον αγρό, εάν αυτό κριθεί απαραίτητο. Η εύχρηστη διεπαφή χρήστη όπου ο γεωργός μπορεί να ενημερώνεται για τις συνθήκες που επικρατούν στον αγρό τον βοηθάει να προγραμματίζει τις επόμενες ενέργειες που συμβάλουν στην ανάπτυξη και προστασία της καλλιέργειας του. Ωστόσο, υπάρχει χώρος για βελτίωση στο σύστημα όπως η προσθήκη μίας μικρής φωτοβολταϊκής κυψέλης στον μικροελεγκτή έτσι ώστε να επιτευχθεί ενεργειακή αυτονομία. Επιπλέον η προσθήκη κάποιου έξυπνου μηχανισμού θα βοηθούσε στην αυτοματοποιημένη ενημέρωση των χρηστών δίνοντας προβλέψεις για την πορεία της καλλιέργειας και λύσεις σε προβλήματα που μπορεί να προκύψουν.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Adriano, J. D., Mendes, Y. C. T., Marcondes, G. A. B., Furtado, V., & Rodrigues, J. J. P. C. (2018).
An IoT Sensor Mote for Precision Agriculture with Several MAC Layer Protocols Support.
*2018 International Conference on Information and Communication Technology
Convergence (ICTC), Jeju*, 684–688.
- Ahmed, A. T., El Gohary, F., Tzanakakis, V. A., & Angelakis, A. N. (2020). Egyptian and Grek Water
Cultures and Hydro-Techonology in Ancient Times. *Sustainability*, 12(22), 9760.
- Ananthi, N., Divya, J., Divya, M., & Janani, V. (2017). IoT based smart soil monitoring system for
agricultural production. *2017 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and
Rural Development (TIAR), Chennai*, 209–214.
- Anupriya, K., Jubin Sebastian, E., Yomas, J., Hari Babu, P., & Dwarakanath, T. (2016). Integrating
ZigBee and Sub GHz devices for long range networks. *2016 Online International
Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET), Coimbatore*, 1–5.
- Ashifuddin Mondal, M., & Rehena, Z. (2018). IoT Based Intelligent Agriculture Field Monitoring
System. *2018 8th International Conference on Cloud Computing, Data Science &
Engineering (Confluence), Noida, India*, 625–629.

- Ayoub, W., Samhat, A. E., Nouvel, F., Mroue, M., & Prevotet, J. (n.d.). Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and Supported Mobility. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.
- Azoidou, E., Pang, Z., Liu, Y., Lan, D., Bag, G., & Gong, S. (2018). Battery Lifetime Modeling and Validation of Wireless Building Automation Devices in Thread. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *14*(7), 2869–2880.
- Bauer, J., & Aschenbruck, N. (2018). Design and implementation of an agricultural monitoring system for smart farming. *2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany (IOT Tuscany), Tuscany*, 1–6.
- Bojan, T. M., Kumar, U. R., & Bojan, V. M. (2014). NFC based automation system for Tea plantation sector. *2014 Sixth International Conference on Advanced Computing (ICoAC), Chennai*, 140–144.
- Daskalakis, S. N., Goussetis, G., Assimonis, S. D., Tentzeris, M. M., & Georgiadis, A. (2018). A uW Backscatter-Morse-Leaf Sensor for Low-Power Agricultural Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Journal*, *18*(19), 7889–7898.
- Deepika, G., & Rajapirian, P. (2016). Wireless sensor network in precision agriculture: A survey. *2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS), Pudukkottai*, 1–4.
- Heble, S., Kumar, A., Prasad, K. V. V. D., Samirana, S., Rajalakshmi, P., & Desai, U. B. (2018). A low power IoT network for smart agriculture. *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Singapore*, 609–614.
- Imtiaz Jaya, N., & Hossain, M. F. (2018). A Prototype Air Flow Control System for Home Automation Using MQTT Over Websocket in AWS IoT Core. *2018 International*

- Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), Zhengzhou, China, 111–1116.*
- Jiajin, Z., Lichang, C., Qingsong, D., Haidong, Z., & Yonghua, Z. (2014). A social networks integrated sensor platform for precision agriculture,. *2014 4th IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, Beijing, 131–136.*
- Khattab, A., Abdelgawad, A., & Yelmarthi, K. (2016). Design and implementation of a cloud-based IoT scheme for precision agriculture. *016 28th International Conference on Microelectronics (ICM), Giza, 201–204.*
- Krishna, K. L., Silver, O., Malende, W. F., & Anuradha, K. (2017). Nternet of Things application for implementation of smart agriculture system. *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), Palladam, 54–59.*
- Linh An, P. M., & Kim, T. (2018). A Study of the Z-Wave Protocol: Implementing Your Own Smart Home Gateway. *2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), Nagoya, 411–415.*
- Marios, S., & Georgiou, J. (2017). Precision agriculture: Challenges in sensors and electronics for real-time soil and plant monitoring. *2017 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), Turin, 1–4.*
- Mekala, M. S., & Viswanathan, P. (2017). A novel technology for smart agriculture based on IoT with cloud computing. *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), Palladam, 75–82.*
- Odara, S., Khan, Z., & Ustun, T. S. (2015). Integration of Precision Agriculture and SmartGrid technologies for sustainable development. *2015 IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR), Chennai, 84–89.*

- Oliveira, K. V. D., Esgalha Castelli, H. M., José Montebeller, S., & Prado Avancini, T. G. (2017). Wireless Sensor Network for Smart Agriculture using ZigBee Protocol. *2017 IEEE First Summer School on Smart Cities (S3C), Natal*, 61–66.
- Pedersen, S. M., & Lind, K. M. (2017). Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives. *Springer International Publishing*.
- Piotrowski, K., Sojka-Piotrowska, A., Stamenkovic, Z., & Kraemer, P. (2016). IHPNode platform as a base for precision farming and remote diagnosis in agriculture. *24th Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade*, 1–5.
- Pooja, S., Uday, D. V., Nagesh, U. B., & Talekar, S. G. (2017). Application of MQTT protocol for real time weather monitoring and precision farming. *2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICECCOT), Mysuru*, 1–6.
- Popli, S., Jha, R. K., & Jain, S. (2019). A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NBloT): Architecture, Application and Challenges. *IEEE Access*, *7*, 16739–16776.
- Prathibha, S. R., Hongal, A., & Jyothi, M. P. (2017). IOT Based Monitoring System in Smart Agriculture. *2017 International Conference on Recent Advances in Electronics and Communication Technology (ICRAECT), Bangalore*, 81–84.
- Rajeswari, S., Suthendran, K., & Rajakumar, K. (2017). A smart agricultural model by integrating IoT, mobile and cloud-based big data analytics. *2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2), Coimbatore*, 1–5.
- Rao, R. N., & Sridhar, B. (2018). IoT based smart crop-field monitoring and automation irrigation system. *2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC), Coimbatore*, 478–483.

- Ribeiro, G. G. L., Lima, L. F. D., Oliveira, L., Rodrigues, J. J. P. C., Marins, C. N. M., & Marcondes, G. A. B. (2018). An Outdoor Localization System Based on SigFox. *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Porto*, 1–5.
- Rzepecki, W., Iwanecki, L., & Ryba, P. (2018). IEEE 802.15.4 Thread Mesh Network – Data Transmission in Harsh Environment. *2018 6th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW), Barcelona*, 42–47.
- Sahitya, G., Balaji, N., & Naidu, C. D. (2016). Wireless sensor network for smart agriculture. *2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (ICATccT), Bangalore*, 488–493.
- Santoshkumar, & Udaykumar, R. Y. (2015). Development of WSN system for precision agriculture. *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), Coimbatore*, 1–5.
- Shobha, N. S. S., Aruna, K. S. P., Bhagyashree, M. D. P., & Sarita, K. S. J. (2016). NFC and NFC payments: A review. *2016 International Conference on ICT in Business Industry & Government (ICTBIG), Indore*, 1–7.
- Sowmiya, P. B., Nagaswetha, B. K., & Priyadharshini, D. (2017). Design of Automatic Nutrition Supply System Using IoT Technique in Modern Cities. *2017 International Conference on Technical Advancements in Computers and Communications (ICTACC), Melmaurvathur*, 109–111.
- Vangimalla, S. R., & El-Sharkawy, M. (2018). Interoperability Enhancement in Health Care at Remote Locations using Thread Protocol in UAVs. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC*, 2821–2826.

Wasson, T., Choudhury, T., Sharma, S., & Kumar, P. (2017). Integration of RFID and sensor in agriculture using IOT. *2017 International Conference on Smart Technologies for Smart Nation (SmartTechCon), Bangalore.*

Zhang, Q., & Pierce, F. J. (2016). Agricultural automation: Fundamentals and practices. *CRC Press.*

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αμπατζίδης, Κ. (2019). ΟΙ ΑΝΤΙΛΗΨΕΙΣ ΤΩΝ ΕΛΛΗΝΩΝ ΓΕΩΡΓΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΥΠΝΗ ΓΕΩΡΓΙΑ.

Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Θεσσαλονίκη.

Λαλούσης, Ν. (2019). *Μελέτη τεχνολογιών δικτύωσης και συλλογής πληροφορίας του*

Διαδικτύου των Πραγμάτων για εφαρμογές στην γεωργία ακριβείας.

Μπαρμπάκης, Δ. (2022). *Ρομποτική Σμήνους στην Έξυπνη Γεωργία.*

Ηλεκτρονικές πηγές

<https://openweathermap.org/current>

<https://help.openstreetmap.org/questions/>

<https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/>

<https://www.chartjs.org>

<https://nodered.org>

<http://mqtt-explorer.com>

<https://www.arduino.cc>

<https://github.com/matthijskooijman/arduino-lmic>