



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάλυση και Επεξεργασία Δεδομένων σε Βιομηχανικά
Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

ΤΟΛΙΚΑΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Α.Ε.Μ. 455

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΣΑΡΗΓΙΑΝΝΙΔΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΟΖΑΝΗ - ΜΑΡΤΙΟΣ 2017

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα κενή)

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία στο βιβλιογραφικό της μέρος εστιάζεται στην ανάλυση της τεχνολογίας των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks - WSNs) και ιδιαίτερα στην συμμετοχή τους στο Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Industrial Internet of Things - IIoT). Στο ερευνητικό της κομμάτι γίνεται η ανάπτυξη ενός πρωτοκόλλου δρομολόγησης που βασίζεται στην μετάδοση πακέτων μέσω εκπομπής (broadcast) και στην οποία προστίθεται μία μέθοδος διατήρησης της ενέργειας των κόμβων. Το περιβάλλον μελέτης είναι ένα δίκτυο αισθητήρων, σε τυχαία διάταξη, οι οποίοι επικοινωνούν με μία πύλη (gateway) για την παρακολούθηση του δικτύου και την αποστολή εντολών από την πύλη προς τους κόμβους και την επιστροφή μετρήσεων από την μεριά των κόμβων.

Οι στόχοι της εργασίας συνοψίζονται ως εξής:

- Μελέτη και παρουσίαση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με τα Βιομηχανικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Industrial Wireless Sensor Networks - IWSN).
- Ανάλυση και ανάπτυξη του πρωτοκόλλου REALFLOW και της μεθόδου διατήρησης της ενέργειας.
- Αποτίμηση του πρωτοκόλλου με προσομοίωση.
- Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα που προκύπτουν.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των WSNs και του IIoT, παρουσιάζονται οι απαιτήσεις του συστήματος των δικτύων IWSN, τα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί, οι προκλήσεις που υπάρχουν στους διάφορους τομείς, και οι κατηγορίες των εφαρμογών που έχουν αναπτυχθεί.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία ανάλυση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης, παρουσιάζονται μερικά πρωτόκολλα και αναλύεται λεπτομερώς το πρωτόκολλο REALFLOW το οποίο επιλέχθηκε να προσομοιωθεί στο εργαλείο MATLAB με τη χρήση γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού (event-driven programming).

Το Κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει τη μέθοδο διατήρησης της ενέργειας που επιλέχθηκε προκειμένου να επεκταθεί η βιωσιμότητα των κόμβων του δικτύου

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα που παρήχθησαν από την προσομοίωση τόσο για την αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου σχετικά με την δρομολόγηση αλλά και την διατήρηση της ενέργειας. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν το ποσοστό παράδοσης πακέτων, την χρονοκαυστέρηση (latency) των πακέτων και το ποσοστό ενέργειας που εξοικονομήθηκε στους κόμβους.

Τέλος στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η παρουσίαση και περιγραφή των κύριων γεγονότων που δημιουργήθηκαν για την προσομοίωση του πρωτοκόλλου καθώς και όποιο άλλο σημείο του κώδικα κρίνεται σημαντικό.

Abstract

This thesis in the bibliography part focuses on the analysis of the technology of Wireless Sensor Networks (WSN) and especially in their participation in the Industrial Internet of Thing (IIoT). In the research part includes the development of a routing protocol based on packet transmission through broadcast and in which a method of maintaining the node energy added. The study environment is a network of wireless sensors, in random order, which communicate with one Gateway for network monitoring and sending commands from the Gateway to nodes and returning measurements on the side of nodes.

The objectives of this work can be summarized as follows:

- Study and presentation of the existing literature on the Industrial Wireless Sensor Networks (IWSN)
- Analysis and development of the protocol REALFLOW in addition with an energy conservation method.
- Evaluation of protocol through simulation.
- Compare of the results and conclusions drawn.

Chapter 1 presents the basic elements of WSNs and IIoT, presenting the requirements of IWSNs systems, the standards that have been developed, the challenges that exist in the various sectors and the categories of the developed applications.

Chapter 2 includes an analysis of routing protocols by presenting the major protocols that have been developed and analyzing in detail REALFLOW protocol, which was chosen to be evaluated with simulation in MATLAB tool using event-driven programming.

Chapter 3 presents the energy conservation method that was chosen to be added, in order to extend the viability of nodes in the network.

Chapter 4 includes the presentation of the comparative results, which obtained from the simulation process, of both protocol routing efficiency and the conservation of energy. Measurements include the Packet Delivery Ratio (PDR), latency of the protocol and the amount of energy saved the nodes.

Finally, Chapter 5 is an outline of the main events that were created in simulation of protocol REALFLOW and any other point of the code that deemed important.

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα κενή)

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία αποτελεί διπλωματική εργασία στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Πριν την παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους με τους οποίους συνεργάστηκα και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίησή της, καθώς και όλους αυτούς που είχα την ιδιαίτερη χαρά να συνεργαστώ όλα αυτά τα χρόνια φοίτησής μου στο πανεπιστήμιο και όλους όσους μου στάθηκαν και με στήριξαν από την αρχή μέχρι το τέλος της προσπάθειάς μου.

Πρώτον από όλους θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου, τον Επίκουρο Καθηγητή Σαρηγιαννίδη Παναγιώτη για την υπομονή, την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση, την βοήθεια και υποστήριξή τους.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου, τους συμφοιτητές και το προσωπικό του τμήματος για την συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια και την βοήθεια που μου παρείχαν ώστε να φέρω εις πέρας την όλη μου προσπάθεια και να πραγματοποιήσω τους στόχους μου.

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα κενή)

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Ευχαριστίες	6
1 ^ο Κεφάλαιο	12
1.1 Τα χαρακτηριστικά των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων	13
1.2 Τα χαρακτηριστικά του Διαδικτύου των Πραγμάτων	14
1.3 Τα χαρακτηριστικά του Βιομηχανικού Διαδικτύου των Πραγμάτων	15
1.4 Βιομηχανικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (IWSN)	18
1.4.1 Απαιτήσεις Συστήματος	18
1.4.2 Τα Πρότυπα των Βιομηχανικών Ασύρματων Δικτύων	21
1.4.3 Προκλήσεις	35
1.4.4 Εφαρμογές	38
2 ^ο Κεφάλαιο	40
2.1 Πρωτόκολλα Πρόληψης	40
2.2 Πρωτόκολλα Αντίδρασης	41
2.3 Υβριδικά Πρωτόκολλα	41
2.4 Πρωτόκολλο AODV	41
2.5 Πρωτόκολλο DSR	42
2.6 Πρωτόκολλο DYMO	42
2.7 Πρωτόκολλο EARQ	42
2.8 Αλγόριθμος InRout	43
2.9 Πρωτόκολλο POCTP	44
2.10 Πρωτόκολλο Δρομολόγησης με βάση την Λαμβανόμενη Ισχύ του Σήματος	44
2.11 Πρωτόκολλο REALFLOW	47
3 ^ο Κεφάλαιο	57
3.1 Μηχανισμός Εξοικονόμησης Ενέργειας των Κόμβων	57
Κύκλος Καθηκόντων - Σχήμα Προγραμματισμένου Ραντεβού (Duty Cycle – Scheduled)	58
4 ^ο Κεφάλαιο	60
4.1 Στατιστικά Ελέγχου Αποδοτικότητας του Πρωτοκόλλου REALFLOW	61
4.1.1 Σενάριο 1 ^ο	61
4.1.2 Σενάριο 2 ^ο	63
4.1.2 Σενάριο 3 ^ο	66

4.2 Στατιστικά Ελέγχου Αποδοτικότητας της Τεχνικής Εξοικονόμησης Ενέργειας	69
4.2.1 Σενάριο 1 ^ο	69
4.2.2 Σενάριο 2 ^ο	70
4.2.3 Σενάριο 3 ^ο	71
5 ^ο Κεφάλαιο	73
5.1 Παρουσίαση του κώδικα	73
Συμπεράσματα.....	83
Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	83
Βιβλιογραφία	85

Εικόνα 1: Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων.....	13
Εικόνα 2: Η δομή των αισθητήρων [1].....	13
Εικόνα 3: Διαδίκτυο των Πραγμάτων.....	14
Εικόνα 4: Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων.....	15
Εικόνα 5: Οι τέσσερις βιομηχανικές επαναστάσεις [6].....	15
Εικόνα 6: Τα πλεονεκτήματα του ΙοΤ [3]	16
Εικόνα 7: Η στοίβα του ΙοΤ [6].....	17
Εικόνα 8: Η στοίβα του 802.15.4.....	22
Εικόνα 9: Η δομή ενός πακέτου στο φυσικό επίπεδο.....	22
Εικόνα 10: Η δομή ενός πακέτου στο επίπεδο MAC	23
Εικόνα 11: Οι τοπολογίες αστέρα και πλέγματος.....	24
Εικόνα 12: Η δομή ενός δικτύου ISA100.11a	25
Εικόνα 13: Η στοίβα του ISA100.11a	26
Εικόνα 14: Η δομή του Zigbee	29
Εικόνα 15: Οι κύριες τοπολογίες εφαρμογής του Zigbee.....	31
Εικόνα 16: Η δομή ενός δικτύου WirelessHART	33
Εικόνα 17: Η στοίβα του HART (ενσύρματου και ασύρματου)	34
Εικόνα 18: Οι κατηγορίες των πρωτοκόλλων δρομολόγησης.....	40
Εικόνα 19: Ποσοστό παράδοσης πακέτων (PDR).....	46
Εικόνα 20: Αλγόριθμος 1.....	49
Εικόνα 21: Αλγόριθμος 2.....	50
Εικόνα 22: Αλγόριθμος 3.....	52
Εικόνα 23: Αλγόριθμος 4.....	53
Εικόνα 24: Τα τέσσερα βήματα της λειτουργίας του RELAFLOW.....	55
Εικόνα 25: Παράδειγμα λειτουργίας του REALFLOW	55
Εικόνα 26: Η ενεργειακή ροή σε μια συσκευή αισθητήρα	57
Εικόνα 27: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 1 - $K_{max} = 2$	61
Εικόνα 28: Χρονακαθυστέρηση - Σενάριο 1 - $K_{max}=2$	62
Εικόνα 29: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 1 - $K_{max} = 3$	62
Εικόνα 30: Χρονακαθυστέρηση - Σενάριο 1 - $K_{max}=3$	63
Εικόνα 31: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 2 - $K_{max} = 2$	64
Εικόνα 32: Χρονακαθυστέρηση - Σενάριο 2 - $K_{max}=2$	64
Εικόνα 33: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 2 - $K_{max} = 3$	65
Εικόνα 34: Χρονακαθυστέρηση - Σενάριο 2 - $K_{max}=3$	65
Εικόνα 35: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 3 - $K_{max} = 2$	66
Εικόνα 36: Χρονακαθυστέρηση - Σενάριο 3 - $K_{max}=2$	67
Εικόνα 37: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 3 - $K_{max} = 3$	67
Εικόνα 38: Χρονακαθυστέρηση - Σενάριο 3 - $K_{max}=3$	68
Εικόνα 39: Ποσό ενεργειακής κατανάλωσης - Σενάριο 1	69
Εικόνα 40: Ποσό ενεργειακής κατανάλωσης - Σενάριο 2	70
Εικόνα 41: Ποσό ενεργειακής κατανάλωσης - Σενάριο 3	71

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα κενή)

1^ο Κεφάλαιο

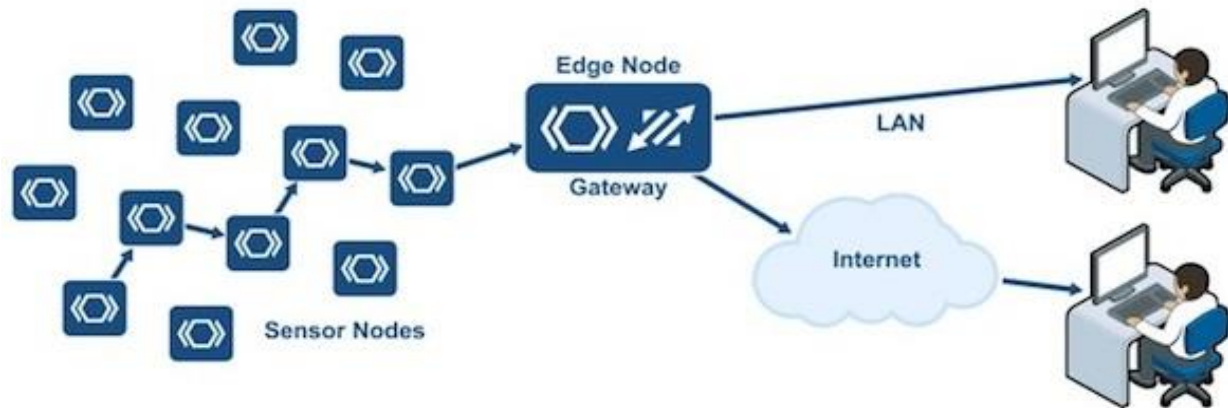
Σήμερα οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε δραστηριότητα του ανθρώπου και για την κάλυψη πολλών αναγκών του. Το ευρύ φάσμα εφαρμογής τους μας επιτρέπει να τους συναντάμε σε οποιοδήποτε περιβάλλον βρισκόμαστε ή σε οποιαδήποτε ηλεκτρονική συσκευή χρησιμοποιούμε. Αισθητήρες συναντούμε από τα smart phones μας, τα αυτοκίνητά μας, το σπίτι μας, τους δημόσιους χώρους, στις εργοστασιακές μονάδες μέχρι και σε μη κατοικήσιμες περιοχές του πλανήτη μας για ερευνητικούς λόγους. Παρά λοιπόν το γεγονός πως υπάρχει μια πληθώρα χρήσεων αυτών των συσκευών και πως υπάρχουν αρκετό καιρό στη ζωή μας η έρευνα και ανάπτυξη τους έχει ξεκινήσει από το 1980, για στρατιωτικούς σκοπούς αρχικά, και μόλις από το 2001 χρησιμοποιούνται για βιομηχανικούς και ερευνητικούς λόγους.

Ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων είναι ένα δίκτυο που σχηματίζεται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων, οι οποίοι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες ώστε να ανιχνεύουν φυσικά φαινόμενα όπως το φως, η θερμοκρασία κ.α. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων - ΑΔΑ (WSN) αποτελούν μια ιδιαίτερη μέθοδο συλλογής πληροφοριών που μπορούν να αναβαθμίσουν την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα των επικοινωνιών. Σε σύγκριση με τις ενσύρματες τεχνολογίες, τα ΑΔΑ έχουν πιο ευέλικτη εφαρμογή και συγχρόνως η ταχύτερη ανάπτυξη τους αποτελεί ένα καθοριστικό χαρακτηριστικό στην ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT). Επιπλέον, οι αισθητήρες λόγω του μικρού μεγέθους, του χαμηλού κόστους και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας τους θα μπορούν να προσθέσουν το IoT σε μικρότερες συσκευές σε οποιοδήποτε περιβάλλον.

Καθώς, όμως, θα προσθέτουμε στο περιβάλλον μας συσκευές που θα έχουν την δυνατότητα να καταγράφουν πληθώρα πληροφοριών, θα εμφανίζονται στην επιφάνεια και κάποιες ανησυχίες οι οποίες θα πρέπει να διευθετηθούν. Πρέπει να καθοριστεί άμεσα το ποιος θα έχει την κυριότητα των πληροφοριών που θα συλλέγει μία συσκευή, ποιος θα μπορεί να έχει πρόσβαση σε αυτές, ποιες θα είναι οι επιτρεπόμενες ενέργειες αυτού που θα χειρίζεται τα δεδομένα και το πόσο ασφαλή θα είναι σε πιθανές επιθέσεις.[1] Επίσης σημαντικό είναι να δημιουργηθεί ένα νομικό πλαίσιο στο οποίο θα λειτουργούν οι αισθητήρες διότι εκτός της συλλογής των δεδομένων έχουν την δυνατότητα και να παίρνουν αυτόνομες αποφάσεις. Πλέον οι συσκευές αυτές θα λειτουργούν σαν νομικά πρόσωπα, και αυτό είναι κάτι που εγείρει πολύπλοκα θέματα.

1.1 Τα χαρακτηριστικά των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

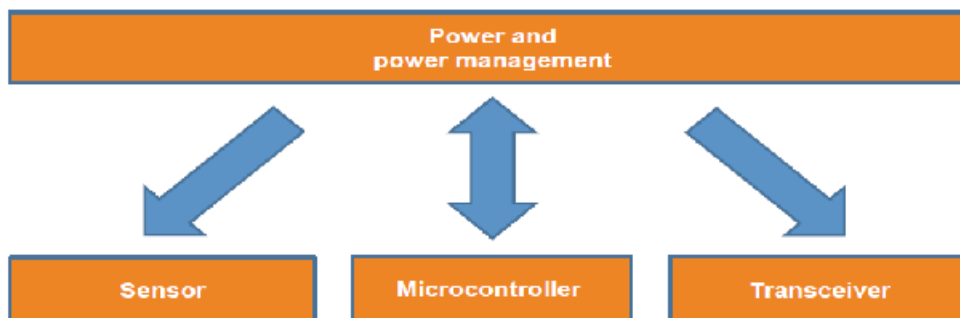
Ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων ουσιαστικά είναι ένα δίκτυο κόμβων που ελέγχει κάποιο περιβάλλον και προσφέρει την αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπων και υπολογιστών με το περιβάλλον.[2] Αποτελείται συνήθως από κόμβους αισθητήρες (sensors), κόμβους ενεργοποιητές (actuators) και από μία πύλη (gateway). Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην περιοχή παρακολούθησης και μεταδίδουν τα δεδομένα που έχουν συλλέξει στην πύλη τα οποία έπειτα φτάνουν στον κόμβο διαχείρισης. Ο χρήστης είναι αυτός που μέσω του κόμβου διαχείρισης ελέγχει τα ΑΔΑ και καθορίζει τη συλλογή των δεδομένων.



Εικόνα 1: Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων

Η δομή των αισθητήρων

Οι αισθητήρες αποτελούν το κύριο κομμάτι ενός ΑΔΑ και περιλαμβάνει τα εξής τέσσερα μέρη: την μπαταρία, την οντότητα διαχείρισης της ενέργειας, ένα μικροελεγκτή και ένα ασύρματο πομποδέκτη. Η μπαταρία προσφέρει την ενέργεια για τη λειτουργία του αισθητήρα. Ο αισθητήρας λαμβάνει σήματα από το περιβάλλον όπως το φως, την θερμοκρασία κ.α. και τα στέλνει στο μικροελεγκτή ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα. Τέλος, ο πομποδέκτης στέλνει τα δεδομένα.



Εικόνα 2: Η δομή των αισθητήρων [1]

1.2 Τα χαρακτηριστικά του Διαδικτύου των Πραγμάτων

Ο όρος Διαδίκτυο των Πραγμάτων που χρησιμοποιείται ευρέως αναφέρεται i) στο παγκόσμιο δίκτυο διασυνδεδεμένων συσκευών που προκύπτει μέσω της επέκτασης της τεχνολογίας του Διαδικτύου, ii) το σύνολο των υποστηριζόμενων τεχνολογιών που απαιτείται την υλοποίησή του και το σύνολο των εφαρμογών και υπηρεσιών που χρησιμοποιούν αυτές τις τεχνολογίες για την ανάπτυξη νέων επιχειρήσεων και τη δημιουργία νέων ευκαιριών στην αγορά.



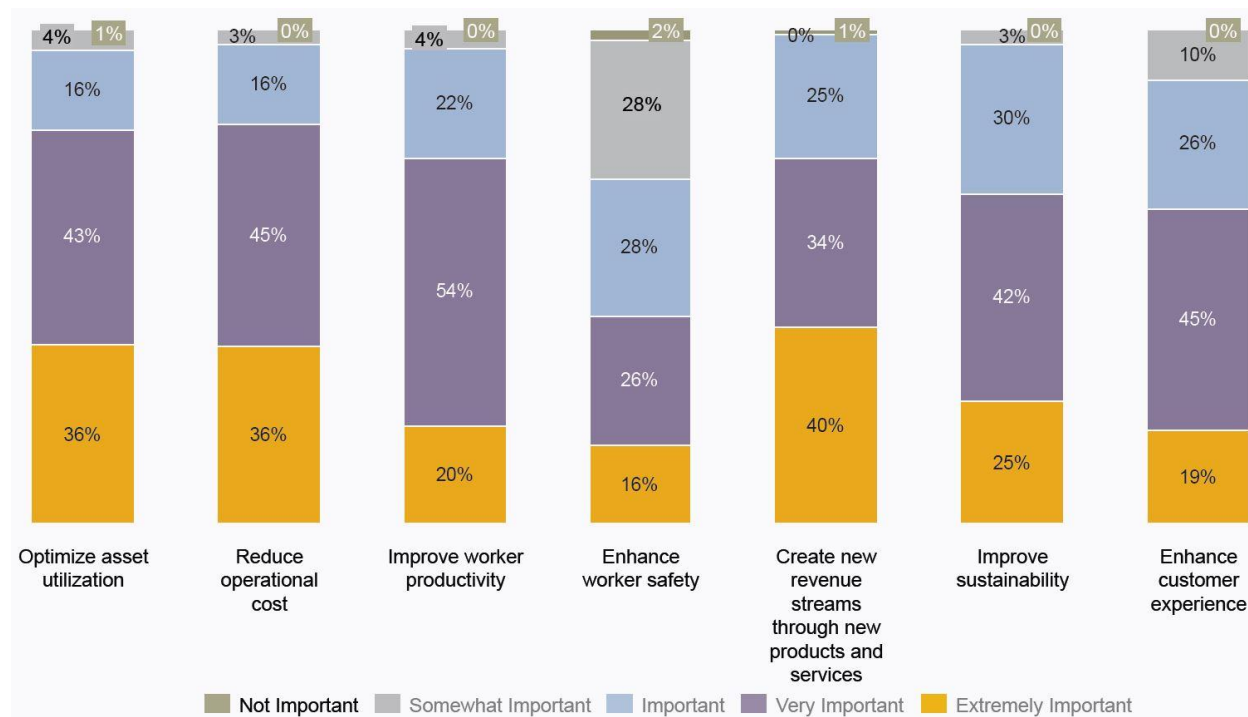
Εικόνα 3: Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Σκοπός του IoT είναι η μετάβαση από ένα Internet που χρησιμοποιείται από διασυνδεδεμένες συσκευές χρηστών σε ένα Internet το οποίο χρησιμοποιείται για την διασύνδεση φυσικών πραγμάτων που επικοινωνούν μεταξύ τους ή/και με τους χρήστες για την παροχή καινούριων προοπτικών στις υπάρχουσες υπηρεσίες αλλά και την δημιουργία νέων. Τα κύρια στοιχεία του IoT μπορούν να προσδιοριστούν ως : i)Υλισμικό – που αποτελείται από sensors, actuators και ενσωματωμένο τηλεπικοινωνιακό υλικό, ii)Ενδιάμεσο υλικό/λογισμικό – τον απαιτούμενο χώρο αποθήκευσης και υπολογιστικά εργαλεία ανάλυσης δεδομένων και iii) Η Εμφάνιση – καινοτόμα και ευκολονόητη παρουσίαση και ερμηνεία των εργαλείων τα οποία θα πρέπει να είναι προσβάσιμα σε διάφορες πλατφόρμες και εφαρμογές.

Επιπλέον, αναφορικά, τα κύρια χαρακτηριστικά που πρέπει να καλύπτει το IoT είναι : ετερογένεια των συσκευών, επεκτασιμότητα, συνεχή ανταλλαγή δεδομένων μέσω των ασύρματων τεχνολογιών, λύσεις βελτιστοποίησης της ενεργειακής κατανάλωσης, ικανότητες παρακολούθησης και εντοπισμού των συσκευών, ικανότητες αυτό-αναδιοργάνωσης, διαλειτουργικότητα και διαχείριση των δεδομένων και, τέλος, ενσωματωμένη ασφάλεια και μηχανισμούς προστασίας της ιδιωτικότητας.

επωφελούνται από το ΙΙoT μέσω της μείωσης του κόστους εξαιτίας της προληπτικής συντήρησης, της αυξημένης ασφάλειας, και άλλων αποδοτικών λειτουργιών. Οι έξυπνες συσκευές των δικτύων του ΙΙoT επιτρέπουν στις βιομηχανικές εταιρίες να συνδέσουν όλο τους το προσωπικό, τα δεδομένα και τις διεργασίες τους από την εργοστασιακή μονάδα μέχρι τα εκτελεστικά γραφεία. Μπορούν μέσω του ΙΙoT να έχουν μια πλήρη και ακριβή εικόνα της πορείας της επιχείρησης, πράγμα που δίνει ιδιαίτερη βοήθεια στην λήψη αποφάσεων.

Η παρακάτω εικόνα συνοψίζει επιτυχώς τα πλεονεκτήματα της υιοθέτησης του Βιομηχανικού Διαδικτύου των πραγμάτων, από τις βιομηχανικές επιχειρήσεις [3].



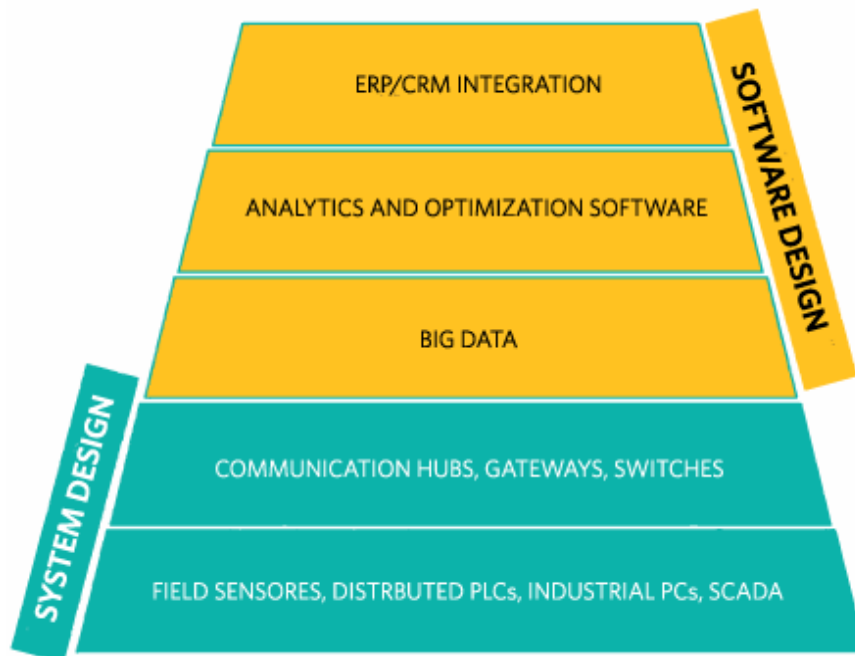
Εικόνα 6: Τα πλεονεκτήματα του ΙΙoT [3]

Τα πλεονεκτήματα που αναφέρει η παραπάνω εικόνα είναι η βελτιστοποίηση της χρήσης των περιουσιακών στοιχείων, η μείωση των λειτουργικών εξόδων, η βελτίωση της παραγωγικότητας των εργατών, η ενίσχυση της ασφάλειας των εργατών, η δημιουργία νέων ροών προσόδων μέσω νέων προϊόντων και υπηρεσιών, η βελτίωσης της βιωσιμότητας και η ενίσχυση της εμπειρίας του πελάτη.

Αναλύοντας τα οφέλη του ΙΙoT, στην εποχή της πληροφορίας και της συντονισμένης συλλογής των δεδομένων, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να δούμε και να μετρήσουμε την ικανότητα του στην εξόρυξη δεδομένων αλλά και στην συνεργασία του με εφαρμογές τεχνητής υπολογιστικής [4]. Όπως επίσης, πάντα σχετικά με την ανάλυση δεδομένων, το ΙΙoT έχει τις προϋποθέσεις για την εξαιρετική συνεργασία με την υπολογιστική νέφους (fog computing)[5].

Το ΠoT θεωρείται ότι είναι μία από τις πρωταρχικές τάσεις στις βιομηχανικές επιχειρήσεις σήμερα και στο μέλλον. Οι βιομηχανίες πιέζουν προς τον εκμοντερνισμό των συστημάτων και του εξοπλισμού τους ώστε να πληρούν νέους κανονισμούς, να συμβαδίζουν με την αυξανόμενη ταχύτητα και μεταβλητότητα της αγοράς. Οι εταιρίες που έχουν αποδεχτεί και εφαρμόσει το ΠoT έχουν δει σημαντική βελτίωση στην ασφάλειά τους, την κερδοφορία, και προβλέπεται αυτή η τάση να συνεχιστεί καθώς βελτιώνονται οι τεχνολογίες του ΠoT και γίνονται ευρύτερα αποδεκτές.

Ένας διαφορετικός τρόπος να κατανοήσει κανείς το ΠoT είναι το παρακάτω σχήμα, το οποίο δείχνει ένα βιομηχανικό δίκτυο με τη μορφή επιπέδων.



Εικόνα 7: Η στοίβα του IIoT [6]

Στη βάση του βρίσκονται οι συσκευές του συστήματος που είναι τοποθετημένες στην εργοστασιακή μονάδα.[6] Αυτές οι συσκευές μπορεί να είναι αισθητήρες, ελεγκτές (controllers) ή υπολογιστικές μονάδες και όλες αυτές οι συσκευές μπορεί να περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά ασφάλειας του υλισμικού. Το επόμενο επίπεδο είναι οι συσκευές δικτύωσης. Αφού, λοιπόν, τα δεδομένα γίνονται προσβάσιμα (π.χ. μέσω καταχώρησης σε κάποια βάση δεδομένων) τότε μπορούν διάφορα λογισμικά ανάλυσης και βελτιστοποίησης να χρησιμοποιηθούν για να βελτιστοποιηθούν τα στοιχεία παραγωγής για ένα πολύ μεγάλο αριθμό διεργασιών, όπως π.χ. ο χρόνος λειτουργίας του συστήματος, η προγραμματισμένη συντήρηση, η ενεργειακή αποδοτικότητα και η πιο αποδοτική αξιοποίηση των πόρων της επιχείρησης. Η λειτουργία παραγωγής όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την σχεδίαση και την πιο αποδοτική κοστολόγηση της παραγωγικής διαδικασίας, αλλά να χρησιμοποιήσει τις πληροφορίες των πελατών και να αλλάξει την γραμμή παραγωγής και τις παραμέτρους της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο.

1.4 Βιομηχανικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (IWSN)

Τα βιομηχανικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ένας τομέας ο οποίος έχει τραβήξει την προσοχή πολλών ερευνητών, εδώ και κάποια χρόνια, όπως στο [7] όπου οι συγγραφείς εξετάζουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χαμηλή ισχύος που χρησιμοποιούν IPv6 (6LoWPAN), το πρωτόκολλο περιορισμένων εφαρμογών (CAP) και τα Δίκτυα με Απώλειες (RPL) για την εφαρμογή τους στα IWSN δίκτυα. Αυτό που πρέπει να γίνει πρώτα είναι σκιαγράφηση των απαιτήσεων που έχουν τα IWSN δίκτυα, τα πρότυπα που έχουν αναπτυχθεί για αυτά, οι προκλήσεις που παρουσιάζονται σε αυτά τα δίκτυα καθώς και της εφαρμογές που έχουν αναπτυχθεί.

1.4.1 Απαιτήσεις Συστήματος

Η χρήση αισθητήρων σε βιομηχανικά μηχανήματα, αντλίες και αγωγούς δεν είναι κάτι καινούριο στο χώρο της βιομηχανίας. Παρατηρείται μια αυξανούσα χρήση αισθητήρων και δικτύων σε βιομηχανικές μονάδες εδώ και καιρό, από διυλιστήρια πετρελαίου μέχρι γραμμές παραγωγής. Οι απαιτήσεις όμως που υπάρχουν στον βιομηχανικό τομέα σχετικά με την αξιοπιστία και την ασφάλεια αυτών των δικτύων δεν μπορούν να καλυφθούν από τις τεχνολογίες που υπάρχουν ήδη στα εμπορικά δίκτυα.[8] Μέσω αυτών των απαιτήσεων γίνεται ένας έλεγχος για το ποιες εμπορικές τεχνολογίες μπορούν να ανταποκριθούν στις βιομηχανικές IoT εφαρμογές. Συγκεκριμένα, ο τρόπος με τον οποίο αυτοί οι αισθητήρες συμμετέχουν σε ένα δίκτυο καθορίζει και το αν μπορούν να εφαρμοστούν με ασφάλεια και με αποδοτικό κόστος στις δύσκολες συνθήκες που υπάρχουν σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον.

Σε αντίθεση με τις εμπορικές εφαρμογές όπου το κόστος είναι το σημαντικότερο γνώρισμα, οι βιομηχανικές εφαρμογές έχουν την αξιοπιστία και την ασφάλεια. Κάτι που είναι λογικό αν σκεφτεί κανείς πως η κερδοφορία της εταιρίας, η ποιότητα των προϊόντων και η ασφάλεια των εργαζομένων συχνά εξαρτάται από αυτά τα δίκτυα.

Ένας τρόπος για να επιτευχθεί η αξιοπιστία σε ένα δίκτυο είναι ο πλεονασμός, όπου ένας μηχανισμός ανακατεύθυνσης σε πιθανή αστοχία επιτρέπει την επαναφορά του δικτύου χωρίς την απώλεια δεδομένων. Στα ΑΔΑ υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι επίτευξης πλεονασμού. Ο ένας έχει την έννοια του χωρικού πλεονασμού, όπου ο κάθε ασύρματος κόμβος συνδέεται με τουλάχιστον άλλους δύο κόμβους και ένα σχήμα δρομολόγησης το οποίο να δίνει την δυνατότητα τα δεδομένα να φτάσουν στον προορισμό τους. Ο δεύτερος τρόπος επίτευξης πλεονασμού είναι η χρήση των πολλαπλών καναλιών του φάσματος των ραδιοσυχνοτήτων (RF spectrum). Η αλλαγή καναλιού μεταξύ δύο κόμβων σε οποιαδήποτε μετάδοση δίνει την δυνατότητα στο να ξεπεράσουν το προσωρινό πρόβλημα με οποιοδήποτε κανάλι σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο βιομηχανικό περιβάλλον.

Η ασφάλεια είναι το δεύτερο σημαντικό γνώρισμα των IWSNs. Οι πρωταρχικοί στόχοι για την ασφάλεια είναι: i) Η εμπιστευτικότητα – πέραν του νόμιμου παραλήπτη, κανείς άλλος να μην έχει τη δυνατότητα πρόσβασης στα δεδομένα που θα μεταδίδονται, ii) Η ακεραιότητα – τα δεδομένα που θα λαμβάνονται να επιβεβαιώνεται ότι δεν έχουν υποστεί καμία αλλαγή σε σχέση με αυτά που εστάλησαν και iii) Η αυθεντικότητα – να μπορεί να πιστοποιείται η ταυτότητα του αποστολέα που δηλώνουν τα δεδομένα.

Ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό των βιομηχανικών δικτύων είναι πως θα πρέπει να έχουν την δυνατότητα ανεξαρτησίας. Για παράδειγμα, οι επικοινωνία των κόμβων να γίνεται ανεξάρτητα από την ύπαρξη του προσωπικού, θα πρέπει να έχουν αυτό-αναδιοργάνωση, να επισκευάζουν την οποιαδήποτε αδυναμία σύνδεσης για την αποφυγή της οποιαδήποτε διακοπής της ροής για την επισκευή, την δυνατότητα να κάνουν διάγνωση εάν συμβεί η οποιαδήποτε διακοπή και την όσο το δυνατόν λιγότερο συχνά επιτόπου συντήρηση για τη μείωση του κόστους αυτής. Πολλά δίκτυα οφείλουν την επιτυχία τους στο γεγονός ότι είναι ανεπτυγμένα σε περιβάλλον μη φιλικό προς τον άνθρωπο και για αυτό είναι δύσκολο για αυτόν να τα προσεγγίσει, δηλαδή μια μορφή ασφάλειας. Αυτό βέβαια σημαίνει πως η ζωή της μπαταρίας τους θα πρέπει να διαρκεί για τουλάχιστον 5 χρόνια.

Το ελάχιστο κόστος και η μείωση του χώρου που απαιτούν για την εγκατάσταση τους σίγουρα είναι δύο παράγοντες με ιδιαίτερο ρόλο. Τα IWSNs έχουν ως σκοπό την αύξηση της παραγωγικότητας, την μείωση του κόστους και την αύξηση του κέρδους της επιχείρησης. Τα κύρια κίνητρα που παρακινούν της βιομηχανικές επιχειρήσεις, στην μετάβαση στο IIoT και την χρήση των IWSNs, είναι οι χαμηλές σε κόστος απαιτήσεις για την εγκατάσταση και εφαρμογή που έχουν οι ασύρματες σε σχέση με τις ενσύρματες λύσεις. Το μικρότερο μέγεθος των ασύρματων κόμβων και συνεπώς οι μικρότερες απαιτήσεις σε χώρο και μεγαλύτερη ευκολία στην εγκατάσταση είναι κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα.

Σε μία βιομηχανική μονάδα είναι δεδομένο πως θα υπάρχουν διάφορα ασύρματα δίκτυα, μηχανήματα και τηλεπικοινωνιακά συστήματα που θα δημιουργούν παρεμβολές και θόρυβο. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με το ότι τα ADA δίκτυα λειτουργούν με σήματα χαμηλής ισχύος και είναι ευαίσθητα στο θόρυβο, δημιουργεί κάποιες ιδιαίτερες απαιτήσεις αλλά παρόλα αυτά προβλέπεται πως λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Ακόμη, τα προβλήματα συνύπαρξης με άλλες συσκευές που λειτουργούν στα 2.4 GHz και είναι αιτία πρόκλησης παρεμβολών προσθέτουν κάποιες επιπλέον ανησυχίες.

Φυσικά, η ενεργειακή κατανάλωση δεν θα μπορούσε να λείπει από τις απαιτήσεις στα IWSN δίκτυα. Οι συγκεκριμένες απαιτήσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν από δύο οπτικές γωνίες : από την χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και την αποδοτική ενεργειακή κατανάλωση. Η αποδοτική ενεργειακή κατανάλωση σχετίζεται με την ενεργειακή ισορροπία ανάμεσα στους κόμβους ολόκληρου του δικτύου. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η ύπαρξη των κατάλληλων πρωτοκόλλων με γνώμονα την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και δρομολόγησης για την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Από την άλλη, για να υπάρξει χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση πρέπει οι μπαταρίες και οι κόμβοι να είναι ενεργειακά αποδοτικοί για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής ενός δικτύου. Η χρήση σημάτων χαμηλής ισχύος συμβάλει προς αυτή την κατεύθυνση.

Επιπλέον, λόγω του ότι ένα τέτοιο δίκτυο θα πρέπει να λειτουργεί συνεχώς για πολλά χρόνια, όσο ανθεκτικό και να είναι, τα προβλήματα δεν θα λείψουν. Βασικός παράγοντας είναι η γρήγορη διάγνωση και οι έγκυρες ειδοποιήσεις για την αποφυγή διάφορων θεμάτων και την ποιότητα των υπηρεσιών του δικτύου. Ως εκ τούτου, η διαχείριση του δικτύου θα πρέπει να παρέχει : την ικανότητα μέτρησης της ποιότητας του δικτύου μέσω του σήματος RSSI (Received Signal Strength Indicator), σε όλο το εύρος του δικτύου επιτυχή ρυθμό μετάδοσης των πακέτων, δυνατότητα έγκυρης ειδοποίησης των κόμβων που δεν έχουν επαρκείς εναλλακτικές διαδρομές για να παραμείνει αξιόπιστο το δίκτυο και συνεχή ενημέρωση της κατάστασης του κάθε κόμβου και της ενεργειακής του επάρκειας.

Καθοριστικός παράγοντας στα δίκτυα IWSN είναι και ο βαθμός ανθεκτικότητάς τους ή η ανοχή σε σφάλματα που έχουν. Τα ασύρματα δίκτυα δεδομένου της περιορισμένης παροχής ενέργειας που έχουν, κάποια στιγμή οι κόμβοι παύουν να λειτουργούν μετά το πέρας συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Η αποτυχία σύνδεσης ενός ή περισσότερων κόμβων προϋποθέτει το γεγονός πως το υπόλοιπο δίκτυο θα συνεχίσει την λειτουργία κανονικά.

Μία παράμετρος που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής είναι το κατά πόσο μία σύνδεση είναι αξιόπιστη. Η αξιοπιστία των συνδέσεων σε ένα ασύρματο δίκτυο είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα, κάτι που σε συνδυασμό με το βιομηχανικό περιβάλλον μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη απώλεια πακέτων και καθυστέρηση στο χρόνο παράδοσης αυτών. Για αυτό το λόγο θα πρέπει να εφαρμοσθούν τεχνικές αναμετάδοσης στο επίπεδο ζεύξης ή στο επίπεδο μεταφοράς των δεδομένων, σε όποιες περιπτώσεις κρίνεται ότι χρειάζεται, ή η εφαρμογή πρωτοκόλλων δρομολόγησης που χρησιμοποιούν την επαναπροώθηση των πακέτων.

Ακόμη, τα πρότυπα που χρησιμοποιούν τα IWSN δίκτυα μπορούν να αξιοποιηθούν σε διάφορες εφαρμογές, αλλά τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στα πρότυπα προορίζονται για συγκριμένες εφαρμογές. Η κάθε βιομηχανική εφαρμογή έχει και διαφορετικές απαιτήσεις, ως εκ τούτου συγκεκριμένα πρωτόκολλα πληρούν τις απαιτήσεις συγκεκριμένων εφαρμογών.

Τέλος, με το ρυθμό ανάπτυξης του υλισμικού και του λογισμικού των ΑΔΑ δικτύων αυξάνεται η πιθανότητα χρήσης παραπάνω από μια εφαρμογής σε ένα δίκτυο. Κάτι που θα αλλάξει στην τοπολογία τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων κόμβων sink (π.χ. ο κεντρικός κόμβος ενός cluster όπου όλοι οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα) σε παραπάνω από ένα. Συνεπώς, είναι απαραίτητη προϋπόθεση ο σχεδιασμός τρόπων δρομολόγησης για αυτές τις τοπολογίες.

1.4.2 Τα Πρότυπα των Βιομηχανικών Ασύρματων Δικτύων

Μέχρι σήμερα έχουν επικυρωθεί αρκετά πρότυπα για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.[9] Εκτός από αυτά τα πρότυπα υπάρχουν και κάποιοι μη επικυρωμένοι, ιδιόκτητοι μηχανισμοί. Σε αυτό το κομμάτι της βιβλιογραφικής αναφοράς επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν και να αναλυθούν τα τρία κυριότερα επικυρωμένα πρότυπα που βρίσκονται ήδη σε εφαρμογή είτε από την βιομηχανία ή/και σε ερευνητικά έργα. Αυτά δεν είναι άλλα από τα εξής: ISA-100.11a, Zigbee και WirelessHART. Μία ενδιαφέρουσα έρευνα έχει γίνει στο [10] με την προσομοίωση και των τριών προτύπων με το πλαίσιο Pymote και το εργαλείο Castalia, καθώς ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι συγκρίσεις των WirelessHART με το ISA-100.11a [11], του WirelessHart με το Zigbee [12].

Πριν όμως γίνει η ανάλυση των τριών βιομηχανικών προτύπων, θα γίνει μία ανάλυση του προτύπου IEEE802.15.4 για τον λόγο του ότι χρησιμοποιείται και από τα τρία βιομηχανικά πρότυπα στο φυσικό επίπεδο.

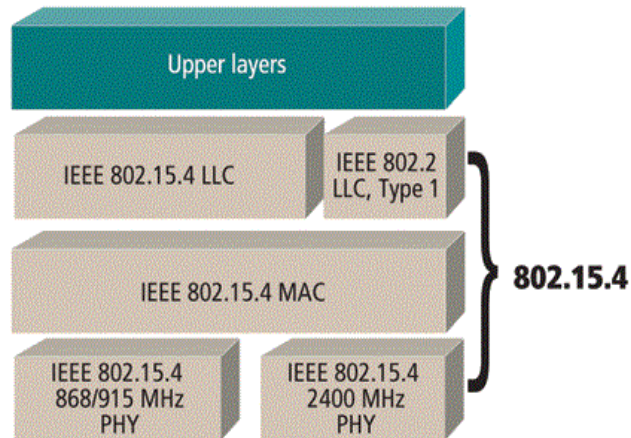
1 - IEEE802.15.4

Το πρότυπο IEEE802.15.4 αρχικά κυκλοφόρησε το 2003 και ανήκει στην οικογένεια των προτύπων της IEEE για το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο ζεύξης για τα ασύρματα δίκτυα.[13] Η αρχική έκδοση υποστήριζε δύο φυσικά επίπεδα, το ένα λειτουργούσε στις συχνότητες 868 και 915 MHz και το δεύτερο στα 2.4 GHz. Το 2006 που κυκλοφόρησε μία ανανέωσή του, στην οποία βελτιώθηκαν οι ταχύτητες μεταφοράς, προστέθηκαν επιπλέον συχνότητες. Ο κύριος στόχος είναι η παροχή χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (0.01 – 250 Kbits/s) με απλή ή καθόλου ποιότητα υπηρεσιών, μικρής πολυπλοκότητας και αυστηρές απαιτήσεις στην κατανάλωση ενέργειας. Το πρωτόκολλο αυτό επιλέγεται να χρησιμοποιείται στην υποστήριξη άλλων πρωτοκόλλων όπως το Zigbee και το WirelessHART λόγω της ικανότητας του να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των ΑΔΑ.

Δύο ειδών συσκευές υπάρχουν που μπορούν να συμμετέχουν στον σχηματισμό ενός δικτύου IEEE802.15.4: η μία είναι η συσκευή πλήρους λειτουργίας (Full-function device - FFD) και η άλλη είναι η συσκευή περιορισμένης λειτουργίας (Reduced-function device - RFD). Μία FFD μπορεί να λειτουργήσει και ως συντονιστής δικτύου PAN (Personal Area Network coordinator). Μία RFD δεν μπορεί να λειτουργήσει ως PAN coordinator, συγκεκριμένα οι RFD συσκευές προορίζονται για τη χρήση απλών εφαρμογών και να συνεργαστούν όταν χρειαστεί με μία FFD συσκευή. Συνεπώς, οι RFD συσκευές εφαρμόζονται χρησιμοποιώντας το λιγότερο δυνατόν πόρους και χωρητικότητα μνήμης.

Η στοίβα του πρωτοκόλλου IEEE802.15.4 όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα από το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο ζεύξης δεδομένων που χωρίζεται σε δύο υποεπίπεδα, το υποεπίπεδο MAC και το υποεπίπεδο Ελέγχου Λογικής Σύνδεσης (LLC)

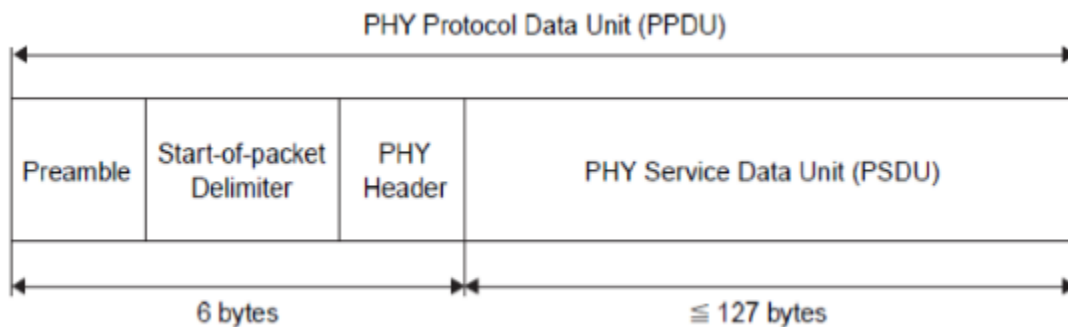
802.15.4 architecture



Εικόνα 8: Η στοίβα του 802.15.4

Φυσικό Επίπεδο

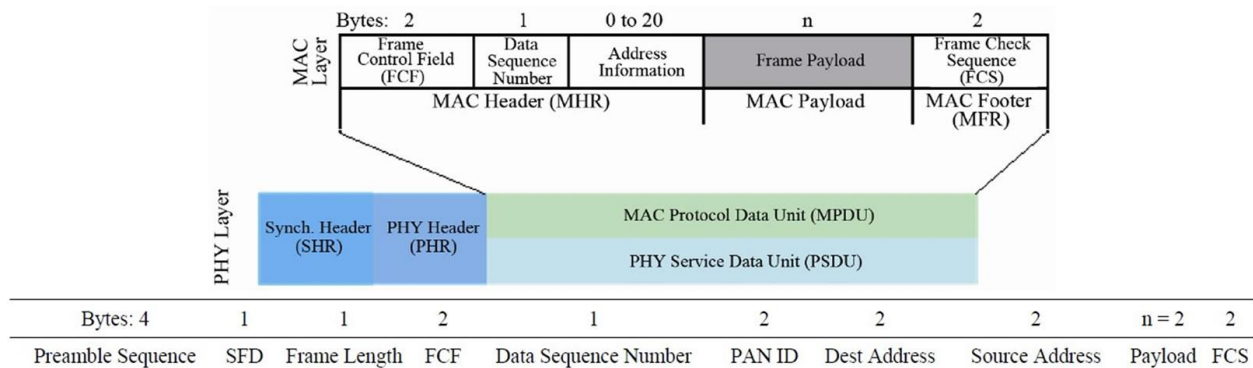
Το φυσικό επίπεδο είναι υπεύθυνο να παρέχει τις ακόλουθες λειτουργίες χαμηλού επιπέδου: μεταφορά και αποδοχή δεδομένων, ανίχνευση ενέργειας του παρόντος καναλιού, ένδειξη της ποιότητας της σύνδεσης (LQI) και σαφή εκτίμηση του καναλιού. Η ένδειξη της ποιότητας του καναλιού υποδεικνύει την ισχύ του καναλιού. Η ανίχνευση ενέργειας του καναλιού χρησιμοποιείται για την επιλογή του καναλιού. Η σαφή εκτίμηση του καναλιού γίνεται με τρεις τρόπους: ανίχνευση της ενέργειας, ανίχνευση του φέροντος σήματος ή με τον συνδυασμό αυτών των δύο. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τη δομή του πακέτου στο φυσικό επίπεδο. Το πακέτο περιέχει μία κεφαλίδα συγχρονισμού που είναι κομμάτι της εισαγωγής (preamble) και ένα διαχωριστικό που υποδηλώνει την αρχή ενός αφικνούμενου πακέτου. Επίσης περιέχει μία κεφαλίδα που δηλώνει το μήκος του φορτίου και ακολουθεί το φορτίο.



Εικόνα 9: Η δομή ενός πακέτου στο φυσικό επίπεδο

Το υποεπίπεδο MAC

Το υποεπίπεδο MAC έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά: σύνδεση και αποσύνδεση, επιβεβαιωμένη παράδοση του πλαισίου, μηχανισμό πρόσβασης καναλιού, επικύρωση πλαισίου, εγγυημένη διαχείριση των χρονοθυρίδων και διαχείριση των φάρων (beacon). Επιπλέον το υποεπίπεδο MAC παρέχει το χώρο για την υλοποίηση των απαραίτητων για την εφαρμογή μηχανισμών ασφαλείας.[14] Στην παρακάτω εικόνα του πλαισίου του επιπέδου MAC παρατηρούμε τα εξής: Το πρώτο πεδίο το οποίο είναι ο έλεγχος του πλαισίου ουσιαστικά ενημερώνει για τον τύπο του πλαισίου που μεταδίδεται, κανονίζει τη μορφή και διαχειρίζεται τις επιβεβαιώσεις. Το πεδίο του αριθμού ακολουθίας των δεδομένων χρησιμοποιείται για το ταίριασμα των πλαισίων επιβεβαίωσης. Το πεδίο της διεύθυνσης ποικίλει από 0-20 bytes και μπορεί να μία μικρή 8-bit τύπου διεύθυνση ή μία 64-bit διεύθυνση IEEE συσκευής. Το φορτίο έχει μεταβλητό μέγεθος αλλά πρέπει να είναι μικρότερο από 127 bytes αναλογιζόμενοι και το φορτίο του φυσικού επιπέδου. Και, τέλος, το πεδίο της ακολουθίας ελέγχου πλαισίου χρησιμοποιείται για την επικύρωση της ακεραιότητας του πλαισίου.

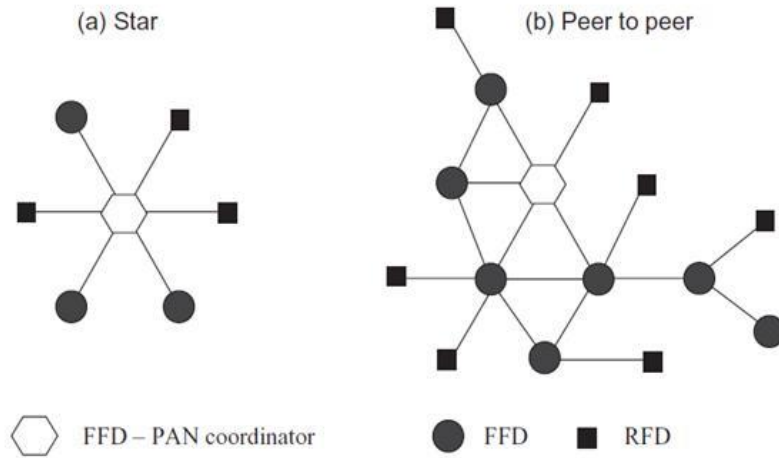


Εικόνα 10: Η δομή ενός πακέτου στο επίπεδο MAC

Τοπολογίες

Σύμφωνα και με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, ένα δίκτυο λειτουργεί σε δύο ειδών τοπολογίες: την τοπολογία αστέρα και την τοπολογία πλέγματος (mesh) ή peer-to-peer. Τον οποίων ο σχηματισμός φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Στην τοπολογία αστέρα, η επικοινωνία εγκαθιδρύεται μεταξύ δύο συσκευών και ενός κεντρικού ελεγκτή, ο οποίος ονομάζεται συντονιστής PAN (Personal Area Network coordinator). Ο συντονιστής έχει μία συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως η κάθε συσκευή, που όμως παρά την έναρξη ή να τον τερματισμό μίας επικοινωνίας, μπορεί επιπλέον να την δρομολογήσει στο δίκτυο. Ο συντονιστής του δικτύου PAN συχνά είναι τροφοδοτούμενος ενεργειακά από το δίκτυο ενέργειας, ενώ οι συσκευές τροφοδοτούνται ενεργειακά με μπαταρία. Οι εφαρμογές που επωφελούνται από μία τέτοια τοπολογία είναι κυρίως ο οικιακός αυτοματισμός, τα περιφερειακά συστήματα ενός δικτύου υπολογιστών και οι εφαρμογές που έχουν να κάνουν την φροντίδα της προσωπικής υγείας.

Από την άλλη, ένα δίκτυο peer-to-peer διαφέρει αρκετά με ένα δίκτυο αστέρα διότι όλες οι συσκευές μπορούν να επικοινωνήσουν με οποιαδήποτε άλλη αρκεί να βρίσκεται η μία μέσα στο εύρος της άλλης. Είναι πιο δύσκολη η υλοποίηση ενός σχηματισμού τέτοιων δικτύων. Εφαρμογές που μπορούν να επωφεληθούν είναι ο βιομηχανικός έλεγχος και ο βιομηχανικός αυτοματισμός, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ευφυείς καλλιέργειες και η ασφάλεια.

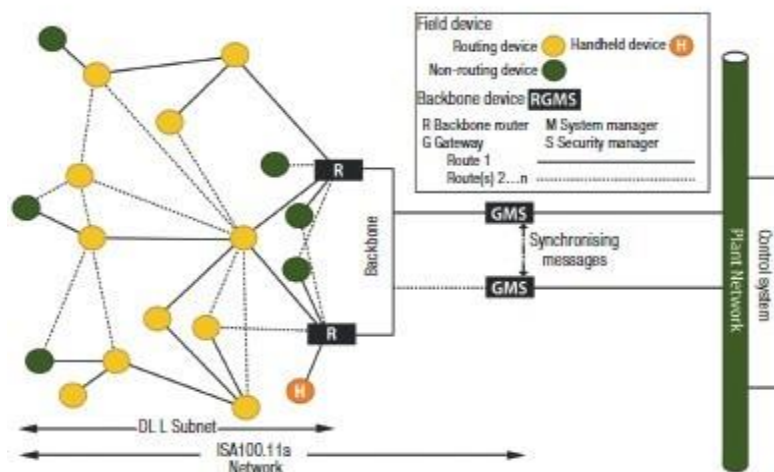


Εικόνα 11: Οι τοπολογίες αστέρα και πλέγματος

2 - ISA-100.11a

Η επιτροπή ISA100 είναι μέρος του οργανισμού Automation, Systems and Automation Society (ISA). Ένα από τα πρώτα έργα της επιτροπής ήταν η δημιουργία του ISA100.11a, ενός ανοιχτού προτύπου ασύρματης δικτύωσης για την εφαρμογή των ασύρματων δικτύων στις εργοστασιακές μονάδες.[15] Το ISA100 επιτυγχάνει την εφαρμογή αυτή ανταποκρίνοντας στην ακεραιότητα των δεδομένων και τις απαιτήσεις και ακολουθώντας μια στρατηγική συνολικής συνύπαρξης σε ένα περιβάλλον με άλλα δίκτυα που χρησιμοποιούν διαφορετικά πρότυπα. Το ISA100.11a είναι το πρώτο πρότυπο της οικογένειας ISA100 και τα κριτήρια που καλύπτει ο σχεδιασμός του είναι τα εξής: ελαστικότητα, υποστήριξη πολλαπλών πρωτοκόλλων, αξιοπιστία, χρήση ανοιχτών προτύπων, υποστήριξη πολλαπλών εφαρμογών και ασφάλεια.

Το ISA100.11a καθορίζει την λειτουργία της στοίβας πρωτοκόλλου, της διαχείρισης του συστήματος και της ασφάλειας για χρήση σε ασύρματα δίκτυα χαμηλής ισχύος. Τα επίπεδα δικτύου και μεταφοράς βασίζονται στα πρότυπα 6LoWPAN, IPv6 και UDP. Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων είναι μοναδικό και χρησιμοποιεί μία μη συμβατική μορφή του IEEE802.15.4 MAC και επίσης χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά εναλλαγής συχνότητας, γράφους δρομολόγησης και χρονοθυρίδες πολλαπλής πρόσβασης. Η μεταφορά των πακέτων γίνεται στο επίπεδο ζεύξης.



Εικόνα 12: Η δομή ενός δικτύου ISA100.11a

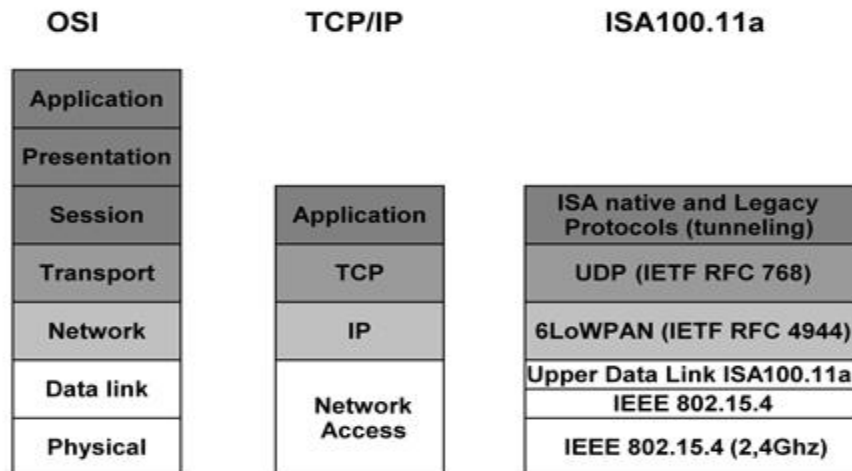
Όλοι οι κόμβοι που συνδέονται είτε με τοπολογία αστέρα ή πλέγματος ονομάζονται DL subnet (data link subnet – υποδίκτυο επιπέδου ζεύξης).[16] Όλα τα πακέτα προωθούνται μεταξύ των συσκευών στο επίπεδο ζεύξης. Μέχρι το πακέτο να φτάσει στον προορισμό του, μέσα στο DL subnet ή στο δρομολογητή του backbone, δεν ελέγχεται από το LoWPAN και τα επίπεδα δικτύου.

Δηλαδή τα πακέτα μετακινούνται στο DL subnet χωρίς να γίνονται αντιληπτά από τα παραπάνω επίπεδα.

Ένα ISA100.11a δίκτυο παρέχει:

- Τοπολογίες αστέρα, πλέγμα και συνδυασμό αυτών των δύο.
- Η σύνδεση με το βιομηχανικό δίκτυο γίνεται μέσω μιας πύλης.
- Την διαλειτουργικότητα των συσκευών.
- Την αξιοπιστία, την ιδιωτικότητα, την αυθεντικότητα, την προστασία καθυστέρησης και επανάληψης των δεδομένων.
- Την συνύπαρξη με άλλα ασύρματα δίκτυα.
- Ανθεκτικότητα σε περίπτωση ύπαρξης παρεμβολών.

Παρακάτω εξηγείται η λειτουργία των επιπέδων του ISA100.11a.



Εικόνα 13: Η στοίβα του ISA100.11a

Όπως παρατηρείται και στην παραπάνω εικόνα το πρότυπο ISA100.11a χρησιμοποιεί τα εξής πέντε επίπεδα: φυσικό επίπεδο, επίπεδο ζεύξης, επίπεδο δικτύου, επίπεδο μεταφοράς και το επίπεδο εφαρμογής. Επιπλέον χρησιμοποιείται ένας κεντρικός διαχειριστής συστήματος για την συνολική ενορχήστρωση της δρομολόγησης του δικτύου.

Φυσικό Επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο βασίζεται στο φυσικό επίπεδο του προτύπου 802.15.4 της IEEE στα 2.4 GHz.

Επίπεδο Ζεύξης Δεδομένων

Το επίπεδο ζεύξης παρέχει υποστήριξη στη δημιουργία, συντήρηση και προώθηση των πακέτων. Δημιουργεί την δομή και το πλαίσιο των πακέτων δεδομένων, κάνει ανίχνευση σφαλμάτων και τη διαχείριση του συστήματος bus. Επιπλέον περιλαμβάνει τη λειτουργία του MAC επιπέδου. Στην

περίπτωση του ISA100.11a το επίπεδο ζεύξης έχει επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει τις ακόλουθες λειτουργίες.

- Διευθυνσιοδότηση τοπικού συνδέσμου
- Προώθηση πακέτων
- Διαχείριση του φυσικού επιπέδου
- Προσαρμοστική εναλλαγή καναλιών
- Διευθυνσιοδότηση μηνυμάτων, έλεγχο συγχρονισμού και ακεραιότητας
- Ανίχνευση και επανάκτηση των χαμένων μηνυμάτων
- Συγχρονισμός ρολογιού

Τα μηνύματα μεταφέρονται με τη χρήση χρονοθυρίδων, τυπικά στα 10 ms αλλά μπορεί να διαμορφωθεί καταλλήλως. Ο συγχρονισμός προσφέρει ακριβή χρονοσήμανση και η εναλλαγή καναλιών αυξάνει την αξιοπιστία. Επιπλέον ο συγχρονισμός και η εναλλαγή των καναλιών βελτιώνει την συνύπαρξη του ISA100.11a με άλλα ραδιοσυχνοτηκά δίκτυα, μειώνοντας την συνεχή χρήση ενός καναλιού.

Το επίπεδο ζεύξης δημιουργεί και χρησιμοποιεί γράφους δρομολόγησης. Αυτοί οι γράφοι παρέχουν ένα αριθμό διαφορετικών μονοπατιών για τους διαφορετικούς τύπους κίνησης δικτύου μέσα στο DL subnet. Πολλαπλοί γράφοι χρησιμοποιούνται από διάφορες συσκευές για να μεταδώσουν διαφορετικούς τύπους δεδομένων.

Ο διαχειριστής συστήματος (System Manager) χρησιμοποιεί τους διαφορετικούς τύπους κίνησης μαζί με τις απαιτήσεις της ποσότητας των δεδομένων και τις απαιτήσεις για συχνότητα και χρονοκαθυστέρηση για να υπολογίσει τους γράφους για τις διάφορες κινήσεις δεδομένων. Επιπλέον λαμβάνει υπόψη την απόδοση των καναλιών μεταξύ δύο κόμβων, καθώς και τους ενεργειακούς περιορισμούς του κάθε κόμβου. Στο τέλος των υπολογισμών υπογράφονται συμβόλαια με τους γράφους για τα ID των κόμβων. Αυτά τα συμβόλαια μεταφέρονται σε κάθε κόμβο μέσω της κεφαλίδας του επιπέδου ζεύξης, και ελέγχονται από τους κόμβους για να καθορίσουν το επόμενο κόμβο (next hop) που θα προωθήσουν ένα πακέτο.

Επίπεδο Δικτύου

Το επίπεδο δικτύου χρησιμοποιεί το 6LoWPAN πρότυπο. Χρησιμοποιείται IPv6 διεθυνσιοδότηση για την απ' άκρη εις άκρη δρομολόγηση. Σε ένα δίκτυο ISA100.11a είναι πιθανό για ένα ζευγάρι διακομιστή – πελάτη να παραχθούν πακέτα IPv6 που προωθούνται μέσω 6LoWPAN δρομολογητές σε 6LoWPAN συσκευές. Ο δρομολογητής πραγματοποιεί την προσαρμογή από τη μορφή IPv6 σε 6LoWPAN για να γίνουν κατανοητά από τις συσκευές του ISA100.11a. Τα IPv6 πακέτα μεταδίδονται σε κομμάτια και η επανα-συναρμολόγηση γίνεται στο επίπεδο προσαρμογής του 6LoWPAN.

Επίπεδο Μεταφοράς

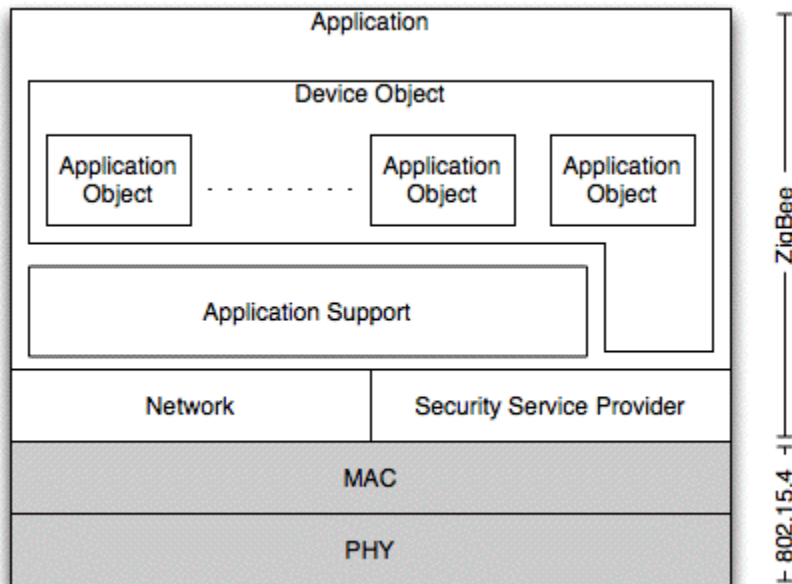
Το επίπεδο μεταφοράς παρέχει μία ασυνδεδεσμένη υπηρεσία βασισμένη στο UDP με ενισχυμένη ακεραιότητα των μηνυμάτων και απ' άκρη εις άκρη ασφάλεια.

Επίπεδο Εφαρμογής

Μέχρι πρότεινος δεν έχει καθοριστεί καμία διαδικασία ελέγχου στο επίπεδο μεταφοράς για το ISA100.11a. Έχουν καθοριστεί μόνο ένα σύνολο υπηρεσιών για της εφαρμογές χρήστη και όχι μία εφαρμογή αυτοματοποίησης διαδικασίας. Μόνο ο Διαχειριστής Συστήματος έχει καθοριστεί.

3 - Zigbee

Το πρότυπο Zigbee κυκλοφόρησε το 2004 και αργότερα το 2006 και το 2007 αναβαθμίστηκε. Είναι πρότυπο για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων χαμηλού ρυθμού, χαμηλής ισχύος και αναπτύχθηκε από τον οργανισμό Zigbee Alliance. Καθορίζει τα επίπεδα δικτύου και εφαρμογής ενώ χρησιμοποιεί το πρότυπο 802.15.4 της IEEE για το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο MAC. Εφόσον χρησιμοποιεί το IEEE802.15.4 έχουν τις ίδιες τεχνικές διαμόρφωσης και διαμόρφωσης του εύρους ζώνης και των καναλιών. Το Zigbee αρχικά η χρήση του αναφερόταν σε εμπορικές εφαρμογές, αργότερα όμως έδειξε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε βιομηχανικές εφαρμογές. [17] Η χρήση όμως ενός μόνο καναλιού το έκανε ιδιαίτερα ευάλωτο σε παρεμβολές από άλλα δίκτυα αλλά και στο θόρυβο από άλλες πηγές στο ίδιο περιβάλλον, έτσι κρίθηκε ότι δεν είναι ανθεκτικό για το περιβάλλον μιας βιομηχανικής μονάδας. Αυτό το γεγονός έφερε το Zigbee PRO το 2007, το οποίο προορίζεται ειδικά για βιομηχανική χρήση έχοντας χαρακτηριστικά αυξημένης ασφάλειας και αποφυγής των παρεμβολών, έχοντας τη δυνατότητα να αλλάγής του καναλιού σε όλο το δίκτυο όταν αντιμετωπίζει μεγάλη ποσοστά θορύβου ή/και παρεμβολών.



Εικόνα 14: Η δομή του Zigbee

Το Zigbee PRO έχει βελτιώσει πολλά χαρακτηριστικά και τα κυριότερα εξ αυτών είναι:

Στοχαστική Διευθυνσιοδότηση

Χρησιμοποιεί Στοχαστική διευθυνσιοδότηση για να την ανάθεση νέων διευθύνσεων χρησιμοποιώντας ανάλυση πιθανοτήτων για την απλοποίηση τους σχηματισμού του δικτύου. Σε δίκτυα τοπολογίας cluster-tree μπορεί να προκαλέσει ανατάραξη του πίνακα διευθύνσεων όταν ένας νέος κόμβος εισάγεται στο δίκτυο, κάτι που μπορεί να είναι προβληματικό σε μεγάλα δίκτυα.

Επιπλέον οι κόμβοι, με αυτό τον τρόπο, δεν χρειάζονται νέα διεύθυνση όταν εισάγονται σε ένα δίκτυο. Στην σπάνια περίπτωση της σύγκρουσης η στοίβα παρέχει μία λύση χρησιμοποιώντας την μοναδική διεύθυνση της IEEE που έχει σε κάθε συσκευή. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ότι ολόκληρος ο χώρος των 16 bit είναι διαθέσιμος σε όλους τους κόμβους σε οποιοδήποτε σημείο στο δίκτυο.

Συνυπολογισμός Διαδρομής

Τα δίκτυα Zigbee PRO μπορούν να συνυπολογίσουν διαδρομές μέσω της χρήσης της δρομολόγησης «πολλών σε ένα». Επιτρέποντας σε κάθε συσκευή να χρησιμοποιήσει το ίδιο μονοπάτι δρομολόγησης μειώνοντας την εκπομπή (broadcasting) και την κίνηση στο δίκτυο, έτσι βελτιώνεται η αποδοτικότητα και σταθερότητα του πίνακα δρομολόγησης.

Ευκινησία στη χρήση Συχνότητας

Η λειτουργία του προτύπου στα 2.4 GHz έχει την επιπλέον βοήθεια της χρήσης των 16 καναλιών. Η ευκινησία του Zigbee PRO καθιστά πιο εύκολη την χρήση των επιπλέον καναλιών. Όταν ένα δίκτυο σχηματίζεται γίνεται αναζήτηση για το κανάλι που έχει τη λιγότερη κίνηση και θόρυβο. Εάν κάτι αλλάξει στην πορεία η εφαρμογή εξυπηρετητή μπορεί να διεξάγει εκ νέου αναζήτηση για ένα κανάλι με λιγότερο θόρυβο και παρεμβολές και έχει τη δυνατότητα να αλλάξει το κανάλι σε όλο το δίκτυο.

Λειτουργία Υψηλής Ασφάλειας

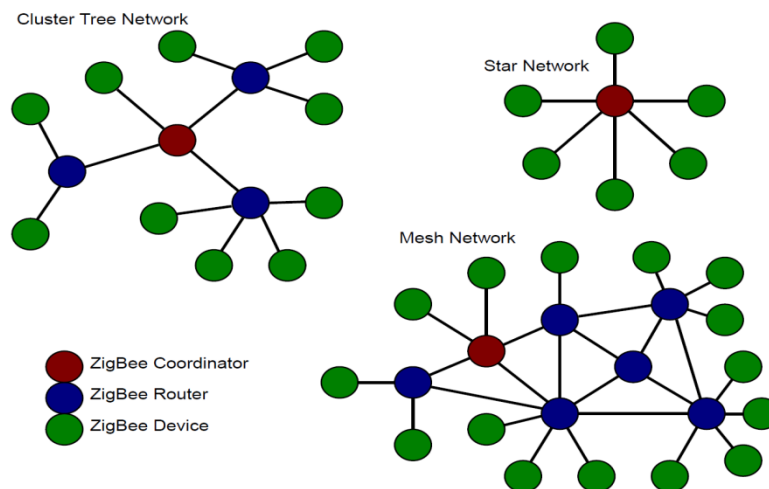
Σε ένα δίκτυο είναι απαραίτητο ένα κλειδί ευρείας ασφαλείας και προσθέτει επιπλέον ασφάλεια για τη διαχείρισή του και την κατανομή του. Η διαχείριση της ενέργειας είναι επίσης βελτιωμένη, με αποτέλεσμα να μπορούν οι κόμβοι να έχουν περισσότερο χρόνο εκτός λειτουργίας, για την εξοικονόμηση ενέργειας. Στην περίπτωση, λοιπόν, που ένας κόμβος βρίσκεται εκτός λειτουργίας ενώ αλλάξει το κλειδί ασφαλείας, τότε όταν θα ξυπνήσει ο κόμβος και προσπαθήσει να

επικοινωνήσει με το παλιό κλειδί, το Zigbee PRO έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιήσει μία ειδική σύνδεση για να κρυπτογραφήσει το μήνυμα και να το επικυρώσει με το κέντρο ασφαλείας και να λάβει ο κόμβος το νέο κλειδί.

Κατακερματισμός

Το πρότυπο Zigbee έχει καθορίσει ως μέγιστο μέγεθος πακέτου τα 128 bytes. Σε περίπτωση που το δίκτυο χρειαστεί να στείλει ένα μεγαλύτερο μήνυμα, το Zigbee PRO έχει την δυνατότητα του κατακερματισμού αυτού και της επανασυναρμολόγησής του στον παρλήπτη.

Το πρότυπο Zigbee μπορεί να πραγματοποιήσει μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις και να περάσει δεδομένα μέσω ενδιάμεσων κόμβων για να φτάσει πιο απομακρυσμένους κόμβους. Μπορεί χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία δικτύων με διάφορες τοπολογίες αλλά τρεις είναι οι κύριες τοπολογίες στις οποίες αναπτύσσεται: αστέρα, πλέγμα και σε δέντρα με συμπλέγματα κόμβων (cluster trees).



Εικόνα 15: Οι κύριες τοπολογίες εφαρμογής του Zigbee

Η τοπολογία αστέρα παρέχει μεγάλη διάρκεια ζωής στη μπαταρία των κόμβων. Η τοπολογία πλέγματος παρέχει μεγαλύτερη αξιοπιστία και επεκτασιμότητα μέσω των πολλών διαθέσιμων διαδρομών στο δίκτυο. Η τοπολογία cluster-tree είναι ένας συνδυασμός των άλλων δύο τοπολογιών και παρέχει και των δύο τα πλεονεκτήματα.

Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα δίκτυα είναι τριών τύπων:

1 – Συντονιστής (Zigbee Coordinator - ZC) : Είναι η πιο ισχυρή συσκευή στο δίκτυο καθώς διαμορφώνει την δρομολόγηση, αποθηκεύει πληροφορίες για το δίκτυο, ακόμη και των κλειδιών ασφαλείας.

2 – Δρομολογητής (Zigbee Router - ZR) : Παράλληλα με την εκτέλεση μιας λειτουργίας εφαρμογής, μπορεί να δράσει και ως ένας ενδιάμεσος δρομολογητής μεταφέροντας δεδομένα από άλλες συσκευές.

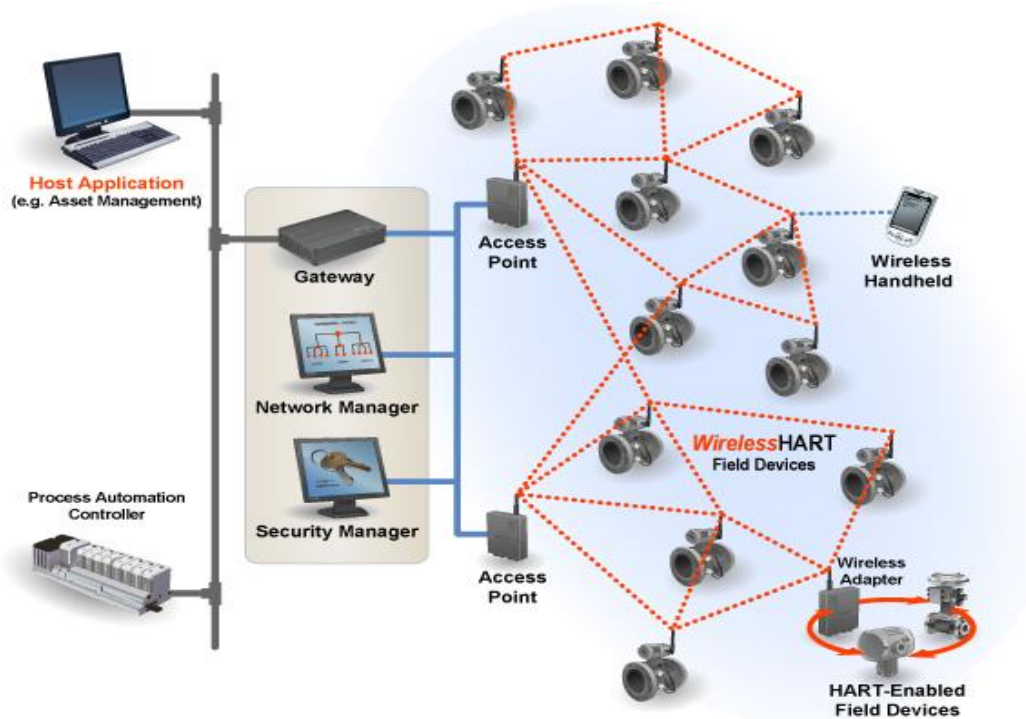
3 – Τερματική Συσκευή (Zigbee End Device - ZED) : Παρέχει την απαιτούμενη λειτουργικότητα για να συνομιλήσει με τον πατρικό κόμβο ενώ δεν μπορεί να αναμεταδώσει δεδομένα από άλλες συσκευές και απαιτεί κάποια ποσότητα μνήμης.

Το πρότυπο Zigbee αποτελείται από διάφορες μορφές δικτυακής κίνησης με την κάθε μία να έχει τα δικά της χαρακτηριστικά. Παρακάτω αναλύονται τα χαρακτηριστικά αυτών:

- Περιοδικά δεδομένα : Τα δεδομένα διαχειρίζονται μέσω ενός συστήματος δείκτη (beaconing system) όπου ο αισθητήρας ξυπνά σε συγκεκριμένο χρόνο και να ελέγχει το beacon, ανταλλάζει δεδομένα, και ξανά πέφτει σε κατάσταση ύπνου.
- Διακοπτόμενα δεδομένα : Τα δεδομένα μπορούν να διαχειριστούν μόνο μέσω ενός συστήματος δείκτη ή εκτός σύνδεσης. Στην κατάσταση εκτός σύνδεσης, η συσκευή συνδέεται στο δίκτυο μόνο όταν απαιτείται η επικοινωνία, εξοικονομώντας σημαντική ποσότητα ενέργειας.
- Επαναλαμβανόμενα δεδομένα μικρής χρονοκαθυστερήσης : Χρησιμοποιεί κατανομή χρονοθυρίδων. Αυτές οι εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ικανότητα εγγυημένης χρονοθυρίδας (Guaranteed Time Slot - GTS). Το GTS είναι μια μέθοδος ποιότητας υπηρεσιών (QoS) που επιτρέπει σε κάθε συσκευή σε ένα συγκεκριμένο διάστημα που ορίζεται από τον συντονιστή PAN (Personal Area Network) στο υπερπλαίσιο να κάνει ότι απαιτείται χωρίς σύγκρουση και χρονοκαθυστερήση.

4 - WirelessHART

Το πρότυπο WirelessHART ,[18],[19] είναι μια προέκταση του HARTκαι προσθέτει την δυνατότητα των ασύρματων δικτύων στον πρόγονό του. Είναι ένα πρωτόκολλο τεχνολογίας δικτύων πλέγματος και λειτουργεί στα 2.4 GHz ISM μπάντα ραδιοσυχνοτήτων.[20] Χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE802.15.4, [21], και εναλλαγή καναλιών. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο σχεδιάστηκε για τον βιομηχανικό αυτοματισμό. Αναπτύχθηκε με τα εξής χαρακτηριστικά: τις ασφαλείς, αξιόπιστες και απλές επικοινωνίες των κόμβων και της εναλλαγής καναλιών με τη χρήση του TDMA. Τα τέσσερα βασικά στοιχεία ενός δικτύου [22] είναι: ο Διαχειριστής Δικτύου (Network Manager), ο Διαχειριστής Ασφαλείας (Security Manager), η Πύλη/Σημείο Πρόσβασης (Gateway/Access Point) και οι συσκευές του δικτύου (Field Devices).

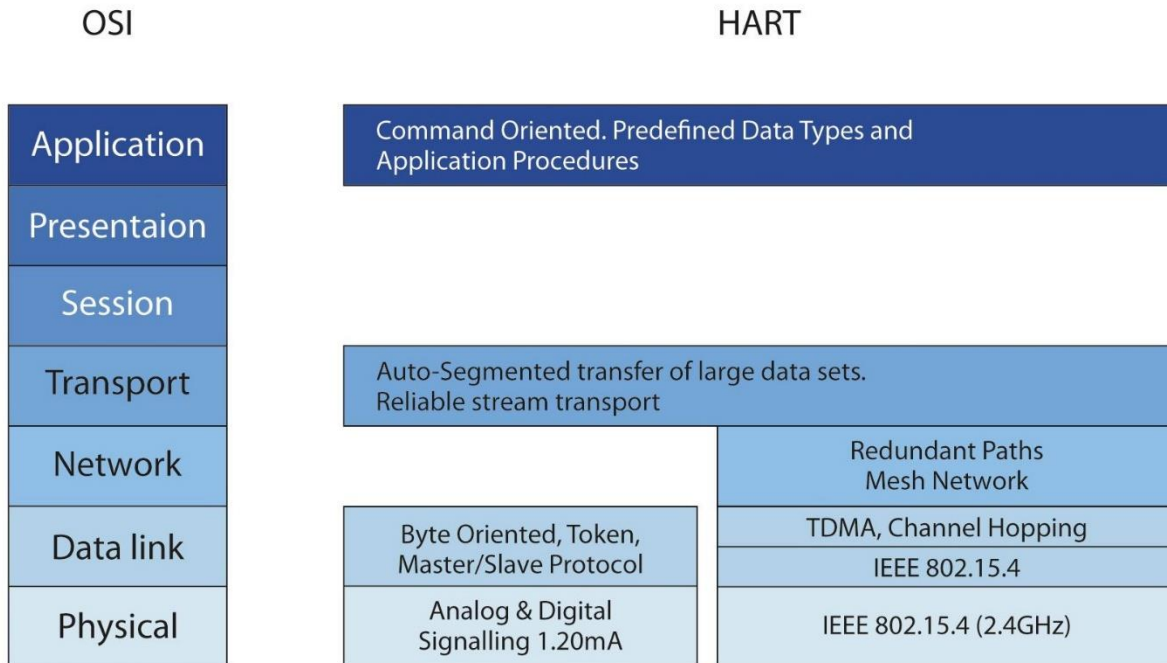


Εικόνα 16: Η δομή ενός δικτύου WirelessHART

Ο Διαχειριστής Δικτύου υλοποιεί και συντηρεί το δίκτυο πλέγματος. Προσδιορίζει τα καλύτερα μονοπάτια και διαχειρίζεται την κατανομή των χρονοθυρίδων. Ο Διαχειριστής Ασφάλειας κατανέμει τα κλειδιά κρυπτογράφησης και διατηρεί μία λίστα με τις συσκευές που είναι εξουσιοδοτημένες να συμμετέχουν στο δίκτυο. Η Πύλη παρέχει την σύνδεση στο δίκτυο εξυπηρετητή και τους Διαχειριστές Δικτύου και Ασφάλειας [23].

Όλες οι μεταδόσεις εκτελούνται βάση προσχεδιασμένων χρονοθυρίδων των 10ms. Όλες οι μεταδόσεις περνάνε από την πύλη.[24] Έπειτα η πύλη πρέπει να δρομολογήσει τα πακέτα στον προορισμό τους. Επιπλέον όλες οι συσκευές στο WirelessHART έχουν ικανότητες δρομολόγησης και αντιμετωπίζονται ισότιμα στις όσον αφορά την δρομολόγηση, την εγκατάσταση, τον σχηματισμό και την επέκταση.

Παρακάτω γίνεται η ανάλυση των επιπέδων της στοίβας του πρωτοκόλλου WirelessHART αλλά όπως φαίνεται και από την εικόνα αυτά είναι τα εξής πέντε: το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο ζεύξης δικτύου, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο μεταφοράς και το επίπεδο εφαρμογής.



Εικόνα 17: Η στοίβα του HART (ενσύρματου και ασύρματου)

Φυσικό Επίπεδο

Το φυσικό επίπεδο του WirelessHART στηρίζεται κυρίως στο φυσικό επίπεδο εκτεταμένου φάσματος άμεσης ακολουθίας (Direct-sequence spread spectrum - DSSS) του προτύπου της IEEE 802.15.4 στα 2.4 GHz. Το επίπεδο καθορίζει κυρίως τα χαρακτηριστικά της ραδιοσυχνότητας, όπως τη μέθοδο σηματοδότησης, την ισχύ του σήματος και την ευαισθησία της συσκευής. Το πρότυπο WirelessHART λειτουργεί στη μπάνα μεταξύ 2400-2483.5 με ρυθμό μεταφοράς δεδομένων 250 kbits/s.

Επίπεδο Ζεύξης Δικτύου

Το αμέσως επόμενο επίπεδο είναι το επίπεδο ζεύξης, το οποίο εφαρμόζει πλήρως το πρότυπο IEEE802.15.4 MAC. Το WirelessHART επεκτείνει την λειτουργικότητα του MAC θέτοντας χρονοθυρίδες των 10ms. Συγχρονισμένη εναλλαγή καναλιού και πολυπλεξία χρόνου για την αποφυγή συγκρούσεων. Η διαχείριση των χρονοθυρίδων γίνεται μέσω ενός πλαισίου που ενσωματώνει μια σειρά από χρονοθυρίδες. Το πλαίσιο αυτό είναι περιοδικό με περίοδο το μήκος των χρονοθυρίδων. Για το σωστό συντονισμό της χρήσης των καναλιών, το WirelessHART καταχωρεί τα κανάλια με συνεχή παρουσία παρεμβολών ή θορύβου σε μια λίστα. Ο διαχειριστής

του δικτύου μπορεί να απενεργοποιήσει αυτά τα κανάλια και έτσι η λίστα που διατηρεί η κάθε συσκευή μπορεί να περιέχει λιγότερα από 16 κανάλια.

Επίπεδο Δικτύου

Το επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο για αρκετά πράγματα, με πιο σημαντικό αυτό της δρομολόγησης και της ασφάλειας των δεδομένων. Ενώ το επίπεδο ζεύξης δικτύου μετακινεί τα πακέτα μεταξύ των συσκευών, το επίπεδο δικτύου δρομολογεί τα πακέτα από άκρη σε άκρη του δικτύου. Επιπλέον, το επίπεδο δικτύου περιλαμβάνει και χαρακτηριστικά όπως πίνακες δρομολόγησης και χρονοδιαγράμματα. Οι πίνακες δρομολόγησης χρησιμοποιούνται στην δρομολόγηση των επικοινωνιών με τη χρήση των γράφων. Τα χρονοδιαγράμματα χρησιμοποιούνται για την κατανομή του εύρους ζώνης και τον καθορισμό υπηρεσιών όπως της παραγωγής δεδομένων και της μεταφοράς πακέτων δεδομένων.

Επίπεδο Μεταφοράς

Το επίπεδο μεταφοράς παρέχει αξιόπιστη και ασυνδεδιστρεφή υπηρεσία μεταφοράς στο επίπεδο εφαρμογής. Υποδεικνύει την κατάσταση μιας συσκευής και εξασφαλίζει την παράδοση των πακέτων.

Επίπεδο Εφαρμογής

Το WirelessHART εφαρμόζει το επίπεδο εφαρμογής του HART. Συνήθως, την ταυτοποίηση της αρχικής συσκευής και της sink συσκευής, την πιστοποίηση της διαθεσιμότητας πόρων και των συγχρονισμό των δεδομένων εφαρμογής.

1.4.3 Προκλήσεις

Η ανάπτυξη και εγκατάσταση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον αλλά και προκλητικές εργασίες, πόσο μάλλον όταν μπαίνει και ο παράγοντας του βιομηχανικού περιβάλλοντος. Στην ουσία, κάθε προϊόν και η κάθε φάση της παραγωγής του προϊόντος έχουν τις δικές τους απαιτήσεις και αυτό επιφέρει διάφορους περιορισμούς στο σύστημα παρακολούθησης [25],[26]. Επιπλέον υπάρχουν προσπάθειες να επιτευχθεί ο συνδυασμός των δύο κυρίαρχων προτύπων, WirelessHART και ISA100.11a, ώστε να επωφεληθούμε από τα προτερήματα και των δύο. Παρακάτω αναλύονται οι κυριότερες προκλήσεις που συναντάμε σήμερα στον τομέα των Βιομηχανικών Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (IWSN).

Περιορισμένοι Πόροι

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των δικτύων IWSN περιορίζονται από τρεις τύπους πόρων: την ενέργεια, την μνήμη και την δυνατότητα επεξεργασίας. Δεδομένου του μικρού μεγέθους τους έχουν και μικρότερες μπαταρίες για την παροχή ενέργειας. Την ίδια στιγμή η μνήμη τους είναι περιορισμένη και έχουν περιορισμένες ικανότητες επεξεργασίας.

Ποιότητα Υπηρεσιών (Quality-of-Service - QoS)

Η μεγάλη ποικιλία των εφαρμογών που προβλέπεται να αναπτυχθούν για τα δίκτυα IWSN θα προσθέσει επιπλέον QoS απαιτήσεις. Το QoS που παρέχουν τα δίκτυα IWSN αναφέρεται στην ακρίβεια μεταξύ των δεδομένων που παραδίδονται στον κέντρο ελέγχου και σε αυτό που πραγματικά συμβαίνει στο βιομηχανικό περιβάλλον. Επιπλέον, είναι σημαντικό τα δεδομένα που παραδίδονται στον κόμβο sink να λαμβάνονται μέσα σε ένα χρονικό πλαίσιο, διότι εάν υπάρχει μεγάλη χρονοκαθυστερήση ή αν περάσει ο χρόνος μέσα στον οποίο μπορούν τα δεδομένα να σταλούν και «λήξει» η σύνδεση τότε αυτό θα οδηγήσει σε λάθος αποφάσεις από την μεριά του συστήματος παρακολούθησης του περιβάλλοντος.

Ανάπτυξη Μεγάλης Κλίμακας και Αρχιτεκτονική Ad-hoc

Τα περισσότερα από τα δίκτυα IWSN περιλαμβάνουν ένα πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων, οι οποίοι θα είναι τυχαία τοποθετημένοι σε ολόκληρο το πεδίο ανάπτυξης. Επιπροσθέτως, η έλλειψη κάποιου προϋπάρχοντος δικτύου σημαίνει πως τα δίκτυα IWSN να εγκαταστήσουν τις συνδέσεις των κόμβων και να διατηρήσουν την συνδεσιμότητα του δικτύου αυτόνομα.

Συντονισμός

Απαιτείται ο συντονισμός μεταξύ των actuators ώστε να παρθούν συλλογικές αποφάσεις για ορισμένες δράσεις. Για να πάρουν τις σωστές αποφάσεις, οι actuators πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους.[27] Ο τρόπος που θα επιτευχθεί η επικοινωνία τους εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του δικτύου. Θα μπορούσε να γίνει μέσω μια κεντρικής διαχείρισης, στην οποία ο διαχειριστής δικτύου αποφασίζει για τις δράσεις και ενημερώνει τους actuators να λάβουν δράση. Ο εναλλακτικός τρόπος θα ήταν να χρησιμοποιηθεί μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική.

Συνύπαρξη

Μία από τις βασικές απαιτήσεις των Βιομηχανικών Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων είναι η συνύπαρξη με άλλα πρότυπα ασύρματων δικτύων. [28] Έχουν γίνει προσπάθειες να διευθετηθεί με τη δημιουργία λίστας καναλιών προς αποφυγή της χρήσης τους και της εναλλαγής συχνότητας στο WirelessHART κάτι που έχει συμβάλει στην βελτίωση της συνύπαρξης των προτύπων. Επιπλέον υπάρχουν συγκρούσεις πακέτων που επηρεάζουν την Ποιότητα των Υπηρεσιών (QoS) των πρωτοκόλλων και των προτύπων. Ως εκ τούτου απαιτείται η ύπαρξη πιο αποτελεσματικών μηχανισμών για την επίλυση της συνύπαρξης.

Σφάλματα πακέτων και ικανότητα μεταβλητού συνδέσμου.

Σε αντίθεση με τα ενσύρματα δίκτυα, στα δίκτυα IWSN, η ικανότητα του εκάστοτε καναλιού εξαρτάται από τα επίπεδα των παρεμβολών που υπάρχουν στον δέκτη, και έχουν παρατηρηθεί μεγάλα ποσοστά σφαλμάτων στις επικοινωνίες. Επιπλέον, οι ασύρματες συνδέσεις παρουσιάζουν ποικίλα χαρακτηριστικά με την πάροδο του χρόνου εξαιτίας των εμποδίων και του θορυβώδους περιβάλλοντος. Με αποτέλεσμα η ικανότητα και η καθυστέρηση σε κάθε σύνδεση να εξαρτάται από την τοποθεσία του αισθητήρα και να ποικίλουν συνεχώς, κάνοντας την πρόβλεψη του QoS ιδιαίτερη πρόκληση.

Προβλεψιμότητα

Η προβλεψιμότητα είναι μια από τις κύριες απαιτήσεις των δικτύων IWSN. Ένα δίκτυο IWSN είναι αρκετά περίπλοκο με πολλά επίπεδα με διάφορες λειτουργίες ενσωματωμένες στο καθένα. Είναι μία πρόκληση η δημιουργία πρωτοκόλλων δικτύων που ικανοποιούν τις επιθυμητές απαιτήσεις και να υποστηρίζουν την προβλεψιμότητα. Για παράδειγμα, η χρήση ενός γεγονοδηγούμενου μοτίβου συχνότητας δεδομένων δεν περιλαμβάνει προβλεψιμότητα στις λειτουργίες δρομολόγησης. Ως εκ του του, υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας πρωτοκόλλων που είναι προβλέψιμα επιπρόσθετα με τις λειτουργίες και τις υπηρεσίες που παρέχει.

Ασφάλεια

Η ασφάλεια θα πρέπει να είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό στη σχεδίαση των δικτύων IWSN ώστε να είναι οι ασφαλείς οι επικοινωνίες από εξωτερικές επιθέσεις όπως η άρνηση-υπηρεσιών και οι εισβολές στο σύστημα [29], [30]. Τα IWSN δίκτυα έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που δημιουργούν νέους τρόπους επιθέσεων. Οι παθητικές επιθέσεις εκτελούνται μέσω υποκλοπών στη μεταφορά των δεδομένων περιλαμβάνοντας ανάλυση της κίνησης του δικτύου και αποκάλυψη των περιεχομένων των μηνυμάτων. Οι ενεργητικές επιθέσεις

περιλαμβάνουν τροποποίηση και διακοπή των συνδέσεων, που στην περίπτωση των IWSN δικτύων μπορεί να συμπεριλαμβάνουν αιχμαλωσία ενός κόμβου, επιθέσεις στην δρομολόγηση ή επίθεση πλημμύρας.

1.4.4 Εφαρμογές

Μετά την ανάλυση των προκλήσεων που υπάρχουν στα IWSN δίκτυα προκύπτει πως οι λύσεις που θα δοθούν θα πρέπει να παρέχουν ευκολία ως προς την χρήση και την εγκατάσταση, πολύπλευρες, με μεγάλη διάρκεια ζωής και με χαμηλό κόστος.[31] Σε αυτό το σημείο γίνεται μία ανάλυση των κατηγοριών των εφαρμογών και οι αναφορά κάποιων λύσεων στην εκάστοτε κατηγορία.

Με βάση τις απαιτήσεις συστήματος οι εφαρμογές κατηγοριοποιούνται σε τρεις ομάδες: την ανίχνευση του περιβάλλοντος, την παρακολούθηση της κατάστασης και την αυτοματοποίηση των διαδικασιών.

Ανίχνευση του περιβάλλοντος

Οι εφαρμογές σχετικά με την ανίχνευση του περιβάλλοντος καλύπτουν προβλήματα όπως η μόλυνση των υδάτων και του αέρα αλλά καλύπτει και την ρύπανση των υλικών παραγωγής. Επιπροσθέτως, σε επικίνδυνα περιβάλλοντα όπως τα βιομηχανικά υπάρχουν και ανάγκες ανίχνευσης όπως οι περιπτώσεις πυρκαγιάς, πλημμύρας και ολίσθησης του εδάφους. Ιδιαίτερα σημαντικά όμως είναι και τα θέματα ασφαλείας που προκύπτουν και χρησιμοποιούνται τα δίκτυα IWSN σε σημεία ενδιαφέροντος και την παρακολούθηση της ευρύτερης περιοχής και της περίφραξης.

Ο γενικός στόχος αυτής της κατηγορίας εφαρμογών είναι η αποδοτική συλλογή πληροφοριών, προς χρήση για την πρόβλεψη καταστάσεων και την ανάλυση του συστήματος. Παρά τα πολλαπλά πλεονεκτήματα των ασύρματων δικτύων, θα πρέπει ακόμα να αντιμετωπιστούν καταστάσεις όπως οι εσφαλμένες συνδέσεις, η ανθεκτικότητα και εμπόδια όπως η μειωμένη διάρκεια ζωής και το κόστος. Οι τρεις πιο δημοφιλείς τομείς εφαρμογών σε αυτή την ομάδα είναι η ρύπανση, η επικινδυνότητα ενός περιβάλλοντος και η ασφάλεια.

Παρακολούθηση της κατάστασης

Αυτή η ομάδα εφαρμογών καλύπτει τα προβλήματα της παρακολούθησης της δομικής κατάστασης, την παροχή πληροφοριών για την δομή και την ευστάθεια του συστήματος και την κατάσταση των μηχανημάτων συμπεριλαμβάνοντας πιθανή αυτόματη συντήρηση. Επομένως αυτή η ομάδα είναι ζωτικής σημασίας για την παραγωγή.

Υπάρχει η ανάγκη τεχνικών παρακολούθησης της δομής και του εξοπλισμού που να παρέχουν μια γενικότερη εικόνα της κατάστασης και να προλαμβάνουν εγκαίρως τυχόν αποτυχίες του συστήματος. Η χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων προσπερνά τα όποια προβλήματα λόγω της εύκολης εγκατάστασης και επαναδιαμόρφωσής τους και γενικά της μείωσης του κόστους της εγκατάστασης και της παρακολούθησης της κατάστασης. Οι κυριότεροι τομείς εφαρμογών είναι: 1) η παρακολούθηση της δομικής υγείας του συστήματος και 2) η παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού. Μία πολύ ενδιαφέρουσα έρευνα, αυτή στο [32], προτείνει την παρακολούθηση των μηχανών και της ενεργειακής κατανάλωσης από απόσταση. Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει και το πλαίσιο παρακολούθησης των βιομηχανικών Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων, το οποίο παρουσιάζεται στο [33], όπως και το σχήμα στο [34].

Αυτοματοποίηση των διαδικασιών

Η τρίτη και τελευταία ομάδα παρέχει στους χρήστες πληροφορίες σχετικά με τους πόρους της παραγωγής και για την παροχή υπηρεσιών. Θέματα μείζονος σημασίας είναι η παρακολούθηση της επίδοσης της παραγωγής, η εκτίμηση και η βελτίωση της παραγωγής που έχουν γίνει εφικτές μέσω των δικτύων IWSN.

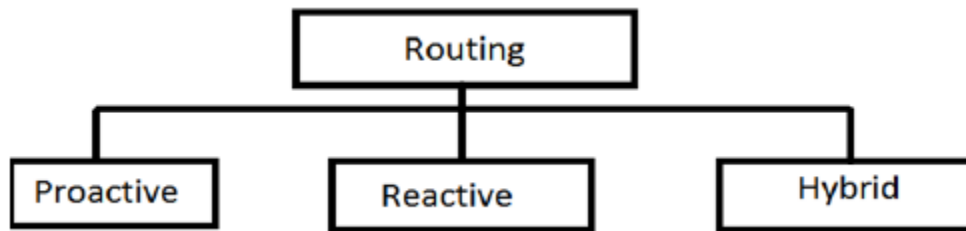
Η παρακολούθηση των διαδικασιών περιλαμβάνει πολλά βιομηχανικά τμήματα, από τη στιγμή που στοχεύει στην παρακολούθηση της ποιότητας κατά τη διάρκεια όλης της ζωής του προϊόντος, από την παροχή των υλικών που χρησιμοποιούνται μέχρι την διάθεσή του. Ως εκ τούτου, τα δίκτυα IWSN στοχεύουν στην παρακολούθηση του ανθρώπινου δυναμικού των υλικών παραγωγής καθώς σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται η επιμελητεία και το σύστημα μεταφοράς. Ο ρόλος τους λοιπόν σε αυτού του είδους των εφαρμογών είναι η αξιολόγηση και βελτίωση των διαδικασιών της παραγωγής, της κατανομής και της κατανάλωσης αλλά και αυτός ο κύκλος στην ολότητά του.

Η παρακολούθηση των υπηρεσιών σχετίζεται κυρίως στην αξιολόγηση της ποιότητας της παροχής μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας στον τελικό χρήστη. Η εκτίμηση της ποιότητας μπορεί να γίνει είτε με τον όρο της απόδοσης της γραμμής παροχής είτε με την αποδοτικότητα της παροχής υπηρεσιών στον τελικό χρήστη. Οι εφαρμογές παρακολούθησης των υπηρεσιών έχουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο γιατί παρέχουν και στον κατασκευαστή και στον καταναλωτή χρήσιμες πληροφορίες για την παροχή. Οι κυρίαρχες υπάρχουσες λύσεις περιλαμβάνουν: 1) την αξιολόγηση της παροχής υπηρεσιών και των διαδικασιών και 2) την βελτίωση της παροχής υπηρεσιών και των διαδικασιών.

2° Κεφάλαιο

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση και ανάλυση των κυρίαρχων τεχνικών δρομολόγησης στα Βιομηχανικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Επιπλέον, αναλύεται λεπτομερώς η λειτουργία του πρωτοκόλλου δρομολόγησης REALFLOW καθώς και η τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας των κόμβων που επιλέχθηκε να υλοποιηθεί.

Η δρομολόγηση των πακέτων σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον με τη χρήση ασύρματης τεχνολογίας είναι μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις, και ο λόγος είναι ότι κληρονομεί όλα τα χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων όπως οι περιορισμοί στην παροχή ενέργειας, η κινητικότητα των κόμβων και η πυκνή ανάπτυξή τους.[35] Τα κύρια θέματα που πρέπει να διευθετηθούν είναι η μείωση της χρονοκαθυστέρησης, οι τοπολογικές αλλαγές, η επεκτασιμότητα, η αξιοπιστία, η αύξηση της διάρκειας της ζωής του δικτύου και η παράδοση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα διάφορα πρωτόκολλα που έχουν αναπτυχθεί ανήκουν σε μία από τις τρεις κατηγορίες: πρόληψης (proactive), αντίδρασης (reactive) και τα υβριδικά (hybrid).



Εικόνα 18: Οι κατηγορίες των πρωτοκόλλων δρομολόγησης

Για το λόγο ότι τα δίκτυα αισθητήρων ανήκουν στην κατηγορία των Ad-hoc Κινητών Δικτύων μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε και στα δίκτυα IWSN.

2.1 Πρωτόκολλα Πρόληψης

Τα πρωτόκολλα πρόληψης είναι γνωστά και ως πρωτόκολλα που λειτουργούν με πίνακες (table driven protocols). Ο κάθε κόμβος απαιτείται να αποθηκεύει πληροφορίες δρομολόγησης στο δίκτυο. Η κατάσταση του δικτύου ενημερώνεται είτε περιοδικά είτε όταν αλλάξει η τοπολογία του δικτύου, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της χρονοκαθυστέρησης αλλά το εύρος ζώνης χαρμίζεται εξαιτίας των περιοδικών ενημερώσεων. Επιπλέον, τα πρωτόκολλα αυτά δεν είναι ενεργειακά αποδοτικά και η αξιοπιστία τους είναι αμφισβητήσιμη. Κάποια πρωτόκολλα αυτής της

κατηγορίας είναι το STAR (Source Tree Adaptive Routing), DSDV (Destination Sequenced Distance Vector Routing) και OLSR (Optimized Link State Routing Protocol).

2.2 Πρωτόκολλα Αντίδρασης

Τα πρωτόκολλα αντίδρασης βρίσκουν το μονοπάτι δρομολόγησης όταν χρειάζεται, και για αυτό ονομάζονται και πρωτόκολλα δρομολόγησης «κατ' απαίτηση» (On Demand routing protocol). Η διαδικασία εύρεσης του μονοπατιού γίνεται με τη μέθοδο της πλημμύρας με πακέτα αίτησης μονοπατιού (Route REQuest - RREQ) σε όλο το δίκτυο. Αυτή η κατηγορία πρωτοκόλλων χρησιμοποιούν την πάντα την πρόσφατη κατάσταση του δικτύου και η δημιουργία της κίνησης γίνεται με εκρηκτικό τρόπο, κάτι που μπορεί να προκαλέσει συγκρούσεις, και επιπλέον η εύρεση του μονοπατιού μπορεί να επιφέρει σημαντική καθυστέρηση. Το καλό με αυτή την κατηγορία είναι ότι μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια και εύρος ζώνης κατά τη διάρκεια την περίοδο αδράνειας. Είναι πρωτόκολλα για δίκτυα με χαμηλή κίνηση. Κάποια πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας είναι το AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector), το DSR (Dynamic Source Routing) και DYMO (Dynamic MANET On-Demand) και το LAR (Location Aided Routing).

2.3 Υβριδικά Πρωτόκολλα

Τα υβριδικά πρωτόκολλα είναι μία μίξη των κατηγοριών πρόληψης και αντίδρασης. Τα καλύτερα χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων πρόληψης και αντίδρασης είναι η χαμηλή χρονοκαθυστέρηση και η μικρές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης αντίστοιχα, αυτά είναι συσσωματωμένα στα υβριδικά τα οποία επιχειρούν την ισορροπία μεταξύ τους. Κάποια πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας είναι το ZRP (Zone Routing Protocol) και το CEDAR (Core-Extraction Distributed Ad-hoc Routing).

Με γνώμονα την αξιοπιστία σε πραγματικό χρόνο τα πρωτόκολλα αντίδρασης είναι πιο κατάλληλα για χρήση σε βιομηχανικό περιβάλλον διότι μπορούν να εξοικονομήσουν εύρος ζώνης και απαιτούν λιγότερους πόρους. Επιπλέον η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί σε περιόδους ενέργειας βελτιώνει την αξιοπιστία και οι απαιτήσεις χαμηλής δικτυακής κίνησης κάνει τα πρωτόκολλα αντίδρασης πιο κατάλληλα για τα δίκτυα IWSN.

2.4 Πρωτόκολλο AODV

Το πρωτόκολλο AODV (Ad-hoc On Demand Distance Vector) εγκαθιδρύει κατ' απαίτηση ένα μονοπάτι προς τον κόμβο προορισμού. Το πρωτόκολλο προσφέρει δυναμική, αυτό-εκκινούμενη, πολλαπλών βημάτων (multihop) δρομολόγηση μεταξύ των κόμβων που συμμετέχουν στην εγκαθίδρυση και διατήρηση ενός ad-hoc δικτύου. Επιτρέπει για ένα νέο προορισμό την απόκτηση μονοπατιού γρήγορα και δεν απαιτεί από τους κόμβους να διατηρούν διαδρομές προς προορισμούς που δεν είναι ενεργοί. Το πρωτόκολλο πέφτει σε βρόγχους και αποφεύγοντας το

πρόβλημα Bellman-Ford (μέτρηση στο άπειρο) προσφέρει γρήγορη σύγκλιση όταν η τοπολογία ενός δικτύου ad-hoc αλλάζει.

2.5 Πρωτόκολλο DSR

Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο είναι σχεδιασμένο για multihop ασύρματα δίκτυα που οι κόμβοι τους είναι κινητοί. Το πρωτόκολλο επιτρέπει στο δίκτυο να είναι τελειώς αυτο-οργανούμενο και αυτο-διαμορφούμενο. Χρησιμοποιεί τον κύκλο εύρεσης διαδρομής και τον κύκλο συντήρησης διαδρομής. Αυτοί οι κύκλοι λειτουργούν παράλληλα, βρίσκουν και διατηρούν την διαδρομή με αντιδραστικό τρόπο, δημιουργούν την επικεφαλίδα του πακέτου δρομολόγησης για την αναζήτηση των διαδρομών δυναμικά. Επιπλέον παρατείνει την διάρκεια ζωής του δικτύου, την εξισορρόπηση φόρτου, παρέχοντας ευελιξία στον αποστολέα να επιλέξει και να ελέγξει την διαδρομή μεταξύ άλλων επιλεγμένων διαδρομών.

2.6 Πρωτόκολλο DYMO

ΤΟ πρωτόκολλο DYMO (Dynamic MANET On-Demand) είναι σχεδιασμένο για κινητούς κόμβους, με στόχο να δουλέψει σε multihop ασύρματα δίκτυα. Αλλάζει δυναμικά την τοπολογία του δικτύου και κατ' απαίτηση καθορίζει διαδρομές unicast μεταξύ των κόμβων. Οι δύο βασικές λειτουργίες του πρωτοκόλλου είναι η εύρεση διαδρομής και η διαχείριση της διαδρομής. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης DYMO είναι σχεδιασμένο για μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας κινητά δίκτυα ad-hoc, μπορεί να χειριστεί μεγάλου εύρους κινητικότητα, διάφορα μοτίβα κίνησης, αλλά εφαρμόζει καλύτερα σε δίκτυα χαμηλού φόρτου. Απαιτεί μικρή ποσότητα μνήμης για την αποθήκευση μόνο ενεργούς προορισμούς και όχι όλες τις πληροφορίες δρομολόγησης. Επιπλέον, ο κάθε κόμβος διατηρεί ένα αριθμό ακολουθίας ο οποίος εγγυάται την αποφυγή βρόγχων.

Πέρα από αυτά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, τα οποία είναι και τα πιο ευρέως διαδεδομένα και με τα οποία πολλά καινούρια συγκρίνονται, έχουν προταθεί και άλλα όπως το EARQ, το InRout και το POCTP. Τα τρία αυτά πρωτόκολλα έχουν ένα κοινό γνώρισμα, το οποίο είναι το γεγονός πως και τα τρία απευθύνονται για μία συγκεκριμένη κατηγορία εφαρμογών η οποία είναι η παρακολούθηση (monitoring).

2.7 Πρωτόκολλο EARQ

Το EARQ είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης, ανήκει στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πρόληψης, και ο σκοπός του είναι η διατήρηση ενός εν εξέλιξη πίνακα δρομολόγησης. Επιπλέον είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης εξοικονόμησης ενέργειας για πραγματικού χρόνου και αξιόπιστες επικοινωνίες στα ασύρματα βιομηχανικά δίκτυα αισθητήρων.[36] Πέραν της βασικής του λειτουργίας που είναι η προληπτική δρομολόγηση, έχει ως επιπλέον ενέργεια την δημιουργία

και διατήρηση ενός πίνακα δρομολόγησης με πληροφορίες για τους γειτονικούς κόμβους. Χρησιμοποιεί ένα μηνύματα δείκτη (beacon) για την ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με την δρομολόγηση μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Το πραγματικό μονοπάτι επιλέγεται κατά τη διάρκεια τη μετάδοση του πακέτου. Υπάρχουν δύο ειδών μηνύματα: τα μηνύματα δείκτη και τα πακέτα δεδομένων.[37] Το μήνυμα δείκτη ανταλλάσσεται μεταξύ των γειτονικών κόμβων για τη δημιουργία και διατήρηση του πίνακα δρομολόγησης. Κατά την λήψη ενός μηνύματος δείκτη, ο πίνακας δρομολόγησης ενημερώνεται υπολογίζοντας με την αναμενόμενες τιμές του κόστους ενέργειας, της καθυστέρησης και της αξιοπιστίας. Όταν ένα μονοπάτι προς τον κόμβο sink γίνει γνωστό σε ένα κόμβο, ο κόμβος ξεκινά την μετάδοση ενός επεισοδιακού μηνύματος δείκτη. Ο κόμβος πηγή (source node) στέλνει πακέτα δεδομένων στον κόμβο sink αφού δημιουργήσει τον πίνακα δρομολόγησης. Κάθε κόμβος προωθεί το πακέτο δεδομένων σε ένα γειτονικό κόμβο που μπορεί να στείλει μέσα στον διαθέσιμο χρόνο το πακέτο. Ο κόμβος που θα προωθήσει το πακέτο επιλέγεται με βάση την ενδεχόμενη καθυστέρηση και αξιοπιστία. Αυτό είναι αντιστρόφως ανάλογο με το ενδεχόμενο ενεργειακό κόστος των γειτονικών κόμβων. Τότε, είναι πιο πιθανό να επιλεγεί ένα μονοπάτι που θα ξοδέψει λιγότερη ενέργεια από ένα άλλο. Για να σιγουρέψει την αξιόπιστη παράδοση ενός πακέτου, εάν η προβλεπόμενη αξιοπιστία του επιλεγμένου κόμβου δεν ικανοποιεί την απαιτούμενη αξιοπιστία, ο κόμβος πηγή επιλέγει ένα επιπλέον γειτονικό κόμβο για να προωθήσει το πακέτο.

2.8 Αλγόριθμος InRout

Το InRout είναι ένας αλγόριθμος επιλογής διαδρομής, ένας αλγόριθμος επιλογής διαδρομής που βασίζεται στην προσαρμοστική πολυμετρική και χρησιμοποιεί την τεχνική Q-learning για να επιλέξει τα καλύτερα μονοπάτια με βάση τις παρούσες συνθήκες του δικτύου και τις ρυθμίσεις των εφαρμογών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ένα οποιοδήποτε πρωτόκολλο δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών.[38] Το InRout λαμβάνει υπόψη του της κληρονομικούς περιορισμούς και προκλήσεις των ΑΔΑ με μία διαφοροποίηση διαδρομής για να ικανοποιήσει τις ανάγκες των βιομηχανικών εφαρμογών όπως ο ρυθμός εσφαλμένων πακέτων (Packet Error Rate - PER), η καθυστέρηση, ή η ενέργεια. Το InRout είναι ένας αλγόριθμος επιλογής διαδρομής που εξαρτάται στην αποτελεσματικότητα των πρωτοκόλλων δρομολόγησης πολλαπλής διαδρομών. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που ένα μονοπάτι ή ένας κόμβος αποτύχει στο να εξυπηρετήσει την μετάδοση, είναι ο ρόλος του υποκείμενου πρωτοκόλλου πολλαπλής διαδρομής να βρει εναλλακτικές διαδρομές και να κάνει την συντήρηση του μονοπατιού. Αυτός ο αλγόριθμος δεν έχει κάποια αποτελεσματική μέθοδο υπολογισμού της καθυστέρησης, για αυτό λαμβάνει υπόψη του των ελάχιστο αριθμό βημάτων και χρειάζεται κάποιο χρόνο για να συγκλίνει σε κάποια απόφαση. Το InRout είναι σχεδιασμένο να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε QoS (Quality of Service) των εφαρμογών ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει υπόψη του ρεαλιστικά σενάρια ΑΔΑ με περιορισμούς (τη μπαταρία, περιορισμένα buffers, κύκλο εργασιών κ.α.). Ως εκ τούτου, το InRout είναι σχεδιασμένο για ρεαλιστικά περιβάλλοντα ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Επιπλέον ο σχεδιασμός του έχει γίνει συγκεκριμένα ώστε να χρησιμοποιεί την ελάχιστη δυνατή μνήμη και να έχει τις ελάχιστες υπολογιστικές απαιτήσεις όπως επίσης να δημιουργεί πολύ χαμηλή επιβάρυνση

ελέγχου. Όλα αυτά το καθιστούν ιδανικό για κόμβους με περιορισμένους πόρους. Τέλος, εφαρμόζεται εύκολα σε διάφορα σχήματα δρομολόγησης πολλαπλών διαδρομών, κάτι που κάνει το InRout μια ευέλικτη λύση για την ενσωμάτωση και την ενίσχυση των υπαρχόντων βασικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης για τα ΑΔΑ.

2.9 Πρωτόκολλο POCTP

Το πρωτόκολλο POCTP (Pareto Optimal Collection Tree Protocol) [39] δημιουργήθηκε με σκοπό να καλύψει τις πολυκριτηριακές απαιτήσεις των μεταδόσεων στα βιομηχανικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρακολούθησης. Είναι μία βελτιωμένη έκδοση του CTP, που είναι ένα πρωτόκολλο συλλογής δέντρων όπου οι αισθητήρες δημιουργούν ένα σύνολο από δέντρα δρομολόγησης με ρίζες τους κόμβους sink, και οι κόμβοι δημιουργούν διαβαθμισμένες μετρήσεις δρομολόγησης. Το POCTP χρησιμοποιεί πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση βασισμένο στο Pareto για να εξασφαλίσει την Ποιότητα των Υπηρεσιών (QoS). Χρησιμοποιεί δυναμική κατανεμημένη βελτιστοποίηση για να επιλέξει τις καλύτερες διαδρομές με στόχο να στείλει τα δεδομένα στον κόμβο sink εγκαίρως και με την υψηλότερη αξιοπιστία. Αυτό το πρωτόκολλο παρέχει πραγματικού χρόνου και αξιόπιστες μεταδόσεις για τα βιομηχανικά ΑΔΑ παρακολούθησης. Απεικονίζεται με ένα ολοκληρωμένο και λογικό ιεραρχικό μοντέλο επαλήθευσης βασισμένο στη μαθηματική γλώσσα Petri net. Παρόλα αυτά, αυτό οδηγεί σε αύξηση των μηνυμάτων ελέγχου και δεν λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς της ενέργειας και του μεγέθους του buffer.

2.10 Πρωτόκολλο Δρομολόγησης με βάση την Λαμβανόμενη Ισχύ του Σήματος

Για να αποφευχθούν τα μειονεκτήματα των παρόντων σχημάτων δρομολόγησης έχουν προταθεί πρωτόκολλα με τη χρήση της τεχνικής πλημύρας με βάση την τοποθεσία (Location-based flooding).²¹ Παρόλα αυτά, τα κληρονομικά μειονεκτήματα των σχημάτων αυτών, όπως οι δυσκολίες στην εγκατάσταση των κόμβων, περιορίζουν τη χρήση αυτών τεχνικών δρομολόγησης. Ως εκ τούτου, έχει προταθεί ένα σχήμα πλημύρας που βασίζεται στην Λαμβανόμενη Ισχύ του Σήματος (Received Signal Strength – RSS). Αυτό το σχήμα περιέχει δύο συστατικά. Πρώτα, σε κάθε κόμβο πρέπει να ανατεθεί μία τιμή βαρύτητας. Ο κόμβος sink περιοδικά εκπέμπει προς όλους τους κόμβους (broadcast) ένα μήνυμα ανανέωσης της τιμής βαρύτητας του κάθε κόμβου. Ο κάθε κόμβος «ζυγίζει» τον εαυτό του μέσω της τιμής του Δείκτη Λαμβανόμενη Ισχύ του Σήματος (Received Signal Strength Indicator – RSSI) από τα λαμβανόμενα μηνύματα και τα μηνύματα βάρους και το μήνυμα προς τους άλλους κόμβους. Μετά την εξάπλωση των μηνυμάτων σε όλο το δίκτυο, ο κάθε κόμβος λαμβάνει μία τιμή βαρύτητας που υποδεικνύει την «λογική» απόσταση επικοινωνίας από τον κόμβο sink. Έπειτα, όταν ένας κόμβος σκοπεύει να στείλει ένα πακέτο στον κόμβο sink, εισάγει την τιμή RSS μέσα στο πακέτο και αποστέλλει προς όλους τους κόμβους αυτό το πακέτο (broadcast). Όλα τα πακέτα από τον κόμβο προωθούνται μόνο από τους κόμβους με μικρότερη τιμή RSS. Εφόσον στον κόμβο sink έχει ανατεθεί μηδενική τιμή RSS, όλα τα πακέτα θα καταλήξουν τελικά σε αυτόν. Με βάση αυτή την τεχνική, σε περίπτωση οποιασδήποτε αποτυχίας κάποιας σύνδεσης ή αλλαγής της τοπολογίας δεν θα προκαλέσει την επανάληψη της

μέτρησης του μονοπατιού ή την διακοπή της μετάδοσης των δεδομένων, αφού αυτή η τεχνική δεν βασίζεται σε πίνακες δρομολόγησης. Εκτός αυτού, η τοποθέτηση των κόμβων γίνεται ευκολότερη διότι δεν χρειάζεται να γίνει μέτρηση της απόστασης όπως τα σχήματα που βασίζονται στην τοποθεσία των κόμβων. Εφόσον χρησιμοποιείται η τιμή του RSSI για την απόδοση τιμής βαρύτητας στους κόμβους, αυτή η λύση είναι πιο ρεαλιστική και με μεγαλύτερη ακρίβεια σχέση με τη μέθοδο που χρησιμοποιούν τα πρωτόκολλα με βάση την γεωγραφική απόσταση, αποφεύγοντας τα προβλήματα των γεωγραφικών εμποδίων.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε από τον παρακάτω πίνακα ότι οι τιμές της μέσης τιμής και της μέγιστης τιμής της καθυστέρηση στο προτεινόμενο σχήμα δρομολόγησης είναι εμφανώς καλύτερες σε σύγκριση με τα προαναφερθέντα πρωτόκολλα δρομολόγησης AODV, DSR και DYMO και σχεδόν ίδιες με τα σχήματα δρομολόγησης που βασίζονται στην γεωγραφική τοποθεσία.

AVERAGE AND MAXIMUM END-TO-END DELAY FOR SCENARIO I

Routing protocol	Ave. end-to-end delay	Max. end-to-end delay
AODV	0.260 ms	4.07 ms
DSR	0.256 ms	8.30 ms
DYMO	0.232 ms	3.98 ms
Location-based flooding	0.171 ms	0.495 ms
Proposed scheme	0.188 ms	0.496 ms

Πίνακας 1: Μέση και μέγιστη χρονοκαθυστέρηση

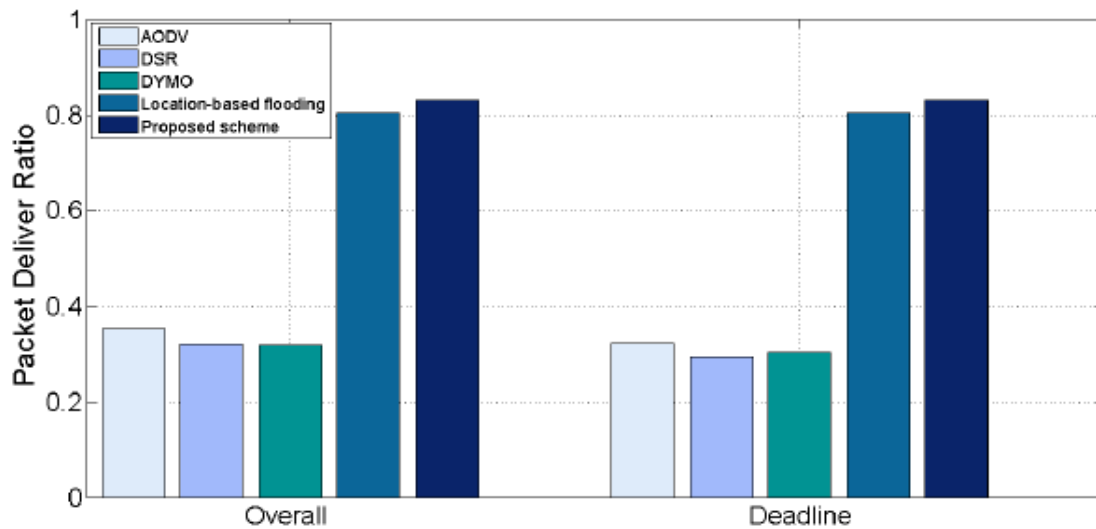
Επιπλέον, από τον παρακάτω πίνακα του χρόνου επαναφοράς των πρωτοκόλλων εξαγάγουμε το συμπέρασμα πως τα σχήματα με βάση την γεωγραφική τοποθεσία και με βάση την τιμή του RSSI είναι πιο αξιόπιστα σχέση με τα υπόλοιπα μιας και χρειάζονται μηδενικό χρόνο επαναφοράς, και η μέτρηση της τιμής βαρύτητας γίνεται μόλις μία φορά χωρίς να διακόπτεται η λειτουργία του δικτύου.

RECOVERY TIMES FOR VARIOUS ROUTING PROTOCOLS

Routing protocol	Recovery time	Other parameters
AODV	39.7 sec 19.9 sec	Hello interval: 30 sec Hello interval: 15 sec
DSR	290.1 sec	
DYMO	35.4 sec 28.4 sec	Hello interval: 30 sec Hello interval: 15 sec
Location-based flooding	0 sec	
Proposed scheme	0 sec	Weight updated once

Εικόνα 2: Χρόνος ανάκαμψης του δικτύου

Τέλος, από το παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε πως το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί την τιμή του RSSI έχει το μεγαλύτερο ποσοστό παράδοσης των πακέτων (Packet Delivery Ratio - PDR) σε σύγκριση με όλα και μάλιστα με μεγάλη διαφορά από τα πρωτόκολλα AODV, DSR και DYMO.



Εικόνα 19: Ποσοστό παράδοσης πακέτων (PDR)

2.11 Πρωτόκολλο REALFLOW

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστεί και θα αναλυθεί εκτενώς το πρωτόκολλο δρομολόγησης REALFLOW [40], το οποίο πρωτόκολλο είναι αυτό που επιλέχθηκε να προσομοιωθεί στο ερευνητικό μέρος της διπλωματικής αυτής.

Με σκοπό να επιτευχθεί υψηλότερη αξιοπιστία, χρησιμοποιείται η μέθοδος της πλημμύρας στο πρωτόκολλο δρομολόγησης για να εισάγει ποικιλία πολλαπλών μονοπατιών. Το πρωτόκολλο βασίζεται σε ένα μηχανισμό ελεγχόμενης πλημμύρας στον οποίο η πλημύρα είναι περιορισμένη σε ένα καθορισμένο εύρος, ώστε η χρήση των πόρων του δικτύου να είναι πιο αποτελεσματική. Για να φτάσουν τα πακέτα στον προορισμό τους διάφορα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν, για παράδειγμα, πίνακες δρομολόγησης. Με αυτή την τεχνική ένα ID γράφου συσσωματώνεται στο μήνυμα για την προώθηση των μηνυμάτων στο πρότυπο WirelessHART. Με αυτό τον τρόπο όμως μπορεί να οδηγηθεί ο διαχειριστής δικτύου σε υπολογισμούς μεγάλης διάρκειας ή οι κόμβοι σε απρόσμενο φόρτο εργασίας. Επιπλέον, επειδή η τοπολογία των δικτύων αλλάζει και οι πίνακες δρομολόγησης και οι γράφοι πρέπει να υπολογιστούν ξανά, κατά τη διάρκεια των υπολογισμών είναι πιθανό μέρος των μεταδόσεων να τερματιστεί λόγω του ότι μπορεί να λήξει το χρονικό όριο μετάδοσής τους. Για αυτούς τους λόγους το εν λόγω πρωτόκολλο εφαρμόζει ένα διαφορετικό μηχανισμό και εισάγει νέες παραμέτρους δρομολόγησης. Το βασικό μέλημα του REALFLOW είναι η δημιουργία και διατήρηση μίας λίστας L σε κάθε κόμβο, που περιέχει όλους τους σχετικούς κόμβους με τον εκάστοτε κόμβο. Με τον όρο «σχετικοί κόμβοι» αναφέρεται σε αυτούς τους κόμβους που ο κάθε κόμβος μπορεί να προωθήσει πακέτα. Στον παρακάτω αλγόριθμο παρουσιάζεται η πρώτη φάση της δημιουργίας του δικτύου και ακολουθεί η ανάλυσή του.

Πρώτα όμως θα δοθεί ο ορισμός κάποιων παραμέτρων και υποθέσεων που χρησιμοποιούνται στους παρακάτω αλγορίθμους για να γίνει πιο σαφές το πώς λειτουργεί το πρωτόκολλο.

Υποθέτουμε πως το δεδομένο δίκτυο που θα δημιουργηθεί αποτελείται από m κόμβους. Το σύνολο N των κόμβων αναπαρίσταται ως $N = \{N_1, N_2, \dots, N_m\}$. Για τον έλεγχο της τεχνικής της πλημμύρας εισάγεται μία νέα έννοια, αυτή του σχετικού κόμβου (relative node). Δηλαδή εάν ο κόμβος N_i ($1 \leq i \leq m$) εμπλέκεται μεταξύ της επικοινωνίας του κόμβου N_k ($1 \leq k \leq m, k \neq i$) και της πύλης τότε ο κόμβος N_i είναι σχετικός προς τον κόμβο N_k .

Για τον διαχωρισμό των σχετικών από τους άσχετους κόμβους προς ένα συγκεκριμένο κόμβο γίνεται η χρήση της λίστα σχετικών κόμβων L . Ο κόμβος N_k , για παράδειγμα, διατηρεί τη λίστα L_k η οποία εμπεριέχει όλο το σύνολο των διευθύνσεων των σχετικών κόμβων προς τον κόμβο N_k και αναπαρίσταται ως $L_k = \{A_1, A_2, \dots, A_p\}$, αν υποθέσουμε πως p είναι το μήκος αυτής της λίστας.

Η πηγαία διεύθυνση του N_i είναι η A_i , και εάν ισχύει η A_i ανήκει στη λίστα L τότε ο κόμβος N_i είναι σχετικός προς τον N_k . Εφόσον ο κόμβος N_i είναι σχετικός προς τον N_k , τότε εάν ο N_i έχει μικρότερο αριθμό βημάτων από την πύλη τότε είναι γονιός του N_k (parent node), εάν έχει μικρότερο είναι παιδί του (child node) και εάν έχουν ίδιο αριθμό βημάτων τότε είναι οι κόμβοι N_i και N_k είναι αδέρφια (sibling nodes).

```

(1) Extract  $r_{\text{pkt}}$ ,  $h_{\text{pkt}}$ , and  $A_{\text{prt}}$  from the list-updated message
(2) Obtain  $r_{\text{link}}$  from RF part
(3) if  $r_{\text{link}} < T_{\text{link}}$  then
(4)   if  $h_{\text{pkt}} \leq h_{\text{node}}$  then
(5)      $r_{\text{pkt}} = r_{\text{pkt}} + r_{\text{link}}$ 
(6)      $C = C + 1$ 
(7)     if  $C < K_{\text{max}}$  then
(8)       if  $h_{\text{pkt}} = h_{\text{node}}$  then
(9)          $\mathbb{V} = \mathbb{V} \cup \{A_{\text{prt}}, r_{\text{pkt}}, \text{sibling}\}$ 
(10)      else if  $h_{\text{pkt}} < h_{\text{node}}$  then
(11)         $\mathbb{V} = \mathbb{V} \cup \{A_{\text{prt}}, r_{\text{pkt}}, \text{parent}\}$ 
(12)         $h_{\text{node}} = h_{\text{pkt}} + 1$ 
(13)      end if
(14)     else if  $C \geq K_{\text{max}}$  then
(15)       if  $r_{\text{pkt}} < \max(\mathbb{V}, r_i)$  then
(16)          $\mathbb{V} = \mathbb{V} - \{r_i\}$ 
(17)         if  $h_{\text{pkt}} = h_{\text{node}}$  then
(18)            $\mathbb{V} = \mathbb{V} \cup \{A_{\text{prt}}, r_{\text{pkt}}, \text{sibling}\}$ 
(19)         else if  $h_{\text{pkt}} < h_{\text{node}}$  then
(20)            $\mathbb{V} = \mathbb{V} \cup \{A_{\text{prt}}, r_{\text{pkt}}, \text{parent}\}$ 
(21)            $h_{\text{node}} = h_{\text{pkt}} + 1$ 
(22)         end if
(23)       else
(24)         Drop
(25)       end if
(26)     end if
(27)      $h_{\text{pkt}} = h_{\text{pkt}} + 1$ 
(28)      $A_{\text{prt}} = A_{\text{current}}$ 
(29)     Forward
(30)   else if  $h_{\text{pkt}} > h_{\text{node}}$  then
(31)     Drop
(32)   end if
(33) else if  $r_{\text{link}} \geq T_{\text{link}}$  then
(34)   Drop
(35) end if

```


Αρχικά εξηγούνται μία προς μία οι μεταβλητές του αλγορίθμου.

r_{pkt} (η απόλυτη συσσωρευόμενη τιμή RSSI): αρχικοποιείται ως μηδενική. Όταν ένα κόμβος λαμβάνει ένα μήνυμα, η RSSI τιμή που αποκτήθηκε από τον καταχωρητή ραδιοσυχνοτικού chip θα προστίθεται στην προηγούμενη τιμή

h_{pkt} (ο αριθμός του βήματος του πακέτου): αρχικοποιείται ως μηδενικό. Κάθε φορά που ένα μήνυμα περνά από ένα ενδιάμεσο κόμβο αυτή η παράμετρος αυξάνεται κατά ένα.

A_{prev} (η διεύθυνση του προηγούμενου κόμβου): κάθε φορά που ένα μήνυμα προωθείται η διεύθυνσή του θα αποθηκεύεται σε αυτή την παράμετρος.

h_{node} (ο αριθμός βήματος του κόμβου): αυτή η παράμετρος αντιπροσωπεύει τον αριθμό των βημάτων του παρόντος κόμβου από την πύλη.

V (το σύνολο των καταγεγραμμένων δεδομένων του κόμβου γονέα ή αδερφού): όταν ένας κόμβος λαμβάνει ένα μήνυμα ανανέωσης λίστας από κόμβο γονέα ή αδερφό, η διεύθυνση αυτού του κόμβου, καθώς και η τιμή r_{pkt} προστίθενται σε αυτό το σύνολο δεδομένων. Αυτή η καταγραφή είναι πολύ σημαντική για το επόμενο στάδιο της παραγωγής της λίστας των σχετικών κόμβων.

T_{link} : ένα προκαθορισμένο κατώφλι για να φιλτράρει τα πακέτα με αδύναμο δείκτη ισχύος.

r_{link} : η απόλυτη τιμή του μετρούμενου RSSI του παρόντος λαμβανόμενου μηνύματος.

$A_{current}$: η διεύθυνση του παρόντος κόμβου.

K_{max} : ένας προκαθορισμένος επιτρεπόμενος μέγιστος αριθμός των κόμβων γονέων.

Ο τρόπος λειτουργίας του παραπάνω αλγορίθμου έχει ως εξής: Για να καθοριστεί η τοπολογία του δικτύου από την πύλη και να παραχθούν οι λίστες σχετικών κόμβων (L) σε όλους τους κόμβους, η πύλη εκπέμπει περιοδικά προς όλους τους κόμβους (broadcast) μηνύματα ανεύρεσης. Τα μηνύματα αυτά ονομάζονται list-update (ανανέωσης της λίστας). Κάθε μήνυμα περιέχει τρεις παραμέτρους: r_{pkt} , h_{pkt} και A_{prev} .

Όταν ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα list-updated θα το εκπέμψει (broadcast) προς τους υπόλοιπους κόμβους. Πριν το προωθήσει όμως, και οι τρεις αυτές οι παράμετροι θα ανανεωθούν. Ο κόμβος επίσης θα καταγράψει τις πληροφορίες από το μήνυμα list-updated. Με σκοπό όμως να δημιουργηθούν οι λίστες των σχετικών κόμβων χρειάζεται να συγκρατηθούν τρεις σημαντικές παράμετροι: h_{node} , C , και V .

Όταν η πύλη εκπέμπει (broadcast) ένα μήνυμα list-updated, αυτό το μήνυμα θα πρέπει να ξαναγίνει εκπομπή (broadcast) από όλους τους άλλους κόμβους μέχρι να μεταδοθεί σε όλο το δίκτυο. Η επανάληψη της μετάδοσης συνοψίζεται στον παραπάνω αλγόριθμο.

Για να δημιουργηθούν τα κατάλληλα μονοπάτια δρομολόγησης, το λαμβανόμενο σήμα ισχύος από το μήνυμα list-update θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο του κατωφλιού T_{link} , ειδάλλως αυτό το

μονοπάτι θα θεωρείται ασταθές και αναξιόπιστο. Το T_{link} καθορίζεται ανάλογα με το περιβάλλον του ασύρματου δικτύου. Για να αποτραπεί η συνεχής αναμετάδοση των μηνυμάτων list-updated η παράμετρος h_{pkt} ελέγχεται σε κάθε βήμα. Αν το h_{pkt} είναι μεγαλύτερο από την παράμετρο h_{node} σημαίνει ότι το μήνυμα αυτό προέρχεται από ένα κόμβο παιδί και θα πρέπει να απορριφθεί. Οι διαφορετικές τιμές της παραμέτρου K_{max} δημιουργούν διαφορετικές ιδιότητες για τα πολλαπλά μονοπάτια των μεταδόσεων των κόμβων. Όσοι περισσότεροι κόμβοι γονείς ή αδέρφια επιλεγθούν, τόσο περισσότερα μονοπάτια θα αναμιχθούν στην μετάδοση των δεδομένων. Επομένως, η ποικιλία των τιμών της παραμέτρου K_{max} , επηρεάζει την αξιοπιστία των μεταδόσεων. Παρά το γεγονός πως η μεγαλύτερη τιμή της K_{max} θα αυξήσει την αξιοπιστία της μετάδοσης των δεδομένων, θα χρειαστούν και περισσότεροι πόροι του δικτύου λόγω της αύξησης των διαδρομών. Ως εκ τούτου, υπάρχει μία σχέση αναλογίας-αλληλεξάρτησης μεταξύ της αξιοπιστίας και της κατανάλωσης των πόρων η οποία καθορίζεται από την παράμετρο K_{max} .

Ο παρακάτω αλγόριθμος είναι η δεύτερη φάση της δημιουργίας της τοπολογίας του δικτύου και περιλαμβάνει επίσης το σημαντικό έργο της δημιουργίας της λίστας των σχετικών κόμβων (related node list – L) σε κάθε κόμβο. Αρχικά, όπως και προηγουμένως, εξηγείται η λειτουργία των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε αυτό το κομμάτι αλγορίθμου.

```

(1) Extract  $s_{pkt}$ ,  $A_{src}$  and  $N_{fwd}$  from the list-response message
(2) if  $\{s_{pkt}, A_{src}\} \notin H$  then
(3)    $H = H \cup \{s_{pkt}, A_{src}\}$ 
(4)   if  $A_{current} \in N_{fwd}$  then
(5)     if  $A_{current}$  is a parent node type then
(6)        $N_{fwd} = V_{current}$ 
(7)     else if  $A_{current}$  is a sibling node type then
(8)       Find  $\{A_j, r_j, \text{parent/sibling}\}$  where  $r_j$  is minimum in  $V_{current}$ 
(9)        $N_{fwd} = \{A_j, r_j, \text{parent/sibling}\}$ 
(10)    end if
(11)    $L = L \cup A_{src}$ 
(12)   Forward
(13) else if  $A_{current} \notin N_{fwd}$  then
(14)   Drop
(15) end if
(16) else if  $\{s_{pkt}, A_{src}\} \in H$  then
(17)   Drop
(18) end if

```

Εικόνα 21: Αλγόριθμος 2

s_{pkt} (ο αριθμός ακολουθίας του πακέτου): ένας μοναδικός δείκτης για την αποφυγή των επαναλαμβανόμενων πακέτων.

N_{src} (το σύνολο των κόμβων γονιών και αδερφών που έχουν επιλεγθεί): περιέχει την διεύθυνση των επιλεγμένων κόμβων γονιών και αδερφών που έχουν αποκτηθεί από τα προηγούμενα μηνύματα list-updated.

N_{fwd} (το σύνολο των κόμβων ενός βήματος): περιέχει τις διευθύνσεις των κόμβων που απέχουν εάν βήμα (hop), καθώς και τον τύπο τους.

A_{src} : η πηγαία διεύθυνση του μηνύματος που εστάλη από τον κόμβο N_{src} .

$V_{current}$: το σύνολο των κόμβων γονέων και αδερφών του παρόντος κόμβου που αποκτήθηκαν από το προηγούμενο στάδιο του μηνύματος list-updated.

H : ένας πίνακας καταγραφής ιστορικού όλων των μηνυμάτων που έχουν περάσει από τον κόμβο για την αποφυγή της προώθησης εις διπλούν.

Αφού γίνει η λήψη των list-updated μηνυμάτων, ο κάθε κόμβος θα πρέπει στείλει μία απάντηση στην πύλη, εκπέμποντας (broadcast) ένα μήνυμα το οποίο ονομάζεται list-response. Ένα μήνυμα list-response περιλαμβάνει τις απαραίτητες παραμέτρους: s_{pkt} , N_{src} και N_{fwd} .

Για να αναγνωριστούν τα διάφορα μηνύματα list-response από τον ίδιο κόμβο, εισάγεται ο αριθμός ακολουθίας s_{pkt} και αυξάνεται κατά ένα με κάθε απάντηση που στέλνει ο κόμβος αυτός. Η παράμετρος N_{src} θα πρέπει να παραδοθεί στην πύλη με σκοπό να υπολογιστεί η υπάρχουσα τοπολογία του δικτύου, η παράμετρος N_{fwd} χρησιμοποιείται για να βρεθεί ο επόμενος κόμβος μετάδοσης. Τα μηνύματα list-response έχουν διπλό σκοπό. Πρώτον, η πύλη είναι ικανή να αποκτήσει πληροφορίες για να υπολογίσει την τοπολογία του δικτύου από αυτά τα μηνύματα. Δεύτερον, η παραγωγή της λίστας σχετικών κόμβων L σε κάθε κόμβο βασίζεται σε αυτά τα μηνύματα.

Εφόσον ο συνδυασμός των s_{pkt} και της πηγαίας διεύθυνσης του μηνύματος μπορεί να ξεχωρίσει τα διαφορετικά μηνύματα list-response, εάν αυτά τα μηνύματα δεν ταυτοποιηθούν στον πίνακα καταγραφής ιστορικού, τότε μπορούν να γίνουν αποδεκτά από τον κόμβο για το επόμενο βήμα του αλγορίθμου. Η παράμετρος N_{fwd} περιέχει τις διευθύνσεις των κόμβων που απέχουν ένα hop. Ως εκ τούτου, εάν η διεύθυνση του παρόντος κόμβου βρεθεί στην παράμετρο N_{fwd} , στο μήνυμα επιτρέπεται να προωθηθεί. Η σχέση μεταξύ του παρόντος κόμβου με τον προηγούμενο κόμβο καθορίζει τον επόμενο κόμβο. Εάν ο παρόντας κόμβος είναι γονιός του προηγούμενου κόμβου τότε το N_{fwd} αντικαθίσταται από την παράμετρο $V_{current}$. Στην περίπτωση που είναι αδερφός του προηγούμενου τότε ο παρόντας κόμβος επιλέγει ως επόμενο κόμβο το γονιό του που έχει τη μικρότερη τιμή RSSI (αναπαρίσταται με r_i στον αλγόριθμο). Το τελευταίο βήμα πριν την προώθηση του μηνύματος είναι να προστεθεί η πηγαία διεύθυνση A_{src} του μηνύματος list-response στην λίστα σχετικών κόμβων L . Το εύρος αφίξεων επηρεάζει άμεσα το εύρος της πλημμύρας του κόμβου N_{src} . Για να περιοριστεί όμως το εύρος πλημμύρας θα πρέπει στην περίπτωση που ληφθεί ένα μήνυμα list-response από ένα κόμβο αδερφό θα πρέπει να προωθηθεί προς ένα κόμβο γονέα και κατά προτίμηση σε αυτόν με την μικρότερη τιμή RSSI, για το λόγο ότι ο αδερφός κόμβος απέχει τον ίδιο αριθμό βημάτων από την πύλη και μια περαιτέρω προώθησή του χωρίς τον

περιορισμό αυτό θα οδηγήσει σε αύξηση του εύρους της πλημμύρας με δυσάρεστα αποτελέσματα για το δίκτυο.

Στον παρακάτω αλγόριθμο παρουσιάζεται ο τρόπος δημιουργίας της τοπολογίας του δικτύου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το δίκτυο IWSN περιέχει m κόμβους εκτός της πύλης. A_k είναι η

διεύθυνση του κόμβου N_k . Ορίζεται ως N_k το σύνολο των γονέων του κόμβου N_k , το οποίο αποκτήθηκε από το μήνυμα list-response. M είναι το σύνολο των κόμβων που έχει ήδη επεξεργαστεί από τον αλγόριθμο δημιουργίας της τοπολογίας.

```
(1)  $n = m$ 
(2)  $M = M \cup \{A_{gw}\}$ 
(3) while  $n \neq 0$  do
(4)   for all  $A_i$  such that  $A_i \in M$  do
(5)     for all  $N_k, k = 1, \dots, m$  do
(6)       if  $A_i \in N_k$  then
(7)         Set  $N_k$  as a child or sibling of  $N_i$ .
(8)          $N_k = N_k - \{A_i\}$ 
(9)         if  $N_k = \emptyset$  then
(10)           $n = n - 1$ 
(11)        end if
(12)       if  $A_k \notin M$  then
(13)          $M = M \cup \{A_k\}$ 
(14)       end if
(15)     end if
(16)   end for
(17) end for
(18) end while
```

Εικόνα 22: Αλγόριθμος 3

Η διαδικασία της παραγωγής της τοπολογίας είναι αρκετά απλή, εφόσον οι πληροφορίες που θα λάβει η πύλη τα list-response μηνύματα είναι σαφείς τότε μπορεί να περιγράψει την σχέση μεταξύ δύο κόμβων στο δίκτυο. Αυτό που ουσιαστικά κάνει ο τρίτος αλγόριθμος είναι να καταγράψει τους κόμβους παιδιά του εκάστοτε κόμβου.

Αφού τελειώσει και αυτό το κομμάτι η πύλη και παρθεί η απόφαση του προγραμματισμού του δικτύου τότε αποστέλλεται από την πύλη ένα μήνυμα επιβεβαίωσης της λίστας του εκάστοτε

κόμβου (list-confirmed message). Η απόφαση του προγραμματισμού είναι ουσιαστικά ο σχεδιασμός της λειτουργίας του TDMA που χρησιμοποιείται από το πρωτόκολλο στο επίπεδο MAC. Τα σχήμα προώθησης αυτού του μηνύματος είναι ίδιο με τη μέθοδο προώθησης των πακέτων που περιγράφεται παρακάτω. Μόλις ένας κόμβος λάβει μήνυμα list-confirmed αμέσως εφαρμόζει και την λίστα L και την απόφαση προγραμματισμού. Καθώς μιλάμε για ένα δίκτυο με κεντρικό έλεγχο, πριν αποσταλεί ένα μήνυμα list-confirmed σε κάποιο κόμβο η πύλη έχει τη δυνατότητα να επέμβει και να αλλάξει την τοπολογία, εσωκλείοντας μία εντολή στο μήνυμα και ο αντίστοιχος κόμβος να διαγράψει ένα συγκεκριμένο κόμβο από την λίστα του.

Στον τέταρτο και τελευταίο αλγόριθμο, όπως αναφέραμε και πριν, αναπτύσσεται η μέθοδος προώθησης των πακέτων.

```

(1) Extract  $A_{src}$ ,  $A_{dst}$  and  $s_{pkt}$  from the received packet
(2) if  $A_{src} = A_{gw}$  then
(3)   if  $A_{dst} \in L$  then
(4)     Construct the unique pair  $P = (s_{pkt}, A_{dst})$ 
(5)     if  $P \notin H$  then
(6)       Update  $T_{age}$ 
(7)       if  $T_{age} < T_{refresh}$  then
(8)          $H = H \cup \{P\}$ 
(9)         Forward
(10)      end if
(11)    end if
(12)  end if
(13) else if  $A_{dst} = A_{gw}$  then
(14)   if  $A_{src} \in L$  then
(15)    Construct the unique pair  $P = (s_{pkt}, A_{src})$ 
(16)    if  $P \notin H$  then
(17)      Update  $T_{age}$ 
(18)      if  $T_{age} < T_{refresh}$  then
(19)         $H = H \cup \{P\}$ 
(20)        Forward
(21)      end if
(22)    end if
(23)  end if
(24) end if
(25) Drop

```

Εικόνα 23: Αλγόριθμος 4

Αφού τελειώσει όλη η διαδικασία της δημιουργίας της λίστα σχετικών κόμβων (L) σε κάθε κόμβο και εφαρμοστεί μαζί με την απόφαση προγραμματισμού που ελήφθη από την πύλη, οι κόμβοι είναι έτοιμοι να προωθήσουν πακέτα μεταξύ τους. Όπως ήδη αναφέρθηκε χρησιμοποιούνται οι λίστες σχετικών κόμβων με σκοπό να αποφευχθεί η υπερβολική προώθηση πακέτων, που είναι και το μειονέκτημα στις μεταδόσεις με την τεχνική πλημμύρας, μέσο του περιορισμού του εύρους της πλημμύρας. Σε αυτό το σημείο λοιπόν θα θέσουμε τα κριτήρια με τα οποία θα γίνεται η προώθηση των πακέτων στο πρωτόκολλο REALFLOW. Τα κριτήρια τα οποία θέτονται είναι τρία.

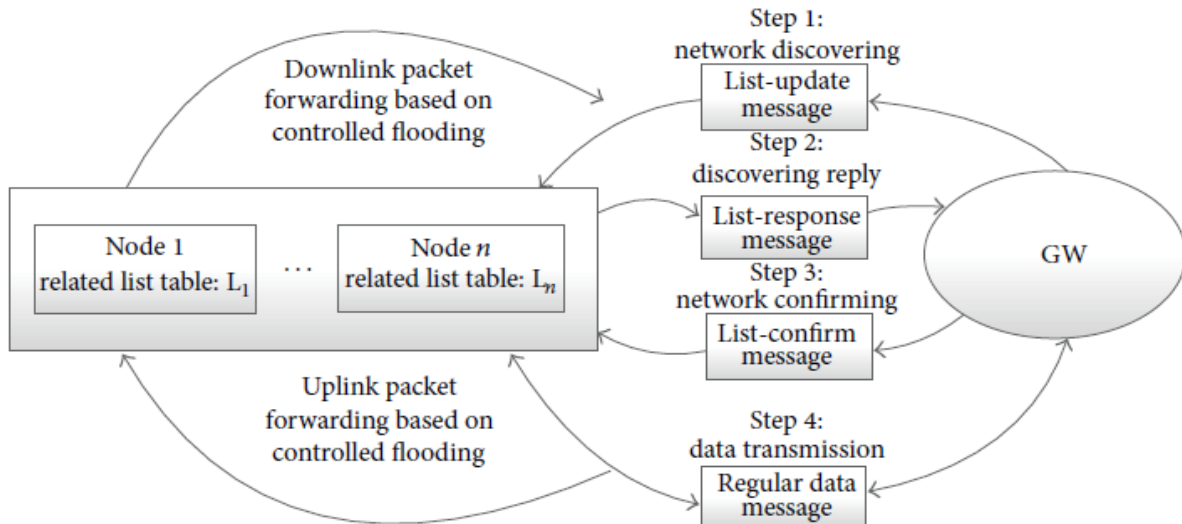
Το πρώτο κριτήριο προώθησης ελέγχει όταν ένα πακέτο ληφθεί με μία πηγαία διεύθυνση ή διεύθυνση προορισμού A, η οποία διεύθυνση υπάρχει μέσα στην τοπική λίστα σχετικών κόμβων L, τότε αυτό το πακέτο μπορεί να προωθηθεί. Ο συμβολισμός αυτού του κριτηρίου είναι ο εξής: $A \in L$.

Επειδή όμως, όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, το πρωτόκολλο δρομολόγησης REALFLOW χρησιμοποιεί την τεχνική πλημμύρας και σε κάθε προώθηση το εκάστοτε πακέτο θα εκπέμπεται (broadcast), θα εμφανιστούν διπλότυπα των πακέτων που έχουν ήδη προωθηθεί. Για την αποφυγή αυτών των διπλότυπων και της αχρείαστης προώθησής τους κάθε πακέτο δεδομένων θα πρέπει να έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό. Έτσι περνάμε στο δεύτερο κριτήριο προώθησης για το οποίο ορίζεται ένα ζευγάρι παραμέτρων (P) ως αναγνωριστικό. Το P αποτελείται από τον αριθμό ακολουθίας s_{pkt} και την πηγαία διεύθυνση A_{src} του κόμβου παραγωγής του πακέτου, $P = (s_{pkt}, A_{src})$. Αφού προωθηθεί ένα πακέτο ο αριθμός ακολουθίας αυξάνεται κατά ένα. Όπως έχει οριστεί παραπάνω ο κάθε κόμβος θα πρέπει να διατηρεί ένα πίνακα ιστορικού H. Έτσι, όταν λοιπόν θα λαμβάνει ένα νέο πακέτο το ζευγάρι αναγνωριστικού θα καταγραφεί στον πίνακα H. Πριν όμως καταγραφεί να γίνει έλεγχος στον πίνακα H και αν υπάρχει ήδη το αναγνωριστικό P τότε αυτό σημαίνει πως το πακέτο είναι ένα διπλότυπο και δεν θα προωθηθεί. Το δεύτερο αυτό κριτήριο συμβολίζεται ως: $P \notin H$.

Επιπλέον μία από τις σημαντικές απαιτήσεις του πρωτοκόλλου είναι λειτουργία σε πραγματικό χρόνο. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα θα πρέπει να φτάσουν στον προορισμό τους σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές τα δεδομένα που δεν έφτασαν στο προκαθορισμένο χρονικό διάστημα δεν χρησιμοποιούνται. Αυτό είναι πιο λογικό μια λογική ενέργεια που έχει ως σκοπό την εξοικονόμηση των πόρων για άλλες μεταδόσεις δεδομένων. Για τρίτο κριτήριο λοιπόν, ορίζεται ως T_{age} η χρονική διάρκεια της ζωής του πακέτου και ως $T_{refresh}$ το χρονικό κατώφλι όπου θα απορρίπτονται τα πακέτα που το ξεπερνούν. Ο συμβολισμός του τρίτου κριτηρίου γίνεται ως εξής: $T_{age} < T_{refresh}$.

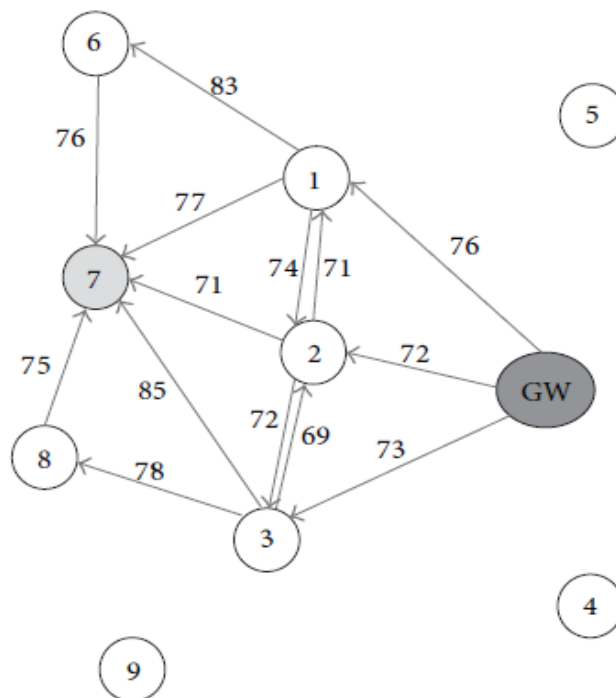
Μέχρι αυτό το σημείο έχουν αναλυθεί όλες οι λεπτομέρειες του πρωτοκόλλου REALFLOW. Εν ολίγοις, στην λειτουργία του πρωτοκόλλου εμπλέκονται τέσσερα στάδια και τέσσερις τύποι μηνυμάτων. Αρχικά, η πύλη εκπέμπει (broadcast) μηνυμάτων list-updated και για να σκιαγραφήσει την παρούσα τοπολογία του δικτύου. Έπειτα ο κάθε κόμβος απαντά με ένα μήνυμα list-response ώστε να ενημερώσει την πύλη για τους κόμβους γονείς του και να προστεθεί από όλους τους ενδιαμέσους κόμβους προς την πύλη στην λίστα σχετικών κόμβων. Εφόσον ληφθούν όλες απαντήσεις από την πύλη, τότε αυτή είναι έτοιμη να υπολογίσει την τοπολογία του δικτύου και να προγραμματίσει την λειτουργία του TDMA και να στείλει τις αποφάσεις της πίσω στους κόμβους μέσω των μηνυμάτων list-confirmed. Τέλος, όλοι οι κόμβοι είναι έτοιμη να επικοινωνήσουν με την πύλη με βάση την ελεγχόμενη πλημμύρα και σύμφωνα με τους κανόνες προώθησης για το ρεύμα ανόδου (uplink) και το ρεύμα καθόδου (downlink). Τα τέσσερα αυτά βήματα συνοψίζονται στην παρακάτω εικόνα.

Αυτό που απομένει για να πλήρως κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του πρωτοκόλλου REALFLOW είναι η παρουσίαση ενός παραδείγματος από την δημιουργία της τοπολογίας μέχρι την μετάδοση των πακέτων.



Εικόνα 24: Τα τέσσερα βήματα της λειτουργίας του REALFLOW

Παρακάτω απεικονίζεται ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (1-9) και την πύλη (GW). Θα χρησιμοποιήσουμε αυτήν τοπολογία για την διεξαγωγή ενός παραδείγματος του πρωτοκόλλου REALFLOW. Θα εστιάσουμε στις μεταδόσεις μεταξύ του κόμβου 7 και της πύλης.



Εικόνα 25: Παράδειγμα λειτουργίας του REALFLOW

Αρχικά, στην εικόνα φαίνεται με βέλη η μετάδοση των μηνυμάτων list-updated από την πύλη και πως αυτά καταλήγουν στον κόμβο 7. Οι αριθμοί στα βέλη είναι οι τιμές του δείκτη λαμβανόμενου σήματος ισχύος (RSSI). Η παράμετρος K_{max} έχει οριστεί για το συγκεκριμένο παράδειγμα με την τιμή 2, εφόσον έχουν δημιουργηθεί πολλαπλά μονοπάτια και δεν απαιτούνται πολλοί πόροι του δικτύου. Συγκεκριμένα ο κόμβος 7 λαμβάνει πέντε αντίγραφα του μηνύματος list-updated από τους κόμβους 1,2,3,6 και 8. Εάν συγκρίνουμε τις τιμές του RSSI θα δούμε ότι οι διαδρομές με τους κόμβους 1 και 2 έχουν τις μικρότερες τιμές, συνεπώς μπορούν να δημιουργηθούν και οι πιο αξιόπιστες συνδέσεις με αυτούς τους 2 κόμβους. Ο κόμβος 7 λοιπόν επιλέγει τους κόμβους 1 και 2 για κόμβους γονείς.

Επιπλέον από το σχήμα παρατηρούμε πως οι γονείς των κόμβων 1 και 2 είναι η πύλη μόνο για τον κόμβο 1 και η πύλη και ο κόμβος 3 για τον κόμβο 2. Το επόμενο βήμα είναι να απαντήσει ο κόμβος 7 με την αποστολή του μηνύματος list-response. Οι μόνοι κόμβοι που θα δεχθούν το list-response μήνυμα του κόμβου 7 θα είναι οι κόμβοι 1 και 2 εφόσον μόνο οι δικές τους διευθύνσεις θα συμπεριλαμβάνονται στην παράμετρο N_{fwd} . Έτσι αυτοί οι δύο κόμβοι θα προσθέσουν την διεύθυνση του κόμβου 7 στην λίστα σχετικών κόμβων L και θα προωθήσουν το μήνυμα στους κόμβους γονείς τους.

Αφού φτάσουν όλα τα μηνύματα list-response στην πύλη και δημιουργηθούν κατά πως πρέπει οι λίστες σχετικών κόμβων στον κάθε κόμβο, τότε η πύλη θα υπολογίσει την τοπολογία του δικτύου. Τέλος, η πύλη θα στείλει τα μηνύματα list-confirmed προς όλους τους κόμβους, μαζί τον σχεδιασμό του τρόπου δρομολόγησης. Να τονιστεί σε αυτό το σημείο πως οι κόμβοι 4,5 και 9 δεν έχουν βέλη μεταξύ των κόμβων γιατί η τιμές του RSSI που συλλέχθηκαν ξεπερνούν το κατώφλι και επιλέχθηκε να μην συμμετέχουν στο δίκτυο γιατί οι συνδέσεις τους θα ήταν ασταθείς και αναξιόπιστες.

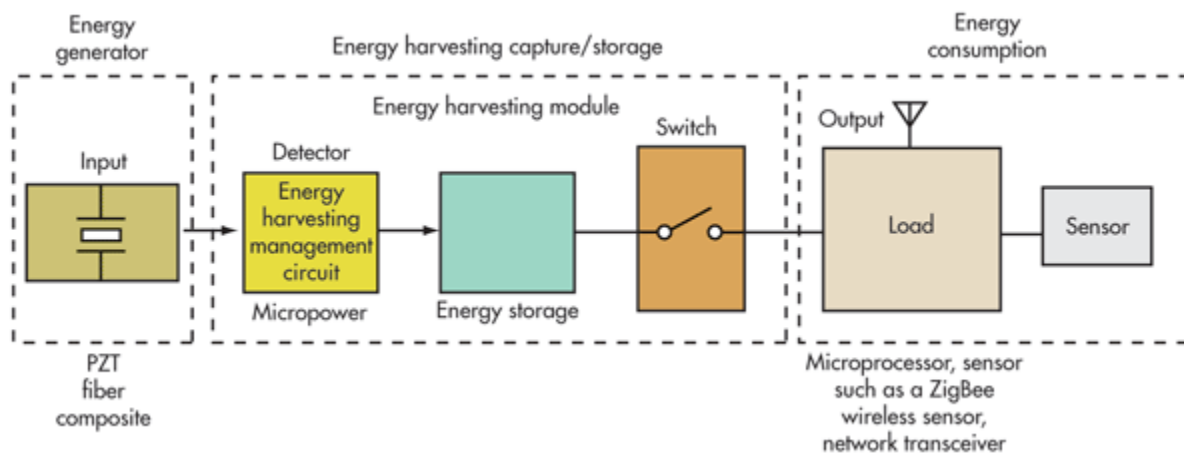
Στο επόμενο βήμα, μετά τη λήψη των list-confirmed μηνυμάτων, ξεκινά η μετάδοση πακέτων δεδομένων μεταξύ των κόμβων. Στο παράδειγμά μας ο κόμβος 7 θα στέλνει προς όλους τα πακέτα με τη μέθοδο της πλημμύρας αλλά οι μόνοι κόμβοι που θα μπορούν να τα λάβουν είναι οι 1 και 2, οι υπόλοιποι θα τα απορρίπτουν αμέσως. Έτσι ο κόμβος 7 έχει 2 διαδρομές στη διάθεσή του για την επικοινωνία με την πύλη και με αυτό τον τρόπο επετεύχθη η δημιουργία πολλαπλών μονοπατιών και επιπλέον η επικοινωνία με πλημμύρα είναι ελεγχόμενη μέσα σε ένα καθορισμένο εύρος για την αποφυγή της υπερβολικής προώθησης πακέτων.

3° Κεφάλαιο

3.1 Μηχανισμός Εξοικονόμησης Ενέργειας των Κόμβων

Οι ασύρματοι αισθητήρες των δικτύων συνήθως έχουν ως βασική παροχή ενέργειας τις μπαταρίες. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται πιο συχνά είναι οι τύποι AA και AAA. Η διαφορά αυτών των δύο τύπων μπαταριών είναι πως ο τύπος AA έχουν μεγαλύτερη ισχύ και χρησιμοποιούνται σε συσκευές μεγάλης ενεργειακής κατανάλωσης ενώ ο τύπος AAA χρησιμοποιείται σε συσκευές χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.[41] Η αλλαγή των μπαταριών των αισθητήρων σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον είναι μία δύσκολη διαδικασία, για αυτό το λόγο προτείνεται η χρήση μπαταριών μεγάλης διάρκειας με υψηλή ποιότητα.

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τα εξαρτήματα και καταστάσεις από τα οποία περνάει η ενέργεια μέσα σε ένα αισθητήρα.



Εικόνα 26: Η ενεργειακή ροή σε μια συσκευή αισθητήρα.

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων η ενέργεια καταναλώνεται σε διάφορα επίπεδα όπως η μετάδοση, η λήψη, η κατάσταση της ακρόασης (listening), η κατάσταση ύπνου (sleeping) και η άεργη κατάσταση (idle). Η ενεργειακή απόδοση και αποδοτικότητα των δεδομένων είναι οι δύο κύριοι περιορισμοί των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.[42] Για την ενεργειακή απόδοση των δικτύων έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές. Οι κυριότερες είναι οι παρακάτω.

Μείωση Δεδομένων: η συγκεκριμένη τεχνική στοχεύει στην μείωση των δεδομένων που παράγονται και μεταδίδονται.

Μείωση των γενικών εξόδων του πρωτοκόλλου: Η τεχνική αυτή προσπαθεί να αυξήσει την αποδοτικότητα του πρωτοκόλλου μειώνοντας τα γενικά έξοδά του. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: 1) προσαρμοστική περίοδος μετάδοσης που εξαρτάται από την σταθερότητα των ΑΔΑ ή την απόσταση την πηγή των πληροφοριών, 2) διασταύρωση επιπέδων με τα ανώτερα και κατώτερα επίπεδα να βελτιστοποιούν τους πόρους του δικτύου ενώ

εκπληρώνουν και τις απαιτήσεις των εφαρμογών και 3) βελτιστοποιημένη πλημμύρα με σκοπό της αποφυγής των αχρειαστων μεταδόσεων.

Ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση: Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης θα έπρεπε να σχεδιάζονται με στόχο την αύξηση της διάρκειας ζωής του δικτύου μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας με την απ' άκρη εις άκρη μετάδοση και αποφεύγοντας τους κόμβους με χαμηλό υπολειπόμενο ενέργειας. Κάποια πρωτόκολλα εκμεταλλεύονται την κινητικότητα των κόμβων ή την εκπομπή (broadcast) στις ασύρματες επικοινωνίες για να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση με την μετάδοση στον κόμβο sink. Άλλα χρησιμοποιούν γεωγραφικές συντεταγμένες για την δημιουργία μονοπατιών προς τον προορισμό. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης πολλαπλών μονοπατιών χρησιμοποιούν πολλαπλές διαδρομές για την εξισορρόπηση του φόρτου και να αποφύγουν τις ασταθείς διαδρομές.

Κύκλος καθηκόντων (Duty Cycle): Ο κύκλος καθηκόντων είναι το χρονικό διάστημα το οποίο οι κόμβοι είναι ενεργοί. Οι περίοδοι που οι κόμβοι είναι ενεργοί ή σε κατάσταση ύπνου πρέπει να είναι συντονισμένοι με τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Σε αυτή την τεχνική ο πομποδέκτης του αισθητήρα πέφτει σε κατάσταση ύπνου ή κατάσταση χαμηλής ισχύος όταν δεν υπάρχουν πακέτα για τον ίδιο ή που χρειάζεται να προωθήσει ο ίδιος. Ο εκάστοτε κόμβος εναλλάσσεται μεταξύ δύο καταστάσεων: της ενεργού και της ανενεργού καταστάσεως. Για αυτή την τεχνική υπάρχουν τρεις κατηγορίες: το σχήμα λειτουργίας κατ' απαίτηση, το σχήμα προγραμματισμένου «ραντεβού» και το ασύγχρονο σχήμα.

Έλεγχος της τοπολογίας: Αυτή η τεχνική έχει ως στόχο την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας με την προσαρμογή της ισχύς μετάδοσης διατηρώντας την συνδεσιμότητα του δικτύου.

Στην παρούσα υλοποίηση έχει επιλεχθεί να υλοποιηθεί το σχήμα προγραμματισμένου ραντεβού της τεχνικής κύκλου καθηκόντων. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτό το σχήμα και αυτή η τεχνική είναι ότι οι περισσότερες των υπολοίπων τεχνικών επεμβαίνουν στον τρόπο λειτουργίας της δρομολόγησης των πακέτων [43], [44], κάτι που ήταν αποτρεπτικό σε αυτή την περίπτωση. Επίσης είναι το μόνο σχήμα εκ των τριών της τεχνικής Duty Cycle που μπορεί να εφαρμοστεί σε πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν δρομολόγηση με εκπομπή broadcast.

Κύκλος Καθηκόντων - Σχήμα Προγραμματισμένου Ραντεβού (Duty Cycle – Scheduled Rendezvous Scheme)

Αυτό το σχήμα έχει ως αξίωμα ότι όλοι οι κόμβοι και οι γειτονικοί κόμβοι τους θα έχουν κάποιο χρόνο αφύπνισης. Αυτό εγγυάται ότι θα έχουν επικοινωνία μεταξύ τους σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Έπειτα, μέχρι την επόμενη στιγμή που θα χρειαστεί να επικοινωνήσουν μπαίνουν σε κατάσταση ύπνου (sleep mode). Σε αυτή την κατάσταση όταν ένας κόμβος είναι ενεργός αυτό σημαίνει ότι όλοι οι γειτονικοί του κόμβοι θα είναι ενεργοί. Τα πρωτόκολλα προγραμματισμένου ραντεβού διαφέρουν ανάλογα με την στρατηγική που χρησιμοποιούν για τις καταστάσεις αφύπνισης/ύπνου. Ένα παράδειγμα είναι το μοτίβο του πλήρη συγχρονισμού των κόμβων. Σε αυτό το μοτίβο οι χρονοθυρίδες για τις καταστάσεις αφύπνισης και ύπνου είναι σταθερές. Οι κόμβοι που θα αφυπνιστούν είναι καθορισμένοι καθώς ο χρόνος που θα παραμείνουν ενεργοί είναι επίσης

καθορισμένος και έπειτα επιστρέφουν στην κατάσταση ύπνου μέχρι την επόμενη φορά που θα χρειαστούν να επικοινωνήσουν. Λόγω της χαμηλής πολυπλοκότητας αυτής της τεχνικής είναι εύκολα εφαρμόσιμη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές υλοποιήσεις.

Σημαντικό κομμάτι στην όλη προσπάθεια εξοικονόμησης της ενέργειας των κόμβων αποτέλεσε η εύρεση ενός αποτελεσματικού τρόπου καταγραφής της δαπανούμενης ενέργειας για να καταστεί εφικτό η καταγραφή της ενεργειακής ροής στους κόμβους.

Η καταγραφή της ενέργειας που δαπανάται μπορεί να γίνει με τρεις βασικούς τρόπους: την μετάδοση πακέτων, την λήψη δεδομένων και την καταγραφή δεδομένων για τους σκοπούς που εγκαταστάθηκαν οι εκάστοτε αισθητήρες [45].

Για την καταγραφή της δαπανούμενης ενέργειας στην μετάδοση των πακέτων δεδομένων χρησιμοποιείθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$E_{tx} = (\alpha_3 + \alpha_4 d^\beta) \times L$$

Όπου L είναι το μήκος του πακέτου το οποίο μεταδίδει, το $\alpha_3 = 45$ nJ/bit, το $\alpha_4 = 10$ pJ/bit/m⁴, το d είναι η απόσταση μεταξύ του αποστολέα και του παραλήπτη και β είναι ο εκθέτης απώλειας διαδρομής.

Για την λήψη των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος:

$$E_{rx} = \alpha_2 \times L$$

Όπου $\alpha_2 = 135$ nJ/bit

Ενώ για την καταγραφή δεδομένων από τους αισθητήρες ο παρακάτω τύπος:

$$E_{se} = \alpha_1 \times L$$

Όπου $\alpha_1 = 50$ nJ/bit.

4^ο Κεφάλαιο

Σε αυτό κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα από την προσομοίωση του πρωτοκόλλου REALFLOW. Τα διαγράμματα που παρήχθησαν μέσω του MATLAB αναφέρονται στο ποσοστό παράδοσης των πακέτων στον προορισμό τους, την χρονοκαθυστέρηση των πακέτων, δηλαδή τη μέση χρονική διάρκεια παράδοσής τους από την στιγμή την οποία παρήχθησαν, και το ποσοστό της ενέργειας που εξοικονομήθηκε μέσω της τεχνικής Duty Cycle – Scheduled Rendezvous η οποία εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αρχικά θα πρέπει να δώσουμε κάποια χαρακτηριστικά του δικτύου που προσομοιώθηκε για να γίνουν πιο κατανοητά τα ποσοστά καθώς και τα διαγράμματα τα οποία θα παρατίθενται παρακάτω.

Η εν λόγω προσομοίωση περιλαμβάνει τρία σενάρια. Αυτό που αλλάζει μεταξύ των σεναρίων είναι ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο. Η πύλη προφανώς παραμένει μία και μοναδική και στα τρία σενάρια. Στο πρώτο σενάριο συμπεριλαμβάνονται 10 κόμβοι, στο δεύτερο 18 και στο τρίτο 30 κόμβοι. Κάθε δίκτυο αποτελείται από 50% κόμβους αισθητήρες και 50% κόμβους πραγματοποιητές (actuators).

Ακόμη πρέπει να αναφερθεί πως το πρωτόκολλο έχει προσομοιωθεί για δύο περιπτώσεις δρομολόγησης. Η πρώτη περίπτωση είναι αυτή στην οποία το πακέτα δεν έχουν κάποιο χρονικό όριο παράδοσης στον προορισμό τους και ονομάζεται Overall. Και στη δεύτερη περίπτωση έχουν χρονικό όριο το οποίο καθορίζεται ανάλογα από το σενάριο (δηλαδή τον αριθμό κόμβων) το οποίο προσομοιώνεται και ονομάζεται Deadline. Στην περίπτωση Deadline στο πρώτο σενάριο (10 κόμβοι) η παράμετρος $T_{refresh}$ που ορίζει το χρονικό όριο λαμβάνει την τιμή 250ms, στο δεύτερο σενάριο (18 κόμβοι) το $T_{refresh}$ λαμβάνει την τιμή 500ms και στο τρίτο σενάριο λαμβάνει την τιμή 1second.

Επιπλέον το κάθε σενάριο χωρίζεται σε δύο σενάρια στα οποία η διαφορά του έγκειται στην διαφορετική τιμή της παραμέτρου K_{max} , η οποία καθορίζει τον μέγιστο αριθμό γονέων που μπορεί να έχει ο κάθε κόμβος. Μία ενέργεια που επηρεάζει την δημιουργία των ποικίλων διαδρομών που θα δημιουργηθούν και συνεπώς την αποδοτικότητα της δρομολόγησης αλλά και την κατανάλωση των πόρων του δικτύου. Στο πρώτο από αυτά τα σενάρια η τιμή στο K_{max} ορίζεται ως 2 και στο δεύτερο ως 3.

Το εκάστοτε δίκτυο παράγεται με τυχαία τοποθέτηση των κόμβων μέσα σε μία έκταση 100m X 100m.

Τα δεδομένα που παράγονται από τους κόμβους έχουν ως μοναδικό παραλήπτη κάθε φορά την πύλη. Δεν επικοινωνούν μεταξύ τους οι κόμβοι, δηλαδή δεν ανταλλάζουν μηνύματα με τα οποία αναλαμβάνουν δράση οι actuators καθώς και δεν αναφέρονται οι αισθητήρες στους άλλους κόμβους αλλά μόνο στην πύλη.

4.1 Στατιστικά Ελέγχου Αποδοτικότητας του Πρωτοκόλλου REALFLOW

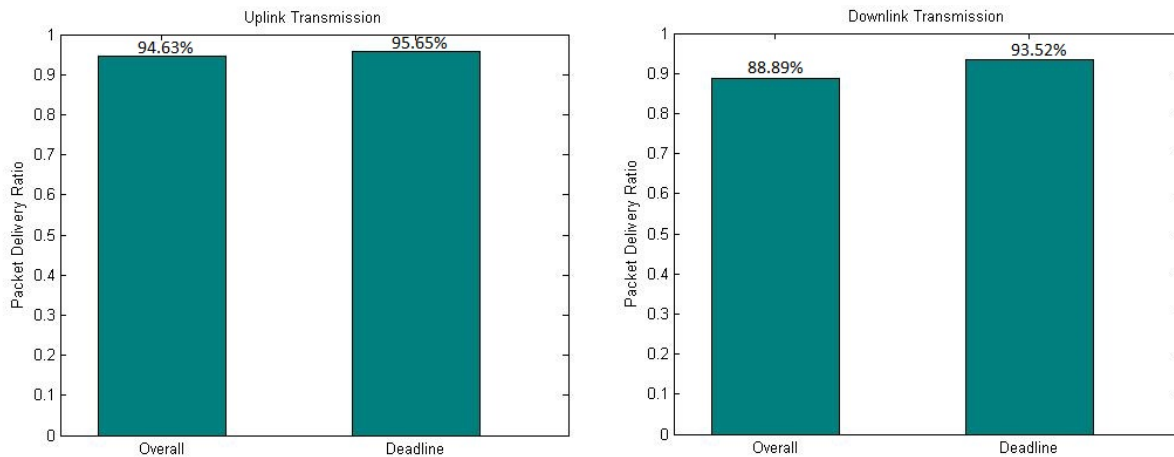
4.1.1 Σενάριο 1^ο

$$K_{\max} = 2 - 10 \text{ κόμβοι} - T_{\text{refresh}} = 250\text{ms}$$

Ποσοστό επιτυχών παραδόσεων των πακέτων – Packet Delivery Ratio (PDR)

Στο παρακάτω αριστερά διάγραμμα παρατηρούμε ότι το ποσοστό παράδοσης πακέτων στο ρεύμα ανόδου είναι υψηλό με ποσοστά 94,63% και 95,65% στην περίπτωση Overall και Deadline αντίστοιχα. Συγκεκριμένα στο Overall παραδόθηκαν τα 652 από τα 689 πακέτα που παρήχθησαν κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης ενώ στο Deadline τα 659 από τα 689.

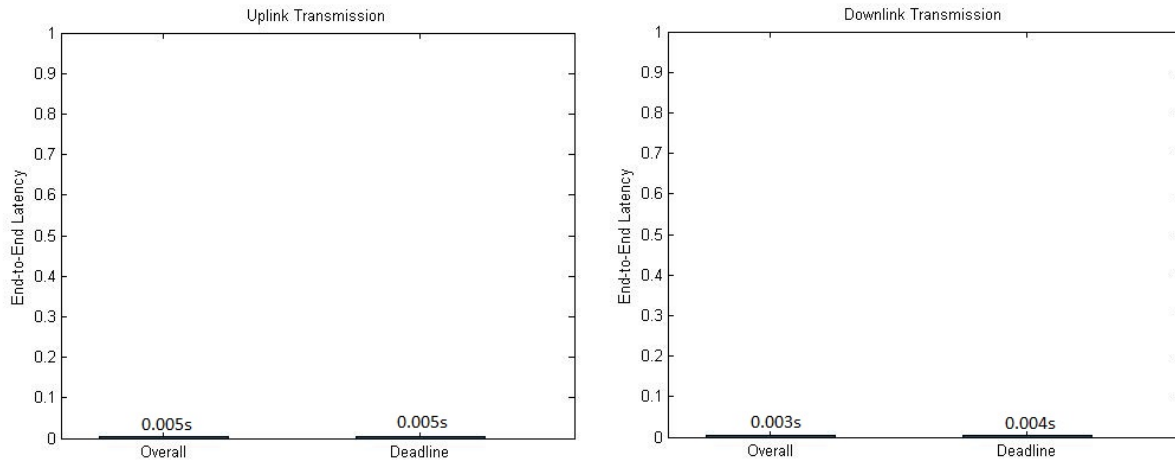
Το ίδιο υψηλά είναι τα ποσοστά και στο ρεύμα καθόδου στα δεξιά. Με ποσοστό 88,89% στο Overall και 93,52% στο Deadline. Συγκεκριμένα στο Overall παραδόθηκαν τα 96 από τα 108 και στο Deadline τα 101 από τα 108 πακέτα.



Εικόνα 27: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 1 - $K_{\max} = 2$

Χρονοκαθυστέρηση – Latency

Το αποτέλεσμα της χρονοκαθυστέρησης για το ρεύμα ανόδου στην περίπτωση του Overall είναι 0,005s ενώ στην περίπτωση του Deadline είναι επίσης 0,005s. Χρόνος ιδιαίτερα μικρός για ένα πολύ σημαντικό στατιστικό που επηρεάζει άμεσα τη βιωσιμότητα του δικτύου. Από την άλλη, στο ρεύμα καθόδου τα ποσοστά αυτά φαίνονται και στα παρακάτω διαγράμματα.

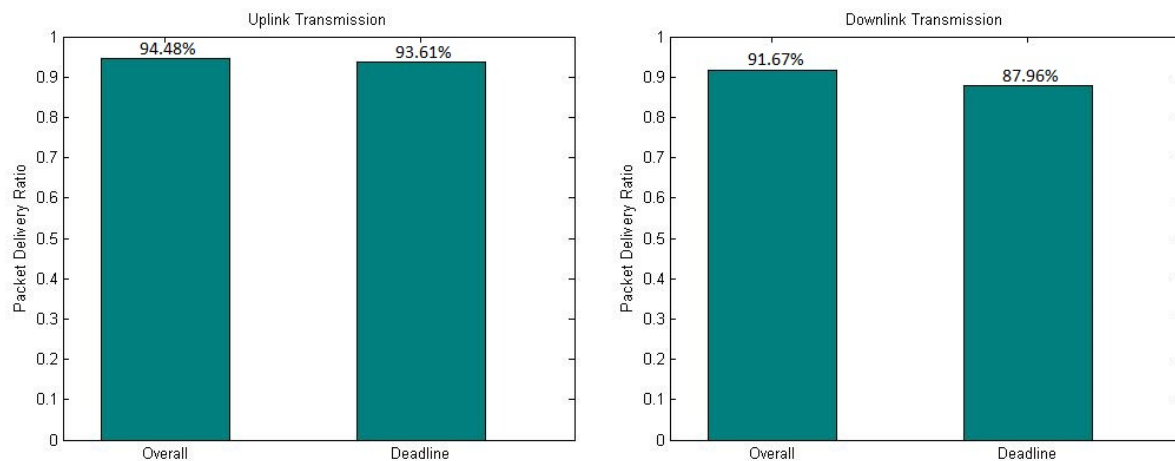


Εικόνα 28: Χρονακαυστέρηση - Σενάριο 1 - $K_{max}=2$

$K_{max} = 3 - 10$ κόμβοι - $T_{refresh} = 250ms$

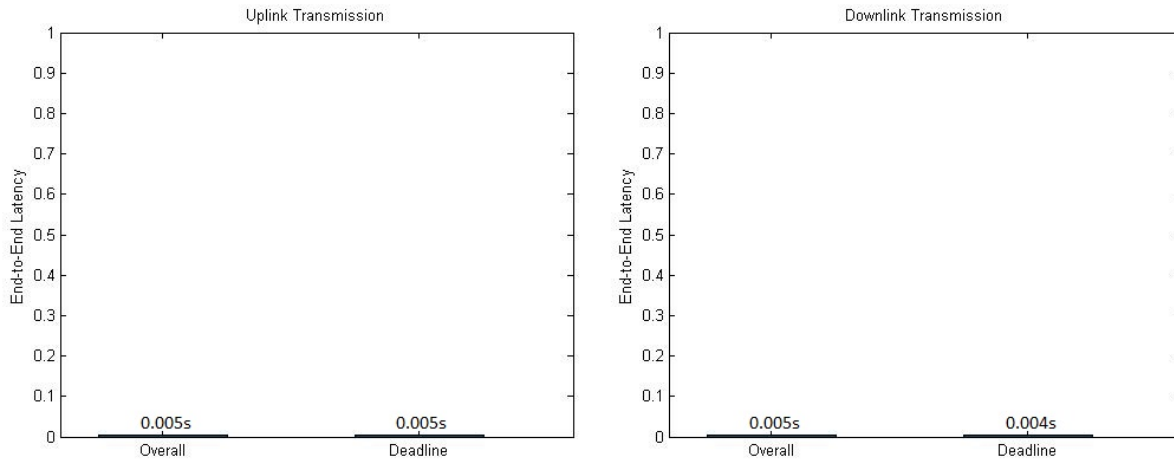
Ποσοστό επιτυχών παραδόσεων των πακέτων – Packet Delivery Ratio (PDR)

Τα υψηλά ποσοστά συνεχίζουν να εμφανίζονται και στην περίπτωση που η παράμετρος που ορίζει τον μέγιστο επιτρεπτό αριθμό γονέων αυξηθεί σε τρία. Στο αριστερό διάγραμμα του ρεύματος ανόδου πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε πως το ποσοστό παράδοσης πακέτων στην περίπτωση Overall είναι 94,48%, δηλαδή παραδόθηκαν τα 651 από τα 689 πακέτα, ενώ στο Deadline είναι 93,61%, παραδόθηκαν τα 645 από 689 πακέτα. Στο δεξιά διάγραμμα, του ρεύματος καθόδου, το ποσοστό στο Overall είναι 91,67% και είχαμε παράδοση των 99 από τα 108 πακέτων, εν αντιθέσει με το Deadline που το ποσοστό είναι 87,69%, και σε αυτή την περίπτωση παραδόθηκαν τα 95 από τα 108 πακέτα.



Εικόνα 29: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 1 - $K_{max} = 3$

Χρονοκαθυστέρηση – Latency



Εικόνα 30: Χρονοκαθυστέρηση - Σενάριο 1 - $K_{max}=3$

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα η χρονοκαθυστέρηση παραμένει σε ιδιαίτερα χαμηλό επίπεδο. Πιο ιδιαίτερα στο ρεύμα ανόδου η χρονοκαθυστέρηση είναι 0,005s και στις δύο περιπτώσεις Overall και Deadline. Στο ρεύμα καθόδου η τιμές της είναι 0,005s και 0,004s για τις περιπτώσεις Overall και Deadline αντίστοιχα.

Ως ένα πρώτο σχόλιο για το πρώτο σενάριο μπορούμε να πούμε πως το ποσοστό της παράδοσης των πακέτων στο προορισμό τους είναι ιδιαίτερα υψηλό και στις δύο περιπτώσεις όπου ο αριθμός των κόμβων γονέων αυξήθηκε από δύο (2) σε τρεις (3). Όσον αφορά την χρονοκαθυστέρηση (Latency) δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την αλλαγή αυτή και να παρουσιάζει και στις δύο περιπτώσεις χαμηλές τιμές.

4.1.2 Σενάριο 2^ο

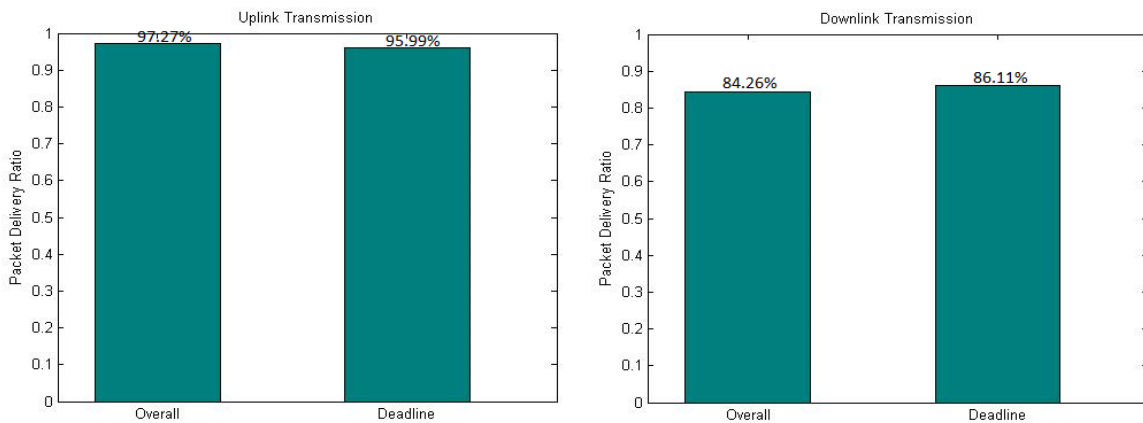
$$K_{max} = 2 - 18 \text{ κόμβοι} - T_{refresh} = 500ms$$

Ποσοστό επιτυχών παραδόσεων των πακέτων – Packet Delivery Ratio (PDR)

Στο δεύτερο σενάριο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο από δέκα (10) που ήταν προηγουμένως σε δεκαοχτώ (18). Σε αυτή την περίπτωση όμως αυξάνεται και το χρονικό κατώφλι από 250ms στα 500ms.

Από το παρακάτω διάγραμμα του ποσοστού παράδοσης πακέτων παρατηρούμε πως το ποσοστό έχει αυξηθεί στο ρεύμα ανόδου και στις δύο περιπτώσεις, Overall και Deadline, με ποσοστά 97,27% και 95,99 αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση (Overall) παραδόθηκαν τα 1213 πακέτα από τα 1247 ενώ στην δεύτερη (Deadline) από τα 1247 παραδόθηκαν τα 1197.

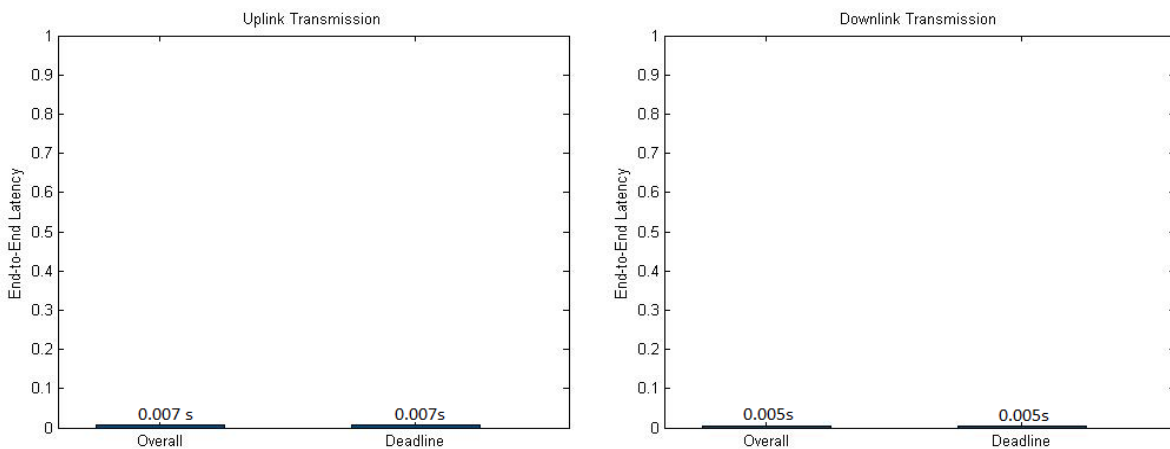
Αντίθετα στο ρεύμα καθόδου παρατηρείται μια πτώση του ποσοστού παράδοσης πακέτων με την περίπτωση Overall να καταγράφει ποσοστό 84,26% (91/108 πακέτα) και την περίπτωση Deadline 86,11% (93/108 πακέτα).



Εικόνα 31: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 2 - Kmax = 2

Χρονοκαθυστέρηση – Latency

Τα αποτελέσματα του διαγράμματος της χρονοκαθυστέρησης παρουσιάζουν μία πολύ μικρή αύξηση στο ρεύμα ανόδου στο δεύτερο σενάριο. Στο ρεύμα ανόδου καταγράφεται και για τις περιπτώσεις, Overall και Deadline, χρονοκαθυστέρηση 0,007s. Ενώ για το ρεύμα καθόδου 0,005s χρονοκαθυστέρηση και για τις δύο περιπτώσεις.



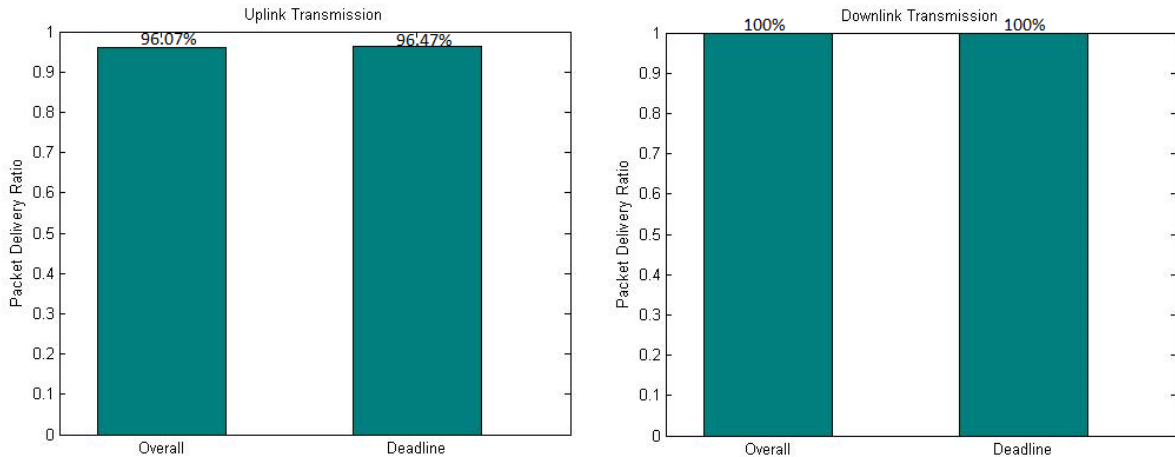
Εικόνα 32: Χρονοκαθυστέρηση - Σενάριο 2 - Kmax=2

$K_{\max} = 3 - 18$ κόμβοι - $T_{\text{refresh}} = 500\text{ms}$

Ποσοστό επιτυχών παραδόσεων των πακέτων – Packet Delivery Ratio (PDR)

Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε στην περίπτωση που αυξηθεί ο αριθμός των γονιών σε τρεις δεν διαφέρουν για το ρεύμα ανόδου αλλά στο ρεύμα καθόδου παρατηρείται πολύ σημαντική αύξηση. Πιο συγκεκριμένα στο ρεύμα ανόδου σημειώνεται ποσοστό 96,07% (1198/1247 πακέτα) και 96.47% (1203/1247) για τις περιπτώσεις Overall και Deadline αντίστοιχα.

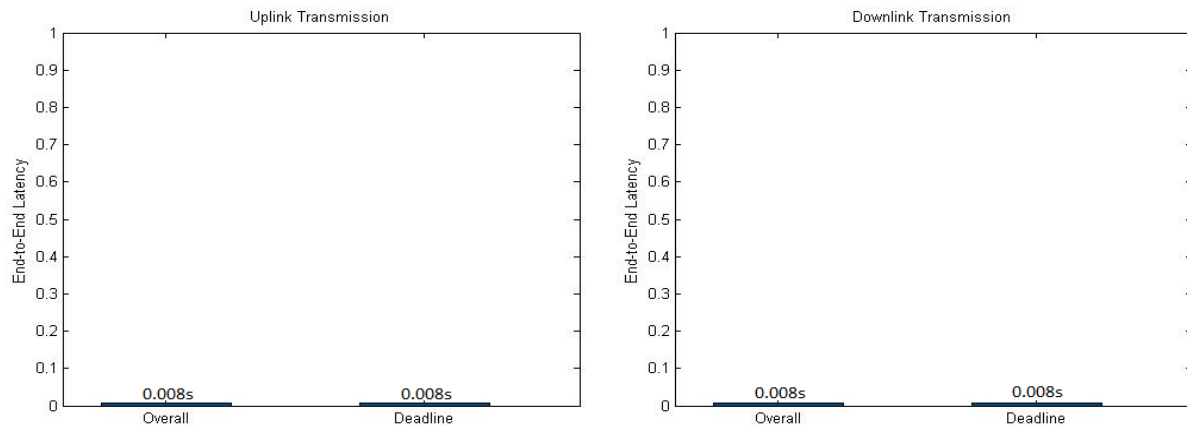
Στο ρεύμα καθόδου καταγράφεται ποσοστό 100% (108/108) και για τις δύο περιπτώσεις.



Εικόνα 33: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 2 - $K_{\max} = 3$

Χρονοκαθυστέρηση – Latency

Η τιμή της χρονοκαθυστέρησης όταν αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων γονέων δεν επηρεάζεται και παραμένει χαμηλή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση μάλιστα και στα δύο ρεύματα αλλά και στις δύο περιπτώσεις, Overall και Deadline, τείνει να είναι ίδια.



Εικόνα 34: Χρονοκαθυστέρηση - Σενάριο 2 - $K_{\max}=3$

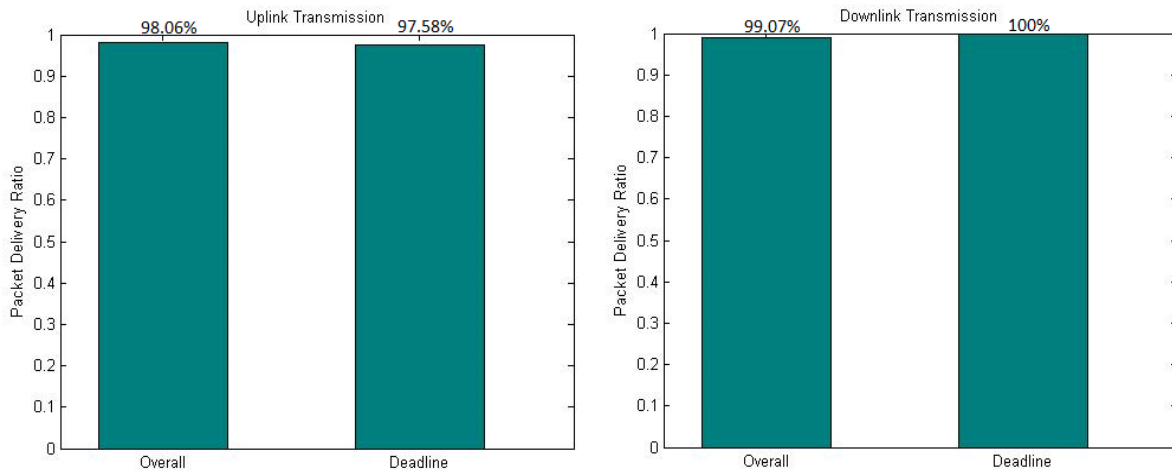
4.1.2 Σενάριο 3^ο

$K_{\max} = 2 - 30$ κόμβοι - $T_{\text{refresh}} = 1s$

Στο τρίτο σενάριο ο αριθμός των κόμβων αυξάνεται σε τριάντα (30) και το χρονικό κατώφλι σε 1s.

Ποσοστό επιτυχών παραδόσεων των πακέτων – Packet Delivery Ratio (PDR)

Στο τρίτο σενάριο λοιπόν στην πρώτη περίπτωση, στην οποία ο μέγιστος αριθμός των γονέων είναι δύο (2), στο ποσοστό παράδοσης πακέτων παρουσιάζει ελαφρώς πιο υψηλά ποσοστά. Στην κατάσταση Overall, στο ρεύμα ανόδου σημειώνεται ποσοστό 98,06% (2026/2066) ενώ στο ρεύμα καθόδου 99,07% (107/108). Στην κατάσταση Deadline το ποσοστό στο ρεύμα ανόδου είναι 97,58% (2016/2066) ενώ στο ρεύμα καθόδου 100% (108/108).

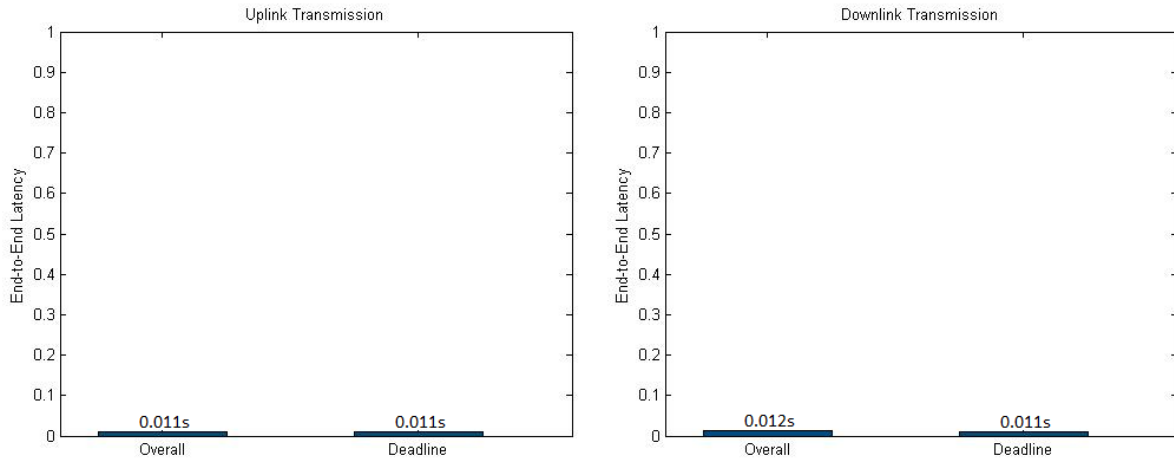


Εικόνα 35: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 3 - $K_{\max} = 2$

Χρονοκαθυστέρηση – Latency

Σχετικά με την χρονοκαθυστέρηση στο τρίτο σενάριο, και με περιορισμό στους δύο γονικούς κόμβους, από τα παρακάτω διάγραμμα συμπεραίνεται πως και σε αυτή την περίπτωση η χρονοκαθυστέρηση παραμένει σε χαμηλό επίπεδο. Παρατηρούμε βέβαια πως έχει ελαφρώς ανεβασμένες τιμές και αυτό οφείλεται στην αύξηση του αριθμού των κόμβων στο δίκτυο σε συνδυασμό με το γεγονός πως ο περιορισμός των γονικών κόμβων είναι κατά πως φαίνεται μικρός για αυτή την περίπτωση του σεναρίου.

Στο παρακάτω διάγραμμα συγκεκριμένα οι τιμές στην κατάσταση Deadline και στα δύο ρεύματα είναι 11ms, καθώς επίσης και στην κατάσταση Overall στο ρεύμα ανόδου, ενώ η κατάσταση Overall στο ρεύμα καθόδου έχει τιμή 12ms.

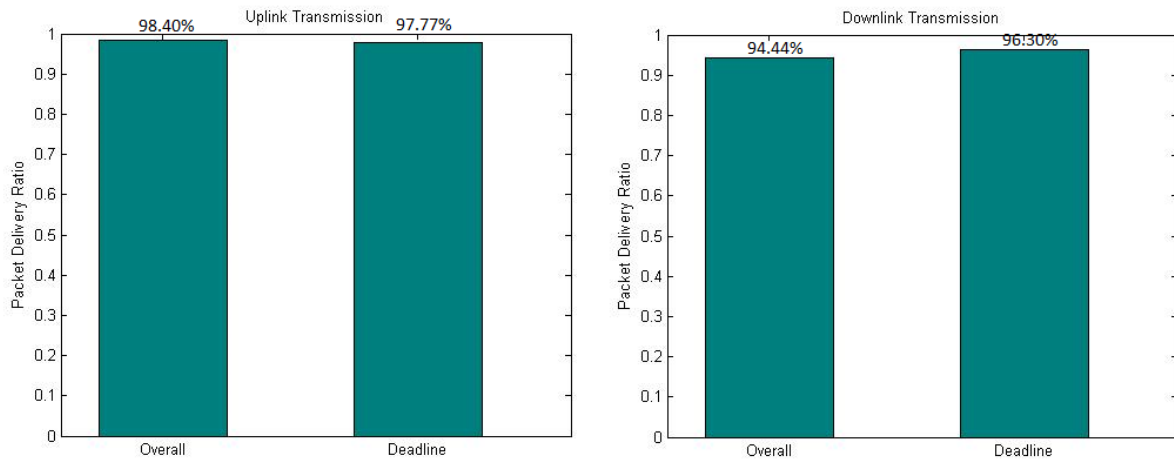


Εικόνα 36: Χρονακαθυστέρηση - Σενάριο 3 - $K_{max}=2$

$K_{max} = 3 - 30$ κόμβοι - $T_{refresh} = 1s$

Ποσοστό επιτυχών παραδόσεων των πακέτων – Packet Delivery Ratio (PDR)

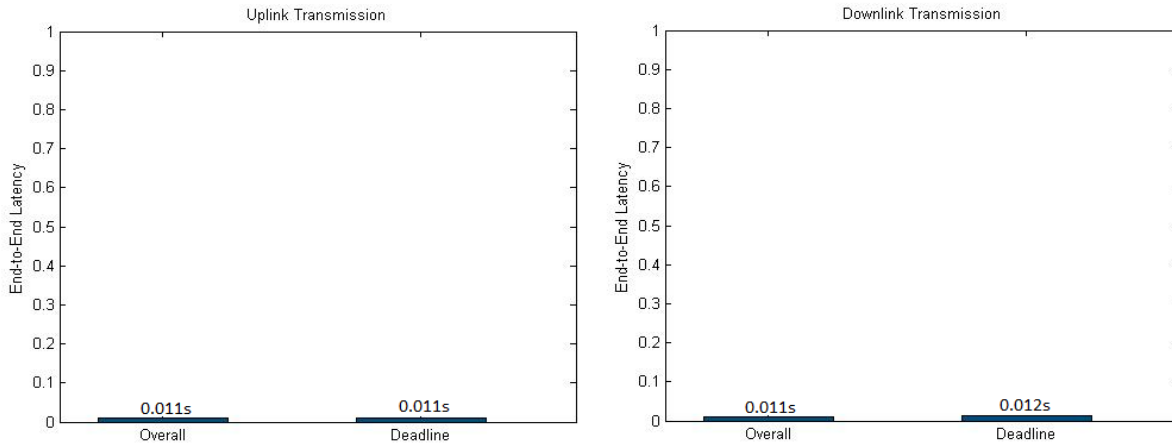
Στην δεύτερη περίπτωση του τρίτου σεναρίου, όπου ο περιορισμός των γονικών κόμβων αυξήθηκε σε τρεις κόμβους. Όπως, μαρτυρά και το παρακάτω διάγραμμα οι τιμές των ποσοστών επιτυχών μεταδόσεων είναι παραμένουν ιδιαίτερα υψηλές. Το ρεύμα ανόδου καταγράφει ποσοστά παράδοσης 98,40% και 97,77%, στις καταστάσεις Overall και Deadline αντίστοιχα. Αντίθετα στο ρεύμα καθόδου είναι ελαφρώς πιο μικρά τα ποσοστά, με 94,44% στο Overall και 96,30% στο Deadline.



Εικόνα 37: Ποσοστό παράδοσης πακέτων - Σενάριο 3 - $K_{max} = 3$

Χρονοκαθυστέρηση – Latency

Το τελευταίο διάγραμμα της προσομοίωσης, σχετικά με την δρομολόγηση, αναφέρεται στην χρονοκαθυστέρηση και αυτό που παρατηρούμε ότι οι τιμές τις και στα δύο ρεύματα, και στις δύο καταστάσεις, Overall και Deadline, παραμένουν σχεδόν αμετάβλητες. Με όλες τις περιπτώσεις να καταγράφουν 11ms εκτός της Deadline στο ρεύμα καθόδου που καταγράφει 12ms.



Εικόνα 38: Χρονοκαθυστέρηση - Σενάριο 3 - Kmax=3

Η συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων για την δραστηριότητα της δρομολόγησης, που παρουσιάστηκαν μέχρι αυτό το σημείο σε αυτό το κεφάλαιο, δεν μπορεί να δημιουργήσει κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο για το πώς επηρεάζουν την δρομολόγηση των πακέτων οι εκάστοτε αλλαγές που έγιναν για την παραγωγή των διαγραμμάτων και την καταμέτρηση της αποδοτικότητας της δρομολόγησης του πρωτοκόλλου. Αυτό που μπορεί όμως να αποτιμηθεί είναι το γεγονός πως το συγκεκριμένο πρωτόκολλο κατά γενικό κανόνα όταν αυξάνεται ο αριθμός των γονικών κόμβων, καθώς και όσο μεγαλώνει ο αριθμός των κόμβων μέσα στο δίκτυο τόσο πιο αποδοτικός γίνεται ο τρόπος δρομολόγησης των πακέτων που χρησιμοποιεί.

Σχετικά με την χρονοκαθυστέρηση η τιμές της, στα τρία σενάρια που ερευνήθηκαν, κυμαίνονται από 3ms έως 12ms. Όσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα του δικτύου, δηλαδή ο αριθμός των κόμβων του δικτύου, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η χρονοκαθυστέρηση. Παρόλα αυτά τα συγκεκριμένα νούμερα που μας έδωσε η προσομοίωση είναι πολύ πιο χαμηλά από άλλα πρωτόκολλα. Αυτό οφείλεται στην τεχνική μετάδοσης που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο REALFLOW. Το γεγονός πως δεν απασχολεί ένα κόμβο η αναζήτηση της κατάλληλης δρομολόγησης, ή μιας εκ νέου δρομολόγησης εφόσον κάποιος κόμβος βγει εκτός δικτύου, αλλά εκπέμπει (broadcast) ένα πακέτο προς τους υπόλοιπους κόμβους αυτομάτως εξοικονομεί πολύτιμο χρόνο στην διαδικασία προώθησης. Σε άλλα πρωτόκολλα που δεν χρησιμοποιούν έστω παρόμοια τεχνική στην προώθηση υπάρχει περίπτωση να καθυστερήσει ιδιαίτερα ο υπολογισμός μιας νέας διαδρομής και αυτό να οδηγήσει τα πακέτα στο να «λήξουν» και να απορριφθούν από τον παραλήπτη. Αυτό το γεγονός θα οδηγήσει και σε κατανάλωση επιπλέον πόρων. Ακόμη, η χαμηλή

χρονοκαθυστέρηση οφείλεται και στο γεγονός πως δεν χρειάζεται η ανταλλαγή μηνυμάτων για την ανανέωση πινάκων δρομολόγησης, καθώς δεν χρησιμοποιεί πίνακες δρομολόγησης.

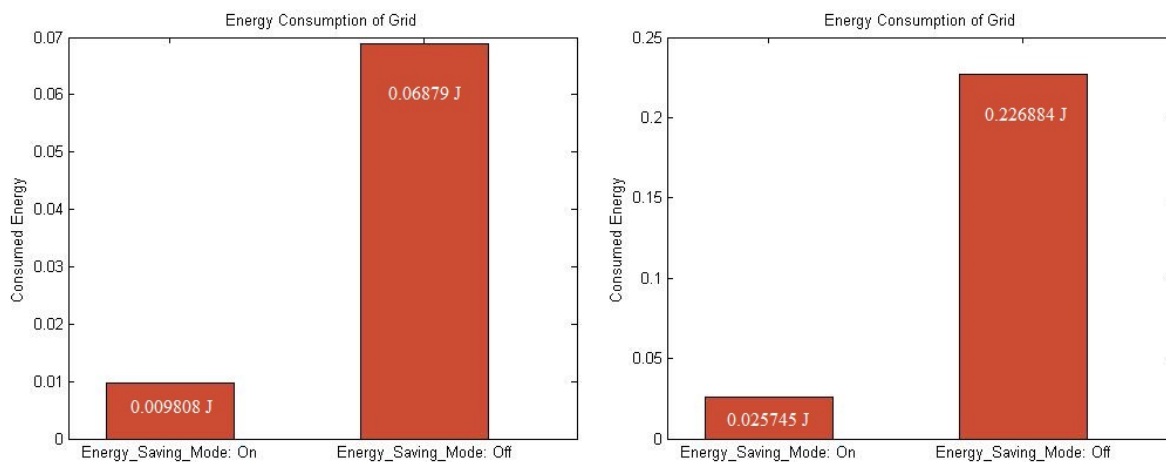
4.2 Στατιστικά Ελέγχου Αποδοτικότητας της Τεχνικής Εξοικονόμησης Ενέργειας

4.2.1 Σενάριο 1^ο

Στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε την ενεργειακή κατανάλωση σε ένα δίκτυο με δέκα κόμβους. Στην πρώτη περίπτωση (αριστερά) ο μέγιστος αριθμός των κόμβων γονέων είναι δύο (2) ενώ στη δεύτερη περίπτωση (δεξιά) είναι τρεις (3). Και οι περιπτώσεις έχουν προσομοιωθεί για τον ίδιο χρόνο. Η αρχική ενέργεια των κόμβων είναι 18720 Joules, η οποία ισοδυναμεί με δύο μπαταρίες AA.

Στην πρώτη περίπτωση η κατανάλωση με την τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας περιορίζεται στα 0,009808 Joule. Δηλαδή, σύμφωνα με την αρχική ενέργεια έχει καταναλωθεί μόλις το 0.000005%. Από την άλλη η υλοποίηση χωρίς την τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας παρουσιάζει κατανάλωση 0,06879 Joule, δηλαδή 0,000037%. Σε αυτή την περίπτωση η τεχνική εξοικονόμησης κατάφερε να περιορίσει την κατανάλωση σε ένα ποσό 7 φορές λιγότερο.

Στην δεύτερη περίπτωση που αυξάνονται οι γονείς των κόμβων, συνεπώς και ο όγκος των μηνυμάτων που καλείται πλέον να δρομολογήσει το πρωτόκολλο. Στην υλοποίηση με εφαρμογή της τεχνικής εξοικονόμησης ενέργειας το ποσό που κατανάλωσε είναι 0,025745 Joule, 0,000014%. Σε αντίθεση με την δεύτερη υλοποίηση που χωρίς την τεχνική εξοικονόμησης κατανάλωσε 0,226884 Joule, δηλαδή 0,000121%. Και στην δεύτερη περίπτωση λοιπόν η τεχνική περιορίσε την κατανάλωση κατά 0,000107% ή κατανάλωσε 8 φορές λιγότερη ενέργεια.



Εικόνα 39: Ποσό ενεργειακής κατανάλωσης - Σενάριο 1

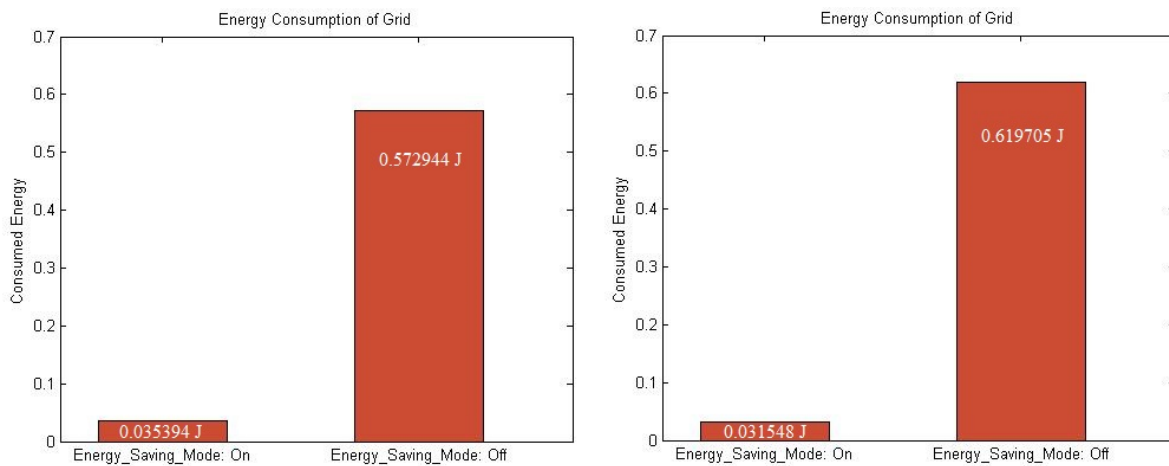
4.2.2 Σενάριο 2^ο

Στο δεύτερο, όπως και προηγουμένως στα διαγράμματα δρομολόγησης, αυτό που θα αλλάξει είναι ο αριθμός των κόμβων που εμπλέκονται στο δίκτυο. Από δέκα (10) αυξάνονται σε δεκαοχτώ (18).

Στο δεύτερο σενάριο, λοιπόν, όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς από τα παρακάτω διαγράμματα έχουμε και πάλι δύο περιπτώσεις διαφορετικών περιορισμών για τον μέγιστο επιτρεπτό αριθμό κόμβων γονέων.

Στην πρώτη περίπτωση όπου και ο μέγιστος αριθμός γονέων για ένα κόμβο είναι δύο (2), στην υλοποίηση με την τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας η συνολική κατανάλωση στο δίκτυο περιορίζεται στα 0,035394 Joule σε αντίθεση με αυτή που δεν εφάρμοσε την τεχνική και κατανάλωσε 0,572944 Joule. Το κέρδος σε αυτή την περίπτωση είναι πως η τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας κατανάλωσε 0.53755 Joule, τουτέστιν 15 φορές λιγότερη ενέργεια.

Στην δεύτερη περίπτωση όπου ο αριθμός των πιθανών γονέων αυξήθηκε σε τρεις (3) η κατανάλωση έχει την ίδια συμπεριφορά στο διαχωρισμό των υλοποιήσεων. Στην υλοποίηση που εφαρμόστηκε η υλοποίηση το ποσό που καταναλώθηκε είναι 0.031548 Joule. Εν αντιθέσει η υλοποίηση χωρίς τεχνική διατήρησης της ενέργειας κατανάλωσε 0,619705 Joule. Από τα ποσά αυτά προκύπτει πως η τεχνική διατήρησης της ενέργειας κατανάλωσε 19 φορές λιγότερη ενέργεια.

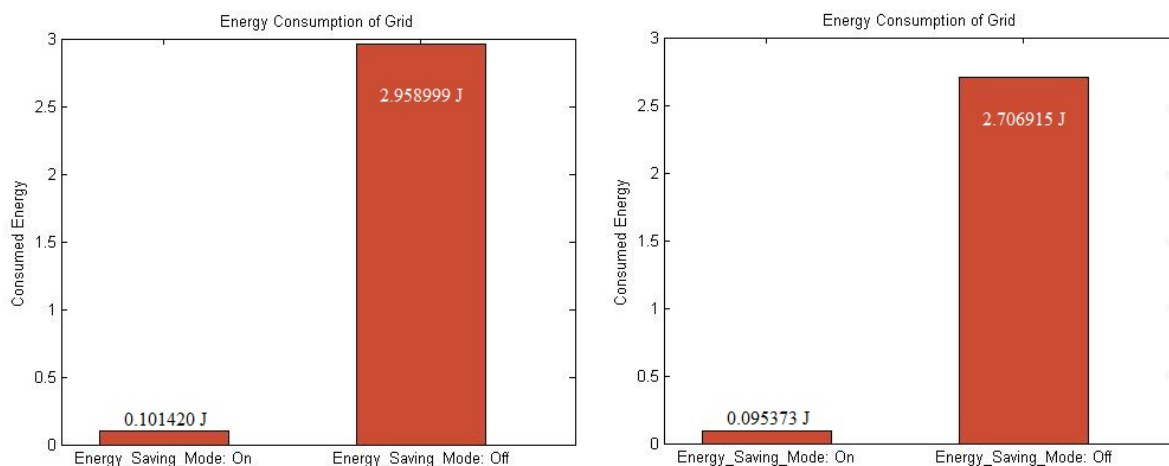


Εικόνα 40: Ποσό ενεργειακής κατανάλωσης - Σενάριο 2

4.2.3 Σενάριο 3^ο

Στο τρίτο σενάριο αυτό που αλλάζει επίσης είναι ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, από 18 στο δεύτερο σενάριο, τώρα ο αριθμός τους φτάνει τους τριάντα κόμβους.

Τα από αποτελέσματα που παρήχθησαν και για αυτό το σενάριο δεν διαφέρουν σε κάτι με τα προηγούμενα σενάρια, μόνο σαν απόλυτα ποσά διαφέρουν και αυτό εξηγείται από των αριθμό των κόμβων. Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση των μέχρι δύο γονέων τα ποσά κατανάλωσης έχουν ως εξής: 0.101420 Joule με εφαρμογή της τεχνικής και 2,958999 Joule χωρίς. Ενώ στην περίπτωση των 3 γονέων με την τεχνική η κατανάλωση ήταν 0.095373 Joule και χωρίς 2.706915 Joule. Και στις 2 περιπτώσεις η τεχνική εξοικονόμησης ενέργειας κατανάλωσε πάνω από 20 φορές λιγότερη ενέργεια σε σχέση με την σκέτη υλοποίηση.



Εικόνα 41: Ποσό ενεργειακής κατανάλωσης - Σενάριο 3

Το αποτέλεσμα της χρήσης της τεχνικής εξοικονόμησης Duty Cycle, του Σχήματος Προγραμματισμένου Ραντεβού των κόμβων, οδήγησε όχι μόνο στην διατήρηση της ενέργειας στο δίκτυο αλλά κράτησε την κατανάλωση σε πολύ χαμηλά επίπεδα ακόμη και στο τρίτο σενάριο όπου αυξήθηκαν οι απαιτήσεις.

Επίσης, μπορούμε να συμπεράνουμε από τα νούμερα που προέκυψαν ότι η κατανάλωση της ενέργειας των δικτύων επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον αριθμό των κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο, πόσο μάλλον σε ένα δίκτυο που υλοποιείται και λειτουργεί όπως το REALFLOW, με συνεχή προώθηση μηνυμάτων και μάλιστα με broadcast. Επιπλέον, στην περίπτωση των σεναρίων μας αυτό που φάνηκε να ανεβάζει την κατανάλωση είναι όταν ο μέγιστος αριθμός γονέων αυξανόταν, έστω κατά ένα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η αύξηση συνέβαλε

στον πολλαπλασιασμό των πακέτων που θα προωθούνται από και προς κόμβους που μέχρι πρότινος χρησιμοποιούσανε άλλα μονοπάτια για να επικοινωνήσουν.

Ως ένα γενικότερο συμπέρασμα μπορούμε αν πούμε ότι η τεχνική που επιλέχθηκε για την διατήρηση της ενέργειας στο δίκτυο ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματική και επιβεβαιώθηκαν οι ισχυρισμοί ότι πρόκειται για μια τεχνική που δουλεύει με πολύ αποδοτικό τρόπο σε δίκτυα που χρησιμοποιούν broadcast για την προώθηση και μετάδοση των πακέτων δεδομένων.

5^ο Κεφάλαιο

5.1 Παρουσίαση του κώδικα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των βασικών συναρτήσεων και γεγονότων που υλοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση του πρωτοκόλλου REALFLOW και της τεχνικής εξοικονόμησης ενέργειας των κόμβων του δικτύου.

Το REALFLOW όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυσή του στο Κεφάλαιο 3 χωρίζεται σε τέσσερα βήματα. Τα οποία δύο πρώτα είναι η αποστολή των μηνυμάτων list-updated από την πύλη προς τους κόμβους και των μηνυμάτων list-response τα οποία στέλνονται από τους κόμβους με προορισμό την πύλη. Η ολοκλήρωση του υπολογισμού της τοπολογίας του δικτύου γίνεται με τα μηνύματα list-confirmed που στέλνει η πύλη προς τους κόμβους για να τους ενημερώσει για τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η αποστολή των μηνυμάτων των κόμβων προς αυτή. Το τέταρτο και τελευταίο βήμα είναι η αποστολή και προώθηση των πακέτων δεδομένων από τους κόμβους προς την πύλη και το αντίστροφο.

Παρακάτω ακολουθεί η παρουσίαση και ανάλυση του κώδικα για το καθένα από αυτά τα βήματα.

Αρχικά δημιουργείται το δίκτυο με τυχαία τοποθέτηση των κόμβων στο χώρο και της πύλης πάντοτε στο κέντρο, όπως φαίνεται στον παρακάτω κώδικα.

```
%Εύρεση του κέντρου της δεδομένης έκτασης.
Node_Pos_X = floor( Grid_Height/2 );
Node_Pos_Y = floor( Grid_Width/2 );

%Τοποθέτηση της Gateway στο κέντρο της δεδομένης έκτασης.
[Grid,Grid_Connectivity] = Network_Range(Grid,Grid_Connectivity,Node_Pos_X,Node_Pos_Y,'G');

%Τοποθέτηση των κόμβων σε τυχαίες θέσεις
for i=1:Nodes
    Node_Pos_X = floor( rand*(Grid_Height-1)+1 );
    Node_Pos_Y = floor( rand*(Grid_Width-1)+1 );
    while Node_Pos_X == floor( Grid_Height/2 )
        Node_Pos_X = floor( rand*(Grid_Height-1)+1 );
    end
    while Node_Pos_Y == floor( Grid_Width/2 )
        Node_Pos_Y = floor( rand*(Grid_Width-1)+1 );
    end

    [Grid,Grid_Connectivity] = Network_Range(Grid,Grid_Connectivity,Node_Pos_X,Node_Pos_Y,i);
end

%Grid_Node_Distance : Οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων
Grid_Node_Distance = Node_Distance(Grid_Connectivity);
```

Στο τέλος της παραπάνω εικόνας ο βρίσκονται οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων με την προϋπόθεση ότι ένα κελί του πίνακα Grid, στον οποίο τοποθετήθηκαν οι κόμβοι, ισούται με ένα μέτρο.

Έπειτα στην από κάτω εικόνα φαίνεται η αποστολή των μηνυμάτων list-updated με τα οποία η πύλη ξεκινά των υπολογισμό της τοπολογίας. Η αποστολή αυτή είναι μέρος του προηγούμενου γεγονότος, της δημιουργίας του δικτύου.

```
%Grid_Node_Distance : Οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων
Grid_Node_Distance = Node_Distance(Grid_Connectivity);

for i=2:length(Grid_Node_Distance(:,1))
    Event_List(1,end+1) = 1;
    Event_List(2,end) = Time + Grid_Node_Distance(i,2)/(2*(10^8)) + 8/250000;
    Event_List(3,end) = 2;
    Event_List(4,end) = Grid_Node_Distance(i,1);
    Event_List(5,end) = 0;
    Event_List(6,end) = 0;
    Event_List(7,end) = 'G';
end
end
```

Στο επόμενο γεγονός είναι η λήψη των μηνυμάτων list-updated από τον εκάστοτε κόμβο.

Αρχικά γίνεται η αρχικοποίηση των παραμέτρων που χρειαζόμαστε.

```
%A_current : η διεύθυνση του παρόντος κόμβου
A_current = Event_List(4,1);
if A_current=='G'
    array_var = 1;
else
    array_var = A_current+1;
end
%r_pkt : η απόλυτη συσσωρευμένη τιμή RSSI
r_pkt = Event_List(5,1);
%h_pkt : ο αριθμός βήματος του πακέτου
h_pkt = Event_List(6,1);
%A_prt : η διεύθυνση του προηγούμενου κόμβου
A_prt = Event_List(7,1);
%h_node : ο αριθμός βημάτων μεταξύ του κόμβου και της gateway
h_node = H_Node(2,array_var);
```

Έπειτα συνεχίζοντας στο ίδιο γεγονός ξεκινά η διαδικασία της αναγνώρισης ενός μηνύματος list-updated και οι έλεγχοι για το αν θα γίνει δεκτό από τον κόμβο, αν θα συμπεριληφθεί ο κόμβος

από τον οποίο προέρχεται στο σημαντικό πίνακα δημιουργεί την εικόνα για τους γειτονικούς κόμβους για τον εκάστοτε κόμβο.

```

if r_link < T_link
    if h_pkt <= h_node
        r_pkt = r_pkt + r_link;
        if l==0
]
        for i=1:length(V(:,1))
            % Εφόσον δεν υπάρχει ήδη στον πίνακα V τότε προσθήθενται
            % οι παράμετροι A_prt, r_pkt και η ιδιότητα του
            % προηγούμενου κόμβου ως προς τον παρόντα. (γονέας ή αδερφός)
            if (V(i,array_var*3-2)>0 && i==length(V(:,1)))
                V(end+1,array_var*3-2) = A_prt;
                V(end,array_var*3-1) = r_pkt;
                if h_pkt == h_node
                    V(end,array_var*3) = 'S';
                elseif h_pkt < h_node
                    V(end,array_var*3) = 'P';
                    H_Node(2,array_var) = h_pkt + 1;
                end
                break
            elseif V(i,array_var*3-2)==0
                V(i,array_var*3-2) = A_prt;
                V(i,array_var*3-1) = r_pkt;
                if h_pkt == h_node
                    V(i,array_var*3) = 'S';
                elseif h_pkt < h_node
                    V(i,array_var*3) = 'P';
                    H_Node(2,array_var) = h_pkt + 1;
                end
                break
            end
        end
    end
end

```

Στη συνέχεια γίνεται η προώθηση των μηνυμάτων list-updated προς τους υπόλοιπους κόμβους.

```

%H αποστολή του μηνύματος list-update προς όλους τους κόμβους.
for i=2:length(Grid_Node_Distance(:,1))
    if Grid_Node_Distance(i,array_var*2-1) ~= 'G'
        Event_List(1,end+1) = 1;
        %Propagation delay + Transmission time.
        Event_List(2,end) = Time + Grid_Node_Distance(i,array_var*2)/(2*(10^8)) + 8/250000;
        Event_List(3,end) = 2;
        Event_List(4,end) = Grid_Node_Distance(i,array_var*2-1);
        Event_List(5,end) = r_pkt;
        Event_List(6,end) = h_pkt;
        Event_List(7,end) = A_prt;
    end
end

```

Το γεγονός αυτό κλείνει με το κλείσιμο των if που προηγήθηκαν και φυσικά με τα κατάλληλα μηνύματα να εμφανίζονται για την αναγνώριση της κάθε κίνησης κατά την εκτέλεση.

```

elseif h_pkt > h_node
    %Εάν ο προηγούμενος είναι έστω κατά ένα βήμα πιο μακριά από την
    %gateway τότε θεωρείται παιδί ως προς τον παρόντα και απορρίπτεται.
    fprintf('\nDrop! Node %d is Node-Child to Node %d\n',A_prt,A_current)
end
elseif r_link >= T_link
    %Εάν η τιμή του RSSI δεν περνάει το προκαθορισμένο κατώφλι απορρίπτεται
    %η σύνδεση με αυτό τον κόμβο.
    fprintf('\nDrop! Weak Signal Strength from Node %d to Node %d!\n',A_prt,A_current)
end
end

```

Έπειτα, κάθε φορά που ένας κόμβος λαμβάνει ένα list-updated μήνυμα εκτελεί τον κώδικα που ακολουθεί για να αποφασίσει σύμφωνα με τους περιορισμούς που έχει θέσει ο χρήστης του προγράμματος, εάν θα δεχθεί ένα κόμβο σαν γονέα ή ως αδερφό.

```

if C<=K_max
]   for i=2:length(V(:,1))
        if V(i,array_var*3)=='P'
            Relationship = 'P';
            A_prt = V(i,array_var*3-2);

            %Εφόσον η παράμετρος C δεν υπερβαίνει τον μέγιστο αριθμό των
            %γονέων που μπορεί να έχει ένα κόμβος προστίθεται ο
            %προηγούμενος κόμβος στους πίνακες N_src και N_parents.
            [N_src,N_parents] = N_SRC(N_src,N_parents,Relationship,A_current,A_prt);
        elseif V(i,array_var*3)=='S'
            Relationship = 'S';
            A_prt = V(i,array_var*3-2);

            %N_src table update.
            [N_src,N_parents] = N_SRC(N_src,N_parents,Relationship,A_current,A_prt);
        end
    end
end

```

Μπορεί όμως να δεχθεί ένα κόμβο και στην περίπτωση που έχει συμπληρώσει τον μέγιστο επιτρεπτό αριθμό κόμβων που θα έχει άμεση σύνδεση. Αυτό θα γίνει μόνο εάν η σύνδεση που θα του προσφέρει αυτός ο νέος κόμβος θα είναι πιο αξιόπιστη και σταθερή από τουλάχιστον μία άλλη από αυτές που έχει ήδη συμπεριλάβει. Ο τρόπος φαίνεται στον παρακάτω κώδικα.

```

elseif C > K_max
]   while C > K_max
      max = 0;
]   for i=2:length(V(:,1))
      if V(i,array_var*3)=='P'
          if (max < V(i,array_var*3-1))
              max = V(i,array_var*3-1);
              max_node = i;
          end
      end
      end
      V(max_node,array_var*3-2) = 0;
      V(max_node,array_var*3-1) = 0;
      V(max_node,array_var*3) = 0;
      C = C - 1;
  end
] for i=2:length(V(:,1))
  if V(i,array_var*3)~=0
      if V(i,array_var*3)=='P'
          Relationship = 'P';
          A_prt = V(i,array_var*3-2);

          %Προσθήκη του προηγούμενο κόμβου στους πίνακες N_src
          %και N_parents εφόσον το C είναι μεγαλύτερο της παραμέτρου
          %K_max ΚΑΙ το RSSI είναι καλύτερο από κάποιο άλλο κόμβο που
          %έχει ήδη στους πίνακες.
          [N_src,N_parents] = N_SRC(N_src,N_parents,Relationship,A_current,A_prt);
      elseif V(i,array_var*3)=='S'
          Relationship = 'S';
          A_prt = V(i,array_var*3-2);

```

Το γεγονός αυτό κλείνει με την αποστολή των μηνυμάτων list-response προς όλους ώστε να φτάσουν στην πύλη.

```

%Σε αυτό το σημείο ο κόμβος κάνει broadcast το μήνυμα list-response.
]for i=2:length(Grid_Node_Distance(:,1))
  counter=7;
  Event_List(1,end+1) = 2;
  %Propagation delay + Transmission time.
  Event_List(2,end) = Time + Grid_Node_Distance(i,array_var*2)/(2*(10^8)) + 8/250000;
  Event_List(3,end) = 2;
  Event_List(4,end) = Grid_Node_Distance(i,array_var*2-1);
  Event_List(5,end) = A_current;
  Event_List(6,end) = S_PKT(2,array_var);
  if length(N_fwd(:,1))>1
]   for j=2:length(N_fwd)
      Event_List(counter,end) = N_fwd(j,1);
      counter = counter + 1;
      Event_List(counter,end) = N_fwd(j,2);
      counter = counter + 1;
  end
  end
end
end
end

```

Το επόμενο γεγονός περιλαμβάνει όλους τους απαραίτητους ελέγχους κατά την λήψη ενός τέτοιου μηνύματος και αποφασίζει αν ο κόμβος από τον οποίο προήλθε θα συμπεριληφθεί στον πίνακα των σχετικών του κόμβων (L).

Στην αρχή γίνεται η αρχικοποίηση όλων των απαραίτητων παραμέτρων.

```

%V_current : το σύνολο των κόμβων γονέων και αδερφών του παρόντος κομβου
V_current = zeros(0,1);

%N_fwd : Αρχικοποίηση του πίνακα που θα περιέχει τους κόμβους που θα προωθηθεί
N_fwd = zeros(0,1);

%A_current : Η διεύθυνση του παρόντος κόμβου
A_current = Event_List(4,1);
if A_current=='G'
    array_var = 1;
else
    array_var = A_current+1;
end

%A_src : η πηγαία διεύθυνση του μηνύματος list-response message
A_src = Event_List(5,1);
%s_pkt : ο αριθμος ακολουθίας του μηνύματος
s_pkt = Event_List(6,1);
%N_fwd_indicator : Αποθήκευση ενός δείκτη για το επόμενο κόμβο ώστε να ξέρει
% σε ποια στήλη του πίνακα να αναζητήσει.
N_fwd(1,end) = A_src;
N_fwd(1,end+1) = s_pkt;

```

Αφού γίνουν οι απαραίτητοι έλεγχοι και εφόσον τηρούνται τα κριτήρια από τον κόμβο αποστολέα του list-response, τότε συμπεριλαμβάνεται στον πίνακα σχετικών κόμβων του παρόντος κόμβου

```

%Συμπλήρωση του πίνακα L. (Πίνακας Σχετικών Κόμβων)
for j=1:length(L(:,array_var))
    if L(j,array_var)==A_src
        break
    else
        if (length(L(:,1))==1 || (L(j,array_var)>0 && j==(length(L(:,1))))))
            L(end+1,array_var) = A_src;
            break
        elseif L(j,array_var)==0
            L(j,array_var) = A_src;
            break
        end
    end
end
end

```

Ο κόμβος τότε στέλνει το συγκεκριμένο μήνυμα προς όλους τους κόμβους που επικοινωνεί. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι να φτάσει στην πύλη.

Μόλις ληφθούν στην πύλη όλα τα list-response μηνύματα τότε, υπολογίζει την τοπολογία:

```

]while N~=0
]   for i=1:length(M)
]     for k=2:length(N_parents(1,:))
]       if M(i)~=N_parents(1,k)
]         for y=2:length(N_parents(:,1))
]           if M(i)==N_parents(y,k)

               %θέτει το Nk ως παιδί στο κόμβο Ni
               if M(i)=='G'
                 array_var = 1;
               else
                 array_var = M(i) + 1;
               end
]         for x=2:length(N_src(:,1))
]           if N_src(x,array_var*2-1)==0
]             N_src(x,array_var*2-1) = N_parents(1,k);
]             N_src(x,array_var*2) = 'C';
]             break;
]           elseif (N_src(x,array_var*2-1)>0 && x==length(N_src(:,1)))
]             N_src(end+1,array_var*2-1) = N_parents(1,k);
]             N_src(end,array_var*2) = 'C';
]             break;
]           end
]         end
]       end

N_parents(y,k) = 0;

%Ελέγχει εάν η στήλη αυτού του κόμβου στον πίνακα
%N_parents είναι άδεια, εάν είναι τότε το N
%μειώνεται κατά ένα.
empty = 0;
for j=2:length(N_parents(:,1))
  if N_parents(j,k)>0
    empty = 1;
  end
end
if empty == 0;
  N = N - 1;
end
%Ελέγχει αν αυτός ο κόμβος υπάρχει στον πίνακα M
%και δεν υπάρχει τότε προστίθεται.
exist = 0;
for j=1:length(M)
  if M(j)==N_parents(1,k)
    exist = 1;
  end
end
if exist==0
  M(end+1) = N_parents(1,k);
end

end
end

```


Αφού υπολογίσει την τοπολογία και προγραμματίσει τον τρόπο με τον οποίο θα μεταδίδουν οι κόμβοι στέλνει μηνύματα list-confirmation προς του κόμβους για να τους ενημερώσει.

Μόλις λάβει ένα τέτοιο μήνυμα ένας κόμβος και περάσει τους ελέγχους για τον προορισμό και το αν είναι διπλότυπο τότε ενημερώνεται ο κόμβος για τις στιγμές που θα μπορεί να επικοινωνήσει και για τυχόν αλλαγές που ίσως χρειαστεί να πραγματοποιήσει στους πίνακές του για το ποιους κόμβους θα εξυπηρετεί.

```
if A_current==A_dst
    if ((exist==1 && dst_H==1))
        for i=2:length(H(:,1))
            if (H(i,array_var*2-1)>0 && (i)==length(H(:,1)))
                H(end+1,array_var*2-1) = A_dst;
                H(end,array_var*2) = s_pkt;
                break
            elseif H(i,array_var*2-1)==0
                H(i,array_var*2-1) = A_dst;
                H(i,array_var*2) = s_pkt;
                break
            end
        end
    end
    fprintf('\nConfirmation Packet received from Node: %d!\n',A_dst)
    if mod(A_current,2)>0
        Allocation_counter = Allocation_counter + 1;
        for i=2:length(Timeslot_Allocation(:,1))
            if Timeslot_Allocation(i,1)==A_current

                Timeslot_Allocation(i,2) = Allocation_counter * (10^(-3));

                Event_List(1,end+1) = 3;
                Event_List(2,end) = Time;
                Event_List(3,end) = 3;
                Event_List(4,end) = A_current;
                Event_List(5,end) = Timeslot_Allocation(i,2);

                break
            end
        end
    end
end
```

Μετά από αυτό το στάδιο οι κόμβοι είναι έτοιμοι να επικοινωνήσουν και να προωθήσουν πακέτα μεταξύ τους.

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται είναι με τη χρήση χρονοθυρίδων, το πρόγραμμα των οποίων το έχει δώσει στο προηγούμενο βήμα. Οπότε οι κόμβοι όταν έρθει η χρονοθυρίδα τους εκπέμπουν (broadcast) το πακέτο δεδομένων που θέλουν να στείλουν στην πύλη και οι υπόλοιποι το προωθούν.

Ο τρόπος με τον οποίο δέχεται ένα πακέτο ένας κόμβος είναι σημαντικός καθώς επηρεάζει την βιωσιμότητα και την αξιοπιστία του δικτύου.

Λήψη πακέτου από την πύλη:

```
if A_current==A_dst
    % Λήψη πακέτου από την Gateway
    if ((A_current == 'G' && src_H==1))
        %Έλεγχος Πίνακα Ιστορικού και ενημέρωσή του.
    ]
        for i=2:length(H(:,1))
            if (H(i,array_var*2-1)>0 && (i)==length(H(:,1)))
                H(end+1,array_var*2-1) = A_src;
                H(end,array_var*2) = s_pkt;
                break
            elseif H(i,array_var*2-1)==0
                H(i,array_var*2-1) = A_src;
                H(i,array_var*2) = s_pkt;
                break
            end
        end
    end
    fprintf('\nPacket received from Gateway!\n')
    Uplink_Deliveries = Uplink_Deliveries + 1;
]
    for i=1:length(Uplink_Latency(1,:))
        if (Uplink_Latency(1,i) == A_src && Uplink_Latency(2,i) == s_pkt)
            Uplink_Latency(4,i) = Time;
        end
    end
end
```

Λήψη πακέτο από κόμβο:

```
    %Λήψη πακέτου από κόμβο
elseif ((exist==1 && dst_H==1))
]
    for i=2:length(H(:,1))
        if (H(i,array_var*2-1)>0 && (i)==length(H(:,1)))
            H(end+1,array_var*2-1) = A_dst;
            H(end,array_var*2) = s_pkt;
            break
        elseif H(i,array_var*2-1)==0
            H(i,array_var*2-1) = A_dst;
            H(i,array_var*2) = s_pkt;
            break
        end
    end
end
    fprintf('\nPacket received from Node: %d!\n',A_dst)
    Downlink_Deliveries = Downlink_Deliveries + 1;
]
    for i=1:length(Downlink_Latency(1,:))
        if (Downlink_Latency(1,i) == A_src && Downlink_Latency(2,i) == s_pkt)
            Downlink_Latency(4,i) = Time;
        end
    end
end
end
```

Εάν κατά τη λήψη ενός πακέτου ο κόμβος αποφασίσει ότι δεν προορίζεται για αυτόν θα πρέπει να το αποθηκεύσει, εφόσον περάσει τους ελέγχους των παραμέτρων, και να το μεταδώσει μόλις έρθει η σειρά του.

Η παρακάτω διαδικασία είναι αυτή που ακολουθεί ένας κόμβος για ένα πακέτο που προέρχεται από την πύλη με προορισμό ένα κόμβο, ώστε να το αποθηκεύσει σε κάποιο buffer.

```

if A_src == 'G'%Ελεγχος αν προέρχεται από την Gateway
    if dst_L == 1%Ελεγχος της λίστας σχετικών κόμβων
        if dst_H == 1%Ελεγχος του πίνακα ιστορικού
            if T_age < T_refresh%Ελεγχος του χρονικού κατωφλιού
                for i=2:length(H(:,1))
                    if (H(i,array_var*2-1)>0 && (i)==length(H(:,1)))
                        H(end+1,array_var*2-1) = A_dst;
                        H(end,array_var*2) = s_pkt;
                        break
                    elseif H(i,array_var*2-1)==0
                        H(i,array_var*2-1) = A_dst;
                        H(i,array_var*2) = s_pkt;
                        break
                    end
                end
                end
                Packets_of_Nodes(1,end+1) = A_current;
                Packets_of_Nodes(2,end) = A_src;
                Packets_of_Nodes(3,end) = A_dst;
                Packets_of_Nodes(4,end) = s_pkt;
                Packets_of_Nodes(5,end) = Time;
                Packets_of_Nodes(6,end) = Packet_Size;
                Node_Buffer(2,array_var) = Node_Buffer(2,array_var) + Packet_Size;
            else
                Expired_Packets = Expired_Packets + 1;
                fprintf('\nEXPIRED\n')
            end
        end
    end
end
end

```

Η αντίστοιχη διαδικασία γίνεται και για τα πακέτα που έρχονται από κόμβους με προορισμό την πύλη.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν συνοπτικά τα κυριότερα σημεία και γεγονότα που δημιουργήθηκαν για την προσομοίωση του πρωτοκόλλου REALFLOW.

Συμπεράσματα

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάλυση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται στο Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων και η επιλογή ενός από αυτά για την ανάπτυξη και προσομοίωση με το εργαλείο MATLAB. Το πρωτόκολλο που επιλέχθηκε είναι το REALFLOW. Ένα αξιόπιστο πρωτόκολλο για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων σε πραγματικό χρόνο. Ένα καινούριο πρωτόκολλο δρομολόγησης που δεν έχει αναλυθεί πλήρως από την ερευνητική κοινότητα αλλά ιδιαίτερα ελπιδοφόρο σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του αλλά και από τα πρώτα αποτελέσματα που προσφέρει στις όποιες ερευνητικές αναλύσεις του έχουν γίνει. Το REALFLOW λειτουργεί στο επίπεδο δικτύου και η μετάδοση των πακέτων δεδομένων γίνεται στο επίπεδο MAC. Ο πρώτος στόχος ήταν η εξαγωγή των αποτελεσμάτων που αναφέρονταν στην αρχική δημοσίευση και ο δεύτερος να παραχθούν ακόμη καλύτερα αποτελέσματα. Και οι δύο στόχοι στέφθηκαν με επιτυχία όπως φαίνεται και στο 4^ο Κεφάλαιο όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Με την ολοκλήρωση του κομματιού της προσομοίωσης επιλέχθηκε να ενισχυθεί το πρωτόκολλο με κάποια τεχνική εξοικονόμησης ή διατήρησης της ενέργειας των κόμβων του δικτύου. Η εύρεση της κατάλληλης τεχνικής ήταν ένα κομμάτι που παρουσίασε δυσκολία καθώς οι περισσότερες τεχνικές που υπάρχουν επηρεάζουν τον τρόπο δρομολόγησης των πακέτων μέσα σε ένα δίκτυο ή είναι πρωτόκολλα δρομολόγησης που στοχεύουν στην διατήρηση της ενέργειας του δικτύου. Τελικά, επιλέχθηκε η τεχνική Duty Cycle, και πιο συγκεκριμένα το σχήμα Προγραμματισμένων Ραντεβού μεταξύ των κόμβων. Η συγκεκριμένη τεχνική συνεργάζεται πολύ καλά με το πρωτόκολλο REALFLOW καθώς δεν επηρεάζει την δρομολόγηση καθόλου και μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε πρωτόκολλα που οι κόμβοι τους εκπέμπουν προς όλους κάθε φορά (broadcast). Η κεντρική ιδέα του συγκεκριμένου σχήματος είναι οι κόμβοι να μεταβαίνουν σε κατάσταση ύπνου (sleep mode) όταν δεν χρειάζονται και σε κατάσταση αφύπνισης (awake mode) όταν χρειάζονται. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ενθαρρυντικά όπως φαίνονται και αυτά επίσης στο 4^ο Κεφάλαιο.

Τελικώς, αυτό που μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα είναι πως το πρωτόκολλο REALFLOW λόγω του τρόπου που χρησιμοποιεί για να διαμορφώσει το δίκτυό του καθώς και ο τρόπος με τον οποίο δρομολογεί τα πακέτα του, το κάνουν να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό σε ένα περιβάλλον όπως αυτό μίας βιομηχανικής μονάδας, σταθερό όσον αφορά την αποδοτικότητά του, με μικρές τιμές κατανάλωσης ενέργειας, εύκολα υλοποιήσιμο και με εύκολη διαχείριση.

Μελλοντικές Επεκτάσεις

Είναι γνωστό πως τα Βιομηχανικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και γενικότερα η ιδέα του Βιομηχανικού Διαδικτύου των πραγμάτων βρίσκονται στην αρχή της εξέλιξής τους. Βρισκόμαστε ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης και βελτιστοποίησης των προϊόντων αυτού του τομέα, και απέχουμε δύο με τρία χρόνια από την ευρεία αποδοχή τους στον βιομηχανικό τομέα καθώς και την εγκατάσταση αυτών των συστημάτων στην πλειοψηφία των βιομηχανικών μονάδων.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο θα μπορούσαν να γίνουν οι κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε να μπορεί να συμπεριλάβει στο δίκτυό του και κινητές συσκευές, κάτι που θα του έδινε ιδιαίτερη ώθηση καθώς θα μπορούσε να αξιοποιήσει περισσότερα δεδομένα με αυτό τον τρόπο καθώς και αυξήσει το εύρος των εφαρμογών με τις οποίες μπορεί να συνεργαστεί. Το πιο σημαντικό όμως είναι να γίνει μια πραγματική υλοποίηση του πρωτοκόλλου δρομολόγησης, σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον και να αξιολογηθεί σε πραγματικές συνθήκες. Η εγκατάστασή και η καταγραφή των επιδόσεών του σε ένα πραγματικό περιβάλλον είναι πολύ σημαντικό για την εξέλιξή του καθώς και την ανάπτυξή του.

Βιβλιογραφία

- [1] White Paper, “Internet of Things: Wireless Sensor Networks”, International Electrotechnical Commission, Switzerland 2014.
- [2] Technical Paper, “Series Y.2000: NEXT GENERATION NETWORKS, Applications of Wireless Sensor Networks in Next Generation Networks”, International Telecommunication Union, February 2014.
- [3] Industry Agenda, “Industrial Internet of Things: Unleashing the Potential of Connected Products and Services”, WORLD ECONOMIC FORUM, January 2015.
- [4] Jouni Tervonen, Ville Isoherranen and Marjo Heikkila, “ A review of the cognitive capabilities and data analysis issues of the future industrial Internet-of-Things, Cognitive Infocommunications (CogInfoCom), October 2015.
- [5] Vangelis Gazis, Alessandro Leonardi, Kostas Mathioudakis, Konstantinos Sasoglou, Panayotis Kikiras and Raghuram Sudhaakar, “Components of fog computing in an industrial internet of things context”, SECON Workshops, June 2015.
- [6] Suhel Dhanani, Sr. Principal MT, “INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS (IIOT) NAD ITS IMPACT ON THE DESIGN OF AUTOMATION SYSTEMS”, Control and Automation Strategic Marketing, Maxim Integrated, 2014
- [7] C. P. Kruger and G. P. Hancke, “Implementing the Internet of Things vision in industrial wireless sensor networks”, Industrial Informatics (INDIN), July 2014
- [8] White Paper | WP007, “Wireless Sensor Networks for the Industrial Internet of Things”, LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION, 2015
- [9] A. Ajith Kumar S., Knut Ovsthus, Lars M. Kristensen, “An Industrial Perspective on Wireless Sensor Networks – A Survey of Requirements, Protocols, and Challenges”, IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS, 2014.
- [10] Abdullah Al-Yami, Wajih Abu-Al-Saud, Farrukh Shahzad, “Simulation of Industrial Wireless Sensor Network (IWSN) protocols”, 2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), April 2016.
- [11] Stig Petersen, Simon Carlsen, “WirelessHART Versus ISA100.11a: The Format War Hits the Factory Floor”, IEEE Industrial Electronics Magazine (Volume: 5, Issue: 4, Dec. 2011).
- [12] Gilbert Habib, Nicolas Haddad and Ralph El Khoury, “Case study: WIRELESSHART vs ZIGBEE network”, Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE), May 2015.
- [13] IEEE Computer Society, “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – PART 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) – IEEE Std 802.15.4TM – 2011”, IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2011

- [14] Ketan Devadiga, “IEEE 802.15.4 and the Internet of Things”, Aalto University School of Science.
- [15] Pedram Radman, Alex Talevski, Stig Petersen and Simon Carlsen, “Comparison of Industrial WSN Standards”, 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (IEEE DEST 2010).
- [16] Mark Nixon, “A Comparison of WirelessHART and ISA100.11.a”, White Paper: Comparison of WirelessHART and ISA100.11.a, September 23, 2012.
- [17] Priya Asher, Ujala Daswani, “An Overview of Zigbee Specifications and its Industrial Applications”, International Journal of Science and Research (IJSR) – ISSN (Online):2319-7064 Index Copernicus Value (2013): 6.14 | Impact Factor (2013): 4.438
- [18] Jose A. Gutierrez, Edgar H. Callaway and Raymond L. Barrett, “Introduction to WirelessHART”, Wiley-IEEE Standards Association, 2007.
- [19] Igor Konocalov, “A Framework for WirelessHART Simulations”, Swedish Institute of Computer Science, SICS Technical Report T2010:06 ISSN 1100-3154, June 15, 2010.
- [20] Deji Chen, Mark Nixon, Song Han, Aloysius K. Mok and Xiuming Zhu, “WirelessHART and IEEE 802.15.4e”, Industrial Technology (ICIT), March 2014.
- [21] Jose A. Gutierrez, Edgar H. Callaway and Raymond L. Barrett, “The WirelessHART Network”, Wiley-IEEE Standards Association, 2007.
- [22] Jose A. Gutierrez, Edgar H. Callaway and Raymond L. Barrett, “WirelessHART Security”, Wiley-IEEE Standards Association, 2007.
- [23] Marcelo Nobre, Ivanovitch Silva and Luiz Affonso Guedes, “Routing and Scheduling Algorithms for WirelessHART Networks: A Survey”, Sensors 2015, 15, 9703-9740; doi:10.3390/s150509703, ISSN 1424-8220.
- [24] Jian Ma, Hongchao Wang, Dong Yang, and Yujun Cheng, “Challenges: From Standards to Implementation for Industrial Wireless Sensor Networks”, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2016, Article ID 3898535, December 2015.
- [25] Hongyu Pei Breivold and Kristian Sandström, “Internet of Things for Industrial Automation -- Challenges and Technical Solutions”, Data Science and Data Intensive Systems (DSDIS), December 2015.
- [26] Vehbi C. Gungor, Member, IEEE, and Gerhard P. Hancke, Senior Member, IEEE, “Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principals, and Technical Approaches”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 56, NO. 10, OCTOBER 2009.

- [27] Jean Michel Winter and Carlos Eduardo Pereira, “Coexistence aware for WirelessHART networks”, 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), July 2014.
- [28] Ahmad-Reza Sadeghi, Christian Wachsmann and Michael Waidner, “ Security and privacy challenges in industrial Internet of Things”, Design Automation Conference (DAC), June 2015.
- [29] Sheela S. J., Suresh K.V. and Deepaknath Tandur, “Security of Industrial Wireless Sensor Networks: A review”, 2015 International Conference on Trends in Automation, Communications and Computing Technology (I-TACT-15), December 2015.
- [30] Milan Erdelj, Nathalie Mitton, Enrico Natalizio. Applications of Industrial Wireless Sensor Networks. Vehbi C_ a_gr_ G• ung• or and Gerhard P. Hancke. Industrial Wireless Sensor Networks: Applications, Protocols, and Standards, CRC Press, 2013. <hal-00788629>
- [31] P. Brizzi, D. Conzon, H. Khaleel, R. Tomasi, C. Pastrone, A. M. Spirito, M. Knechtel, F. Pramudianto, P. Cultrona,” Bringing the Internet of Things along the manufacturing line: A case study in controlling industrial robot and monitoring energy consumption remotely”, Emerging Technologies & Factory Automation (ETFAs), September 2013.
- [32] Mert Bal, “An industrial Wireless Sensor Networks framework for production monitoring”, 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), June 2014
- [33] Amal Tiab and Louiza Boualouche-Medjkoune, “Routing in Industrial Wireless Sensor Networks: A Survey”, Hindawi Publishing Corporation, Chinese Journal of Engineering, Volume 2014, Article ID 579874.
- [34] Zafar Iqbal, Kiseon Kim, Heung-No Lee, “A Cooperative Wireless Sensor Network for Indoor Industrial Monitoring”, IEEE Transactions on Industrial Informatics (Volume: PP, Issue: 99), September 2016.
- [35] Manish Kumar, Itika Gupta, Sudarshan Tiwari, Rajeev Tripathi, “A Comparative Study of Reactive Routing Protocols for Industrial Wireless Sensor Networks”, 2010.
- [36] G. Chaitanya Kumar Reddy, Mohd. ShahbazKan, “EARQ: Energy Aware Routing Protocol for Real-Time and Reliable Communication in Wireless Industrial Sensor Networks”, International Journal of Advanced Technology and Innovative Research, ISSN 2348-2370, Vol.01, Issue.01, January 2009.
- [37] Berta Carballido Villaverde, Susan Rea, Dirk Pesch, “InRout – A QoS Aware Route Selection Algorithm for Industrial Wireless Sensor Networks”, Preprint submitted to Ad Hoc Networks, October 2012.
- [38] Wu Yi-Zhi, Quan Dong-Ping and Han Han-guang, “Pareto Optimal Collection Tree Protocol for industrial monitoring WSNs”, 2011 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), December 2011.

- [39] Kan Yu, Mikael Gidlund, Johan Akerberg and Mats Bjorkman, “Reliable RSS-based Routing Protocol for Industrial Wireless Sensor Networks”, IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, October 2012.
- [40] Kan Yu, Zhibo Pang, Mikael Gidlund, Johan Akerberg and Mats Bjorkman, “REALFLOW: Reliable Real-Time Flooding-Based Routing Protocol for Industrial Wireless Sensor Networks”, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2014, Article ID 936379, July 2014.
- [41] Naveen Garlapati and Mohammed Altaf Ahmed, “Evaluation of Power Conservation Algorithms in Industrial Wireless Sensor Networks”, Master’s Thesis, Electrical Engineering, School of Computing, Blekinge Institute of Technology, October 2012.
- [42] Ridha Soua, “Wireless Sensor Networks in Industrial Environment: Energy Efficiency, Delay and Scalability”, PhD Thesis, University Pierre Et Marie Curie, Paris, February 2014.
- [43] Nguyen Bach Long, Hak-Hui Choi and Dong-Seong Kim, “Energy-aware routing scheme in industrial wireless sensor networks for Internet of Things systems”, Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), September 2016.
- [44] Xianzhong Tian, Yi-Hua Zhu, Kaikai Chi, Jiajia Liu, Daqiang Zhang, “Reliable and Energy-Efficient Data Forwarding in Industrial Wireless Sensor Networks”, IEEE Systems Journal (Volume: PP, Issue: 99), August 2015.
- [45] Tran Dinh Hieu, Le The Dung and Byung-Seo Kim, “Stability-Aware Geographic Routing in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks”, Sensors 2016, 16, 696; doi: 10.3390/s16050696.