



**ΤΕΙ ΗΠΕΙΡΟΥ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε**

**ΠΜΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ & ΔΙΚΤΥΩΝ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ  
ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΕΚΤΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ  
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ**

Δημήτριος Χαρμής

Επιβλέπων: Γρηγόριος Δουμένης, Επίκουρος Καθηγητής

Άρτα, Φεβρουάριος, 2019



**ΤΕΙ ΗΠΕΙΡΟΥ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε**

**ΠΜΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Η/Υ & ΔΙΚΤΥΩΝ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΥΤΟΝΟΜΟΥΣ ΕΝΕΡΓΙΑ ΕΦΦΙΕΙΕΝΚΥ ΙΜΡΟΒΕΜΕΝΤ ΙΝ  
WIRELESS SENSOR NETWORKS USING LOW POWER WAKE UP  
RECEIVERS**

Δημήτριος Χαρμπής

Επιβλέπων: Γρηγόριος Δουμένης, Επίκουρος Καθηγητής

Άρτα, Φεβρουάριος, 2019

**ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΙΑΣ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ  
ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΕΚΤΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ  
ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ**

## **Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή**

Άρτα, 19-02-2019

### **ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ**

1. Επιβλέπων καθηγητής

Γρηγόριος Δουμένης,

Επίκουρος Καθηγητής

2. Μέλος επιτροπής

Ευριπίδης Γλαβάς

Καθηγητής

3. Μέλος επιτροπής

Φώτιος Βαρτζιώτης,

Καθηγητής Εφαρμογών

Ο Διευθυντής του ΠΜΣ

Χρυσόστομος Στύλιος,

Καθηγητής

Υπογραφή

©Χαρμής, Δημήτριος, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

## **Δήλωση μη λογοκλοπής**

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Χαρμής Δημήτριος

Υπογραφή

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα θερμά να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Δουμένη Γρηγόριο, τόσο για την καθοδήγηση που μου παρείχε, όσο και για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη της διάρκειας εκπόνησής της.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων κεντρίζουν ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον, τα τελευταία χρόνια, τόσο της επιστημονικής κοινότητας, όσο και της βιομηχανίας. Ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών, είναι οι περιορισμένοι πόροι που έχουν οι κόμβοι του ασύρματου δικτύου, με πιο σημαντικό τον πόρο της ενέργειας. Οι κόμβοι αυτοί έχουν περιορισμένη ενέργεια, η οποία προέρχεται συνήθως από την ύπαρξη μιας μικρής μπαταρίας με περιορισμένη διάρκεια ζωής. Σε πολλές περιπτώσεις επίσης, είναι δύσκολο να αντικατασταθεί ή να επαναφορτιστεί, κυρίως όταν πρόκειται για δίκτυα τα οποία είναι εγκατεστημένα σε δυσπρόσιτες ή απομακρυσμένες περιοχές. Δεδομένου αυτού του περιορισμού, αρκετές είναι οι προσπάθειες της επιστημονικής κοινότητας με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζονται και αναλύονται state of the art τεχνικές ενεργειακής αποδοτικότητας, οι οποίες αφορούν τη βελτιστοποίηση του ραδιοσυστήματος, την μείωση των μεταδιδόμενων δεδομένων, την δρομολόγηση πακέτων, τη διαχείριση των επικοινωνιών από ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα επιπέδου MAC, καθώς επίσης και τεχνικές εξόρυξης ενέργειας.

Το σημαντικότερο ωστόσο κομμάτι της διπλωματικής αυτής, αφορά σε μία νέα και αρκετά υποσχόμενη τεχνολογία, τους δέκτες (Wake Up Receivers – WuRs) χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Οι δέκτες αυτοί έχουν σαν στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας και την ενεργειακή αυτονομία των κόμβων, αντιμετωπίζοντας καταστάσεις άσκοπης κατανάλωσης ενέργειας, όπως οι καταστάσεις Idle Listening.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν έναν από τους υπό μελέτη δέκτες χαμηλής κατανάλωσης της βιβλιογραφία μας, παρουσιάζουμε μία μελέτη περίπτωσης, για ένα προτεινόμενο σύστημα, το οποίο συμβάλει σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία του συντονιστή, ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων τύπου STAR, το οποίο βασίζεται στο πρωτόκολλο 802.15.4. Πρόκειται για έναν κόμβο, ο οποίος έχει υψηλή κατανάλωση ενέργειας και αποτελεί τον πιο σημαντικό κόμβο ενός zigbee ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

**Λέξεις-κλειδιά:** Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, συντονιστής, κατανάλωση ενέργειας, duty cycle, δέκτης χαμηλής κατανάλωσης



## **ABSTRACT**

Wireless Sensor Networks are becoming the most interesting area of research both the scientific community and the industry in recent years. One of the basic features of these networks is the limited resources that their nodes have, with the source of energy being the most important of them. These nodes have limited power, usually due to the existence of a small battery with a limited life span. In many cases too, it is difficult for these to be replaced or recharged, especially when it comes to networks that are located in inaccessible or remote areas. Given this limitation, a lot of effort is being given by the scientific community to reduce energy consumption.

This diploma thesis presents and analyzes state-of-the-art energy efficiency techniques related to radio-optimization, data transfer reduction, packet routing, communication management from energy-efficient MAC protocols as well as techniques of energy mining.

The most important part of this diploma, however, concerns a new and promising technology, the low-power Wake Up Receivers (WuRs). These receivers are designed to provide energy efficiency and autonomy to the nodes, dealing with situations of unnecessary power consumption, such as Idle Listening.

Using one of the low power consumption receivers of our study, a case study is presented for a proposed system that contributes significantly to the coordinator's energy autonomy, in a STAR Wireless Sensor Network. It is a node that has high energy consumption demands and is the most important node of a Zigbee wireless sensor network.

**Keywords:** Wireless Sensor Network, Coordinator, Energy Consumption, Duty Cycle, Wake up Receiver

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	ix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	x
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	3
2. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων .....	4
2.1 Βασικές Έννοιες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων .....	4
2.1.1 Αίσθηση (Sensing) .....	4
2.1.2 Κόμβος Αισθητήρα (Sensor node).....	4
2.1.2.1 Επεξεργαστής – Μικροελεγκτής (Processor – Microcontroller) .....	5
2.1.2.2 Αποθήκευση – Μνήμη (Storage – Memory).....	6
2.1.2.3 Αισθητήρας (Sensor).....	6
2.1.2.4 Μετατροπέας Δεδομένων (Analog – Digital Converter) .....	6
2.1.2.5 Πομποδέκτης (Transceiver) .....	6
2.1.2.6 Μονάδα Ενέργειας (Power Unit) .....	6
2.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων .....	7
2.3 Αρχιτεκτονική .....	8
2.3.1 Φυσικό Στρώμα.....	9
2.3.2 Στρώμα Σύνδεσης Δεδομένων .....	9
2.3.3 Στρώμα Δικτύου.....	10
2.3.4 Στρώμα Μεταφοράς.....	10

2.3.5 Στρώμα Εφαρμογών.....	10
2.4 Πλάνα Διαχείρισης.....	10
2.5 Τύποι Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων .....	11
2.6 Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων .....	13
2.7 Περιορισμοί και Ζητήματα Σχεδίασης.....	15
2.8 Πρότυπα .....	18
2.8.1 IEEE 802.15.4 .....	19
2.8.2 Zigbee.....	21
2.8.3 Wireless Hart.....	22
2.8.4 ISA100.11a .....	23
2.8.5 6LoWPAN .....	24
3. Ενεργειακή Αποδοτικότητα .....	24
3.1 Κατανάλωση Ασύρματου Κόμβου .....	24
3.1.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Κατανάλωση Ενέργειας .....	26
3.1.1.1 Collisions .....	26
3.1.1.2 Idle Listening .....	27
3.1.1.3 Overhearing.....	27
3.1.1.4 Overhead (Protocol Overhead) .....	27
3.1.1.5 Over Emitting.....	27
3.2 Μηχανισμοί Ενεργειακής Αποδοτικότητας .....	28
3.2.1 Βελτιστοποίηση Ραδιοσυστήματος.....	29
3.2.1.1 Έλεγχος Ισχύος Μετάδοσης.....	30
3.2.1.2 Βελτιστοποίηση Διαμόρφωσης.....	31
3.2.1.3 Συνεργατική Επικοινωνία .....	31
3.2.1.4 Κατευθυντικές κεραιές.....	32
3.2.1.5 Έξυπνα Ραδιοσυστήματα (Cognitive Radios) .....	33
3.2.2 Μείωση Δεδομένων .....	35

3.2.2.1	Συνάθροιση Δεδομένων .....	35
3.2.2.2	Προσαρμοστική δειγματοληψία.....	36
3.2.2.3	Συμπίεση Δεδομένων .....	37
3.2.2.4	Κωδικοποίηση Δικτύου.....	38
3.2.2.5	Πρόβλεψη Δεδομένων .....	40
3.2.3	Ενεργειακά Αποδοτικές Τεχνικές Δρομολόγησης.....	41
3.2.3.1	Επικοινωνία Πολλαπλών Βημάτων .....	42
3.2.3.2	Επικοινωνία Ενός Βήματος.....	47
3.2.4	Εξόρυξη Ενέργειας.....	49
3.2.4.1	Περιβάλλον .....	50
3.2.4.2	Ασύρματη (RF) Εξόρυξη Ενέργειας.....	52
3.2.4.3	Μηχανική Ενέργεια.....	53
3.2.4.4	Ανθρώπινη Ενέργεια .....	54
4.	Ενεργειακά Αποδοτικά MAC Πρωτόκολλα & Wake-up Receivers.....	55
4.1	Duty Cycling .....	55
4.2	Ενεργειακά Αποδοτικά MAC πρωτόκολλα .....	61
4.2.1	Berkeley MAC - (B-MAC).....	63
4.2.2	X-MAC .....	65
4.2.3	RECEIVERINITIATED - MAC.....	67
4.2.4	WISE-MAC and Relative Extensions.....	69
4.3	Wake up Receivers - WuR.....	74
4.3.1	Wake up Receivers Classification.....	76
4.3.2	Ζητήματα Σχεδίασης Wake Up Receiver .....	79
4.3.3	Αποτελέσματα Έρευνας.....	80
5.	Βελτίωση ενεργειακής αυτονομίας του συντονιστή με χρήση δεκτών χαμηλής κατανάλωσης (WuRs) .....	85
5.1	Κατανάλωση ενέργειας σε STAR δίκτυο Zigbee .....	85

5.1.1 Κατανάλωση ενέργειας του end device κατά τη διάρκεια μίας μετάδοσης .....	88
5.1.2 Κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή κατά τη διάρκεια μίας λήψης ...	91
5.1.3 Κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή κατά τη διάρκεια μίας λήψης με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης. ....	93
5.1.4 Κατανάλωση ενέργειας του end device κατά τη διάρκεια μίας μετάδοσης με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης στην πλευρά του συντονιστή. ....	97
5.1.5 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του συντονιστή για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας .....	101
5.1.6 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του συντονιστή με χρήση WuR για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας.....	104
5.1.7 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του end device για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας .....	106
5.1.8 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του end device για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας .....	108
6. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία .....	110
6.1 Οφέλη στην Ενεργειακή Αυτονομία του Συντονιστή με χρήση WuR .....	110
6.2 Περιορισμοί του παραπάνω συστήματος με χρήση WuR .....	117
6.3 Μελλοντική Εργασία .....	118
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	120

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1:</b> <i>Ικανότητες γνωστικού ραδιοσυστήματος</i> .....	34
<b>Πίνακας 2:</b> <i>WISE-MACs offset schedule table</i> .....	70
<b>Πίνακας 3:</b> <i>Υλοποιήσεις συστημάτων WuR με range<math>\geq</math>30 μέτρων και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας</i> .....	84
<b>Πίνακας 4:</b> <i>Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας Συντονιστή χωρίς τη χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, σε μία ημέρα</i> .....	103
<b>Πίνακας 5:</b> <i>Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας Συντονιστή με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, σε μία ημέρα</i> .....	106
<b>Πίνακας 6:</b> <i>Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας End Device χωρίς τη χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης στην πλευρά του συντονιστή, σε μία ημέρα</i> .....	108
<b>Πίνακας 7:</b> <i>Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας End Device με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης στην πλευρά του συντονιστή, σε μία ημέρα</i> .....	110
<b>Πίνακας 8:</b> <i>Συνολική κατανάλωση ενέργειας συντονιστή / end device σε μία ημέρα</i> .....	110
<b>Πίνακας 9:</b> <i>Χρονική διάρκεια μίας λήψης / αποστολής και αντίστοιχη κατανάλωση</i> .....	111
<b>Πίνακας 10:</b> <i>Κατανάλωση ενέργειας του end device κατά τη διάρκεια μίας λήψης, με τη χρήση WuR και χωρίς τη χρήση, από την πλευρά του συντονιστή</i> .....	117

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1:</b> <i>Data Prediction Techniques</i> .....	41
<b>Σχήμα 2:</b> <i>Energy Efficient and Energy Balanced Routing Methods and Techniques</i> .....	42
<b>Σχήμα 3:</b> <i>Συστάδα Πολλαπλών Βημάτων</i> .....	43
<b>Σχήμα 4:</b> <i>Δέντρο Εξισορρόπησης Φορτίου Πολλαπλών Μονοπατιών</i> .....	45
<b>Σχήμα 5:</b> <i>Δέντρο Εξισορρόπησης Φορτίου Ενός Μονοπατιού</i> .....	47
<b>Σχήμα 6:</b> <i>Παράδειγμα Συστάδας ενός Βήματος</i> .....	49
<b>Σχήμα 7:</b> <i>Wake up Receiver Technologies Classification</i> .....	77
<b>Σχήμα 8:</b> <i>Point to Point σύνδεση μεταξύ συντονιστή και end device σε STAR WSN</i> .....	86
<b>Σχήμα 9:</b> <i>End Device initiated communication in zigbee non beacon mode</i> .....	87
<b>Σχήμα 10:</b> <i>Κατανάλωση συντονιστή σε κατάσταση LPM3 και WuR σε ενεργή κατάσταση</i> .	94

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1:</b> <i>Αρχιτεκτονική Αισθητήριου Κόμβου</i> .....	5
<b>Εικόνα 2:</b> <i>A typical Wireless Sensor Network</i> .....	8
<b>Εικόνα 3:</b> <i>Αρχιτεκτονική ασύρματων δικτύων αισθητήρων</i> .....	9
<b>Εικόνα 4:</b> <i>Τύποι Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων</i> .....	12
<b>Εικόνα 5:</b> <i>Classification of WSN Applications</i> .....	14
<b>Εικόνα 6:</b> <i>Taxonomy of WSN Applications</i> .....	14
<b>Εικόνα 7:</b> <i>WSN Constrain Designs</i> .....	16
<b>Εικόνα 8:</b> <i>Wireless Standards - Range and Data Rate</i> .....	19
<b>Εικόνα 9:</b> <i>IEEE 802.15.4 and Zigbee functional layers</i> .....	21
<b>Εικόνα 10:</b> <i>Wireless Sensor Node Subsystems</i> .....	25
<b>Εικόνα 11:</b> <i>Power Consumption of Node Subsystems</i> .....	25
<b>Εικόνα 12:</b> <i>Common Energy Efficiency Mechanisms</i> .....	29
<b>Εικόνα 13:</b> <i>Παραδείγματα επικοινωνίας με κατευθυντικές κεραιές</i> .....	33
<b>Εικόνα 14:</b> <i>Communication with and without Network Coding</i> .....	39
<b>Εικόνα 15:</b> <i>WSN Energy Harvesting Models</i> .....	50
<b>Εικόνα 16:</b> <i>Wireless Energy Harvesting Node</i> .....	53
<b>Εικόνα 17:</b> <i>Σύγχρονη περιοδική αφύπνιση κόμβου</i> .....	56
<b>Εικόνα 18:</b> <i>(a) Αρχικοποίηση επικοινωνίας από κόμβο πηγή (b) Αρχικοποίηση επικοινωνίας από κόμβο προορισμό</i> .....	58
<b>Εικόνα 19:</b> <i>Παράδειγμα επικοινωνίας με χρήση always on WuRx</i> .....	60
<b>Εικόνα 20:</b> <i>Παράδειγμα Επικοινωνίας με χρήση duty cycled WuRx</i> .....	61
<b>Εικόνα 21:</b> <i>Παράδειγμα Επικοινωνίας του πρωτοκόλλου B-MAC</i> .....	64
<b>Εικόνα 22:</b> <i>Λειτουργία πρωτοκόλλου X-MAC</i> .....	66
<b>Εικόνα 23:</b> <i>Ανταγωνισμός μεταξύ δύο αποστολέων στο X-MAC</i> .....	67
<b>Εικόνα 24:</b> <i>Αποστολή beacon ως ACK και παράλληλα ως απαίτηση για νέα παραλαβή δεδομένων</i> .....	68
<b>Εικόνα 25:</b> <i>Παράδειγμα Επικοινωνίας με σύγκρουση και back off window</i> .....	69
<b>Εικόνα 26:</b> <i>Επικοινωνία στο πρωτόκολλο RI-MAC</i> .....	69
<b>Εικόνα 27:</b> <i>Επικοινωνία στο πρωτόκολλο WISE-MAC</i> .....	70
<b>Εικόνα 28:</b> <i>Παράδειγμα μπουτλιαρίσματος σε Tree WSN</i> .....	72
<b>Εικόνα 29:</b> <i>Λειτουργία πρωτοκόλλου Extended WISE-MAC</i> .....	72

<b>Εικόνα 30:</b> Παράδειγμα κόμβου με υλοποίηση συστήματος WuR .....	75
<b>Εικόνα 31:</b> Παράδειγμα επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων που υλοποιούν μηχανισμό WuR .....	75
<b>Εικόνα 32:</b> Τυπική δομή ενός σήματος αφύπνισης του WuR.....	76
<b>Εικόνα 33:</b> Δομή πλαισίου δεδομένων επιπέδου MAC .....	90
<b>Εικόνα 34:</b> Δομή πλαισίου επιβεβαίωσης.....	90

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

<b>Διάγραμμα 1:</b> Στάδια και κατανάλωση ενέργειας του end device κατά τη διάρκεια μιας εκπομπής δεδομένων προς το συντονιστή .....	89
<b>Διάγραμμα 2:</b> Στάδια και κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή κατά τη διάρκεια μιας λήψης δεδομένων από το end device.....	92
<b>Διάγραμμα 3:</b> Στάδια και κατανάλωση ενέργειας συντονιστή και WuR κατά τη διάρκεια μιας λήψης δεδομένων από το end device .....	95
<b>Διάγραμμα 4:</b> Στάδια και κατανάλωση ενέργειας του End Device κατά τη διάρκεια μιας εκπομπής δεδομένων προς το συντονιστή ο οποίος χρησιμοποιεί δέκτη χαμηλής κατανάλωσης.....	99
<b>Διάγραμμα 5:</b> Κατανάλωση ενέργειας Συντονιστή κατά τη διάρκεια μίας λήψης .....	111
<b>Διάγραμμα 6:</b> Συνολική κατανάλωση ενέργειας συντονιστή σε μια περίοδο και για διαφορετικές περιόδους.....	112
<b>Διάγραμμα 7:</b> Συνολική κατανάλωση ενέργειας συντονιστή στη διάρκεια μίας ημέρας για διαφορετικές περιόδους δειγματοληψίας .....	113
<b>Διάγραμμα 8:</b> Μέση Ισχύς του Συντονιστή για διαφορετικές περιόδους λήψης πακέτου... 116	



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα, το έξυπνο δίκτυο, τα έξυπνα σπίτια, τα έξυπνα δίκτυα ύδρευσης, οι έξυπνες μεταφορές είναι συστήματα υποδομής που συνδέουν τον κόσμο μας περισσότερο από ότι πιστεύαμε ποτέ. Το κοινό όραμα αυτών των συστημάτων συνδέεται συνήθως με μια ενιαία έννοια, το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), όπου μέσω της χρήσης αισθητήρων, ολόκληρη η φυσική υποδομή συνδέεται στενά με τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών και μπορεί να επιτευχθεί έξυπνη παρακολούθηση και διαχείριση μέσω της χρήσης δικτυακών ενσωματωμένων συσκευών. Σε ένα τόσο εξελιγμένο δυναμικό σύστημα, οι συσκευές διασυνδέονται για να μεταδίδουν χρήσιμες πληροφορίες μέτρησης και οδηγίες ελέγχου μέσω δικτύων κατανεμημένων αισθητήρων. Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN) είναι ένα δίκτυο που αποτελείται από μεγάλο αριθμό κόμβων αισθητήρων όπου κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με αισθητήρα για την ανίχνευση φυσικών φαινομένων όπως το φως, τη θερμότητα, την πίεση κλπ. Τα WSN θεωρούνται ως μια επαναστατική μέθοδος συλλογής πληροφοριών για τη δημιουργία πληροφοριών συστημάτων που βελτιώνει σημαντικά την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων υποδομής. Σε σύγκριση με την ενσύρματη λύση, τα WSN διευκολύνουν την ανάπτυξη και την ευελιξία των συσκευών. Με την ταχεία τεχνολογική εξέλιξη των αισθητήρων, οι WSNs καθίστανται η βασική τεχνολογία για το Διαδίκτυο

Το ζήτημα της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, αποτελεί το πιο “hot” ζήτημα στην σχεδίαση και ανάπτυξη ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Η περιορισμένη ενέργεια ενός κόμβου, καθορίζει και τη διάρκεια ζωής του ενώ η περιορισμένη ενέργεια πολλών κόμβων που συνθέτουν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, καθορίζουν τη διάρκεια ζωής ολόκληρου του δικτύου. Το ενεργειακά πιο απαιτητικό κομμάτι ενός ασύρματου κόμβου, είναι ο ραδιοπομπός του, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία και παραλαβή/λήψη πακέτων. Για παράδειγμα, ο πολύ γνωστός ραδιοπομπός CC2420 της Texas Instruments, καταναλώνει 18.8mA, όταν βρίσκεται σε κατάσταση λήψης (RX), ενώ περίπου την ίδια κατανάλωση έχει όταν βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας (idle listening).

Η κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση αδράνειας (Idle Listening), είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες σπατάλης ενέργειας σε ένα τέτοιο δίκτυο, διότι στην κατάσταση αυτή ο κόμβος απλά “ακούει” το κανάλι για πιθανή επικοινωνία, χωρίς να λαμβάνει ή να αποστέλλει πακέτα. Ένας δεύτερος, εξίσου σημαντικός παράγοντας

σπατάλης ενέργειας, είναι το overhearing. Σε κατάσταση overhearing βρίσκονται οι κόμβοι που λαμβάνουν πακέτα ενώ δεν προορίζονται για αυτούς, λόγω της broadcast φύσης της επικοινωνίας.

Μια από τις πιο σύνηθες τεχνικές που υιοθετούνται για την αντιμετώπιση των παραπάνω παραγόντων σπατάλης ενέργειας, είναι το duty cycling. Με τον μηχανισμό αυτό ο κόμβος ξυπνάει για λίγο, ανά χρονικά διαστήματα, “ακούει” το κανάλι για πιθανή επικοινωνία και ξαναπέφτει σε κατάσταση ύπνου. Ένα χαμηλό duty cycle μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας του κόμβου ενώ παράλληλα δημιουργεί καθυστερήσεις. Από την άλλη πλευρά, ένα υψηλό duty cycle ανταποκρίνεται καλύτερα σε υψηλά φορτία με κόστος την αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας.

Αρκετά MAC πρωτόκολλα, έχουν υιοθετήσει τον μηχανισμό αυτό με στόχο την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Κάποια από αυτά είναι σύγχρονα ενώ άλλα ψευδο-ασύγχρονα. Τα σύγχρονα MAC πρωτόκολλα, παράλληλα με το duty cycling, απαιτούν και ένα είδος συγχρονισμού στο δίκτυο, γεγονός που το επιβαρύνει με συνεχείς ανταλλαγές πακέτων συγχρονισμού (δημιουργία overhead). Οι συνεχείς ανταλλαγές πακέτων συγχρονισμού, δημιουργούν μια πολυπλοκότητα στο δίκτυο, κάνοντάς τα μη προσαρμοστικά σε αλλαγές, ενώ παράλληλα οδηγούν σε αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας.

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μια στροφή σε πιο ασύγχρονες μορφές επικοινωνίας, με τα ψευδο-ασύγχρονα πρωτόκολλα να κατέχουν σημαντική θέση σε υλοποιήσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Τα ψευδο-ασύγχρονα MAC πρωτόκολλα, που υιοθετούν μηχανισμό duty cycling, είναι πιο προσαρμοστικά σε αλλαγές, αφαιρώντας παράλληλα την πολυπλοκότητα και το overhead των σύγχρονων πρωτοκόλλων. Ακόμη και σε αυτά ωστόσο, οι καταστάσεις idle listening και overhearing αποτελούν ζητήματα προς μελέτη, μιας και οι κόμβοι συνεχίζουν να ξυπνάνε ανά διαστήματα, “ακούγοντας” το κανάλι για πιθανή επικοινωνία.

Μια σχετικά νέα και αρκετά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία βασίζεται σε μια καθαρά ασύγχρονη μορφή επικοινωνίας, είναι οι Wake up Receivers (WuR). Η συγκεκριμένη τεχνολογία στοχεύει να μειώσει τις καταστάσεις αδράνειας του παραδοσιακού duty cycling ή ακόμη και να τις εξαλείψει μειώνοντας παράλληλα και τις καταστάσεις overhearing με τη χρήση τεχνικών διευθυνσιοδότησης. Βασικό χαρακτηριστικό των WuR, είναι η ύπαρξη ενός δεύτερου ραδιοπομπού, ο οποίος θα

καταναλώνει πολύ λιγότερη ενέργεια, σε σχέση με τον βασικό ραδιοπομπό. Ο ραδιοπομπός αυτός θα είναι υπεύθυνος να ελέγχει το κανάλι για πιθανή επικοινωνία, ενώ ο βασικός θα βρίσκεται μόνιμα σε κατάσταση “ύπνωσης”, όταν δεν υπάρχουν πακέτα προς παραλαβή, καταναλώνοντας σχεδόν μηδενική ενέργεια.

## 1.1 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο κεφάλαιο 2 αυτής της εργασίας παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες των ασύρματων δικτύων αισθητήρων και πιο συγκεκριμένα αναλύονται τα δομικά στοιχεία ενός κόμβου αισθητήρα και η έννοια της αίσθησης σε ένα τέτοιο δίκτυο. Στη συνέχεια μπαίνουμε σε μεγαλύτερη ανάλυση και μελετάμε την αρχιτεκτονική και τα δομικά στοιχεία του ίδιου του κόμβου, δηλαδή, τον επεξεργαστή, τη μνήμη, τον αισθητήρα, τον μετατροπέα και τον πομποδέκτη. Πιο κάτω αναλύεται η αρχιτεκτονική και τα στρώματα του δικτύου τα οποία δεν διαφέρουν πολύ από αυτά των παραδοσιακών δικτύων. Επίσης γίνεται παρουσίαση των πλάνων διαχείρισης όπου γίνεται λόγος για Power, Mobility, Task και QoS Management. Τέλος, παρουσιάζονται οι τύποι WSN δικτύων, οι εφαρμογές τους, τα πρότυπα και γίνεται ανάλυση των περιορισμών σχεδιάσής τους.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται εκτενής ανάλυση ενός από τους πιο σημαντικούς περιορισμούς των πόρων ενός κόμβου, αυτού της περιορισμένης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά και ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν τη κατανάλωση του κόμβου και στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται οι μηχανισμοί ενεργειακής αποδοτικότητας.

Στο κεφάλαιο 4 αρχικά παρουσιάζεται το duty cycling, το οποίο μετά από έρευνα που διεξήχθη στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, φαίνεται να είναι μια από τις σημαντικότερες τεχνικές (έως τώρα), για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του κόμβου στα εν λόγω δίκτυα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται μερικά από τα πιο σημαντικά ενεργειακά αποδοτικά ψευδό – ασύγχρονα MAC πρωτόκολλα όπως το B-MAC, το X-MAC και λοιπά, τα οποία επίσης είναι αποτέλεσμα έρευνας που πραγματοποιήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Τέλος γίνεται παρουσίαση των wake up receivers (WuR), μια τεχνική που υπόσχεται να λύσει τα προβλήματα του παραδοσιακού duty cycling, συμβάλλοντας θετικά στον τομέα της κατανάλωσης ενέργειας. Στη συνέχεια, ύστερα από την διεξαγωγή εκτεταμένης έρευνας, από το 2010 έως σήμερα, παρουσιάζονται και αναλύονται, οι πιο σημαντικές προσπάθειες υλοποίησης

συστημάτων WuR από την επιστημονική κοινότητα, με γνώμονα τη χαμηλή κατανάλωση και την απόσταση επικοινωνίας που επιτυγχάνουν.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μία μελέτη περίπτωσης, για ένα προτεινόμενο σύστημα, το οποίο με τη χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, συμβάλει σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία του συντονιστή, ενός 802.15.4 (zigbee) ασύρματου δικτύου αισθητήρων τύπου αστέρα (STAR).

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παραπάνω μελέτης, συμπεριλαμβάνοντας τα οφέλη από το υπό μελέτη σύστημα, τους περιορισμούς, καθώς και προτάσεις εξέλιξης της παρούσας διπλωματικής για μελλοντική εργασία.

## **2. Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων**

### **2.1 Βασικές Έννοιες Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων**

#### **2.1.1 Αίσθηση (Sensing)**

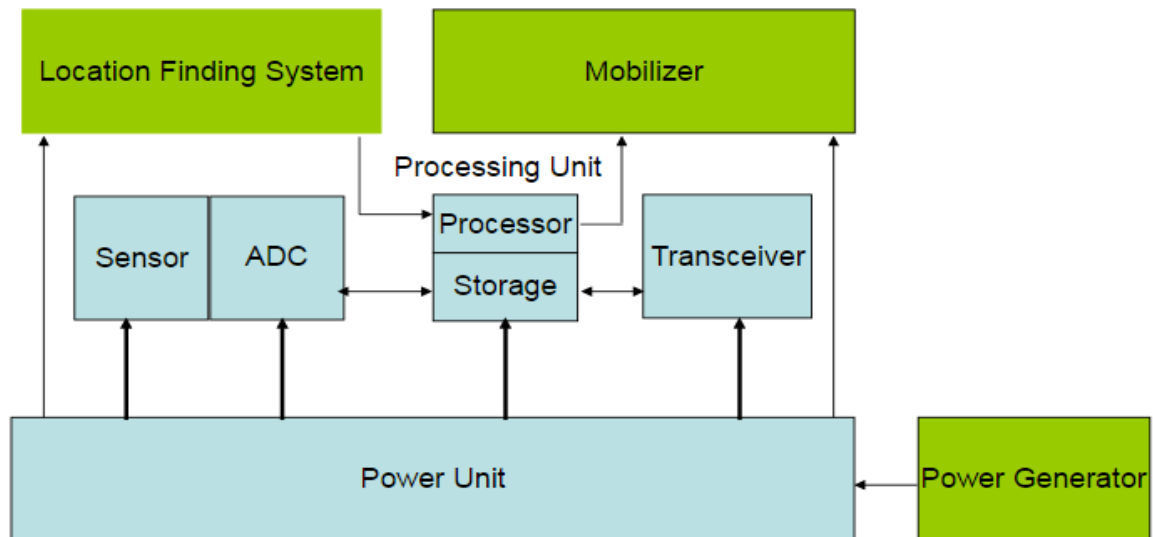
Η διαδικασία της αίσθησης, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, αναφέρεται στην τεχνική εκείνη η οποία έχει σαν στόχο την συλλογή πληροφοριών σχετικά με ένα φαινόμενο του φυσικού περιβάλλοντος, ενώ οι συσκευές αυτές οι οποίες επιτελούν μία τέτοια λειτουργία ονομάζονται αισθητήρες. Πρόκειται για συσκευές που λειτουργούν ως μετατροπείς (transducers), οι οποίοι μετατρέπουν φυσικά φαινόμενα (όπως θερμοκρασία, υγρασία, δόνηση, κίνηση κ.λ.π.) σε ηλεκτρικά σήματα. Αναφέρονται και ως συσκευές που αποτελούν τον **συνδεδετικό κρίκο** ανάμεσα στον φυσικό με τον ψηφιακό κόσμο, προσφέροντας σημαντικά οφέλη όπως η αποτροπή καταστροφών, η αύξηση της παραγωγικότητας, η ασφάλεια, η υγεία, η δημιουργία έξυπνων συστημάτων όπως έξυπνα σπίτια κ.λ.π.[1]

#### **2.1.2 Κόμβος Αισθητήρα (Sensor node)**

Ένα από τα πιο βασικά στοιχεία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι οι Κόμβοι, οι οποίοι λόγω της βασικής λειτουργίας που επιτελούν, αναφέρονται και ως Αισθητήριοι Κόμβοι (Sensor Nodes). Πρόκειται για σχετικά μικρές και φθηνές συσκευές εφοδιασμένες με έναν ή περισσότερους αισθητήρες, ενεργειακά αυτόνομες, οι οποίες τοποθετούνται στο φυσικό περιβάλλον, κοντά στο υπό μελέτη φαινόμενο. Βασικός σκοπός

των συσκευών αυτών είναι η **συλλογή** στοιχείων από το φυσικό περιβάλλον, μέσω της διαδικασίας της αίσθησης, η **επεξεργασία** και η **δρομολόγηση** των στοιχείων που έχουν συλλεχθεί προς τον τελικό χρήστη, μέσω μιας υποδομής ενός ασύρματου δικτύου.

Τα δομικά στοιχεία ενός ασύρματου Αισθητήριου Κόμβου ποικίλουν ανάλογα τις λειτουργίες που πρόκειται να επιτελέσει, ωστόσο στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η βασική αρχιτεκτονική ενός τέτοιου κόμβου.



**Εικόνα 1:** Αρχιτεκτονική Αισθητήριου Κόμβου

Η βασική αρχιτεκτονική ενός Αισθητήριου Κόμβου περιλαμβάνει έναν αισθητήρα, έναν αναλογικό – ψηφιακό μετατροπέα, έναν μικροεπεξεργαστή, μια μονάδα μνήμης, έναν πομποδέκτη και μια μονάδα τροφοδοσίας. [2]

Επιπροσθέτως της βασικής αρχιτεκτονικής, μπορεί να περιλαμβάνει σύστημα GPS (για εντοπισμό της θέσης του κόμβου), mobilizer (σε περίπτωση που έχουμε κινητούς κόμβους), actuator καθώς και γεννήτρια τροφοδοσίας (όπως για παράδειγμα ένα ηλιακό πάνελ).

#### **2.1.2.1 Επεξεργαστής – Μικροελεγκτής (Processor – Microcontroller)**

Αναφέρεται ως ελεγκτής ή μικροελεγκτής και αποτελεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του κόμβου (Micro Controller Unit – MCU). Σκοπός του μικροελεγκτή είναι η συλλογή των παραγόμενων δεδομένων, η επεξεργασία τους και η απόφαση για τον αν θα στείλει κάποια ή όλα τα δεδομένα και που θα τα στείλει. Επίσης ο μικροελεγκτής, πέρα από τα δεδομένα που θα δημιουργηθούν στον δικό του κόμβο, μπορεί να λάβει δεδομένα

και από άλλους κόμβους και είναι υπεύθυνος για την συμπεριφορά των actuators, σε περίπτωση που υπάρχουν. Ο συγκεκριμένος τύπος επεξεργαστή, σε αντίθεση με κοινούς επεξεργαστές που υπάρχουν σε υπολογιστές, laptops κ.λ.π., υποστηρίζει τις βασικές απαιτήσεις των ενσωματωμένων συστημάτων, όπως αυτή της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και της ευελιξίας του να συνδέεται με άλλες συσκευές, όπως οι αισθητήρες. Η δυνατότητά του να μπορεί να μπαίνει σε καταστάσεις ύπνου και μόνο ορισμένα μέρη του να είναι ενεργά, τον κάνει κατάλληλο για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, διότι με αυτό τον τρόπο μπορεί να μειώσει και άλλο την ήδη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

#### **2.1.2.2 Αποθήκευση – Μνήμη (Storage – Memory)**

Όσον αφορά το μέρος της μνήμης του κόμβου, χρησιμοποιείται μνήμη τύπου flash memory λόγω του χαμηλού κόστους και της υψηλής χωρητικότητας.

#### **2.1.2.3 Αισθητήρας (Sensor)**

Ο αισθητήρας αποτελεί το μέρος εκείνο του κόμβου το οποίο είναι υπεύθυνο να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον συλλέγοντας τα δεδομένα που θέλουμε να μελετήσουμε.

#### **2.1.2.4 Μετατροπέας Δεδομένων (Analog – Digital Converter)**

Τα αναλογικά δεδομένα τα οποία θα συλλεχθούν από τον αισθητήρα, θα περάσουν από τον ADC μετατροπέα με σκοπό να μετατραπούν σε ψηφιακά και να προωθηθούν στην μονάδα του μικροελεγκτή.

#### **2.1.2.5 Πομποδέκτης (Transceiver)**

Απαραίτητο στοιχείο σε έναν Αισθητήριο Κόμβο αποτελεί ο πομποδέκτης ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία του κόμβου με άλλους κόμβους. Μετατρέπει μια σειρά από bits, bytes ή frames σε ραδιοκύματα ενώ λειτουργεί σε κατάσταση half duplex. Οι καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί είναι κατάσταση αποστολής, λήψης, αδράνειας και ύπνου, οι οποίες όπως θα δούμε και παρακάτω, είναι πολύ **κρίσιμες** για την συνολική κατανάλωση ενέργειας του κόμβου.

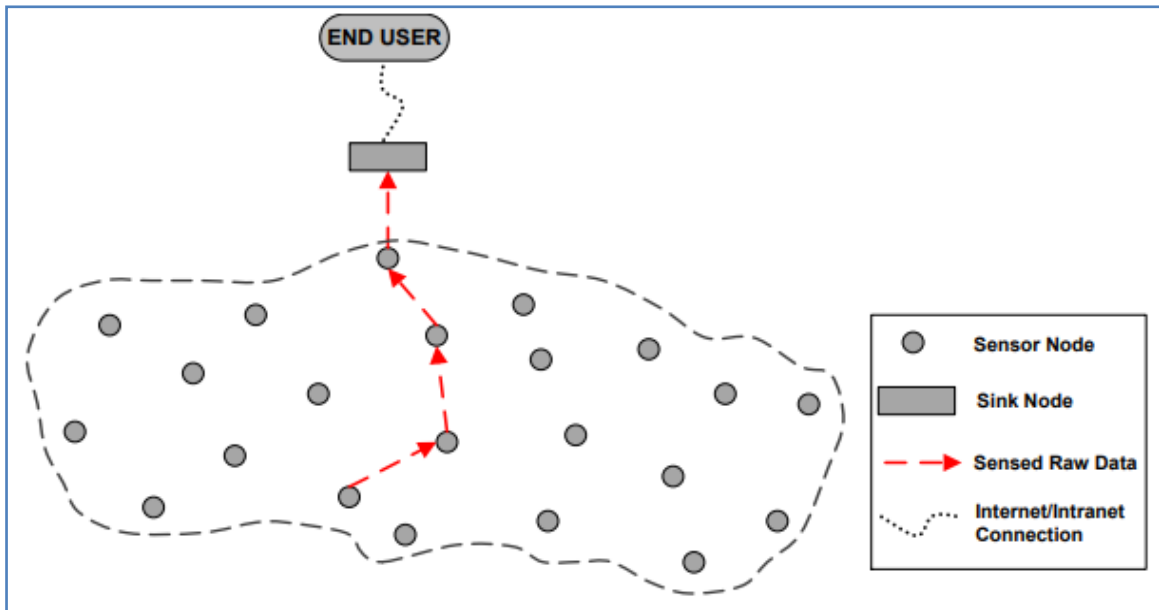
#### **2.1.2.6 Μονάδα Ενέργειας (Power Unit)**

Το βασικό σύστημα τροφοδοσίας ενός Αισθητήριου κόμβου αποτελείται από την ύπαρξη μιας μικρής μπαταρίας με περιορισμένες δυνατότητες, κατάλληλες ωστόσο να υποστηρίξουν την ενεργειακή αυτονομία του Κόμβου.

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, παρουσιάζονται δύο τύποι ασύρματων κόμβων. Ο ένας είναι ο γενικού τύπου ασύρματος κόμβος, ο οποίος έχει περιορισμένες δυνατότητες (μικρή μπαταρία, περιορισμένη υπολογιστική ισχύ, μικρός σε μέγεθος, μικρό εύρος μετάδοσης) και σκοπός του είναι η αίσθηση και η μετάδοση των πληροφοριών από κόμβο σε κόμβο. Ο δεύτερος τύπος ασύρματου κόμβου που συναντούμε σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι ο συχνά αναφερόμενος και ως συγκεντρωτής (Sink Node). Σκοπός του συγκεντρωτή είναι η συλλογή των δεδομένων από όλους τους κόμβους του δικτύου και η μεταφορά τους στον τελικό χρήστη. Για τον λόγο αυτό, ο συγκεντρωτής είναι εξοπλισμένος με περαιτέρω δυνατότητες σε σχέση με τον απλό κόμβο. Τροφοδοτείται με μεγαλύτερη μπαταρία, έχει περισσότερη υπολογιστική ισχύ μιας διαχειρίζεται περισσότερα δεδομένα και εκτελεί επιπρόσθετες λειτουργίες όπως συνάθροιση δεδομένων κ.λ.π., έχει μεγαλύτερο εύρος μετάδοσης μιας και ο σταθμός βάσης (base station) μπορεί να βρίσκεται χιλιόμετρα μακριά. [3]

## 2.2 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από έναν μικρό ή μεγάλο αριθμό Αισθητήριων κόμβων, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί στο φυσικό περιβάλλον, με στόχο τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα υπό μελέτη φυσικά φαινόμενα. Οι συσκευές αυτές δρουν συνεργατικά και ανταλλάσσουν τις πληροφορίες που συλλέγουν από το περιβάλλον μέσω ασύρματων συνδέσεων. Η τοποθέτηση των κόμβων μπορεί να γίνει με **συγκεκριμένο πλάνο** ή με **τυχαία τοποθέτηση** ενώ οι κόμβοι μπορεί να είναι **σταθεροί** ή **κινητοί**. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 2[4].



**Εικόνα 2:** *A typical Wireless Sensor Network*

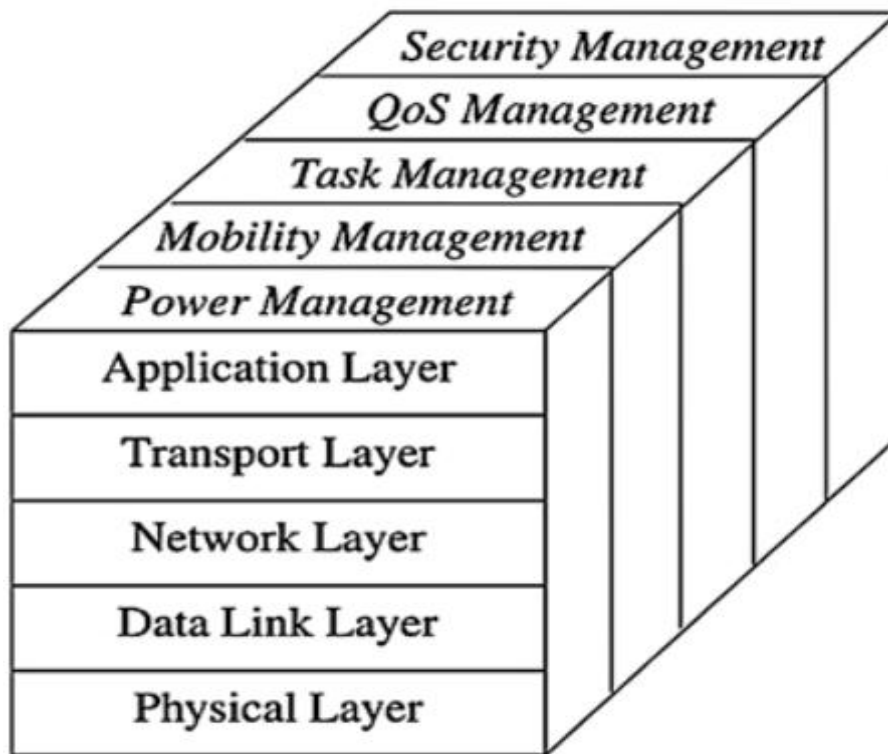
Οι κόμβοι που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα είναι εφοδιασμένοι με έναν ή περισσότερους αισθητήρες και ο ρόλος τους σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι διττός:[5]

Αφενός λειτουργούν ως **γεννήτριες δεδομένων** μέσω των στοιχείων που συλλέγουν από το περιβάλλον και αφετέρου λειτουργούν ως **δρομολογητές** με σκοπό την δρομολόγηση των δεδομένων σε έναν συγκεντρωτή δεδομένων ο οποίος ονομάζεται Sink Node. Εν συνεχεία ο ρόλος του συγκεντρωτή είναι να μεταφέρει τα δεδομένα αυτά στον τελικό χρήστη μέσω μιας διαφορετικής υποδομής δικτύου, όπως για παράδειγμα μέσω ενός κλασικού ασύρματου ή ενσύρματου δικτύου (Ethernet – WiFi).

### 2.3 Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική των ασύρματων δικτύων αισθητήρων περιλαμβάνει 5 στρώματα τα οποία μοιάζουν αρκετά με τα στρώματα της αρχιτεκτονικής ενός παραδοσιακού δικτύου. Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 3) απεικονίζονται σχηματικά τα 5 αυτά στρώματα:[6]





**Εικόνα 3:** Αρχιτεκτονική ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Τα στρώματα αυτά είναι: Το φυσικό στρώμα, το στρώμα ζεύξης δεδομένων, το στρώμα δικτύου, το στρώμα μεταφοράς και το στρώμα εφαρμογών. [7]

### **2.3.1 Φυσικό Στρώμα**

Το φυσικό στρώμα αποτελεί το πρώτο στρώμα της στοίβας πρωτοκόλλου ενός ασύρματου δικτύου και είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό και τη διαχείριση του μέσου επικοινωνίας και των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων. Σε αυτό το στρώμα περιλαμβάνονται διαδικασίες όπως επιλογή της συχνότητας που θα χρησιμοποιηθεί, η διαμόρφωση, η κρυπτογράφηση κ.λ.π.

### **2.3.2 Στρώμα Σύνδεσης Δεδομένων**

Το στρώμα σύνδεσης δεδομένων αποτελεί το δεύτερο επίπεδο το οποίο είναι υπεύθυνο να παρέχει υπηρεσίες οι οποίες θα επιτρέψουν στους κόμβους να έχουν πρόσβαση και να διαμοιραστούν με επιτυχία το μέσο επικοινωνίας. Ορισμένες από αυτές είναι: Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου (Medium Access Control – MAC), έλεγχος και διόρθωση λαθών, αξιόπιστη παράδοση κ.λ.π.

### 2.3.3 Στρώμα Δικτύου

Το στρώμα δικτύου, αποτελεί το τρίτο στρώμα της στοίβας, το οποίο είναι υπεύθυνο για την δημιουργία μονοπατιών μεταξύ των κόμβων του ασύρματου δικτύου, με σκοπό την επιτυχή δρομολόγηση των δεδομένων, από κόμβο σε κόμβο, έως τον τελικό προορισμό. Η επιλογή του πρωτοκόλλου δρομολόγησης που θα χρησιμοποιηθεί σε αυτό το στρώμα διαφέρει ανάλογα τον σκοπό που θα εξυπηρετήσει. Άλλα πρωτόκολλα επικεντρώνονται στην ποιότητα υπηρεσιών, άλλα στην κατανάλωση ενέργειας ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθούν και υβριδικά συνδυάζοντας τις δύο περιπτώσεις.

### 2.3.4 Στρώμα Μεταφοράς

Το στρώμα μεταφοράς αποτελεί το τέταρτο στρώμα της στοίβας, σκοπός του οποίου είναι να παράσχει μια διαφανή και αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ των τελικών χρηστών (end users). Στο συγκεκριμένο στρώμα τρέχουν πρωτόκολλα όπως το TCP και UDP παρέχοντας υπηρεσίες όπως έλεγχος επικοινωνίας, έλεγχος ροής, έλεγχος μετάδοσης κ.λ.π.

### 2.3.5 Στρώμα Εφαρμογών

Το στρώμα των εφαρμογών αποτελεί το πέμπτο και τελευταίο στρώμα, το οποίο υπάρχει σε πολλές εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Είναι το στρώμα το οποίο βρίσκεται πιο κοντά στον τελικό χρήστη. Παραδείγματα πρωτοκόλλων που μπορεί να τρέξουν σε αυτό το επίπεδο είναι: Telnet, HTTP, FTP.

## 2.4 Πλάνα Διαχείρισης

Εκτός των 5 βασικών στρωμάτων, η αρχιτεκτονική ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων μπορεί να περιλαμβάνει και ορισμένα **πλάνα διαχείρισης** τα οποία αφορούν την διαχείριση ενέργειας, την κινητικότητα, την διαχείριση εργασιών, την ποιότητα υπηρεσιών, την ασφάλεια.[8]

**Power Management:** Το πλάνο διαχείρισης της ενέργειας ενός WSN αφορά την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα τέτοιο δίκτυο έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής του και η απρόσκοπτη λειτουργία του. Σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να παρατηρήσουμε και υποβάθμιση της λειτουργικότητας ενός τέτοιου δικτύου, με απώτερο σκοπό την μείωση κατανάλωσης ενέργειας.

**Mobility Management:** Το πλάνο διαχείρισης της κινητικότητας αφορά την μέριμνα που δίνεται στον εντοπισμό και τον καθορισμό της θέσης των κινητών κόμβων, με σκοπό την εξασφάλιση της μεταξύ τους επικοινωνίας και την επιτυχή δρομολόγηση των δεδομένων προς τον συγκεντρωτή.

**Task Management:** Όπως προαναφέραμε, σε ένα WSN ο ρόλος των κόμβων είναι διττός. Κάποιοι κόμβοι μπορεί να είναι εφοδιασμένοι με διαφορετικού τύπου αισθητήρες (κάποιοι μπορεί να ελέγχουν την υγρασία, κάποιοι άλλοι την κίνηση, άλλοι την θερμοκρασία, τις δονήσεις κ.λ.π.) ενώ ο ρόλος κάποιων άλλων μπορεί να είναι μόνο η δρομολόγηση των δεδομένων που συλλέγονται. Συνεπώς, το πλάνο διαχείρισης των εργασιών, περιλαμβάνει την διαχείριση των διαφορετικών εργασιών που μπορεί να εκπονούνται από διαφορετικούς κόμβους ενός WSN.

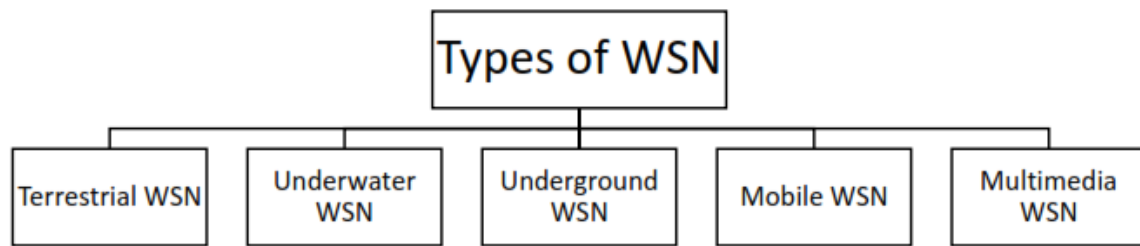
**QoS Management:** Το πλάνο διαχείρισης της ποιότητας των υπηρεσιών αφορά την ποιότητα των υπηρεσιών που θα πρέπει να παρέχονται από ένα WSN δίκτυο, ειδικά σε κρίσιμες και πραγματικού χρόνου εφαρμογές.

**Security Management:** Το πλάνο αυτό αφορά την διαχείριση της ασφάλειας σε ένα WSN δίκτυο. Σε αυτό το πλάνο εξασφαλίζεται η αντοχή του δικτύου σε φυσικές ή ηλεκτρονικές επιθέσεις, τύπου DDoS και η αποτροπή κλοπής ευαίσθητων δεδομένων από μη εξουσιοδοτημένους χρήστες.

## 2.5 Τύποι Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Η ιδέα και η γένεση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων βρίσκεται αρκετά πίσω στο παρελθόν, περίπου στο 1980, ενώ αρχικά η χρήση τους προβλεπόταν για καθαρά στρατιωτικούς σκοπούς.[9] Στις μέρες μας οι εφαρμογές των WSNs έχουν εξαπλωθεί δραματικά και παρουσιάζονται σχεδόν σε όλους τους τομείς των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

Μια γενική κατηγοριοποίηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων καθορίζει πέντε γενικές κατηγορίες:[3] Τα επίγεια, τα υπόγεια, τα υποθαλάσσια, τα κινητά και τα πολυμεσικά Ασύρματα Δικτύων Αισθητήρων. [10] [11]



**Εικόνα 4:** Τύποι Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων

Τα επίγεια WSNs αποτελούνται από ένα μικρό ή ένα μεγάλο αριθμό φθηνών σε κόστος αισθητήρων οι οποίοι αναπτύσσονται, στο επίγειο περιβάλλον, τυχαία ή με συγκεκριμένο πλάνο και μπορεί να είναι σταθεροί ή κινητοί (δημιουργία ενός τύπου adhoc δικτύου). Λόγω της περιορισμένης ζωής που έχει η μπαταρία η οποία τροφοδοτεί τον κόμβο, μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές energy harvesting για να αυξήσουν τον κύκλο ζωής του δικτύου. Χαρακτηριστικό αυτού του είδους των WSNs είναι ότι μπορεί να βρίσκονται εκτεθειμένα σε έντονες καιρικές συνθήκες οι οποίες δυσχεραίνουν την λειτουργία τους.

Τα υποθαλάσσια WSNs, [12] σε αντίθεση με τα επίγεια, έχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις διότι καλούνται να λειτουργήσουν σε δύσκολο περιβάλλον και απαιτούν πιο ακριβούς Αισθητήριους Κόμβους με αυξημένες δυνατότητες. Η ασύρματη επικοινωνία των υποθαλάσσιων WSNs γίνεται μέσω ακουστικών κυμάτων, τα οποία έχουν αρκετούς περιορισμούς όπως περιορισμένο bandwidth, λανθάνουσα κατάσταση, καθυστέρηση κ.λ.π. Οι κόμβοι τροφοδοτούνται με μπαταρία η οποία είναι δύσκολο να αντικατασταθεί ή να επαναφορτιστεί. Τα δεδομένα που συλλέγουν οι κόμβοι μπορεί να αποστέλλονται σε έναν συγκεντρωτή ο οποίος βρίσκεται πάνω από τη θάλασσα ή χρησιμοποιούνται αυτόνομα υποθαλάσσια οχήματα τα οποία συλλέγουν τα δεδομένα αυτά από τους κόμβους. [13]

Τα υπόγεια WSNs, τοποθετούνται κάτω από το έδαφος με σκοπό να συλλέξουν πληροφορίες σχετικά με υπόγειες καταστάσεις. Απαιτούν και αυτά πιο ακριβούς Αισθητήριους κόμβους, σε σχέση με τα επίγεια, διότι καλούνται να λειτουργήσουν σε δυσμενές περιβάλλον. Η συλλογή των δεδομένων που γίνεται από αυτούς τους κόμβους, αποστέλλεται συνήθως σε έναν συγκεντρωτή που βρίσκεται πάνω από το έδαφος. Βασικά μειονεκτήματα στην επικοινωνία αυτού του τύπου των δικτύων είναι η συχνή απώλεια επικοινωνίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παραδοσιακή επικοινωνία μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που χρησιμοποιούνται στα επίγεια WSN, δεν είναι

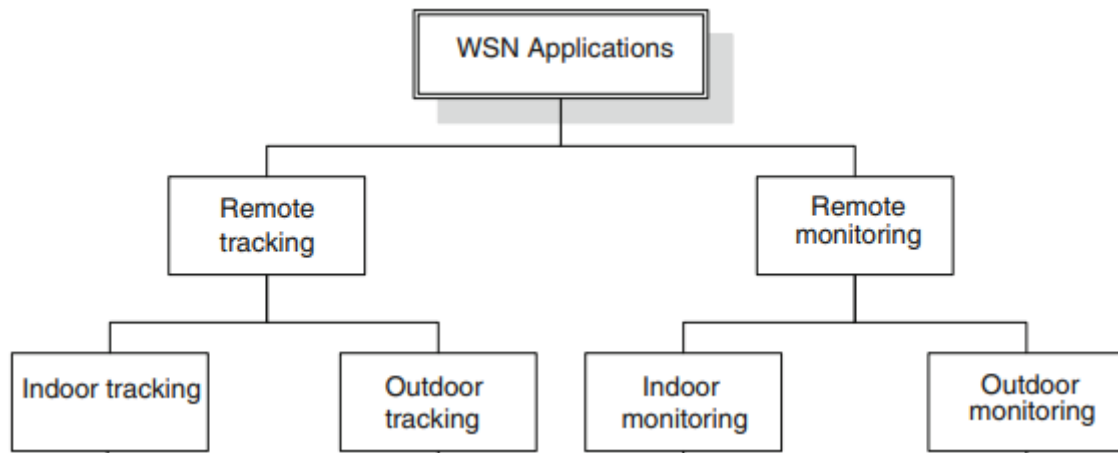
κατάλληλα για υπόγεια επικοινωνία διότι δέχονται υψηλά επίπεδα εξασθένησης, λόγω της απορρόφησής τους από το νερό, τις πέτρες και το χώμα που υπάρχει στο έδαφος καθώς και από την ύπαρξη ηλεκτρολύτη. Ποιο πρόσφατες μελέτες αναζητούν νέους τρόπους αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος χρησιμοποιώντας τεχνικές μαγνητικής επαγωγής[14] [15].

Τα κινητά WSNs, τοποθετούνται στον περιβάλλον με την επιπλέον ιδιότητα της αλλαγής θέσης με σκοπό να ακολουθούν το υπό μελέτη φαινόμενο, να συλλέξουν πληροφορίες από άλλους κόμβους ή να αντικαταστήσουν άμεσα τους κόμβους ή τον συγκεντρωτή ενός WSN δικτύου που έχουν βγει εκτός λειτουργίας. Βασική απαίτηση αυτού του τύπου WSN είναι η δυνατότητα αυτοοργάνωσης του δικτύου μέσω δυναμικών αλγορίθμων δρομολόγησης ενώ ορισμένοι από τους περιορισμούς που τίθενται είναι η παρούσα κατάσταση του κόμβου, η πλοήγηση, η τοποθεσία και η επανατοποθέτηση του κόμβου, η ενέργεια κ.λ.π

Ένα πολυμεσικό WSN[16] αποτελείται από κόμβους οι οποίοι είναι συνήθως σταθεροί και μπορεί να είναι εξοπλισμένοι με κάμερες ή μικρόφωνα με σκοπό την αποτύπωση, την επεξεργασία και τη μετάδοση εικόνων, video ή ήχων. Η μετάδοση τέτοιου τύπου δεδομένων απαιτεί υψηλό bandwidth, παροχή ποιότητας υπηρεσιών (QoS), αξιόπιστη μετάδοση και μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Η τοποθέτηση των κόμβων ενός τέτοιου δικτύου γίνεται με συγκεκριμένο πλάνο με σκοπό την σωστή και πλήρη κάλυψη της υπό μελέτη περιοχής.

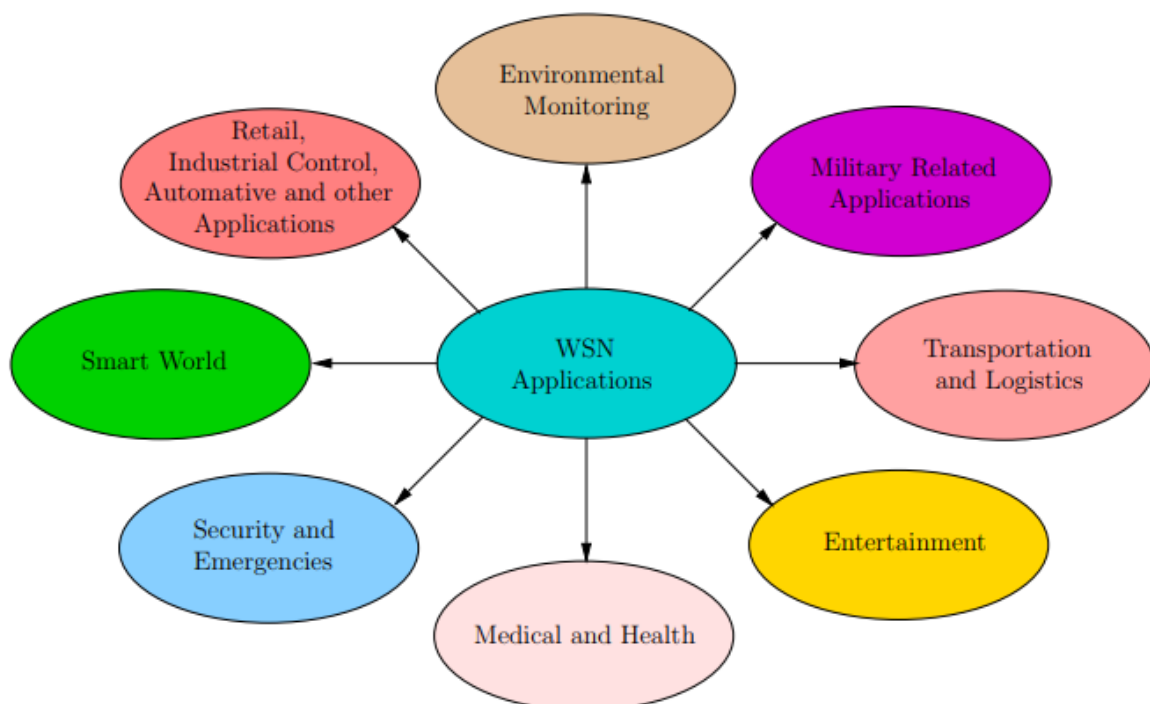
## **2.6 Εφαρμογές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων**

Τα σημαντικά πλεονεκτήματα και η ευελιξία που προσφέρουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, έχουν σαν αποτέλεσμα την εξάπλωσή τους σχεδόν σε όλες τις εκφάνσεις των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Ενώ αρχικά ξεκίνησαν για καθαρά στρατιωτικούς σκοπούς, έχουν πλέον εξαπλωθεί και σε άλλους τομείς, όπως ο τομέας της υγείας, της βιομηχανίας, του αυτοματισμού, της υγείας, του περιβάλλοντος, της ασφάλειας κ.λ.π. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σαν εφαρμογές αντίχενυσης (tracking) και παρακολούθησης (monitoring) ενώ μια επιπλέον κατηγοριοποίηση αφορά τις εφαρμογές εσωτερικού (Indoor) και εξωτερικού (Outdoor) χώρου (εικόνα 5)[7].



**Εικόνα 5:** *Classification of WSN Applications*

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται μια γενική ταξινόμηση των εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων ανάλογα με τον τομέα δραστηριότητας τον οποίο καλούνται να εξυπηρετήσουν (εικόνα 6).[17]



**Εικόνα 6:** *Taxonomy of WSN Applications*

Όσον αφορά τον τομέα της βιομηχανίας και του αυτοματισμού, σημαντικές πληροφορίες μπορεί κανείς να εντοπίσει στην πηγή [18] όπου γίνεται εκτενής αναφορά

και κριτική ανάλυση σε προκλήσεις και μελλοντικές οδηγίες πάνω σε εφαρμογές βιομηχανικών WSN.

Όσον αφορά τον Έξυπνο Κόσμο (Smart World), αναφορές και παραδείγματα ασύρματων δικτύων αισθητήρων σε συνδυασμό με Internet of Things, για έξυπνα σπίτια, έξυπνα κτίρια και έξυπνες πόλεις, μπορεί κάποιος να εντοπίσει στις αναφορές[19][20][21][22].

Όσον αφορά τον τομέα της υγείας, σημαντικές αναφορές μπορεί κάποιος να εντοπίσει στις πηγές[23][24][25][26][27].

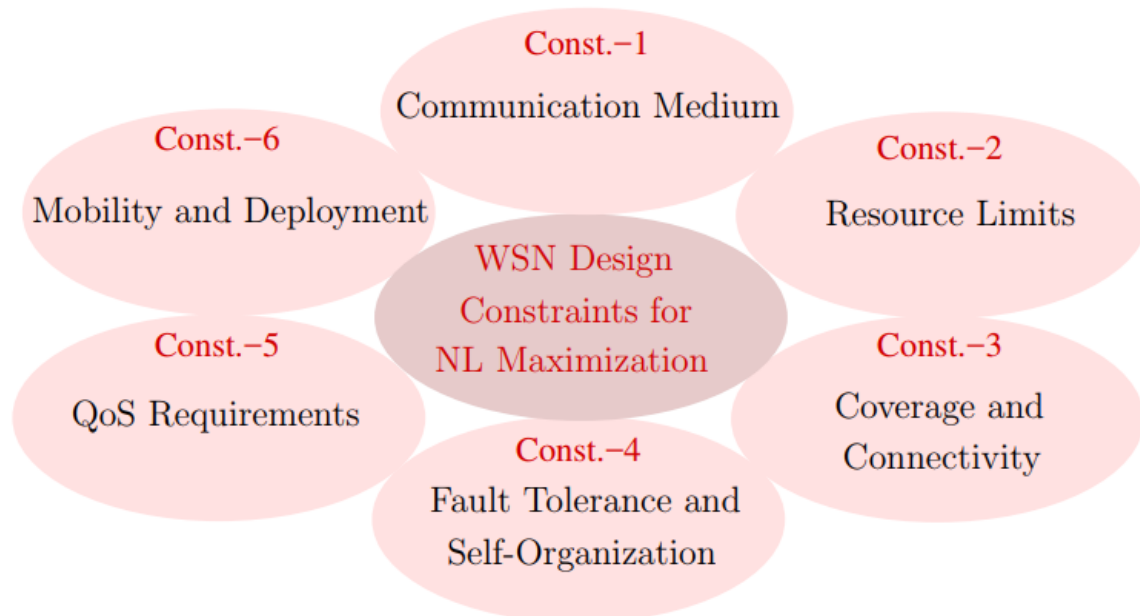
Στον τομέα του περιβάλλοντος, μπορεί κανείς να συναντήσει αρκετές αναφορές, μερικές από τις οποίες μπορεί κάποιος να αναζητήσει στις πηγές[28][29][30][31][32].

## 2.7 Περιορισμοί και Ζητήματα Σχεδίασης

Όπως παρατηρήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται από πολλές εφαρμογές και προσφέρουν μεγάλα πλεονεκτήματα λόγω της ευελιξίας τους. Η σχεδίαση ωστόσο ενός τέτοιου δικτύου απαιτεί προσοχή και διαφέρει από τη σχεδίαση ενός παραδοσιακού ασύρματου δικτύου διότι υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι σε ένα WSN δίκτυο θα πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες οι οποίοι δεν λαμβάνονται σε ένα παραδοσιακό ασύρματο δίκτυο.[33]

Ένας από τους παράγοντες αυτούς είναι η ενέργεια. Η σχεδίαση ενός WSN δικτύου θα πρέπει να λάβει υπόψη ότι οι κόμβοι του μπορεί να είναι τοποθετημένοι σε απομακρυσμένες ή δύσβατες περιοχές, όπου δύσκολα μπορεί να φτάσει κάποιος για να αντικαταστήσει την μπαταρία (μοναδική πηγή ενέργειας του κόμβου), με αποτέλεσμα να έχουμε περιορισμένη διάρκεια ζωής του δικτύου. Επομένως απαιτούνται συγκεκριμένες τεχνικές για την μείωση κατανάλωσης της ενέργειας του κόμβου, με απώτερο σκοπό την μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής του δικτύου (Network Lifetime). Ο δεύτερος παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι σε αντίθεση με τα κλασικά ασύρματα δίκτυα, όπου υπάρχει διευθυνσιοδότηση του κάθε αντικειμένου (IP Address), στα WSN δίκτυα δεν υπάρχει αναγνωριστικό (Identification – ID) για τους κόμβους. Ο τρίτος παράγοντας ο οποίος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι η θέση των κόμβων μπορεί να μην είναι προκαθορισμένη (όταν αυτά αναπτύσσονται τυχαία σε μια περιοχή) με αποτέλεσμα την απαίτηση αυτοοργάνωσης του δικτύου.

Για τη σχεδίαση λοιπόν ενός WSN δικτύου, οι σχεδιαστές, αφού λάβουν υπόψη τους παραπάνω παράγοντες, καλούνται να αντιμετωπίσουν τους παρακάτω περιορισμούς στους οποίους εμπίπτει ένα τέτοιο δίκτυο (Εικόνα 7). [17]



**Εικόνα 7:** WSN Constrain Designs

Ο πρώτος περιορισμός αφορά το μέσο επικοινωνίας. Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αναφέρεται ως μια πολύ κρίσιμη διαδικασία, τόσο από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας, όσο και από πλευράς αξιοπιστίας. Συνεπώς το μέσο επικοινωνίας που θα χρησιμοποιηθεί, παίζει καθοριστικό ρόλο, διότι διαφορετικά μέσα επικοινωνίας (συνεπώς και διαφορετικές ράδιο ζώνες) έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και απαιτούν διαφορετικές διαμορφώσεις. Κάποια από αυτά απαιτούν μεγαλύτερη και άλλα μικρότερη ισχύ μετάδοσης, κάποια υποστηρίζουν μικρότερες και άλλα μεγαλύτερες αποστάσεις μετάδοσης, κάποια από αυτά είναι περισσότερο ανθεκτικά σε παρεμβολές που μπορεί να προκληθούν από άλλα ασύρματα δίκτυα κ.λ.π.

Ο δεύτερος περιορισμός αφορά τους περιορισμένους πόρους που έχουν οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων όπως περιορισμένη μνήμη, περιορισμένη υπολογιστική ισχύ, περιορισμένη ενέργεια, περιορισμός ο οποίος προκύπτει από την απαίτηση για την ύπαρξη πολύ μικρών σε μέγεθος κόμβων και πολύ φθηνών. Ο περιορισμός της ενέργειας, σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να αντιμετωπιστεί με τεχνικές energy harvesting [34]. Οποιαδήποτε επιπλέον λειτουργικότητα του κόμβου, έχει ως



αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους του κόμβου, την αύξηση κατανάλωσης ενέργειας του κόμβου και συνεπώς του συνολικού δικτύου.[35]

Ο τρίτος περιορισμός αφορά την κάλυψη της υπό μελέτης περιοχής καθώς επίσης και τη συνδεσιμότητα μεταξύ των κόμβων και του συγκεντρωτή. Το κόστος των κόμβων και σε αυτόν τον περιορισμό, παίζει σημαντικό ρόλο, διότι για την κάλυψη μιας μεγάλης περιοχής και την επίτευξη αποδοτικής συνδεσιμότητας, ίσως χρειαστεί να αναπτυχθούν δεκάδες ή εκατοντάδες κόμβοι, γεγονός που επηρεάζει το συνολικό κόστος του δικτύου. Σημαντικός παράγοντας αποτελεί επίσης η δυνατότητα ενός δικτύου να είναι κλιμακούμενο με αποτέλεσμα να μπορούν να προστεθούν νέοι κόμβοι σε περίπτωση που χρειαστεί από την εφαρμογή. Επίσης κατά τη διάρκεια δημιουργίας του δικτύου, θα πρέπει να δοθεί σημαντική μέριμνα στην τοπολογία του, παράγοντας που επηρεάζει την κάλυψη και τη συνδεσιμότητα, διαμορφώνοντας χαρακτηριστικά όπως ή χωρητικότητα, η καθυστέρηση, η δρομολόγηση του συνολικού δικτύου.

Ο τέταρτος περιορισμός αφορά την ανοχή σε σφάλματα, την αυτοοργάνωση και την αξιοπιστία (reliability) του δικτύου. Ο περιορισμός της ανοχής σε σφάλματα, αναφέρεται στις περιπτώσεις όπου ένας ή περισσότεροι κόμβοι τεθούν εκτός λειτουργίας, είτε από φυσική επίθεση είτε από κάποιο σφάλμα υλικού και στην απαίτηση για την άμεση αποκατάσταση (robustness) του δικτύου, με σκοπό την απρόσκοπτη λειτουργία του. Επιπροσθέτως, ο περιορισμός της αξιοπιστίας μετάδοσης είναι πολύ σημαντικός και αναφέρεται στις περιπτώσεις όπου χαθούν κάποια πακέτα κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας. Σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές επαναμετάδοσης των πακέτων (οι οποίες ωστόσο δημιουργούν συμφόρηση στο δίκτυο και αύξηση κατανάλωσης ενέργειας), ή να εφαρμοστούν νέες τεχνικές όπως για παράδειγμα στην πηγή [36].

Ο πέμπτος περιορισμός αφορά την ποιότητα των υπηρεσιών που απαιτούν κυρίως πολύ κρίσιμες εφαρμογές, εφαρμογές πραγματικού χρόνου ή πολυμεσικές εφαρμογές. Χαρακτηριστικά ποιότητας υπηρεσιών που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη μπορεί να είναι ο ρυθμός σφαλμάτων (Bit Error Rate – BER), το throughput, τα επίπεδα παρεμβολών, ο ακριβής συγχρονισμός χρόνου κ.α.

Ο έκτος περιορισμός αναφέρεται στην ανάπτυξη των κόμβων και την κινητικότητα. Όπως προαναφέραμε, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, μπορεί να μην είναι πάντα σταθερό, αλλά να υπάρχει κινητικότητα των κόμβων. Αυτός ο περιορισμός οδηγεί στην

απαιτήση της αυτοοργάνωσης ενός τέτοιου δικτύου και στην χρήση αποδοτικών τεχνικών δρομολόγησης. Σε ένα δίκτυο κινητών κόμβων ισχύουν εξίσου οι προαναφερόμενοι περιορισμοί.

Όλοι οι παραπάνω περιορισμοί είναι άμεσα συνδεδεμένοι μεταξύ τους και επηρεάζουν την ζωή ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

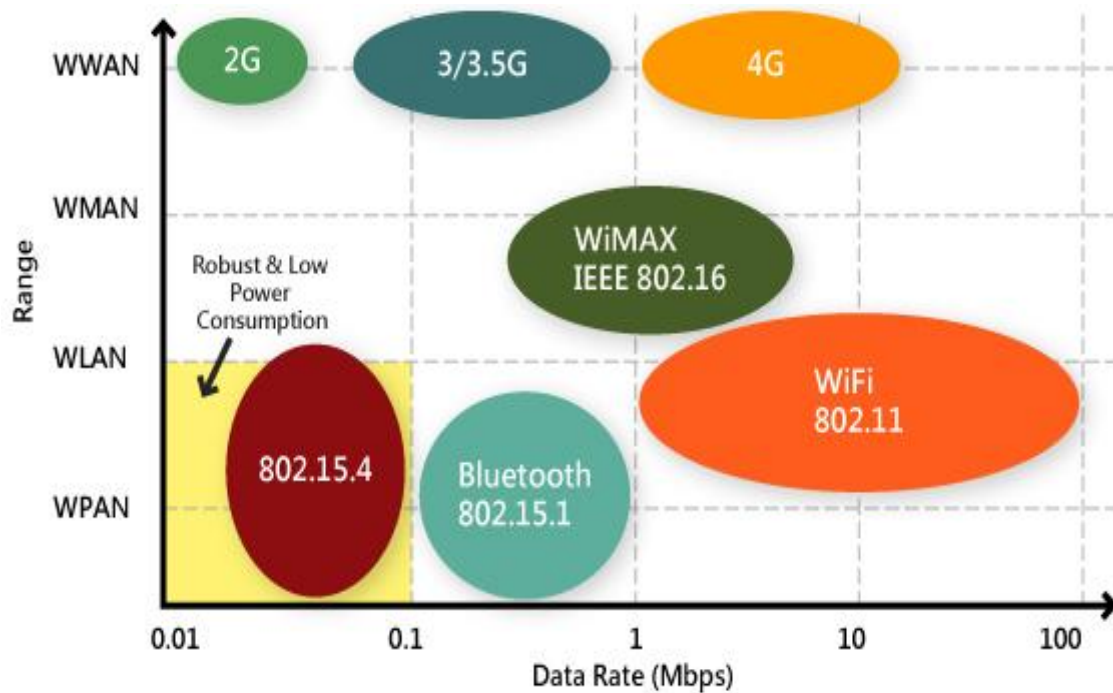
## 2.8 Πρότυπα

Τα ασύρματα δίκτυα εξαπλώνονται καθημερινά και έχουν αρχίσει να κερδίζουν έδαφος σε αυτό τον άτυπο ανταγωνισμό σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα, λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν. Ορισμένα από αυτά είναι η ευκολία στην εγκατάσταση, το γεγονός ότι δεν χρειάζονται καλωδιώσεις τους βοηθάει να αναπτύσσονται ακόμη και σε περιοχές όπου είναι αδύνατη η εγκατάσταση καλωδίωσης, η διαθεσιμότητα, ή κινητικότητα κ.λ.π. [37]

Ορισμένα από τα βασικότερα πρότυπα που χρησιμοποιούνται σε παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα, είναι το IEEE 802.11a/b/g (WiFi), το IEEE 802.15.1 (Bluetooth) το IEEE 802.16 (WiMAX) και τα 2G – 3G – 4G. Βασικά χαρακτηριστικά των παραπάνω προτύπων, όπως το εύρος στο οποίο εκτείνονται και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 8 [38].

Η ανάπτυξη ωστόσο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, δημιούργησε την ανάγκη για την ύπαρξη νέων προτύπων, τα οποία θα εκτείνονταν σε ένα πιο μικρό εύρος ζώνης (PAN – Personal Area Network) και θα εξυπηρετούσαν μικρότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων με στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου και την αύξηση της ‘ζωής’ του (Network Lifetime – NL).

Αποτέλεσμα των ερευνών της επιστημονικής κοινότητας, πάνω στην αναζήτηση νέων προτύπων ασύρματης επικοινωνίας, τα οποία θα συμμορφώνονταν με τις βασικές απαιτήσεις των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, είναι το πρότυπο **IEEE 802.15.4**.



**Εικόνα 8:** *Wireless Standards - Range and Data Rate*

### 2.8.1 IEEE 802.15.4

Όπως προαναφέραμε, το πρότυπο IEEE 802.15.4 είναι το αποτέλεσμα χρόνιων ερευνών της επιστημονικής κοινότητας, προκειμένου να υποστηριχθούν τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα και πιο συγκεκριμένα τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Σκοπός των ερευνών ήταν η δημιουργία ενός προτύπου, το οποίο θα λειτουργούσε σε ασύρματα προσωπικά δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης (LP – WPAN), παρέχοντας πολύ χαμηλό κόστος, χαμηλή ισχύ, χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και μικρό εύρος ζώνης.

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 καθορίζει τα 2 τελευταία επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλου που απεικονίζονται στην εικόνα 3. **Καθορίζει** δηλαδή το **φυσικό στρώμα** και το **στρώμα σύνδεσης δεδομένων**. Τα υπόλοιπα ανώτερα στρώματα της στοίβας της εικόνας 3, όπως θα δούμε και παρακάτω, καθορίζονται από άλλα πρωτόκολλα, τα οποία βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.15.4, όπως για παράδειγμα το πρωτόκολλο Zigbee.

Ακολουθούν ορισμένα από τα σημαντικότερα task του φυσικού στρώματος και του στρώματος σύνδεσης δεδομένων: [39]

**Φυσικό στρώμα:** Παρέχει μια διασύνδεση μεταξύ του υποστρώματος MAC και του φυσικού ράδιο-καναλιού και είναι υπεύθυνο για:

- την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του πομποδέκτη

- την αποστολή και λήψη δεδομένων
- την ένδειξη της ποιότητας της σύνδεσης για τα εισερχόμενα πακέτα
- εκτίμηση ‘καθαρού’ καναλιού (Clear Channel Assessment – CCA). Η εκτίμηση καθαρού καναλιού μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι μέσω της διάγνωσης ύπαρξης ενέργειας στο κανάλι. Αν η διάγνωση αυτή εκτιμήσει ότι στο κανάλι υπάρχει ενέργεια που περνάει ένα συγκεκριμένο όριο (Threshold), τότε το κανάλι θεωρείται απασχολημένο και επιλέγεται άλλο ελεύθερο κανάλι. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω της τεχνικής της αίσθησης του καναλιού για πολλαπλή πρόσβαση προκειμένου να αποφευχθούν συγκρούσεις μεταξύ των πακέτων (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA-CA). Μέσω της συγκεκριμένης τεχνικής, ελέγχεται αν στο κανάλι υπάρχει σήμα με χαρακτηριστικά που δηλώνουν ότι πρόκειται για σήμα τύπου IEEE 802.15.4. Αν διαγνωστεί τέτοιο σήμα, τότε το κανάλι θεωρείται απασχολημένο και επιλέγεται άλλο κανάλι ή χρησιμοποιείται μηχανισμός back-off. Ο back-off μηχανισμός, θέτει μια χρονική καθυστέρηση στην αποστολή του πακέτου, προκειμένου να απελευθερωθεί το απασχολημένο κανάλι και στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια αποστολής του πακέτου, πάλι με τη χρήση της τεχνικής CSMA-CA.
- επιλογή της συχνότητας καναλιού

**Στρώμα σύνδεσης δεδομένων:** Παρέχει διασύνδεση μεταξύ του φυσικού στρώματος και του στρώματος δικτύου και είναι υπεύθυνο για διεργασίες όπως:

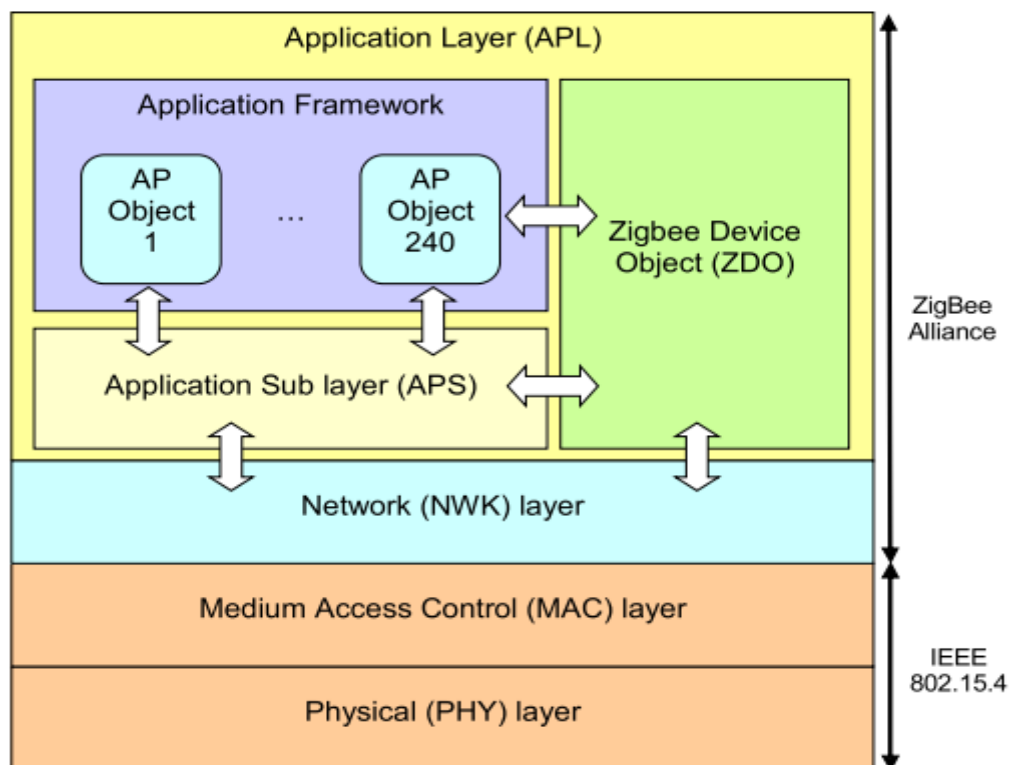
- την παραγωγή των beacons, σε περίπτωση που πρόκειται για συσκευή που έχει το ρόλο του συντονιστή (Coordinator)
- τον συγχρονισμό των beacons
- την υλοποίηση της τεχνικής CSMA-CA που περιγράφηκε πιο πάνω
- την διαχείριση και τη συντήρηση του μηχανισμού που παρέχει εγγυημένα χρονικά slots (Guaranteed Time Slots – GTS Mechanism)
- την παροχή αξιόπιστης σύνδεσης μεταξύ ενός ζεύγους οντοτήτων

Τα πρότυπο IEEE 802.15.4, πέρα από τα δύο αυτά στρώματα τα οποία καθορίζει, είναι υπεύθυνο και για άλλες λειτουργίες. Μερικές από αυτές είναι ο καθορισμός του τύπου των συσκευών που συμμετέχουν στο δίκτυο (Reduced Function Devices and Full Function Devices), η δομή του frame και Superframe, το μοντέλο μετάδοσης δεδομένων, την κατανάλωση ενέργειας, την άμεση αποκατάσταση σε περίπτωση σφάλματος ή αστοχίας, την τοπολογία δικτύου, την ασφάλεια κ.λ.π.

Αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία του προτύπου IEEE 802.15.4, μπορεί κανείς να αναζητήσει στις αναφορές [40] [41] [42] [43].

### 2.8.2 Zigbee

Το πρωτόκολλο Zigbee καθορίζει τα υπόλοιπα ανώτερα στρώματα από αυτά που καθορίζει το IEEE 802.15.4, προσφέροντας μια διασύνδεση μεταξύ του στρώματος δικτύου και του στρώματος των εφαρμογών. Στην παρακάτω εικόνα 9 [42] απεικονίζεται η στοίβα πρωτοκόλλου και τα επίπεδα στα οποία λειτουργεί το Zigbee.



Εικόνα 9: IEEE 802.15.4 and Zigbee functional layers

Βασικές λειτουργίες του πρωτοκόλλου Zigbee, είναι η **παροχή δρομολόγησης** πάνω σε ένα one hop ή multihop δίκτυο, το οποίο θα έχει ως υπόστρωμα το πρότυπο IEEE 802.15.4, ενώ το επίπεδο των εφαρμογών είναι υπεύθυνο **να παρέχει ένα πλαίσιο για την ανάπτυξη καταναεμημένων εφαρμογών και επικοινωνίας.**

Στο στρώμα δικτύου, το Zigbee καθορίζει τριών ειδών συσκευές. Μια απλή συσκευή (end – device) η οποία μπορεί να είναι συσκευή πλήρης ή μειωμένης λειτουργικότητας, μια πλήρης λειτουργικότητας συσκευή η οποία θα έχει το ρόλο του δρομολογητή στο δίκτυο και μια συσκευή πλήρης λειτουργικότητας, ή οποία θα έχει το ρόλο του συντονιστή, ρόλος του οποίου είναι η διαχείριση ολόκληρου του δικτύου. Όσον αφορά το στρώμα του δικτύου, το Zigbee είναι υπεύθυνο για τη διάταξη του δικτύου, την απόδοση διευθύνσεων, τη δρομολόγηση και την ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης μέσω της διαδικασίας Route Discovery.

Στο στρώμα των εφαρμογών συναντούμε τα αντικείμενα εφαρμογών (Application Objects - APOs), τα οποία αναφέρονται σε κομμάτια κώδικα τα οποία ελέγχουν τις μονάδες υλικού (π.χ έναν διακόπτη, ένα Led κ.λ.π.) πάνω σε διάφορες συσκευές ενός δικτύου. Στο κομμάτι κώδικα της κάθε συσκευής, δίνεται ένας μοναδικός αναγνωριστικός αριθμός με σκοπό να μπορεί να αναγνωριστεί και να αναγνωρίσει αντικείμενα εφαρμογών άλλων συσκευών με τα οποία αλληλεπιδρά. Στο στρώμα των εφαρμογών συναντούμε επίσης και ένα ειδικό αντικείμενο το οποίο ονομάζεται αντικείμενο συσκευής (Zigbee Device Object – ZDO) σκοπός του οποίου είναι η ανακάλυψη των συσκευών μέσα στο δίκτυο, η επικοινωνία μεταξύ τους και η διαχείριση υπηρεσιών δικτύωσης και ασφάλειας. Τέλος, το υπόστρωμα των εφαρμογών (Application Sub layer - APS) παρέχει διασύνδεση υπηρεσιών μεταξύ των δύο παραπάνω αντικειμένων.

Περισσότερες και αναλυτικότερες πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία, την αρχιτεκτονική και τη δρομολόγηση του πρωτοκόλλου Zigbee, μπορεί κανείς να αναζητήσει στις αναφορές.[42][43]

### **2.8.3 Wireless Hart**

Το Wireless Hart είναι ένα πρωτόκολλο για εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων, το οποίο βασίζεται και αυτό στο πρότυπο IEEE 802.15.4. Δημιουργήθηκε κυρίως για Βιομηχανικούς σκοπούς, με σκοπό να αντέχει σε πολύ σκληρά βιομηχανικά περιβάλλοντα, παρέχοντας λειτουργίες sensing και actuation. Αναφέρεται και ως

πρωτόκολλο, βασικός στόχος του οποίου είναι η παροχή αξιοπιστίας στο δίκτυο, παρόμοια με αυτή ενός ενσύρματου δικτύου και η απρόσκοπτη λειτουργία του για μεγάλο χρονικό διάστημα. Για την αποφυγή συγκρούσεων πακέτων στο δίκτυο, σε επίπεδο MAC συνήθως χρησιμοποιείται ο μηχανισμός Time Division Multiple Access – TDMA με τη χρήση back-off μηχανισμού, σε αντίθεση με τον μηχανισμό CSMA-CA που χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE 802.15.4. Ο λόγος αυτής της διαφοροποίησης έγκειται στο γεγονός ότι σε ένα ‘σκληρό’ βιομηχανικό περιβάλλον, θα υπάρχουν σίγουρα παρεμβολές από άλλα ασύρματα δίκτυα (όπως WiFi ή ασύρματα τηλέφωνα), ύπαρξη θορύβου από τις γύρω μηχανές, φυσική παρεμπόδιση των ράδιο-μονοπατιών μεταξύ των συσκευών κ.α, με αποτέλεσμα να υπάρχει πρόβλημα την επικοινωνία των συσκευών και γενικότερα στη λειτουργία ολόκληρου του δικτύου (το κανάλι θα παρουσιάζεται συνεχώς απασχολημένο λόγω ύπαρξης ενέργειας). Σε αντίθεση με το Zigbee, καθορίζει μόνο συσκευές με πλήρη λειτουργικότητα (FFDs) και μπορεί να υποστηρίξει full mesh δίκτυα. Ο επιθετικός μηχανισμός duty cycling που υποστηρίζει (1% active) του επιτρέπει να έχει σημαντική μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας.[44]

Αναλυτικές πληροφορίες για την αρχιτεκτονική και τη λειτουργία του πρωτοκόλλου Wireless Hart στην αναφορά [45].

#### **2.8.4 ISA100.11a**

Το πρωτόκολλο ISA100.11a δημιουργήθηκε και αυτό κυρίως για βιομηχανικούς σκοπούς και έχει κοινά στοιχεία με το Wireless Hart, όπως για παράδειγμα τον μηχανισμό TDMA που του επιτρέπει να λειτουργεί σε σκληρά βιομηχανικά περιβάλλοντα. Εκτός από τον μηχανισμό TDMA, μπορεί να χρησιμοποιήσει και τον μηχανισμό CSMA (όπως το Zigbee/IEEE802.15.4), κυρίως σε πιο φιλικά και μη βιομηχανικά περιβάλλοντα, επιτρέποντας στους αισθητήριους κόμβους να έχουν μεγαλύτερο bandwidth. Αποτέλεσμα των δύο παραπάνω τεχνικών, είναι η προσφορά αξιοπιστίας στην επικοινωνία των κόμβων σε σκληρά βιομηχανικά περιβάλλοντα (με τη χρήση TDMA) και η επίτευξη καλύτερου throughput[46] σε πιο φιλικά περιβάλλοντα (με τη χρήση CSMA-CA). Βασικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου, σε σχέση με το Wireless Hart, είναι ότι δεν απαιτεί όλες οι συσκευές του ασύρματου δικτύου αισθητήρων να έχουν δυνατότητες δρομολόγησης, με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους του. Μια πιο αναλυτική σύγκριση των δύο αυτών πρωτοκόλλων, μπορεί κανείς να δει στην αναφορά [47]

### **2.8.5 6LoWPAN**

Το ακρωνύμιο του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου προέρχεται από το πρωτόκολλο IPv6 που χρησιμοποιεί για ασύρματα προσωπικά δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης (Low Power Wireless Personal Area Networks) και δημιουργήθηκε από το IETF (International Engineering Task Force). Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, όσον αφορά το φυσικό στρώμα και το στρώμα σύνδεσης δεδομένων, βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάπτυξη δικτύων σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές με χαμηλό κόστος, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλή υπολογιστική ισχύ, προσφέροντας παράλληλα συνδεσιμότητα των συσκευών του δικτύου, με το διαδίκτυο. Αναλυτικές πληροφορίες για το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, παρουσιάζονται στο βιβλίο της αναφοράς [48].

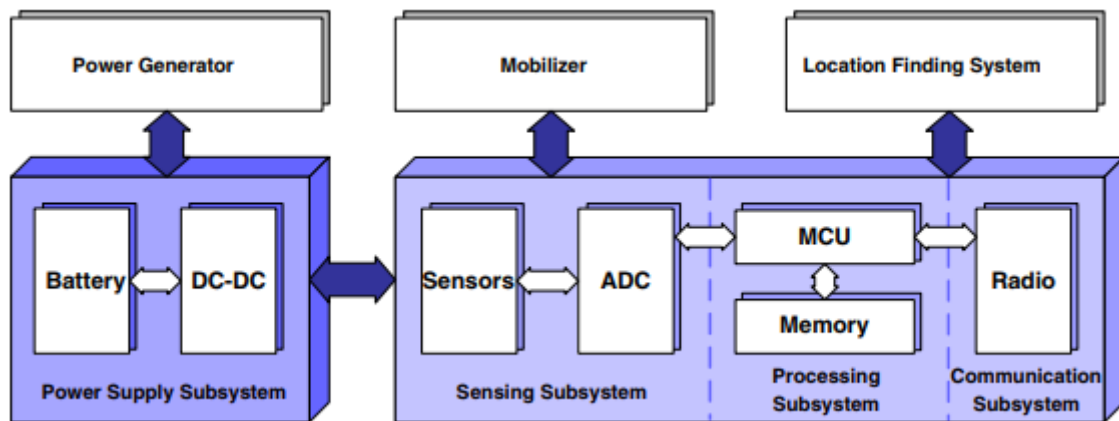
## **3. Ενεργειακή Αποδοτικότητα**

Όπως προαναφέραμε, ένα από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, είναι οι περιορισμένοι πόροι ενός Κόμβου. Ένας από τους πιο σημαντικούς αυτούς περιορισμούς είναι η περιορισμένη ενέργεια του κόμβου, η οποία προέρχεται από την ύπαρξη μιας πολύ μικρής μπαταρίας, η οποία καλείται να τροφοδοτήσει ολόκληρο το σύστημα και για μεγάλο χρονικό διάστημα, το οποίο μπορεί να εκτείνεται σε μήνες ή χρόνια. Επομένως η ενεργειακή αποδοτικότητα ενός κόμβου, αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές προκλήσεις, στη σχεδίαση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

### **3.1 Κατανάλωση Ασύρματου Κόμβου**

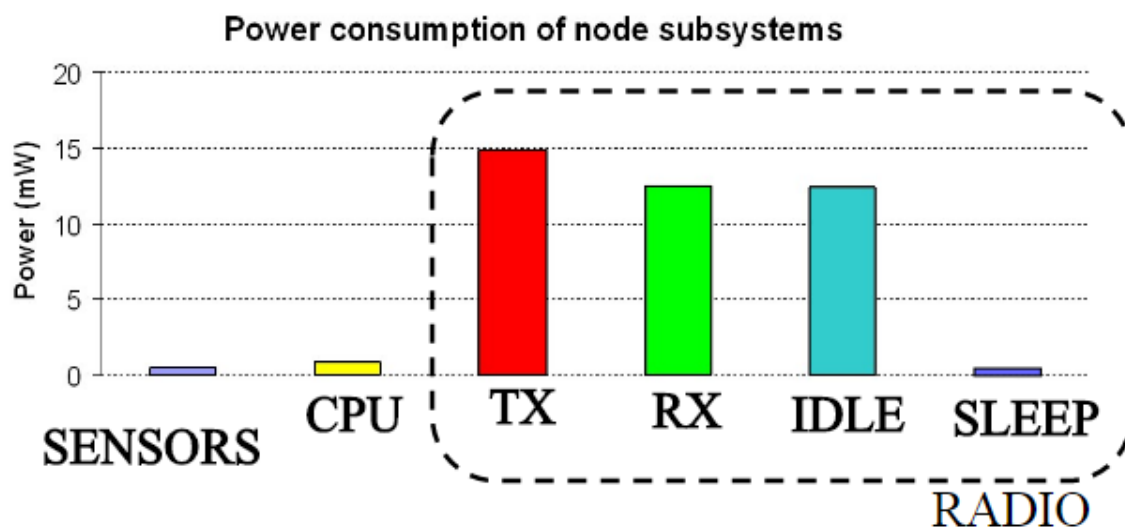
Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένας κόμβος ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων αποτελείται από ορισμένα δομικά στοιχεία, τα οποία δεν έχουν εξίσου την ίδια κατανάλωση ενέργειας. Ορισμένα από αυτά καταναλώνουν περισσότερη και άλλα λιγότερη ενέργεια. Στην εικόνα 10 που ακολουθεί παρατηρούμε τα δομικά αυτά στοιχεία, χωρισμένα σε υποσυστήματα. Το υποσύστημα της αίσθησης αποτελείται τουλάχιστον από έναν αισθητήρα και τον αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα. Το υποσύστημα των διεργασιών αποτελείται από τον μικροελεγκτή και τη μνήμη. Το υποσύστημα της επικοινωνίας αποτελείται από τον πομποδέκτη και τέλος το υποσύστημα τροφοδοσίας αποτελείται από την μπαταρία.





Εικόνα 10: Wireless Sensor Node Subsystems

Στην παρακάτω εικόνα 11, παρατηρούμε ενδεικτικά, την κατανάλωση ενέργειας του κάθε υποσυστήματος ενός ασύρματου κόμβου.



Εικόνα 11: Power Consumption of Node Subsystems

Το υποσύστημα της αίσθησης έχει πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας, συγκριτική με την κατανάλωση ενέργειας όταν ο κόμβος είναι σε κατάσταση “ύπνωσης”. Η κατανάλωση αυτή ωστόσο είναι σχετική και αναφέρεται στην ύπαρξη ενός απλού παθητικού αισθητήρα, όπως για παράδειγμα ενός αισθητήρα ελέγχου θερμοκρασίας, υγρασίας, δόνησης κ.λ.π. Όταν πρόκειται για εφαρμογές που απαιτούν την ύπαρξη ενός

ενεργού και πιο ενεργειακά απαιτητικού αισθητήρα, όπως για παράδειγμα ένας αισθητήρας ελέγχου κίνησης με δυνατότητες λήψης εικόνας ή βίντεο, τότε η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να κυμανθεί σε πολύ υψηλά επίπεδα, συγκρινόμενα με αυτά της αποστολής και λήψης του υποσυστήματος των επικοινωνιών.[49] Σε τέτοιες περιπτώσεις, η κατανάλωση ενέργειας του αισθητήρα είναι μετρήσιμη και θα πρέπει να δοθεί έμφαση στην μείωσή της.

Το υποσύστημα των επικοινωνιών έχει την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από όλα τα δομικά στοιχεία ενός κόμβου, όταν δεν βρίσκεται σε κατάσταση ύπνου. Ενεργοποιεί ουσιαστικά την επικοινωνία με τους διπλανούς κόμβους καθώς και με τον “έξω κόσμο” και η κατανάλωση ενέργειας επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως ο τύπος της διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί, ο ρυθμός δεδομένων, η απόσταση καθώς και το ποσοστό του χρόνου που το σύστημα θα είναι ενεργό (duty cycling). Οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το υποσύστημα των επικοινωνιών είναι κατάσταση αποστολής, λήψης, αναμονής και “ύπνου”. Σε σύγκριση με το υποσύστημα των διεργασιών (υπολογιστικό σύστημα), το υποσύστημα των επικοινωνιών καταναλώνει πολύ περισσότερη ενέργεια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι για την αποστολή ενός bit, απαιτείται τόση ενέργεια, όση σχεδόν χρειάζεται το υποσύστημα των διεργασιών για να εκτελέσει μερικές εκατοντάδες εντολές.

### **3.1.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Κατανάλωση Ενέργειας**

Εκτός της βασικής κατανάλωσης ενέργειας από τα διάφορα δομικά στοιχεία ενός ασύρματου κόμβου, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες[50] οι οποίοι επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας του κόμβου και ακολούθως, ολόκληρου του ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

#### **3.1.1.1 Collisions**

Οι συγκρούσεις αποτελούν έναν από τους παράγοντες που αυξάνουν την κατανάλωση ενέργειας σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Οι συγκρούσεις αυτές συμβαίνουν όταν την ίδια χρονική στιγμή στέλνονται περισσότερα του ενός πακέτα προς έναν αποδέκτη, με αποτέλεσμα τα πακέτα αυτά να απορρίπτονται και να απαιτείται επαναποστολή. Οι συνεχείς επαναποστολές, σημαίνει συνεχείς ενεργοποιήσεις του

υποσυστήματος μετάδοσης, με αποτέλεσμα να έχουμε σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας των κόμβων και συνολικά ολόκληρου του δικτύου.

### **3.1.1.2 Idle Listening**

Ένας επίσης πολύ σημαντικός παράγοντας που οδηγεί στην αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας του κάθε κόμβου, είναι η κατάσταση αδράνειας (Idle Listening). Σε κατάσταση αδράνειας ο κάθε κόμβος βρίσκεται όταν έχει συνεχώς ανοιχτό τον πομποδέκτη, με σκοπό να διαπιστώσει την διαθεσιμότητα του μέσου μετάδοσης. Το φαινόμενο αυτό δημιουργεί σημαντική αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας του κάθε κόμβου, σε σημείο που η κατανάλωση αυτή μπορεί να φτάσει σε υψηλότερα επίπεδα από την αποστολή και λήψη πακέτων.

### **3.1.1.3 Overhearing**

Ένας άλλος παράγοντας αύξησης κατανάλωσης ενέργειας του κόμβου, είναι το Overhearing. Η κατάσταση overhearing αναφέρεται στις περιπτώσεις εκείνες, όπου ο κάθε κόμβος 'ακούει' πακέτα' τα οποία προορίζονται για άλλους κόμβους και όχι για τον συγκεκριμένο, με αποτέλεσμα να προκαλείται άσκοπη κατανάλωση ενέργειας.

### **3.1.1.4 Overhead (Protocol Overhead)**

Ένας επίσης σημαντικός παράγοντας αύξησης κατανάλωσης ενέργειας αποτελεί το χαρακτηριστικό του Overhead. Κατά την αποστολή ενός πακέτου, το πραγματικό payload δεν είναι το μόνο στοιχείο που αποστέλλεται. Τα πρωτόκολλα MAC, εισαγάγουν επιπρόσθετα πεδία στην επικεφαλίδα του προς αποστολή πακέτου, μαζί με το πραγματικό payload, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία ενός μεγαλύτερου πακέτου. Όσο μεγαλύτερο είναι το πακέτο, τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτείται για την αποστολή του. Επίσης ορισμένα πρωτόκολλα επιπέδου MAC, εκτός από το πακέτο που περιέχει το πραγματικό payload, αποστέλλουν και ορισμένα σήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται σαν πακέτα ελέγχου, όπως για παράδειγμα πακέτα RTS και CTS.

### **3.1.1.5 Over Emitting**

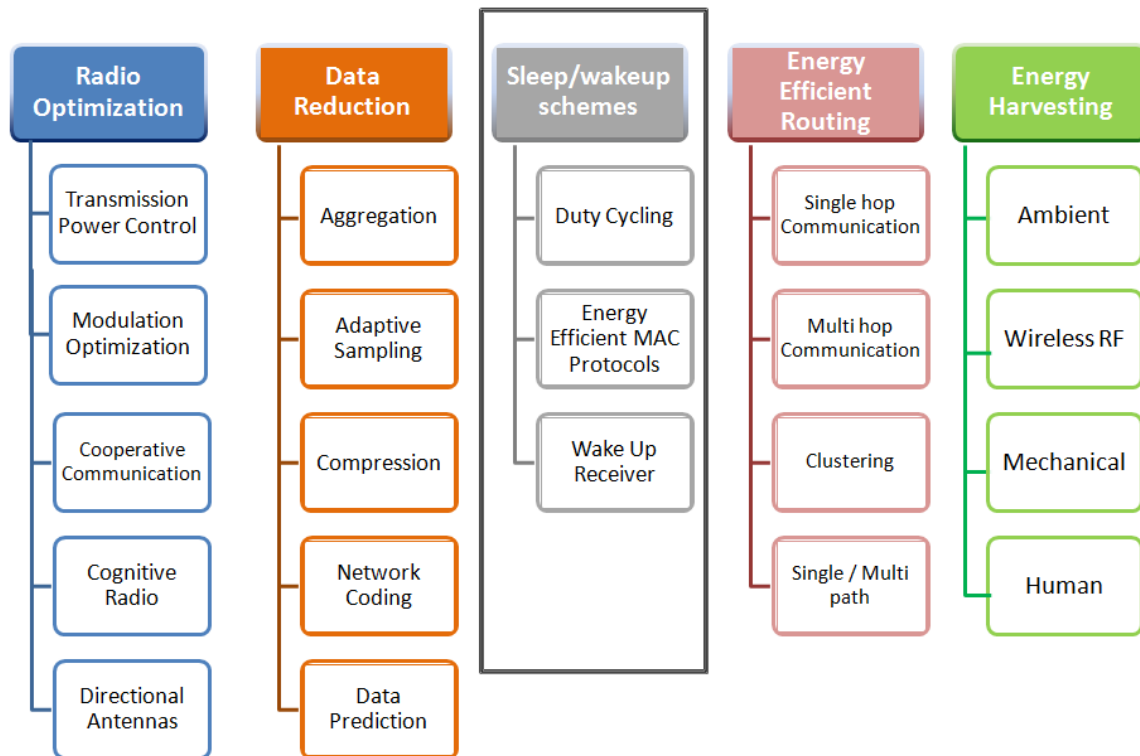
Ο παράγοντας Over Emitting αναφέρεται στις περιπτώσεις όπου ο αποστολέας στέλνει ένα πακέτο προς έναν παραλήπτη, ο οποίος ωστόσο δεν είναι έτοιμος για να το παραλάβει ή ο ρυθμός μετάδοσης του αποστολέα (Transmitter bit rate) είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό παραλαβής του παραλήπτη (Receiver bit rate). Το γεγονός αυτό οδηγεί σε

επαναποστολές πακέτων με αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας του κάθε κόμβου και συνολικά ολόκληρου του δικτύου.

Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω παραγόντων, είναι η αύξηση κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων η οποία οδηγεί στη μείωση της συνολικής ‘ζωής’ του ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

### **3.2 Μηχανισμοί Ενεργειακής Αποδοτικότητας**

Μια από τις πιο σημαντικές προκλήσεις στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί το κομμάτι της ενέργειας. Η ελαχιστοποίησή της κατανάλωσης της ενέργειας του κάθε κόμβου ξεχωριστά, με απώτερο σκοπό την μεγιστοποίηση της ‘ζωής’ του ασύρματου δικτύου, αποτελεί αντικείμενο χρόνιων και συνεχών ερευνών της επιστημονικής κοινότητας. Η μείωση ωστόσο της κατανάλωσης της ενέργειας σε ένα τέτοιο δίκτυο, αποτελεί ένα ζήτημα αρκετά πιο περίπλοκο και οι μηχανισμοί ενεργειακής αποδοτικότητας που θα κληθούν να υλοποιηθούν, θα πρέπει να υποστηρίζουν μια βασική αρχή. Η βασική αυτή αρχή αναφέρεται στο γεγονός ότι οποιοσδήποτε μηχανισμός ενεργειακής αποδοτικότητας επιλεγθεί, θα πρέπει να υλοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η συμπεριφορά ολόκληρου του δικτύου. Η απαίτηση αυτή γίνεται πιο έντονη, ειδικά σε περιπτώσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων που υλοποιούν κρίσιμες εφαρμογές και η ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχουν, έχουν πολύ υψηλότερη βαρύτητα, από την μέριμνα που θα πρέπει να δοθεί για την μείωση της κατανάλωσης της.



**Εικόνα 12:** *Common Energy Efficiency Mechanisms*

Στην σχετική βιβλιογραφία, υπάρχουν αρκετές αναφορές ταξινόμησης των μηχανισμών και τεχνικών ενεργειακής αποδοτικότητας που μπορεί να υλοποιηθούν σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, ανάλογα το πεδίο στο οποίο στοχεύουν [51] [52].

Στην αναφορά[53] απεικονίζεται μια ταξινόμηση των πιο σημαντικών και ευρέως χρησιμοποιούμενων τεχνικών ενεργειακής αποδοτικότητας ενός ασύρματου δικτύου, ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους. Η ταξινόμηση αυτή, με σεβασμό στην δουλειά των συντακτών της παραπάνω αναφοράς, ενημερώθηκε και εμπλουτίστηκε με νέες, πιο πρόσφατες τεχνικές, οι οποίες παρουσιάζονται στην εικόνα 12.

### 3.2.1 Βελτιστοποίηση Ραδιοσυστήματος

Όπως είδαμε και νωρίτερα, το υποσύστημα ενός ασύρματου κόμβου με την μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, είναι αυτό της ραδιοεπικοινωνίας. Είναι επομένως αυτονόητο πως οποιαδήποτε προσπάθεια μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας ενός κόμβου, θα πρέπει να ξεκινήσει από το υποσύστημα των επικοινωνιών.

Οι πιο βασικές τεχνικές μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας του υποσυστήματος αυτού, αναφέρονται σε τεχνικές ελέγχου ισχύς εκπομπής, βελτιστοποίηση της

διαμόρφωσης, συνεργατική επικοινωνία, κατευθυνόμενες κεραιές και χρήση ενός ενεργειακά αποδοτικού έξυπνου radio.

### 3.2.1.1 Έλεγχος Ισχύος Μετάδοσης

Η ισχύς μετάδοσης, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, παίζει έναν από τους σημαντικότερους ρόλους, στην διαμόρφωση της κατανάλωσης ενέργειας του κάθε κόμβου ξεχωριστά αλλά και συνολικά του δικτύου. Ο έλεγχος της ισχύς μετάδοσης, έχει απασχολήσει αρκετά την ερευνητική κοινότητα, όσον αφορά το κομμάτι της ενέργειας. Οι περισσότερες έρευνες εστιάζουν στο γεγονός, ότι μια στατική ισχύς μετάδοσης, ένα στατικό εύρος μετάδοσης και μια στατική ποιότητα σύνδεσης, είναι μια μη ενεργειακά αποδοτική προσέγγιση, η οποία έχει αρνητικό αντίκτυπο, στην διάρκεια ζωής του δικτύου. Συνεπώς, προτείνεται ο **έλεγχος της ισχύς μετάδοσης**, μέσω της **προσαρμογής** ισχύος, η οποία γίνεται λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες, όπως την τοπολογία του δικτύου, τις αλλαγές που μπορεί να συμβούν στο δίκτυο, την ενέργεια του κάθε κόμβου κ.λ.π. Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να επισημάνουμε ότι η μείωση της ισχύος μετάδοσης οδηγεί στην μείωση του εύρους μετάδοσης, ενώ μια υψηλή ισχύς μετάδοσης, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία παρεμβολών στο δίκτυο, πέρα της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας. Συνεπώς οι λύσεις που θα προταθούν θα πρέπει να λάβουν υπόψη και άλλους παράγοντες, εκτός της κατανάλωσης ενέργειας.

Στην αναφορά [54] οι συντάκτες παρουσιάζουν έναν αλγόριθμο ενός προσαρμοστικού μοντέλου ελέγχου ισχύος μετάδοσης (Adaptive Transmission Power Control – ATPC), σύμφωνα με το οποίο ο κάθε κόμβος δημιουργεί ένα μοντέλο για κάθε γειτονικό του κόμβο, το οποίο περιγράφει μια συσχέτιση της ισχύς μετάδοσης και της ποιότητα σύνδεσης που έχει με αυτόν. Η βασική ιδέα του συγκεκριμένου μοντέλου, είναι ότι για να υπάρχει μια ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, θα πρέπει να γίνεται χρήση της ελάχιστης ισχύς μετάδοσης ή οποία θα εγγυάται μια καλή ποιότητα σύνδεσης. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του κάθε κόμβου, ενώ παράλληλα εξασφαλίζουμε μια αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων. Στην αναφορά [55] γίνεται μια παρουσίαση από τους συντάκτες, διαφόρων πρωτοκόλλων και τεχνικών ελέγχου ισχύος μετάδοσης, ενώ γίνεται και μια ανάλυση του πρωτοκόλλου ART (Adaptive and Robust Topology), αποδεικνύοντας το πόσο ενεργειακά αποδοτικό είναι και πόσο καλή και αποδοτική χρήση του φάσματος κάνει.

### 3.2.1.2 Βελτιστοποίηση Διαμόρφωσης

Η διαμόρφωση (modulation) αναφέρεται στη διαδικασία κωδικοποίησης των δεδομένων που πρόκειται να αποσταλούν, στη συχνότητα φέροντος. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την κωδικοποίηση της συχνότητας, του χρόνου, του πλάτους και της φάσης, με σκοπό να μπορέσουν να αποσταλούν τα δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις. Η διαμόρφωση αποτελεί ένα κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας ενός ασύρματου δικτύου δεδομένων ενώ η διαδικασία της βελτιστοποίησής της, αναφέρεται σε όλες τις τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν, έχοντας σαν στόχο τον προσδιορισμό των κατάλληλων παραμέτρων διαμόρφωσης, με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας. Αναφορές σχετικά με τεχνικές ενεργειακά αποδοτικής διαμόρφωσης, μπορεί κανείς να συναντήσει στις αναφορές [56][57][58][59].

### 3.2.1.3 Συνεργατική Επικοινωνία

Το ασύρματο κανάλι επικοινωνίας, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, όπως για παράδειγμα σε ένα αρκετά σκληρό βιομηχανικό περιβάλλον, υποφέρει από διάφορα ζητήματα όπως propagation loss, multipath fading, time variation κ.λ.π. Ένα κακό link επικοινωνίας, έχει ως αποτέλεσμα, πέρα από ένα κακό throughput του δικτύου, την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου, λόγω των συνεχών αναμεταδόσεων αλλά και λόγω της αύξησης της ισχύς μετάδοσης προκειμένου να φτάσει το σήμα στον παραλήπτη.[60]

Μια από τις πιο βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις περιπτώσεις, για την βελτίωση του σήματος από τον παραλήπτη, είναι η συνεργατική επικοινωνία. Η συνεργατική επικοινωνία επιτυγχάνεται με την συνεργασία των κεραιών από διαφορετικούς κόμβους, με σκοπό την δημιουργία μιας πιο μεγάλης και πιο αποδοτικής εικονικής κεραιάς εκπομπής. Η βασική ιδέα της συνεργατικής επικοινωνίας, εκμεταλλεύεται την broadcast φύση του καναλιού επικοινωνίας και του overhead που προκαλείται στους γειτονικούς κόμβους του παραλήπτη. Σε ένα τέτοιο συνεργατικό σύστημα επικοινωνίας, κάθε κόμβος, πέρα από τα δικά του σήματα που θέλει να στείλει, λειτουργεί και σαν agent για άλλους κόμβους. Αναφορές σχετικά με την συνεργατική επικοινωνία μπορεί κάποιος να συναντήσει στην βιβλιογραφία [61][62][63]

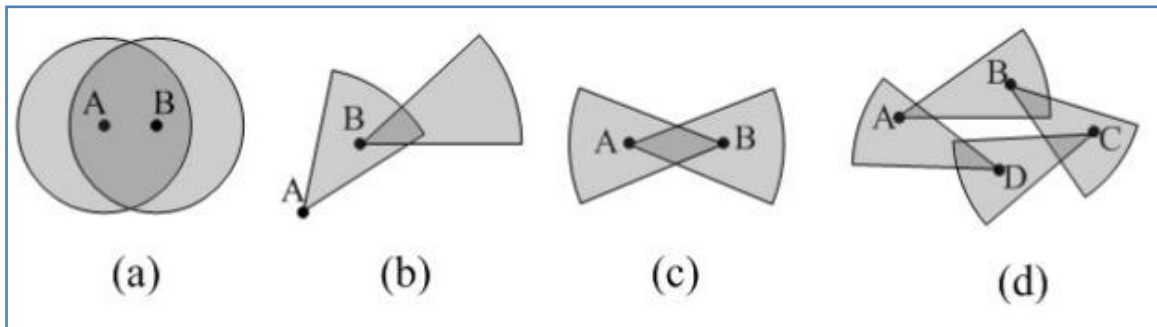
#### 3.2.1.4 Κατευθυντικές κεραίες

Όπως προαναφέραμε, ένα από τους σημαντικότερους παράγοντες που οδηγούν στην αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, είναι το overhearing. Το overhearing προκαλείται από την ύπαρξη μη κατευθυντικών κεραιών οι οποίες εκπέμπουν ένα σήμα, όχι μόνο προς τον τελικό παραλήπτη, αλλά και προς μη επιθυμητές κατευθύνσεις, με αποτέλεσμα να λαμβάνουν το σήμα και μη επιθυμητοί παραλήπτες. Ένας βασικό μηχανισμός ο οποίος μπορεί να υλοποιηθεί για την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας, είναι η χρήση κατευθυντικών κεραιών, οι οποίες θα επιτρέπουν την αποστολή και λήψη του σήματος, προς μια κατεύθυνση κάθε φορά. Αποτέλεσμα της χρήσης κατευθυντικών κεραιών, πέρα από σημαντικά πλεονεκτήματα που επιφέρουν, όπως η βελτίωση του εύρους μετάδοσης και του throughput του δικτύου, είναι και η σημαντική μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας, λόγω της μείωσης του overhearing. Σε γενικές γραμμές, η χρήση κατευθυντικών κεραιών επηρεάζει θετικά την απόδοση ολόκληρου του δικτύου, διότι εστιάζουν το ραδιοσήμα μόνο προς τις επιθυμητές κατευθύνσεις και παράλληλα μειώνουν δραματικά τις παρεμβολές (που προκαλούνται από τις μη κατευθυντικές) προς τις μη επιθυμητές.[64].

Η υιοθέτηση ωστόσο της επιλογής των κατευθυντικών κεραιών, είναι αρκετά πιο περίπλοκη σε σχέση με την επιλογή των μη κατευθυντικών κεραιών και διάφοροι παράγοντες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Ένας από τους παράγοντες αυτούς είναι ο προσανατολισμός των κόμβων. Ο προσανατολισμός των κόμβων αποτελεί ένα κρίσιμο σημείο στην ανάπτυξη κατευθυντικών κεραιών σε αντίθεση με τις μη κατευθυντικές κεραίες στις οποίες δεν λαμβάνεται υπόψη. Οι μη κατευθυντικές κεραίες, λειτουργούν σε εύρος 360 μοιρών και δεν 'ενδιαφέρονται' για τον προσανατολισμό των κόμβων τους οποίους τους αντιμετωπίζουν όλους συμμετρικά σε μια διάσταση 2D, ενώ οι κατευθυντικές καλούνται να λειτουργήσουν σε ένα εύρος από 0 έως 360 μοίρες. Το βασικό πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί από την ανάπτυξη κατευθυντικών κεραιών σε σχέση με τον προσανατολισμό των κόμβων, είναι η **ασύμμετρη σύνδεση** (Link Asymmetry) μεταξύ των κόμβων.





**Εικόνα 13:** Παραδείγματα επικοινωνίας με κατευθυντικές κεραιές

Όπως παρατηρούμε στην παραπάνω εικόνα 13 [65], στην περίπτωση (a) στην οποία έχουμε υλοποίηση μη κατευθυντικών κεραιών, όταν ο κόμβος A είναι συνδεδεμένος με τον κόμβο B, τότε αυτόματα και ο κόμβος B είναι συνδεδεμένος με τον κόμβο A. Στην περίπτωση (b) όμως που έχουμε υλοποίηση με κατευθυντικές κεραιές, ενώ ο κόμβος A συνδέεται με τον κόμβο B, δεν σημαίνει αυτόματα ότι και ο κόμβος B θα συνδέεται με τον κόμβο A, διότι αυτός μπορεί να εστιάζει κάπου αλλού. Στην περίπτωση (c) παρατηρούμε μια σύνδεση διπλής κατεύθυνσης μεταξύ των κόμβων A και B, με χρήση κατευθυντικών κεραιών, ενώ στην περίπτωση (d) παρατηρούμε μια αλυσιδωτή σύνδεση μεταξύ τεσσάρων κόμβων, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους κυκλικά, πάλι με χρήση κατευθυντικών κεραιών.

### 3.2.1.5 Έξυπνα Ραδιοσυστήματα (Cognitive Radios)

Η ολοένα και αυξανόμενη απαίτηση για ασύρματες υπηρεσίες, έχουν ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Η αύξηση αυτή ωστόσο έχει ως επακόλουθο τη δημιουργία φασματικής συμφόρησης και συνεχών παρεμβολών ανάμεσα σε διαφορετικά δίκτυα που διαμοιράζονται το ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Οι παρεμβολές αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε έναν σχετικά υψηλό ρυθμό απώλειας πακέτων, με αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας του δικτύου, λόγω των συνεχών επαναποστολών πακέτων.

Η τεχνολογία του γνωστικού ραδιοσυστήματος, αποτελεί μια αρκετά υποσχόμενη τεχνολογία, η οποία έχει ως βασικό σκοπό την βελτίωση του τρόπου με τον οποίο γίνεται η χρήση του φάσματος. Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο κάνει χρήση της τεχνολογίας γνωστικού ραδιοσυστήματος, το κάθε ραδιοσύστημα επιλέγει **δυναμικά** το κανάλι επικοινωνίας και την πρόσβαση σε αυτό, προσαρμόζοντας τις παραμέτρους

αποστολής και λήψης αντίστοιχα, με απώτερο σκοπό την μείωση της ισχύς μετάδοσης και την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών.[66]

Αρχικά το ραδιοσύστημα ‘αισθάνεται’ το φάσμα, εντοπίζει τις ζώνες (bands) που είναι ελεύθερες και κάνει χρήση των διαθέσιμων αυτών των ζωνών, με ένα τρόπο καιροσκοπικό (opportunistic), με σκοπό τη βελτίωση της χρήσης του φάσματος και την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του συνολικού δικτύου.[67]

Εκτός από την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας, ένα γνωστικό ραδιοσύστημα μπορεί να προσφέρει και άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, τα σημαντικότερα από αυτά συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 1[68].

Function	Action
Cognitive capabilities	
Spectrum sensing	Detect unused spaces (white spaces) by the incumbents in the spectrum bands.
Spectrum sharing	Use the unused white spaces of incumbents and share the white space information with cognitive users.
Prediction	Predict the arrival of incumbents on the channel.
Fairness	Distribution of spectrum utilization opportunities fairly among cognitive users.
Routing	Route the packet to the destination efficiently considering the network life span, load balancing, shortest route and delay in multi-hop CR-WSNs.
Reconfiguration capability	Reconfigure and adjust according to the environment outcomes.
Environment sensing	Sensing the environmental factors as in conventional wireless sensors *.
Trust and security	Building a trustable environment and secure networks.
Power control	Control transmission power considering the legal boundaries and requirements.

**Πίνακας 1:** Ικανότητες γνωστικού ραδιοσυστήματος

Πρόσφατες μελέτες και υλοποιήσεις πάνω σε γνωστικά ραδιοσυστήματα, ονομαζόμενα και γνωστικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Cognitive Wireless Sensor Networks - CWSN), μπορεί κανείς να εντοπίσει στις αναφορές [69][70][71][72][73][74].

### 3.2.2 Μείωση Δεδομένων

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, τα δεδομένα που παράγονται από τους αισθητήρες και μεταδίδονται, επηρεάζουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας του κάθε κόμβου ξεχωριστά αλλά και συνολικά ολόκληρου του δικτύου. Όσο περισσότερα δεδομένα παράγονται και μεταδίδονται, τόσο αυξάνεται η κατανάλωση της ενέργειας του συνολικού δικτύου και συνεπώς η διάρκεια ‘ζωής’ του. Διάφορες τεχνικές έχουν υιοθετηθεί, για την μείωση των δεδομένων σε ένα ασύρματο δίκτυο δεδομένων, ορισμένες από τις σημαντικότερες είναι η συνάθροιση δεδομένων, η προσαρμοστική δειγματοληψία, η συμπίεση δεδομένων καθώς επίσης και τεχνικές κωδικοποίησης δικτύου.

#### 3.2.2.1 Συνάθροιση Δεδομένων

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, ο κάθε κόμβος, εκτός των δικών του δεδομένων που παράγει και αποστέλλει, προωθεί και δεδομένα από άλλους κόμβους προς τον συγκεντρωτή (Sink). Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, είναι ότι ο κάθε κόμβος επιβαρύνεται με δεδομένα από άλλους κόμβους με συνέπεια την αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειάς του, ενώ ο κόμβος που βρίσκεται πιο κοντά στον συγκεντρωτή, καταναλώνει την μεγαλύτερη ενέργεια, σε σχέση με πιο απομακρυσμένους κόμβους, με κίνδυνο να σταματήσει να λειτουργεί.

Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας τεχνικές **συνάθροισης δεδομένων**, όπου ο κάθε κόμβος αναμεταδότης (relay node), συναθροίζει τα δικά του δεδομένα με τα δεδομένα που παραλαμβάνει από άλλους κόμβους, στέλνοντας μόνο ένα πακέτο κάθε φορά. Αποτέλεσμα αυτής της συνάθροισης, είναι η μείωση των μεταδόσεων, η μείωση του overhead από τις πολλαπλές αποστολές και συνεπώς η μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας του συνολικού δικτύου. Τα παραπάνω οφέλη ωστόσο από τη συνάθροιση δεδομένων, είναι άμεσα συνδεδεμένα με την τοπολογία του δικτύου καθώς και τις με τεχνικές δρομολόγησης που θα κληθούν να υλοποιηθούν.[75]

Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η συνάθροιση δεδομένων, ενώ από τη μια πλευρά οδηγεί στην μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας, από την άλλη πλευρά οδηγεί στην αύξηση της καθυστέρησης της μετάδοσης, διότι ο κόμβος αναμεταδότης, θα πρέπει να περιμένει να λάβει τα κατάλληλα δεδομένα από άλλους κόμβους τα οποία θα συναθροιστούν με τα δικά του. Συνεπώς η χρήση της τεχνικής της συνάθροισης δεδομένων, θα πρέπει να εφαρμόζεται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπου ο χρόνος άφιξης των δεδομένων δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα.[76]

Επιπροσθέτως, ένας άλλος παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι ότι λόγω της περιορισμένης υπολογιστικής ισχύς των κόμβων, οι αλγόριθμοι συνάθροισης που συνήθως χρησιμοποιούνται, είναι εξαιρετικά απλοί (SUM, AVERAGE, MAX), με αποτέλεσμα η συνάθροιση να είναι ευάλωτη σε σφάλματα αλλά και σε εξωτερικές επιθέσεις.[77]

Στην πρόσφατη σχετική βιβλιογραφία, μπορεί κανείς να συναντήσει αρκετές αναφορές για την χρήση τεχνικών συνάθροισης δεδομένων. Στην αναφορά [78] οι συντάκτες εφαρμόζουν μια ιεραρχική συνάθροιση δεδομένων με τη χρήση συμπιεσμένης αίσθησης, ενώ στην αναφορά [79] οι συντάκτες εφαρμόζουν έναν ασφαλή αλγόριθμο συνάθροισης δεδομένων ενάντια σε επιθέσεις που γίνονται στον τελικό κόμβο (base station). Στην αναφορά [80] γίνεται παρουσίαση, διαχωρισμός και ταξινόμηση διαφόρων τεχνικών και αλγορίθμων σχεδίασης, έτσι ώστε όλοι οι κόμβοι ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων να κάνουν πιο αποδοτική τη διαδικασία συνάθροισης δεδομένων.

### 3.2.2.2 Προσαρμοστική δειγματοληψία

Οι πολιτικές δειγματοληψίας οι οποίες εφαρμόζονται σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, περιγράφουν το ρυθμό δειγματοληψίας ενός κόμβου. Περιγράφουν δηλαδή το πόσο συχνά απαιτείται από έναν κόμβο να λάβει δειγματοληψία από το περιβάλλον, μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.[81] Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα της δειγματοληψίας αυτής, τόσο αυξάνεται και η κατανάλωση ενέργειας του κόμβου.

Διάφορες τεχνικές δειγματοληψίας έχουν κατά καιρούς υιοθετηθεί από την επιστημονική κοινότητα, με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Μια από τις πιο σημαντικές είναι μέθοδος της **προσαρμοστικής δειγματοληψίας** (adaptive sampling). Η προσαρμοστική δειγματοληψία αναφέρεται στην δυνατότητα του κάθε κόμβου, να προσαρμόζει δυναμικά το ρυθμό δειγματοληψίας, αποφεύγοντας άσκοπες δειγματοληψίες, με απώτερο σκοπό την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειάς του. Η προσαρμογή αυτή της δειγματοληψίας του κάθε κόμβου, μπορεί να γίνει εκμεταλλευόμενη δύο πολύ σημαντικές έννοιες.

Η πρώτη αφορά την έννοια της **χωρικής αυτοσυσχέτισης** (Spatial Correlation). Ο όρος της χωρικής αυτοσυσχέτισης αναφέρεται στο γεγονός ότι τα δεδομένα από τοποθεσίες που βρίσκονται κοντά ή σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, το πιο πιθανό είναι να έχουν περισσότερες ομοιότητες μεταξύ τους, σε σχέση με δεδομένα τα οποία

προέρχονται από τοποθεσίες που βρίσκονται πιο μακριά. Σύμφωνα λοιπόν και με τον πρώτο νόμο της Γεωγραφίας, «Όλα τα πράγματα συνδέονται μεταξύ τους αλλά τα κοντινά συνδέονται περισσότερο απ' ό,τι τα μακρινά» («Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things»)[82]

Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ο όρος της χωρικής συσχέτισης μεταφράζεται ως εξής: Τα δεδομένα που λαμβάνονται από το περιβάλλον μεταξύ γειτονικών κόμβων, είναι τις περισσότερες φορές αρκετά όμοια, οπότε μπορούμε να μεταδίδουμε μόνο τις διαφορές και όχι όλα τα δεδομένα από κάθε δειγματοληψία.

Η δεύτερη αναφέρεται στην έννοια της **χρονικής αυτοσυσχέτισης** (Temporal Correlation). Σύμφωνα με την χρονική αυτοσυσχέτιση, οι πληροφορίες που αντλούνται από το περιβάλλον, συνήθως δεν διαφέρουν πολύ στη μονάδα του χρόνου. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αυτό μεταφράζεται ως εξής: μια ακολουθία από δείγματα μπορεί να είναι όμοια μεταξύ τους ή να έχει πολύ μικρές διαφορές. Συνεπώς δεν είναι αναγκαίος ένας υψηλός ρυθμός δειγματοληψίας.

Παραδείγματα και υλοποιήσεις χωρικής και χρονικής αυτοσυσχέτισης, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, μπορεί κανείς να συναντήσει στις αναφορές[83][84][85]

### 3.2.2.3 Συμπίεση Δεδομένων

Όπως έχουμε προαναφέρει, συνήθως το υποσύστημα των επικοινωνιών καταναλώνει πολύ μεγαλύτερη ενέργεια σε σχέση με το υπολογιστικό υποσύστημα. Ένας πιθανός τρόπος μείωσης της κατανάλωσής της, θα ήταν να εφαρμόσουμε τεχνικές **συμπίεσης** δεδομένων. Η συμπίεση δεδομένων, ουσιαστικά κωδικοποιεί την πληροφορία με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να μειώσουμε τον αριθμό των bits που αναπαριστούν το αρχικό μήνυμα. Με τη συμπίεση δεδομένων, η οποία συντελείται στο υπολογιστικό σύστημα πριν την μετάδοσή τους, καταφέρνουμε να μειώσουμε τον όγκο των προς μετάδοση δεδομένων και συνεπώς την ισχύς μετάδοσή τους, με αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής κατανάλωσης του κόμβου.[86]

Εκτός όμως από την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του κόμβου, επιτυγχάνουμε μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και ολόκληρου του δικτύου. Αυτό συμβαίνει διότι η συμπίεση δεδομένων που γίνεται σε έναν κόμβο, οδηγεί στη μείωση της μεταδιδόμενης ενέργειας όλων των ενδιάμεσων κόμβων που λειτουργούν ως αναμεταδότες προς τον

συγκεντρωτή, λόγω της multi-hop φύσης των μεταδόσεων στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.[87]

Η χρήση της τεχνικής της συμπίεσης δεδομένων, είναι αρκετά συχνή σε εφαρμογές ασύρματων δικτύων. Στην αναφορά [88] οι συντάκτες εφαρμόζουν ένα μοντέλο συμπίεσης δεδομένων σε έναν κόμβο, καθορίζοντας τον βαθμό συμπίεσης δεδομένων του κάθε κόμβου και συνεπώς το ποσοστό μείωσης κατανάλωσης ενέργειας, ανάλογα με το επίπεδο ενέργειας των γειτονικών κόμβων, χρησιμοποιώντας παράλληλα και τεχνικές εξόρυξης ενέργειας. Στην αναφορά [89] οι συντάκτες παρουσιάζουν έναν αλγόριθμο συμπίεσης ο οποίος είναι και ενεργειακά αποδοτικός ενώ παράλληλα προσφέρει σταθερότητα.

Στην αναφορά [90] οι συντάκτες παρουσιάζουν ένα νέο μοντέλο συμπίεσης δεδομένων, σύμφωνα με το οποίο η συμπίεση των δεδομένων που “διαβάζονται” από τους αισθητήρες, γίνεται “on the fly”, χρησιμοποιώντας παράλληλα μια μέθοδο οπορτουνιστικής δρομολόγησης.

#### **3.2.2.4 Κωδικοποίηση Δικτύου**

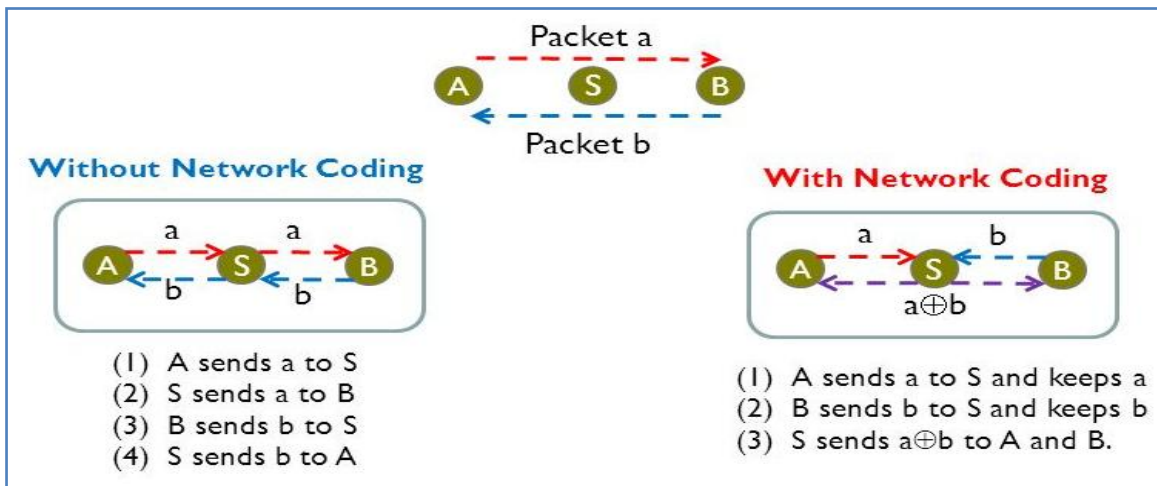
Μια από τις πιο σημαντικές προκλήσεις, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αποτελεί η broadcast φύση της επικοινωνίας των κόμβων. Η πρόκληση αυτή πηγάζει από το γεγονός, ότι η broadcast επικοινωνία μεταξύ των κόμβων, δημιουργεί αρκετές παρεμβολές μεταξύ των συνδέσεων (links) ενώ παράλληλα παράγονται και μεταδίδονται πολλαπλά αντίτυπα του ίδιου πακέτου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας του δικτύου, εξαιτίας των αποστολών πολλαπλών πακέτων, καθώς επίσης και των επαναποστολών, σε περιπτώσεις παρεμβολών μεταξύ των συνδέσεων.

Η κωδικοποίηση δικτύου, αποτελεί μια αρκετά καινοτόμα τεχνολογία, η οποία παρουσιάστηκε στις αρχές του 2000. Αρχικά προοριζόταν για ενσύρματα δίκτυα, με σκοπό την αντιμετώπιση του ‘μποτιλιαρίσματος’ και την αύξηση του throughput στα δίκτυα αυτά. Εν συνεχεία, λόγω της broadcast φύσης και της ποικιλομορφίας των συνδέσεων στα ασύρματα δίκτυα, αποτέλεσε μια τεχνική η οποία υιοθετείται αρκετά συχνά από τα δίκτυα αυτά.[91]

Η βασική αρχή της κωδικοποίησης δικτύου, είναι ότι οι ενδιαμέσοι κόμβοι αναμεταδότες, κάνουν μια μίξη από διάφορα πακέτα που παραλαμβάνουν από διαφορετικούς κόμβους, χρησιμοποιώντας μαθηματικές συναρτήσεις και στη συνέχεια

αποστέλλουν ένα μόνο πακέτο αντί για πολλαπλά. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η κωδικοποίηση δικτύου εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι το υπολογιστικό σύστημα καταναλώνει αισθητά λιγότερη ενέργεια σε σχέση με το σύστημα των επικοινωνιών, ακολουθώντας μια τεχνική **Compute and Forward** αντί για την κλασσική τεχνική **Store and Forward**. Αυτό έχει ως συνέπεια, την μείωση των μεταδόσεων και των παρεμβολών, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, με αποτέλεσμα την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του συνολικού δικτύου. Εκτός όμως από την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας, η κωδικοποίηση δικτύου, προσφέρει και άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου καθώς επίσης και την αύξηση του throughput.

Στην παρακάτω εικόνα 14 [92], παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί η κωδικοποίηση δικτύου. Στην εικόνα αυτή υποθέτουμε ότι ο κόμβος A θέλει να στείλει ένα πακέτο στον κόμβο B και ο κόμβος B στον A. Στην πρώτη περίπτωση θα χρειαστούμε 4 αποστολές πακέτων ενώ στη δεύτερη με την τεχνική της κωδικοποίησης δικτύου, θα χρειαστούμε τρεις. Αυτό συμβαίνει διότι ο κόμβος αναμεταδότης, κάνει μίξη των πακέτων από τους δύο κόμβους και κάνει broadcastένα πακέτο μόνο κωδικοποιημένο. Στη συνέχεια ο κάθε κόμβος, εκτελεί τη λειτουργία XOR, του κωδικοποιημένου πακέτου που παραλαμβάνει, με το δικό του, εκτελώντας έτσι τη λειτουργία της αποκωδικοποίησης.



**Εικόνα 14:** Communication with and without Network Coding

Όσον αφορά την κωδικοποίηση δικτύου, αρκετές είναι οι αναφορές που μπορεί κάποιος να συναντήσει. Στην αναφορά [93] οι συντάκτες παρουσιάζουν έναν αλγόριθμο κωδικοποίησης, ο οποίος έχει σαν στόχο την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την μεγιστοποίηση της ζωής του δικτύου. Στην αναφορά [94] οι συντάκτες παρουσιάζουν έναν καινοτόμο και 'έξυπνο' αναμεταδότη, ο οποίος υλοποιεί έναν αλγόριθμο κωδικοποίησης δικτύου, για σκληρά περιβάλλοντα, χρησιμοποιώντας τη μαθηματική

συνάρτηση XOR, για overhead πακέτα, ενώ στην αναφορά [95] γίνεται μια λεπτομερή ανάλυση τεχνικών κωδικοποίησης δικτύου, σε έξυπνα ραδιοσυστήματα, (cognitive radio), παρουσιάζοντας ανοιχτά ζητήματα, προκλήσεις καθώς επίσης και μελλοντικές κατευθύνσεις ερευνών.

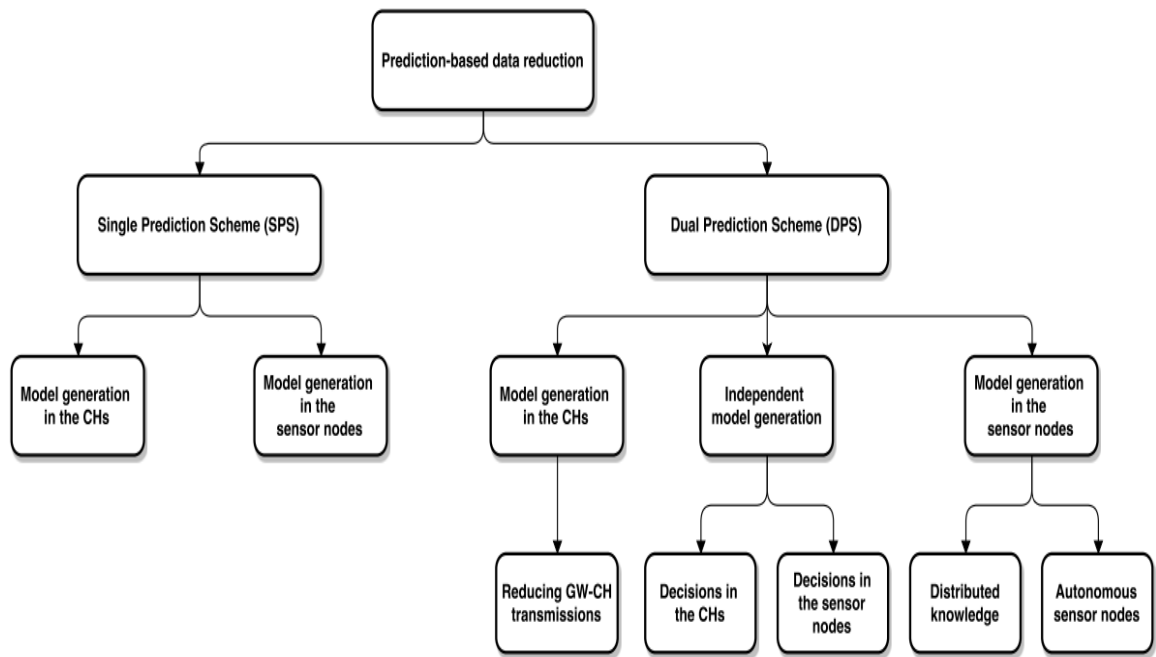
### 3.2.2.5 Πρόβλεψη Δεδομένων

Η πρόβλεψη δεδομένων αποτελεί μια σημαντική και αρκετά υποσχόμενη τεχνική μείωσης κατανάλωσης ενέργειας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, η οποία έχει ως στόχο την μείωση των δεδομένων που διακινούνται στο δίκτυο και την μείωση των εκπομπών. Σε αντίθεση με την τεχνική της συμπίεσης δεδομένων, το μοντέλο πρόβλεψης δεδομένων, αναπτύσσεται στους κόμβους αλλά και στον συγκεντρωτή δεδομένων. Όταν μια πρόβλεψη των δεδομένων που παράγει ο κόμβος με τη διαδικασία της αίσθησης, είναι ακριβής ή μέσα σε επιτρεπτά πλαίσια λάθους, τότε και ο κόμβος αλλά και ο συγκεντρωτής, χρησιμοποιούν το μοντέλο των προβλέψιμων δεδομένων και δεν χρειάζεται να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου τα προβλεπόμενα δεδομένα παρεκκλίνουν με τα πραγματικά δεδομένα που παράγονται από τους αισθητήρες, τότε είναι απαραίτητη η επικοινωνία μεταξύ του κόμβου και του συγκεντρωτή, για την αποστολή των πραγματικών στοιχείων.

Στην αναφορά [96] οι συντάκτες εφαρμόζουν ένα μοντέλο πρόβλεψης δεδομένων, για την μείωση των δεδομένων που διακινούνται στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας ένα ιεραρχικό Least-Mean-Square (Hierarchical LMS) προσαρμοστικό φίλτρο, επιτυγχάνοντας περίπου 95% μείωση της επικοινωνίας, για μετρήσεις που αφορούν θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα διατηρούν ακρίβεια μετρήσεων της τάξης των 0,3 °C. Στην αναφορά [97] οι συντάκτες παρουσιάζουν ένα μοντέλο πρόβλεψης δεδομένων, βασισμένο σε μια τεχνική που ονομάζεται Derivate – Based Prediction (DBP), με την οποία θεωρούν ότι φτάνουν σε ένα επίπεδο της τάξης του 99% της μείωσης των δεδομένων που διακινούνται, ενώ παράλληλα προσφέρουν ικανοποιητική ακρίβεια πρόβλεψης.

Στην αναφορά [98] γίνεται μια εκτενής παρουσίαση και ταξινόμηση διαφορετικών αρχιτεκτονικών και τεχνικών πρόβλεψης δεδομένων, με στόχο την μείωση των δεδομένων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, όπως αυτές απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 1.





**Σχήμα 1:** *Data Prediction Techniques*

### 3.2.3 Ενεργειακά Αποδοτικές Τεχνικές Δρομολόγησης

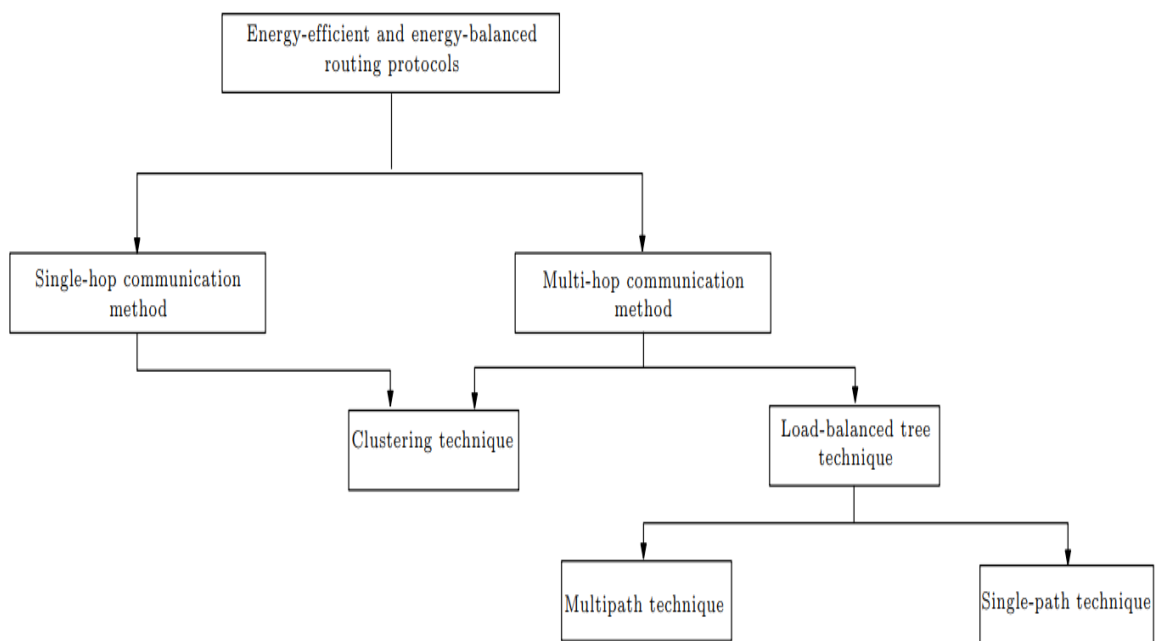
Η δρομολόγηση των πακέτων, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα, ο οποίος επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας ολόκληρου του δικτύου και συνεπώς είναι υπεύθυνος και για την διάρκεια ζωής του. Η αποστολή λοιπόν των διαχειριστών, που θα κληθούν να υλοποιήσουν τεχνικές δρομολόγησης, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, εκτός της εύρεσης και διατήρησης των μονοπατιών διάδοσης των πακέτων, είναι να λάβουν υπόψη και διάφορους άλλους παράγοντες, όπως η περιορισμένη ενέργεια και οι αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου σε περιπτώσεις αστοχίας ενός ή ορισμένων κόμβων.

Ορισμένοι από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν μια ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι:

- Ανάπτυξη των κόμβων
- Ετερογένεια των κόμβων
- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας χωρίς να χαθεί η ακρίβεια
- Το μοντέλο αναφοράς των δεδομένων
- Ανοχή σε σφάλματα
- Κλιμάκωση

- Κάλυψη
- Η ποιότητα των υπηρεσιών
- Τα μέσα μετάδοσης
- Κινητικότητα των κόμβων
- Συνδεσιμότητα

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω παράγοντες, εστιάζοντας κυρίως στον τομέα της κατανάλωσης ενέργειας, παρουσιάζουμε μια κατηγοριοποίηση των τεχνικών/πρωτοκόλλων δρομολόγησης (σχήμα 2), οι οποίες έχουν σαν στόχο την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων [99].



**Σχήμα 2:** *Energy Efficient and Energy Balanced Routing Methods and Techniques*

Όλες οι τεχνικές που παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα, μπορεί να διαφέρουν μεταξύ τους, έχουν όμως ως κοινό στόχο την εξισορρόπηση ενέργειας στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, με σκοπό την επέκταση της ζωής και της λειτουργικότητάς του.

### 3.2.3.1 Επικοινωνία Πολλαπλών Βημάτων

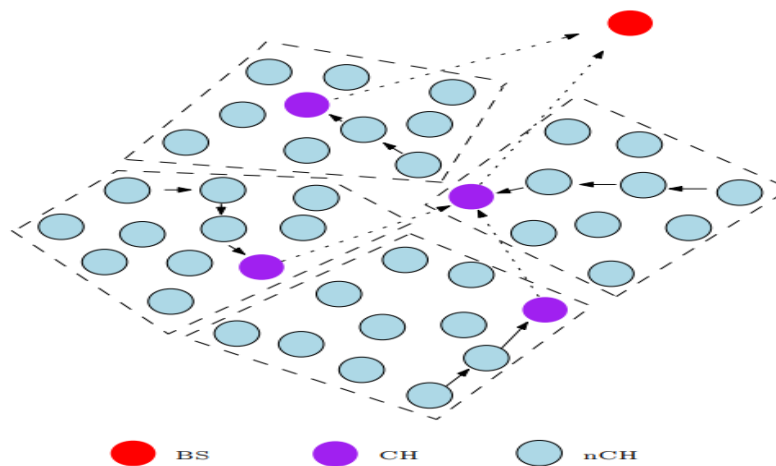
Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο χρησιμοποιεί το μοντέλο της επικοινωνίας πολλαπλών βημάτων/μεταπηδήσεων, τα δεδομένα που παράγονται από τους αισθητήρες, μεταφέρονται από τον κόμβο προς τον συγκεντρωτή, μέσω ενός ή

περισσότερων κόμβων, που λειτουργούν ως αναμεταδότες. Ορισμένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από το μοντέλο των πολλαπλών βημάτων, είναι η βελτίωση της συνδεσιμότητας, η επέκταση της κάλυψης του δικτύου, οι υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων και η αποδοτικότερη χρήση του μέσου επικοινωνίας. Ο βασικότερος ωστόσο λόγος ο οποίος οδήγησε στην χρήση τέτοιων τεχνικών επικοινωνίας, είναι η **μείωση της απόστασης** μεταξύ του κόμβου που παράγει τα δεδομένα και του συγκεντρωτή. Η απόσταση σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αύξηση ή την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερη ισχύς χρειάζεται ο κόμβος για να μπορέσει να ‘φτάσει’ τον συγκεντρωτή και να στείλει επιτυχώς τα δεδομένα που έχει συλλέξει.

Οι μέθοδοι επικοινωνίας πολλαπλών βημάτων, που συνήθως χρησιμοποιούνται σε υλοποιήσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Στην τεχνική της συστάδας πολλαπλών βημάτων (Multi – hop Clustering) και στην τεχνική ενός δέντρου εξισορρόπησης φορτίου (Load Balancing Tree).

### 1. Συστάδα Πολλαπλών βημάτων

Στο παρακάτω σχήμα 3, παρατηρούμε ένα παράδειγμα υλοποίησης ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, με χρήση της τεχνικής συστάδας πολλαπλών βημάτων.



**Σχήμα 3:** Συστάδα Πολλαπλών Βημάτων

Ένα δίκτυο συστάδας αποτελείται από τριών ειδών συσκευές. Τον σταθμό βάσης (Base Station – BS), όπου προορίζονται να φτάσουν όλα τα δεδομένα, τον επικεφαλής συστάδας (Cluster Head – CH), ο οποίος στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι εξοπλισμένος με περισσότερες δυνατότητες, σε σχέση με τους απλούς κόμβους και είναι

υπεύθυνος για τον συντονισμό της συστάδας που ανήκει και τέλος τον απλό κόμβο (nCH), ο οποίος έχει περιορισμένες δυνατότητες. Στις περιπτώσεις όπου οι CHs έχουν διαφορετικές δυνατότητες σε σχέση με τους απλούς κόμβους, τότε αναφερόμαστε σε ένα ετερογενές δίκτυο, ενώ τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που θα κληθούν να υλοποιηθούν, χαρακτηρίζονται ως ιεραρχικά πρωτόκολλα. Σε ένα τέτοιο δίκτυο, οι απλοί κόμβοι συλλέγουν τα δεδομένα και τα στέλνουν στον CH, άμεσα ή μέσω άλλων κόμβων της ίδιας συστάδας. Στη συνέχεια ο CH της κάθε συστάδας κάνει συνάθροιση των δεδομένων που λαμβάνει από τους κόμβους και τα στέλνει άμεσα στον σταθμό βάσης ή έμμεσα μέσω άλλων CHs. Ως αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας, είναι οι CHs να καταναλώνουν αρκετά μεγαλύτερη ενέργεια, ενώ σε περίπτωση κατανάλωσης όλης της ενέργειάς τους, τότε αυτομάτως θέτουν την συστάδα της οποίας ηγείται, εκτός δικτύου.

Μια από τις πιο σημαντικές προσεγγίσεις, όσον αφορά τη δρομολόγηση σε ένα τέτοιο δίκτυο, είναι ότι ο CH δεν θα πρέπει να είναι ποτέ σταθερός, αλλά να αλλάζει ανά τακτά χρονικά διαστήματα ή ανά γύρους δρομολόγησης, επιλέγοντας π.χ ως CH τον κόμβο με την υψηλότερη υπολειπόμενη ενέργεια κάθε φορά.

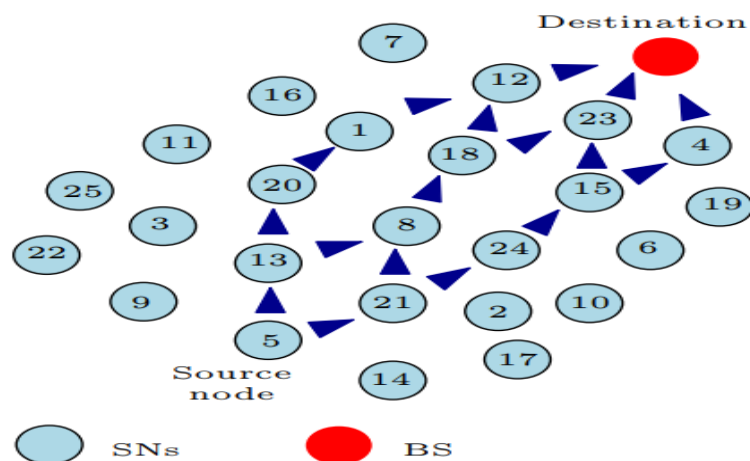
Αρκετές είναι οι αναφορές στη σχετική βιβλιογραφία, που υιοθετούν τέτοιες τεχνικές δρομολόγησης. Στην αναφορά [100] οι συντάκτες παρουσιάζουν έναν αλγόριθμο ενεργειακά αποδοτικής επιλογής CH, ο οποίος ονομάζεται Particle Swarm Optimization (PSO-ECHS). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, για την επιλογή του CH, λαμβάνει υπόψη διάφορες παραμέτρους, όπως την απόσταση μέσα στη συστάδα (intra – cluster distance), την απόσταση από τον συγκεντρωτή και την υπολειπόμενη ενέργεια του κάθε κόμβου. Στην αναφορά [101] οι συντάκτες παρουσιάζουν έναν γενετικό αλγόριθμο, για την αυτοοργάνωση της συστάδας ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων (a genetic algorithm based, self-organizing network clustering – GASONEC), ο οποίος για την επιλογή του κατάλληλου CH της κάθε συστάδας, λαμβάνει υπόψη του παράγοντες όπως η υπολειπόμενη ενέργεια του κάθε κόμβου, η αναμενόμενη κατανάλωση ενέργειας και η απόσταση του κάθε κόμβου, από τον σταθμό βάσης. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, ουσιαστικά εξισορροπεί τις 3 παραπάνω παραμέτρους, οργανώνοντας τους κόμβους σε κατάλληλες συστάδες και επιλέγοντας τον κατάλληλο κόμβο, ως αντικατάσταση του αρχικού CH, καταφέρνει να επιτύχει επέκταση της ζωής του δικτύου της τάξης του 43,44%. Στην αναφορά [102] οι συντάκτες, βασιζόμενοι στο ιεραρχικό πρωτόκολλο LEACH[103] προτείνουν το πρωτόκολλο Node Ranked LEACH σύμφωνα με το οποίο προσπαθούν να υπερκεράσουν τα προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθούν από μια

τυχαία επιλογή του CH. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, για την επιλογή του CH, λαμβάνονται υπόψη παράγοντες που αφορούν τον αριθμό των συνδέσεων και το κόστος μονοπατιού (path cost) μεταξύ των κόμβων.

## 2. Δέντρο εξισορρόπησης φορτίου

Η τεχνική ενός δέντρου εξισορρόπησης φορτίου, ουσιαστικά προσπαθεί να ανακαλύψει μονοπάτια, από τον κόμβο πηγή έως τον σταθμό βάσης, τα οποία θα επιτυγχάνουν την μέγιστη δυνατή εξισορρόπηση φορτίου, με στόχο μια ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση. Η βασικότερη μέριμνα που θα πρέπει να δοθεί, σε μια τέτοια υλοποίηση, είναι ο προσεκτικός σχεδιασμός της αλυσίδας δρομολόγησης των πακέτων. Στις τεχνικές του δέντρου εξισορρόπησης φορτίου, η αλυσίδα δρομολόγησης των πακέτων, που δημιουργείται σε κάθε γύρο εκπομπών, θα πρέπει να αλλάζει, για να μην επιβαρύνονται ενεργειακά πάντα οι ίδιοι κόμβοι. Το βασικό στοιχείο αυτής της τεχνικής, που οδηγεί σε μια ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση, είναι το γεγονός ότι τα πακέτα που δημιουργούνται στον κόμβο πηγή, κατανέμονται σε όσους περισσότερους ενδιάμεσους κόμβους, με στόχο ο κάθε ενδιάμεσος κόμβος να έχει να διαχειριστεί ένα πολύ μικρότερο φορτίο.

Η κατασκευή της αλυσίδας δρομολόγησης, στα δέντρα εξισορρόπησης φορτίου, μπορεί να γίνει είτε με τη μέθοδο πολλαπλών μονοπατιών (σχήμα 4), είτε με τη μέθοδο ενός μόνο μονοπατιού (σχήμα 5).



Σχήμα 4: Δέντρο Εξισορρόπησης Φορτίου Πολλαπλών Μονοπατιών

Με τη μέθοδο των πολλαπλών μονοπατιών, ουσιαστικά επιτυγχάνουμε εξισορρόπηση φορτίου, κατανέμοντας την δικτυακή κίνηση σε όσο το δυνατό περισσότερους κόμβους, μέχρι τα πακέτα να φτάσουν στον σταθμό βάσης. Η υλοποίηση

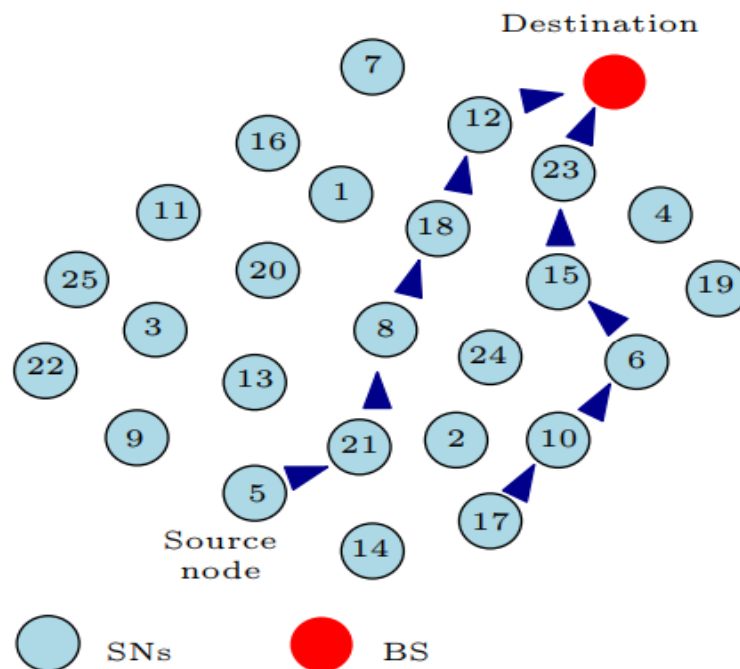
ωστόσο μιας δρομολόγησης πολλαπλών μονοπατιών, δεν είναι εύκολη υπόθεση και θα πρέπει να λάβει υπόψη διάφορους παράγοντες. Ένας από τους παράγοντες αυτούς είναι η **φάση ανακάλυψης του μονοπατιού**, κατά την οποία επιλέγονται οι ενδιάμεσοι κόμβοι, οι οποίοι θα εξυπηρετήσουν τα πολλαπλά μονοπάτια. Ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας είναι η **φάση καθορισμού του αριθμού των μονοπατιών**, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για να εξυπηρετήσουν τον διαμοιρασμό της δικτυακής κίνησης.

Λαμβάνοντας υπόψη του παραπάνω παράγοντες και έχοντας σαν στόχο μια ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση, διάφορες είναι οι προσεγγίσεις, οι οποίες υλοποιούν την τεχνική των πολλαπλών μονοπατιών μέσω ενός δέντρου εξισορρόπησης φορτίου.

Ορισμένες από αυτές επιλέγουν τους ενδιάμεσους κόμβους με βάση την υπολειπόμενη ενέργειά τους (Residual Energy – RE), ενώ άλλες λαμβάνουν υπόψη τον αριθμό των μεταπηδήσεων (Hop Counts HC), την απόσταση των μεταπηδήσεων (Hop Distance – HD) καθώς επίσης την ισχύ μετάδοσης (Transmission Power – TP). Ιδιαίτερη προσοχή ωστόσο θα πρέπει να δοθεί, κατά τη διάρκεια της φάσης της επιλογής του τρόπου με τον οποίο θα ανακαλυφθούν και θα καθοριστούν τα μονοπάτια, διότι αρκετά προβλήματα μπορεί να δημιουργηθούν. Για παράδειγμα αν επιλέξουμε ως ενδιάμεσους κόμβους αναμεταδότες, τους κόμβους με την υψηλότερη υπολειπόμενη ενέργεια (RE), τότε αυτό μπορεί να μας οδηγήσει σε μια καθυστέρηση του δικτύου, διότι μπορεί οι κόμβοι με την υψηλότερη υπολειπόμενη ενέργεια να βρίσκονται σε μακρινές αποστάσεις μεταξύ τους. Επίσης, αν επιλέξουμε τους ενδιάμεσους κόμβους, λαμβάνοντας υπόψη τον μικρότερο αριθμό μεταπηδήσεων (HC) ή την απόσταση των μεταπηδήσεων (HD), τότε υπάρχει η πιθανότητα να οδηγηθούμε μέσω κόμβων, οι οποίοι μπορεί να έχουν πολύ μικρή υπολειπόμενη ενέργεια, με αποτέλεσμα να οδηγηθούμε σε αστοχία δρομολόγησης. Συνεπώς, η δημιουργία των πολλαπλών μονοπατιών, με γνώμονα μια ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση, θα πρέπει να κάνει μια εξισορρόπηση των παραπάνω προσεγγίσεων, λαμβάνοντας υπόψη και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την λειτουργικότητα του δικτύου και τις εφαρμογές τις οποίες πρόκειται να εξυπηρετήσουν.

Η μέθοδος του **ενός μονοπατιού**, σε αντίθεση με την μέθοδο των πολλαπλών μονοπατιών, προσπαθεί να δημιουργήσει ένα και μόνο, ενεργειακά αποδοτικό και εξισορροπημένο μονοπάτι, προς τον σταθμό βάσης. Η μέθοδος αυτή, είναι λιγότερη περίπλοκη σε σχέση με την μέθοδο των πολλαπλών μονοπατιών και επιτυγχάνει μείωση της καθυστέρησης στο συνολικό δίκτυο, κάνοντάς την κατάλληλη για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Όπως και στην περίπτωση των πολλαπλών μονοπατιών, οι

προσεγγίσεις για τον τρόπο επιλογής του μονοπατιού είναι παραπλήσιες και οι παράγοντες που μπορεί να ληφθούν υπόψη είναι η υπολειπόμενη ενέργειά (RE), ο αριθμός των μεταπηδήσεων (HC), η απόσταση των μεταπηδήσεων (HD), η συνολική ενέργεια (Total Energy- TE), η ισχύς μετάδοσης (TP) και η μέση ενέργεια του δικτύου (Average net work Energy – AE). Η ύπαρξη ωστόσο ενός και μόνο μονοπατιού, κάνει το σύστημα ευάλωτο, σε περίπτωση αστοχίας κάποιου ενδιάμεσου κόμβου, η οποία θα οδηγήσει σε αστοχία δρομολόγησης δεδομένων. Επομένως, για την επιλογή του κατάλληλου μονοπατιού δρομολόγησης δεδομένων, πέρα από την εξισορρόπηση των παραπάνω παραγόντων, που θα πρέπει να γίνει για μια ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση, θα πρέπει να εγγραφεί και την αξιοπιστία μετάδοσης των δεδομένων.



**Σχήμα 5:** Δέντρο Εξισορρόπησης Φορτίου Ενός Μονοπατιού

### 3.2.3.2 Επικοινωνία Ενός Βήματος

Στην μέθοδο επικοινωνίας ενός βήματος, όλοι οι κόμβοι στέλνουν άμεσα τα δεδομένα που συλλέγουν από το περιβάλλον, στον σταθμό βάσης, χωρίς κανέναν ενδιάμεσο κόμβο αναμεταδότη. Με αυτό τον τρόπο, μειώνουμε σημαντικά την καθυστέρηση σε ένα δίκτυο, αποφεύγουμε προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθούν από το φαινόμενο της ενεργειακής “τρύπας” (Energy Hole), ενώ παράλληλα προσφέρουμε αξιόπιστη μετάδοση, διότι δεν υπάρχει ο κίνδυνος να χαθούν δεδομένα από πολλαπλές μεταπηδήσεις. Αν ένας κόμβος είναι ενεργειακά επαρκής, στέλνει τα δεδομένα που

συλλέγει στο σταθμό βάσης, ενώ αν κάποιος κόμβος δεν έχει ενεργειακή επάρκεια ή έχει βγει εκτός λειτουργίας, απλά δεν μπορεί να στείλει τα δικά του δεδομένα, και δεν επηρεάζει τους υπόλοιπους κόμβους. Η συγκεκριμένη μέθοδος επικοινωνίας, είναι ενεργειακά πιο αποδοτική, σε σχέση με την μέθοδο πολλαπλών μεταπηδήσεων, διότι ο κάθε κόμβος επιβαρύνεται μόνο με το δικό του φορτίο. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή λειτουργεί ενεργειακά πιο αποδοτικά, σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μικρής κλίμακας, όπου οι κόμβοι βρίσκονται κοντά στον σταθμό βάσης. Σε περιπτώσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων, όπου οι κόμβοι βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τον σταθμό βάσης, η μέθοδος αυτή δεν λειτουργεί αποδοτικά, διότι οι απομακρυσμένοι από το σταθμό βάσης κόμβοι, χρειάζονται μεγαλύτερη ισχύ μετάδοσης δεδομένων, προκειμένου να τον “φτάσουν”, με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας. Στις περιπτώσεις μεγάλης κλίμακας ασύρματων δικτύων αισθητήρων, για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιείται το μοντέλο της συστάδας ενός βήματος.

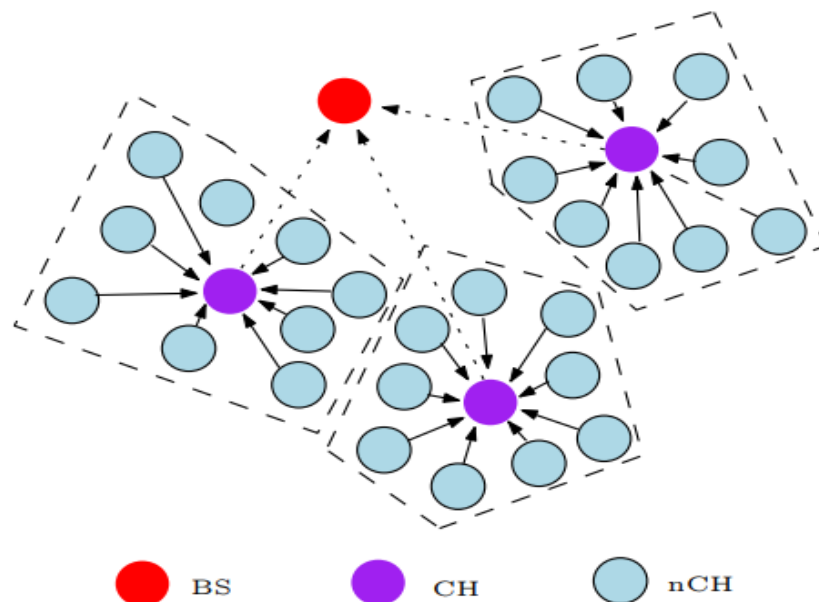
#### **Συστάδα ενός βήματος:**

Στο μοντέλο της συστάδας ενός βήματος, το δίκτυο χωρίζεται σε ομάδες (clusters) και η κάθε συστάδα έχει ως “επικεφαλή” έναν κόμβο. Ο κόμβος αυτός βρίσκεται σε μικρότερη απόσταση από τους απλούς κόμβους της συστάδας, αναφορικά με τον σταθμό βάσης και όλα τα μέλη της συστάδας στέλνουν τα δεδομένα που συλλέγουν στον κόμβο αυτόν. Στη συνέχεια ο “επικεφαλής” της κάθε συστάδας, κάνει συνάθροιση των δεδομένων που παραλαμβάνει και τα στέλνει στον σταθμό βάσης. Χαρακτηριστικό γνώρισμα τόσο της επικοινωνίας εντός της συστάδας, όσο και της επικοινωνίας των “επικεφαλής” της κάθε συστάδας με τον σταθμό βάσης, είναι ότι δεν υπάρχει ενδιάμεσος κόμβος αναμεταδότης και η επικοινωνία γίνεται άμεσα. Το βασικό πρόβλημα, σε τέτοιες μεθόδους επικοινωνίας, είναι το γεγονός ότι ο “επικεφαλής” της κάθε συστάδας, διαχειρίζεται όλα τα δεδομένα που παραλαμβάνει από τους κόμβους, εκτελεί περαιτέρω υπολογισμούς πάνω στα δεδομένα (όπως συνάθροιση κ.λ.π), ενώ παράλληλα καλείται να στείλει όλα αυτά τα δεδομένα στον σταθμό βάσης, ο οποίος πιθανόν να βρίσκεται σε αρκετά μεγάλη απόσταση. Αυτό έχει σαν συνέπεια την μεγάλη κατανάλωση ενέργειας από τους “επικεφαλής”, με κίνδυνο να ξεμείνουν κάποια στιγμή από ενέργεια, αποκόπτοντας ολόκληρη τη συστάδα από το δίκτυο.

Αρκετές είναι οι αναφορές στη σχετική βιβλιογραφία, σχετικά με μια ενεργειακά αποδοτική δρομολόγηση, πάνω σε δίκτυα συστάδας ενός βήματος. Οι περισσότερες από αυτές εστιάζουν στον “επικεφαλής” της κάθε συστάδας, ο οποίος καταναλώνει την



περισσότερη ενέργεια. Οι περισσότερες από αυτές, χρησιμοποιούν τεχνικές και πρωτόκολλα δρομολόγησης, που εστιάζουν στην συχνή αλλαγή του επικεφαλής της κάθε συστάδας, με αποτέλεσμα η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας που απαιτεί η συγκεκριμένη “θέση”, να διαμοιράζεται και σε άλλους. Στην αναφορά [104] οι συντάκτες παρουσιάζουν ένα ενεργειακά αποδοτικό σχέδιο δημιουργίας συστάδας, σύμφωνα με το οποίο η επιλογή του “επικεφαλής” της συστάδας, γίνεται ανάλογα με τα βάρη (weight) τα οποία έχουν ανατεθεί στους κόμβους της και τα οποία διαμορφώνονται ανάλογα με την υπολειπόμενη ενέργειά (RE) τους και την μέση ενέργεια (Average Energy – AE) των κόμβων της συστάδας. Στην αναφορά [105] οι συντάκτες παρουσιάζουν ένα σχέδιο δυναμικής επιλογής του “επικεφαλής” της συστάδας, υποστηρίζοντας ότι αυξάνουν τη ζωή του δικτύου κατά 50%, σε σχέση με το αντίστοιχο LEACH πρωτόκολλο δρομολόγησης.



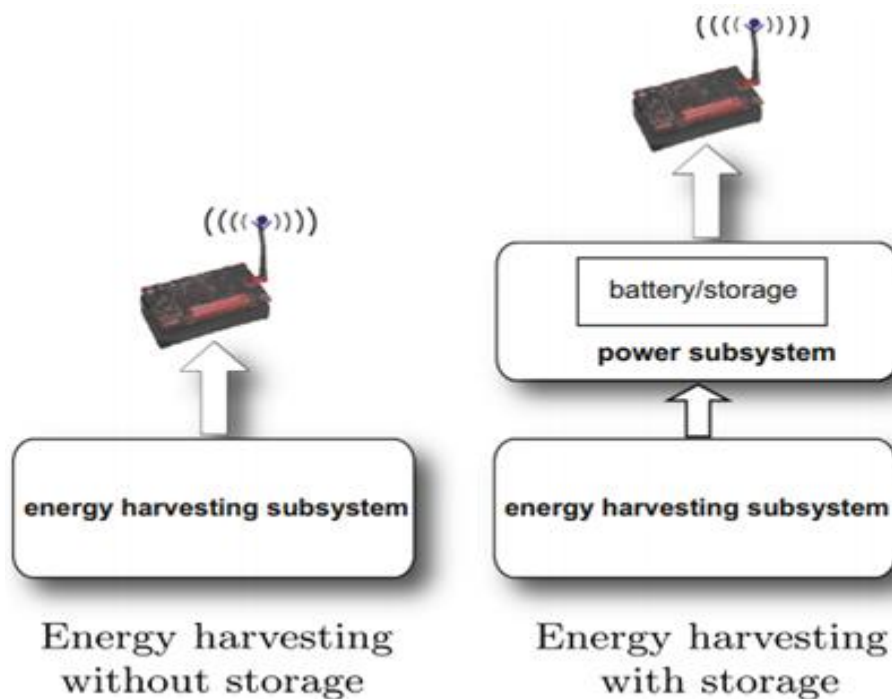
**Σχήμα 6:** Παράδειγμα Συστάδας ενός Βήματος

### 3.2.4 Εξόρυξη Ενέργειας

Όπως έχουμε προαναφέρει, ένας από τους βασικότερους περιορισμούς, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, είναι οι περιορισμένοι πόροι του κόμβου. Ένας από τους πιο σημαντικούς αυτούς περιορισμούς, είναι η περιορισμένη ενέργεια που διαθέτει ο κάθε κόμβος, η οποία συνήθως προέρχεται από μια απλή μπαταρία. Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, έχει άμεσο αντίκτυπο στη διάρκεια ζωής ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, ειδικά στις περιπτώσεις εκείνες, όπου η αντικατάστασή της είναι αδύνατη. Ειδικά σε

τέτοιες περιπτώσεις ασύρματων δικτύων αισθητήρων, παρατηρούμε μια στροφή της επιστημονικής κοινότητας προς την κατεύθυνση των επαναφορτιζόμενων μπαταριών, οι οποίες σε συνδυασμό με νέες τεχνικές εξόρυξης ενέργειας, αποτελούν μια ενεργειακά αποδοτική λύση για την επέκταση της ζωής ολόκληρου του δικτύου.

Η εξόρυξη ενέργειας αναφέρεται στον μηχανισμό εκείνο, ο οποίος έχει ως στόχο την παραγωγή ενέργειας από το περιβάλλον, με σκοπό να τροφοδοτήσει τον κόμβο και να συμβάλλει τόσο στην απρόσκοπτη λειτουργία του, όσο και στην επέκταση της ζωής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Τα μοντέλα εξόρυξης ενέργειας, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στο μοντέλο όπου η εξορυσσόμενη από το περιβάλλον ενέργεια, μετατρέπεται άμεσα σε ηλεκτρική και τροφοδοτεί απευθείας τον κόμβο και το μοντέλο στο οποίο η εξορυσσόμενη ενέργεια αποθηκεύεται, πριν τροφοδοτήσει τον κόμβο (εικόνα 15).



**Εικόνα 15:** WSN Energy Harvesting Models

Ορισμένες από τις πιο σημαντικές πηγές εξόρυξης ενέργειας, είναι το περιβάλλον, η μηχανική, ο άνθρωπος καθώς επίσης και πηγές ασύρματης φόρτισης μπαταριών (rectifiers).

#### 3.2.4.1 Περιβάλλον

Όσον αφορά το περιβάλλον, αρκετές είναι οι πηγές εξόρυξης ενέργειας οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Μια από τις πιο

σημαντικές πηγές, αποτελεί η **ηλιακή ενέργεια**, η οποία συσσωρεύεται, μέσω της χρήσης φωτοβολταϊκών κελιών και εν συνεχεία μετατρέπεται σε ηλεκτρική, τροφοδοτώντας τον ασύρματο κόμβο. Αποτελεί μια από τις πιο παραδοσιακές τεχνικές εξόρυξης ενέργειας προσφέροντας ένα ικανοποιητικό επίπεδο μετατροπής, σε σχέση με άλλες τεχνικές εξόρυξης. Η παραγόμενη ισχύς ωστόσο, από ένα τέτοιο σύστημα εξόρυξης ενέργειας, εξαρτάται άμεσα από την παρουσία του φωτός και από παράγοντες του περιβάλλοντος. Στην αναφορά [106] οι συντάκτες παρουσιάζουν ένα σύστημα εξόρυξης και διαχείρισης ενέργειας για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία προορίζονται για εφαρμογές μεταφοράς και αποθήκευσης αγαθών, ενώ στην αναφορά [107] οι συντάκτες παρουσιάζουν ένα υβριδικό μοντέλο, συνδυάζοντας εξόρυξη ηλιακής ενέργειας παράλληλα με ασύρματη φόρτιση μπαταριών. Το μοντέλο προσπαθεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της συστάδας, όπου ο “επικεφαλής” καταναλώνει την περισσότερη ενέργεια, με κίνδυνο να βγει εκτός λειτουργίας, τροφοδοτώντας τον με ηλιακό πάνελ, εξορύσσοντας ενέργεια από τον ήλιο, ενώ στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου, εφαρμόζεται η τεχνική της ασύρματης φόρτισης, με σκοπό την αδιάλειπτη λειτουργία του δικτύου και την επέκταση της ζωής του.

Οι τεχνικές εξόρυξης **θερμικής ενέργειας**, ουσιαστικά υλοποιούνται από την εξόρυξη **θερμοηλεκτρικής** και από την εξόρυξη **πυροηλεκτρικής** ενέργειας. Με την εξόρυξη θερμοηλεκτρικής ενέργειας, ουσιαστικά δημιουργούμε ηλεκτρική ενέργεια, εκμεταλλευόμενοι την διαφορά θερμοκρασίας δύο στοιχείων (μετάλλων) που έρχονται σε επαφή και το φαινόμενο του Seebeck, χρησιμοποιώντας γεννήτριες θερμοηλεκτρικής ισχύος (TEGs). Με την εξόρυξη πυροηλεκτρικής ενέργειας, ουσιαστικά δημιουργούμε ενέργεια ζεσταίνοντας ή κρυώνοντας συνεχώς, πυροηλεκτρικά υλικά. Αναφορές τεχνικών εξόρυξης θερμικής ενέργειας σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, μπορεί κανείς να συναντήσει στις αναφορές[108][109][110].

Άλλες πηγές εξόρυξης ενέργειας από το περιβάλλον, περιλαμβάνουν εξόρυξη ενέργειας από την εκμετάλλευση ροής ενός στοιχείου, όπως την ροή **ανέμου και νερού**. Η αρχιτεκτονική τεχνικών εκμετάλλευσης του ανέμου, συνήθως περιλαμβάνει ένα αρχικό στάδιο, στο οποίο με τη χρήση ενός διορθωτή (rectifier), γίνεται μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος που εξέρχεται από την τουρμπίνα, σε ένα πιο κατάλληλο συνεχές ρεύμα (AC to DC), ενώ το δεύτερο στάδιο, με τη χρήση ενός ρυθμιστή (Maximum Power Point Tracking - MPPT), περιλαμβάνει την αποθήκευση ενέργειας και την τροφοδοσία του κόμβου. [111]

Με την τεχνική εξόρυξης ενέργειας με τη χρήση του νερού, ουσιαστικά δημιουργούμε ενέργεια εκμεταλλευόμενοι την ροή ή την πτώση νερού όπως για παράδειγμα στην αναφορά [112]

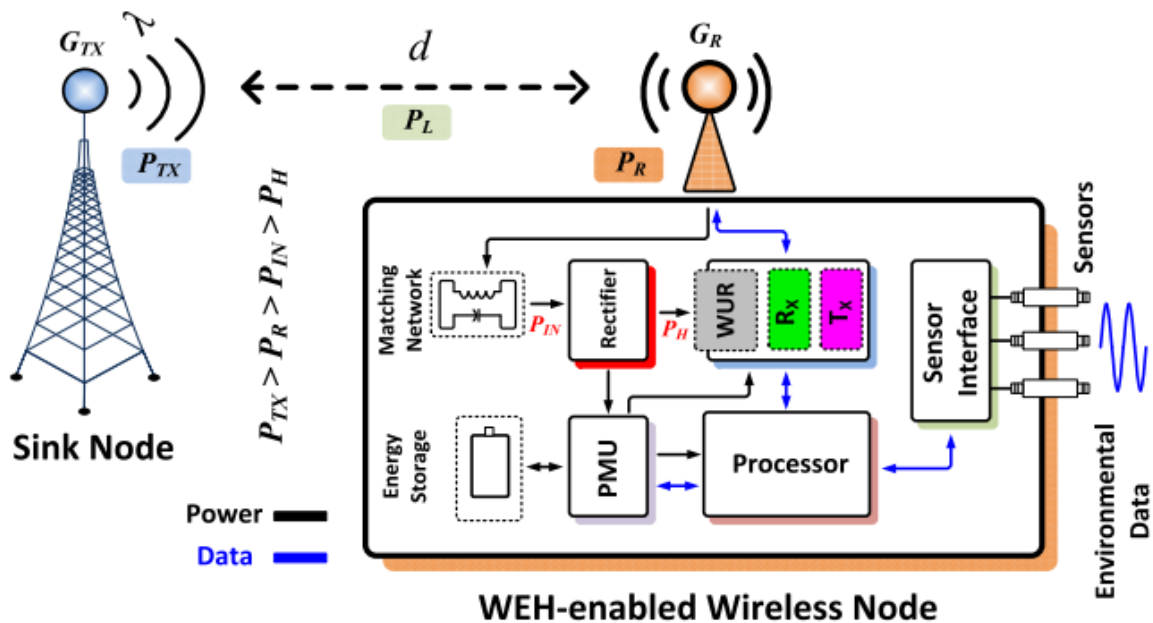
#### 3.2.4.2 Ασύρματη (RF) Εξόρυξη Ενέργειας

Μια αρκετά ελκυστική και πολλά υποσχόμενη προσέγγιση εξόρυξης ενέργειας για τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αλλά και γενικώς για το IoT, είναι οι ασύρματες τεχνικές εξόρυξης, με τις οποίες στοχεύουμε την φόρτιση/επαναφόρτιση της μπαταρίας ενός κόμβου με σκοπό να αυξήσουμε την διάρκεια ζωής του και να εξασφαλίσουμε την λειτουργικότητά του. Μια από αυτές τις τεχνικές, αποτελεί η τεχνική της εκμετάλλευσης των ραδιοσυχνοτήτων (RF). Ένα σύστημα εκμετάλλευσης ραδιοσυχνοτήτων, ουσιαστικά έχει σαν στόχο να παραλάβει τα εκπεμπόμενα κύματα και να τα μετατρέψει σε μια σταθερή κυματομορφή, με σκοπό να επαναφορτίσει ή να τροφοδοτήσει έναν ασύρματο κόμβο. Όσον αφορά την πηγή από την οποία μπορεί να προέρχονται τα ραδιοκύματα αυτά, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη αναφέρεται στην **εκμετάλλευση ραδιοκυμάτων** τα οποία προέρχονται από το **περιβάλλον**, όπως για παράδειγμα η εκμετάλλευση κυμάτων που προέρχονται από τηλεοράσεις, ραδιοπύργους ή από WiFi access points. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ωστόσο, δεν υιοθετείται αρκετά, λόγω της μη προβλέψιμης φύσης τέτοιων τεχνικών αλλά και της απουσίας ελέγχου σε ένα τέτοιο σύστημα. Η δεύτερη προσέγγιση, αφορά την ύπαρξη μιας **συγκεκριμένης και καθορισμένης πηγής** εκπομπής ραδιοκυμάτων, όπως για παράδειγμα η χρήση ενός sink, ο οποίος πέρα από τις βασικές λειτουργίες που είναι προορισμένος να επιτελέσει, έχει και σαν στόχο την εκπομπή ραδιοκυμάτων, με σκοπό να τροφοδοτήσει ή να επαναφορτίσει της μπαταρίες ενός ή περισσότερων κόμβων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης, είναι ότι το σύστημα αυτό είναι πιο προβλέψιμο με ταυτόχρονη ύπαρξη δυνατότητας ελέγχου του ρυθμού εκπομπής και της βέλτιστης συχνότητας.

Ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 16 [113]. Όπως παρατηρούμε, ο ασύρματος κόμβος του παρακάτω σχήματος, πέρα των βασικών στοιχείων που περιέχει (επεξεργαστής, αισθητήρα, κεραία κ.λ.π), εμπεριέχει και ένα επιπρόσθετο στοιχείο, το οποίο αποτελεί το στοιχείο κλειδί για την ασύρματη φόρτιση/τροφοδοσία του κόμβου. Το στοιχείο αυτό ονομάζεται διορθωτής (rectifier) και σκοπός του είναι η μετατροπή των λαμβανόμενων RF σημάτων σε σταθερή DC ενέργεια, με σκοπό την

τροφοδοσία του κόμβου. Στην αναφορά[114] παρουσιάζεται από τους συντάκτες ένα διαφορετικό μοντέλο ασύρματης φόρτισης, στο οποίο γίνεται φόρτιση πολλαπλών κόμβων, την ίδια χρονική στιγμή, μέσω ενός κινητού οχήματος ασύρματης φόρτισης (Wireless Charging Vehicle - WCV), το οποίο ταξιδεύει ανάμεσα στους κόμβους ανά τακτά χρονικά διαστήματα και τους φορτίζει. Στις αναφορές [115][116][117] παρουσιάζονται πιο μοντέρνες τεχνικές ασύρματης φόρτισης ασύρματων δικτύων αισθητήρων, με τη χρήση μη επανδρωμένων σκαφών (UAV).

Επιπλέον, πιο πρόσφατες αναφορές, σε θέματα που αφορούν την ασύρματη φόρτιση, σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, μπορεί κανείς αναζητήσει στις αναφορές [118][119][120]



Εικόνα 16: Wireless Energy Harvesting Node

### 3.2.4.3 Μηχανική Ενέργεια

Η εξόρυξη μηχανικής ενέργειας ουσιαστικά προέρχεται από την διαδικασία μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική η οποία προέρχεται συνήθως από τη χρήση δονήσεων, μηχανικής έντασης (Stress) και πίεσης. Για να μπορέσουμε να εξορύξουμε ενέργεια από δονήσεις ή πιέσεις, χρειαζόμαστε μια κατάλληλη γεννήτρια μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική (Mechanical to Electrical Energy Generator - MEEG) η οποία χρησιμοποιεί ηλεκτροστατικούς, ηλεκτρομαγνητικούς η πιεζοηλεκτρικούς μηχανισμούς.

Με την τεχνική της ηλεκτροστατικής εξόρυξης ενέργειας [121] [122], ουσιαστικά δημιουργούμε ένα μεταβλητό πυκνωτή, τοποθετώντας απέναντι (δίπλα δίπλα) δύο μεταλλικές πλάκες, μια σταθερή και μια κινούμενη, οι οποίες αρχικά φορτίζονται. Στη συνέχεια με τη χρήση δονήσεων, ξεχωρίζουμε τις δύο αυτές πλάκες μεταξύ τους, μετακινώντας την κινητή πλάκα και με την κίνηση αυτή η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική, από την αλλαγή χωρητικότητας.

Με την τεχνική της πιεζοηλεκτρικής εξόρυξης ενέργειας [123] [124], χρησιμοποιούμε πιεζοηλεκτρικά υλικά στα οποία όταν ασκούμε πίεση, δύναμη ή δόνηση έχουν την τάση να συστέλλονται και διαστέλλονται, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ηλεκτρική ενέργεια.

#### **3.2.4.4 Ανθρώπινη Ενέργεια**

Η εξόρυξη ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένη στον άνθρωπο, αποτελεί μια αρκετά υποσχόμενη τεχνική εξόρυξης, η οποία κρίνεται κατάλληλη ειδικά για εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων που αφορούν τον τομέα της υγείας και πιο συγκεκριμένα για εφαρμογές που προορίζονται για το ανθρώπινο σώμα (Wireless Body Area Network-WBAN).

Σε τέτοιες εφαρμογές, τοποθετούνται πάνω ή μέσα στο σώμα του ανθρώπου ένας ή περισσότεροι αισθητήρες, με σκοπό την παρακολούθηση των σωματικών λειτουργιών. Σε τέτοια συστήματα κρίνεται απαραίτητο, οι αισθητήρες να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, αντίστοιχη με τη διάρκεια ζωής του ανθρώπου. Η εξόρυξη ενέργειας προερχόμενη από τον άνθρωπο, η οποία μπορεί να τροφοδοτήσει τέτοιους αισθητήρες, μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, όπως για παράδειγμα από την κίνηση των δακτύλων, των χεριών και των ποδιών, από την πίεση των ποδιών κατά το περπάτημα ή το τρέξιμο, από την ροή του αίματος, από την θερμότητα του σώματος κ.λ.π. Βασική πρόκληση τέτοιων τεχνικών, αποτελεί η απαίτηση για τη δημιουργία αρκετά μικροσκοπικών συστημάτων εξόρυξης ενέργειας, τα οποία θα μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στο ανθρώπινο σώμα.

Παραδείγματα εφαρμογών εξόρυξης ενέργειας από το ανθρώπινο σώμα, μπορεί κανείς να αναζητήσει στις αναφορές [125][126] [127] [128] [129].

## 4. Ενεργειακά Αποδοτικά MAC Πρωτόκολλα & Wake-up Receivers

### 4.1 Duty Cycling

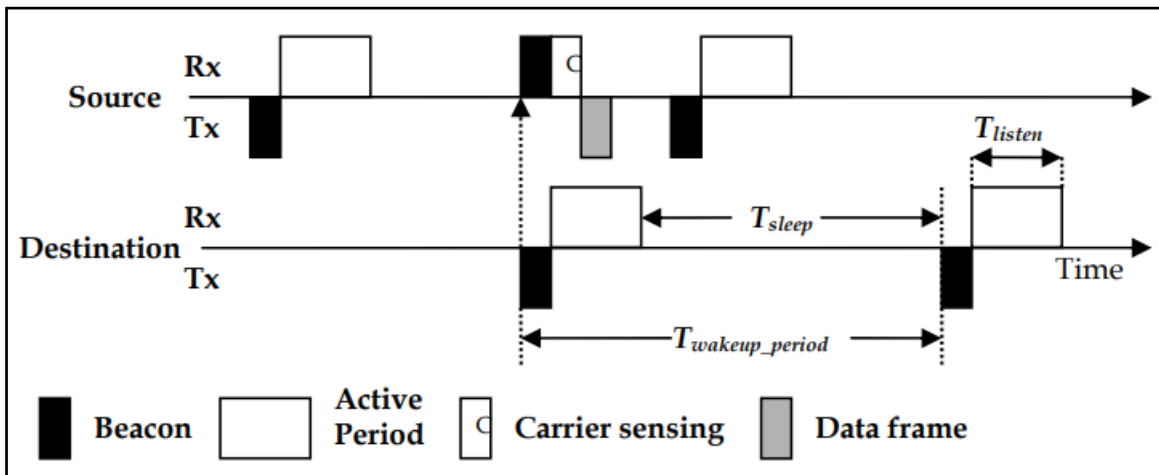
Δύο από τις κυριότερες αιτίες αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας, σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, είναι η φάση αδράνειας στην οποία μπορεί να βρίσκονται οι κόμβοι του δικτύου, “ακούγοντας” το κανάλι και η φάση αποστολής και λήψης πακέτων. Πρόκειται ουσιαστικά για δύο φάσεις, οι οποίες έχουν ως κοινό στοιχείο την **ενεργή** κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο κόμβος, έχοντας παράλληλα ενεργοποιημένο τον πομποδέκτη. Μια από τις σημαντικότερες τεχνικές που εφαρμόζεται σε τέτοια δίκτυα, για την μείωση κατανάλωσης ενέργειας, είναι το **duty cycling**.

Ο όρος duty cycle αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου που μια συσκευή είναι ενεργή για μια συγκεκριμένη περίοδο. Αν για παράδειγμα σε μια περίοδο 100ms το ραδιοσύστημα του κόμβου ενεργοποιείται για 1ms, τότε το duty cycle του συγκεκριμένου είναι 1%. Στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, το duty cycling αναφέρεται ως ένας μηχανισμός, ο οποίος υλοποιείται κυρίως από πρωτόκολλα επιπέδου MAC και έχει σαν στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω της αλλαγής της κατάστασης στην οποία βρίσκονται οι κόμβοι. Με πιο απλά λόγια, ο συγκεκριμένος μηχανισμός έχει σαν στόχο να θέσει τον κόμβο σε κατάσταση ύπνωσης, όταν δεν είναι απαραίτητο να είναι ενεργός και να τον ενεργοποιεί μόνο όταν χρειάζεται. Η ιδεατή κατάσταση ενός μηχανισμού duty cycling, είναι ο κόμβος να βρίσκεται μόνιμα σε κατάσταση ύπνωσης, καταναλώνοντας ελάχιστη ενέργεια και να ενεργοποιείται όταν πρόκειται να αποστείλει ή να παραλάβει κάποιο πακέτο. Με αυτό τον τρόπο εξοικονομούμε την άσκοπη κατανάλωση ενέργειας, από την άσκοπη ενεργοποίηση του κόμβου.

Όσον αφορά τις τεχνικές duty cycling, που μπορούν να εφαρμοστούν σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις: **Σύγχρονη, ψευδό-ασύγχρονη και καθαρά ασύγχρονη**.

Στην **σύγχρονη προσέγγιση** duty cycling, τα πρωτόκολλα MAC έχουν προκαθορισμένες περιόδους στις οποίες ξυπνάνε, για την ανταλλαγή πακέτων. Προγραμματίζονται ουσιαστικά συγκεκριμένα χρονικά slots στα οποία μπορεί να επιτευχθεί η επικοινωνία του αποστολέα με τον παραλήπτη. Συνεπώς ο χρόνος που

ξυπνάει ο κάθε κόμβος είναι γνωστός εκ των προτέρων. Ένα παράδειγμα σύγχρονης επικοινωνίας μπορούμε να δούμε στην παρακάτω εικόνα 17 [130] όπου ο συγχρονισμός των κόμβων επιτυγχάνεται με περιοδικές αποστολές και λήψεις beacons. Σε ένα τέτοιο σύστημα, όταν ο κόμβος πηγή έχει να στείλει ένα πακέτο, ξυπνάει στην ενεργή περίοδο του παραλήπτη και εν συνεχεία στέλνει το πακέτο.



Εικόνα 17: Σύγχρονη περιοδική αφύπνιση κόμβου

Ένας από τους βασικούς περιορισμούς αυτής της προσέγγισης είναι ότι τα σύγχρονα MAC πρωτόκολλα μπορούν να προσαρμοστούν καλύτερα σε μικρής κλίμακας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ή σε μικρά clusters τέτοιων δικτύων, διότι είναι δύσκολος ο συγχρονισμός των κόμβων ενός μεγάλου ασύρματου δικτύου. Επιπροσθέτως, η υιοθέτηση της σύγχρονης προσέγγισης, ακόμη και σε ένα μικρό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, αντιτίθεται με την απαίτηση της κλιμάκωσης. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, υπάρχουν διάφοροι παράγοντες οι οποίοι οδηγούν στην αύξηση της σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων σύγχρονης μετάδοσης. Ο πρώτος παράγοντας αφορά το υψηλό **overhead ελέγχου** που δημιουργείται από την απαίτηση για επαναλαμβανόμενο και συνεχή συγχρονισμό των κόμβων. Οι άλλοι δύο παράγοντες αφορούν τις καταστάσεις **overhearing** και **idle listening** που βρίσκονται οι κόμβοι, διότι “ξυπνάνε” ακόμη και όταν δεν έχουν πακέτα για να στείλουν ή να παραλάβουν, γεγονός που αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας του κάθε κόμβου αλλά και του συνολικού δικτύου. Από την άλλη πλευρά ωστόσο, η υιοθέτηση της σύγχρονης προσέγγισης, είναι αρκετά σημαντική σε εφαρμογές που θεωρούνται κρίσιμες από πλευράς χρόνου (Time critical applications), καθώς επίσης και σε εφαρμογές που έχουμε υψηλή διακίνηση φορτίων διότι με τη χρήση

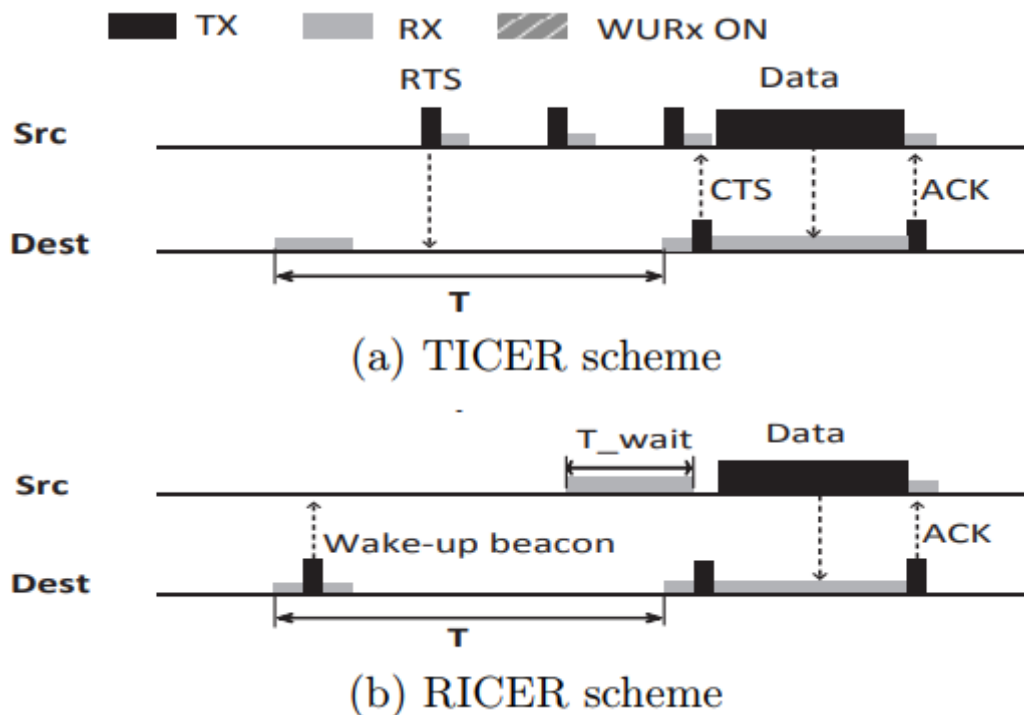


χρονικών slots έχουμε αποφυγή συγκρούσεων. Χαρακτηριστικός στόχος της προσέγγισης αυτής είναι η μείωση των καθυστερήσεων και η αύξηση της ρυθμαπόδοσης (Throughput).

Στην **ασύγχρονη ή ψευδό - ασύγχρονη προσέγγιση** duty cycling, δεν υπάρχει καμία πληροφόρηση χρονοπρογραμματισμού ή χρονικού συγχρονισμού των κόμβων σε σχέση με την επικοινωνία μεταξύ τους και την ανταλλαγή πακέτων. Ο κάθε κόμβος λειτουργεί, χρονικά αυτοτελώς και ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους. Ακολουθώντας λοιπόν την ψευδό - ασύγχρονη προσέγγιση, κάθε κόμβος του δικτύου “ξυπνάει” αυτοτελώς, ανάλογα με τους κανόνες που καθορίζει το MAC πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται.[131]

Το βασικό concept της ψευδό - ασύγχρονης προσέγγισης, είναι ότι ο κάθε κόμβος μένει σε μια διαρκή κατάσταση “ύπνωσης”, καταναλώνοντας σχεδόν μηδενική ενέργεια καθ όλη τη διάρκεια “ύπνωσης” και “ξυπνάει” μόνο όταν χρειάζεται να παραλάβει ή να αποστείλει πακέτα. Η συνήθης επικοινωνία σε ένα τέτοιο σύστημα ως εξής: Ο κόμβος προορισμός ξυπνάει ανά χρονικά διαστήματα ακούγοντας το κανάλι, εφαρμόζοντας συνήθως μια τεχνική Low Power Listening – LPL. Αν υπάρχουν πακέτα προς παραλαβή, τα παραλαμβάνει, αλλιώς πέφτει σε “ύπνωση”. Από την άλλη πλευρά, ο αποστολέας στέλνει για παράδειγμα πακέτα RTS ή PREAMBLES για να υποδηλώσει στον παραλήπτη ότι έχει δεδομένα να του στείλει. Αν δεν συμπέσουν τα πακέτα αυτά με την στιγμή αφύπνισης του παραλήπτη, τότε ο αποστολέας συνεχίζει να τα στέλνει μέχρι τη στιγμή αφύπνισης του παραλήπτη. Παρατηρούμε δηλαδή ότι ο αποστολέας μπορεί να ξεκινήσει την επικοινωνία με τον παραλήπτη οποιαδήποτε στιγμή θελήσει ή όταν έχει δεδομένα, ενώ από την άλλη πλευρά, η επιτυχής παραλαβή των δεδομένων αυτών γίνεται στον χρόνο αφύπνισης του παραλήπτη. Αυτός είναι ένας από τους βασικότερους λόγους που κατατάσσουμε αυτές τις τεχνικές duty cycling και τα αντίστοιχα πρωτόκολλα MAC στην ψευδό – ασύγχρονη προσέγγιση, διότι απαιτείται ένα είδος ψευδό – συγχρονισμού με την στιγμή αφύπνισης του παραλήπτη.

Όσον αφορά την αρχικοποίηση της επικοινωνίας, σε ένα ψευδό - ασύγχρονο μοντέλο μετάδοσης, υπάρχουν δύο προσεγγίσεις οι οποίες απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα 18. Την **αρχικοποίηση** της επικοινωνίας από τον **κόμβο πηγή** (Transmitter Initiated CyclEd Receivers – TICER) και την **αρχικοποίηση** από τον **κόμβο προορισμό** (Receiver Initiated CyclEd Receivers – RICER).[132]



**Εικόνα 18:** (a) Αρχικοποίηση επικοινωνίας από κόμβο πηγή (b) Αρχικοποίηση επικοινωνίας από κόμβο προορισμό

Στην πρώτη περίπτωση, όταν ο κόμβος πηγή έχει να στείλει ένα πακέτο, αρχικά ελέγχει το μέσο να δει αν είναι διαθέσιμο και στη συνέχεια στέλνει σήματα RTS (Request To Send) με τα οποία ζητάει από τον δέκτη ότι έχει να μεταδώσει, περιμένοντας ανταπόκριση από αυτόν. Τα σήματα αυτά στέλλονται συνεχώς έως ότου ταυτιστούν με την στιγμή αφύπνισης του κόμβου παραλήπτη. Με την παραλαβή του σήματος αυτού, ο παραλήπτης απαντά άμεσα με ένα σήμα CTS (Clear To Send) με το οποίο υποδηλώνει στον αποστολέα ότι είναι έτοιμος να δεχθεί το πακέτο. Λαμβάνοντας ο αποστολέας το σήμα αυτό, άμεσα με τη σειρά του στέλνει τα δεδομένα και περιμένει να λάβει μια επιβεβαίωση ότι το πακέτο παραλήφθηκε σωστά.

Στη δεύτερη περίπτωση, όταν ο κόμβος προορισμός δεν έχει κανένα πακέτο να στείλει, ξυπνάει ανά χρονικά διαστήματα, στέλνοντας ένα beacon κάθε φορά, με το οποίο υποδηλώνει ότι έχει ξυπνήσει και είναι έτοιμος να δεχθεί κάποιο εν δυνάμει μεταδιδόμενο πακέτο. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιο προς παραλαβή, τότε πέφτει πάλι σε φάση “ύπνωσης”. Αν ο αποστολέας, κατά τη διάρκεια “ύπνωσης” του παραλήπτη, έχει κάποιο πακέτο να του αποστείλει, τότε περιμένει μέχρι να δεχθεί ένα beacon από τον παραλήπτη (το οποίο του υποδηλώνει ότι είναι ενεργός) και του στέλνει το πακέτο. Εν τέλει ό

παραλήπτης απαντά με ένα σήμα επιβεβαίωσης στον αποστολέα, ότι έχει παραλάβει επιτυχώς το πακέτο.

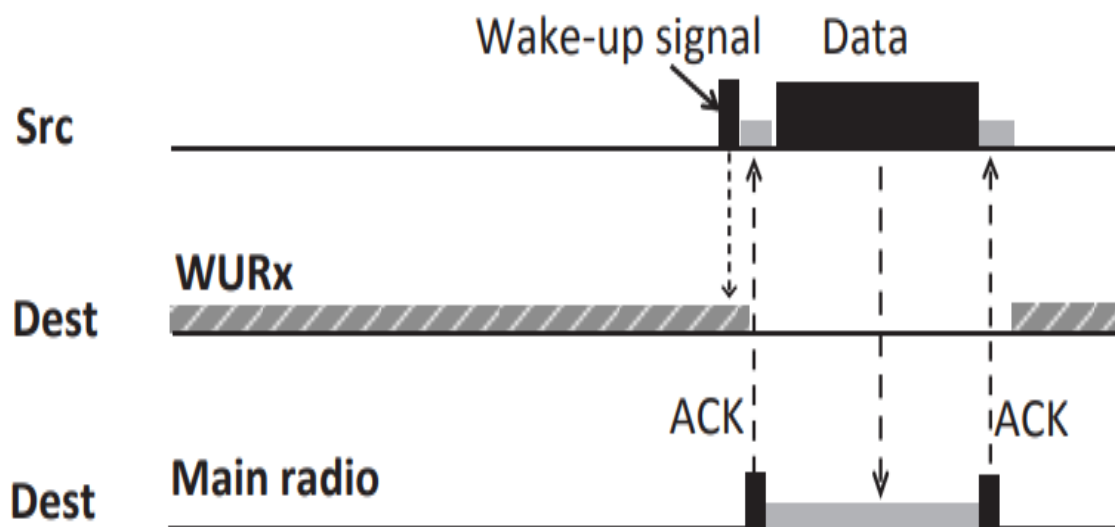
Στην **καθαρά σύγχρονη προσέγγιση** duty cycling, η οποία θεωρείται ως μια από τις πιο ενεργειακά αποδοτικές και αρκετά υποσχόμενες προσεγγίσεις, έχουμε την κατά απαίτηση αφύπνιση του κόμβου και την αποστολή πακέτων, την ίδια χρονική στιγμή που ο κόμβος αποστολέας θέλει να επικοινωνήσει, χωρίς να περιμένει την στιγμή αφύπνισης του παραλήπτη. Στην προσέγγιση αυτή, γίνεται μια προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί ή και να μηδενιστεί ακόμη η κατάσταση idle listening που βρίσκονται οι κόμβοι της ψευδο – ασύγχρονης προσέγγισης η οποία οδηγεί στην αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας καθώς και οι καθυστερήσεις.

Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτός ο στόχος είναι με μια αρκετά υποσχόμενη τεχνολογία, τους **separate wake – up receivers (WuRx)** με πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το κύριο ραδιοσύστημα. Στην προσέγγιση αυτή λοιπόν, ο κύριος δέκτης βρίσκεται το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε κατάσταση “ύπνωσης” και ξυπνάει μόνο όταν τον διακόψει ο αποστολέας μέσω ενός WU (Wake Up) σήματος. Ο παραλήπτης από τη μεριά του, έχει κλειστό το κύριο ραδιοσύστημα, το οποίο καταναλώνει πολύ υψηλή ενέργεια, ενώ παράλληλα έχει ανοιχτό **συνεχώς** (always on), το σύστημα WuRx, με σκοπό να μπορέσει να ανιληφθεί το WU σήμα του αποστολέα. Όταν το ανιληφθεί, στέλνει ένα interrupt στο κύριο ραδιοσύστημα με σκοπό να το ενεργοποιήσει για να μπορέσει να δεχθεί τα πακέτα του αποστολέα. Με αυτό τον τρόπο έχουμε σημαντική μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας, μηδενίζοντας το idle listening του κύριου ραδιοσυστήματος και τις συνεχείς μεταδόσεις RTS και PREAMBLES από τον αποστολέα.

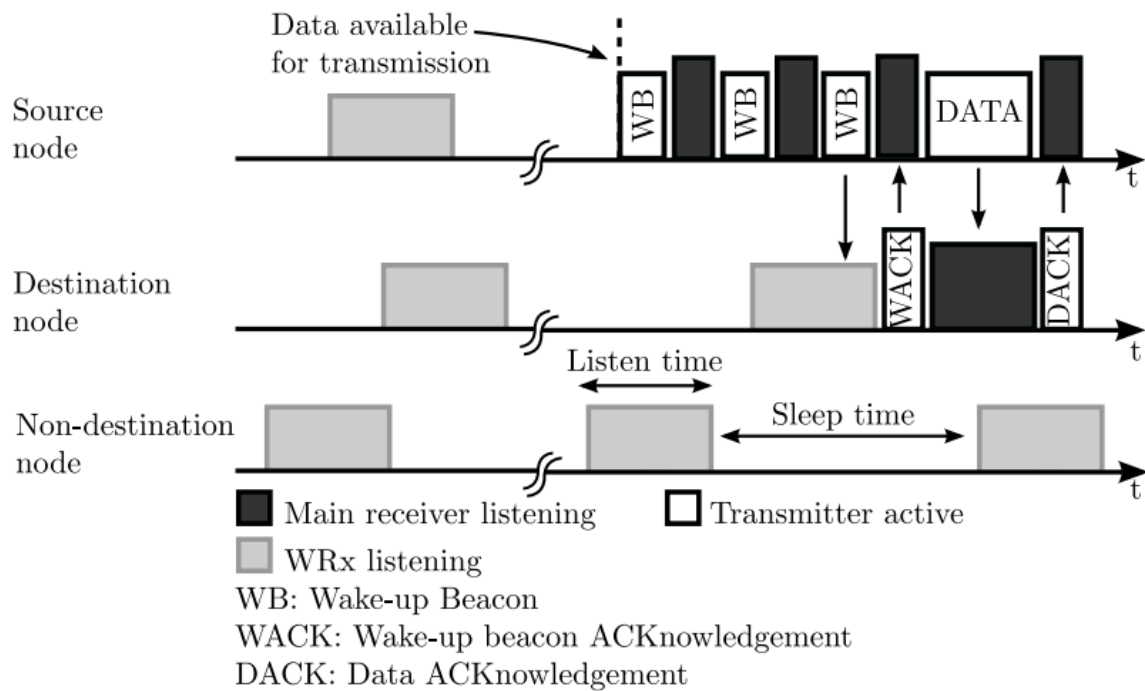
Μια εναλλακτική προσέγγιση στη χρήση των WuRx, κυρίως σε συστήματα που μας ενδιαφέρει περισσότερο η κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με μια ενδεχόμενη καθυστέρηση, είναι ο συνδυασμός τους με κλασικές τεχνικές duty cycling. Στην προσέγγιση αυτή, το κύριο ραδιοσύστημα παραλήπτη παραμένει σε κατάσταση “ύπνωσης”, όπως και πριν, ενώ το υποσύστημα του WuRx **δεν είναι μόνιμα ανοιχτό**, αλλά αφυπνίζεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα (duty cycling), προκειμένου να ελέγξει το μέσο για να διαπιστώσει εάν υπάρχει κίνηση. Ο αποστολέας από την άλλη πλευρά, όταν έχει να στείλει δεδομένα, στέλνει πριν τα δεδομένα, σήματα Wake up Beacons (WBs) και ενεργοποιεί το κύριο ραδιοσύστημα για να παραλάβει μια επιβεβαίωση από τον παραλήπτη. Οδηγώντας και το σύστημα του WuRx σε καταστάσεις ύπνωσης, έχουμε

μεγαλύτερη μείωση στην κατανάλωση της ενέργειας με κόστος μια αύξηση στην καθυστέρηση από την αναμονή της αφύπνισης του παραλήπτη. Ένα παράδειγμα αυτής της τεχνικής παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 20[133].

Στο σημείο αυτό, σημαντικό είναι να αναφέρουμε, ότι ο σχεδιασμός ενός συστήματος της πρώτης προσέγγισης (always on WuRx), θα πρέπει να γίνει με προσεκτικό τρόπο και με μια ενεργειακή εξισορρόπηση του κύριου ραδιοσυστήματος και του WuRx. Θα πρέπει δηλαδή η κατανάλωση ενέργειας του WuRx σε μια περίοδο, συγκρινόμενη με την αντίστοιχη εσωτερική περίοδο αφύπνισης ( $T_{\text{wake-up Interval}}$ ) του κύριου ραδιοσυστήματος, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα ένα ψευδό – ασύγχρονο MAC πρωτόκολλο, να είναι μικρότερη. Ένας από τους βασικούς περιορισμούς και των δύο παραπάνω προσεγγίσεων, είναι η πολυπλοκότητα και το αυξημένο κόστος της εγκατάστασης δεύτερης κεραίας.



**Εικόνα 19:** Παράδειγμα επικοινωνίας με χρήση always on WuRx



**Εικόνα 20:** Παράδειγμα Επικοινωνίας με χρήση duty cycled WuRx

## 4.2 Ενεργειακά Αποδοτικά MAC πρωτόκολλα

Το επίπεδο MAC στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς έρευνας στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όσον αφορά το ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας των κόμβων αλλά και του συνολικού δικτύου. Το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για τον συντονισμό των μεταδόσεων σε ένα κανάλι επικοινωνίας, καθορίζοντας το **πότε** και το **πώς** μπορεί ένας ή περισσότεροι κόμβοι να μεταδώσουν[134].

Μια από τις βασικότερες απαιτήσεις (ίσως η βασικότερη, ανάλογα και τις εφαρμογές που θα κληθούν να υποστηρίξουν) στον σχεδιασμό ενός αποδοτικού MAC πρωτοκόλλου είναι κατανάλωση ενέργειας. Ένα MAC πρωτόκολλο, λόγω των περιορισμένων ενεργειακών πόρων των κόμβων ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, καθώς επίσης και λόγω των περιπτώσεων ανάπτυξης δικτύων σε απομακρυσμένες ή δύσβατες περιοχές (όπου δεν μπορεί να γίνει αντικατάσταση του υποσυστήματος τροφοδοσίας), καλείται να αντιμετωπίσει αποδοτικά το **ζήτημα της κατανάλωσης της ενέργειας** 1) για τη σωστή λειτουργία του δικτύου και 2) για την επέκταση της ζωής του. Μια δεύτερη απαίτηση σχεδίασης, αποτελεί η **καθυστέρηση** που μπορεί να προκληθεί σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Σε περιπτώσεις εφαρμογών WSNs, όπου τα δεδομένα που δημιουργούνται θα

πρέπει να παραδίδονται σε σωστό χρόνο (time critical applications), το MAC πρωτόκολλο θα πρέπει να μεριμνήσει για την μείωση ή την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης, που προκύπτει κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας και μέχρι τα δεδομένα να φτάσουν στον τελικό παραλήπτη. Μια τρίτη απαίτηση αποτελεί η **ρυθμοαπόδοση** (throughput) του δικτύου όπου εφαρμογές απαιτούν υψηλούς και σταθερούς ρυθμούς δημιουργίας και μετάδοσης δεδομένων. Μια τελευταία απαίτηση ενός αποδοτικού MAC πρωτοκόλλου είναι η **δικαιοσύνη** μεταξύ των κόμβων, όπου όλοι οι κόμβοι θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο.

Όπως έχουμε προαναφέρει, τα MAC πρωτόκολλα, όσον αφορά τον τρόπο επικοινωνίας, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε σύγχρονα και ψευδό-ασύγχρονα ή ασύγχρονα. Μια περαιτέρω ταξινόμηση και κατηγοριοποίηση μπορεί κανείς να συναντήσει στις αναφορές [135] [136] [137] όπου γίνεται αναφορά και στα υβριδικά πρωτόκολλα που συνδυάζουν τις 2 παραπάνω κατηγορίες.

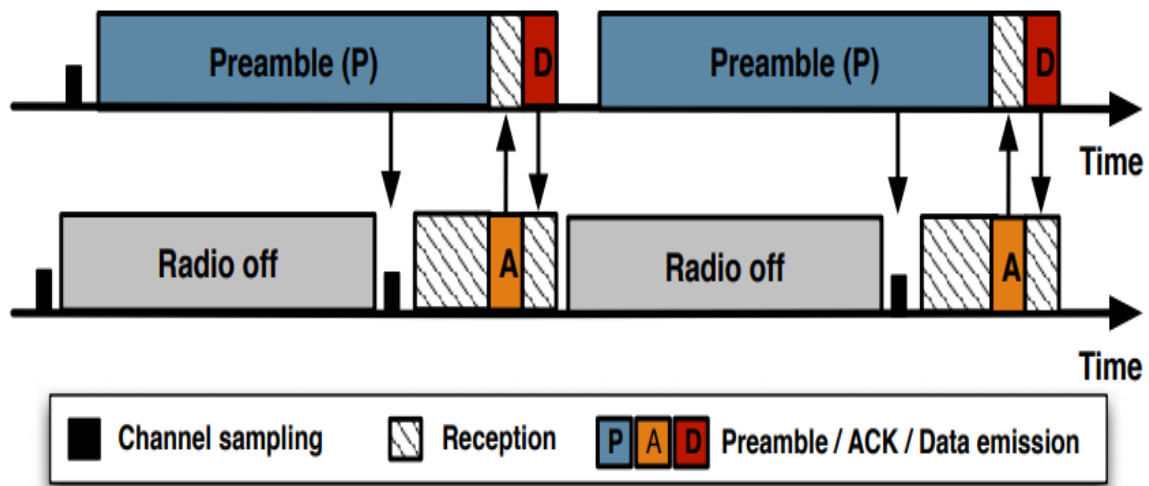
Ορισμένα από τα βασικά πρωτόκολλα που βασίζονται στη σύγχρονη επικοινωνία είναι το S-MAC[138], T-MAC[139], SCP-MAC[140], TRAMA[141] κ.λ.π. Το σημαντικότερο πρόβλημα των σύγχρονων πρωτοκόλλων, αποτελεί το γεγονός ότι για επιτευχθεί η επικοινωνία, θα πρέπει όλοι οι κόμβοι να συγχρονιστούν μεταξύ τους (Local or Global Synchronization), ανταλλάσσοντας περιοδικά πακέτα συγχρονισμού. Ο συγχρονισμός αυτός, αποτελεί μια δύσκολη και αρκετά πολύπλοκη διαδικασία, ειδικά σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πολλαπλών βημάτων. Επιπροσθέτως, σε περιπτώσεις μικρών σε μέγεθος δικτύων με μικρό φορτίο, η κατανάλωση ενέργειας που μπορεί να προκύψει από το overhead που δημιουργείται λόγω της συνεχής αποστολής πακέτων ελέγχου και από τη δημιουργία και συντήρηση χρονικών slots, μπορεί να είναι μεγαλύτερος από την ενέργεια που καταναλώνεται από την πραγματική διακίνηση δεδομένων. Συνεπώς η υιοθέτηση σύγχρονων τεχνικών επικοινωνίας (καθώς και υβριδικών), κρίνεται ενεργειακά ασύμφορη για μικρά WSNs με μικρό φορτίο εργασίας.

Από την άλλη πλευρά, έχουμε τα πρωτόκολλα MAC που υιοθετούν την ψευδό - ασύγχρονη μορφή επικοινωνίας, η οποία είναι πιο προσαρμοστική και πολύ πιο ενεργειακά αποδοτική για μικρά WSN με μικρό φόρτο εργασίας. Παρακάτω παραθέτουμε και αναλύουμε 4 από τα πιο διαδεδομένα ψευδό-ασύγχρονα MAC πρωτόκολλα, τρία από τα οποία βασίζονται στην αρχικοποίηση της επικοινωνίας από τον αποστολέα (B-MAC, X-MAC, WISE-MAC) και ένα το οποίο βασίζεται στην αρχικοποίηση της επικοινωνίας από τον παραλήπτη (RI-MAC).

#### 4.2.1 Berkeley MAC - (B-MAC)

Το Berkeley Mac[142] είναι ένα αρκετά γνωστό και ευρέως χρησιμοποιούμενο από διάφορα λειτουργικά συστήματα (TinyOS) ψευδό - ασύγχρονο πρωτόκολλο, το οποίο θεωρείται μινιμαλιστικό (λόγω του μικρού κώδικα που εκτελεί) και αρκετά ευέλικτο (Reconfigurable for low and heavy load applications). Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο βασίζεται στον μηχανισμό CSMA-CA και την αρχικοποίηση της επικοινωνίας από τον αποστολέα (Sender Initiated). Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 21 [143].

Όταν ο αποστολέας θέλει να στείλει ένα πακέτο, αρχικά εκτελεί έναν έλεγχο μέσω μιας τεχνικής που ονομάζεται εκτίμηση καθαρού καναλιού (Clear Channel Assessment – CCA), για ένα μικρό χρονικό διάστημα, το οποίο ονομάζεται άκουσμα χαμηλής ισχύος (Low Power Listening - LPL). Σε περίπτωση που το μέσο είναι απασχολημένο, τότε εκτελεί ένα backoff μηχανισμό, περιμένοντας για ένα χρονικό διάστημα να απελευθερωθεί το μέσο και επανέρχεται στη διαδικασία του CCA. Σε περίπτωση που διαπιστώσει ότι το κανάλι είναι ελεύθερο, τότε στέλνει ένα Preamble πριν την αποστολή των δεδομένων, για να υποδηλώσει ότι έχει δεδομένα να στείλει και να εξασφαλίσει την επιτυχή παράδοση προς όλους τους εν δυνάμει παραλήπτες. Η εξασφάλιση της επιτυχούς επικοινωνίας – παράδοσης, διασφαλίζεται από το μέγεθος του preamble, το οποίο είναι ίσο ή μεγαλύτερο από την εσωτερική περίοδο αφύπνισης (duty cycle) του κάθε κόμβου, οπότε δεν υπάρχει πιθανότητα κάποιος από τους κόμβους να το παραλείψει. Από την άλλη πλευρά, ο παραλήπτης εκτελεί και αυτός έλεγχο καναλιού μέσω CCA και LPL, ανά τακτά χρονικά διαστήματα (ανάλογα το duty cycle που έχει καθοριστεί), με σκοπό να δει αν υπάρχουν πακέτα προς παραλαβή. Αν δεν υπάρχει κίνηση τότε ξαναπέφτει σε κατάσταση “ύπνωσης”, ενώ αν παρατηρήσει το preamble, τότε μένει ενεργός μέχρι το τέλος του preamble. Μόλις λήξει η εκπομπή του preamble, τότε αλλάζει την κατάσταση του δέκτη από κατάσταση LPL σε κανονική κατάσταση λήψης δεδομένων (η οποία καταναλώνει μεγαλύτερη ενέργεια), στέλνει ένα ACK στον αποστολέα ότι έχει δει το preamble και ο αποστολέας εν συνεχεία του στέλνει τα πακέτα.



**Εικόνα 21:** Παράδειγμα Επικοινωνίας του πρωτοκόλλου B-MAC

Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, λύνει ορισμένα από τα προβλήματα που υπάρχουν στα ασύγχρονα πρωτόκολλα όπως την απαίτηση για συγχρονισμό και την συνεχή αποστολή πακέτων χρονικού συγχρονισμού, που αυξάνουν την κατανάλωση ενέργειας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου, είναι ότι η δειγματοληψία του preamble γίνεται με πιο αποδοτικό τρόπο, με τη χρήση ειδικού λογισμικού που παρέχει το B-MAC. Με αυτό τον τρόπο, το πρωτόκολλο εξασφαλίζει ότι οι κόμβοι του θα θεωρούν ως χρήσιμη, μόνο την ενέργεια η οποία είναι πάνω από το επίπεδο του θορύβου, αποφεύγοντας άσκοπες ενεργοποιήσεις από θορύβους του περιβάλλοντος και άσκοπη κατανάλωση ενέργειας. Επιπροσθέτως, το πρωτόκολλο B-MAC, υποστηρίζει και μηχανισμούς RTS – CTS, οι οποίοι μπορούν κατά βούληση να υλοποιηθούν, για την αποφυγή και την αντιμετώπιση συγκρούσεων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με υψηλό φορτίο. [144]

Για την περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης τη ενέργειας στο B-MAC, υπάρχει η δυνατότητα απενεργοποίησης των μηχανισμών CCA και ACK, ενώ μπορούν να διαμορφωθούν κατά απαίτηση, η περίοδος αφύπνισης και ακολούθως το μέγεθος του preamble.

Από την άλλη πλευρά ωστόσο, η ύπαρξη ενός τόσο μεγάλου preamble, δημιουργεί overheadστο δίκτυο ενώ παράλληλα αναγκάζει τους παραλήπτες σε μια μακρά idle listening κατάσταση, έως ότου τελειώσει η αποστολή του preamble, για να καταφέρουν να παραλάβουν το πακέτο. Το γεγονός επίσης ότι δεν είναι ένα πρωτόκολλο στοχευόμενο (targeted) προς συγκεκριμένους κόμβους, προκαλεί καταστάσεις overhearing στο δίκτυο,



όπου οι κόμβοι για τους οποίους δεν προορίζονται τα πακέτα, αναγκάζονται να ακολουθούν μια μακρά κατάσταση idle listening, μέχρι να διαπιστώσουν ότι τα πακέτα δεν προορίζονται για αυτούς (το id του παραλήπτη περιλαμβάνεται στο packet header του πακέτου, οπότε ο παραλήπτης περιμένει να παραλάβει το πακέτο για να δει αν προορίζεται για αυτόν). Αποτέλεσμα της χρονικά μακράς αυτής κατάστασης, είναι η αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας. Εκτός από την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, έχουμε και μια καθυστέρηση στο δίκτυο, η οποία οφείλεται στον χρόνο που χρειάζεται ο αποστολέας να ανταγωνιστεί την πρόσβαση στο κανάλι ( $T_{Contention}$ ), στο χρόνο που χρειάζεται να αποσταλεί το μακρύ preamble ( $T_{Long-Preamble}$ ), το πακέτο με τα δεδομένα ( $T_{Packet}$ ) και η επιβεβαίωση ( $T_{Ack}$ )[145].

$$\text{OneHopDelay} = T_{Contention} + T_{Long-Preamble} + T_{Packet} + T_{Ack}$$

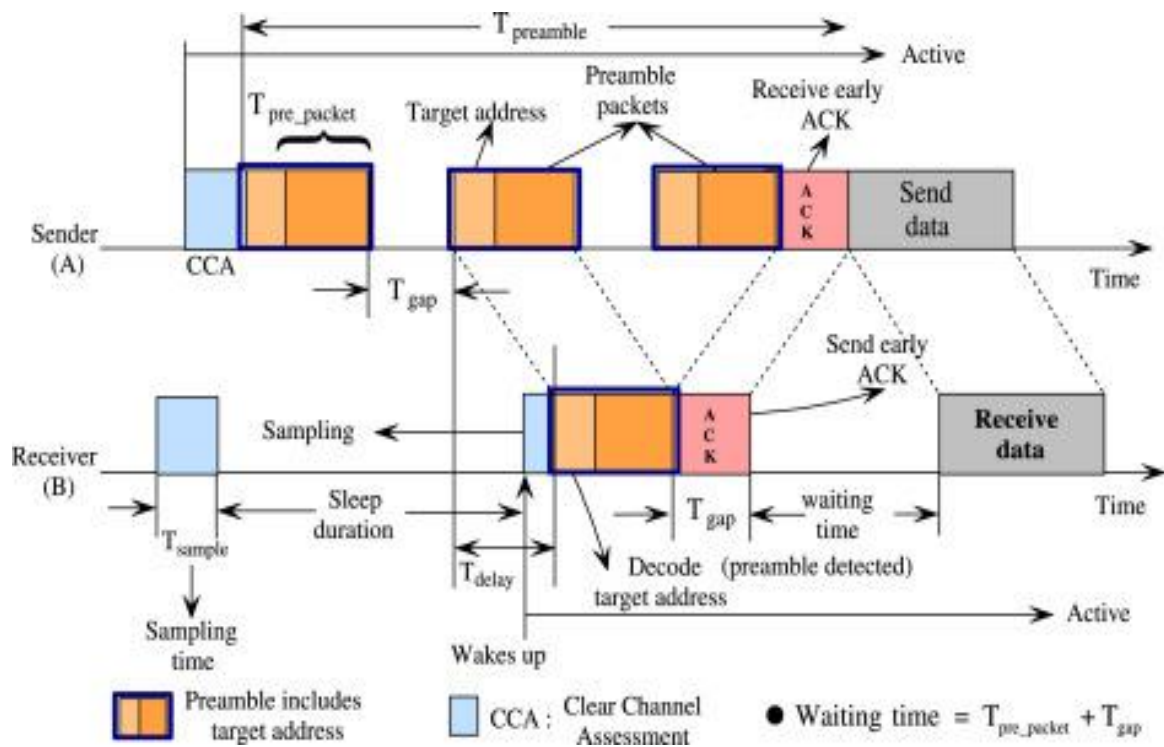
#### 4.2.2 X-MAC

Ένα επίσης χαρακτηρισμένο ως preamble sampling ψευδό - ασύγχρονο πρωτόκολλο, για εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων, αποτελεί το X-MAC[146]. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο δημιουργήθηκε για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της αυξημένης κατανάλωσης της ενέργειας, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η οποία προέρχεται από καταστάσεις overhead, overhearing και idle listening.

Μια από τις βασικές καινοτομίες του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου, σε σχέση με το B-MAC, είναι η αφαίρεση του μεγάλου μήκους των preambles και η αντικατάστασή τους με πολύ μικρά, αντιμετωπίζοντας με αυτόν τον τρόπο το υψηλό overhead και τις μακρές διαρκείας idle listening καταστάσεις που δημιουργούνται. Ένα δεύτερο, πολύ σημαντικό στοιχείο, το οποίο διαφοροποιήθηκε στο συγκεκριμένο πρωτόκολλο, αποτελεί το γεγονός ότι η ταυτότητα του παραλήπτη εμπεριέχεται στα μικρά preambles και όχι στην επικεφαλίδα του πακέτου, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τις καταστάσεις overhearing. Αντιμετωπίζοντας λοιπόν με αποδοτικό τρόπο και τις τρεις παραπάνω καταστάσεις, το X-MAC οδηγεί τους κόμβους σε μια μείωση της κατανάλωσης της ενέργειάς τους.

Στην εικόνα 22 παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία του πρωτοκόλλου X-MAC με έναν αποστολέα και έναν παραλήπτη[147]. Όταν ένας κόμβος έχει ένα πακέτο για να στείλει, ελέγχει το μέσο (CCA) και αν είναι απασχολημένο, εκτελεί ένα μηχανισμό backoff, περιμένει μέχρι να τελειώσει ο χρόνος του backoff και στη συνέχεια ξανά ελέγχει το μέσο. Σε περίπτωση που είναι ελεύθερο, ξεκινάει να στέλνει μικρά preambles, με σκοπό

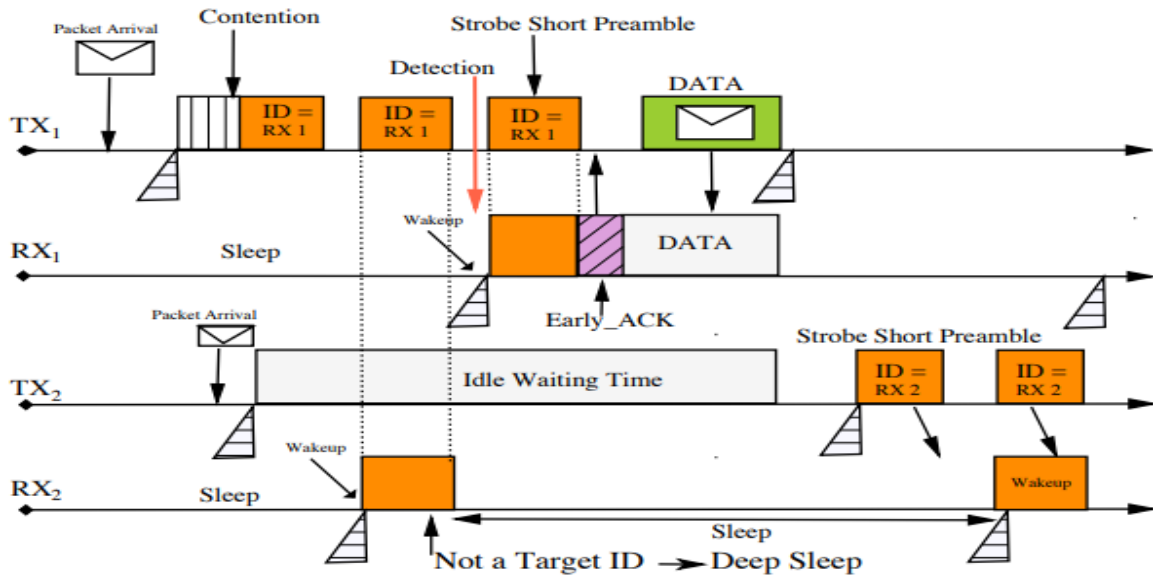
να υποδείξει στον παραλήπτη ότι έχει πακέτα να στείλει. Για να εξασφαλιστεί η πιθανότητα ότι ο παραλήπτης θα δει σίγουρα το πακέτο όταν αφυπνιστεί, δίνεται μέριμνα έτσι ώστε το μήκος της ακολουθίας των διαδοχικών preambles, να είναι μεγαλύτερο από την διάρκεια ύπνωσης του παραλήπτη. Επιπροσθέτως, το χρονικό αυτό κενό μεταξύ των preambles, δίνει τη δυνατότητα στο παραλήπτη να αποστείλει το ACK.



Εικόνα 22: Λειτουργία πρωτοκόλλου X-MAC

Η καινοτομία του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου αφορά στην ενσωμάτωση του ID του παραλήπτη στα μικρά αυτά preambles. Όταν ο παραλήπτης, κατά τη διάρκεια αφύπνισης και ελέγχου του μέσου (CCA), δει το μικρό αυτό preamble, το λαμβάνει, αποκωδικοποιεί το ίδιο και καταλαβαίνει αν πρόκειται για πακέτο που προορίζεται για τον ίδιο. Σε περίπτωση που δεν τον αφορά, ξαναπέφτει πάλι σε κατάσταση “ύπνωσης”, εξοικονομώντας με αυτό τον τρόπο άσκοπη κατανάλωση ενέργειας. Σε περίπτωση που διαπιστώσει ότι προορίζεται γι’ αυτόν, στέλνει ένα ACK στον αποστολέα ότι το έχει δει και περιμένει ενεργός για να του στείλει το πακέτο ο αποστολέας. Ο αποστολέας στέλνει το πακέτο και αν δεν έχει άλλο να στείλει, πέφτει πάλι σε ύπνωση. Ο παραλήπτης αφού παραλάβει το πακέτο, δεν πέφτει σε ύπνωση άμεσα, αλλά περιμένει ένα μικρό χρονικό διάστημα, όσο είναι ο χρόνος του backoff μηχανισμού, για να δει αν υπάρχουν άλλα

πακέτα στην ουρά από άλλους αποστολείς που διεκδικούν το κανάλι και έχουν υποχωρήσει λόγω του ανταγωνισμού. Στην παρακάτω εικόνα 23 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ανταγωνισμού του μέσου, μεταξύ δύο αποστολέων (TX<sub>1</sub> και TX<sub>2</sub>) που ανταγωνίζονται το μέσο επικοινωνίας και δύο διαφορετικών παραληπτών (RX<sub>1</sub> και RX<sub>2</sub>)[145].



Εικόνα 23: Ανταγωνισμός μεταξύ δύο αποστολέων στο X-MAC

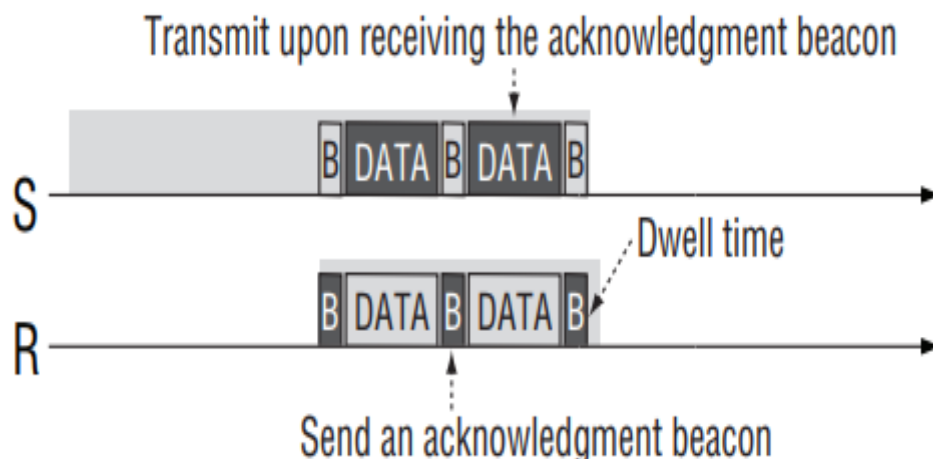
#### 4.2.3 RECEIVER INITIATED - MAC

Το RI – MAC[148] είναι ένα ψευδó ασύγχρονο πρωτόκολλο, το οποίο δημιουργήθηκε για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της κατανάλωσης της ενέργειας, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, προσπαθώντας να μειώσει το χρόνο τον οποίο ο αποστολέας και ο παραλήπτης απασχολούν το κανάλι, με στόχο να καθορίσουν ένα ραντεβού για να μεταδώσουν και να παραλάβουν δεδομένα. Η διαφοροποίηση με άλλα ψευδó – ασύγχρονα πρωτόκολλα είναι, ότι ο έλεγχος και η αρχικοποίηση της επικοινωνίας ξεκινάει από τον παραλήπτη.

Στο RI – MAC, κάθε κόμβος ξυπνάει ανεξάρτητα από τους άλλους, ανά χρονικά διαστήματα (duty cycling), στέλνοντας ένα beacon, με το οποίο υποδηλώνει ότι έχει ξυπνήσει και είναι έτοιμος να δεχθεί πακέτα. Το αρχικό αυτό beacon περιλαμβάνει μόνο το ίδτης πηγής (Src) και μπορούν να προστεθούν επίσης άλλα δύο πεδία (διεύθυνση παραλήπτη – Dst και Backoff Window - BW για αποφυγή συγκρούσεων), διότι όπως θα

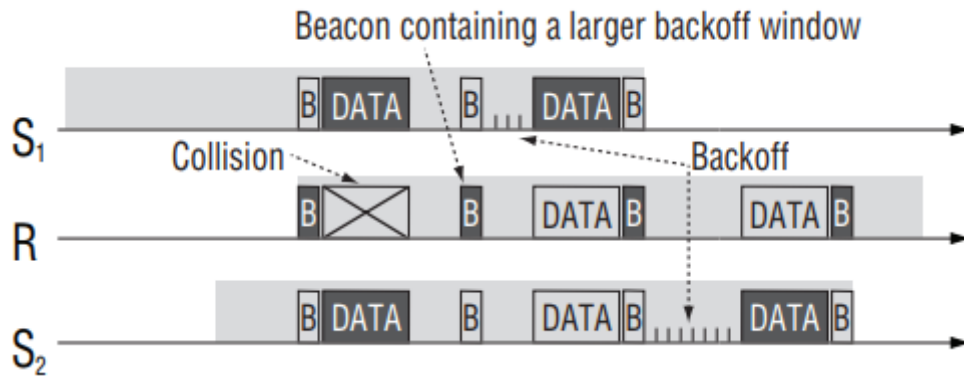
δούμε και παρακάτω, ο ρόλος του beacon είναι διττός. Ο αποστολέας από την άλλη πλευρά, αν έχει δεδομένα προς αποστολή, περιμένει σιωπηλά μέχρι να λάβει το αρχικό beacon από τον προοριζόμενο παραλήπτη και στη συνέχεια του αποστέλλει τα δεδομένα. Ο παραλήπτης αφού παραλάβει τα δεδομένα, στέλνει ένα νέο beacon στο αποστολέα (συμπεριλαμβάνοντας και το πεδίο *Dst* με το *ID* του αποστολέα του πακέτου ή αλλιώς του παραλήπτη του beacon που θέλει να στείλει το πακέτο), το οποίο χρησιμοποιείται σαν ACK, ότι έχει παραληφθεί το πακέτο (DATA).

Το ACK beacon αυτό, εκτός από τη χρήση του ως επιβεβαίωση ορθής παραλαβής, χρησιμοποιείται επίσης από τον παραλήπτη και ως μια πρόσκληση προς όλους τους εν δυνάμει αποστολείς, να του στείλουν αν έχουν εκκρεμή πακέτα (εικόνα 24). Σε περίπτωση που υπάρχουν πακέτα από άλλους κόμβους, τότε αυτοί βλέποντας το beacon, αδιαφορούν για το πεδίο *Dst* και λαμβάνοντας υπόψη μόνο το πεδίο *Src*, ξεκινούν να του στέλνουν πακέτα. Αν δεν υπάρχουν, τότε πέφτουν και οι δύο σε κατάσταση ύπνωσης.



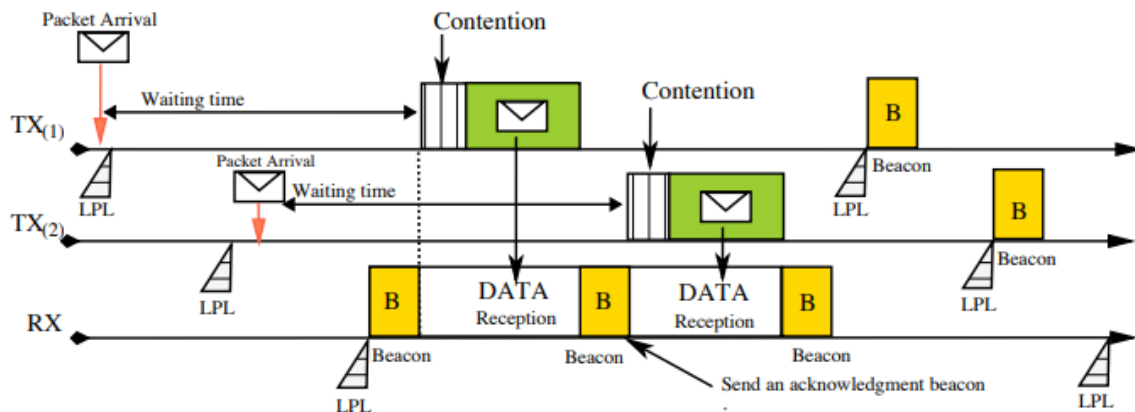
**Εικόνα 24:** Αποστολή beacon ως ACK και παράλληλα ως απαίτηση για νέα παραλαβή δεδομένων

Το πεδίο back off window που ενσωματώνεται στο beacon, χρησιμοποιείται από τον παραλήπτη όταν παρατηρηθούν συγκρούσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο παραλήπτης, στέλνει ένα νέο beacon, με μεγαλύτερο back off window, με σκοπό την αποφυγή της σύγκρουσης πακέτων από διαφορετικούς αποστολείς (εικόνα 25).



Εικόνα 25: Παράδειγμα Επικοινωνίας με σύγκρουση και back off window

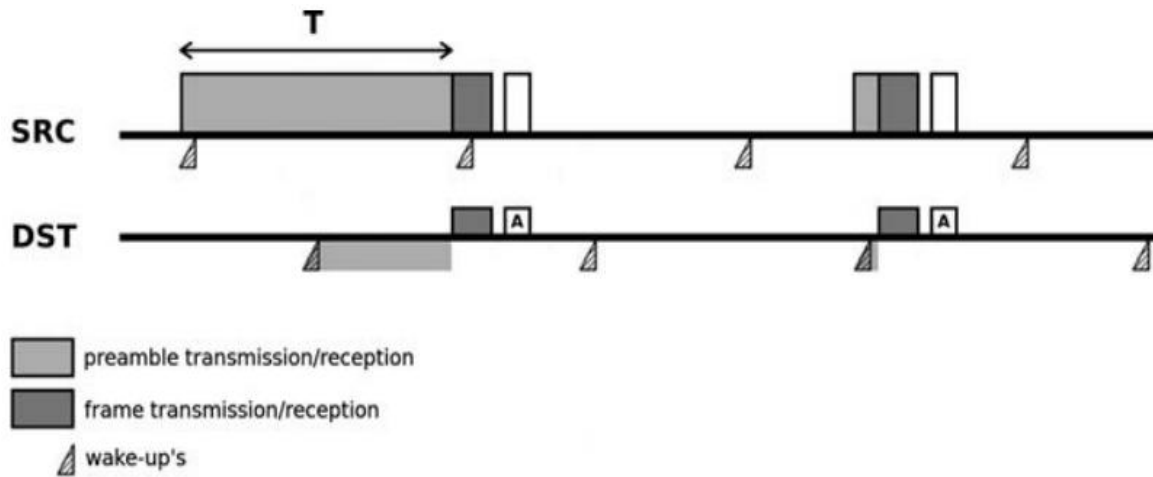
Ένα συνολικό παράδειγμα της λειτουργίας του RI-MAC παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 26[145].



Εικόνα 26: Επικοινωνία στο πρωτόκολλο RI-MAC

#### 4.2.4 WISE-MAC and Relative Extensions

Το WISE-MAC[149] είναι ένα ψευδό-ασύγχρονο πρωτόκολλο, το οποίο βασίζεται στο ασύγχρονο duty cycling των κόμβων, διατηρώντας ωστόσο ένα χαρακτηριστικό “φτωχού” συγχρονισμού. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, στοχεύει στον περιορισμό του μεγάλου μήκους των preambles, το οποίο οδηγεί σε καταστάσεις υψηλού overhearing καθώς επίσης και μακράς διάρκειας καταστάσεις idle listening. Η βασική ιδέα πίσω από την οποία κρύβεται ο σχεδιασμός του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου, είναι η γνώση όλων των κόμβων του δικτύου σχετικά με την περίοδο αφύπνισης του κάθε κόμβου ξεχωριστά, έτσι ώστε να σταματήσει η αποστολή μεγάλου μήκους preambles και να αντικατασταθεί με μικρά preambles, τα οποία θα στέλνονται την στιγμή αφύπνισης του κόμβου παραλήπτη. Στην παρακάτω εικόνα 27 απεικονίζεται η λειτουργία του WISE-MAC[150].



**Εικόνα 27:** Επικοινωνία στο πρωτόκολλο WISE-MAC

Όλοι οι κόμβοι σε ένα τέτοιο δίκτυο λειτουργούν ανεξάρτητα, “ακούγοντας” το κανάλι επικοινωνίας σε διαφορετικές στιγμές, έχοντας ωστόσο σταθερή περίοδο αφύπνισης. Όταν ο αποστολέας έχει να στείλει ένα αρχικό πακέτο σε έναν παραλήπτη (πρώτη μεταξύ τους επικοινωνία), ξεκινώντας ουσιαστικά την επικοινωνία, στέλνει ένα μεγάλο preamble, ίσο χρονικά με το duty cycle του παραλήπτη για να σιγουρευτεί ότι θα το παραλάβει. Το preamble αυτό είναι αρκετά μεγάλο διότι δεν είναι ακόμη γνωστό το σχέδιο αφύπνισης του παραλήπτη. Ο παραλήπτης, όταν ξυπνήσει και δει το preamble, περιμένει ενεργός έως ότου τελειώσει η αποστολή του και εν συνεχεία παραλαμβάνει το πακέτο. Μετά την επιτυχή παραλαβή του πακέτου, ο παραλήπτης αποστέλλει ένα ACK στον αποστολέα με το οποίο του υποδηλώνει ότι έλαβε επιτυχώς το πακέτο στο οποίο συμπεριλαμβάνει και το σχέδιο αφύπνισής του για να του υποδείξει το κάθε πότε ξυπνάει. Ο αποστολέας όταν παραλάβει το ACK από τον παραλήπτη, βλέπει το σχέδιο αφύπνισης του και το περνάει σε έναν πίνακα (πίνακας 2), τον οποίο και θα χρησιμοποιήσει στην επόμενη αποστολή προς τον συγκεκριμένο παραλήπτη.

Node ID	Remaining time until the next sampling time
1	$T_{WakeUp}(1)$
:	:
:	:
i	$T_{WakeUp}(i)$

**Πίνακας 2:** WISE-MACs offset schedule table

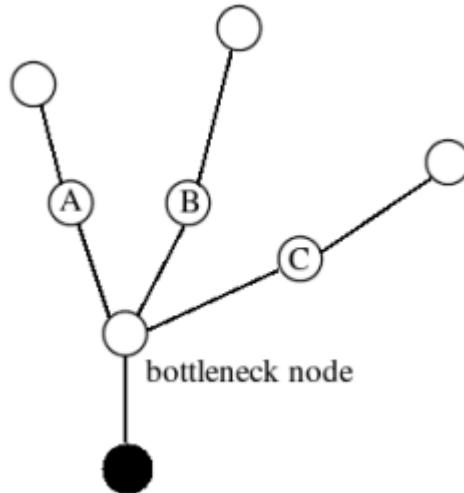
Διατηρώντας λοιπόν έναν τέτοιο πίνακα, συνεχώς ενημερωμένο (μέσω της ανταλλαγής πακέτων ή από πιθανό overhead), ο κάθε κόμβος γνωρίζει τον επόμενο χρόνο αφύπνισης (wake-up interval) του κάθε γειτονικού του κόμβου. Έτσι λοιπόν, όταν ένας κόμβος θέλει να στείλει ένα πακέτο, συμβουλευέται τον πίνακα για τον χρόνο που θα ξυπνήσει ο κόμβος παραλήπτης, κρατάει κλειστό τον πομποδέκτη του και του στέλνει ένα μικρού μήκους preamble, την στιγμή αφύπνισης του για να του υποδηλώσει ότι έχει πακέτο να του στείλει.

Με τον τρόπο αυτό το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, επηρεάζει σημαντικά την μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας του δικτύου, διότι αντιμετωπίζει ικανοποιητικά α) τις καταστάσεις overhead που προέρχονται από τα μεγάλα μήκους preambles, β) τις μακράς διάρκειας idle listening καταστάσεις από τους κόμβους προορισμούς μέχρι να παραλάβουν το πακέτο και γ) τις καταστάσεις overhearing που δημιουργούνται στους μη παραλήπτες κόμβους, οι οποίοι περιμένουν τα μεγάλα preambles για να δουν αν προορίζεται για αυτούς το πακέτο. Η μείωση της χρήσης του καναλιού από τον αποστολέα, λόγω του μικρού preamble και λόγω της αναμονής αφύπνισης του παραλήπτη (κλειστός πομποδέκτης), αυξάνει το throughput του δικτύου ενώ το ζήτημα της καθυστέρησης παραμένει ανοιχτό.

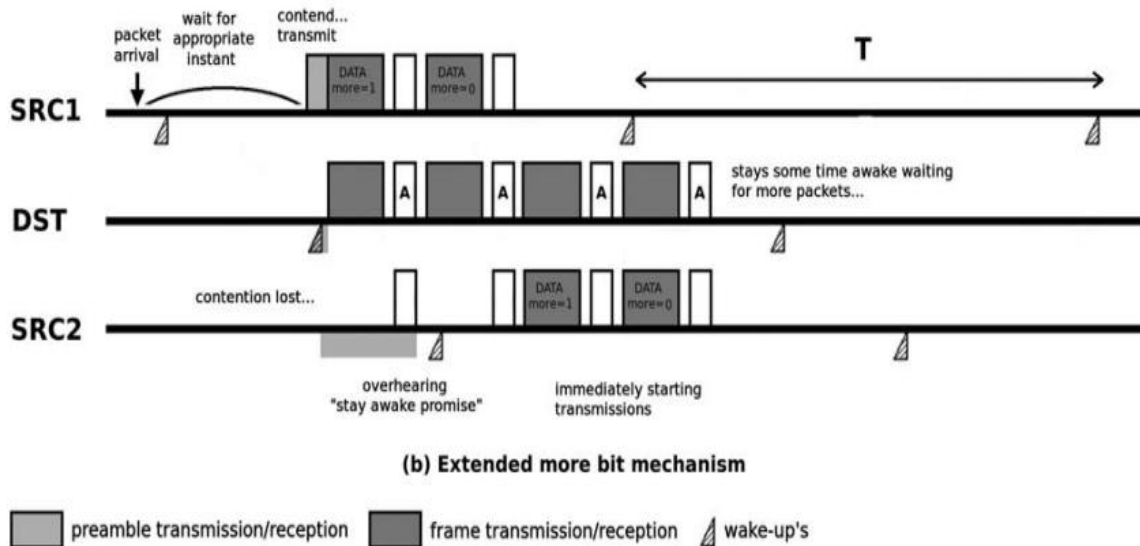
Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, αντιμετωπίζοντας τα παραπάνω ζητήματα ικανοποιητικά, συμβάλει σημαντικά στην μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας του δικτύου. Προορίζεται ωστόσο για μικρά σταθερά δίκτυα με μικρό φορτίο εργασίας. Για πιο μεγάλα δίκτυα, για δίκτυα με αυξημένο φορτίο εργασίας ή για δίκτυα τοπολογίας δέντρου, δημιουργούνται προβλήματα που έχουν να κάνουν με “μποτιλιαρίσματα” τα οποία οδηγούν σε χαμηλό throughput και αυξημένη καθυστέρηση στον κόμβο relay ή στον κόμβο παραλήπτη στον οποίο θέλουν να στείλουν ταυτόχρονα πολλοί αποστολείς (εικόνα 28)[151].

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων, οι συντάκτες στην αναφορά[150] παρουσιάζουν μια επέκταση του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου, το οποίο ονομάζεται WISE-MAC more-bit extended και κάνοντας πειράματα τόσο σε προσομοιωτή όσο και σε πραγματικό υλικό, απέδειξαν την αύξηση του throughput και την μείωση της καθυστέρησης που επιτυγχάνεται, μειώνοντας παράλληλα και την κατανάλωση της ενέργειας του δικτύου. Η βασική ιδέα του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου είναι ότι όταν υπάρχουν διαφορετικά πακέτα προς τον ίδιο παραλήπτη, από τον ίδιο αποστολέα, θα πρέπει να στέλνονται διαδοχικά μεταξύ τους και όχι ένα κάθε στιγμή αφύπνισης του παραλήπτη. Επιπροσθέτως, όταν ο αποστολέας έχει να στείλει ένα πακέτο προς τον ίδιο

παραλήπτη αλλά εκκρεμούν και άλλα πακέτα από άλλους αποστολείς προς αυτόν, θα πρέπει η παράδοση αυτών των πακέτων να γίνει άμεσα, χωρίς να μεσολαβήσει “ύπνωση” του παραλήπτη. Η λειτουργία του συγκεκριμένου πρωτοκόλλου απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα 29.



Εικόνα 28: Παράδειγμα μπουτυλιαρίσματος σε Tree WSN



Εικόνα 29: Λειτουργία πρωτοκόλλου Extended WISE-MAC

Παρατηρώντας την παραπάνω εικόνα, βλέπουμε ότι υπάρχουν δύο αποστολείς (SRC1 & SRC2) οι οποίοι ανταγωνίζονται το μέσο προκειμένου να στείλουν πακέτα στον κόμβο παραλήπτη (DST). Στον ανταγωνισμό κερδίζει ο SRC1, ο οποίος κοιτάζοντας τον



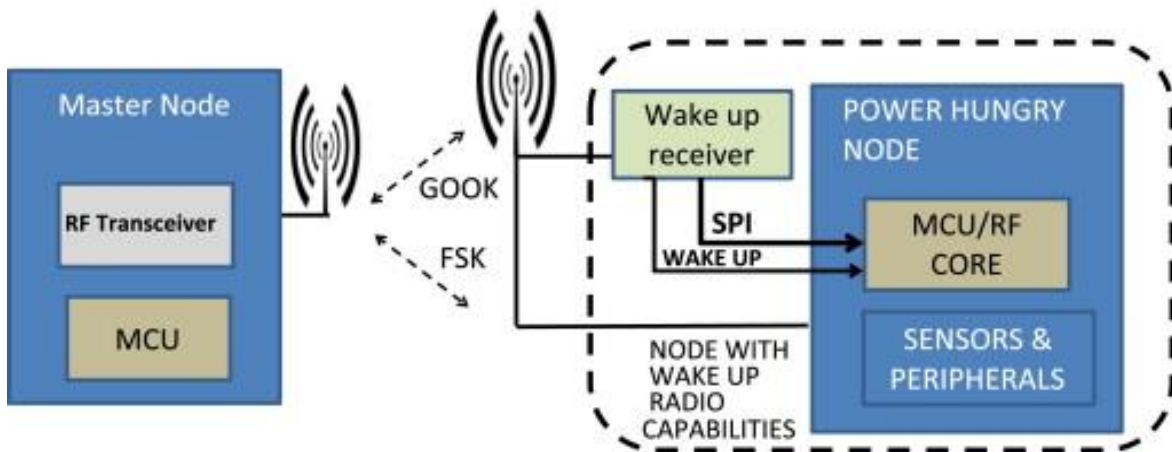
πίνακα και βλέποντας τον χρόνο αφύπνισης του DST, περιμένει με κλειστό το πομποδέκτη τη στιγμή αφύπνισης και του στέλνει το πακέτο. Στην επικεφαλίδα του πακέτου, ενσωματώνει και ένα flag (DATAmore=1) με το οποίο παροτρύνει τον παραλήπτη να μην κοιμηθεί μετά την παραλαβή του συγκεκριμένου πακέτου, διότι ακολουθούν ένα η περισσότερα πακέτα. Ο παραλήπτης με την παραλαβή του πακέτου, βλέποντας το DATAmore = 1, στέλνει μια υπόσχεση με ένα ACK, ότι θα παραμείνει “ξύπνιος” για μια περίοδο αφύπνισης (wake-up interval), για να δεχτεί το επόμενο πακέτο. Ο SRC2, βρίσκεται σε κατάσταση overhearing της συγκεκριμένης επικοινωνίας και βλέποντας την υπόσχεση (ACK), παραμένει ενεργός, γνωρίζοντας ότι μπορεί να αρχίσει την επικοινωνία αμέσως μόλις τελειώσει ο SRC1. Στο δεύτερο πακέτο που στέλνει άμεσα ο SRC1, αλλάζει το flag σε “0”, υποδηλώνοντας στον παραλήπτη ότι αυτό είναι το τελευταίο πακέτο και ότι μπορεί να κοιμηθεί ή να παραλάβει αν έχει πακέτα από άλλους παραλήπτες. Ο DST επιβεβαιώνει το δεύτερο πακέτο μέσω ενός ACK και βλέποντας το flag = 0, ξέρει ότι δεν υπάρχουν αυτή τη στιγμή άλλα πακέτα από τον συγκεκριμένο παραλήπτη. Ο SRC2, βλέπει και αυτός το flag=0 και γνωρίζοντας ότι έχει τελειώσει η επικοινωνία, αρχίζει άμεσα και χωρίς καθυστέρηση, τη δική του αποστολή πακέτων προς τον DST, με τον ίδιο τρόπο. Όταν τελειώσει και ο SRC2 την αποστολή πακέτων, ο DST περιμένει ένα μικρό χρονικό διάστημα (wake up interval) να δει αν υπάρχουν άλλα πακέτα από άλλους αποστολείς και αν δεν υπάρχουν, εκτελεί την κανονική διαδικασία duty cycling.

Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, όπως προαναφέραμε αντιμετωπίζει αποδοτικά το πρόβλημα της καθυστέρησης σε ένα δενδροειδές ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ή σε δίκτυα υψηλού φορτίου, αυξάνοντας παράλληλα το throughput και την ενεργειακή αποδοτικότητα. Αναφέρεται και ως ένα προσαρμοστικό πρωτόκολλο, έχοντας την ικανότητα να ανταποκριθεί σε χαμηλά και υψηλά φορτία εργασίας ενώ παράλληλα βελτιώνει την ενεργειακή αποδοτικότητα του δικτύου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, όπου οι εφαρμογές έχουν απαιτήσεις χρόνου (time critical applications), χωρίς ωστόσο να μπορεί να ανταγωνιστεί επάξια, στο κομμάτι του χρόνου, τα σύγχρονα πρωτόκολλα. Η διατήρηση επίσης και η διαχείριση μεγάλων πινάκων (που αφορούν τον χρόνο αφύπνισης όλων των κόμβων) σε μεγάλα δίκτυα με πολλούς κόμβους, θα πρέπει να μελετηθεί, διότι μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας του υπολογιστικού υποσυστήματος.

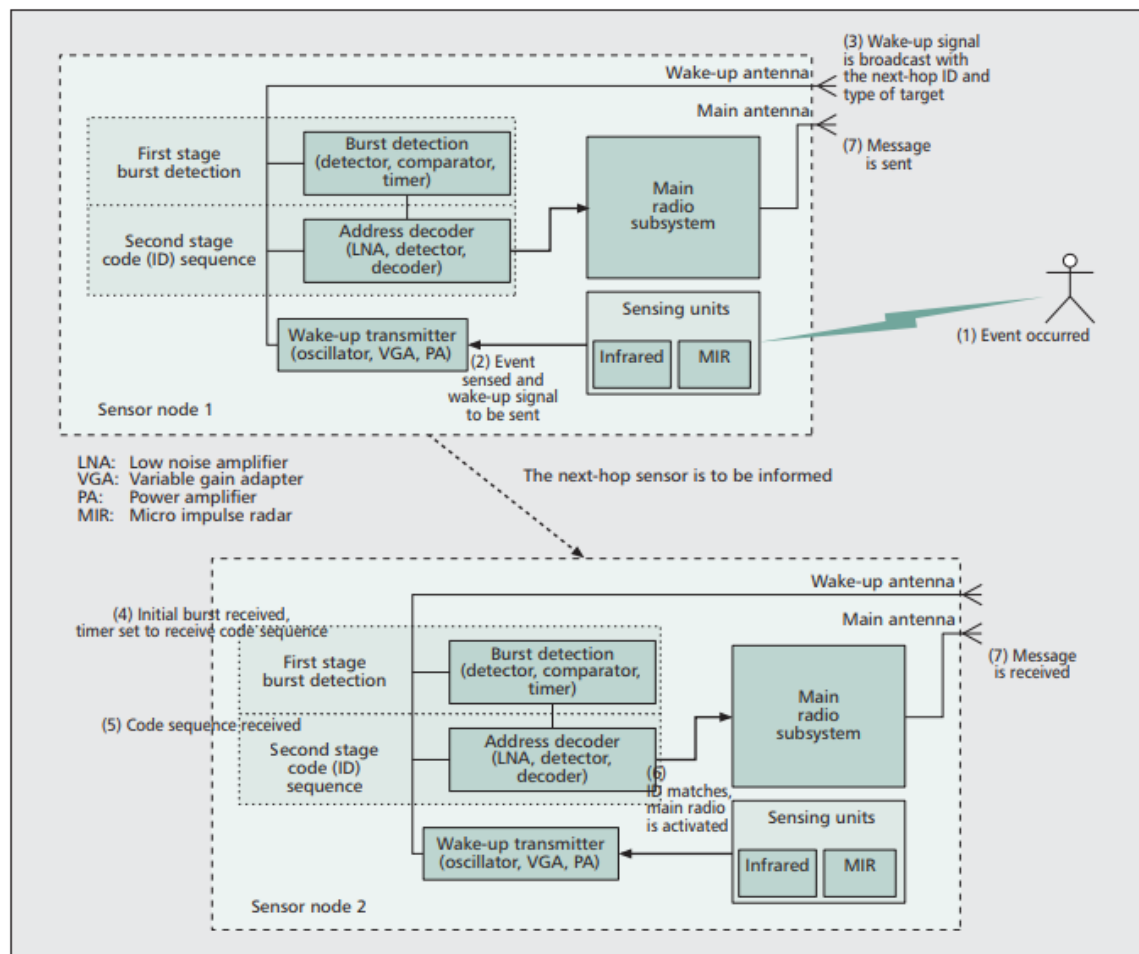
### 4.3 Wake up Receivers - WuR

Όπως προαναφέραμε, η βασική τεχνική μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας που είναι ευρέως διαδεδομένη και υλοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, είναι η τεχνική του duty cycling. Με την συγκεκριμένη τεχνική, προσπαθούμε να μειώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τις καταστάσεις idle listening που δημιουργούνται, έχοντας σαν στόχο την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Με την συγκεκριμένη τεχνική ωστόσο, καταφέρνουμε **εν μέρει** να μειώσουμε τις καταστάσεις αυτές, χωρίς να τις εξαλείφουμε, με παράλληλο κόστος τη δημιουργία delays στο δίκτυο, που εμποδίζουν την λειτουργία απλών αλλά και πιο απαιτητικών εφαρμογών.

Τα τελευταία χρόνια, για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών, παρατηρούμε μια στροφή της επιστημονικής κοινότητας, σε **καθαρά ασύγχρονους** και πιο **αποδοτικούς** ενεργειακά και λειτουργικά, μηχανισμούς επικοινωνίας, όπως οι Wake Up Receivers (WuR). Οι WuR θα μπορούσαμε να πούμε ότι λειτουργούν ως συμπληρωματικοί πομποδέκτες, του βασικού υποσυστήματος επικοινωνιών, οι οποίοι καταναλώνουν πολύ μικρότερη ενέργεια. Βασικός σκοπός αυτής της συμπλήρωσης, είναι η αντικατάσταση του παραδοσιακού duty cycling με τη χρήση των WuRx, βασική λειτουργία των οποίων θα είναι η αφύπνιση γειτονικών κόμβων ή του κόμβου στον οποίο έχουν αναπτυχθεί. Πρόκειται δηλαδή για μια καθαρά ασύγχρονη προσέγγιση ή οποία λειτουργεί on demand, την στιγμή δηλαδή που θέλουμε και όχι ύστερα από το πέρας ενός χρονικού διαστήματος (wake up interval of a receiver node). Το σχέδιο πάνω στο οποίο στηρίχτηκε η ιδέα αυτή, είναι ότι ο κάθε κόμβος κρατάει κλειστό τον βασικό του πομποδέκτη, που καταναλώνει την μεγαλύτερη ενέργεια, ενώ παράλληλα χρησιμοποιεί ένα δεύτερο (WuR), ο οποίος θα ελέγχει το κανάλι και θα καταναλώνει πολύ λιγότερη ενέργεια. Όταν ο WuRεντοπίσει δραστηριότητα, στέλνει ένα interrupt με το οποίο καλεί τον βασικό του πομποδέκτη να ενεργοποιηθεί για να παραλάβει τα δεδομένα. Ένα παράδειγμα κόμβου με ενσωμάτωση τεχνολογίας WuR, παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 30[152], ενώ στην εικόνα 31 παρουσιάζεται και ένα αναλυτικό παράδειγμα επικοινωνίας, μεταξύ δύο κόμβων που υλοποιούν μηχανισμό WuR[153].

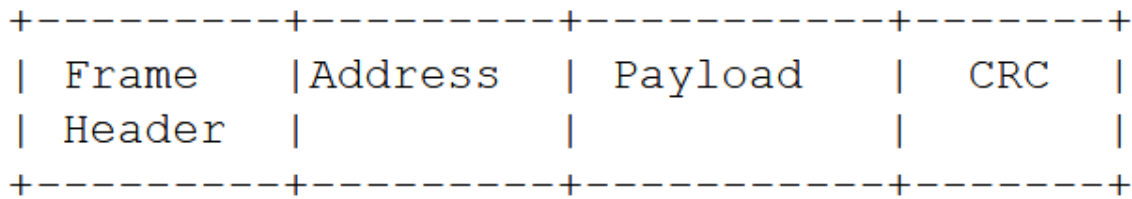


Εικόνα 30: Παράδειγμα κόμβου με υλοποίηση συστήματος WuR



Εικόνα 31: Παράδειγμα επικοινωνίας μεταξύ δύο κόμβων που υλοποιούν μηχανισμό WuR

Η επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων αυτών επιτυγχάνεται με την αποστολή σημάτων αφύπνισης (WuS). Ένα παράδειγμα της δομής ενός τέτοιου σήματος απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα 32[154].



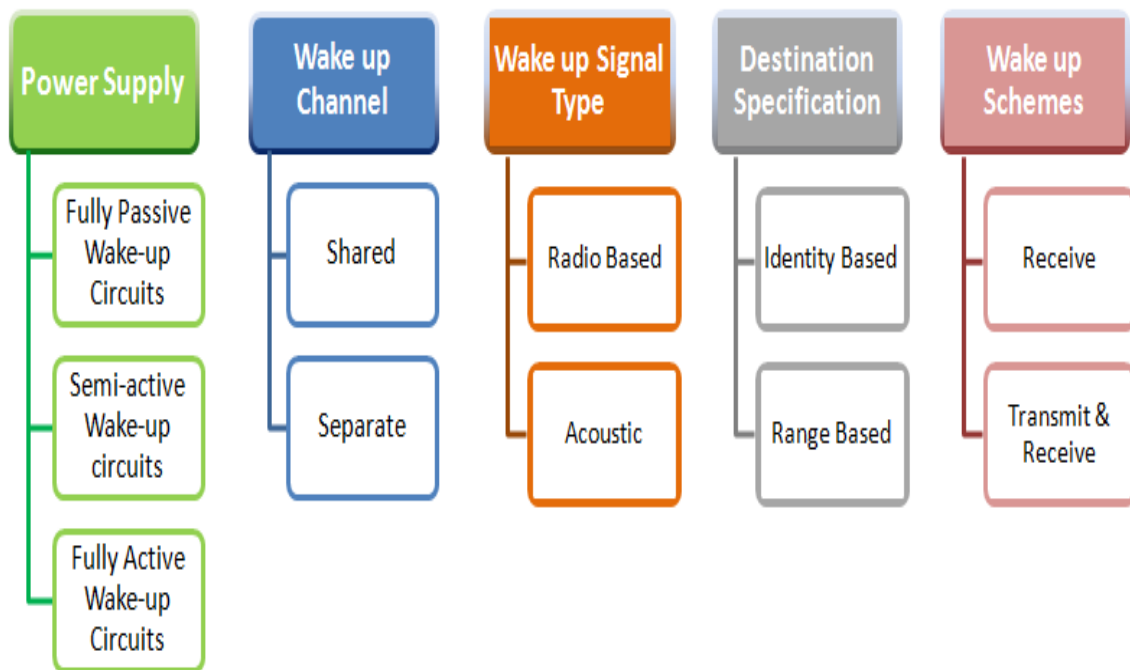
**Εικόνα 32:** Τυπική δομή ενός σήματος αφύπνισης του WuR

Το πρώτο byte της επικεφαλίδας του σήματος, περιλαμβάνει το Wake-up preamble, το οποίο χρειάζεται για να συγχρονιστεί ο πομπός με τον δέκτη, ενώ το SFD (Start Frame Delimiter), οριοθετεί την αρχή του σήματος. Τα επόμενα δύο bytes (ή περισσότερα ανάλογα με τις δυνατότητες του WuR) είναι προαιρετικά και περιλαμβάνουν την διεύθυνση (ID) του παραλήπτη, ενώ ακολουθούν άλλα δύο bytes τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν κανόνες δρομολόγησης, την ενέργεια του κόμβου κ.λ.π. Τέλος ακολουθεί ένα byte, το οποίο περιλαμβάνει τον κυκλικό έλεγχο πλεονασμού για τον έλεγχο της ακεραιότητας των δεδομένων.

Στο σημείο αυτό, καλό θα είναι να διαχωρίσουμε την τεχνολογία των WuR από την τεχνολογία των συστημάτων Wake On Radio (WoR) [155][156] για να μην υπάρχουν συγχύσεις μεταξύ των δύο τεχνολογιών αυτών. Στα συστήματα WoR, ο βασικός πομποδέκτης του κόμβου, εναλλάσσεται περιοδικά από κατάσταση ύπνωσης σε κατάσταση αδράνειας (ελέγχοντας το κανάλι για εισερχόμενα πακέτα), **χωρίς καμία αλληλεπίδραση με την μονάδα ελέγχου του μικροελεγκτή**. Η μονάδα ελέγχου παραμένει σε μόνιμη κατάσταση ύπνωσης και ενεργοποιείται από τον πομποδέκτη, μόνο όταν εντοπιστούν εισερχόμενα πακέτα.

#### 4.3.1 Wake up Receivers Classification

Οι τεχνολογίες των WuR που υπάρχουν στην σχετική βιβλιογραφία, επιδεικνύουν διάφορες αρχές λειτουργίας μέσω της δημιουργίας συγκεκριμένων κυκλωμάτων WuR (Hardware) ή μέσω προσομοιώσεων (Software). Μια ταξινόμηση των τεχνολογιών αυτών, μαζί με τα οφέλη και τις προκλήσεις των WuR παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 7.



Σχήμα 7: Wake up Receiver Technologies Classification

- Όσον αφορά την τροφοδοσία των κυκλωμάτων WuR, υπάρχουν τρεις βασικές προσεγγίσεις[157].

Στην πρώτη προσέγγιση υπάρχουν οι WuR, οι οποίοι χρησιμοποιούν **πλήρως παθητικά κυκλώματα**, χωρίς καμία πηγή τροφοδοσίας και για να δημιουργήσουν μια διακοπή, εξορύσσουν ενέργεια από την ραδιοεπικοινωνία. Παρά το γεγονός ότι καταναλώνουν μηδενική ενέργεια, δεν χρησιμοποιούνται αρκετά διότι παρουσιάζουν αρκετούς περιορισμούς. Ένας από τους περιορισμούς αυτούς είναι ότι δεν μπορούν να ξεχωρίσουν ένα RF σήμα από ένα WU σήμα. Ένας επίσης σημαντικός περιορισμός είναι η χαμηλή ευαισθησία της κεραίας (συνήθως -25dBm), με αποτέλεσμα να μπορούν να επιτύχουν επικοινωνία μόνο σε μικρές αποστάσεις.

Στην δεύτερη προσέγγιση υπάρχουν οι WuR, **όπου ορισμένα** (η μειοψηφία) μόνο μέρη του κυκλώματος **τροφοδοτούνται με ενέργεια** και παραμένουν ενεργά, ενώ τα υπόλοιπα παραμένουν ανενεργά. Αποτελεί μια από τις προσεγγίσεις, η οποία χρησιμοποιείται αρκετά σε υλοποιήσεις WuR και συνήθως ακολουθείται η στρατηγική της ύπαρξης ενός envelope detector (χρησιμοποιώντας παθητικά μέρη) ακολουθούμενος από έναν ενεργό comparator, ο οποίος παράγει την διακοπή.

Στην τρίτη προσέγγιση υπάρχουν οι WuR, όπου όλα τα κυκλώματα είναι πάντα ενεργά και τροφοδοτούνται από μια πηγή ενέργειας. Ο βασικός στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η επίτευξη μεγαλύτερης ευαισθησίας, η οποία θα μπορεί να παράσχει επικοινωνία σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

- Όσον αφορά το **κανάλι επικοινωνίας**, αυτό μπορεί να είναι **διαμοιραζόμενο** ή **ξεχωριστό**. Στο μοιραζόμενο κανάλι επικοινωνίας (In-Band), ο κύριος πομποδέκτης του κόμβου καθώς και ο WuR, χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων (π.χ 2.4GHz or sub-GHz) και μπορούν να διαμοιραστούν την ίδια κεραία. Στο ξεχωριστό κανάλι επικοινωνίας (Out of Band), ο κόμβος και ο WuR χρησιμοποιούν δύο διαφορετικούς πομποδέκτες και μπορούν να λειτουργήσουν σε διαφορετικές συχνότητες. Ο ένας μεταφέρει τα σήματα αφύπνισης (Wake up Signal - WuS), ενώ ο άλλος τα δεδομένα. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των ξεχωριστών πομποδεκτών, είναι ότι μειώνεται η πιθανότητα παρεμβολών, από γειτονικούς κόμβους, οι οποίοι λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα, αποτελεί το γεγονός ότι το συγκεκριμένο ξεχωριστό κανάλι του WuR, μπορεί να χωριστεί σε πολλαπλά κανάλια (code or frequency division techniques), μέσω των οποίων μπορούμε να αφυπνίσουμε ξεχωριστούς κόμβους. Το βασικό μειονέκτημα ωστόσο αποτελεί το σχετικά υψηλό κόστος για την ανάπτυξη δεύτερου ραδιοσυστήματος.
- Όσον αφορά τον **τύπο του σήματος**, αυτό μπορεί να είναι RF σήμα ή ακουστικό. Τα **RF σήματα** είναι τα πιο διαδεδομένα και εφαρμόζονται στις περισσότερες των περιπτώσεων. Πρόκειται για σήματα που η συχνότητά τους κυμαίνεται από 3KHz έως GHz. Στην δεύτερη περίπτωση υπάρχουν τα **ακουστικά** σήματα (ultra sonic or audio signals), τα οποία δεν απαιτούν ειδική υποδομή και μπορεί να δημιουργηθούν από ηχεία ή smartphones.
- Το ζήτημα της διευθυνσιοδότησης σε συστήματα WuR, αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι στην υλοποίηση συστημάτων WuR, το οποίο μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου.

Από την μια πλευρά έχουμε την **broadcast** εκπομπή, όπου όλοι κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται μέσα στο **εύρος εκπομπής**, ξυπνάνε και λαμβάνουν το πακέτο. Ο συγκεκριμένος τύπος εκπομπής έχει το πλεονέκτημα της μείωσης της καθυστέρησης, μιας και όλοι οι κόμβοι δεν χρειάζεται να μουν σε μια διαδικασία αποκωδικοποίησης του πακέτου για να αναλύσουν το id του παραλήπτη όπως συμβαίνει σε συστήματα WuR που υιοθετούν τεχνικές διευθυνσιοδότησης. Από την άλλη πλευρά, συμβάλλουν σημαντικά

στην αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας ολόκληρου του δικτύου, διότι εκτός από τους προοριζόμενους παραλήπτες, ξυπνάνε και όλοι οι υπόλοιποι που βρίσκονται στο ίδιο εύρος.

Προαιρετικά, υπάρχει και η δυνατότητα **διευθυνσιοδότησης** σε συστήματα WuR, όπου στο εκπεμπόμενο σήμα αφύπνισης, εμπεριέχεται και η διεύθυνση συγκεκριμένων παραληπτών (bit sequence of 8, 16, 32 bits). Η ενσωμάτωση της διεύθυνσης του παραλήπτη αυξάνουν το μήκος του πακέτου, με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο χρόνος που θα χρειαστεί για να μεταδοθεί. Συνεπώς έχουμε μια αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας. Από την άλλη πλευρά ωστόσο, η ενσωμάτωση του ID του παραλήπτη στο εκπεμπόμενο σήμα, μπορεί να οδηγήσει σε μια σημαντική μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας ολόκληρου του δικτύου, διότι αποτρέπει λαθεμένες αφυπνίσεις των μη προοριζόμενων παραληπτών.

- Όσον αφορά το σχέδιο αφύπνισης και τις δυνατότητες του WuR, υπάρχουν δύο κατευθύνσεις. Στην πρώτη περίπτωση ο WuR, μπορεί μόνο να παραλάβει σήματα αφύπνισης, αφυπνίζοντας τον κύριο πομποδέκτη του, αλλά δεν μπορεί να μεταδώσει τέτοια σήματα για να αφυπνίσει γειτονικούς κόμβους. Στην δεύτερη περίπτωση, ο WuR, έχει την δυνατότητα αποστολής (TuX) και λήψης σημάτων αφύπνισης.

#### 4.3.2 Ζητήματα Σχεδίασης Wake Up Receiver

Η σχεδίαση ενός συστήματος WuR, για να είναι ενεργειακά αποδοτική και λειτουργική, θα πρέπει να λάβει υπόψη διάφορους παράγοντες, οι πιο βασικοί από τους οποίους είναι οι παρακάτω:

**Κατανάλωση ενέργειας:** Το ζήτημα της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας σε συστήματα WuR, αποτελεί την πιο μεγάλη πρόκληση, διότι αποτελεί τον κύριο λόγο ύπαρξής τους. Ο βασικός κανόνας που θα πρέπει να ακολουθείται στη σχεδίαση τέτοιων συστημάτων, για να έχουμε θετικό ισοζύγιο στην κατανάλωση της ενέργειας, είναι ότι ο WuR σε ενεργή κατάσταση, δεν θα πρέπει να καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από αυτή που καταναλώνει ο κύριος πομποδέκτης κατά τη διάρκεια “ύπνωσης”.

**Λαθεμένες αφυπνίσεις και παρεμβολές:** Οι συνεχείς και λαθεμένες αφυπνίσεις των κόμβων που δεν είναι οι προοριζόμενοι παραλήπτες του πακέτου, συμβάλλουν σημαντικά στην αύξηση της κατανάλωσης της ενέργειας του δικτύου. Οι λαθεμένες αυτές αφυπνίσεις μπορεί να προέρχονται από σήματα αφύπνισης που προορίζονται για άλλους κόμβους ή από παρεμβολές. Για την αντιμετώπιση των λαθεμένων σημάτων αφύπνισης, μπορούν να

υιοθετηθούν στρατηγικές διευθυνσιοδότησης για την εξάλειψη του φαινομένου. Όσον αφορά τις παρεμβολές, ένα WuR σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να τις διακρίνει από τα RF σήματα αφύπνισης, χωρίς την ανάμειξη του κύριου επεξεργαστή, ενώ για την διαμόρφωση του σήματος, μπορεί να υιοθετηθούν τεχνικές όπως On-Off-Keying (OOK), Pulse Width Modulation (PWM), Amplitude Shift Keying, με σκοπό την αποτροπή παρεμβολών μεταξύ των κόμβων.

**Χρόνος αφύπνισης:** Ο χρόνος που θα χρειαστεί ο WuR για να αφυπνίσει τον κόμβο θα πρέπει να είναι ελάχιστος, έτσι ώστε να μην υπάρχουν σημαντικές καθυστερήσεις στο σύστημά μας.

**Ευαισθησία (Sensitivity):** Η ευαισθησία, η οποία μας παρέχει το ελάχιστο επίπεδο ισχύς στο οποίο ένας WuR μπορεί να παραλάβει ένα σήμα αφύπνισης, αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα στην υλοποίηση τέτοιων συστημάτων. Από την πλευρά του παραλήπτη, για να επιτύχουμε υψηλή ευαισθησία, χρειαζόμαστε ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία καταναλώνουν μεγάλη ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, αν έχουμε χαμηλή ευαισθησία, επιτυγχάνουμε μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας, λόγω της χρήσης λιγότερο απαιτητικών υλικών, αλλά ταυτόχρονα απαιτείται μεγαλύτερη ισχύ από την πλευρά του αποστολέα για να στείλει το σήμα αφύπνισης. Επιπροσθέτως, η ευαισθησία είναι άμεσα συνδεδεμένη με την απόσταση μετάδοσης, οπότε αν έχουμε χαμηλή ευαισθησία, έχουμε και μικρή απόσταση επικοινωνίας.

**Ρυθμός δεδομένων:** Εκτός των βελτιώσεων που μπορεί να γίνουν σε φυσικό επίπεδο (επιλογή συχνότητας – κεραιές κ.λ.π.), σημαντική μέριμνα θα πρέπει να δοθεί και στον ρυθμό δεδομένων, ο οποίος επηρεάζει άμεσα την λειτουργικότητα και την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Από την πλευρά του αποστολέα (TuX), ένας χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, αυξάνει την διάρκεια αποστολής ενός bit, με αποτέλεσμα να χρειάζεται περισσότερη ενέργεια για να αποστείλει ένα WuS. Από την πλευρά του παραλήπτη, αυτό σημαίνει μεγαλύτερο χρόνο αναμονής σε ενεργή κατάσταση μέχρι να δημιουργήσει την διακοπή, με αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας.

#### 4.3.3 Αποτελέσματα Έρευνας

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχετική βιβλιογραφία, για προσπάθειες που έχουν γίνει στον τομέα της μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, σε συστήματα Wake up Receivers. Στην αναφορά [158] οι συντάκτες παρουσιάζουν ένα μοντέλο, το οποίο



αποτελεί ένα από τα λιγότερο απαιτητικά συστήματα WuR, σε θέματα κατανάλωσης ενέργειας μέχρι σήμερα. Πρόκειται για έναν WuR, ο οποίος δουλεύει στη ζώνη συχνοτήτων των **915MHz** και η κατανάλωση του περιορίζεται στα **98nW**. Η συγκεκριμένη κατανάλωση φαίνεται αρκετά ελκυστική, αλλά αν παρατηρήσουμε τα επιμέρους χαρακτηριστικά του συστήματος, θα διαπιστώσουμε ότι η χαμηλή ευαισθησία της κεραίας (**-41dBm**) και η χαμηλή απόσταση εμβέλειας (περίπου **1.2 μέτρα**), καθιστούν το συγκεκριμένο σύστημα κατάλληλο κυρίως για εφαρμογές WBAN (Wireless Body Area Network). Στην αναφορά [159] οι συντάκτες παρουσιάζουν έναν WuR, ο οποίος λειτουργεί στη συχνότητα των **433MHz** και η κατανάλωσή του περιορίζεται στα **270nW**. Το συγκεκριμένο σύστημα εμπεριέχει τεχνολογία για αποφυγή παρεμβολών και ευελιξία όσον αφορά την υποστήριξη διαφορετικών ρυθμών δεδομένων. Υποστηρίζει μηχανισμό αποφυγής παρεμβολών και μηχανισμό αποκωδικοποίησης διευθυνσιοδότησης, η οποία ωστόσο γίνεται από την κεντρική μονάδα του μικροελεγκτή (MCU) και δεν υπάρχει αναφορά στην κατανάλωσή της. Η χαμηλή ευαισθησία (**-51dBm**) και η μικρή απόσταση (περίπου **10 μέτρα**), την κρίνουν μια καλή επιλογή για WBAN δίκτυα. Στην αναφορά [160] οι συντάκτες παρουσιάζουν ένα Multi-Band WuR, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει στις ζώνες **402-405MHz**, **915MHz** και **2,4GHz**, καταναλώνοντας **116nW** σε ενεργή κατάσταση και **20pW** σε κατάσταση ύπνου. Το συγκεκριμένο σύστημα παρέχει μηχανισμό απόρριψης παρεμβολών χωρίς τη δυνατότητα αποκωδικοποίησης διευθύνσεων, ενώ δεν γίνεται αναφορά σε συγκεκριμένα αποτελέσματα όσον αφορά την απόσταση επικοινωνίας. Στην αναφορά [161] οι συντάκτες παρουσιάζουν έναν WuR για βιομηχανική χρήση, επιτυγχάνοντας κατανάλωση **690nW** και μέγιστη απόσταση τα **2 μέτρα** στη συχνότητα των **868MHz**.

Οι παραπάνω αναφορές αποτελούν μερικές από τις πιο σημαντικές, οι οποίες επιδεικνύουν κατανάλωση ενέργειας σε επίπεδο μερικών μόνο **nW**. Κρίνονται ωστόσο ακατάλληλες για δίκτυα μικρής ή μέσης απόστασης (**>30μ**), διότι η χαμηλή ευαισθησία και η μικρή εμβέλεια, τις περιορίζουν αρκετά.

Συνεχίζοντας την έρευνα λοιπόν, προσπαθήσαμε να αναζητήσουμε πρωτότυπες υλοποιήσεις WuR, δίνοντας έμφαση στην χαμηλή κατανάλωση ενέργειας αλλά και στην απόσταση, ελάχιστο όριο της οποίας ορίσαμε τα **30 μέτρα**. Οι αναφορές αυτές που συμφωνούσαν με το κριτήριο της απόστασης και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, παρουσιάζονται στον παρακάτω **πίνακα 3**.

Παρατηρώντας τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναφορά [164] στην οποία οι συντάκτες, σε σύγκριση με άλλες υλοποιήσεις, έχουν πετύχει τη μεγαλύτερη απόσταση επικοινωνίας, η οποία φτάνει τα **1.2Km** με ευαισθησία κεραίας στα **-82dBm**. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση, η κατανάλωση ενέργειας του WuR φτάνει τα **4,75μW** ενώ παράλληλα χρησιμοποιείται και μηχανισμός αποκωδικοποίησης διευθυνσιοδότησης με την χρήση correlator. Πρόκειται για μια υλοποίηση η οποία μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, μέσης ή μεγάλης απόστασης. Αξιόλογο εύρος επικοινωνίας αντίστοιχα έχει επιτευχθεί από τους συντάκτες της αναφοράς [163], οι οποίοι έφτασαν στην απόσταση των **304** μέτρων, πετυχαίνοντας ευαισθησία κεραίας τα **-71dBm**. Πρόκειται για σαφώς μικρότερη απόσταση από την προηγούμενη αναφορά, ωστόσο η κατανάλωση του WuR, περιορίζεται περίπου στο μισό της προηγούμενης (**2,4μW**). Ο ρυθμός δεδομένων που έχει επιτευχθεί είναι σαφώς ανώτερος από την αναφορά [164] (**20-200Kbps**), ενώ το σύστημα αποκωδικοποίησης διευθυνσιοδότησης που υιοθετεί με τη χρήση correlator, τον αποτρέπει από αχρείαστες διακοπές της μονάδας του μικροελεγκτή και του βασικού ραδιοπομπού του κόμβου. Στην αναφορά [162], παρουσιάζεται από τους συντάκτες ένα σύστημα WuR, το οποίο λειτουργώντας στην ζώνη συχνοτήτων των **868MHz** καταφέρνει ένα αρκετά υψηλό ρυθμό δεδομένων σε σχέση με τους υπόλοιπους, της τάξης των **250Kbps**, με κατανάλωση ενέργειας μόλις **2,78μW**. Η ευαισθησία των **-52dBm**, του επιτρέπει μέγιστη απόσταση τα **40 μέτρα** και παράλληλα με την αρκετά χαμηλή κατανάλωση, κρίνεται κατάλληλος για μικρής εμβέλειας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η μεγαλύτερη κατανάλωση συστήματος WuR, μεταξύ των υπολοίπων, παρατηρείται στην αναφορά [165], η οποία φτάνει τα **1,62mW** με μέγιστη απόσταση τα **120 μέτρα**. Αντίστοιχη κατανάλωση της τάξης των **mW**, παρουσιάζεται στην αναφορά [167], οι συντάκτες της οποίας κατάφεραν να επιτύχουν ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα **100Kbps** με κατανάλωση στα **1,276μW**. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, μεταξύ των υπολοίπων, παρουσιάζει η αναφορά [171], οι συντάκτες της οποίας υλοποίησαν ένα σύστημα WuR και με τη χρήση τριών διαφορετικών comparators, κατάφεραν να επιτύχουν τρία διαφορετικά συστήματα, με διαφορετικά χαρακτηριστικά, παρέχοντας παράλληλα πληροφορίες για την καθυστέρηση του συστήματος. Στην πρώτη περίπτωση, με τη χρήση του comparator **TLV3691** της Texas Instruments, κατάφεραν να επιτύχουν κατανάλωση ενέργειας της τάξης των **nW**, φτάνοντας μόλις τα **152nW**, με ευαισθησία κεραίας τα **-32dBm**. Η απόσταση που επιτεύχθηκε, φτάνει τα **7 μέτρα** και ο ρυθμός δεδομένων τα **10Kbps**. Στην δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιώντας τον comparator **AS1976** της Austria Microsystems,

κατάφεραν να επιτύχουν απόσταση επικοινωνίας τα **22 μέτρα**, καταναλώνοντας μόλις **365nW**, με ευαισθησία κεραίας τα **-42dBm**. Στην τρίτη περίπτωση, με τη χρήση του comparator **LPV7215** από την Texas Instruments, κατάφεραν να επιτύχουν κατανάλωση στα **1196nW** και με ευαισθησία κεραίας τα **-55dBm**, έφτασαν απόσταση επικοινωνίας τα **50μέτρα**.

Ref	year	Different Components	Frequency (GHz)	Data Rate (Kbps)	Power consumption (active) $\mu$ W	Addressing	Sensitivity (dBm)	Distance (m)	Delay (ms)	Power Supply (V)
[162]	2010		0.868 In band	250	7,8	yes	-52	40	-	0.9
[163]	2011		0,868 In band	20-200	2.4	yes	-71	304	-	1.2
[164]	2013		0.868	0.128	4.75	yes	-83	1.200	-	2.5
[165]	2014		2,4 In band	250	1.620	yes	-83	120	-	1.2
[166]	2014		0.868 In band	2.7	24	yes	-53	41	45.87	3
[167]	2014		0.868	100	1.276	yes	-55	45	-	1.8
[168]	2014		2.4 in band	0.5 to 8	8.4	yes	-53	40	13.08	3
[169]	2015		0.434	8.192	8.1	yes	-52	30	34	3
[170]	2015		1.5	-	6.9	yes	-60	82	10	2.5
[171]	2016	TLV 3691	0.868	10	0,152	yes	-32	7	<b>0.06</b> (with IAC and AD ) <b>0,008</b> (without IAC and AD)	1.8V
		AS1976		10	0,365		-42	22		
		LPV7215		10	1,2		-55	50		

**Πίνακας 3:** Υλοποιήσεις συστημάτων WuR με range >= 30 μέτρων και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας

## **5. Βελτίωση ενεργειακής αυτονομίας του συντονιστή με χρήση δεκτών χαμηλής κατανάλωσης (WuRs)**

Η χρήση δεκτών χαμηλής κατανάλωσης, αποτελεί μια αρκετά υποσχόμενη τεχνολογία, στον τομέα των Ασύρματων δικτύων Αισθητήρων, η οποία καλείται να αντιμετωπίσει ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που επηρεάζουν τη λειτουργία και την διάρκεια ζωής τους, την κατανάλωση ενέργειας. Επίσης αρκετές είναι και οι έρευνες πάνω στην ανεύρεση πρωτοκόλλων επιπέδου MAC, τα οποία θα καθορίζουν τη λειτουργία τους, χωρίς ωστόσο να υπάρχει ακόμη κάποια προτυποποίηση.[172]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο οι δέκτες χαμηλής κατανάλωσης επηρεάζουν την κατανάλωση ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων, αποφασίσαμε να μην χρησιμοποιήσουμε κάποιο από τα πειραματικά πρωτόκολλα που περιγράφονται στην παραπάνω αναφορά, αλλά να μελετήσουμε την συμβολή τους στην ενεργειακή αυτονομία του συντονιστή, ενός δικτύου (STAR) που χρησιμοποιεί το πρότυπο πρωτόκολλο Zigbee (το οποίο βασίζεται στο 802.15.4 – Physical & MAC layer) σε non – beacon mode (unslotted CSMA-CA), χωρίς να παρέμβουμε στο πρωτόκολλο και χωρίς να επηρεάσουμε τη λειτουργία του (WuR over Zigbee).

### **5.1 Κατανάλωση ενέργειας σε STAR δίκτυο Zigbee**

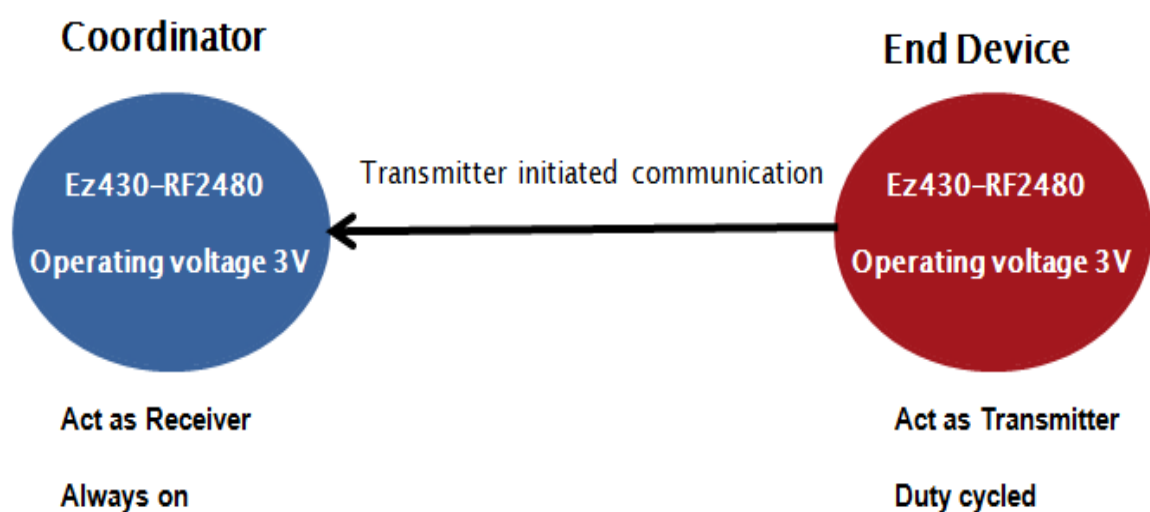
Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, το οποίο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο zigbee, αποτελείται από συσκευές, οι οποίες λειτουργούν είτε ως συσκευές πλήρους λειτουργικότητας (FFD – Full Function Devices) είτε ως συσκευές μειωμένης λειτουργικότητας (RFD – Reduced Function Devices). Οι συσκευές μειωμένης λειτουργικότητας έχουν πολύ μικρότερες απαιτήσεις σε ενέργεια, σε σχέση με τις συσκευές πλήρους λειτουργικότητας. Βασική λειτουργία τους είναι να συλλέγουν πληροφορίες από το περιβάλλον και να τις αποστέλλουν στο συντονιστή του δικτύου. Τέτοιου είδους συσκευές, αποτελούν τα end devices (τελικές συσκευές), τα οποία λειτουργούν σε low duty cycled mode. Αφυπνίζονται δηλαδή ανά τακτά χρονικά διαστήματα, συλλέγουν πληροφορίες και τις αποστέλλουν άμεσα στον συντονιστή, είτε έμμεσα, μέσω δρομολογητών (Routers). Οι δρομολογητές αποτελούν συσκευές πλήρους λειτουργικότητας, οι οποίες έχουν ως στόχο την κάλυψη ενός μεγάλου σε έκταση

ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Η χρήση τους είναι προαιρετική, έχουν μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και σκοπός τους είναι η δρομολόγηση των δεδομένων στο δίκτυο, έως τον τελικό προορισμό.

Την πιο σημαντική ωστόσο συσκευή, σε ένα zigbee δίκτυο, αποτελεί ο συντονιστής (Coordinator) του δικτύου. Πρόκειται για μια συσκευή πλήρους λειτουργικότητας, ή οποία βρίσκεται μόνιμα ανοιχτή, με την υψηλότερη απαίτηση σε ενέργεια. Αποτελεί τον πυρήνα ενός zigbee δικτύου και εκτελεί λειτουργίες όπως την δημιουργία και την εκκίνηση του δικτύου, την ανάθεση διευθύνσεων σε δρομολογητές και τελικές συσκευές, επιτρέπει σε νέες συσκευές να ενωθούν με το δίκτυο ή σε ήδη υπάρχουσες να το εγκαταλείψουν καθώς επίσης και την αποστολή πακέτων ελέγχου εφαρμογών. Είναι κατανοητό από τα παραπάνω, ότι **η ενεργειακή αυτονομία του συντονιστή**, αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την απρόσκοπτη λειτουργία του, γεγονός που έχει άμεση επίπτωση στην απρόσκοπτη λειτουργία ολόκληρου του δικτύου.

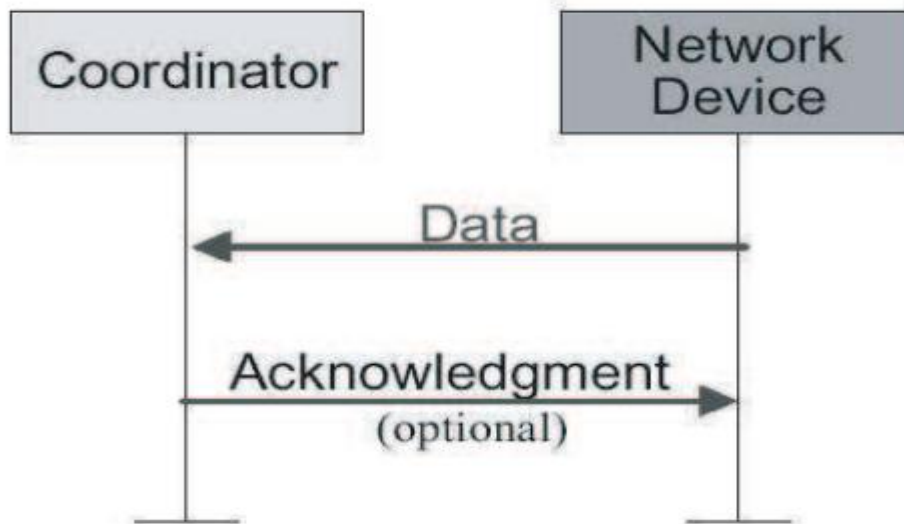
Σκοπός της παρούσας μελέτης περίπτωσης, είναι να αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο η χρήση δεκτών χαμηλής κατανάλωσης, μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία του συντονιστή (coordinator) ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων, το οποίο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο zigbee.

Για να το πετύχουμε αυτό, αρχικά ορίσαμε ένα zigbee δίκτυο (STAR), με μια point to point σύνδεση (σχήμα 8), μεταξύ του συντονιστή και ενός end device, χωρίς την ύπαρξη δεκτών χαμηλής κατανάλωσης.



**Σχήμα 8:** Point to Point σύνδεση μεταξύ συντονιστή και end device σε STAR WSN

Η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών αυτών ξεκινάει από το end device (receiver initiated transmission), το οποίο βρίσκεται σε μια κατάσταση duty cycling. Ενεργοποιείται δηλαδή ανά τακτά χρονικά διαστήματα (για εξοικονόμηση ενέργειας), δειγματοληπτεί, στέλνει τα δεδομένα από τη δειγματοληψία στον συντονιστή του δικτύου και περιμένει μια επιβεβαίωση (σχήμα 9).[173]



**Σχήμα 9:** End Device initiated communication in zigbee non beacon mode

Από την άλλη πλευρά, ο συντονιστής παραμένει μόνιμα ανοιχτός (always on), περιμένοντας την παραλαβή των δεδομένων, τα οποία θα αποσταλούν από το end device.

Τόσο ο συντονιστής, όσο και το end device, χρησιμοποιούν το kit της Texas Instruments Ez430-RF2480, το οποίο αποτελείται από τον πολύ χαμηλής κατανάλωσης μικροελεγκτή MSP430 και τον zigbee επεξεργαστή CC2480, ο οποίος λειτουργεί στη συχνότητα των 2,4GHz. Για να μελετήσουμε την κατανάλωση ενέργειας, βασιστήκαμε στην αναφορά [174], όπου οι συντάκτες μοντελοποίησαν την κατανάλωση ενέργειας, μιας μετάδοσης, μεταξύ δύο συσκευών ενός zigbee Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων.

### 5.1.1 Κατανάλωση ενέργειας του end device κατά τη διάρκεια μίας μετάδοσης

Έστω ότι το end device έχει δεδομένα (2 bytes) να στείλει στον συντονιστή. Η διαδικασία που ακολουθεί είναι η εξής: Ο μικροελεγκτής ενεργοποιεί τον zigbee επεξεργαστή CC2480. Στη συνέχεια ο πομποδέκτης ελέγχει το κανάλι (CSMA/CA) να διαπιστώσει αν είναι ελεύθερο. Σε περίπτωση που είναι ελεύθερο, στέλνει τα δεδομένα στον συντονιστή και περιμένει την απάντηση (ACK) ότι τα δεδομένα παρελήφθησαν. Όταν παραλάβει την απάντηση, την στέλνει στον μικροελεγκτή και στη συνέχεια πέφτει σε κατάσταση ύπνου. Στην περίπτωση που το κανάλι δεν είναι ελεύθερο, περιμένει ένα μικρό χρονικό διάστημα και εκτελεί την ίδια διαδικασία.

Στο παρακάτω διάγραμμα 1, απεικονίζεται η χρονική διάρκεια και η κατανάλωση στο κάθε στάδιο, κατά την διαδικασία μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων από το end device προς το συντονιστή.

Τα στάδια 1 και 9 αναφέρονται στον χρόνο που το end device βρίσκεται σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης (LPM3 – Standby), καταναλώνοντας **1,2μΑ** για όσο χρόνο δεν έχει δεδομένα προς αποστολή.

Τα επόμενα τρία στάδια (2,3,4) αναφέρονται στον χρόνο των **10,2ms** που χρειάζεται η ενεργοποίηση του zigbee επεξεργαστή CC2480, με αντίστοιχη κατανάλωση **13mA**.

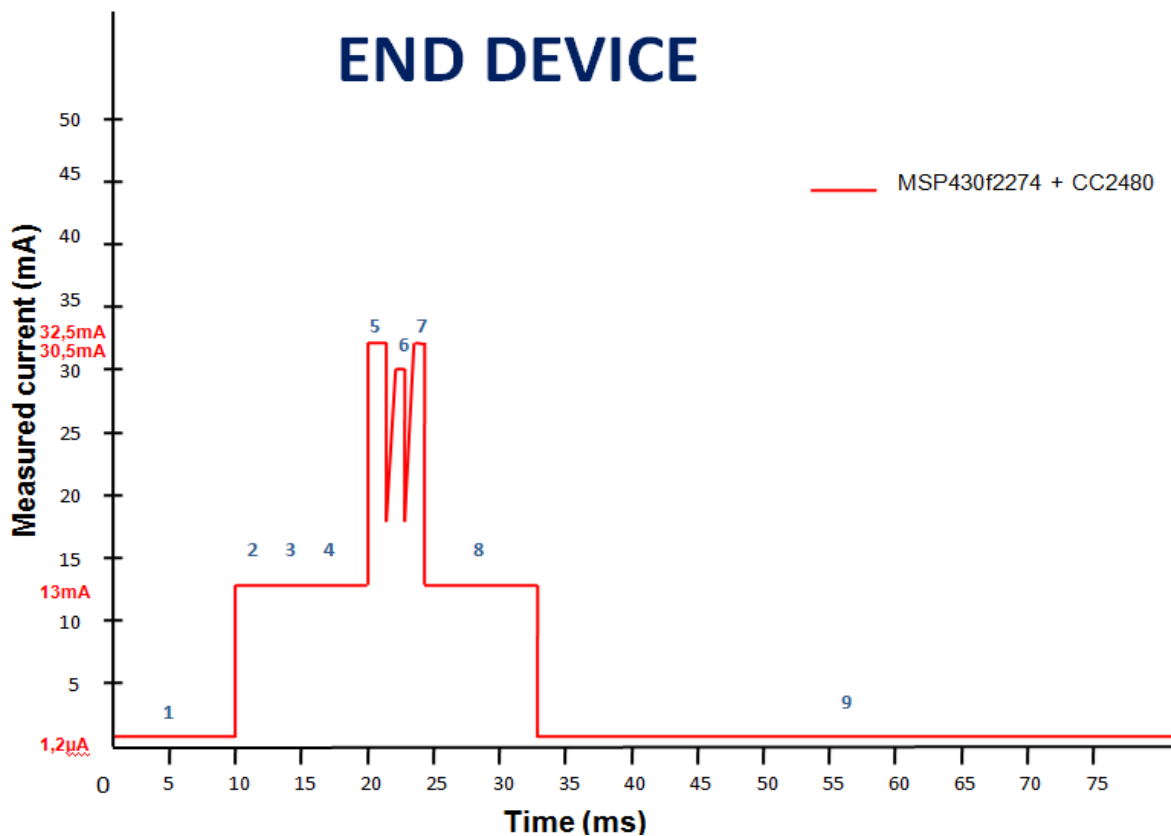
Το πέμπτο στάδιο αναφέρεται στον χρόνο των **1,6ms** που χρειάζεται ο ραδιοπομπός να ελέγξει το κανάλι για να διαπιστώσει αν είναι ελεύθερο, με αντίστοιχη κατανάλωση **32,5mA**.

Το έκτο στάδιο αναφέρεται στον χρόνο των **(8 x n) / 250.000** (όπου n το μέγεθος των δεδομένων μαζί με το υπόλοιπο data frame), που χρειάζεται το end device να στείλει το πακέτο, με αντίστοιχη κατανάλωση **30,5mA**.

Στο έβδομο στάδιο, ο πομποδέκτης αλλάζει την κατάστασή του σε αναμονή λήψης, περιμένοντας την **11-byte** επιβεβαίωση (ACK). Η διάρκεια αναμονής είναι τα **1,3ms** με αντίστοιχη κατανάλωση τα **32,5mA**.

Στο όγδοο στάδιο, ο πομποδέκτης χρειάζεται **9ms** να στείλει τα δεδομένα στον μικροελεγκτή, με αντίστοιχη κατανάλωση τα **13mA** και στη συνέχεια πέφτει σε κατάσταση ύπνου.





**Διάγραμμα 1:** Στάδια και κατανάλωση ενέργειας του *end device* κατά τη διάρκεια μιας εκπομπής δεδομένων προς το συντονιστή

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το kit της Texas Instruments τροφοδοτείται από μια μπαταρία η οποία λειτουργεί στα 3V, υπολογίσαμε τη συνολική ενέργεια που καταναλώνει το *end device*, κατά τη διάρκεια αποστολής ενός πακέτου, ως εξής:

Stage 2,3,4:

$$(Ισχύς) \quad 13\text{mA} * 3\text{V} = 0,013\text{A} * 3\text{V} = 0,039\text{W}$$

$$(Ενέργεια) \quad 0,039\text{W} * 0,0102\text{s} = \underline{\underline{397,8\mu\text{J}}}$$

Stage 5:

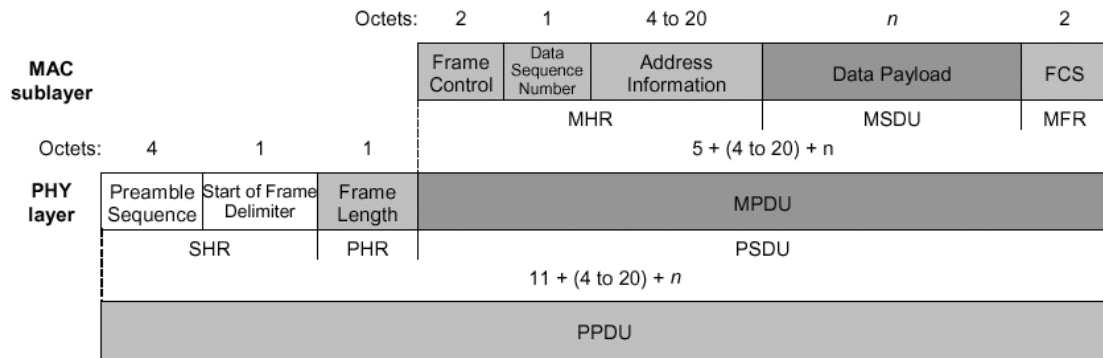
$$(Ισχύς) \quad 32,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0325\text{A} * 3\text{V} = 0,0975\text{W}$$

$$(Ενέργεια) \quad 0,0975\text{W} * 0,0016\text{s} = \underline{\underline{156\mu\text{J}}}$$

Για τον υπολογισμό της κατανάλωσης του 6<sup>ου</sup> σταδίου, υπολογίσαμε το μέγεθος του πακέτου που θα αποσταλεί, λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στη συχνότητα των 2,4GHz (250kbps) καθώς και τη μορφή του πλαισίου δεδομένων του MAC επιπέδου, όπως αυτό φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 33. Επομένως, για data payload ίσο

με 2 bytes και χρησιμοποιώντας τα 4 από τα 20 bytes για το address information, υπολογίσαμε ότι το συνολικό μέγεθος του πακέτου το οποίο θα αποσταλεί, είναι ίσο με **17 bytes**.

## Data Frame format



Εικόνα 33: Δομή πλαισίου δεδομένων επιπέδου MAC

### Stage 6:

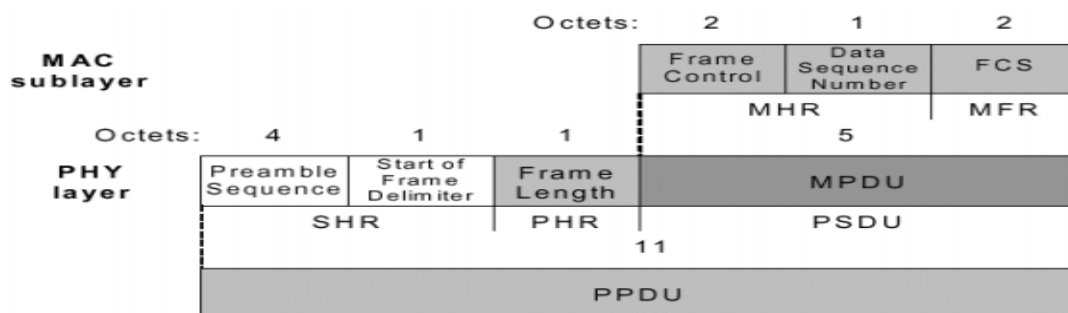
(Ισχύς)  $30,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0305\text{A} * 3\text{V} = 0,0915\text{W}$

(Ενέργεια)  $0,0915\text{W} * [(17\text{byte})/250\text{kbps}] = 0,0915\text{W} * (136\text{bit}/250.000\text{bps}) = 0,0915\text{W}$

$* 0,000544\text{sec} = 0,0915\text{W} * 0,000544\text{s} = \underline{\underline{49,77\mu\text{J}}}$

Για τον υπολογισμό του 7<sup>ου</sup> επιπέδου, λάβαμε υπόψη τη μορφή του πλαισίου Επιβεβαίωσης (εικόνα 34), το μέγεθος του οποίου είναι **11 bytes** και ορίσαμε ως χρόνο αναμονής της επιβεβαίωσης, από το end device, το χρόνο του **1ms** (με default μέγιστο χρόνο αναμονής τα **1,3ms**).

## Acknowledgement Frame Format



Εικόνα 34: Δομή πλαισίου επιβεβαίωσης

#### Stage 7a:

$$(Ισχύς) \quad 32,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0325\text{A} * 3\text{V} = 0,0975\text{W}$$

$$(Ενέργεια) \quad 0,0975\text{W} * 0,001\text{s} = \underline{\underline{97,5\mu\text{J}}} \text{ (waiting for ACK reception)}$$

#### Stage 7b:

$$(Ισχύς) \quad 32,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0325\text{A} * 3\text{V} = 0,0975\text{W}$$

$$(Ενέργεια) \quad 0,0975\text{W} * [(11\text{byte})/250000\text{bps}] = 0,0975\text{W} * [(88\text{bit})/250000\text{bps}] = 0,0975\text{W} * 0,000352\text{sec} = \underline{\underline{34,32\mu\text{J}}} \text{ (receiving ACK)}$$

#### Stage 8:

$$(Ισχύς) \quad 13\text{mA} * 3\text{V} = 0,013\text{A} * 3\text{V} = 0,039\text{W}$$

$$(Ενέργεια) \quad 0,039\text{W} * 0,009\text{s} = \underline{\underline{351\mu\text{J}}}$$

Οπότε η συνολική ενέργεια που καταναλώνει το end device, κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης δεδομένων, υπολογίζεται από το άθροισμα της κατανάλωσης σε κάθε στάδιο ως εξής:

$$EC_{\text{end\_device}} = \text{stage (2,3,4)} + \text{stage (5)} + \text{stage(6)} + \text{stage (7a)} + \text{stage (7b)} + \text{stage (8)}$$

$$EC_{\text{end\_device}} = 397,8\mu\text{J} + 156\mu\text{J} + 49,77\mu\text{J} + 97,5\mu\text{J} + 34,32\mu\text{J} + 351\mu\text{J} = \underline{\underline{1.086,39\mu\text{J}}} \text{ ή } \underline{\underline{1,086\text{mJ}}}$$

Η παραπάνω καταναλισκόμενη ενέργεια, συντελέστηκε κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης από το end device προς το συντονιστή και για χρονικό διάστημα ίσο με **22,7ms**

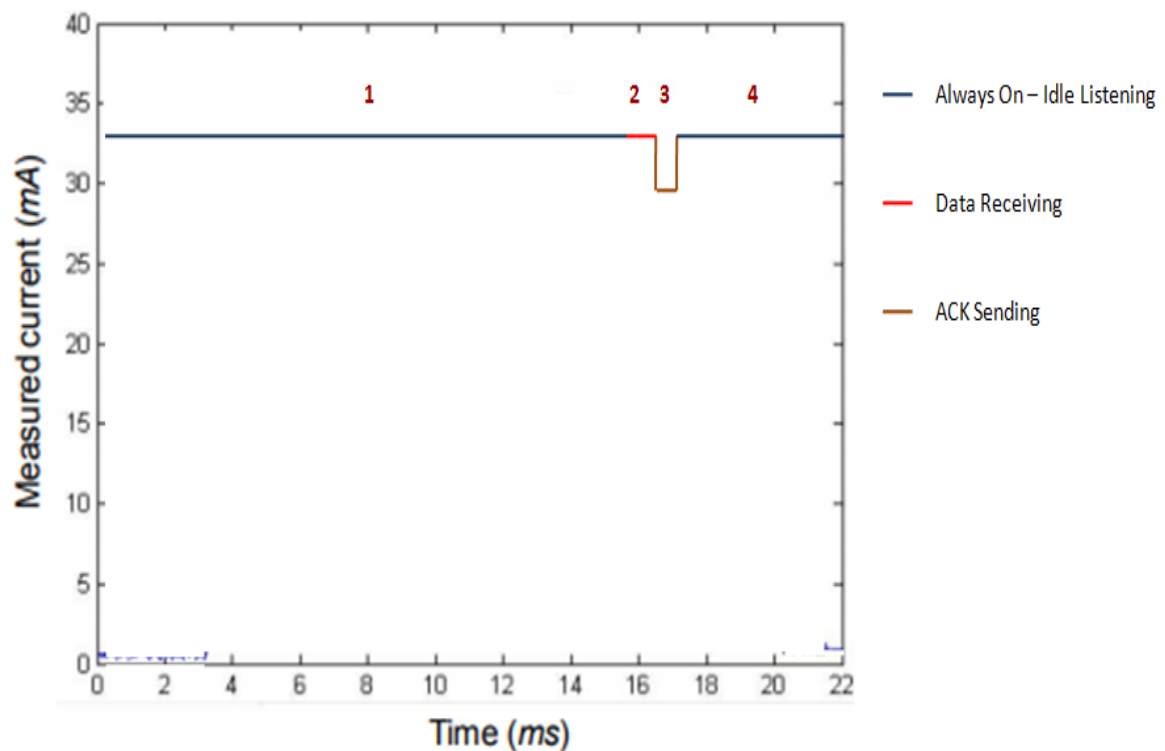
### **5.1.2 Κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή κατά τη διάρκεια μίας λήψης**

Ο συντονιστής του παραπάνω δικτύου, παραμένει μόνιμα ανοιχτός (στάδιο 1), ακούγοντας το κανάλι για εν δυνάμει λήψη πακέτου δεδομένων, καταναλώνοντας μόνιμα **32,5mA** (idle listening mode).

Στο δεύτερο στάδιο ο συντονιστής βρίσκεται σε διαδικασία λήψης του πακέτου το οποίο αποστέλλεται από το end device, καταναλώνοντας επίσης **32,5mA** για διάρκεια **(8\*17byte)/250.000kbps**.

Στο τρίτο στάδιο ο συντονιστής, κατόπιν της επιτυχούς λήψης του πακέτου, αποστέλλει το ACK στο end device και για διάρκεια  $(8*11\text{byte})/250.000\text{kbps}$ , καταναλώνει **30,5mA**.

Στο τέταρτο στάδιο ο συντονιστής, παραμένει εκ νέου μόνιμα ανοιχτός και ακούγοντας το κανάλι, αναμένει μέχρι την επόμενη λήψη πακέτου, καταναλώνοντας μόνιμα **32,5mA**.



**Διάγραμμα 2:** Στάδια και κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή κατά τη διάρκεια μιας λήψης δεδομένων από το end device

#### Stage 1 & 4:

Στο στάδιο 1 και 4 η κατανάλωση ανέρχεται στα 32,5mA για όσο χρονικό διάστημα δεν υπάρχουν δεδομένα προς αποστολή ή λήψη.

#### Stage 2:

$$(Ισχύς) \quad 32,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0325\text{A} * 3\text{V} = 0,0975\text{W}$$

$$(Ενέργεια) \quad 0,0975\text{W} * [17\text{byte}/250.000\text{bps}] = 0,0975\text{W} * (136\text{bit}/250.000\text{bps}) = 0,0975\text{W} * 0,000544\text{sec} = \mathbf{53 \mu\text{J} (Receiving Data)}$$

### Stage 3:

$$(I_{σχύς}) \quad 30,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0305 * 3\text{V} = 0,0915\text{W}$$

$$(E_{ενέργεια}) \quad 0,0915\text{W} * [(11\text{byte})/250.000\text{bps}] = 0,0915\text{W} * [(88\text{bits})/250.000\text{bps}] = 0,0915\text{W} * 0,000352\text{sec} = \underline{\underline{32,2\mu\text{J}}} \text{ (Sending ACK)}$$

Οπότε η κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή, κατά τη διάρκεια λήψης του πακέτου, αποτελεί το άθροισμα των σταδίων 2, 3 και ακολουθεί ως εξής:

$$E_{C_{\text{coordinator}}} = 53\mu\text{J} + 32,2\mu\text{J} = \underline{\underline{85,2\text{Mj}}}$$

Η παραπάνω καταναλισκόμενη ενέργεια, συντελέστηκε κατά τη διάρκεια μιας λήψης από τον συντονιστή και για χρονικό διάστημα ίσο με **0,89ms**

### **5.1.3 Κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή κατά τη διάρκεια μίας λήψης με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης.**

Σε αυτή την περίπτωση, για να υπολογίσουμε την κατανάλωση μιας μετάδοσης από το end device προς τον συντονιστή, χρησιμοποιήσαμε τον δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, όπως αυτός περιγράφεται στην αναφορά [165], στον συντονιστή του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, ορίσαμε ότι ο συντονιστής του δικτύου θα παραμένει σε μια κατάσταση πολύ χαμηλής κατανάλωσης (Low Power Mode), για όσο χρόνο δεν υπάρχουν δεδομένα προς παραλαβή, ενώ ο δέκτης πολύ χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (Wake up Receiver – WuR) θα παραμένει μόνιμα ενεργός, προκειμένου να αντιληφθεί κίνηση δεδομένων και να αφυπνίσει τον κύριο ραδιοπομπό του συντονιστή.

Η κατάσταση πολύ χαμηλής κατανάλωσης, στην οποία βρίσκεται ο μικροελεγκτής (MSP430) του συντονιστή, καθ' όλη τη διάρκεια που θα βρίσκεται σε κατάσταση αναμονής, είναι η LPM3 (standby), με κατανάλωση **1,2μΑ**, τάση λειτουργίας τα **3V** και πολύ γρήγορη αφύπνιση από standby σε active mode σε λιγότερο από **1ms**. [175]. Η κατανάλωση του WuR, ο οποίος θα βρίσκεται μόνιμα ανοιχτός, είναι τα **1,35mA στα 1,2V (operating voltage)**.

Σκοπός της παραπάνω διαδικασίας είναι να έχουμε ανοιχτό έναν δέκτη, ο οποίος καταναλώνει πολύ λιγότερη ενέργεια, σε σχέση με τον κύριο πομποδέκτη (CC2480) του κόμβου.

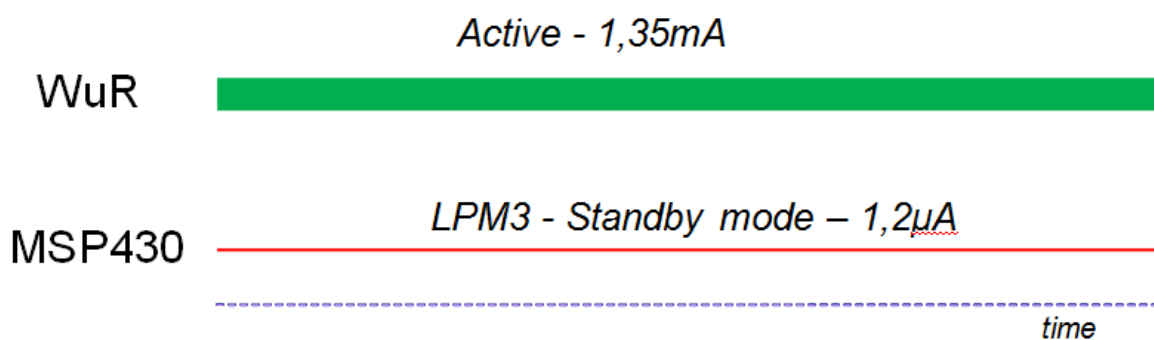
Ξεκινώντας λοιπόν την διαδικασία επικοινωνίας το end device και έχοντας δεδομένα να στείλει, αποστέλλει αρχικά ένα σήμα αφύπνισης (**8 συμβόλων = 32bits**) στον

WuR του συντονιστή με σκοπό να ενεργοποιήσει τον μικροελεγκτή MSP430 (standby → active), ο οποίος με τη σειρά του θα ενεργοποιήσει τον κύριο ραδιοπομπό, για να μπορέσει να παραλάβει τα δεδομένα. Το σήμα αυτό αποστέλλεται από τον κύριο ραδιοπομπό του end device, ο οποίος λειτουργεί στη συχνότητα των **2,4GHz** με ρυθμό μετάδοσης τα **250.000bps**. Η διάρκεια αφύπνισης του MSP430 του συντονιστή, από τη στιγμή που θα ξεκινήσει να στέλνει το end device το σήμα αφύπνισης, έως τη στιγμή αφύπνισης του μικροελεγκτή, είναι τα **50ms**.

Τα πρώτο στάδιο του συντονιστή, αφορά την κατάσταση στην οποία βρίσκεται πριν την έναρξη της επικοινωνίας με το end device. Όπως παρατηρούμε στο παρακάτω σχήμα, ο WuR βρίσκεται μόνιμα ανοιχτός (δεν κλείνει ποτέ), με κατανάλωση **1,35mA**, ενώ παράλληλα ο μικροελεγκτής βρίσκεται σε κατάσταση standby, με κατανάλωση **1,2μA**.

## COORDINATOR

Ez430-RF2480 mote  
MSP430F2274 Microcontroller  
Zigbee Processor CC2480



**Σχήμα 10:** Κατανάλωση συντονιστή σε κατάσταση LPM3 και WuR σε ενεργή κατάσταση

Το δεύτερο στάδιο αφορά τη διάρκεια των **50ms** που χρειάζεται ο WuR του συντονιστή, προκειμένου να αφυπνίσει τον μικροελεγκτή MSP430. Στη διάρκεια αυτή των **50ms**, η κατανάλωση παραμένει ως έχει στο πρώτο στάδιο, τόσο για τον WuR όσο και για τον μικροελεγκτή.

Το τρίτο στάδιο, αμέσως μετά την αφύπνιση του μικροελεγκτή, αφορά τη διάρκεια των **10,2ms** που χρειάζεται ο μικροελεγκτής για να αφυπνίσει τον zigbee επεξεργαστή CC2480, με κατανάλωση **13mA**.

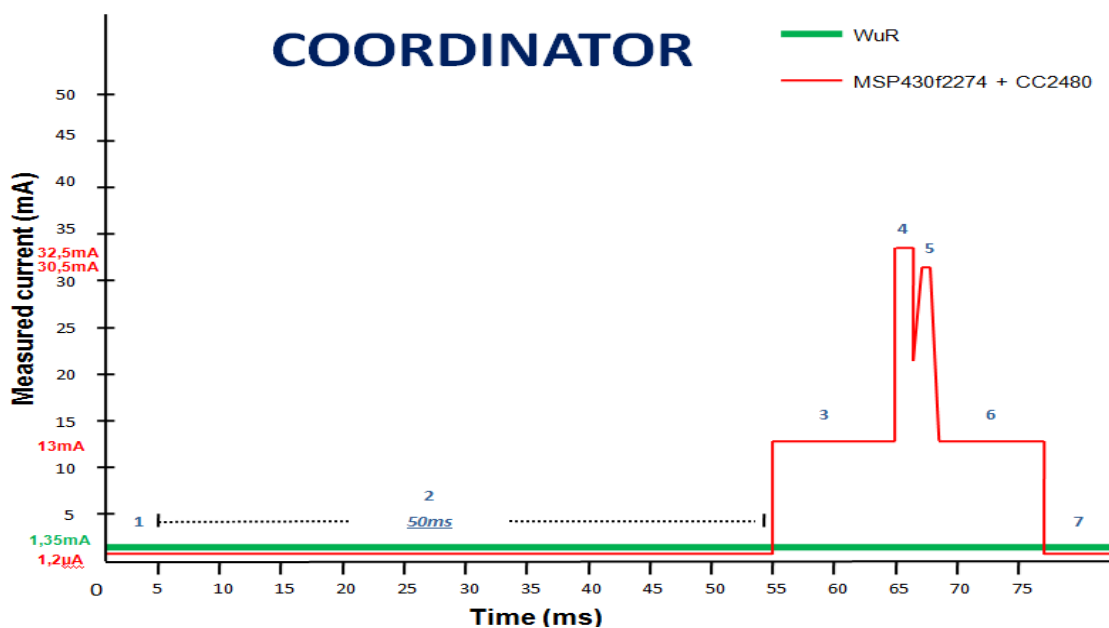
Το τέταρτο στάδιο αφορά την κατάσταση λήψης στην οποία βρίσκεται ο zigbee επεξεργαστής CC2480, προκειμένου να παραλάβει τα δεδομένα από το end device. Ο χρόνος που χρειάζεται για να παραλάβει το πακέτο (17 byte), είναι ίσο με  $(8 \cdot 17 \text{byte}) / 250.000 \text{kbps}$  και αντίστοιχη κατανάλωση τα **32,5mA**.

Στο πέμπτο στάδιο, μετά την επιτυχή παραλαβή του πακέτου, ο zigbee επεξεργαστής του συντονιστή, αλλάζει, από κατάσταση λήψης σε κατάσταση εκπομπής, προκειμένου να αποστείλει την επιβεβαίωση (11byte ACK) στο end device και να του επιβεβαιώσει τη σωστή παραλαβή του πακέτου. Ο χρόνος που χρειάζεται στο στάδιο αυτό είναι ίσος με  $(8 \cdot 11 \text{byte}) / 250.000 \text{kbps}$  και αντίστοιχη κατανάλωση **30,5mA**.

Το έκτο στάδιο, αναφέρεται στη διάρκεια των **9ms**, με κατανάλωση **13mA** που χρειάζεται ο πομποδέκτης να στείλει τα δεδομένα στον μικροελεγκτή και να πέσει σε κατάσταση ύπνου.

Στο έβδομο στάδιο, μετά το πέρας της επικοινωνίας, ο WuR συνεχίζει να παραμένει ανοιχτός και ο μικροελεγκτής σε κατάσταση standby (LPM3), όπως ακριβώς και στο πρώτο στάδιο, με αντίστοιχες καταναλώσεις.

Στο παραπάνω τρίτο, τέταρτο, πέμπτο και έκτο στάδιο, παράλληλα με τις καταναλώσεις που περιγράφονται, λαμβάνουμε υπόψη και την κατανάλωση του WuR, ο οποίος παραμένει ανοιχτός, για τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα.



**Διάγραμμα 3:** Στάδια και κατανάλωση ενέργειας συντονιστή και WuR κατά τη διάρκεια μιας λήψης δεδομένων από το end device

### Stage 1 & 7:

Στο στάδιο 1 και 7 η κατανάλωση του συντονιστή αποτελεί το άθροισμα της κατανάλωσης του WuR (**Active - 1,35mA**) και της κατανάλωσης του MSP430 (**Standby - 1,2μA**), για το χρονικό διάστημα στο οποίο δεν υπάρχουν δεδομένα προς παραλαβή.

### Stage 2:

Το δεύτερο στάδιο αφορά την διάρκεια των **50ms** που χρειάζεται να αφυπνιστεί από το σήμα αφύπνισης,

$$\text{(msp430): (Ισχύς)} \quad 1,2\mu\text{A} * 3\text{V} = 0,0000012\text{A} * 3\text{V} = 0,0000036\text{W}$$

$$\text{(Ενέργεια)} \quad 0,0000036\text{W} * 0,050\text{s} = \mathbf{0,18\mu\text{J}}$$

$$\text{(WuR): (Ισχύς)} \quad 1,35\text{mA} * 1,2\text{V} = 0,00135\text{A} * 1,2\text{V} = 0,00162\text{W}$$

$$\text{(Ενέργεια)} \quad 0,00162\text{W} * 0,050\text{s} = \mathbf{81\mu\text{J}}$$

Σύνολο καταναλισκόμενης ενέργειας 2<sup>ο</sup> σταδίου: **0,18μJ + 81μJ = 81,18μJ**

### Stage 3:

$$\text{(msp430 + cc2480): (Ισχύς)} \quad 13\text{mA} * 3\text{V} = 0,013\text{A} * 3\text{V} = 0,039\text{W}$$

$$\text{(Ενέργεια)} \quad 0,039\text{W} * 0,0102\text{s} = \mathbf{397,8\mu\text{J}}$$

$$\text{(WuR): (Ισχύς)} \quad 1,35\text{mA} * 1,2\text{V} = 0,00135\text{A} * 1,2\text{V} = 0,00162\text{W}$$

$$\text{(Ενέργεια)} \quad 0,00162\text{W} * 0,0102\text{s} = \mathbf{16,5\mu\text{J}}$$

Σύνολο καταναλισκόμενης ενέργειας 3<sup>ο</sup> σταδίου: **397,8μJ + 16,5μJ = 414,3μJ**

### Stage 4:

$$\text{(msp430 + cc2480): (Ισχύς)} \quad 32,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0325\text{A} * 3\text{V} = 0,0975\text{W}$$

$$\text{(Ενέργεια)} \quad 0,0975\text{W} * [17\text{byte}/250.000\text{bps}] = 0,0975\text{W} *$$

$$(136\text{bit}/250.000\text{bps}) = 0,0975\text{W} * 0,000544\text{s} = \mathbf{53\mu\text{J} \text{ (Receiving Data)}}$$

$$\text{(WuR): (Ισχύς)} \quad 1,35\text{mA} * 1,2\text{V} = 0,00135\text{A} * 1,2\text{V} = 0,00162\text{W}$$

$$\text{(Ενέργεια)} \quad 0,00162\text{W} * 0,000544\text{s} = \mathbf{0,88\mu\text{J}}$$

Σύνολο καταναλισκόμενης ενέργειας 4<sup>ο</sup> σταδίου: **53μJ + 0,88μJ = 53,88μJ**

### Stage 5:

$$\text{(msp430 + cc2480): (Ισχύς)} \quad 30,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0305\text{A} * 3\text{V} = 0,0915\text{W}$$

$$\text{(Ενέργεια)} \quad 0,0915\text{W} * [(11\text{byte})/250.000\text{bps}] = 0,0915\text{W} *$$

$$[(88\text{bits})/250.000\text{bps}] = 0,0915\text{W} * 0,000352\text{sec} = \mathbf{32,2\mu\text{J} \text{ (Sending ACK)}}$$



(WuR): (Ισχύς)  $1,35\text{mA} * 1,2\text{V} = 0,00135\text{A} * 1,2\text{V} = 0,00162\text{W}$   
 (Ενέργεια)  $0,00162\text{W} * 0,000352\text{s} = \mathbf{0,57\mu\text{J}}$

Σύνολο καταναλισκόμενης ενέργειας 5<sup>ου</sup> σταδίου:  $32,2\mu\text{J} + 0,57\mu\text{J} = \mathbf{32,77\mu\text{J}}$

Stage 6:

(msp430 + cc2480): (Ισχύς)  $13\text{mA} * 3\text{V} = 0,013\text{A} * 3\text{V} = 0,039\text{W}$   
 (Ενέργεια)  $0,039\text{W} * 0,009\text{s} = \mathbf{351\mu\text{J}}$

(WuR): (Ισχύς)  $1,35\text{mA} * 1,2\text{V} = 0,00135\text{A} * 1,2\text{V} = 0,00162\text{W}$   
 (Ενέργεια)  $0,00162\text{W} * 0,009\text{s} = \mathbf{14,58\mu\text{J}}$

Σύνολο καταναλισκόμενης ενέργειας 6<sup>ου</sup> σταδίου:  $351\mu\text{J} + 14,58\mu\text{J} = \mathbf{365,58\mu\text{J}}$

Οπότε η συνολική κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή, κατά τη διάρκεια λήψης του πακέτου, αποτελεί το άθροισμα των σταδίων 3,4,5,6 και ακολουθεί ως εξής:

$$E_{C_{\text{coordinator}}} = \mathbf{81,18\mu\text{J} + 414,3\mu\text{J} + 53,88\mu\text{J} + 32,77\mu\text{J} + 365,58\mu\text{J} = 947,71\mu\text{J}}$$

Η παραπάνω καταναλισκόμενη ενέργεια, συντελέστηκε κατά τη διάρκεια μιας λήψης από τον συντονιστή και για χρονικό διάστημα ίσο με 70ms.

#### 5.1.4 Κατανάλωση ενέργειας του end device κατά τη διάρκεια μίας μετάδοσης με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης στην πλευρά του συντονιστή.

Από την πλευρά του το end device, βρίσκεται σε μια κατάσταση duty cycling. Δειγματοληπτεί δηλαδή ανά τακτά χρονικά διαστήματα (ανάλογα την εφαρμογή) και στέλνει τα δεδομένα στον συντονιστή. Όταν έχει δεδομένα να αποστείλει στον συντονιστή, στέλνει αρχικά ένα σήμα αφύπνισης, στον δέκτη χαμηλής του συντονιστή, με σκοπό αυτός να αφυπνίσει τον κύριο ραδιοπομπό του, για να παραλάβει τα δεδομένα. Το μέγεθος του σήματος αφύπνισης είναι της τάξης των **8 συμβόλων = 32bit (4bit/symbol)**, με ρυθμό μετάδοσης τα **250kbps στα 2,4GHz**, ενώ ο χρόνος που χρειάζεται η αφύπνιση του μικροελεγκτή είναι τα **50ms**.

Τα στάδια 1 και 12, αφορούν την κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης (LPM3 – standby) του end device, όταν δεν υπάρχουν δεδομένα προς αποστολή. Η κατανάλωση ανέρχεται στα **1,2μΑ**.

Τα επόμενα στάδια (2,3,4) αναφέρονται στον χρόνο των **10,2ms** που χρειάζεται η ενεργοποίηση του zigbee επεξεργαστή CC2480, με αντίστοιχη κατανάλωση **13mA**.

Το πέμπτο στάδιο αναφέρεται στον χρόνο των **1,6ms** που χρειάζεται ο ραδιοπομπός να ελέγξει το κανάλι για να διαπιστώσει αν είναι ελεύθερο, με αντίστοιχη κατανάλωση **32,5mA**.

Το έκτο στάδιο αναφέρεται στον χρόνο των **(32bit) / 250.000bps**, που χρειάζεται το end device να στείλει το σήμα αφύπνισης, με αντίστοιχη κατανάλωση **30,5mA**.

Στο επόμενο στάδιο ο κύριος ραδιοπομπός του end device θα πρέπει να περιμένει **50ms** προκειμένου να αφυπνίσει ο συντονιστής τον μικροελεγκτή συν **10,2ms** που χρειάζεται ο μικροελεγκτής να αφυπνίσει τον CC2480.

Στην περίπτωση που αφήσουμε ανοιχτό τον ραδιοπομπό του end device για το διάστημα αυτό, θα τον επιβαρύνουμε με κατανάλωση της τάξης των **30,5mA** (σε περίπτωση που παραμένει σε κατάσταση TX) ή των **32,5mA** (σε περίπτωση που παραμένει σε κατάσταση RX) για διάστημα περίπου **60,2ms**. Στην περίπτωση που αποφασίσουμε να κλείσουμε και να ξανά ανοίξουμε τον ραδιοπομπό στο διάστημα αυτό, θα τον επιβαρύνουμε με κατανάλωση **13mA** για **9ms** (χρόνο που χρειάζεται να κλείσει) συν την κατανάλωση των **13mA** για **10,2ms** (χρόνο που χρειάζεται να ενεργοποιηθεί). Διαβάζοντας λοιπόν τα datasheet του CC2480 [176], διαπιστώσαμε ότι συγκεκριμένος ραδιοπομπός, όταν λειτουργεί σαν end device, έχει τη δυνατότητα να μπει αυτόματα, σε μια κατάσταση χαμηλής ισχύος, στα κενά διαστήματα, με πολύ μικρή κατανάλωση της τάξης των **<0,5μΑ** και άμεσο χρόνο αφύπνισης της τάξης των **120μs** (από PM2 & PM3 → σε PM0).

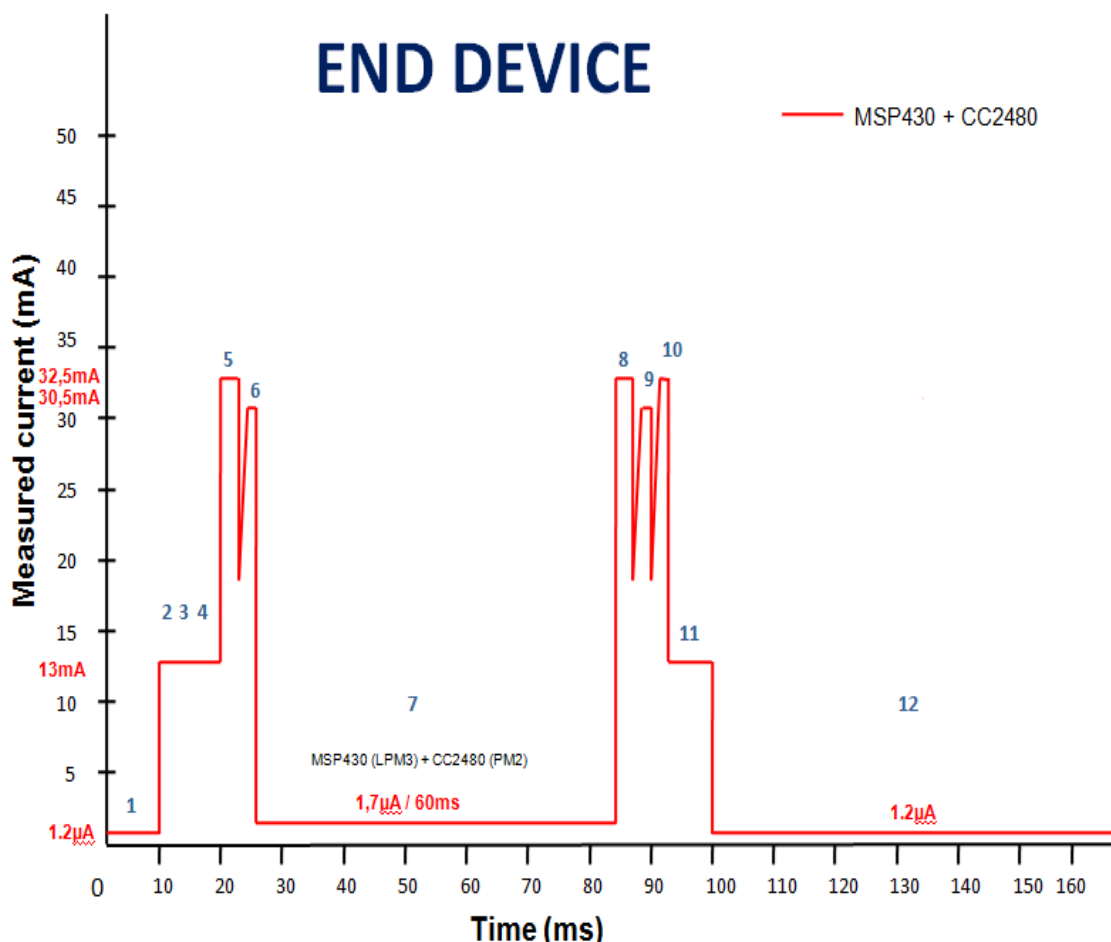
Στο έβδομο στάδιο λοιπόν, ο ραδιοπομπός του end device μπαίνει σε μια κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης και πιο συγκεκριμένα στην PM2, με κατανάλωση τα **0,5μΑ** για διάστημα **60,2ms**. Παράλληλα, θέτουμε και τον μικροελεγκτή του end device (MSP430) σε κατάσταση LPM3 (standby), με κατανάλωση τα **1,2μΑ** (average current in 3V<sub>CC</sub>) και γρήγορη αφύπνιση της τάξης του **1ms**. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνουμε να ελαχιστοποιήσουμε την επιβάρυνση στην κατανάλωση του end device, για τη διάρκεια των **60ms**.

Το όγδοο στάδιο, αναφέρεται στον χρόνο του **1,6ms** που χρειάζεται ο ραδιοπομπός του end device, να ελέγξει το κανάλι για να διαπιστώσει αν είναι ελεύθερο, με αντίστοιχη κατανάλωση τα **32,5mA**.

Το ένατο στάδιο αναφέρεται στον χρόνο των **(8 x n) / 250.000** (όπου n το μέγεθος σε byte, των δεδομένων μαζί με το υπόλοιπο data frame), που χρειάζεται το end device να στείλει το πακέτο, με αντίστοιχη κατανάλωση **30,5mA**.

Στο δέκατο στάδιο, ο πομποδέκτης αλλάζει την κατάστασή του σε αναμονή λήψης, περιμένοντας την **11-byte** επιβεβαίωση (**ACK**). Η διάρκεια αναμονής είναι τα **1ms** (όπως και στην πρώτη περίπτωση) με αντίστοιχη κατανάλωση τα **32,5mA**.

Στο ενδέκατο και τελευταίο στάδιο, ο πομποδέκτης χρειάζεται **9ms** να στείλει τα δεδομένα στον μικροελεγκτή, με αντίστοιχη κατανάλωση τα **13mA** και στη συνέχεια πέφτει σε κατάσταση ύπνωσης.



**Διάγραμμα 4:** Στάδια και κατανάλωση ενέργειας του End Device κατά τη διάρκεια μιας εκπομπής δεδομένων προς το συντονιστή ο οποίος χρησιμοποιεί δέκτη χαμηλής κατανάλωσης

Stage 1 & 12:

Στα στάδια 1 και 12 η κατανάλωση του end device βρίσκεται στα 1,2μΑ.

Stage 2,3,4:

(Ισχύς)  $13\text{mA} * 3\text{V} = 0,013\text{A} * 3\text{V} = 0,039\text{W}$

(Ενέργεια)  $0,039\text{W} * 0,0102\text{s} = \mathbf{397,8\mu\text{J}}$

Stage 5:

(Ισχύς)  $32,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0325\text{A} * 3\text{V} = 0,0975\text{W}$

(Ενέργεια)  $0,0975\text{A} * 0,0016\text{s} = \mathbf{156\mu\text{J}}$

Stage 6:

(Ισχύς)  $30,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0305\text{A} * 3\text{V} = 0,0915\text{W}$

(Ενέργεια)  $0,0915\text{W} * (32\text{bit}/250\text{kbps}) = 0,0915\text{W} * (32\text{bit}/250.000\text{bps}) = 0,0915\text{W} * 0,000128\text{sec} = \mathbf{11,7\mu\text{J}}$

Stage 7:

**MSP430 (LPM3) + CC2480 (PM2)**

(Ισχύς)  $1,2\mu\text{A} + 0,5\mu\text{A} = 1,7\mu\text{A} * 3\text{V} = 0,0000017\text{A} * 3\text{V} = 0,0000051\text{W}$

(Ενέργεια)  $0,0000051\text{W} * 60,2\text{ms} = 0,0000051\text{A} * 0,0602\text{s} = \mathbf{0,3\mu\text{J}}$

Stage 8:

(Ισχύς)  $32,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0325\text{A} * 3\text{V} = 0,0975\text{W}$

(Ενέργεια)  $0,0975\text{A} * 0,0016\text{s} = \mathbf{156\mu\text{J}}$

Stage 9:

(Ισχύς)  $30,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0305\text{A} * 3\text{V} = 0,0915\text{W}$

(Ενέργεια)  $0,0915\text{W} * [(17\text{byte})/250\text{kbps}] = 0,0915\text{W} * (136\text{bit}/250.000\text{bps}) = 0,0915\text{W} * 0,000544\text{sec} = 0,0915\text{W} * 0,000544\text{s} = \mathbf{49,77\mu\text{J}}$

Stage 10a:

(Ισχύς)  $2,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0325\text{A} * 3\text{V} = 0,0975\text{W}$

(Ενέργεια)  $0,0975\text{W} * 0,001\text{s} = \mathbf{97,5\mu\text{J}}$  (waiting for ACK reception)

#### Stage 10b:

$$(Ισχύς) \quad 32,5\text{mA} * 3\text{V} = 0,0325\text{A} * 3\text{V} = 0,0975\text{W}$$

$$(Ενέργεια) \quad 0,0975\text{W} * [(11\text{byte})/250000\text{bps}] = 0,0975\text{W} * [(88\text{bit})/250000\text{bps}] = 0,0975\text{W} * 0,000352\text{sec} = \mathbf{34,32\mu\text{J}} \text{ (receiving ACK)}$$

#### Stage 11:

$$(Ισχύς) \quad 13\text{mA} * 3\text{V} = 0.013\text{A} * 3\text{V} = 0,039\text{W}$$

$$(Ενέργεια) \quad 0,039\text{W} * 0,009\text{s} = \mathbf{351\mu\text{J}}$$

Οπότε η συνολική κατανάλωση ενέργειας του end device, κατά τη διάρκεια αποστολής του πακέτου, αποτελεί το άθροισμα των σταδίων 2 έως 11 και ακολουθεί ως εξής:

$$E_{C_{\text{end\_device}}} = \mathbf{397,8\mu\text{J} + 156\mu\text{J} + 11,7\mu\text{J} + 0,3\mu\text{J} + 156\mu\text{J} + 49,77\mu\text{J} + 97,5\mu\text{J} + 34,32\mu\text{J} + 351\mu\text{J} = \underline{\mathbf{1.254\mu\text{J} \text{ ή } 1,25\text{mJ}}}$$

Η παραπάνω καταναλισκόμενη ενέργεια, συντελέστηκε κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης από το end device προς το συντονιστή και για χρονικό διάστημα ίσο με **84,6ms**

### **5.1.5 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του συντονιστή για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας**

Έχοντας λοιπόν υπολογίσει την κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή και του end device, κατά τη διάρκεια μίας λήψης/εκπομπής, καθώς και τη χρονική περίοδο της κατανάλωσης αυτής, τόσο με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης όσο και χωρίς τη χρήση του, στη συνέχεια υπολογίζουμε την κατανάλωση της ενέργειας αυτής, για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας. Οι ρυθμοί αυτοί αφορούν δειγματοληψία κάθε **100ms, 1s, 60s, 600s** και ο υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας αφορά τη **διάρκεια μίας ημέρας**.

Ακολουθεί ο υπολογισμός της κατανάλωσης ενέργειας του συντονιστή, για μία ημέρα, χωρίς τη χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης.

Regular zigbee Communication (no WuR)

**Coordinator energy consumption**

Για λήψη πακέτου κάθε **100ms, 1s, 60s, 600s** και για χρονική διάρκεια **86.400sec** (1 ημέρα), **ο αριθμός των λήψεων** είναι ίσος με:

<b><u>100ms:</u></b>	86.400.000ms / 100ms	= <b>864.000</b> λήψεις / αποστολές
<b><u>1.000ms:</u></b>	86.400.000ms / 1000ms	= <b>86.400</b> λήψεις / αποστολές
<b><u>60.000ms:</u></b>	86.400.000ms / 60.000ms	= <b>1.440</b> λήψεις / αποστολές
<b><u>600.000ms:</u></b>	86.400.000ms / 600.000ms	= <b>144</b> λήψεις / αποστολές

Η κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή, **κατά τη διάρκεια μιας λήψης**, είναι τα **85,2μJ** η οποία συντελείται σε διάστημα **0,89ms**.

Επομένως η **συνολική κατανάλωση** ενέργειας του συντονιστή, **για το σύνολο των λήψεων** σε μια ημέρα είναι αντίστοιχα:

<b><u>Για 864.000 λήψεις:</u></b>	$864.000 * 85,2\mu\text{J} = 73.612.800\mu\text{J} = \mathbf{73,61J}$	(α1)
<b><u>Για 86.400 λήψεις:</u></b>	$86.400 * 85,2\mu\text{J} = 7.361.280\mu\text{J} = \mathbf{7,36J}$	(α2)
<b><u>Για 1.440 λήψεις:</u></b>	$1.440 * 85,2\mu\text{J} = 123.120\mu\text{J} = \mathbf{0,12J}$	(α3)
<b><u>Για 144 λήψεις:</u></b>	$144 * 85,2\mu\text{J} = 12.269\mu\text{J} = \mathbf{0,012J}$	(α4)

Η **διάρκεια της κατανάλωσης** για κάθε αριθμό λήψεων είναι:

<b><u>Για 864.000 λήψεις:</u></b>	$864.000 * 0,89\text{ms} = 768.960\text{ms} = \mathbf{768,96s}$
<b><u>Για 86.400 λήψεις:</u></b>	$86.400 * 0,89\text{ms} = 76.896\text{ms} = \mathbf{76,89s}$
<b><u>Για 1.440 λήψεις:</u></b>	$1.440 * 0,89\text{ms} = 1.281,6\text{ms} = \mathbf{1,28s}$
<b><u>Για 144 λήψεις:</u></b>	$144 * 0,89\text{ms} = 128,16\text{ms} = \mathbf{0,128s}$

Η **διάρκεια της κατανάλωσης** ενέργειας του συντονιστή, **όταν δεν υπάρχει λήψη** (On and Idle Listening mode) είναι:

**Για 864.000 λήψεις:**  $86.400\text{s} - 768.96\text{s} = \mathbf{85.631\text{s}}$

**Για 86.400 λήψεις:**  $86.400s - 76,89s = 86.323s$

**Για 1.440 λήψεις:**  $86.400s - 1,28s = 86.398s$

**Για 144 λήψεις:**  $86.400s - 0,128s = 86.399s$

Η ισχύς του συντονιστή, είναι:

$$32,5mA * 3V = 0,0325A * 3V = 0,0975W$$

Η **συνολική κατανάλωση** ενέργειας του συντονιστή, **όταν δεν υπάρχει λήψη** (On and Idle Listening mode), σε μία ημέρα είναι:

**Για 864.000 λήψεις:**  $85.631s * 0,0975W = 8.349J$  (β1)

**Για 86.400 λήψεις:**  $86.323s * 0,0975W = 8.416,5J$  (β2)

**Για 1.440 λήψεις:**  $86.398s * 0,0975W = 8.423,8J$  (β3)

**Για 144 λήψεις:**  $86.399s * 0,0975W = 8.423,9J$  (β4)

Η **συνολική κατανάλωση** ενέργειας του συντονιστή, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, αντίστοιχα είναι:

**Για 100ms:**  $\alpha(1) + \beta(1) = 73,61J + 8.349J = 8.422,61 \text{ Joule}$

**Για 1.000ms:**  $\alpha(2) + \beta(2) = 7,36J + 8.416,5J = 8.423,86 \text{ Joule}$

**Για 60.000ms:**  $\alpha(3) + \beta(3) = 0,12J + 8.423,8J = 8.423,92 \text{ Joule}$

**Για 600.000ms:**  $\alpha(4) + \beta(4) = 0,012J + 8.423,9J = 8.423,91 \text{ Joule}$

Coordinator without WuR (regular zigbee communication)				
Ρυθμός λήψης	Αριθμός πακέτων	Κατανάλωση ενέργειας για το σύνολο των λήψεων μίας ημέρας	Συνολική κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση idle listening, σε μία ημέρα	Συνολική κατανάλωση ενέργειας συντονιστή σε μία ημέρα
100ms	1	73,61J	8.349J	8.422,61J
1.000ms	1	7,36J	8.416,5J	8.423,86J
60.000ms	1	0,12J	8.423,8J	8.423,92J
600.000ms	1	0,012J	8.423,9J	8.423,91J

**Πίνακας 4:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας Συντονιστή χωρίς τη χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, σε μία ημέρα

### 5.1.6 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του συντονιστή με χρήση WuR για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας

Ομοίως, ακολουθεί ο υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του συντονιστή, με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, για ρυθμούς δειγματοληψίας κάθε 100ms, 1s, 60s και 600s.

WuR over Zigbee Communication

#### Coordinator energy consumption

Η κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή με χρήση WuR, κατά τη διάρκεια μιας λήψης, είναι τα 947,71μJ η οποία συντελείται σε διάστημα 70ms.

Επομένως η συνολική κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή, για το σύνολο των λήψεων σε μια ημέρα είναι αντίστοιχα:

$$\text{Για } \underline{\mathbf{864.000}} \text{ λήψεις: } 864.000 * 947,71\mu\text{J} = 818.821.440\mu\text{J} = \mathbf{818,82J} \quad (\alpha 1)$$

$$\text{Για } \underline{\mathbf{86.400}} \text{ λήψεις: } 86.400 * 947,71\mu\text{J} = 81.882.144\mu\text{J} = \mathbf{81,88J} \quad (\alpha 2)$$

$$\text{Για } \underline{\mathbf{1.440}} \text{ λήψεις: } 1.440 * 947,71\mu\text{J} = 1.364.702\mu\text{J} = \mathbf{1,36J} \quad (\alpha 3)$$

$$\text{Για } \underline{\mathbf{144}} \text{ λήψεις: } 144 * 947,71\mu\text{J} = 136.470,24\mu\text{J} = \mathbf{0,136J} \quad (\alpha 4)$$

Η διάρκεια της κατανάλωσης για κάθε αριθμό λήψεων είναι:

$$\text{Για } \underline{\mathbf{864.000}} \text{ λήψεις: } 864.000 * 70\text{ms} = 60.480.000\text{ms} = \mathbf{60.480s}$$

$$\text{Για } \underline{\mathbf{86.400}} \text{ λήψεις: } 86.400 * 70\text{ms} = 6.048.000\text{ms} = \mathbf{6.048s}$$

$$\text{Για } \underline{\mathbf{1.440}} \text{ λήψεις: } 1.440 * 70\text{ms} = 100.800\text{ms} = \mathbf{100.8s}$$

$$\text{Για } \underline{\mathbf{144}} \text{ λήψεις: } 144 * 70\text{ms} = 10.080\text{ms} = \mathbf{10s}$$

Η διάρκεια της κατανάλωσης ενέργειας του συντονιστή, όταν δεν υπάρχει επικοινωνία (MSP430 standby + Wur On) είναι:

$$\text{Για } \underline{\mathbf{864.000}} \text{ λήψεις: } 86.400\text{s} - 60.480\text{s} = \mathbf{25.920s}$$

$$\text{Για } \underline{\mathbf{86.400}} \text{ λήψεις: } 86.400\text{s} - 6.048\text{s} = \mathbf{80.352s}$$

$$\text{Για } \underline{\mathbf{1.440}} \text{ λήψεις: } 86.400\text{s} - 100.8\text{s} = \mathbf{86.299,2s}$$

$$\text{Για } \underline{\mathbf{144}} \text{ λήψεις: } 86.400\text{s} - 10\text{s} = \mathbf{86.390s}$$



Η ισχύς του συντονιστή, όταν δεν υπάρχει λήψη είναι:

$$\text{MSP430: } \underline{0,0000036\text{W}} \quad (\text{LPM3 – Standby})$$

$$\text{WuR: } \underline{0,00162\text{W}} \quad (\text{On})$$

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή, όταν δεν υπάρχει λήψη, για μία ημέρα είναι:

Για 864.000 λήψεις:

$$\text{MSP430: } 25.920\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,09\text{J}}$$

$$\text{WuR: } 25.920\text{s} * 0,00162\text{W} = \mathbf{41,99\text{J}}$$

$$\text{MSP430} + \text{WuR} = 0,09\text{J} + 41,99\text{J} = \mathbf{42,08\text{J}} \quad (\beta 1)$$

Για 86.400 λήψεις:

$$\text{MSP430: } 80.352\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,29\text{J}}$$

$$\text{WuR: } 80.352\text{s} * 0,00162\text{W} = \mathbf{130,17\text{J}}$$

$$\text{MSP430} + \text{WuR} = 0,09\text{J} + 130,17\text{J} = \mathbf{130,46\text{J}} \quad (\beta 2)$$

Για 1.440 λήψεις:

$$\text{MSP430: } 86.299,2\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,31\text{J}}$$

$$\text{WuR: } 86.299,2\text{s} * 0,00162\text{W} = \mathbf{139,8\text{J}}$$

$$\text{MSP430} + \text{WuR} = 0,31\text{J} + 139,8\text{J} = \mathbf{140,11\text{J}} \quad (\beta 3)$$

Για 144 λήψεις:

$$\text{MSP430: } 86.390\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,31\text{J}}$$

$$\text{WuR: } 86.390\text{s} * 0,00162\text{W} = \mathbf{139,95\text{J}}$$

$$\text{MSP430} + \text{WuR} = 0,31\text{J} + 139,95\text{J} = \mathbf{140,26\text{J}} \quad (\beta 4)$$

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή (με χρήση WuR), κατά τη διάρκεια μίας ημέρας, αντίστοιχα είναι:

$$\underline{\text{Για 100ms:}} \quad \alpha(1) + \beta(1) = \mathbf{818,82\text{J}} + \mathbf{42,08\text{J}} = \underline{\mathbf{860,9\text{Joule}}}$$

$$\underline{\text{Για 1.000ms:}} \quad \alpha(2) + \beta(2) = \mathbf{81,88\text{J}} + \mathbf{130,46\text{J}} = \underline{\mathbf{212,34\text{Joule}}}$$

$$\underline{\text{Για 60.000ms:}} \quad \alpha(3) + \beta(3) = \mathbf{1,36\text{J}} + \mathbf{140,11\text{J}} = \underline{\mathbf{141,47\text{Joule}}}$$

**Για 600.000ms:**  $\alpha(4) + \beta(4) = 0,136J + 140,26J = \underline{140,39Joule}$

Coordinator with WuR				
Ρυθμός λήψης	Αριθμός πακέτων	Κατανάλωση ενέργειας για το σύνολο των λήψεων μίας ημέρας	Συνολική κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση idle listening, σε μία ημέρα	Συνολική κατανάλωση ενέργειας συντονιστή σε μία ημέρα
100ms	1	818,82J	42,08J	860,9J
1.000ms	1	81,18J	130,46J	212,34J
60.000ms	1	1,36J	140,11J	141,47J
600.000ms	1	0,136J	140,26J	140,39J

**Πίνακας 5:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας Συντονιστή με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, σε μία ημέρα

### 5.1.7 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του end device για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας

Ομοίως, ακολουθεί ο υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του end device, για ρυθμούς δειγματοληψίας κάθε 100ms, 1s, 60s και 600s.

Regular zigbee Communication (no WuR)

#### End Device energy consumption

Η κατανάλωση ενέργειας του end device, κατά τη διάρκεια μιας αποστολής, είναι τα **1.086,39μJ** η οποία συντελείται σε διάστημα **22,7ms**.

Επομένως η συνολική κατανάλωση ενέργειας του end device, για το σύνολο των αποστολών σε μια ημέρα είναι αντίστοιχα:

**Για 864.000 αποστολές:**  $864.000 * 1.086,39\mu J = 938.640.960\mu J = \mathbf{938,64J}$  ( $\alpha_1$ )

**Για 86.400 αποστολές:**  $86.400 * 1.086,39\mu J = 93.864.096\mu J = \mathbf{93,86J}$  ( $\alpha_2$ )

**Για 1.440 αποστολές:**  $1.440 * 1.086,39\mu J = 1.564.401,6\mu J = \mathbf{1,56J}$  ( $\alpha_3$ )

**Για 144 αποστολές:**  $144 * 1.086,39\mu J = 156.440,16\mu J = \mathbf{0,156J}$  ( $\alpha_4$ )

Η διάρκεια της κατανάλωσης για κάθε αριθμό αποστολών είναι:

**Για 864.000 αποστολές:**  $864.000 * 22,7\text{ms} = 19.612.800\text{ms} = \mathbf{19.612,8s}$

**Για 86.400 αποστολές:**  $86.400 * 22,7\text{ms} = 1.961.280\text{ms} = \mathbf{1.961,28s}$

**Για 1.440 αποστολές:**  $1.440 * 22,7\text{ms} = 32.688\text{ms} = \mathbf{32,69s}$

**Για 144 αποστολές:**  $144 * 22,7\text{ms} = 3.268,8\text{ms} = \mathbf{3,27s}$

Η **διάρκεια της κατανάλωσης** ενέργειας του end device, **όταν δεν υπάρχει αποστολή** (standby – LPM3) είναι:

**Για 864.000 αποστολές:**  $86.400\text{s} - 19.612,8\text{s} = \mathbf{66.787,2s}$

**Για 86.400 αποστολές:**  $86.400\text{s} - 1.961,28\text{s} = \mathbf{84.438,72s}$

**Για 1.440 αποστολές:**  $86.400\text{s} - 32,69\text{s} = \mathbf{86.367,31s}$

**Για 144 αποστολές:**  $86.400\text{s} - 3,27\text{s} = \mathbf{86.396,73s}$

Η ισχύς του end device, όταν δεν υπάρχει αποστολή (LPM3), είναι:

$$1,2\mu\text{A} * 3\text{V} = 0,0000012\text{A} * 3\text{V} = \mathbf{0,0000036\text{W}}$$

Η **συνολική κατανάλωση** ενέργειας του end device, **όταν δεν υπάρχει αποστολή** (Standby – LPM3)), σε μία ημέρα είναι:

**Για 864.000 αποστολές:**  $66.787,2\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,24\text{J}}$  (β1)

**Για 86.400 αποστολές:**  $84.438,72\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,30\text{J}}$  (β2)

**Για 1.440 αποστολές :**  $86.367,31\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,31\text{J}}$  (β3)

**Για 144 αποστολές:**  $86.396,73\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,31\text{J}}$  (β4)

Η **συνολική κατανάλωση** ενέργειας του end device, κατά τη **διάρκεια μίας ημέρας**, αντίστοιχα είναι:

**Για 100ms:**  $\alpha(1) + \beta(1) = 938,64\text{J} + 0,24\text{J} = \mathbf{938,88\text{ Joule}}$

**Για 1.000ms:**  $\alpha(2) + \beta(2) = 93,86\text{J} + 0,30\text{J} = \mathbf{94,16\text{ Joule}}$

**Για 60.000ms:**  $\alpha(3) + \beta(3) = 1,56\text{J} + 0,31\text{J} = \mathbf{1,87\text{ Joule}}$

**Για 600.000ms:**  $\alpha(4) + \beta(4) = 0,156\text{J} + 0,31\text{J} = \mathbf{0,46\text{ Joule}}$

End Device without WuR (Regular Zigbee Communication)				
Ρυθμός μετάδοσης	Αριθμός πακέτων	Κατανάλωση ενέργειας για το σύνολο των αποστολών μίας ημέρας	Συνολική κατανάλωση ενέργειας όταν δεν υπάρχει αποστολή, σε μία ημέρα	Συνολική κατανάλωση ενέργειας End Device σε μία ημέρα
100ms	1	938,64J	0,24J	938,88J
1.000ms	1	93,86J	0,30J	94,16J
60.000ms	1	1,56J	0,31J	1,87J
600.000ms	1	0,156J	0,31J	0,46J

**Πίνακας 6:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας End Device χωρίς τη χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης στην πλευρά του συντονιστή, σε μία ημέρα

### 5.1.8 Υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του end device για διαφορετικούς ρυθμούς δειγματοληψίας

Ομοίως, ακολουθεί ο υπολογισμός κατανάλωσης ενέργειας του end device, με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης στην πλευρά του συντονιστή, για ρυθμούς δειγματοληψίας κάθε 100ms, 1s, 60s και 600s.

#### WuR over Zigbee Communication

#### End Device energy consumption

Η κατανάλωση ενέργειας του end device, κατά τη διάρκεια μιας αποστολής, είναι τα **1.254μJ** η οποία συντελείται σε διάστημα **84,6ms**.

Επομένως η συνολική κατανάλωση ενέργειας του end device, για το σύνολο των αποστολών σε μια ημέρα είναι αντίστοιχα:

$$\text{Για 864.000 αποστολές: } 864.000 * 1.254\mu\text{J} = 1.083.456.000\mu\text{J} = \mathbf{1.083,45J} \quad (\alpha 1)$$

$$\text{Για 86.400 αποστολές: } 86.400 * 1.254\mu\text{J} = 108.345.600\mu\text{J} = \mathbf{108,34J} \quad (\alpha 2)$$

$$\text{Για 1.440 αποστολές: } 1.440 * 1.254\mu\text{J} = 1.805.760\mu\text{J} = \mathbf{1,8J} \quad (\alpha 3)$$

$$\text{Για 144 αποστολές: } 144 * 1.254\mu\text{J} = 180.576\mu\text{J} = \mathbf{0,18J} \quad (\alpha 4)$$

Η διάρκεια της κατανάλωσης για κάθε αριθμό αποστολών είναι:

$$\text{Για 864.000 αποστολές: } 864.000 * 84,6\text{ms} = 73.094.400\text{ms} = \mathbf{73.094,4s}$$

**Για 86.400 αποστολές:**  $86.400 * 84,6\text{ms} = 7.309.440\text{ms} = \mathbf{7.309,44\text{s}}$

**Για 1.440 αποστολές:**  $1.440 * 84,6\text{ms} = 121.824\text{ms} = \mathbf{121,82\text{s}}$

**Για 144 αποστολές:**  $144 * 84,6\text{ms} = 12.182,4\text{ms} = \mathbf{12,18\text{s}}$

Η **διάρκεια της κατανάλωσης** ενέργειας του end device, **όταν δεν υπάρχει αποστολή** είναι:

**Για 864.000 αποστολές:**  $86.400\text{s} - 73.094,4\text{s} = \mathbf{13.305,6\text{s}}$

**Για 86.400 αποστολές:**  $86.400\text{s} - 7.309,44\text{s} = \mathbf{79.090,56\text{s}}$

**Για 1.440 αποστολές:**  $86.400\text{s} - 121,82\text{s} = \mathbf{86.278,18\text{s}}$

**Για 144 αποστολές:**  $86.400\text{s} - 12,18\text{s} = \mathbf{86.387,82\text{s}}$

Η ισχύς του end device, όταν δεν υπάρχει αποστολή (LPM3), είναι:

$$1,2\mu\text{A} * 3\text{V} = 0,0000012\text{A} * 3\text{V} = \mathbf{0,0000036\text{W}}$$

Η **συνολική κατανάλωση** ενέργειας του end device, **όταν δεν υπάρχει αποστολή** (Standby – LPM3), σε μία ημέρα είναι:

**Για 864.000 αποστολές:**  $13.305,6\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,04\text{J}}$  (β1)

**Για 86.400 αποστολές:**  $79.090,56\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,28\text{J}}$  (β2)

**Για 1.440 αποστολές:**  $86.278,18\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,31\text{J}}$  (β3)

**Για 144 αποστολές:**  $86.387,82\text{s} * 0,0000036\text{W} = \mathbf{0,31\text{J}}$  (β4)

Η **συνολική κατανάλωση** ενέργειας του end device, κατά τη **διάρκεια μίας ημέρας**, αντίστοιχα είναι:

**Για 100ms:**  $\alpha(1) + \beta(1) = 1.083,45\text{J} + 0,04\text{J} = \mathbf{1,083,49\text{ Joule}}$

**Για 1.000ms:**  $\alpha(2) + \beta(2) = 108,34\text{J} + 0,28\text{J} = \mathbf{108,62\text{ Joule}}$

**Για 60.000ms:**  $\alpha(3) + \beta(3) = 1,8\text{J} + 0,31\text{J} = \mathbf{2,11\text{ Joule}}$

**Για 600.000ms:**  $\alpha(4) + \beta(4) = 0,18\text{J} + 0,31\text{J} = \mathbf{0,49\text{ Joule}}$

End Device with WuR				
Ρυθμός μετάδοσης	Αριθμός πακέτων	Κατανάλωση ενέργειας για το σύνολο των αποστολών μίας ημέρας	Συνολική κατανάλωση ενέργειας όταν δεν υπάρχει αποστολή, σε μία ημέρα	Συνολική κατανάλωση ενέργειας End Device σε μία ημέρα
100ms	1	1.083,45J	0,04J	1.083,49J
1.000ms	1	108,34J	0,28J	108,62J
60.000ms	1	1,8J	0,31J	2,11J
600.000ms	1	0,18J	0,31J	0,49J

**Πίνακας 7:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κατανάλωσης ενέργειας End Device με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης στην πλευρά του συντονιστή, σε μία ημέρα.

	COORDINATOR		END DEVICE	
ΛΗΨΗ ΚΑΘΕ	Σύνολο κατανάλωσης ενέργειας σε μία ημέρα (no WuR)	Σύνολο κατανάλωσης ενέργειας σε μία ημέρα με χρήση WuR	Σύνολο κατανάλωσης ενέργειας σε μία ημέρα (no WuR)	Σύνολο κατανάλωσης ενέργειας σε μία ημέρα με χρήση WuR
100ms	<b>8.422,61 Joule</b>	<b>860,9 Joule</b>	<b>938.88 Joule</b>	<b>1.083,49 Joule</b>
1000ms	<b>8.423,86 Joule</b>	<b>212,34 Joule</b>	<b>94.16 Joule</b>	<b>108,62 Joule</b>
60.000ms	<b>8.423.92 Joule</b>	<b>141,47 Joule</b>	<b>1.87 Joule</b>	<b>2,11 Joule</b>
600.000ms	<b>8.423,92 Joule</b>	<b>140,39 Joule</b>	<b>0.46 Joule</b>	<b>0.49 Joule</b>

**Πίνακας 8:** Συνολική κατανάλωση ενέργειας συντονιστή / end device σε μία ημέρα

## 6. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

### 6.1 Οφέλη στην Ενεργειακή Αυτονομία του Συντονιστή με χρήση WuR

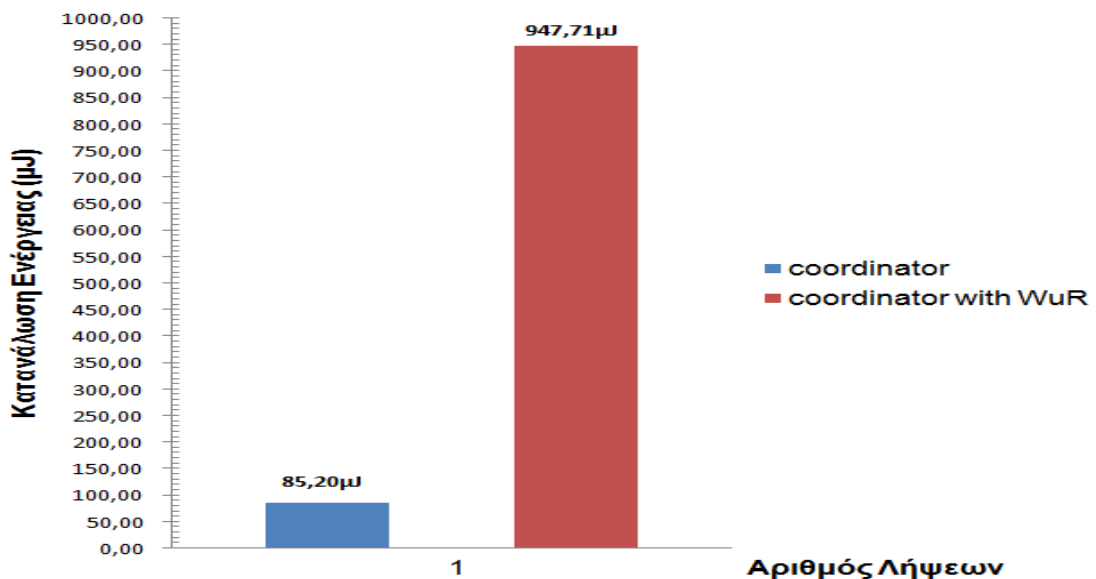
Ξεκινώντας λοιπόν την ανάλυση όλων των παραπάνω, τα πρώτα στοιχεία που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 9.

	Regular zigbee communication (one reception) No WuR		zigbee communication (one reception) with WuR	
	Energy Consumption	Reception Duration	Energy Consumption	Reception Duration
Coordinator	<b>85,2μJ</b>	<b>0,89ms</b>	<b>947,71μJ</b>	<b>70ms</b>

**Πίνακας 9:** Χρονική διάρκεια μίας λήψης / αποστολής και αντίστοιχη κατανάλωση

Στον Πίνακα παρουσιάζεται η κατανάλωση ενέργειας του Συντονιστή, κατά τη διάρκεια μίας λήψης, καθώς και η χρονική διάρκεια που απαιτείται για την ολοκλήρωση της λήψης αυτής. Από τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε την αρκετά μεγάλη **αύξηση (11 φορές περίπου)** της κατανάλωσης του συντονιστή με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης σε σχέση με τον απλό συντονιστή (διάγραμμα 5).

#### Coordinator Energy Consumption during one reception



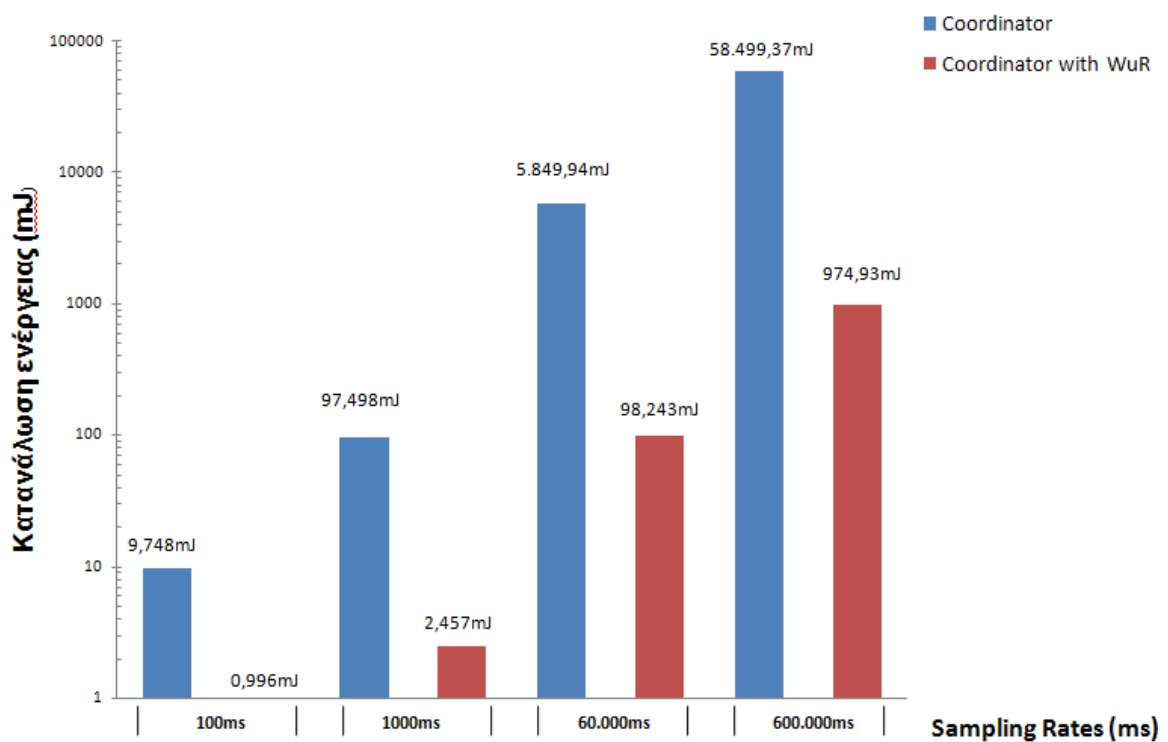
**Διάγραμμα 5:** Κατανάλωση ενέργειας Συντονιστή κατά τη διάρκεια μίας λήψης

Η αύξηση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι αυξήσαμε τον χρόνο τη λήψης του πακέτου, λόγω της ύπαρξης του δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, ο οποίος χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα της τάξης των 50ms, για να αφυπνίσει τον MSP430, ο οποίος με τη σειρά του θα πρέπει να αφυπνίσει τον κύριο ραδιοπομπό του συστήματος (CC2480) (10ms) για να παραλάβει το πακέτο (10ms). Παρά την αύξηση αυτή της κατανάλωσης

ενέργειας του συντονιστή, κατά τη διάρκεια μίας λήψης, το κέρδος στην κατανάλωση ενέργειας που επιτυγχάνουμε (όπως θα δούμε παρακάτω), αφορά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας, κατά τη διάρκεια μία περιόδου. Αυτό το επιτυγχάνουμε εξαλείφοντας τις καταστάσεις idle listening που βρίσκεται ο συντονιστής, όταν δεν υπάρχει λήψη πακέτων, στις οποίες καταναλώνει 32,5mA.

Για να αποδείξουμε το συνολικό αυτό κέρδος από την κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, σε σχέση με τον κλασικό συντονιστή, υπολογίσαμε την κατανάλωση ενέργειας, κατά τη διάρκεια μίας περιόδου και για διαφορετικές περιόδους δειγματοληψίας. Η κατανάλωση αυτή απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα 6.

### Coordinator Energy Consumption during one period



**Διάγραμμα 6:** Συνολική κατανάλωση ενέργειας συντονιστή σε μια περίοδο και για διαφορετικές περιόδους

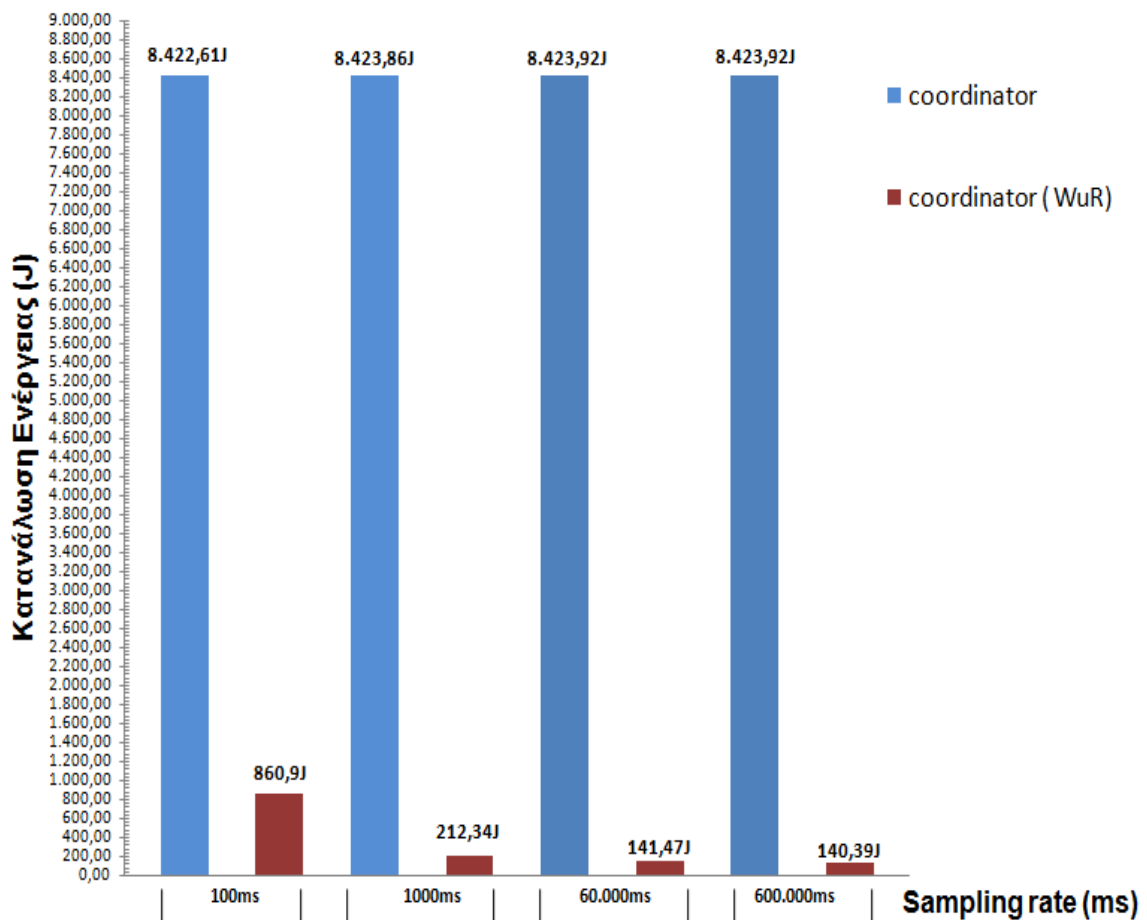
Από τα παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε αρκετά μεγάλη μείωση, στην κατανάλωση του συντονιστή με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης. Για την περίοδο των **100ms, μειώσαμε 10 φορές** την συνολική κατανάλωση του κλασικού συντονιστή, ενώ στην περίπτωση δειγματοληψίας των **600.000ms (δέκα λεπτά)**, μειώσαμε την κατανάλωση περίπου **62 φορές**. Αυτό σημαίνει δηλαδή ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος



δειγματοληψίας, τόσο αυξάνετε η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του συντονιστή με χρήση WuR, σε σχέση με τον κλασικό συντονιστή, ενώ αντίστοιχα όταν έχουμε μικρή περίοδο δειγματοληψίας, μειώνεται η διαφορά αυτή, επειδή ο συντονιστής βρίσκεται μεγαλύτερο διάστημα ανοιχτός.

Στη συνέχεια, υπολογίσαμε τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή, στη διάρκεια μίας ημέρας, για τις παραπάνω περιόδους δειγματοληψίας (100ms, 1000ms, 60.000ms και 600.000ms) και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα 7.

### Coordinator Energy Consumption during one day with different sampling rates



**Διάγραμμα 7:** Συνολική κατανάλωση ενέργειας συντονιστή στη διάρκεια μίας ημέρας για διαφορετικές περιόδους δειγματοληψίας

Από τα παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε ότι η κατανάλωση ενέργειας του κλασικού συντονιστή, παραμένει σχεδόν ίδια και σε υψηλά επίπεδα, διότι σε όλη τη διάρκεια της μίας ημέρας, παραμένει ανοιχτός, βρισκόμενος είτε σε κατάσταση **idle**

**listening** (κατανάλωση 32.5mA), είτε σε κατάσταση λήψης (κατανάλωση 32.5mA) είτε σε κατάσταση αποστολής (αποστολή ACK – 30.5mA). Από την άλλη πλευρά, η κατανάλωση ενέργειας του συντονιστή, με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει διότι στα διαστήματα στα οποία δεν υπάρχει επικοινωνία, ο συντονιστής παραμένει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης (LPM3 – κατανάλωση 1.2μΑ) ενώ βρίσκεται μόνιμα ανοιχτός ο δέκτης χαμηλής κατανάλωσης (1,35mA), ο οποίος “ακούει” μόνιμα το κανάλι για εν δυνάμει λήψη πακέτων.

Το αμέσως επόμενο στάδιο, είναι ο υπολογισμός της μέσης ισχύος που χρειάζεται ο Συντονιστής για να επιτελέσει ένα έργο, στο χρονικό διάστημα μίας περιόδου. Το ποσό της ενέργειας δηλαδή που καταναλώνεται σε μία περίοδο. Παράλληλα με τη μέση ισχύ, σημαντικός είναι και ο υπολογισμός του **transaction time** του συντονιστή. Το ποσοστό του χρόνου δηλαδή που χρειάζεται ο Συντονιστής για να ολοκληρώσει μία λήψη, στη διάρκεια μίας περιόδου.

#### Coordinator (no WuR)

**Μέση Ισχύς:** Συνολική κατανάλωση ενέργειας σε μία περίοδο / περίοδο

$$100\text{ms:} \quad 0,009748\text{J} / 0.1\text{s} = \mathbf{0,09748\text{W}} = \mathbf{97,48\text{mW}}$$

$$1000\text{ms:} \quad 0,097498\text{J} / 1\text{s} = \mathbf{0,09748\text{W}} = \mathbf{97,48\text{mW}}$$

$$60.000\text{ms:} \quad 5,849944\text{J} / 60\text{s} = \mathbf{0,09749\text{W}} = \mathbf{97,49\text{mW}}$$

$$600.000\text{ms:} \quad 58,49937\text{J} / 600\text{s} = \mathbf{0,09749\text{W}} = \mathbf{97,49\text{mW}}$$

#### Coordinator (with WuR)

**Μέση Ισχύς:** Συνολική κατανάλωση ενέργειας σε μία περίοδο / περίοδο

$$\underline{100\text{ms:}} \quad 0,000996\text{J} / 0.1\text{s} = \mathbf{0,009960\text{W}} = \mathbf{9,96\text{mW}}$$

$$\underline{1000\text{ms:}} \quad 0,002457\text{J} / 1\text{s} = \mathbf{0,002457\text{W}} = \mathbf{2,45\text{mW}}$$

$$\underline{60.000\text{ms:}} \quad 0,098243\text{J} / 60\text{s} = \mathbf{0,001637\text{W}} = \mathbf{1,63\text{mW}}$$

$$\underline{600.000\text{ms:}} \quad 0,974930\text{J} / 600\text{s} = \mathbf{0,001624\text{W}} = \mathbf{1,62\text{mW}}$$

### Coordinator (no WuR)

**Duty Cycle:** Χρόνος που χρειάζεται ο συντονιστής για τη λήψη / περίοδο

$$\underline{100\text{ms}}: \quad 0,00089\text{s} / 0.1\text{s} = \mathbf{0,0089\text{s}}$$

$$\underline{1.000\text{ms}}: \quad 0,00089\text{s} / 1\text{s} = \mathbf{0,00089\text{s}}$$

$$\underline{60.000\text{ms}}: \quad 0,00089\text{s} / 60\text{s} = \mathbf{1,48333\text{E-}05\text{s} = 0,00001483}$$

$$\underline{600.000\text{ms}}: \quad 0,00089\text{s} / 600\text{s} = \mathbf{1,48333\text{E-}06\text{s} = 0,00000148}$$

### Coordinator (with WuR)

**Duty Cycle:** Χρόνος που χρειάζεται ο συντονιστής για τη λήψη / περίοδο

$$\underline{100\text{ms}}: \quad 0,07\text{s} / 0.1\text{s} = \mathbf{0,7\text{s}}$$

$$\underline{1.000\text{ms}}: \quad 0,07\text{s} / 1\text{s} = \mathbf{0,07\text{s}}$$

$$\underline{60.000\text{ms}}: \quad 0,07\text{s} / 60\text{s} = \mathbf{0,0011666\text{s}}$$

$$\underline{600.000\text{ms}}: \quad 0,07\text{s} / 600\text{s} = \mathbf{0,0001166\text{s}}$$

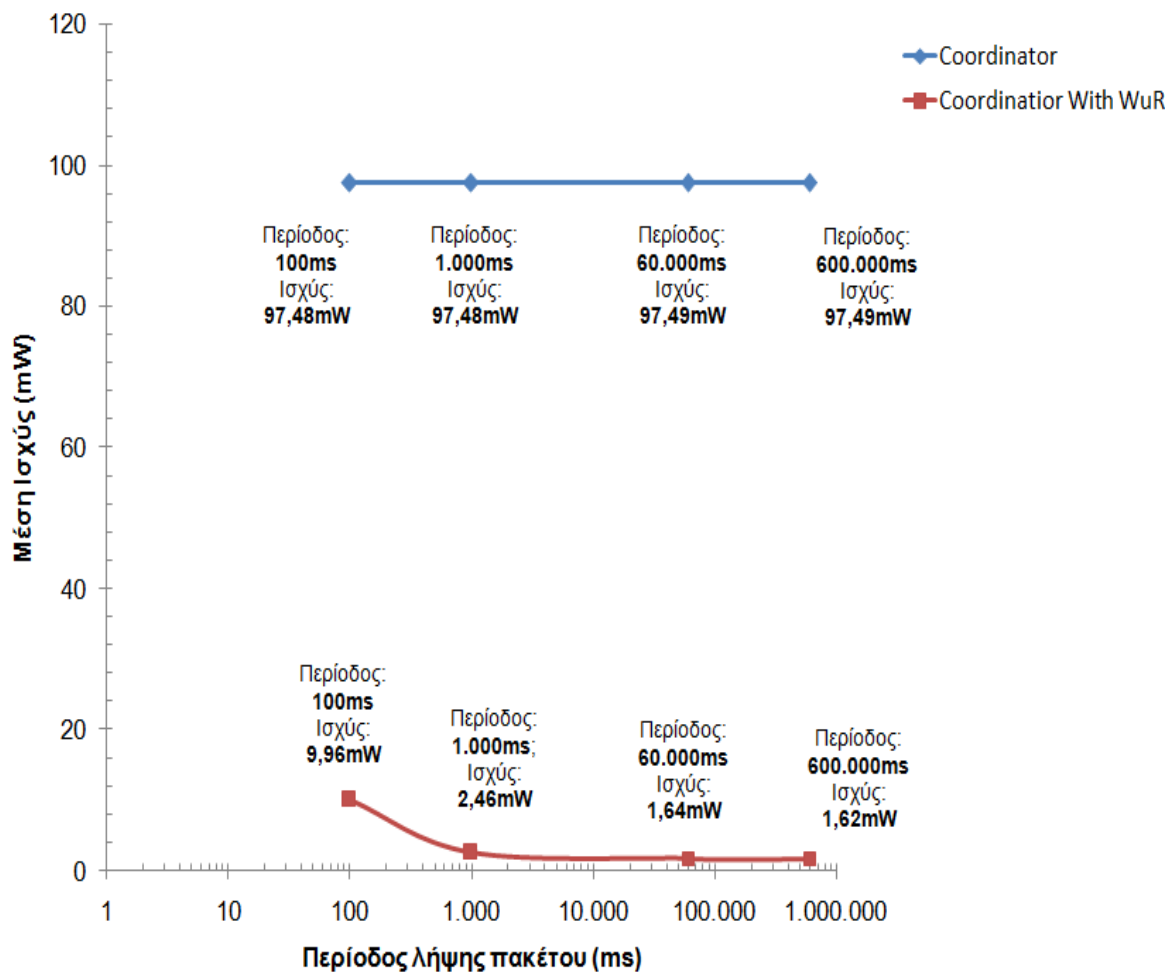
Συνοψίζοντας τους παραπάνω υπολογισμούς, καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα 8. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται η μέση ισχύς του συντονιστή (με χρήση WuR και χωρίς) για διαφορετικές περιόδους λήψης πακέτου.

Αναλύοντας τα στοιχεία του διαγράμματος, παρατηρούμε την σχετικά υψηλή μέση ισχύς, της τάξης των **97,49mW**, που χρειάζεται μόνιμα ο κλασικός συντονιστής προκειμένου να ολοκληρώσει τη λήψη, ανεξάρτητα από τη συχνότητα λήψης πακέτων. Πρόκειται για μία **σταθερή μέση ισχύ**, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι ο συντονιστής παραμένει μόνιμα ανοιχτός, έχοντας σχεδόν την ίδια υψηλή κατανάλωση, ανεξάρτητα αν βρίσκεται σε κατάσταση λήψης, αποστολής ή idle listening. Το συγκεκριμένο σύστημα κρίνεται ενεργειακά ασύμφορο, ειδικότερα σε περιπτώσεις εφαρμογών Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων, που έχουν σχετικά μεγάλες περιόδους δειγματοληψίας, όπως για παράδειγμα περιόδους του ενός λεπτού (60.000ms) ή των 10 λεπτών (600.000ms). Στις περιόδους αυτές το σύστημα **απαιτεί την ίδια μέση ισχύ**, όπως και στην περίπτωση της

μετάδοσης πακέτου κάθε 100ms ή κάθε 1000ms με αποτέλεσμα τη δυσαναλογία στην κατανάλωση ενέργειας, σε σχέση με το έργο που συντελείται.

Από την πλευρά του Συντονιστή με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, παρατηρούμε την μεγάλη διαφορά, σε απαίτηση ισχύος, σε σχέση με τον κλασικό συντονιστή, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με την περίοδο λήψης πακέτου. Όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος αυτή (π.χ 600.000ms), τόσο η ισχύς μειώνεται και τείνει προς το μηδέν, ενώ όσο μικρότερη είναι η περίοδος, τόσο αυξάνεται η ισχύς και τείνει προς την αντίστοιχη κατανάλωση του κλασικού συντονιστή. Αυτό είναι λογικό διότι σε μεγάλες περιόδους λήψης πακέτων, ο συντονιστής με χρήση WuR, περνάει τον περισσότερο χρόνο σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης, λόγω της ύπαρξης του δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, σε αντίθεση με τον κλασικό συντονιστή, ο οποίος παραμένει ανοιχτός καταναλώνοντας υψηλή ενέργεια.

### Μέση Ισχύς Συντονιστή ανά Περίοδο λήψης πακέτου



**Διάγραμμα 8:** Μέση Ισχύς του Συντονιστή για διαφορετικές περιόδους λήψης πακέτου

Η μείωση στη μέση ισχύ του συντονιστή με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης φτάνει το **90%** για συχνότητα λήψης πακέτου τα **100ms**, το **97,5%** για συχνότητα λήψης πακέτου τα **1.000ms** και περίπου στο **98%** για συχνότητα λήψης πακέτου τα **60.000ms** και **600.000ms**.

Το παραπάνω σύστημα του συντονιστή με χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, κρίνεται ενεργειακά αποδοτικό σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά κυρίως σε περιπτώσεις εφαρμογών Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων, με μεγάλες περιόδους δειγματοληψίας. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι σε τέτοιου είδους εφαρμογές, συναντάται η δυσαναλογία της κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με το έργο που επιτελείται, χρησιμοποιώντας τον κλασικό συντονιστή χωρίς δέκτη χαμηλής κατανάλωσης. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούμε ένα συντονιστή, ενεργειακά πιο αυτόνομο, σε σχέση με τον κλασικό συντονιστή, επεκτείνοντας παράλληλα και τη διάρκεια “ζωής του”.

## 6.2 Περιορισμοί του παραπάνω συστήματος με χρήση WuR

Εκτός από τα σημαντικά οφέλη, στην ενεργειακή αυτονομία του συντονιστή με χρήση WuR, το εν λόγω σύστημα υπόκειται και σε ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, σε περίπτωση υιοθέτησής του. Όπως θα δούμε και στον παρακάτω πίνακα 10, η χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης στο συντονιστή, επέφερε μία μικρή αύξηση, της τάξης των **167μJ** στην κατανάλωση του end device, κατά τη διάρκεια μετάδοσης του πακέτου.

	Regular zigbee communication (one transmission) No WuR		zigbee communication (transmission) with WuR	
	Energy Consumption	Transmission Duration	Energy Consumption	Transmission Duration
End Device	<b>1.086.39μJ</b>	<b>22,7ms</b>	<b>1.254μJ</b>	<b>84,6ms</b>

**Πίνακας 10:** Κατανάλωση ενέργειας του end device κατά τη διάρκεια μία λήψης, με τη χρήση WuR και χωρίς τη χρήση, από την πλευρά του συντονιστή

Αυτό συνέβη διότι αυξήθηκε ο χρόνος που χρειάζεται το end device να μεταδώσει το πακέτο, λόγω της χρήσης του δέκτη χαμηλής κατανάλωσης, από την πλευρά του συντονιστή. Το end device δηλαδή θα πρέπει να περιμένει για χρόνο ίσο με το χρόνο που χρειάζεται ο δέκτης να αφυπνίσει τον κύριο ραδιοπομπό, μέχρι να ξεκινήσει να στέλνει το πακέτο. Αυτό σημαίνει, ότι σε περίπτωση ενός zigbee ασύρματου δικτύου αισθητήρων, με περισσότερους του ενός κόμβου (end devices), αν θελήσουμε να επιτύχουμε μία ενεργειακή εξισορρόπηση, θα πρέπει το άθροισμα της προστιθέμενης αυτής ενέργειας όλων των τελικών κόμβων, να μην ξεπερνάει το κέρδος που έχουμε στην κατανάλωση ενέργειας, από την πλευρά του συντονιστή με τη χρήση WuR, δεδομένης μίας περιόδου δειγματοληψίας.

Ο δεύτερος περιορισμός αφορά την αδυναμία του συντονιστή με χρήση WuR, να δέχεται πακέτα, με ρυθμό λήψης μικρότερο των 70ms. Αυτό συμβαίνει διότι τα 70 αυτά ms είναι ο χρόνος που απαιτείται από τον συντονιστή, για την παραλαβή ενός πακέτου, σε αντίθεση με τον κλασικό συντονιστή, ο οποίος χρειάζεται 0,89ms για να παραλάβει ένα πακέτο. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η χαμηλή εκμετάλλευση της χωρητικότητας του καναλιού, σε σχέση με τον κλασικό συντονιστή.

### 6.3 Μελλοντική Εργασία

Στην παραπάνω μελέτη, εξετάσαμε την ενεργειακή αυτονομία του συντονιστή, σε ένα zigbee ασύρματο δίκτυο αισθητήρων τύπου αστέρα, το οποίο αφορά μονόδρομη επικοινωνία προς το συντονιστή, η οποία αρχικοποιείται από το end device. Συνεπώς, συνέχεια αυτής της διπλωματικής, θα μπορούσε να είναι η εξέταση της ανάστροφης διαδικασίας. Πως θα μπορούσε δηλαδή ο συντονιστής να επικοινωνήσει με το end device, με τη χρήση δέκτη χαμηλής κατανάλωσης από την πλευρά του end device, όταν θελήσει να επικοινωνήσει μαζί του για του στείλει πακέτα ελέγχου και με ποιο τρόπο θα μπορούσαμε να μειώσουμε την κατανάλωσή του, με χρήση δεκτών χαμηλής κατανάλωσης.

Ένα δεύτερο πεδίο, το οποίο θα μπορούσε κάλλιστα να αποτελέσει συνέχεια αυτής της διπλωματικής, είναι η εξέταση ενός πρωτοκόλλου σήματος, το οποίο θα διαχειρίζεται την λειτουργία των δεκτών με τέτοιο τρόπο, ώστε να οδηγήσει σε μία υψηλότερη εκμετάλλευση της χωρητικότητας του καναλιού, σε σχέση με το υπό μελέτη σύστημα. Για παράδειγμα, όταν το end device έχει περισσότερα του ενός πακέτου να αποστείλει προς το

συντονιστή, θα μπορούσε μέσω μίας σηματοδοσίας, να ενημερώσει τον συντονιστή ότι έχει και άλλα πακέτα να στείλει. Αναφερόμαστε δηλαδή σε μία λειτουργία παρόμοια με την λειτουργία του Ψευδοασύγχρονου πρωτοκόλλου Extended Wise Mac, το οποίο περιγράφεται στην ενότητα 4.2.4. Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο, ενσωματώνει στην επικεφαλίδα του πακέτου μία σηματοδοσία με την ονομασία DATAmore. Σε περίπτωση που η τιμή αυτής της σηματοδοσίας είναι ίση με 1 (DATAmore=1), σημαίνει ότι ο αποστολέας έχει περισσότερα από ένα πακέτα να στείλει, οπότε ο παραλήπτης παραμένει ανοιχτός για να παραλάβει και τα επόμενα πακέτα, χωρίς επιπλέον καθυστέρηση, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο την εκμετάλλευση της χωρητικότητας του καναλιού.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Walteneus Dargie, Christian Poellabauer, “Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice, A John Wiley and Sons, Ltd Publication, ISBN 978-0-470-99765-9 (H/B), 2010.
- [2] [Holger Karl and Andreas Willig, “Protocols and Architectyres for Wireless Sensor Networks: John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-09510-5, 2005.
- [3] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, Dipak Ghosal, “Wireless sensor network survey”, Computer Networks, 52, 2292–2330, Elsevier, April 2008.
- [4] M. A. Mahmood, W. K. G. Seah, and I. Welch, “Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead, December 2014.
- [5] Carlo Fischione, “An Introduction to Wireless Sensor Networks”, Royal Institute of Technology, September 2014.
- [6] Geoff V. Merrett and Yen Khneng Tan, “Wireless Sensor Networks: Application – Centric Design”, InTech, ISBN 978-953-307-321-7, Chapter 1, p-6, December 2014
- [7] Shuang-Hua Yang, “Wireless Sensor Networks Principles: Design and Applications”, Springer, doi: 10.1007/978-1-4471-5505-8, 2014
- [8] H.M.A. Fahmy, “Wireless Sensor Networks, Signals and Communication Technology”, Springer Science+Business Media Singapore, doi: 10.1007/978-981-10-0412-4\_2, Chapter 2, 2016
- [9] Chee-Yee Chong, and Srikanta P. Kumar, “Sensor Networks: Evolution, Opportunities and challenges”, Proceedings of the IEEE, Vol 91, No 8, doi: 10.1109/JPROC.2003.814918, August 2003.
- [10] Priyanka Rawat, Kamal Deep Singh, Hakima Chaouchi and Jean Marie Bonnin, “Wireless Sensor Networks: A survey on recent developments and potential synergies”, The Journal Of Intercomputing, Springer, Volume 68, Issue\_1, pp 1–48, ISSN: 0920-8542, April 2014.
- [11] Ahmad Ali, Yu Ming, Sagnik Chakraborty and SaimaIram, “A Comprehensive Survey on Real-Time Applications of WSN”, MDPI, Future Internet, doi: 10.3390/fi9040077, November 2017.
- [12] Salvador Climent, Antonio Sanchez, Juan Vicente Capella, Nirvana Meratnia and Juan Jose Serrano, “Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks: Advances and Future Trends in Physical, MAC and Routing Layers”, MDPI, doi: 10.3390/s140100795, January 2014.
- [13] Matthew Dunbabin, Peter Corke, Iuliu Vasilescu and Daniela Rus, “Data Muling over Underwater Wireless Sensor Networks using an Autonomous Underwater Vehicle”, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, Florida, May 2006
- [14] Xin Tan, Zhi Sun, Ian F., “A Testbed of Magnetic Induction-based Communication System for Underground Applications”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, March 2015.



- [15] S. Kisseleff, X. Chen, I. F. Akyildiz, and W. Gerstacker, "Localization of a Silent Target Node in Magnetic Induction based Wireless Underground Sensor Networks", IEEE ICC 2017 Ad-Hoc and Sensor Networking Symposium, doi: 10.1109/ICC.2017.7996460, May 2017.
- [16] Ian F. Akyildiz, Tommaso Melodia, Kaushik R. Chowdhury, "A survey on wireless multimedia sensor networks", Elsevier, Computer Networks, Volume 51, Issue 4, Pages 921-960, March 2007.
- [17] HalilYetgin, Kent TszKan Cheung, Mohammed El-Hajjar, and Lajos Hanzo, "A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks", IEEE Communications Surveys & Tutorials, doi:10.1109/COMST.2017.2650979, 2016.
- [18] Raza, M., Aslam, N., Le-Minh, H., Hussain, S., Cao, Y. and Khan, N. M., "A critical analysis of research potential, challenges and future directives in industrial wireless sensor networks", IEEE Communications Surveys and Tutorials, doi:10.1109/COMST.2017.2759725, October 2017.
- [19] Mingfu Li, Hung-Ju Lin, "Design and Implementation of Smart Home Control Systems Based on Wireless Sensor Networks and Power Line Communications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, doi: 10.1109/TIE.2014.2379586, November 2014.
- [20] Hemant Ghayvat, Subhas Mukhopadhyay, Xiang Gui and Nagender Suryadevara, "WSN- and IOT-Based Smart Homes and Their Extension to Smart Buildings", MDPI, doi:10.3390/s150510350, May 2015.
- [21] Terence. K. L. Hui, R. Simon Sherratt, Daniel Diaz Sanchez, "Major Requirements for Building Smart Homes in Smart Cities", Elsevier, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2016.10.026>, October 2015.
- [22] Orestis Evangelatos, Kasun Samarasinghe, Jose Rolim, "Major Requirements for Building Smart Homes in Smart Cities based on Internet of Things Technologies", IEEE, DOI: 10.1109/MASS.2012.6708524, January 2014.
- [23] Adam B. Noel, Abderrazak Abdaoui, Tarek Elfouly, Mohamed Hossam Ahmed, Ahmed Badawy, and Mohamed S. Shehata, "Structural Health Monitoring Using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 19, No. 3, doi: 10.1109/COMST.2017.2691551, April 2017.
- [24] Ruhul Amin,SK Hafizul Islam,G.P Biswas, NeerajKumar,"A robust and anonymous patient monitoring system using wireless medical sensor networks", Elsevier, Future Generation Computer Systems, Volume 80, Pages 483-495, March 2018.
- [25] ThairHayajneh, Bassam J Mohd, Muhammad Imran, Ghada Almashaqbeh and Athanasios V. Vasilakos, "Secure Authentication for Remote Patient Monitoring with Wireless Medical Sensor Networks", MDPI, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.05.032>, March 2016.
- [26] Ahmed Lounis, Abdelkrim Hadjidj, Abdelmadjid Bouabdallah, Yacine Challal, "Healing on the Cloud: Secure Cloud Architecture for Medical Wireless sensor networks", Future Generation Systems, Elsevier, 55, pages 266 – 277, doi: 10.1016/j.future.2015.01.009, February 2017.
- [27] Mary M. Rodgers, Vinay M. Pai, and Richard S. Conroy, "Recent Advances in Wearable Sensors for Health Monitoring" IEEE Sensors Journal, doi: 10.1109/JSEN.2014.2357257, September 2014.

- [28] Mare Srbinovska, Cvetan Gavrovski, Vladimir Dimcev, Aleksandra Krkoleva and Vesna Borozan, "Environmental parameters monitoring in precision agriculture using wireless sensor networks", *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, Volume 88, Pages 297-307, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.036>, February 2015.
- [29] Mushtaque Ahmed Rahu, Pardeep Kumar, Sarang Karim, Azeem Ayaz Mirani, "Agricultural Environmental Monitoring: A WSN Perspective", *University of Sindh Journal of Information and Communication Technology*, Volume 2, Issue 1, pages 17-24, ISSN-E: 2523-1235, January 2018.
- [30] Konstantinos P. Ferentinos, Nikolaos Katsoulas, Antonis Tzounis, Thomas Bartzanas, Constantinos Kittas, "Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment", Published by Elsevier Ltd, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2016.11.005, November 2016.
- [31] Muhammad Saqib Jamil, Muhammad Atif Jamil, Anam Mazhar, Ahsan Ikram, Abdullah Ahmed, Usman Munawar, "Smart Environment Monitoring System by Employing Wireless Sensor Networks on Vehicles for Pollution Free Smart Cities" *Procedia Engineering*, Elsevier, Volume 107, Pages 480-484, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.106>, 2015.
- [32] Ziran Zhang, Steven D. Glaser, Roger C. Bales, Martha Conklin, Robert Rice and Danny G. Marks "Technical report: the design and evaluation of a basin-scale wireless sensor network for mountain hydrology", *University of California, Water Resources Research*, doi: 10.1002/2016WR019619, May 2017.
- [33] H.M.A. Fahmy, "Wireless Sensor Networks, Signals and Communication Technology", Springer Science+Business Media Singapore, doi: 10.1007/978-981-10-0412-4\_2, Chapter 2, p.56, 2016
- [34] Faisal Karim Shaikh, Sherali Zeadally, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, p. 1041 – 1054, November 2015.
- [35] M.A. Matin and M.M. Islam, "Overview of Wireless Sensor Network", *Wireless Sensor Networks – Technology and Protocols*, Intech, Chapter 1, p.6, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/49376>, 2012.
- [36] Muhammad Adeel Mahmood, Winston K.G. Seah and Ian Welch, "Reliability in Wireless Sensor Networks: A Survey and Challenges Ahead", December 2014.
- [37] T. Mirzoev, "Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN 802.15.4 standard)", February 2005.
- [38] AdvanTech, "Extending Coverage with Advantech's Wireless Sensor Networks", url: [http://www2.advantech.eu/it/edm/2011\\_WSN/index\\_flash.htm](http://www2.advantech.eu/it/edm/2011_WSN/index_flash.htm).
- [39] J. Zheng, M.J. Lee, A comprehensive performance study of IEEE 802.15.4, in: *Sensor Network Operations*, IEEE Press, Wiley Interscience, New York, pp. 218–237, Chapter 4, 2006.
- [40] J. S. Lee, "Performance evaluation of IEEE 802.15.4 for low-rate wireless personal area networks," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 52, no. 3, pp. 742-749, Aug. 2006.

- [41] L. S. Committee et al., "Part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)," IEEE, 2003.
- [42] Baronti, P., Pillai, P., Chook, V., Chessa, S., Gotta, A., & Hu, Y. F., "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and zigbee standards" Elsevier, *Computer Communications*, 30(7), 1665–1695, doi:10.1016/j.comcom.2006.12.020, December 2006.
- [43] Sinem Coler iErgen, "ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary", [Online], Available: <http://pages.cs.wisc.edu/~suman/courses/707/papers/zigbee.pdf>, September 2004
- [44] Wagner, S. R., "Standards-Based Wireless Sensor Networking Protocols for Spaceflight Applications", IEEE Aerospace Conference, NASA Johnson Space Center, 2101 NASA Parkway, Houston, Texas 77058, [Online], Available: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100001311.pdf>, 2010.
- [45] J. Song, S. Han, A. Mok, D. Chen, M. Lucas, and M. Nixon, "Wireless hart: Applying wireless technology in real-time industrial process control," in Proc. IEEE RTAS, pp. 377–386, May 2008.
- [46] P. T. A. Quang and D. S. Kim, "Throughput-aware routing for industrial sensor networks: Application to ISA100.11a," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 10, no. 1, pp. 351-363, doi: 10.1109/TII.2013.2255617, February 2014.
- [47] M. Nixon, "A Comparison of Wireless HART and ISA100.11a," white paper, September 2012.
- [48] Zach Shelby, Carsten Bormann, "6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet", Wiley Series in Communications Networking & Distributed Systems" ISBN:9780470747998 (H/B), [online], Available: [http://keshi.ubiwna.org/2015IoTComm/6LoWPAN\\_The%20Wireless%20Embedded%20Internet.pdf](http://keshi.ubiwna.org/2015IoTComm/6LoWPAN_The%20Wireless%20Embedded%20Internet.pdf), 2009.
- [49] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park, and Mani B. Srivastava, "Energy-Aware Wireless Microsensor Networks", *IEEE Signal Processing Magazine*, Volume: 19, Issue: 2, doi: 10.1109/79.985679, Mar 2002.
- [50] Ramya R, Saravanakumar G, Ravi S., "MAC Protocols for Wireless Sensor Networks". *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 8(34), doi: 10.17485/ijst/2015/v8i34/72318, December 2015.
- [51] RidhaSoua and Pascale Minet, "A Survey on Energy Efficient Techniques in Wireless Sensor Networks", *IEEE Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, October 2011.
- [52] G. Anastasi, M. Conti, M. Francesco, A. Passarella, "Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A survey", *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 537-568, May 2009
- [53] T. Rault, A. Bouabdallah, Y. Challal, "Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey", *Comput. Netw.*, vol. 67, pp. 104-122, July 2014.
- [54] S. Linetal., "ATPC: Adaptive transmission power control for wireless sensor networks," *ACM Transactions on Sensor Networks.*, vol. 12, no. 1, , March. 2016.
- [55] Chincoli, M, Syed, AA, Exarchakos, G. "Power control in wireless sensor networks with variable interference. *Mobile Information Systems*, June 2016.

- [56] F. M. Costa, H. Ochiai, "A Comparison of Modulations for Energy Optimization in Wireless Sensor Network Links", IEEE Global Telecommunications Conference January 2010.
- [57] S. Gao et al., "Energy Efficient Adaptive Modulation in Wireless Cognitive Radio Sensor Networks," Proc. IEEE ICC, June 2007.
- [58] Soltan, M., Hwang, I., Pedram, M. "Modulation-Aware energy balancing in hierarchical wireless sensor networks", Proceedings of the 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC '08), May 2008, Santorini.
- [59] R.Sathya Janaki, Dr.V.Nagarajan, "Fuzzy Logic Based Adaptive Modulation System for Energy Efficient Wireless Sensor Network, 2018.
- [60] Zafar. Iqbal, Kiseon. Kim, Heung.-No. Lee, "A cooperative wireless sensor network for indoor industrial monitoring", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, volume 13, issue 2, April 2016.
- [61] X. Liu et al., "Distributed cooperative communication nodes control and optimization reliability for resource-constrained WSNs", *Neurocomputing*, vol. 270, pp. 122-136, December 2017.
- [62] H. Chen, Y. Li, J. Rebelatto, B. Filho, B. Vucetic, "Harvest-then-cooperate: Wireless-powered cooperative communications", *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 63, no. 7, pp. 1700-1711, Apr. 2015.
- [63] Sunil Pattepu, Swarnajit Mukherjee, Amlan Datta, "Energy Efficiency Analysis of Cooperative Relaying with Decode-and-Forward and Amplify-and-Forward Schemes for Wireless Sensor Networks, International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud), February 2017.
- [64] Q. Wang, H.-N. Dai, Z. Zheng, M. Imran, A. V. Vasilakos, "On Connectivity of Wireless Sensor Networks with Directional Antennas", *Sensors*, vol. 17, no. 1, January 2017.
- [65] Z. Yu, J. Teng, X. Bai, D. Xuan, W. Jia, "Connected coverage in wireless networks with directional antennas", *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 2264-2272, April 2011.
- [66] J. Ren et al., "Dynamic Channel Access to Improve Energy Efficiency in Cognitive Radio Sensor Networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 5, May 2016.
- [67] O. B. Akan, O. Karli, O. Ergul, "Cognitive Radio Sensor Networks", *IEEE Network*, vol. 23, no. 4, pp. 34-40, July.-Augusts 2009.
- [68] G. P. Joshi, S. W. Kim, "A survey on node clustering in cognitive radio wireless sensor networks", *Sensors*, vol. 16, no. 9, pp. 1465, September 2016.
- [69] L. Wan, G. Han, D. Zhang, A. Li, N. Feng, "Distributed DOA estimation for arbitrary topology structure of mobile wireless sensor network using cognitive radio", *Wireless Pers. Commun.*, January 2016.
- [70] T. M. Chiwewe, C. F. Mbuya, G. P. Hancke, "Using cognitive radio for interference-resistant industrial wireless sensor networks: An overview", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 11, no. 6, pp. 1466-1481, December. 2015.

- [71] J. Zhu, Y. Song, D. Jiang, H. Song, "Multi-armed bandit channel access scheme with cognitive radio technology in wireless sensor networks for the Internet of Things", *IEEE Access*, vol. 4, pp. 4609-4617, September 2016.
- [72] E. Fadel et al., "Spectrum-aware bio-inspired routing in cognitive radio sensor networks for smart grid applications", *Computer Communications*, vol. 101, no. 15, pp. 106-120, March 2017.
- [73] W. Ejaz, G. A. Shah, N. Ul Hasan, H. S. Kim, "Energy and throughput efficient cooperative spectrum sensing in cognitive radio sensor networks", *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 26, no. 7, pp. 1019-1030, Jul. 2015.
- [74] Qureshi, F.F., Iqbal, R., Asghar, M.N.: "Energy efficient wireless communication technique based on cognitive radio for internet of things". *Journal of Network Computer Applications*, vol 89, pp 14–25, July 2017.
- [75] Jie Cui, Lili Shao, Hong Zhong, Yan Xu Lu Liu, "Data aggregation with end-to-end confidentiality and integrity for large-scale wireless sensor networks", *Peer-to-Peer Networking and Applications*, pp 1-16, July 2017.
- [76] I. Yoon, H. Kim, D. K. Noh, "Adaptive data aggregation and compression to improve energy utilization in solar-powered wireless sensor networks", *Sensors*, vol. 17, no. 6, May 2017.
- [77] M. Rezvani, A. Ignatovic, E Bertino, S. Jha, "Secure data aggregation technique for wireless sensor networks in the presence of collusion attacks", *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing.*, vol. 12, no. 1, pp. 98-110, January. 2015.
- [78] X. Xu, R. Ansari, A. Khokhar, A. V. Vasilakos, "Hierarchical data aggregation using compressive sensing (HDACS) in WSNS", *ACM Trans. Sensor Netw.*, vol. 11, no. 3, pp. 45, February 2015.
- [79] S. Roy, M. Conti, S. Setia, S. Jajodia, "Secure data aggregation in wireless sensor networks", *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 7, no. 3, pp. 1040-1052, January 2012.
- [80] M. Baga, Y. Challal, A. Ksentini, A. Derhab, N. Badache, "Data aggregation scheduling algorithms in wireless sensor networks: Solutions and challenges", *IEEE Communication. Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1339-1368, May 2014.
- [81] J. Kho, A. Rogers, N. R. Jennings, "Decentralized control of adaptive sampling in wireless sensor networks", *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 5, no. 3, pp. 19:1-19:35, May 2009.
- [82] W. R. Tobler, "A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region", *Economy Geography*, volume 46, January 2011.
- [83] Y. Li, L. E. Parker, "Nearest neighbor imputation using spatial-temporal correlations in wireless sensor networks", *Inf. Fusion*, vol. 15, pp. 64-79, January 2014.
- [84] Yu Xiang, Xuezhi Wang, Lihua He, Wenyong Wang, William Moran, "Spatial-Temporal Analysis of Environmental Data of North Beijing District Using Hilbert-Huang Transform", *Journals Plos*, December 2016.

- [85] X.-L. Piao, Y.-L. Hu, Y.-F. Sun, B.-C. Yin, J.-B. Gao, "Correlated spatio-temporal data collection in wireless sensor networks based on low rank matrix approximation and optimized node sampling", *Sensors*, vol. 14, no. 12, pp. 23137-23158, December 2014.
- [86] N. Kimura, S. Latifi, "A survey on data compression in wireless sensor networks", Proc. International Conference on Information Technology: *Coding and Computing*, pp. 8-13, April 2005.
- [87] J. M. Yi, E. J. Oh, D. K. Noh, and I. Yoon, "Energy-aware data compression and transmission range control for energy-harvesting wireless sensor networks," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 13, no. 4, doi:10.1177/1550147717705785, April 2017.
- [88] S. Kim, C. Cho, K.-J. Park, H. Lim, "Increasing network lifetime using data compression in wireless sensor networks with energy harvesting", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, no. 1, pp. 1-10, January 2017.
- [89] Yao Liang, Yimei Li, "An Efficient and Robust Data Compression Algorithm in Wireless Sensor Networks", *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 3, March 2014.
- [90] X.-Y. Liu et al., "CDC: Compressive data collection for wireless sensor networks", *IEEE Transactions on Parallel Distributing Systems*, vol. 26, no. 8, pp. 2188-2197, August. 2015.
- [91] P. Ostovari, J. Wu and A. Khreishah, "Network coding techniques for wireless and sensor networks," in *The Art of Wireless Sensor Networks*. Springer, pp. 129-162, December 2013.
- [92] Yung-Cheng Tu, "Introduction to Network Coding in Wireless Sensor Networks", December 2010. Available on url: <http://slideplayer.com/slide/8103403/>.
- [93] B. Khodabakhshi, M. Khalily-Dermayn, "An energy efficient network coding model for wireless sensor networks", *Procedia Computer Science*, pp 157 – 162, 2016.
- [94] ZaherMerhi, OussamaTahan, Bakri Abdul-Hay, RabihRammal, SamihAbdulNabi, "SR-Code: Smart Relay Network Coding for Data Collection for Wireless Sensor Networks", *International Journal of Engineering Research and Application*, Vol. 7, Issue 1, (Part-2), pp.58-64, January 2017.
- [95] A. Naeem, M. H. Rehmani, Y. Saleem, I. Rashid, N. Crespi, "Network coding in cognitive radio networks: A comprehensive survey", *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, vol. 19, issue 3, pp. 1945-1973, January 2017.
- [96] Tan Liansheng, Mou Wu, "Data reduction in wireless sensor networks: A hierarchical lms prediction approach", *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 6, pp. 1708-1715, March 2016.
- [97] U. Raza, A. Camera, A. L. Murphy, T. Palpanas, G. P. Picco, "Practical data prediction for real-world wireless sensor networks", *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 27, no. 8, pp. 2231-2244, August 2015.
- [98] G. M. Dias, B. Bellalta, S. Oechsner, "A Survey about Prediction-based Data Reduction in Wireless Sensor Networks", *submitted to the ACM Computing Surveys journal*, pp. 35, May 2016.
- [99] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, D. D. Vergados, "Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 2, pp. 551-591, July 2013.

- [100] P. S. Rao, P. K. Jana, H. Banka, "A particle swarm optimization based energy efficient cluster head selection algorithm for wireless sensor networks" in *J. Mobile Commun. Comput. Inf. Wireless Netw.*, Volume 23, Issue 7, pp 2005–2020, October 2017.
- [101] P. G. V. Naranjo, M. Shojafar, H. Mostafaei, Z. Pooranian, E. Baccarelli, "P-SEP: A prolong stable election routing algorithm for energy-limited heterogeneous fog-supported wireless sensor networks", *J. Supercomput.*, vol. 72, pp. 1-23, June 2016.
- [102] A. Al-Baz, A. El-Sayed, "A new algorithm for cluster head selection in LEACH protocol for wireless sensor networks", *International Journal of Communication Systems*, pp. 1-13, September 2017.
- [103] Y. Li, N. Yu, W. Zhang, W. Zhao, X. You, and M. Daneshmand, "Enhancing the Performance of LEACH Protocol in Wireless Sensor Networks", In proceedings of IEEE INFOCOM Workshop on M2MCN 2011, Shanghai, April 2011.
- [104] LeuJenq-Shiou, Chiang Tung-Hung, Yu Min-Chieh, Su Kuan-Wu, "Energy Efficient Clustering Scheme for Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Network With Isolated Nodes", *IEEE communication letters*, vol. 19, no. 2, February 2015.
- [105] D. Jia, H. Zhu, S. Zou, P. Hu, "Dynamic Cluster Head Selection Method for Wireless Sensor Network", *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 8, pp. 2746-2754, December 2015.
- [106] P. Visconti, R. Ferri, M. Pucciarelli, E. Venere: Development and Characterization of a solar-based energy harvesting and power management system for a WSN node applied to optimized goods transport and storage. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 9, Issue 4, pp. 1637 – 1667, December 2016.
- [107] C. Wang, J. Li, F. Ye, Y. Yang, "A hybrid framework combining solar energy harvesting and wireless charging for wireless sensor networks", *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1-9, April 2016.
- [108] LiqunHou, Shudong Tan, Lei Yang, Zhijuan Zhang, Neil Bergmann, "Autonomous Wireless Sensor Node with Thermal Energy Harvesting for Temperature Monitoring of Industrial Devices", *International Journal of Online Engineering*, vol. 13, No 04, 2017.
- [109] Monitoring gearbox using a wireless temperature node powered by thermal energy harvesting module", *Proceedings of the 23rd International Conference on Automation & Computing*, University of Huddersfield, Huddersfield, UK, 7-8, September 2017.
- [110] Ali Mohammed Abdal-Kadhim, KokSwee Leong, "Application of Thermal Energy Harvesting from Low-Level Heat Sources in Powering up WSN Node", *2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies*, April 2017.
- [111] D. Porcarelli, D. Spenza, D. Brunelli, A. Cammarano, C. Petrioli, L. Benini, "Adaptive rectifier driven by power intake predictors for wind energy harvesting sensor networks", *Emerging and Selected Topics in Power Electronics IEEE Journal of*, vol. 3, no. 2, pp. 471-482, June 2015.

- [112] A. Ahmed et al., "Self-Powered Wireless Sensor Node Enabled by a Duck-Shaped Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Water Wave Energy," *Advanced Energy Materials*, vol. 7, no. 7, December 2017.
- [113] C. Mahapatra, Z. Sheng, P. Kamalinejad, V. C. M. Leung, S. Mirabbasi, "Optimal power control in green wireless sensor networks with wireless energy harvesting wake-up radio and transmission control", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 501-518, March 2017.
- [114] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou, W. Lou, H. D. Sherali, S. F. Midkiff, "Multi-node wireless energy charging in sensor networks", *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 23, no. 2, pp. 437-450, Apr. 2015.
- [115] Mittleider, A.; Griffin, B.; Detweiler, C. "Experimental analysis of a uav-based wireless power transfer localization system". In *Experimental Robotics: The 14th International Symposium on Experimental Robotics*; Hsieh, M.A., Khatib, O., Kumar, V., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, , pp. 357–371, November 2016.
- [116] Jiming Chen, Songyuan Li, Shuo Chen, Shibo He, Zhiguo Shi, "Q-Charge: A Quadcopter-Based Wireless Charging Platform for Large-Scale Sensing Applications", *IEEE Network*, vol. 31, Issue 6, pp 56-61, November 2017.
- [117] Elizabeth Basha, Michael Eiskamp, Jennifer Johnson, Carrick Detweiler, "UAV recharging opportunities and policies for sensor networks", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 501, pp. 158-168, August 2015.
- [118] W. Xu, W. Liang, X. Jia, Z. Xu, Z Li, Y. Liu "Maximizing Sensor Lifetime with the Minimal Service Cost of a Mobile Charger in Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, March 2018.
- [119] L. Khelladi, D. Djenouri, M. Rossi, N. Badache, "Efficient on-demand multi-node charging techniques for wireless sensor networks", *Computer Communications*, Elsevier, pp 1-13, October 2016.
- [120] A. Madhja et al., "Hierarchical collaborative wireless charging in sensor networks", *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1-8, March 2015.
- [121] S. Boisseau, G. Despesse, B. Ahmed Seddik, "Electrostatic conversion for vibration energy harvesting" in *Small-Scale Energy Harvesting*, InTech, October 2012.
- [122] E. O. Torres, G. A. Rincn-Mora, "Electrostatic energy-harvesting and battery - charging CMOS system prototype", *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 56, no. 9, pp. 1938-1948, September 2009.
- [123] Bowen C. R., Kim H. A., Weaver P. M. and Dunn S. "Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications *Energy & Environmental Science* 7, pp 25–44, November 2013.
- [124] Calio`, R., Rongala, U. B., Camboni, D., Milazzo, M., Stefanini, C., De Petris, G., & Oddo, C. M., "Piezoelectric energy harvesting solutions". *Sensors*, 14(3), pp 4755–4790, February 2014.
- [125] E. Ibarra, A. Antonopoulos, E. Kartsakli, J. J. P. C. Rodrigues, C. Verikoukis, "QoS-aware energy management in body sensor nodes powered by human energy harvesting", *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 2, pp. 542-549, January. 2016.



- [126] C. Dagdeviren, Z. Li, Z. L. Wang, "Energy Harvesting from the animal/human body for self-powered electronics", *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, vol. 19, pp. 85-108, June 2017.
- [127] E. Ibarra, A. Antonopoulos, E. Kartsakli, C. Verikoukis, "HEH-BMAC: Hybrid polling MAC protocol for WBANs operated by human energy harvesting", *Telecommun. Syst.*, vol. 58, no. 2, pp. 111-124, February 2015.
- [128] Thielen Moritz et al., "Human body heat for powering wearable devices: From thermal energy to application", *Energy Conversion and Management*, vol. 131, pp. 44-54, January 2017.
- [129] K. Yang, T. Ruan, J. C. Zheng, M. Zhu, "Energy harvesting during human walking to power a wireless sensor node", *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 254, pp. 69-77, February 2017.
- [130] M. Riduan Ahmad<sup>1</sup>, Eryk Dutkiewicz<sup>2</sup> and Xiaojing Huang<sup>3</sup>, "A Survey of Low Duty Cycle MAC Protocols in Wireless Sensor Networks". <sup>1</sup>Universiti Teknikal Malaysia Melaka, <sup>2</sup>Macquarie University, <sup>3</sup>CSIRO ICT Centre, November 2010.
- [131] T. Alskaf, B. Bellal, M. G. Zapata, J. M. B. Ordi-nasa, "Energy efficiency of MAC protocols in low data rate wireless multimedia sensor networks: A comparative study", *Ad Hoc Networks V.56*, pp. 141-157, March 2017.
- [132] V. Jelcic, "Analytic Comparison of Wake-Up Receivers for WSNs and Benefits Over the Wake-On Radio Scheme", *Proc. 7th ACM Wksp. Performance Monitoring and Measurement of Heterogeneous Wireless and Wired Networks*, pp. 99-106, October 2012.
- [133] NafisehSeyed Mazloun, "Duty-cycled Wake-up Schemes for Ultra-low Power Wireless Communications", Department of Electrical and Information Technology, January 2016,
- [134] C. Cano, B. Bellalta, A. Sfaieropoulou, M. Oliver, "Low energy operation in WSNs: A survey of preamble sampling MAC protocols", *Computer Networks*, vol. 55, no. 15, pp. 3351-3363, June 2011.
- [135] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. Mutka, N. Xi, "The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: A survey", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 101-120, April 2012.
- [136] B. Yahya, J. Ben-Othman, "Towards a classification of energy aware MAC protocols for wireless sensor networks", *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 9, no. 12, pp. 1572-1607, February 2009.
- [137] K. Langendoen, A. Meier, "Analyzing mac protocols for low data-rate applications", *ACM Trans. Sensor Networks*, vol. 7, no. 2, pp. 1-40, August 2010.
- [138] W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", *IEEE/ACM Trans. Net.*, vol. 12, no. 3, pp. 493-506, June 2004.
- [139] T.V. Dam and K. Langendoen, "An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks", The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys'03), Los Angeles, CA, USA, November 2003.
- [140] Wei Ye, Fabio Silva, John Heidemann, "Ultra-Low Duty Cycle MAC with scheduled Channel Polling", ACM SenSys 2006, November, 2006.

- [141] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks. In *SenSys*, Los Angeles, California, USA, November 2003.
- [142] J. Polastre, J. Hill, D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks", *Proc. 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 95-107, November 2004.
- [143] G. Z. Papadopoulos, *Improving Medium Access in Dynamic Wireless Sensor Networks*, September 2015.
- [144] C.-C. Pu, C.-H. Pu, and H.-J. Lee., "Emerging Communications for Wireless Sensor Networks: Indoor Location Tracking using Received Signal Strength Indicator, " *InTech Open Access Publisher*, ch.11, pp.229-256, February 2011.
- [145] D. Messaoud, D. Djamel, B. Nadjib, "Survey on latency issues of asynchronous MAC protocols in delay - sensitive wireless sensor networks", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 2, pp. 528-550, April 2012.
- [146] M. Buettner, G. V. Yee, E. Anderson, R. Han, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks", *Proc. 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 307-320, November 2006.
- [147] T. Maitra, S. Roy, "A comparative study on popular mac protocols for mixed wireless sensor networks: From implementation viewpoint", *Computer Science Review*, vol. 22, no. c, pp. 107-134, November 2016.
- [148] Y. Sun, O. Gurewitz, D. B. Johnson, "RI-MAC: A Receiver-Initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks", *SenSys '08: Proc. 6th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems*, pp. 1-14, November 2008.
- [149] A. El-Hoiydi, J-D. Decotignie, "WiseMAC: An Ultra Low Power MAC Protocol for the Downlink of Infrastructure Wireless Sensor Networks", *Proc. IEEE Symp. Computers and Comm.*, pp. 244-251, November 2004.
- [150] P. Hurni, T. Braun, M. Anwander, "Evaluation of WiseMAC and extensions on wireless sensor nodes", *J. Telecom. Syst.*, vol. 43, no. 1-2, pp. 49-58, September 2010.
- [151] Philipp Hurni, Torsten Braun, "Increasing Throughput for WiseMAC", *IEEE/IFIP WONS 2008*, pp. 105-108, 23-25, March 2008.
- [152] M. Magno, S. Marinkovic, B. Srbinovski, E. M. Popovici, "Wake-up radio receiver based power minimization techniques for wireless sensor networks: A review", *Microelectronics Journal 45*, vol. 12, pp. 1627-1633, December 2014.
- [153] I. Demirkol, C. Ersoy, E. Onur, "Wake-up receivers for wireless sensor networks: benefits and challenges", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 16, no. 4, pp. 88-96, August 2009.
- [154] C. S. Hong, M. A. Ameen, and S. I. Moon, "Emergency Communication for Low Energy Body-Centric Wearable Networks," *Internet Engineering Task Force, Internet Draft*, April 2016.

- [155] L. Gang, D. Debraj, X. Mingsen, S. Wen-Zhan, "Telosw: Enabling ultra-low power wake-on sensor network", *INSS 2010*, June 2010.
- [156] Texas Instruments, SirlNamtvedt, "CC1100/CC2500 – Wake On Radio", Application Note AN047", (online) Available: <http://www.ti.com/lit/an/swra126b/swra126b.pdf>.
- [157] M. Magno et al., "Design implementation and performance evaluation of a flexible low-latency nano watt wake-up radio receiver", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 12, no. 2, pp. 633-644, April 2016.
- [158] N. E. Roberts and D. D. Wentzloff, "A 98 nW Wake-up Radio for Wireless Body Area Networks," in Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC), IEEE, , pp. 373–376, June 2012.
- [159] S. J. Marinkovic and E. M. Popovici, "Nano-Power Wireless Wake-Up Receiver With Serial Peripheral Interface," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 29, no. 8, pp. 1641–1647, September 2011.
- [160] S. Oh, N. E. Roberts, D. D. Wentzloff, "A 116 nW multi-band wake-up receiver with 31-bit correlator and interference rejection", *Proc. IEEE Custom Integr. Circuits Conf. (CICC)*, November 2013.
- [161] S. Bdiri and F. Derbel, "A nanowatt Wake-Up Receiver for industrial production line," in Systems, Signals Devices (SSD), 2014 11th International Multi-Conference on, February 2014.
- [162] G. U. Gamm, M. Sippel, M. Kostic, L. M. Reindl, "Low power wake-up receiver for wireless sensor nodes", *Proc. 6th ISSNIP*, pp. 121-126, December 2010.
- [163] C. Hambeck, S. Mahlkecht, T. Herndl, "A 2.4J- $\mu$ w wake-up receiver for wireless sensor nodes with 71dBm sensitivity", *Proceedings of the IEEE ISCAS 2011*, pp. 534-537, May 2011.
- [164] H. Milosiu et al., " A 3- ( $\mu$ ) W 868-MHz wake-up receiver with  $-83$  dBm sensitivity and scalable data rate ", *Proc. ESSCIRC*, pp. 387-390, September 2013.
- [165] C. Petrioli, D. Spenza, P. Tommasino, A. Trifiletti, "A Novel Wake-Up Receiver with Addressing Capability for Wireless Sensor Nodes", *Proceedings of IEEE DCOSS*, pp. 18-25, May 2014.
- [166] U. Gamm, and L. Reindl, "IEEE 802.11-enabled wake-up radio system: Design and performance evaluation," *Electron. Lett.*, vol.50, no.20, pp.1484–1486, September 2014.
- [167] D. Spenza, M. Magno, S. Basagni, L. Benini, M. Paoli, C. Petrioli, "Beyond duty cycling: Wake-up radio with selective awakenings for long-lived wireless sensing systems", *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, pp. 522-530, August 2015.
- [168] J. Oller, I. Demirkol, J. Casademont, J. Paradells, G. Gamm, L. Reindl, "Performance evaluation and comparative analysis of subcarrier modulation wake-up radio systems for energy-efficient wireless sensor networks", *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 22-51, 2014.
- [169] F. Sutton, B. Buchli, J. Beutel, L. Thiele, "Zippy: On-Demand Network Flooding", *ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp. 45-58, November 2015.
- [170] S. Bdiri, F. Derbel, "An Ultra-Low Power Wake-Up Receiver for Realtime constrained Wireless Sensor Networks", *AMA Conferences*, pp. 612-617, 2015.

- [171] M. Magno et al., "Design implementation and performance evaluation of a flexible low-latency nanowatt wake-up radio receiver", *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 12, no. 2, pp. 633-644, April 2016.
- [172] Djiroun, F.Z.; Djenouri, D. "MAC Protocols With Wake-Up Radio for Wireless Sensor Networks: A Review". *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 19, 587–618, 2017.
- [173] Sinem Coleri Ergen, "ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary", September 2004.
- [174] Casilari, E. Cano-García, J.M. Campos-Garrido, G., "Modeling of Current Consumption in 802.15.4/ZigBee Sensor Motes", *Sensors*, 10, 5443-5468, 2010.
- [175] Texas Instruments, "Mixed Signal Microcontroller", MSP430F2274-EP, p.1 & 20, September 2008 – revised May 2011. Available on url: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f2274-ep.pdf>.
- [176] Texas Instruments, "Z-Accel 2.4 GHz ZigBee® Processor", CC2480, p. 8. Available on url: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2480a1.pdf>.