

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΕΠΟΠΤΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΣΙΜΕΣ ΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΛΙΜΝΩΝ ΚΟΡΩΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΒΟΛΒΗΣ ΜΕ
ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Διπλωματική Εργασία

του

Μίχου Γεώργιου

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2020

ΕΠΟΠΤΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΙΣ
ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΣΙΜΕΣ ΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΛΙΜΝΩΝ ΚΟΡΩΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΒΟΛΒΗΣ ΜΕ
ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

Μίχος Γεώργιος

Μηχανικός Αυτοματισμών ΤΕ, ΤΕΙ Στερεάς Ελλάδας, 2017

Διπλωματική Εργασία

υποβαλλόμενη για τη μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων του

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΤΙΤΛΟΥ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια
Δρ. Πετρίδου Σοφία, Επίκουρη Καθηγήτρια

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 04/11/2020

Πετρίδου Σοφία,
Επίκουρη Καθηγήτρια

Ψάννης Κωνσταντίνος,
Αναπληρωτής Καθηγητής

Μαμάτας Ελευθέριος,
Επίκουρος Καθηγητής

.....

.....

.....

Μίχος Γεώργιος

.....

Περίληψη

Σήμερα, καθώς διανύουμε την εποχή της βιομηχανίας 4.0, παρατηρούμε τις εξελίξεις και την πρόοδο που έχει φέρει στην γεωργία ο ερχομός της γεωργίας ακριβείας και της έξυπνης γεωργίας. Η έξυπνη γεωργία έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή και κυρίως η εφαρμογή ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN). Ένα WSN μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά τη γεωργία με τη συλλογή των δεδομένων σε μια καλλιεργήσιμη έκταση και να συμβάλλει στη μείωση της σπατάλης των φυσικών πόρων. Ειδικότερα στην ευρύτερη περιοχή του υγροτόπου των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης όπου η υπεράντληση σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή, την λειψυδρία και γενικά τα περιβαλλοντολογικά προβλήματα υποβάθμισαν την περιοχή τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, σε τέτοιο επίπεδο που η λίμνη Κορώνεια, το 2002, αποξηράνθηκε τελείως. Σε αυτή την έρευνα στόχος είναι να προταθεί ένα σύστημα περιβαλλοντολογικής παρακολούθησης με στόχο την καταγραφή και εποπτεία των ευρύτερων περιοχών πέριξ των λιμνών, την ποιότητα των υδάτων στις λίμνες και των καλλιεργούμενων εκτάσεων, και συγκεκριμένα την εποπτεία των αρδευτικών υδάτων με απώτερο σκοπό τον συνεχή έλεγχο της ποιότητας τους και την μείωση της σπατάλης τους.

Λέξεις Κλειδιά:

Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, διαδίκτυο των πραγμάτων, συστήματα συλλογής δεδομένων, συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, λίμνη Κορώνεια, λίμνη Βόλβη, έξυπνη γεωργία, γεωργία ακρίβειας, ασύρματες επικοινωνίες, περιβαλλοντική παρακολούθηση

Abstract

Today, as we move into the age of industry 4.0, we observe the development and progress that has brought to agriculture the advent of precision agriculture and smart agriculture. Smart farming has attracted a lot of attention and especially the implementation of wireless sensor networks (WSN). A WSN can effectively support agriculture by collecting data on arable land and help reduce natural resource waste. Especially in the wider area of the wetlands of Koronia and Volvi lakes, where over-pumping combined with climate change, water scarcity, and general the environmental issues degraded the area both qualitatively and quantitatively, to such an extent that lake Koronia collapsed completely in 2002. In this research, the aim is to propose an environmental monitoring system with the aim of recording and monitoring the wider areas around the lakes, the water quality in the lakes and the cultivated areas, and in particular monitoring the irrigation waters, with the ultimate goal of their continuous quality control and reducing water wasting.

Keywords:

Wireless Sensor Networks, WSN, Internet of Things, IoT, Data Acquisition Systems, DAQ, Decision Support System Decision Support System, DSS, Koronia lake, Volvi lake, smart agriculture, precision agriculture, wireless communications, environmental monitoring

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωσή της και όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Ευχαριστώ θερμά την επιβλέπων καθηγήτρια μου, Δρ. Πετρίδου Σοφία, για την ευθύνη που ανέλαβε να με καθοδηγήσει καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Για τα εποικοδομητικά της σχόλια και την επιμονή που έδειξε ώστε να ολοκληρωθεί με επιτυχία η παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή Δρ. Ψάννη Κωνσταντίνο και τον Επίκουρο Καθηγητή Δρ. Μαμάτα Ελευθέριο για την συμβολή τους στην επιλογή του θέματος και την πολύτιμη συνεισφορά τους στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, ως μέλη της τριμελούς επιτροπής.

Επίσης, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, στους γονείς μου Βασίλη και Ελένη, και στα αδέρφια μου Ιορδάνη και Σωτηρία, για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Και φυσικά στη σύζυγό μου Ελισάβετ, που στάθηκε δίπλα μου, αρωγός σε όλη μου την προσπάθεια καθώς ήταν εκείνη που με ενέπνευσε να συνεχίσω τις σπουδές μου και να μην εγκαταλείψω. Ήταν πάντα δίπλα σε όλα μου τα βήματα και μαζί έχουμε καταφέρει σημαντικά πράγματα.

Τέλος θα ήθελα να αφιερώσω την επιτυχία των σπουδών μου στην κόρη μου Μαρία Ελένη, καθώς από την στιγμή που ήρθε στην ζωή μας είναι η έμπνευση μου να προσπαθώ να φτάσω όσο πιο ψηλά μπορώ για να μπορώ στο μέλλον να της δείξω τον δρόμο ώστε να με ξεπεράσει.

Μίχος Γεώργιος

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή	1
1.1 Πρόβλημα – Σημαντικότητα του θέματος	1
1.1.1 Περιοχή μελέτης - Η Μυγδονία λεκάνη	1
1.2 Σκοπός – Στόχοι	4
1.3 Διάρθρωση της μελέτης	5
2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση – Θεωρητικό Υπόβαθρο	8
2.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων – Internet of Things (IoT)	8
2.2 Συστήματα συλλογής Δεδομένων – Data Acquisition Systems (DAQ)	8
2.3 Αρχιτεκτονική Κόμβων IoT και WSN	10
2.4 Ασύρματη Δικτύωση συσκευών IoT	14
2.4.1 Τεχνολογίες δικτύων χαμηλής ισχύος	16
2.4.2 Αρχιτεκτονική δικτύων χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής	19
2.5 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων - Wireless Sensor Network (WSN)	26
2.5.1 Κατηγορίες εφαρμογών WSN	27
2.6 Έξυπνη γεωργία και γεωργία ακριβείας	34
3 Μεθοδολογία	38
3.1 Επιλογή σχετικού ερευνητικού έργου	38
3.2 Συγκριτική μελέτη περιπτώσεων ως ερευνητική μεθοδολογία	39
4 Σχετικό Ερευνητικό Έργο	41
4.1 Εφαρμογές WSN για χρήση σε εποπτεία λιμνών και υδάτων	41
4.1.1 Εφαρμογές με έμφαση στην εξοικονόμηση ενέργειας	41
4.1.2 Εφαρμογές με έμφαση σε συστήματα συλλογής δεδομένων	44
4.1.3 Υλοποιημένες εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες	50
4.2 Εφαρμογές WSN για χρήση στην γεωργία ακριβείας	52
4.2.1 Εφαρμογές με έμφαση σε συστήματα συλλογής δεδομένων	53
4.2.2 Εφαρμογές με έμφαση στην ασφάλεια των επικοινωνιών IoT	59
4.2.3 Εφαρμογές με έμφαση την παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων	61
4.3 Εφαρμογές WSN για εποπτεία και έλεγχο συστημάτων άρδευσης	65
4.4 Εφαρμογές WSN για την διαχείριση οικοσυστημάτων	73
5 Συγκριτική Μελέτη	77
5.1 Κριτήρια επιλογής σχετικών μελετών	77

5.2 Κριτήρια προς σύγκριση σχετικών μελετών	79
5.2.1 Κατανάλωση ενέργειας και αυτονομία	79
5.2.2 Πρωτόκολλο επικοινωνίας και εμβέλεια	80
5.2.3 Φυσικά μεγέθη προς μέτρηση	81
5.2.4 Ασφάλεια επικοινωνιών και δεδομένων	83
5.2.5 Εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες	84
5.2.6 Προσομοίωση και πειραματική ανάπτυξη πλατφόρμας εξομοίωσης	85
5.3 Αποτελέσματα Σύγκρισης	85
5.3.1 Ανάλυση σχετικών ερευνητικών έργων	85
5.3.2 Σύγκριση σχετικών ερευνητικών έργων	86
6 Αποτελέσματα	93
6.1 Σχεδίαση WSN εφαρμογής για την περιοχή μελέτης	93
6.1.1 Σχεδίαση πλαισίου WSN για την εποπτεία της λίμνης Κορώνειας	94
6.1.2 Τεχνικές προδιαγραφές δικτυακής υποδομής	95
6.1.3 Τεχνικές προδιαγραφές κόμβων WSN	96
6.1.4 Σχεδίαση συστήματος συλλογής δεδομένων	99
6.2 Ρίσκα υλοποίησης	100
Επίλογος	101
Σύνοψη και συμπεράσματα	101
Όρια και περιορισμοί της έρευνας	102
Μελλοντικές Επεκτάσεις	102
Βιβλιογραφία	104

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1 Αρχιτεκτονική κόμβων WSN	10
Εικόνα 2-2 Ασύρματα Πρωτόκολλα για χρήση σε εφαρμογές IoT	15
Εικόνα 2-3 Τοπολογίες Αστέρα και Πλέγματος	20
Εικόνα 2-4 Βασικά στοιχεία δικτύων LPWAN	22
Εικόνα 2-5 LoRaWAN Topology	24
Εικόνα 6-1 Πρόταση δικτύωσης WSN για την λίμνη Κορώνεια.....	95

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1 Δραστηριότητες που οδηγούν σε υποβάθμιση του υδροφόρου ορίζοντα.	3
Πίνακας 2-1 Καταλληλότητα πρωτοκόλλων για εφαρμογές IoT.....	26
Πίνακας 5-1 Επικεντρωμένο πεδίο έρευνας σχετικών μελετών.....	78
Πίνακας 5-2 Συγκριτική Μελέτη Σχετικού Ερευνητικού Έργου	87

Συμβολισμοί

ADC	Analog-to-digital converter
AES	Advanced Encryption Standard
AI	Artificial Intelligence
API	Application Programming Interface
CPU	Central Processing Unit
CSV	Comma-separated values
DAQ	Data Acquisition
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HTTP	Hypertext Transfer Protocol Secure
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IC	Integrated circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IPv4	Internet Protocol version 4
IPv6	Internet Protocol version 6
ISM	Industrial, Scientific, and Medical radio band
JSON	JavaScript Object Notation
LPWAN	Low Power Wide Area Network
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Media Access Control
MCU	Microcontroller Unit
ML	Machine Learning
NoSQL	non-SQL
RAM	Random-Access Memory
RF	Radio Frequency
RFID	Radio-Frequency Identification
ROM	Read-Only Memory
SDR	Software-Defined Radio
SPI	Serial Peripheral Interface
SQL	Structured Query Language
UDP	User Datagram Protocol
WAN	Wide Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networking
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
XML	eXtensible Markup Language

1 Εισαγωγή

1.1 Πρόβλημα – Σημαντικότητα του θέματος

Ο κόσμος σήμερα είναι ευάλωτος στους κινδύνους της κλιματικής αλλαγής, όπως η υποχώρηση των παγετώνων, η αύξηση των θερμοκρασιών, και άλλα πιο μεταβλητά και έντονα καιρικά φαινόμενα όπως πλημμύρες, ξηρασίες και παγετοί, η υποβάθμιση του εδάφους και η συνεχώς αυξανόμενη λειψυδρία. Ωστόσο, υπάρχουν μεγάλα κενά στην κατανόηση των αλλαγών στο κλίμα και πώς αυτές οι αλλαγές θα επηρεάσουν τα ανθρώπινα και φυσικά συστήματα, καθιστώντας δύσκολη την πρόβλεψη, τον σχεδιασμό και την προσαρμογή στις επερχόμενες αλλαγές.

Η εφαρμογή προτάσεων WSN και γενικότερα δικτύων αισθητήρων και συστημάτων συλλογής δεδομένων σε αυτόν τον τομέα μπορεί να βελτιώσει την κατανόησή της επιστημονικής κοινότητας για το κλίμα. Χρησιμοποιώντας τεχνολογικές λύσεις, και παρέχοντας παράλληλα μετρήσεις των κλιματικών στοιχείων που βασίζονται στην ανίχνευση και τις επικοινωνίες WSN. Τέτοιες μετρήσεις είναι απαραίτητες για την υποστήριξη της εκτίμησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε κάθε ένα από τα σχετικά πεδία εφαρμογής όπως η ποιότητα του περιβάλλοντος και η παρακολούθηση του, η βιώσιμη ενέργεια, τα γεωργικά συστήματα, η πολιτιστική διατήρηση και η βιώσιμη εξόρυξη (Salam, 2020). Καθώς η κλιματική αλλαγή και οι συνέπειες της είναι μια γενική έννοια με παγκόσμιες διαστάσεις δεν είναι εφικτό να υπάρχουν λύσεις WSN αυτής της κλίμακας.

1.1.1.1 Περιοχή μελέτης - Η Μυγδονία λεκάνη

Η λεκάνη της Μυγδονίας βρίσκεται στην κεντρική Μακεδονία και περιλαμβάνει τις λίμνες Κορώνειας και Βόλβης. Οι δυο λίμνες απαρτίζουν τον επονομαζόμενο υγρότοπο «Λίμνες Κορώνεια και Βόλβη» ο οποίος περιλαμβάνεται από το 1975 στη διεθνή συνθήκη προστασίας Ramsar και στο πανευρωπαϊκό δίκτυο προστασίας Natura 2000. Επίσης από το 2004 έχει θεσμοθετηθεί ως Εθνικό Πάρκο των υγροτόπων λιμνών Κορώνειας Βόλβης και Μακεδονικών Τεμπών, καθώς και σε άλλα καθεστώτα προστασίας λόγω της υψηλής οικολογικής αξίας του οικοσυστήματος (Φορέας Διαχείρισης Λιμνών Κορώνειας - Βόλβης, 2015).

Συγκεκριμένα η λίμνη Κορώνεια, ένας από τους 11 πιο σημαντικούς υγροτόπους της Ελλάδας που προστατεύεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω από την συνθήκη Ramsar, έχει σχεδόν εξαφανιστεί καθώς τις τελευταίες δεκαετίες έχει χάσει περισσότερο από τα 2/3 της αρχικής της επιφάνειας. Η υποβάθμιση του υδάτινου συστήματος είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα μη βιώσιμης διαχείρισης των υδάτων στην περιοχή. Τόσο το νερό της λίμνης, όσο και τα επιφανειακά και τα υπόγεια ύδατα σε ολόκληρη την υδρολογική λεκάνη δεν είναι σε θέση να διατηρήσουν τη συστηματική οικονομική ανάπτυξη της περιοχής με αποτέλεσμα την εξάντληση των υδάτων, την αρνητική ισορροπία του νερού, την υποβάθμιση του περιβάλλοντος και πολύ σοβαρά οικονομικά προβλήματα (Mylopoulos et al., 2007).

Τις προηγούμενες δεκαετίες, η περιοχή γύρω από τη λίμνη Κορώνεια έγινε πόλος έλξης για την ανάπτυξη βιομηχανικών μονάδων οι οποίες όμως χωροθετήθηκαν άναρχα πέριξ της λίμνης. Η βιομηχανική υποδομή περιλάμβανε κάποιες υδροβόρες μονάδες, όπως βαφεία, γαλακτοβιομηχανίες, και κάποιες άλλες όπως κλωστοϋφαντουργικές, και μεταποιητικές, γεωργικές και αλιευτικές βιομηχανίες. Ορισμένες από αυτές τις βιομηχανίες επηρεάζουν τη λίμνη Κορώνεια μέσω της απόρριψης λυμάτων απευθείας στη λίμνη, οι οποίες συμβάλλουν στη μείωση της ποιότητας των υδάτων. Επιπλέον, η βιομηχανική παραγωγή προκαλεί τον υγρότοπο μέσω τροποποίησης του υδρολογικού προϋπολογισμού της λεκάνης απορροής μέσω άντλησης υπόγειων υδάτων (Manakou et al., 2008).

Άλλοι παράγοντες που οδήγησαν στην υποβάθμιση της λίμνης είναι η κτηνοτροφία και οι αστικές δραστηριότητες. Το ζωικό κεφάλαιο επηρεάζει το οικοσύστημα της λίμνης με δύο τρόπους: με την απόρριψη των αποβλήτων του στη λίμνη χωρίς επεξεργασία και με την εντατικοποίηση των ζώων (υπερβόσκηση), η οποία οδήγησε στη μείωση της υπάρχουσας βλάστησης. Εκτός από το αρνητικό ισοζύγιο νερού, η λίμνη δέχεται μεγάλες ποσότητες οικιακών λυμάτων, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση της ποιότητας των υδάτων. Τα λύματα από τα συστήματα αποχέτευσης και οι σηπτικές δεξαμενές από τους δήμους που βρίσκονται γύρω από τη λίμνη καταλήγουν στη λίμνη χωρίς επεξεργασία. Ο παρακάτω πίνακας 1-1 συνοψίζει τις προαναφερθείσες απειλές και τις επιπτώσεις τους στο οικοσύστημα της λίμνης Κορώνειας (Manakou et al., 2008).

Πίνακας 1-1 Δραστηριότητες που οδηγούν σε υποβάθμιση του υδροφόρου ορίζοντα.

Πηγή: (Manakou et al., 2008)

Δραστηριότητες	Συνέπειες
Γεωργικές δραστηριότητες	
Αύξηση των γεωτρήσεων άρδευσης	Μείωση της στάθμης του νερού
Αύξηση χρήσης λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων	Ποιοτική υποβάθμιση του νερού
Κτηνοτροφικές Δραστηριότητες	
Απόρριψη απορριμμάτων στη λίμνη	Ποιοτική υποβάθμιση του νερού
Υπερβόσκηση	Υποβάθμιση της βλάστησης
Βιομηχανικές δραστηριότητες	
Βιομηχανικά λύματα	Ποιοτική υποβάθμιση του νερού
Άντληση υπόγειων υδάτων	Μείωση της στάθμης του νερού
Αστικές δραστηριότητες	
Απόρριψη απορριμμάτων στη λίμνη	Ποιοτική υποβάθμιση του νερού

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει και στις δυο λίμνες, Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε χημικά όπως ο φώσφορος στα ιζήματα της Λίμνης Κορώνειας ήταν υψηλότερες από εκείνες της Λίμνης Βόλβης (Fytianos & Kotzakioti, 2005). Δεδομένου ότι και στις δυο λίμνες υπήρχε και υπάρχει ακόμα έντονη αγροτική δραστηριότητα (στην υπολεκάνη της Κορώνειας καλλιεργούνται 220.000 στρέμματα ενώ στην υπολεκάνη της Βόλβης 140.000) με υδροβόρες καλλιέργειες καθώς και κτηνοτροφικές μονάδες όπως βουστάσια, ποιμνιστάσια και χοιροστάσια οι οποίες έχουν υψηλές απαιτήσεις σε νερό, τα περισσότερα εκ των οποίων βρίσκονται εντός της υπολεκάνης της Βόλβης, και με μόνη διαφορά την έντονη βιομηχανική δραστηριότητα στην περιοχή της λίμνης Κορώνειας με αποκορύφωση τις δεκαετίες '80 και '90 με βιομηχανίες όπως βαφεία, φινιριστήρια, κλωστοϋφαντουργία και γαλακτοβιομηχανίες οι οποίες είτε έχουν διακόψει την λειτουργία τους (Τεκίδης, 2012), είτε έχουν μεταφέρει τις δραστηριότητες τους σε γειτονικές χώρες με μειωμένη φορολογία. Δεδομένου ότι η μεγαλύτερη οικολογική καταστροφή έχει παρατηρηθεί το διάστημα των δεκαετιών που η βιομηχανική δραστηριότητα ήταν έντονη γύρω από την λίμνη Κορώνεια, με

αποκορύφωση τις χρονιές 2002 και 2008 όπου η λίμνη αποξηράνθηκε ολοσχερώς καθώς και τις χρονιές 2004 και 2007 όπου περισσότερα από 30.000 πτηνά από 39 αποδημητικά είδη, ανάμεσά τους σπάνια και απειλούμενα, βρέθηκαν νεκρά (Manakou et al., 2008; Myloroupos et al., 2007). Θα μπορούσε κανείς να κάνει τον συσχετισμό πως η κύρια αιτία της οικολογικής καταστροφής δεν είναι οι αγροτικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες αλλά η συστηματική απόρριψη ακατέργαστων λυμάτων και αποβλήτων τα οποία διοχετεύονταν στην λίμνη από την έντονη βιομηχανική δραστηριότητα (Manakou et al., 2008). Εφόσον δεν έχει υπάρξει κάποια σχετική μελέτη πάνω σε αυτό, δεν μπορούν να εξαχθούν βάσιμα συμπεράσματα καθώς όποια μελέτη γίνει από εδώ και πέρα δεν θα μπορεί να έχει ως παράγοντα την βιομηχανική δραστηριότητα η οποία έχει σχεδόν εκλείψει από την περιοχή.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή θεωρεί ότι η Ελλάδα δεν έχει λάβει επαρκή μέτρα για να αποτρέψει την υποβάθμιση της λίμνης και την παρενόχληση της πανίδας και της χλωρίδας (European Commission, 2009). Το ψάρεμα και η κολύμβηση στη λίμνη δεν είναι πλέον εφικτά και η λίμνη συνεχίζεται να μολύνεται σοβαρά από απορρίψεις βλαβερών ουσιών, βαρέων μετάλλων και άλλων ρύπων από βιομηχανίες και πόλεις της γύρω περιοχής. Αυτά τα βλαβερά συστατικά προάγουν την υπερβολική ανάπτυξη των φυκών που πνίγει άλλη ζωή, μια διαδικασία γνωστή ως ευτροφισμός. Καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο βιότοπος της λίμνης φιλοξενεί πτηνά που αναπαράγονται, διαχειμάζουν ή διαβιούν, όπως για παράδειγμα ο κρυπτοτσικνιάς *Ardeola ralloides*, ο θαλασσαετός *Heliaetus albicilla*, και η λαγγόνα *Phalacrocorax pygmeus*, αποτελεί περιοχή Natura 2000 που προστατεύεται κάτω από της οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα πτηνά και τους οικοτόπους και περιλαμβάνεται στη σύμβαση Ramsar, διεθνή συνθήκη για την προστασία και την αειφόρο χρήση φυσικών υγροτόπων. Η Ελλάδα έχει νομικές υποχρεώσεις για την περιοχή σύμφωνα με την οδηγία για την απόρριψη επικίνδυνων ουσιών στο υδάτινο περιβάλλον και την οδηγία για την επεξεργασία των αστικών λυμάτων που απαιτεί από τα κράτη μέλη να διεξάγουν αυστηρή επεξεργασία των λυμάτων που προορίζονται να απελευθερωθούν σε ευαίσθητες περιοχές (European Commission, 2011).

1.2 Σκοπός – Στόχοι

Σκοπός της εργασίας είναι να αναλυθούν και να συγκριθούν προτάσεις διαφόρων ερευνητών με γνωστικό αντικείμενο τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor

Network - WSN). Έπειτα να διερευνηθεί η εφαρμογή των WSN σε γεωργικές καλλιέργειες, στον έλεγχο και την εποπτεία σύγχρονων μονάδων παραγωγής και άλλα πεδία έρευνας πάνω στην κλιματική αλλαγή και την εποπτεία νερών και υδάτων. Ως απώτερος σκοπός της έρευνας είναι η πρόταση μιας λύσης για την μείωση της σπατάλης των φυσικών πόρων του υδροβιότοπου των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης καθώς και την αποτελεσματική φυτοπροστασία σε περίπτωση μολύνσεων. Στόχος είναι ένα σύστημα ελέγχου και εποπτείας των εκτάσεων πέριξ των λιμνών για την παρακολούθηση της άρδευσης και σύστημα ελέγχου που βασίζεται σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και στο Διαδίκτυο των πράγματος. Το WSN συλλέγει από απόσταση τα δεδομένα από τα πεδία και τα μεταφέρει στο υπολογιστικό σύννεφο (Cloud) δημιουργώντας ένα ολοκληρωμένο Σύστημα Συλλογής Δεδομένων (Data Acquisitions System - DAQ) από το οποίο μπορούν να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες με την εφαρμογή τεχνικών Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning – ML) και Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI).

Για την υλοποίηση μια πιθανής λύσης WSN απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι κόμβοι πάνω στους οποίους είναι συνδεδεμένοι οι αισθητήρες να έχουν δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας ώστε μπορούν να επικοινωνούν με πλατφόρμες υποστήριξης επικοινωνίας Μηχανή-προς-Μηχανή (Machine to Machine - M2M) με ασύρματα πρωτόκολλα δικτύωσης, ενδεικτικά πρωτόκολλα είναι το ZigBee και το LoRaWAN τα οποία έχουν μεγάλη εφαρμογή σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καθώς και γενικότερα σε IoT συσκευές, είτε πιο συνηθισμένες μεθόδους ασύρματες δικτύωσης με την χρήση πρωτοκόλλων Wi-Fi, Bluetooth ή κυψελοειδών δικτύων 3G, 4G και 5G τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση της ασύρματης επικοινωνίας εσωτερικά μεταξύ των κόμβων καθώς και του κεντρικού κόμβου με τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή (Rodríguez et al., 2017).

1.3 Διάρθρωση της μελέτης

Η παρούσα εργασία χωρίζεται σε επτά κεφάλαια. Κάθε κεφάλαιο παρουσιάζει, αναλύει και συγκρίνει διαφορετικές λεπτομέρειες σε αντικείμενα μελέτης και τεχνολογίες, υψηλής σημασίας για το θέμα της έρευνας. Κύριο μέλημα κατά την συγγραφή κάθε κεφαλαίου ήταν να παρουσιαστούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την παρουσίαση των τεχνολογιών WSN και των ασύρματων πρωτοκόλλων τα οποία χρησιμοποιούνται από

συσκευές IoT για να καταστεί δυνατή η κατανόηση του σχετικού ερευνητικού έργου καθώς και η υλοποίηση μια εφαρμογής ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Τελικός στόχος είναι μέσω της ερευνητικής διαδικασίας να επέλθει η αποδοχή των τεχνολογιών αυτών για να προταθεί μια ολοκληρωμένη λύση για την περιοχή μελέτης μας.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης στην οποία θα επικεντρωθεί η παρούσα εργασία και γίνεται μια αναφορά στην αναγκαιότητα της υλοποίησης μιας πρότασης επιβλέψεις των αρδευτικών συστημάτων και γενικότερα του υδροβιότοπων και της ποιότητάς των υδάτων των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης. Επίσης γίνεται μια απλή αναφορά στις τεχνολογίες στις οποίες θα επικεντρωθεί η μελέτη στα επόμενα κεφάλαια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο όπου αναλύονται περισσότερο οι έννοιες του διαδικτύου των πραγμάτων, των συστημάτων συλλογής δεδομένων καθώς και τον ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Επίσης γίνεται εκτενή αναφορά στις τεχνολογίες δικτύωσης οι οποίες προσφέρουν λύσεις που εφαρμόζονται στο διαδίκτυο των πραγμάτων καθώς και πληροφορίες σχετικά με την αρχιτεκτονική και την τοπολογία που χρησιμοποιούνται για την δικτύωση αυτών των συσκευών.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει την μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για την υλοποίηση της έρευνας της εργασίας. Στη συνέχεια του τρίτου κεφαλαίου γίνεται μια αναφορά στα κριτήρια με τα οποία επιλέχθηκαν οι μελέτες που θα παρουσιαστούν στο σχετικό ερευνητικό έργο. Τέλος για την ολοκλήρωση της παρουσίασης της μεθοδολογίας, γίνεται μια αναφορά στον τρόπο με τον οποίο θα συγκριθούν οι μελέτες μεταξύ τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν σχετικές έρευνες οι οποίες παρουσιάζουν αντίστοιχες λύσεις και εφαρμογές της τεχνολογίας ασύρματης δικτύωσης αισθητήρων με στόχο είτε την αξιοποίηση τους σε εφαρμογές έξυπνης γεωργίας και τον έλεγχο αρδευτικών συστημάτων είτε για την εποπτεία και μελέτη περιοχών περιβαλλοντολογικού, οικολογικού και αγροτικού ενδιαφέροντος. Τα πεδία έρευνας των σχετικών μελετών έχουν χωριστεί σε τέσσερις κατηγορίες, οι οποίες είναι εφαρμογές WSN για χρήση σε εποπτεία λιμνών και υδάτων, για χρήση στην γεωργία ακριβείας, για εποπτεία και έλεγχο συστημάτων άρδευσης και για την διαχείριση οικοσυστημάτων. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια μικρή αναφορά στις προτάσεις των ερευνητών πάνω στα τέσσερα αυτά πεδία έρευνας, στις προκλήσεις τις οποίες κλήθηκαν

να αντιμετωπίσουν με την εφαρμογή της έρευνας τους και στις δυσκολίες που τυχόν συνάντησαν κατά την ερευνητική διαδικασία

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια συγκριτική μελέτη των ερευνών και των τεσσάρων πεδίων έρευνας που αναλύθηκαν, ομαδοποιούνται, και αφού θέτονται έξι κριτήρια για την σύγκριση τους, παρουσιάζεται η συγκριτική μελέτη και αναλύονται ως προς έξι κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά είναι η κατανάλωση ενέργειας και η δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας των κόμβων, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιήθηκαν τα οποία συγκρίνονται με βάση την εμβέλεια τους, το εύρος και τα χαρακτηριστικά με τα οποία οι ερευνητές τα επέλεξαν για την εφαρμογή στην πρόταση τους, οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για να ληφθούν οι φυσικές μετρήσεις από το περιβάλλον, και τα δύο τελευταία κριτήρια είναι είτε η εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες, είτε η υλοποίηση προσομοίωσης και πειραματικής πλατφόρμας για την λήψη μετρήσιμων αποτελεσμάτων και παρουσίαση της πρότασης κάθε έρευνας.

Το έκτο κεφάλαιο είναι το σημείο στο οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ερευνάς καθώς και η πρόταση που προκύπτει από την συγκριτική μελέτη και πως μπορεί να υλοποιηθεί μια λύση WSN στην περιοχή μελέτης μας, αξιοποιώντας κατάλληλα τις τεχνολογίες που έχουν αναφερθεί σε όλα τα προηγούμενα κεφάλαια με στόχο την επίτευξη της ιδανικής λύσης για τις ανάγκες της περιοχής. Τα κριτήρια για την υλοποίηση της προταθείσας λύσης έχουν εξαχθεί από τα αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης με στόχο την υιοθέτηση των τεχνολογιών που αρμόζουν στην περιοχή μελέτης της παρούσας έρευνας και λαμβάνοντας υπόψιν τους φυσικούς παράγοντες και τυχόν δυσκολίες και ρίσκα υλοποίησης μια πρότασης WSN, δεδομένου της έκτασης της περιοχής κάλυψης.

Τέλος, το τελευταίο κεφάλαιο αναφέρεται στα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την εργασία και γίνεται μια αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα οφέλη που μπορεί να έχει η υλοποίηση μια τέτοιας πρότασης. Επίσης, παραθέτονται διάφορες προτάσεις βελτίωσης και παράμετροι που δεν έχουν ληφθεί υπόψιν για να μπορέσει να υπάρξει η πιθανότητα μελλοντικών επεκτάσεων και επιπρόσθετων πεδίων ερευνάς που μπορεί να συμπληρώσουν ή να βελτιώσουν την πρόταση που έχει προκύψει ως αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας.

2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση – Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων – Internet of Things (IoT)

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT) αποτελεί μια τεχνολογική καινοτομία η οποία επιτρέπει σε διάφορα καθημερινά αντικείμενα να συνδεθούν μεταξύ τους, άλλα και με άλλες δικτυακές συσκευές και τερματικά έτσι ώστε να μπορούν να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει σύνδεση στο διαδίκτυο. Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι από πολύπλοκες βιομηχανικές μηχανές μέχρι wearable συσκευές που χρησιμοποιούν ενσωματωμένους αισθητήρες για τη περισυλλογή πληροφοριών και δεδομένων, καθώς και την πραγματοποίηση κάποιας ενέργειας σύμφωνα με τον προγραμματισμό τους. Ανάμεσα στις συσκευές IoT είναι και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Network – WSN) (Rajalakshmi & Mahalakshmi, 2016).

2.2 Συστήματα συλλογής Δεδομένων – Data Acquisition Systems (DAQ)

Η συλλογή δεδομένων είναι η διαδικασία απόκτησης δεδομένων από μετρήσεις για αποθήκευση και ανάλυση. Για την διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται συστήματα μετρήσεων τα οποία συμβάλουν στην επεξεργασία, αποθήκευση και απεικόνιση δεδομένων από φυσικές διαδικασίες (Κινγκ, 2005). Η απόκτηση δεδομένων είναι η συλλογή σημάτων από πραγματικές μετρήσιμες πηγές και η ψηφιοποίηση αυτών των σημάτων για αποθήκευση, ανάλυση και παρουσίαση σε προσωπικό υπολογιστή. Το φως, η θερμοκρασία, η πίεση και η ροπή είναι μερικοί από τους πολλούς διαφορετικούς τύπους σημάτων που μπορούν να διασυνδεθούν με ένα σύστημα λήψης δεδομένων. Εκτός από την απόκτηση δεδομένων, τα συστήματα συλλογής δεδομένων χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή ηλεκτρικών σημάτων (Bishop, 2007).

Αυτά τα σήματα μπορούν είτε να ελέγξουν έξυπνα τα μηχανικά συστήματα είτε να παρέχουν ένα ερέθισμα έτσι ώστε το σύστημα συλλογής δεδομένων να μπορεί να μετρήσει την απόκριση. Ένα σύστημα συλλογής δεδομένων παρέχει έναν τρόπο να δοκιμαστούν εμπειρικά σχέδια, θεωρίες και συστήματα πραγματικού κόσμου για επικύρωση ή έρευνα (Bishop, 2007). Για παράδειγμα, ο σχεδιασμός και η παραγωγή μοντέρνων αυτοκινήτων βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην απόκτηση δεδομένων. Οι μηχανικοί θα χρησιμοποιήσουν πρώτα τα ανακτημένα δεδομένα για να ελέγξουν το σχεδιασμό των

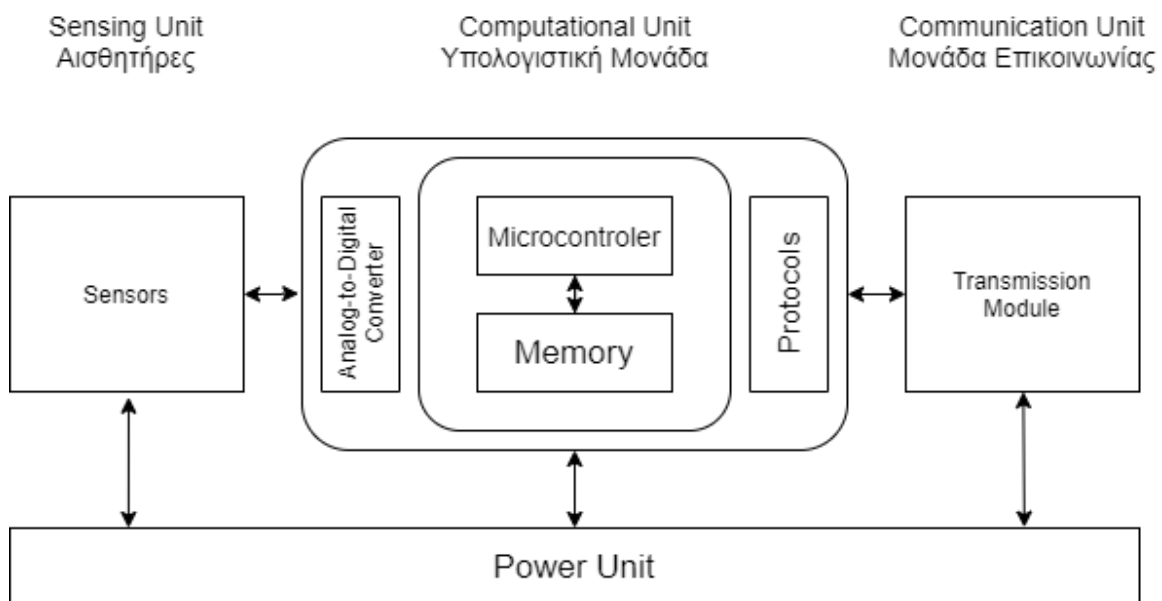
εξαρτημάτων του αυτοκινήτου. Το πλαίσιο μπορεί να παρακολουθείται για μηχανική καταπόνηση, θόρυβο ανέμου και αντοχή. Η δόνηση και η θερμοκρασία του κινητήρα μπορούν να αποκτηθούν για την αξιολόγηση της ποιότητας του σχεδιασμού. Οι ερευνητές και οι μηχανικοί μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουν αυτά τα δεδομένα για να βελτιστοποιήσουν το σχεδιασμό του πρώτου πρωτοτύπου του αυτοκινήτου. Το πρωτότυπο μπορεί στη συνέχεια να παρακολουθείται υπό πολλές διαφορετικές συνθήκες σε ένα κομμάτι δοκιμής, ενώ οι πληροφορίες συλλέγονται μέσω της απόκτησης δεδομένων. Μετά την απαιτούμενη επανάληψη της αλλαγής σχεδιασμού και της απόκτησης δεδομένων, το αυτοκίνητο είναι έτοιμο για παραγωγή. Οι συσκευές συλλογής δεδομένων μπορούν να παρακολουθούν τις μηχανές που συναρμολογούν το αυτοκίνητο και μπορούν να διασφαλίσουν ότι το συναρμολογημένο αυτοκίνητο πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές (Bishop, 2007).

Τα σύγχρονα συστήματα συλλογής δεδομένων αποτελούνται από μετατροπείς και αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ενός φυσικού φαινομένου. Τα υπόλοιπα μέρη ενός σύγχρονου συστήματος συλλογής δεδομένων είναι τα ηλεκτρικά σήματα που προκύπτουν, το υλικό για την προετοιμασία των σημάτων για μέτρηση, το υλικό μέτρησης και το λογισμικό απόκτησης δεδομένων (Bishop, 2007).

Σήμερα, η συλλογή δεδομένων γίνεται κυρίως με συστήματα συλλογής που παράγουν ψηφιακά δεδομένα για αποθήκευση και επεξεργασία σε ένα υπολογιστικό σύστημα. Δεδομένου ότι οι εφαρμογές τους λαμβάνουν χώρα στον τομέα της πληροφορικής, η χρήση μιας βάσης δεδομένων για την αποθήκευση των συλλεχθέντων δεδομένων είναι αναμενόμενη. Παράλληλα, η ευρεία εξάπλωση των συσκευών IoT επιτρέπει τη συλλογή τεράστιου όγκου δεδομένων. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές πηγές, τα παραδοσιακά συστήματα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων SQL δεν είναι κατάλληλα για την αποθήκευση αυτού του τεράστιου όγκου δεδομένων (Amghar et al., 2018; Ferencz & Domokos, 2019). Εφόσον αυτά τα δεδομένα είναι δύσκολο να χειριστούν χρησιμοποιώντας παραδοσιακές σχεσιακές βάσεις δεδομένων, η αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών οδηγούν στη χρήση βάσεων δεδομένων NoSQL. Υπάρχουν διάφορες μελέτες σχετικά με την επιλογή της κατάλληλης NoSQL βάσης για την χρήση της σε εφαρμογές IoT. Σε αυτή την εργασία δεν θα γίνει επέκταση σε αυτό το ερευνητικό πεδίο καθώς αποτελεί έναν ξεχωριστό κλάδο μελέτης.

2.3 Αρχιτεκτονική Κόμβων IoT και WSN

Αν και κάθε κόμβος ασυρμάτου αισθητήρα μπορεί να προσαρμοστεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τις ανάγκες κάθε εφαρμογής, στο τέλος όλοι οι κόμβοι αισθητήρων έχουν παρόμοια εξαρτήματα. Στο σημείο αυτό θα γίνει μια αναφορά σε κάθε τμήμα από το οποίο απαρτίζεται ένας κόμβος ασύρματου αισθητήρα. Ένας κόμβος WSN αποτελείται από ένα κεντρικό μικροελεγκτή χαμηλής ισχύος για την επεξεργασία όλων των λειτουργιών, μια μονάδα RF για την εκτέλεση ασύρματων επικοινωνιών, μια προαιρετική εξωτερική μνήμη για την καταγραφή δεδομένων σε αυτήν και τις μπαταρίες ή οποιαδήποτε πηγή τροφοδοσίας για μπορεί να λειτουργεί ο κόμβος WSN και να έχει μεγάλη διάρκεια ζωής. Στην εικόνα 2-1 απεικονίζεται μια εσωτερική αναπαράσταση ενός κοινού κόμβου ασύρματου αισθητήρα. Αν και υπάρχουν διαφορετικοί συνδυασμοί σχεδιασμού ασύρματων κόμβων αισθητήρων. Η εικόνα 2-1 απεικονίζει την πιο δημοφιλή αντιπροσώπευση.



Εικόνα 2-1 Αρχιτεκτονική κόμβων WSN

Ο κόσμος του διαδικτύων των πραγμάτων IoT σήμερα απαριθμεί δεκάδες τρισεκατομμύρια ενσωματωμένες συσκευές σε όλο τον κόσμο. Τέτοιες συσκευές αποτελούνται από διαφορετικές οικογένειες μικροελεγκτών (Microcontroller ή MCU) και κάθε μία από αυτές χρησιμοποιείται για διάφορες εφαρμογές. Σήμερα, ο μέσος άνθρωπος έχει ένα έξυπνο τηλέφωνο μαζί του κάθε στιγμή. Αυτά τα έξυπνα τηλέφωνα αποτελούνται από πολλούς μικροελεγκτές και είναι σε θέση να μετρήσουν τη θερμοκρασία, να

καταγράψουν ήχο, να τραβήξουν φωτογραφίες ή βίντεο, να μετρήσουν την πίεση ή την επιτάχυνση και αμέτρητα άλλα πράγματα. Προβλέπεται ότι ο αριθμός των συσκευών IoT που μας περιβάλλουν θα αυξηθεί εκθετικά και θα εισαχθεί ένας τεράστιος αριθμός νέων συσκευών τα επόμενα χρόνια με τις οποίες θα αλληλοεπιδρούμε καθημερινά. Σε αντίθεση με το IoT, τα WSN δεν είναι όλα συνδεδεμένα στο διαδίκτυο. Παρόλο που τα WSN μπορούν να λειτουργήσουν μέσω Internet Protocol version 4 (IPv4) ή Internet Protocol version 6 (IPv6) αδιακρίτως, για λόγους ασφαλείας μόνο οι πύλες είναι συνήθως συνδεδεμένες στο Internet (Lorente, 2015).

Σε γενικές γραμμές ένας μικροελεγκτής MCU, επίσης γνωστός και ως uC, είναι ένας τύπος μικροεπεξεργαστή, θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως επεξεργαστής σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα (Integrated Circuit - IC), τέτοιου είδους μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται ευρέως στα ενσωματωμένα συστήματα (Embedded Systems). Ένα τέτοιο ολοκληρωμένο κύκλωμα διαθέτει στον πυρήνα του έναν εσωτερικό επεξεργαστή, on-chip ROM μνήμη (Read Only Memory), μνήμη αποθήκευσης η οποία είναι συνήθως εξωτερική και ως φυσικό μέσο χρησιμοποιούνται μνήμες τύπου flash, κυρίως για λογούς κόστους και ευκολίας συντήρησης, και πιο σπάνια μνήμη RAM (Random Access Memory), καθώς και άλλα χαρακτηριστικά ανάλογα με τον κατασκευαστή και το πεδίο εφαρμογής του. Οι μικροελεγκτές, όπως έχει προαναφερθεί, έχουν σχεδιαστεί κυρίως για ενσωματωμένες εφαρμογές (Embedded Applications). Στον κόσμο των μικροελεγκτών μπορούμε να παρατηρήσουμε μια ταξινόμηση των αρχιτεκτονικών με βάση τον αριθμό των bit. Όπως και μια μονάδα CPU, ένας μικροελεγκτής λειτουργεί με λέξεις που σχηματίζονται από ένα συγκεκριμένο προκαθορισμένο αριθμό bit ανάλογα με την αρχιτεκτονική τους. Οι μικροελεγκτές λειτουργούν επίσης σε συγκεκριμένες συχνότητες ρολογιού που βασίζονται στις προδιαγραφές υλικού τους για την εφαρμογή ενός συνόλου μηχανικών οδηγιών (Lorente, 2015).

Όταν οι κατασκευαστές κόμβων WSN επιλέγουν έναν μικροελεγκτή για τις ενσωματωμένες τους εφαρμογές τους, αντιμετωπίζουν πολλά προβλήματα για να επιλέξουν τον καταλληλότερο σχεδιασμό για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της εφαρμογής WSN που καλούνται να υλοποιήσουν. Η κατανάλωση ενέργειας είναι ίσως το πιο κρίσιμο χαρακτηριστικό στα WSN που θα πρέπει να λάβουν υπόψη πριν το σχεδιασμό. Όσο λιγότερη κατανάλωση ενέργειας, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ζωής του κόμβου WSN. Η ασφάλεια έναντι των φυσικών συνθηκών πρέπει επίσης να συζητηθεί λεπτομερώς

και οι μικροελεγκτές θα πρέπει να έχουν τουλάχιστον επαρκή προστασία κατά της παραβίασης για να βγουν αβλαβείς μετά τις πιο κοινές φυσικές επιθέσεις, δεδομένου ότι πολλοί κόμβοι χρησιμοποιούνται για μετρήσεις σε εξωτερικό περιβάλλον και είναι εκτεθειμένοι σε διάφορους παράγοντες όπως για παράδειγμα τα άστατα καιρικά φαινόμενα. Ωστόσο, η απόδοση είναι επίσης πολύ σημαντική. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά είναι η ταχύτητα, το μέγεθος αποθήκευσης, η υπολογιστική ισχύς, η ωριμότητα των εργαλείων εντοπισμού σφαλμάτων, η διεπαφή Application Programming Interface (API) που διατίθεται και ούτω καθεξής (Lorente, 2015).

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, ένας κόμβος WSN έχει ένα κύριο μικροελεγκτή ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία όλων των δεδομένων και την αποστολή του πακέτου που πρόκειται να μεταδοθεί στη μονάδα επικοινωνίας. Από την άλλη πλευρά, όταν τα δεδομένα έχουν παραλήπτη τον κόμβο WSN και τη μονάδα επικοινωνίας και προέρχονται από άλλους κόμβους WSN, τα δεδομένα πρέπει είτε να προωθηθούν είτε να επανεπεξεργαστούν και να επιστραφούν στο επόμενο hop. Σε ορισμένες περιπτώσεις, υπάρχουν περισσότεροι από ένας μικροελεγκτές στον κόμβο WSN, αλλά υπάρχει μόνο ένας που λειτουργεί ως κύριος (Lorente, 2015).

Η μονάδα επικοινωνίας είναι υπεύθυνη για την ασύρματη μετάδοση όλων των πληροφοριών σε ένα ασύρματο δίκτυο. Όλες οι πληροφορίες αποστέλλονται από τον κύριο μικροελεγκτή στο ολοκληρωμένο κύκλωμα της μονάδας επικοινωνίας μέσω εντολών. Αυτές οι εντολές εξαρτώνται από τον κατασκευαστή της μονάδας επικοινωνίας καθώς και του πρωτοκόλλου που χρησιμοποιεί. Όταν ένας κατασκευαστής προμηθεύει αυτές τις μονάδες, μία διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών API είναι υποχρεωτική για να είναι εύκολος και απλός ο προγραμματισμός τους. Η διεπαφή API είναι ένα σύνολο οδηγιών ή εντολών με τις οποίες ένα module ασύρματης επικοινωνίας επικοινωνεί σε έναν μικροελεγκτή ή άλλο στοιχείο. Αυτό η διεπαφή API είναι συνήθως προσβάσιμη μέσω μιας διεπαφής UART με τις κύριες θύρες TX (Transmission) και RX (Reception). Ανάλογα με τον κατασκευαστή, διαφορετικές θύρες ενδέχεται να είναι σημαντικές για την επικοινωνία με το ασύρματο module. Η ταχύτητα UART σε μια επικοινωνία εξαρτάται επίσης από τον κατασκευαστή αν και είναι συνήθως είτε 9600 bits ανά δευτερόλεπτο (bps) είτε 115200 bps. Μόλις η επικοινωνία είναι διαθέσιμη και οι σωστές θύρες είναι συνδεδεμένες, μπορεί να ξεκινήσει να αποκρίνεται σε εντολές (Lorente, 2015).

Ένα ασύρματο module σε έναν κόμβο WSN μπορεί να εμφανιστεί με διαφορετικούς τρόπους, ενσωματωμένο στον κύριο μικροελεγκτή, σε μια εξωτερική μονάδα, προσαρτημένο στην κύρια πλακέτα ως ένα άλλο εξάρτημα ή απλώς ως μια συσκευή με όλα ενσωματωμένα σε έναν μικροελεγκτή. Στα περισσότερα πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας, τα εκάστοτε ασύρματα module διαθέτουν ένα ενσωματωμένο σύστημα το οποίο εφαρμόζει έναν αλγόριθμο υπεύθυνο για την κρυπτογράφηση και την αποκρυπτογράφηση όλης της επικοινωνίας με τους άλλους κόμβους αισθητήρων. Ο πλέον δημοφιλής αλγόριθμος που χρησιμοποιείτε για τέτοιας μορφής ασύρματων επικοινωνιών είναι ο Advanced Encryption Standard (AES) 128.

Κάθε κόμβος έχει έναν ή περισσότερους αισθητήρες συνδεδεμένους σε αυτό. Υπάρχουν διάφορα είδη αισθητήρων ανάλογα με την εφαρμογή την οποία καλείτε να υλοποιήσει. Οι πιο χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες είναι μεταξύ άλλων είναι οι αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, κίνησης, πυκνότητας, μέτρησης αποστάσεων, θορύβων και κραδασμών. Τουλάχιστον ένας αισθητήρας είναι πάντα ενσωματωμένος σε ασύρματος κόμβους. Είναι δυνατό να ενσωματωθούν είτε στο ίδιο το ασύρματο module, είτε στον κύριο μικροελεγκτή είτε ως αποκλειστικός μικροελεγκτής για τη λήψη μετρήσεων από το περιβάλλον.

Πολλοί ασύρματοι αισθητήρες περιορίζονται από τους πόρους τους και ως εκ τούτου δεν είναι σε θέση να αποθηκεύουν όλες τις μετρήσεις τους στις on-chip μνήμες. Αν και οι μικροελεγκτές έχουν εσωτερική μνήμη, δεν θεωρείται καλή ιδέα να αποθηκεύονται δεδομένα σε αυτές τις μνήμες. Κυρίως επειδή οι ασύρματοι αισθητήρες έχουν μειωμένη διάρκεια ζωής ανάλογα με τις λειτουργίες εγγραφής τους. Και έπειτα, επειδή κατά την παρακολούθηση καταγράφει και αποθηκεύει δεδομένα συνεχώς. Η πλειονότητα των ασύρματων κόμβων αισθητήρων είναι εξοπλισμένη με εξωτερική και μόνιμη μνήμη. Σε αυτήν τη μνήμη, αποθηκεύονται πολλές μετρήσεις και παραμένουν διαθέσιμες ακόμη και μετά την αντικατάσταση του ασύρματου κόμβου. Κανονικά αυτές οι εξωτερικές μνήμες είναι σειριακές μνήμες ή σειριακές EEPROM. Τέτοιες συσκευές μνήμης επικοινωνούν με τους μικροελεγκτές μέσω των διεπαφών SPI ή Inter-Integrated Circuit (I²C) (Lorente, 2015). Το I²C υλοποιείται με την χρήση δύο καλωδίων διπλής κατεύθυνσης. Τα δύο καλώδια αυτά είναι το SDA, Serial Data (γραμμή σειριακών δεδομένων), που χρησιμοποιείται για την μεταφορά δεδομένων και το SCL, Serial Clock (γραμμή σειριακού ρολογιού), για το ρολόι και είναι συνδεδεμένα πάντα σε θετική

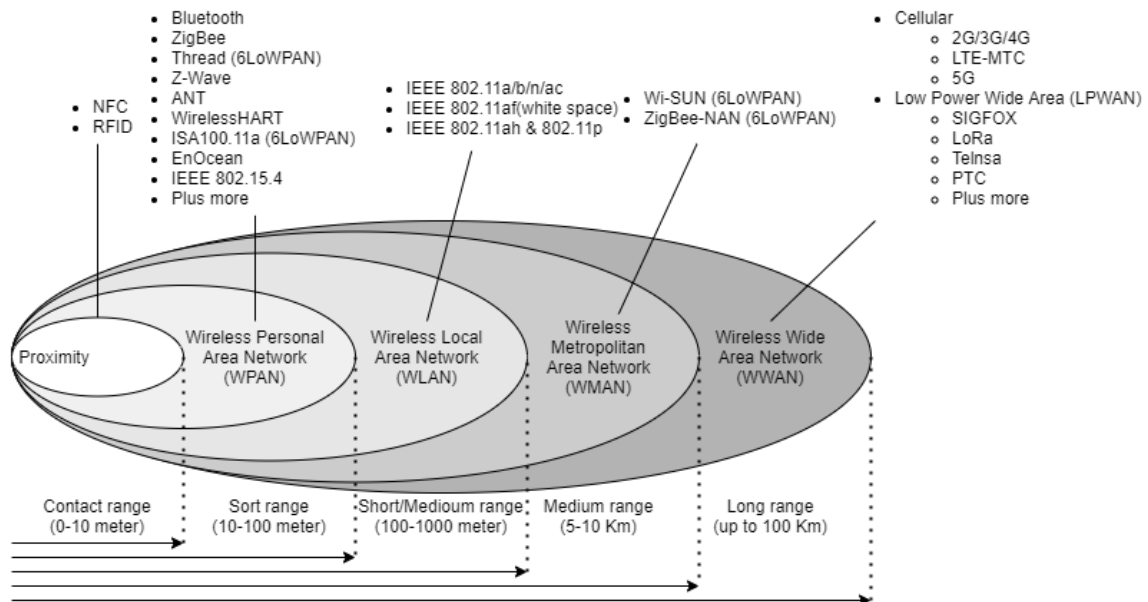
τροφοδοσία μέσω pull-up αντιστάσεων, τα δυο καλώδια αποτελούν τον δίαυλο επικοινωνίας του πρωτοκόλλου I²C. Κάθε συσκευή πάνω στο δίαυλο έχει τη δικιά της μοναδική διεύθυνση, καθώς επίσης και το δικαίωμα αποστολής και λήψης δεδομένων από το δίαυλο. Ο δίαυλος SPI (Serial Peripheral Interface Bus) υλοποιήθηκε για πρώτη φορά από την εταιρία Motorola και ο σκοπός της ανάπτυξης του, όπως και το I²C, ήταν για την εύκολη επικοινωνία μεταξύ ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και τον καλύτερο τρόπο διασύνδεσης των μικροελεγκτών για να επικοινωνούν με μία ή περισσότερες περιφερειακές μονάδες, σε μικρές αποστάσεις. Το πρωτόκολλο SPI επιτρέπει τη σύγχρονη σειριακή επικοινωνία μεταξύ ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε πλήρης αμφίδρομη (duplex) επικοινωνία. Τόσο το πρωτόκολλο SPI όσο και το I²C είναι δύο πρωτόκολλα σειριακής επικοινωνίας που βασίζονται στην επικοινωνία Master-Slave.

Όσον αφορά την παροχή ενέργειας για τους κόμβους WSN, υπάρχουν τουλάχιστον τρεις γνωστές πηγές ρεύματος, αυτόνομες μπαταρίες, εξοικονόμηση ενέργειας με ηλιακούς συλλέκτες ή άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι πιο ασυνήθιστες, συνδεδεμένες στο δίκτυο παροχής ενέργειας. Οι κόμβοι είναι γνωστό ότι είναι ανεξάρτητοι και διαδίδονται ελεύθερα στον κόσμο. Το γεγονός αυτό εξαρτάται από τη χρήση μπαταριών ως τρόπο διατήρησης των κόμβων ενεργών. Δεδομένου ότι οι μικροελεγκτές χαμηλής ισχύος έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να μειώσουν την κατανάλωση, πολλοί μικροελεγκτές έχουν σχεδιαστεί για να παραμένουν σε κατάσταση αδράνειας sleep-mode όσο μπορούν όταν δεν υπάρχει ασύρματη επικοινωνία ή σειριακές εντολές από τον κύριο μικροελεγκτή. Η διάρκεια ζωής του κόμβου εκτιμάται ότι είναι έως και δέκα χρόνια, αν και υπάρχουν κόμβοι που ζουν μόνο για περίπου πέντε χρόνια. Όταν οι συνθήκες είναι σκληρές, η διάρκεια ζωής μειώνεται δραστικά σε περίπου δυο χρόνια. Οι πιο δημοφιλείς μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στους κόμβους ασύρματων αισθητήρων είναι είτε μπαταρίες τύπου coin cell είτε μερικές από τις γνωστές συμβατικές μπαταρίες τύπου AA (Lorente, 2015).

2.4 Ασύρματη Δικτύωση συσκευών IoT

Το διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT) και τα δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (Low Power WAN - LPWAN) αποτελούν το βασικό θεμελιώδες σύστημα για πολλές εφαρμογές. Παίζει κρίσιμο ρόλο στην εκπλήρωση δυναμικών απαιτήσεων και ευέλικτων εφαρμογών και υπηρεσιών και παρέχει το πλαίσιο για την

παροχή αποτελεσματικών και αποδοτικών λύσεων. Για επικοινωνίες και διασυνδέσεις τέτοιων εφαρμογών, διατίθεται μια σειρά είτε από κλειστά, ιδιοταγή πρότυπα είτε λύσεις ανοιχτών προτύπων. Τα δίκτυα εκτείνονται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-2 (Chaudhari & Zennaro, 2020).



Εικόνα 2-2 Ασύρματα Πρωτόκολλα για χρήση σε εφαρμογές IoT

Τα ασύρματα δίκτυα μικρής εμβέλειας που βασίζονται στην αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων και στην επικοινωνία κοντινού πεδίου είναι δίκτυα προσωπικού χώρου (Wireless Personal Area Networks - WPANs) για συσκευές που απαιτούν εγγύτητα. Τα WPAN χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πληροφοριών σε μικρές αποστάσεις μεταξύ της ομάδας των συμμετεχόντων συσκευών με μικρή ή καθόλου υποδομή. Αυτά τα δίκτυα μπορούν να συνδεθούν σε πλατφόρμες cloud μέσω μιας κεντρικής συσκευής ή ενός διακομιστή. Τα περισσότερα από τα WPAN έχουν σχεδιαστεί για χαμηλό ρυθμό δεδομένων, εξοικονόμηση ενέργειας, μικρή απόσταση και φθηνές λύσεις. Οι εξέχουσες τεχνολογίες WPAN περιλαμβάνουν IEEE 802.15.4 WPAN χαμηλού ρυθμού, ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a, 6LoWPAN, Bluetooth χαμηλής ενέργειας (Bluetooth Low Energy - BLE), και άλλα (εικόνα 2-2). Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Network - WLAN) έχουν σχεδιαστεί κυρίως για ανταλλαγή δεδομένων υψηλής ταχύτητας μεταξύ των συσκευών με κάλυψη που περιορίζεται σε αποστάσεις εντός ενός κτηρίου ή μιας συγκεκριμένης έκτασης σε μερικές εκατοντάδες μέτρα όπως για παράδειγμα το

γνωστό σε όλους Wi-Fi. Οι τεχνολογίες WLAN περιλαμβάνουν τις διαφορετικές παραλλαγές του προτύπου IEEE 802.11. Τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (Metropolitan Area Network - WMAN) έχουν εξελιχθεί σε ένα νέο στοιχείο αρχιτεκτονικού συστήματος για ευρυζωνικές ασύρματες τοπικές εφαρμογές, οι οποίες περιλαμβάνουν περιοχές εξυπηρέτησης μικρότερες από τα δίκτυα ευρείας περιοχής αλλά μεγαλύτερη από τα τοπικά δίκτυα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια περιοχή της οποίας η έκταση μπορεί να καλύπτει για παράδειγμα μιας πανεπιστημιούπολης, ή ενός πάρκου ή και για εφαρμογές κοινής ωφέλειας σε αντίστοιχες γεωγραφικές εκτάσεις. Ορισμένες από τις τεχνολογίες για δίκτυα WMAN είναι οι Wi-SUN, ZigBee NAN και Wireless M-bus. (Chaudhari & Zennaro, 2020)

Τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (Wireless Wide Area Network - WWAN) έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν μεγαλύτερες περιοχές σε σύγκριση με τα δίκτυα WLAN και WMAN. Έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για διαφορετικές εφαρμογές από την άποψη της κάλυψης, της απόδοσης ισχύος, των ρυθμών μετάδοσης, της επεκτασιμότητας, της επαναχρησιμοποίησης πόρων και άλλων. Τα δίκτυα WWAN μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε κυψελοειδή (cellular) και δίκτυα χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής (Low Power Wide Area Network - LPWAN). Τα κυψελοειδή δίκτυα όπως τα 3G, 4G και 5G έχουν σχεδιαστεί κυρίως για τη μεταφορά δεδομένων με υψηλό ρυθμό για αποστάσεις από μερικά έως δεκάδες χιλιόμετρα. Αυτά τα δίκτυα υποστηρίζουν την κινητικότητα και ως εκ τούτου παρέχουν εκτεταμένη κάλυψη πέρα από την περιοχή κάλυψης μιας κυψέλης μέσω μηχανισμών μεταπομπής, handover. Δηλαδή της διαδικασίας μεταφοράς του ελέγχου της εκπομπής και λήψης των μεταδιδόμενων πληροφοριών από τον σταθμό βάσης μιας κυψέλης σε έναν άλλον. Τα LPWAN είναι τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας που έχουν σχεδιαστεί για να επιτρέπουν επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, διεπαφής χαμηλού κόστους και σχετικά χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων για εφαρμογές IoT και M2M. Οι περισσότερες από τις έξυπνες εφαρμογές απαιτούν ορισμένους συνδυασμούς των παραπάνω λύσεων ασύρματης πρόσβασης (Chaudhari & Zennaro, 2020).

2.4.1 Τεχνολογίες δικτύων χαμηλής ισχύος

Γενικά, δύο βασικές κατηγορίες δικτύων αναπτύσσονται σε εφαρμογές IoT, δίκτυα χαμηλής ισχύος μικρής εμβέλειας και δίκτυα χαμηλής ισχύος μεγάλης εμβέλειας. Τα

δίκτυα χαμηλής ισχύος μικρής εμβέλειας αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο μέρος του δυναμικού αριθμού των πραγμάτων, όπως για παράδειγμα η τεχνολογία IPv6 over low-power wireless personal area networks, γνωστή με το ακρωνύμιο 6LoWPAN, συστήματα ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνοτήτων, RFID, τεχνολογία Near Field Communication, NFC, και Bluetooth χαμηλής ενέργειας, BLE. Το 6LoWPAN είναι ένα βασικό μέρος του διαδικτύων των πραγμάτων όπου τα κόμβοι 6LoWPAN αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία των δικτυωμένων συσκευών στο IoT για δίκτυα χαμηλής ισχύος μικρής εμβέλειας. Τα δίκτυα χαμηλής ισχύος μεγάλης εμβέλειας ή μερικές φορές καλούνται δίκτυα χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής (Low Power Wide Area Network - LPWAN) έχουν σχεδιαστεί και χρησιμοποιούνται για επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλό ρυθμό δεδομένων. Μερικά παραδείγματα τέτοιων δικτύων είναι τα δίκτυα SIGFOX, δίκτυα Long-Range Wide Area Network - LoRaWAN, Wi-SUN, narrow-band IoT (NB-IoT) και άλλα. Οι συσκευές LPWAN αναμένεται να είναι περίπου το 25% των συνολικών συσκευών IoT. Τα SIGFOX και LoRaWAN χρησιμοποιούνται ήδη και χρησιμοποιούνται ευρέως. Σύμφωνα με έρευνα των Al-Kashoash και Kemp στην επίσημη σελίδα της SIGFOX το δίκτυο SIGFOX, μέχρι το 2017, κάλυπτε 29 χώρες και έκταση άνω των 1,7 εκατομμυρίων km², με 471 εκατομμύρια συσκευές (Al-Kashoash & Kemp, 2016).

Τόσο τα δίκτυα 6LoWPAN όσο και τα LPWAN παίζουν καθοριστικό ρόλο στον κόσμο του IoT όπου ο κάθε τύπος δικτύου έχει τα δικά του, μοναδικά χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές του. Σύμφωνα με την προαναφερθείσα έρευνα των Al-Kashoash και Kemp πολλές εργασίες που μελετήθηκαν από τους ερευνητές εξετάζουν, συγκρίνουν και αξιολογούν διαφορετικές τεχνολογίες LPWAN για το IoT. Ανάμεσα στις έρευνες αυτές υπάρχουν διαφορετικά πρότυπα και τεχνολογίες LPWAN. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα τα οποία εξήγαγαν οι ερευνητές κατέληξαν ότι οι τεχνολογίες LPWAN υιοθετούν παρόμοιες προσεγγίσεις και έχουν τους ίδιους περιορισμούς και προκλήσεις. Αναφορικά ανάμεσα σε αυτές τις μελέτες υπάρχει μια αξιολόγηση δικτύων SIGFOX και LoRaWAN για το IoT από άποψη φυσικών και MAC επιπέδων. Στην συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε μια πειραματική αξιολόγηση για την εκτίμηση δοκιμών εξωτερικού εύρους για την τεχνολογία SIGFOX. Σε άλλη μελέτη αναλύθηκε η τεχνολογία LoRaWAN όσον αφορά την επεκτασιμότητα του δικτύου και την απόδοση του ως προς τους ρυθμούς μετάδοσης. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ένας σταθμός βάσης μπορεί να εξυπηρετεί αρκετά εκατομμύρια τελικούς κόμβους και η χωρητικότητα καναλιού στους ρυθμούς

μετάδοσης ανερχόμενης ζεύξης (uplink) εξαρτάται από την απόσταση και δεν υπερβαίνει τα 2 kbps. Ολοκληρώνοντας τις αξιοσημείωτες μελέτες από την έρευνα των Al-Kashoash και Kemp να αναφερθεί η επισκόπηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών του LoRaWAN από άποψη μεγέθους δικτύου, αξιοπιστίας και χωρητικότητας δικτύου καθώς και μια διερεύνηση των ορίων χωρητικότητας του LoRaWAN, όπου τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι τα δίκτυα LoRaWAN μπορούν να κλιμακωθούν αρκετά καλά εάν χρησιμοποιούν την επιλογή παραμέτρων δυναμικής μετάδοσης ή και πολλούς σταθμούς βάσης. Διαφορετικά, δεν το κάνουν. Ωστόσο κανένα από αυτά δεν εξετάζει και συγκρίνει μεταξύ 6LoWPAN και LPWAN (Al-Kashoash & Kemp, 2016).

Στην έρευνα των Boulogeorgos, Diamantoulakis και Karagiannidis (Boulogeorgos et al., 2016) συγκρίνονται και συζητούνται οι προδιαγραφές σχεδιασμού των τεχνολογιών LPWAN και η καταλληλότητά τους για διαφορετικές εφαρμογές IoT, ανάμεσα σε αυτές τις εφαρμογές περιλαμβάνει πολλές ευρέως χρησιμοποιούμενες εφαρμογές σε διάφορους τομείς, όπως μεταφορές και εφοδιαστική αλυσίδα, έξυπνες πόλεις, έξυπνα κτίρια, βιομηχανικές εφαρμογές καθώς και εφαρμογές για το περιβάλλον και την γεωργία στις οποίες εστιάζει και η παρούσα εργασία. Στην συγκεκριμένη μελέτη αναλύονται διάφορες τεχνολογίες LPWAN και συγκρίνονται ως προς τις απαιτήσεις και τις προδιαγραφές τους. Τα βασικά χαρακτηριστικά για τα δίκτυα LPWAN που μπορούν να υποστηρίξουν με επιτυχία αυτές τις εφαρμογές IoT, είναι ή υψηλή ενεργειακή αυτονομία των συνδεδεμένων συσκευών, καθώς αρκετές εφαρμογές IoT απαιτούν συσκευές μεγάλης διάρκειας ζωής της μπαταρίας ώστε να μπορούν να λειτουργούν χωρίς αντικατάσταση μπαταρίας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το χαμηλό κόστος της συσκευής καθώς και της ανάπτυξης της προκειμένου να καταστεί δυνατή μια κερδοφόρα επιχειρηματική περίπτωση για εφαρμογές IoT καθώς και το κόστος ανάπτυξης να διατηρείται στο ελάχιστο ώστε να είναι εφικτό με μια απλή αναβάθμιση των υφιστάμενων υποδομών και η αποφυγή της ανάπτυξης νέου υλικού ή η αντικατάσταση τους με την πρόοδο της τεχνολογίας. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των LPWAN είναι η εκτεταμένη κάλυψη, απαραίτητο χαρακτηριστικό για τα δίκτυα LPWAN ώστε να είναι δυνατή η υποστήριξη συσκευών IoT. Για παράδειγμα συσκευές που βρίσκονται στο υπόγειο των κτιρίων, πίσω από τοίχους και γενικά σε σημεία όπου η ασύρματη μετάδοση είναι δύσκολη με απώλεια σημάτων. Τέλος, ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό είναι η υποστήριξη για ένα μεγάλο αριθμό συσκευών IoT. Λόγω της εκθετικής αύξησης των συσκευών IoT, οι οποίες ενδέχεται να

μην είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες, κάθε σταθμός βάσης LPWAN θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίζει ένα τεράστιο αριθμό συσκευών IoT που να συνδέονται ταυτόχρονα (Boulogeorgos et al., 2016).

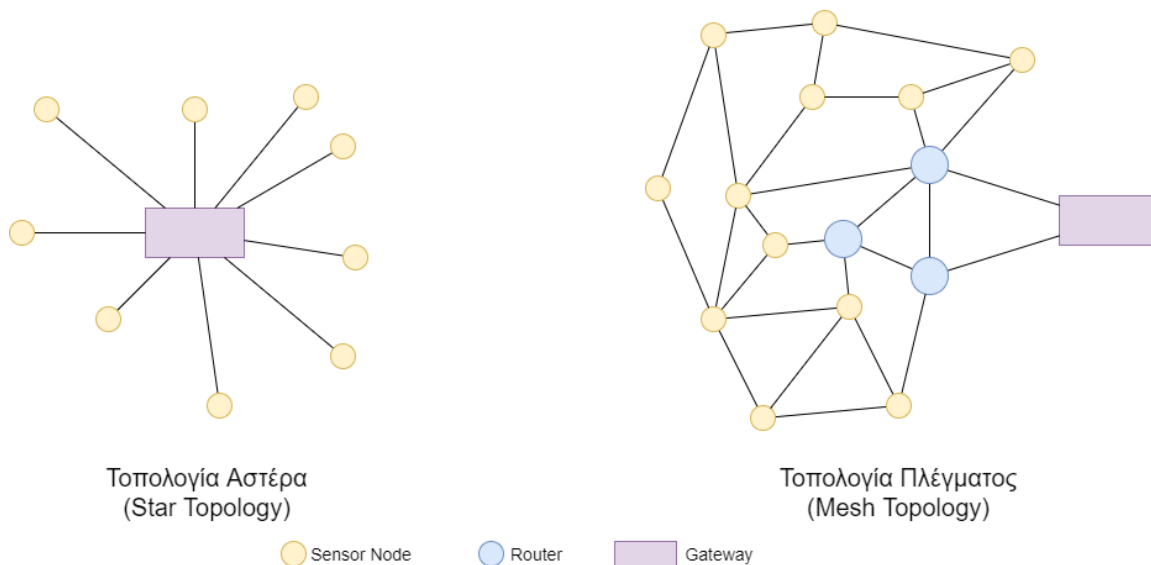
Αξίζει να αναφερθεί πως σε σχετικές μελέτες έχουν εξεταστεί και έχουν συγκριθεί τεχνολογίες 6LoWPAN σε ως προς τεχνολογίες LPWAN (LoRaWAN και SIGFOX) με κριτήρια διάφορες πτυχές τους, όπως η αρχιτεκτονική δικτύου, τα πρωτοκόλλα επικοινωνίας, εφαρμογές και πτυχές ασφάλειας. Οι περιορισμοί των δικτύων LPWAN είναι πιο απαιτητικοί από τα δίκτυα 6LoWPAN. Τα δίκτυα LPWAN χαρακτηρίζονται από περιορισμούς όσον αφορά τους κόμβους όπως πολύ χαμηλό κόστος, περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας, μικρό μέγεθος μνήμης και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, άλλα και από περιορισμούς συνδέσμων, όπως πολύ μικρό μήκος ωφέλιμου φορτίου και χαμηλό εύρος ζώνης. Επίσης, σε αντίθεση με τα δίκτυα 6LoWPAN, οι κόμβοι LPWAN δεν διαθέτουν δυνατότητες διευθύνσεων IPv6, τουλάχιστον ως το έτος 2016 μέχρι το οποίο έχει καλύψει η έρευνα των Al-Kashoash και Kemp. Παρόλα αυτά αναφέρεται η ομάδα εργασίας Internet Engineering Task Force (IETF) LPWAN που δημιουργήθηκε το 2016 και εργάζεται για να προσαρμόσει τα πρωτόκολλα που καθορίζονται από το IETF και να φέρει διεύθυνση IPv6 στο LPWAN. (Al-Kashoash & Kemp, 2016), στο σημείο αυτό να αναφερθεί πως δεν έχει καλυφθεί η δυνατότητα δικτύωσης με διευθύνσεων IPv6 σε δίκτυα LPWAN στην παρούσα εργασία, παρόλο που υπάρχουν έρευνες και μελέτες που καλύπτουν αυτό το αντικείμενο και παραθέτουν προτάσεις επί τούτου, όπως για παράδειγμα ή έρευνα των Thielemans, Bezunartea και Steenhaut όπου προτάθηκε η υλοποίηση μιας πλατφόρμας αισθητήρων που βασίζεται σε τεχνολογία LoRa και χρησιμοποιεί το λειτουργικό σύστημα για IoT συσκευές, ContikiOS, προκειμένου να ενεργοποιηθούν οι τυποποιημένες LoRa επικοινωνίες IPv6 (Thielemans et al., 2017).

2.4.2 Αρχιτεκτονική δικτύων χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής

Παρόλο που όπως έχει αναφερθεί τα δίκτυα χαμηλής ισχύος μικρής εμβέλειας είναι ένα βασικό μέρος του διαδικτύων των πραγμάτων και πως οι κόμβοι 6LoWPAN αντιπροσωπεύουν την πλειοψηφία των δικτυωμένων συσκευών στο IoT, για τις ανάγκες της παρούσα εργασίας θα προτιμηθούν και θα αναλυθούν προτάσεις δικτύων χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής, καθώς η περιοχή μελέτης των λιμών Κορώνειας και Βόλβης που απασχολεί την παρούσα εργασία και στην οποία έχει επικεντρωθεί η έρευνα, είναι μια

έκταση μεγάλης κλίμακας και η τεχνολογία δικτύων χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής θεωρείται καταλληλότερη έτσι ώστε να καταστεί εφικτό να δικτυωθούν πιθανές προτάσεις οι οποίες θα προκύψουν από τα αποτελέσματα της μελέτης. Τυχόν λόγοι στους οποίους μπορεί να αποδοθεί αυτή η απόφαση θα παρουσιαστούν στην συνέχεια της εργασίας. Με βάση τα παραπάνω, σε αυτή την ενότητα θα συνοψιστούν τοπολογίες που ισχύουν για τα δίκτυα χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής LPWAN και το αρχιτεκτονικό πλαίσιο που σχετίζεται με αυτά. Οι λύσεις δικτύων LPWAN χρησιμοποιούν ένα σύνολο τοπολογιών οι οποίες προσανατολίζονται στις εφαρμογές που εξυπηρετούν, άλλα και το σύνολο απαιτήσεων στις οποίες θέλουν να επικεντρωθούν.

Από άποψη τοπολογίας, τα δίκτυα LPWAN μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες, στην τοπολογία αστέρα – star topology, και τοπολογία πλέγματος – mesh topology, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-3.



Εικόνα 2-3 Τοπολογίες Αστέρα και Πλέγματος

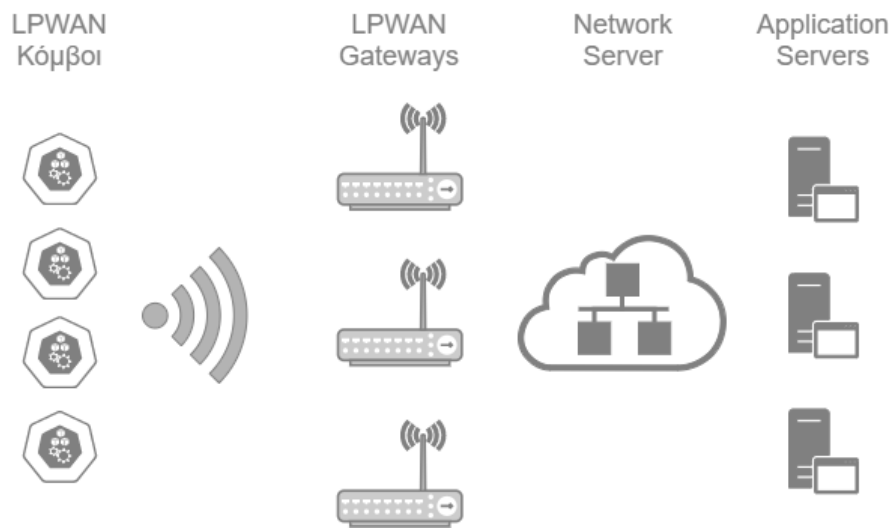
Στην τοπολογία αστέρα, ένα δίκτυο αποτελείται από μια κεντρική πύλη gateway στον οποίο συνδέονται όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι. Οι κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους μόνο μέσω της κεντρικής πύλης. Τα μηνύματα των κόμβων μεταδίδονται σε έναν κεντρικό διακομιστή μέσω των κεντρικών πυλών. Κάθε τερματικός κόμβος μεταδίδει τα μηνύματα σε μία ή περισσότερες πύλες. Η πύλη προωθεί τα μηνύματα στον διακομιστή δικτύου όπου πραγματοποιούνται έλεγχοι σφάλματων και ασφαλείας. Τα δίκτυα αστέρα είναι γρήγορα και αξιόπιστα λόγω της δυνατότητας επικοινωνίας ενός βήματος - single-hop. Οι ελαττωματικοί κόμβοι μπορούν επίσης να εντοπιστούν και να απομονωθούν εύκολα, όμως εάν η κεντρική πύλη αποτύχει, δεν είναι δυνατή η πρόσβαση σε όλους τους

κόμβους που είναι συνδεδεμένοι σε αυτήν. Η τοπολογία πλέγματος αποτελείται από μια κεντρική πύλη, τερματικούς κόμβους και κόμβους οι οποίοι λειτουργούν και ως δρομολογητές. Όλοι οι κόμβοι μπορούν να συνδεθούν απευθείας ο ένας στον άλλο με μια τοπολογία πλήρους πλέγματος. Σε μια τοπολογία μερικού πλέγματος, ορισμένοι κόμβοι συνδέονται με μερικούς από άλλους, αλλά άλλοι συνδέονται μόνο με αυτούς με τους οποίους ανταλλάσσουν τα περισσότερα μηνύματα. Τα δίκτυα πλέγματος έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως διαθεσιμότητα πολλαπλών διαδρομών για δυνατότητα προσβασιμότητας, ταυτόχρονες μεταδόσεις προς όλες τις κατευθύνσεις, εύκολη επεκτασιμότητα του δικτύου και δυνατότητα εύρεσης εναλλακτικών διαδρομών σε περίπτωση που ένας κόμβος βγει εκτός λειτουργίας. Αυτά τα δίκτυα έχουν όμως κάποια μειονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της πολυπλοκότητας λόγω των περιττών κόμβων, της πρόσθετης καθυστέρησης χρόνου λόγω της επικοινωνίας πολλαπλών γραμμών και της αύξησης του κόστους. Ο πλεονασμός των κόμβων θέτει επίσης σε κίνδυνο την ενεργειακή απόδοση του δικτύου (Chaudhari & Zennaro, 2020).

Μια επιλεγμένη τεχνολογία μπορεί να διαμορφωθεί σε οποιαδήποτε από αυτές τις ομάδες, εάν είναι εξοπλισμένη με τα σχέδια που απαιτούνται για την τοπολογία και εάν υπάρχουν εγκαταστάσεις ανάπτυξης για να την υποστηρίξουν. Οι κυψελοειδείς τεχνολογίες είναι γενικά ευέλικτες από αυτή την άποψη και υποστηρίζουν επίσης την κινητικότητα των τερματικών κόμβων. Υπάρχει ένα σύνολο βασικών οντοτήτων που σχηματίζουν την αρχιτεκτονική για δίκτυα LPWAN (Chaudhari & Zennaro, 2020).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, διακεκριμένες τοπολογίες είναι η τοπολογία αστέρα και η τοπολογία πλέγματος. Για τα δίκτυα LPWAN γενικά, προτιμάται η τοπολογία αστέρα ή αστέρα σε αστέρι έναντι της τοπολογίας δικτύου πλέγματος για τη διατήρηση της ισχύος της μπαταρίας και την αύξηση του εύρους επικοινωνίας. Η συνδεσιμότητα μεγάλης εμβέλειας των LPWAN επιτρέπει σε τέτοια single-hop δίκτυα, πρόσβαση σε μεγάλο αριθμό κόμβων, μειώνοντας έτσι το κόστος. Από άποψη κάλυψης, οι παραδοσιακές τεχνολογίες δικτύων ασύρματων αισθητήρων όπως το ZigBee, το Bluetooth και το Wi-Fi δεν έχουν σχεδιαστεί για ευρεία κάλυψη και ως εκ τούτου δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμες ως τεχνολογίες LPWAN (Chaudhari & Zennaro, 2020). Υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός εφαρμογών που βασίζονται σε τεχνολογίες IoT, οι οποίες εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις και είναι ευαίσθητες τόσο ως προς το κόστος όσο και προς την κατανάλωση ενέργειας. Τέτοια αναπτυσσόμενα δίκτυα ταξινομούνται ως δίκτυα LPWAN. Εκτιμάται

ότι το ένα τέταρτο των συνολικών συσκευών IoT πρόκειται να συνδεθούν στο διαδίκτυο χρησιμοποιώντας είτε κλειστές, ιδιοταγή τεχνολογίες είτε ανοικτές τεχνολογίες LPWAN. Οι εφαρμογές που βασίζονται σε LPWAN υπολογίζονται πως είναι το ένα τρίτο όλων των εφαρμογών IoT. Εναλλακτικές τεχνολογίες από τα δίκτυα LPWAN εστιάζουν συνήθως στην επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, χαμηλότερου χρόνου απόκρισης και υψηλότερης αξιοπιστίας. Οι λύσεις LPWAN περιλαμβάνουν συνήθως έναν τεράστιο αριθμό τελικών συσκευών, στέλνουν πακέτα μικρού μεγέθους και με μικρή συχνότητα μεταξύ τους και είναι ανεκτές σε καθυστερήσεις μετάδοσης από κόμβο σε κόμβο, μέσα σε λογικά πλαίσια. Η αξιοπιστία των μεταδόσεων και οι απαιτήσεις ως προς αυτήν ποικίλλουν ανάλογα με την εφαρμογή. Οι τεχνολογίες LPWAN συμπληρώνουν και ορισμένες φορές αντικαθιστούν τις συμβατικές ασύρματες τεχνολογίες κυψελοειδών δικτύων και δικτύων μικρής εμβέλειας σε απόδοση για διάφορες αναπτυσσόμενες εφαρμογές (Chaudhari & Zennaro, 2020).



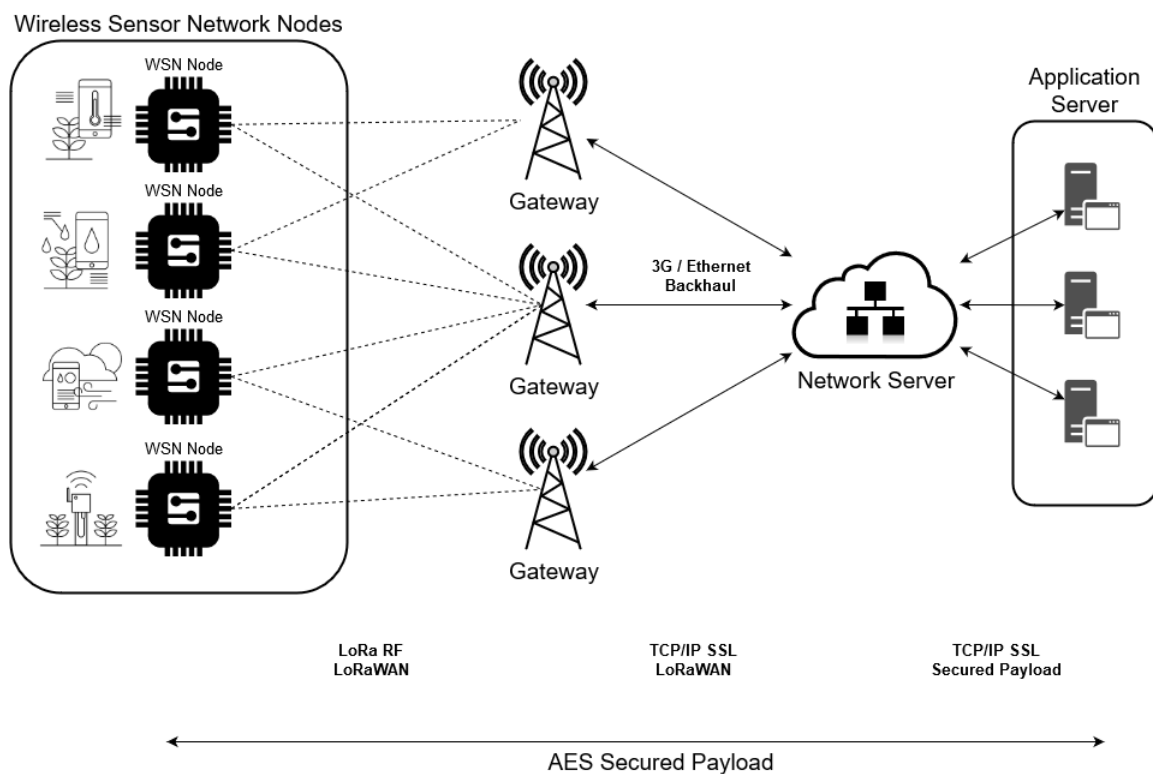
Εικόνα 2-4 Βασικά στοιχεία δικτύων LPWAN

Θεωρώντας της τεχνολογίες LoRaWAN και SIGFOX, μαζί με τα κυψελοειδή δίκτυα 3G/4G και 5G, ως κυρίαρχες τεχνολογίες ανάμεσα στα δίκτυα χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής LPWAN, θα αναφερθούν περιληπτικά οι αρχιτεκτονικές των LoRaWAN και SIGFOX ώστε να σχηματιστεί μια πλήρη εικόνα σχετικά με τα δίκτυα LPWAN. Τα δίκτυα LoRaWAN και SIGFOX αποτελούνται από τέσσερα στοιχεία, τους τελικούς κόμβο, έναν αριθμό σταθμών βάσεων Gateways, έναν διακομιστή δικτύου Network Server και τέλος την εφαρμογή τελικού χρήστη, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-4 (Chaudhari &

Zennaro, 2020). Η αρχιτεκτονική τους είναι μια τοπολογία αστέρα όπου οι πύλες gateways λειτουργούν ως γέφυρες μεταξύ των τελικών κόμβων και του διακομιστή δικτύου. Οι τερματικοί κόμβοι συνδέονται με το διακομιστή δικτύου με ασύρματη επικοινωνία με συνδέσεις single-hop (LoRa RF και SIGFOX LTN radio), ενώ οι πύλες συνδέονται με το διακομιστή δικτύου με συνδεσιμότητα οπισθόζευξης, backhaul, που μπορεί να χρησιμοποιεί διάφορες τεχνολογίες δικτύωσης, όπως για παράδειγμα κυψελοειδή δικτύων 3G/4G/5G, Wi-Fi, Ethernet ή ακόμα και δορυφορική ζεύξη. Στα δίκτυα LoRa και SIGFOX, οι τελικοί κόμβοι δεν μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους απευθείας όπως στα δίκτυα 6LoWPAN. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας (Al-Kashoash & Kemp, 2016).

Η τεχνολογία SIGFOX αποτελεί ένα κλειστό πρότυπο τεχνολογίας LPWAN εξαιρετικά στενοζωνικό που χρησιμοποιεί αργό ρυθμό διαμόρφωσης για να επιτύχει μεγαλύτερο εύρος. Αρχικά, το SIGFOX υποστήριζε μόνο μονοκατευθυντική επικοινωνία ανερχόμενης ζεύξης uplink, δηλαδή, μεταξύ των συσκευών αισθητήρων και του συσσωρευτή με διαφορετική δυαδική διαμόρφωση μετατόπισης φάσης (DBPSK). Οι τελευταίες εκδόσεις υποστηρίζουν αμφίδρομη επικοινωνία όπου η διαμόρφωση Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) χρησιμοποιείται για κατερχόμενη ζεύξη, downlink. Αυτό το χαρακτηριστικό υπερσύνδεσης του SIGFOX επιτρέπει στον δέκτη να ακούει μόνο σε ένα μικρό κομμάτι του φάσματος, έτσι ώστε να μπορεί να μετριάσει η επίδραση του θορύβου. Όπως το LoRa, έτσι το SIGFOX λειτουργεί στην βιομηχανική, επιστημονική, ιατρική (Industrial, Scientific, Medical ISM) ζώνη συχνοτήτων χωρίς άδεια. Το SIGFOX διαθέτει φθηνές συσκευές αισθητήρων και σταθμούς πρόσβασης που βασίζονται σε SDR (Software-defined radio) για τη διαχείριση του δικτύου και τη σύνδεση στο διαδίκτυο. Το SIGFOX υποστηρίζει πολύ χαμηλό ρυθμό δεδομένων σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες LPWAN. Για να παρέχει αξιοπιστία, το SIGFOX μεταδίδει ένα μήνυμα πολλές φορές, με αποτέλεσμα την υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Μία από τις κύριες διαφορές μεταξύ SIGFOX και LoRa είναι η διάκριση των επιχειρήσεων. Το SIGFOX αναπτύσσεται από τους διαχειριστές του δικτύου και οι χρήστες πρέπει να πληρώσουν τις χρεώσεις συνδρομής, ενώ το LoRa μπορεί να αναπτυχθεί ως ένα ανεξάρτητο δίκτυο χωρίς χρεώσεις συνδρομής. Κάθε πύλη SIGFOX μπορεί να χειριστεί έως ένα εκατομμύριο συνδεδεμένα αντικείμενα, με μια περιοχή κάλυψης από 30 έως 50 χιλιόμετρα σε αγροτικές περιοχές και από τρία έως δέκα σε αστικές περιοχές (Chaudhari & Zennaro, 2020). Το πρωτόκολλο

LoRaWAN είναι μια τεχνολογία ανοιχτού προτύπου, και όπως είναι αναμενόμενο, όπως σε όλα τα ανοιχτά πρότυπα, είναι πιο εύκολο από την ερευνητική κοινότητα να προτείνει λύσεις και να επεκταθεί στην ανάλυση του καθώς είναι ισότιμα διαθέσιμο σε όλους τους ενδιαφερόμενους. Το LoRa λειτουργεί στο φυσικό επίπεδο και λειτουργεί στην sub-GHz μπάντα της ζώνης συχνοτήτων ISM χωρίς άδεια χρήσης και βασίζεται στην τεχνική τεχνολογίας διασποράς φάσματος CSS (Chirp Spread Spectrum). Το CSS είναι μια διαμόρφωση γραμμικής συχνότητας ευρείας ζώνης στην οποία η συχνότητα φορέα μεταβάλετε για την καθορισμένη χρονική περίοδο. Το LoRa λειτουργεί με καθαρές αρχές ALOHA και υποστηρίζει διαφορετικές συχνότητες ISM. Η μετάδοση γίνεται με single-hop επικοινωνία, τα μηνύματα που μεταδίδονται από τους κόμβους αποστέλλονται από τους κόμβους αισθητήρων LoRa στον κεντρικό διακομιστή μέσω πυλών gateway, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-5.



Εικόνα 2-5 LoRaWAN Topology

Ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων που υποστηρίζεται από το LoRa κυμαίνεται από 300 bps έως 50 kbps, ανάλογα με τον παράγοντα διάδοσης (Spreading factor - SF) και τις ρυθμίσεις εύρους ζώνης καναλιού. Οι μεταδόσεις LoRa με διαφορετικά SF είναι ημι-

ορθογώνια (quasi-orthogonal) και επιτρέπουν πολλαπλές μεταδόσεις με διαφορετικά SF ταυτόχρονα. Για να μπορέσει να υποστηριχθεί το LoRa στο διαδίκτυο, ο οργανισμός LoRa Alliance έχει αναπτύξει το δίκτυο ευρείας περιοχής μεγάλης εμβέλειας LoRaWAN, το οποίο λειτουργεί στο επίπεδο δικτύου. Το LoRaWAN παρέχει τρεις κατηγορίες τελικών συσκευών για την αντιμετώπιση των διαφορετικών απαιτήσεων ενός ευρέος φάσματος εφαρμογών IoT, για παράδειγμα, των απαιτήσεων καθυστέρησης. Το LoRa είναι ένας από τους καλύτερους υποψηφίους για μεταδόσεις μεγάλων αποστάσεων και χαμηλής ισχύος (Chaudhari & Zennaro, 2020).

Το δίκτυο LoRaWAN υλοποιείται με την τοπολογία αστέρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-5, το οποίο καθορίζει ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που λειτουργεί στην κορυφή του φυσικού επιπέδου LoRa. Τα στοιχεία του δικτύου είναι οι τελικές συσκευές (WSN Nodes), οι πύλες (Gateways), ο διακομιστής δικτύου (Network Server) και οι διακομιστές εφαρμογών (Application Server). Οι τελικές συσκευές είναι εξοπλισμένες με διάφορους αισθητήρες που είναι υπεύθυνοι για τη συλλογή πληροφοριών και την αποστολή τους στις πύλες μέσω ενός μηχανισμού single-hop. Συνδέονται σε πολλές πύλες που προωθούν τα δεδομένα στον διακομιστή του δικτύου. Ο διακομιστής δικτύου είναι υπεύθυνος για το φιλτράρισμα των διπλών πακέτων, την ασφάλεια, την αποστολή των επιβεβαιώσεων και την προώθηση δεδομένων στον διακομιστή εφαρμογών (Subashini et al., 2018).

Ο πίνακας 2-1 παρουσιάζει διάφορες εφαρμογές που βασίζονται σε τεχνολογίες IoT και αναφέρονται οι απαιτήσεις τους και η καταλληλότητα των πρωτοκόλλων. Τα στοιχεία του πίνακα είναι αποτέλεσμα της έρευνας των Subashini, Venkateswari και Mathiyalagan (Subashini et al., 2018). Στην προαναφερθείσα έρευνα παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις άλλων ερευνητών τις οποίες οι συγγραφείς αξιοποίησαν ώστε να καταλήξουν στον παραπάνω πίνακα και είχαν ως στόχο αναλυθεί η δυνατότητα εφαρμογής του LoRaWAN για ποικιλία εφαρμογών WSN, όπως για παράδειγμα ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη κατολισθήσεων στις ασταθείς πλαγιές, που για την υλοποίηση του χρειάζεται συνεχή παρακολούθηση με αποτέλεσμα την υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Το σύστημα παρακολουθεί συνεχώς τη συνολική παραμόρφωση του σχήματος των πλαγιών για την αποφυγή κατολισθήσεων. Η μονάδα ραδιοεπικοινωνίας χαμηλής ισχύος χρησιμοποιεί διαμόρφωση LoRa για να επιτευχθεί μεγάλη ανοσία σε μεγάλες αποστάσεις και παρεμβολές. Ο συνδυασμός τεχνικών διόρθωσης σφαλμάτων προς τα εμπρός και τεχνολογίας διασποράς φάσματος

διαμόρφωσης φάσματος εξάπλωσης αύξησε το εύρος του LoRa. Η ζώνη των 868 MHz παρέχει υψηλή ανοσία σε παρεμβολές με ελαχιστοποιημένη κατανάλωση ενέργειας. Το LoRa καλύπτει ένα εύρος 30 χιλιομέτρων κατάλληλο για την τοποθέτηση των κόμβων αισθητήρα που τοποθετούνται σε απόσταση ανάμεσα σε 10 και 15 χιλιόμετρα (Subashini et al., 2018).

Πίνακας 2-1 Καταλληλότητα πρωτοκόλλων για εφαρμογές IoT

πηγή: (Subashini et al., 2018)

Τυπικές εφαρμογές δικτύων αισθητήρων	Απαιτήσεις	Καταλληλότητα πρωτοκόλλων
Μετρήσεις ποιότητας υδάτων	Συνεχής παρακολούθηση, Αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων	Zigbee, Wi-Fi, LoRa
Διαχείριση πόρων σε εργοστάσια	Ταχύτερη παρακολούθηση και έλεγχος	LoRa
Πρόβλεψη φυσικών καταστροφών	Συνεχής παρακολούθηση	LoRa
Γεωργία	Κατανεμημένες μετρήσεις	Zigbee, Wi-Fi, LoRa
Υπόγεια δίκτυα αισθητήρων	Περιοδική παρακολούθηση	Wi-Fi, LoRa
Παρακολούθηση θαλάσσιου περιβάλλοντος	Περιοδική συλλογή δεδομένων	LoRa
Έξυπνη Πόλη, Smart city	Συνεχής παρακολούθηση	IEEE802.11p IEEE802.11n LoRa

Οι εφαρμογές που βασίζονται στο διαδίκτυο των πραγμάτων πρέπει να αντιμετωπίσουν σημαντικές δυσκολίες όσον αφορά την λειτουργικότητα τους, την ασφάλεια, το εύρος ζώνης, τον χρόνο απόκρισης και άλλα ζητήματα απόδοσης. Καθώς οι αισθητήρες αναπτύσσονται σε διάφορες εφαρμογές WSN και IoT, η εξοικονόμηση ενέργειας είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Για να αντιμετωπιστούν αυτές τις προκλήσεις και να μπορέσει να γίνει εφικτή ή επικοινωνία σε οποιοδήποτε πεδίο και με διαφορετικούς κόμβους IoT, μπορεί να ειπωθεί με σιγουριά πως το LoRaWAN είναι πιο κατάλληλο.

2.5 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων - Wireless Sensor Network (WSN)

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Network - WSN) είναι υψίστης σημασίας για το Διαδίκτυο των πραγμάτων, το οποίο στοχεύει στη σύνδεση κάθε

αντικειμένου και την αυτοματοποίηση κάθε πτυχής της καθημερινής ζωής. Ο βιομηχανικός έλεγχος και η παρακολούθηση, εφαρμογές οικιακών αυτοματισμών, ο τομέας των ηλεκτρονικών ειδών και άλλων οικιακών συσκευών ευρείας κατανάλωσης, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος και της υγείας, η ασφάλεια και η στρατιωτική ανίχνευση, η παρακολούθηση περιουσιακών στοιχείων και η διαχείριση της αλυσίδας εφοδιασμού ή η έξυπνη γεωργία είναι μόνο μερικά παραδείγματα τομέων εφαρμογών που θα μπορούσαν να επηρεαστούν από την άνοδο του IoT (Thielemans et al., 2017). Καθώς το ενδιαφέρον και η αγορά του IoT και των σχετικών τεχνολογιών αυξάνεται σταθερά, η επικοινωνία είναι το βασικό σημείο κλειδί που χρειάζεται για να συγκεντρώσει όλα τα πράγματα στο IoT ώστε να δημιουργηθεί ένα δίκτυο συσκευών του διαδικτύου των πραγμάτων. Η ασύρματη επικοινωνία παρέχει τα πλεονεκτήματα της κινητικότητας, χωρίς καλώδια, εύκολη προσθήκη περισσότερων συσκευών στο δίκτυο και ευκολία πρόσβασης οποιοδήποτε αντικείμενου της δυνατότητας σύνδεσης στο Διαδίκτυο. Επιπλέον, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι μια από τις πιο επιτυχημένες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για ανάπτυξη λύσεων IoT. Το WSN εμφανίζεται ως βασικό μέρος του IoT επειδή εξυπηρετεί έναν σκοπό, να επιτρέψει τη διασύνδεση και την ενσωμάτωση των φυσικών αντικειμένων με τον κυβερνοχώρο. Καθιστά επίσης δυνατή την εξέλιξη και ανάπτυξη προτάσεων IoT εφικτές με χαμηλό κόστος λόγω της προόδου και των τεχνολογικών καινοτομιών που πραγματοποιούνται στην ασύρματη επικοινωνία. Τα WSN αποτελείται από ασύρματους αισθητήρες χαμηλής ισχύος που στέκουν ως υποδομή για ανάπτυξη και μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, τα WSN καλούνται να αντιμετωπίσουν πολλές προκλήσεις λόγω των περιορισμών των κόμβων αισθητήρων, όπως η ενεργειακή χωρητικότητα, η υπολογιστική ισχύς και το εύρος ζώνης επικοινωνίας. Η διαχείριση και η ασφάλεια του δικτύου είναι τομείς που απαιτούν ακόμη μεγαλύτερη προσοχή (Khutsoane et al., 2017).

2.5.1 Κατηγορίες εφαρμογών WSN

Σήμερα, καθώς οι εφαρμογές των WSN έχουν επεκταθεί περισσότερο, υπάρχει μια πληθώρα πεδίων στα οποία μπορούν να κάνουν εφαρμογή και να ταιριάζουν στο μοντέλο των συστημάτων κατανεμημένων αισθητήρων χαμηλού κόστους. Μερικά παραδείγματα τέτοιων πεδίων εφαρμογών είναι η κλιματική αλλαγή και οι εφαρμογές ανίχνευσης που σχετίζονται με το περιβάλλον, όπως η ανίχνευση και παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών

και αγροτικών ρύπων σε αστικά και γεωργικά περιβάλλοντα (Gaura et al., 2010). Άλλες πιθανές εφαρμογές WSN είναι η παρακολούθηση και εποπτεία στρατιωτικών στόχων, ανίχνευση και πρόβλεψη φυσικών καταστροφών, η βιοϊατρική παρακολούθηση της υγείας καθώς και πολλές βιομηχανικές εφαρμογές. Στην παρακολούθηση και την εποπτεία στρατιωτικών στόχων, ένα WSN μπορεί να βοηθήσει στην ανίχνευση και τον εντοπισμό εισβολών. Στον τομέα της ανίχνευσης φυσικών καταστροφών, οι κόμβοι αισθητήρων μπορούν να μετρήσουν και να ανιχνεύσουν το περιβάλλον για να προβλέψουν καταστροφές πριν συμβούν, όπως για παράδειγμα η ανίχνευση σεισμικής δραστηριότητας, η τοποθέτηση αισθητήρων κατά μήκος μια ηφαιστειακής περιοχής μπορεί να ανιχνεύσει την ανάπτυξη σεισμών και εκρήξεων προλαμβάνοντας μια επικίνδυνη φυσική καταστροφή. Στις βιοϊατρικές εφαρμογές, τα χειρουργικά εμφυτεύματα αισθητήρων μπορούν να βοηθήσουν στην παρακολούθηση της υγείας ενός ασθενούς (Fahmy, 2016).

Με τέτοιες συναρπαστικές εφαρμογές στον ορίζοντα και δεκαετή ερευνητική ιστορία, η ανάπτυξη νέων εφαρμογών είναι απλώς θέμα ολοκλήρωσης υπαρχόντων μελετών. Δυστυχώς, ενώ έχει σημειωθεί τεράστια πρόοδος μέχρι σήμερα, η δημοσιευμένη έρευνα στρέφεται να είναι λιγότερο πολύτιμη από ό, τι μπορεί να ελπίζει κανείς. Η παράδοση μιας δοκιμασμένης στο πεδίο εφαρμογής απαιτεί ακόμα μια δαπανηρή και εξειδικευμένη προσπάθεια έρευνας και ανάπτυξης. Ο λόγος για αυτό είναι ότι η δημοσιευμένη ερευνά βασίζεται στην ποικιλία των πιθανών εφαρμογών κατά την τελευταία δεκαετία, σε σχέση με την πραγματική εφαρμογή της τεχνολογίας. Ελλείπει σαφώς καθορισμένων αναγκών εφαρμογής και μιας ισχυρής βιομηχανικής αγοράς, πολλές από τις προτάσεις που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής ήταν είτε πολύ γενικές για να εφαρμοστούν εύκολα, είτε ήταν καλά καθορισμένες, αλλά στοχεύουν σε μια εφαρμογή χωρίς οικονομικό όφελος (Gaura et al., 2010). Σε γενικές γραμμές θα μπορούσε να αναφερθεί πως καθώς η δημοσιευμένη έρευνα έχει ως στόχο κυρίως εφαρμογές κοινής ωφέλειας και λύσεων οι οποίες έχουν αντίκτυπο στο γενικό καλό, δεν παρουσιάζουν επενδυτικό ενδιαφέρον έτσι ώστε να μπορέσουν να προσελκύσουν χρηματοδοτήσεις με στόχο την υλοποίηση τους και φυσικά σε βάθος χρόνου την συντήρησή τους, στην αντίπερα όχθη, πολλές επιχειρηματικές προτάσεις και δημοσιεύσεις οι οποίες έχουν ως στόχο λύσεις και εφαρμογές στο πεδίο της βιομηχανίας παρουσιάζουν μεγαλύτερο επενδυτικό ενδιαφέρον και υπάρχουν περισσότερες υλοποιημένες εφαρμογές στο κομμάτι της βιομηχανίας.

2.5.1.1 Βιομηχανικές Εφαρμογές

Η εφαρμογή των τεχνολογιών WSN στο σχεδιασμό δικτύων για βιομηχανικά συστήματα επικοινωνίας και ελέγχου έχει τη δυνατότητα να προσφέρει σημαντικά οφέλη όσον αφορά την ευέλικτη εγκατάσταση και συντήρηση συσκευών σε αυτόν τον τομέα. Λύσεις όπως η υποστήριξη για παρακολούθηση των λειτουργιών κινητών ρομπότ και μείωση του κόστους και προβλήματα λόγω καλωδίωσης καλωδίων. Είναι γνωστό ότι οι βιομηχανικές εφαρμογές είναι κάτι περισσότερο από άφθονες (Fahmy, 2016).

2.5.1.2 Εφαρμογές περιβαλλοντικού ελέγχου

Η ανάπτυξη της ανθρώπινης κοινωνίας έχει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και επιδιώκονται επιθετικά όλες οι προσπάθειες για τη βελτίωση της διατήρησής του. Η περιβαλλοντική παρακολούθηση είναι μια τόσο σημαντική προσπάθεια, η οποία επέτρεψε την παρακολούθηση διαφόρων φυσικών παραμέτρων για τον έλεγχο ή τον περιορισμό της περαιτέρω εξέλιξης της περιβαλλοντικής υποβάθμισης. Οι συμβατικές τεχνικές παρακολούθησης απαιτούσαν χειροκίνητη συλλογή περιβαλλοντικών δεδομένων, αλλά αργότερα θεωρήθηκαν αναποτελεσματικές, καθώς είναι εντάσεως εργασίας και δεν έχουν ικανότητα έγκαιρης προειδοποίησης για την περιβαλλοντική μόλυνση. Πριν από μερικά χρόνια, εισήχθησαν καταγραφικά δεδομένα για να βελτιώσουν τη χωρική και χρονική ανάλυση της περιβαλλοντικής παρακολούθησης, αλλά δεν είχαν ακόμη αναλυτικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Με την έλευση του διαδικτύου των πραγμάτων, αναπτύχθηκαν τεχνολογίες WSN χαμηλής ισχύος και η περιβαλλοντική παρακολούθηση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί εξ αποστάσεως και σε πραγματικό χρόνο (Pule et al., 2017).

Οι εφαρμογές περιβαλλοντικού ελέγχου βασίζονται στην εξαγωγή πληροφορίας και γνώσης από δεδομένα. Ως εκ τούτου, όσο πιο σημαντικά δεδομένα λαμβάνονται, τόσο περισσότερες γνώσεις μπορούν να αντληθούν. Επειδή τα δεδομένα συλλέγονται μέσω των μετρήσεων και της παρατήρησης, οι δυνατότητες του συστήματος μέτρησης των WSN προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στον τομέα της περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Πιθανώς το πιο θεμελιώδες είναι η αυτονομία της συγκέντρωσης δεδομένων. Ενώ οι παραδοσιακές μέθοδοι δειγματοληψίας απαιτούν αυξημένη εισροή εργασίας για μεγαλύτερες ποσότητες δειγμάτων (π.χ. δειγματοληψία σε διάφορες τοποθεσίες στην ίδια περιοχή), ένα ιδανικό δίκτυο WSN παρατηρεί το περιβάλλον σε πολλές τοποθεσίες και

μεταδίδει αυτόματα τα δεδομένα στο σημείο συγκέντρωσης μέσω της δικτυακής υποδομής. Επιπλέον, η αυτόνομη δειγματοληψία επιτρέπει τη διακριτική παρατήρηση φαινομένων και την παρακολούθηση σε δύσβατες τοποθεσίες και υπό ακραίες συνθήκες. Επειδή τα δίκτυα ανίχνευσης συνήθως συνδέονται απευθείας με τον χειριστή μέσω του διαδικτύου ή κάποιου τύπου τοπικής σύνδεσης, τα δεδομένα συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο ή σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτρέπει την ανίχνευση προβλημάτων σε προγενέστερο στάδιο από ότι σε συστήματα με τοπική αποθήκευση και μη αυτόματη λήψη. Επιπλέον, η απομακρυσμένη σύνδεση με το δίκτυο αισθητήρων σημαίνει αφαίρεση της απόστασης μεταξύ του επιστήμονα και του επιτηρούμενου χώρου, καθώς ο ερευνητής μπορεί να παρατηρήσει άμεσα τι συμβαίνει σε μια συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος (Bader, 2011).

Κατ' επέκταση των εφαρμογών περιβαλλοντικού ελέγχου και καθώς ο κόσμος είναι ευάλωτος στους κινδύνους της κλιματικής αλλαγής, όπως η υποχώρηση των παγετώνων, η αύξηση της θερμοκρασίας. Και σε πιο μεταβαλλόμενα και έντονα καιρικά φαινόμενα όπως πλημμύρες, ξηρασίες και παγετοί, η επιδείνωση των ορεινών οικοσυστημάτων, η υποβάθμιση του εδάφους, η αυξανόμενη λειψυδρία καθώς και άλλα αντίστοιχα ακραία φαινόμενα, επιπτώσεις της ανθρώπινης δραστηριότητάς και της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, υπάρχουν μεγάλα κενά στην κατανόηση των αλλαγών στο κλίμα και πώς αυτές οι αλλαγές θα επηρεάσουν τα αστικά και φυσικά συστήματα, καθιστώντας δύσκολη την πρόβλεψη, τον σχεδιασμό και την προσαρμογή στις επερχόμενες αλλαγές. Το διαδίκτυο των πραγμάτων σε αυτόν τον τομέα μπορεί να βελτιώσει την κατανόησή για το κλίμα χρησιμοποιώντας τεχνολογικές λύσεις, παρέχοντας παράλληλα πληροφορίες σχετικά με τα δυναμικά κλιματικά στοιχεία που βασίζονται στην ολοκληρωμένη περιβαλλοντική ανίχνευση. Η αξιοποίηση των σύγχρονων τεχνολογιών επικοινωνίας είναι απαραίτητη για την εξαγωγή γνώσης και πραγματοποίησης εκτιμήσεων των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής σε κάθε μία από τις σχετικές περιοχές, όπως η βιώσιμη ενέργεια, τα γεωργικά συστήματα, και την πολιτιστική διατήρηση. Σήμερα οι λύσεις IoT και WSN για την περιβαλλοντική αειφόρα και την κλιματική αλλαγή, προσφέρουν ένα πλαίσιο για ενημερωμένη δημιουργία, ερμηνεία και χρήση των προβολών της κλιματικής αλλαγής και τις συνεχείς καινοτομίες στην επιστήμη του κλίματος και του περιβάλλοντος που καθοδηγούνται από βασικούς κοινωνικούς και οικονομικούς φορείς (Salam, 2020).

Όσον αφορά λύσεις IoT με στόχο τους υδάτινους πόρους και γενικά την αξιοποίηση του νερό ως αγαθό, προσφέρονται ακριβή συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για να καθοδηγήσει την τεχνολογική και κοινωνική πρόοδο στη χρήση του νερού. Υπάρχουν λύσεις που επιτρέπουν ετήσιες παρατηρήσεις βροχόπτωσης και παρατηρήσεις παραλλαγής ροής ποταμών. Κατά συνέπεια, μπορεί να προβλεφθούν πολύ βαριές βροχοπτώσεις, ξηρές περίοδοι και εποχιακές, βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες ξηρασίες σε χωρική και χρονική κλίμακα. Επιπλέον, με βάση τις τεχνολογίες IoT ανίχνευσης για την απόσυρση των υπόγειων υδάτων και την επαναφόρτιση του υδροφόρου ορίζοντα, μπορεί να εξακριβωθεί η διαθεσιμότητα της ζήτησης. Οι προμήθειες επιφανειακών και υπόγειων υδάτων μειώνονται λόγω της κατανάλωσης, της απόσυρσης, της καθίζησης και της απορροής, σε συνδυασμό με τις αλλαγές στην κατανάλωση και την ρύπανση. Ο προσδιορισμός διαφορών συστημάτων επιφανειακών και υπόγειων υδάτων μπορεί να βοηθήσει στην αναβίωση, προστασία ή ακόμα και δημιουργία σημαντικών υδροτόπων γλυκού νερού. Οι συνολικές μετρήσεις νερού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη πιθανών απειλών πλημμύρας. Επομένως, μπορούν να μειωθούν οι κίνδυνοι για την οικονομία, τις κοινοτικές υποδομές, την ανθρώπινη υγεία και την ανθρώπινη ασφάλεια. Η τεχνολογία IoT σε συνδυασμό με τα οικολογικά πρότυπα και δείκτες είναι χρήσιμα για την επίτευξη στόχων αειφορίας. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα για την εφαρμογή τεχνολογιών IoT σε υδάτινους πόρους για τη βιώσιμη ανάπτυξη κάθε κοινότητας. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών WSN επιτρέπει την παρακολούθηση του νερού, όπως υδροτόπων και εισροών λιμνών. Κατά συνέπεια, με βάση την εποπτεία των υδάτινων πόρων, μπορούν να αναπτυχθούν καλύτερες προσεγγίσεις για δείκτες βιωσιμότητας του νερού που θα συμβάλουν στην ανθεκτικότητα των υδάτων και των χερσαίων οικοσυστημάτων. Η ποιότητα του νερού μπορεί να βελτιωθεί με τη μείωση των ρύπων που προκαλούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες. Λύσεις WSN μπορούν επίσης να εφαρμοστούν για την ανάπτυξη νέων συστημάτων και τη μείωση της χρήσης νερού. Επιπλέον, οι τεχνολογίες καθαρισμού και ανακύκλωσης νερού μπορούν να αναπτυχθούν και να ενσωματωθούν στο σύστημα μέσω της ανίχνευσης των ρύπων του νερού, του αζώτου και των ιζημάτων. Κατά συνέπεια, η ποιότητα για παράδειγμα μιας λίμνης και του νερού της μπορεί να βελτιωθεί. Επιπλέον, κρίσιμα σύνολα δεδομένων όπως δεδομένα που σχετίζονται με τη ροή ενός ποταμού, τα υπόγεια ύδατα, τις

μεταδοτικές ασθένειες, της πηγές μόλυνσης και ρύπανσης και γενικά τη χρήση νερού μπορούν να επιτρέψουν την καλύτερη κατανόηση του οικοσυστήματος (Salam, 2020).

2.5.1.3 Εφαρμογές στο τομέα της υγείας

Οι εφαρμογές WSN και γενικά τεχνολογίες IoT στον τομέα της υγείας έχουν ισχυρές δυνατότητες να επιφέρουν τεράστιες βελτιώσεις στην ανθρώπινη υγεία και ευεξία μέσω της ανίχνευσης και της παρακολούθησης των επιπτώσεων στην υγεία. Τέτοιες εφαρμογές επιτρέπουν την ανάπτυξη μιας προσέγγισης συστημάτων στον τομέα της ανθρώπινης υγείας και του οικοσυστήματος. Επιτρέπουν την ενσωμάτωση ευρύτερων υποτομέων υγείας σε ένα μεγαλύτερο πρότυπο για τη βελτίωση της βιωσιμότητας της υγείας στον τομέα των κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών τομέων. Στον κλάδο της υγείας και των εφαρμογών WSN αξιοποιούνται οι τεχνολογίες ανίχνευσης, επικοινωνίας και παρακολούθησης και έχουν ως στόχο τον αντίκτυπο των βασικών παραγόντων του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών IoT (Salam, 2020)

Το διαδίκτυο των πραγμάτων στο πεδίο της υγείας επιτρέπει την ανάπτυξη μιας προσέγγισης συστημάτων στον τομέα της ανθρώπινης υγείας και του οικοσυστήματος. Αυτές οι προσεγγίσεις μετριάσμου του κλίματος που χρησιμοποιούν τα παραδείγματα IoT φέρνουν επίσης πολλά οφέλη για την υγεία, όπως ένα ασφαλές αστικό περιβάλλον που επιτυγχάνεται μέσω της ανίχνευσης και την εφαρμογή των αντίστοιχων βελτιώσεων στην ποιότητα του αέρα, το πράσινο αστικό περιβάλλον και τη μείωση των φυσικών καταστροφών όπως έχει αναφερθεί παραπάνω (Salam, 2020).

2.5.1.4 Καθημερινές εφαρμογές και Εφαρμογές Smart Home

Οι καθημερινές εφαρμογές είναι άφθονες. έχουν σκοπό να κάνουν τη ζωή ευκολότερη, πιο φιλική στο σπίτι, στη δουλειά και γενικά στην καθημερινότητα των ανθρώπων βελτιώνοντας απλά καθημερινά πράγματα με στόχο να απλοποιήσουν κάποιες διαδικασίες και να προσφέρουν τεχνολογικές λύσεις με καθημερινές εφαρμογές. Αρκετές διαθέσιμες εφαρμογές αξιοποιούν τις τεχνολογίες τους και τον τρόπο χρήσης τους, και αλληλεπικαλύπτονται με αισθητήρες και πρότυπα με στόχο να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής. Τέτοιες εφαρμογές για παράδειγμα είναι ένα έξυπνο σύστημα διαχείρισης χώρου στάθμευσης ή ένα WSN καθημερινών αντικειμένων και οικιακών συσκευών σε ένα έξυπνο οικιακό περιβάλλον (Fahmy, 2016).

2.5.1.5 Στρατιωτικές εφαρμογές

Αρκετοί τομείς έρευνας περιλαμβάνονται στη χρήση των WSN σε στρατιωτικές εφαρμογές. Ένας τέτοιος τομέας έρευνας είναι για παράδειγμα η επεξεργασία ακουστικών σημάτων των πυροβολισμών. Το επίκεντρο είναι η ανθεκτική ανίχνευση και η εκτίμηση μήκους μικρών διαμετρήσεων ακουστικών κυμάτων και εκρήξεων. Τα άκρα του κρουστικού κύματος είναι συνήθως καλά καθορισμένα και το μήκος του κρουστικού κύματος σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά της σφαίρας. Τέτοιες μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιήσουν το μήκος του κρουστικού κύματος, όπως καθορίζεται από τους αισθητήρες, για την εκτίμηση του διαμετρήματος ενός βλήματος. Ένα σχετικό θέμα είναι η έρευνα και ανάπτυξη πειραματικών συστημάτων εντοπισμού. Σύμφωνα με την μελέτη του Fahmy (Fahmy, 2016) ερευνητές έχουν αναπτύξει ένα τέτοιο WSN σύστημα, το οποίο έχει τη δυνατότητα να εγκατασταθεί σε σταθερή θέση ή να φορεθεί από στρατιώτες (Fahmy, 2016).

Οι πολυάριθμες στρατιωτικές και πολιτικές εφαρμογές της τεχνολογίας WSN έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν σημαντικά την κοινωνία. Ο κύριος στόχος των αποστολών επιτήρησης είναι η απόκτηση και η επαλήθευση πληροφοριών σχετικά με τις δυνατότητες του εχθρού και τις θέσεις των εχθρικών στόχων. Αυτές οι αποστολές συνεπάγονται συχνά υψηλό στοιχείο κινδύνου για το ανθρώπινο προσωπικό και απαιτούν υψηλό βαθμό μυστικότητας. Επομένως, η ικανότητα ανάπτυξης μη επανδρωμένων αποστολών επιτήρησης με τη χρήση εφαρμογών WSN έχει μεγάλη πρακτική σημασία για τη στρατιωτική βιομηχανία. Τέτοια έργα έχουν χρησιμοποιήσει λύσεις WSN για την ανίχνευση των ναρκών στα πεδία της μάχης με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σε άλλες εφαρμογές πραγματοποιηθήκαν διάφορα πειράματα χρησιμοποιώντας κόμβους WSN για να αντληφθούν τους εχθρούς. Αυτό το σύστημα ήταν ικανό να ανιχνεύει και να εντοπίζει με ακρίβεια σκοπευτές ακόμη και σε αστικό περιβάλλον (Lorente, 2015).

2.5.1.6 Εφαρμογές έξυπνης Γεωργίας

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις αειφορίας του 21^{ου} αιώνα είναι η εξασφάλιση κατάλληλης τροφής και νερού στον συνεχώς αυξανόμενο πληθυσμό του κόσμου. Η διαχείριση αυτών των πόρων είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική ανταπόκρισή σε αυτές τις προκλήσεις. Η κλιματική αλλαγή επηρέασε αρνητικά τη γεωργική παραγωγή τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες. Διάφοροι παράγοντες που

σχετίζονται με τις καλλιέργειες, όπως η ξηρασία, τα ζιζάνια, οι ασθένειες των καλλιεργειών έχουν προκαλέσει μείωση της παραγωγής των καλλιεργειών και των αποδόσεων. Συγκεκριμένα, οι γεωγραφικές περιοχές και οι καλλιέργειες που εξαρτώνται από τη βροχή και τις βροχοπτώσεις επηρεάζονται περισσότερο λόγω απώλειας πόρων που σχετίζονται με το έδαφος και το νερό που προκαλούνται από ακραίες καιρικές συνθήκες. Αυτά τα καιρικά φαινόμενα καθιστούν δύσκολη την προσαρμογή στις κλιματικές αλλαγές στη γεωργία (Salam, 2020).

Το WSN που αναπτύσσεται σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις, οπωρώνες και αμπελώνες χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των συνθηκών του τόπου, κυρίως περιβαλλοντικών, καιρικών και ατμοσφαιρικών μετρήσεων, με παραμετρικές μεταβλητές, όπως αέρα, υγρασία εδάφους, θερμοκρασία εδάφους, ηλιακή ακτινοβολία, σχετική υγρασία, ταχύτητα και κατεύθυνση άνεμων και συντεταγμένες εδάφους, για σκοπούς λήψης και διαχείρισης αποφάσεων. Για παράδειγμα, σε εύκρατες περιοχές, οι πολύ κρύες χειμερινές θερμοκρασίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την παραγωγικότητα της αμπέλου μέσω καταστροφής ιστών και οργάνων που προκαλείται από παγετό. Ως εκ τούτου, οι αμπελουργοί πρέπει να αποφασίσουν για το πότε θα ξεκινήσουν λαμβάνοντας μέτρα προστασίας από τον παγετό για να αποφευχθεί οποιαδήποτε ζημία μόλις εκδοθεί προειδοποίηση στην πρόγνωση καιρού (Ghobakhlou et al., 2020).

Τεχνικά, οι κόμβοι αισθητήρων αναπτύσσονται στο χωράφια. Αρχίζουν να συλλέγουν περιβαλλοντικές πληροφορίες και να παρακολουθούν τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Στη συνέχεια, συνεργάζονται σύμφωνα με σχεδιασμένα πρωτόκολλα για να μεταδώσουν τις συλλεγόμενες πληροφορίες σε έναν κεντρικό κόμβο. Μετά από αυτό, αυτές οι πληροφορίες υποβάλλονται σε επεξεργασία και αντιμετωπίζονται για να ληφθεί τελική απόφαση (Bennis et al., 2017).

2.6 Έξυπνη γεωργία και γεωργία ακριβείας

Μια από τις μεγαλύτερες αλλαγές που επέφερε η βιομηχανική επανάσταση ήταν η εκμηχάνιση της γεωργίας. Έπειτα η τρίτη βιομηχανική επανάσταση έφερε την αρχή της αυτοματοποίησης και την έλευση αυτοματοποιημένων συστημάτων ύδρευσης και άρδευσης σε σύγχρονες γεωργικές εκμεταλλεύσεις. Σήμερα, καθώς διανύουμε την εποχή της βιομηχανίας 4.0, όπως είναι η ονομασία που χρησιμοποιήθηκε για την τρέχουσα τάση της αυτοματοποίησής των τεχνολογιών παραγωγής όπου χρησιμοποιείτε η ανταλλαγή

δεδομένων με χρήση συσκευών που ανήκουν στο ευρύτερο φάσμα του διαδικτύου των πραγμάτων και σε τεχνολογίες υπολογιστικού νέφους, παρατηρούμε και τον ερχομό της έξυπνης γεωργίας. Η έξυπνη γεωργία έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή και κυρίως η εφαρμογή ασύρματων δικτύων αισθητήρων WSN. Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά τη γεωργία με τη συλλογή των δεδομένων σε ένα αγρόκτημα. Από τις διάφορες πληροφορίες σχετικά με δεδομένα μετρήσεων περιβαλλοντολογικών συνθηκών μέχρι επίβλεψη και ειδοποίηση για διαρροές και βλάβες στα ήδη αυτοματοποιημένα συστήματα άρδευσης και φυτοπαραγωγής.

Καθοριστικό ρόλο στην έλευση της βιομηχανίας 4.0 έχει η επιστήμη της πληροφορικής. Τις τελευταίες δεκαετίες η πληροφορική έχει υπάρξει η αναστατωτική δύναμη στις βιομηχανίες, απομακρύνοντας τις ανεπάρκειες της αγοράς μέσω αυτοματισμών και καλύτερων εργαλείων υποστήριξης και λήψης. Όπως όλες οι βιομηχανίες, η γεωργία δεν έχει απαλλαγεί από τις συνεχείς διαταραχές του περασμένου αιώνα και της εκμηχάνισης της γεωργίας. Ωστόσο, οι πρόσφατες εξελίξεις στην υπολογιστική υποδομή, την τεχνολογία αισθητήρων, τα μεγάλα δεδομένα Big Data και τους προηγμένους αλγόριθμους (Deep Learning, Machine Learning, Artificial Intelligence) υποδηλώνουν ότι μια σημαντική διαταραχή βρίσκεται στον ορίζοντα. Η πληροφορική κατέχει επίσης το κλειδί για την επιτάχυνση της μεταφοράς γνώσεων από το εργαστήριο στον παραγωγό. Τελικά, θα χρειαστεί ένα σύστημα βασισμένο σε αυτές τις νέες τεχνολογίες για την ανάπτυξη προηγμένων καλλιεργειών, για τη διαχείριση αγρονομικών δεδομένων και για την ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής επόμενης γενιάς.

Τα δεδομένα που παράγονται από αυτά τα συστήματα καλλιέργειας είναι κοινά στους περισσότερους τύπους καλλιεργειών και η ομοιογένεια τους εξαρτάτε από το μικρόκλιμα της κάθε περιοχής. Επομένως, η παρακολούθηση της απόδοσης των καλλιεργειών και του περιβάλλοντος θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό όχι μόνο από τις παραδοσιακές μεθόδους παρατήρησης της γης, καθώς οι παραδοσιακές τεχνικές μπορεί να μην έχουν εφαρμογή σε περιπτώσεις που η μια τεχνική καλλιέργειας είναι εφαρμοστέες σε μια περιοχή με άλλα περιβαλλοντολογικά χαρακτηριστικά και διαφορετικό μικρόκλιμα αλλά και από δεδομένα που παράγονται κατά μήκους της διαδικασίας παραγωγής.

Η γεωργία βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στο νερό, τη σωστή χρήση, αποθήκευση και διαχείριση του. Με την έλευση της τεχνολογίας και της βιομηχανίας 4.0, τα γεωργικά μηχανήματα τροποποιήθηκαν και από μηχανοποιημένα συστήματα, εξελίχθηκαν ώστε να

είναι αυτοματοποιημένα και πρόσφατα να λειτουργούν ως έξυπνες συσκευές. Το κύμα της τεχνολογίας και του διαδικτύου των πραγμάτων μπορεί να διευκολύνει περαιτέρω το απαραίτητο έργο του ποτίσματος και της άρδευσης των χωραφιών, ειδικά στις περιοχές που υπάρχει λειψυδρία ή ανάγκη για εξοικονόμηση υδάτινων πόρων, καθώς και σε καταστάσεις όπου υπάρχουν καλλιεργήσιμες εκτάσεις πολύ μακριά από κατοικημένες περιοχές. Επίσης, η εφαρμογή έξυπνης γεωργίας και επιβλέψεις των υδάτινων πόρων αποτρέπει την υπερβολική χρήση νερού για κάθε καλλιέργεια. Η ακανόνιστη κλιματική συμπεριφορά τα τελευταία χρόνια οδήγησε λειψυδρία σε πολλές περιοχές.

Η τεχνολογία του διαδικτύου των πραγμάτων συνέβαλε σημαντικά τόσο στη διάγνωση όσο και στον έλεγχο στον τομέα της βιομηχανίας του περιβάλλοντος και της γεωργίας. Επιπλέον, το IoT μπορεί να προσφέρει δεδομένα στον τελικό χρήστη σχετικά με την αφετηρία του προϊόντος και τα αποτελέσματά. Για τη βελτίωση της παραγωγικότητας της γεωργίας, η ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων WSN στον τομέα μπορεί να επιφέρει καλύτερη ποιότητα και αποτελέσματα στους αγρότες. Οι αισθητήρες ενός δικτύου WSN έχουν την δυνατότητα να αξιολογήσουν την υγρασία του εδάφους, τις καιρικές συνθήκες, τη θερμοκρασία, την υγρασία, τους κραδασμούς και τη βιομάζα φυτών ή ζώων. Εκτός αυτού, ένα δίκτυο WSN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της ανάπτυξης και της παραγωγικότητας των καλλιεργειών. Επιπλέον, το WSN καθορίζει τον ιδανικό χρόνο για την συγκομιδή, αναγνώριση και πρόβλεψη ασθενειών και άλλα ζητήματα που σχετίζονται με τη γεωργία και της καλλιέργειες (Yahya, 2019).

Σήμερα στη γεωργική βιομηχανία στόχος είναι η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της τεχνολογίας ώστε να αξιοποιήσουμε τις δυνατότητες που παρέχει για την καλύτερη διαχείριση της παραγωγής, την διασφάλιση των φυσικών πόρων και την πρόβλεψη πιθανών κλιματικών αλλαγών και επιδημιών φυτοπαθολογίας. Η έξυπνη γεωργία συμβάλλει στη μείωση της σπατάλης των φυσικών πόρων, στην αποτελεσματική χρήση λιπασμάτων και, ως εκ τούτου, στην αύξηση της απόδοσης (Rajalakshmi & Mahalakshmi, 2016).

Κατά την τελευταία δεκαετία, η γεωργία ακριβείας - precision agriculture, έχει αναδειχθεί ως νέα τάση για την ενίσχυση των γεωργικών πρακτικών. Ο κύριος στόχος της γεωργίας ακριβείας είναι η παρακολούθηση των χωροχρονικών χαρακτηριστικών του αγροτεμαχίου. Με αυτόν τον τρόπο, η απόδοση των καλλιεργειών μπορεί να

βελτιστοποιηθεί, ενώ οι φυσικοί, οικονομικοί και ενεργητικοί πόροι μπορούν να διατηρηθούν. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι ελεγχόμενες γεωργικές περιοχές είναι γενικά διάσπαρτες και υποφέρουν από μεταβλητές περιβαλλοντικές συνθήκες, η ανάγκη για ακριβείς και σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες που συλλέγονται είναι πιο έντονη. Επίσης, οι κλασικές λύσεις όπως δορυφορικές εικόνες, αεροσκάφη ή άλλα συστήματα που βασίζονται στο χάρτη δεν μπορούν να υποστηριχθεί από όλους τους αγρότες λόγω του μεγάλου κόστους τους. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων WSN εισήχθησαν στο γεωργικό περιβάλλον (Bennis et al., 2017).

Στο σημείο αυτό να γίνει μια αναφορά για της τεχνικές ποτίσματος οι οποίες θα συναντηθούν σε παρακάτω ενότητες καθώς ένα μεγάλο ποσοστό των εφαρμογών WSN έχουν ως πεδίο εφαρμογής τα αρδευτικά συστήματα ειδικεύοντας σε ένα κομμάτι της γεωργίας ακριβείας. Οι πρόσφατες πρακτικές στη γεωργία ακριβείας περιλαμβάνουν δύο κύριες μεθόδους άρδευσης που προωθούν την αποδοτική χρήση του νερού. Η πρώτη μέθοδος είναι η στάγδην άρδευση. Επιτρέπει στο νερό να στάζει στις ρίζες των φυτών μέσω σωλήνων που περιέχουν αρκετούς σταλάκτες. Αυτό το σύστημα άρδευσης αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία, την πηγή νερού που συνήθως είναι μια δεξαμενή ή μια γεώτρηση που συνδέεται με έναν κύριο σωλήνα ο οποίος ονομάζεται κύριος αγωγός. Αρκετοί σωλήνες συνδέονται με αυτόν τον κύριο σωλήνα χρησιμοποιώντας χειροκίνητες ή ηλεκτρικές βαλβίδες που ελέγχουν τη ροή του νερού. Οι σωλήνες περνούν από το χωράφι και διανέμουν νερό για κάθε φυτό. Η δεύτερη μέθοδος είναι η άρδευση ψεκαστήρα που παρέχει νερό μέσω ενός δικτύου σωλήνων υπό πίεση στα ακροφύσια του ψεκαστήρα που ψεκάζουν το νερό στον αέρα. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος είναι λιγότερο αποτελεσματική από την στάγδην, καθώς χάνεται περισσότερο νερό λόγω εξάτμισης και απορροής (Bennis et al., 2017). Θα πρέπει επίσης να τονιστεί επίσης πως σύμφωνα με στοιχεία του πρώην Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.) στην Ελλάδα τα οποία αναλύθηκαν από την έρευνα του Τεκίδη (Τεκίδης, 2012), ο βαθμός απόδοσης για άρδευση με συστήματα στάγδην είναι 0,9 ενώ αντίστοιχα οι βαθμός απόδοσης για άρδευση με ψεκαστήρα είναι 0,6. Στην ίδια μελέτη αναφέρεται πως για την υπολεκάνη της λίμνης Κορώνειας, η οποία αποτελεί τμήμα της περιοχής μελέτης στην οποία επικεντρώνεται η έρευνα, οι περισσότερες υδροβόρες καλλιέργειες κατά τους μήνες ποτίσματος Μάιο με Σεπτέμβριο ο τρόπος ποτίσματος που χρησιμοποιούταν στις περισσότερες υδροβόρες καλλιέργειες ήταν η δεύτερη μέθοδος, άρδευση με ψεκαστήρα.

3 Μεθοδολογία

Για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχουν εξεταστεί δημοσιευμένα έργα που προτείνουν ή υλοποιούν τεχνολογίες WSN για την απόκτηση περιβαντολλογικών δεδομένων πάνω στο ερευνητικό πεδίο χρήσης αυτών των συστημάτων σε εφαρμογές γεωργίας ακριβείας, αυτοματοποίησης γεωργικών διεργασιών και εποπτείας λιμνών και άλλων περιοχών οικολογικού ενδιαφέροντος.

3.1 Επιλογή σχετικού ερευνητικού έργου

Τα δημοσιευμένα έργα έχουν επιλεγθεί με την προϋπόθεση να πληρούν τα παρακάτω τρία κριτήρια. Το πρώτο κριτήριο είναι η πιθανή εφαρμογή τους στην περιοχή μελέτης καθώς και τυχόν ομοιότητες της εστιασμένης περιοχής μελέτης κάθε δημοσίευσης με την περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας. Το δεύτερο κριτήριο για την επιλογή των δημοσιευμένων έργων ήταν να έχουν υλοποιηθεί κατά κύριο λόγο την τελευταία δεκαετία με στόχο να αποφευχθεί η εστίαση σε παρωχημένες τεχνολογίες καθώς το γνωστικό αντικείμενο της τεχνολογίας του διαδικτύου των πραγμάτων και των ασύρματων δικτύων αισθητήρων αποτελεί ένα ερευνητικό πεδίο ενδιαφέροντος τεχνολογίας αιχμής. Τέλος το τρίτο κριτήριο με το οποίο επιλέχθηκαν οι δημοσιεύσεις για να συμπληρώσουν το σχετικό ερευνητικό έργο είναι η ετερογένεια στην προσέγγιση των WSN από τον κάθε ερευνητή. Καθώς κατά την επιλογή των έργων παρατηρήθηκε πως κάθε ερευνητική ομάδα έχει εξετάσει το γνωστικό αντικείμενο των WSN με διαφορετική προσέγγιση εστιάζοντας και δίνοντας βαρύτητα σε ένα ερευνητικό πεδίο με στόχο την βέλτιστη λύση και την εις βάθος κατανόηση του. Σκοπός του τελευταίου κριτηρίου είναι να υπάρχει ένα διευρυμένο εύρος μελετών επικεντρωμένες σε διαφορετικά πεδία ενδιαφέροντος.

Μερικά σημαντικά παραδείγματα επικεντρωμένων ερευνών σε ένα συγκεκριμένο πεδίο ειδίκευσης αποτελούν η ανάλυση των δεδομένων και οι τεχνικές μηχανικής μάθησης και τεχνίτης νοημοσύνης στην διαδικασίας λήψης αποφάσεων, η υλικοτεχνική υποδομή και η προσέγγιση στην σχεδίαση της αρχιτεκτονικής των κόμβων καθώς και τοπολογίες του WSN δικτύου που υλοποιήθηκαν στις δημοσιευμένες έρευνες και τέλος οι προσέγγιση στην διαχείριση της ενέργειας, τόσο στους κόμβους WSN όσο και στις δικτυακές συσκευές που απαρτίζουν την κάθε τοπολογία καθώς και στην προσέγγιση της ασφάλειας

στις επικοινωνίες της κάθε εφαρμογής WSN. Αυτή η προσέγγισή, να υπάρχουν έρευνες εστιασμένες σε ένα αντικείμενο, θα έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή εξειδικευμένης γνώσης για αυτά τα πεδία ενδιαφέροντος που απαρτίζουν κομμάτια του WSN, και την αξιοποίηση αυτής της γνώσης για την σχεδίαση και υλοποίηση της βέλτιστης εφαρμογής WSN για την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, σε όποιο βαθμό είναι αυτό εφικτό.

3.2 Συγκριτική μελέτη περιπτώσεων ως ερευνητική μεθοδολογία

Ο στόχος είναι η αξιολόγηση των προταθέντων συστημάτων και η ανάλυση τους ως περιπτώσεις μελέτης. Οι τεχνικές μελέτης περιπτώσεων αναγνωρίζονται ως ερευνητικό μέσο για την εξέταση της πολλαπλότητας ενός αντικειμένου, και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων εξετάζοντας τα μέσω διαφορετικών προσεγγίσεων. Η ερευνητική μεθοδολογία που εφαρμόστηκε είναι η συγκριτική μελέτη περίπτωσης, η σύγκριση πραγματοποιήθηκε με βάση έξι προκαθορισμένα κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά είναι η κατανάλωση ενέργειας και η αυτονομία της κάθε πρότασης, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιήσαν στην κάθε έρευνα με σκοπό να εντοπιστούν τα κριτήρια με τα οποία έχει επιλεγεί η χρήση κάθε πρωτοκόλλου, τους τύπους αισθητήρων που αξιοποίησαν οι ερευνητές σε κάθε WSN λύση για την λήψη των περιβαντολογικών μετρήσεων και την αξιοποίηση των ληφθέντων δεδομένων σε κάθε πρόταση, την ασφάλεια των επικοινωνιών και των δεδομένων και τέλος την παρουσίαση αποτελεσμάτων από την εφαρμογή της κάθε πρότασης σε πραγματικές συνθήκες ή των αποτελεσμάτων από πειραματικές εξομοιώσεις.

Για την ανάλυση της κάθε έρευνας ως προς τα επιλεγθέντα κριτήρια δεν έχει ληφθεί υπόψιν η εστίαση της κάθε έρευνας σε ένα πεδίο ενδιαφέροντος, οπότε αν μια έρευνα για παράδειγμα εστιάζει στην αποδοτική διαχείριση ενέργειας και δεν δίνει έμφαση στους τύπους αισθητήρων θα αξιολογηθεί ισότιμα για το κάθε κριτήριο όπως μια εφαρμογή που εστιάζει στους τύπους αισθητήρων και στην αξιοποίηση των μετρήσεων. Σκοπός αυτής της προσέγγισης είναι τα αναλυθέντα αποτελέσματα να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν στην υλοποίηση μια πρότασης με τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα ως προς κάθε ένα από τα έξι κριτήρια.

Από την ανάλυση των εφαρμογών, είναι σαφές ότι υπάρχουν και άλλοι παράγοντες οι οποίοι μπορεί να ληφθούν υπόψιν για την αξιοποίηση τους στην συγκριτική μελέτη, όπως για παράδειγμα προτάσεις για διαχείριση της παραχθείσας πληροφορίας ως μεγάλα δεδομένα, big data, η χρήση εφαρμογών στο υπολογιστικό νέφος, η τροφοδότηση των

μετρήσεων σε συστήματα εξόρυξης δεδομένων, και η αξιοποίηση τους σε εφαρμογές μηχανικής μάθησης στην διαδικασία λήψης αποφάσεων για κάθε πεδίο εφαρμογής. Δεδομένου όμως ότι οι συγκεκριμένες τεχνολογίες αποτελούν από μόνες τους ένα γνωστικό αντικείμενο δεν γίνει σύγκριση όλων των ερευνών ως προς άλλα κριτήρια, όμως θα χρησιμοποιηθεί κάθε διαθέσιμη πληροφορία η οποία θα προκύψει από το σχετικό ερευνητικό έργο για την ανάλυση των ερευνών καθώς και για την σχεδίαση της πρότασης για την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας.

Τέλος θα προταθεί μια εφαρμογή WSN για χρήση στην περιοχή μελέτης της εργασίας, δηλαδή στην ευρύτερη καλλιεργήσιμη έκταση στους υδροβιότοπους των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης, καθώς και στις ίδιες τις λίμνες όπου αυτό είναι εφικτό. Στόχος είναι η πρόταση να αποτελέσει προϊόν της παραχθείσας γνώσεως η οποία έχει αποκτηθεί από τα αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης, και αν αυτό είναι εφικτό η υλοποίηση μιας πειραματικής εφαρμογής για την επικύρωση της πρότασης, είτε μέσω εξομοίωσης, είτε μέσω του σχεδιασμού μιας μικρογραφίας της πρότασης και η εφαρμογή της σε ένα ασφαλές εργαστηριακό περιβάλλον που να προσομοιώνει τις πραγματικές συνθήκες για την αποκόμιση των αποτελεσμάτων της πρότασης με φυσικές μετρήσεις.

4 Σχετικό Ερευνητικό Έργο

4.1 Εφαρμογές WSN για χρήση σε εποπτεία λιμνών και υδάτων

Η κατανομή του νερού είναι ο τρόπος για τον προσδιορισμό ή την αξιολόγηση των όγκων του νερού που είναι προσβάσιμοι ή χρησιμοποιούνται για αστική, βιομηχανική ή γεωργική εκμετάλλευση. Καταστροφικές χρήσεις για τους όγκους του νερού είναι εκείνες που περιλαμβάνουν την απομάκρυνση του νερού από μια υδάτινη οδό, λίμνη ή υπόγεια αποθέματα, και κατά μήκος αυτών των γραμμών ενσωματώνουν σύστημα άντλησης νερού, βιομηχανικές χρήσεις και τοπική παροχή νερού.

Σε αυτό το πεδίο εφαρμογής, οι σχετικές έρευνες επιλέχθηκαν με κριτήριο την υλοποίηση ή την πρόταση εφαρμογών WSN που έχουν ως στόχο την αξιοποίηση τεχνολογιών WSN με σκοπό να μπορέσουν να μετρηθούν διάφορα φυσικά μεγέθη και να εφαρμοστούν για την προστασία του όγκου του νερού σε λίμνες, ποταμούς, ή άλλους υδάτινους πόρους από περιπτώσεις υπεράντλησης και σπατάλης άλλα και την αποφυγή της υποβάθμισης της ποιότητας του νερού από πηγές μόλυνσης. Για το συγκεκριμένο πεδίο επιλέχθηκαν ερευνητικές προτάσεις οι οποίες παρουσιάζουν λύσεις για την εποπτεία λιμνών και υδάτινων πόρων, την περιβαλλοντική αειφορία και την κλιματική αλλαγή. Κοινό στοιχείο των ερευνών είναι η συλλογή δεδομένων και επεξεργασία τους και η εφαρμογή μεθόδων διαχείρισης μεγάλων δεδομένων big data με στόχο την χρήση τους και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του αντικατοπτρισμού της κλιματικής αλλαγής στους όγκους νερού για την αντιστροφή των συνεπειών της με προτάσεις και καινοτομίες στην διαχείριση των υδάτινων πόρων, στην επιστήμη του κλίματος και του περιβάλλοντος που καθοδηγούνται από βασικούς κοινωνικούς και οικονομικούς φορείς.

4.1.1 Εφαρμογές με έμφαση στην εξοικονόμηση ενέργειας

Στην μελέτη των Huang, Yi, Chen και Zhu (Huang et al., 2015) οι ερευνητές σχεδίασαν και προγραμματίσαν χρησιμοποιώντας κανόνες της γλώσσας κανόνων σημασιολογικού ιστού (Semantic Web Rule Language – SWRL) και της γλώσσας οντολογίας του παγκοσμίου Ιστού (Web Ontology Language - OWL) για την παρακολούθηση κατάστασης δικτύων WSN και υποστήριξη λήψης λειτουργικών αποφάσεων. Στόχος ήταν η πρόταση ενός WSN για την παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων μιας λίμνης. Οι πληροφορίες που συλλέγονται στους κόμβους WSN μπορούν

να χρησιμοποιηθούν για παρακολούθηση της κατάστασης της ποιότητάς του νερού σε πραγματικό χρόνο, επίσης οι κανόνες που έχουν χρησιμοποιηθεί εφαρμόζονται και στην παρακολούθηση της υγείας του ίδιου του κόμβου WSN (Huang et al., 2015).

Στην πρόταση των ερευνητών ως τεχνολογία δικτύωσης για την επικοινωνία ανάμεσα στους κόμβους WSN επιλέχθηκε η ασύρματη τεχνολογία ZigBee με κύριο κριτήριο την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Για την επικοινωνία του κεντρικού κόμβου με τον απομακρυσμένο διακομιστή παρακολούθησης έχει επιλεγθεί η τεχνολογία GPRS. Εκτός των δυο παραπάνω τεχνολογιών, οι κόμβοι είναι εξοπλιζόμενοι και με έναν γεωδαιτικό δέκτη GPS. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν θερμοκρασίας νερού, αγωγιμότητας, αισθητήρας διαλυμένου οξυγόνου (DO) και αισθητήρας ενεργού οξύτητας (pH). Φυσικά εκτός τον παραπάνω κάθε κόμβος ήταν εξοπλισμένος με έναν μικροελεγκτή και μια μνήμη τύπου EEPROM και μια συσκευή συλλογής δεδομένων που καταγράφει τις μετρήσεις του νερού σε πραγματικό χρόνο, τις οποίες μεταδίδονται στο απομακρυσμένο κεντρικό για επεξεργασία. Ως κεντρικός διακομιστής χρησιμοποιήθηκε ένα φυσικός υπολογιστής. Για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας οι κόμβοι δεν ήταν όλοι εξοπλισμένοι και με τους τέσσερις τύπους αισθητήρων αλλά μοιραστήκαν έτσι ώστε να συλλέγουν δειγματοληπτικά μετρήσεις και τα τέσσερα μετρήσιμα μεγέθη. Αφού λήφθηκαν μετρήσεις από δείγματα πέντε διαφορετικών λιμών έχει προταθεί μια κλίμακα πέντε σταδίων ανάμεσα τους στάδια όπως πόσιμο νερό, νερό για βιομηχανική χρήση και νερό για αγροτικές καλλιέργειες. Σημαντικό ρόλο για την δημιουργία αυτής της κλίμακας παίζουν οι μετρήσεις της αγωγιμότητας, του διαλυμένου οξυγόνου και της ενεργού οξύτητας pH (Huang et al., 2015).

Σημαντικό ενδιαφέρον στην παραπάνω πρόταση είναι η έμφαση που έχουν δώσει οι ερευνητές στην εξοικονόμηση ενέργειας. Για την παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων της λίμνης με την χρήση ενός WSN, αντί να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές πηγές ενέργειας, εφαρμόστηκαν αποτελεσματικές στρατηγικές για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Οι λόγοι οι οποίοι οδήγησαν σε αυτή την απόφαση είναι πως για την χρήση των κόμβων για μετρήσεις σε περιοχές λιμνών και άλλων υδάτινων πόρων απαιτείται η τοποθέτηση τους σε δύσβατες και απόμακρες περιοχές καθιστώντας δύσκολη και κοστοβόρα την συντήρησή τους ή την ύπαρξη σταθερής πηγής από το δίκτυο παροχής ενέργειας. Οι κατάλληλες μέθοδοι διαχείρισης για WSN βελτίωσαν σημαντικά την απόδοση του δικτύου, μειώνοντας την

κατανάλωση ενέργειας και παρατείνουν τη διάρκεια ζωής ολόκληρου του δικτύου. Για την τροφοδοσία των κόμβων χρησιμοποιήθηκαν δυο κοινές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Εκτός των αισθητήρων μετρήσεων των φυσικών μεγεθών οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι και με μετρητές της τάσης των μπαταριών, αποστέλλοντας επίσης δεδομένα για την κατάσταση των μπαταριών στον κεντρικό διακομιστή έτσι ώστε να γνωρίζει ο τελικός χρήστης την υγεία της μπαταρίας κάθε κόμβου. Δεν θα γίνει ανάλυση των κανόνων και της τεχνικής που χρησιμοποιήθηκαν για την εξοικονόμηση ενέργειας, περιληπτικά θα αναφέρουμε πως εστίασαν κυρίως με την κατάσταση ποιότητας του νερού προσαρμόζοντας την κατανάλωση ενέργειας του WSN σύμφωνα με την κατάσταση της ποιότητας του. Για παράδειγμα, όταν η ποιότητα του νερού είναι χαμηλή ή κάποιος δείκτης παρατήρησης υπερβαίνει το κανονικό εύρος, υπήρχε αύξηση της συχνότητας δειγματοληψίας και επικοινωνίας με αποτέλεσμα η κατανάλωση ενέργειας να αυξηθεί. Ωστόσο, εάν ο βαθμός ποιότητας του νερού είναι υψηλός, τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε χαμηλότερες συχνότητες μετρήσεων και δειγματοληψίας ή κατάσταση αναμονής για εξοικονόμηση ενέργειας (Huang et al., 2015).

Στο μέλλον, στόχος είναι να βελτιώσουν τις λειτουργίες παρακολούθησης του δικτύου WSN. Για να επιτευχθεί αυτό μια πρόταση είναι προσθέτοντας περισσότερες συσκευές και θα συμπεριλαμβάνοντας πιο περίπλοκες στρατηγικές στους κανόνες συλλογισμού που ελέγχουν δυναμικά την κατανάλωση ενέργειας. για παράδειγμα, πρωτόκολλα τοπολογίας, πρωτόκολλα δρομολόγησης με επίγνωση ισχύος και πιο αποτελεσματικά πρωτόκολλα διαχείρισης ύπνου. Άλλη πρόταση για να επιτευχθεί η βελτίωση της λειτουργίας παρακολούθησης είναι πραγματοποιώντας περισσότερα πειράματα σε μεγαλύτερη κλίμακα για να ελέγχοντας τις συγκρούσεις κανόνων και την ακρίβεια της διάγνωσης (Huang et al., 2015).

Σε άρθρο των Tang & Huang (Tang & Huang, 2010), έχει προταθεί μια τεχνολογία παρακολούθησης υδρόβιας βλάστησης που βασίζεται σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων WSN, και έχει ως περιοχή μελέτης την οικονομική και οικολογική ζώνη της λίμνη Poyang στην επαρχία Τσιανγκσί της Λαϊκής Δημοκρατίας της Κίνας, όπου οι δραστηριότητες του ανθρώπου έχουν επηρεάσει σημαντικά ολόκληρο το περιβάλλον αυτής της περιοχής. Η οικολογική καταστροφή όπως η θανάτωση της υδρόβιας βλάστηση, η εξαφάνιση ορισμένων ειδών, η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση των υδάτινων πόρων, η ρύπανση της ποιότητας των υδάτων και άλλα, απαιτεί πολλές επείγουσες λύσεις από την

κυβέρνηση ή το αντίστοιχο τμήμα τοπικής αυτοδιοίκησης. Για την υλοποίηση της λύσης επιλέχθηκαν συσκευές χαμηλής ισχύος και λειτουργία ύπνου για να τον συντονισμό του ασύρματου δικτύου αισθητήρων και των κόμβων αισθητήρων. Στη μελέτη, το έγγραφο αφορούσε ειδικό περιβάλλον υδρόβιας βλάστησης για την ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, και λαμβάνοντας υπόψη ότι αυτοί οι κόμβοι αισθητήρων διαφέρουν από τους παραδοσιακούς κόμβους αισθητήρα επίγειου. Εφαρμόζοντας την τεχνολογία ασύρματου δικτύου αισθητήρων υποθαλάσσιας βλάστησης (under aquatic vegetation wireless sensor network system – UAWSN) για τη συλλογή και μετάδοση δεδομένων, η οποία κατά τους ερευνητές μπορεί να λύσει πολλές δυσκολίες, όπως η μετάδοση ενδιάμεσου εύρους συστήματος παρακολούθησης υδρόβιας βλάστησης και μπορεί να πραγματοποιήσει ανταλλαγή δεδομένων απομακρυσμένης παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο (Tang & Huang, 2010).

Για την υλοποίηση της παραπάνω έρευνας των Tang και Huang οι κόμβοι εξοπολήστηκαν με μαγνητοελαστικές συστοιχίες αισθητήρων για την παρακολούθηση του περιβαλλοντικού pH καθώς επίσης και της φωτεινότητας, τυχόν αιρούμενα στερεά αντικείμενα στο νερό και την ποσότητα διαλυμένου οξυγόνου. Για την δικτύωση των συσκευών χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο επικοινωνίας ZigBee, το οποίο επιλέχθηκε με κριτήριο τα με το χαρακτηριστικά της εύκολης δομής, του χαμηλού κόστους, του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης, της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και του υψηλής αξιοπιστίας δικτύου μικρό-ισχύος. Ένας επιπλέον κριτήριο που επιλέχθηκε ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας με χαμηλή κατανάλωση ισχύος είναι γιατί οι κόμβοι τροφοδοτούνται με μπαταρία (Tang & Huang, 2010).

4.1.2 Εφαρμογές με έμφαση σε συστήματα συλλογής δεδομένων

Στην έρευνα των Duarte, Palacios και Santos (Duarte et al., 2019) οι ερευνητές συγκέντρωσαν δεδομένα από παραδοσιακούς μετρολογικούς σταθμούς με στόχο την ανάλυση και τις επιπτώσεις διαφορετικών σεναρίων στην καθίζηση της λεκάνης απορροής του ποταμού Totaré που βρίσκεται στην περιοχή Tolima της Κολομβίας και τις πιθανές συνέπειές της στην αγροτική παραγωγή της περιοχής. Το υδρολογικό καθεστώς του ποταμού στο κύριο κανάλι του είναι διτροπικό, με υγρές εποχές μεταξύ Μαρτίου-Μαΐου και Σεπτεμβρίου-Νοεμβρίου και ξηρών περιόδων μεταξύ Δεκεμβρίου-Φεβρουαρίου και Ιουνίου-Αυγούστου. Η συγκεκριμένη έρευνα δεν επιλέχθηκε με κριτήριο της εφαρμογές

της στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων άλλα την υλοποίηση πολλαπλών προγνωστικών μαθηματικών μοντέλων που εφαρμόστηκαν καθώς και τα οφέλη και πλεονεκτήματα για την περιοχή μελέτης. Παρόλο που δεν πρόκειται για τεχνολογίες οι οποίες αναλύονται στην παρούσα εργασία, δεν παύει να αποτελεί ένα πρώιμο δίκτυο αισθητήρων με εφαρμογές στην περιβαλλοντική μελέτη και συγκεκριμένα σε ένα σενάριο σχετικό με την περιοχή μελέτης του εθνικού πάρκου των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης και για αυτούς τους λόγους έχει συμπεριληφθεί στο σχετικό ερευνητικό έργο. Στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν κλιματολογικά μοντέλα βασισμένα σε διεθνή πρότυπα λαμβάνοντας μετρήσεις από 22 μετεωρολογικούς σταθμούς εξοπλισμένους με βροχόμετρο για διαφορετικά διαστήματα συσσώρευσης βροχόπτωσης (5, 7, 10, 15 και 30 ημέρες). Τα δεδομένα τα οποία αξιοποιήθηκαν ήταν μετρήσεις σχεδόν 60 ετών (1958 – 2016) (Duarte et al., 2019).

Το σημαντικό ενδιαφέρον που παρουσιάζει η συγκεκριμένη έρευνα είναι η αξιοποίηση των ληφθέντων φυσικών μετρήσεων, η ψηφιοποίηση τους, και η δημιουργία ενός συγχρόνου συστήματος συλλογής δεδομένων με στόχο την παραγωγή μαθηματικών και στατιστικών μοντέλων και η εφαρμογή τους στην σύγχρονη γεωργία, την ανάστροφη της κλιματικής αλλαγής και την προστασία του λεκανοπέδιου του ποταμού. Ο όγκος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην ερευνά μπορούν να θεωρηθούν ως μεγάλα δεδομένα, big data. Τα αποτελέσματα της μελέτης προέβλεψαν των αύξηση των βροχοπτώσεων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Totaré από 10% σε 50% για τα μέσα και το τέλος του αιώνα σε όλα τα εφαρμοσμένα σενάρια. Οι ερευνητές κατέληξαν πως είναι απαραίτητο να ληφθούν μέτρα για την εξασφάλιση επαρκούς γεωργικής παραγωγής λόγω πιθανών πλημμυρών ή της διάβρωσης του εδάφους. Σημαντικό ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η εκμετάλλευση των μετρήσεων για παράλληλη εφαρμογή τους στην γεωργία ακριβείας και στις αγροτικές παραγωγές της περιοχής μελέτης με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και των νερών του ποταμού, καθώς και την προστασία των καλλιέργειών από περιόδους συνεχών βροχοπτώσεων, παρατεταμένης ξηρασίας ή ακόμα και σε περιπτώσεις πλημμύρας και υπερχειλίσης του ποταμού που μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφή των καλλιέργειών περίξ της λεκάνης απορροής. Σε αυτό το κομμάτι οι ερευνητές έχουν διαχωρίσει τις καλλιεργήσιμες και δασικές εκτάσεις και έχουν εφαρμόσει διαφορετικά στατιστικά μοντέλα σε καλλιέργειες όπως φυτείες καφέ, ορυζώνες, καλλιέργειες λαχανικών και οπωροφόρων δέντρων, με στόχο να προταθούν

λύσεις εξοικονόμησης υδάτινων πόρων και αξιοποίηση τους στις υδροβόρες καλλιέργειες όπως είναι ο καφές και το ρύζι που καλλιεργούνται στην περιοχή, και την αντιστροφή του φαινομένου του θερμοκηπίου (Duarte et al., 2019).

Ο στόχος της εργασίας των Al-Dahoud, Fezari και Mehamdia (Al-Dahoud et al., 2020) ήταν η ανάπτυξη ενός ασύρματου συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας του νερού στην λίμνη Τόνγκα. Η λίμνη Τόνγκα βρίσκεται στην Αλγερία και ανήκει στο εθνικό πάρκο Ελ Καλά (El Kala National Park). Είναι μια περιοχή διεθνούς σημασίας στην περιοχή της Μεσογείου, καθώς έχει καταχωρηθεί στη λίστα της συνθήκης Ramsar από το 1982. Ο σκοπός της ανάπτυξης του WSN είναι η διατήρηση καλής ποιότητας νερού έτσι ώστε να επιφέρει ωφελεί τόσο τους ανθρώπους όσο και τα υδάτινα οικοσυστήματα (Al-Dahoud et al., 2020).

Η εφαρμογή που υλοποιήθηκε στην έρευνά παρακολουθεί την ποιότητας νερού και συλλέγει δείγματα νερού σε πραγματικό χρόνο, σε αντίθεση με παραδοσιακές μεθόδους δειγματοληψίας με τακτικές περιόδους μετρήσεων και αποστολή των δειγμάτων για χημική ανάλυση στο εργαστήριο. Για την υλοποίηση του δικτύου των κόμβων WSN χρησιμοποιήθηκαν IoT συσκευές ανοιχτού κώδικά τύπου Arduino και τοποθετήθηκαν ως πλωτοί κόμβοι με την χρήση πλαστικού κυτίου. Κάθε κόμβος περιείχε πέντε αισθητήρες. Για τις μετρήσιμες μονάδες επιλέχθηκαν αισθητήρες ενεργού οξύτητας pH, διαλυμένου οξυγόνου DO, θερμοκρασίας, αγωγιμότητας και θολότητας. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τους αισθητήρες επεξεργάζονται πρώτα από τον μικροελεγκτή του κόμβου και μετά τα επιλεγμένα δεδομένα μεταδίδονται στην στον απομακρυσμένο εξυπηρετητή μέσω του κόμβου gateway. Για την ασύρματη επικοινωνία των κόμβων μεταξύ τους, άλλα και του κόμβου gateway με τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή χρησιμοποιήθηκε η ασύρματη τεχνολογία ZigBee. Ως απομακρυσμένος εξυπηρετητής χρησιμοποιήθηκε ένας υπολογιστής με γραφικό περιβάλλον GUI που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό MATLAB. Το γραφικό περιβάλλον επιτρέπει στους χρήστες να εξετάζουν τα συλλεχθέντα δεδομένα ποιότητας νερού ή τυχόν προειδοποιητικά μηνύματα που μπορεί να πυροδοτήσουν τον αλγόριθμο της εφαρμογής όταν η ποιότητα του νερού ανιχνεύεται όταν είναι κάτω από τα προκαθορισμένα πρότυπα. Τα δεδομένα που συλλέγονται καταγράφονται σε σκληρό δίσκο και παραμένουν διαθέσιμα στον χρήστη για περαιτέρω ανάλυση με διάφορα εργαλεία λογισμικού για μελλοντικές προβλέψεις και ενέργειες (Al-Dahoud et al., 2020).

Μεγάλη έμφαση έχει δοθεί από τους ερευνητές στο κομμάτι της ανάλυσης των συλλεχθέντων δεδομένων με σκοπό την δημιουργία ενός συστήματος λήψης αποφάσεων με βάση τις μετρήσεις και τις προγνώσεις που μπορούν να παραχθούν από το WSN. Σύμφωνα με τις μετρήσεις που πάρθηκαν οι ερευνητές εφάρμοσαν διάφορα στατιστικά και προγνωστικά μοντέλα με στόχο να μπορούν να προβλέψουν τυχόν συμπεριφορές στην λίμνη που θα πρέπει να ανιχνευθούν, να αναφερθούν και να παρθούν ενέργειες δράσης εγκαίρως. Για την τροφοδοσία ρεύματος στους κόμβους οι ερευνητές προσπάθησαν να σχεδιάσουν τον κόμβο όσο τον δυνατών με λιγότερη κατανάλωση ενέργειας (Al-Dahoud et al., 2020).

Τα πλεονεκτήματα που επισήμαναν οι ερευνητές αυτής της προσέγγισης έναντι της παραδοσιακής δειγματοληψίας είναι ότι στην παραδοσιακή δειγματοληψία η συλλογή δεδομένων είναι ανομοιογενής στο χώρο και στο χρόνο, με αποτέλεσμα τα περιστατικά σποραδικής ρύπανσης να μην μπορούν να γίνουν αντιληπτά όπως μπορεί να συμβεί με ένα σύστημα WSN, μπορούν εύκολα να χαθούν και είναι χρονοβόρο και δαπανηρό για το προσωπικό να συλλέγει δείγματα νερού, να επιστρέφει στο εργαστήριο για να δοκιμάζει και να επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία για διαφορετικούς υδατικούς πόρους. Επίσης υπάρχουν ορισμένες βιολογικές και χημικές διεργασίες όπως το δυναμικό μείωσης της οξείδωσης που πρέπει να μετρηθούν επιτόπου για να διασφαλιστεί η ακρίβεια, οι εργαστηριακές δοκιμές έχουν πολύ βραδύτερο χρόνο ανακύκλωσης σε σύγκριση με την επιτόπια παρακολούθηση και τέλος η ερμηνεία των δεδομένων που συλλέγονται σε διαφορετικές εποχές είναι δύσκολη, καθώς τα δεδομένα είναι αραιά τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Με την εφαρμογή της λύσης WSN μπόρεσε και δόθηκε λύση στους παραπάνω περιορισμούς της παραδοσιακής δειγματοληψίας (Al-Dahoud et al., 2020).

Στην προτεινόμενη μέθοδο των Vijayakumar και Ramya (Vijayakumar & Ramya, 2015), οι ερευνητές αξιοποίησαν μια συσκευή Raspberry Pi ως βασικός ελεγκτής, έναν Single Board υπολογιστή, που αν και έχει περισσότερες δυνατότητες και λειτουργίες από έναν απλό κόμβο IoT, χρησιμοποιείται πολύ συχνά για IoT εφαρμογές λόγω του χαμηλού κόστους και των δυνατοτήτων του. Το Raspberry Pi χρησιμοποιεί λειτουργικό σύστημα Linux. Για την δυνατότητα μετρήσεων και λειτουργιών WSN έχουν εφαρμοστεί αισθητήρες θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, θολότητας, διαλυμένου οξυγόνου (DO) και αισθητήρες ενεργού οξύτητας (pH). Οι μετρήσεις των αισθητήρων μπορούν να διαβαστούν απευθείας από τη γραμμή εντολών. Ωστόσο, αυτό απαιτεί να εισάγουμε μια

εντολή κάθε φορά που θέλουμε να γνωρίζουμε τις τιμές των αισθητήρων. Για να επιτευχθεί πρόσβαση σε όλους τους ακροδέκτες των αισθητήρων, οι ερευνητές υλοποίησαν ένα πρόγραμμα γραμμένο σε γλώσσα Python. Για την δικτύωση του Raspberry Pi χρησιμοποιήθηκε ένα Wi-Fi IoT Module το οποίο επιτρέπει την αποστολή δεδομένων στο διαδίκτυο χρησιμοποιώντας τεχνολογίες υπολογιστικού νέφους καθώς και σε άλλες κινητές συσκευές μέσω του δικτύου Wi-Fi.

Οι παράμετροι παρακολούθησης του νερού καθώς και οι μετρήσεις από τους αισθητήρες μεταδίδονται μέσω της μονάδας IoT στην πύλη του δικτύου. Η πύλη είναι υπεύθυνη για την ανάλυση δεδομένων και την προώθηση δεδομένων ανίχνευσης στον απομακρυσμένο διακομιστή. Τα πακέτα UDP που παράγονται στην πύλη ενσωματώνουν δείγματα δεδομένων για αποστολή σε απομακρυσμένο διακομιστή με λειτουργικό Windows. Ο διακομιστής συλλέγει δείγματα δεδομένων λαμβάνοντας τα πακέτα UDP που περιέχουν δείγματα δεδομένων από τη μονάδα IoT και την πύλη και τα αποθηκεύει σε βάση δεδομένων. Χρησιμοποιώντας μια ξεχωριστή διεύθυνση IP οι χρήστες μπορούν να δούνε τα δεδομένα του αισθητήρα απομακρυσμένα μέσω της πλατφόρμας η οποία φιλοξενείται στο υπολογιστικό νέφος από οπουδήποτε στον κόσμο.

Η πρόταση των ερευνητών δεν έχει ως στόχο να υλοποιηθεί σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή άλλα γενικά την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού για πολλές εφαρμογές όπως η παρακολούθηση του περιβάλλοντος μιας λίμνης και του οικοσυστήματος, η διανομή και μέτρηση πόσιμου νερού, η ανίχνευση μόλυνσης στο πόσιμο νερό και άλλες παρόμοιες λύσεις. Σύμφωνα με τους ερευνητές τέτοιες εφαρμογές χρειάζονται μια ξεχωριστή τεχνική για την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού. Στο προτεινόμενο σύστημά τους, καθώς μπορούν να παρακολουθούν τις παραμέτρους ποιότητας του νερού στο διαδίκτυο χρησιμοποιώντας υπολογιστικό νέφος, οι τιμές των παραμέτρων ποιότητας νερού αποθηκεύονται σε ξεχωριστό διακομιστή ιστού στο cloud καθιστώντας δυνατό αυτές οι παράμετροι μπορούν να προβληθούν χρησιμοποιώντας μια ξεχωριστή διεύθυνση IP. Οι μετρήσεις και η παρακολούθηση γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από αρκετούς αισθητήρες παραμέτρων ποιότητας νερού (Vijayakumar & Ramya, 2015).

Σε αυτή την πρόταση οι ερευνητές έχουν υλοποιήσει μόνο την πειραματική διάταξη χωρίς πραγματικές εφαρμογές και χωρίς συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής. Έχουν διεξάγει διάφορες πειραματικές μετρήσεις και έχουν θέση σε λειτουργία σε πραγματικό

χρόνο την δυνατότητα καταγραφών μετρήσεων από τον κόμβο WSN, καθώς και της επεξεργασίας και προβολής των δεδομένων με την χρήση των δυνατοτήτων της πλατφόρμας υπολογιστικού νέφους που υλοποίησαν. Στον τομέα της ασφάλειας η αναφορά των ερευνητών είναι ότι χρησιμοποίησαν πρωτόκολλο UDP για την αποστολή των πληροφοριών, το οποίο δεν παρέχει τα μεγαλύτερα επίπεδα ασφάλειας στις δικτυακές επικοινωνίας. Σε ότι αφορά την παροχή ενέργειας του κόμβου δεν έχει γίνει καμία αναφορά από τους ερευνητές για την πηγή ενέργειας που χρησιμοποίησαν.

Στην έρευνα των Rani, Balakrishnan, Sundari και Ramya (Rani et al., 2019), προτείνεται μια λύση για τη δημιουργία μια λύσης για την παρακολούθηση της στάθμης μιας πηγής νερού από μια δυσπρόσιτη περιοχή σε μια λίμνη. Η πρόταση τους έχει στόχο την αξιοποίηση συσκευών IoT σε περιβάλλον cloud μέσω των ασύρματων κόμβων αισθητήρων (Rani et al., 2019). Για την επιλογή των αισθητήρων οι ερευνητές βασίστηκαν σε αντίστοιχες μελέτες όπου χρησιμοποιούν ως μετρήσιμες μονάδες φυσικοχημικές παραμέτρους όπως αλατότητα, διαλυμένο οξυγόνο (DO), θερμοκρασία, ενεργός οξύτητα (pH), ηλεκτρική αγωγιμότητα και ολοκληρωμένα διαλυμένα στερεά, ή αισθητήρες στάθμης νερού σε δεξαμενές υδραγωγείων τα οποία υδροδοτούν κατοικημένες περιοχές. Στις προτάσεις που ανέλυσαν οι ερευνητές χρησιμοποιήθηκαν γραφικά περιβάλλοντα προσβάσιμα μέσω φυλλομετρητή για τον έλεγχο και την εποπτεία των υδάτων που είχαν πρόθεση να εποπτεύσουν. Η τελική πρόταση των ερευνητών που κατέληξαν μετά από την έρευνα τους είναι ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων βασισμένο σε συσκευές IoT, τα δεδομένα που συλλέγονται καταλήγουν σε ένα σύστημα συλλογής δεδομένων και με την χρήση μιας Cloud πλατφόρμας είναι προσβάσιμα με οποιαδήποτε τερματική συσκευή εξοπλισμένη με φυλλομετρητή δημιουργώντας ένα σύγχρονο περιβάλλον διεπαφής για παρακολούθηση της στάθμης των υδάτων μιας λίμνης με στόχο τον έλεγχο της κατανάλωσης νερού (Rani et al., 2019).

Σημαντικό μειονέκτημα της παραπάνω ερευνητικής πρότασης είναι η ελλείψεις που παρουσιάζει η μελέτη για τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσκευών IoT, των τύπο αισθητήρων με τον οποίο θα είναι εξοπλισμένες οι συσκευές IoT για την συλλογή δεδομένων, την πηγή ενέργειας που θα τροφοδοτήσει τους κόμβους καθώς και την έλλειψη πληροφοριών πρωτοκόλλου και τοπολογίας δικτύωσης. Επίσης δεν παραθέτουν πληροφορίες για την περιοχή μελέτης στην οποία είχαν ως στόχο να εποπτεύσουν με το σύστημα WSN και τέλος τυχόν πληροφορίες από τα αποτελέσματα τους είτε σε

πειραματική διάταξη ή εξομοίωση, είτε από εφαρμογές και δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες (Rani et al., 2019).

4.1.3 Υλοποιημένες εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες

Στην έρευνα των Corke, Wark, Jurdak et al. (Corke et al., 2010) αναλύθηκαν οι κύριες εφαρμογές WSN οι οποίες δημιουργήθηκαν από την ομάδα των ερευνητών τα τελευταία έξι χρόνια πριν την δημοσίευση της έρευνας. Όλες οι εφαρμογές μοιράζονται ένα κοινό θέμα, την κατανόηση του φυσικού και γεωργικού περιβάλλοντος στις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η χώρα της Αυστραλίας. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν την παρακολούθηση του μικροκλίματος για τις γεωργικές καλλιέργειες, τα τροπικά δάση, την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού και την παρακολούθηση και τον έλεγχο κτηνοτροφικών μονάδων (Corke et al., 2010). Οι προτάσεις των ερευνητών που καλύπτονται στην δημοσίευση τους θα αναλυθούν και σε αυτό υπό κεφάλαιο άλλα και στα επόμενα καθώς υπάρχουν λύσεις για όλους το τομείς WSN εφαρμογών που αναλύονται στην παρούσα έρευνα.

Η εφαρμογή των Corke, Wark, Jurdak et al (Corke et al., 2010) στο πεδίο που αφορά της εφαρμογές WSN για χρήση σε εποπτεία λιμνών και υδάτων, είχε ως στόχος μετρηθεί το κατακόρυφο προφίλ θερμοκρασίας σε πολλά σημεία μιας λίμνης που καταλογίζετέ ως μια μεγάλη αποθήκη νερού που παρέχει το μεγαλύτερο μέρος του πόσιμου νερού για την πόλη του Μπρίσμπεϊν της Αυστραλίας. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ήταν μια σειρά ψηφιοποιημένης θερμοκρασίας σε βάθη από 1 έως 6 m και ανά διαστήματα ενός λεπτού, παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ανάμειξη νερού μέσα στη λίμνη που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της ανάπτυξης άλγης και φυκιών. Οι ασύρματες επικοινωνίες χαμηλής ισχύος πάνω από το νερό αποδείχθηκαν πρόκληση λόγω της πολλαπλής διαδρομής καθώς τα ραδιοκύματα που αντανακλώνται από την επιφάνεια του νερού επηρεάζουν καταστρεπτικά τα κύματα που ταξιδεύουν άμεσα και τον μη κατακόρυφο προσανατολισμό των κεραιών σε θυελλώδεις ή κυματιστές συνθήκες. Η διασύνδεση ενός ρομποτικού σκάφους στους κόμβους στατικών αισθητήρων ήταν μια ακόμα πρόκληση για τους ερευνητές. Συνοψίζοντας η λύση των ερευνητών που αποτελούνταν από πλωτούς κόμβους οι οποίοι ήταν εξοπλισμένοι με της IoT συσκευές και αισθητήρες Θερμοκρασίας από το βάθος της λίμνης καθώς και το ρομποτικό σκάφος το οποίο ήταν εξοπλισμένο εκτός τον αισθητήρων με GPS και ηλιακή παροχή ενέργειας. Το

ρομποτικό σκάφος χρησιμοποιείτε για την ευθυγράμμιση των πλωτών κόμβων και για τον υπολογισμό της απόστασης από κόμβο σε κόμβο για την καλύτερη αξιοποίηση των συλλεχθέντων δεδομένων (Corke et al., 2010).

Στην δημοσίευση των Kamaludin και Ismail, (Kamaludin & Ismail, 2017) προτείνετε μια εφαρμογή βασισμένη στο διαδίκτυο των πραγμάτων που ενσωματώνει την τεχνολογία αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων RFID σε μια πλατφόρμα WSN για την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού. Η προτεινόμενη ραδιοσυχνότητα για την επικοινωνία του δικτύου WSN που θα αναπτυχθεί σε περιοχή βλάστησης είναι 920 MHz. Τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι μέτρησης για την αξιολόγηση του νερού στο προτεινόμενο σύστημα είναι η ενεργός οξύτητα pH, με την χρήση ενός αναλογικού αισθητήρα pH καθώς και η θερμοκρασία περιβάλλοντος με έναν αναλογικό αισθητήρα θερμοκρασίας. Για την υλοποίηση της πειραματικής διάταξης και αξιολόγηση της απόδοσης των κόμβων και του δικτύου, οι ερευνητές εγκατέστησαν τους κόμβους IoT σε πραγματικό περιβάλλον στη μία λίμνη εντός της έκτασης της πανεπιστημιούπολης του πανεπιστημίου Sains Malaysia (USM) στην πολιτεία Πενάνγκ της Μαλαισίας (Kamaludin & Ismail, 2017).

Ως τεχνολογία δικτύωσης η αρχική πρόταση των ερευνητών ήταν η χρήση του πρωτόκολλο ZigBee. Κατά την διάρκεια της έρευνας και αφού λήφθηκαν υπόψιν ως παράγοντας η εξασθένηση του σήματος σε περιοχές πυκνής βλάστησης, επιλέχθηκε το κλειστού προτύπου πρωτόκολλο DigiMesh, που βασίζεται σε μια παραλλαγή του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4 για την δρομολόγηση των πακέτων και λειτουργεί στην συχνότητα των 920 MHz, έτσι ώστε σε περιοχές πυκνής βλάστησης να μπορεί να ξεπεράσει την εξασθένηση του σήματος. Η τοπολογία που εφαρμόστηκε για την αξιοποίηση του πρωτοκόλλου ήταν η τοπολογία πλέγματος. Οι αξιολογήσεις για το προτεινόμενο πρωτόκολλο έγιναν σε πραγματικό περιβάλλον για να διασφαλιστεί ότι η κύρια λειτουργικότητα στη διαδικασία μέτρησης του pH ακολουθεί τις απαιτήσεις σχεδιασμού. Διεξήχθησαν αρκετές πειραματικές αναλύσεις, συμπεριλαμβανομένης της ανάλυσης ενέργειας και της ανάλυσης εύρους ανάγνωσης επικοινωνίας για τη μελέτη της συνολικής απόδοσης του προτεινόμενου συστήματος. Για την τροφοδοσία των κόμβων χρησιμοποιήθηκαν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και αφού πάρθηκαν διάφορες μετρήσεις για την κατανάλωση ενέργειας την περίοδο που οι κόμβοι ήταν σε καταστάσεις λήψης, αποστολής, αδράνειας και sleep mode, κατέληξαν πως η σωστή αξιοποίηση της

κατάστασης sleep mode που υποστηρίζεται από την ασύρματη τεχνολογία που χρησιμοποιήσαν είναι ο πιο αποδοτικός τρόπος να πετύχουν την μέγιστη αυτονομία για τους κόμβους (Kamaludin & Ismail, 2017).

Ο κόμβος που χρησιμοποιήθηκε ως κεντρική πύλη ήταν δικτυωμένος ενσύρματα με την χρήση ethernet με το διαδίκτυο και τα δεδομένα αποθηκεύονται στο υπολογιστικό νέφος και είναι προσπελάσιμα στον τελικό χρήστη με την χρήση εφαρμογής για έξυπνά κινητά τηλέφωνα. Για την εκκίνηση της αποστολής των συλλεχθέντων δεδομένων και την χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος πυροδότησης γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού PHP (Kamaludin & Ismail, 2017).

4.2 Εφαρμογές WSN για χρήση στην γεωργία ακριβείας

Η πρόθεση της γεωργίας ακριβείας είναι να ταιριάζει τις γεωργικές πρακτικές με τις τοπικές συνθήκες μιας καλλιέργειας και να βελτιώσει την ακρίβεια των εφαρμογών τους. Η γεωργία ακριβείας οδηγεί συνεπώς στα ακόλουθα αποφασιστικά πλεονεκτήματα για τη γεωργία, το περιβάλλον και την ενεργειακή πτυχή, να βελτιώνει την απόδοση της καλλιέργειας, να παρέχει πληροφορίες για καλύτερες αποφάσεις διαχείρισης, να μειώνει το κόστος χημικών και λιπασμάτων μέσω πιο αποτελεσματικών εφαρμογών, να παρέχει πιο ακριβή παραγωγή δεδομένων γεωργικών εκμεταλλεύσεων, να αυξάνει το περιθώριο κέρδους και μειώνει τη ρύπανση. Όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 2.5.1.6 τα δίκτυα WSN έχουν αξιοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους για τον γεωργικό τομέα και την επίτευξη των παραπάνω πλεονεκτημάτων. Η πτυχή της διασφάλισης της ποιότητας και της ανατροφοδότησης στην διαδικασία παραγωγής με πληροφορίες και δεδομένα τα οποία έχουν εξαχθεί, επεξεργαστεί και αναλυθεί με στόχο την αξιοποίησή τους στην λήψη αποφάσεων για την γεωργική καλλιέργεια είναι ένα άλλο παράδειγμα του πώς μπορούν λύσεις WSN να βελτιώσουν τη γεωργική απόδοση.

Στην πραγματικότητα, οι καλλιέργειες επηρεάζονται αρνητικά από παράγοντες όπως ασθένειες φυτών, απειλές από λειψυδρία ή αυξημένη ατμοσφαιρική υγρασία η οποία σχετίζεται με την ανάπτυξη μικροοργανισμών, βακτηρίων και μυκήτων ή ακόμα και από εισβολείς ανθρώπων ή ζώων. Επίσης, η διαδικασία παραγωγής εξακολουθεί να ελέγχεται ανεπαρκώς, γεγονός που οδηγεί σε πιθανή απώλεια προϊόντων και παραγωγής. Για να ξεπεραστούν αυτές οι απειλές, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές και λύσεις αξιοποιώντας τεχνολογίες του διαδικτύου των πραγμάτων, όπως για παράδειγμα η χρήση

κόμβων παρακολούθησης βίντεο ή ανίχνευσης κίνησης με υπέρυθρες, για τον εντοπισμό και την αναγνώριση των εισβολέων καθώς και για την καλύτερη φροντίδα της διαδικασίας παραγωγής. Στην πραγματικότητα οι αγρότες χρησιμοποιούν ήδη τεχνικές καλλιέργειας ακριβείας χρησιμοποιώντας τις γνώσεις, τις δεξιότητες και την εμπειρία τους με την πάροδο του χρόνου για να βρουν τους καλύτερους τρόπους να κάνουν τα πράγματα με τα διαθέσιμα εργαλεία. Με την αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών και του WSN μπορούν να περιμένουν καλύτερα αποτελέσματα και περισσότερα οφέλη. Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν διάφορες σχετικές μελέτες οι οποίες προτείνουν εφαρμογές WSN και αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας στην έξυπνη γεωργία και συγκεκριμένα σε λύσεις πάνω στην γεωργία ακριβείας.

4.2.1 Εφαρμογές με έμφαση σε συστήματα συλλογής δεδομένων

Η έρευνα των Nunez, Fonthan και Quazada (Núñez et al., 2018) παρουσιάζει το σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός συστήματος έξυπνης γεωργίας που χρησιμοποιεί δίκτυα αισθητήρων ως βάση στη γεωργία ακριβείας για αγρότες καλλιέργειες ντομάτας στην Κολομβία με σκοπό τη παραγωγή δεδομένων και αξιοποίηση των γνώσεων και τον μετριασμό των επιπτώσεων της αλλαγής του εδάφους και του κλίματος στις καλλιέργειες ντομάτας. Επίσης έχει γίνει μια προσπάθεια για τον υπολογισμό των βέλτιστων ευρών τιμών για τα μετρηθέντα φυσικά μεγέθη με στόχο τη βελτίωση της παραγωγικότητας και την αποφυγή απωλειών λόγω μη ελεγχόμενων αγροκλιματικών μεταβλητών όπως η σχετική θερμοκρασία, η θερμοκρασία του εδάφους, η σχετική υγρασία, η υγρασία του εδάφους και η φωτεινότητα. Τέλος η έρευνα στοχεύει σε μια αρχιτεκτονική IoT για την αποθήκευση και ιχνηλασιμότητα των καλλιεργειών τομάτας στο υπολογιστικό νέφος.

Στόχος της έρευνας είναι η βελτίωση της παραγωγικότητας και της έγκαιρης ανίχνευσης ζιζανίων. Έχοντας ως βάση και αξιοποιώντας γνώση που έχει παραχθεί σε πολλές εφαρμογές στην υπάρχουσα βιβλιογραφία για εφαρμογές ερευνών που βασίζονται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων WSN με χρήση στην έξυπνη γεωργία. Στην ερευνά των συγγραφέων της δημοσίευσης καταλήγουν στην ανάγκη δημιουργίας λύσεων έξυπνης γεωργίας σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Ινδία, όπου τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία χρησιμοποιούν την τεχνολογία δικτύωσης ZigBee υποστηρίζουν λύσεις γεωργίας ακριβείας για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών όπως το κλίμα, η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία του εδάφους και η γονιμότητα του εδάφους, ή άλλων

παραγόντων που δεν έχουν να κάνουν με φυσικά μετρήσιμα μεγέθη όπως η ανίχνευση ζιζανίων, η παρακολούθηση της ανάπτυξης των καλλιεργειών, η εγκατάσταση αυτοματοποιημένης άρδευσης και η σωστή αποθήκευση των γεωργικών προϊόντων (Núñez et al., 2018).

Για την υλοποίηση της πρότασης των Nunez, Fonthan και Quazada οι ερευνητές υλοποίησαν την πρόταση τους με κυρία κριτήρια το χαμηλό κόστος, την εμβέλεια ανάμεσα στην κεντρική πύλη με τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή με μέγιστη απόσταση τα δυο χιλιόμετρα, την αξιοπιστία των μεταδόσεων, την δυνατότητα μέτρησης πολλών φυσικών μεγεθών, την συνδεσιμότητα των κόμβων μεταξύ τους και την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Για να πετύχουν την υλοποίηση της πιλοτικής διάταξης την οποία ολοκλήρωσαν εξόπλισαν τον κόμβο, ο οποίος ήταν μια IoT συσκευή βασισμένη στην πλατφόρμα Arduino Mega, η οποία είναι μια πλακέτα ανάπτυξης ανοικτού προτύπου, εξοπλισμένη με έναν μικροελεγκτή. Επιπλέον η IoT συσκευή εξοπλιστική με αισθητήρες υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους, ατμοσφαιρικής υγρασίας και θερμοκρασίας και φωτεινότητας. Για την δικτύωση των κόμβων μεταξύ τους χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης ZigBee σε τοπολογία πλέγματος, με κριτήρια την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας καθώς και την εμβέλεια η οποία ήταν μέσα στα επιτρεπτά όρια που είχαν θέσει στα κριτήρια οι ερευνητές. Για την δικτύωση του κόμβου που λειτουργούσε ως κεντρική πύλη Gateway με τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή χρησιμοποιήθηκε δίκτυο κυψέλης GPRS, η εκπομπή δεδομένων από την κεντρική πύλη στον εξυπηρετητή ήταν ανά 30 λεπτά για εξοικονόμηση ενέργειας άλλα και για χαμηλή διακίνηση δεδομένων. Αντί φυσικού υπολογιστή ως κεντρικό διακομιστή χρησιμοποιήθηκε τεχνολογία υπολογιστικού νέφους όπου λειτουργούσε ως σύστημα συλλογής δεδομένων εξοπλισμένο με μια σχεσιακή βάση δεδομένων. Τα δεδομένα είναι προσβάσιμα για τον τελικό χρήστη μέσω μια εφαρμογής για έξυπνες κινητές συσκευές γραμμένη σε γλώσσα Java. Για την τροφοδοσία του κόμβου χρησιμοποιήθηκαν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες συνδεδεμένες με ηλιακές κυψέλες (Núñez et al., 2018).

Κατά την πιλοτική εφαρμογή της πρότασης σε πραγματικές συνθήκες οι ερευνητές συλλέξανε περισσότερες από 10000 μετρήσεις και ανέπτυξαν διάφορα μαθηματικά και στατιστικά μοντέλα βάση της παραχθέντας πληροφορίας με στόχο την μελέτη της συμπεριφοράς των αγροκλιματικών μεταβλητών έναντι της παραγωγής. Σύμφωνα με τους συγγραφείς το παραχθέν έργο μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην αγροτική ανάπτυξη

και τις γεωργικές επιστήμες. Οι πληροφορίες που αναλύονται και ο συσχετισμός των δοκιμαστικών μεταβλητών έχουν μεγάλη σημασία για το μέλλον, ώστε να μπορέσουν να δοθούν απαντήσεις και λύσεις στην επίδραση της κλιματικής αλλαγής (Núñez et al., 2018).

Στην εργασία Rodríguez, Gualotuña, Grilo (Rodríguez et al., 2017) έχει υλοποιηθεί μια WSN εφαρμογή που επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων από γεωργικές καλλιέργειες, όπως θερμοκρασία, υγρασία και φωτεινότητα. Κάθε κόμβος WSN μπορεί να μεταδώσει δεδομένα παρακολούθησης στο υπολογιστικό νέφος. Για την υλοποίηση της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές εξόρυξης δεδομένων με σκοπό τον εντοπισμό μοτίβων συμπεριφοράς δεδομένων των περιβαλλοντικών συνθηκών που συλλέγονται από το δίκτυο αισθητήρων. Η ερευνητική διαδικασία αυτής της μελέτης υλοποιήθηκε ως μελέτη περίπτωσης εντός ενός θερμοκήπιου καλλιέργειας τριαντάφυλλων εντός της πανεπιστημιούπολης στο πανεπιστήμιο Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, στο Εκουαδόρ (Rodríguez et al., 2017).

Για την δικτύωση των κόμβων WSN οι ερευνητές αξιοποίησαν την ασύρματη τεχνολογία ZigBee. Ως τερματικοί κόμβοι WSN χρησιμοποιήθηκαν οι IoT συσκευές ανοιχτού κώδικα τύπου Arduino Mega και ως κεντρικός κόμβος Gateway μια συσκευή τύπου Raspberry Pi. Για την συλλογή των δεδομένων ο κόμβος gateway δρομολογούσε τα πακέτα δεδομένων σε ένα αποθετήριο Big Data καθώς και μια εφαρμογή εποπτείας, ανάλυσης με στόχο την κατάλληλη εφαρμογή αλγόριθμων για την πρόγνωση της συμπεριφοράς των φυτών. Το αποθετήριο Big Data λειτουργεί ως ένα σύγχρονο σύστημα συλλογής δεδομένων και χρησιμοποιεί ως βάση δεδομένων MongoDB (Rodríguez et al., 2017). Σε αντίθεση με της παραδοσιακές σχεσιακές βάσεις δεδομένων, η MongoDB είναι μια NoSQL βάση, η αποθήκευση των δεδομένων έχει την μορφή ενός αρχείου. Ένας ακόμα ορισμός που χρησιμοποιείτε για βάσης δεδομένων που χρησιμοποιούν αρχεία και δομών δεδομένων για την αποθήκευση των εγγραφών τους, όπως για παράδειγμα JSON, XML ή CSV, ονομάζονται document-oriented databases και έχουν μια πληθώρα εφαρμογών στο τομέα της επιστήμης των δεδομένων, των Big Data και της εξόρυξης δεδομένων data mining (Rodríguez et al., 2017).

Οι ερευνητές δεν έχουν παρουσιάσει πολλά στοιχεία από την έρευνά τους όσον αφορά την δικτυακή υποδομή και την υλικοτεχνική υποδομή, infrastructure, της πρότασης τους. Παρόλα αυτά η έρευνα παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς δίνει μεγάλη βαρύτητα στην ανάπτυξη ενός μηχανικού αλγόριθμού έξυπνης γεωργίας. Κατά την διάρκεια της

υλοποίησης της έρευνας συλλέχθηκαν περίπου 1250000 μετρήσεις και αναλύθηκαν με την εξομοίωση διαφόρων μελλοντικών σεναρίων βάση των μετρήσεων που πάρθηκαν. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εφαρμόστηκαν σε διάφορες περιπτώσεις μελέτης με στόχο την παραγωγή στατιστικών και προγνωστικών μοντέλων για την βελτιστοποίηση της παραγωγής και την εξοικονόμηση της κατανάλωσης νερού (Rodríguez et al., 2017).

Στο άρθρο των Guillermo, García-Cedeño, Rivas-Lalaleo, Huerta, Clotet, (Guillermo et al., 2019) προτείνεται ο σχεδιασμός μια εφαρμογής WSN χαμηλού κόστους επικεντρωμένη στην εφαρμογή της σε καλλιέργειες κακάο στις αγροτικές εκτάσεις του Εκουαδόρ. Σύμφωνα με τους ερευνητές η πρόταση τους μπορεί να εφαρμοστεί σε οπουδήποτε άλλη καλλιέργεια ανεξάρτητα ότι η οικονομοτεχνική μελέτη καθώς και ο σχεδιασμός της εφαρμογής έγινε λαμβάνοντας υπόψιν της καλλιέργειες κακάου του Εκουαδόρ. Η αρχιτεκτονική επιλέχθηκε με κριτήρια, ώστε να μπορεί να είναι εφικτό σε μικρούς και μεσαίους παραγωγούς γεωργικών προϊόντων να χρησιμοποιήσουν εφαρμογή. Οι κύριες λειτουργίες που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν είναι η παρακολούθηση και αποθήκευση πληροφοριών διαφόρων κλιματικών και εδαφικών μεγεθών που επηρεάζουν τη βέλτιστη ανάπτυξη και παραγωγή κακάου. Τα δεδομένα που συλλέγονται από το δίκτυο αισθητήρων μπορούν να απεικονιστούν μέσω διαδραστικών χαρτών, πινάκων και στατιστικών γραφημάτων στην τερματική εφαρμογή του χρήστη η οποία είναι διαθέσιμη είτε για έξυπνες κινητές εφαρμογές, είτε σε περιβάλλον διαδικτύου με την χρήση ενός σύγχρονου φυλλομετρητή. Επιπλέον, το σύστημα μπορεί να ειδοποιεί ή να εκπέμπει ειδοποιήσεις στον αγρότη μέσω email ή της γραφικής διεπαφής της εφαρμογής για ένα συγκεκριμένο περιστατικό που έχει συμβεί, προκειμένου να υποστηρίξει τη βέλτιστη και κατάλληλη λήψη αποφάσεων (Guillermo et al., 2019).

Για την υλικοτεχνική υποδομή της πρότασης των ερευνητών, ως πρωτόκολλο δικτύωσης επιλέχθηκε η τεχνολογία ZigBee για την διασύνδεση των κόμβων μεταξύ τους, και η τεχνολογία LoRaWAN για την δικτύωση των κόμβων WSN με την κεντρική πύλη gateway. Για την υλοποίηση των κόμβων χρησιμοποιήθηκαν IoT συσκευές ανοιχτού προτύπου τύπου Arduino UNO εξοπλισμένοι με κοινούς αισθητήρες υγρασίας εδάφους, θερμοκρασίας και υγρασίας ατμόσφαιρας, φωτεινότητας, ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ενεργούς οξύτητας pH. Για την υλοποίηση του κόμβου gateway χρησιμοποιήθηκε μια IoT συσκευή ανοιχτού προτύπου τύπου Raspberry Pi. Όλοι οι εξυπηρετητές που φιλοξενούν την βάση δεδομένων που λειτουργεί ως σύστημα συλλογής δεδομένων καθώς και τις

πλατφόρμες για τις εφαρμογές που αναπτύχθηκαν είναι στο υπολογιστικό νέφος ώστε να είναι διαθέσιμοι κάθε στιγμή από τους τελικούς χρήστες (Guillermo et al., 2019).

Μεγάλη έμφαση έχει δοθεί στην υλοποίηση της πλατφόρμας της εφαρμογής. Για την αποθήκευση των συλλεχθέντων δεδομένων χρησιμοποιήθηκε μια σχεσιακή βάση δεδομένων MySQL και η υλοποίηση της εφαρμογής έγινε με την χρήση της γλώσσας προγραμματισμού PHP. Για την ανάλυση και την επεξεργασία των συλλεχθέντων δεδομένων έχει γίνει εκτενή αναφορά στην διαδικασία data mining και στα οφείλει που μπορεί να υπάρξουν στις καλλιέργειες κακάο από την αξιοποίηση της εξόρυξης γνώσης από δεδομένα και την εφαρμογή τους στην διαδικασία λήψης αποφάσεων. Αναφέρονται τεχνικές επεξεργασίας πληροφοριών αποθηκευμένες σε δομές δεδομένων μορφής JSON, και στην συνέχεια την αξιοποίηση διαφόρων τεχνικών που χρησιμοποιούνται στην επιστήμη των δεδομένων για την ανάλυση μεγάλων δεδομένων Big Data. Τέλος έχει γίνει μια αναφορά στο κομμάτι της ασφάλειας των δεδομένων κατά την αποθήκευση και στην σημαντικότητα του ελέγχου πρόσβασης στην εφαρμογή για τον κάθε χρήστη για αποτροπή κακόβουλης χρήσης της εξορυχθείσας γνώσης. Οι πληροφορίες που λαμβάνονται είναι θεμελιώδεις για τη βιώσιμη διαχείριση των καλλιεργειών μέσω της σωστής διαχείρισης των πόρων, διευκολύνοντας τον ποιοτικό έλεγχο των προϊόντων και τη δημιουργία προληπτικών σχεδίων προστασίας από παράσιτα και ασθένειες (Guillermo et al., 2019).

Στην έρευνα των Khalifeh, AlQammaz, Darabkh Sha'ar και Ghatasheh (Khalifeh et al., 2021) εξετάζεται ένα πλαίσιο το οποίο χρησιμοποιεί ένα WSN δίκτυο εξοπλισμένο με διάφορους αισθητήρες γεωργικών μετρήσεων. Οι κόμβοι μεταξύ τους συνδέονται εσωτερικά μέσω του ασύρματου πρωτοκόλλου ZigBee, ενώ για την επικοινωνία του WSN με το υπόλοιπο μέρος του δικτύου που αποτελεί μέρος της προτεινόμενης εφαρμογής υλοποιείτε σύνδεση οπισθόζευξης, backhaul, με την χρήση πρωτοκόλλου LoRaWAN. Στο δίκτυο backhaul, οι κόμβοι αισθητήρων ελέγχονται πρώτα πριν από την πρόσβαση στους πόρους του δικτύου και, στη συνέχεια, τα δεδομένα των αισθητήρων αποθηκεύονται, υποβάλλονται σε επεξεργασία, αναλύονται και οι σχετικές με τη γεωργία αποφάσεις λαμβάνονται από ένα σύστημα γεωργικών εμπειρογνομώνων, το οποίο χρησιμοποιεί εφαρμογές ασαφούς λογικής, fuzzy logic, και αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης AI (Khalifeh et al., 2021).

Για την υλοποίηση της πρότασης WSN των ερευνητών χρησιμοποιήθηκαν κόμβοι IoT ανοιχτού κώδικα τύπου libelium waspmote. Η επιλογή των κόμβων έγινε με κριτήριο

την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας καθώς και την δυνατότητα να υποστηρίζουν διάφορης τύπους αισθητήρων για περιβαλλοντολογικές μετρήσεις, όπως θερμοκρασίας, υγρασίας, φωτεινότητας, υγρασίας εδάφους και άλλους διαθέσιμους τύπους αισθητήρων. Οι κόμβοι WSN χωρίστηκαν σε συμπλέγματα WSN, clusters. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, η ομαδοποίηση σε cluster είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική που μπορεί να ανταπεξέλθει αποτελεσματικά στη διατήρηση της ενέργειας των κόμβων και στη βελτίωση της απόδοσης επικοινωνίας. Σε κάθε cluster χρησιμοποιήθηκε ένας κόμβος ως κεφαλή του συμπλέγματος, cluster head που είναι υπεύθυνος για τη συλλογή των ανιχνευόμενων δεδομένων από τους κόμβους αισθητήρων και τη μετάδοσή του στον απομακρυσμένο διακομιστή για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία. Μέσα στο σύμπλεγμα, χρησιμοποιείται επικοινωνία μικρής εμβέλειας, επομένως επιλέχθηκε το πρότυπο ZigBee για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων στο κάθε cluster. Ωστόσο, για την αποστολή των δεδομένων στον απομακρυσμένο διακομιστή, η χρήση της τεχνολογίας LoRaWAN θεωρήθηκε κατάλληλη. Επομένως, ο κόμβος cluster head είναι εξοπλισμένος με δύο modules επικοινωνίας, μία για την επικοινωνία εντός του συμπλέγματος που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο ZigBee, και μια για τη σύνδεση επικοινωνίας του κάθε συμπλέγματος με το διακομιστή που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο LoRaWAN (Khalifeh et al., 2021).

Το δίκτυο backhaul είναι ο κύριος κορμός του συστήματος όπου συλλέγονται, αποθηκεύονται, υποβάλλονται σε επεξεργασία, αναλύονται δεδομένα και λειτουργεί ως ένα προηγμένο σύστημα λήψης αποφάσεων τεχνίτης νοημοσύνης. Αποτελείται από τρία κύρια μέρη, την πύλη LoRaWAN και δυο διακομιστές, ένα ελέγχου ταυτότητας και έναν τερματικό εξυπηρετητή όπου υλοποιείτε η εφαρμογή τεχνίτης νοημοσύνης AI. Η πύλη LoRaWAN είναι το κύριο σημείο εισόδου από την πλευρά του WSN, κάθε κόμβος cluster head επικοινωνεί με την πύλη gateway σε ένα αποκλειστικό κανάλι επικοινωνίας. Η πύλη μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλά κανάλια για επικοινωνία με όλους τους κόμβους cluster head. Για να υπάρχει ένα ασφαλές σύστημα, χρησιμοποιείται ένας διακομιστής ελέγχου ταυτότητας όπου επιτρέπονται μόνο οι εξουσιοδοτημένοι κόμβοι αισθητήρων για σύνδεση με την πύλη LoRaWAN και το σύστημα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας διάφορα σχήματα ελέγχου ταυτότητας, όπως η χρήση δημόσιου κλειδιού και ο έλεγχος ταυτότητας (Khalifeh et al., 2021).

Το τρίτο μέρος του δικτύου backhaul είναι το σύστημα λήψης αποφάσεων όπου εκτελείτε ο αλγόριθμος AI-ML και η εφαρμογή ασαφούς λογικής Fuzzy Logic, όπου τα δεδομένα αναλύονται και το σύστημα εξάγει διάφορες αποφάσεις σχετικές με τη γεωργία και συμπεράσματα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βελτίωση της γεωργικής διαδικασίας και διατήρηση των φυσικών πόρων. Τέλος να σημειωθεί ότι τόσο ο διακομιστής ελέγχου ταυτότητας όσο και το σύστημα λήψης αποφάσεων προτείνετε να υλοποιηθούν με την χρήση του υπολογιστικού νέφους cloud, εκμεταλλευόμενοι έτσι τις δυνατότητες του cloud και μειώνοντας το κόστος αγοράς των διακομιστών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τους ρυθμούς μετάδοσης και την απόδοση του LoRaWAN ως πρωτόκολλο για την μετάδοση μετρήσεων από κόμβους WSN που λήφθηκαν από την πειραματική υλοποίηση της πρότασης συγκρίθηκαν με τους θεωρητικούς ρυθμούς μετάδοσης και οι ερευνητές εξήγαγαν ένα αποτέλεσμα σχετικά με την καταλληλότητα του πρωτοκόλλου για την εφαρμογή του σε λύσης WSN στην γεωργία ακριβείας (Khalifeh et al., 2021).

4.2.2 Εφαρμογές με έμφαση στην ασφάλεια των επικοινωνιών IoT

Η δημοσίευση των Haseeb, Din, Almogren και Islam (Haseeb et al., 2020) στοχεύει στην ανάλυση της ασφάλειας των επικοινωνιών ενός WSN για τη συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον και τη μεταφορά των δεδομένων σε απομακρυσμένους κόμβους gateway που λειτουργούν ως σταθμοί βάσης για χρήση στην λήψη ασφαλών αποφάσεων. Το σενάριο το οποίο αναλύθηκε ως προς την ασφάλεια του, οι κόμβοι WSN είναι χωρισμένοι σε συμπλέγματα αισθητήρων cluster και διασκορπισμένοι στη καλλιεργήσιμη έκταση για την εξαγωγή διαφόρων πληροφοριών που σχετίζονται με τη σύνθεση του εδάφους, όπως υγρασία, θερμοκρασία, επίπεδα υγρασίας και ανιχνευτές στάθμης νερού. Αυτές οι πληροφορίες μεταδίδονται με ασφάλεια στους κόμβους που χρησιμοποιούνται ως sink node, οι οποίοι λειτουργούν ως αποθηκευτικοί χώροι μνήμης για την προώθηση δεδομένων προς τον σταθμό βάσης. Με την ασφαλή λήψη δεδομένων από το σταθμό βάσης, ο εξυπηρετητής μπορεί να παρέχει ενημερωμένες πληροφορίες στους χρήστες και να λειτουργήσει ως ένα αποτελεσματικό σύστημα εξόρυξης δεδομένων και λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Το προτεινόμενο πλαίσιο προσφέρει μια ενεργειακή και αξιόπιστη διαδρομή για την αυτοματοποίηση των γεωργικών παραγωγών με το ελάχιστο βάρος των γεωργών. Τα δεδομένα παρατήρησης των γεωργικών αισθητήρων

κατευθύνονται προς το σταθμό βάσης έξυπνα και με ασφάλεια, γεγονός που βελτιώνει την παρακολούθηση και την παραγωγικότητα της γεωργικής γης (Haseeb et al., 2020).

Για την υλοποίηση της πρότασης των ερευνητών δεν έχουν παρθεί υπόψιν κριτήρια όπως η ασύρματη τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί ή η τεχνολογία IoT των WSN κόμβων. Καθώς επίσης δεν υπάρχει κάποια αναφορά για την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων που θα φτάσουν στον τελικό χρήστη για την συμμετοχή τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Το σημαντικότερο μέρος της έρευνας είναι η ανάπτυξη ενός κρυπτογραφικού αλγόριθμου ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ όλων των συσκευών που συμμετέχουν στην επικοινωνία της λύσης WSN που έχει χρησιμοποιηθεί ως σενάριο αναφοράς. Από τον τερματικό κόμβο αισθητήρων που είναι υπεύθυνος για της μετρήσεις, τον κόμβο Sink Node που λειτουργεί ως κεφαλή του WSN cluster, μέχρι τον σταθμό βάσης και τον τερματικό χρήστη. Στο προτεινόμενο πλαίσιο, ο κάθε σταθμός βάσης δημιουργεί μυστικά κλειδιά χρησιμοποιώντας την επανάληψη μιας γραμμικής εξίσωσης που έχουν σχεδιάσει οι ερευνητές. Αντίστοιχα όλοι οι τερματικοί κόμβοι αισθητήρων είναι εφοδιασμένοι με το μυστικό κλειδί. Ο κάθε τερματικός κόμβος στέλνει τα πακέτα του προς τον κόμβων sink node, κρυπτογραφημένα με το αποτέλεσμα μιας άλλης εξίσωσης χρησιμοποιώντας το μυστικό κλειδί του σταθμού βάσης, τα πακέτα αποκρυπτογραφούνται με το κλειδί της δεύτερης εξίσωσης και αποστέλλονται στον σταθμό βάσης όπου αποκρυπτογραφούνται με την χρήση της δεύτερης εξίσωσης (Haseeb et al., 2020).

Οι ερευνητές διεξήγαγαν πειράματα με εξομοίωση χρησιμοποιώντας έναν μεγάλο αριθμό κόμβων WSN σε διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις, με σημείο αναφοράς μια αγροτική καλλιέργεια μεγάλης έκτασης. Επίσης θεωρήθηκε πως υπάρχει ετερογένεια μεταξύ των κόμβων και δεν υπάρχει ομοιομορφία στα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων. Τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων συγκρίθηκαν με άλλες προτεινόμενες λύσης κρυπτογραφίας στα WSN δίκτυα με κριτήρια την απώλεια πακέτων, την αξιοπιστία των μεταδόσεων, και την κατανάλωση ενέργειας κατά την αποστολή κρυπτογραφημένων πακέτων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάστηκαν στην δημοσίευση των ερευνητών. Σύμφωνα με τους ερευνητές και τα προσομοιωμένα πειράματα για το προτεινόμενο πλαίσιο, έδειξαν ότι τα αποτελέσματα ήταν υψηλά σε σύγκριση με υπάρχουσες λύσεις που βασίζονται σε διαφορετικές παραμέτρους δικτύου (Haseeb et al., 2020).

4.2.3 Εφαρμογές με έμφαση την παρακολούθηση μεγάλων εκτάσεων

Στην εργασία των Vo, Nguyen και Vo (Vo et al., 2013) παρουσιάζεται ένα πλαίσιο για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων WSN που έχει σχεδιαστεί για να παρατηρεί τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε αγροτικές καλλιέργειες. Αξίζει να αναφερθεί ότι η έρευνα υλοποιήθηκε στα πλαίσια ενός προγράμματος του Εθνικού Πανεπιστημίου του Βιετνάμ (Vietnam National University – HCMC) με θέμα τα εκτεταμένα δίκτυα WSN για εφαρμογές παρακολούθησης της αλλαγής του κλίματος (Ubiquitous WSN for Climate Change Monitoring Applications project). Στην έρευνα προτείνεται μια αρχιτεκτονική συστήματος για ένα εκτεταμένο δίκτυο WSN για αυτόματη και συνεχή παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο με εφαρμογές κυρίως στη γεωργία σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως το Βιετνάμ με στόχο την βελτίωση της λήψης αποφάσεων για τη γεωργία και να εφαρμοστούν στρατηγικές αντιμετώπισης των απειλών από την κλιματική αλλαγή χρησιμοποιώντας κόμβους αισθητήρων όπου ένας κόμβος μπορεί να λάβει πολλές κλιματολογικές παραμέτρους από ένα συγκεκριμένο πεδίο σε πραγματικό χρόνο (Vo et al., 2013).

Το πρωτότυπο σύστημα των ερευνητών, που έχει σχεδιαστεί και υλοποιηθεί, περιλαμβάνει δύο σταθμούς βάσης και αρκετούς κόμβους αισθητήρων που τροφοδοτούνται από ηλιακές κυψέλες. Οι κλιματικές παράμετροι από τους κόμβους αισθητήρων αποστέλλονται μέσω του δικτύου WSN στο σταθμό βάσης, ενώ ο σταθμός βάσης επικοινωνεί με τον απομακρυσμένο κεντρικό διακομιστή δεδομένων μέσω του δικτύου GPRS. Οι λόγοι οι οποίοι οδήγησαν στην επιλογή του δικτύου GPRS είναι ότι τα δίκτυα WSN είναι συνήθως τοπικά δίκτυα, καθιστώντας δύσκολη την παρακολούθηση περιοχών όπου βρίσκονται πολύ μακριά από τον κεντρικό διακομιστή δεδομένων. Έτσι οι ερευνητές καταλήγουν πως συνδυάζοντας το δίκτυο GPRS με την υποδομή WSN, το πρόβλημα της διαχείρισης του δικτύου μπορεί να επιλυθεί έτσι ώστε η παρακολούθηση της αλλαγής του κλίματος να μπορεί να γίνει οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Κατά συνέπεια, η καλύτερη λύση για την παρακολούθηση της κλιματικής αλλαγής θα επιτευχθεί με την ενσωμάτωση του WSN στο δίκτυο GPRS χρησιμοποιώντας μια πύλη, η οποία προσφέρει ένα πιο πλήρες σύνολο μετρήσεων καθώς και τηλεπικοινωνίες για απομακρυσμένη πρόσβαση. Η κατανομή των κόμβων έχει χωριστεί σε επιμέρους συμπλέγματα αισθητήρων (sensing clusters) κατά μήκος της περιοχής μελέτης όπου οι τοποθετήσεις των κόμβων έχουν γίνει με αποστάσεις μεταξύ τους από 200 μέτρα έως δυο

χιλιόμετρα. Κάθε cluster έχει έναν κεντρικό κόμβο με διαφόρους κόμβους αισθητήρων και ο κεντρικός κόμβος επικοινωνεί με έναν απομακρυσμένο κεντρικό διακομιστή δεδομένων. Τέλος όσον αφορά την δικτύωση των κόμβων, και καθώς σε πολλές εκτάσεις οι οποίες είναι στην περιοχή μελέτη ίσως να μην υπάρχει κάλυψη δικτύου GPRS, οι κόμβοι έχουν εξοπλιστεί με παραδοσιακούς RF πομποδέκτες, αξιοποιώντας δυο ασύρματες τεχνολογίες δικτύωσης, στο κάθε cluster η επικοινωνία του κεντρικού κόμβου, που θα έχει τον ρόλο του δρομολογητή, με τους κόμβους αισθητήρων θα γίνεται με RF επικοινωνία, και η επικοινωνία του κεντρικού κόμβου με τον κεντρικό διακομιστή με GPRS (Vo et al., 2013).

Οι κόμβοι είναι χωρισμένοι σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία, οι τερματικοί κόμβοι, είναι βασισμένοι σε έναν απλό μικροελεγκτή τύπου intel 8051, για την ασύρματη επικοινωνία τους χρησιμοποιούν έναν RF πομποδέκτη στα 433 MHz για την επικοινωνία τους με τον κεντρικό κόμβο του κάθε cluster κι είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας ανέμου, κατεύθυνσης ανέμου, βροχόμετρο, θερμοκρασίας υγρασίας, στάθμης νερού και ενεργούς οξύτητας (pH). Για την τροφοδοσία των ασύρματων κόμβων χρησιμοποιούνται επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και ηλιακούς συλλέκτες. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι η μέγιστη διάρκεια συνεχής λειτουργίας με πλήρως φορτισμένες μπαταρίες είναι μέγιστο πέντε ημέρες, λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας από τον RF πομποδέκτη. Για να μπορέσει να ξεπεραστεί αυτό το μειονέκτημα, οι ερευνητές έχουν προγραμματίσει τους κόμβους να ενεργοποιούν τον RF transceiver για 90 δευτερόλεπτα κάθε 15 λεπτά και να αποστέλλει τα μετρηθέντα δεδομένα. Η δεύτερη κατηγορία κόμβων, είναι οι κεντρικοί κόμβοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται και ως δρομολογητές. Οι αισθητήρες και η τροφοδοσία των κόμβων παραμένουν ίδια όπως και στους τερματικούς κόμβους. Η κύρια διαφορά είναι πως οι κεντρικοί κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με ένα 3G/GPRS module καθώς και με έναν ADC (Analog-to-Digital Converter) και αποθηκεύει τα δεδομένα προς μετάδοση προσωρινά σε έναν data logger (Vo et al., 2013). Οι ερευνητές έχουν υλοποιήσει την πειραματική διάταξη ενός μόνο cluster αξιοποιώντας ένα απλό πρωτόκολλο δικτύου RF χαμηλής ισχύος, που ονομάζεται SimpliCI, χωρίς εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες. Επίσης δεν έχουν κάνει αναφορά ότι αφορά την ασφάλεια των επικοινωνιών ανάμεσα στους κόμβους (Vo et al., 2013).

Στο έργο των Nurellari και Srivastava (Nurellari & Srivastava, 2018) εξετάστηκε ο σχεδιασμός ενός ενεργειακά αποδοτικού WSN που αναπτύσσεται πρακτικά σε μεγάλες αγροτικές εκτάσεις. Οι κόμβοι αισθητήρων είναι επιφορτισμένοι με την παρακολούθηση

μιας μεγάλης περιοχής ενδιαφέροντος, όπως μια καλλιεργήσιμη αγροτική έκταση, και την αναφορά των στατιστικών δοκιμών τους στο κέντρο λήψης αποφάσεων μέσω ενός ασύρματου καναλιού, στο οποίο υπάρχει εξασθένιση του σήματος λόγω εμβέλειας. Στόχος ήταν να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του WSN και να ενεργοποιηθεί η επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας με ελάχιστη ισχύ μετάδοσης (Nurellari & Srivastava, 2018)

Για τον σχεδιασμό της εφαρμογής WSN αξιοποιήθηκε το πρωτόκολλο επικοινωνίας ευρείας περιοχής LoRaWAN. Κάθε ένας από τους κόμβους αισθητήρων έχει σχεδιαστεί και ενεργοποιηθεί με αρκετούς αισθητήρες τελευταίας τεχνολογίας, προκειμένου να εκτιμηθούν διαφορετικές παράμετροι ενδιαφέροντος, όπως για παράδειγμα υγρασία εδάφους, θερμοκρασία εδάφους, αλατότητα σε διαφορετικό βάθος εδάφους, βαρομετρική πίεση, υγρασία περιβάλλοντος, υγρασία φύλλων, και τα άλλες πιθανές περιβαντολλογικές μετρήσεις. Το βασικό χαρακτηριστικό της προτεινόμενης λύσης είναι ότι οι κόμβοι μαθαίνουν και προσαρμόζονται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό είναι πολύ σημαντικό κριτήριο για την επιμήκυνση της διάρκειας λειτουργίας του WSN (Nurellari & Srivastava, 2018).

Το προτεινόμενο σύστημα επικυρώθηκε μέσω πειραμάτων σε πραγματικές συνθήκες χρησιμοποιώντας εννέα ομοιογενείς κόμβους για λήψη βασικών μετρήσεων σε έκταση 90 στρεμμάτων. Οι κόμβοι σχεδιάστηκαν με την δυνατότητα συλλογής ενέργειας με την χρήση ηλιακών κυψελών και ήταν εξοπλισμένοι με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Για την φυσική προστασία των κόμβων, τοποθετήθηκαν σε στεγανά κυτία για την προστασία από την υγρασία και τον κίνδυνο βραχυκυκλώματος, καθώς και ορισμένοι από τους κόμβους που ήταν σε σημεία όπου μπορεί να υπήρχαν επισκέψεις από κτηνοτροφικά ζώα τοποθετήθηκαν εντός μικρής φυσικής περιφράξης. Επίσης εξοπλίστηκαν με κάρτες μνήμες για την χρήση τους ως data logger με δυνατότητα να αποθηκεύσουν έως περίπου 70 εκατομμύρια μετρήσεις από το φυσικό περιβάλλον. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας, LoRaWAN, επιλέχθηκε με κριτήριο να μπορεί να λειτουργήσει αποδοτικά με στόχο την επέκταση της διάρκειας ζωής της εφαρμογής WSN και την αποδοτική μετάδοση δεδομένων στο κανάλι επικοινωνίας από τους κόμβους WSN προς τον σταθμό βάσης. Το σενάριο του πειράματος ήταν να ελεγχθεί η απόδοση του δικτύου ως προς την ενέργεια του και την αξιοπιστία των μεταδόσεων στην μέγιστη δυνατή απόσταση που μπορεί να υποστηρίξει το πρωτόκολλο. Επίσης τα μεταδιδόμενα πακέτα περιείχαν πληροφορίες από μετρήσεις περιβάλλοντος από έως οκτώ διαφορετικού τύπου αισθητήρων χαμηλής

κατανάλωσης. Ο σκοπός του σεναρίου ήταν να δοκιμαστεί τόσο το κανάλι επικοινωνίας με μεταδιδόμενα πακέτα σημαντικού όγκου για της δυνατότητες μιας IoT συσκευής, καθώς και την συμπεριφορά του κόμβου με την τροφοδότηση ενέργειας τόσο του μικροελεγκτή, όσο και τον αισθητήρων (Nurellari & Srivastava, 2018).

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο WSN μπορεί να ανταπεξέλθει και να παρακολουθήσει αποτελεσματικά μια μεγάλη γεωργική έκταση με ελάχιστο αριθμό κόμβων αισθητήρων και σημαντικά μειωμένη ισχύ μετάδοσης και συνεπώς παρατεταμένη διάρκεια ζωής στην εφαρμογή WSN (Nurellari & Srivastava, 2018).

Στην έρευνα των Silva, Mendes, Silva, dos Santos, Mestre, Serôdio και Morais (Silva et al., 2019) αξιοποιείται η τεχνολογία LoRa και το πρωτόκολλο LoRaWAN, και δοκιμάζονται σε ένα σενάριο γεωργίας ακριβείας, και συγκεκριμένα αμπελοκομίας ακριβείας, χρησιμοποιώντας συσκευές συλλογής δεδομένων χαμηλής ισχύος που έχουν αναπτυχθεί σε έναν αμπελώνα εντός της πανεπιστημιούπολη του πανεπιστημίου Trás-os-Montes και Alto Douro (UTAD) που βρίσκεται στη πόλη Vila Real της Πορτογαλίας. Ο Αμπελώνας βρίσκεται σε απόσταση 400 μέτρων από τον πλησιέστερο κόμβο gateway. Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι να αξιολογήσει την ενσωμάτωση δεδομένων από μετρήσεις αισθητήρων στο περιβάλλον mySense, μια εμπορική Cloud πλατφόρμα που στοχεύει στη συστηματοποίηση των διαδικασιών απόκτησης δεδομένων από αισθητήρες για την αντιμετώπιση κυρίως εφαρμογών υγείας, άλλα και άλλων κοινών ζητημάτων, ανάμεσα τους και εφαρμογής γεωργίας ακριβείας (Silva et al., 2019).

Για την υλοποίησή της υλικοτεχνικής υποδομής της εφαρμογής WSN χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία LoRa. Ως κόμβοι WSN χρησιμοποιήθηκαν IoT συσκευές τύπου SPWAS'18 (Solar Powered Wireless Acquisition Station) οι οποίου μπορούν να υποστηρίξουν διάφορα πρωτόκολλα επικοινωνίας, ανάμεσα τους το LoRaWAN και το ZigBee και να συνδεθούν με έως οκτώ ασύρματους αισθητήρες διαφόρων τύπων, όπως υγρασίας, θερμοκρασίας ή ηλιακής ακτινοβολίας. Για της ανάγκες της έρευνας τοποθετήθηκαν δυο κόμβοι, ο ένας χρησιμοποιήθηκε ως κόμβος αισθητήρα για λήψη μετρήσεων και ο δεύτερος ως κόμβος gateway για την μετάδοση των ληφθέντων μετρήσεων στην cloud πλατφόρμα. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αποθηκεύτηκαν με την μορφή δομής δεδομένων τύπου JSON. Η επικοινωνία με την cloud πλατφόρμα mySense έγινε με την χρήση HTTP πρωτόκολλου και υπηρεσιών REST API. Ένας σημαντικός

περιορισμός στην υλοποίηση αυτής της πρότασης ήταν οι δυνατότητες αποστολής πακέτων του LoRaWAN με σημαντικό περιορισμό στον όγκο των δεδομένων που μπορούν να αποσταλθούν και όριο τα 242 bytes δεδομένων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα σε περιπτώσεις που ο κόμβος έχει πολλούς αισθητήρες να πρέπει να γίνουν διάφοροι περιορισμοί και να εφαρμοστούν κάποιοι έλεγχοι στον μικροελεγκτή του κόμβου για την αποστολή μικρότερων πακέτων ή την εφαρμογή ενός αλγόριθμου έτσι ώστε να αποστέλλει μετρήσεις από έναν αισθητήρα κάθε φορά (Silva et al., 2019).

Κατά την λήψη των πειραματικών μετρήσεων, οι ερευνητές δοκίμασαν τον κόμβο σε διάφορα σημεία στις εκτάσεις εντός της πανεπιστημιούπολης και τα αποτελέσματα από τον έλεγχο του εύρους και της ακεραιότητάς των μεταδιδόμενων πακέτων ήταν ότι τα δεδομένα μπορούσαν να αποσταλθούν με επιτυχία και αμετάβλητα σε αγροτικές εκτάσεις όπου δεν υπήρχαν κτήρια ή άλλα εμπόδια ανάμεσα στον τερματικό κόμβο και στον κόμβο gateway με απόσταση έως 2400 μέτρα μεταξύ των κόμβων. Σε περιπτώσεις όπου υπήρχαν κτήρια ή δέντρα μπορεί να υπήρχε και απώλεια πακέτων έως 100%, ακόμα και σε μικρές αποστάσεις των 230 μέτρα. Σχετικά με την cloud πλατφόρμα mySense, οι ερευνητές κατέστησαν δυνατό την αποστολή πακέτων με μετρήσεις από θερμοκρασία και υγρασία στην πλατφόρμα, καθώς και την επεξεργασία τους από τους προσφερόμενους αλγόριθμους για λύσεις στην γεωργία και στην αμπελουργία ακριβείας και την συμμετοχή των δεδομένων στην διαδικασία λήψης αποφάσεων (Silva et al., 2019).

4.3 Εφαρμογές WSN για εποπτεία και έλεγχο συστημάτων άρδευσης

Η παραδοσιακή άρδευση των καλλιεργειών είναι συνήθως επανδρωμένη και χρειάζεται τεράστιο ανθρώπινο δυναμικό και υλικούς πόρους, γεγονός που οδήγησε σε ανεπάρκεια σε πραγματικό χρόνο και ακρίβεια και αντιβαίνει στην αναπτυξιακή τάση της μακροχρόνιας γεωργικής παραγωγής και της αειφόρου χρήσης των υδάτινων πόρων. Εξετάζοντας τον σχετικό ερευνητικό έργο στην προηγούμενη ενότητα καταλήγουμε πως τα WSN χρησιμοποιείται εκτενώς στη γεωργία ακριβείας, συνεπώς οι χρήσεις των δικτύων WSN δεν θα μπορούσαν να εκλείψουν από την εφαρμογή τους για την έξυπνη άρδευση για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων.

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις ελέγχου και παρακολούθησης που συμβάλλουν στη συλλογή δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων αυτόνομων κινητών συστημάτων και ενσωματωμένων, δικτυωμένων συστημάτων. Τα δίκτυα αισθητήρων παίζουν τον κύριο

ρόλο σε αυτήν την προσέγγιση. Για τη μεγιστοποίηση της ποσότητας, της ποικιλομορφίας και της ακρίβειας των πληροφοριών που εξάγονται από την ανάπτυξη WSN, απαιτείται μια ποικιλία αξιόπιστων, υψηλής απόδοσης και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών αισθητήρων. Πολλές παράμετροι μπορούν να ελεγχθούν όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η υγρασία του εδάφους, τα φυτοφάρμακα και πολλές άλλες. Ωστόσο, η γεωργία είναι ένα τεράστιο πεδίο εφαρμογής και μπορεί να χωριστεί σε πολλούς τομείς εμπειρογνωμοσύνης. Στο σημείο αυτό θα εξεταστεί το σχετικό ερευνητικό έργο που έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια εφαρμογών WSN έξυπνης γεωργίας συγκεκριμένα για τον έλεγχο και εποπτεία αρδευτικών συστημάτων. Μπορεί να φαίνεται εύκολο να γίνει, αλλά η απώλεια νερού από αυτά τα συστήματα μπορεί να είναι έως και 50% λόγω του κύκλου εξάτμισης. Τις ζεστές και ηλιόλουστες μέρες, η μερίδα του νερού δεν μπορεί ποτέ να φτάσει στο έδαφος (Khrjji et al., 2014). Επομένως, ένα αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης θα πρέπει να μπορεί να ανιχνεύει όταν τα φυτά χρειάζονται νερό ή άλλες λύσεις για την εξοικονόμηση, καθώς και την σωστή διαχείριση του νερού ανάλογα με την εκάστοτε περιοχή μελέτης.

Στην πρόταση των Bennis, Fouchal, Zytoune, και Aboutajdine (Bennis et al., 2017). Έχει επιλεγεί η στρατηγική στάγδην για την πειραματική μελέτη τους. Το προτεινόμενο μοντέλο είναι ένα μοντέλο κλειστού βρόχου, καθώς σύμφωνα με την έρευνα τους ένα σύστημα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως μοντέλο κλειστού βρόχου εάν η απόκριση του συστήματος παρακολουθείται και χρησιμοποιείται ως ανατροφοδότηση για τη ρύθμιση και τον έλεγχο του. Στόχος των ερευνητών είναι η δημιουργία ενός μοντέλου για ένα σύστημα άρδευσης με συγκεκριμένες απαιτήσεις. Η μεταβλητότητα με τον οποίο ορίζονται οι απαιτήσεις προέρχεται από τον τύπο του εδάφους, τον τύπο καλλιέργειας και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Ο κύριος σκοπός του σχεδιασμού ήταν να χειριστούν τη δυσλειτουργική κατάσταση της εγκατάστασης στάγδην θεραπεύοντας αρνητικές επιπτώσεις όπως για παράδειγμα εισβολές ανθρώπων ή ζώων. Τα προβλήματα τα οποία κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν ήταν σπασμένες σωλήνες από τους δασοφύλακες που κατά λάθος που μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στα αποθέματα νερού και στα φυτά. Επίσης οι σταλάκτες των σωλήνων που μπορεί να μπλοκάρουν λόγω φυσικών αιτιών όπως λάσπη ή άμμος και μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση των φυτών. Για να ξεπεραστούν αυτές οι ελλείψεις, πρέπει να παρακολουθείται ο ρυθμός ροής του νερού στην εγκατάσταση στάγδην. Για το σκοπό αυτό, το προτεινόμενο σύστημά των ερευνητών περιλαμβάνει τους

ακόλουθους αισθητήρες και ενεργοποιητές, αισθητήρας υγρασίας εδάφους ο οποίος χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση της άρδευσης και για την προειδοποίηση της καταπόνησης των φυτών ελέγχοντας ορισμένες παραμέτρους, όπως η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους ή η υπόγεια ογκομετρική περιεκτικότητα σε νερό. Η μέτρηση της υγρασίας του εδάφους μπορεί να βοηθήσει τους αγρότες να διαχειριστούν τα αρδευτικά τους συστήματα πιο αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας λιγότερο νερό για να καλλιεργήσουν μια καλλιέργεια και αυξάνοντας την ποιότητα και τις αποδόσεις. Αισθητήρας θερμοκρασίας, ο οποίος χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Μπορεί να είναι αναλογικό ή ψηφιακό και να βοηθήσει τον αγρότη να προσαρμόσει το πρόγραμμα άρδευσης σύμφωνα με τη θερμοκρασία που μετράτε για να αποφευχθεί ο κίνδυνος εξάτμισης. αισθητήρας πίεσης, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της πίεσης των αερίων ή των υγρών και τη μετατροπή του σε ποσότητα που μπορεί να υποστεί ηλεκτρονική επεξεργασία. Παράγει σήμα ως συνάρτηση της επιβληθείσας πίεσης (Bennis et al., 2017).

Σε εφαρμογές άρδευσης, αυτό το είδος αισθητήρων βοηθά στην παρακολούθηση της ανώμαλης πίεσης της εγκατάστασης σωλήνων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μέσω της μονάδας επικοινωνίας, ZigBee ή 802.15.4, ένα μήνυμα μπορεί να μεταδοθεί στην αντίστοιχη ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, η οποία ελέγχει τον κεντρικό αγωγό του συστήματος άρδευσης, για να κλείσει το σύστημα. Μια πολύ χαμηλή τιμή πίεσης μπορεί να είναι συνώνυμη ενός σπασμένου σωλήνα ή της αποτυχίας ανοίγματος βαλβίδων. Έχοντας μια τιμή υψηλής πίεσης μπορεί να δείξει ότι μια βαλβίδα δεν έχει κλείσει σωστά ή ότι μερικοί σταλάκτες μπλοκάρονται. Η χρήση μιας σωληνοειδής βαλβίδας η οποία είναι μια ηλεκτρομηχανική βάνα, σε συνδυασμό με μια μονάδα ZigBee, έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί να ελεγχθεί μέσω ασύρματης επικοινωνίας και να χρησιμοποιηθεί σε υγρά ή αέρια, ώστε με την χρήση ηλεκτρικού ρεύματος να μπορεί αλλάξει την κατάσταση της βαλβίδας. Όσον αφορά το ενεργειακό ζήτημα, η βαλβίδα μπορεί να έχει εξωτερικές πηγές ενέργειας ή ηλιακό πάνελ. Τέλος ένας από τους κόμβους θα χρησιμοποιηθεί ως sink node, δηλαδή ως πύλη του συστήματος συλλέγοντας δεδομένα από όλους τους κόμβους αισθητήρων. Όλοι οι κόμβοι αισθητήρων στην τοπολογία πρέπει να προωθήσουν τις συγκεντρωμένες πληροφορίες τους στον sink node για επεξεργασία. Επίσης, μέσω αυτού του κόμβου, δημιουργούνται εντολές αιτημάτων στους αντίστοιχους ενεργοποιητές ή αισθητήρες (Bennis et al., 2017).

Για την ανάπτυξη της παραπάνω πειραματικής διάταξης ασύρματου δικτύου αισθητήρων πολλές παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή της πιο ωφέλιμης ανάπτυξης, όπως τα χαρακτηριστικά των καλλιεργειών, οι μικρο-μετεωρολογικές παράμετροι, οι προδιαγραφές των αισθητήρων και των κόμβων και προφανώς ο προϋπολογισμός του αγρότη. Σύμφωνα με έναν γενικό οδηγό που παρουσιάζουν οι ερευνητές, η κάλυψη των κόμβων αισθητήρων στο γεωργικό WSN πρέπει να είναι πυκνή. Με αυτόν τον τρόπο, όλες οι απαιτούμενες μετρήσεις μπορούν να συγκεντρωθούν για να έχουν αξιόπιστη γνώση της περιοχής παρακολούθησης. Οι συγγραφείς σε αυτόν τον οδηγό υποστηρίζουν ότι για 100 m² του μεγέθους του πεδίου, απαιτούνται τουλάχιστον 80-90 κόμβοι. Εκτός από τον επαρκή αριθμό κόμβων, πρέπει να προσδιοριστεί ο σχηματισμός τοπολογίας. Μεταξύ της τοπολογίας ααστέρα, δέντρου ή πλέγματος, η σωστή επιλογή εξαρτάται από το μέγεθος του χωραφιού και τον σχηματισμό των φυτών. Ωστόσο, για μεσαία ή υψηλή επιφάνεια, η τοπολογία του πλέγματος παραμένει η πιο κατάλληλη. Με βάση την παραπάνω συζήτηση, επιλέχθηκε η τοπολογία του πλέγματος για τον σχεδιασμό συστημάτων άρδευσης στάγδην. Στη μέση κάθε αγροτεμαχίου έχει προταθεί η στερέωση έναν κόμβο υγρασίας και θερμοκρασίας του εδάφους. Υποθέτοντας ότι η υγρασία του εδάφους και η θερμοκρασία παραμένουν τα ίδια μέσα στο αγροτεμάχιο (Bennis et al., 2017).

Ως τελικό αποτέλεσμα της παραπάνω πρότασης, οι κόμβοι των αισθητήρων συλλέγουν περιοδικά τη θερμοκρασία και την υγρασία του εδάφους από το αγρόκτημα. Σύμφωνα με την ληφθείσα τιμή, οι κόμβοι του αισθητήρα αποφασίζουν να στείλουν τις πληροφορίες στο sink node ή όχι. Στον sink node, οι μη φυσιολογικές πληροφορίες υποβάλλονται σε επεξεργασία και λαμβάνεται τελική απόφαση για την προσαρμογή του προγράμματος άρδευσης σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εγκατάστασης. Το ίδιο πρόγραμμα άρδευσης μεταδίδεται στους κόμβους πίεσης για να αφυπνιστεί ταυτόχρονα με τη διαδικασία άρδευσης. Μόλις οι ενεργοποιητές λάβουν μια ενέργεια από το sink node, ελέγχουν τις αντίστοιχες βαλβίδες τους για άνοιγμα ή κλείσιμο. Εάν ανοίξουν οι βαλβίδες, η ροή του νερού περνά μέσα από τους σωλήνες και οι κόμβοι πίεσης αρχίζουν να λαμβάνουν μετρήσεις. Εάν συγκεντρωθεί κάποια ανώμαλη τιμή πίεσης, ένα μήνυμα προειδοποίησης μεταδίδεται στον sink node για να τερματίσει τη διαδικασία άρδευσης και να ζητήσει εξωτερική ανθρώπινη επαλήθευση της εγκατάστασης σωλήνων. Για την εξοικονόμηση ενέργειας οι κόμβοι είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν σε sleep mode και

εάν τα δεδομένα που συλλέγονται δεν παρέχουν σχετικές πληροφορίες, οι κόμβοι επιστρέφουν απευθείας σε κατάσταση αναμονής με την δυνατότητα να ελέγχεται η εναλλαγή από sleep mode σε λειτουργία από τον sink node ο οποίος μπορεί να αφυπνίσει τους μικροελεγκτές που βρίσκονται σε χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. (Bennis et al., 2017).

Για την υλοποίηση της παραπάνω πρότασης των Bennis, Fouchal, Zytoune, και Aboutajdine (Bennis et al., 2017) υλοποιήθηκε ένας πειραματικός αισθητήρας με την χρήση του λειτουργικού συστήματος για συσκευές IoT, TinyOS, και αξιοποιώντας τις δυνατότητες της πλατφόρμας εξομοίωσης TOSSIM. Για την δικτύωση των συσκευών χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό μονάδες GPRS και ZigBee και ως πρωτόκολλο δρομολόγησης το CSA-MGR σε τοπολογία πλέγματος. Σημαντικό μειονέκτημα αυτής της πρότασης είναι πως για της ανάγκες της έρευνας αναπτύχθηκε μόνο η πειραματική εξομοίωση στην πλατφόρμα TOSSIM και πως υλοποίησαν μόνο πέντε κόμβους αισθητήρων και ένας σταθμός εργασίας που χρησιμοποιήθηκε ως sink node (Bennis et al., 2017).

Στην έρευνα των Khrijji, El Houssaini, Jmal, Viehweger, Abid και Kanoun (Khrijji et al., 2014) οι ερευνητές εφάρμοσαν διαφορετικούς τύπους αισθητήρων χρησιμοποιώντας κόμβους ανοιχτού προτύπου, τύπου Crossbow TelosB, ενσωματωμένους με εμπορικούς αισθητήρες και άλλες μονάδες ελέγχου και ανατροφοδότησης. Αυτοί οι κόμβοι υποστηρίζουν την εγκατάσταση μεγάλου αριθμού αισθητήρων για γεωργική χρήση με ασύρματη μεταφορά δεδομένων στην κεντρική πύλη gateway (Khrijji et al., 2014). Στόχος της έρευνας είναι να δημιουργηθεί ένα αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης για χρήση σε γεωργικές εφαρμογές με την χρήση WSN που μπορεί να μειώσει την σπατάλη του νερού και ταυτόχρονα να είναι οικονομικά αποδοτικό ενώ απαιτεί την ελάχιστη ανθρώπινη επέμβαση για την λειτουργία του.

Αυτό το έργο (Khrijji et al., 2014) επικεντρώνεται στη χρήση πολλαπλών αισθητήρων ως συσκευή ελέγχου της ποσότητας νερού σε συστήματα άρδευσης σε πραγματικό χρόνο. Η κύρια πρόκλησή ήταν η κατανάλωση χαμηλής ισχύος, ο σχεδιασμός και η χρήση υλικού χαμηλής ισχύος. Έτσι, το συνολικό σύστημα θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη την κατανάλωση ενέργειας που έπρεπε να ελαχιστοποιηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο σε κάθε φάση του σχεδιασμού του συστήματος. Άλλα χαρακτηριστικά που λήφθηκαν υπόψιν κατά την σχεδίαση ήταν το χαμηλό κόστος των κόμβων, η

ελαχιστοποίηση του ανθρώπινου προσπάθειας και ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης. Για την επίτευξη των στόχων οι οποίοι είχαν τεθεί κατά την σχεδίαση, ως τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο IEEE 802.15.4 που προσφέρει τα βασικά χαμηλότερα επίπεδα ενός τύπου ασύρματου δικτύου και εστιάζει στην χαμηλού κόστους και χαμηλής ταχύτητας αδιάλειπτη επικοινωνία μεταξύ συσκευών.

Για την λήψη μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένας κόμβος ως gateway και τρεις τερματικοί κόμβοι αισθητήρων σε τοπολογία αστέρα. Για την πειραματική διάταξη οι τερματικοί κόμβοι ήταν χωρισμένοι σε τρεις κατηγορίες, ένας κόμβος για την μέτρηση της υγρασίας του εδάφους στην καλλιεργήσιμη έκταση, ένας κόμβος να λαμβάνει μετεωρολογικές μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτεινότητας και ένας για την μέτρηση της στάθμης του νερού στην δεξαμενή του αρδευτικού συστήματος ο οποίος ήταν επίσης εξοπλισμένος και με μια σωληνοειδούς ηλεκτρομηχανικής βαλβίδας για τον έλεγχο της ροής του αρδευτικού συστήματος. Ως λειτουργικό σύστημα των συσκευών IoT χρησιμοποιήθηκε το λειτουργικό σύστημα TinyOS χωρίς να γίνει κάποια προσομοίωση σε κάποια πλατφόρμα καθώς οι μετρήσεις λήφθηκαν από πραγματικές συνθήκες. Η επικοινωνία του κόμβου gateway με τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή ήταν απευθείας με την χρήση USB, η επεξεργασία προβολή και αποθήκευση των δεδομένων έγινε με την χρήση ενός γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής σε γλώσσα προγραμματισμού Java, για την αποθήκευση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε μια βάση δεδομένων MySQL. Η αξιοποίηση των δεδομένων έγινε με την δημιουργία ενός μηχανισμού λήψεις αποφάσεων με κριτήρια την κατανόηση των αναγκών των καλλιεργειών και συγκρίνοντας τα ανακτημένα δεδομένα από τους αισθητήρες. Η ανάγνωση των πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε ότι το φυτό αρδεύεται καλά και οι απαιτήσεις του σε νερό τηρούνται καλά. Εάν κάποιο από τα πειραματικά αποτελέσματα υπερβεί το όριο της παραμέτρου που μελετήθηκε, το σύστημα μπορεί να ειδοποιήσει τον χρήστη της εφαρμογής για αυτό το πρόβλημα για να λάβει την κατάλληλη απόφαση.

Τέλος για την τροφοδοσία των κόμβων χρησιμοποιήθηκαν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες με την δυνατότητα φόρτισής από εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως ηλιακές κυψέλες και εφαρμόστηκε τεχνική κατάστασης sleep-mode όταν οι κόμβοι δεν εκπέμπουνε ώστε να επιτευχθεί περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας. Επίσης για την μέτρηση της στάθμης του φορτίου της χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας τάσης και ένας αλγόριθμος ανοικτού κώδικα ο οποίος έστειλε τα δεδομένα μαζί με τα υπόλοιπα

μετρηθέντα μεγέθη στο περιβάλλον διεπαφής του χρήστη. Σύμφωνα με τους συγγραφείς οι μπαταρίες παρέχουν στους κόμβους διάρκεια ζωής αρκετών εβδομάδων (Khrijji et al., 2014).

Στο πεδίο που αφορά της εφαρμογές WSN για χρήση σε εποπτεία αρδευτικών συστημάτων και υδάτων, στην έρευνα των Corke, Wark, Jurdak et al (Corke et al., 2010) έχει προταθεί η ακόλουθη λύση ενός σχετικά μικρού δικτύου εννέα κόμβων. Σκοπός του ήταν να παρακολουθεί την αλατότητα, την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην περιοχή μελέτης και το ρυθμό εξαγωγής νερού σε μια σειρά οπών εντός της αρδευόμενης περιοχής καλλιεργείων ζαχαροκάλαμου στην επαρχία Burdekin της Αυστραλίας. Πρόκειται για παράκτια περιοχή και η υπερβολική άντληση νερού έχει ως αποτέλεσμα στην διήθηση αλατούχου νερού στον υδροφόρο ορίζοντα σε μια περιοχή μελέτης περίπου 6000 στρεμμάτων. Στόχος των ερευνητών ήταν το δίκτυο WSN να μπορεί να λειτουργήσει χωρίς επίβλεψη. Το δίκτυο ήταν πολύ αραιό με πολύ μεγάλες αποστάσεις ασύρματης μετάδοσης, με μέσο μήκος σύνδεσης άνω των 800m. Μια απλοποίηση ήταν ότι πολλοί κόμβοι θα μπορούσαν να τροφοδοτηθούν με ρεύμα από το δίκτυο ηλεκτροδότησης καθώς στις περιοχές τοποθέτησης υπήρχε παροχή για της αντλίες άρδευσης (Corke et al., 2010).

Σε αυτή την πρόταση, οι κόμβοι ήταν εξοπλισμένοι με αισθητήρες φωτός, θερμοκρασίας, υπέρυθρων, υγρασίας και βαρομετρικής πίεσης. Για την προστασίας των κόμβων από φυσική φθορά λόγω των συνθηκών στο περιβάλλον στο οποίο τοποθετήθηκαν, σχεδιαστικέ ειδικό κυτίο που αποτελείται από ακρυλικό περίβλημα και έχει αναπτυχθεί ειδικά για αυτήν την εφαρμογή. Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει τουλάχιστον εννέα μήνες από μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Η αυξημένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας μπόρεσε να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας καινοτόμες μεθόδους για τη συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον. Για την δικτύωση των συσκευών χρησιμοποιήθηκε ένας RF πομποδέκτης με εύρος από 433 έως 915 MHz, πρωτόκολλο δρομολόγησης MintRoute και λειτουργικό σύστημα TinyOS για τις συσκευές IoT. Οι κόμβοι περιλάμβαναν επίσης έναν βελτιωμένο ηλιακό φορτιστή που επέτρεψε την αποσύνδεση των ηλιακών κυττάρων από την μπαταρία ή το δίκτυο ηλεκτροδότησης, με την χρήση λογισμικού, για την αποφυγή υπερφόρτισης. Το δίκτυο αναπτύχθηκε το 2006 και λειτούργησε για περισσότερο από έναν χρόνο, συλλέγοντας πάνω από ένα εκατομμύριο μετρήσεις της ποιότητας του νερού (Corke et al., 2010).

Στην έρευνα των Kodali, Soratkal και Boppana, (Kodali et al., 2017) οι ερευνητές επικεντρώνονται στις καλλιέργειες καφέ και συγκεκριμένα στις περιοχές της νοτιοδυτικής Ινδίας όπου οι μουσώνες παίζουν σημαντικό ρόλο στην ποιότητα και στην παραγωγή του καφέ σε αυτές τις εκτάσεις. Με έναυσμά την κλιματική αλλαγή και θεώρησαν ότι η τεχνητή άρδευση είναι απαραίτητη για την ενίσχυση της παραγωγικότητας. Βασιζόμενοι σε διάφορες μελέτες όπου καταλήγουν πως αγροτικές καλλιέργειες βιώνουν έντονη καταπόνηση κατά τη διάρκεια της ξηρασίας και αυτό αναστέλλει την καρποφορία, μειώνοντας κατά συνέπεια την απόδοση. Το αποτέλεσμα της μελέτης των ερευνητών ήταν μια εφαρμογή WSN, η οποία παρακολουθώντας τους παραμέτρους του εδάφους και του περιβάλλοντος, καθώς και της υγρασίας των φύλλων με την χρήση κατάλληλων αισθητήρων να υλοποιήσουν ένα αυτοματοποιημένο σύστημα για κατάλληλη χρήση του νερού μέσω συστήματος άρδευσης στάγδην. Επίσης η χρήση του αισθητήρα υγρασίας φύλλων που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του ρυθμού διαπνοής και φωτοσύνθεσης των φυτών και να βοηθήσει στην πρόβλεψή του κινδύνου προσβολών από βακτήρια και μύκητες (Kodali et al., 2017).

Στην εργασία δεν έχει γίνει καμία ανάλυση των χαρακτηριστικών των κόμβων και του πρωτοκόλλου το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την δικτύωση των συσκευών καθώς για την υλοποίηση της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκαν WSN κόμβοι από εμπορικές λύσεις κλειστού προτύπου. Ο τύπος των κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν είναι Crossbow Eko pro series, παρόλο που δεν γίνεται καμία αναφορά στα πρωτόκολλα επικοινωνίας, από περαιτέρω έλεγχο που έγινε για της ανάγκες της πληρότητας της συγκριτικής μελέτης, σύμφωνα με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων κόμβων το πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιούν είναι IEEE 802.15.4, σύμφωνα με τα datasheets του προτύπου. Για την τροφοδοσία των κόμβων οι ερευνητές αναφέρουν πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, είτε συλλέκτες ηλιακής ενέργειας. Ο κόμβος gateway συνδέεται με την χρήση USB με έναν τερματικό υπολογιστή όπου τρέχει το περιβάλλον διεπαφής των κόμβων. Στο περιβάλλον διεπαφής γίνεται εικονικοποίηση των συλλεχθέντων πληροφοριών όπου μπορούν να αναλυθούν και να ληφθούν υπόψιν στην διαδικασία λήψης αποφάσεων για τις ανάγκες της κάθε καλλιέργειας, και συγκεκριμένα για την μελέτη των ερευνητών για την καλλιέργεια καφέ (Kodali et al., 2017).

Οι Kodali, Soratkal και Borpana, δεν έχουν δώσει αρκετή έμφαση στις υποδομές οι οποίες χρειάζονται για την υλοποίηση της εφαρμογής, δεδομένου ότι βασίστηκαν σε έτοιμα βιομηχανικά πρότυπα. Παρόλο που η ερευνά παρουσιάζει αρκετές ελλείψεις όσον αφορά της δικτυακές και υπολογιστικές υποδομές, ή όπως συνηθίζεται να αποκαλείτε, του *infrastructure*, έχουν παρουσιάσει εκτενή έρευνα σχετικά με τα οφείλει της εφαρμογής ενός αυτοματοποιημένου αρδευτικού συστήματος και μεθόδους αύξησης της ποιότητας της παραγωγής και μείωσης της κατανάλωσης των υδάτινων πόρων. Σύμφωνα με την λύση των ερευνητών, η άρδευση μπορεί να προγραμματιστεί και να αυτοματοποιηθεί με βάση τις επικρατούσες συνθήκες του χωραφιού (Kodali et al., 2017).

4.4 Εφαρμογές WSN για την διαχείριση οικοσυστημάτων

Η παρακολούθηση και η διαχείριση οικοσυστημάτων και γενικότερα του περιβάλλοντος αντιπροσωπεύει μια κατηγορία εφαρμογών WSN με τεράστια πιθανά οφέλη για την επιστημονική κοινότητάς και την κοινωνία γενικότερα. Η οργάνωση φυσικών χώρων με πολλούς δικτυακούς αισθητήρες μπορεί να επιτρέψει τη μακροπρόθεσμη συλλογή δεδομένων σε κλίμακες και αναλύσεις που είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να ληφθούν διαφορετικά. Επίσης η δυνατότητα σύνδεσης εφαρμογών WSN που λαμβάνουν ψηφιακές μετρήσεις άμεσα προσπελάσιμες με τεχνολογίες όπως το διαδίκτυο με το φυσικό του περιβάλλον επιτρέπει σε κάθε αισθητήρα να παρέχει τοπικές μετρήσεις και λεπτομερείς πληροφορίες που είναι δύσκολο να ληφθούν μέσω παραδοσιακών οργάνων. Η επεξεργασία και η αποθήκευση των δεδομένων επιτρέπει στους κόμβους αισθητήρων να εκτελούν πολύπλοκες λειτουργίες και την εκτέλεση πιο σύνθετων εργασιών, όπως στατιστική δειγματοληψία, συγκέντρωση δεδομένων και παρακολούθηση της υγείας και της κατάστασης του συστήματος. Σε πολλές εφαρμογές WSN οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους με την πάροδο του χρόνου σε απόκριση σε αλλαγές στο περιβάλλον, στην κατάσταση του ίδιου του δικτύου αισθητήρων ή στην επιστημονική προσπάθεια (Mainwaring et al., 2002).

Ο αντίκτυπος των δικτύων αισθητήρων για την παρακολούθηση οικοσυστημάτων και του περιβάλλοντος μπορεί να μετρηθεί από την ικανότητά τους να επιτρέπουν την ανάπτυξη νέων εφαρμογών και να παράγουν νέα αποτελέσματα που διαφορετικά είναι δύσκολο να υλοποιηθούν. Στο σημείο αυτό θα αναλυθούν διάφορες τέτοιες προτάσεις για εφαρμογές WSN στο πεδίο της παρακολούθησης οικοσυστημάτων και τη προσφορά

γνώσης είχαν τα συλλεχθέντα δεδομένα σε αυτό τον τομέα έρευνας και στην επιστημονική κοινότητα που ασχολείται με αυτόν τον κλάδο.

Στην έρευνα των Mainwaring, Polastre, Szewczyk, Culler, και Anderson (Mainwaring et al., 2002) έχει πραγματοποιηθεί μια εις βάθος μελέτη και υλοποίηση μια εφαρμογής WSN για την παρακολούθηση ενός οικότοπου σε πραγματικό χρόνο. Αναπτύσσεται ένα σύνολο απαιτήσεων σχεδιασμού συστήματος που καλύπτουν τη σχεδίαση υλικού των κόμβων, τη σχεδίαση του δικτύου αισθητήρων και τις δυνατότητες για απομακρυσμένη πρόσβαση και διαχείριση δεδομένων. Προτείνεται μια αρχιτεκτονική συστήματος για την κάλυψη αυτών των απαιτήσεων για την παρακολούθηση των ενδιατημάτων εν γένει και παρουσιάζεται μια παρουσία της αρχιτεκτονικής για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και της συμπεριφοράς ωοτοκίας θαλάσσιων πτηνών. Το δίκτυο που αναπτύχθηκε αποτελείται από 32 κόμβους σε ένα μικρό νησί 12 στρεμμάτων στα ανοικτά των ακτών της πολιτείας του Μέιν (Grand Duck Island), στις ΗΠΑ, και μεταδίδει χρήσιμα ζωντανά δεδομένα στον Ιστό. Η εφαρμογή σχεδιάστηκε με βάση την εφαρμογή χρησιμεύει στον εντοπισμό σημαντικών τομέων περαιτέρω εργασιών σε δειγματοληψία δεδομένων, επικοινωνίες, επαναπροσδιορισμός δικτύου και παρακολούθηση της υγείας. Η συγκεκριμένη μελέτη ήταν από της πρώτες εφαρμογές πάνω στο τομέα των WSN (Selmic et al., 2016), το δοκιμαστικό δίκτυο αισθητήρων που υλοποιήθηκε, χρησιμοποιήθηκε σε πραγματικό χρόνο στην άγρια φύση. Η ομάδα η οποία αποτελούνταν από στελέχη της Intel Corporation και του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας, το Μπέρκλεϊ ανέπτυξε το σύστημα και χρησιμοποιήθηκε για την παρακολούθηση αποικιών θαλασσοπουλιών. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι δεν διαταράσσει τη φύση και τα είδη που παρακολουθούνται.

Στην πρόταση των Mainwaring, Polastre, Szewczyk, Culler, και Anderson, οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες φωτός, θερμοκρασίας, υπέρυθρων, υγρασίας και βαρομετρικής πίεσης. Συσκευασία που αποτελείται από ακρυλικό περίβλημα έχει αναπτυχθεί ειδικά για αυτήν την εφαρμογή. Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει τουλάχιστον 9 μήνες από μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Η αυξημένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας καινοτόμες μεθόδους για τη συλλογή ενέργειας από το περιβάλλον. Για την δικτύωση των συσκευών χρησιμοποιήθηκε ένας RF πομποδέκτης στα 916 MHz και με ρυθμό μετάδοσης 40 kbps (Mainwaring et al., 2002).

Η εφαρμογή των Corke, Wark, Jurdak et al (Corke et al., 2010) στο πεδίο που αφορά της εφαρμογές WSN για χρήση σε εποπτεία οικοσυστημάτων, ήταν μέρος μιας μεγάλης πρωτοβουλίας για την παροχή αξιόπιστης, μακροχρόνιας παρακολούθησης των οικοσυστημάτων τροπικών δασών. Η περιοχή μελέτη της έρευνας ήταν μια έκταση τροπικών δασών στο Νοτιοανατολικό Κουίνσλαντ στην επαρχία Springbrook της Αυστραλίας, η οποία είχε υψηλή ανάγκη για την παρακολούθηση της για την αποκατάσταση της βιοποικιλότητας. Στόχος του έργου ήταν να σχεδιαστεί η ανάπτυξη της εφαρμογής με βλέψεις την καλύτερη κατανόηση των προκλήσεων που συναντήθηκαν κατά την ανάπτυξη της ώστε μακροπρόθεσμα να μπορούν να αναπτυχθούν χαμηλής ισχύος WSN σε περιβάλλοντα δασών. Αυτά τα περιβάλλοντα χαρακτηρίζονται συνήθως από περιοχές με πολύ περιορισμένη ηλιακή ενέργεια με δυσμενή και δύσβατα περιβάλλοντα. Προκειμένου να αναπτυχθεί το δίκτυο και τα πρωτόκολλα διαχείρισης ενέργειας που απαιτούνται για την αξιόπιστη απόδοση του δικτύου σε ένα τροπικού δάσους, τα παραπάνω κριτήρια λήφθηκαν υπόψιν για την σχεδίαση του WSN υπό αυτές τις συνθήκες (Corke et al., 2010).

Καθώς στην περιοχή μελέτης δεν υπήρχε κάποιο δίκτυο παροχής ρεύματος, οι ερευνητές επανασχεδίασαν τους κόμβους τους οποίους χρησιμοποίησαν στις προηγούμενες έρευνες τους αντικαθιστώντας την πηγή ενέργειας με μπαταρίες και σύστημα συλλόγου ανανεώσιμης ενέργειας από το περιβάλλον, ώστε να είναι εφικτή η μακροχρόνια λειτουργία των κόμβων που τοποθετήθηκαν στην περιοχή μελέτης. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν οι κόμβοι να είναι εξοπλισμένοι με δυο μπαταρίες, μια επαναφορτιζόμενη και μια κοινή αλκαλική μπαταρία και μια ηλιακή κυψέλη. Η κυρία πηγή μπαταρίας ήταν η επαναφορτιζόμενη η οποία χρησιμοποιούσε την ηλιακή κυψέλη ως πηγή φόρτισης, με εφεδρική την κοινή αλκαλική μπαταρία σε περίπτωση που δεν υπήρχε επαρκή πηγή φόρτισης για μεγάλο διάστημα. Ως λειτουργικό σύστημα των κόμβων χρησιμοποιήθηκε το λειτουργικό σύστημα συσκευών IoT, TinyOS και ως πρωτόκολλο δρομολόγησης το πρωτόκολλο LQ-routing. Για επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας οι ερευνητές εφάρμοσαν ένα πρωτόκολλο MAC χαμηλής ισχύος όπου οι κόμβοι ξυπνούν περιοδικά. κάθε 57 millisecond, για ένα μικρό χρονικό διάστημα τριών millisecond για να ελέγχουν για επικοινωνιακές δραστηριότητες και να προσπαθούν να λαμβάνουν μηνύματα (Corke et al., 2010).

Για την ασύρματη επικοινωνία αντικατέστησαν τους RF πομποδέκτες που λειτουργούσαν στα 433 MHz στην συχνότητα των 900 MHz. Το αποτέλεσμα αυτής της αλλαγής σύμφωνα με τους συγγραφείς δεν ήταν αποτελεσματικό για τις επικοινωνίες των κόμβων μεταξύ τους καθώς διάδοση του σήματος μέσω πυκνού και υγρού δάσους ήταν αναποτελεσματική. Το πρωτόκολλο LQ-routing λειτούργησε πολύ καλά παρά τους περιορισμούς του πομποδέκτη. Τα αποτελέσματα από τα πειράματα έδειξαν ότι στην περίπτωση των δασικών κόμβων, η απόδοση κυμάνθηκε από 95% έως λιγότερο από 20% στις χειρότερες περιόδους. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι πολλοί σύνδεσμοι δασικών κόμβων καταρρέυσαν εντελώς κατά τη διάρκεια και μετά από έντονες βροχοπτώσεις (Corke et al., 2010).

Όσον αφορά τα μετρήσιμα μεγέθη και τους αισθητήρες που χρησιμοποιήσαν οι ερευνητές δεν έχουν κάνει κάποια αναφορά καθώς επαναχρησιμοποίησαν την αρχιτεκτονική που εφάρμοσαν στις προηγούμενες μελέτες τους, όπως αναλύθηκαν στις παραπάνω μελέτες περίπτωσης (Corke et al., 2010).

Τέλος σχετικά με την εκμετάλλευση της διαθέσιμης ηλιακή ενέργειας κατέληξαν ότι δεν είναι πάντα αρκετή για να τροφοδοτήσει έναν κόμβο. Ειδικά όταν πρέπει να τροφοδοτείται έναν μεγάλο αριθμό αισθητήρων. Σημαντικό συμπέρασμα σχετικά με αυτό ήταν ότι σε αντίστοιχες έρευνες στην βιβλιογραφία οι κόμβοι που αναπτύσσονται είτε δεν δοκιμάζονται σε πραγματικές συνθήκες, είτε δεν επανεξετάζονται ποτέ σε μεταγενέστερες εφαρμογές. Για τους κόμβους του τροπικού δάσους ήταν απαραίτητη η επίσκεψη για την συντήρηση τους κάθε λίγους μήνες για να αφαιρέσουν φύλλα, ραβδιά και φωλιές εντόμων από τους κόμβους και της ηλιακές κυψέλες. Επομένως θα ήταν πιο αποδοτικό και θα μείωνε την πολυπλοκότητα της εφαρμογής και την ενεργειακή ανεπάρκεια που εμφανιζόταν κατά περιόδους, αν κατά τον σχεδιασμό είχε αντικατασταθεί ο ηλιακός συλλέκτης με μια κοινή μπαταρία έτσι ώστε αντί οι επισκέψεις να ήταν για την συντήρηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων να ήταν για την αντικατάσταση των μπαταριών (Corke et al., 2010).

5 Συγκριτική Μελέτη

5.1 Κριτήρια επιλογής σχετικών μελετών

Όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 3.1 η επιλογή των ερευνών οι οποίες αναλύθηκαν στην ενότητα 4 έγινε με βάση τρία κριτήρια. Το πρώτο κριτήριο ήταν η πιθανή εφαρμογή τους στην περιοχή μελέτης καθώς και τυχόν ομοιότητες της εστιασμένης περιοχής μελέτης κάθε δημοσίευσης με την περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας. Το συγκεκριμένο κριτήριο αποτελεί αυστηρό προαπαιτούμενο. Λαμβάνοντας υπόψιν το πρώτο κριτήριο όλες οι έρευνες που έχουν επιλεγθεί παρουσιάζουν προτάσεις με WSN, συλλογή μετρήσεων και περιβαλλοντολογική παρακολούθηση σε περιοχές οι οποίες είτε παρουσιάζουν κοινά με την περιοχή μελέτης, είτε πρόκειται για οικοτόπους περιβαλλοντολογικού ενδιαφέροντος είτε είναι αρδεύσιμες και καλλιεργήσιμες εκτάσεις.

Το δεύτερο κριτήριο, να έχουν υλοποιηθεί κατά κύριο λόγο την τελευταία δεκαετία, δεν απαιτούσε αυστηρό κριτήριο. Παρόλα αυτά, ότι η τεχνολογίες του διαδικτύου των πραγμάτων και των ασύρματων αισθητήρων δικτύων αποτελεί τεχνολογίες οι οποία θα μπορούσε να πει κανείς ότι μόλις έχουν ολοκληρώσει την πρώτη της δεκαετία από όταν εδραιώθηκαν σαν γνωστικό αντικείμενο στον χώρο της πληροφορικής. Λαμβάνοντας υπόψιν το παραπάνω και επιχειρώντας την αποφυγή παρωχημένων ερευνών έγινε επικέντρωσή σε έρευνες τις τελευταίες δεκαετίες. Σε αυτό το κριτήριο, εξαίρεση αποτελούν οι έρευνες των Mainwaring, Polastre, Szewczyk, Culler, και Anderson (Mainwaring et al., 2002), καθώς και των Corke, Wark, Jurdak et al (Corke et al., 2010). Συγκεκριμένα για την έρευνα των πρώτων, σύμφωνα με τους Selmic, Phoha και Serwadda (Selmic et al., 2016) η συγκεκριμένη μελέτη ήταν από της πρώτες εφαρμογές πάνω στο τομέα των WSN και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Το τρίτο κριτήριο αποτελεί το πιο πολύπλοκο και ευέλικτο κριτήριο. Η ανάγκη για την ύπαρξη ενός εύρους μελετών, επικεντρωμένες σε διαφορετικά πεδία έρευνας με στόχο την αξιολόγηση των βέλτιστων λύσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος, οδήγησε στην επιλογή του συγκεκριμένου κριτηρίου. Στόχος ήταν μια ετερογένεια ανάμεσα στις έρευνες που έχουν επιλεγθεί με αποτέλεσμα την ύπαρξη εστιασμένων ερευνών επικεντρωμένες σε διαφορετικά πεδία ενδιαφέροντος. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου κριτηρίου παρουσιάζονται με λεπτομέρειες στον πίνακα 5-1.

Πίνακας 5-1 Επικεντρωμένο πεδίο έρευνας σχετικών μελετών

Ερευνητικό Έργο	Έτος	Επικεντρωμένο πεδίο έρευνας
<i>(Huang et al., 2015)</i>	2015	Εξοικονόμηση ενέργειας
<i>(Tang & Huang, 2010)</i>	2010	Εξοικονόμηση ενέργειας
<i>(Duarte et al., 2019)</i>	2019	Σύστημα Συλλογής Δεδομένων Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων
<i>(Al-Dahoud et al., 2020)</i>	2020	Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων
<i>(Vijayakumar & Ramya, 2015)</i>	2015	Περιβαλλοντολογική παρακολούθηση
<i>(Rani et al., 2019)</i>	2019	Εφαρμογές στο υπολογιστικό νέφος
<i>(Corke et al., 2010)</i>	2010	Τεχνικές προδιαγραφές κόμβων
<i>(Kamaludin & Ismail, 2017)</i>	2017	Πειραματικές μετρήσεις
<i>(Núñez et al., 2018)</i>	2018	Πειραματικές μετρήσεις Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων
<i>(Rodríguez et al., 2017)</i>	2017	Εφαρμογές στο υπολογιστικό νέφος Μεγάλα δεδομένα Συστήματα Υποστήριξης αποφάσεων
<i>(Guillermo et al., 2019)</i>	2019	Μεγάλα δεδομένα Συστήματα Υποστήριξης αποφάσεων
<i>(Khalifeh et al., 2021)</i>	2020	Δικτυακές υποδομές Μηχανική μάθηση Συστήματα Υποστήριξης αποφάσεων
<i>(Haseeb et al., 2020)</i>	2020	Ασφάλεια επικοινωνιών
<i>(Vo et al., 2013)</i>	2013	Δικτυακές υποδομές Τεχνικές προδιαγραφές κόμβων
<i>(Nurellari & Srivastava, 2018)</i>	2018	Δικτυακές υποδομές Δικτυακές επικοινωνίες
<i>(Silva et al., 2019)</i>	2019	Δικτυακές υποδομές Εφαρμογές υπολογιστικού νέφους
<i>(Bennis et al., 2017)</i>	2017	Εξοικονόμηση ενέργειας Αυτόματος έλεγχος

<i>(Khriji et al., 2014)</i>	2014	Εξοικονόμηση ενέργειας Αυτόματος έλεγχος
<i>(Corke et al., 2010)</i>	2010	Εξοικονόμηση ενέργειας Τεχνικές προδιαγραφές κόμβων
<i>(Kodali et al., 2017)</i>	2017	Αυτόματος έλεγχος Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων
<i>(Mainwaring et al., 2002)</i>	2002	Εξοικονόμηση ενέργειας Τεχνικές προδιαγραφές κόμβων
<i>(Corke et al., 2010)</i>	2010	Εξοικονόμηση ενέργειας Τεχνικές προδιαγραφές κόμβων

5.2 Κριτήρια προς σύγκριση σχετικών μελετών

Αυτή η ενότητα επισημαίνει διάφορες παραμέτρους που παρουσιάζονται στο σχετικό έργο των ερευνητών, όπως έχουν προταθεί από αυτούς στις δημοσιεύσεις που επιλέχθηκαν να συγκριθούν στην παρούσα εργασία. Οι περισσότερες από τις ακόλουθες παραμέτρους θεωρούνται κύριας σημασίας για την εξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων σύμφωνα με την λειτουργικότητα των προτάσεων την αποδοτικότητα τους στο να θεραπεύσουν την πρόκληση την οποία καλούνται να αντιμετωπίσουν και την πιθανή εφαρμογή τους στην Ελληνική ύπαιθρο και συγκεκριμένα στην περιοχή του εθνικού πάρκου των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης. Οι επιλεγμένες έρευνες που παρουσιάστηκαν στο σχετικό ερευνητικό έργο στην ενότητα 4 συγκρίνονται με βάση τις ακόλουθες παραμέτρους που θα αναφερθούν στις παρακάτω υπό ενότητες.

5.2.1 Κατανάλωση ενέργειας και αυτονομία

Η διαχείριση ισχύος και ενέργειας είναι αξιοσημείωτη ανησυχία για συσκευές IoT, λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση αισθητήρων βάσει των εκάστοτε εφαρμογών και την ανάγκη για την μακροπρόθεσμη και αδιάλειπτη λειτουργία τους. Σε μια κοινή συσκευή IoT απαιτείται η τροφοδοσία από μικρές μπαταρίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επίσης τα διάφορα περιφερειακά που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες συσκευές, όπως αισθητήρες, module ασύρματης επικοινωνίας, συσκευές υποδοχής καρτών μνήμης και άλλα, πρέπει να είναι σχεδιασμένοι για χαμηλή ισχύ. Τα δίκτυα WSN χρησιμοποιούν ουσιαστικά κόμβους που είναι σχεδιαζόμενοι για συγκεκριμένο τομέα εφαρμογών με

δυνατότητα αναγνώρισης και λήψης ζωτικών πληροφοριών. Μια τυπική αρχιτεκτονική ενός κόμβου IoT όπως έχει αναλυθεί στην ενότητα 2.3 λειτουργεί έχοντας ως πηγή ενέργειας μια απλή μπαταρία. Θεωρώντας τα παραπάνω απαραίτητα χαρακτηριστικά που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την σχεδίαση μιας εφαρμογής WSN η συγκεκριμένη παράμετρος έχει τεθεί ανάμεσα στις πιο βασικές παραμέτρους για την υλοποίηση μια WSN λύσης. Η κατανάλωση ενέργειας αφορά την αποδοτικότητα και περιγράφεται από την ικανότητα των κόμβων στην διαχείριση ενέργειας καθώς και των υπόλοιπων συσκευών που συνδέονται με το δίκτυο αισθητήρων. Οι μελέτες περίπτωσης που έχουν σχολιαστεί στην ενότητα 4 θα συγκριθεί ως προς τις προτάσεις που έχει γίνει από τους συγγραφείς κάθε μελέτης και τον τρόπο που διαχειρίστηκαν την κατανάλωση ενέργειας από τους κόμβους που υλοποίησαν κατά την έρευνα τους.

5.2.2 Πρωτόκολλο επικοινωνίας και εμβέλεια

Η λειτουργία δικτύωσης των συσκευών του διαδικτύου των πράγματων χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου και προς τον κόμβο gateway. Συγκεκριμένα στα δίκτυα WSN οι μετρήσεις που ανιχνεύονται από διαφορετικές τοποθεσίες δρομολογούνται προς το σύστημα συλλογής δεδομένων και κατά συνέπεια στην φυσική θέση αποθήκευσης ή στο υπολογιστικό νέφος για επακόλουθη χρήση στη διαδικασία ανάλυσης και λήψης αποφάσεων. Όπως έχει αναλυθεί και στην ενότητα 2.4 υπάρχουν συγκεκριμένες τεχνολογίες που επιλέγονται για την δικτύωση συσκευών IoT και την δρομολόγηση αυτών των πακέτων. Μεγαλύτερη έμφαση για την επιλογή ενός πρωτοκόλλου για λύσεις IoT δίνεται στην κατανάλωση ενέργειας, και ειδικότερα επιλέγονται τεχνολογίες χαμηλής ισχύος καθώς όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κριτήριο σύγκρισης η κατανάλωση ενέργειας είναι ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας, αλληλένδετος με τα πρωτόκολλα και τους αισθητήρες μέτρησης φυσικών μεγεθών που χρησιμοποιούνται. Αυτές οι τεχνολογίες θα μπορούσαν να λειτουργήσουν με ανοχή καθυστέρησης και ανοχή στην ακεραιότητα των μεταδόσεων ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε πρότασης σύμφωνα με το πεδίο εφαρμογής της και της περιοχής μελέτης.

Στις λύσεις IoT για περιβαλλοντική αιεφορία με στόχο την εξασφάλιση των φυσικών πόρων και την διασφάλισή της ποιότητας και της ισορροπίας στο οικοσύστημα, οι δυνατότητες δικτύωσης περιέχουν πολλές προτάσεις, όπως δορυφορικά, εναέρια,

επίγεια, υποβρύχια και υπόγεια δίκτυα. Αυτές οι λειτουργίες δικτύωσης θα συγκριθούν και θα συζητηθούν ως μια από τις κυρίες παραμέτρους σύγκρισης των σχετικών ερευνών. Οι κάρτες διασύνδεσης δικτύου χρησιμοποιούνται από τους κόμβους WSN για τις λειτουργίες δικτύωσης και επικοινωνίας στο πρότυπο IoT και παρέχουν σύνδεση μεταξύ των κόμβων και της κεντρικής πύλης Gateway. Στο σημείο αυτό θα γίνει μια αναφορά στο ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιούν οι κόμβοι σε κάθε μελέτη περίπτωσης για να ανταλλάξουν τα δεδομένα των μετρήσεων μεταξύ των κόμβων καθώς και στα πρωτόκολλα επικοινωνίας για την αποστολή των δεδομένων με τον κεντρικό διακομιστή αν υπάρχει.

5.2.3 Φυσικά μεγέθη προς μέτρηση

Τα φυσικά μεγέθη προς μέτρηση αναφέρονται στους αισθητήρες που υποστηρίζει η κάθε εφαρμογή και τα συμπεράσματα που εξάγονται από την καταγραφή των μετρήσεων των φυσικών μεγεθών. Η σωστή λειτουργικότητα αυτών των στοιχείων IoT είναι ζωτικής σημασίας για την ικανοποίηση των απαιτήσεων και την επίτευξη των στόχων της IoT εφαρμογής. Μια σαφής περιγραφή αυτών των στόχων σε συνδυασμό με την επαρκή και αναλυτική περιγραφή των απαιτήσεων είναι τα χαρακτηριστικά τα οποία θα οδηγήσουν στην επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων για διάφορες εφαρμογές. Στο διαδίκτυο των πραγμάτων και συγκεκριμένα σε λύσεις WSN, η λειτουργία ανίχνευσης χρησιμοποιείται για την ανίχνευση φυσικών, λογικών και βιολογικών ιδιοτήτων διαφορετικών περιβαλλόντων στον φυσικό κόσμο στον αναλογικό και ψηφιακό τομέα. Κατά συνέπεια, αυτά τα δεδομένα καθίστανται ως είσοδο σε επακόλουθες λειτουργίες του IoT και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τη συλλογή δεδομένων, τη δικτύωση, την αποθήκευση δεδομένων, την επεξεργασία και τη λήψη αποφάσεων. Παραδείγματα περιλαμβάνουν αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση του αέρα, ανίχνευση εδάφους και ανίχνευση νερού. Διαφορετικά παραδείγματα μηχανισμών ανίχνευσης σε διάφορα μετρήσιμα φυσικά μεγέθη τα οποία έχουν αναφερθεί στο σχετικό ερευνητικό έργο συζητούνται λεπτομερώς στην συγκριτική μελέτη. Η συλλογή δεδομένων είναι μια σημαντική λειτουργία του IoT στο οποίο τα δεδομένα συλλέγονται, συνδυάζονται και επεξεργάζονται για ένα συγκεκριμένο περιβάλλον που παρέχει τη δυνατότητα συνδυασμού και επεξεργασίας ορισμένων δεδομένων.

Η αποθήκευση δεδομένων και η δυνατότητα αξιοποίησης του υπολογιστικού νέφους στο διαδίκτυο των πραγμάτων είναι επίσης ένας επιπλέον παράγοντας ο οποίος είναι σχετικός με αυτή την παράμετρο ως προς την οποία θα συγκριθούν οι σχετικές έρευνες καθώς η αποθήκευση των δεδομένων είναι εξίσου σημαντική όσο και η συλλογή τους. Τα παραδείγματα των λειτουργιών αποθήκευσης δεδομένων περιλαμβάνουν είτε την αξιοποίηση ενσωματωμένων συστημάτων συλλογής δεδομένων πάνω στους κόμβους WSN, είτε σε απομακρυσμένους διακομιστές, είτε προηγμένες βάσεις δεδομένων σε εξυπηρετητές ή ακόμα και απλούς data loggers πάνω στους κόμβους με την χρήση μια κοινής κάρτας μνήμης.

Η λειτουργία επεξεργασίας στο διαδίκτυο των πραγμάτων να μετατρέπει ανεπεξέργαστα δεδομένα σε χρήσιμες πληροφορίες και να παρέχει την δυνατότητα της αξιοποίησης της πληροφορίας σε λειτουργία λήψης αποφάσεων είναι επίσης άλλο ένα χαρακτηριστικό αυτής της παραμέτρου. Η παραχθείσα πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τους χρήστες, τους διαχειριστές και τους υπεύθυνους που επιβλέπουν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των συλλεχθέντων δεδομένων για την υλοποίηση διαφορετικών στρατηγικών ως σχέδιο δράσης για την εκάστοτε λύση στο πεδίο εφαρμογής του WSN. Οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται στα συστήματα διαχείρισης άρδευσης καθοδηγούμενων από αισθητήρες είναι ένα παράδειγμα της λειτουργίας επεξεργασίας όπου τροφοδοτούνται δεδομένα από αισθητήρες στον τομέα της ψηφιακής γεωργίας και η επεξεργασία τους οδηγεί στην λήψη αποφάσεων για την λειτουργία των αρδευτικών συστημάτων.

Η λήψη αποφάσεων είναι το τελευταίο στάδιο στο οποίο επεμβαίνουν τα συλλεχθέντα δεδομένα. Σε αυτό το στάδιο, λαμβάνεται μια απόφαση με βάση τη συλλογή, την αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων και, κατά συνέπεια, λαμβάνονται κατάλληλες ενέργειες που οδηγούν σε αντίστοιχες αλλαγές στον φυσικό κόσμο για την επίτευξη του επιθυμητού στόχου βιωσιμότητας. Μερικά από τα παραδείγματα αυτών των λειτουργιών στα πεδία ενδιαφέροντος της μελέτης όπως η γεωργία ακριβείας, περιλαμβάνουν έλεγχο ποιότητας με βάση την ανίχνευση θρεπτικών ουσιών, σωστή εφαρμογή επεξεργασίας νερού με βάση την ανίχνευση μολυσματικών ουσιών, σωστή άρδευση με βάση την ανίχνευση υγρασίας του εδάφους, και εφαρμογή λιπάσματος με βάση τις ανάγκες της καλλιέργειας. Περιλαμβάνει επίσης λειτουργικότητα που σχετίζεται

με την ανθρώπινη αλληλεπίδραση με τα συστήματα IoT χρησιμοποιώντας γραφικές διεπαφές χρήστη και τερματικές οθόνες.

5.2.4 Ασφάλεια επικοινωνιών και δεδομένων

Η ασφάλεια και η προστασία των δεδομένων αντιμετωπίζουν την ικανότητα του σχεδιασμού της αρχιτεκτονικής σε εξωτερικές επιθέσεις. Ασχολείται με διάφορα ζητήματα όπως ο έλεγχος ταυτότητας, η κρυπτογράφηση. Όπως σε όλα τα υπολογιστικά συστήματα, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργικότητα του WSN, προκειμένου να επιτραπεί η σωστή παροχή υπηρεσιών. Αυτά τα δίκτυα πρέπει να συμμορφώνονται με ορισμένες απαιτήσεις ασφαλείας, όπως η εμπιστευτικότητα, η διαθεσιμότητα, η ακεραιότητα, ο έλεγχος ταυτότητας και άλλα, που προέρχονται από το πλαίσιο της εφαρμογής. Ωστόσο, η επίτευξη αυτού του στόχου δεν είναι εύκολη υπόθεση για τις εφαρμογές WSN, καθώς είναι ιδιαίτερα ευάλωτο σε εξωτερικές και εσωτερικές επιθέσεις λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του. Οι συσκευές του δικτύου, οι κόμβοι αισθητήρων, είναι πολύ περιορισμένοι όσον αφορά τις υπολογιστικές δυνατότητες, τη μνήμη, το εύρος ζώνης επικοινωνίας και την ισχύ της μπαταρίας. Επιπλέον, είναι εύκολη η φυσική πρόσβαση σε αυτούς τους κόμβους, επειδή πρέπει να βρίσκονται κοντά στη φυσική πηγή των συμβάντων και συνήθως δεν είναι ανθεκτικές σε παραβιάσεις λόγω περιορισμών κόστους. Επιπλέον, οποιαδήποτε εσωτερική ή εξωτερική συσκευή μπορεί να έχει πρόσβαση στην ανταλλαγή πληροφοριών επειδή το κανάλι επικοινωνίας είναι δημόσιο. Ως αποτέλεσμα, το WSN πρέπει να αντιμετωπίσει πολλές απειλές που μπορεί εύκολα να εμποδίσουν τη λειτουργικότητά του και να ακυρώσουν τα οφέλη από τη χρήση των υπηρεσιών του της υλοποιηθείσας εφαρμογής (Lopez & Zhou, 2008). Αυτές οι απειλές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν όπως σε όλα τα υπολογιστικά συστήματα. Αναφορικά τέτοιες κατηγορίες επιθέσεων είναι οι κοινές επιθέσεις, οι επιθέσεις άρνησης υπηρεσίας επιθέσεις πλαστοπροσωπίας ή επιθέσεις man-in-the-middle και επιθέσεις ειδικά για πρωτόκολλο επικοινωνίας.

Λόγω των χαρακτηριστικών του WSN, υπάρχουν ορισμένες συγκεκριμένες επιθέσεις που στοχεύουν στα κανάλια επικοινωνίας. Ένας αντίπαλος μπορεί εύκολα να ανακτήσει πολύτιμα δεδομένα από τα μεταδιδόμενα πακέτα που αποστέλλονται (Λαθρακρόαση - Eavesdropping). Αυτός ο αντίπαλος μπορεί επίσης απλά να αναχαιτίσει και να τροποποιήσει το περιεχόμενο των πακέτων που προορίζονται για το σταθμό βάσης

ή τους ενδιάμεσους κόμβους (Τροποποίηση μηνύματος) ή να μεταδώσει εκ νέου τα περιεχόμενα αυτών των πακέτων αργότερα (Αναπαραγωγή μηνυμάτων). Τέλος, ο εισβολέας μπορεί να στείλει ψεύτικα δεδομένα στο δίκτυο, ίσως να μεταμφιέζεται ως ένας από τους αισθητήρες, με σκοπό να καταστρέψει την ανάγνωση των συλλεγόμενων αισθητήρων ή να διακόψει τα δεδομένα του εσωτερικού ελέγχου (Μήνυμα έγχυσης). (Lopez & Zhou, 2008). Δεδομένων όλων των απειλών που έχουν αναφερθεί παραπάνω η παράμετρος της ασφάλειας των επικοινωνιών και των δεδομένων θεωρείτε υψίστης σημασίας και οι σχετικές έρευνες έχουν αναλυθεί ως προς την αναφορά της εκάστοτε έρευνας σε αυτή την παράμετρο και η πρόταση των συγγραφέων της κάθε έρευνας για την αντιμετώπιση αυτών των απειλών. Τέτοιες αναφορές μπορεί να είναι είτε κάποια αναφορά στην ασφάλεια που παρέχει το κάθε πρωτόκολλο και πως αυτό υιοθετήθηκε από την λύση WSN που ανέπτυξαν οι ερευνητές, είτε κάποια εφαρμογή ενός κρυπτογραφικού αλγόριθμου κατά την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αναφέροντας τυχόν δυσκολίες που υπήρχαν για την εφαρμογή τέτοιων λύσεων σε μικροελεγκτές χαμηλής ισχύος.

5.2.5 Εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες

Η εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες ως κριτήριο για την σύγκριση των σχετικών ερευνών αφορά την εφαρμογή της μελέτης σε πραγματικό περιβάλλον, είτε έχει γίνει με πειραματική διάταξη και λήφθηκαν δειγματοληπτικές μετρήσεις για την εύρωστή λειτουργία της κάθε πρότασης, είτε έχει υλοποιηθεί σε πραγματικές συνθήκες λαμβάνοντας μετρήσεις από φυσικό περιβάλλον και παραθέτοντας στοιχεία από τα συμπεράσματα των ερευνητών από την εφαρμογή της πρότασης τους σε πραγματικές συνθήκες.

Για τις ανάγκες της σύγκρισης θα θεωρηθεί ως υψηλής σημαντικότητας οι περιπτώσεις όπου λήφθηκαν μετρήσεις από πραγματικές συνθήκες, μέτριας σημαντικότητας σε περιπτώσεις που υλοποιήθηκε η πειραματική διάταξη και λήφθηκαν δειγματοληπτικές μετρήσεις και τέλος χαμηλής σημαντικότητας σε περιπτώσεις όπου υλοποιήθηκε η πειραματική διάταξη άλλα δεν έχουν ληφθεί καθόλου, ή δεν έχει γίνει καμία αναφορά για μετρήσεις είτε σε φυσικό περιβάλλον, είτε μετρήσεις εργαστηρίου. Στόχος των αποτελεσμάτων είναι να αναλυθεί κατά πόσο η ερευνητική υλοποίηση που σχεδιάστηκε στην κάθε μελέτη περίπτωσης έχει εφαρμογή σε πραγματικό περιβάλλον,

όπως για παράδειγμα σε υπαίθριες καλλιέργειες, θερμοκήπια, βοσκότοπους ή άλλα οικοσυστήματα και περιοχές οικολογικής σημασίας.

5.2.6 Προσομοίωση και πειραματική ανάπτυξη πλατφόρμας εξομοίωσης

Το κριτήριο σύγκρισης που αφορά την προσομοίωση και πειραματική ανάπτυξη πλατφόρμας εξομοίωσης ή την δοκιμή του WSN σε testbed. Η προσομοίωση και πειραματική ανάπτυξη είναι αλληλένδετο κριτήριο με το προηγούμενο κριτήριο σύγκρισης που αναφέρθηκε στην ενότητα 5.2.5 , εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες, καθώς οι αιτία όπου για περιπτώσεις μελέτης δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες στην έρευνα για προσομοίωση της εφαρμογής, είναι το γεγονός ότι οι ερευνητές εφάρμοσαν την μελέτη τους είτε με λήψη μετρήσεων σε αληθινές συνθήκες δεδομένα, είτε με δειγματοληψία μετρήσεων σε συνθήκες εργαστηρίου.

Οι περιπτώσεις όπου οι ερευνητές παραθέτουν μετρήσεις και από προσομοίωση και από την εφαρμογή τους σε αληθινές συνθήκες θεωρούνται υψηλής σημασία. Αντίστοιχα οι περιπτώσεις όπου οι ερευνητές έχουν υλοποιήσει την πειραματική διάταξη και έχουν ληφθεί μετρήσεις από περιβάλλον εργαστηρίου θεωρούνται μέτριας σημασίας. Και τέλος χαμηλής σημασίας θεωρούνται περιπτώσεις μελέτης όπου δεν έχει υλοποιηθεί κάποια πειραματική διάταξη, άλλα οι ερευνητές έχουν παραθέσει αποτελέσματα από περιβάλλον εξομοίωσης όπου έχουν τρέξει διάφορα πιθανά σενάρια και αλγόριθμους σχετικά με την ανάπτυξη WSN εφαρμογών για λύσης στην έξυπνη γεωργία και άλλες περιβαντολλογικές μετρήσεις.

5.3 Αποτελέσματα Σύγκρισης

5.3.1 Ανάλυση σχετικών ερευνητικών έργων

Στόχος όλων των ερευνών είναι ήταν αυτοματοποίηση διαφόρων παραγωγικών διεργασιών και η εξαγωγή γνώσης από τις μετρήσεις που έχουν συλλεχθεί με την χρήση WSN στον τομέα της εποπτείας λιμνών και υδάτων, της κλιματικής αλλαγής και της γεωργίας και της κτηνοτροφίας που κάνουν τις διάφορες εργασίες ευκολότερες και ταχύτερες ή στοχεύουν στην αξιοποίηση των πληροφοριών για χρήση σε συστήματα λήψης αποφάσεων και εφαρμογής της επιστήμης των δεδομένων στον τομέα της έξυπνης γεωργίας. Σημαντικότερα φυσικά μεγέθη προς μέτρηση και παρακολούθηση σύμφωνα με τις περισσότερες ερευνητικές προτάσεις θεωρείται η μέτρηση της ατμοσφαιρικής

υγρασίας, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και της υγρασίας στο υπέδαφος για τις WSN εφαρμογές στο πεδίο της γεωργίας ακριβείας και της αυτοματοποίησης αρδευτικών συστημάτων, και θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, θολότητας, διαλυμένου οξυγόνου (DO) και ενεργού οξύτητας (pH) στις έρευνες στο πεδίο της εποπτείας λιμνών, υδάτινων πόρων, οικοσυστημάτων και άλλων περιοχών περιβαντολογικού ενδιαφέροντος.

Τα περισσότερα μοντέλα χρησιμοποιούν τις μετρήσεις που λαμβάνουν με τέτοιο τρόπο ώστε να καταλήξουν σε διάφορα συμπεράσματα και να αποφασίσουν αυτόνομα αν θα δράσουν με κάποια ενέργεια σύμφωνα με τις μετρήσεις την κάθε χρονική περίοδο, όπως για παράδειγμα αυτόματη άρδευση σε περίπτωση χαμηλής υγρασίας. Φυσικά υπάρχουν και άλλα μοντέλα, όπου οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή στατιστικών μοντέλων και προβλέψεων και η τελική απόφαση λαμβάνεται από τον χρήστη χωρίς να υπάρχει κάποιος αυτοματισμός ή κάποια πιθανή εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης ή τεχνίτης νοημοσύνης. Παρόλο που η επικοινωνία μεταξύ των μηχανών μειώνει την ανθρώπινη παρέμβαση, αποτρέποντας πολλά λάθη, οι λύσεις που έχουν ως παραλήπτη της πληροφορίας τον τελικό χρήστη είναι ένας σημαντικός αριθμός. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την εποπτεία της διαδικασίας με λεπτομερή καταγραφή των ληφθέντων ενεργειών, γεγονός που συμβάλλει στη βελτίωση των αποφάσεων που θα πρέπει να ληφθούν από τον χρήστη του ασύρματου δικτύου αισθητήρων, χρησιμοποιώντας κατάλληλα προγραμματισμένους αλγόριθμους οι οποίοι θα βοηθούν στην λήψη των σωστών ενεργειών. Ο συνδυασμός των κόμβων WSN, της δικτυακής υποδομής, την χρήση αυτοματισμών κλειστού βρόγχου, όπου οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται ως είσοδος σε κάποιον μηχανισμό που εκτελεί ενεργείες και λειτουργίες στην περιοχή μελέτης, ενός συστήματος συλλογής δεδομένων και ενός συστήματος ανάλυσης επεξεργασίας των δεδομένων με την χρήση των κατάλληλων αλγόριθμων και δημιουργούν ένα πλήρες σύστημα λήψης αποφάσεων.

5.3.2 Σύγκριση σχετικών ερευνητικών έργων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι επιλεγθείσες έρευνες δεν έχουν όλες ως προαπαιτούμενο την ύπαρξη αναφορών και στα έξι κριτήρια ως προς τα οποία θα συγκριθούν, άλλα έχουν επιλεγθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει τουλάχιστον μια εξειδικευμένη πρόταση για κάθε ένα από τα έξι κριτήρια. Αφού οι έρευνες αναλύθηκαν, και εξετάστηκαν ως προς τα έξι κριτήρια, έγινε μια κατηγοριοποίηση βάση αυτών των

στοιχείων. Η κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε για το κάθε κριτήριο, πλην του χρησιμοποιηθέντος πρωτοκόλλου, έχει τις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες, Not Available (Μη Διαθέσιμος) για περιπτώσεις όπου οι ερευνητές δεν έχουν κάνει καμία αναφορά στην εκάστοτε κατηγορία, low (χαμηλή) για περιπτώσεις όπου έχει γίνει μια απλή αναφορά χωρίς περισσότερες πληροφορίες ή για ανεπαρκείς προσεγγίσεις στην κατηγορία, medium (μέση) για περιπτώσεις όπου έχει γίνει αναφορά στο κριτήριο σύγκρισης και έχουν εστιάσει σε αυτό, είτε δεν προσφέρουν κάποια καινοτομία για λύσεις σε αυτό το κριτήριο, και τέλος high (υψηλή) για περιπτώσεις όπου η εργασία έχει επικεντρωθεί σε αυτό, είτε προσφέρει αναλυτική περιγραφή ή καινοτόμες λύσεις. Ο παρακάτω πίνακας 5-2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προαναφερθείσας κλίμακας.

Πίνακας 5-2 Συγκριτική Μελέτη Σχετικού Ερευνητικού Έργου

<i>Ερευνητικό Έργο</i>	Protocol	En	Pu	Sc	Rl	Sm
<i>Εφαρμογές WSN για χρήση σε εποπτεία λιμνών και υδάτων.</i>						
(Huang et al., 2015)	ZigBee, Cellular	H	H	NA	L	H
(Tang & Huang, 2010)	ZigBee	M	M	NA	H	NA
(Duarte et al., 2019)	NA	NA	M	NA	H	H
(Al-Dahoud et al., 2020)	ZigBee	L	H	NA	L	H
(Vijayakumar & Ramya, 2015)	Wi-Fi	NA	H	L	NA	H
(Rani et al., 2019)	NA	NA	L	NA	NA	NA
(Corke et al., 2010)	RF	H	M	NA	H	H
(Kamaludin & Ismail, 2017)	IEEE 802.15.4	M	M	NA	M	M
<i>Εφαρμογές WSN για χρήση στην γεωργία ακριβείας</i>						
(Núñez et al., 2018)	ZigBee, Cellular	M	H	NA	M	M
(Rodríguez et al., 2017)	ZigBee	NA	M	NA	M	H
(Guillermo et al., 2019)	ZigBee, LoRaWAN	NA	H	L	M	H
(Khalifeh et al., 2021)	ZigBee, LoRaWAN	M	L	M	L	H
(Haseeb et al., 2020)	NA	H	M	H	NA	M
(Vo et al., 2013)	RF, Cellular	H	H	NA	L	H

<i>Ερευνητικό Έργο</i>	Protocol	En	Pu	Sc	Rl	Sm
(Nurellari & Srivastava, 2018)	LoRaWAN	H	H	NA	H	H
(Silva et al., 2019)	LoRaWAN	H	L	NA	M	H
<i>Εφαρμογές WSN για εποπτεία και έλεγχο συστημάτων άρδευσης</i>						
(Bennis et al., 2017)	ZigBee	M	M	NA	L	H
(Khrijji et al., 2014)	IEEE 802.15.4	M	H	NA	L	H
(Corke et al., 2010)	RF	H	H	NA	H	NA
(Kodali et al., 2017)	IEEE 802.15.4	M	H	NA	M	M
<i>Εφαρμογές WSN για την διαχείριση οικοσυστημάτων</i>						
(Mainwaring et al., 2002)	RF	H	H	NA	H	NA
(Corke et al., 2010)	RF	H	NA	NA	H	NA
<i>H: High</i>	Protocol: Communication Protocol		Sc: Security			
<i>M: Medium</i>	En: Energy Efficiency		Rl: Real-Life Application			
<i>L: Low</i>	Pu: Physical Units Measurement		Sm: Simulation			
<i>NA: Not Available</i>						

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που έχουν επιλεγεί για την διασύνδεση μεταξύ των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου επικοινωνίας φαίνεται να καταλήγουν σε προτάσεις χαμηλής ισχύος ασύρματων μητροπολιτικών δικτύων WMAN ή ασύρματων δικτύων ευρείας περιοχής WWAN. Αποφεύγονται λύσεις με μικρή εμβέλεια που ανήκουν στα προσωπικά δίκτυα υπολογιστών WPAN όπως το Bluetooth και το NFC που θα μπορούσαμε να συναντήσουμε σε WSN εφαρμογές στον τομέα της υγείας καθώς και σε IoT συσκευές wearables συσκευές, ή τεχνολογίες που ανήκουν στα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN όπως το Wi-Fi που θα μπορούσαμε να συναντήσουμε σε εφαρμογές Smart Home, και προτιμώντας λύσεις όπως η παραδοσιακή ασύρματη επικοινωνία με ραδιοκύματα RF, το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4, το ZigBee που είναι υποκατηγορία του προαναφερθέντος, και το LoRaWAN. Ειδικότερα παρατηρούμε λύσεις όπου έχουν ληφθεί μετρήσεις με επιτυχία ακόμα και σε αποστάσεις μεγαλύτερες των δυο χιλιομέτρων από κόμβο αισθητήρα με προορισμό των πακέτων στον κόμβο gateway ή στο σταθμό βάσης σε περιοχές όπου δε υπήρχαν φυσικά εμπόδια ανάμεσα στους κόμβους (Nurellari & Srivastava, 2018; Silva et al., 2019), επίσης υπάρχουν προτάσεις που έχουν καταφέρει να καλύψουν με επιτυχία εκτάσεις που φτάνουν έως τα 6000 στρέμματα (Corke et al., 2010),

ακόμα και εκτάσεις στο μέγεθος ενός μικρού νησιού με μήκος που φτάνει τα 2.4 χιλιόμετρα (Mainwaring et al., 2002). Γενικότερα το δίκτυο αισθητήρων δεν παράγει μεγάλο όγκο δεδομένων οπότε οι υπάρχουσες τεχνολογικές λύσεις στην βιομηχανία είναι αρκετές για την επίτευξη ορθής διασύνδεσης ανάμεσα στους κόμβους του δικτύου, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου ο όγκος δεδομένων δημιουργούσε περιορισμούς στην αποστολή των πακέτων έχουν δοθεί λύσεις από την υπάρχουσα βιβλιογραφία για την αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων (Silva et al., 2019). Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο όγκος κυκλοφορίας επικοινωνίας στο εσωτερικό του δικτύου δεν θα αυξήσει τα επίπεδα του θορύβου που απαιτείτε για την αλλοίωση των συλλεχθέντων πληροφοριών.

Στο κομμάτι της δικτύωσης για το κανάλι που δημιουργεί την οπισθόζευξη, backhaul, μεταξύ του κόμβου gateway ή του σταθμού βάσης που εξυπηρετεί το WSN με τον απομακρυσμένο εξυπηρετητή, και κατ' επέκταση το διαδίκτυο, παρατηρείτε μια προτίμηση σε τεχνολογίες κυψελοειδή δικτύων GPRS και 3G (Bennis et al., 2017; Huang et al., 2015; Núñez et al., 2018; Vo et al., 2013). Σε μεμονωμένες περιπτώσεις υπάρχει ενσύρματη επικοινωνία με την χρήση πρωτοκόλλου ethernet για την επικοινωνία του κόμβου gateway με τον εξυπηρετητή (Kamaludin & Ismail, 2017) και σε άλλη περίπτωση έχει επιλεγεί η χρήση του πρωτοκόλλου LoRaWAN με κριτήριο την απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και εξυπηρετητή (Khalifeh et al., 2021). Φυσικά υπάρχουν και οι περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείτε η ίδια ασύρματη τεχνολογία που έχει εφαρμοστεί για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων, έτσι ώστε να υπάρχει ομοιογένεια μεταξύ όλων των κόμβων, για παράδειγμα περιπτώσεις όπου οι κόμβοι επικοινωνούσαν με την χρήση του πρωτοκόλλου ZigBee και μεταξύ τους άλλα και με τον κεντρικό εξυπηρετητή (Al-Dahoud et al., 2020). Η αξιοπιστία των παρεχόμενων υπηρεσιών, service reliability, είναι το κύριο κριτήριο με το οποίο οι περισσότεροι ερευνητές έχουν επιλέξει τα κυψελοειδή δίκτυα για την δημιουργία του καναλιού επικοινωνίας οπισθόζευξης μεταξύ του WSN και των εξυπηρετητών, είτε είναι φυσικοί διακομιστές, είτε είναι πόροι και πλατφόρμες στο υπολογιστικό νέφος. Ένα ακόμα σημαντικό κριτήριο με το οποίο οι ερευνητές επιλέγουν την χρήση κυψελοειδή δικτύων για την υλοποίηση της οπισθόζευξης είναι η έλλειψη υποδομών στις περιοχές μελέτης των δημοσιεύσεων. Από την στιγμή που οι πληροφορίες καταλήγουν στο διακομιστή του συστήματος, είτε αυτός είναι ένας φυσικός διακομιστής, είτε μια πλατφόρμα εικονικοποίησης, είτε μια βάση δεδομένων στο cloud, το φόρτο διακίνησης των ανταλλασσόμενων δεδομένων θα μεταφερθεί από το

ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και θα καταλήξει στο διαδίκτυο το οποίο είναι ήδη κατάλληλα δομημένο για να υποστηρίξει την συλλογή και την αποθήκευση των πληροφοριών που θα παραχθούν.

Το θέμα της ασφάλειας σε συσκευές IoT γενικότερα είναι μείζονος σημασίας, καθώς σχεδόν κάθε συσκευή γύρω μας θα μετατραπεί σε μια έξυπνη συσκευή, ο αριθμός των συσκευών που έχουν πρόσβαση στο Internet αυξάνεται ραγδαία. Κάποιες από αυτές τις συσκευές παράγουν και διακινούν σημαντικές πληροφορίες, όπως μετρήσεις από Smart Health υπηρεσίες, πληροφορίες για συστήματα ασφαλείας σε εφαρμογές Smart Home ή ελεγκτές βιομηχανικών μονάδων παραγωγής. Αυτό θα προκαλέσει σημαντικά προβλήματα αντιμετώπισης κατά την κυκλοφορία αυτών των δεδομένων. Καθώς όλες οι συσκευές θα συνδεθούν στο Internet ταυτόχρονα, στέλνοντας σημαντικές πληροφορίες στο σύννεφο, η ασφάλεια μπορεί να είναι μια μεγάλη απειλή. Κακόβουλοι χρήστες μπορεί να επιχειρήσουν να φτάσουν σε αυτές τις πληροφορίες. Η κρυπτογράφηση και η ασφάλεια των δεδομένων είναι η λύση στην οποία θα πρέπει να στραφούν οι ερευνητές άλλα και η βιομηχανία για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων. Στις περιπτώσεις των ερευνών που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, ελάχιστοι προτείνουν λύσης για την ασφάλεια των δεδομένων, θεωρώντας ελάχιστονος σημασίας τις πληροφορίες που παράγουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε περιπτώσεις που εφαρμόζονται σε γεωργικές καλλιέργειες ή σε κτηνοτροφικές μονάδες.

Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι ένας από τους βασικούς στόχους που θέλουν να πετύχουν οι ερευνητές. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας τα οποία αξιοποιήθηκαν και είναι σχεδιασμένα για IoT συσκευές έχουν ως παράγοντα στις προδιαγραφές τους την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, για αυτό άλλωστε και επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν είτε στις πειραματικές διατάξεις είτε στις βιομηχανικές εφαρμογές που υλοποιούνται στις έρευνες. Οι μικροελεγκτές και οι αισθητήρες των κόμβων είναι επίσης χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης με μειονέκτημα την χαμηλή απόδοση και σε επεξεργαστική ισχύ, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορούν οι κόμβοι να εκτελέσουν πολύπλοκες αλγοριθμικές πράξεις αυτόνομα. Πρακτικές όπως η κατάσταση αδράνειας, sleep mode, ή ο χρονικός έλεγχος ανάμεσα στις μετρήσεις για να ελαττώσουν την χρήση των αισθητήρων και την λήψη μετρήσεων σε χρονικές περιόδους όπου τα φυσικά μεγέθη τα οποία παρακολουθούνται από το WSN δεν ξεπερνάνε κάποια όρια, threshold, τα οποία έχουν οριστεί κατά τον σχεδιασμό του WSN ως κρίσιμα επίπεδα όπως για παράδειγμα η

υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας, είναι κάποιες από τις συνηθισμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την εξοικονόμηση ενέργειας από πλευράς αρχιτεκτονικής και σχεδιασμού των κόμβων WSN. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με την χρήση ηλιακών στοιχείων είναι μια προτεινόμενη λύση για σταθερούς κόμβους σε περιπτώσεις που οι καλλιέργειες είναι πολυετής και ο κόμβος δεν θα χρειαστεί να μετεγκατασταθεί την επόμενη καλλιεργητική περίοδο. Φυσικά υπήρχαν και περιπτώσεις όπου οι χρήσεις ηλιακών κυψελών επέφερε προβλήματα στην συντήρηση του δικτύου, δεδομένου ότι τοποθετήθηκαν σε περιοχές όπου τα φύλλα και τα κλαδιά από το φυσικό περιβάλλον δημιουργούσαν προβλήματα στους ηλιακούς συλλέκτες (Corke et al., 2010).

Ότι αφορά τους αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των δεδομένων στο κάθε πεδίο εφαρμογής, έχει παρατηρηθεί πως σε κάθε πεδίο εφαρμογής επιλέγονται διαφορετικοί αισθητήρες έτσι ώστε να καλύπτονται η ανάγκες της κάθε εφαρμογής κατά περίπτωση. Για τις προτάσεις που αφορούν την εποπτεία λιμνών και υδάτων, τα κυρίαρχα φυσικά μεγέθη που έχουν προτιμηθεί για την λήψη των περιβαλλοντολογικών μετρήσεων είναι αισθητήρες θερμοκρασίας, διαλυμένου οξυγόνου (DO), αγωγιμότητας και ενεργού οξυγόνου (pH). Σημαντικά προβλήματα που καλούνται να λύσουν τα WSN με την αξιοποίηση της γνώσης από τους παραπάνω αισθητήρες είναι η ανίχνευση μόλυνσης στους υδάτινους όγκους των περιοχών μελέτης, η παρακολούθηση της υδρόβιας βλάστησης και η αποτροπή δημιουργίας άλγης, καθώς η εμφάνιση νηματώδους άλγης αποτελεί δείκτη υγείας του καθαρού νερού και έχει ως επίπτωση την ανεπαρκή παροχή φωτός στα υδρόβια φυτά, καθώς και την σοβαρή μόλυνση του νερού από την κατανάλωση οξυγόνου κατά την αποσύνθεσης της νεκρής άλγη. Η ηθική εκμετάλλευση των υδάτινων πόρων, η διασφάλιση της ποιότητας του νερού και η ταξινόμηση του ως πόσιμο νερό ή σε διάφορες άλλες κλίμακες βασισμένες στις ληφθέντες μετρήσεις. Για τις προτάσεις στα υπόλοιπα πεδία που εστιάζουν κυρίως σε μετρήσεις σε χερσαίες περιοχές, όπως στο πεδίο της γεωργίας ακριβείας, παρατηρείτε ότι οι κυρίαρχοι αισθητήρες είναι αυτοί της θερμοκρασίας ατμόσφαιρας και εδάφους, της υγρασίας ατμόσφαιρας και εδάφους, και της φωτεινότητας.

Συγκεκριμένα για τις εφαρμογές WSN στα αρδευτικό σύστημα, τα οποία αποτελούν τμήμα των λύσεων στην γεωργία ακριβείας, χρησιμοποιούνται επιπλέον αισθητήρες πίεσης για τα κανάλια άρδευσης, αλατότητας, ενώ οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι και με μια ηλεκτροβάννα, απαρτίζοντας επί της ουσίας ένα σύστημα κλειστού

βρόγχου όπου υπάρχει ανατροφοδότηση και αξιοποίηση των μετρήσεων χωρίς απαραίτητα την ύπαρξή κάποιου διακομιστή, καθώς η υπολογιστική ισχύς του μικροελεγκτή είναι αρκετή για να επεξεργαστεί τον όγκο των πληροφοριών που χρειάζονται για την λήψη μιας τέτοιας απόφασής, υλοποιώντας ένα σύστημα ασαφούς λογικής, fuzzy logic. Αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται πιο σπάνια σε αυτές τις λύσεις είναι αισθητήρες για την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, για την υγρασία των φύλλων, για την στάθμη των νερού σε δεξαμενές ποτίσματος και άλλοι κατά περίπτωση. Σημαντικά προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι λύσεις WSN σε αυτά τα πεδία είναι η βελτίωση της παραγωγής, η παρακολούθηση της ανάπτυξης των καλλιεργειών, η ανίχνευσή ζιζανίων η αντιμετώπιση περιόδων ξηρασίας και φυσικά η ελεγχόμενη άρδευση με στόχο την εξοικονόμηση του νερού.

Εκτός των άλλων, ενδιαφέρον παρουσιάζει η επιλογή λύσεων στο υπολογιστικό νέφος. Συγκεκριμένα οι πιο πρόσφατες έρευνες, από το 2017 και έπειτα προτείνουν ως επί των πλείστων χρήση του υπολογιστικού νέφους για την αποθήκευση και την επεξεργασία των δεδομένων, έναντι των ερευνών πριν το 2017 όπου η πλειοψηφία των ερευνών επιλέγει φυσικούς διακομιστές για τις εφαρμογές τους. Επίσης παρατηρείτε ότι στις έρευνες που έχει δοθεί μεγάλη σημασία στο κομμάτι της επιστήμης των μεγάλων δεδομένων και της αξιοποίησης των δεδομένων για τις ανάγκες της κάθε έρευνας υπάρχει εκτενή αναφορά στην τεχνολογία της βάσης δεδομένων η οποία έχει χρησιμοποιηθεί, καθώς και σε τυχόν γλώσσες προγραμματισμού ή άλλες τεχνικές μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης που έχουν αξιοποιηθεί για αυτούς τους σκοπούς. Σε αντίθεση, έρευνες που εστιάζουν κυρίως στην υλικοτεχνική υποδομή, σε τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας, αξιοποίησης ασύρματων πρωτοκόλλων και γενικά προσεγγίζουν τα δίκτυα WSN από την σκοπιά της δικτυακής υποδομής δεν υπάρχει εκτενή αναφορά στο κομμάτι των δεδομένων και μπορεί η έρευνα να αρκείτε απλά στην υλοποίηση ενός απλού data logger με την χρήση μια κοινής κάρτας μνήμης.

6 Αποτελέσματα

6.1 Σχεδίαση WSN εφαρμογής για την περιοχή μελέτης

Το εθνικό πάρκο λιμνών Κορώνειας Βόλβης και Μακεδονικών Τεμπών, που αποτελεί την ευρύτερη περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, περιλαμβάνει τρεις ζώνες. Την ζώνη Α που περιλαμβάνει τις λίμνες Κορώνεια και Βόλβη με τις όχθες και κάποιες παραλίμνιες εκτάσεις, και τις ζώνες Β και Γ οι οποίες είναι περιφερειακές (Φορέας Διαχείρισης Λιμνών Κορώνειας - Βόλβης, 2015). Και οι δυο λίμνες που ανήκουν στο εθνικό πάρκο αποτελούν περιοχές ισάξιου περιβαλλοντολογικού ενδιαφέροντος, γεωργικής και οικονομικής σημασίας. Σύμφωνα με τις βιβλιογραφικές πηγές η λίμνη με την μεγαλύτερη οικολογική καταστροφή είναι η λίμνη Κορώνεια. Βάσει των μελετών που έχουν αναλυθεί, η έκταση όλου του εθνικού πάρκου θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να παρακολουθηθεί με μια λύση WSN, καθώς θα πρέπει να ληφθούν διάφοροι παράγοντες για τον σχεδιασμό της λύσης, όπως η εμβέλεια των ασύρματων τεχνολογιών, το κόστος εγκατάστασης, το κόστος συντήρησης, η ενεργειακή αυτονομία, η τοποθέτηση των κόμβων και στον σταθμών βάσεων και άλλα, και δεδομένου πως η υλοποίηση μιας εφαρμογής τέτοιας κλίμακας δεν θα ήταν εύκολο να υλοποιηθεί.

Η πρόταση της παρούσας εργασίας για την εποπτεία των αρδευτικών συστημάτων στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις του εθνικού πάρκου είναι να σχεδιαστεί ένα πιλοτικό ετερογενές WSN πλαίσιο για την εποπτεία των εκτάσεων της λίμνης Κορώνειας, με δυνατότητες μελλοντικής επέκτασης στις εκτάσεις της λίμνης Βόλβης, λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα που μπορεί να αποφέρει η πιθανή υλοποίηση της εφαρμογής WSN στις εκτάσεις της λίμνης Κορώνειας. Για την υλοποίηση μιας τέτοια πρότασης θα πρέπει το πλαίσιο WSN αν επικεντρωθεί στην ζώνη Α της λίμνης Κορώνειας με προσέγγιση στην επίβλεψη της ποιότητας των υδάτων της λίμνης, και σε τμήματα της ζώνης Β, περιφερειακά της λίμνης, με προσέγγιση στις αρδευόμενες εκτάσεις της περιοχής με στόχο την αποφυγή χρήσης των υδάτινων πόρων σε χρονικές στιγμές με αυξημένη θερμοκρασία καθώς και με ακραίες μεταβολές των καιρικών συνθηκών προς αποφυγής σπατάλης σε περιπτώσεις όπως λόγω εξάτμισης ή λόγω πιθανών βροχοπτώσεων.

6.1.1 Σχεδίαση πλαισίου WSN για την εποπτεία της λίμνης Κορώνειας

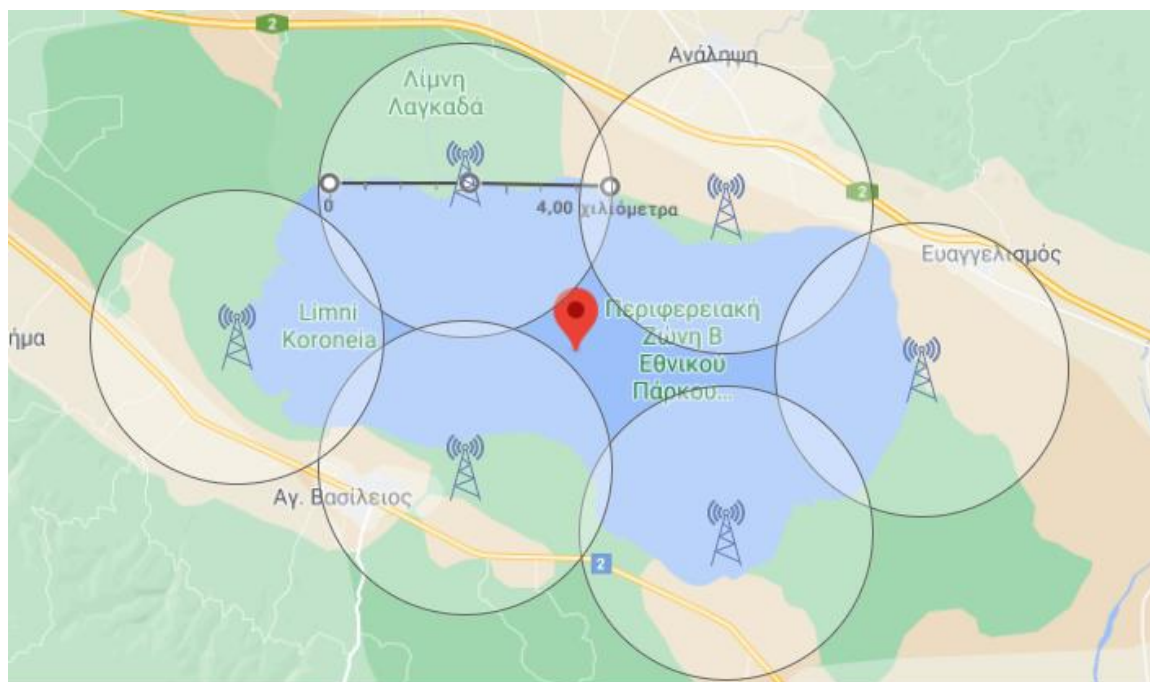
Για την εποπτεία της ζώνης Α και συγκεκριμένα του υδάτινού όγκου της λίμνης Κορώνειας, η προταθείσα λύση θα βασιστεί σε αντίστοιχες προσεγγίσεις όπως στις αναλυθέντες έρευνες όπου οι ερευνητές είχαν ως στόχο την επίτευξη της διατήρησης της ποιότητας των υδάτων στις λίμνες των περιοχών μελέτης της κάθε έρευνας (Corke et al., 2010; Kamaludin & Ismail, 2017; Tang & Huang, 2010; Vijayakumar & Ramya, 2015), κάποιες από τις οποίες παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με την περιοχή μελέτης της παρούσας ερευνάς, όπως για παράδειγμα η λίμνη Tonga η οποία αποτελεί επίσης προστατευόμενο υγρότοπο βάση της συνθήκης Ramsar (Al-Dahoud et al., 2020). Στις έρευνες που αναλύθηκαν, υπήρχαν λύσεις όπου τα πλαίσια WSN που προτάθηκαν μπόρεσαν με επιτυχία να καλύψουν τις απαιτήσεις για την εποπτεία λιμνών και υδάτινων πόρων, χωρίς να διαταράζουν την φυσική ηρεμία του οικοσυστήματος που παρακολουθούσαν, ενώ παράλληλα αξιολόγησαν τις συλλεχθέντων μετρήσεις για την αξιοποίηση τους ως δεδομένα σε αλγόριθμους μηχανικής μάθησης για την εφαρμογή τους σε περιβαλλοντολογικές λύσεις. Εφόσον η μετρήσεις που απαιτούνται να ληφθούν για την εποπτεία αυτής της περιοχής απαιτούν τους ανάλογους αισθητήρες οι τεχνικές προδιαγραφές για τους κόμβους WSN θα σχεδιαστούν με στόχο να καλύψουν αυτές τις ανάγκες.

Στο πεδίο της εποπτείας των αρδευόμενων εκτάσεων της ζώνης Β, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης από τις προτάσεις που αναλύθηκαν στα πεδία της γεωργίας ακριβείας, στον έλεγχο αρδευτικών συστημάτων και στην διαχείριση οικοσυστημάτων θα χρησιμοποιηθούν, με στόχο την αξιοποίηση τους για την σχεδίαση των χαρακτηριστικών των κόμβων WSN, για την λήψη των κατάλληλων μετρήσεων σε μια βέλτιστη λύση, με δυνατότητα εποπτείας των αρδευόμενων εκτάσεων σε μια περιοχή πολλών στρεμμάτων, όπως αυτή της ζώνης Β περιμετρικά της λίμνης Κορώνειας.

Λαμβάνοντας υπόψιν την γεωγραφική περιοχή και την περίμετρο της λίμνης Κορώνειας, για την υλοποίηση μιας τέτοιας λύσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν κόμβοι WSN ομαδοποιημένοι σε συμπλέγματα cluster. Κάθε σύμπλεγμα cluster θα πρέπει έχει έναν κόμβο ο οποίος θα χρησιμοποιείται ως κεφαλή του συμπλέγματος, cluster head, και να επικοινωνεί με έναν σταθμό βάσης, που θα λειτουργεί ως πύλη gateway για την δικτύωση όλων των κόμβων και την μεσολάβηση για την επικοινωνία με τον διακομιστή του WSN.

6.1.2 Τεχνικές προδιαγραφές δικτυακής υποδομής

Για την υλοποίηση της πρότασης, όπως έχει ήδη αναφερθεί θα πρέπει οι κόμβοι να ομαδοποιηθούν και να χωριστούν σε συμπλέγματα cluster. Σε κάθε σύμπλεγμα θα πρέπει να ανατεθεί ένα τμήμα από την περιοχή μελέτης, και συγκεκριμένα εφόσον θεωρείτε ότι η πιλοτική εφαρμογή της πρότασης θα πρέπει να σχεδιαστεί πρώτα με προδιαγραφές τις εκτάσεις της λίμνης Κορώνειας, τα συμπλέγματα θα πρέπει να κατανεμηθούν στις περιοχές περιμετρικά της λίμνης. Λαμβάνοντάς υπόψιν τις αναλυθέντες μελέτες όπου ήταν εφικτό να αποσταλθούν πακέτα δεδομένων με την χρήση ασύρματων τεχνολογιών κατάλληλες για την δικτύωση IoT συσκευών με μέγιστη απόσταση 2400 μέτρα, και την περίμετρο της λίμνης Κορώνειας, η οποία σήμερα ξεπερνάει τα 25 χιλιόμετρα, μια πιθανή πρόταση η οποία θα μπορούσε να υλοποιηθεί για την εποπτεία των τμημάτων που αφορούν την περιοχή μελέτη είναι η χρήση έξι σταθμών βάσεων ως gateways. Κάθε σταθμός βάσης θα έχει υπό την επίβλεψη του την περιοχή που σχηματίζεται από τον νοητό κύκλο με ακτίνα 2 χιλιομέτρων από τον σταθμό βάσης, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6-1. Κάθε σταθμός βάσης μπορεί να επικοινωνεί με ένα η περισσότερα clusters, και στην συνέχεια με την χρήση ενός δικτύου οπισθοζεύξης με το διαδίκτυο και τους τερματικούς εξυπηρετητές που ολοκληρώνουν το πλαίσιο της λύσης WSN.



Εικόνα 6-1 Πρόταση δικτύωσης WSN για την λίμνη Κορώνεια

Για την δικτύωση των Cluster μεταξύ τους και την επικοινωνίας τους με τον σταθμό βάσης προτείνεται η επιλογή της ασύρματης τεχνολογίας LoRaWAN. Η συγκεκριμένη τεχνολογία προτείνεται σύμφωνα με τα αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης, καθώς στις μελέτες περίπτωσης που έχουν αναλυθεί, οι προτάσεις όπου οι απαιτήσεις στην εμβέλεια ξεπερνούσαν τα δυο χιλιόμετρα, η χρήση του πρωτοκόλλου LoRaWAN είχε ως αποτέλεσμα την διασφάλιση της ακεραιότητας των επικοινωνιών και ελαχιστοποίηση των απολεσθέντων πακέτων ανάμεσα στους κόμβους και τον σταθμό βάσης (Guillermo et al., 2019; Khalifeh et al., 2021; Nurellari & Srivastava, 2018; Silva et al., 2019). Επίσης σύμφωνα με πληροφορίες που έχουν αναφερθεί στην ενότητα 2.4.2 και συγκεκριμένα στα στοιχεία του πίνακα 2-1, το πρωτόκολλο LoRa επιλέγεται ανάμεσα στα τρία καταλληλότερα για γεωργικές εφαρμογές και για εφαρμογές εποπτείας υδάτων (Subashini et al., 2018).

Το δίκτυο οπισθόζευξης είναι σημαντικό κομμάτι της εφαρμογής, καθώς είναι το κομβικό σημείο από το οποίο θα πρέπει να περάσουν όλες οι μετρήσεις και οι πληροφορίες για να καταλήξουν στο διαδίκτυο. Επίσης είναι υπεύθυνο για την δικτύωση όλων των gateways. Θα μπορούσε να θεωρηθεί πως είναι ο διαμεσολαβητής μεταξύ του δικτύου WSN και του συστήματος συλλογής δεδομένων και κατ' επέκταση τον εξυπηρετητή ο οποίος είναι υπεύθυνος να επεξεργαστεί τα δεδομένα και να τα παρέχει στον τελικό χρήστη. Για την επίτευξη αυτής της επικοινωνίας χρειάζεται ένα ασφαλές και αξιόπιστο κανάλι επικοινωνίας, ικανό να λειτουργεί αδιάλειπτα και να μπορεί να αποστείλει τα μεταδιδόμενα πακέτα χωρίς παρεμβολές και αλλοιώσεις. Για την υλοποίησή του δικτύου οπισθόζευξης, backhaul, λαμβάνοντας υπόψιν την έλλειψη υποδομών στην ευρύτερη περιοχή καθώς πρόκειται για μια γεωργική έκταση, προτείνεται η χρήση κυψελοειδή δικτύου 4G με δυνατότητα αναβάθμισης σε 5G αυτό καθιστή δυνατό στις υποδομές που καλύπτουν την περιοχή.

6.1.3 Τεχνικές προδιαγραφές κόμβων WSN

Για την αποτελεσματική λήψη μετρήσεων από το φυσικό περιβάλλον θα πρέπει οι κόμβοι αισθητήρων να σχεδιαστούν έτσι ώστε να καλύψουν τις ανάγκες σύμφωνα με τις προδιαγραφές της κάθε ζώνης. Για την ζώνη Α, μια επαρκής πρόταση για την εποπτεία της επιφάνειας της λίμνης, της ποιότητας των υδάτων και γενικότερα της κατάστασης της υγείας του οικοσυστήματος της λίμνης, είναι η σχεδίαση πλωτών κόμβων WSN

εξοπλισμένων με αισθητήρες ενεργού οξύτητας pH, διαλυμένου οξυγόνου DO, θερμοκρασίας, αγωγιμότητας, θολότητας και στάθμης νερού. Για την επιβεβαίωση του σημείου δειγματοληψίας των μετρήσεων θα πρέπει οι κόμβοι εκτός από τους παραπάνω αισθητήρες να είναι εξοπλισμένοι και πομποδέκτη GPS, για την αποστολή του γεωγραφικού στίγματος μαζί με τις ληφθείσες μετρήσεις. Λαμβάνοντας υπόψιν τα εμπόδια που έχουν συναντηθεί από την υλοποίηση παρόμοιων προτάσεων θα πρέπει να ληφθούν κάποια προληπτικά μέτρα για την αποφυγή προβλημάτων όπως η αντανάκλαση των ραδιοκυμάτων στην επιφάνεια του νερού με αποτέλεσμα την αλλοίωση των αποσταλμένων πακέτων μετάδοσης (Corke et al., 2010).

Οι προδιαγραφές για τους κόμβους αισθητήρων οι οποίοι θα είναι υπεύθυνοι για την λήψη μετρήσεων από τα τμήματα της περιοχής της ζώνης B τα οποία είναι εντός της εμβέλειας των σταθμών βάσεων θα σχεδιαστούν βασιζόμενοι στα συμπεράσματα στα οποία έχουν εξαχθεί από την ανάλυση και την σύγκριση των προτάσεων στα πεδία της έξυπνης γεωργίας, του ελέγχου αρδευτικών συστημάτων καθώς και της εποπτείας περιοχών περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος. Εφόσον η περιοχή της ζώνης B αποτελεί τμήμα της χερσαίας έκταση του περιβαλλοντικού πάρκου, οι μετρήσεις οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν είναι αυτές των φυσικών μεγεθών υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους, ατμοσφαιρικής υγρασίας και θερμοκρασίας και φωτεινότητας με την χρήση των αντίστοιχων αισθητήρων. Η λήψη του γεωγραφικού στίγματος δεν θεωρείται απαραίτητη για τους χερσαίους κόμβους καθώς η θέση τους θα είναι σταθερή.

Για την σχεδίαση των κόμβων θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι τεχνικές προδιαγραφές του κυτίου του κόμβου, το οποίο θα πρέπει να είναι στεγανοποιημένο για την αποφυγή βραχυκυκλώματος λόγω υγρασίας και να προστατεύει τα ηλεκτρονικά μέρη του κόμβου από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Η αδιαβροχοποίηση και η στεγανοποίηση ισχύει και για τους δυο τύπους κόμβων, είτε πρόκειται για τους χερσαίους κόμβους είτε για τους πλωτούς. Επίσης επιπλέον για τους χερσαίους κόμβους θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η προστασία τους από διάφορες εισβολές ή για οποιαδήποτε κακόβουλή φυσική επίθεση.

Η τροφοδοσία των κόμβων μπορεί να γίνει με την επαναφόρτιση από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με την χρήση ηλιακών κυψελών. Επιπλέον η χρήση τεχνικών όπως η κατάσταση αναμονής, sleep mode, ή η αξιοποίηση διάφορων δοκιμασμένων αλγόριθμων κατά την λήψη μετρήσεων ή κατά την αποστολή των πακέτων μπορούν να συμβάλουν

θετικά στην εξοικονόμηση ενέργειας και στην επιμήκυνση της διάρκειάς ζωής των κόμβων WSN. Αντίστοιχα προβλήματα με την χρήση ηλιακών συλλεκτών, που αντιμετωπίστηκαν από τους ερευνητές στις μελέτες περίπτωσης που έχουν αναλυθεί (Corke et al., 2010), δεν παρουσιάζουν ομοιότητες με την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας καθώς δεν υπάρχει δασική βλάστηση στην ζώνη Β του εθνικού πάρκου των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης, άλλα κυρίως θαμνώδης ή ποώδης βλάστηση με διεσπαρμένα δέντρα.

Αν και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μελετών που έχουν αναλυθεί ο τομέας της ασφάλειας θεωρείται ελάχιστονος σημασίας για τα δίκτυα WSN, για την περιοχή των λιμνών θεωρείται ότι είναι κύριας σημασίας, καθώς στο παρελθόν κατά την περίοδο που υπήρχε έντονη βιομηχανική δραστηριότητα στην περιοχή υπήρχε και το φαινόμενο της ανεξέλεγκτης και παράνομης ρίψης αποβλήτων στον υδροφόρο ορίζοντα του εθνικού πάρκου. Οπότε για να αποκλείσουμε το παραπάνω γεγονός θα πρέπει να εξασφαλισθεί η ασφάλεια και η εμπιστευτικότητα του καναλιού επικοινωνίας, η ακεραιότητα των πληροφοριών και των μετρήσεων και φυσικά η διαθεσιμότητα όλων των πόρων του δικτύου, είτε πρόκειται για υλικοτεχνικές υποδομές, είτε για πληροφορίες. Για την επίτευξη των παραπάνω θα πρέπει να θεσμοθετηθεί ένα σύστημα αυθεντικοποίησης των κόμβων και εξουσιοδότησης τους για εκπομπή μόνο εφόσον το κανάλι επικοινωνίας είναι ασφαλές. Για να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα των δεδομένων θα πρέπει να εφαρμοστεί μια τεχνική κρυπτογράφησης κατά την αποστολή. Η πρόταση της παρούσας εργασίας είναι κρυπτογράφηση με την χρήση δημόσιου κλειδιού. Για να υλοποιηθεί μια τέτοια τεχνική κρυπτογράφησης θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν η υπολογιστική ισχύ των κόμβων και το μέγεθος των μεταδιδόμενων πακέτων, καθώς η κρυπτογράφηση των πακέτων απαιτεί κατανάλωση υπολογιστικών πόρων, χρήση ενέργειας και αύξηση του όγκου στα πακέτα μετάδοσης. Όλες αυτές οι παράμετροι θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την σχεδίαση της τεχνικής κρυπτογράφησης καθώς όπως έχουμε ήδη αναφέρει, και τα τρία σημεία είναι κομβικά για μια συσκευή που ανήκει στο διαδίκτυο των πραγμάτων και λειτουργεί με τους λιγότερους δυνατούς πόρους. Φυσικά εκτός από την διασφάλιση των επικοινωνιών και των πληροφοριών θα πρέπει να ασφαλίσουμε και φυσικά τους κόμβους μας, δεδομένου ότι μια επίθεση σε μια εφαρμογή WSN δεν μπορεί να είναι μόνο μια κυβερνοεπίθεση άλλα μπορεί να είναι μια φυσική επίθεση, για παράδειγμα μια επίθεση άρνησης υπηρεσιών σε φυσικό επίπεδο θα ήταν αν ένας κακόβουλος χρήστης

απομακρύνει τους κόμβους από το φυσικό περιβάλλον το οποίο έχουν ανατεθεί να καταγράφουν. Όλα αυτά θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό των κόμβων και είναι ίσως η μεγαλύτερη πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί.

6.1.4 Σχεδίαση συστήματος συλλογής δεδομένων

Γενικότερα στο διαδίκτυο των πραγμάτων έχουν γίνει πολλές βιομηχανικές και ακαδημαϊκές προσπάθειες για τη δημιουργία καινοτόμων εφαρμογών. Το μεγαλύτερο κοινό που έχουν όλες οι λύσεις IoT είναι ότι είναι ένα δίκτυο συνδεδεμένων αντικειμένων που δημιουργούν δεδομένα. Η ανταλλαγή και η ανάλυση των δεδομένων είναι αυτό που οδηγεί στην δημιουργία έξυπνων εφαρμογών. Όπως την υλοποίηση κάθε IoT λύσης, έτσι για την για την προτεινόμενη WSN εφαρμογή για την εποπτεία των προστατευόμενων ζωνών της λίμνης Κορώνειας θα πρέπει να υλοποιηθεί ένα σύστημα συγκέντρωσης και αποθήκευσης των δεδομένων που συλλέγονται από τους WSN κόμβους.

Η πρόταση της παρούσας εργασίας για την επιλογή της κατάλληλης βάσης δεδομένων ώστε να υποστηρίξει την WSN εφαρμογή και να χρησιμοποιηθεί ως ένα σύγχρονο σύστημα συλλογής δεδομένων είναι μια NoSQL βάση δεδομένων, όπως είναι η MongoDB ή η Apache Cassandra, οι οποίες παρέχουν την δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων από αισθητήρες, είτε σε φυσικούς διακομιστές, είτε σε διακομιστές στο υπολογιστικό νέφος, παρέχοντας υψηλή διαθεσιμότητα. Ακολουθώντας την τάση της τεχνολογίας, και λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι δημοφιλέστερες πλατφόρμες των παροχών υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους προσφέρουν λύσεις για υπηρεσίες NoSQL βάσεων δεδομένων με πλήρη υποστήριξη για υποδομές IoT, η επιλογή του cloud για την φιλοξενία της βάσης δεδομένων αλλά και όλης της εφαρμογής WSN θεωρείται η πλέον κατάλληλη έναντι παραδοσιακών λύσεων σε φυσικούς διακομιστές.

Επιπρόσθετα από την συλλογή και αποθήκευση των δεδομένων, στόχος είναι η επεξεργασία και ανάλυση τους με σκοπό την υλοποίηση μια ολοκληρωμένης λύσης όπου όλα τα συνδεδεμένα αντικείμενα ανταλλάσσουν πληροφορίες με τα κατάλληλα πρωτόκολλα επικοινωνίας χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Το ιδεατό σενάριο είναι η ανάλυση των πληροφοριών να παράγει την κατάλληλη γνώση η οποία να συνεισφέρει στην σωστή διαχείριση των υδάτων αλλά και στην διαδικασία λήψης αποφάσεων για τις αρδευόμενες εκτάσεις στα τμήματα της ζώνης Β του εθνικού πάρκου τα οποία είναι κάτω από την εποπτεία του δικτύου WSN.

6.2 Ρίσκα υλοποίησης

Γενικότερα ο γεωργικός τομέας δεν είναι γνωστός για την υιοθέτηση πρωτοπόρων λύσεων και τεχνολογικών καινοτομιών, ούτε να κάνει χρήση βέλτιστων πρακτικών που βασίζονται στην επιστήμη, αντ' αυτού έχει μακρά παράδοση να βασίζεται σε παραδοσιακές πρακτικές οι οποίες έχουν προέρχονται από την εμπειρία και την πρακτικές μεθόδους καλλιέργειας σύμφωνα με το μικρόκλιμα της κάθε περιοχής.

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι οι οποίοι αιτιολογούν την παραπάνω συμπεριφορά, ορισμένοι από αυτούς είναι η κουλτούρα στην κοινότητα των γεωργών, οι δεξιότητες, οι τρέχουσες διαδικασίες διαχείρισης πληροφοριών και άλλα. Ίσως ο μεγαλύτερος λόγος, μέχρι πρόσφατα, ήταν οι περιορισμοί τόσο των τεχνολογιών όσο και των γεωργικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη της γεωργίας ακριβείας (Delgado et al., 2019). Συγκεκριμένα για τις λίμνες Κορώνειας και Βόλβης, ενώ υπάρχει ήδη εγκατεστημένο ένα δίκτυο τηλεμετρίας από το 2008 με 35 σταθμούς, το οποίο δεν έχει ληφθεί υπόψιν κατά την υλοποίηση της παρούσας εργασίας. Δεν έχει γίνει καμία ενέργεια για την αξιοποίηση αυτών των μετρήσεων προς όφελος των αγροτικών εκτάσεων, το οποίο επιβεβαιώνει και τα παραπάνω.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, οι μέχρι τώρα προτάσεις για την αντιμετώπιση της μείωσης του αρδευτικού νερού στην υπολεκάνη της Κορώνειας με βάση τα δεδομένα και την ανάλυση που έχει προηγηθεί θα έπρεπε να κινηθεί σε τρεις βασικούς άξονες, στην αναδιάρθρωση καλλιεργειών, στα δικαιώματα χρήσης νερού και στην αλλαγή μεθόδου άρδευσης (Τεκίδης, 2012). Δυστυχώς ότι αφορά τις αρδευόμενες εκτάσεις της περιοχής, το μοναδικό μέτρο το οποίο έχει εφαρμοστεί και θεωρείται ότι είχε αποτέλεσμα ήταν το σφράγισμα των παράνομων γεωτρήσεων στην ευρύτερη περιοχή της ζώνης Β και των δυο λιμνών. Όλες οι παραπάνω λύσεις απαιτούν είτε την επέμβαση της πολιτείας, είτε την συμμόρφωση των αγροτών της περιοχής με προτάσεις οι οποίες είτε δεν είναι οικονομικά εφικτές από τον κάθε παραγωγό, είτε δεν υπάρχει η κατάλληλη τεχνογνωσία για να υλοποιηθούν. Μια ολοκληρωμένη λύση WSN θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στην περιοχή με την ελάχιστη απαίτηση ανθρώπινης παρουσίας για την λειτουργία του.

Επίλογος

Σύνοψη και συμπεράσματα

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων έχει πολλές δυνατότητες και ευκαιρίες στο εγγύς μέλλον. Πολλές συσκευές σε όλο τον κόσμο αναμένεται πολύ σύντομα να ενταχθούν στο ευρύ δίκτυο των πραγμάτων και των συσκευών. Οι τεράστιες αγορές αναμένεται να είναι ανοικτές για εφαρμογές WSN, και γενικά για IoT συσκευές. Παράλληλα θα αξιοποιηθούν και νέα πρωτόκολλα επικοινωνίας και εφαρμογές λογισμικού. Επιπλέον, η ποιότητα ζωής των ανθρώπων αναμένεται να αυξηθεί, οι εργασίες και οι βιομηχανίες αναμένεται να έχουν πολύ υψηλότερες επιδόσεις, με τη βοήθεια του αυτοματισμού και της μεγάλης ποσότητας πληροφοριών που διακινούνται στο διαδίκτυο των πραγμάτων. Σε αυτή τη εργασία, πραγματοποιήθηκε μια συγκριτική μελέτη για να επισημανθούν τα πλεονεκτήματα χρήσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων στην γεωργία ακριβείας με απώτερο στόχο την πρόταση για την εφαρμογή τους στην Ελληνική ύπαιθρο και συγκεκριμένα στο εθνικό πάρκο υδροτόπων των λιμνών Κορώνειας Βόλβης και Μακεδονικών Τεμπών. Δεδομένου ότι η εξέλιξη της αγροτικής παραγωγής στην Ελλάδα κατά την τελευταία 20ετία παρουσιάζει ανοδική τάση, με μονάδα μέτρησης την συνολική χρησιμοποιούμενη γεωργική έκταση. Οι ζεστοί θερινοί μήνες καθώς και ανάγκη για εξοικονόμηση φυσικών πόρων, και κυρίως αρδευτικών υδάτων, αποτελούν κίνητρο για την αξιοποίηση εφαρμογών WSN με στόχο την οικονομία στο νερό και το αποτελεσματικότερο πότισμα των καλλιεργειών χωρίς σπατάλη.

Η γεωργία ακριβείας εμφανίστηκε από τη δεκαετία του 1980 λόγω της ανάπτυξης πολλών βασικών τεχνολογιών και της γενικότερης την αξιοποίηση των επιστημών με στόχο της βελτίωσης της ποιότητας και την μείωση του κόστους των παραγωγών. Οι νέες τεχνολογίες όπως το GPS, οι δορυφορικές εικόνες και οι νέες μέθοδοι γενετικής τροποποίησης στην πράσινη επανάσταση αντιπροσώπευαν μια διαταραχή στη γεωργία που δεν παρατηρήθηκε μετά την εισαγωγή του πρώτου επιτυχημένου εμπορικού ελκυστήρα στις αρχές της δεκαετίας του 1900 και την πράσινη επανάσταση που σημειώθηκε μεταξύ του 1950 και του 1960. Με τον αυξανόμενο αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής η επόμενη επανάσταση στην γεωργία ακριβείας θα καθοδηγείται από το WSN. Ένα σύστημα λήψης αποφάσεων που θα μπορούσε να αξιοποιήσει τις προηγούμενες τεχνολογίες σε συνδυασμό με την ανάλυση Big Data με στόχο την βελτίωση των

συστημάτων λήψης αποφάσεων στο τομέα της γεωργίας. Μεταξύ άλλων θετικών επιπτώσεων, το WSN μπορεί να συμβάλει σε αύξηση των αποδόσεων των παραγωγών, προσαρμογή των καλλιεργητικών τεχνικών στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και ακόμα και αναστροφή αυτών των επιπτώσεων, βιωσιμότητα των γεωργικών συστημάτων και αυξημένη αειφορία εκτός του χωραφιού και σε όλες τις λεκάνες απορροής, μειώνοντας την κατασπατάληση των υδάτων και συμβάλλοντας στη συνολική βιωσιμότητα.

Όρια και περιορισμοί της έρευνας

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι δεν έχει υλοποιηθεί η πειραματική προσομοίωση της πρότασης σε περιβάλλον εξομοίωσης, δεν μπορεί να καταστεί δυνατή η αξιοποίηση μια τέτοια λύσης αν πρώτα δεν επικυρωθούν τα αποτελέσματα της σε πειραματικό περιβάλλον. Επίσης δεν έχουν ληφθεί υπόψιν η παρούσες εγκαταστάσεις τηλεμετρίας στην περιοχή και τυχόν παρεμβολές που μπορεί να προκύψουν από τα συστήματα μετρήσεων της υπάρχουσας υποδομής, ή πιθανότητες συνεργασίας της παρούσας υποδομής με ένα νέο δίκτυο WSN.

Μελλοντικές Επεκτάσεις

Κατά την συγγραφή της παρούσας εργασίας έγινε μια προσπάθεια υλοποίησης ενός πειραματικού μοντέλου στην πλατφόρμα εξομοίωσης Cooja του λειτουργικού συστήματος για IoT συσκευές ContikiOS. Η προσέγγιση που ακολουθήσε ήταν πρώτα να γίνει η απόπειρα της εξομοίωσης στο περιβάλλον του Cooja και έπειτα να συνεχιστεί η συγγραφή της εργασίας βασισμένοι στα αποτελέσματα τα οποία θα μπορούσαν να εξαχθούν από την εξομοίωση.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν κατέστη δυνατό να αποφέρει αποτελέσματα καθώς δεν υπήρχε το θεωρητικό υπόβαθρό το οποίο αποκομήθηκε κατά την ανάλυση του σχετικού ερευνητικού έργου. Η έλλειψη του θεωρητικού υπόβαθρου είχε ως αποτέλεσμα να μην μπορούν να θεσμοθετηθούν διάφορα σενάρια στην επικοινωνία των κόμβων. Στα σενάρια αυτά θα έπρεπε να ληφθούν υπόψιν από τις πιο απλές πληροφορίες, όπως είναι η σωστή τοποθέτηση των κόμβων στην περιοχή μελέτης, ως πιο πολύπλοκα χαρακτηριστικά, όπως το μέγεθος το μεταδιδόμενων πακέτων ανάλογα με τον αριθμό των μεγεθών προς μέτρηση ή σενάρια με μετρήσεις όπου έχει ενεργοποιηθεί η κατάσταση αδράνειας, sleep mode. Εκτός από τις ελλείψεις στο θεωρητικό υπόβαθρο υπήρχαν και

ελλείψεις στις τεχνικές γνώσεις οι οποίες δημιούργησαν επιπλέον εμπόδια στην υλοποίηση μιας πειραματικής μελέτης.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω η έκταση της παρούσας εργασίας δεν έχει επεκταθεί στην πειραματική υλοποίηση της πρότασης WSN για την περιοχή των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης αλλά έχει επικεντρωθεί στην θεωρητική προσέγγιση του πλαισίου WSN για την εποπτεία των αρδευόμενων εκτάσεων της περιοχής, καθώς και της ίδιας της λίμνης Κορώνειας.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως η σημαντικότερη μελλοντική επέκταση της παρουσίας έρευνας είναι η πειραματική υλοποίηση της πρότασης και μετέπειτα η δοκιμή της σε πραγματικές συνθήκες. Μελλοντικός στόχος είναι η υλοποίηση μια ολοκληρωμένης πλατφόρμας με προσέγγιση όχι τόσο στις υλικοτεχνικές υποδομές ενός WSN αλλά κυρίως από την πλευρά της πληροφορίας. Αξίζει να σημειωθεί πως η επιστήμη των Big Data έχει μια συνεχώς αυξανόμενη τάση τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο τα μεγάλα δεδομένα απασχολούν τις τεχνολογικές εξελίξεις και κυριαρχούν στην επιστημονική έρευνα αλλά και στην βιομηχανία. Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα δίκτυα WSN έχουν ως κύρια εργασία την παραγωγή δεδομένων. Αυτά τα δεδομένα μπορούν με την χρήση των κατάλληλων αλγόριθμων και της σωστής επεξεργασίας να χρησιμοποιηθούν στην διαδικασία λήψης αποφάσεων και συγκεκριμένα για την περιοχή μελέτης μας, στην βελτίωση τόσο της ποιότητας του οικοσυστήματος του εθνικού πάρκου των υγροτόπων των λιμνών Κορώνειας Βόλβης και Μακεδονικών Τεμπών, όσο και την συμβολή τους στην βελτίωση της ποιότητας των παραγωγών στις καλλιεργούμενες εκτάσεις της περιοχής.

Βιβλιογραφία

- Al-Dahoud, A., Fezari, M., & Mehamdia, H. (2020). Water Quality Monitoring System Using WSN in Tanga Lake. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 987, 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-030-19501-4_1
- Al-Kashoash, H. A. A., & Kemp, A. H. (2016). Comparison of 6LoWPAN and LPWAN for the Internet of Things. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 13(4), 268–274. <https://doi.org/10.1080/1448837X.2017.1409920>
- Amghar, S., Cherdal, S., & Mouline, S. (2018). Which NoSQL database for IoT applications? *2018 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking, MoWNeT 2018*, 131–137. <https://doi.org/10.1109/MoWNet.2018.8428922>
- Bader, S. (2011). *Enabling Autonomous Environmental Measurement Systems with Low-Power Wireless Sensor Networks*. Mid Sweden University.
- Bennis, I., Fouchal, H., Zytoune, O., & Aboutajdine, D. (2017). Monitoring drip irrigation system using wireless sensor networks. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 461, 297–315. https://doi.org/10.1007/978-3-319-44354-6_17
- Bishop, R. H. (2007). Mechatronic system control, logic, and data acquisition. In *Mechatronic System Control, Logic, and Data Acquisition* (Second Edi). Taylor & Francis.
- Boulogeorgos, A.-A. A., Diamantoulakis, P. D., & Karagiannidis, G. K. (2016). Low Power Wide Area Networks (LPWANs) for Internet of Things (IoT) Applications: Research Challenges and Future Trends. In *ArXiv*.
- Chaudhari, B. S., & Zennaro, M. (2020). LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications. In *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2018-0-04787-8>
- Corke, P., Wark, T., Jurdak, R., Hu, W., Valencia, P., & Moore, D. (2010). Environmental wireless sensor networks. *Proceedings of the IEEE*, 98(11), 1903–1917. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2068530>
- Delgado, J. A., Short, N. M., Roberts, D. P., & Vandenberg, B. (2019). Big Data Analysis for Sustainable Agriculture on a Geospatial Cloud Framework. In *Frontiers in Sustainable Food Systems* (Vol. 3, p. 54). Frontiers Media S.A.

<https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00054>

Duarte, F., Palacios, J. R., & Santos, G. R. (2019). Evaluation of Threats to Agriculture in the Totaré River Basin Due to Changes in Rainfall Patterns Under Climate Change Scenarios. In J. C. Corrales, P. Angelov, & J. A. Iglesias (Eds.), *Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change II* (Vol. 893, pp. 234–248). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04447-3_16

European Commission. (2011). *Environment: Commission takes Greece to Court for failing to protect Lake Koroneia* (European Commission (ed.); p. 2). European Commission Press release. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_11_89

European Commission. (2009). *Greece: Commission pursues legal action over lack of measures to protect important wetland* (European Commission (ed.); p. 2). European Commission Press release. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_09_1025

Fahmy, H. M. A. (2016). Wireless Sensor Networks. Concepts, Applications, Experimentation and Analysis. In *Encyclopedia of Mobile Computing and Commerce*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0412-4>

Ferencz, K., & Domokos, J. (2019). IoT Sensor data acquisition and storage system using raspberry Pi and apache cassandra. *CANDO-EPE 2018 - Proceedings IEEE International Conference and Workshop in Obuda on Electrical and Power Engineering*, 143–146. <https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE.2018.8601139>

Fytianos, K., & Kotzakioti, A. (2005). Sequential fractionation of phosphorus in lake sediments of Northern Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 100(1–3), 191–200. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-4770-y>

Gaura, E., Girod, L., Brusey, J., Allen, M., & Challen, G. (2010). Wireless sensor networks: Deployments and design frameworks. In *Wireless Sensor Networks: Deployments and Design Frameworks*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-5834-1>

Ghobakhlou, A., Shanmuganthan, S., & Sallis, P. (2020). Wireless sensor networks for climate data management systems. In *18th World IMACS Congress and MODSIM 2009 - International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling*

and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, Proceedings.

- Guillermo, J. C., García-Cedeño, A., Rivas-Lalaleo, D., Huerta, M., & Clotet, R. (2019). IoT Architecture Based on Wireless Sensor Network Applied to Agricultural Monitoring: A Case of Study of Cacao Crops in Ecuador. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 893, 42–57. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04447-3_3
- Haseeb, K., Din, I. U., Almogren, A., & Islam, N. (2020). An energy efficient and secure IoT-based WSN framework: An application to smart agriculture. *Sensors (Switzerland)*, 20(7). <https://doi.org/10.3390/s20072081>
- Huang, X., Yi, J., Chen, S., & Zhu, X. (2015). A wireless sensor network-based approach with decision support for monitoring lake water quality. *Sensors (Switzerland)*, 15(11), 29273–29296. <https://doi.org/10.3390/s151129273>
- Kamaludin, K. H., & Ismail, W. (2017). Water quality monitoring with internet of things (IoT). *Proceedings - 2017 IEEE Conference on Systems, Process and Control, ICSPC 2017, 2018-Janua*, 18–23. <https://doi.org/10.1109/SPC.2017.8313015>
- Khalifeh, A., AlQammaz, A., Darabkh, K. A., Sha'ar, B. A., & Ghatasheh, O. (2021). A Framework for Artificial Intelligence Assisted Smart Agriculture Utilizing LoRaWAN Wireless Sensor Networks (pp. 408–421). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52190-5_29
- Khriji, S., El Houssaini, D., Jmal, M. W., Viehweger, C., Abid, M., & Kanoun, O. (2014). Precision irrigation based on wireless sensor network. *IET Science, Measurement and Technology*, 8(3), 98–106. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2013.0137>
- Khutsoane, O., Isong, B., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017). IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN. *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017-Janua*, 6107–6112. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217061>
- Kodali, R. K., Soratkal, S., & Boppana, L. (2017). WSN in coffee cultivation. *Proceeding - IEEE International Conference on Computing, Communication and Automation, ICCCA 2016*, 661–666. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2016.7813804>
- Lopez, J., & Zhou, J. (2008). *Wireless Sensor Network Security*. IOS Press.
- Lorente, E. (2015). *Reverse Engineering WirelessHART Hardware* (Issue August). Radboud Universiteit Nijmegen.
- Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D., & Anderson, J. (2002). Wireless

- sensor networks for habitat monitoring. *Proceedings of the ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, 88–97. <https://doi.org/10.1145/570748.570751>
- Manakou, V., Kungolos, A., & Beriatos, E. (2008). Hazards that threaten Greek wetlands: The case of Lake Koronia. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, 39, 3–10. <https://doi.org/10.2495/RISK080011>
- Mylopoulos, N., Mylopoulos, Y., Kolokytha, E., & Tolikas, D. (2007). Integrated water management plans for the restoration of Lake Koronia, Greece. *Water International*, 32(SUPPL. 1), 720–738. <https://doi.org/10.1080/02508060.2007.9671993>
- Núñez, J. V. M., Fonthal, F. R., & Quezada, Y. L. M. (2018, December 5). Design and Implementation of WSN and IoT for Precision Agriculture in Tomato Crops. *2018 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2018.8564674>
- Nurellari, E., & Srivastava, S. (2018). A practical implementation of an agriculture field monitoring using wireless sensor networks and iot enabled. *Proceedings - 2018 IEEE 4th International Symposium on Smart Electronic Systems, ISES 2018*, 134–139. <https://doi.org/10.1109/iSES.2018.00037>
- Pule, M., Yahya, A., & Chuma, J. (2017). Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality. *Journal of Applied Research and Technology*, 15(6), 562–570. <https://doi.org/10.1016/j.jart.2017.07.004>
- Rajalakshmi, P., & Mahalakshmi, S. D. (2016). IOT based crop-field monitoring and irrigation automation. *Proceedings of the 10th International Conference on Intelligent Systems and Control, ISCO 2016*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISCO.2016.7726900>
- Rani, S. S., Balakrishnan, S., Sundari, V. K., & Ramya, K. C. (2019). IoT Based Water Level Monitoring System for Lake in a Cloud Environment. *International Journal of Lakes and Rivers*, 12(1), 21–25.
- Rodríguez, S., Gualotuña, T., & Grilo, C. (2017). A System for the Monitoring and Predicting of Data in Precision Agriculture in a Rose Greenhouse Based on Wireless Sensor Networks. *Procedia Computer Science*, 121, 306–313. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.042>
- Salam, A. (2020). Internet of Things for Sustainable Community Development. In *Internet*

- of Things*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35291-2>
- Selmic, R., Phoha, V., & Serwadda, A. (2016). *Wireless Sensor Networks: Security, Coverage, and Localization*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46769-6>
- Silva, N., Mendes, J., Silva, R., dos Santos, F. N., Mestre, P., Serôdio, C., & Morais, R. (2019). Low-Cost IoT LoRa®Solutions for Precision Agriculture Monitoring Practices. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11804 LNAI, 224–235. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30241-2_20
- Subashini, S., Venkateswari, R., & Mathiyalagan, P. (2018). A study on loRaWAN for wireless sensor networks. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 810, pp. 245–252). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1513-8_26
- Tang, W., & Huang, Z. (2010). Research on aquatic vegetation monitoring technology based on WSN. *Proceedings - 3rd International Symposium on Information Processing, ISIP 2010*, 153–156. <https://doi.org/10.1109/ISIP.2010.50>
- Thielemans, S., Bezunartea, M., & Steenhaut, K. (2017, June 7). Establishing transparent IPv6 communication on LoRa based low power wide area networks (LPWANS). *Wireless Telecommunications Symposium*. <https://doi.org/10.1109/WTS.2017.7943535>
- Vijayakumar, N., & Ramya, R. (2015, July 15). The real time monitoring of water quality in IoT environment. *IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2015*. <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2015.7159459>
- Vo, T. T., Nguyen, T. D., & Vo, M. T. (2013). Ubiquitous sensor network for development of climate change monitoring system based on solar power supply. *International Conference on Advanced Technologies for Communications*, 121–124. <https://doi.org/10.1109/ATC.2013.6698090>
- Yahya, A. (2019). Emerging technologies in agriculture, livestock, and climate. In A. Yahya (Ed.), *Emerging Technologies in Agriculture, Livestock, and Climate*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33487-1>
- Κινγκ, P. E. (2005). *Συστήματα μετρήσεων*. Τζιόλας.
- Τεκίδης, Η. (2012). *Βιώσιμη διαχείριση προστατευόμενων οικοσυστημάτων*. Πολιτικές και

εργαλεία εφαρμογής. Η περίπτωση της λίμνης Κορώνειας [Πανεπιστήμιο Μακεδονίας
Οικονομικών και Κοινωνικών Επιστημών].

<http://dspace.lib.uom.gr/handle/2159/14797>

Φορέας Διαχείρισης Λιμνών Κορώνειας - Βόλβης. (2015). *Οδηγός για το εθνικό πάρκο
λιμνών Κορώνειας Βόλβης και Μακεδονικών Τεμπών*. Φορέας Διαχείρισης Λιμνών
Κορώνειας - Βόλβης.