



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Πληροφορική»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Συστήματα Ασύρματης Δικτύωσης σε Βιομηχανικό Περιβάλλον Industrial Wireless Networks Systems
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Κωνσταντίνος Κωνσταντίνου
Πατρώνυμο	Αθανάσιος
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΠΛ14042
Επιβλέπων	Χρήστος Δουληγέρης, Καθηγητής

Ημερομηνία Παράδοσης **Μήνας Έτος**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(υπογραφή)

Περιεχόμενα

1.1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1-10
1.1	Εισαγωγή.....	1-10
1.2	Συσκευές ασύρματων δικτύων αισθητήρων.....	1-12
1.2.1	Αισθητήρας.....	1-12
1.2.2	Μικροελεγκτής.....	1-12
1.2.3	Ασύρματος πομποδέκτης.....	1-12
1.2.4	Μνήμη.....	1-13
1.2.5	Πηγή ενέργειας.....	1-13
1.2.6	Διάδοση.....	1-13
1.3	Παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.....	1-13
1.3.1	Πηγή ενέργειας.....	1-14
1.3.2	Επεκτασιμότητα.....	1-14
1.3.3	Κόστος παραγωγής.....	1-15
1.3.4	Περιορισμοί υλικού.....	1-15
1.3.5	Τοπολογία δικτύου αισθητήρων.....	1-16
1.3.6	Περιβάλλον.....	1-17
1.3.7	Μέσον μετάδοσης.....	1-17
1.3.8	Κατανάλωση ενέργειας.....	1-18
1.4	Εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.....	1-19
1.4.1	Στρατιωτικές εφαρμογές.....	1-19
1.4.2	Περιβαλλοντικές εφαρμογές.....	1-20
1.4.3	Εφαρμογές υγείας.....	1-21
1.4.4	Οικιακές εφαρμογές.....	1-22
1.4.5	Άλλες εμπορικές εφαρμογές.....	1-23
1.5	Πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε βιομηχανικό περιβάλλον.....	1-23
1.5.1	Ανεπαρκείς περιορισμοί καλωδίωσης.....	1-24
1.5.2	Εύκολη συντήρηση.....	1-24
1.5.3	Μειωμένο κόστος.....	1-24
1.5.4	Βελτιωμένη επίδοση.....	1-25
1.2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	2-26
2.1	Τα πρότυπα της οικογένειας του IEEE 802.15.4.....	2-26
2.2	Πρότυπο IEEE 802.15.4.....	2-26
2.2.1	Συστατικά του IEEE 802.15.4.....	2-26

2.2.2	Τοπολογίες IEEE 802.15.4	2-27
2.2.3	Η αρχιτεκτονική του IEEE 802.15.4	2-29
2.2.4	Το φυσικό επίπεδο (Physical Layer – PHY) του IEEE 802.15.4	2-29
2.2.5	Το υποεπίπεδο MAC του IEEE 802.15.4	2-31
2.2.6	Ο αλγόριθμος CSMA-CA του IEEE 802.15.4	2-31
2.2.7	Μοντέλο μεταφοράς δεδομένων.....	2-34
2.3	Ασύρματο πρότυπο ZigBee	2-36
2.3.1	Αρχιτεκτονική του ZigBee	2-39
2.3.2	Επίπεδο δικτύου	2-39
2.3.3	Επίπεδο εφαρμογής	2-40
2.4	Ασύρματο πρότυπο WirelessHART	2-41
2.4.1	Αρχιτεκτονική του WirelessHART	2-42
2.5	Ασύρματο πρότυπο ISA.100.11.a	2-45
2.5.1	Αρχιτεκτονική του ISA.100.11.a.....	2-46
2.6	Σύνοψη προτύπων επικοινωνίας 802.15.4.....	2-48
1.3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	3-51
3.1	Εισαγωγή	3-51
3.2	Το λογισμικό Prosoft	3-51
3.3	Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα	3-52
3.4	Ξεκινώντας το Prosoft Wireless Designer.....	3-53
3.4.1	Εκκίνηση της εφαρμογής	3-53
3.4.2	Σχεδιάζοντας ένα νέο δίκτυο	3-53
3.4.3	Προσθήκη τοποθεσίας.....	3-56
3.4.4	Εισαγωγή συντεταγμένων τοποθεσίας	3-57
3.4.5	Προσθήκη επιπρόσθετης τοποθεσίας.....	3-58
3.4.6	Προβολή ιδιοτήτων τοποθεσίας	3-58
3.4.7	Προσθήκη συνδέσμου	3-59
3.4.8	Προβολή ιδιοτήτων συνδέσμου.....	3-59
3.4.9	Προσθήκη κεραίας	3-60
3.4.10	Προβολή στοιχείων	3-61
3.4.11	Εξαγωγή στοιχείων τοποθεσίας.....	3-62
1.4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	4-63
4.1	Εισαγωγή	4-63
4.2	Μελέτη περίπτωσης – Soil Instruments Ltd.....	4-63
4.2.1	Ο στόχος	4-63
4.2.2	Η λύση	4-64
4.2.3	Τα αποτελέσματα	4-64

4.3	Μελέτη περίπτωσης - LANTRONIX – Spectrum CNC Technologies	4-64
4.3.1	Η πρόκληση	4-64
4.3.2	Η λύση	4-65
4.3.3	Τα αποτελέσματα	4-65
4.4	Μελέτη περίπτωσης - Phoenix Contact – British Petroleum.....	4-66
4.4.1	Προφίλ πελάτη.....	4-66
4.4.2	Η πρόκληση	4-66
4.4.3	Η λύση	4-66
4.4.4	Τα αποτελέσματα	4-67

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή γίνεται παρουσίαση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των προτύπων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Αναφέρονται οι εφαρμογές των ασύρματων αισθητήρων τόσο στον βιομηχανικό τομέα όσο και στον στρατιωτικό, στον τομέα της υγείας και του περιβάλλοντος όπου χρησιμοποιούνται ευρέως για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των διαδικασιών.

Περιγράφονται οι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου όπως η ανοχή σε σφάλματα ανάλογα με τις συνθήκες εγκατάστασης, η επεκτασιμότητα και η κατανάλωση ενέργειας και τέλος αναλύονται τα πλεονεκτήματα των ασύρματων αισθητήρων στο βιομηχανικό περιβάλλον.

Στη συνέχεια γίνεται μια λεπτομερής περιγραφή των προτύπων επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις αναλύοντας την αρχιτεκτονική του κάθε προτύπου, τις συσκευές που χρησιμοποιούν εντός του δικτύου και τέλος γίνεται μια συγκριτική μελέτη μεταξύ αυτών.

Τέλος, έγινε παρουσίαση του λογισμικού προσομοίωσης για τον σχεδιασμό ενός βιομηχανικού δικτύου μέσω του υπολογιστή της εταιρίας PROSOFT και εξετάστηκαν μελέτες περιπτώσεων βιομηχανικών εταιριών που χρησιμοποίησαν την ασύρματη δικτύωση για τον έλεγχο των εγκαταστάσεων

Abstract

This thesis deals with the presentation of the wireless sensor networks and the use of the communication standards at the industry. We mention the applications of wireless sensors in the industrial, military, health and environmental field where they are widely used in order to monitor and control processes.

We describe the factors that influence the design of a wireless network such as fault tolerance according to installation conditions, scalability and energy consumption. Finally, we analyze the benefits of wireless sensors networks in the industrial environment.

Furthermore, is made a detailed description of the communication standards which used in industrial facilities by analyzing the architecture of each standard, the device they use within the network and eventually we make a comparative study among them.

Finally, we present a simulation software for the design of an industrial network via the PROSOFT in computer environment and we present selective case studies of industrial companies which uses the wireless communication for plant networks.

Εισαγωγή

Στη παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των προτύπων επικοινωνίας τους σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στις συσκευές που απαρτίζουν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, τους παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό του, τις εφαρμογές τους και τα πλεονεκτήματά τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πρότυπα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, δηλαδή το ZigBee, WirelessHART και ISA.100.11.a και γίνεται μία σύγκριση μεταξύ αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση της εφαρμογής Prosoft Wireless Designer για τον σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου σε βιομηχανικό περιβάλλον.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες μελέτες περιπτώσεων εφαρμογής ασύρματης δικτύωσης σε βιομηχανικό περιβάλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

1.1 Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSNs) εμπνεύστηκε από στρατιωτικούς εφαρμογές, ιδίως για την επιτήρηση σε ζώνες σύγκρουσης. Σήμερα, αποτελούνται από κατανεμημένες ανεξάρτητες συσκευές που χρησιμοποιούν αισθητήρες για την παρακολούθηση των φυσικών συνθηκών και σε συνδυασμένο με τις εφαρμογές τους μπόρεσαν να επεκταθούν σε βιομηχανικές υποδομές, στους αυτοματισμούς, στην υγεία, στην μεταφορά και σε διάφορες άλλες περιοχές [45].

Η έρευνα πάνω στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρονολογείται από την δεκαετία του 1980, όταν η Υπηρεσία Έρευνας Προηγμένων Αμυντικών Προγραμμάτων του Υπουργείου Άμυνας των ΗΠΑ (United States Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA) πραγματοποίησε το κατανεμημένο δίκτυο αισθητήρων (Distributed Sensor Network - DSN) για τον αμερικανικό στρατό. Εκείνη την εποχή, η Υπηρεσία Έρευνας Προηγμένων Δικτύων (Advanced Research Projects Agency Network - ARPANET) ήταν σε λειτουργία για αρκετά χρόνια με περίπου 200 συνδρομητές από πανεπιστήμια και ερευνητικά ινστιτούτα [18]. Τα DSN δίκτυα διέθεταν κατανεμημένους κόμβους ανίχνευσης χαμηλού κόστους, συνεργάζονταν μεταξύ τους αλλά λειτουργούσαν και αυτόνομα, με τις πληροφορίες να κατευθύνονται προς οποιοδήποτε κόμβο ο οποίος μπορούσε να χρησιμοποιήσει καλύτερα τις πληροφορίες αυτές. Αν και οι νέοι ερευνητές σε δίκτυα αισθητήρων είχαν το όραμα ενός DSN δικτύου στο μυαλό τους και το οποίο ήταν πολύ φιλόδοξο για την εποχή, η τεχνολογία δεν ήταν ακόμα έτοιμη να το υλοποιήσει. Πιο συγκεκριμένα, οι αισθητήρες ήταν πολλοί μεγάλοι για παράδειγμα είχαν το μέγεθος ενός κουτιού παπουτσιών ή και ακόμα μεγαλύτερο γεγονός που περιόριζε τον αριθμό των πιθανών εφαρμογών. Επιπλέον, τα πρώτα DSNs δεν σχετιζονταν με την ασύρματη επικοινωνία.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα της πληροφορικής, της επικοινωνίας και της μικροηλεκτρομηχανικής τεχνολογίας είχε σαν αποτέλεσμα σημαντική μεταστροφή στην έρευνα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων φέρνοντας την έτσι πιο κοντά στο αρχικό όραμα. Το νέο κύμα ερευνών για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ξεκίνησε γύρω στο 1998 και προσέλκυε όλο και περισσότερη προσοχή και διεθνής συμμετοχή. Το νέο κύμα ερευνών που δημιουργήθηκε σχετικά με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων εστίαζε στην τεχνολογία δικτύων και επεξεργασίας πληροφοριών κατάλληλα για δυναμικά αποκεντρωμένα (ad-hoc) περιβάλλοντα και αισθητήριους κόμβους με περιορισμένη κατανάλωση ισχύος. Επιπλέον, οι αισθητήριοι κόμβοι ήταν πολύ μικρότεροι σε μέγεθος και πιο οικονομικοί όσον αναφορά την τιμή, και έτσι πολλές νέες προσωπικές και εμπορικές εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων όπως η παρακολούθηση του περιβάλλοντος, η παρακολούθηση των

οχημάτων τα οποία ήταν συνδεδεμένα σε ένα δίκτυο αλλά και οι παρακολούθηση των ασθενών έγινε πραγματικότητα.

Και πάλι, η DARPA ενήργησε ως πρωτοπόρος στο νέο κύμα ερευνών στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με την έναρξη ενός ερευνητικού προγράμματος ονομαζόμενου SensIT [54] το οποίο παρείχε τα υπάρχοντα δίκτυα αισθητήρων με νέες δυνατότητες, όπως ad hoc δικτύωση, δυναμική αναζήτηση και εκτέλεση εργασιών, επαναπρογραμματισμό και εκτέλεση πολλαπλών εργασιών. Επί του παρόντος, τα WSNs θεωρούνται μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες του 21ο αιώνα [20]. Η Κίνα, για παράδειγμα, έχει συμπεριλάβει τα WSNs στην εθνικά τους στρατηγικά προγράμματα ερευνών [67] με αποτέλεσμα, να επιταχύνεται η εμπορευματοποίηση των WSNs και πολλές νέες εταιρείες να χρησιμοποιούν τόσο καινοτόμες τεχνολογίες συνδέοντας με τον τρόπο αυτό τον φυσικό κόσμο με το ψηφιακό κόσμο.

Σήμερα, ο βιομηχανικός αυτοματισμός είναι ένας από τους πιο σημαντικούς τομείς εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Σύμφωνα με τον όμιλο Freedonia, το μερίδιο αγοράς των αισθητήρων για βιομηχανική χρήση είναι 11 δισεκατομμύρια δολάρια, ενώ το κόστος εγκατάστασης (κυρίως κόστος καλωδίωσης) και χρήσης είναι πάνω από 100 δισεκατομμύρια δολάρια. Αυτό το υψηλό κόστος είναι το κύριο ζήτημα που εμποδίζει την ανάπτυξη της τεχνολογίας των βιομηχανικών επικοινωνιών. Η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, επιτρέπει την πλήρη επιτήρηση όλης της βιομηχανικής διαδικασίας, μπορεί να εξασφαλίσει σημαντικές παραμέτρους που δεν είναι διαθέσιμες μέσω διαδικτυακής παρακολούθηση λόγω του κόστους που αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτές οι παράμετροι αποτελούν σημαντικά θεμέλια για την εφαρμογή του βέλτιστου ελέγχου προκειμένου να επιτευχθεί η βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων και η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας [45].

Παράλληλα, το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) παρατηρώντας τις υψηλές δυνατότητες, σε χαμηλό κόστος και μικρής κατανάλωση ισχύος που παρέχουν τα WSN προχώρησε στην δημιουργία του προτύπου IEEE 802.15.4 για τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα με χαμηλή μετάδοση δεδομένων (Wireless Personal Area Networks – WPAN). Καθώς οι σχετικές τεχνολογίες άρχισαν να ωριμάζουν, το κόστος εξοπλισμού για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έπεφτε δραματικά και οι εφαρμογές τους επεκτείνονταν σταδιακά από το στρατιωτικό πεδίο στο βιομηχανικό και εμπορικό πεδίο. Εντωμεταξύ, πρότυπα για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν ήδη αναπτυχθεί όπως το ZigBee, το WirelessHART και το ISA100.11a που προορίζονται για βιομηχανικούς αυτοματισμούς - αυτοματοποίηση διαδικασιών (WIA-PA), κλπ. Επιπλέον, με νέες εφαρμογές WSN που αναδύονται στο βιομηχανικό αυτοματισμό και στις οικιακές εφαρμογές, το συνολικό μέγεθος της αγοράς για εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων θα συνεχίσουν να αυξάνεται γρήγορα [45].

1.2 Συσσκευές ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από πολλές συσκευές που βρίσκονται κατανεμημένες στο χώρο και οι οποίες ονομάζονται κόμβοι (nodes). Ο κάθε κόμβος συνδέεται με έναν ή περισσότερους αισθητήρες μέσω των οποίων παρακολουθείται το φυσικό περιβάλλον γύρω του και αποθηκεύει τις απαραίτητες πληροφορίες. Κάθε ένας τέτοιος κόμβος του δικτύου αποτελείται από κάποια συγκεκριμένα τμήματα [4]:

- **Αισθητήρας (Sensor)**
- **Μικροελεγκτή (Microcontroller)**
- **Ασύρματος πομποδέκτη (Wireless Transceiver)**
- **Μνήμη (Memory)**
- **Μπαταρία**

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο σχεδιασμός όλων των τμημάτων των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έγκειται σε περιορισμούς που υπάρχουν σε μέγεθος και κόστος έχουν ως αποτέλεσμα αντίστοιχους περιορισμούς σε υπολογιστικούς πόρους όπως ενέργεια, μνήμη, υπολογιστική ταχύτητα και στο εύρος συχνοτήτων των επικοινωνιών [45].

1.2.1 Αισθητήρας

Ένας αισθητήρας είναι υπεύθυνος για τη συλλογή και τη μετατροπή των σημάτων από αναλογικό σε ψηφιακό, όπως το φως, οι κραδασμοί και τα χημικά σήματα, σε ηλεκτρικά σήματα και στη συνέχεια την μεταφορά τους στον μικροελεγκτή. Ο αισθητήρας μπορεί να έχει σαν πηγή τροφοδοσίας την πηγή του κόμβου ή να έχει δική του τροφοδοσία. Στην περίπτωση που τροφοδοτείται από τον κόμβο θα πρέπει οι αισθητήρες να έχουν μικρό μέγεθος και να καταναλώνουν χαμηλή ενέργεια όπως ακριβώς και ο κόμβος [45].

1.2.2 Μικροελεγκτής

Ο μικροελεγκτής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων επεξεργάζεται τα δεδομένα που λαμβάνει από τον αισθητήρα, προγραμματίζει τις εργασίες και ελέγχει την λειτουργία των υπόλοιπων τμημάτων του υλικού του κόμβου [45].

1.2.3 Ασύρματος πομποδέκτης

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνουν συσκευές όπως έναν ασύρματο πομποδέκτη (RF module) χαμηλής απόδοσης και μικρής εμβέλειας ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία του κόμβου. Επειδή αποτελεί το πιο ενεργοβόρο κομμάτι του κόμβου, ο πομποδέκτης πρέπει να ενσωματώσει ενεργειακά αποδοτικούς τρόπους διαχείρισης του χρόνου λειτουργίας. Οι πιθανές καταστάσεις του πομποδέκτη είναι ενεργοποίησης (wake-up), λήψης (receive), αναμονής (idle) και απενεργοποίησης. Σε κατάσταση ενεργοποίησης η κεραία παραμένει ενεργή και ο

κάθε κόμβος αποστέλλει δεδομένα σε κάποιον άλλον κόμβο ή στην κεντρική βάση. Σε κατάσταση λήψης τα δεδομένα λαμβάνονται από την διάταξη και στέλνονται στον μικροελεγκτή για επιπλέον επεξεργασία. Σε κατάσταση αναμονής ο ραδιοπομποδέκτης είναι σε αναμονή για να δεχθεί δεδομένα ενώ κάποια μέρη του κόμβου είναι ενεργά και κάποια όχι. Σε κατάσταση απενεργοποίησης ο κόμβος είναι ανενεργός και εξοικονομεί ενέργεια.

1.2.4 Μνήμη

Ο κάθε κόμβος διαθέτει ένα κομμάτι μνήμης το οποίο χωρίζεται σε τρία είδη. Την RAM για την αποθήκευση των μετρήσεων και την αποθήκευση των πακέτων που λαμβάνονται από τον κόμβο, την ROM για την αποθήκευση του κώδικα της συσκευής και την EEPROM για την αποθήκευση των δεδομένων που αποστέλλονται σε τακτά χρονικά διαστήματα

1.2.5 Πηγή ενέργειας

Η ενέργεια που καταναλώνεται από έναν κόμβο εξαρτάται από την εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και μπορεί να αποθηκευτεί σε μπαταρίες χαμηλού κόστους όπως για παράδειγμα τις μπαταρίες AA. Εξαιτίας όμως της χαμηλής χωρητικότητας των μπαταριών, η περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία του κόμβου είναι ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό του WSN. Για την αποφυγή αυτών των περιορισμών είναι πλέον δυνατόν ο κόμβος να υποστηριχθεί από μια μονάδα παραγωγής ενέργειας όπως οι ηλιακές κυψέλες.

1.2.6 Διάδοση

Τα ραδιοκύματα διαδίδονται και στις τρεις διαστάσεις στον χώρο όπως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Όταν τα κύματα χτυπήσουν ένα αντικείμενο, αντανακλώνται εντελώς αν το αντικείμενο είναι ηλεκτρικά αγώγιμο. Αν το αντικείμενο δεν είναι αγώγιμο, ένα μέρος των κυμάτων ανακλάται, ένα άλλο μέρος απορροφάτε από το αντικείμενο και τέλος το υπόλοιπο το διαπερνάει. Όταν χτυπάνε σε ακμές, τα ραδιοκύματα διασκορπίζονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τον σχεδιασμό ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου αισθητήρων επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που περιλαμβάνουν την ανοχή σφάλματος, την επεκτασιμότητα, το κόστος παραγωγής, το περιβάλλον στο οποίο τοποθετούνται οι κόμβοι, την τοπολογία του δικτύου αισθητήρων, τους περιορισμούς υλικού, το μέσον μετάδοσης και την κατανάλωση ενέργειας. Αυτοί οι παράγοντες είναι σημαντικοί επειδή λειτουργούν ως

κατευθυντήριοι για το σχεδιασμό ενός πρωτοκόλλου ή ενός αλγορίθμου για τα δίκτυα αισθητήρων. Επιπλέον, αυτοί οι παράγοντες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συγκριθούν διαφορετικά συστήματα [4].

1.3.1 Πηγή ενέργειας

Ορισμένοι κόμβοι του δικτύου αισθητήρων ενδέχεται να αποτύχουν ή να αποκλειστούν λόγω έλλειψης ενέργειας, της καταστροφή του κόμβου ή από φυσικά αίτια. Η βλάβη των κόμβων αυτών δεν επηρεάζει τη συνολική λειτουργία του δικτύου αισθητήρων. Συνεπώς, είναι σημαντικό να υπάρχει μια αξιόπιστη υποδομή ανάκτησης της λειτουργίας του προβληματικού κόμβου και σε περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό να υπάρχει ανοχή σφάλματος για την απρόσκοπτη λειτουργία του δικτύου. Ως ανοχή σφάλματος καλούμε την ικανότητα του αισθητήρα να διατηρεί τις λειτουργίες του δικτύου χωρίς κάποια διακοπή λόγω αποτυχιών του αισθητήριου κόμβου [89]. Η αξιοπιστία $R_k(t)$ ή ανοχή σφάλματος ενός αισθητήριου κόμβου [38] μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας την κατανομή Poisson για να παρουσιάσει την πιθανότητα μίας αποτυχίας μέσα σε ένα σύστημα με περίοδο $(0, t)$:

$$R_k(t) = e^{-\lambda_k t}$$

Όπου λ_k και t είναι ο ρυθμός αποτυχίας του κόμβου αισθητήρα k κατά την χρονική περίοδο.

Να σημειωθεί ότι πρωτόκολλα και αλγόριθμοι πιθανόν να σχεδιαστούν για να αντιμετωπίσουν το επίπεδο ανοχής σφάλματος που απαιτείται από τα δίκτυα αισθητήρων. Εάν το περιβάλλον όπου υπάρχουν οι αισθητήριοι κόμβοι έχει μικρή παρέμβαση, τότε τα πρωτόκολλα μπορεί να χρησιμοποιούνται λιγότερο. Για παράδειγμα, εάν έχουν αναπτυχθεί κόμβοι αισθητήρων σε ένα σπίτι για να παρακολουθείτε η υγρασία και τα επίπεδα της θερμοκρασίας, η ανοχή σφάλματος μπορεί να είναι χαμηλή δεδομένου ότι αυτό το είδος αισθητήρων δεν καταστρέφονται εύκολα ή δεν παρεμποδίζονται από περιβαλλοντικούς θορύβους. Από την άλλη πλευρά, αν οι κόμβοι αισθητήρων έχουν αναπτυχθεί σε ένα πεδίο μάχης για επιτήρηση και ανίχνευση, τότε η ανοχή σφάλματος πρέπει να είναι υψηλή επειδή τα αισθητά δεδομένα είναι κρίσιμα και οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να καταστραφούν από εχθρικές ενέργειες. Σαν αποτέλεσμα, το επίπεδο ανοχής σφάλματος εξαρτάται από την εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και των συστημάτων που θα αναπτυχθούν [4].

1.3.2 Επεκτασιμότητα

Ο αριθμός των αισθητήριων κόμβων που αναπτύχθηκαν για την μελέτη ενός φαινομένου μπορεί να είναι της τάξης των εκατοντάδων ή χιλιάδων. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο αριθμός μπορεί να φτάσει στην ακραία τιμή των εκατομμυρίων. Τα νέα συστήματα πρέπει να είναι ικανά να μπορούν να λειτουργούν με αυτόν τον αριθμό των κόμβων. Πρέπει επίσης να μπορούν να χρησιμοποιούν την υψηλή πυκνότητα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Η πυκνότητα μπορεί να κυμαίνεται από λίγους

κόμβους αισθητήρων έως μερικές εκατοντάδες κόμβους αισθητήρων σε μια περιοχή, που μπορεί να έχει διάμετρο μικρότερη από 10 μέτρα [18].

Επιπλέον, ο αριθμός των κόμβων σε μία περιοχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό να προσδιοριστεί η πυκνότητα των κόμβων. Η πυκνότητα του κόμβου εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούνται οι αισθητήριοι κόμβοι. Για μια εφαρμογή ελέγχου μιας μηχανής η πυκνότητα των κόμβων είναι περίπου 300 αισθητήριοι κόμβοι σε μία περιοχή $5 \times 5 \text{ m}^2$ και η πυκνότητα των κόμβων για μια εφαρμογή ελέγχου ενός αυτοκινήτου είναι 10 αισθητήριοι κόμβοι ανά περιοχή. Σε γενικές γραμμές η πυκνότητα μπορεί να είναι μέχρι 20 αισθητήριοι κόμβοι ανά m^3 [92]. Ένα σπίτι μπορεί να περιέχει περίπου δυο δεκάδες οικιακών συσκευών με αισθητήριοι κόμβους αλλά ο αριθμός τους μπορεί να αυξηθεί αν είναι ενσωματωμένοι σε έπιπλα και σε διάφορα άλλα αντικείμενα [73]. Επιπλέον, η πυκνότητα των αισθητήρων θα αυξηθεί αρκετά σε ένα άτομο, το οποίο υπό κανονικές συνθήκες περιέχει εκατοντάδες ενσωματωμένους κόμβους που βρίσκονται ενσωματωμένοι στα ρούχα του, στα παπούτσια του, στα κοσμήματα και πάνω στο σώμα του, όταν όμως αυτό το άτομο τοποθετηθεί σε ένα γήπεδο με άλλα άτομα να κάθονται γύρω του και να παρακολουθούν ένα οποιονδήποτε αγώνα οι αισθητήριοι κόμβοι θα αυξηθούν αρκετά [14].

1.3.3 Κόστος παραγωγής

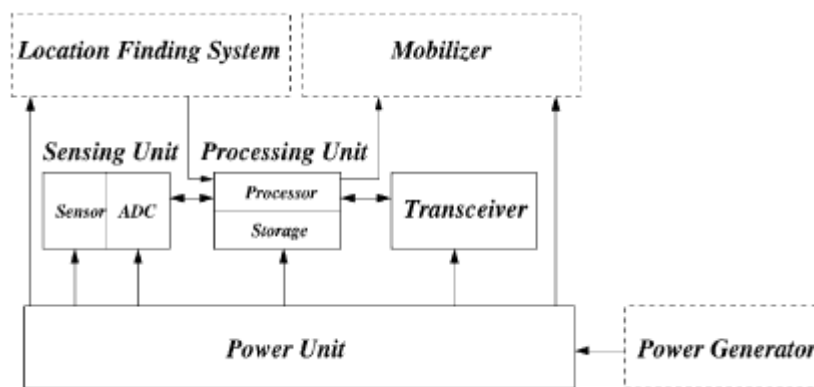
Δεδομένου ότι τα δίκτυα αισθητήρων αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό αισθητήρων κόμβων, το κόστος ενός μόνο κόμβου είναι πολύ σημαντικό να δικαιολογεί το συνολικό κόστος του δικτύου. Εάν το κόστος του δικτύου είναι πολύ μεγαλύτερο από το κόστος των παραδοσιακών αισθητήρων τότε το κόστος του δικτύου αισθητήρων δεν θα μπορεί να δικαιολογηθεί. Σαν αποτέλεσμα, το κόστος κάθε αισθητήριοι κόμβου πρέπει να διατηρείται χαμηλά. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένας αισθητήριοι κόμβος περιέχει και κάποιες επιπρόσθετες μονάδες, όπως για παράδειγμα μονάδες επεξεργασίας και ανίχνευσης. Επιπροσθέτως, ανάλογα με την εφαρμογή του δικτύου αισθητήρων πιθανόν να είναι εξοπλισμένος με συστήματα εντοπισμού γεωγραφικής θέσης ή με γεννήτρια ενέργειας. Με αποτέλεσμα να καταλήγουμε ότι το κόστος ενός αισθητήριοι κόμβου να είναι ένα πολύ απαιτητικό θέμα το οποίο θέλει μελέτη και σχεδιασμό δεδομένου των λειτουργιών που χρειάζεται να καλύψει ανάλογα με την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί [4].

1.3.4 Περιορισμοί υλικού

Ένας αισθητήριοι κόμβος αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.1: μια μονάδα ανίχνευσης, μια μονάδα επεξεργασία, τον πομποδέκτη και μιας μονάδας ισχύος. Μπορούν επίσης, ανάλογα με την εφαρμογή να υπάρχουν επιπλέον μονάδες, όπως το σύστημα εντοπισμού θέσης και μια γεννήτρια ισχύος. Οι μονάδες εντοπισμού συνήθως αποτελούνται από δύο υπομονάδες: τους αισθητήρες και τους μετατροπείς σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό (ADCs). Τα αναλογικά

σήματα που παράγονται από τους αισθητήρες μετατρέπεται σε ψηφιακά σήματα από το ADC, και στη συνέχεια προωθούνται στην μονάδα επεξεργασίας. Η μονάδα επεξεργασίας, η οποία γενικά έχει τον ρόλο του συντονισμού όλων των μονάδων υλοποιεί και την εκτέλεση του λογισμικού για τα διάφορα επίπεδα του δικτύου.

Όλες αυτές οι υπομονάδες δεν θα πρέπει να ξεπερνούν σε μέγεθος το ένα κυβικό εκατοστό [78]. Εκτός από το μέγεθος υπάρχουν επίσης και άλλοι αυστηροί περιορισμοί για τους αισθητήριους κόμβους όπως το να καταναλώνουν χαμηλή ενέργεια, να είναι προσαρμόσιμοι στο περιβάλλον στο οποίο τοποθετούνται, να έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής, να είναι αυτόνομοι και να λειτουργούν χωρίς επιτήρηση [50].



Σχήμα 1.3.1: Τα στοιχεία ενός αισθητήριου κόμβου.

[Πηγή: Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002), Wireless sensor networks: a survey]

1.3.5 Τοπολογία δικτύου αισθητήρων

Οι αισθητήριοι κόμβοι είναι επιρρεπείς σε συχνές αποτυχίες κάνοντας την συντήρηση της τοπολογίας μία δύσκολη διαδικασία. Εκατοντάδες έως και αρκετές χιλιάδες κόμβοι αναπτύσσονται κατά μήκος του πεδίου εφαρμογής με την πυκνότητα εμφάνισης τους σε μια συγκεκριμένη περιοχή να φτάνει μέχρι και τους 20 κόμβους ανά κυβικό μέτρο. Η ανάπτυξη μεγάλου αριθμού κόμβων σε μία περιοχή απαιτεί προσεχτικό σχεδιασμό της τοπολογίας. Θα πρέπει να εξεταστούν θέματα που αφορούν την συντήρηση της τοπολογίας και να διακριθούν στις παρακάτω φάσεις [91]:

- **Φάση προεγκατάστασης και κατά την διάρκεια της εγκατάστασης** - Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορεί να ρίχνονται είτε μαζικά από εναέριο μέσα όπως ένα αεροπλάνο ή έναν πύραυλο, είτε να τοποθετούνται ένας προς ένα στο πεδίο εφαρμογής από έναν άνθρωπο ή ένα ρομπότ [4].
- **Φάση έπειτα από την εγκατάσταση** - Αφού τοποθετηθούν οι αισθητήριοι κόμβοι μπορεί να υπάρξουν αλλαγές στην τοπολογία τους λόγω απώλειας ενέργειας, μετακίνησης των κόμβων και δυσλειτουργίας τους [63].

- **Φάση επανεγκατάστασης επιπρόσθετων κόμβων** - Επιπρόσθετοι κόμβοι μπορεί να τοποθετηθούν οποιαδήποτε στιγμή προκειμένου να αντικαταστήσουν κόμβους που δυσλειτουργούν. Η πρόσθεση επιπλέον κόμβων θέτει την ανάγκη για την αναδιοργάνωση του δικτύου [4].

1.3.6 Περιβάλλον

Οι αισθητήριοι κόμβοι αναπτύσσονται είτε πολύ κοντά είτε μέσα στο φαινόμενο που πρόκειται να παρατηρήσουν. Ως εκ τούτου, συνήθως λειτουργούν χωρίς επίβλεψη σε απομακρυσμένες γεωγραφικές περιοχές. Μπορεί να λειτουργήσουν:

- στο εσωτερικό ενός μεγάλου μηχανήματος,
- στο βάθος ενός ωκεανού,
- μέσα σε έναν ανεμοστρόβιλο,
- στην επιφάνεια ενός ωκεανού κατά τη διάρκεια ενός ανεμοστρόβιλου,
- σε μολυσμένα βιολογικά ή χημικά πεδία,
- σε ένα πεδίο μάχης πέρα από τις γραμμές του εχθρού,
- σε ένα σπίτι ή σε ένα μεγάλο κτίριο,
- σε μια μεγάλη αποθήκη,
- προσαρτημένα σε ζώα και
- προσαρτημένα σε κινούμενα οχήματα που αναπτύσσουν μεγάλες ταχύτητες

Ο κατάλογος αυτός μας δίνει μια ιδέα για το ποιες είναι οι συνθήκες στις οποίες λειτουργούν οι κόμβοι ενός δικτύου αισθητήρων. Λειτουργούν υπό υψηλή πίεση στο βάθος ενός ωκεανού, σε σκληρά περιβάλλοντα όπως σε συντρίμια ή ένα πεδίο μάχης, κάτω από υπερβολική ζέστη όπως στη μηχανή ενός αεροσκάφους ή στην αρκτική και σε ένα εξαιρετικά θορυβώδη περιβάλλοντα όπως στην περίπτωση μιας κυκλοφοριακής συμφόρησης [4].

1.3.7 Μέσον μετάδοσης

Σε ένα δίκτυο αισθητήρων οι κόμβοι επικοινωνούν μέσω ενός ασύρματου μέσου. Αυτές οι επικοινωνιακές συνδέσεις μπορεί να σχηματιστούν μέσω υπέρυθρων ή οπτικών μέσων. Για να καταστεί δυνατή η παγκόσμια λειτουργία αυτών των δικτύων, θα πρέπει να είναι διαθέσιμο ένα επιλεγμένο μέσο μετάδοσης Παγκόσμιος.

Μια επιλογή είναι η χρήση της Βιομηχανικής, Επιστημονικής και Ιατρικής (Industrial Scientific Medical - ISM) ζώνης, η οποία προσφέρει επικοινωνία χωρίς κάποια άδεια στις περισσότερες χώρες καλύπτοντας ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων ενώ κάποιες από τις συχνότητες αυτές χρησιμοποιούνται ήδη στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν και διάφοροι κανόνες και περιορισμοί όπως περιορισμός στην ισχύ και στις επιβλαβείς παρεμβολές από άλλες υπάρχουσες εφαρμογές που χρησιμοποιούν τις συγκεκριμένες ελεύθερες συχνότητες. Επίσης προτείνεται να χρησιμοποιηθεί η μπάντα συχνοτήτων των 915MHz της ISM για την

βόριο Αμερική και η μπάντα συχνοτήτων των 433MHz για την Ευρώπη. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθούν και τα ασύρματα πρότυπα επικοινωνίας όπως το ZigBee, WirelessHART και το ISA100.11a που στηρίζονται στο πρωτόκολλο 802.15.4 [4].

Εύρος Συχνοτήτων	Κεντρική Συχνότητα
6.765-6.795 MHz	6.780 MHz
13.553-13.567 MHz	13.560 MHz
26.957-27.283 MHz	27.120 MHz
40.66-40.70 MHz	40.68 MHz
433.05-434.79 MHz	433.92 MHz
902-928 MHz	915 MHz
2.400-2.500 GHz	2.450 GHz
5.725-5.875 GHz	5.800 GHz
24-24.25 GHz	24.125 GHz
61-61.5 GHz	61.25 GHz
122-123 GHz	122.5 GHz
244-246 GHz	245 GHz

Πίνακας 1.3.1: Διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων για ISM

[Πηγή: Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002), Wireless sensor networks: a survey]

1.3.8 Κατανάλωση ενέργειας

Ο ασύρματος αισθητήριος κόμβος είναι μια μικρο-ηλεκτρονική συσκευή, η οποία μπορεί να είναι εξοπλισμένη μόνο με μια περιορισμένο πηγή ισχύος (< 0,5 Ah, 1,2 V). Σε κάποιες εφαρμογές, η αναπλήρωση των πηγών ενέργειας πιθανόν να είναι αδύνατο. Επομένως, η διάρκεια ζωής ενός αισθητήρα, συνδέεται άμεσα με την διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η δυσλειτουργία ορισμένων κόμβων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές τοπολογικές αλλαγές και μπορεί να χρειαστεί αναδιάταξη των πακέτων και αναδιοργάνωση του δικτύου. Ως εκ τούτου, η εξοικονόμηση ενέργειας και η διαχείριση ισχύος αποκτά πρόσθετη σημασία. Γι' αυτούς τους λόγους οι ερευνητές επικεντρώνονται στον σχεδιασμό πρωτοκόλλων και αλγόριθμων για εξοικονόμηση ενέργειας για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρά στην ποιότητα των υπηρεσιών όπως στα δίκτυα επικοινωνιών.

Ο κύριος ρόλος του αισθητήριου κόμβου μέσα στο πεδίο είναι η ανίχνευση συμβάντων, η γρήγορη επεξεργασία των δεδομένων και τέλος η μετάδοση αυτών. Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να χωριστεί σε τρεις τομείς, την αίσθηση, την επικοινωνία και την επεξεργασία δεδομένων. Η ενέργεια που καταναλώνει ένας κόμβος για την παρακολούθηση ποικίλει ανάλογα με τις εφαρμογές. Η σποραδική παρακολούθηση για παράδειγμα μπορεί να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από ότι η συνεχή παρακολούθηση συμβάντων. Η πολυπλοκότητα της ανίχνευσης των

συμβάντων παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο για την κατανάλωση της ενέργειας. Τα υψηλότερα επίπεδα θορύβου προκαλούν σημαντική εξασθένιση και αύξηση της πολυπλοκότητας. Από τους τρεις τομείς, ο τομέας της επικοινωνίας των δεδομένων σε έναν αισθητήριο κόμβο χρειάζεται περισσότερη ενέργεια τόσο για την μετάδοση τους όσο και για την λήψη τους. Τέλος, η επεξεργασία των δεδομένων είναι η λιγότερο δαπανηρή σε σχέση με τους προηγούμενους τομείς [4].

1.4 Εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αποτελούνται από πολλούς διαφορετικούς τύπους αισθητήρων όπως σεισμικών, χαμηλού ρυθμού δειγματοληψίας, θερμικών, οπτικών, υπέρυθρων, ακουστικών και ραντάρ, οι οποίοι είναι ικανοί να παρακολουθούν μια ευρεία ποικιλία συνθηκών συμπεριλαμβανομένου των ακόλουθων [28]:

- θερμοκρασία,
- υγρασία,
- κίνηση οχημάτων,
- συνθήκες καταιγίδας,
- πίεση,
- μορφολογία εδάφους,
- επίπεδα θορύβου,
- την παρουσία ή απουσία συγκεκριμένων αντικειμένων,
- τα τρέχοντα χαρακτηριστικά όπως ταχύτητα, κατεύθυνση και μέγεθος ενός αντικειμένου.

Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συνεχή ανίχνευση, ανίχνευση συμβάντων, ανίχνευση προκαθορισμένων γεγονότων και ανίχνευση θέσης. Η ιδέα της ανίχνευσης και της ασύρματης σύνδεσης αυτών των κόμβων υπόσχεται πολλές νέα είδη εφαρμογών. Κατηγοριοποιούμε τις εφαρμογές σε στρατιωτικές, υγείας, περιβαλλοντικές, οικιακές και εμπορικές. Είναι πιθανόν να επεκτείνουμε την ομαδοποίηση σε περισσότερες κατηγορίες όπως εξερεύνηση του διαστήματος, χημική επεξεργασία, αντιμετώπιση καταστροφών κ.α [4].

1.4.1 Στρατιωτικές εφαρμογές

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αποτελέσουν ένα αναπόσπαστο κομμάτι της στρατιωτικής διοίκησης, των συστημάτων ελέγχου, των επικοινωνιών, του υπολογισμού, της παρακολούθησης, της αναγνώρισης και της στόχευσης. Τα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων, όπως η ταχεία ανάπτυξη, η αυτό-οργάνωση και η ανοχή σε λάθη, τους καθιστούν ένα πολύ υποσχόμενο αισθητήριο μέσο για στρατιωτικές εφαρμογές. Δεδομένου ότι τα δίκτυα αισθητήρων βασίζονται στην πυκνή ανάπτυξη και στο χαμηλό κόστος των αισθητήριων κόμβων η καταστροφή ορισμένων κόμβων από εχθρικές ενέργειες δεν επηρεάζει μια στρατιωτική επιχείρηση

σε τέτοιο βαθμό όσο η καταστροφή ενός παραδοσιακού αισθητήρα, το οποίο κάνει την χρήση των δικτύων αισθητήρων ιδανική για τα πεδία των μαχών. Κάποιες από τις στρατιωτικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων είναι η παρακολούθηση των φιλικών δυνάμεων, του εξοπλισμού και των πυρομαχικών τους, η παρακολούθηση του πεδίου της μάχης, η αναγνώριση των εχθρικών δυνάμεων και των εδαφών τους, η εκτίμηση των καταστροφών έπειτα από μία μάχη και η ανίχνευση μιας πυρηνικής, βιολογικής και χημικής επίθεσης (Nuclear Biological Chemical - NBC).

Παρακολούθηση του εξοπλισμού και των πυρομαχικών των φιλικών δυνάμεων: Οι ηγέτες και οι διοικητές μπορούν άμεσα να παρακολουθούν την κατάσταση των φιλικών δυνάμεων καθώς και την διαθεσιμότητα του εξοπλισμού και των πυρομαχικών τους χρησιμοποιώντας τα δίκτυα αισθητήρων. Κάθε μονάδα, όχημα, εξοπλισμός και οπλικό σύστημα μπορεί να συνδεθεί με αισθητήρες που θα αναφέρουν την κατάστασή του. Αυτές οι αναφορές συγκεντρώνονται σε κεντρικούς κόμβους και προωθούνται προς τους διοικητές των τμημάτων [4].

Παρακολούθηση του πεδίου μάχης: Κρίσιμα εδάφη, δρομολόγια προσέγγισης και μονοπάτια μπορούν γρήγορα να καλυφθούν με δίκτυα αισθητήρων και να παρακολουθούνται στενά για εχθρικές δραστηριότητες. Καθώς οι επιχειρήσεις θα εξελίσσονται και νέα επιχειρησιακά σχέδια θα ετοιμάζονται, νέα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αναπτύσσονται οποιαδήποτε στιγμή για την παρακολούθηση του πεδίου μάχης [4].

Αναγνώριση των εχθρικών δυνάμεων και εδάφους: Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αναπτυχθούν σε κρίσιμα εδάφη και να συγκεντρώνουν λεπτομερείς πληροφορίες μέσα σε λίγα λεπτά για τις εχθρικές δυνάμεις και των εδαφών τους, προτού οι εχθρικές δυνάμεις μπορέσουν να παρεμποδίσουν τα δίκτυα αυτά [4].

Στόχευση: Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα πλοήγησης των ευφυών πυρομαχικών.

Αξιολόγηση των καταστροφών έπειτα από μία μάχη: Ακριβώς πριν ή μετά από κάποια επίθεση τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να εγκατασταθούν σε μια συγκεκριμένη περιοχή και να συλλέξουν δεδομένα για την εκτίμηση της μάχης.

Ανίχνευση και αναγνώριση πυρηνικής, βιολογικής και χημικής επίθεσης: Σε έναν πυρηνικό, βιολογικό και χημικό πόλεμο, όταν είσαι κοντά στο σημείο μηδέν είναι σημαντικό να διαθέτεις ακριβή και έγκαιρη πληροφορία για την ύπαρξη μόλυνσης. Τα δίκτυα αισθητήρων τα οποία εγκαθίστανται σε φιλικές περιοχές και χρησιμοποιούνται ως συστήματα αναγνώρισης και προειδοποίησης τέτοιων ουσιών, μπορούν να παρέχουν πληροφορίες άμεσα δίνοντας την δυνατότητα να αντιδράσουν μειώνοντας δραστικά τις απώλειες [4].

1.4.2 Περιβαλλοντικές εφαρμογές

Μερικές περιβαλλοντολογικές εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνουν την παρακολούθηση των κινήσεων των πτηνών, μικρών ζώων και εντόμων, την παρακολούθηση των περιβαλλοντολογικών συνθηκών που επηρεάζουν τις

καλλιέργειες, την χημική και βιολογική ανίχνευση, την βιολογική και περιβαλλοντολογική παρακολούθηση της θάλασσας, του εδάφους και του αέρα, την ανίχνευση φωτιάς στα δάση, την μετεωρολογική και γεωφυσική έρευνα, την ανίχνευση πλημμυρών και την ανίχνευση σύνθετων ζωντανών οργανισμών του περιβάλλοντος [11].

Ανίχνευση δασικών πυρκαγιών: Καθώς οι αισθητήριои κόμβοι μπορούν να είναι στρατηγικά, τυχαία και πυκνά αναπτυγμένοι σε ένα δάσος, μπορούν να αναμεταδώσουν την ακριβή προέλευση της φωτιάς στους τελικούς χρήστες πριν η πυρκαγιά εξαπλωθεί ανεξέλεγκτα. Εκατομμύρια αισθητήριων κόμβων μπορούν να εγκατασταθούν και να δημιουργήσουν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα χρησιμοποιώντας ασύρματες συχνότητες και οπτικά συστήματα. Επίσης, μπορούν να εξοπλιστούν με αποτελεσματικές μεθόδους εκμετάλλευσης της ενέργειας όπως ηλιακές κυψέλες καθώς είναι πιθανόν να λειτουργούν απρόσκοπτα χωρίς παρακολούθηση για μήνες ή και χρόνια [50]. Οι αισθητήριои κόμβοι μπορούν να συνεργάζονται ο ένας με τον άλλο προκειμένου να εκτελούν κατανεμημένη ανίχνευση και να αντιμετωπίζουν εμπόδια όπως δέντρα και βράχια, που παρεμποδίζουν το πεδίο ανίχνευσης [16].

Ανίχνευση πλημμυρών: Ένα παράδειγμα συστήματος ανίχνευσης πλημμυρών είναι το σύστημα ALERT το οποίο αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ. Διάφοροι τύποι αισθητήρων αναπτύχθηκαν στο σύστημα ALERT όπως βροχόπτωσης, μέτρησης επιπέδων του νερού και καιρού. Αυτοί οι αισθητήρες παρέχουν πληροφορίες σε μία κεντρική βάση δεδομένων με ένα προκαθορισμένο τρόπο. Σχέδια ερευνών όπως το COUGAR στο πανεπιστήμιο του Cornell και το σχέδιο DataSpace στο πανεπιστήμιο του Rutgers, είναι προσεγγίσεις στην αλληλεπίδραση με αισθητήριους κόμβους μέσα στο πεδίο που αυτοί παρακολουθούν για παρέχουν στιγμιαία και μακροπρόθεσμα ερωτήματα [11].

Γεωργία: Κάποια από τα οφέλη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι η ικανότητα να παρακολουθούν το ακριβές επίπεδο των φυτοφαρμάκων στο πόσιμο νερό, του επιπέδου διάβρωσης του εδάφους και του επιπέδου μόλυνσης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε πραγματικό χρόνο [104].

1.4.3 Εφαρμογές υγείας

Μερικές από τις εφαρμογές υγείας για τα δίκτυα αισθητήρων είναι η παροχή ευκολιών για άτομα με ειδικές ανάγκες, η παρακολούθηση ασθενών, η διάγνωση, η διαχείριση φαρμάκων σε νοσοκομεία, η παρακολούθηση των κινήσεων και των εσωτερικών διαδικασιών των εντόμων ή άλλων μικρών ζώων, τηλεπαρακολούθηση της ανθρώπινης φυσιολογίας και ο εντοπισμός και η παρακολούθηση των γιατρών και των ασθενών σε ένα νοσοκομείο [69].

Τηλεπαρακολούθηση της ανθρώπινης φυσιολογίας: Τα δεδομένα ενός ασθενή που συλλέγονται από τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να αποθηκευτούν για μεγάλο χρονικό διάστημα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ιατρική εξερεύνηση [49]. Το εγκατεστημένο δίκτυο αισθητήρων μπορεί επίσης να παρακολουθεί και να ανιχνεύει

την συμπεριφορά ηλικιωμένων ατόμων, όπως για παράδειγμα μια πτώση [21]. Αυτοί οι μικροί κόμβοι αισθητήρων επιτρέπουν στο άτομο μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων και επιτρέπουν στους γιατρούς να αναγνωρίσουν έγκαιρα προκαθορισμένα συμπτώματα [66]. Επίσης, βελτιώνουν την ποιότητα ζωής σε άτομα που έχουν ανάγκη σε σύγκριση με τα κέντρα παροχής θεραπείας [8].

Εντοπισμός και παρακολούθηση γιατρών και ασθενών μέσα σε ένα νοσοκομείο: Κάθε ασθενής μπορεί να έχει μικρούς και ελαφρύς αισθητήριους κόμβους προσαρτημένους πάνω του. Κάθε αισθητήριος κόμβος έχει μια συγκεκριμένη λειτουργία. Για παράδειγμα ένας αισθητήριος κόμβος μπορεί να ανιχνεύει τον καρδιακό παλμό ενώ ένας άλλος κάποιος άλλος να ανιχνεύει την αρτηριακή πίεση. Οι γιατροί επίσης μπορούν να φέρουν έναν αισθητήριο κόμβο, ο οποίος θα επιτρέπει σε άλλους γιατρούς να τους εντοπίζουν μέσα στο νοσοκομείο [4].

Χορήγηση φαρμάκων σε ένα νοσοκομείο: Αν οι αισθητήριοι κόμβοι εγκατασταθούν σε φάρμακα, μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα να συνταγογραφηθεί το λάθος φάρμακο σε ασθενή. Επειδή, οι ασθενείς θα έχουν αισθητήριους κόμβους που θα αναγνωρίζουν τις αλλεργίες τους και τις απαιτούμενες θεραπείες. Υπολογιστικά συστήματα όπως περιγράφονται, έχουν δείξει ότι μπορούν να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων ενεργειών από λάθος φάρμακα [86].

1.4.4 Οικιακές εφαρμογές

Οικιακός αυτοματισμός: Με την πρόοδο της τεχνολογίας, έξυπνοι αισθητήριοι κόμβοι και ενεργοποιητές μπορούν να τοποθετηθούν σε συσκευές, όπως ηλεκτρικές σκούπες, φούρνοι μικροκυμάτων, ψυγεία και βίντεο [73]. Αυτοί οι αισθητήριοι κόμβοι οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στις οικόσιτες συσκευές αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους μέσω ενός εξωτερικού δικτύου και μέσω του διαδικτύου ή του δορυφόρου. Επιτρέπουν στους τελικούς χρήστες να διαχειρίζονται εύκολα τις οικιακές συσκευές τους τοπικά ή απομακρυσμένα.

Έξυπνο περιβάλλον: Ο σχεδιασμός του έξυπνου περιβάλλοντος μπορεί να έχει δύο διαφορετικές προοπτικές για παράδειγμα μία με επίκεντρο τον άνθρωπο και μία με επίκεντρο την τεχνολογία [1]. Για την άνθρωποκεντρική προσέγγιση, ένα έξυπνο περιβάλλον πρέπει να προσαρμοστεί στις ανάγκες των τελικών χρηστών σε ότι αφορά στις δυνατότητες εισόδου και εξόδου. Για την τεχνοκεντρική προσέγγιση, νέες τεχνολογίες υλικού, δικτυακές λύσεις και ενδιάμεσες συσκευές θα πρέπει να αναπτυχθούν. Οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να είναι ενσωματωμένοι στην επίπλωση και σε οικιακές συσκευές και μπορούν να επικοινωνούν ο ένας με τον άλλον καθώς και με τον διακομιστή του δωματίου. Ο διακομιστής δωματίου μπορεί επίσης να επικοινωνεί με άλλους διακομιστές για να μαθαίνει για τις υπηρεσίες που προσφέρουν όπως για παράδειγμα εκτύπωση, σάρωση και αποστολή φαξ. Αυτοί οι διακομιστές δωματίου και οι αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να ενσωματωθούν με τις υπάρχουσες συσκευές και να γίνουν αυτό-οργανώμενοι, αυτό-ρυθμιζόμενοι και να

προσαρμοστούν σε συστήματα βασιζόμενα σε θεωρίες μοντέλων και ελέγχων. Ένα άλλο παράδειγμα έξυπνου περιβάλλοντος είναι το “Residential Laboratory” στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Georgia. Ο υπολογισμός και η αίσθηση σε αυτό το περιβάλλον θα πρέπει να είναι αξιόπιστος, επίμονος και διάφανος [26].

1.4.5 Άλλες εμπορικές εφαρμογές

Ορισμένες από τις εμπορικές εφαρμογές είναι η παρακολούθηση των υλικών, η διαχείριση αποθεμάτων, η παρακολούθηση της ποιότητας της παραγωγής, η κατασκευή έξυπνων χώρων γραφείου, ο περιβαλλοντολογικός έλεγχος σε συγκροτήματα γραφείων, ο έλεγχος των ρομπότ και η καθοδήγηση σε αυτόματα βιομηχανικά περιβάλλοντα, διαδραστικά παιχνίδια, διαδραστικά μουσεία, ο έλεγχος και η αυτοματοποίηση εργοστασιακών διαδικασιών, η παρακολούθηση περιοχών καταστροφής, η διάγνωση μηχανών, οι μεταφορές, η εγκατάσταση βιομηχανικών οργάνων, ο τοπικός έλεγχος μηχανισμών κίνησης, η ανίχνευση και παρακολούθηση κλοπών αυτοκινήτων, η παρακολούθηση και η ανίχνευση κινούμενων οχημάτων [104].

Περιβαλλοντολογικός έλεγχος σε συγκροτήματα γραφείων: Ο κλιματισμός και η θέρμανση των περισσότερων κτιρίων ελέγχεται κεντρικά. Ως εκ τούτου, η θερμοκρασία μέσα σε ένα δωμάτιο μπορεί να διαφέρει μερικούς βαθμούς από πλευρά σε πλευρά. Ένα καταναλωμένο δίκτυο ασύρματων αισθητήρων μπορεί να εγκατασταθεί για να ελέγχει την ροή του αέρα και την θερμοκρασία σε διάφορα σημεία του δωματίου [80].

Ανίχνευση και παρακολούθηση κλοπών οχημάτων: Αισθητήριοι κόμβοι μπορούν να αναπτυχθούν προκειμένου να ανιχνεύσουν και να αναγνωρίσουν απειλές μέσα σε μια γεωγραφική περιοχή και να αναφέρουν τις απειλές αυτές στους απομακρυσμένους τελικούς χρήστες μέσω του διαδικτύου για ανάλυση [78].

Διαχείριση ελέγχου απογραφής: Κάθε στοιχείο σε μια αποθήκη μπορεί να έχει ένα αισθητήριο κόμβο προσαρτημένο πάνω του. Οι τελικοί χρήστες μπορούν να εντοπίσουν την ακριβή θέση του αντικειμένου και να μετρήσουν τα αντικείμενα της ίδιας κατηγορίας. Αν οι τελικοί χρήστες επιθυμούν να εισάγουν νέα αντικείμενα, το μόνο που χρειάζεται να κάνουν είναι να τοποθετήσουν τους κατάλληλους αισθητήριους κόμβους στα αντικείμενα αυτά. Οι τελικοί χρήστες μπορούν να εντοπίσουν και να παρακολουθήσουν τα αποθέματα ανά πάσα στιγμή [4].

1.5 Πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε βιομηχανικό περιβάλλον

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διαθέτουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραδοσιακή ενσύρματη βιομηχανική παρακολούθηση και έλεγχο των συστημάτων που εκφράζονται στα ακόλουθα:

1.5.1 **Ανεπαρκείς περιορισμοί καλωδίωσης**

Οι ασύρματοι κόμβοι αισθητήρων εγκαθίστανται σε βιομηχανικές συσκευές και εξοπλισμούς για την παρακολούθηση των μετρήσεων όπως η θερμοκρασία, η πίεση, το επίπεδο και η ποιότητα ισχύος, και για να μεταδίδουν ή να λαμβάνουν σήματα ελέγχου για την ενεργοποίηση της συσκευής. Χωρίς τους περιορισμούς για καλωδίωση, οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που προηγουμένως ήταν απρόσιτες λόγω του φυσικού περιβάλλοντος ή δαπανηρές. Για παράδειγμα, η υιοθέτηση της ασύρματης μετάδοσης μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα των διατάξεων της εφαρμογής για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του εξοπλισμού. Επιπλέον, το σύστημα βιομηχανικής διεργασίας καθίσταται επεκτάσιμο και ευέλικτο λόγω της αυτονομία της συσκευής. Για παράδειγμα, οι συσκευές μπορούν εύκολα να μεταφερθούν και να αναδιοργανωθούν χωρίς να χρειάζεται να αφαιρεθούν τα παλιά καλώδια ή να τοποθετηθούν νέα. Επιπλέον, νέες συσκευές μπορούν να εγκατασταθούν σε οποιαδήποτε θέση οποιαδήποτε στιγμή [108].

1.5.2 **Εύκολη συντήρηση**

Μετά την εγκατάσταση της ενσύρματης συσκευής, οι μηχανικοί ελέγχου πρέπει να ασχοληθούν με διάφορα προβλήματα που εμφανίζονται στις καλωδιώσεις όπως διάβρωση, εισροές υδάτων στους αγωγούς, καμένη καλωδίωση, πάγος, προξένιση βλαβών από ζώα, φυσική φθορά που προκαλείται από τη συχνή μετακίνηση των οργάνων και απροσδόκητες διακοπές ρεύματος. Η ασύρματη συσκευή μπορεί να δουλέψει αδιάληπτα χωρίς προσοχή, το μόνο που χρειάζεται είναι μια αλλαγή μπαταρίας μετά από χρόνια λειτουργίας. Επιπλέον, είναι επίσης δυνατή η μεταφορά των τρεχόντων ασύρματων συσκευών ή η εγκατάσταση πρόσθετων ασύρματων συσκευών στο σύστημα ελέγχου μετά την εγκατάσταση με ελάχιστες αλλαγές στην υπάρχουσα διαμόρφωση.

1.5.3 **Μειωμένο κόστος**

Η καλωδίωση και η εγκατάσταση για ένα έργο αυτοματισμού σε μια υπάρχουσα εγκατάσταση μπορεί να τρέξει τόσο ψηλά όσο το 80% του συνολικού κόστους του συστήματος και μπορεί να υπερβεί τα 1.000 δολάρια ανά τετραγωνικό μέτρο σε ρυθμιζόμενα περιβάλλοντα, όπως ένα τυπικό εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας. Η μετάβαση στην ασύρματη σύνδεση εξαλείφει την καλωδίωση, τον αγωγό και την εγκατάσταση κόστος. Επιπλέον, για μερικές εφαρμογές, οι αισθητήριοι κόμβοι μπορεί να βάλουν την μετάδοσή τους σε κατάσταση εκτός λειτουργίας όταν είναι απαραίτητο, εξοικονομώντας με τον τρόπο αυτό πολλή ενέργεια σε σύγκριση με τις ενσύρματες συσκευές, πράγμα που απαιτεί σταθερή παροχή ηλεκτρικού ρεύματος [108].

1.5.4 **Βελτιωμένη επίδοση**

Τα ασύρματα βιομηχανικά δίκτυα αισθητήρων έχουν τη δυνατότητα να ξεπεράσουν το υπάρχον δίκτυο ελέγχου που χρησιμοποιεί ενσύρματες συσκευές. Πρώτον, έχει υψηλότερη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων. Για παράδειγμα, το περισσότερο δημοφιλή πρωτόκολλα ελέγχου HART (Highway Addressable Remote Transducer) έχει ρυθμό δεδομένων 1,2 kbps και το FF (Foundation Fieldbus) έχει ρυθμό δεδομένων 31,25 kbps, ενώ το WirelessHart έχει ρυθμό δεδομένων 250 kbps το οποίο βασίζεται το πρότυπο IEEE 802.15.4. Δεύτερον, σε αντίθεση με τα ενσύρματα συστήματα ελέγχου, όπου οι συσκευές μοιράζονται έναν μόνο δίαυλο, στα ασύρματα συστήματα οι συσκευές επικοινωνούν ταυτόχρονα εάν δεν υπάρχει κάποια παρεμβολή. Τρίτον, πολλοί αισθητήρες μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να αντικαταστήσουν την απόδοση του παραδοσιακού ενσύρματου συστήματος ελέγχου [95].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΡΟΤΥΠΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ

2.1 Τα πρότυπα της οικογένειας του IEEE 802.15.4

Η ομάδα εργασίας του IEEE 802.15 έχει διαμορφωθεί προκειμένου να δημιουργήσει ένα πρότυπο για τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (Wireless Personal Area Networks - WPANs) με περιοχή κάλυψης τα 10 μέτρα και τα οποία είναι χαμηλού κόστους, μικρής εμβέλειας και μικρού μεγέθους κάνοντας τα ιδανικά για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Το IEEE 802.15 περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές ομάδες διεργασιών, η οποίες έχουν καθοριστεί από την ομάδα του προτύπου IEEE 802.15, όπως το 802.15.1 για το Bluetooth το οποίο χειρίζεται μια ποικιλία εργασιών που κυμαίνονται από τα κινητά τηλέφωνα έως PDA επικοινωνίες κατάλληλες για φωνητικές επικοινωνίες [98]. Το IEEE 802.15.2 το οποίο βοηθάει στην συνύπαρξη συσκευών WPAN και WLAN, το IEEE 802.15.3 το οποίο είναι κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλή ποιότητα υπηρεσιών. Τέλος το IEEE 802.15.4 το οποίο εξυπηρετεί ένα σύνολο βιομηχανικών, οικιακών και ιατρικών εφαρμογών με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας λόγω του χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και πάνω στο οποίο στηρίζονται το ZigBee, WirelessHART και το ISA100.11a [25].

2.2 Πρότυπο IEEE 802.15.4

Το IEEE 802.15.4 είναι ένα πρότυπο που ορίζει το φυσικό στρώμα (PHY layer) και τον έλεγχο πρόσβασης μέσου (MAC) για ασύρματα προσωπικά δίκτυα μικρής εμβέλειας και χαμηλής ταχύτητας (LR WPANs - Low Rate Wireless Personal Area Networks) που σχηματίζονται από σταθερές ή κινούμενες συσκευές, τροφοδοτούμενες από μπαταρίες ή κάποια άλλη πηγή περιορισμένης ενέργειας χωρίς όμως να υποστηρίζει ανώτερα στρώματα ή μεθόδους δικτύωσης και ολοκληρώθηκε στις αρχές του 2003.

2.2.1 Συστατικά του IEEE 802.15.4

Το βασικότερο συστατικό των δικτύων που χρησιμοποιούν το πρότυπο 802.15.4 είναι η συσκευή ή κόμβος. Υπάρχουν δύο είδη κόμβων:

- Συσκευή πλήρους λειτουργίας (Full Function Device – FFD) και
- Συσκευή μειωμένης λειτουργίας (Reduced Function Device – RFD)

Η FFD συσκευή μπορεί να λειτουργήσει σε τρεις λειτουργίες: Ως συντονιστή του δικτύου (PAN coordinator – Personal Area Network) ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επιλογή βασικών παραμέτρων για την διαμόρφωση του δικτύου και την εκκίνησή του, ως συντονιστή συνδέσεων και ως μια συσκευή. Μια RFD συσκευή προορίζεται για

εφαρμογές που είναι εξαιρετικά απλές και δεν χρειάζεται να στείλουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων ενώ επίσης χρειάζονται ελάχιστους υπολογιστικούς πόρους. Μια FFD μπορεί να μιλήσει σε RFDs ή FFDs συσκευές ενώ μια RFD μπορεί να μιλήσει μόνο σε μια FFD [25].

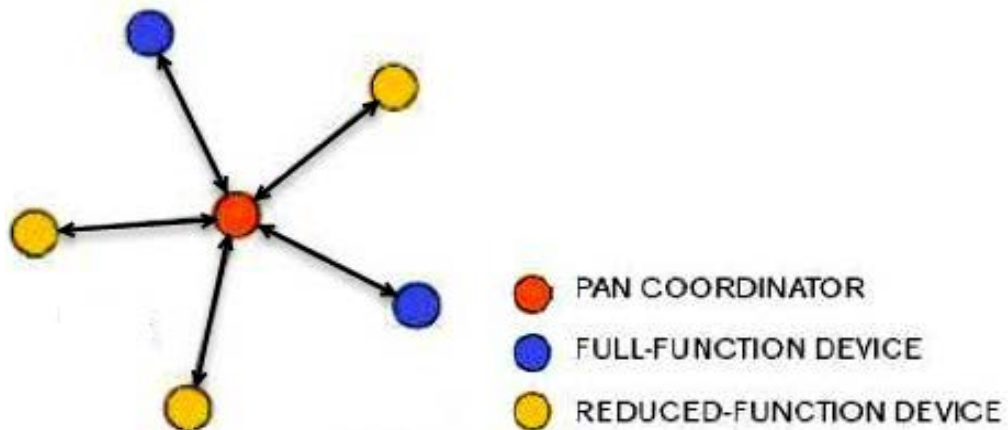
2.2.2 Τοπολογίες IEEE 802.15.4

Το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 υποστηρίζει τρεις βασικές τοπολογίες:

➤ Τοπολογία αστέρα

Στην τοπολογία αστέρα, η επικοινωνία δημιουργείται μεταξύ συσκευών και ενός μοναδικού κεντρικού ελεγκτή αποκαλούμενου συντονιστής PAN (Personal Area Network coordinator). Ο PAN coordinator μπορεί να τροφοδοτείται με ρεύμα ενώ οι συσκευές συνήθως τροφοδοτούνται από μπαταρία. Οι εφαρμογές που ωφελούνται από αυτήν την τοπολογία περιλαμβάνουν την αυτοματοποίηση των κατοικιών, τους προσωπικούς υπολογιστές (PC) και τα παιχνίδια [25].

Όταν ένας FFD ενεργοποιηθεί για πρώτη φορά, μπορεί να καθιερώσει το δίκτυό του και να γίνει ο PAN coordinator. Κάθε δίκτυο με τοπολογία τύπου αστέρα επιλέγει έναν PAN identifier, ο οποίος δεν χρησιμοποιείται από κάποιο άλλο δίκτυο εντός της περιοχής εκπομπής. Αυτό επιτρέπει τα δίκτυα τύπου star λειτουργούν ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα δίκτυα αστέρα. Οι τοπολογίες αστεριού είναι κοινές και παρέχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των μπαταριών [25].



Σχήμα 2.2.1: Τοπολογία αστέρα.

[Πηγή: Ergen S.C., (2004), ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary]

➤ Τοπολογία peer-to-peer (mesh)

Στην peer-to-peer τοπολογία, υπάρχει επίσης ένας PAN coordinator. Σε αντίθεση με την τοπολογία αστέρα οποιαδήποτε συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με οποιαδήποτε άλλη συσκευή, εφ' όσον είναι στην εμβέλεια

της άλλης. Ένα peer-to-peer δίκτυο μπορεί να είναι ad hoc, αυτοοργανωμένο και αυτοθεραπευόμενο. Εφαρμογές όπως ο βιομηχανικός έλεγχος, ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να επωφεληθούν από μία τέτοια τοπολογία. Επίσης, επιτρέπει την δρομολόγηση μηνυμάτων από μια συσκευή σε μία οποιαδήποτε άλλη μέσα στο δίκτυο. Οι τοπολογίες αυτές παρέχουν αξιοπιστία και επεκτασιμότητα [25].

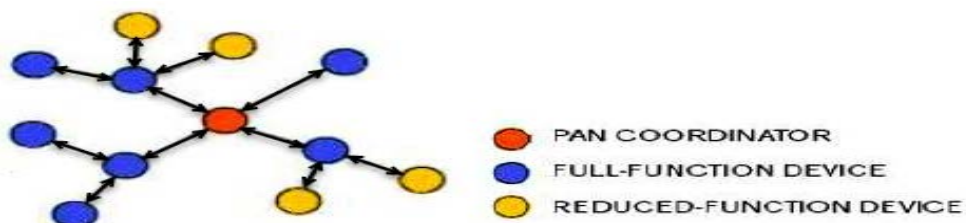


Σχήμα 2.2.2: Τοπολογία peer-to-peer.
[Πηγή: Ergen S.C., (2004), ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary]

➤ Τοπολογία Cluster-tree

Η τοπολογία cluster-tree αποτελεί μία ειδική περίπτωση δικτύου που χρησιμοποιεί την τοπολογία peer-to-peer στην οποία οι περισσότερες συσκευές είναι FFD, ενώ μία συσκευή RFD μπορεί να συνδεθεί μόνο όταν είναι στο τέλος της διακλάδωσης του cluster. Κάθε μία από τις συσκευές FFD μπορεί να λειτουργήσει σαν συντονιστής και να παρέχει υπηρεσίες συγχρονισμού σε άλλες συσκευές και συντονιστές. Ωστόσο μόνο ένας συντονιστής μπορεί να λειτουργήσει σαν PAN coordinator [25].

Ο PAN coordinator σχηματίζει την πρώτη ομάδα – cluster, της οποίας αποτελεί το cluster head (CLH) της ομάδας με το cluster identifier (CID) να λαμβάνει την τιμή 0, επιλέγοντας ένα αχρησιμοποίητο PAN identifier και μεταδίδοντας ακολουθίες δεδομένων σε γειτονικές συσκευές. Μια υποψήφια συσκευή λαμβάνοντας μια ακολουθία δεδομένων μπορεί να απαιτήσει να συνδεθεί στο δίκτυο μέσω του CLH. Αν ο PAN coordinator το επιτρέψει, τότε θα προστεθεί η συσκευή ως child στη λίστα των γειτόνων του. Η νέα αυτή συσκευή θα προσθέσει το CLH ως parent στη λίστα γειτόνων της και θα ξεκινήσει η μετάδοση περιοδικών ακολουθιών (periodic beacons). Βασικό πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η ευρεία κάλυψη μιας περιοχής, έχοντας ως μειονέκτημά τη χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης των μηνυμάτων [25].



Σχήμα 2.2.3: Τοπολογία cluster tree.
[Πηγή: Ergen S.C., (2004), ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary]

2.2.3 Η αρχιτεκτονική του IEEE 802.15.4

Η αρχιτεκτονική κάθε LR-WPAN στην κατηγορία των οποίων ανήκουν και τα WSNs (Wireless Sensor Networks), κατηγοριοποιείται σε μία σειρά από επίπεδα (layers), τα οποία διευκολύνουν τη μελέτη και το σχεδιασμό του δικτύου. Αποτελείται από το φυσικό επίπεδο, το οποίο περιλαμβάνει έναν πομποδέκτη για τις ράδιο-συχνότητες μαζί με κάποιους μηχανισμούς ελέγχου χαμηλού επιπέδου, και το επίπεδο MAC, το οποίο παρέχει μηχανισμούς πρόσβασης στο φυσικό κανάλι, όπως το CSMA/CA (Carrie Sense Multiple Access/ Collision Avoidance). Η πρόσβαση στο υπό-επίπεδο MAC γίνεται μέσω του Logical Link Control (LLC) και της ειδικής υπηρεσίας σύγκλισης του υπό-επιπέδου (Service Specific Convergence Sublayer - SSCS) [25].



Σχήμα 2.2.4: Αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4.

[Πηγή Mohamed Shahid Abdul Ghayum, B.E. (2010), Comparative Study of Wireless Protocols - Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, WirelessHART and ISA SP100, and their Effectiveness in Industrial Automation]

2.2.4 Το φυσικό επίπεδο (Physical Layer – PHY) του IEEE 802.15.4

Το φυσικό επίπεδο παρέχει δύο υπηρεσίες, την υπηρεσία δεδομένων (PHY data service) και την υπηρεσία διαχείρισης (PHY management service), που αλληλοεπιδρά με την οντότητα διαχείρισης του φυσικού επιπέδου (Physical Layer Management Entity – PLME).

Τα χαρακτηριστικά του PHY επίπεδο του 802.15.4 είναι [25]:

- Ενεργοποίηση και Απενεργοποίηση του Πομποδέκτη (transceiver), όπου αυτός τίθεται σε μία από τις τρεις καταστάσεις: εκπομπή, λήψη και sleeping.
- Ανίχνευση Ενέργειας (Energy Detection – ED), όπου πρόκειται για μια εκτίμηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος εντός του εύρους ζώνης του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4.
- Ένδειξη Ποιότητας Ζεύξης (Link Quality Indication – LQI)
- Επιλογή συχνότητας καναλιού, αφού οι ασύρματες ζεύξεις μπορούν να λειτουργήσουν σε 27 διαφορετικά κανάλια υπό το πρότυπο 802.15.4 και έτσι το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο για τη μετάθεση του πομποδέκτη σε ένα συγκεκριμένο κανάλι.

- Έλεγχος Αδράνειας Καναλιού (Clear Channel Assessment - CCA) ο οποίος εκτελείται σύμφωνα με μία τουλάχιστον από τις παρακάτω μεθόδους: Σε κατάσταση ενέργειας πάνω από το προκαθορισμένο όριο όπου το μέσο θεωρείται κατειλημμένο αν ανιχνευθεί επίπεδο ενέργειας πάνω από ένα προκαθορισμένο όριο. Σε κατάσταση ανίχνευσης φέροντος το μέσο θεωρείται κατειλημμένο αν ανιχνευθεί σήμα με διαμόρφωση και τα spreading χαρακτηριστικά του προτύπου 802.15.4. Στη συνδυασμένη κατάσταση, όπου απαιτούνται και οι δύο παραπάνω συνθήκες να λαμβάνονται υπόψιν για το αν το μέσο είναι κατειλημμένο ή όχι.
- Αποστολή και λήψη δεδομένων.

Το πρότυπο προσφέρει δύο επιλογές βασιζόμενες στην ζώνη συχνοτήτων. Οι δύο επιλογές βασίζονται στην τεχνική εξάπλωσης φάσματος συνεχούς ακολουθίας DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) με διαμόρφωση BPSK (Binary Phase Shift Keying) ή O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying). Οι ρυθμοί δεδομένων είναι [51]:

- 250Kbps στη ζώνη των 2.4 GHz με κωδικοποίηση O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying)
- 40Kbps στη ζώνη των 915 MHz με κωδικοποίηση BPSK (Binary Phase Shift Keying)
- 20Kbps στη ζώνη των 868 MHz με κωδικοποίηση BPSK

Ο υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στα 2.4 GHz αποδίδεται σε διαμόρφωση υψηλότερης τάξης. Οι χαμηλότερες συχνότητες παρέχουν μεγαλύτερο εύρος λόγω των μικρότερων απωλειών στη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Ο χαμηλός ρυθμός μπορεί να μεταφραστεί σε καλύτερη ευαισθησία και μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης. Ο υψηλότερος ρυθμός σημαίνει υψηλότερη απόδοση και μικρότερη καθυστέρηση ή χαμηλότερο κύκλο λειτουργίας (duty-cycle) [25].

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, οι αριθμοί καναλιών, οι διαμορφώσεις και οι ρυθμοί δεδομένων που υποστηρίζουν.

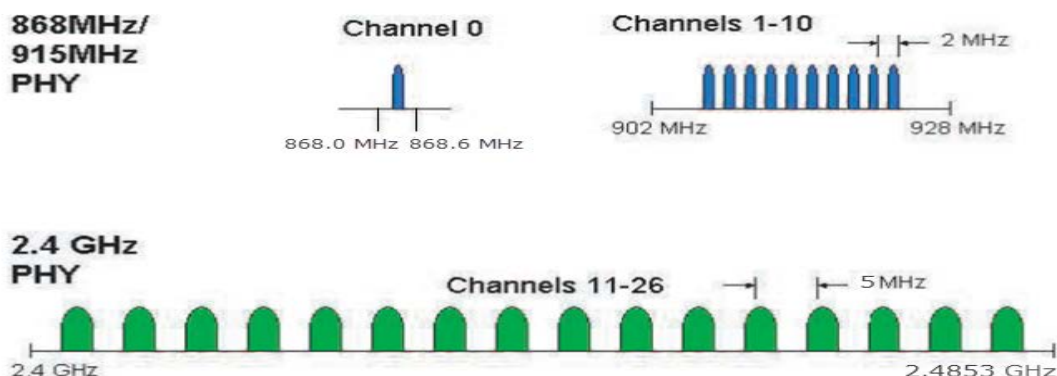
PHY (MHz)	Ζώνη Συχνοτήτων (MHz)	Παράμετροι Διάδοσης		Παράμετροι Δεδομένων			Κανάλια
		Ρυθμός Chip (kchip/s)	Διαμόρφωση	Ρυθμός Bit (kb/s)	Ρυθμός Συμβόλων (ksymbols/s)	Σύμβολα	
868/915	868-868,6	300	BPSK	20	20	Binary	1
	902-928	600	BPSK	40	40	Binary	10
2450	2400-2483,5	2000	O-QPSK	250	62,5	16-ary Orthogonal	16

Πίνακας 2.2.1: Ζώνες συχνοτήτων, αριθμός καναλιών, διαμορφώσεις και ρυθμοί δεδομένων για το IEEE 802.15.4

[Πηγή: Ergen S.C., (2004), ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary]

Στο πρωτόκολλο 802.15.4 εκχωρούνται συνολικά 27 κανάλια εκ των οποίων 16 κανάλια ανήκουν στη ζώνη των 2.4 GHz σε παγκόσμιο επίπεδο, 10 κανάλια στη ζώνη μεταξύ 902 και 928MHz για την Αμερική και 1 κανάλι στη ζώνη μεταξύ 868 και 868.8MHz για την Ευρώπη όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.5

Η ζώνη των 2.4 GHz αποτελεί την πιο διαδεδομένη ζώνη συχνοτήτων, που είναι και η κοινή ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας με τα υπόλοιπα ασύρματα δίκτυα και στις τρεις ζώνες.



Σχήμα 2.2.5: Οι διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων και τα αντίστοιχα κανάλια συχνοτήτων για το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4.

[Πηγή: Ergen S.C., (2004), ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary]

2.2.5 Το υποεπίπεδο MAC του IEEE 802.15.4

Το MAC υπό-επίπεδο παρέχει δυο υπηρεσίες, την υπηρεσία δεδομένων MAC (MAC data service) και την υπηρεσία διαχείρισης MAC (MAC management service), που αλληλοεπιδρά με την οντότητα διαχείρισης του MAC (MAC Layer Management Entity – MLME) και την υπηρεσία πρόσβασης σημείου (Service Access Point - SAP). Η MAC data service ενεργοποιεί τη μετάδοση και λήψη δεδομένων του MAC πρωτοκόλλου (MPDU) κατά μήκος της PHY data service [25].

Τα χαρακτηριστικά του MAC υπό-επίπεδο είναι [25]:

- Η διαχείριση του beacon
- Η πρόσβαση στο κανάλι
- Η διαχείριση των εγγυημένων χρονοθυρίδων (Guaranteed Time Slots - GTS)
- Η επικύρωση του πλαισίου
- Η αναγνώριση της παράδοσης του πλαισίου.

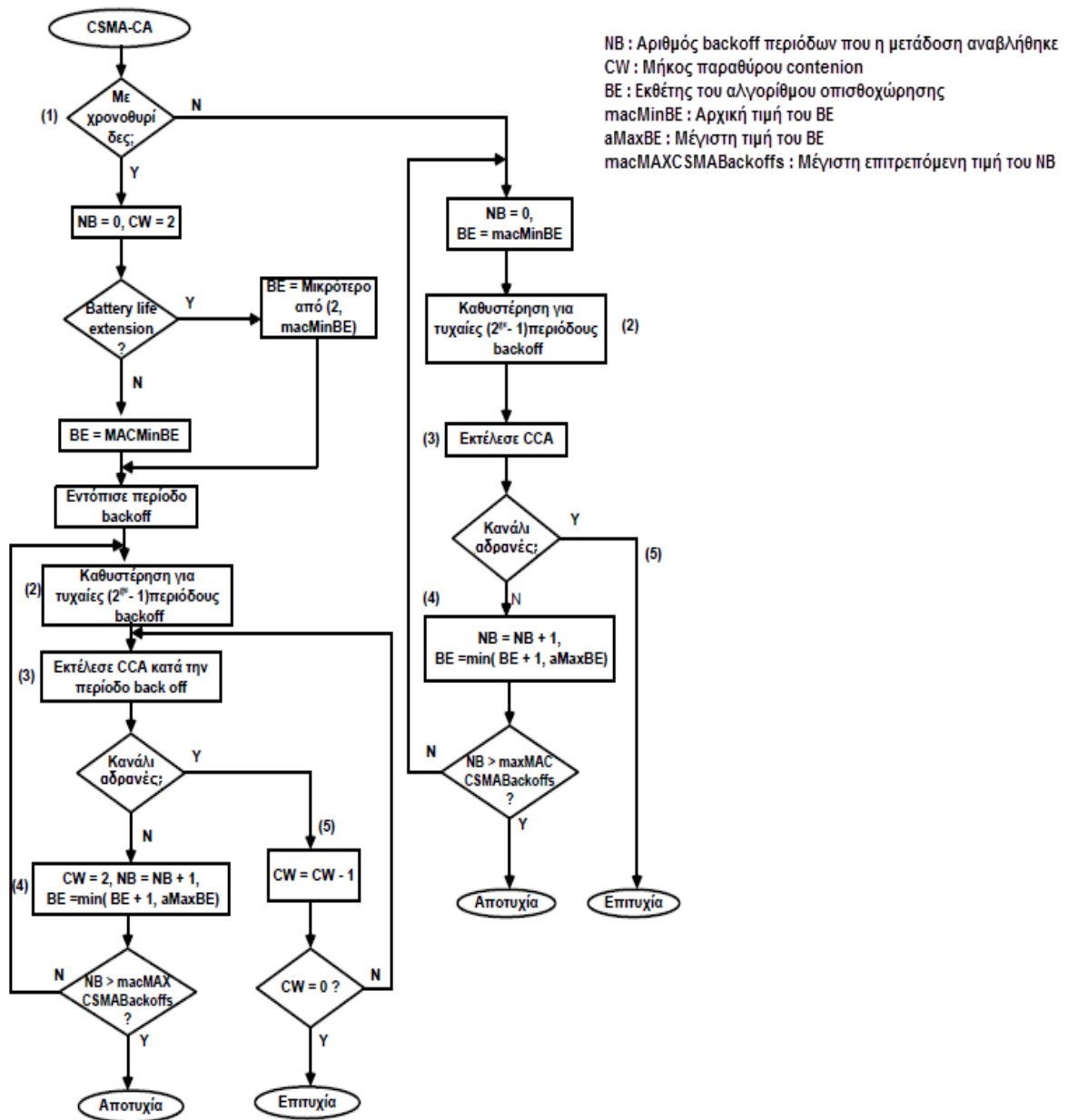
2.2.6 Ο αλγόριθμος CSMA-CA του IEEE 802.15.4

Ο αλγόριθμος Πολλαπλής Πρόσβασης με Ανίχνευση Φέροντος με Αποφυγή Συγκρούσεων (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – CSMA/CA) θα

χρησιμοποιηθεί από το υπό-επίπεδο MAC για την επιλογή της χρονικής στιγμής που θα εκπέμψει μια συσκευή ή θα τεθεί σε αναμονή για τη λήψη ενός πακέτου. Το IEEE 802.15.4 χρησιμοποιεί δύο τύπους προσπέλασης ανάλογα με τη διαμόρφωση του καναλιού[56]:

- Un-Slotted CSMA-CA: Δίκτυα με απενεργοποιημένη την εκπομπή beacon χρησιμοποιούν αυτό τον μηχανισμό πρόσβασης στο κανάλι. Κάθε φορά που μια συσκευή που θέλει να εκπέμψει δεδομένα πρέπει να περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα. Αν το κανάλι είναι αδρανές, αρχίζει να μεταδίδει ακολουθώντας έναν τυχαίο αλγόριθμο backoff. Αν το κανάλι είναι απασχολημένο, τότε ακολουθεί πάλι έναν τυχαίο αλγόριθμο backoff, η συσκευή θα πρέπει να περιμένει για άλλη μία τυχαία περίοδο προτού προσπαθήσει να αποκτήσει πάλι πρόσβαση στο κανάλι.
- Slotted CSMA-CA: Χρησιμοποιείται από δίκτυα με ενεργοποιημένη την εκπομπή beacon πλαισίων. Οι χρονοσχιστές απόσυρσης ευθυγραμμίζονται με την αρχή εκπομπής του πλαισίου beacon και όταν ένας κόμβος επιθυμεί να εκπέμψει στη διάρκεια της περιόδου ανταγωνισμού του καναλιού, εντοπίζει το όριο της επόμενης θυρίδας και περιμένει τυχαίο χρόνο. Αν το κανάλι είναι κατειλημμένο, θα πρέπει να περιμένει για ένα τυχαίο αριθμό από θυρίδες και να ξαναδοκιμάσει για την πρόσβασή του στο κανάλι. Αν το κανάλι είναι ελεύθερο η συσκευή μπορεί να ξεκινήσει να μεταδίδει στο επόμενο όριο της θυρίδας.

Και στις δυο περιπτώσεις ο αλγόριθμος υλοποιείται χρησιμοποιώντας μονάδες χρόνου που ονομάζονται περίοδοι backoff, όπου μια περίοδος backoff θα πρέπει να είναι ίση με μία σταθερά πχ $aUnitBackoffPeriod$. Ο μέγιστος αριθμός backoff που θα επιχειρήσει ο αλγόριθμος CSMA-CA προτού δηλώσει αποτυχία πρόσβασης στο κανάλι μπορεί να ποικίλει μεταξύ 0 και 5 (4 προκαθορισμένο) και μπορεί να δηλωθεί πάλι από μία σταθερά πχ $macMaxCSMABackoffs$. Να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος CSMA-CA δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετάδοση πλαισίων beacon, πλαισίων αναγνώρισης ή πλαισίων μετάδοσης [40].



Σχήμα 2.2.5: Διάγραμμα ροής μετάδοσης ενός πακέτου με τον CSMA-CA αλγόριθμο

[Πηγή: Ergen S.C., (2004), ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary]

Βήμα 1: Κάθε φορά που γίνεται προσπάθεια για μετάδοση, κάθε συσκευή θα έχει 3 μεταβλητές NB, CW και BE. Η NB μας δείχνει πόσες φορές ο αλγόριθμος χρειάστηκε να υποχωρήσει ενώ προσπαθούσε να μεταδώσει. Αρχικοποιείται με την τιμή 0 πριν από κάθε νέα μετάδοση. Η μεταβλητή CW είναι το μήκος του παραθύρου “contention” και η οποία ορίζει τον αριθμό των περιόδων υποχώρησης πριν ξεκινήσει η μετάδοση. Αρχικοποιείται στην τιμή 2 πριν από κάθε προσπάθεια για μετάδοση και παίρνει την τιμή και 2 κάθε φορά που το κανάλι εκτιμάται ότι είναι κατειλημμένο. Η

μεταβλητή CW χρησιμοποιείται μόνο για τον slotted CSMA-CA αλγόριθμο. Το BE είναι ο εκθέτης back off και σχετίζεται με το πόσες περιόδους back off μια συσκευή πρέπει να περιμένει πριν προσπαθήσει να εισαχθεί στο κανάλι. Αν και ο δέκτη της συσκευής είναι ενεργοποιημένος κατά τη διάρκεια εκτίμησης του καναλιού σε αυτό το τμήμα του αλγορίθμου, η συσκευή πρέπει να απορρίψει οποιαδήποτε πλαίσια που έχουν ληφθεί κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

Βήμα 2: Στο slotted CSMA-CA, το NB, το CW και το BE αρχικοποιούνται στο όριο της επόμενης περιόδου back off. Στο un-slotted CSMA-CA τα NB και BE αρχικοποιούνται στο βήμα 1. Το επίπεδο MAC θα καθυστερήσει για έναν τυχαίο αριθμό πλήρων back off περιόδων στη περιοχή 0 έως $2^{BE} - 1$.

Βήμα 3: Έπειτα θα απαιτήσει από το PHY να εκτελέσει μία CCA (Clear Channel Assessment). Το υποεπίπεδο MAC θα πρέπει έπειτα να προχωρήσει εάν τα απομείνουν τα επόμενα βήματα του αλγορίθμου CSMA-CA, δηλαδή στη μετάδοση των πλαισίων και οποιαδήποτε άλλη επιβεβαίωση μπορούν να ολοκληρωθούν πριν από το τέλος του CAP. Εάν το υποεπίπεδο MAC δεν μπορεί να προχωρήσει, θα πρέπει να περιμένει μέχρι την έναρξη του CAP του επόμενου superframe και θα επαναλάβει την αξιολόγηση.

Βήμα 4: Αν το κανάλι αξιολογηθεί ως απασχολημένο, το υποεπίπεδο MAC θα αυξήσει και τις δύο μεταβλητές NB και BE κατά ένα, εξασφαλίζοντας ότι η BE δεν θα είναι μεγαλύτερο από το $aMaxBE$. Στο slotted CSMA-CA, το CW μπορεί επίσης να επανέλθει στην τιμή 2. Εάν η τιμή του NB είναι μικρότερη ή ίση του $macMaxCSMABackoffs$, το CSMA-CA θα επιστρέψει στο βήμα 2, διαφορετικά το CSMA-CA θα τερματίσει σε μια κατάσταση αποτυχημένης πρόσβασης στο κανάλι.

Βήμα 5: Αν το κανάλι αξιολογηθεί ως αδρανές, στο slotted CSMA-CA, το υποεπίπεδο MAC θα επιβεβαιώσει ότι το παράθυρο λήγει πριν ξεκινήσει η μετάδοση. Για αυτό, το υπο-επίπεδο MAC πρώτα μειώνει το CW κατά ένα. Εάν το CW δεν είναι ίσο με 0, πηγαίνει στο βήμα 3 διαφορετικά αρχίζει τη μετάδοση στο όριο της επόμενης περιόδου backoff. Στο un-slotted CSMA-CA, το υποεπίπεδο MAC ξεκινά αμέσως τη μετάδοση εάν το κανάλι αξιολογηθεί αδρανές. Ολόκληρη η διαδικασία του CSMA-CA αλγορίθμου φαίνεται στο σχήμα 2.2.5 [25].

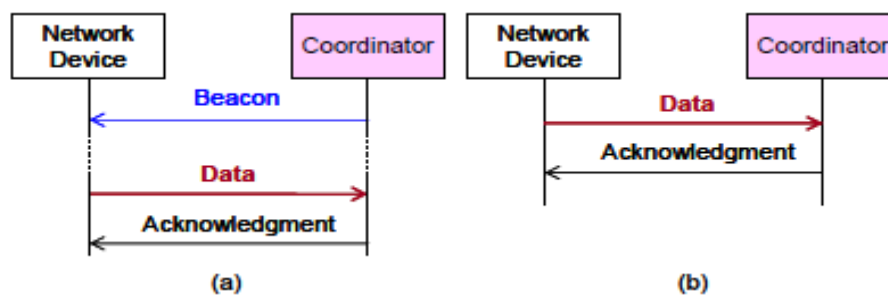
2.2.7 Μοντέλο μεταφοράς δεδομένων

Οι μηχανισμοί μεταφοράς δεδομένων εξαρτώνται από το αν το δίκτυο υποστηρίζει ή όχι τη μετάδοση των beacons. Ένα δίκτυο με ενεργοποιημένο το beacon χρησιμοποιείται από συσκευές με χαμηλή καθυστέρηση όπως ο υπολογιστής. Εάν το δίκτυο δεν χρειάζεται να υποστηρίξει τέτοιες συσκευές μπορεί να επιλέξει να μην χρησιμοποιήσει το beacon για φυσιολογικές μεταδόσεις [56].

➤ Άμεση μετάδοση δεδομένων

Όταν μια συσκευή θέλει να μεταφέρει δεδομένα στο συντονιστή εντός δικτύου με beacon λειτουργία, τότε το πρώτο πράγμα που πρέπει να κάνει είναι να περιμένει την εκπομπή του beacon από τον συντονιστή όπως φαίνεται στο

σχήμα 2.2.6 (a). Όταν η συσκευή εντοπίσει το beacon, συγχρονίζεται με τη δομή του υπερπλαισίου και τη σωστή στιγμή μεταφέρει τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας την slotted εκδοχή του CSMA-CA αλγορίθμου. Ο συντονιστής με τη σειρά του έχει τη δυνατότητα να στείλει ένα μήνυμα αναγνώρισης – Acknowledgement πίσω στη συσκευή. Από την άλλη μεριά όταν μια συσκευή (Network Device) θέλει να μεταφέρει δεδομένα στο συντονιστή (Coordinator) εντός ενός δικτύου που δεν υποστηρίζει τη beacon μετάδοση, τότε απλά μεταφέρει τα δεδομένα στον συντονιστή κάνοντας χρήση της unslotted εκδοχής του CSMA-CA αλγορίθμου. Ο συντονιστής με τη σειρά του έχει τη δυνατότητα να στείλει ένα μήνυμα αναγνώρισης πίσω στη συσκευή, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί 2.2.6 (b) [56].



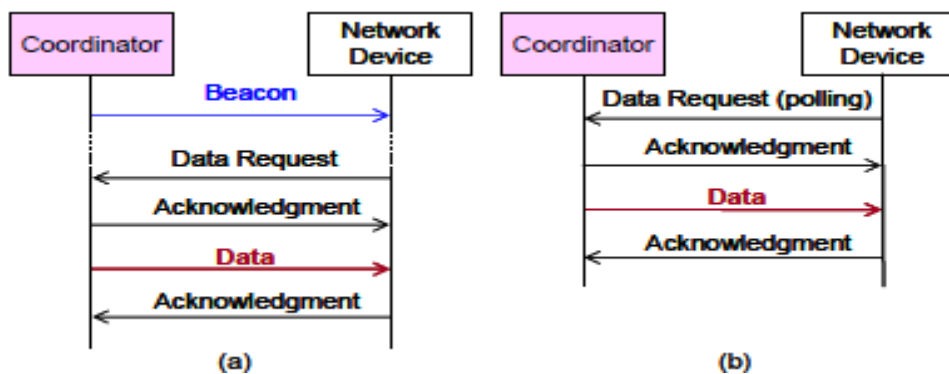
Σχήμα 2.2.6: Άμεση μετάδοση δεδομένων σε (a) beacon-enabled και (b) nonbeacon-enabled δίκτυα.

[Πηγή: Lee J.S. (2010) Performance evaluation of IEEE 802.15.4 for low-rate wireless personal area networks"]

➤ Έμμεση μετάδοση δεδομένων

Σε ένα δίκτυο με ενεργοποιημένη την beacon λειτουργία, όταν ο συντονιστής θέλει να στείλει δεδομένα προς μια συσκευή δηλώνει μέσω του beacon ότι το μήνυμα δεδομένων βρίσκεται σε αναμονή. Η συσκευή ακούει περιοδικά το beacon δίκτυο και όταν δει ότι υπάρχει μήνυμα που εκκρεμεί, στέλνει μία MAC εντολή ζητώντας τα δεδομένα με χρήση του slotted CSMA-CA αλγορίθμου. Ο συντονιστής στέλνει ένα μήνυμα αναγνώρισης πίσω στη συσκευή. Τα δεδομένα μεταφέρονται με τον ίδιο αλγόριθμο. Η συσκευή αναγνωρίζει τη σωστή λήψη στέλνοντας ένα αντίστοιχο μήνυμα. Όταν ολοκληρωθεί η αποστολή των δεδομένων, διαγράφεται από την λίστα αναμονής μηνυμάτων του συντονιστή. Η διαδικασία συνοψίζεται στο σχήμα 2.2.7 (a). Από την άλλη πλευρά όταν ο συντονιστής θέλει να μεταφέρει δεδομένα σε μια συσκευή εντός δικτύου χωρίς beacon λειτουργία, αποθηκεύει τα δεδομένα που προορίζονται για τη κατάλληλη συσκευή. Η συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με τον συντονιστή ζητώντας τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας μία MAC εντολή, η οποία απαιτεί τα δεδομένα με καθορισμένο ρυθμό μετάδοσης, χρησιμοποιώντας τον unslotted CSMA-CA αλγόριθμο σχήμα 2.2.7 (b). Ο συντονιστής στέλνει ένα μήνυμα πίσω στη συσκευή ότι αναγνωρίζει την προηγούμενη αίτηση. Αν τα δεδομένα βρίσκονται σε αναμονή, ο συντονιστής μεταδίδει τα δεδομένα χρησιμοποιώντας τον unslotted CSMA-CA αλγόριθμο.

Αν τα δεδομένα δεν βρίσκονται σε αναμονή, ο συντονιστής μεταφέρει το πλαίσιο δεδομένων με μηδενικό μήκος ωφέλιμου φορτίου ώστε να δείξει ότι τα δεδομένα δε βρίσκονταν σε αναμονή. Η συσκευή στέλνει ένα μήνυμα πίσω στον συντονιστή ότι αναγνωρίζει την προηγούμενη αίτηση [56].



Σχήμα 2.2.7: Έμμεση μετάδοση δεδομένων σε (a) beacon-enabled και (b) nonbeacon-enabled δίκτυα.

[Πηγή: Lee J.S. (2010) Performance evaluation of IEEE 802.15.4 for low-rate wireless personal area networks"]

2.3 Ασύρματο πρότυπο ZigBee

Το ZigBee είναι μια τυποποιημένη, μικρής απόστασης, χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης ισχύος ασύρματη τεχνολογία η οποία βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και σχεδιάστηκε για να ικανοποιήσει τις αυξανόμενες απαιτήσεις του δικτύου για χαμηλή ισχύ, αποδοτική ασύρματη δικτύωση των αισθητήρων και έλεγχο του δικτύου εφαρμογών. Το ZigBee προτείνεται από την ZigBee Alliance η οποία είναι μια κοινοπραξία εταιριών η οποία παρέχει αξιόπιστα και εύκολα στην χρήση ZigBee πρότυπα [6]. Το ZigBee είναι μια αυτοργανούμενη και αυτοαποκαθιστάμενη τεχνολογία ασύρματων δικτύων πλέγματος, η οποία υποστηρίζει πάνω από 64.000 συσκευές σε ένα ενιαίο δίκτυο. Μπορεί να λειτουργεί στα 2.4 GHz (2,4-2,4835 GHz) στην βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική ζώνη (ISM - Industrial, Scientific and Medical Band) μη αδειοδοτημένων συχνοτήτων με 16 κανάλια και ρυθμό δεδομένων 250Kbs για παγκόσμια χρήση. Στη ζώνη των 915 MHz με 10 κανάλια και ρυθμό δεδομένων 40Kbs, με 1 κανάλι και ρυθμό δεδομένων 20Kbs, με χαμηλότερους όμως ρυθμούς μετάδοσης [6].

Το ZigBee μπορεί να λειτουργήσει και στους δύο τύπους μηχανισμών πρόσβασης, σε κατάσταση με το beacon ενεργοποιημένο και σε κατάσταση non-beacon. Σε κατάσταση beacon οι κόμβοι είναι συγχρονισμένοι και το υπερπλαίσιο έχει χωριστεί σε 16 χρονοθυρίδες. Υπάρχει μία επιλογή για χρήση μέχρι εφτά από αυτές τις χρονοθυρίδες σε συγκεκριμένους κόμβους αυξάνοντας το ντεντερμινισμό, το οποίο ονομάζεται Εγγυημένος Χρόνος Υποδοχής (Guaranteed Slot Time - GTS) [6, 59].

Δύο επιλογές υλοποίησης προφέρονται για την προδιαγραφή ZigBee, το ZigBee και το ZigBee PRO. Ενώ το ZigBee έχει σχεδιαστεί για μικρότερα δίκτυα, το σύνολο των χαρακτηριστικών του ZigBee PRO βελτιώνει τις δυνατότητες λειτουργίας του ZigBee θέτοντας το για υποστήριξη σε μεγαλύτερα δίκτυα παρέχοντας όμως την ίδια αξιοπιστία και τα ίδια χαρακτηριστικά.

Το πρωτόκολλο ZigBee εισήλθε στην αγορά των ασύρματων τεχνολογιών προσφέροντας εξαιρετικό έλεγχο, επεκτασιμότητα, ασφάλεια, ευκολία στην χρήση, χαμηλό κόστος και χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Το πρωτόκολλο ZigBee προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών [6]:

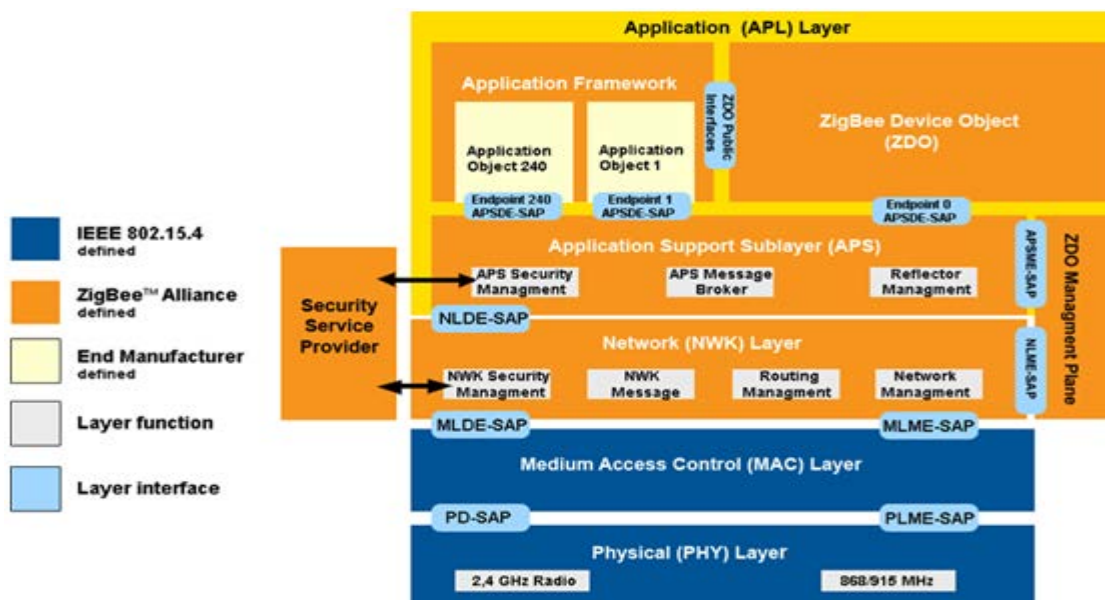
- **Αξιοπιστία** - Το ZigBee θεωρείται μια αξιόπιστη τεχνολογία, αφού εφαρμόζει μηχανισμούς αναγνώρισης (acknowledgement - ACK) και αναμετάδοσης από άκρο σε άκρο φιλτράροντας τα διπλότυπα πακέτα [6]. Η χρήση μετρητών ποιότητας της σύνδεσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την αξιοπιστία της τεχνολογίας αυτής. Το ZigBee επωφελείται από τον εκτιμητή ποιότητας σύνδεσης που προσφέρεται από το IEEE 802.15.4 βασιζόμενη στην εκτίμηση του ποσοστού σφαλμάτων bit (bit error rate - BER), που εφαρμόζεται σε πολλά ασύρματα chips. Η τοπολογία αστέρα είναι η λιγότερο σύνθετη τοπολογία και μπορεί να οδηγήσει σε απλότητα και αυξημένη αξιοπιστία, από την άλλη πλευρά, οι τοπολογίες σημείου προς σημείο μπορούν να αυξήσουν την αξιοπιστία του δικτύου, καθώς περιλαμβάνουν πολλαπλά μονοπάτια στον συντονιστή και στις τερματικές συσκευές ZigBee [6].
- **Αποφυγή Παρεμβολών** - Οι περισσότερες από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις οικιακές ηλεκτρικές συσκευές, όπως το Bluetooth, το Wi-Fi, το ασύρματο USB και οι φούρνοι μικροκυμάτων, μοιράζονται την ίδια 2.4 GHz ISM (Industrial, Scientific and Medical Band) μπάντα με το ZigBee. Συνεπώς, το πρόβλημα παρεμβολών είναι αναπόφευκτο σε τέτοιες καταστάσεις. Το ZigBee χρησιμοποιεί διαφορετικές τεχνικές κατανομής φάσματος για να προστατευτεί από τις πολλαπλές παρεμβολές στη ζώνη αυτή [6]. Πράγματι, το IEEE 802.15.4 προτείνει διάφορα κανάλια στις 915MHz και 2.4 GHz ζώνες για το ZigBee. Το ZigBee μπορεί να επιλέξει το κανάλι με τις λιγότερες παρεμβολές για την καταπολέμησή τους. Επιπλέον, ο συντονιστής ZigBee έχει τη δυνατότητα να επανενώσει το δίκτυο σε ένα διαφορετικό κανάλι σε περίπτωση παρεμβολών. Επιπλέον, το στρώμα MAC του IEEE 802.15.4 βασίζεται στο CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), όπου ο αισθητήριος κόμβος θα ακούει το κανάλι προτού μεταδώσει το πακέτο. Μια συσκευή που θέλει να διαβιβάσει τα ίχνη από τον τρόπο ύπνου, αφουγκράζεται αρχικά τη δραστηριότητα στο κανάλι της. Εάν ανιχνεύει δραστηριότητα, επιστρέφει στην κατάσταση ύπνου για ένα τυχαίο διάστημα και έπειτα «αναζωπυρώνει» και αφουγκράζεται πάλι τη δραστηριότητα. Εάν δεν ακούσει τίποτα, στέλνει το μήνυμά της. Φυσικά, δύο ή περισσότερες συσκευές μπορεί να είναι ακουστικά συγχρονισμένες και προετοιμασμένες για την αποστολή των στοιχείων [6].

- **Παγκόσμια Εφαρμογή** - Το πρωτόκολλο ZigBee έχει παγκόσμια αποδοχή σε όλες σχεδόν τις χώρες, δεδομένου ότι υιοθετεί το φυσικό στρώμα του IEEE 802.15.4 με 16 κανάλια για παγκόσμια χρήση, στα 915 MHz με 10 κανάλια για τη Βόρεια Αμερική και στα 868 MHz με ένα κανάλι για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [6].
- **Χαμηλό Κόστος** - Οι ZigBee συσκευές και οι πλατφόρμες είναι οικονομικώς αποδοτικές με την απλότητα και την ευελιξία του πρωτοκόλλου 802.15.4. Η συντήρηση του συστήματος, η ευελιξία και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας θα πρέπει να συμπεριληφθούν επίσης στο συνολικό κόστος του συστήματος [103].
- **Ασφάλεια** - Το ZigBee έχει ισχυρούς μηχανισμούς κρυπτογράφησης και ελέγχου ταυτότητας οι οποίοι εφαρμόζονται στα στρώματα εφαρμογών, δικτύωσης και MAC. Ενώ το υποεπίπεδο MAC διαχειρίζεται τις δικές του διαδικασίες ασφάλειας τα υπόλοιπα επίπεδα θα πρέπει να επιλέξουν ποιο επίπεδο ασφαλείας θα χρησιμοποιήσουν. Το ZigBee υιοθετεί το πρότυπο εξελιγμένης κρυπτογράφησης (Advance Encryption Standard - AES) με κωδικό επαλήθευσης και μήνυμα αναγνώρισης. Χρησιμοποιούνται τρία είδη κλειδιών, το κύριο κλειδί, το κλειδί ζεύξης και το κλειδί δικτύου, για να την διασφάλιση των πλαισίων όπως δρομολογήσεις μηνυμάτων και αιτήσεις συμμετοχής στο δίκτυο. Το δίκτυο μοιράζεται ένα κλειδί δικτύου ως ένα κοινό κλειδί και όλες οι συσκευές δικτύου το χρησιμοποιούν για να ασφαλίζουν τα πλαίσια του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, το κλειδί ζεύξης είναι ένα μυστικό κλειδί συνόδου που είναι μοναδικό για δύο συσκευές ZigBee οι οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους. Το κύριο κλειδί είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία κλειδιών ζεύξης [6].
- **Μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταριών** - Οι ZigBee κόμβοι είναι πολύ αποδοτικοί στους χρόνους ζωής των μπαταριών, που κυμαίνονται από μερικούς μήνες έως και πολλά χρόνια. Το πρότυπο ZigBee υιοθετεί την λειτουργία ύπνου για να παρατείνει τον χρόνο ζωής του δικτύου. Ενώ οι δρομολογητές και οι συντονιστές μένουν πάντα ξύπνιοι, οι τερματικές συσκευές μπορούν να κοιμούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα και να στέλνουν δεδομένα για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια του ύπνου, ο συντονιστής και οι δρομολογητές ZigBee κρατούν τα δεδομένα και όταν οι τερματικές συσκευές ZigBee είναι ξύπνιες, στέλνουν ένα αίτημα προς τους γονικούς κόμβους αν υπάρχουν πακέτα προς αποστολή [100].
- **Επεκτασιμότητα** - Τα επίπεδα PHY και MAC του προτύπου IEEE 802.15.4, τα οποία χρησιμοποιεί το ZigBee πρωτόκολλο, υποστηρίζουν το χειρισμό μεγάλου αριθμού συσκευών σε ένα δίκτυο, επομένως το δίκτυο ZigBee να είναι ιδιαίτερα επεκτάσιμο. 255 ZigBee κόμβοι (ένας είναι ο Master κόμβος και οι υπόλοιποι είναι Slave κόμβοι) μπορούν να περιέχονται σε ένα δίκτυο ZigBee. Στην περίπτωση που οι συντονιστές του δικτύου διασυνδεθούν μεταξύ τους,

για παράδειγμα σε τοπολογία αστέρα, τότε το μέγεθος όλου του δικτύου μπορεί να είναι μέχρι και 65.000 κόμβους [6].

2.3.1 Αρχιτεκτονική του ZigBee

Το ZigBee βασίζεται στις υπηρεσίες που παρέχουν το φυσικό επίπεδο και το MAC υποεπίπεδο του 802.15.4 και ορίζει δύο επίπεδα του μοντέλου OSI, το επίπεδο εφαρμογής και το επίπεδο δικτύου. Κάθε ένα από τα παραπάνω επίπεδα ορίζει συγκεκριμένες υπηρεσίες. Τα διαφορετικά επίπεδα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του σημείου πρόσβασης υπηρεσιών (SAP - Service Access Point). Αυτή η υπηρεσία περιλαμβάνει δύο οντότητες, την οντότητα δεδομένων (NLDE – SAP - Network Layer Data Entity – Service Access Point) για υπηρεσίες παροχής δεδομένων και την υπηρεσία διαχείρισης (NLME – SAP - Network Layer Management Entity - Service Access Point) οι οποίες παρέχουν όλες τις υπηρεσίες διαχείρισης μεταξύ των επιπέδων [87].



Σχήμα 2.3.1: Το ZigBee πρωτόκολλο ορίζεται από το στρώμα 3 και πάνω. Λειτουργεί με τα στρώματα 1 και 2 του προτύπου 802.15.4.

[Πηγή: Vanzago Laura, Overview on 802.15.4/ZigBee]

2.3.2 Επίπεδο δικτύου

Το επίπεδο δικτύου γεφυρώνει τα δυο πρότυπα, το ZigBee με το 802.15.4, καθώς εξασφαλίζει την σωστή λειτουργία του MAC επιπέδου και παρέχει υπηρεσίες όπως δυναμική δημιουργία δικτύου, ανάθεση διευθύνσεων δικτύου, πρόσθεση και αφαίρεση δικτυακών συσκευών, αποστολή μηνυμάτων, εφαρμογή ασφάλειας στο δίκτυο και υπηρεσίες ανακάλυψης διαδρομής [22].

Το στρώμα δικτύωσης του ZigBee μπορεί να υποστηρίξει διαφορετικές τοπολογίες δικτύων, όπως την τοπολογία Αστέρα, Δένδρου και Πλέγματος και ορίζει τρεις τύπους συσκευών [82]:

- **Συντονιστής (Coordinator)** - Αυτή η συσκευή είναι υπεύθυνη για την έναρξη και έλεγχο του δικτύου. Ο συντονιστής αποθηκεύει πληροφορίες για το δίκτυο το οποίο συμπεριλαμβάνει το κέντρο αξιοπιστίας και ενεργεί ως αποθετήριο για τα κλειδιά ασφάλειας [22].
- **Δρομολογητής (Router)** - Αυτές οι συσκευές επεκτείνουν την περιοχή κάλυψης του δικτύου, παρέχουν δυναμική διαδρομή γύρω από τα εμπόδια που εμφανίζονται στο δίκτυο και παρέχουν εναλλάχτηκες διαδρομές σε περίπτωση συμφόρησης του δικτύου ή αποτυχίας της συσκευής. Επίσης, έχει την δυνατότητα να αποδέχεται αιτήματα ένταξης στο δίκτυο σαν συντονιστής και παρέχει υποστήριξη σε γειτονικές συσκευές [22].
- **Τερματικές συσκευές (End Devices)** - Αυτές οι συσκευές μπορούν να μεταδώσουν ή να λαμβάνουν ένα μήνυμα, αλλά δεν μπορούν να εκτελέσουν καμία λειτουργία δρομολόγησης. Θα πρέπει να συνδεθούν είτε στον συντονιστή είτε στον δρομολογητή και δεν υποστηρίζουν γειτονικές συσκευές [22].

2.3.3 Επίπεδο εφαρμογής

Αποτελεί το υψηλότερο από τα επίπεδα που ορίζει το πρότυπο ZigBee και αποτελείται από το:

- **Πλαίσιο εφαρμογών (AF - Application Framework)** - Παρέχει μία περιγραφή του τρόπου δημιουργίας ενός προφίλ στη στοίβα του ZigBee (για να διασφαλίσει ότι τα προφίλ μπορούν να δημιουργηθούν με σωστό τρόπο). Προσδιορίζει επίσης μια σειρά τυποποιημένων τύπων δεδομένων για προφίλ, περιγραφείς που βοηθούν στην ανακάλυψη υπηρεσιών και διατάξεις πλαισίων για τη μεταφορά δεδομένων [22].
- **Αντικείμενο ZigBee συσκευής (ZDO - ZigBee Device Object)** - Ορίζει τον ρόλο μιας συσκευής μέσα στο δίκτυο (συντονιστής, δρομολογητής ή τελική συσκευή), εκκινεί ή και ανταποκρίνεται σε αιτήματα δέσμευσης και εντοπισμού και δημιουργεί μια ασφαλή σχέση μεταξύ των συσκευών του δικτύου. Παρέχει επίσης ένα πλούσιο σύνολο εντολών διαχείρισης που ορίζονται στο προφίλ συσκευών ZigBee (ZigBee Device Profile) [22].
- **Υπό-επίπεδο Υποστήριξης Εφαρμογής (APS - Application Support Sublayer)** - Υπεύθυνο για την παροχή μιας υπηρεσίας δεδομένων στην εφαρμογή και στα προφίλ της συσκευής ZigBee. Παρέχει επίσης μια υπηρεσία διαχείρισης για τη διατήρηση δεσμευτικών συνδέσεων και την αποθήκευση του ίδιου του πίνακα δεσμεύσεων [22].

2.4 Ασύρματο πρότυπο WirelessHART

Το WirelessHART είναι το πρώτο ανοιχτό πρότυπο βιομηχανικής ασύρματης επικοινωνίας, που σχεδιάστηκε ως ασύρματη επέκταση του πρωτοκόλλου HART (Highway Addressable Remote Transducer) [6, 95, 94]. Σε σύγκριση με το πρωτόκολλο HART, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στη διαδικασία αυτοματοποίησης των βιομηχανικών διαδικασιών με χιλιάδες δίκτυα και συσκευές HART, το WirelessHART έχει πολλά πλεονεκτήματα στο πεδίο του βιομηχανικού ελέγχου. Το WirelessHART προσφέρει απλότητα, ευρωστία, χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης και περισσότερη ευελιξία στην διαμόρφωση στις βιομηχανικές εφαρμογές αυτοματισμού και ελέγχου [95]. Το WirelessHART είναι μία ασύρματη τεχνολογία δικτύωσης η οποία λειτουργεί στη μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων 2.4 GHz βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική ζώνη (ISM - Industrial, Scientific and Medical Band), όπως πολλές άλλες ασύρματες τεχνολογίες. Το WirelessHART είναι ένα δίκτυο που χρησιμοποιεί την τοπολογία πλέγματος βασιζόμενο στο φυσικό επίπεδο του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4 και προσθέτει τα επίπεδο ζεύξης δεδομένων, επίπεδο δικτύου, επίπεδο μεταφοράς και επίπεδο εφαρμογής [6, 94].

Το WirelessHART κυκλοφόρησε επίσημα τον Σεπτέμβριο του 2007 από την HART Communication Foundation (HCF) ως το πρώτο ανοιχτό ασύρματο πρότυπο επικοινωνίας το οποίο σχεδιάστηκε για να καλύψει τις απαιτήσεις λειτουργίας των ασύρματων δικτύων [6]. Το WirelessHART είναι ένα ασφαλές και αξιόπιστο δίκτυο το οποίο βασίζεται στην τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης διαίρεσης χρόνου (TDMA), η οποία είναι δια λειτουργική με τους τύπους ασύρματων συσκευών διαφόρων κατασκευαστών. Όλες οι συσκευές είναι χρονικά συγχρονισμένες και επικοινωνούν μέσα σε προκαθορισμένες χρονοθυρίδες. Το TDMA ελαχιστοποιεί τις συγκρούσεις και μειώνει την κατανάλωση ισχύος των συσκευών [6, 59].

- **Παρεμβολές** - Το WirelessHART χρησιμοποιεί την μέθοδο κατανομής φάσματος (Frequency Hopping Spread Spectrum- FHSS) για να ξεπεραστούν οι παρεμβολές στα καναλιών επικοινωνίας στο βιομηχανικό περιβάλλον. Η τεχνική αυτή παρέχει στο WirelessHART την ικανότητα να μεταπήδα στα 16 κανάλια που ορίζονται από το πρότυπο IEEE802.15.4 για να αποτρέψει τις παρεμβολές ενώ η χρήση της μαύρης λίστας εμποδίζει την χρήση ορισμένων καναλιών. Επιπλέον, υιοθετεί τον μηχανισμό CCA (Clear Chanel Assessment) ως προαιρετική επιλογή πριν από την μετάδοση μηνυμάτων [6, 94].
- **Απλό** - Η απλότητα είναι το κύριο δομικό στοιχείο του προτύπου WirelessHART. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του WirelessHART, όπως η αυτό-οργάνωση και η αυτό-ίαση του ασύρματου δικτύου που υιοθετεί την τοπολογία πλέγματος, το μειωμένο κόστος εγκατάστασης και καλωδίωσης, η εύκολη προσαρμογή στις αλλαγές στις εγκατεστημένες υποδομές, επιτρέπουν στους χρήστες να το εφαρμόσουν εύκολα και να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα του WirelessHART προτύπου [6].
- **Αξιόπιστο** - Η αξιοπιστία είναι μια από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις στον τομέα του βιομηχανικού ελέγχου. Ωστόσο, η ποιότητα των επικοινωνιών στο

βιομηχανικό περιβάλλον απειλείται από τις μεταβαλλόμενες συνθήκες, τις διαφορετικές πηγές ραδιοσυχνοτήτων και τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Για αυτό το λόγο το WirelessHART χρησιμοποιεί τεχνική των χρονοθυρίδων πολλαπλής πρόσβασης (Time Division Multiple Access - TDMA) και διασπορά φάσματος άμεσης ακολουθίας (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS) βρίσκοντας εύκολα εναλλακτικές διαδρομές και προσαρμόζει τα μονοπάτια επικοινωνίας, ώστε να παρέχουν τη βέλτιστη απόδοση [6].

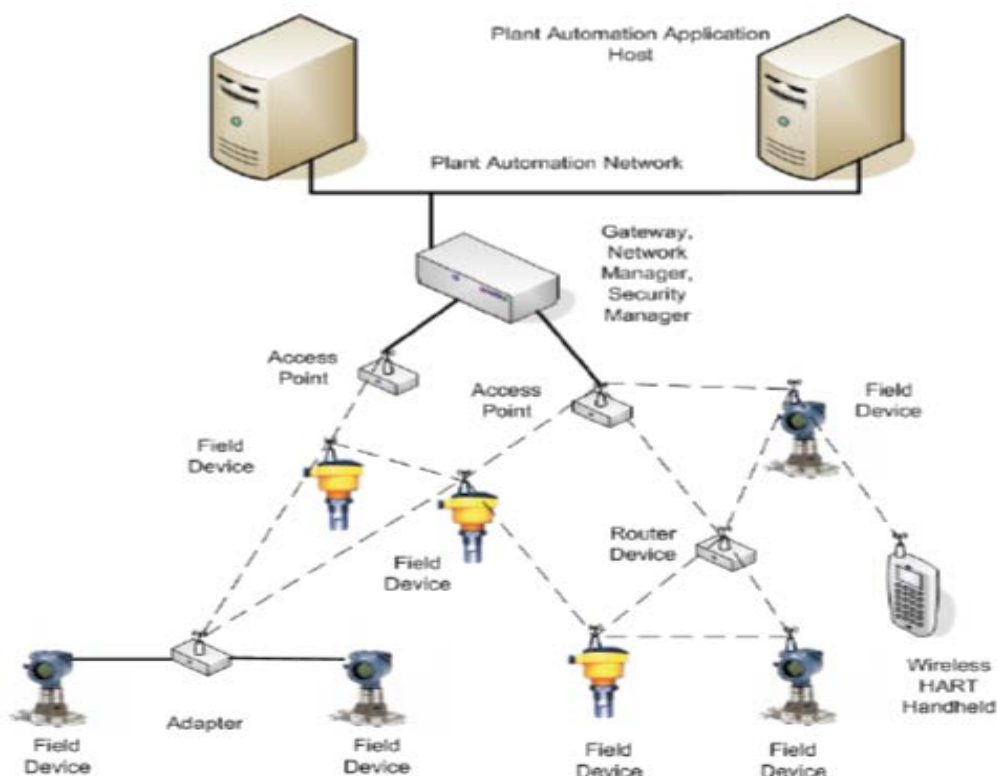
2.4.1 Αρχιτεκτονική του WirelessHART

Το WirelessHART υποστηρίζει υβριδικές (Πλέγματος/Αστέρα) τοπολογίες δικτύων καθώς και τοπολογίες απλού Αστέρα [6]. Τα βασικά συστατικά ενός WirelessHART δικτύου είναι τα εξής:

- **Συσκευές Πεδίου (Field Devices)** - Οι συσκευές πεδίου διαθέτουν ικανότητες δρομολόγησης και εγκαθίστανται στον εργοστασιακό εξοπλισμό συγκεντρώνοντας και μεταδίδοντας τις απαραίτητες πληροφορίες σε όλο το δίκτυο για έλεγχο και παρακολούθηση των διαδικασιών. Διαθέτουν, επίσης τη δυνατότητα να συνδέονται με τον εργοστασιακό εξοπλισμό μέσω άλλων ασύρματων δικτύων ή απευθείας μέσω του δικτύου WirelessHART [102].
- **Προσαρμογείς (Adapters)** - Οι προσαρμογείς χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα για την μετατροπή από ένα ενσύρματο πρωτόκολλο σε ένα ασύρματο. Για παράδειγμα, συνδέουν συσκευές HART οι οποίες θέλουν να επικοινωνήσουν μέσω του δικτύου WirelessHART [102].
- **Δρομολογητές (Routers)** - Οι δρομολογητές είναι ειδικές μορφές των συσκευών πεδίου, οι οποίοι δεν παρεμβαίνουν στη διαδικασία μέχρι να χρειαστούν σε περιπτώσεις βελτίωσης της ασύρματης συνδεσιμότητας [59].
- **Πύλη (Gateway)** - Οι πύλες ενεργούν ως διεπαφή μεταξύ του WirelessHART δικτύου και της εργοστασιακής εγκατάστασης μέσω ενός ή περισσότερων σημείων πρόσβασης καθώς είναι υπεύθυνοι για την επικοινωνία μεταξύ του κεντρικού υπολογιστή και των συσκευών πεδίου [102].
- **Συσκευές χειρός (Handheld Devices)** - Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση, επιβεβαίωση και έλεγχο όλων των ειδών WirelessHART συσκευών. Μια συσκευή χειρός μπορεί να συνδεθεί είτε στο δίκτυο διαμέσου ενός ασύρματου δικτύου στον εργοστασιακό εξοπλισμό (πχ WLAN, Bluetooth) και επικοινωνούν με τις WirelessHART συσκευές διαμέσου του κεντρικού υπολογιστή. Είτε να συνδεθεί κατευθείαν στο WirelessHART δίκτυο ως μία συσκευή WirelessHART όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.2 [59].
- **Διαχειριστής Δικτύου (Network Manager)** - Ο διαχειριστής του δικτύου είναι ο κεντρικός “εγκέφαλος” του δικτύου WirelessHART. Είναι υπεύθυνος για τη συνολική διαμόρφωση και συντήρηση του WirelessHART δικτύου, των διαδρομών οι οποίες πρόκειται να διαμορφωθούν, ενημερώνει τις

πληροφορίες δρομολόγησης και το σχέδιο επικοινωνίας, όταν νέοι κόμβοι αισθητήρων εντάσσονται στο δίκτυο. Μόνο ένας διαχειριστής δικτύου μπορεί να υπάρχει ανά WirelessHART δίκτυο, με την πιθανότητα να υπάρχει ένας εφεδρικός διαχειριστής για να αναλάβει σε περίπτωση αποτυχίας του κεντρικού [59].

- **Διαχειριστής Ασφαλείας (Security manager)** - Ο διαχειριστής ασφάλειας είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση της κατάστασης ασφάλειας του δικτύου και την πρόληψη επιθέσεων, διανέμοντας κλειδιά ασφαλείας για το δίκτυο. Επίσης, διαθέτει τον πίνακα με τις εγκεκριμένες συσκευές για να συμμετάσχουν στο δίκτυο [81].



Σχήμα 2.4.1: Τυπική μορφή αρχιτεκτονικής ενός δικτύου WirelessHart

[Πηγή: Nixon, M. (2012) A Comparison of WirelessHART and ISA100.11a]

Η στοίβα πρωτοκόλλων του προτύπου WirelessHART βασίζεται στην αρχιτεκτονική επιπέδων του OSI.

- Το φυσικό στρώμα (physical layer) βασίζεται στο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 και λειτουργεί στις συχνότητες που καθορίζονται από αυτό, δηλαδή στα 2,4 GHz της Βιομηχανικής, Επιστημονικής και Ιατρικής ζώνης (ISM).
- Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (data link layer) υιοθετεί την τεχνική της χρονικής πολυπλεξίας (Time Division Multiple Access, TDMA) και κάνει χρήση των superframes για την αποφυγή συγκρούσεων κατά την διάρκεια της επικοινωνίας.

- Το επίπεδο δικτύου (network layer) είναι υπεύθυνο για την δρομολόγηση των πακέτων από την αρχική πηγή προς τον τελικό προορισμό, συντηρεί τους πίνακες δρομολόγησης και παρέχει ασφάλεια στις επικοινωνίες από άκρο σε άκρο. Επίσης, ο διαχειριστής του δικτύου εισάγεται στο επίπεδο για να συντηρήσει όλες τις πληροφορίες για την τοπολογία του δικτύου, να διαχειριστεί την δρομολόγηση και να ανανεώσει τους πίνακες δρομολόγησης για κάθε συσκευή που προστίθεται στο δίκτυο [6].
- Στο επίπεδο μεταφοράς (transport layer) είναι υπεύθυνο για την μεταφορά του πακέτου από άκρο σε άκρο σε διάφορες συσκευές εντός δικτύου [6].
- Το επίπεδο εφαρμογής (application layer) είναι στην ουσία το πρότυπο HART. Παρέχει πρόσβαση στο πρότυπο WirelessHART μέσω των κεντρικών υπολογιστικών συστημάτων, των φορητών υπολογιστών και των συστημάτων διαχείρισης [68].

OSI Layer	Function	HART	
Application	Provides the User with Network Capable Applications	Command Oriented. Predefined Data Types and Application Procedures	
Presentation	Converts Application Data Between Network and Local Machine Formats		
Session	Connection Management Services for Applications		
Transport	Provides Network Independent, Transparent Message Transfer	Auto-Segmented Transfer of Large Data Sets, Reliable Stream Transport, Negotiated Segment Sizes.	
Network	End to end Routing of Packets. Resolving Network Addresses	Power-Optimized, Redundant Path, Self-Healing Wireless Mesh Network.	
Data Link	Establishes Data Packet Structure, Framing, Error Detection, Bus Arbitration	Mechanical / Electrical Connection. Transmits Raw Bit Stream	Secure & Reliable, Time Synched TDMA/CSMA, Frequency Agile with ARQ
Physical	Mechanical / Electrical Connection. Transmits Raw Bit Stream	Simultaneous Analog & Digital Signalling. Normal 4-20mA Copper Wiring	2.4GHz Wireless, 802.15.4 Based Radios, 10dBm Tx Power
		Wired FSK/PSK & RS485	Wireless 2.4GHz

Σχήμα 2.4.2: Στοιβά πρωτοκόλλων του προτύπου WirelessHART

[Πηγή: Nixon, M. (2012) A Comparison of WirelessHART and ISA100.11a]

2.5 **Ασύρματο πρότυπο** ISA.100.11.a

Η ISA.100 επιτροπή η οποία αποτελεί μέλος της διεθνούς εταιρίας αυτοματισμών (ISA - International Society of Automation) ιδρύθηκε το 2005 με σκοπό την δημιουργία προτύπων, την θέσπιση πρακτικών και τεχνικών αναφορών για την υλοποίηση ασύρματων συστημάτων αυτοματισμού και ελέγχου περιβάλλοντος, με αρχική εστίαση στο πεδίο ελέγχου [6]. Το πρότυπο ISA.100.11a εγκρίθηκε από την από την ISA standards and Practice Board ως επίσημο πρότυπο το 2009, είναι ένα ανοιχτού τύπου ασύρματο πρότυπο δικτύων mesh το οποίο στοχεύει να παρέχει αξιοπιστία και ασφαλή ασύρματη επικοινωνία και υπηρεσίες για τον έλεγχο των διαδικασιών και των σχετικών εφαρμογών [102]. Το ISA.100.11a προορίζεται να είναι μέρος μιας οικογένειας προτύπων σχεδιασμένο για να υποστηρίζει μια ευρεία γκάμα εφαρμογών. Χαμηλού ρυθμού δεδομένων ασύρματη επικοινωνία παρέχεται από το πρότυπο ISA.100.11a με αυξημένη ασφάλεια και διαχείριση των συστημάτων [6].

Παρακάτω ακολουθούν μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του προτύπου:

- **Ανθεκτικότητα** - Το πρότυπο ISA.100.11a είναι πολύ ανθεκτικό καθώς χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικούς τύπους απόκλισης, χωρική απόκλιση για να χρησιμοποιεί πολλαπλά μονοπάτια για την προώθηση των δεδομένων μέσα στο mesh δίκτυο, την απόκλιση συχνότητας για να επιτρέπει την χρήση χαμηλών συχνοτήτων και την απόκλιση χρόνου για να χειριστεί το μηχανισμό επανάληψης. Αυτή η ποικιλομορφία παρέχει στο πρωτόκολλο ανθεκτικότητα σε συνδυασμό με τις επιδόσεις του φυσικού επιπέδου [6].
- **Επεκτασιμότητα** - Το δίκτυο ISA.100.11a μπορεί να χειριστεί χιλιάδες συσκευές, ωστόσο υπάρχει ένας πρακτικός περιορισμός για να μην επηρεάζεται δυσμενώς η κυκλοφορία των δεδομένων του δικτύου και η κατανάλωση ενέργειας των αισθητήριων κόμβων. Ως εκ τούτου, σε ένα δίκτυο ISA.100.11a επιτρέπονται 50-100 συσκευές [72].
- **Ασφάλεια** - Η ασφάλεια είναι μία από τις πιο σημαντικές απαιτήσεις στα βιομηχανικά συστήματα και στα συστήματα αυτοματισμού. Το πρότυπο χρησιμοποιεί ελέγχους ακεραιότητας και μια προαιρετική κρυπτογράφηση στο επίπεδο σύνδεσης δεδομένων. Επιπλέον, ένας μηχανισμός ασφαλείας παρέχεται στο επίπεδο μεταφοράς. Ένα κοινό κλειδί και ένα ιδιωτικό κλειδί ή ένα πιστοποιητικό είναι απαραίτητα για τους αισθητήριους κόμβους που θέλουν να συμμετάσχουν στο δίκτυο [107].
- **Κατανάλωση ενέργειας** - Οι αισθητήριοι κόμβοι τροφοδοτούνται με μπαταρία, επομένως η κατάσταση αυτή θέτει κάποιους περιορισμούς στην συνέχεια της αξιόπιστης και αποδοτικής επικοινωνίας δεδομένων για το πρότυπο αυτό. Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, ορισμένες τεχνικές υιοθετήθηκαν. Για μη κρίσιμες εφαρμογές ελέγχου εφαρμόζεται μηχανισμός συγχρονισμένης δειγματοληψίας. Αυτός ο μηχανισμός παρέχει μείωση των ρυθμών αναφοράς, δεδομένου ότι οι μεταδόσεις πραγματοποιούνται όταν ο ρυθμός μεταβολής των μετρήσεων υπερβαίνει ένα ορισμένο όριο. Μία άλλη

τεχνική είναι ο προσαρμογέας ελέγχου μεταδιδόμενης ισχύς. Αυτός ο έλεγχος παρέχει στις συσκευές πεδίου του ISA.100.11.a δυναμικό έλεγχο του επιπέδου ισχύος της μετάδοσης, και επομένως, η ισχύς μπορεί να εξυπηρετηθεί. Η τελευταία τεχνική προτιμάται περισσότερο για τοπολογίες αστέρα η οποία είναι αποτελεσματική στη παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου. Όλο το ISA.100.11.a βασίζεται στο IEEE 802.15.4 το οποίο μαζί με την χρήση της τεχνικής DSSS παρέχουν σημαντική μείωση της κατανάλωσης ισχύος [91].

- **Αξιοπιστία** - Για την παροχή αξιοπιστίας σε όλο το δίκτυο μηχανισμοί αποφυγής παρεμβολών θα πρέπει να αναπτυχθούν. Το ISA.100.11.a χρησιμοποιεί αυτούς τους μηχανισμούς για να ξεπεράσει τις παρεμβολές και να αυξήσει την αξιοπιστία των επικοινωνιών [6].

2.5.1 Αρχιτεκτονική του ISA.100.11.a

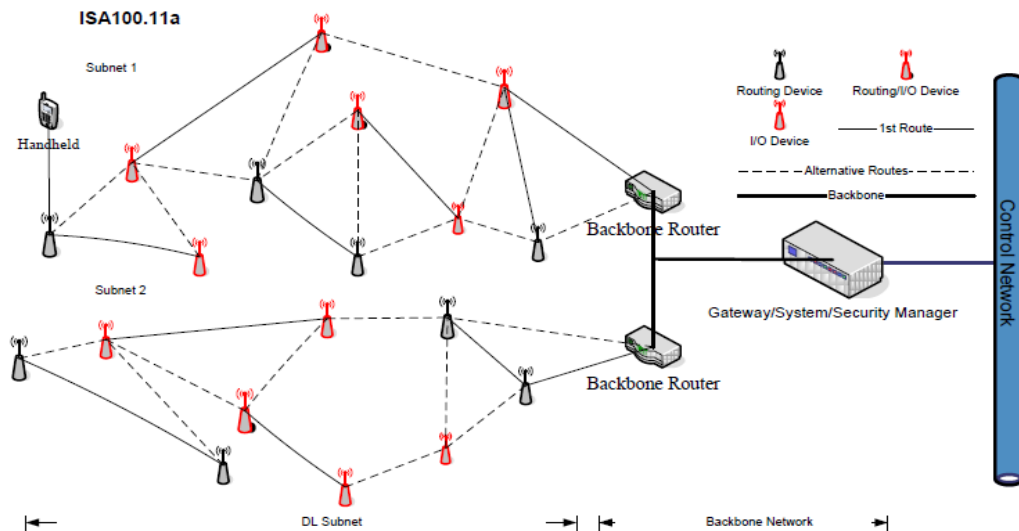
Το δίκτυο ISA.100.11.a αποτελείται από τα κατάλληλα στοιχεία για να μπορεί να διαχειρίζεται τους πόρους του δικτύου, να δρομολογεί την κίνηση των δεδομένων μέσα στο δίκτυο και να επικοινωνεί εύκολα με άλλα συστήματα. Επιπλέον, υπάρχει ένα δίκτυο κορμού το οποίο μπορεί να οριστεί ως ένα ενσύρματο δίκτυο όπου διαφορετικές συσκευές του δικτύου μπορούν να συνδεθούν. Γενικά, το ISA.100.11.a έχει δύο διαφορετικούς τύπους συσκευών, τις συσκευές κορμού και τις συσκευές πεδίου. Οι συσκευές πεδίου μπορεί να έχουν την ικανότητα δρομολόγησης (routing) ή μη δρομολόγησης (non-routing). Για παράδειγμα μια συσκευή χειρός μπορεί να αναγνωριστεί ως non-routing η οποία μπορεί να συνδεθεί σε μία πλήρως λειτουργική συσκευή για έλεγχο ή μετάδοση δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, οι συσκευές κορμού αναγνωρίζονται ως πλήρως λειτουργικές συσκευές οι οποίες έχουν συνεχείς πηγές ενέργειας. Ο δρομολογητής κορμού, η πύλη, ο διαχειριστής συστήματος, ο διαχειριστής ασφαλείας, οι συσκευές δρομολόγησης, non-routing συσκευές είναι μερικά από τα στοιχεία του δικτύου ISA.100.11.a. Το δίκτυο ISA.100.11.a μπορεί να έχει ένα ή περισσότερους δρομολογητές κορμού ή πύλες. Μια γενική εικόνα του δικτύου φαίνεται στο σχήμα 2.5.1 [6].

Παρακάτω ακολουθούν μερικές από τις συσκευές του δικτύου ISA.100.11.a:

- **Η Πύλη (Gateway)** - Η πύλη είναι μία από τις σημαντικότερες συσκευές πεδίου μέσα στο δίκτυο. Ενεργούν ως διεπαφή μεταξύ του δικτύου και της εργοστασιακής εγκατάστασης [74].
- **Διαχειριστή Συστήματος (System manager)** - Είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο του δικτύου, τον συσκευών δικτύου, των πόρων του δικτύου και των επικοινωνιών. Μετά την σύνδεση στο δίκτυο είναι ικανό να ελέγχει την τοπολογία του δικτύου, να εκχωρεί πόρους και να παρέχει πίνακες με τους κατάλληλους γειτονικούς κόμβους. Για αυτό το λόγο, ο διαχειριστής συστήματος θα πρέπει να γνωρίζει το επίπεδο συνδεσιμότητας του δικτύου [6].

- **Ο Διαχειριστής Ασφαλείας (Security management)** - Ο διαχειριστής ασφαλείας παρέχει υπηρεσίες διαχείρισης κλειδιού για την ασφαλή επικοινωνία δεδομένων σε συνεργασία με το διαχειριστή συστήματος και επικυρώνει τις συσκευές. Για να είναι σε θέση να επικοινωνεί με τους γειτονικούς κόμβους, ο αντίστοιχος κόμβος θα χρειάζεται ένα καινούργιο κλειδί ασφαλείας από τον διαχειριστή ασφαλείας. Ως εκ τούτου, μπορεί να εγγυηθεί ότι μόνο πιστοποιημένες συσκευές μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους [6].
- **Ο δρομολογητής (Routing device)** - Ο δρομολογητής είναι ικανός να δρομολογεί δεδομένα σε άλλες συσκευές μέσα στο δίκτυο ISA.100.11.a [6].
- **Η συσκευή I/O (Non-routing I/O device)** - Η συσκευή αυτή δεν μπορεί να δρομολογεί δεδομένα, παρέχει τα δεδομένα των αισθητήρων σε άλλες συσκευές ή χρησιμοποιεί δεδομένα από άλλες συσκευές.
- **Οι δρομολογητές κορμού (Backbone router)** - Ο δρομολογητής κορμού είναι υπεύθυνος για την δημιουργία σύνδεσης με άλλα δίκτυα δρομολογώντας δεδομένα στο δίκτυο κορμού ή από το δίκτυο κορμού. Αποθηκεύει τα δεδομένα που φθάνουν στις συσκευές του ISA.100.11.a [6].

Το δίκτυο ISA.100.11.a χρησιμοποιεί τρεις τοπολογίες δικτύωσης, αστέρα, πλέγματος και αστέρα-πλέγματος σύμφωνα με τον ρόλο της κάθε συσκευής μέσα στο δίκτυο. Για παράδειγμα μέσα σε ένα δίκτυο ISA.100.11.a ο ρόλος δρομολόγησης είναι ξεχωριστός από τους ρόλους των αισθητήρων και των ενεργοποιητών. Με αυτόν τον διαχωρισμό οι συσκευές πεδίου του δικτύου ονομάζονται ως τελικές συσκευές μη έχοντας την ικανότητα δρομολόγησης ή κόμβοι με δυνατότητα δρομολόγησης.



Σχήμα 2.5.1: Αρχιτεκτονική του προτύπου ISA100.11.a

[Πηγή: Wang, G. (2011) A Comparison and Evaluation of Industrial Wireless Sensor Networks Standards ISA100.11a and WirelessHART]

Η στοίβα πρωτοκόλλων του προτύπου ISA.100.11a βασίζεται στην αρχιτεκτονική επιπέδων του μοντέλου OSI.

- Το φυσικό επίπεδο (physical layer) βασίζεται στο IEEE802.15.4 στα 2,4 GHz.
- Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (data link layer) παρέχει στήριξη για τη δημιουργία, τη συντήρηση και την προώθηση πακέτων, λειτουργίες που χρειάζονται στους ασύρματους αισθητήρες. Στο μοντέλο OSI, το επίπεδο ζεύξης δεδομένων βρίσκεται ανάμεσα στο φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο δικτύου. Καθορίζει την δομή των πακέτων, την πλαισίωση, τον εντοπισμό σφαλμάτων και την διαιτησία του διαύλου. Το επίπεδο δικτύου επίσης περιλαμβάνει τις λειτουργίες του υποεπιπέδου MAC. Στο ISA100.11.a το επίπεδο ζεύξης δεδομένων επεκτάθηκε για να περιλάβει λειτουργίες όπως προώθηση μηνυμάτων, εντοπισμό και επανάκτηση χαμένων μηνυμάτων, συγχρονισμό ρολογιού και διαχείριση του φυσικού επιπέδου [88].
- Το επίπεδο δικτύου (network layer) χρησιμοποιεί το πρότυπο 6LoWPAN. Κάνει χρήση του πρωτοκόλλου IPv6 για δρομολόγηση end-to-end υποστηρίζοντας τις υπηρεσίες ασφάλειας, αυθεντικοποίησης, και κρυπτογράφησης [88].
- Το επίπεδο μεταφοράς (transport layer) είναι επίσης συμβατό με το πρότυπο 6LoWPAN και επομένως διαχειρίζεται επικοινωνίες χωρίς σύνδεση βασισμένη στο UDP με έναν βελτιωμένο έλεγχο ακεραιότητας μηνυμάτων και ασφάλεια end-to-end [68].
- Το επίπεδο εφαρμογής (application layer) του ISA100.11a καθορίζει μόνο ένα σύνολο υπηρεσιών για εφαρμογές χρηστών και όχι μία εφαρμογή για αυτοματισμό διεργασιών. Μόνο η εφαρμογή διαχείρισης συστήματος είναι καθορισμένη [68].

2.6 Σύνοψη προτύπων επικοινωνίας 802.15.4

Το ZigBee χρησιμοποιεί τα επίπεδα PHY MAC χαμηλής κατανάλωσης, χαμηλού ρυθμού δεδομένων βασιζόμενο στο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 και λειτουργεί στην συχνότητα των 2,4 GHz παγκοσμίως, αλλά έχει επίσης την επιλογή των 915 MHz και των 868 MHz σε διαφορετικές περιοχές. Το ZigBee χρησιμοποιεί εξελιγμένο πρότυπο κρυπτογράφησης (AES-128 – Advanced Encryption Standard) για την κρυπτογράφηση και την ασφάλεια των δεδομένων και έχει ταχύτητες δεδομένων που κυμαίνονται μεταξύ 20 και 250 kbps [64].

Το πλεονέκτημα του ZigBee είναι ότι έχει την ικανότητα να λειτουργήσει σε κατάσταση sleep-awake-transmit-sleep cycle, γεγονός που αυξάνει σημαντικά την ισχύς της μπαταρίας σε πέντε χρόνια. Χρησιμοποιεί τοπολογίες αστέρα, πλέγματος ή δένδρου για την λειτουργία του δικτύου το οποίο αυξάνει την αξιοπιστία και την απόσταση κάλυψης σε περισσότερο από 300 πόδια με κόστος όμως στην αύξηση της καθυστέρησης. Το ZigBee χρησιμοποιεί την τεχνική μετάδοσης DSSS, η οποία

προσφέρεται από το γονικό πρωτόκολλο μειώνοντας τις παρεμβολές και τον θόρυβο [64].

Τα πρότυπα WirelessHART και ISA.100.11.a αναπτύχθηκαν με μοναδικό σκοπό τον αυτοματισμό των εργοστασίων και των εγκαταστάσεών τους. Το WirelessHART χρησιμοποιεί το υπάρχον πρότυπο το HART επιτρέποντας έτσι την εύκολη πρόσβαση στις υπάρχουσες ενσύρματες εγκαταστάσεις χρησιμοποιώντας μικρότερη ασύρματη υποδομή. Ο σκοπός του WirelessHART ήταν να επεκτείνει το βιομηχανικό πρότυπο HART, ενώ το πρότυπο ISA.100.11.a επικεντρώνεται στην ανάπτυξη του προτύπου για βιομηχανικούς αυτοματισμούς συμπεριλαμβανομένου όλα τα ενσύρματα πρωτόκολλα της βιομηχανίας [64].

Επιπλέον, και τα δύο πρότυπα βασίζονται στα επίπεδα PHY και MAC του IEEE 802.15.4 χρησιμοποιώντας την συχνότητα μετάδοσης των 2,4 GHz με τεχνικές TDMA και DSSS αλλά η διαφορά βρίσκεται στα ανώτερα επίπεδα του OSI μοντέλου. Παρόλο που χρησιμοποιείται η κρυπτογράφηση των δεδομένων, το WirelessHART χρησιμοποιεί μόνο την AES-128 ενώ το ISA.100.11.a έχει την ευελιξία να χρησιμοποιήσει είτε την AES-128 είτε την AES-256, το τελευταίο παρέχει περισσότερη η ασφάλεια με την αύξηση του μεγέθους του κλειδιού [64].

Στον ακόλουθο συγκριτικό πίνακα συνοψίζονται τα τέσσερα κυρίαρχα ασύρματα πρότυπα ZigBee, WirelessHART και ISA100.11a [6].

Feature	ZigBee	WirelessHART	ISA.100.11a
Security	AES-128 plus application layer security	AES-128 plus data link layer security	AES-128, Join Key, Network ID, End to security
Scalability	65.535 nodes are supported by coordinator	80 - 100 field devices supported by per gateway	High
Power Consumption	Low	Low	Low
Network management	Medium	High	High
Data rate	250Kbps	250Kbps	Low data rates
Application types	Commercial	Industrial	Industrial
Reliability	ACK, retransmissions, link quality estimators	Channel hopping, TDMA, DSSSC	Channel hopping, TDMA, CSMA, hybrid channel blacklisting
Interoperability to others systems	Yes	Yes	Yes
PHY Layer	IEEE 802.15.4 with 868/915	IEEE 802.15.4 with 868/915 MHz or 2.4	IEEE 802.15.4 with 868/915 MHz or 2.4

	MHz or 2.4 GHz Radio only	GHz Radio only	GHz Radio only
Network topology	Star, tree, mesh	Star, mesh	Star, mesh
Implementation	Easy	Challenging	Challenging

Πίνακας 2.6.1: Σύνοψη ασύρματων προτύπων επικοινωνίας

[Πηγή: Ammari, H. M., Sahin, D. (2014), "The Art of Wireless Sensor Networks Volume 1: Fundamentals"]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PROSOFT WIRELESS DESIGNER

3.1 Εισαγωγή

Για την προσομοίωση ενός ασύρματου δικτύου χρησιμοποιούνται συνήθως εμπορικά προϊόντα λογισμικού προσομοίωσης και λιγότερο γλώσσες προγραμματισμού όπως η C++ ή Java. Κάποια από τα κύρια χαρακτηριστικά για την επιλογή του κατάλληλου προγράμματος προσημείωσης είναι η ευελιξία μοντελοποίησης του δικτύου και η ευκολία χρήσης του προγράμματος.

Οι κατηγορίες των λογισμικών για την προσομοίωση των ασύρματων δικτύων σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον ή μη είναι δύο. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις γλώσσες προσομοίωσης οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του επιθυμητού μοντέλου με την χρήση κώδικα. Το μειονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι ότι απαιτείται εμπειρία και χρόνος στην εκάστοτε γλώσσα προγραμματισμού που θα χρησιμοποιηθεί από τον χρήστη. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τους προσομοιωτές των ασύρματων δικτύων και οι οποίοι προσφέρουν ένα γραφικό περιβάλλον με την χρήση εικονιδίων τα οποία αναπαριστούν εξαρτήματα, συσκευές και άλλου είδους εξοπλισμό. Παραδείγματα λογισμικού προσομοίωσης είναι το Extend, ProModel, OPNET, NetSim, NS2, και το ProSoft Wireless Designer και το οποίο θα παρουσιαστεί παρακάτω. Σε αυτήν την κατηγορία κάθε φορά που ο χρήστης πραγματοποιήσει μία αλλαγή αυτή εμφανίζεται στην γραφική αναπαράσταση με αποτέλεσμα να μπορεί να κάνει άμεσο επιβεβαίωση του μοντέλου ή έλεγχο για την ύπαρξη λαθών σε αυτό.

3.2 Το λογισμικό Prosoft

Το ProSoft Wireless Designer είναι μία εφαρμογή (πρόγραμμα υπολογιστή) που απλοποιεί το έργο του σχεδιασμού ενός ασύρματου δικτύου, και καθορίζοντας έτσι τα στοιχεία της εγκατάστασης.

Το ProSoft Wireless Designer είναι ένας γρήγορος και ακριβής τρόπος να αναπτύξουμε μια εξειδικευμένη λίστα προδιαγραφών και υλικών για το ασύρματό μας δίκτυο. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το Prosoft Wireless Designer για να καθορίσουμε:

- Το ραδιοδίκτυο
- Τις απαραίτητες καλωδιώσεις
- Την προστασία από κεραυνούς
- Τις κεραίες
- Τους διαχωριστές

3.3 Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα

Το ProSoft Wireless Designer απλοποιεί το εργασία καθορισμού της ασύρματης εγκατάστασης, και παρέχει μία ποικιλία από οπτικές που περιέχουν μία ακριβή περιγραφή της κάθε τοποθεσίας μέσα σε ένα ασύρματο δίκτυο συμπεριλαμβανομένου [79]:

- Εικονικό διάγραμμα του σχεδίου της τοποθεσίας
- Τοποθεσία (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος, βάσει συντεταγμένων μέσω GPS)
- Τύπος ράδιο δικτύου, εύρος συχνότητας, και συγκεκριμένες ανά χώρα τύπος καναλιού και απαιτήσεις ισχύος.
- Μήκος, τύπος και εκτιμώμενη απώλεια σήματος για τα καλώδια
- Απαιτούμενα εξαρτήματα συμπεριλαμβανομένης προστασίας από κεραυνούς, προσαρμογείς καλωδίων και κεραίες.

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το Prosoft Wireless Designer, για να πραγματοποιηθεί έλεγχος μίας τοποθεσίας για έναν πελάτη και έπειτα του παρέχεται μία πλήρη λίστα με τα στοιχεία και μία λεπτομερής περιγραφή για κάθε τοποθεσία και σύνδεσμο. Οι πελάτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή την πληροφορία για να κατανοήσουν και να δημιουργήσουν μία απεικόνιση του δικτύου τους, και να παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τεχνική υποστήριξη και συντήρηση.

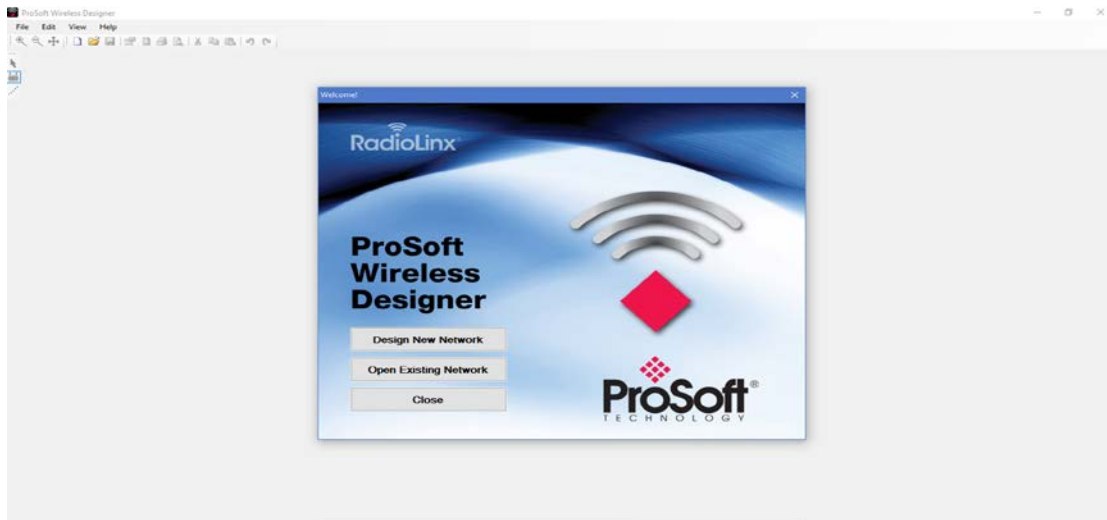
Οι λειτουργικές προδιαγραφές που περιλαμβάνει το Prosoft Wireless Designer είναι οι ακόλουθες [79]:

- Περιλαμβάνει μία βάση δεδομένων με όλα τα διαθέσιμα ραδιοδίκτυα της RadioLinx, κεραίες, καλώδια, συνδετήρες και εξαρτήματα.
- Εξάγει λίστα ανταλλακτικών, λεπτομέρειες για τοποθεσίες και συνδέσμους, και ρυθμίσεις για τον χειρισμό του προγράμματος, σε μία ποικιλία από τύπους αρχείων, για εισαγωγή σε εφαρμογές όπως λογιστικά φύλλα εργασίας, βάσεις δεδομένων και επεξεργαστές κειμένου.
- Ελέγχει αν είναι εφικτή η ασύρματη σύνδεση, βάσει του μήκους του μονοπατιού και των συνιστομένων εξαρτημάτων.
- Προβλέπει την ισχύ του σήματος βάσει της απόστασης, των τοπικών κανονισμών και των επιλογών υλικού.
- Πλήρης τεκμηρίωση του σχεδίου του ασύρματου δικτύου.

3.4 Ξεκινώντας το Prosoft Wireless Designer

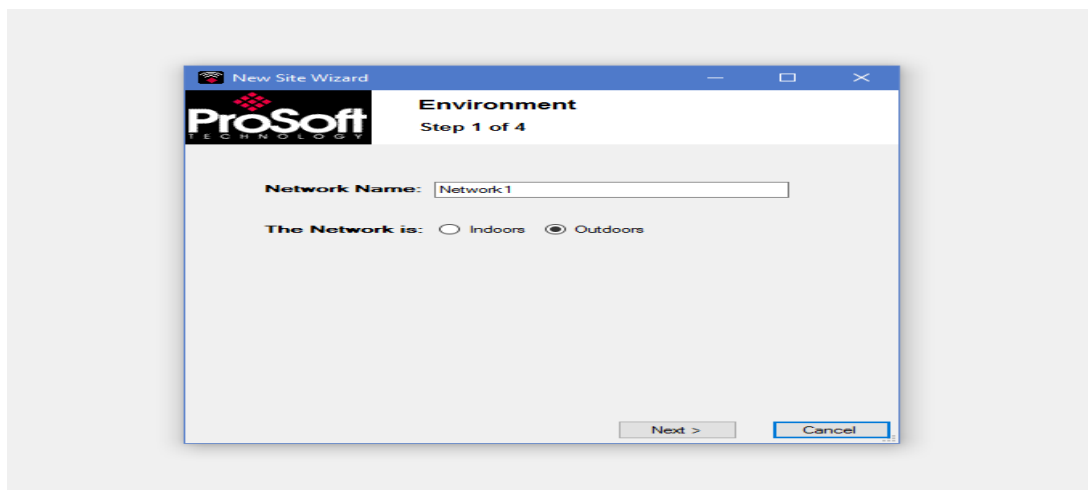
3.4.1 Εκκίνηση της εφαρμογής

Ξεκινώντας την εφαρμογή εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο όπου δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να σχεδιάσει ένα καινούργιο δίκτυο, να ανοίξει ένα υπάρχον δίκτυο που έχει σχεδιάσει και αποθηκεύσει νωρίτερα ή να τερματίσει την εφαρμογή κλείνοντας το πρόγραμμα.

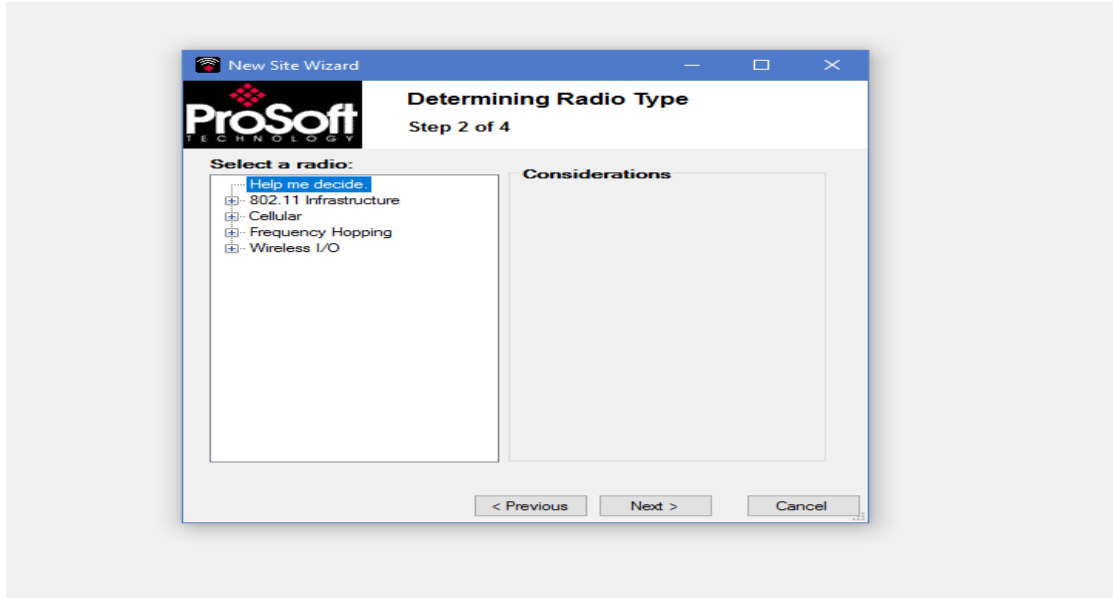


3.4.2 Σχεδιάζοντας ένα νέο δίκτυο

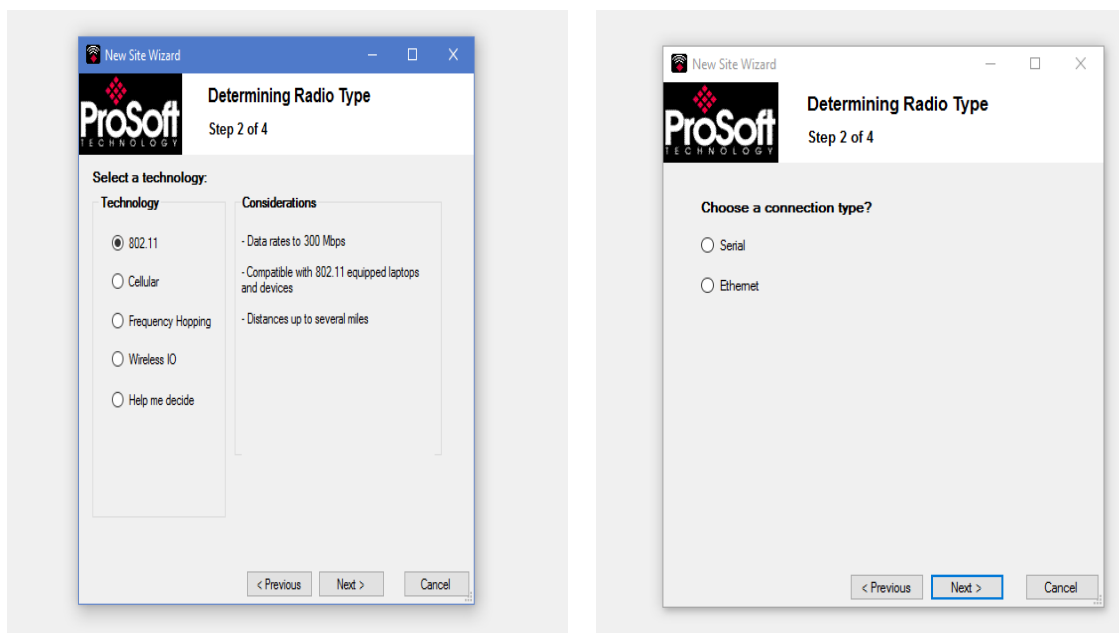
Επιλέγοντας τον σχεδιασμό ενός νέου δικτύου (Design New Network), εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο όπου πρέπει αρχικά στο πρώτο βήμα ο χρήστης να εισάγει το όνομα του δικτύου το οποίο συνήθως είναι ένα αναγνωριστικό της τοποθεσίας και του σκοπού που εξυπηρετεί το εκάστοτε δίκτυο. Στην συνέχεια επιλέγει το περιβάλλον λειτουργίας το οποίο είναι εσωτερικό ή εξωτερικό. Η επιλογή αυτή επηρεάζει τον τύπο των κεραίων και των υπόλοιπων στοιχείων [79].



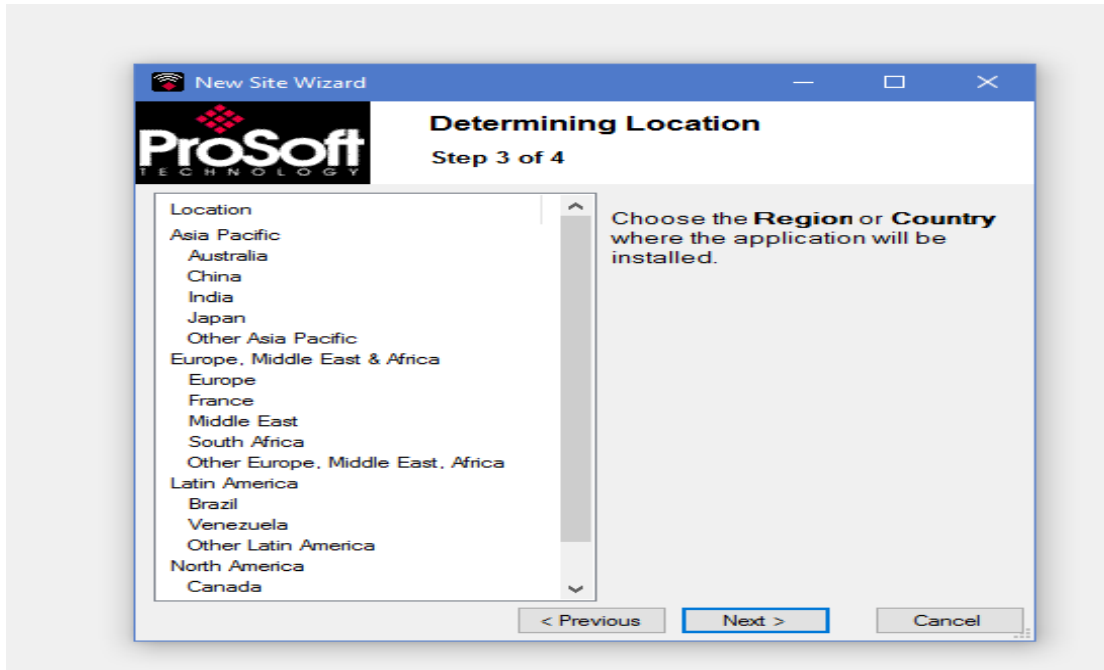
Στο δεύτερο βήμα ζητείται από τον χρήστη να καθορίσει το τύπο ράδιο δικτύου που θα χρησιμοποιήσει:



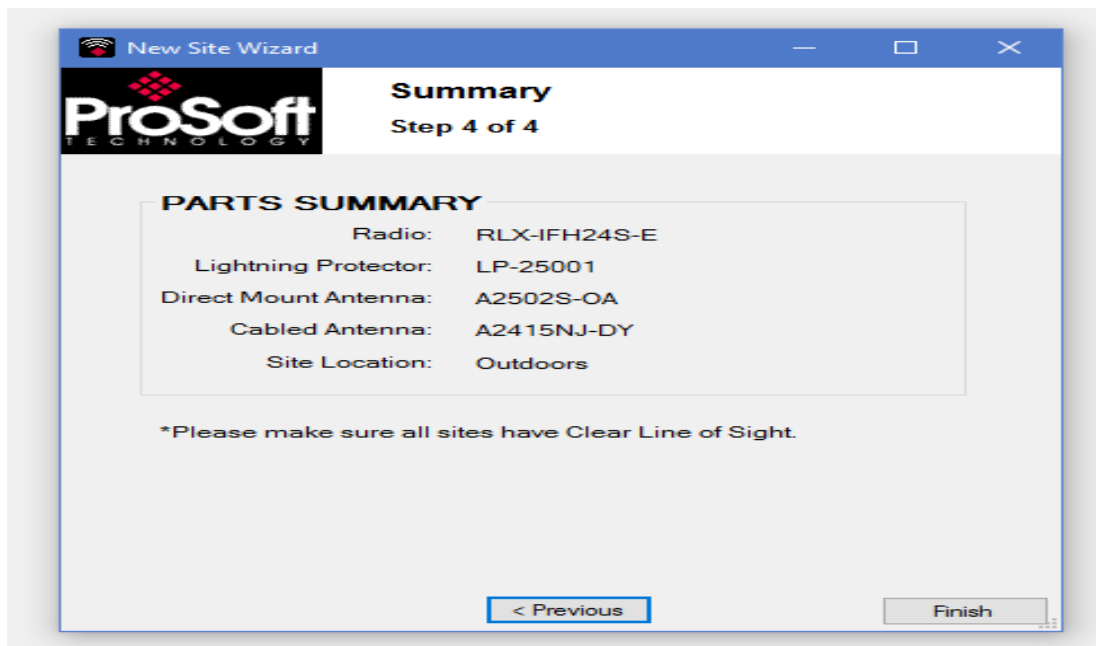
Εδώ ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την επιλογή Help me decide και να μεταβεί στο επόμενο παράθυρο του βήματος 2 έτσι ώστε η εφαρμογή να του προτείνει την επιλογή ραδιοδικτύου βασισμένη στις απαντήσεις του στις επόμενες σελίδες. Για παράδειγμα μπορεί να είναι Ethernet ή Serial, και με ή χωρίς 802.11x συνδεσιμότητα. Επιπλέον, εάν γνωρίζει ήδη μπορεί να επιλέξει το είδος του δικτύου από την αναπτυσσόμενη λίστα [79].



Στο βήμα 3 επιλέγεται η χώρα ή περιοχή όπου θα εγκατασταθεί το ράδιο δίκτυο. Κάθε χώρα ή περιοχή όπου υπάρχουν αυτά τα ραδιοδίκτυα έχει τους δικούς της περιορισμούς για το εύρος της συχνότητας, τα κανάλια και την ισχύ εξόδου για τα ασύρματα δίκτυα.



Στο τέταρτο βήμα ο χρήστης μπορεί να κάνει μία επισκόπηση των επιλογών του για το έλεγχο της ορθότητας τους και τέλος να επιλέξει την επιλογή Finish για να προσθέσει την πρώτη τοποθεσία στο δίκτυό του [79].



3.4.3 Προσθήκη τοποθεσίας

Όταν ο χρήστης τελειώσει με την δημιουργία του δικτύου, θα προωθηθεί σε ένα νέο παράθυρο για να προσθέσει την καινούργια τοποθεσία. Για την προσθήκη αυτής θα πρέπει να εισάγει στο ακόλουθο παράθυρο διαλόγου το όνομα της τοποθεσίας, τις συντεταγμένες και την απόσταση ανάμεσα στην κεραία και στο ραδιοδίκτυο. Το ProSoft Wireless Designer χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για να καθορίσει τις καλωδιώσεις, τις συνδέσεις και τις κεραίες για την τοποθεσία. Επιπλέον, επιλέγοντας ο χρήστης να αλλάξει τον τύπο του ραδιο ανοίγει ένα καινούργιο παράθυρο διαλόγου όπου μπορεί να επιλέξει τον καινούργιο τύπο.

The screenshot shows a dialog box titled "Enter New Site Data". It has the following fields and controls:

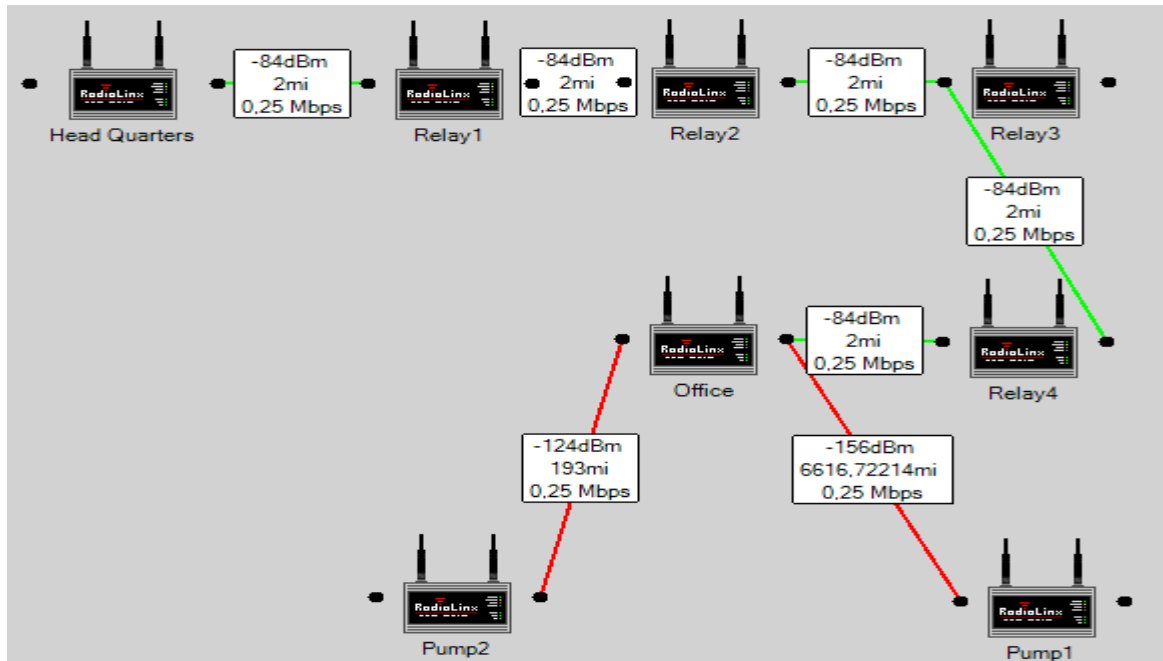
- Site Name:** An empty text input field.
- Distance to Antenna (feet):** An empty text input field.
- Radio:** A dropdown menu showing "RLX-IFH24S-E". To its right is a button labeled "Change Radio Type".
- Location:** A dropdown menu showing "NA" on two lines. To its right is a button labeled "Lat/Long Coordinates".
- At the bottom are two buttons: "OK" and "Cancel".

Αν επιθυμεί ο χρήστης, μπορεί να αλλάξει τις μονάδες μέτρησης που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα. Εάν για παράδειγμα θέλει να χρησιμοποιήσει το διεθνές σύστημα μέτρησης (SI - meters) αντί για το αγγλικό σύστημα μέτρησης (feet), τότε αρκεί να επιλέξει το μενού Edit στην καρδέλα με το μενού γρήγορης πρόσβασης, έπειτα Settings και τέλος από την καρτέλα αριστερά να επιλέξει το κουτί με την ένδειξη "metric".

The screenshot shows the "Settings" dialog box, which is split into two main sections:

- Application Settings:**
 - Measuring units:** Radio buttons for "English" and "Metric" (selected).
 - Disable warnings
 - Update parts automatically on startup
- Document Settings:**
 - Network name:** Text input field containing "Network 1".
 - Default site parts:**
 - Radio:** Dropdown menu showing "RLX-IFH24S-E".
 - Lightning protector:** Text input field showing "LP-25001".
 - Cabled antenna:** Text input field showing "A2415NJ-DY".
 - Direct mount antenna:** Text input field showing "A2502S-OA".
 - Conversion cable length (meters):** Text input field showing "0,60".
 - Band:** Dropdown menu showing "2400 - 2483,5 MHz".
 - Environment:** Radio buttons for "Outdoor" (selected) and "Indoor".
 - Diagram view:**
 - Buttons for "Site Font" and "Site Image Size".
 - Draw to scale
 - Show link details

Ολοκληρώνοντας λοιπόν την εισαγωγή των παραπάνω πληροφοριών, θα παρουσιαστεί στον χρήστη η νέα του τοποθεσία ασύρματου δικτύου.

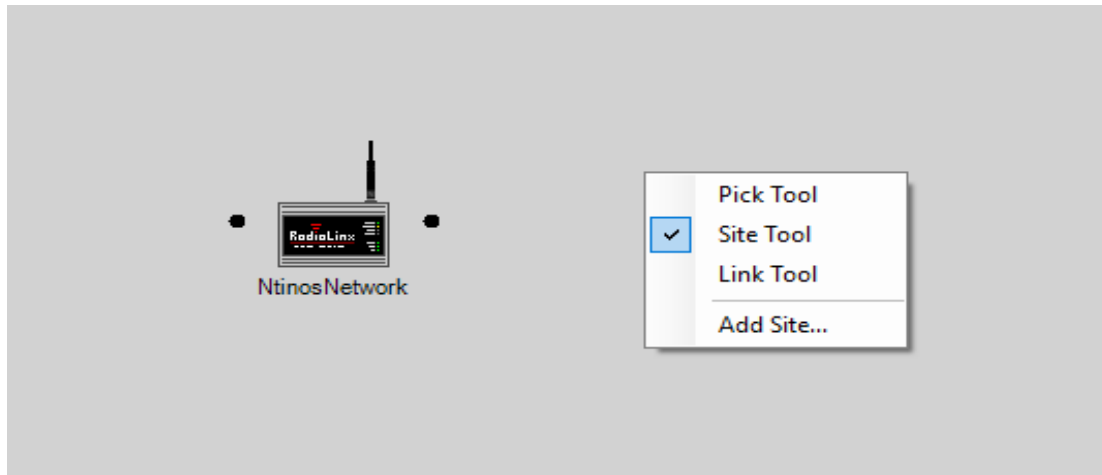


3.4.4 Εισαγωγή συντεταγμένων τοποθεσίας

Ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει τις ακριβείς συντεταγμένες της τοποθεσίας εισάγοντας γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος τις οποίες αργότερα η εφαρμογή τις χρησιμοποιεί για να υπολογίσει την ακριβή απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών. Σε περίπτωση που επιλέξει το κουμπί Lat/Long Coordinates θα εμφανιστεί ένα νέο παράθυρο διαλόγου όπως φαίνεται παρακάτω όπου θα έχει τις επιλογές να εισάγει τις συντεταγμένες σε τρεις προκαθορισμένες μορφές. Decimal Degree για παράδειγμα "23.932168", Degree: Minute για παράδειγμα "23:55.93008" και Degree: Minute: Second για παράδειγμα "23:55:55.804" [79].

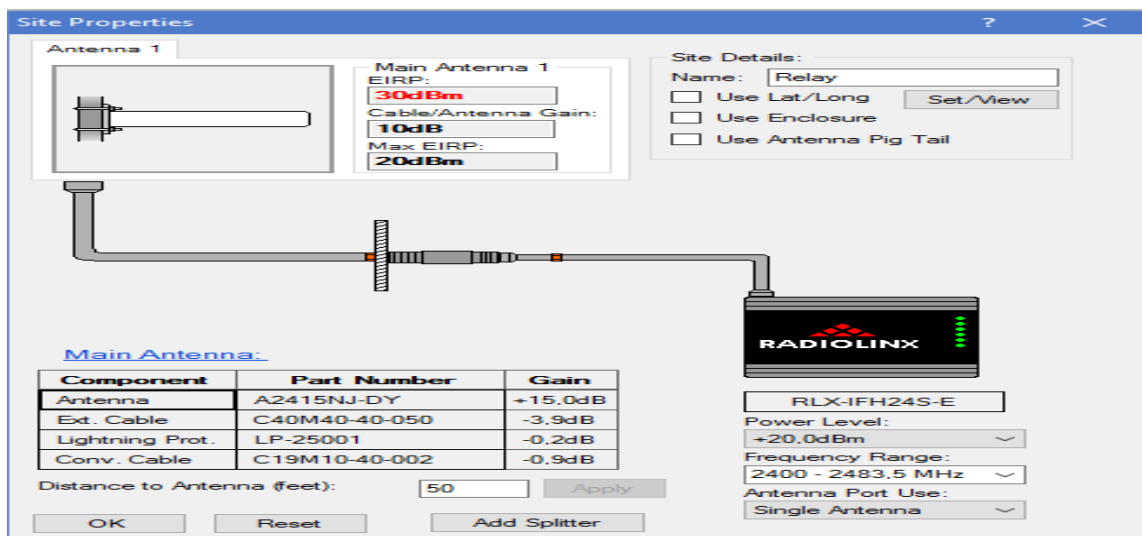
3.4.5 Προσθήκη επιπρόσθετης τοποθεσίας

Ένα ραδιοδίκτυο αποτελείται από δύο ή περισσότερες τοποθεσίες οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους. Με σκοπό την επικοινωνία του δικτύου ο χρήστης θα πρέπει να προσθέσει μία επιπλέον τοποθεσία. Κάνοντας δεξί κλικ στο ποντίκι μέσα στο διάγραμμα του δικτύου εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου και επιλέγουμε Add Site ή Site Tool. Εισάγουμε ξανά το όνομα της τοποθεσίας, την απόσταση μεταξύ ραδιο και κεραίας και αν γνωρίζουμε το γεωγραφικό μήκος και πλάτος.



3.4.6 Προβολή ιδιοτήτων τοποθεσίας

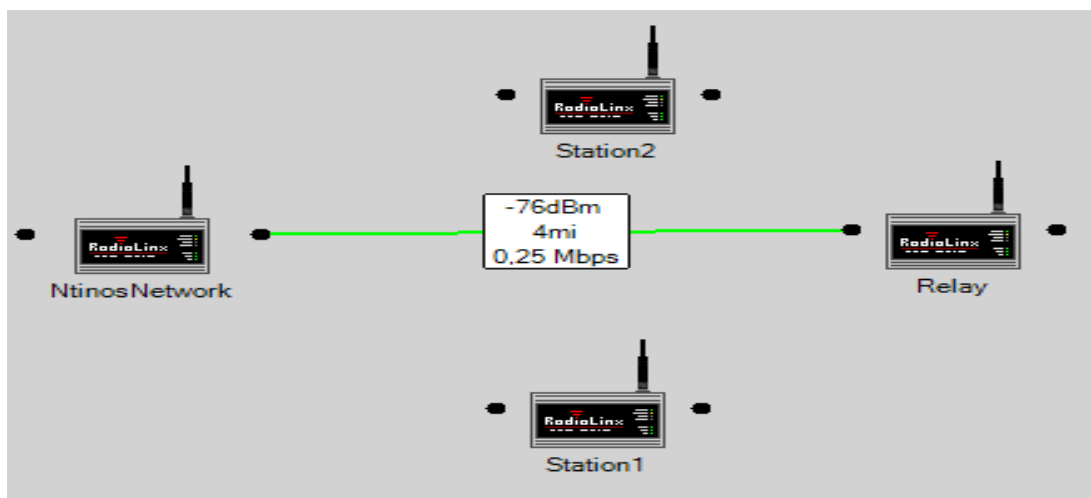
Σε περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί να ελέγξει ή να αλλάξει κάποιο στοιχείο από κάποια τοποθεσία, κάνοντας διπλό κλικ σε αυτήν, θα εμφανιστεί ένα παράθυρο διαλόγου με τις ιδιότητες της τοποθεσίας αυτής. Μπορεί να καθορίσει τον τύπο της κεραίας, τις καλωδιώσεις, το ράδιο, την προστασία από τους κεραυνούς και τα εξαρτήματα.



3.4.7 Προσθήκη συνδέσμου

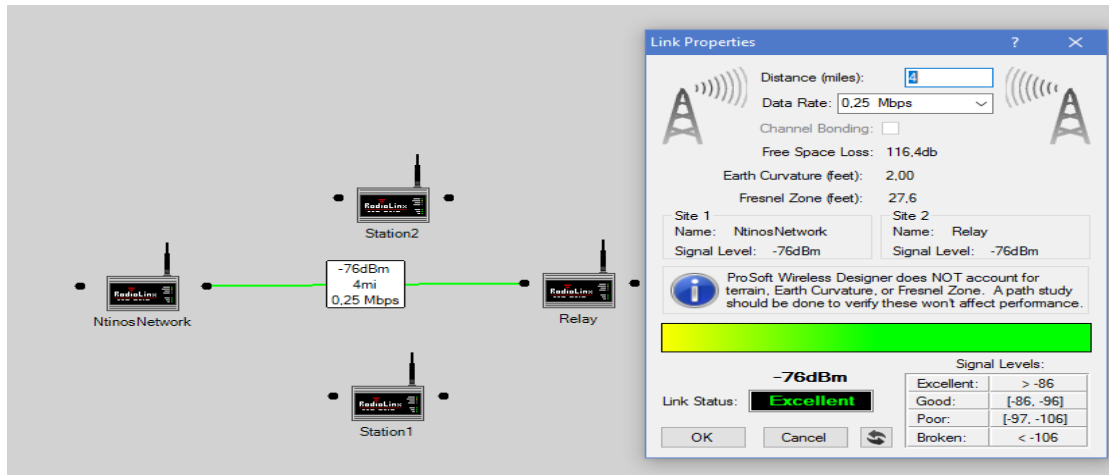
Για να μπορέσει κάθε τοποθεσία να επικοινωνήσει με μία γειτονική της, πρέπει ο χρήστης να δημιουργήσει έναν σύνδεσμο. Ο σύνδεσμος περιλαμβάνει πληροφορίες για την απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών, τις οποίες η εφαρμογή χρησιμοποιεί για να εκτιμήσει την ισχύ του σήματος και την ποιότητα της σύνδεσης.

Για να προστεθεί ένας σύνδεσμος, ο χρήστης κάνει δεξί κλικ στο διάγραμμα του δικτύου, και επιλέγει το "Link Tool". Μεταφέρει τον δείκτη του mouse στην πρώτη τοποθεσία, έπειτα σέρνει τον δείκτη στην δεύτερη τοποθεσία. Στην νέα εισαγόμενη σύνδεση εμφανίζεται αυτόματα ένα παράθυρο διαλόγου και ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει την απόσταση μεταξύ των τοποθεσιών [79].



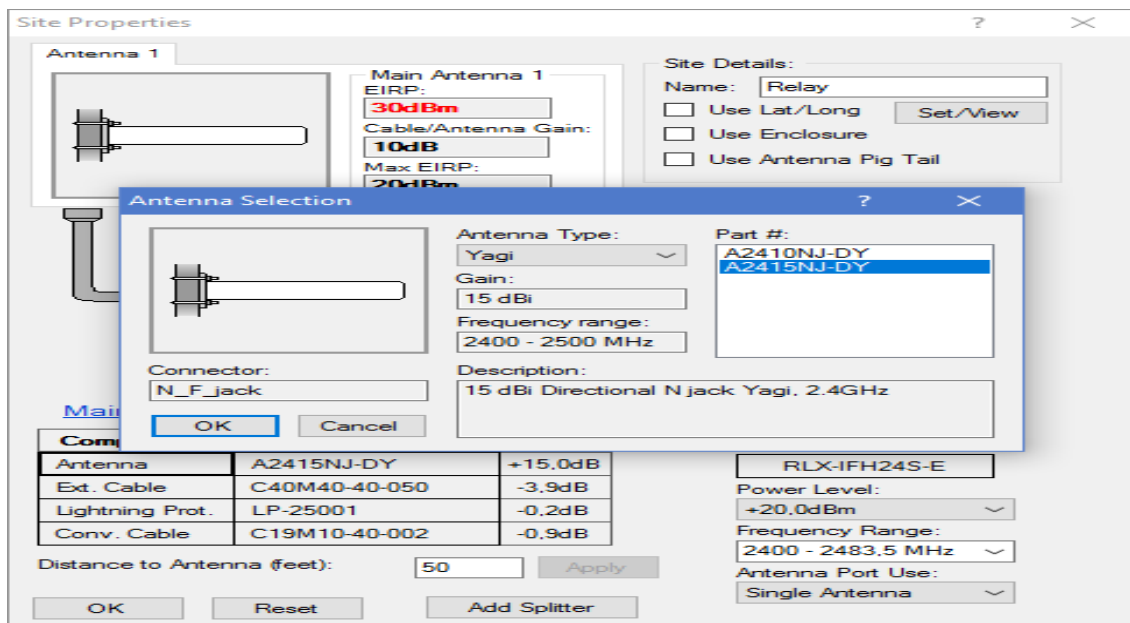
3.4.8 Προβολή ιδιοτήτων συνδέσμου

Για να δει ο χρήστης τις ιδιότητες του συνδέσμου θα πρέπει να κάνει διπλό κλικ στον σύνδεσμο μεταξύ των δύο τοποθεσιών. Εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου όπου μπορεί να επανεξετάσει πληροφορίες για την κατάσταση της σύνδεσης. Περιλαμβάνει το επίπεδο ισχύος του σήματος, την κατάσταση της σύνδεσης, βασισμένο στην κεραία, στον τύπο καλωδίωσης και στον κονέκτορα για τις δύο τοποθεσίες, όπως επίσης και στην απόσταση μεταξύ των δύο κεραιών, η οποία εμφανίζεται σε μίλια ή χιλιόμετρα. Να τονίσουμε ότι η εφαρμογή για να εμφανίσει αυτές τις πληροφορίες μεταξύ των δύο κεραιών δεν λαμβάνει υπόψιν της τυχόν εμπόδια που μπορεί να υπάρχουν ανάμεσα τους όπως δένδρα, βουνά και διάφορες κατασκευές. Τέλος, στον σύνδεσμο μεταξύ δύο τοποθεσιών, το πράσινο σημαίνει πως το σήμα είναι καλό, κίτρινο σημαίνει πως το σήμα είναι φτωχό, και κόκκινο σημαίνει πως το σήμα είναι πολύ φτωχό για να καλύψει την απόσταση που χρειάζεται [79].



3.4.9 Προσθήκη κεραίας

Η κεραία προστίθεται αυτόματα από την εφαρμογή, βασιζόμενη στις πληροφορίες που της παρέχονται από τον αρχικό οδηγό εγκατάστασης. Για να δει ή να αλλάξει ο χρήστης την κεραία της τοποθεσίας θα πρέπει να κάνει δεξί κλικ στην τοποθεσία και επιλέγοντας ιδιότητες (properties). Έπειτα στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται, επιλέγει το εικονίδιο Antenna για να ανοίξει την επιλογή της κεραίας. Χρησιμοποιούμε την αναπτυσσόμενη λίστα για να επιλέξουμε τον τύπο της κεραίας και πληθώρα άλλες επιλογές.



3.4.10 Προβολή στοιχείων

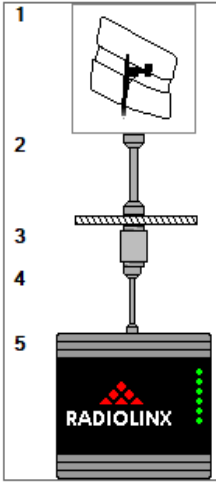
Επιλέγοντας, το κουμπί Part List στο περιβάλλον της εφαρμογής Prosoft Wireless Designer εμφανίζεται στον χρήστη μια λίστα με τα στοιχεία που έχει χρησιμοποιήσει στο δίκτυο.

Diagram	Parts List	Site Details	Link Details
Part #	Quantity	Description	
RLX-FHE-SA	8	2.4 GHz Frequency Hopping Wireless Ethernet Switch	
C19M10-40-002	7	2ft LMR 195 RA RP-SMA → N plug cable	
C19M10-40-005	1	5ft LMR 195 RA RP-SMA → N plug cable	
LP-24002	8	N jack → N jack BH lightning protection w/hardw	
C60M40-40-100	1	100ft LMR 600 N Plug → N plug cable	
C60M40-40-080	1	80ft LMR 600 N Plug → N plug cable	
C40M40-40-005	1	5ft LMR 400 N Plug → N plug cable	
C40M40-40-040	1	40ft LMR 400 N Plug → N plug cable	
C40M40-40-002	4	2ft LMR 400 N Plug → N plug cable	
A2424NJ-DB	3	24 dBi Directional N jack parabolic, 2.4GHz	
A2409NJ-OCD	5	Antenna, 9dBi omni N jack heavy duty - with mounting hardware, 2.4GHz	
RLX-WPK001	1	RF Connector Weatherproofing Kit	

Επιπλέον, μπορεί να δει τις λεπτομέρειες της κάθε τοποθεσίας επιλέγοντας την καρτέλα Site Details

Diagram	Parts List	Site Details	Link Details
Part Name	Part #	Description	
1 Antenna	A2424NJ-DB	24 dBi Directional N jack parabolic, 2.4GHz	
2 Ext Cable	C60M40-40-100	100ft LMR 600 N Plug → N plug cable	
3 Lightning Protector	LP-24002	N jack → N jack BH lightning protection w/hardw	
4 Conv Cable	C19M10-40-002	2ft LMR 195 RA RP-SMA → N plug cable	
5 Radio	RLX-FHE-SA	2.4 GHz Frequency Hopping Wireless Ethernet Switch	

Site Details:	
Site Name	Pump1
Latitude	23801523,00000
Longitude	47394153,00000
EIRP	18dBm
Cable/Antenna Gain	18dBm
Max EIRP	20dBm



< Previous
Site 1 of 8
Next >

Τέλος, μπορεί να πάρει στοιχεία για την κάθε σύνδεση επιλέγοντας το κουμπί Link Details

Category	Field	Value
Link Details:	First Site	Office
	Second Site	Pump1
	Signal Level	-124dBm
	Status	Broken
	Distance	176mi

3.4.11 Εξαγωγή στοιχείων τοποθεσίας

Ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εξάγει τις λεπτομέρειες για το δίκτυο που έχει σχεδιάσει, σε μία ποικιλία τύπων αρχείων για χρήση σε άλλες εφαρμογές. Οι διαθέσιμοι τύποι αρχείων είναι csv για λογιστικά φύλλα και βάσεις δεδομένων, txt για επεξεργαστές κειμένων και αποστολή μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και xml. Για να εξάγουμε τα στοιχεία επιλέγουμε File και έπειτα Network Details / Site Details επιλέγοντας τον προορισμό αποθήκευσης του αρχείου[79].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΔΙΚΤΥΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

4.1 Εισαγωγή

Τα δεδομένα που υπάρχουν σε ένα βιομηχανικό δίκτυο μεταδίδονται είτε μέσω ενσύρματων μέσων όπως χαλκός και οπτικές ίνες, είτε μέσω ασύρματων μέσων όπως τα ραδιοκύματα. Η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι πιθανόν η καλύτερη λύση για την διασύνδεση των μηχανημάτων σε ένα εργοστάσιο και τον έλεγχο τους απομακρυσμένα [5]. Επιπροσθέτως, παρέχουν ένα επαρκές εύρος ραδιοσυχνοτήτων και υψηλής αποδοτικότητας έτσι ώστε να μπορούν ικανοποιούν τις ήδη υπάρχοντες αλλά και μελλοντικές απαιτήσεις των βιομηχανικών εφαρμογών οι οποίες είναι μεταξύ άλλων η διαχείριση της ενέργειας, η απομακρυσμένη παρακολούθηση πλατφόρμων εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου, η παρακολούθηση των αγωγών σε εργοστάσια παραγωγής νερού, η διαχείριση της ενέργειας, συστήματα παρακολούθησης του ηλεκτρικού ρεύματος και εφαρμογές ανίχνευσης μικροδονήσεων. Πιο κάτω θα μελετήσουμε περιπτώσεις βιομηχανικών εφαρμογών και των λύσεων που πρότειναν προκειμένου να μην χρησιμοποιήσουν ενσύρματα μέσα για την μετάδοση των απαραίτητων πληροφοριών από την περιοχή ενδιαφέροντος στο κέντρο ελέγχου συλλογής των πληροφοριών αυτών.

4.2 Μελέτη περίπτωσης – Soil Instruments Ltd

4.2.1 Ο στόχος

Η Soil Instruments Ltd είναι μια μακρά εδραιωμένη εταιρεία η οποία κατασκευάζει και εγκαθιστά γεωτεχνικά και δομικά όργανα για αστικές υποδομές, όπως φράγματα, σήραγγες και γέφυρες, πολλά εκ των οποίων πολύ γνωστά [31].

Συνήθως οι αισθητήρες τους μετρούν την πίεση, την ένταση και τους κραδασμούς για μεγάλες χρονικές περιόδους. Αυτοί οι αισθητήρες είναι δικτυωμένοι σε εγκαταστάσεις που συχνά εκτείνονται πάνω από ένα χιλιόμετρο. Στο υπάρχων σύστημα πολλοί αισθητήρες συνδέονταν μεταξύ τους με ένα καλώδιο. Τα δεδομένα καταγράφονταν σε ένα κόμβο πύλη [31].

Με τέτοια μεγάλα δίκτυα ένα σημαντικό μέρος της εγκατάστασης χρησιμοποιούσε καλώδιο μεταξύ των αισθητήρων και το μέγεθος του δικτύου, το κόστος και ο χρόνος εγκατάστασης ήταν ένα σημαντικό πρόβλημα που έπρεπε να λυθεί. Η καλωδίωση είναι επίσης επιρρεπής σε καταστροφές που προέρχονται από τα μηχανήματα, από τους λάθους χειρισμούς των εργατών και από ζυψίφια [31].

Συστήματα Ασύρματης Δικτύωσης σε Βιομηχανικό Περιβάλλον

4.2.2 Η λύση

Η MailBox ανέλαβε την δικτύωση των αισθητήρων της Soil Instruments με το δίκτυο ZigBee. Το μόνο που χρειαζόταν να γίνει ήταν να ενσωματώσει το υπάρχων δίκτυο αισθητήρων σε ένα ειδικό κύκλωμα και firmware. Στο νέο ασύρματο σύστημα κάθε αισθητήρας ήταν ένας ZigBee router. Επιπλέον, προκειμένου να μεγιστοποιήσει την λειτουργία της μπαταρίας οι αισθητήρες χρησιμοποιούσαν τα χαρακτηριστικά του δικτύου της MailBox θέτοντας το δίκτυο σε κατάσταση ύπνου. Αυτό επέτρεπε σε ολόκληρο το δίκτυο να απενεργοποιηθεί ταυτόχρονα [31].

4.2.3 Τα αποτελέσματα

Οι μηχανικοί μπορούν πλέον να συνδεθούν σε οποιοδήποτε αισθητήρα και να κατεβάσουν δεδομένα από οποιονδήποτε άλλον αισθητήρα του δικτύου. Επίσης έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους με γραπτά μηνύματα χρησιμοποιώντας το δίκτυο αυτό [31].

4.3 Μελέτη περίπτωσης - LANTRONIX – Spectrum CNC Technologies

4.3.1 Η πρόκληση

Για σχεδόν δύο δεκαετίες, η Spectrum CNC Technologies έφερε την επανάσταση στον βιομηχανικό έλεγχο εργαλειομηχανών με ψηφιακό τρόπο (Computer Numerical Control – CNC). Το λογισμικό σύστημα επικοινωνίας για τις εργαλειομηχανές της, το Multi-DNC, ήταν το πρώτο προϊόν στην αγορά επιτρέποντας την ταυτόχρονη φορτώση, λήψη και σταδιακή τροφοδοσία δεδομένων σε πολλαπλούς CNC ελεγκτές. Κατά την διάρκεια των ετών, η Spectrum συνέχισε την επανάσταση με καινοτόμα προϊόντα, υπηρεσίες και την ασυναγώνιστη υποστήριξη που παρείχε στον χώρο της βιομηχανίας [55].

Πριν από μερικά χρόνια, η Spectrum άρχισε να αναπτύσσει μία ασύρματη λύση για το Multi-DNC σύστημά της, κάτι που οι πελάτες της το ζητούσαν. Η Spectrum ήξερε πως μία λύση ασύρματου βιομηχανικού αυτοματισμού θα έφερνε πολλά νέα και ωφέλιμα προνόμια, συμπεριλαμβανομένης της απλοποιημένης και λιγότερο δαπανηρής εγκατάστασης, αυξάνοντας την αξιοπιστία και ενισχύοντας την ευελιξία για την μετακίνηση των μηχανών [55].

Η Spectrum CNC επίσης γνώριζε πως μία ασύρματη λύση για το Multi-DNC θα έθετε τις βάσεις για μια ισχυρή ανάπτυξη. Ωστόσο, τα στελέχη της εταιρίας δεν ήθελαν να βιαστούν προωθώντας στην αγορά ένα αναξιόπιστο σύστημα. Έχοντας συνεργαστεί με την Lantronix στο παρελθόν, η Spectrum ήταν βέβαιη πως η Lantronix θα μπορούσε να προτείνει το καλύτερο προϊόν για την ενσωμάτωση των ασύρματων δυνατοτήτων στο Multi-DNC σύστημά της [55].

4.3.2 **Η λύση**

Ενώ το Multi-DNC ασύρματο σύστημα ήταν υπό ανάπτυξη, η Lantronix έστειλε έναν μηχανικό σχεδιασμού να εργαστεί με την Spectrum σε αρκετές περιπτώσεις. Σύμφωνα με τον πρόεδρο της Spectrum Tony Novak, για να καταστήσουν την λύση αυτή αληθινή, έπρεπε να συνδυάσουν το λογισμικό της Spectrum με την υλοποίηση hardware της εταιρίας Lantronix, το οποίο σήμαινε ότι οι δύο εταιρίες έπρεπε να συνεργαστούν στενά [55].

Λαμβάνοντας υπόψη τις επιθυμητές δυνατότητες και τεχνολογικές απαιτήσεις της Spectrum, η Lantronix συνέστησε το Matchport b/g, το οποίο επιτρέπει στις επιχειρήσεις να δημιουργούν ασύρματη δικτύωση σε σχεδόν οποιαδήποτε ηλεκτρονική συσκευή με σειριακή διασύνδεση. Με αυτή την πλήρη σε χαρακτηριστικά, ενσωματωμένη δικτυακή μονάδα, τα νέα προϊόντα μπορούν να είναι προσβάσιμα ασύρματα και να ελεγχθούν μέσα από το διαδίκτυο. Και δεδομένου ότι το Matchport b/g πληροί τα FCC πρότυπα ασύρματης πιστοποίησης, το νέο σύστημα μπορεί να παραλείψει την διαδικασία πιστοποίησης, συμβάλλοντας στην μείωση του κόστους και στην μείωση του χρόνου για την αγορά [55].

Συνδυάζοντας το ιδιόκτητο λογισμικό Multi-DNC της Spectrum με το Matchport b/g της Lantronix επέτρεψε στην Spectrum να δημιουργήσει το WiBox, το οποίο ασύρματα συνδέει συσκευές CNC χρησιμοποιώντας δίκτυα 802.11b/g φέρνοντας απίστευτα προνόμια στην βιομηχανική αγορά. Χωρίς απαιτήσεις καλωδίωσης, η εγκατάσταση είναι πιο γρήγορη και λιγότερο δαπανηρή, και οι εταιρίες μπορούν να μετακινούν ή να προσθέτουν μηχανές οποτεδήποτε, οπουδήποτε χωρίς να χρειάζεται πρόσθετη καλωδίωση. Σε καθημερινή βάση, το WiBox επιτρέπει στους χρήστες να παρακολουθούν τις μηχανές μέσω από μία κεντρική κονσόλα εργασιών χρησιμοποιώντας ειδοποιήσεις όπως χρόνος κύκλου και χρόνος άξονα. Ο WiBox Device Manager παρέχει επίσης μία γρήγορη επισκόπηση της ασύρματης δικτύωσης, εξασφαλίζοντας πως κάθε μηχανή είναι συνδεδεμένη και λειτουργεί ομαλά [55].

4.3.3 **Τα αποτελέσματα**

Το ασύρματο σύστημα Multi-DNC της Spectrum θέτει το πρότυπο για την δικτύωση 250 ή περισσότερων CNC μηχανών με έναν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας κάτι που λείπει από τους ανταγωνιστές της. Ενώ η Spectrum δεν ήταν η πρώτη στην αγορά με μία ασύρματη λύση, οι ανταγωνιστές χρησιμοποίησαν τυποποιημένο ασύρματο hardware το οποίο δεν μπόρεσε να υποστηρίξει το απαιτητικό CNC περιβάλλον [55].

4.4 **Μελέτη περίπτωσης** - Phoenix Contact – British Petroleum

4.4.1 **Προφίλ πελάτη**

Η BP (British Petroleum) είναι μία Βρετανική εταιρία πετρελαίου και ενέργειας με παγκόσμια έδρα στο Λονδίνο. Είναι μια από τις μεγαλύτερες ιδιόκτητες εταιρίες ενέργειας στον κόσμο. Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, η BP λειτουργεί πολυάριθμα διυλιστήρια, συμπεριλαμβανομένου ενός στο Οχάιο [75].

4.4.2 **Η πρόκληση**

Σε αυτό το διυλιστήριο, οι μηχανικοί και οι τεχνικοί διερεύνησαν τις ασύρματες δυνατότητες επικοινωνίας για αυξημένη απόδοση και παρακολούθηση του χρόνου. Θα έπρεπε να καθοριστεί εάν η αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων θα αντέβαινε σε ένα περιβάλλον με υψηλό επίπεδο ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI – Electromagnetic Interference), και εάν το κόστος καλωδίωσης μιας μεγάλης περιοχής με απομακρυσμένες δεξαμενές αποθήκευσης θα μπορούσε να μειωθεί ή εξαλειφθεί [75].

Οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που βρίσκονται κοντά στο εργοστάσιο μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας διαμέσου γραμμών υψηλής τάσης, δημιουργώντας ισχυρά πεδία παρεμβολών. Οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις αυτών των πεδίων τάσης στις ασύρματες μεταδόσεις ήταν το αρχικό μέλημα. Οι περιοχές εγκατάστασης των ελεγχόμενων δεξαμενών αργού πετρελαίου δεν είχαν την δικιά τους παροχή τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα να απαιτούσε την τροφοδοσία των μπαταριών σε κάθε απομακρυσμένη τοποθεσία [75].

Για να αποδείξουν το εγχείρημα τους, οι μηχανικοί της BP επέλεξαν μία απομακρυσμένη αντλία υπόγειων υδάτων, παρακολουθώντας το επίπεδο του νερού με ένα μετρητή υπερήχων. Η στάθμη του νερού υποδεικνυόταν μέσω ενός βιομηχανικού πρότυπου 4-20mA αναλογικού σήματος, και όταν κατάφερναν ένα υψηλό όριο στάθμης, παραγόταν ένα ψηφιακό σήμα συναγερμού μέσω μιας απομακρυσμένης επαφής. Εξαιτίας της απομακρυσμένης θέσης αυτού του σταθμού άντλησης, η καλωδίωση για το επίπεδο και την πληροφόρηση του συναγερμού, θα ήταν απαγορευτική και άσκοπη [75].

4.4.3 **Η λύση**

Η BP εγκατέστησε το Trusted Wireless Data Radio με σύστημα εισόδου/εξόδου από την εταιρία Phoenix Contact για να συλλέγει τα αναλογικά και ψηφιακά δεδομένα εισόδου/εξόδου από την απομακρυσμένη τοποθεσία, και να μεταδίδει τα δεδομένα ασύρματα πίσω στον δικό τους σταθμό ελέγχου. Η καλωδίωση στην απομακρυσμένη τοποθεσία ήταν απλή χρησιμοποιώντας μονάδες επέκτασης εισόδου/εξόδου από την Phoenix Contact [75].

Αυτά τα επιπρόσθετα κομμάτια εισόδου/εξόδου επιτρέπουν στην καλωδίωση εισόδου/εξόδου να πραγματοποιηθεί όπως θα ήταν και σε ένα σύστημα ενσύρματης καλωδίωσης, αλλά η είσοδος/έξοδος μεταδίδει σε έναν άλλο πομποδέκτη χωρίς καλώδια, καθιστώντας αυτή την τμηματική προσέγγιση E/E ευέλικτη σε μελλοντικές επεκτάσεις του συστήματος [75].

Στην αίθουσα ελέγχου, τα δεδομένα από την απομακρυσμένη περιοχή λαμβάνονται με άλλο Phoenix Contact Trusted Wireless Data Radio, όπου ήταν διασυνδεδεμένο με το σύστημα του εργοστασίου Honeywell DCS, μέσω ενός RS-232 καλωδίου που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο MODBUS. Αυτό επέτρεπε στο DCS να διαβάσει και να γράψει δεδομένα στην απομακρυσμένη τοποθεσία με τον ίδιο τρόπο όπως ένα συμβατικό σύστημα ενσύρματης καλωδίωσης [75].

Ένα άλλο πλεονέκτημα της λύσης αυτής ήταν η δυνατότητα αξιολόγησης πρόσθετων πληροφοριών από το ασύρματο σύστημα. Εκτός από την στάθμη των υπόγειων υδάτων και στην κατάσταση του συναγερμού, το DCS μπορεί επίσης να καταγράψει το RSSI (Δείκτης Ισχύος Ληφθέντος Σήματος), την τάση τροφοδοσίας που παράγεται από το σύστημα ηλιακής ενέργειας, όπως επίσης και την τοπική θερμοκρασία μέσα στο RTU (Απομακρυσμένη Τερματική Μονάδα) μέσω MODBUS καταγραφείς μέσα στο Trusted Wireless Data Radio. Αυτές οι τιμές παρέχονται χωρίς επιπλέον χρέωση, και μπορούν να αρχειοθετηθούν στο DCS χρησιμοποιώντας διαγράμματα κλίσης [75].

4.4.4 Τα αποτελέσματα

Η BP διαπίστωσε ότι εάν το σύστημα απαιτούσε καλωδίωση, θα απαιτούσε κατάλληλα καλώδια εγκατεστημένα σε απόσταση περίπου 2300 ποδιών. Το κόστος ολοκλήρωσης εξαρτάται από τον τύπο της επιφάνειας προς ανασκαφή για την εγκατάσταση των καλωδίων. Η BP εκτίμησε ότι με την μετάβαση στο ασύρματο δίκτυο θα μπορούσαν να εξοικονομήσουν πάνω από \$75.000 στο κόστος εγκατάστασης [75].

Σύμφωνα με την BP, το ασύρματο σύστημα επικοινωνίας ήταν εξαιρετικά αξιόπιστο στο περιβάλλον υψηλών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Κατά συνέπεια, η BP εφάρμοσε την ασύρματη τεχνολογία για την επιτήρηση του επιπέδου λειτουργίας για όλες τις δεξαμενές πετρελαίου σε αυτήν την περιοχή, και για μια επιπρόσθετη μονάδα στον ποταμό Οχάιο. Η ασύρματη τεχνολογία εγκαταστάθηκε σε συνολικά 16 δεξαμενές πετρελαίου στο εργοστάσιο. Επιπλέον, εκτός από την μονάδα του Οχάιο, η BP έχει αναλάβει από τότε πολλά έργα που παρελάμβαναν τοποθεσίες που χρησιμοποιούσαν καλωδίωσεις, κάθε μία με πάνω από πενήντα δεξαμενές, και ενσωμάτωσε ασύρματη παρακολούθηση από την εταιρία Phoenix Contact [75].

Συμπεράσματα

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι μία ελπιδοφόρος τεχνολογία για το μέλλον αλλά και για το παρόν όπου χρησιμοποιούνται σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών όπως βιομηχανικές, στρατιωτικές, οικιακές, ιατρικές, περιβαλλοντικές και εμπορικές προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των ενσύρματων συστημάτων. Ωστόσο, η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων δεν θεωρείται αρκετά ώριμη για να χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές ελέγχου των διαδικασιών. Οι απαιτητικοί περιορισμοί για εφαρμογές παρακολούθησης και ελέγχου των διαδικασιών θέτουν πολλές προκλήσεις στην εφαρμογή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στον βιομηχανικό τομέα.

Επιπλέον, όσον αναφορά τα πρότυπα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων για να αποστείλουν τις απαραίτητες πληροφορίες από το πεδίο ελέγχου της βιομηχανικής εγκατάστασης προς το κεντρικό σύστημα ή την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών του δικτύου παρουσιάζουν πολλά χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν εφαρμοστούν. Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της ασύρματης επικοινωνίας είναι το πρωτόκολλο που ορίζει τις διαδικασίες και τους κανόνες για την επικοινωνία των δεδομένων και την σωστή επιλογή του για το βιομηχανικό δίκτυο. Είναι ένα σημαντικό ζήτημα που πρέπει να απαντήσουμε για την ασύρματη ανάπτυξη.

Τα διαφορετικά διαθέσιμα πρωτόκολλα είναι το Wi-Fi που βασίζεται στο IEEE 802.11 το οποίο προσφέρει μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας, υψηλότερη ισχύς, η τεχνολογία Bluetooth IEEE 802.15.1 με χαμηλή ισχύς, μικρής εμβέλειας και με μεσαίες ταχύτητες δεδομένων και τέλος το ZigBee, WirelessHART και ISA.100.11.a με βάση IEEE 802.15.4 με εξαιρετικά χαμηλής ισχύς, δημιουργία μεγάλης κλίμακας δίκτυα και χαμηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων.

Έπειτα από την μελέτη των προτύπων ασύρματης δικτύωσης αισθητήρων που βασίζονται στο πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα WirelessHART και ISA.100.11.a χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις αδυναμίες του ZigBee και είναι περισσότερο κατάλληλα για βιομηχανικές εφαρμογές. Τα WirelessHART και ISA.100.11.a καθορίζουν την στοίβα επικοινωνίας καθώς και τις διεπαφές και τις ευθύνες των διάφορων συσκευών που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί πως όλα τα πρότυπα προστατεύουν την επικοινωνία από εξωτερικές επιθέσεις και ανανεώνουν τα κλειδιά ασφαλείας εντός του δικτύου τα οποία παρέχονται μέσω συγκεκριμένων μηχανισμών.

Ακρωνύμια

AMPS	Advanced Mobile Phone Service
AF	Application framework
AP	Access Point
APS	Application Support Sublayer
ARQ	Automatic Repeat Request
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BSS	Basic Service Set
CAP	Connection Access Period
CCA	Clear Channel Assesment
CCK	Complementary Code Keying
CFP	Connection Free Period
CID	Cluster Intedifier
CLH	Cluster Head
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance
CTS	Clear To Sent
DLL	Data Link Layer
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EAP	Extensible Authentication Protocol
ECC	Error Correction Coding
ED	Energy Detection
ESS	Extended Service Set
FHSS	Frequency Hoping Spread Spectrum
FDD	Frequency Division Duplexing
FFD	Full Function Device
GTS	Guaranteed Time Slots
HART	Highway Addressable Remote Transducer
ISM	Industrial Scientific Medical
IBSS	Independent Basic Service Sets
LLC	Logical Link Control
LQI	Link Quality Indication
LR WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Networks
MLME	MAC Layer Management Entity
MPDU	MAC Protocol Data Unit
NAV	Network Allocation Vector
NLDE-SAP	Network Layer Data Entity-Service Access point
NLME	Network Layer Management Entity
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnection

PCS	Personal Communications Service
PDA	Personal Digital Assistants
PHR	PHY Header
RFD	Reduced Function Device
PKC	Public Key Cryptography
PSMO	Proxy Security Management Object
RTS	Request To Sent
SAP	Service Access Point
SD	Super frame Duration
SFD	Start Offrame Delimeter
SHR	Synchronization Header
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
SMAP	System Management Application Process
SS	Subscriber Station
TDD	Time Division Duplexing
TDM	Time Division Multiplexing
VoIP	Voice over Internet Protocol
VPN	Virtual Personal Network
WBC	Wireless Backhaul Connectivity
WEP	Wired Equivalent Privacy
WLAN	Wireless Lan Networks
WMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WPN	Wireless Plant Networks
WSN	Wireless Sensor Networks
WWAN	Wireless Wide Area Networks
ZDO	ZigBee Device Objects

Βιβλιογραφία

Ξένη βιβλιογραφία

- [1] Abowd, G.D, Sterbenz, J.P.G. (2000), “Final report on the interagency workshop on research issues for smart environments”, IEEE Personal Communications, pp. 36–40
- [2] Adersson, M. (2013), “Wireless Technologies for Industrial Applications”, *connectBlue*.
- [3] Agre, J., Clare, L. (2000), “An integrated architecture for cooperative sensing networks”, IEEE Computer Magazine, pp. 106–108.
- [4] Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002) “Wireless sensor networks: a survey,” *Comput. Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422.
- [5] Al-Walaie, S. A., Almadi, S. M., Al-Omair, A. M., and Al Qahtani, S. M. (2012), “*Wireless Technology for Industrial Applications, Opportunities and Challenges*”. Riyadh, Saudi Arabia.
- [6] Ammari, H. M., Sahin, D. (2014), “*The Art of Wireless Sensor Networks Volume 1: Fundamentals*”, Volume. 1: Fundamentals, New York City: Springer.
- [7] Baker, N. (2005), “ZigBee and Bluetooth: Strengths and weaknesses for industrial applications”, *IEE Computing & Control Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 20-25.
- [8] Bauer, P., Sichitiu, M., Istepanian, R., Premaratne, K., (2000), “The mobile patient: wireless distributed sensor networks for patient monitoring and care”, *Proceedings 2000 IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine*, pp. 17–21.
- [9] Belden (2010), “Installs Breakthrough Wireless System for Shell Petrochemical Plant Case Study”.
- [10] Bhardwaj, M., Garnett, T., Chandrakasan, A.P. (2001) “Upper bounds on the lifetime of sensor networks”, *IEEE International Conference on Communications ICC’01, Helsinki, Finland*.
- [11] Bonnet, P., Gehrke, J., Seshadri, P. (2000), “Querying the physical world”, *IEEE Personal Communications*, pp. 10–15.
- [12] Bulusu, N., Estrin, D., Girod, L., Heidemann, J. (2001), “Scalable coordination for wireless sensor networks: self-configuring localization systems”, *International Symposium on Communication Theory and Applications (ISCTA 2001)*, Ambleside, UK.
- [13] Celler, B.G. (1994) et al., “An instrumentation system for the remote monitoring of changes in functional health status of the elderly”, *International Conference IEEE-EMBS, New York*, pp. 908–909.

- [14] Cerpa, A., Elson, J., Hamilton, M., Zhao, J. (2001), “Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology”, ACM SIGCOMM’2000, Costa Rica.
- [15] Cerpa, A., Estrin, D. (2001), “ASCENT: adaptive self-configuring sensor networks topologies”, UCLA Computer Science Department Technical Report UCLA/CSDTR-01-0009.
- [16] Chandrakasan, A., Amirtharajah, R., Cho, S., Goodman, J., Konduri, G., Kulik, J., Rabiner, W., Wang, A (1999), “Design considerations for distributed micro-sensor systems”, Proceedings of the IEEE 1999 Custom Integrated Circuits Conference, San Diego, CA, pp. 279–286.
- [17] Chen, D., Nixon, M. and Mok, A. (2010), “WirelessHART™ Real-Time Network for Industrial Automation”, Springer.
- [18] Cho, S., Chandrakasan, A. (2000,) “Energy-efficient protocols for low duty cycle wireless microsensor”, Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, HI Vol. 2, p. 10.
- [19] Chong, C.Y. , Kumar, S. P. (2003), Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. Proceedings of the IEEE 91(8), pp. 1247-1256.
- [20] Coy, P., Gross, N. et al. 21 Ideas for the 21st Century. Business Week Online, 1999, pp. 78-167.
- [21] Coyle, G. (1995), et al., “Home telecare for the elderly”, Journal of Telemedicine and Telecare 1 (1995) 183–184
- [22] Daintree Networks (2010), “Getting Started with ZigBee and IEEE 802.15.4”
- [23] Delphine, C., Mogre, P. and Hollick, M. (2010). “Survey on Wireless Sensor Network Technologies for Industrial Automation: The Security and Quality of Service Perspectives”, *Future Internet* 2.
- [24] Egan, D. (2005), “The emergence of ZigBee in building automation and industrial controls”, Volume 16, issue 2, pp. 14-19.
- [25] Ergen, S.C. (2004), “ZigBee/IEE 802.15.4 Summary”.
- [26] Essa, I.A. (2000), “Ubiquitous sensing for smart and aware environments”, IEEE Personal Communications, pp. 47–49.
- [27] Ferrari, P., Flammini, D., Mariali, D., Sisinni, E. and Taroni, A. (2008), “Wired and Wireless Sensor Networks for Industrial Applications”, *Elsevier Ltd*.
- [28] Estrin, D., Govindan, R. Heidemann, J., Kumar, S., (1999), “Next century challenges: scalable coordination in sensor networks”, ACM MobiCom’99, Washington, USA, pp. 263–270
- [29] Franceschinis, M.; Spirito, M.A.; Tomasi, R.; Ossini, G. & Pidalà, M. (2008). “Using WSN technology for industrial monitoring: a real case”, *Proceedings of the Second International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2008, SENSORCOMM ’08*, pp. 282-287, ISBN 978-0-7695-3330-8, Cap Esterel, France, IEEE.
- [30] Frenze, L. (2013), “What’s The Difference Between IEEE 802.15.4 And ZigBee Wireless”.

- [31] FlexiPanel Ltd (2007), “Sensor Networking Case Study, How a sensor networking company migrated to ZigBee wireless with FlexiPanel products”, <http://www.flexipanel.com/Docs/SensorNetworksCaseStudy.pdf>.
- [32] Geier, J. (2007). “Wireless Industry Report” *Independent Consulting Services*, Wireless Nets Ltd.
- [33] Granjal, J., Sa Silva, J. and Monteiro, E. (2010), “Enable network-layer security on IPv6 wireless sensor”, IEEE GLOBECOM.
- [34] Gungor, V.C. and Hancke, G.P. (2009), “Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches”, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 56, NO. 10*.
- [35] Halweil, B. (2001), “Study finds modern farming is costly”, *World Watch* 14 (1), pp.9–10.
- [36] Harte, L. (2008), “*Introduction to Bluetooth, Technology, Market, Operation, Profiles, and Services*”, vol. 2, New York: Althos.
- [37] Heinzelman, W.R., Kulik, J., Balakrishnan, H. (1989), “Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks”, *Proceedings of the ACM MobiCom’99*, Seattle, Washington, pp. 174–185.
- [38] Hoblos G., Staroswiecki, M., Aitouche, A., (2000), “Optimal design of fault tolerant sensor networks”, *IEEE International Conference on Control Applications*, Anchorage, AK, pp. 467–472.
- [39] I. C. Society (2006), “Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low- Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)”, Technical report, IEEE Computer Society.
- [40] IEEE 802.15.4 (2003), *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. New York, NY: IEEE.
- [41] Institute of Electrical and Electronics Engineers (2006), *IEEE Std 802.15.4-2006, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*.
- [42] Intanagonwiwat, C., Govindan, R., Estrin, D. (2000), “Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks”, *Proceedings of the ACM Mobi- Com’00*, Boston, MA, pp. 56–67.
- [43] ISA (2008) “*Looking Ahead: ISA100a Heads to China*”
- [44] ISA Standard (2007), “ISA 100: Wireless Systems for Industrial Automation Developing a Reliable Universal family of Wireless Standards.”
- [45] Internet of Things: Wireless Sensor Networks, White Paper.
- [46] Jafari, R., Encarnacao, A., Zahoory, A., Dabiri, F., Noshadi, H. and Sarrafzadeh, M. (2005), “Wireless sensor networks for health monitoring” in *Proceedings of 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems*, pp. 479-481.

- [47] Jaikaeo, C., Srisathapornphat, C., Shen, C. (2001), "Diagnosis of sensor networks", IEEE International Conference on Communications ICC'01, Helsinki, Finland.
- [48] Jing, S. and Xiaofen, Z. (2009), "Study of ZigBee Wireless Mesh Networks," in Hybrid Intelligent Systems HIS '09. Ninth International Conference on, 2009, pp. 264-267.
- [49] Johnson, P. et al., (1996), "Remote continuous physiological monitoring in the home", Journal of Telemed Telecare 2 (2), pp. 107–113.
- [50] Kahn, J.M., Katz, R.H., Pister, K.S.J. (1999), "Next century challenges: mobile networking for smart dust", Proceedings of the ACM MobiCom'99, Washington, USA, pp. 271–278.
- [51] Kiokes G., Gkonis, P., Zountouridou, E (2015), "A comparative study of wireless communication protocols for monitoring vital signs in athletes in a soccer field"
- [52] Kim, A. N., Hekland, F.; Petersen, S. & Doyle, P. (2008), "When HART goes wireless: understanding and implementing the WirelessHART standard", *Proceedings of the IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2008, ETFA 2008, pp. 899-907, ISBN 978-1-4244-1505-2, Hamburg, Germany, September 2008, IEEE.
- [53] Kinney, P., (2003), "ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works". Communications Design Conference.
- [54] Kumar, S. and Shepherd, D. (2001), Sensit: Sensor information technology for the warfighter. Proceedings of the 4th International Conference on Information Fusion (FUSION'01), pp. 3-9.
- [55] Lantronix (2009), "Industrial Automation Case Study", <https://www.lantronix.com/resources/case-studies/spectrum-cnc-technologies/> .
- [56] Lee J.S, Su Y.W. & Shen C.C. (2007), "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi", The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON).
- [57] Lee, J.S, Su Y.W. and Shen C.C. (2009), "Applications of Short-Range Wireless Technologies to Industrial Automation: A ZigBee Approach", *Fifth Advanced International Conference on Telecommunications*, IEEE.
- [58] Lee, J.S. (2006), "Performance evaluation of IEEE 802.15.4 for low-rate wireless personal area networks," IEEE Trans. Consumer Electron., vol. 52, no. 3, pp. 742-749.
- [59] Lennvall, T., Svensson, S., and Hekland, F. (2008), "A Comparison of WirelessHART and ZigBee for Industrial Applications", *IEEE International Workshop on*, pp. 85-88.
- [60] Low, K.S., Win, W.N.N. and Er, M.J. (2006), "Wireless Sensor Networks for Industrial Environments", *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce*

- [61] Mainwaring, A., Polastre, J., Szewczyk, R., Culler, D. and Anderson, J., (2002), “Wireless sensor networks for habitat monitoring” in Proceedings of 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, pp. 88-97
- [62] Mats, A. (2013), “Wireless Technologies for Industrial Applications”, *IEEE*.
- [63] Meguerdichian, S., Koushanfar, Qu, F. G., Potkonjak, M. (2001), “Exposure in wireless ad-hoc sensor networks”, Proceedings of ACM MobiCom’01, Rome, Italy, pp. 139– 150.
- [64] Mohamed Shahid Abdul Ghayum, B.E. (2010), “Comparative Study of Wireless Protocols - Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, WirelessHART and ISA SP100, and their Effectiveness in Industrial Automation” Thesis. Master of Science in Engineering, The University of Texas at Austin.
- [65] Nadig D., Iyengar, S.S. (1993), “A new architecture for distributed sensor integration”, Proceedings of IEEE Southeastcon’93, Charlotte, NC.
- [66] Nam, Y.H., et al., (1998), “Development of remote diagnosis system integrating digital telemetry for medicine”, International Conference IEEE-EMBS, Hong Kong, pp. 1170– 1173.
- [67] NI, L.M. (2008), China’s national research project on wireless sensor networks. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC’08), p. 19.
- [68] Nixon, M. (2012), “A Comparison of WirelessHART and ISA100.11a”.
- [69] Noury, N., Herve, T., Rialle, V., Virone, G., Mercier, E., Morey, G., Moro, A., Porcheron, T. (2000), “Monitoring behavior in home using a smart fall sensor”, IEEE-EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology, pp. 607–610.
- [70] Ogawa, M. et al., (1998), “Fully automated biosignal acquisition in daily routine through 1 month”, International Conference on IEEE-EMBS, Hong Kong, pp. 1947–1950.
- [71] Paavola, M. and Leiviskä, K., “Wireless Sensor Networks in Industrial Automation” , INTECH
- [72] Petersen, S. and Carlsen, S. (2011), “WirelessHART Versus ISA100.11a”, *IEEE Industrial Electronics* pp.23-24.
- [73] Petriu, E.M., Georganas, N.D. Petriu, D.C., Makrakis, D., Groza, V.Z. (2000), “Sensor-based information appliances”, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine pp31–35.
- [74] Petrova, M., Riihijarvi, J., Mahonen, P., Labella, S. (2006), “Performance study of IEEE 802.15.4 using measurements and simulations”, in Wireless Communications and networking Conference, WCNC 2006, IEEE vol. 1, pp. 487-492, 3-6.
- [75] Phoenix Contact – British Petroleum (2010), “Wireless solutions in high-noise environments Case Study Oil and Gas”

- https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/local_us/web_dwl_technical_info/AppStory_Wireless_solutions_in_high_noise_07-1930.pdf .
- [76] Pinedo-Frausto E. D. & Garcia-Macias, A. J. (2008). “An experimental analysis of ZigBee Networks”, *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks*, 2008, pp. 723-729, ISBN 978-1-4244-2412-2, Quebec, Canada, October 2008, IEEE.
- [77] Poor, R. and Hodges, B. (2002), “Reliable Wireless Networks for industrial Systems”, *Ember Corporation*, Boston, Massachusetts.
- [78] Pottie, G.J., Kaiser, W.J. (2000) “Wireless integrated network sensors”, *Communications of the ACM* 43 (5), pp. 551– 558.
- [79] Prosoft Technology (2010), “Prosoft Wireless Designer User Manual”, <https://www.prosoft-technology.com/content/download/4323/30857/version/2/file/ProSoft+Wireless+Designer+User+Manual.pdf> .
- [80] Rabaey, J.M., Ammer, M.J., J.L. da Silva Jr., Patel, D., Roundy, S. (2000), “PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking”, *IEEE Computer Magazine*, pp. 42–48.
- [81] Radmand, P., Talevski, A., Petersen S. (2010), “*Comparison of Industrial WSN Standards*” 4th *IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (IEEE DEST)*.
- [82] Raza, S., Duquennoy, S., Chung, T., Yazar, D., Voigt, T. and Roedig, U. (2011), “Securing communication in 6LoWPAN with compressed IPsec”, *Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS)*.
- [83] Sable, A. (2014), “*Comparative Study on IEEE Standard of WPAN 802.15.1/3/4*”, *International Journal for Research in Emerging Science and Technology*, Vol. 1, Issue 1, Research Scholar, PG Department of Computer Science and Engineering, S.G.B.A.U, Amravati.
- [84] Scheiner Electric Industries SAS. (2011), “*Zigbee*”. Γαλλία: Scheiner Electric.
- [85] Sexton, D. (2007) “Understanding the unique nature of the universal family of ISAIOO Wireless Standards”.
- [86] Sibbald, B. (2001), “Use computerized systems to cut adverse drug events: report”, *CMAJ: Canadian Medical Association Journal* 164 (13), 1878, 1/2p, 1c.
- [87] Shayma, W.N. (2012), “A study of ZigBee Network Topologies for Wireless Network with One Coordinator and Multiple Coordinators”, *Tikrit Journal of Engineering Sciences/Vol.19/No.4*, pp. 65-81.
- [88] Shelby, Z. and Bormann, C. (2009), “*6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*”, Willey.
- [89] Shen, C., Srisathapornphat, C., Jaikaeo, C. (2001), “Sensor information networking architecture and applications”, *IEEE Personal Communications*, pp. 52–59.

- [90] Shen, X., Wang, Z. and Sun, Y. (2004), “Wireless sensor networks for industrial applications” *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation*, IEEE
- [91] Shih, E et al., (2001), “Physical layer driven protocol and algorithm design for energy efficient wireless sensor networks”, in Proceedings of MOBICOM, pp. 272-287.
- [92] Shih, E., Cho, S., Ickes, N, Min, R., Sinha, A., Wang, A., Chandrakasan, A. (2001) “Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks”, Proceedings of ACM MobiCom’01, Rome, Italy, pp. 272–286.
- [93] Slijepcevic, S., Potkonjak, M. (2001)” Power efficient organization of wireless sensor networks”, IEEE International Conference on Communications ICC’01, Helsinki, Finland.
- [94] Song, H., Song, J., Zhu, X., Mok, A.K., Chen, D., Nixon, M., Pratt, W., Giondhalekar, V. (2009), “Wi-Htest: compliance test suite for Diagnosing Devices in Real-Time WirelessHART Network”, RTAS 2009, in 15th IEEE, Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, pp. 327-336, 13-16.
- [95] Song, J., Han, S., Mok, A., Chen, D., Lucas, M., Nixon, M. and Pratt, W. (2008), “WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control”, in IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, RTAS 2008, pp. 377-386, 22-24.
- [96] Song, J., Mok, A. K., Chen, D., Nixon, M. (2006), “Challenges of wireless control in process industry,” Workshop on Research Directions for Security and Networking in Critical Real-Time and Embedded Systems.
- [97] Tanenbaum, A. (1988), “*Computer Networks*”, Prentice-Hall, Second Edition.
- [98] Tjensvold, J.M. (2007), “Comparison of the IEEE 802.11, 802.15.1, 802.15.4 and 802.15.6 wireless standards”
- [99] Vanzago, L. (2006), “Overview on 802.15.4/Zigbee”, *STMicroelectronics*
- [100] Viswanathan, A., Boulton, T.E. (2007), “Power conversion in ZigBee networks using temporal control”, in Wireless Pervasive Computing, ISWPC, 2nd International Symposium.
- [101] Wang, G. (2011), “Comparison and Evaluation of Industrial Wireless Sensor Network Standards ISA100.11a and WirelessHART”, Master of Science Thesis, Communication Engineering, Gothenburg, Sweden.
- [102] Wang, W., He, G., Wan, J. (2011), “Research on ZigBee wireless communication technology”, in Electrical and Control Engineering (ICECE), International Conference on, pp. 1245-1249, 16-18.
- [103] Warneke, B., Liebowitz, B., Pister, K.S.J. (2001), “Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer”, IEEE Computer, pp. 2–9.
- [104] Willing, A., Matheus, K., and Wolisz, A. (2005), “Wireless Technology in industrial networks”, *Proceedings of the IEEE (93)*, pp. 1130-1151.

- [105] Yick, J., Mukherjee B. and Ghosal D. (2008), “Wireless sensor network survey”, *Computers Networks*
- [106] Zhang, X., Wei, M., Wang, P., Kim, Y. (2009), “Research and implementation of security mechanism in ISA100.11a networks”, in *Electronic Measurement & Instruments, ICEMI 2009, 9th International Conference on* pp. 4-716, 16-19.
- [107] Zhao, G. (2011), “Wireless Sensor Networks for Industrial Process”, *Monitoring and Control: a survey.*
- [108] Zhuang Goh, K. M. & Zhang, J. B. (2007). “The wireless sensor networks for factory automation: issues and challenges”, *Proceedings of the IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2007, ETFA*, pp. 141-148, ISBN 978-1-4244-0825- 2, Patras, Greece, IEEE.
- [109] ZigBee Alliance, Inc. (2008). “ZigBee Specification”, ZigBee Standards Organization.
- [110] “ZigBee Alliance to Incorporate IETF IT into Wireless Network Standards.” Vol. 2009: HIS, May 10.2009.
- [111] Γιαπιτζάκης, Ι. (2012), “Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και ελεγκτών στην βιομηχανία”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών.
- [112] Μακρή, Χ. (2011). “Μελέτη Συνύπαρξης Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων και Δικτυων Wi-Fi σε πραγματικό περιβάλλον”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών.
- [113] Οικονόμου, Α. (2016), “Ολοκληρωμένο Σύστημα Παρακολούθησης Δασικών Περιοχών”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών.
- [114] Τσαταρώνης, Μ., “Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων”, ΤΕΙ Λαρίσας, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών.
- [115] Marcio, S., Jorge, L.M. Amaral (2012), “Analysis of wireless industrial automation standards: ISA-100.11a and WirelessHART” <https://www.isa.org/standards-publications/isa-publications/intech-magazine/2012/december/web-exclusive-analysis-wireless-industrial-automation-standards-isa-100-11a-wirelesshart/> [accessed 19/02/2017]
- [116] ProSoft (2012), “ProSoft Wireless Designer PSW-PWD”, https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=7ECnXC3PuX0, [accessed 12/03/2017]