

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Τμήμα Διδακτικής της Τεχνολογίας και Ψηφιακών Συστημάτων

ΔΙΑΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ  
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΕΣ ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ

Θεώνη Λιβανού

Η εργασία υποβάλλεται για την μερική κάλυψη των απαιτήσεων  
με στόχο την απόκτηση του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Σπουδών  
στην Διδακτική της Τεχνολογίας και τα Ψηφιακά Συστήματα

Φεβρουάριος 2011

*Αφιερώνεται στους γονείς μου*

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ

## Περίληψη

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks, WSN) αποτελούν σήμερα ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας στον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών. Ωστόσο, λόγω κάποιων από τις ιδιαιτερότητές τους, οι κόμβοι ενός WSN υπόκεινται σε λειτουργικούς και σχεδιαστικούς περιορισμούς, που δημιουργούν νέες προκλήσεις και αντικείμενα έρευνας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Ένα τέτοιο αντικείμενο έρευνας αποτελεί και η συνδεσιμότητα του συνολικού δικτύου, μια έννοια καθοριστική για τη δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και ανταλλαγής πληροφοριών επί της παρατηρούμενης διεργασίας.

Η χρησιμότητα των WSN σε συνδυασμό με την απαίτηση για συνδεσιμότητα αποτέλεσαν το σημείο εκκίνησης για την παρούσα διπλωματική εργασία. Ποιο συγκεκριμένα, επιχειρήθηκε η μελέτη ενός WSN όταν τίθενται θέματα ασφαλείας στον συντονιστή του δικτύου λόγω κάποιων λαθών που προκύπτουν.

Υλοποιήθηκε συνεπώς ένα WSN, αποτελούμενο από τρία PAN (Personal Area Network), των οποίων η επικοινωνία βασίζεται στο πρότυπο της IEEE 802.15.4. Στόχος της πειραματικής διαδικασίας αποτέλεσε η μέτρηση του ποσοστού των απορριφθέντων πακέτων για την επικοινωνία μεταξύ αποστολέα-παραλήπτη, μεταβάλλοντας την τοπολογία του δικτύου από Mesh σε Tree, την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων (data rate) από 250Kbps σε 100Kbps και τον μηχανισμό επιβεβαίωσης πακέτων (ACK) από ενεργό σε μη ενεργό.

Από το στάδιο αυτό της πειραματικής διαδικασίας προέκυψε η σύγκριση όλων των παραπάνω παραμέτρων, με βάση την οποία αναζητήθηκε η ασφαλέστερη υποδομή του δικτύου. Θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον αν επικεντρωνόμασταν στη μελέτη της κατανάλωσης ενέργειας (energy consumption) του κάθε δικτύου. Δυστυχώς όμως, μέχρι και την τελευταία έκδοση του προγράμματος εξομοίωσής μας, OPNET, αυτό δεν κατέσται δυνατό διότι το μοντέλο της κατανάλωσης ενέργειας στο zigbee βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο και δεν μπορούσαμε να το παραμετροποιήσουμε ώστε να λειτουργήσει σωστά στο σενάριό μας.

## Ευχαριστίες

Στην εποχή μας η γνώση, στο μεγαλύτερο τουλάχιστον μέρος της, δεν είναι πια προνόμιο των λίγων αλλά δικαίωμα των πολλών.

Θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τους καθηγητές της σχολής μου οι οποίοι μας δίνουν όχι μόνο τα «κλειδιά» αλλά μας μαθαίνουν και τον τρόπο να ξεκλειδώσουμε τον θησαυρό της γνώσης.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επιμελητή της εργασίας μου κ. Παναγιώτη Δεμέστιχα ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί του για την εκπόνηση της εργασίας. Η προθυμία του όλο αυτό το διάστημα, καθώς και οι γνώσεις που μου προσέφερε πάνω σε αυτό το θέμα αποτέλεσαν βάση για μια επιτυχημένη συνεργασία.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μάριο Λογοθέτη ο οποίος με κατεύθυνε στην αναζήτηση των πληροφοριών καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον σύζυγό μου και τις οικογένειές μας για την εποικοδομητική τους συμπαράσταση μέχρι το πέρας της εργασίας αυτής.

Ελπίζω η εργασία αυτή να είναι αντάξια των προσδοκιών σας.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	i
Ευχαριστίες .....	ii
Περιεχόμενα .....	iii
Κατάλογος Πινάκων .....	v
Κατάλογος Σχημάτων .....	vi
Συνοτομογραφίες .....	ix
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	1
Εισαγωγή .....	1
1.1. Εισαγωγή .....	1
1.2. Δίκτυα αισθητήρων .....	3
Κεφάλαιο 2 .....	4
Βιβλιογραφική Επισκόπηση .....	4
2.1. Εισαγωγή .....	4
2.2. Εφαρμογές .....	5
2.3. Τεχνολογία Zigbee και IEEE802.15.4 .....	12
2.4. IEEE 802.15.4 WPAN .....	14
2.5. Εξαρτήματα του WPAN .....	14
2.6. Τοπολογίες δικτύων .....	14
2.7. Βασικές προκλήσεις στον σχεδιασμό ασύρματων δικτύων αισθητήρων ....	18
2.8. Συσκευές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων .....	24
2.9. Το μοντέλο OSI .....	29
2.10. Αρχιτεκτονική συσκευής LR-WPAN .....	33
Κεφάλαιο 3 .....	36
Μεθοδολογία .....	36
3.1 Εισαγωγή .....	36
3.2 Σενάριο .....	36
3.3 Συλλογή στοιχείων .....	37
Κεφάλαιο 4 .....	39
Αποτελέσματα .....	39
4.1 Εισαγωγή .....	39

4.2 Περιγραφική ανάλυση των δεδομένων.....	39
Κεφάλαιο 5 .....	60
Συμπεράσματα.....	60
5.1 Ανασκόπηση.....	60
5.2 Προτάσεις .....	62
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	63

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑΣ

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 1.1.</b> Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών ασύρματων τεχνολογιών (1980-2011).....	2
<b>Πίνακας 2.1.</b> Ζώνες συχνότητων και ρυθμοί μετάδοσης .....	35
<b>Πίνακας 5.1.</b> Συγκριτική παρουσίαση χαρακτηριστικών του σεναρίου αποτυχίας συντονιστή δικτύου.....	61

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.1.</b> Ασύρματες Τεχνολογίες.....	1
<b>Σχήμα 1.2.</b> Αισθητήριιοι κόμβοι .....	3
<b>Σχήμα 2.1.</b> Χρήση αισθητήριων κόμβων στον τομέα του περιβάλλοντος- έγκαιρη προειδοποίηση πυρκαγιάς.....	5
<b>Σχήμα 2.2.</b> Τοπολογία αστέρα (star topology).....	15
<b>Σχήμα 2.3.</b> Τοπολογία αστέρα (star topology).....	16
<b>Σχήμα 2.4.</b> Τοπολογία πλέγματος (mesh topology).....	17
<b>Σχήμα 2.5.</b> Σχηματικό διάγραμμα κόμβου.....	25
<b>Σχήμα 2.6.</b> Τα 7 επίπεδα του OSI .....	30
<b>Σχήμα 2.7.</b> Αρχιτεκτονική συσκευής LR-WPAN .....	34
<b>Σχήμα 3.1.</b> 3 WPAN networks σε τοπολογία Tree .....	37
<b>Σχήμα 4.1.</b> Zigbee_802_15_4_mac data dropped σε τοπολογία tree.....	39
<b>Σχήμα 4.2.</b> Zigbee_802_15_4_mac Throughput σε τοπολογία tree .....	40
<b>Σχήμα 4.3.</b> Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία tree.....	41
<b>Σχήμα 4.4.</b> 3 WPAN networks σε τοπολογία Mesh.....	42
<b>Σχήμα 4.5.</b> Zigbee_802_15_4_mac data dropped σε τοπολογία Mesh.....	42
<b>Σχήμα 4.6.</b> Zigbee_802_15_4_mac throughput σε τοπολογία Mesh.....	43
<b>Σχήμα 4.7.</b> Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Mesh.....	44
<b>Σχήμα 4.8</b> Zigbee_802_15_4_mac data dropped σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο.....	45
<b>Σχήμα 4.9</b> Zigbee_802_15_4_mac Throughput σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο.....	46
<b>Σχήμα 4.10</b> Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο .....	46
<b>Σχήμα 4.11</b> Zigbee_802_15_4_mac data dropped σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο .....	47
<b>Σχήμα 4.12</b> Zigbee_802_15_4_mac Throughput σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο .....	47
<b>Σχήμα 4.13</b> Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο .....	48



<b>Σχήμα 4.14</b> Zigbee_802_15_4_mac data dropped σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο .....	49
<b>Σχήμα 4.15</b> Zigbee_802_15_4_mac Throughput σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο .....	49
<b>Σχήμα 4.16</b> Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο .....	50
<b>Σχήμα 4.17</b> Zigbee_802_15_4_mac data dropped σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο .....	51
<b>Σχήμα 4.18</b> Zigbee_802_15_4_mac Throughput σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο .....	51
<b>Σχήμα 4.19</b> Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο .....	52
<b>Σχήμα 4.20</b> Zigbee_802_15_4_mac data dropped σε τοπολογία Tree με data rate 250 Kbps .....	53
<b>Σχήμα 4.21</b> Zigbee_802_15_4_mac Throughput σε τοπολογία Tree με data rate 250 Kbps .....	53
<b>Σχήμα 4.22</b> Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Tree με data rate 250 Kbps .....	54
<b>Σχήμα 4.23</b> Zigbee_802_15_4_mac data dropped σε τοπολογία Tree με data rate 100 Kbps .....	54
<b>Σχήμα 4.24</b> Zigbee_802_15_4_mac Throughput σε τοπολογία Tree με data rate 100 Kbps .....	55
<b>Σχήμα 4.25</b> Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Tree με data rate 100 Kbps .....	55
Στο σχήμα 4.26 απεικονίζονται τα πακέτα που χάθηκαν όταν η τοπολογία είναι mesh και το data rate είναι 250 Kbps. Η.....	56
<b>Σχήμα 4.26</b> Zigbee_802_15_4_mac data dropped σε τοπολογία Mesh με data rate 250 Kbps .....	56
<b>Σχήμα 4.27</b> Zigbee_802_15_4_mac Throughput σε τοπολογία Mesh με data rate 250 Kbps .....	57
<b>Σχήμα 4.28</b> Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Mesh με data rate 250 Kbps .....	57

<b>Σχήμα 4.29</b> Zigbee_802_15_4_mac data dropped σε τοπολογία Mesh με data rate 100 Kbps .....	58
<b>Σχήμα 4.30</b> Zigbee_802_15_4_mac Throughput σε τοπολογία Mesh με data rate 100 Kbps .....	59
<b>Σχήμα 4.31</b> Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Mesh με data rate 100 Kbps .....	59

## Συντομογραφίες

### Λατινικές

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
Mbits/sec	Megabits/second
MCU	Multipoint Control Unit
PHY	PHYSical layer
MAC	Medium Access Control
LLC	Logical Link Control
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
LME	Layer Management Entity
PPDU	PHY Protocol Data Units
ED	Energy Detection
LQI	Link Quality Indication
CCA	Clear Channel Assessment
Kbps	Kilobit per second
PLME	Physical Layer Management Entity
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
ISM	Industrial, Scientific and Medical
RF	Radio Frequency
TDMA	Time Division Multiple Access
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
GPS	Global Positioning System
ADCs	Analog to Digital Converters
OSI	Open Systems Interconnection
ISO	International Organization for Standardization
TCP	Transmission Control Protocol
IP	Internet Protocol
UDP	User Datagram Protocol
ACK	Acknowledgement
SCTP	Stream Control Transmission Protocol

FDX	Full-DupleX
HDX	Half-DupleX
LR-WPAN	Low Rate-Wireless Personal Area Network
MIME	Multipurpose Internet Mail Extensions
EBCDIC	Extended Binary Coded Decimal Interchange Code
XML	Extensible Markup Language
ASCII	American Standard Code for Information Interchange

### **Ελληνικές**

Η.Π.Α.	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
--------	-----------------------------

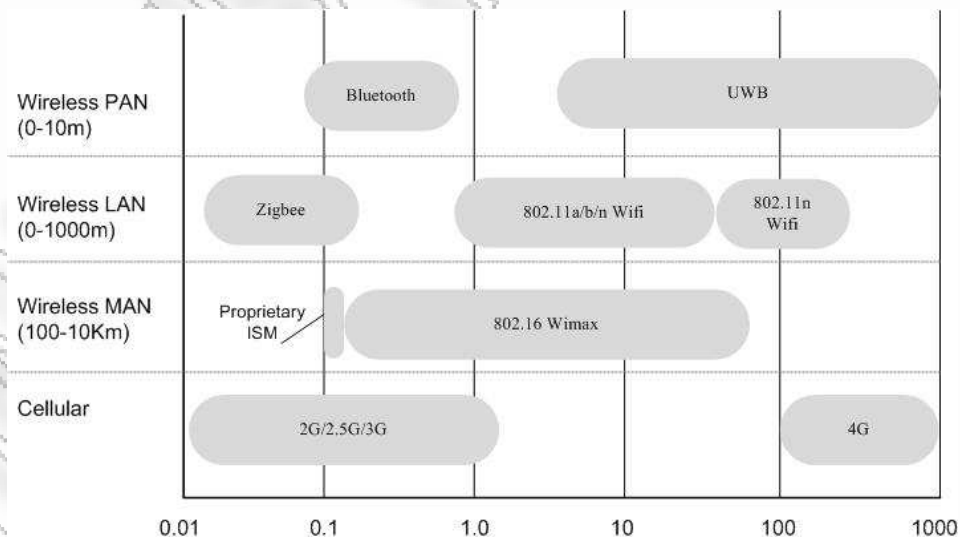
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

### 1.1. Εισαγωγή

Η έντονη προτίμηση που δείχνει το καταναλωτικό κοινό στην εποχή μας, για τις ασύρματες επικοινωνίες, λόγω της ελευθερίας που αυτές παρέχουν, έχει οδηγήσει στη ραγδαία ανάπτυξη τους. Αυτή η ανάπτυξη παρατηρείται στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2<sup>ης</sup>, 3<sup>ης</sup> και πλέον 4<sup>ης</sup> γενιάς καθώς και στα ασύρματα δίκτυα.

Βάση για την ανάπτυξη αυτή ήταν το πρότυπο IEEE 802.11 το οποίο παρέχει ρυθμό μετάδοσης 2 megabits ανά δευτερόλεπτο (2Mbits/sec), με βελτιωμένες εκδόσεις του προτύπου αυτού το IEEE 802.11.n με ρυθμό μετάδοσης έως 150 Mbits/sec, καθώς και τα πρότυπα Bluetooth, ή όπως λέγεται πλέον 802.15.1, τα IEEE 802.15.3 και IEEE 802.15.4, μας δίνουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε τα ασύρματα δίκτυα σε πάρα πολλές εφαρμογές όπως η περιήγηση στο Internet, η ανταλλαγή δεδομένων, ή η αποστολή και λήψη ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.



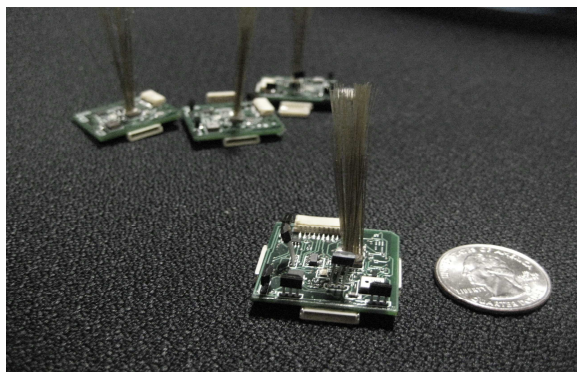
Σχήμα 1.1. Ασύρματες Τεχνολογίες.

(Από τη δεκαετία του '80 έως σήμερα, 2011) [1]

**Πίνακας 1.1.** Συγκριτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών ασύρματων τεχνολογιών (1980-2011) [2]

	Bluetooth	UWB	Zigbee	802.11a/ b/g	802.11n	Proprietary	802.16a	2G/2.5G/3G
Typical Range	<10m	10-30m	70-300m	100m	100m	10Km	50Km	Cellular Network
Modulation	Adaptive FHSS	OFDM or DS-UWB	DSSS	DSSS	DSSS	FHSS	QAM	CDMA/GSM AMPS
Freq. Range	2.4GHz	3.1-10.6GHz	868/915 MHz 2.4GHz	2.4GHz 5.8GHz a	2.4GHz	915MHz & 2.4GHz	2-11GHz	869-894MHz
Network	P2P	P2P	Mesh	IP & P2P	IP & P2P	P2P	IP	IP
IT Network Connectivity	NO	NO	NO	YES	YES	NO	YES	YES
Cost of Data	FREE	FREE	FREE	FREE	FREE	FREE	FREE	Monthly Charge
Application	Cable Replacement	Sync & Transmission of video/audio data	Sensor Networks	LAN Internet	LAN Internet	Point to Point Connectivity	Metro area broadband Internet Connectivity	Cellular telephones & telemetry

Ένα άλλο πολύ σημαντικό στοιχείο που βοήθησε την εξάπλωση των ασύρματων δικτύων, είναι και η πρόοδος που έχει σημειωθεί τόσο στην ηλεκτρονική όσο και στην μικροηλεκτρονική τεχνολογία. Έτσι δόθηκε η δυνατότητα κατασκευής μικρών στο μέγεθος κομβικών αισθητήρων (sensor nodes), οι οποίοι έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, χαμηλή κατανάλωση και μπορούν να επικοινωνούν σε μικρές αποστάσεις. Από τη στιγμή που δόθηκε η δυνατότητα να έχουμε πολλούς μικρούς κόμβους, οι οποίοι θα μπορούν να παίρνουν διάφορες μετρήσεις, να τις επεξεργάζονται και να τις ανταλλάσσουν μεταξύ τους, μπορούσε πλέον να αναπτυχθεί η ιδέα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.



Σχήμα 1.2. Αισθητήριοι κόμβοι. [2]

## 1.2. Δίκτυα αισθητήρων

Η σχεδίαση των δικτύων αυτών επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

Οι αισθητήρες τοποθετούνται μακριά από το φαινόμενο που πρόκειται να μετρήσουν. Σε αυτή την σχεδίαση, είναι απαραίτητη η χρήση περίπλοκων τεχνικών ώστε να ξεχωρίσουμε τη μέτρηση από τον περιβάλλοντα θόρυβο.

Οι αισθητήρες τοποθετούνται κοντά στο φαινόμενο που πρόκειται να μετρήσουν. Στη σχεδίαση αυτή χρησιμοποιούνται αισθητήρες οι οποίοι πραγματοποιούν μόνο μετρήσεις. Οι θέσεις των αισθητήρων και η τοπολογία τους σχεδιάζονται προσεκτικά. Οι αισθητήρες μεταδίδουν τις μετρήσεις στους κεντρικούς κόμβους οι οποίοι διαθέτουν ενσωματωμένο επεξεργαστή και αντί να στέλνουν ροές δεδομένων στους κόμβους, που είναι υπεύθυνοι για τη συγχώνευση, χρησιμοποιούν τον επεξεργαστή τους ώστε να κάνουν απλούς συνήθως υπολογισμούς και να μεταδώσουν μόνο τα απαραίτητα και μερικώς επεξεργασμένα δεδομένα. Ένα άλλο στοιχείο που προκύπτει από την σχεδίαση και εγκατάσταση ενός τέτοιου δικτύου, είναι ότι δεν είναι ανάγκη να γνωρίζουμε εκ των προτέρων την τοπολογία που θα χρησιμοποιήσουμε. Αυτό μας δίνει πολλές δυνατότητες όπως την εγκατάσταση τέτοιων δικτύων σε περιοχές που επικρατούν ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας ή που είναι ακατάλληλες για τον άνθρωπο, όπως μέσα σε ηφαίστεια ή στο εσωτερικό μιας μηχανής εσωτερικής καύσης. [3]

## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική Επισκόπηση

### 2.1. Εισαγωγή

Αφού εξετάσαμε κάποια από τα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων, θα δούμε και κάποιες εφαρμογές στις οποίες ενδείκνυται η χρήση τους.

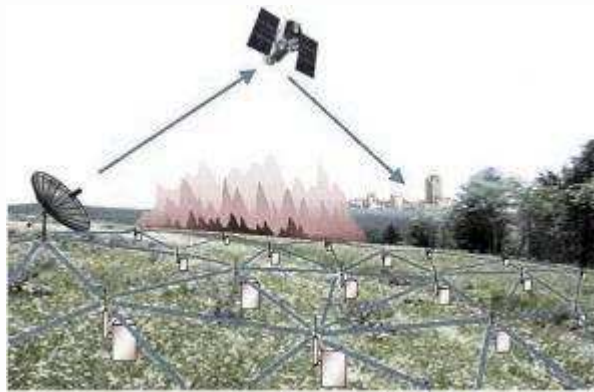
Ένα δίκτυο αισθητήρων μπορεί να παρακολουθεί ένα μεγάλο αριθμό περιβαλλοντολογικών καταστάσεων όπως: θερμοκρασία, υγρασία, πίεση, επίπεδα θορύβου, κίνηση οχημάτων, χαρακτηριστικά, όπως ταχύτητα, κατεύθυνση ενός αντικειμένου. Για τον λόγο αυτό, ένα τέτοιο δίκτυο, μπορεί να αποτελείται από πολλούς και διαφορετικού τύπου αισθητήρες (ετερογένεια). Υπάρχουν λοιπόν αισθητήρες σεισμικοί, θερμικοί, ακουστικοί, αισθητήρες κίνησης κ.ά. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε εν συντομία κάποιες εφαρμογές των δικτύων αυτών από διαφορετικούς τομείς της καθημερινής μας ζωής.

Στον τομέα της υγείας, ένα τέτοιο δίκτυο θα μπορούσε να παρακολουθεί και να καταγράφει την κατάσταση του ασθενούς και να ενημερώνει συνεχώς το ιατρικό προσωπικό.

Στον τομέα της προστασίας του περιβάλλοντος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την έγκαιρη προειδοποίηση πυρκαγιάς.

Στον τομέα της βιομηχανίας για τον έλεγχο των εγκαταστάσεων και για διάφορες μετρήσεις καθώς επίσης θα μπορούσε να καλυτερεύσει και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων με εφαρμογές και αυτοματισμούς για το σπίτι (Εξυπνα Σπίτια).





**Σχήμα 2.1.** Χρήση αισθητήριων κόμβων στον τομέα του περιβάλλοντος- έγκαιρη προειδοποίηση πυρκαγιάς. [4]

## 2.2. Εφαρμογές

Με τη βοήθεια των ασύρματων δικτύων αισθητήρων μας δίνεται πλέον η δυνατότητα να παρατηρούμε την ανίχνευση και παρακολούθηση των κινήσεων ζώων και πτηνών, την παρακολούθηση των καιρικών συνθηκών που επηρεάζουν τις καλλιέργειες, τον έλεγχο των συστημάτων άρδευσης, των εντοπισμό ρυπογόνων ουσιών στο έδαφος, τη γη και τον αέρα, τον έλεγχο της βιοποικιλότητας καθώς και την ανίχνευση πυρκαγιών. Ας δούμε πιο αναλυτικά κάποιες από αυτές τις εφαρμογές.

*Οικολογικός έλεγχος βιοτόπου.* Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται, όταν επιστήμονες παρατηρούν και μελετούν έναν βίοτοπο, είναι η ίδια η παρουσία και οι ενδεχομένως παρεισφορητικές δραστηριότητες των επιστημόνων που μπορούν να έχουν επιπτώσεις στη συμπεριφορά των οργανισμών στον ελεγχόμενο βίοτοπο και να προκαλέσουν έτσι μη ακριβή αποτελέσματα (“επίδραση παρατηρητών”). Σε αυτή την περίπτωση, ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, μπορεί να λειτουργήσει ως ένας μακρινός παρατηρητής που όμως δεν θα γίνεται αισθητός από τους οργανισμούς τους οποίους παρατηρεί. Ακόμα, τα δίκτυα λόγω της μεγάλης έκτασης που μπορεί να έχουν και της χωροχρονικής πυκνότητάς τους, μπορούν να παρέχουν τα πειραματικά στοιχεία μιας πρωτοφανούς αφθονίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας εφαρμογής είναι το δίκτυο που βρίσκεται στον βίοτοπο στο Maine, στο μεγάλο νησί των παπιών. Εκεί ερευνητές

από το ερευνητικό εργαστήριο της Intel στο Μπέρκλεϋ, το πανεπιστήμιο Καλιφόρνιας στο Μπέρκλεϋ, και το κολλέγιο του Ατλαντικού στο Harbor έχει τοποθετήσει τους κόμβους αισθητήρων για να μετρήσει το φως, την βαρομετρική πίεση, τη σχετική υγρασία και θερμοκρασία κ.ά. Τα δεδομένα που συλλέγονταν γίνονταν διαθέσιμα στους ερευνητές, μέσω ενός σταθμού στο νησί που συνδεόταν με μια δορυφορική σύνδεση.

*Γεωργία.* Μερικές από τις εφαρμογές στη γεωργία είναι η παρακολούθηση, σε πραγματικό χρόνο, του επιπέδου εμφάνισης φυτοφαρμάκων στο πόσιμο νερό, του επιπέδου διάβρωσης του εδάφους και του επιπέδου μόλυνσης του αέρα.

*Δασική πυρανίχνευση.* Ένα δίκτυο που θα αποτελείται από πολλούς κόμβους, οι οποίοι θα είναι πυκνά εκτεταμένοι σε ένα δάσος, μπορεί να εντοπίσει έγκαιρα την ακριβή προέλευση της πυρκαγιάς, ώστε να είναι εφικτή η κατάσβεσή της πριν αυτή γίνει ανεξέλεγκτη. Το πλήθος των κόμβων που θα χρησιμοποιηθεί, μπορεί να είναι εξοπλισμένο με συστήματα επαναφόρτισης, όπως ηλιακούς συλλέκτες, ώστε να μπορεί για μεγάλο χρονικό διάστημα να μη χρειάζεται συντήρηση. Οι κόμβοι μπορούν να ξεπεράσουν εμπόδια στη μεταφορά των δεδομένων, που προκύπτουν από τα δέντρα και τους βράχους, αν συνεργαστούν ο ένας με τον άλλο.

*Ανίχνευση πλημμύρων.* Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας εφαρμογής, είναι το σύστημα ALERT το οποίο λειτουργεί στις Η.Π.Α.. Το σύστημα αυτό αποτελείται από διαφορετικά είδη αισθητήρων. Αισθητήρες που μετρούν το ύψος της βροχόπτωσης, το ύψος του νερού και της καιρικές συνθήκες. Τα δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες στέλνονται στο σύστημα κεντρικών βάσεων δεδομένων. Ερευνητικά προγράμματα όπως το COUGAR Device Database Project του Cornell και το Dataspace Project του Rutgers, είναι διανεμημένες προσεγγίσεις στην αλληλεπίδραση με τους κόμβους αισθητήρων για να είναι δυνατή η λήψη προληπτικών μέτρων σε σύντομο αλλά και μακροπρόθεσμο διάστημα.

*Στρατιωτικές εφαρμογές.* Είναι δυστυχώς γεγονός ότι οι περισσότερες νέες τεχνολογίες πληροφοριών, όπως τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, εξελίσσονται κυρίως για τη στρατιωτική έρευνα. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να εγκατασταθεί και να επεκταθεί γρήγορα για την επιτήρηση των πεδίων μαχών ώστε να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη θέση, τους αριθμούς, τη μετακίνηση, και την ταυτότητα των εχθρικών στρατευμάτων και οχημάτων, και για την ανίχνευση χημικών, βιολογικών ή πυρηνικών όπλων. Μεγάλο μέρος ευθύνης για την ραγδαία ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχει η US Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). Η ικανότητα των δικτύων να παρέχουν πυκνή κάλυψη μιας περιοχής, με χαμηλό κόστος χρήσης και να μην επηρεάζονται από την καταστροφή κάποιων κόμβων, που μπορεί να προκληθεί σε μια στρατιωτική επιχείρηση, τα καθιστά ιδανικά για την επιτήρηση πεδίων μαχών.

*Έλεγχος φιλικών δυνάμεων, εξοπλισμού και πυρομαχικών.* Με τη χρήση ενός δικτύου αισθητήρων, είναι δυνατή η παρακολούθηση της θέσης φιλικών στρατευμάτων, την κατάσταση του εξοπλισμού, και την διαθεσιμότητα των πυρομαχικών σε ένα πεδίο μάχης. Κάθε στράτευμα, όχημα και εξοπλισμός, μπορεί να συνδέεται με αισθητήρες ώστε να είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσεις του. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποστέλλονται στη διοίκηση του στρατού.

*Αξιολόγηση των απωλειών στο πεδίο της μάχης.* Από τη στιγμή που όλα τα στρατεύματα, οχήματα και όλος ο εξοπλισμός παρακολουθούνται από αισθητήρες, είναι εύκολο κατά τη διάρκεια ή αμέσως μετά από μια στρατιωτική επιχείρηση να γίνει γρήγορη καταγραφή των απωλειών.

*Ανίχνευση και αναγνώριση πυρηνικών, βιολογικών και χημικών επιθέσεων.* Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν έγκαιρα να εντοπίσουν την ύπαρξη και χρήση χημικών ή βιολογικών όπλων και να στείλουν προειδοποίηση σε πολύ μικρό χρόνο μειώνοντας έτσι τις ανθρώπινες απώλειες.

*Στόχευση.* Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να ενσωματωθούν στα συστήματα κατεύθυνσης ευφυών οπλικών συστημάτων.

*Εφαρμογές σε τομείς της υγείας.* Στον τομέα της υγείας, τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πιο ολοκληρωμένη παρακολούθηση ασθενών, τον έλεγχο των φαρμακευτικών αγωγών στα νοσοκομεία, τη δυνατότητα παρακολούθησης των βιομετρικών δεδομένων των ασθενών, την άμεση επέμβαση στο χώρο ενός ατυχήματος ή μιας καταστροφής, τον εντοπισμό γιατρών και ασθενών στους χώρους του νοσοκομείου κ.ά.

*Παρακολούθηση των ανθρώπινων βιομετρικών δεδομένων.* Εάν σε ένα νοσοκομείο οι ασθενείς είναι εξοπλισμένοι με ασύρματους αισθητήρες, ικανούς να φορεθούν, και οι οποίοι θα συλλέγουν σε πραγματικό χρόνο χρήσιμα βιομετρικά δεδομένα των ασθενών, θα δίνεται η δυνατότητα στο ιατρικό και νοσηλευτικό προσωπικό για συνεχή έλεγχο της κατάστασης των ασθενών. Τα δεδομένα αυτά θα μπορούν να αποθηκεύονται και να χρησιμοποιούνται για ερευνητικούς σκοπούς. Ένα τέτοιο σύστημα παρακολούθησης ασθενών που χρησιμοποιεί την πλατφόρμα CodeBlue εκπονείται στο Ιατρικό Κέντρο της Βοστώνης, το Νοσοκομείο Αποκατάστασης Spaulding, και το Πανεπιστήμιο Johns Hopkins.

*Παρακολούθηση και εντοπισμός ασθενών και γιατρών.* Όπως έχουμε περιγράψει, οι ασθενείς ενός νοσοκομείου θα μπορούσαν να έχουν πάνω τους μικρούς και ελαφριούς αισθητήρες που ο καθένας τους θα εκτελεί διαφορετική λειτουργία. Για παράδειγμα, ένας για τον έλεγχο του καρδιακού ρυθμού, ένας για τη μέτρηση της πίεσης του και ένας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του σώματός του. Θα ήταν όμως επίσης χρήσιμο να είχαν και οι γιατροί πάνω τους έναν αισθητήρα που θα επέτρεπε τον γρήγορο εντοπισμό τους σε περίπτωση ανάγκης από τους συναδέλφους τους στο χώρο του νοσοκομείου.

*Οικιακοί αυτοματισμοί.* Με τη χρήση κόμβων αισθητήρων και ενεργοποιητών που μπορούν να τοποθετηθούν σε οικιακές συσκευές όπως ψυγεία, φούρνοι

μικροκυμάτων, DVD players, πλυντήρια κ.ά., δίνεται η δυνατότητα στις συσκευές αυτές να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους καθώς και να συνδεθούν στο Internet. Με αυτό τον τρόπο οι χρήστες των συσκευών αυτών θα μπορούν να τις χειρίζονται πιο εύκολα και από απόσταση.

*Εξυπνο περιβάλλον.* Το σχέδιο για την ανάπτυξη ενός έξυπνου περιβάλλοντος μπορεί να εξεταστεί από δύο πλευρές: την ανθρωποκεντρική και την τεχνολογική. Στην πρώτη περίπτωση το περιβάλλον θα πρέπει να μπορεί να προσαρμόζεται στις ανάγκες των χρηστών που ζουν και κινούνται μέσα σε αυτό. Από την πλευρά της τεχνολογίας πρέπει να αναπτυχθούν νέες τεχνολογίες σε επίπεδο υλικού, λύσεις για τη διασύνδεση αλλά και ενδιάμεσες υπηρεσίες. Ένα παράδειγμα δημιουργίας έξυπνου περιβάλλοντος είναι το ακόλουθο. Οι κόμβοι αισθητήρων ενσωματώνονται στα έπιπλα και στις συσκευές ώστε να μπορούν να επικοινωνήσουν τόσο μεταξύ τους όσο και με τον κεντρικό υπολογιστή δωματίου. Ο κεντρικός υπολογιστή δωματίου μπορεί να επικοινωνήσει με άλλους υπολογιστές δωματίων και να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες που εκείνοι προσφέρουν. Για παράδειγμα να δει την θερμοκρασία που υπάρχει σε ένα δωμάτιο, να βάλει μουσική σε ένα άλλο ή να στείλει να εκτυπώσει ένα έγγραφο σε ένα δωμάτιο που υπάρχει εκτυπωτής. Οι κόμβοι αισθητήρων μαζί με τους κεντρικούς υπολογιστές αποτελούν ένα ενοποιημένο σύστημα που μπορεί να προγραμματίζεται, να οργανώνεται και να αυτορυθμίζεται.

*Εμπορικές εφαρμογές.* Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια πληθώρα εμπορικών εφαρμογών όπως στον έλεγχο καταπόνησης υλικών, στον έλεγχο περιμέτρου εγκαταστάσεων, στον ποιοτικό έλεγχο προϊόντων, στον έλεγχο περιβάλλοντος σε γραφεία, στον έλεγχο και στην παρακολούθηση περιοχών που έχουν υποστεί καταστροφή, στη διάγνωση προβλημάτων, στον εντοπισμό αυτοκινήτων, στον έλεγχο κίνησης αυτοκινήτων κ.ά.

*Έλεγχος περιβάλλοντος σε γραφεία κτιρίων.* Με τα μέχρι τώρα συστήματα κλιματισμού η θερμοκρασία από τη μία άκρη ενός δωματίου σε μια άλλη

μπορούσε να διαφέρει καθώς υπάρχει μόνο ένας μηχανισμός ελέγχου και η ροή του αέρα δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη. Αυτό μπορεί να διορθωθεί με τη χρήση ενός σωστά κατανεμημένου ασύρματου δικτύου αισθητήρων που θα ελέγχει τη θερμοκρασία και τη σωστή ροή του αέρα σε διαφορετικά σημεία του δωματίου.

*Έλεγχος απογραφών.* Ένα ασύρματο δίκτυο θα μπορούσε να διευκολύνει πάρα πολύ και την οργάνωση των αποθηκών. Θα αρκούσε κάθε αντικείμενο να έχει ένα μικρό αισθητήρα πάνω του για να γνωρίζει ο χρήστης κάθε στιγμή την ακριβή θέση του αντικειμένου αυτού. Με την ίδια λογική, σε κάθε νέο αντικείμενο που θα έφτανε στην αποθήκη θα έπρεπε απλά να τοποθετηθεί ένας αισθητήρας για να γίνει και αυτό μέρος του δικτύου.

*Έλεγχος κυκλοφορίας.* Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να προσφέρουν μια πιο οικονομική λύση στην ανίχνευση οχημάτων. Οι κόμβοι αισθητήρων, μαζί με μαγνητικούς αισθητήρες, μπορούν να επιφέρουν επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο συλλέγονται οι πληροφορίες για τις διάφορες εφαρμογές μεταφορών, παρέχοντας μετρήσεις με μεγάλη πυκνότητα και ακρίβεια. Στους αυτοκινητοδρόμους, τα μαγνητικά στοιχεία αισθητήρων μπορούν να καταγράψουν την κυκλοφορία των οχημάτων, βοηθώντας έτσι στην μελέτη και βελτίωση της, καθώς και να ανιχνεύσουν διάφορα άλλα γεγονότα.

*Μέρος ελεγχόμενου χώρου στάθμευσης.* Μια άλλη εφαρμογή των μαγνητικών αισθητήρων είναι η τοποθέτηση τους σε χώρους στάθμευσης ώστε να καθορίζονται οι ελεύθερες θέσεις. Σε κάθε θέση στάθμευσης θα έχουν τοποθετηθεί ένας ή περισσότεροι κόμβοι αισθητήρων οι οποίοι θα ανιχνεύουν την παρουσία ενός οχήματος και θα αναμεταδίδουν την πληροφορία αυτή στον κεντρικό ελεγκτή. Ο ελεγκτής στη συνέχεια θα μπορεί να καθοδηγήσει σωστά και εύκολα τους οδηγούς στις ελεύθερες θέσεις.

*Δομικός και σεισμικός έλεγχος.* Ο έλεγχος της σωστής κατάστασης και λειτουργίας διάφορων αστικών δομών, όπως κτήρια, γέφυρες, δρόμοι ή ακόμα

και αεροσκάφη, γίνεται είτε με χειρωνακτικές ή οπτικές επιθεωρήσεις ειδικών συνεργείων, ή με τη χρήση χρονοβόρων και με υψηλό κόστος τεχνολογιών όπως ακτίνες-X και υπερήχους. Οι αφύλακτες δικτυωμένες τεχνικές αντίληψης μπορούν να αυτοματοποιήσουν τη διαδικασία, που παρέχει τις πλούσιες και έγκαιρες πληροφορίες για τις αρχικές ρωγμές ή για άλλη δομική ζημία. Μια μελλοντική πρόκληση είναι να μπορέσουν να ενσωματωθούν οι αισθητήρες είτε μέσα στο οικοδομικό υλικό είτε στην επιφάνεια του οικοδομήματος. Τα δίκτυα μπορούν έτσι να ελέγχουν τη μακροπρόθεσμη αντοχή των δομών και την κατάσταση τους ύστερα από καταστροφές όπως σεισμοί ή εκρήξεις. Ένα πιο μακροπρόθεσμο και ίσως φανταστικό σενάριο, είναι να υπάρχουν μέσα στις δομές και ενεργοποιητές μαζί με τους αισθητήρες, οι οποίοι θα αντιδρούν σε πραγματικό χρόνο στις πληροφορίες των αισθητήρων και θα εκτελούν «ηχώ-ακύρωση» στα σεισμικά κύματα κάνοντας έτσι την κατασκευή απρόσβλητη από σεισμούς ή άλλες διαταραχές

*Βιομηχανική και εμπορική δικτυωμένη αντίληψη.* Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη βιομηχανία για να ελέγχουν τη σωστή λειτουργία των εγκαταστάσεων. Για παράδειγμα, σε χημικές εγκαταστάσεις με πολλές βαθμίδες επεξεργασίας, μπορούν να τοποθετηθούν αισθητήρες σε διαφορετικά σημεία της διαδικασίας και να ελέγχουν, σε πραγματικό χρόνο, τη θερμοκρασία, τη χημική συγκέντρωση, την πίεση, κ.ά. [6,7]

Μέχρι σήμερα, για να πραγματοποιήσουμε τις παραπάνω εφαρμογές χρησιμοποιούσαμε τα AD HOC ασύρματα δίκτυα. Η AD HOC τεχνική επιτρέπει σε διάφορες ασύρματες συσκευές, που βρίσκονται μέσα σε μια συγκεκριμένη εμβέλεια, να επικοινωνούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας peer-to-peer τεχνολογία. Δυστυχώς αυτή η τεχνική δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις των δικτύων αισθητήρων. Αυτό το καταλαβαίνουμε αν συγκρίνουμε τα χαρακτηριστικά των δικτύων αισθητήρων και των AD HOC δικτύων.

Οι κυριότερες διαφορές ανάμεσα στα δίκτυα αισθητήρων και τα ad hoc δίκτυα είναι:

- Ο αριθμός των κόμβων σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι συνήθως αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από ότι είναι στα ad hoc δίκτυα.
- Οι κόμβοι αναπτύσσονται με μεγάλη πυκνότητα.
- Η τοπολογία των κόμβων αλλάζει πάρα πολύ συχνά.
- Η μεθοδολογία εκπομπής των κόμβων είναι συνήθως ένας προς πολλούς (mesh networking), ενώ στα ad hoc δίκτυα είναι συνήθως από σημείο προς σημείο (point-to-point).

Οι κόμβοι διακρίνονται για τους σημαντικούς περιορισμούς που έχουν, εκ κατασκευής, στους τομείς της ενέργειας, της υπολογιστικής ισχύος και της μνήμης. [5]

### **2.3. Τεχνολογία Zigbee και IEEE802.15.4**

Η τεχνολογία ZigBee είναι ένα πρωτόκολλο χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, χαμηλού κόστους, ασύρματης δικτύωσης που στοχεύει στον αυτοματισμό και στην εφαρμογή απομακρυσμένου ελέγχου. Η επιτροπή IEEE 802.15.4 άρχισε να εργάζεται πάνω σε ένα πρότυπο χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Στη συνέχεια, η συμμαχία ZigBee (Zigbee Alliance<sup>1</sup>) και η IEEE αποφάσισαν να ενώσουν τις δυνάμεις τους και το ZigBee πλέον είναι η εμπορική ονομασία γι' αυτή την τεχνολογία.

Το ZigBee αναμένεται να προσφέρει χαμηλού κόστους και χαμηλής ενέργειας συνδεσιμότητα για εξοπλισμό ο οποίος χρειάζεται διάρκεια ζωής της μπαταρίας από μερικούς μήνες έως αρκετά χρόνια, αλλά δεν απαιτεί τη μεταφορά δεδομένων σε ποσοστά τόσο υψηλά όσο με εκείνες που ενεργοποιούνται από το Bluetooth. Επιπλέον, το ZigBee μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα πλέγματος μεγαλύτερα από ότι είναι δυνατό με το Bluetooth. Οι συμβατές ασύρματες συσκευές ZigBee

---

<sup>1</sup> Ιδρύθηκε το 2002 και είναι μια ανοιχτή, μη κερδοσκοπική ένωση μελών παγκοσμίως. Αποτελείται από επιχειρήσεις, πανεπιστήμια και κυβερνητικούς φορείς από όλο τον κόσμο. Σήμερα, έχουν δημιουργήσει μια αναπτυσσόμενη οικογένεια από καινοτόμα, αξιόπιστα και εύκολα στη χρήση πρότυπα ZigBee.



αναμένεται να μπορούν διαβιβάσουν στα 10-75 μέτρα, ανάλογα με το περιβάλλον RF και την κατανάλωση ισχύς που απαιτείται για μια δεδομένη εφαρμογή, και θα λειτουργήσει στην παγκόσμια χωρίς άδεια RF (2.4GHz παγκόσμια, 915MHz στην Αμερική ή 868 MHz στην Ευρώπη). Ο ρυθμός δεδομένων είναι 250kbps στα 2.4GHz, 40kbps στα 915MHz και 20kbps στα 868MHz. [7]

Η IEEE και η συμμαχία ZigBee συνεργάζονται στενά για να καθορίσουν το σύνολο της στοίβας του πρωτοκόλλου. Το IEEE 802.15.4 επικεντρώνεται στις προδιαγραφές των χαμηλότερων δύο στρωμάτων του πρωτοκόλλου (Physical και Data Link Layer). Από την άλλη πλευρά, η συμμαχία ZigBee έχει ως στόχο να παράσχει τα ανώτερα στρώματα της στοίβας του πρωτοκόλλου (από το δίκτυο στο επίπεδο εφαρμογής) για διαλειτουργικές δικτύωσεις δεδομένων, υπηρεσίες ασφαλείας και ένα φάσμα από ασύρματες λύσεις για το σπίτι και λύσεων διαχείρισης κτιρίων, διασφάλιση της διαλειτουργικότητας του ελέγχου συμμόρφωσης, της εμπορικότητας του προτύπου, της προηγμένης τεχνολογίας, για την εξέλιξη του προτύπου. Αυτό θα εξασφαλίσει στους καταναλωτές να αγοράζουν προϊόντα από διάφορους κατασκευαστές με την εμπιστοσύνη ότι τα προϊόντα θα λειτουργούν μεταξύ τους.

Το IEEE 802.15.4 προσδιορίζει αναλυτικά το επίπεδο PHY και MAC προσφέροντας δομικά στοιχεία για τα διάφορα είδη δικτύωσης που είναι γνωστά ως «αστέρας, πλέγμα και το δενδροειδής" ("star, mesh, and cluster tree"). Τα σχήματα δρομολόγησης δικτύων αποβλέπουν στη διασφάλιση της διατήρησης ισχύος, και χαμηλής λανθάνουσας κατάστασης μέσω εγγυημένων χρονοθυρίδων (slots). Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του στρώματος δικτύου ZigBee είναι ο πλεονασμός επικοινωνίας εξαλείφοντας «ατομικά σημεία αποτυχίας" σε δίκτυα πλέγματος. Βασικά χαρακτηριστικά του επιπέδου PHY περιλαμβάνουν την ενέργεια και την ανίχνευση της ποιότητας σύνδεσης και τη σαφή εκτίμηση καναλιού για τη βελτίωση της συνύπαρξης με τα άλλα ασύρματα δίκτυα. [8]

## 2.4. IEEE 802.15.4 WPAN

Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού του προτύπου είναι η ευελιξία του δικτύου, το χαμηλό κόστος, η πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, και ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων σε ένα adhoc δίκτυο το οποίο αυτο-οργανώνεται μεταξύ των οικονομικών, σταθερών και φορητών κινούμενων συσκευών. Έχει αναπτυχθεί για εφαρμογές με χαλαρές απαιτήσεις απόδοσης που δεν μπορούν να χειριστούν την κατανάλωση ενέργειας των βαρέων στοιβών του πρωτοκόλλου. [8]

## 2.5. Εξαρτήματα του WPAN

Ένα σύστημα ZigBee αποτελείται από διάφορα συστατικά. Το πιο βασικό είναι η συσκευή. Μια συσκευή μπορεί να είναι μια συσκευή πλήρους λειτουργίας (FFD) ή με μειωμένη λειτουργία (RFD). Ένα δίκτυο πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον μία FFD, η οποία λειτουργεί ως συντονιστής του δικτύου PAN.

Η FFD μπορεί να λειτουργήσει με τρεις τρόπους: ως ένας συντονιστής προσωπικού δικτύου (PAN), ως συντονιστής ή ως μια τερματική συσκευή. Μια RFD προορίζεται για εφαρμογές που είναι εξαιρετικά απλές και δεν χρειάζεται να στείλουν μεγάλες ποσότητες δεδομένων. Μια FFD μπορεί να επικοινωνήσει με RFDs ή FFDS ενώ μία RFD μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με μία FFD. [8]

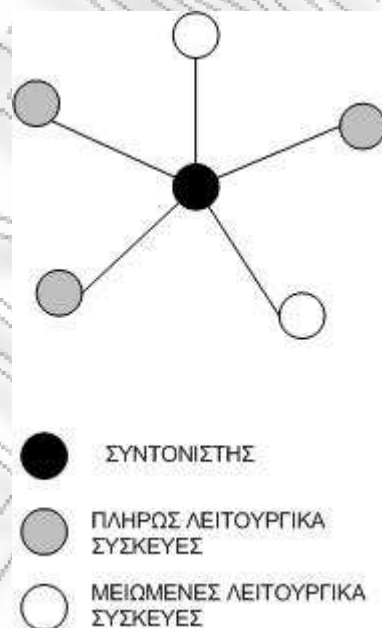
## 2.6. Τοπολογίες δικτύων

Οι τρόποι δικτύωσης των συσκευών ασύρματων δικτύων αισθητήρων, εξαρτώνται από το είδος της εφαρμογής. Στις βασικές εφαρμογές συλλογής δεδομένων, όλα τα δεδομένα κατευθύνονται από τους κόμβους αισθητήρων σε ένα κόμβο ο οποίος ονομάζεται σταθμός κόμβων (sink). Μιλάμε δηλαδή για τοπολογία αστέρα ενός επιπέδου, όπου όλοι οι κόμβοι στέλνουν τα δεδομένα τους άμεσα στον σταθμό κόμβων. Σε περίπτωση που ένα δίκτυο είναι ανάγκη να επεκταθεί πέρα από μια μεγάλη περιοχή, μερικοί κόμβοι μπορούν να ενεργήσουν

οι ίδιοι ως σταθμοί κόμβων, καθώς επίσης και σαν δρομολογητές για άλλους σταθμούς κόμβων.

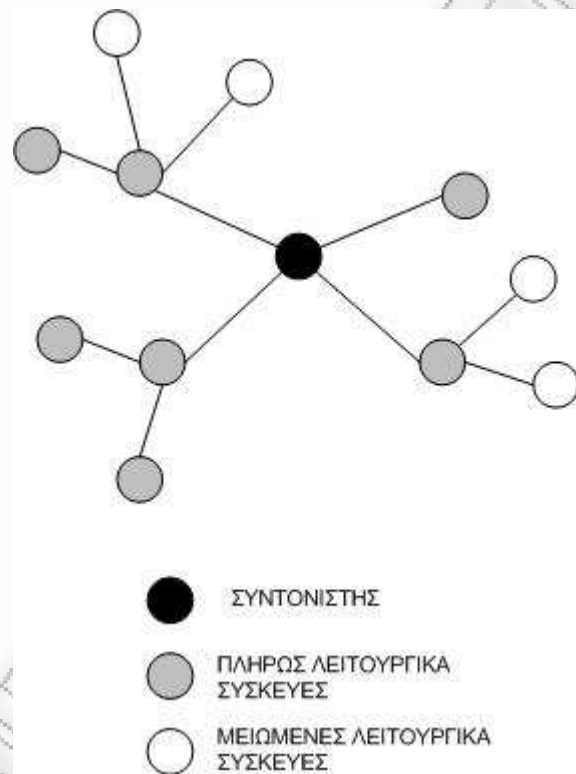
Ένα άλλο πολύ χρήσιμο στοιχείο είναι ότι οι ενδιάμεσοι κόμβοι κατά μήκος της πορείας των δεδομένων, δεν ενεργούν μόνο ως αποστολείς πακέτων, αλλά μπορούν να εξετάσουν και να επεξεργαστούν το περιεχόμενο των πακέτων που περνούν από αυτούς. Αυτό έχει σαν στόχο την βελτίωση της ποιότητας της συμπίεσης στοιχείων ή την επεξεργασία σήματος των συλλεγόμενων δεδομένων.

*Τοπολογία αστέρα (Tree topology).* Η τοπολογία αστέρα διαμορφώνεται για έναν PAN συντονιστή όπου αυτός ο συντονιστής θα ενεργήσει όπως κεντρικό σημείο για τις πλήρως (full-function) ή μειωμένες (reduced-function) λειτουργικά συσκευές. Εδώ ο συντονιστής έχει τη λειτουργία να συνδεθεί άμεσα με μια ή περισσότερες άλλες συσκευές. [9,10]



**Σχήμα 2.2.** Τοπολογία αστέρα (star topology)

*Δενδροειδής τοπολογία (Cluster tree topology).* Η δενδροειδής τοπολογία είναι μια τροποποίηση της τοπολογίας αστέρα. Ο coordinator συνδέεται σε ένα σετ από routers και end devices, τα “παιδιά” του ( its children). Ο router (FFD) μπορεί να συνδεθεί με περισσότερους routers και end devices (RFD) τα “παιδιά” του ( its children). Αυτό μπορεί να συνεχιστεί σε πολλά επίπεδα.



**Σχήμα 2.3.** Τοπολογία αστέρα (star topology)

Ο coordinator και οι routers μπορούν να έχουν “παιδιά” συνεπώς μπορούν να γίνουν και “γονείς”.

Οι end devices δε μπορούν να έχουν “παιδιά” άρα δε μπορούν να γίνουν και “γονείς”.

Οι κανόνες επικοινωνίας της τοπολογίας tree είναι οι εξής:

Ένα παιδί μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με τον γονέα του και με κανέναν άλλο.

Ο γονέας μπορεί να επικοινωνήσει κατευθείαν με το παιδί του και με τον γονέα του.

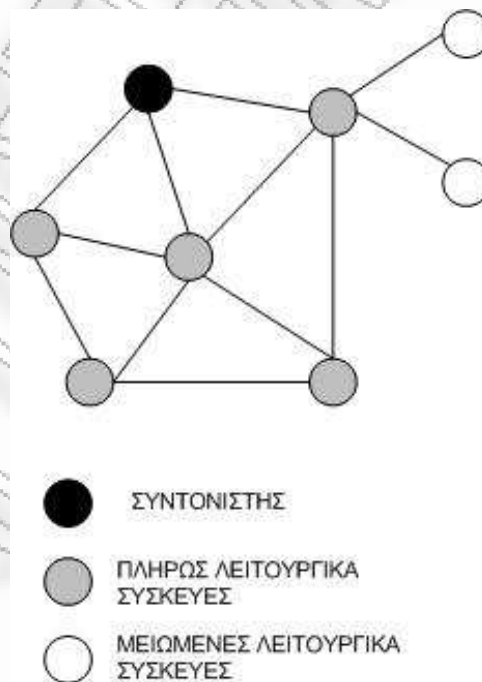
Στην αποστολή ενός μηνύματος από έναν κόμβο σε έναν άλλο, το μήνυμα πρέπει να ταξιδέψει από τον source node πάνω στο δέντρο προς στον πλησιέστερο κοινό γονέα και στη συνέχεια κάτω από το δέντρο στον κόμβο προορισμού. [9,10]

*Τοπολογία πλέγματος (Mesh topology).* Η δομή της τοπολογίας πλέγματος είναι παρόμοια με την δομή της δενδροειδούς τοπολογίας με τον coordinator να είναι στην κορυφή του δέντρου.

Ο coordinator συνδέεται σε ένα σετ από routers και end devices, τα “παιδιά” του (its children).

Ο router μπορεί να συνδεθεί με περισσότερους routers και end devices, τα “παιδιά” του (its children). Αυτό μπορεί να συνεχιστεί σε πολλά επίπεδα.

Ωστόσο οι κανόνες επικοινωνίας είναι πιο ευέλικτοι στους Router όπου εντός της εμβέλειας τους μπορούν να επικοινωνούν απευθείας με άλλους κόμβους. [10]



**Σχήμα 2.4.** Τοπολογία πλέγματος (mesh topology)

## 2.7. Βασικές προκλήσεις στον σχεδιασμό ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Όπως είδαμε ένας κόμβος είναι η ολοκλήρωση σε ένα σύστημα ενός αισθητήρα, μιας CPU και ενός συστήματος ασύρματης επικοινωνίας. Η διαδικασία αυτή για να είναι αποτελεσματική απαιτεί την πλήρη γνώση των δυνατοτήτων καθώς και των περιορισμών καθενός υποσυστήματος ξεχωριστά. Απαιτεί επίσης λεπτομερή γνώση των σύγχρονων τεχνολογιών δικτύωσης και της θεωρίας των κατανεμημένων συστημάτων. Αυτό οδηγεί στην ανάγκη ύπαρξης μιας αρχιτεκτονικής που θα ελαχιστοποιεί τους περιορισμούς των διαφόρων υποσυστημάτων και θα μεγιστοποιεί τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Για να αξιολογήσουμε μια αρχιτεκτονική δικτύων αισθητήρων ορίζουμε τους παρακάτω δείκτες οι οποίοι αναφέρονται στη συνολική απόδοση του δικτύου και είναι επίσης επιθυμητοί στόχοι κατά την σχεδίαση ενός δικτύου:

*Εκτεταμένη διάρκεια ζωής.* Όπως έχουμε δει, οι κόμβοι δικτύων αισθητήρων έχουν σαν συνηθισμένη πηγή ενέργειας τις μπαταρίες. Από εκεί προκύπτουν σημαντικοί περιορισμοί όσον αφορά την αυτονομία ενός κόμβου. Μία κοινή αλκαλική μπαταρία για παράδειγμα, παρέχει περίπου 50 βατώρες. Αυτό σημαίνει λιγότερο από ένα μήνα συνεχούς λειτουργίας για κάθε κόμβο. Γίνεται εύκολα κατανοητό, ότι σε ένα δίκτυο με μεγάλη έκταση ο έλεγχος και η αντικατάσταση των μπαταριών είναι ιδιαίτερα δαπανηρές διαδικασίες, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις είναι ακόμα και ανέφικτες. Για τον λόγο αυτό, πολλές εφαρμογές απαιτούν εγγυήσεις ότι το δίκτυο θα μπορεί να λειτουργεί ομαλά και αδιάλειπτα για αρκετά έτη. Αυτό επιτυγχάνεται σε κάποιο βαθμό από την βελτίωση των τεχνικών σχεδίασης των μπαταριών καθώς και των τεχνικών συγκομιδής ενέργειας. Το σημαντικότερο όμως είναι τα περισσότερα σχέδια πρωτοκόλλου, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, να σχεδιάζονται ρητά έχοντας ως αρχικό στόχο την ενεργειακή απόδοση.

*Ανταπόκριση (Responsiveness).* Όπως έχουμε αναφέρει, ένα σημαντικό ζήτημα είναι η επέκταση της διάρκειας ζωής των δικτύων. Αυτό μπορεί να γίνει με το να

ενεργοποιηθούν οι κόμβοι με έναν duty-cycled (ενεργούς χρόνου) τρόπο με την περιοδική αλλαγή μεταξύ των καταστάσεων αδράνειας και ενεργοποίησης. Ο συγχρονισμός τέτοιων προγραμμάτων αδράνειας και ενεργοποίησης είναι ένα ζήτημα ενδιαφέρον αλλά και δύσκολο καθώς κρύβει κινδύνους. Για παράδειγμα, οι αυθαίρετα μεγάλες περίοδοι ενεργοποίησης μπορούν να περιορίσουν την ανταπόκριση και την αποτελεσματικότητα των αισθητήρων. Όταν η εφαρμογή απαιτεί ορισμένα γεγονότα στο περιβάλλον να ανιχνεύονται και να αναφέρονται γρήγορα, η λανθάνουσα κατάσταση που προκαλείται από τα προγράμματα αδράνειας πρέπει να μην έχει μεγάλη έκταση, ακόμη και κατά την διάρκεια συμφόρησης δικτύων.

*Ευρωστία (Robustness).* Ο στόχος των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι να φτάσουν στο σημείο να παρέχουν κάλυψη σε μεγάλη έκταση και με μεγάλη αξιοπιστία. Το πρώτο επιτυγχάνεται με τη χρήση πολλών συσκευών που όμως έχουν χαμηλό κόστος με αποτέλεσμα συχνά οι συσκευές αυτές να είναι αναξιόπιστες και επιρρεπείς σε σφάλματα. Τα ποσοστά σφαλμάτων αυξάνονται στις περιπτώσεις εκείνες που στα περιβάλλοντα στα οποία βρίσκονται οι συσκευές οι συνθήκες δεν είναι ιδανικές. Θα πρέπει λοιπόν στη σχεδίαση του πρωτοκόλλου να έχουν προβλεφθεί μηχανισμοί που θα διασφαλίζουν την ευρωστία ενός δικτύου. Θα διασφαλίζουν δηλαδή ότι η συνολική απόδοση ενός δικτύου δεν θα είναι ευαίσθητη σε μεμονωμένα σφάλματα συσκευών. Επιπλέον, είναι σημαντικό, η συνολική απόδοση του δικτύου να μειώνεται όσο το δυνατό πιο ομαλά σε περίπτωση ανεπανόρθωτου σφάλματος κάποιων συσκευών του.

*Σύμπραξη (Synergy).* Η συνεχιζόμενη ανάπτυξη της τεχνολογίας, σε όλους τους τομείς, μας έχει δώσει την δυνατότητα να βελτιώσουμε τις συσκευές όσον αφορά την επεξεργαστική τους δύναμη, την μνήμη, την ασύρματη μετάδοση και την ακρίβειά τους, κρατώντας παράλληλα το κόστος τους σταθερό. Είναι πιθανό όμως οι οικονομικές εκτιμήσεις να απαιτήσουν δραστική μείωση του κόστους ανά κόμβο. Αυτό θα οδηγήσει αναγκαστικά στον περιορισμό των δυνατοτήτων των κόμβων. Το ζήτημα λοιπόν είναι να σχεδιαστούν συνεργάσιμα πρωτόκολλα, τα οποία να εξασφαλίζουν ότι το σύστημα συνολικά είναι ικανότερο από το ποσό

των δυνατοτήτων των επιμέρους συστατικών του. Τα πρωτόκολλα πρέπει να παρέχουν μια αποδοτική συνεργάσιμη χρήση της αποθήκευσης, του υπολογισμού και των πόρων επικοινωνίας.

*Εξελισσιμότητα (Scalability).* Ο μακροπρόθεσμος στόχος των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι να μπορούν να αποτελούνται από πολύ μεγάλο αριθμό κόμβων (δεκάδες χιλιάδες ή ακόμα και εκατομμύρια κόμβοι) ώστε να έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν, με πολύ μεγάλη λεπτομέρεια, εξαιρετικά μεγάλες σε έκταση περιοχές. Τα πρωτόκολλα θα πρέπει να διανεμηθούν εγγενώς, περιλαμβάνοντας την εντοπισμένη επικοινωνία, και τα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να χρησιμοποιήσουν τις ιεραρχικές αρχιτεκτονικές προκειμένου να παρασχεθεί τέτοια εξελισσιμότητα. Υπάρχουν όμως ακόμα σημαντικά προβλήματα, όπως ο χειρισμός αποτυχίας και ο επιτόπιος επαναπρογραμματισμός, που μέχρι να λυθούν θα καθιστούν απραγματοποίητο στην πράξη το όραμα για πολυάριθμους κόμβους. Υπάρχουν, επίσης, ορισμένα θεμελιώδη όρια στην απόδοση και τη χωρητικότητα που προσκρούουν στην εξελισσιμότητα της απόδοσης των δικτύων.

*Ετερογένεια.* Η έννοια της ετερογένειας αναφέρεται στις διαφορές των δυνατοτήτων που παρουσιάζονται στις συσκευές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (όσον αφορά τον υπολογισμό, την επικοινωνία, και την αντίληψη). Για παράδειγμα, η συνύπαρξη ενός μικρού αριθμού συσκευών με μεγάλη υπολογιστική ισχύ και ενός μεγάλου αριθμού συσκευών χαμηλής υπολογιστικής ισχύς, αποτελεί μια δικτυακή αρχιτεκτονική cluster-head δύο επιπέδων. Για να επιτύχουμε την παρουσία πολλών μορφών αντίληψης πρέπει να γνωρίζουμε τις σχετικές τεχνικές τήξης (fusion) αισθητήρων. Σημαντικό στοιχείο είναι να επιτυγχάνεται ο σωστός συνδυασμός ετερογενών δυνατοτήτων σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

*Αυτοδιαμόρφωση (Self-configuration).* Η φύση καθώς και οι έκταση που έχουν συνήθως τα ασύρματα δίκτυα τα καθιστά εγγενώς αφύλακτα διανεμημένα συστήματα. Είναι επομένως πολύ σημαντικό κατά την σχεδίαση ενός δικτύου να εξασφαλίζεται η αυτόνομη λειτουργία του. Θα πρέπει η διαμόρφωση της



τοπολογίας των δικτύων, ο εντοπισμός και ο συγχρονισμός των κόμβων καθώς και άλλες σημαντικές λειτουργίες, να διενεργούνται από τους ίδιους τους κόμβους.

*Βελτιστοποίηση και προσαρμογή (Self-optimization and adaptation).* Όταν μελετάμε μια τοποθεσία στην οποία πρόκειται να εγκαταστήσουμε ένα ασύρματο δίκτυο, είναι πιθανό να μη γνωρίζουμε όλες τις παραμέτρους της. Επίσης, οι συνθήκες που επικρατούν σε μια τοποθεσία είναι δυνατό να αλλάξουν δραματικά κατά τη διάρκεια του χρόνου, επηρεάζοντας δραστικά την απόδοση του δικτύου. Υπάρχουν για αυτό τον λόγο, ενσωματωμένοι μηχανισμοί που μαθαίνουν αυτόνομα, μέσω των μετρήσεων που κάνουν και των πληροφοριών που συλλέγουν κατά τη διάρκεια του χρόνου, και που χρησιμοποιούν αυτή την εκμάθηση για τη συνεχή βελτίωση της απόδοσης του δικτύου. Τα πρωτόκολλα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει επίσης να είναι ικανά να προσαρμόζονται με απευθείας σύνδεση σε τέτοια περιβαλλοντική δυναμική.

*Συστηματικό σχέδιο.* Για να ξεπεράσουμε τα εμπόδια που παρουσιάζονται κατά την σχεδίαση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, λόγω των αυστηρών περιορισμών στους οποίους αυτά υπόκεινται, χρειαζόμαστε μεθοδολογίες συστηματικού σχεδιασμού. Οι μεθοδολογίες αυτές μας δίνουν την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης, διαμόρφωσης και προσαρμογής του χρόνου εκτέλεσης που απαιτούνται από τις πρακτικές εκτιμήσεις. Έτσι βελτιώνεται η απόδοση του δικτύου.

*Μυστικότητα και ασφάλεια.* Οι πληροφορίες που συλλέγουν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πρέπει να μην είναι προσβάσιμες από χρήστες που δεν είναι εξουσιοδοτημένοι. Χρειάζονται λοιπόν μηχανισμοί κρυπτογράφησης και αυθεντικοποίησης που να εξασφαλίζουν την μυστικότητα των πληροφοριών αυτών. Η χρήση των μηχανισμών αυτών έχει αρνητική επίδραση στην κατανάλωση του δικτύου αλλά και στο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επιπλέον, στα πακέτα που διακινούνται μέσα στο δίκτυο, προστίθενται και bits κρυπτογράφησης

κάτι το οποίο μειώνει τον αριθμό των πραγματικών δειγμάτων που μπορούν να μεταφερθούν από ένα κόμβο.

*Κάλυψη και Επεκτασιμότητα.* Είναι προφανές πόσο σημαντικό είναι για ένα δίκτυο να μπορεί να καλύψει μια πολύ μεγάλη περιοχή παρατήρησης. Η κάλυψη του δικτύου δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την ακτίνα κάλυψης των επικοινωνιακών συνδέσεων που χρησιμοποιεί ο κάθε κόμβος. Αυτό γιατί η χρήση multi-hop τεχνικών μας δίνει τη δυνατότητα να επεκτείνουμε την κάλυψη αρκετά πιο μακριά από την ακτίνα που επιτρέπει ο συγκεκριμένος πομπός. Πρέπει να γνωρίζουμε όμως, ότι μετά από ένα αριθμό αναπηδήσεων (hop) και μια συγκεκριμένη ακτίνα εκπομπής το συνολικό ισοζύγιο κατανάλωσης ισχύος του δικτύου αυξάνεται ενώ ταυτόχρονα μειώνεται ο χρόνος αντίδρασης του. Πρέπει ακόμα, να υπάρχουν κατάλληλοι μηχανισμοί που να επιτρέπουν την ομαλή προσθήκη νέων κόμβων στο δίκτυο χωρίς να διαταράσσεται η λειτουργία του δικτύου. Η πυκνότητα  $\mu(R)$  αισθητήρων σε μια περιοχή δίνεται από την σχέση:

$$\mu(R) = \frac{(NR^2\pi)}{A}$$

Όπου:  $N$  ο αριθμός των αισθητήρων στην περιοχή  $A$ ,  $R$  είναι η μέγιστη ακτίνα του πομπού του κόμβου.

*Κόστος Παραγωγής και Ευκολία Ανάπτυξης.* Το συνολικό κόστος ενός δικτύου διαμορφώνεται από το κόστος του κάθε κόμβου του. Είναι σημαντικό επομένως το κόστος του κάθε κόμβου να είναι όσο το δυνατό χαμηλότερο ώστε το συνολικό κόστος του δικτύου να είναι χαμηλότερο από αυτό ενός αντίστοιχου συμβατικού δικτύου. Η ευκολία ανάπτυξης έχει να κάνει με το κατά πόσο θα είναι εφικτή η εγκατάσταση ενός δικτύου στην περιοχή λειτουργίας του και από μη εξειδικευμένο προσωπικό. Το ιδανικό είναι το δίκτυο να μπορεί να ρυθμίζεται μόνο του ανεξάρτητα από τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον που πρόκειται να τοποθετηθεί.

*Ανοχή σε Σφάλματα.* Επειδή είναι πιθανό κάποιοι κόμβοι ενός δικτύου να πάψουν να λειτουργούν λόγω βλάβης, δυσλειτουργίας κάποιου υποσυστήματος τους ή λόγω παρεμβολών από κάποιον εξωτερικό παράγοντα, χρειάζεται το σύστημα να έχει ανοχή σε τέτοιου είδους σφάλματα. Θα πρέπει όταν συμβαίνει κάποια βλάβη σε κάποιον κόμβο ή σε μια ομάδα κόμβων, να μην επηρεάζεται η συνολική απόδοση και λειτουργία του δικτύου.

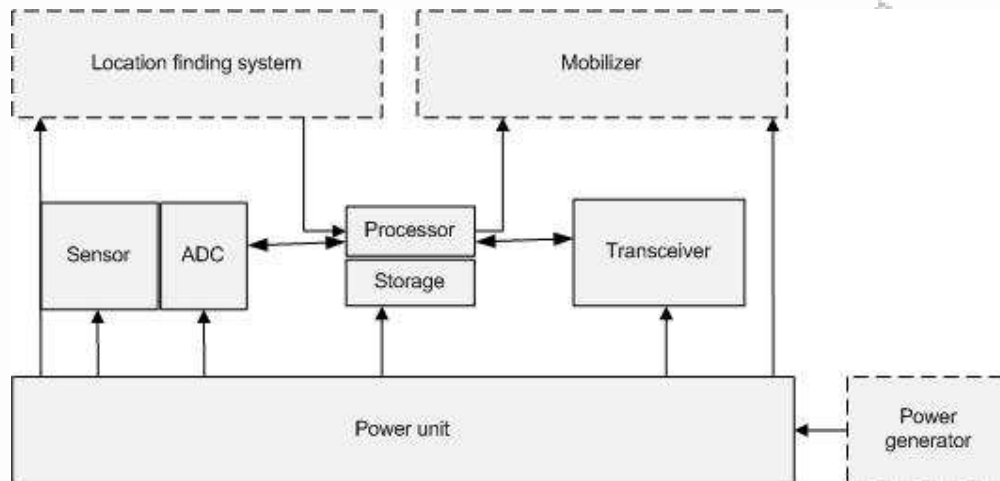
*Συγχρονισμός και χρόνος απόκρισης.* Σε εφαρμογές επιτήρησης και εντοπισμού πρέπει να υπάρχει χρονικός συσχετισμός των δεδομένων που συλλέγονται από τους κόμβους ώστε να είναι καλύτερη η παρατήρηση του φαινομένου. Για να γίνει αυτό, πρέπει το δίκτυο να έχει και να διατηρεί μια καθολική ώρα συστήματος που θα χρησιμοποιείται για να ταξινομεί χρονικά τα δεδομένα που καταγράφονται από τους κόμβους. Απαιτείται λοιπόν η ύπαρξη ενός μηχανισμού ο οποίος θα διαχειρίζεται τις διαδικασίες διατήρησης και διασποράς, μεταξύ των κόμβων, των μηνυμάτων με πληροφορίες συγχρονισμού. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για την σχεδίαση κάποιων εφαρμογών, ιδίως συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και συναγερμού, είναι ο χρόνος απόκρισης. Η ικανότητα όμως ενός δικτύου να έχει μικρό χρόνο απόκρισης έρχεται σε σύγκρουση με άλλους δείκτες, όπως ο χρόνος ζωής του συστήματος. Το πρόβλημα αυτό ξεπερνιέται με την ενσωμάτωση στο δίκτυο κόμβων που βρίσκονται σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας. Πάλι όμως αν και εξασφαλίζεται ο επιθυμητός χρόνος αντίδρασης, δημιουργείται αρνητική επίπτωση στην ευκολία ανάπτυξης του δικτύου.

*Ποιότητα της υπηρεσίας.* Υπάρχουν εφαρμογές στις οποίες είναι ζωτικής σημασίας η παράδοση των δεδομένων εντός μιας ορισμένης ώρας από τη στιγμή της συλλογής τους, αλλιώς τα δεδομένα δεν είναι πλέον χρήσιμα. Σε άλλες εφαρμογές, η συντήρηση της ενέργειας του δικτύου, άρα και η διάρκεια ζωής του, είναι σημαντικότερη από άλλες παραμέτρους. Άρα μπορεί αν χρειαστεί το δίκτυο να μειώσει την ποιότητα των μετρήσεων του προκειμένου να μειωθεί η ενεργειακή κατανάλωσή του και να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του. Για τον λόγο αυτό απαιτούνται ενεργειακά ενήμερα πρωτόκολλα δρομολόγησης για την ικανοποίηση αυτών των περιορισμών.

*Μέσον μετάδοσης.* Η επικοινωνία στα multi-hop ασύρματα δίκτυα, επιτυγχάνεται είτε με χρήση ραδιοπομπών, είτε με χρήση υπέρυθρων, είτε με άλλα οπτικά μέσα. Για να μπορούν τα δίκτυα να είναι διαθέσιμα σε όλες τις τοποθεσίες ανά τον κόσμο πρέπει και το μέσο μετάδοσης να είναι διαθέσιμο παντού. Μια επιλογή είναι η χρήση της βιομηχανικής, επιστημονικής και ιατρικής (Industrial, Scientific and Medical - ISM) ζώνης συχνοτήτων, η οποία είναι ελεύθερη προς χρήση στις περισσότερες χώρες. Υπάρχουν όμως διάφορα προβλήματα που παρουσιάζονται σε ένα ασύρματο κανάλι (όπως fading και υψηλός ρυθμός σφαλμάτων) και μπορεί να επηρεάσουν το δίκτυο. Γενικά, το απαιτούμενο εύρος ζώνης για τα δεδομένα που διακινούνται σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι μικρό, της τάξης των 1-100 kb/s. Ο σχεδιασμός του MAC (Medium Access Control) εξαρτάται από το μέσον μετάδοσης. Μια προσέγγιση του σχεδιασμού του MAC για δίκτυα αισθητήρων είναι η χρήση πρωτοκόλλων βασισμένων σε TDMA (Time Division Multiple Access), τα οποία εξοικονομούν περισσότερη ενέργεια από τα πρωτόκολλα που είναι βασισμένα σε ανταγωνισμό (contention based), όπως το CSMA (Carrier Sense Multiple Access) που χρησιμοποιείται στο IEEE 802.11. [11]

## **2.8. Συσκευές Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων**

Το κύριο συστατικό ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι ο κόμβος αισθητήρα και σε αυτόν επικεντρωνόμαστε όταν μελετάμε ένα τέτοιο δίκτυο, σε επίπεδο υλικού. Η αρχιτεκτονική ενός τέτοιου κόμβου περιλαμβάνει το τμήμα των αισθητήρων (sensing unit), έναν μικροελεγκτή (processing unit) μια συσκευή επικοινωνίας (transceiver unit) και μια πηγή ενέργειας (power unit). Ακολουθεί το σχηματικό διάγραμμα ενός κόμβου καθώς και η περιγραφή των βαθμίδων που τον αποτελούν.



**Σχήμα 2.5.** Σχηματικό διάγραμμα κόμβου [12]

Ο χαμηλής ισχύος ενσωματωμένος επεξεργαστής (*processing unit*). Μία από τις εργασίες που καλείται να εκτελέσει ένας αισθητήρας σε ένα δίκτυο είναι η επεξεργασία των πληροφοριών που συλλέγει ο ίδιος καθώς και των πληροφοριών που μεταδίδονται από άλλους αισθητήρες. Την εργασία αυτή εκτελεί ο επεξεργαστής του αισθητήρα. Λόγω οικονομικών περιορισμών, ο επεξεργαστής αυτός έχει περιορισμένη ισχύ γι' αυτό και οι αισθητήρες χρησιμοποιούν εξειδικευμένα λειτουργικά συστήματα βασισμένα στα ενσωματωμένα συστήματα (*embedded systems*), όπως το TinyOS. Ένας άλλος τρόπος για να αυξηθεί η υπολογιστική δύναμη ενός δικτύου είναι να χρησιμοποιηθούν σε αυτό περισσότεροι κόμβοι. Μελλοντικά οι αισθητήρες θα έχουν πολύ πιο ισχυρούς επεξεργαστές οι οποίοι θα διαθέτουν ακόμα τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας όπως η κατάσταση ύπνου (*sleep mode*) και η δυναμική βαθμονόμηση τάσης (*dynamic voltage scaling*).

*Μνήμη.* Η μνήμη χωρίζεται στη μνήμη προγράμματος, από την οποία ο επεξεργαστής παίρνει και εκτελεί τις εντολές ενός προγράμματος, καθώς και στη μνήμη στοιχείων που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των ακατέργαστων και επεξεργασμένων μετρήσεων αισθητήρων και άλλων τοπικών πληροφοριών. Κι εδώ οι οικονομικοί περιορισμοί δεν μας επιτρέπουν να έχουμε μεγάλες ποσότητες μνήμης.

*Radio transceiver.* Με αυτόν τον ασύρματο πομποδέκτη εξασφαλίζεται η επικοινωνία του ενός αισθητήρα με τους υπόλοιπους. Ο πομποδέκτης αυτός έχει χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και μικρή εμβέλεια. Η επικοινωνία του πομπού είναι ίσως η πιο ενεργοβόρα λειτουργία του γι' αυτό και ο πομποδέκτης πρέπει να ενσωματώνει ενεργειακά αποδοτικούς τρόπους διαχείρισης του χρόνου λειτουργίας με καταστάσεις αδράνειας (sleep) και ενεργοποίησης (wake-up) όπως και τεχνικές διαχείρισης του ενεργού χρόνου (duty cycle). Στο μέλλον αναμένεται βελτίωση των πομποδεκτών όσον αφορά το κόστος τους, τη φασματική αποδοτικότητα, την αυξημένη χωρητικότητα και την ανοχή στο θόρυβο.

*Αισθητήρες ADCs.* Οι αισθητήριες μονάδες συνήθως αποτελούνται από δύο υπομονάδες, τους αισθητήρες και τους μετατροπείς σημάτων από αναλογικό σε ψηφιακό<sup>2</sup>. Το αναλογικό σήμα είναι αυτό το οποίο λαμβάνει ο αισθητήρας, από το εκάστοτε φαινόμενο που παρατηρεί, και το οποίο μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα με τη χρήση του Analogue Digital Converter ώστε να προωθηθεί στη συνέχεια στη μονάδα επεξεργασίας. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται ιδιαίτερα από την εφαρμογή.

Μπορούν παραδείγματος χάριν να περιλαμβάνουν αισθητήρες θερμοκρασίας, φωτός, υγρασίας, πίεσης, επιταχυνσιόμετρα, μαγνητόμετρα, χημικούς αισθητήρες, ακουστικούς αισθητήρες, ή ακόμα και αισθητήρες εικόνων χαμηλής ανάλυσης. Πολλές εφαρμογές απαιτούν τη συλλογή διάφορων τύπων μετρήσεων από την παρατήρηση ενός φαινομένου. Για τον λόγο αυτό μια συσκευή μπορεί να έχει διάφορους αισθητήρες πάνω της.

*GPS (Global Positioning System).* Πολλές εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων απαιτούν να είναι γνωστές οι θέσεις των αισθητήρων. Ένας απλός τρόπος για να γίνει αυτό, είναι να είναι προκαθορισμένες οι θέσεις που βρίσκονται οι αισθητήρες καθώς οι θέσεις στις οποίες δύναται να επεκταθούν οι αισθητήρες. Αυτό είναι εφικτό μόνο σε περιορισμένες επεκτάσεις. Όταν οι κόμβοι αναπτύσσονται τυχαία και χωρίς επιτήρηση, χρειάζεται ένα σύστημα εντοπισμού. Ένα τέτοιο σύστημα, το οποίο μας εξυπηρετεί ιδιαίτερα σε υπαίθριες εφαρμογές,

---

<sup>2</sup> από αναλογικό σε ψηφιακό: Analog to Digital Converters (ADCs)

είναι το δορυφορικό GPS. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως, ότι λόγω των οικονομικών και περιβαλλοντικών περιορισμών, μόνο κάποιοι από τους κόμβους μπορούν να είναι εξοπλισμένοι με σύστημα GPS. Οι υπόλοιποι κόμβοι θα πρέπει να λαμβάνουν την θέση τους έμμεσα μέσω αλγορίθμων εντοπισμού ή άλλων τεχνικών, όπως *dead reckoning*<sup>3</sup>, ή τη χρήση φάρων (beacons).

*Πηγή ενέργειας.* Τις περισσότερες φορές η πηγή ενέργειας των κόμβων είναι μια μπαταρία (π.χ. μπαταρία LiMH AA) για να είναι εύκολη η επέκτασή τους. Είναι όμως δυνατόν, κάποιοι από τους κόμβους, να είναι συνδεδεμένοι με καλώδιο σε μια συνεχή πηγή ενέργειας. Υπάρχουν επίσης και τεχνικές ενεργειακής συγκομιδής (energy scavenging) που μπορούν να παρέχουν έναν βαθμό ενεργειακής ανανέωσης. Η πεπερασμένη ενέργεια των μπαταριών, είναι ίσως το κρισιμότερο πρόβλημα στις περισσότερες εφαρμογές ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

*Node Αισθητήρα:* Το κυρίαρχο συστατικό ενός δικτύου αισθητήρων. Η συνολική απόδοση ενός κόμβου μπορεί να χαρακτηριστεί από κάποιους δείκτες ανάλογους με αυτούς που χαρακτηρίζουν ένα δίκτυο υπολογιστών. Οι δείκτες αυτοί είναι οι εξής:

- Η κατανάλωση ισχύος

Πολύ σημαντική παράμετρος ενός κόμβου είναι η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνουν για την κάθε λειτουργία τους. Όσο πιο μικρότερη κατανάλωση, τόσο μεγαλύτερος χρόνος αυτονομίας για τον κόμβο. Αποδεικνύεται ότι για να λειτουργήσει ένας κόμβος ομαλά για ένα έτος με χρήση δύο μπαταριών AA, θα πρέπει να έχει μέση κατανάλωση μικρότερη των 200μΑ.

- Η προσαρμοστικότητα

Όπως έχουμε πει, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Αυτό απαιτεί, η αρχιτεκτονική σχεδίαση να είναι εύκολη και να

---

<sup>3</sup> *dead reckoning*: Είναι η διαδικασία κατά την οποία εκτιμάται η τρέχουσα θέση κάποιου, βασισμένη από προηγούμενη καθορισμένη θέση η οποία έχει υπολογιστεί από την ταχύτητα, το χρόνο και τη διαδρομή.

προσαρμόζεται εύκολα. Θα πρέπει δηλαδή παράμετροι όπως ο ρυθμός δειγματοληψίας, ο χρόνος απόκρισης, ο χρόνος ζωής καθώς το είδος και η μέθοδος της επεξεργασίας να μπορούν εύκολα να μεταβληθούν για να καλύψουν τις ανάγκες τις εκάστοτε εφαρμογής.

- Η ασφάλεια

Για να μην υπάρξει υποκλοπή των δεδομένων που μεταδίδουν οι κόμβοι ή παρεμβολής στο ασύρματο κανάλι μετάδοσης των δεδομένων, θα πρέπει κάθε εκπομπή να μπορεί να κρυπτογραφείται. Θα πρέπει δηλαδή, ο μικροελεγκτής του κάθε κόμβου να μπορεί να εκτελέσει αλγόριθμους κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης ενδεχομένως και με την προσθήκη ειδικών κρυπτογραφικών κυκλωμάτων.

- Η δυνατότητα επικοινωνίας

Βασικό χαρακτηριστικό των κόμβων είναι η ικανότητα τους να επικοινωνούν. Τα βασικά χαρακτηριστικά της επικοινωνίας τους είναι ο ρυθμός μετάδοσης, η κατανάλωση ενέργειας κατά την εκπομπή και λήψη δεδομένων και η εμβέλεια μετάδοσης.

- Η υπολογιστική ισχύς

Η MCU<sup>4</sup> του κάθε κόμβου έχει να εκτελέσει κάποιες εργασίες οι οποίες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Στην επεξεργασία των δεδομένων που έχει συλλέξει ο κόμβος (καταγραφή, μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό, φιλτράρισμα, εντοπισμός κατωφλίου, συσχετισμός και φασματική ανάλυση) και
2. Στην διαχείριση τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου. Η ποιότητα ενός κόμβου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον δείκτη αυτό.

---

<sup>4</sup> Η μονάδα αυτή είναι ένα σημείο στο τοπικό δίκτυο που παρέχει την ικανότητα σε 3 ή περισσότερα τερματικά και πύλες να συμμετέχουν σε πολυσημειακές συνδιαλέξεις. Το MCU αποτελείται από έναν υποχρεωτικό πολυσημειακό ελεγκτή και τον προαιρετικό πολυσημειακό επεξεργαστή.



- Ο Συγχρονισμός

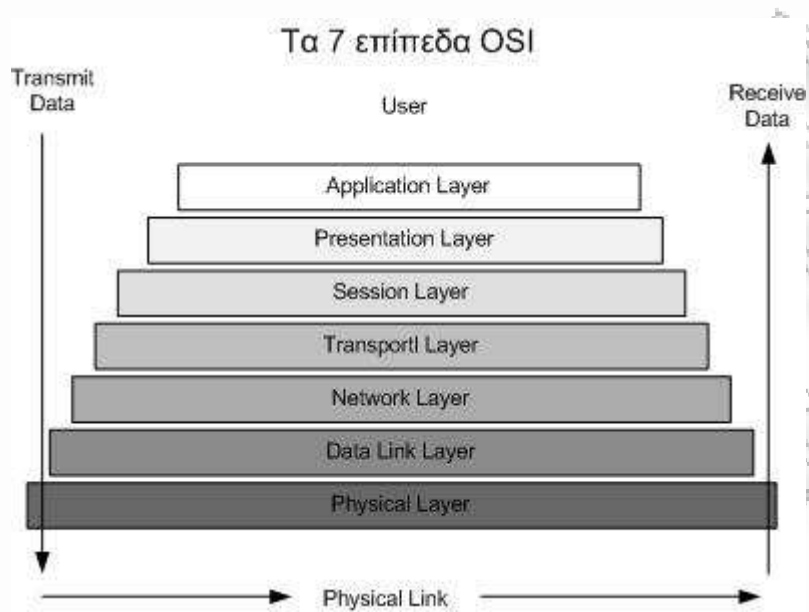
Για να είναι ακριβή και χρήσιμα τα δεδομένα τα οποία συλλέγουν και μεταδίδουν οι κόμβοι, θα πρέπει να διατηρούν τα εσωτερικά τους ρολόγια συγχρονισμένα με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Αν υπάρξουν διαφορές στον χρονισμό των κόμβων τα δεδομένα δεν θα είναι πλέον αξιόπιστα κάτι που θα μειώσει πολύ την συνολική απόδοση του δικτύου.

- Το μέγεθος και το κόστος

Όπως έχουμε δει, σημαντικό ρόλο στην σχεδίαση και ανάπτυξη ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων παίζουν το μέγεθος των κόμβων του και το κόστος του. Το χαμηλό κόστος επιτρέπει την προσθήκη περισσότερων κόμβων για την ακόμα πιο καλή παρατήρηση ενός φαινομένου. Επίσης, μικροί σε μέγεθος κόμβοι μπορούν να τοποθετηθούν πιο εύκολα και σε περισσότερα σημεία και να χρησιμοποιηθούν σε περισσότερες διαφορετικές εφαρμογές. [12]

## 2.9. Το μοντέλο OSI

Οι συσκευές δικτύων που συνδέονται είτε ασύρματα είτε ενσύρματα, περιγράφονται συνήθως από το πρότυπο διασύνδεσης ανοιχτών συστημάτων (OSI). Αυτό το πρότυπο έχει αναπτυχθεί από την οργάνωση διεθνών προτύπων (ISO), η οποία ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 80, και περιγράφει τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και υπηρεσιών. Τα 7 επίπεδα του OSI εφαρμόζονται σε όλους τους τύπους μέσων και δικτύων. Στην πραγματικότητα τα περισσότερα δίκτυα δε χρησιμοποιούν ολόκληρο το μοντέλο του OSI αλλά δεν παύει να είναι μία χρήσιμη αναφορά στο να συσχετίσουμε τα δίκτυα επικοινωνίας. Παρακάτω θα αναφέρουμε το κάθε ένα επίπεδο ξεχωριστά:



**Σχήμα 2.6.** Τα 7 επίπεδα του OSI [13]

Το *φυσικό επίπεδο* ορίζει όλες τις ηλεκτρικές και φυσικές προδιαγραφές των συσκευών. Σ' αυτές περιλαμβάνονται οι σχηματισμοί των ακίδων, οι επιτρεπτές τάσεις, οι προδιαγραφές των καλωδίων. Συσκευές φυσικού επιπέδου είναι οι διανεμητές (hub), οι αναμεταδότες (repeater), οι κάρτες δικτύου, οι προσαρμοστές (adaptor) αρτηρίας (bus). Οι κυριότερες λειτουργίες και υπηρεσίες του φυσικού επιπέδου είναι:

- Έναρξη και περαίωση της ηλεκτρικής σύνδεσης μιας επικοινωνιακής συσκευής.
- Συμμετοχή σε διαδικασίες όπου οι επικοινωνιακές συσκευές εξυπηρετούν αποτελεσματικά πολλούς χρήστες.
- Επιλύονται προβλήματα προτεραιότητας πρόσβασης και ελέγχου ροής δεδομένων.
- Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση των ψηφιακών δεδομένων κατά την μετάδοση από συσκευή σε συσκευή. Για παράδειγμα, τα ψηφιακά ηλεκτρικά σήματα μπορεί να ταξιδέψουν ως αναλογικά σε χάλκινο καλώδιο, μετά σε οπτική ίνα, μετά να μεταδοθούν από ραδιοζεύξη ή δορυφορικά, να φθάσουν πάλι αναλογικά σε χάλκινο καλώδιο, και να γίνουν ψηφιακά στον παραλήπτη.

Το επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων παρέχει τα λειτουργικά και διαδικαστικά μέσα για την μεταφορά δεδομένων από την μια συσκευή του δικτύου στην άλλη, και για τον έλεγχο και την πιθανή διόρθωση σφαλμάτων που συμβαίνουν στο φυσικό επίπεδο. Οι μη ιεραρχημένες διευθύνσεις των συσκευών εδώ είναι οι φυσικές (π.χ. MAC διευθύνσεις), δηλαδή είναι καλωδιωμένες στις κάρτες δικτύου των συσκευών από το εργοστάσιο.

Το πιο γνωστό παράδειγμα είναι το Ethernet. Άλλα παραδείγματα πρωτοκόλλων διασύνδεσης δεδομένων είναι:

Τα HDLC και ADCCP για άμεσες συνδέσεις (point-to-point) ή για δίκτυα μεταφοράς πακέτων και το Aloha για τοπικά δίκτυα (local area network, LAN).

Στα τοπικά δίκτυα με IEEE 802, και σε μερικά άλλα όπως το FDDI, αυτό το επίπεδο μπορεί να χωριστεί σε δύο στρώματα:

ένα στρώμα φυσικών διευθύνσεων MAC (Media Access Control, έλεγχος πρόσβασης σε συσκευές), και το στρώμα IEEE 802.2 για διευθύνσεις LLC, (Logical Link Control, έλεγχος λογικών διασυνδέσεων).

Στο επίπεδο αυτό λειτουργούν οι δικτυακές γέφυρες (bridge) και οι δικτυακοί διακόπτες (switch). Η συνδεσιμότητα παρέχεται μόνο για κόμβους που είναι καλωδιωμένοι τοπικά. Πάντως, μπορούμε βέβαια να ισχυριστούμε ότι αυτά ανήκουν σε κάποιο "επίπεδο 2.5", και όχι αποκλειστικά στο "επίπεδο 2".

Το επίπεδο δικτύου παρέχει τα λειτουργικά και διαδικαστικά μέσα για την μεταφορά στοιχειοσειρών δεδομένων μεταβλητού μήκους από μια προέλευση σε ένα προορισμό, μέσα από ένα ή περισσότερα δίκτυα, ενώ διατηρεί την ποιότητα εξυπηρέτησης που απαιτεί το επίπεδο μεταφοράς. Το επίπεδο δικτύου εκτελεί λειτουργίες δρομολόγησης, με πιθανές τμηματοποιήσεις / αποτμηματοποιήσεις, και αναφέρει σφάλματα σχετικά με την παράδοση των πακέτων. Οι δρομολογητές (routers) λειτουργούν στο επίπεδο αυτό, και στέλνοντας δεδομένα σε

διασυνδεδεμένα δίκτυα έκαναν το Διαδίκτυο πραγματικότητα. Υπάρχουν και δικτυακοί διακόπτες που σχετίζονται με τις διευθύνσεις (IP). Εδώ υπάρχει μια λογική οργάνωση και τις τιμές των διευθύνσεων τις καθορίζει ιεραρχικά ο τεχνικός των επικοινωνιών.

Το καλύτερο παράδειγμα πρωτοκόλλου δικτύου είναι το Πρωτόκολλο Διαδικτύου (Internet Protocol, IP).

Το *επίπεδο μεταφοράς* διεκπεραιώνει την μεταφορά των δεδομένων από χρήστη σε χρήστη, απαλλάσσοντας έτσι τα ανώτερα επίπεδα από κάθε φροντίδα να προσφέρουν αξιόπιστη και οικονομική μεταφορά δεδομένων. Το επίπεδο μεταφοράς ελέγχει την αξιοπιστία ενός χρησιμοποιούμενου καναλιού με έλεγχο ροής (flow control), τμηματοποίηση και αποτμηματοποίηση (segmentation / desegmentation), και έλεγχο σφαλμάτων (error control). Ορισμένα πρωτόκολλα καταγράφουν καταστάσεις και συνδέσεις, οπότε κρατούν λογαριασμό των πακέτων και επανεκπέμπουν αυτά που δεν παραλήφθηκαν σωστά. Τα διάφορα πρωτόκολλα σχηματίζουν διαφορετικά τα πακέτα πληροφοριών.

Το καλύτερο παράδειγμα πρωτοκόλλου μεταφοράς είναι το TCP (Transmission Control Protocol, πρωτόκολλο ελέγχου μετάδοσης). Άλλα πρωτόκολλα μεταφοράς είναι τα UDP (User Datagram Protocol, πρωτόκολλο για διάγραμμα δεδομένων από έναν χρήστη), SCTP (Stream Control Transmission Protocol, πρωτόκολλο ελέγχου της ροής μετάδοσης), κλπ.

Το *επίπεδο συνόδου* ελέγχει τις συνόδους (δηλαδή τους διαλόγους) μεταξύ δύο υπολογιστών, του Α και του Β. Ξεκινά, διαχειρίζεται και τερματίζει την σύνδεση μεταξύ μιας τοπικής και μιας απομακρυσμένης (remote) εφαρμογής. Αντιμετωπίζει λειτουργίες FDX (*full duplex, οι Α και Β μιλούν ταυτόχρονα από δύο κανάλια*) ή HDX (*half-duplex, μιλάει ο Α και μετά απαντάει ο Β από το ένα διαθέσιμο κανάλι*), και έχει διαδικασίες αποθήκευσης κατάστασης (checkpoint) αναβολής (adjournment), περαίωσης λειτουργίας (termination), και επανεκκίνησης (restart). Αυτό το επίπεδο είναι υπεύθυνο για το ομαλό κλείσιμο της συνόδου, (που είναι ιδιότητα του TCP), και επίσης για αποθήκευση

κατάστασης και ανάκτηση (recovery), (που δεν χρησιμοποιούνται στην στοίβα πρωτοκόλλων του Διαδικτύου).

Το επίπεδο παρουσίασης μετασχηματίζει τα δεδομένα σε τυπική μορφή που την αναμένει το επίπεδο εφαρμογών. Στο επίπεδο αυτό γίνεται στα δεδομένα κρυπτογράφηση, συμπίεση, κωδικοποίηση MIME, και όποια άλλη διαμόρφωση απαιτεί η μορφή δεδομένων ή ο σχεδιαστής του πρωτοκόλλου.

Ως παραδείγματα αναφέρουμε την μετατροπή αρχείων από κώδικα EBCDIC σε κώδικα ASCII, και την μετατροπή της δομής των δεδομένων σε μορφή XML ή το αντίστροφο (π.χ. από XML σε έγγραφο DOC).

Το επίπεδο εφαρμογών παρέχει στον χρήστη έναν τρόπο να προσπελάσει μέσω μιας εφαρμογής τις πληροφορίες ενός δικτύου. Αυτό το επίπεδο είναι η κύρια διεπαφή του χρήστη με την εφαρμογή, και συνεπώς με το δίκτυο. Στο επίπεδο αυτό γίνεται η διαχείριση των κατανεμημένων εφαρμογών και η αποστολή των ηλεκτρονικών επιστολών (e-mail).

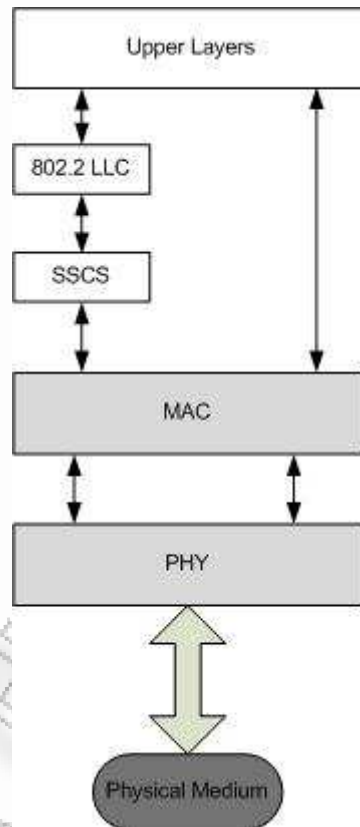
Ως παραδείγματα πρωτοκόλλων επιπέδου εφαρμογών αναφέρουμε τα Telnet, FTP, SMTP και http.

Το 802.15.4 πρωτόκολλο, το οποίο περιορίζεται στο επίπεδο PHY και MAC, μπορεί να σχετιστεί με το μοντέλο του OSI. Παρακάτω θα δούμε πώς το μοντέλο του OSI προσαρμόζεται στο πρωτόκολλο 802.15.4. [14]

## **2.10. Αρχιτεκτονική συσκευής LR-WPAN**

Το σχήμα 2.7 παρουσιάζει μία LR-WPAN συσκευή. Η συσκευή περιλαμβάνει ένα στρώμα PHY το οποίο περιέχει τον πομποδέκτη της ραδιοσυχνότητας (RF) μαζί με το χαμηλού επιπέδου μηχανισμό ελέγχου του, και ένα υπόστρωμα MAC που παρέχει την πρόσβαση στο φυσικό κανάλι για όλους τους τύπους μεταφορών. Τα ανώτερα στρώματα αποτελούνται από το στρώμα δικτύων (network layer), το οποίο παρέχει την διαμόρφωση δικτύων, το χειρισμό και τη δρομολόγηση μηνυμάτων, και το στρώμα εφαρμογών (application layer), το οποίο παρέχει την προοριζόμενη λειτουργία μιας συσκευής.

Ο IEEE 802.2 λογικός έλεγχος συνδέσεων (LLC) μπορεί να έχει πρόσβαση στο υπόστρωμα της MAC μέσω του συγκεκριμένου υποστρώματος σύγκλισης υπηρεσιών (SSCS).



**Σχήμα 2.7.** Αρχιτεκτονική συσκευής LR-WPAN [15]

Το στρώμα PHYSical παρέχει δύο υπηρεσίες: Την υπηρεσία PHY δεδομένων και την υπηρεσία PHY διαχείρισης, που διασυνδέουν την φυσική διαχειριστική οντότητα στρώματος (PLME). Η υπηρεσία δεδομένων PHY επιτρέπει τη μετάδοση και λήψη των μονάδων δεδομένων πρωτοκόλλου PHY (PPDU) πέρα από το φυσικό ραδιοκάνάλι. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του PHY στρώματος είναι η ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του ραδιοπομποδέκτη, η ενεργειακή ανίχνευση (ED), η ποιοτική ένδειξη συνδέσεων (LQI), η επιλογή καναλιών, η σαφής αξιολόγηση των καναλιών (CCA) και η διαβίβαση καθώς επίσης και λήψη των πακέτων πέρα από το φυσικό μέσο.

Τα πρότυπα προσφέρουν δύο επιλογές PHY βασισμένες τη ζώνη συχνότητας. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι 250 Kbps στα 2,4 GHz, 40 kbps στα 915MHz και 20 Kbps στα 868 MHz. Ο υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης στα 2.4GHz αποδίδεται σε ένα σχέδιο διαμόρφωσης υψηλής απόδοσης. Η χαμηλότερη συχνότητα παρέχει την πιο μακροχρόνια σειρά λόγω των χαμηλότερων απωλειών διάδοσης. Η χαμηλή απόδοση μπορεί να ερμηνευτεί σε καλύτερη ευαισθησία και μεγαλύτερη περιοχή κάλυψης. Η υψηλή απόδοση σημαίνει τον υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης, τη χαμηλότερη λανθάνουσα κατάσταση ή χαμηλότερο κύκλο καθήκοντος (duty circle).

PHY (MHz)	Frequency Band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (Kchip/s)	Modulation	Bit rate (Kb/s)	Symbol rate (Ksymbol/s)	Symbols
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902-928	600	BPSK	40	40	Binary
2450	2400-2483.5	2000	Q-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

**Πίνακας 2.1.** Ζώνες συχνοτήτων και ρυθμοί μετάδοσης [16]

Το υπόστρωμα της MAC παρέχει μια διεπαφή μεταξύ του υποστρώματος σύγκλισης συγκεκριμένων υπηρεσιών και του στρώματος PHY. Το υπόστρωμα της MAC παρέχει επίσης δύο υπηρεσίες, την υπηρεσία δεδομένων MAC και την υπηρεσία διαχείρισης MAC. Το υπόστρωμα της MAC είναι υπεύθυνο για την παραγωγή αναγνωριστικών σημάτων δικτύων εάν η συσκευή είναι ένας συντονιστής, συγχρονίζει στα αναγνωριστικά σήματα, παρέχει μια αξιόπιστη σύνδεση μεταξύ δύο όμοιων οντοτήτων της MAC, υποστηρίζοντας PAN σύνδεση και αποσύνδεση. [8]

## Κεφάλαιο 3

### Μεθοδολογία

#### 3.1 Εισαγωγή

Βάση της θεωρίας θα εφαρμόσουμε ένα σενάριο βασισμένο στην τεχνολογία Zigbee. Αυτό θα υλοποιηθεί με την εφαρμογή OPNET v14.5.

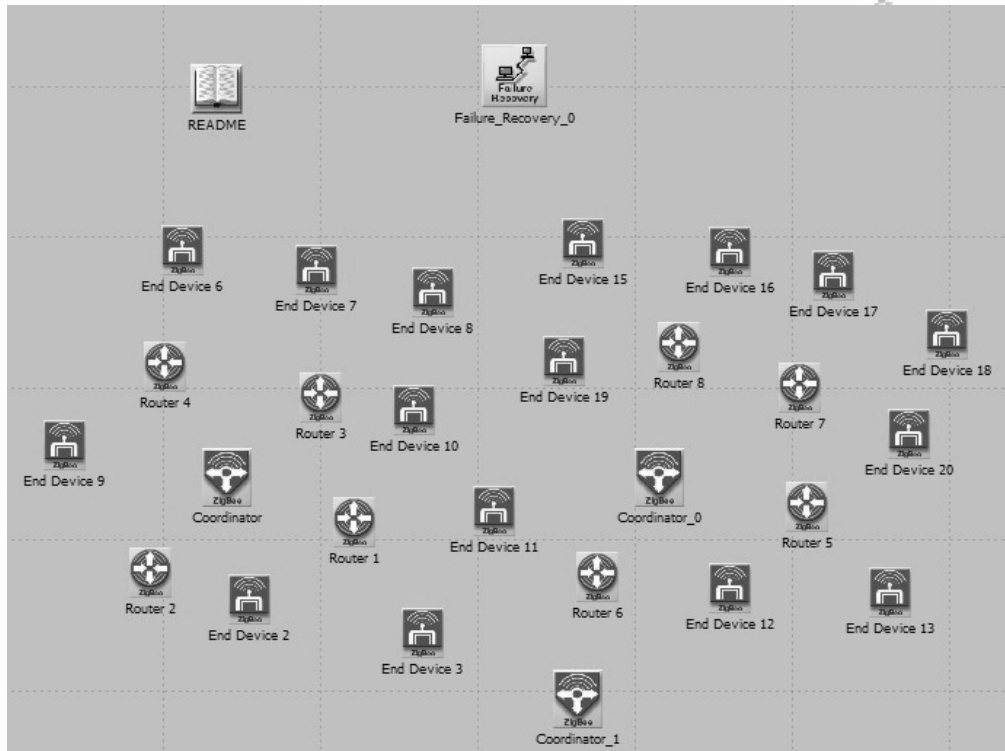
Το OPNET παρέχει ένα εικονικό περιβάλλον που μοντελοποιεί τη συμπεριφορά ενός ολόκληρου δικτύου, συμπεριλαμβανομένων των δρομολογητών, των διακοπών, των πρωτοκόλλων, των εξυπηρετητών και των υπηρεσιών του. Δουλεύοντας σε ένα εικονικό περιβάλλον είναι δυνατή η εύκολη και έγκαιρη διάγνωση των σχεδιαστικών προβλημάτων και η διόρθωσή τους πριν την υλοποίηση του δικτύου.

#### 3.2 Σενάριο

Το σενάριο με το οποίο θα ασχοληθούμε μελετά τη συμπεριφορά ενός δικτύου Zigbee, όταν ο Συντονιστής τεθεί εκτός λειτουργίας (coordinator failure).

Το δίκτυο περιλαμβάνει 3 coordinators (συντονιστές) και 24 Δρομολογητές και Τερματικές Συσκευές, όπου από εδώ και στο εξής θα καλούνται routers και end devices αντίστοιχα. Κάθε Router και End device στο σενάριο έχει καθοριστεί να δέχεται αυτόματα την ταυτότητά τους (PAN ID). Οι coordinators έχουν θέσει τις ταυτότητές τους στην 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Μια μερίδα από τους υπόλοιπους κόμβους θα πρέπει να ενταχθεί σε κάθε έναν από τους τρεις συντονιστές (κάθε δεδομένος κόμβος μπορεί να ενταχθεί σε οποιονδήποτε συντονιστή).





**Σχήμα 3.1.** 3 WPAN networks σε τοπολογία Tree

Στα δύο λεπτά της προσομοίωσης, ο πρώτος coordinator (coordinator) θα βγει εκτός λειτουργίας. Θα παραμείνει εκτός λειτουργίας μέχρι τα τέσσερα λεπτά, όπου θα επανέλθει και θα αποκαταστήσει τη λειτουργία του δικτύου. Στα οκτώ λεπτά, ο δεύτερος coordinator (coordinator\_0) θα βγει εκτός λειτουργίας. Θα παραμείνει εκτός λειτουργίας μέχρι τα δέκα λεπτά και στη συνέχεια θα επανέλθει.

### 3.3 Συλλογή στοιχείων

Θα πάρουμε μία σειρά αποτελεσμάτων και μέσα από αυτά θα βγάλουμε ορισμένα συμπεράσματα τα οποία θα αφορούν:

Αρχικά το σενάριο θα υλοποιηθεί με τοπολογία αστέρα και στη συνέχεια με τοπολογία πλέγματος. Αφού τα συγκρίνουμε μεταξύ τους στη συνέχεια θα πάρουμε την περίπτωση όπου ο ρυθμός μετάδοσης (data rate) μεταβάλλεται. Στην μία περίπτωση θα γίνεται 250 Kbps και στην άλλη 100 Kbps. Αυτό θα γίνει και με τις δύο προαναφερθείσες τοπολογίες. Τέλος, θα μεταβάλουμε τον μηχανισμό

ACK (ACK mechanism), όπου στη μία περίπτωση θα είναι ενεργοποιημένος και στην άλλη όχι και για τις δύο τοπολογίες.

Κατόπιν τούτου θα συγκρίνουμε όλες τις περιπτώσεις αποτελεσμάτων μεταξύ τους και θα προτείνουμε σε ποιες περιπτώσεις είναι οι τοπολογίες κατάλληλες και κάτω από ποιες προϋποθέσεις.

Η αναμενόμενη συμπεριφορά είναι περίπου το  $\frac{1}{3}$  των κόμβων να ενταχθούν αρχικά στον καθένα από τους τρεις συντονιστές. Όταν ο πρώτος coordinator βγει εκτός λειτουργίας, οι κόμβοι που συνδέονταν σε αυτό το PAN, πρέπει να φύγουν και να ενταχθούν στο δεύτερο και/ή στον τρίτο coordinator. Όταν ο δεύτερος coordinator βγει εκτός λειτουργίας, όλοι οι κόμβοι που ήταν συνδεδεμένοι σε αυτόν θα πρέπει να ενταχθούν στον πρώτο και/ή στον τρίτο coordinator.

## Κεφάλαιο 4

### Αποτελέσματα

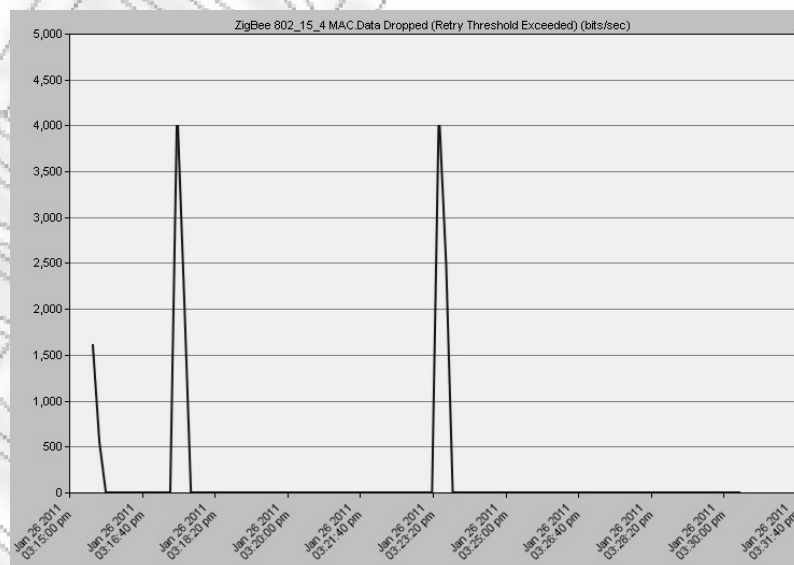
#### 4.1 Εισαγωγή

Βασισμένοι στο παραπάνω σενάριο, coordinator failure, θα πάρουμε μία σειρά αποτελεσμάτων μελετώντας τη συμπεριφορά του δικτύου όταν η τοπολογία είναι δενδροειδής, η οποία από εδώ και στο εξής θα καλείται Tree, και όταν η τοπολογία είναι πλέγματος, η οποία από εδώ και στο εξής θα καλείται Mesh.

#### 4.2 Περιγραφική ανάλυση των δεδομένων

##### CASE 1. Τοπολογία Tree – Τοπολογία Mesh

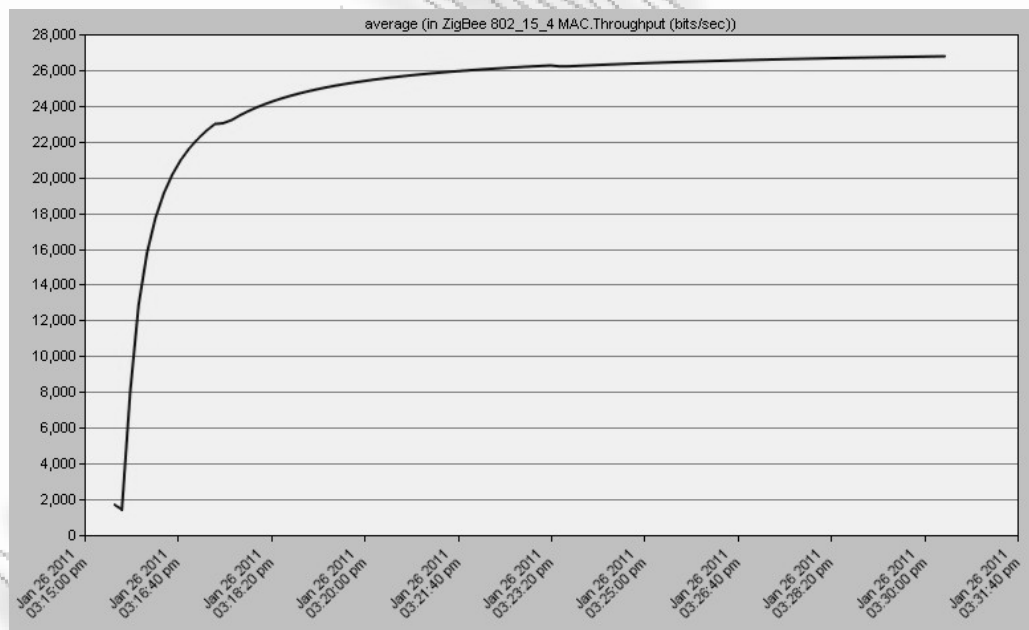
Το σχήμα 4.1 απεικονίζει τα πακέτα που χάθηκαν (data dropped) στο επίπεδο MAC είναι η συνολική κίνηση όλων των υψηλότερων επιπέδων η οποία έχει απορριφθεί από το επίπεδο του MAC.



Σχήμα 4.1. Zigbee\_802\_15\_4\_mac data dropped σε τοπολογία tree

Εδώ παρατηρούμε ότι στο περισσότερο μέρος της προσομοίωσης δεν χάνεται κανένα δεδομένο στο επίπεδο του Zigbee\_802\_15\_4\_mac. Αξία παρατήρησης είναι τα δύο pick της γραφικής παράστασης και λιγότερο σημαντικό στην αρχή το πρώτο pick. Με το πρώτο δε θα ασχοληθούμε παραπάνω διότι είναι κάποια δεδομένα που χάνονται κατά τη διάρκεια της αρχικοποίησης του δικτύου και τα θεωρούμε αμελητέα. Στη συνέχεια παρατηρούμε ότι στο 2ο λεπτό και στο 8ο χάνονται από 4000 bits. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι τα δεδομένα λεπτά της προσομοίωσης έχουμε απώλεια στο 2ο λεπτό του coordinator του PAN 1 δικτύου ενώ στο 8ο λεπτό έχουμε απώλεια του coordinator\_0 του PAN 2 δικτύου. Κατόπιν τούτου η μεταφορά των δεδομένων διεξάγεται ομαλά χωρίς καμία απώλεια.

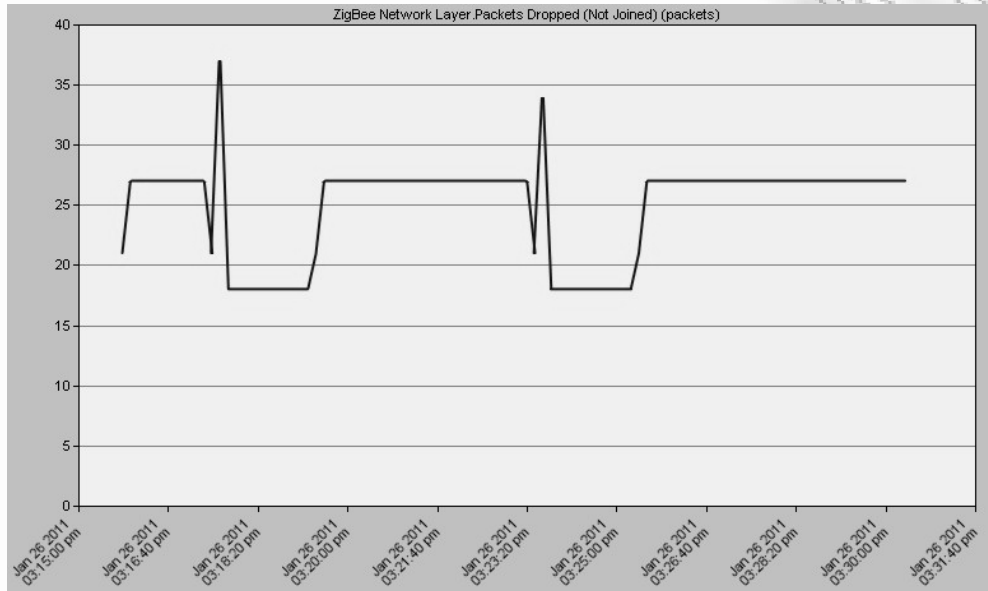
Το σχήμα 4.2 δείχνει το συνολικό αριθμό των bits/sec που περνάνε από το επίπεδο 802.15.4 MAC στα υψηλότερα επίπεδα (throughput).



**Σχήμα 4.2.** Zigbee\_802\_15\_4\_mac Throughput σε τοπολογία tree

Στην τοπολογία tree ο μέσος όρος του throughput είναι περίπου 27000 bits/sec (27Kbps).

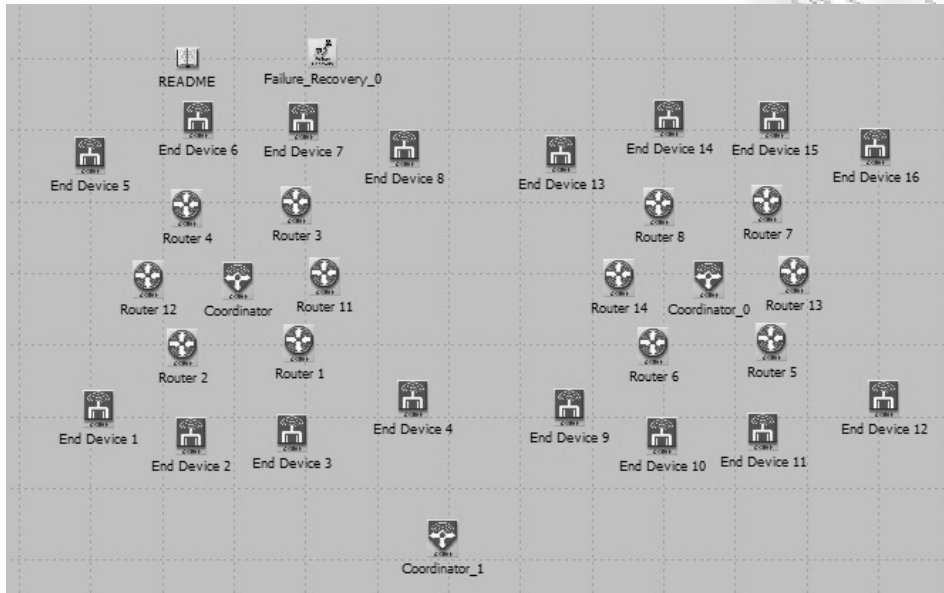
Το σχήμα 4.3 αφορά τα πακέτα τα οποία χάθηκαν από το επίπεδο δικτύου λόγω του ότι δεν κατάφεραν να συνδεθούν στο δίκτυο (not joined).



**Σχήμα 4.3.** Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία tree

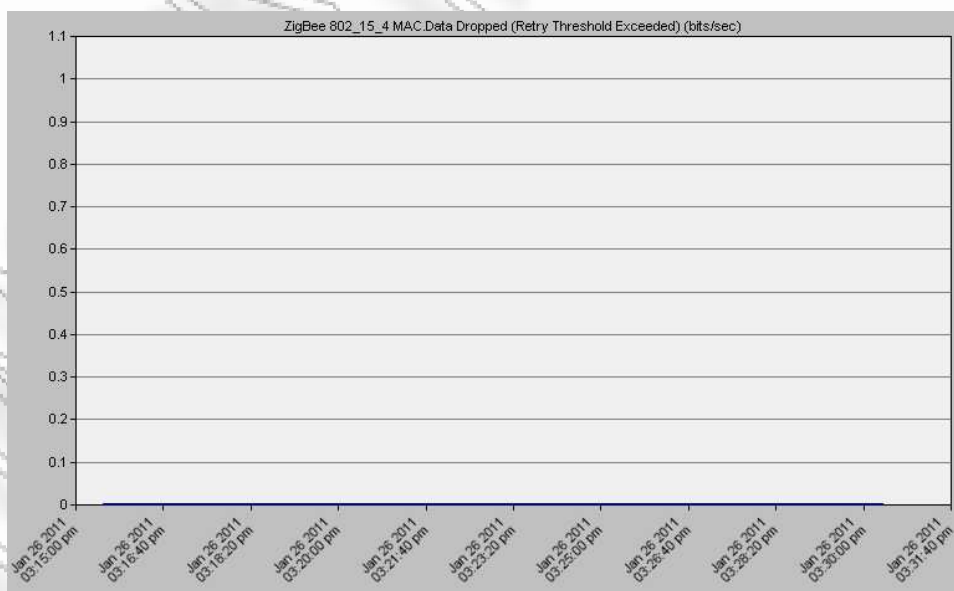
Στην τοπολογία tree αρχικά χάνονται περίπου 27 πακέτα το δευτερόλεπτο. Στα δύο λεπτά της προσομοίωσης χάνονται παραπάνω και αυτό γιατί ο coordinator του PAN1 τίθεται εκτός λειτουργίας συνεπώς όλοι οι κόμβοι που συνδέονται με αυτόν και του στέλνουν πακέτα, αυτά χάθηκαν. Λίγα δευτερόλεπτα μετά και μέχρι το 4ο λεπτό της προσομοίωσης χάνονται πιο λίγα πακέτα, περίπου 18. Αυτό συμβαίνει διότι έχουμε έναν κόμβο πλέον λιγότερο. Αφού ο coordinator ξαναεπανέρχεται μετά το 4ο λεπτό η απώλεια είναι πάλι 27 πακέτα μέχρι το 8ο λεπτό της προσομοίωσης. Από το 8ο μέχρι και το 10ο λεπτό συμβαίνει ότι και στο 2ο με 4ο λεπτό. Μετά το 10ο λεπτό η κατάσταση επανέρχεται πάλι στα προηγούμενα επίπεδα, δηλαδή 27 πακέτα απώλεια.

Το σχήμα 4.4 απεικονίζει 3 wpan δίκτυα όπως και προηγουμένως αλλά αυτή τη φορά σε τοπολογία Mesh.



Σχήμα 4.4. 3 WPAN networks σε τοπολογία Mesh

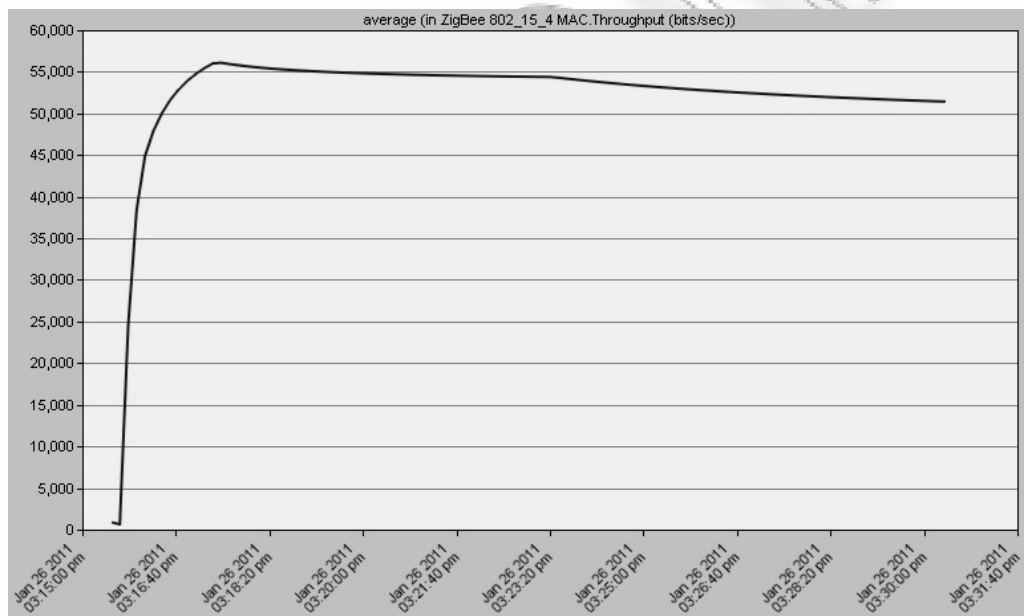
Στο σχήμα 4.5 παρατηρούμε ότι καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης δεν χάνεται κανένα πακέτο.



Σχήμα 4.5. Zigbee\_802\_15\_4\_mac data dropped σε τοπολογία Mesh

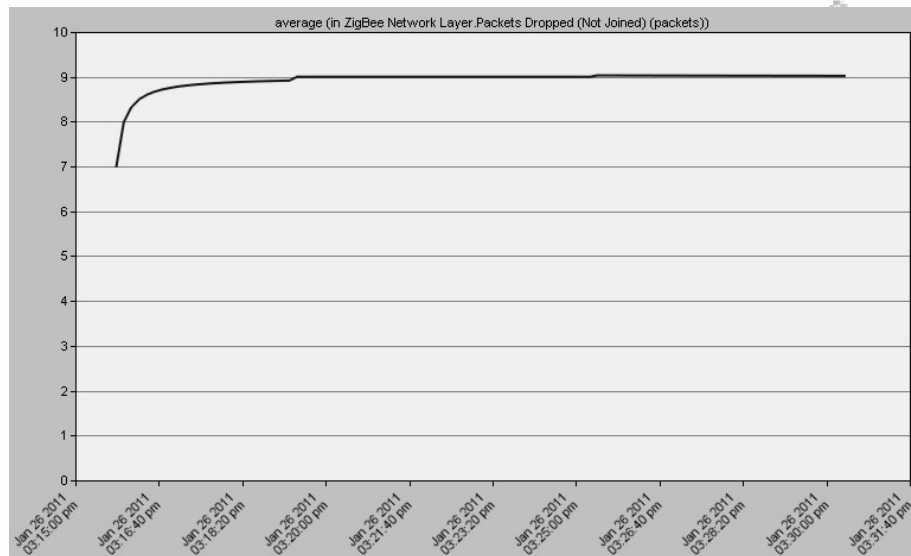
Αυτό είναι λογικό διότι σύμφωνα με τη θεωρία η τοπολογία Mesh οδηγεί σε πιο αποτελεσματική διάδοση μηνυμάτων, που σημαίνει ότι μπορούν να βρεθούν εναλλακτικές διαδρομές, εάν μια σύνδεση αποτύχει ή υπάρχει συμφόρηση. Παρέχεται το χαρακτηριστικό της «ανακάλυψης διαδρομής" (Route discovery) το οποίο επιτρέπει στο δίκτυο να βρει την καλύτερη διαθέσιμη διαδρομή για να προωθήσει ένα μήνυμα.

Το σχήμα 4.6 απεικονίζει το συνολικό throughput όταν η τοπολογία είναι mesh το οποίο κατά μέσο όρο είναι 53000 bits/sec (53Kbps).



**Σχήμα 4.6.** Zigbee\_802\_15\_4\_mac throughput σε τοπολογία Mesh

Στο σχήμα 4.7 παρατηρούμε ότι τα πακέτα που χάνονται κατά μέσο όρο στην τοπολογία mesh είναι 9.



**Σχήμα 4.7.** Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Mesh

#### CASE 2. Τοπολογία Tree ACK/No ACK – Τοπολογία Mesh ACK/No ACK

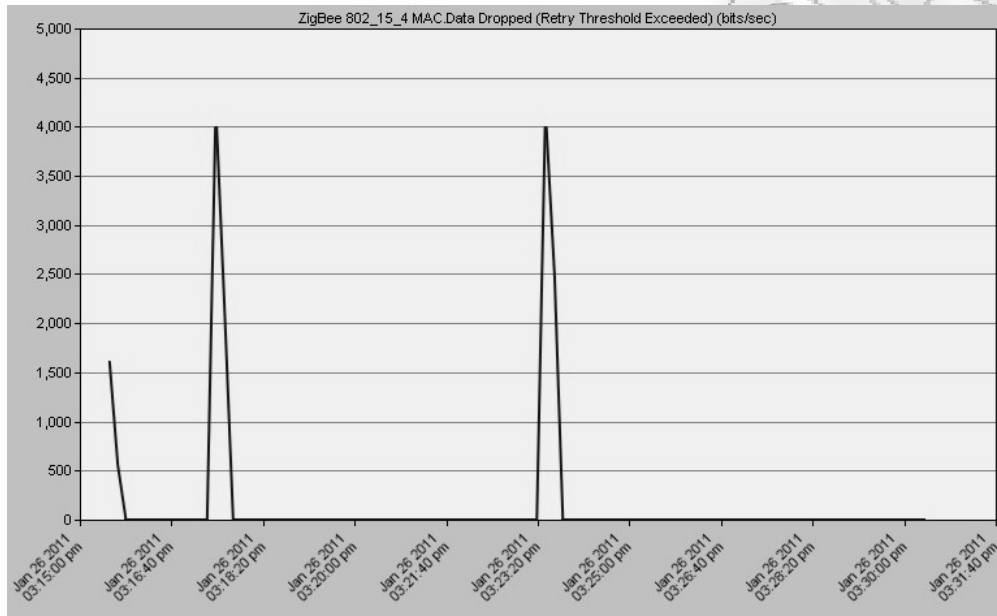
Στο πρωτόκολλο zigbee παρέχεται ο μηχανισμός ACK ο οποίος εάν είναι ενεργοποιημένος μας δίνει τη δυνατότητα να μπορούμε να έχουμε μια πιο αξιόπιστη και ασφαλέστερη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των κόμβων. Αυτός ο μηχανισμός παρέχεται από το επίπεδο Zigbee\_802\_15\_4\_mac.

Η λειτουργία του είναι η εξής:

Έστω ότι έχουμε έναν κόμβο A και έναν κόμβο B. Ο κόμβος A στέλνει ένα πακέτο στον κόμβο B. Μέσα σε κάποιο frame του πακέτου αυτού υπάρχει ο μηχανισμός ACK. Όταν ο κόμβος B παραλάβει επιτυχώς το πακέτο τότε αμέσως θα στείλει ένα πακέτο επιβεβαίωσης (ACK) πίσω στον κόμβο A. Το πακέτο θεωρείται ότι στάλθηκε επιτυχώς αφού το παρέλαβε ο κόμβος A. Εάν ο κόμβος A δεν παραλάβει το πακέτο επιβεβαίωσης δεν θεωρεί επιτυχημένη την αποστολή του πακέτου και θα συνεχίσει να στέλνει το πακέτο για ένα συγκεκριμένο χρόνο και αριθμό προσπαθειών που ορίζουμε εμείς από το επίπεδο του MAC.



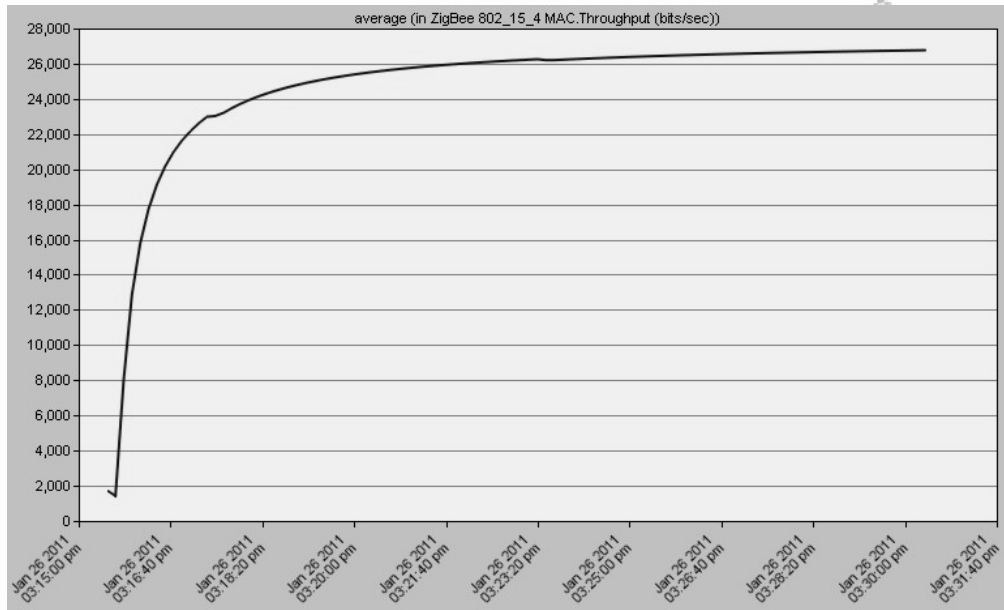
Από το σχήμα 4.8 παρατηρούμε ότι σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης δε χάνεται κάποιο πακέτο εκτός από την χρονική στιγμή των 2 και 8 λεπτών, όπου έχουμε την απώλεια του coordinator του κάθε δικτύου αντίστοιχα.



**Σχήμα 4.8** Zigbee\_802\_15\_4\_mac data dropped σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο

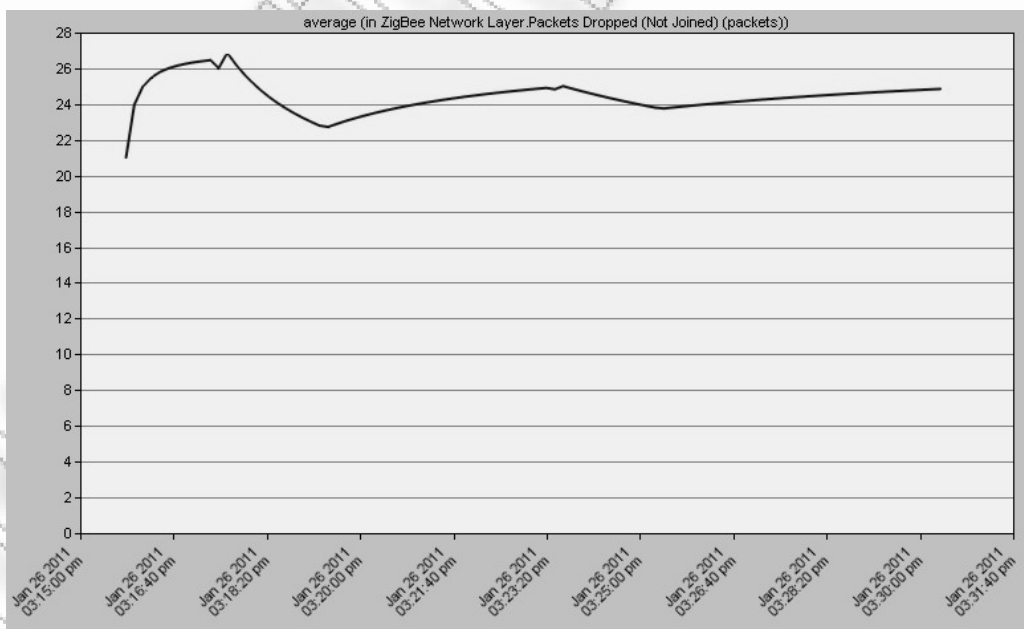
Αυτό οφείλεται στον μηχανισμό ACK οποίος εφόσον ήταν ενεργοποιημένος μας ενημέρωσε ότι κάποια από τα πακέτα που στάλθηκαν δεν παραδόθηκαν ή δεν παραδόθηκαν σωστά.

Ο μέσος όρος του throughput είναι περίπου 27000 bits/sec (27Kbps) όπως φαίνεται από το σχήμα 4.9.

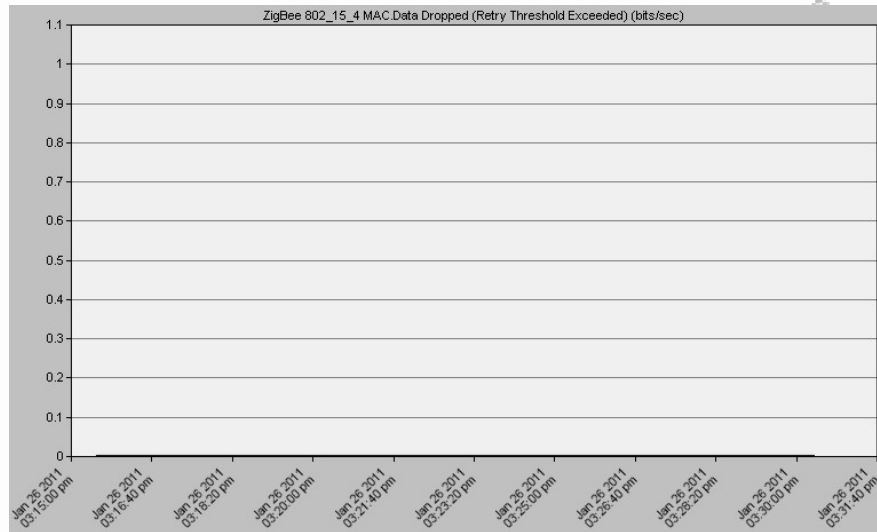


**Σχήμα 4.9** Zigbee\_802\_15\_4\_mac Throughput σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο

Από το σχήμα 4.10 βλέπουμε ότι τα πακέτα τα οποία χάνονται από το επίπεδο δικτύου είναι κατά μέσο όρο περίπου 25.

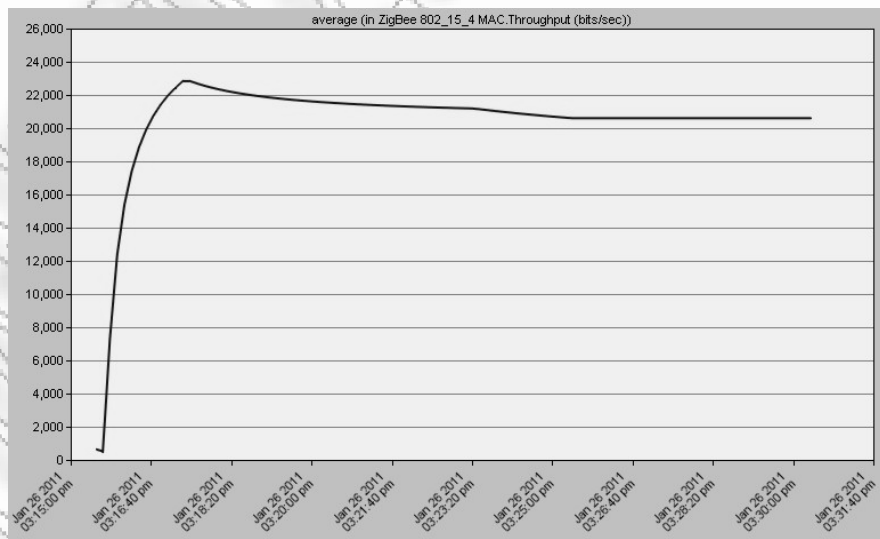


**Σχήμα 4.10** Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο



**Σχήμα 4.11** Zigbee\_802\_15\_4\_mac data dropped σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο

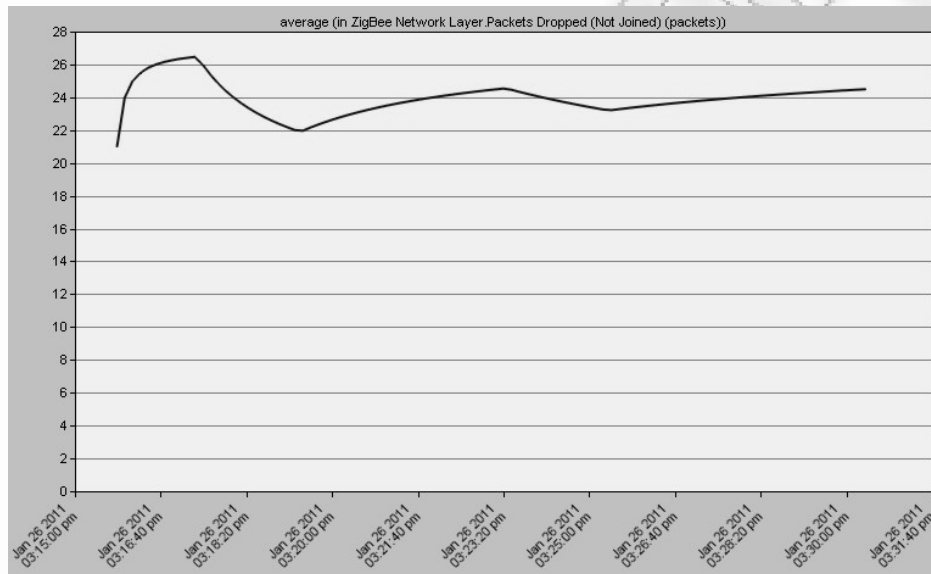
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι η απώλεια πακέτων είναι μηδενική. Στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει αλλά ο λόγος που βλέπουμε ότι υπάρχει μηδενική απώλεια είναι γιατί ο μηχανισμός επιβεβαίωσης πακέτων (ACK) δεν είναι ενεργοποιημένος συνεπώς δε θα ενημερωθεί ποτέ κανένας κόμβος για το αν παραλήφθηκε το πακέτο ή όχι θεωρώντας ότι οι αποστολές πακέτων λήφθηκαν με επιτυχία.



**Σχήμα 4.12** Zigbee\_802\_15\_4\_mac Throughput σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο

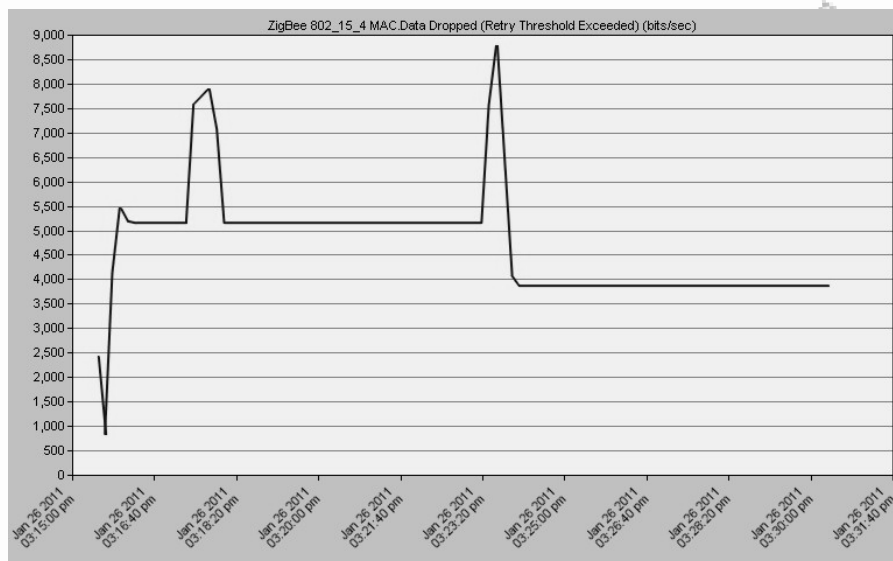
Στο σχήμα 4.12 απεικονίζονται τα συνολικά bits/sec που στάλθηκαν από το επίπεδο του MAC προς τα υψηλότερα επίπεδα και είναι 21000 (21Kbps).

Στο σχήμα 4.13 φαίνεται ο μέσος όρος των πακέτων που χάθηκαν από το επίπεδο του δικτύου και είναι περίπου 25.



**Σχήμα 4.13** Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Tree με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο

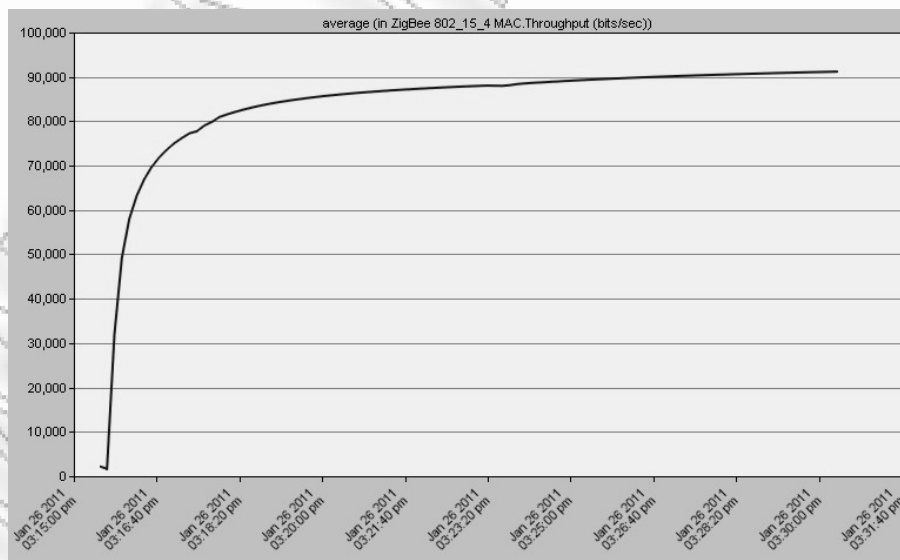
Στο σχήμα 4.14 παρατηρούμε ότι στην τοπολογία mesh όταν ο μηχανισμός ACK είναι ενεργοποιημένος υπάρχει απώλεια πακέτων. Δηλαδή δεν στάλθηκαν ποτέ κάποια πακέτα επιβεβαίωσης συνεπώς θεωρείται ότι υπάρχει απώλεια πακέτων.



**Σχήμα 4.14** Zigbee\_802\_15\_4\_mac data dropped σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο

Η μεγαλύτερη τιμή πακέτων που χάθηκαν σε bits δεν ξεπερνάει τα 9000 (9Kbps).

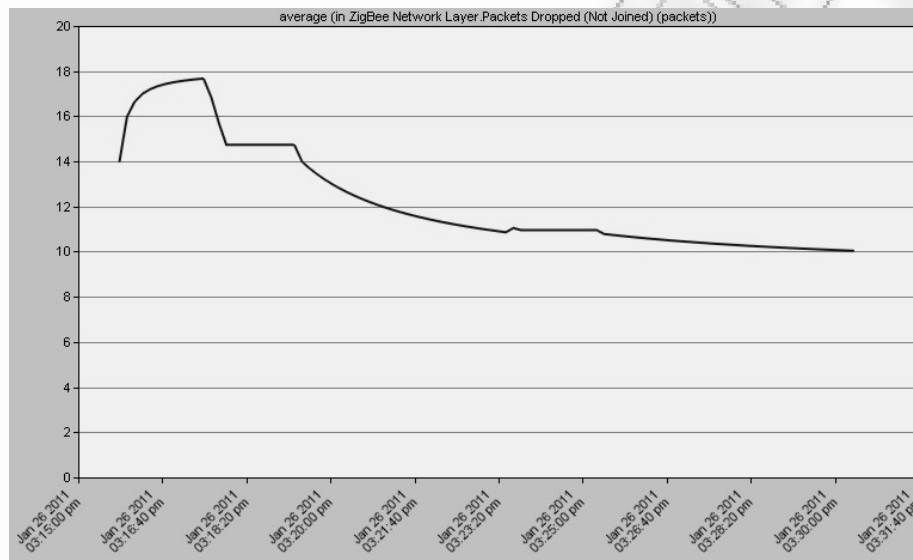
Το συνολικό μέγεθος των bits που στάλθηκαν από το επίπεδο MAC στα υψηλότερα επίπεδα, throughput, είναι κατά μέσο όρο περίπου 90000bits/sec (90Kbps) όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15.



**Σχήμα 4.15** Zigbee\_802\_15\_4\_mac Throughput σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο

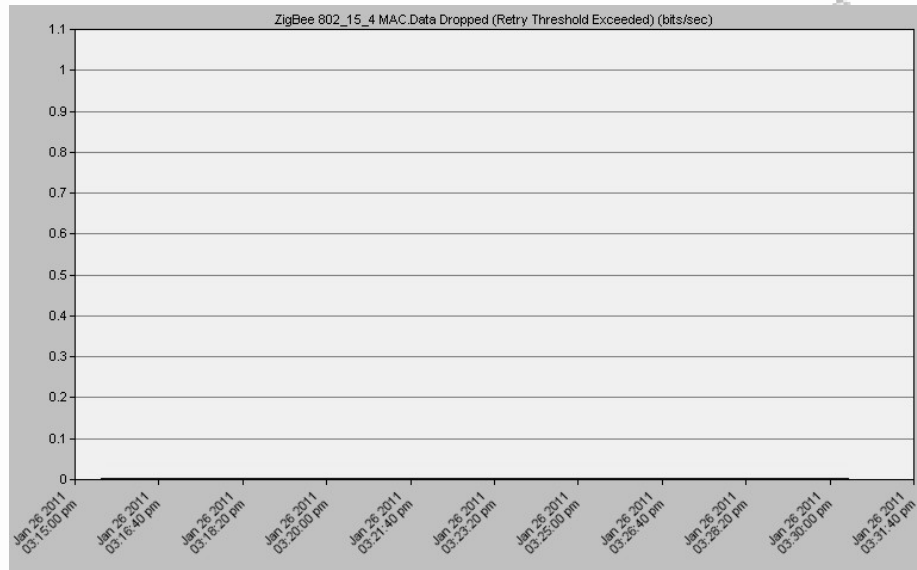
Μέσα σε αυτά τα bits περιλαμβάνονται και τα bits του μηχανισμού επιβεβαίωσης πακέτων.

Στο σχήμα 4.16 απεικονίζονται τα πακέτα που χάνονται κάθε φορά από αυτό το επίπεδο τα οποία είναι κατά μέσο όρο περίπου 12.



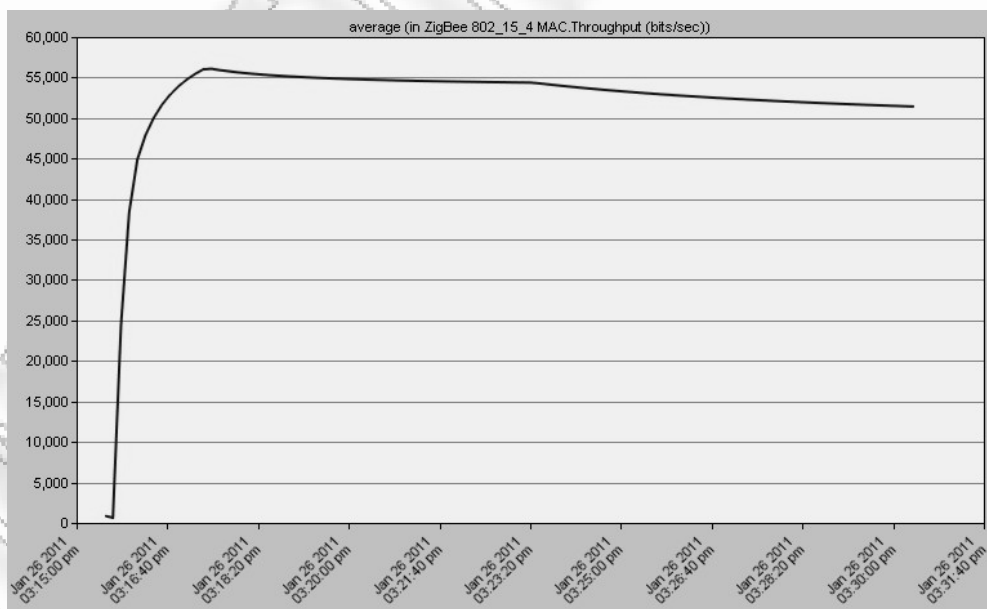
**Σχήμα 4.16** Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο

Παρατηρώντας το σχήμα 4.17 διαπιστώνουμε ότι στην τοπολογία Mesh καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης δεν χάνεται κανένα πακέτο. Αυτό είναι λογικό διότι σύμφωνα με τη θεωρία η τοπολογία Mesh οδηγεί σε πιο αποτελεσματική διάδοση μηνυμάτων, που σημαίνει ότι μπορούν να βρεθούν εναλλακτικές διαδρομές, εάν μια σύνδεση αποτύχει ή υπάρχει συμφόρηση. Παρέχεται το χαρακτηριστικό της «ανακάλυψης διαδρομής» (Route discovery) το οποίο επιτρέπει στο δίκτυο να βρει την καλύτερη διαθέσιμη διαδρομή για να προωθήσει ένα μήνυμα.



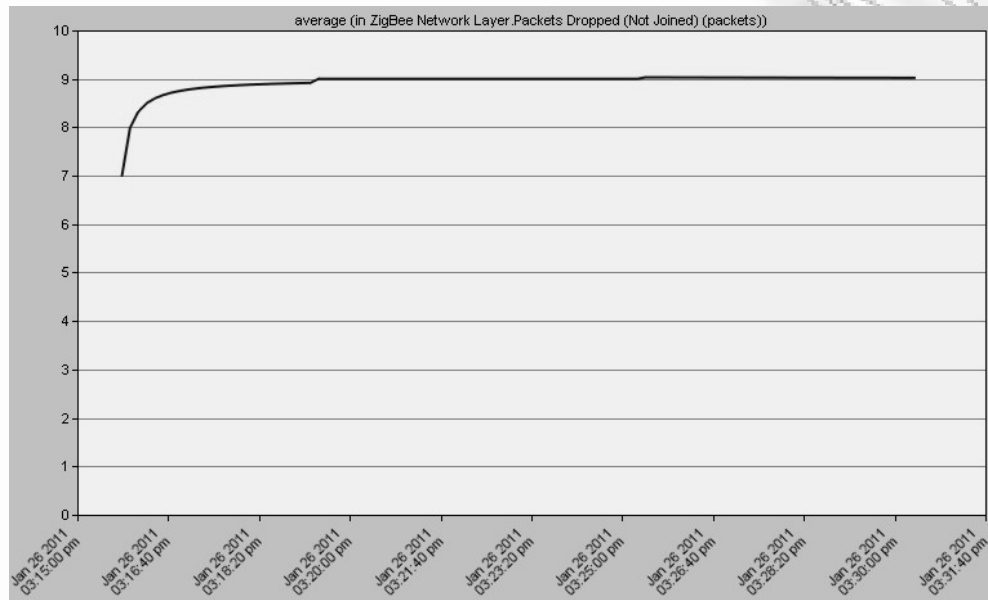
**Σχήμα 4.17** Zigbee\_802\_15\_4\_mac data dropped σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο

Χωρίς τον μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο το συνολικό μέγεθος των bits που στάλθηκαν από το επίπεδο MAC στα υψηλότερα επίπεδα, throughput, είναι κατά μέσο όρο περίπου 53000bits/sec (53Kbps), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18.



**Σχήμα 4.18** Zigbee\_802\_15\_4\_mac Throughput σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο

Από το σχήμα 4.19 παρατηρούμε ότι τα πακέτα που χάνονται τη φορά από αυτό το επίπεδο είναι σχεδόν πάντα 9.

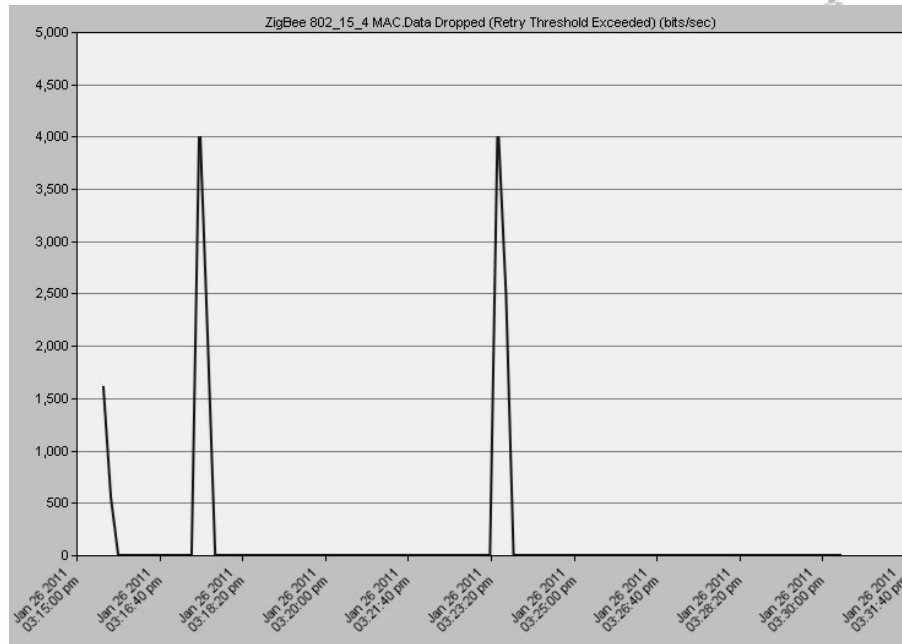


**Σχήμα 4.19** Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Mesh με μηχανισμό ACK απενεργοποιημένο

CASE 3. Τοπολογία Tree Data rate 250Kpbs/100Kbps – Τοπολογία Mesh Data rate 250Kpbs/100Kbps

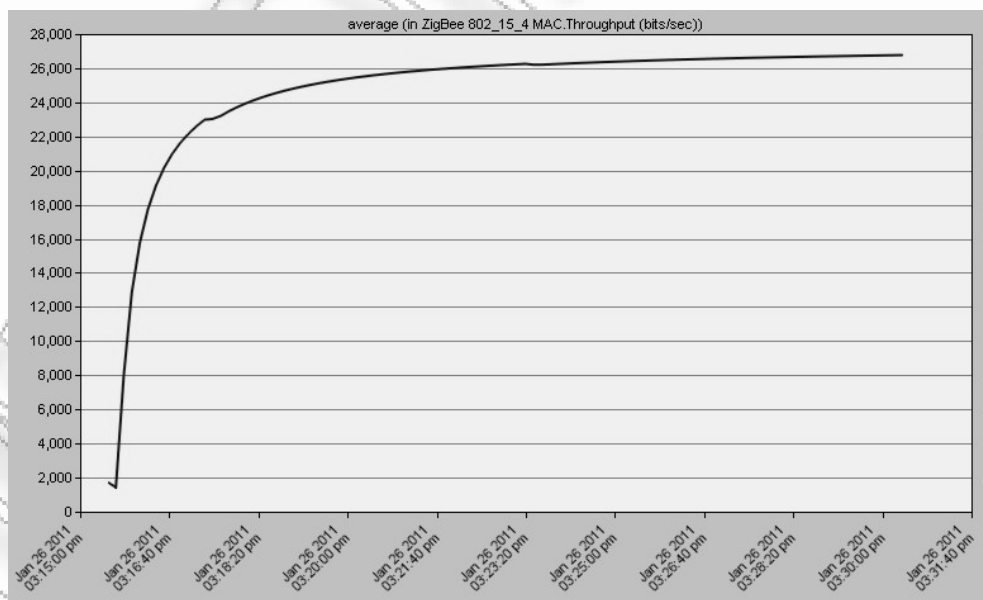
Από το σχήμα 4.20 φαίνεται ότι τα bits που χάνονται σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι συνολικά 8000 (8Kbps)





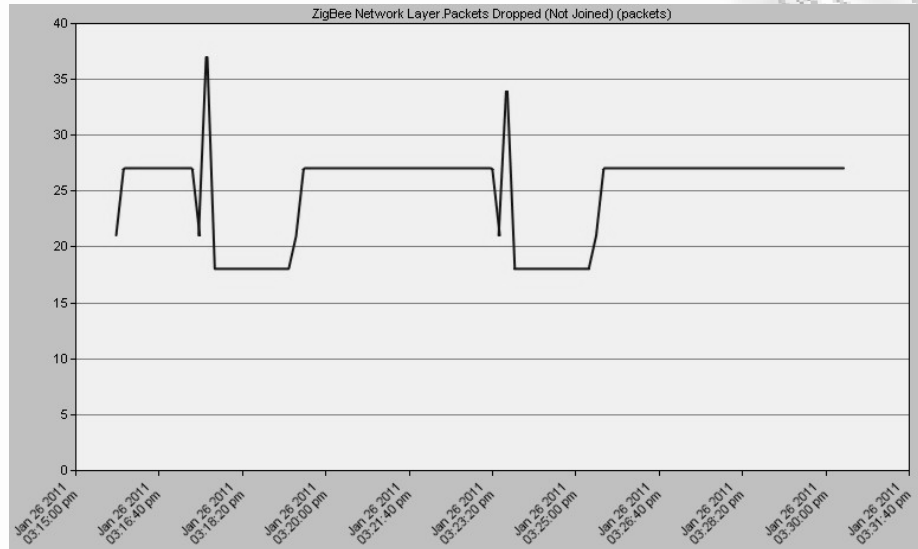
**Σχήμα 4.20** Zigbee\_802\_15\_4\_mac data dropped σε τοπολογία Tree με data rate 250 Kbps

Στο σχήμα 4.21 φαίνεται ότι ο μέσος όρος του throughput είναι περίπου 27000 bits/sec (27Kbps).



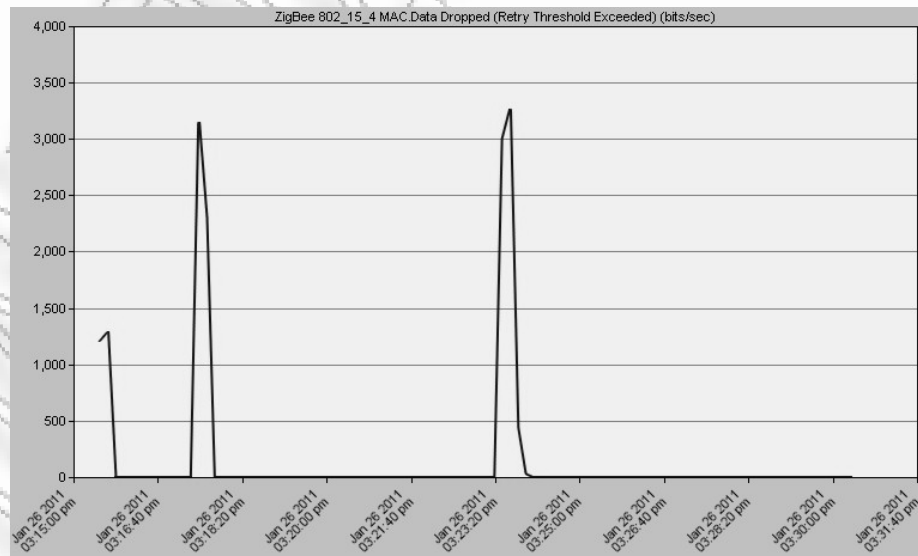
**Σχήμα 4.21** Zigbee\_802\_15\_4\_mac Throughput σε τοπολογία Tree με data rate 250 Kbps

Από το σχήμα 4.22 θα μπορούσαμε να πούμε ότι κατά μέσο όρο τα πακέτα που χάθηκαν είναι περίπου 25 το δευτερόλεπτο



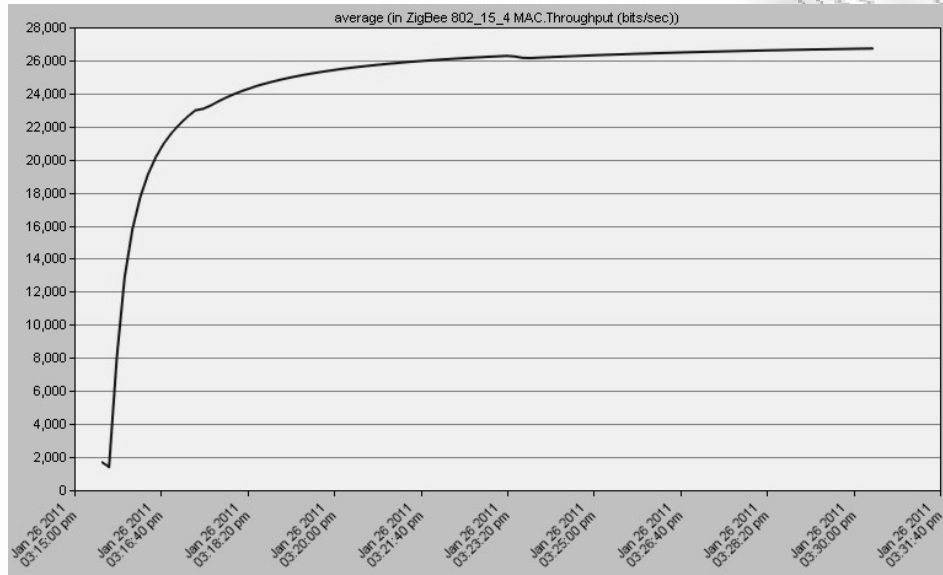
**Σχήμα 4.22** Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Tree με data rate 250 Kbps

Στο σχήμα 4.23 απεικονίζονται τα bits που χάνονται σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης όταν η τοπολογία είναι tree και το data rate είναι 100 Kbps. Συνολικά είναι περίπου 6200 (6.2Kbps)



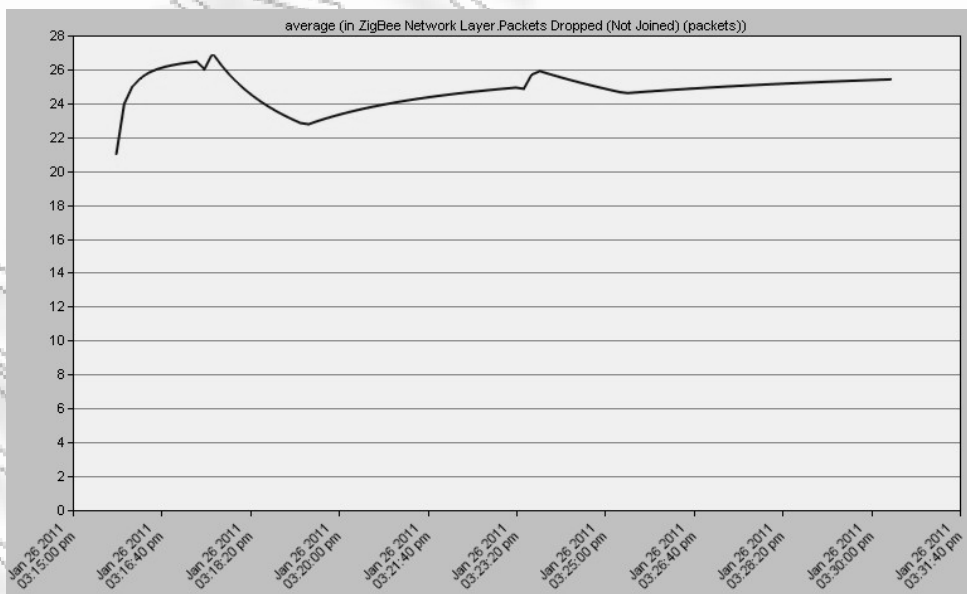
**Σχήμα 4.23** Zigbee\_802\_15\_4\_mac data dropped σε τοπολογία Tree με data rate 100 Kbps

Στο σχήμα 4.24 φαίνεται ότι ο μέσος όρος του throughput είναι περίπου 26000 bits/sec (26Kbps).



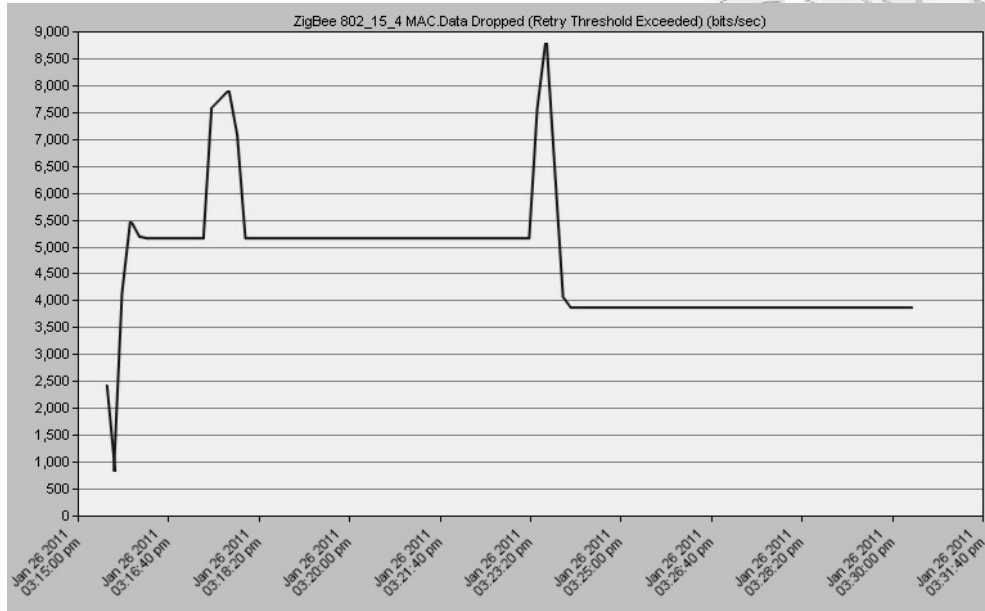
**Σχήμα 4.24** Zigbee\_802\_15\_4\_mac Throughput σε τοπολογία Tree με data rate 100 Kbps

Από το σχήμα 4.25 θα μπορούσαμε να πούμε ότι κατά μέσο όρο τα πακέτα που χάθηκαν είναι περίπου 25 το δευτερόλεπτο.



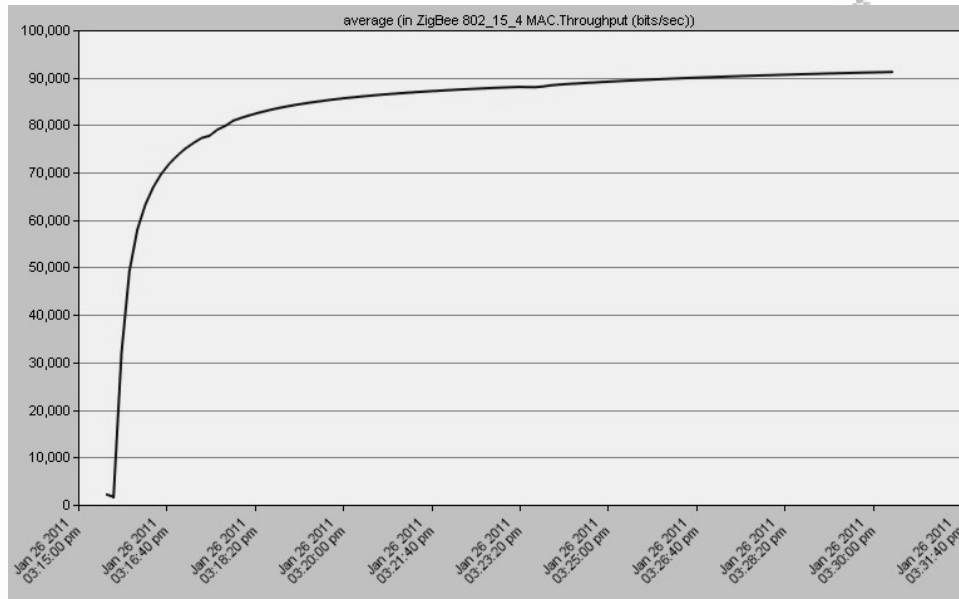
**Σχήμα 4.25** Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Tree με data rate 100 Kbps

Στο σχήμα 4.26 απεικονίζονται τα πακέτα που χάθηκαν όταν η τοπολογία είναι mesh και το data rate είναι 250 Kbps. Η μεγαλύτερη τιμή πακέτων που χάθηκαν σε bits δεν ξεπερνάει τα 9000 (9Kbps).



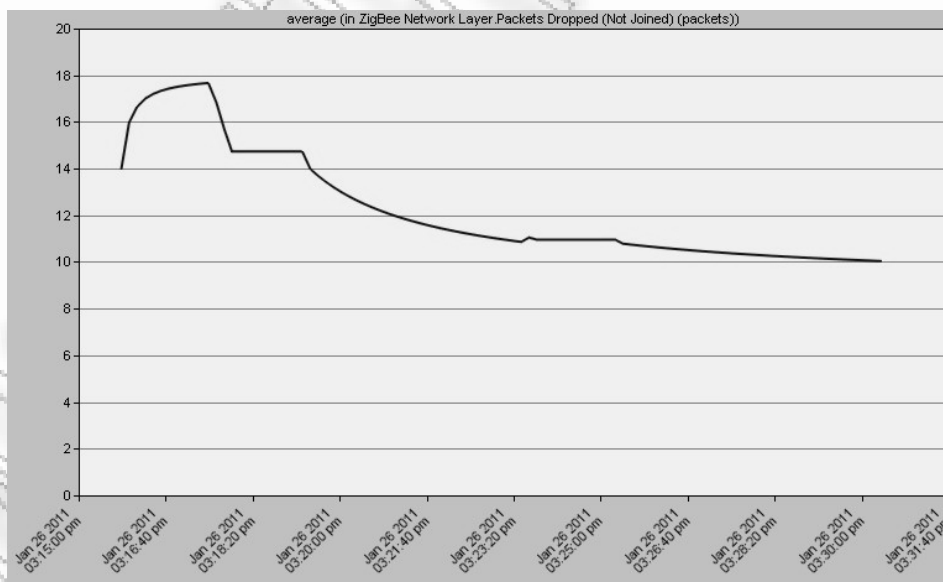
**Σχήμα 4.26** Zigbee\_802\_15\_4\_mac data dropped σε τοπολογία Mesh με data rate 250 Kbps

Στο σχήμα 4.27 απεικονίζεται το συνολικό μέγεθος των bits που στάλθηκαν από το επίπεδο MAC στα υψηλότερα επίπεδα, throughput, το οποίο είναι κατά μέσο όρο περίπου 90000bits/sec (90Kbps). Μέσα σε αυτά τα bits περιλαμβάνονται και τα bits του μηχανισμού επιβεβαίωσης πακέτων.



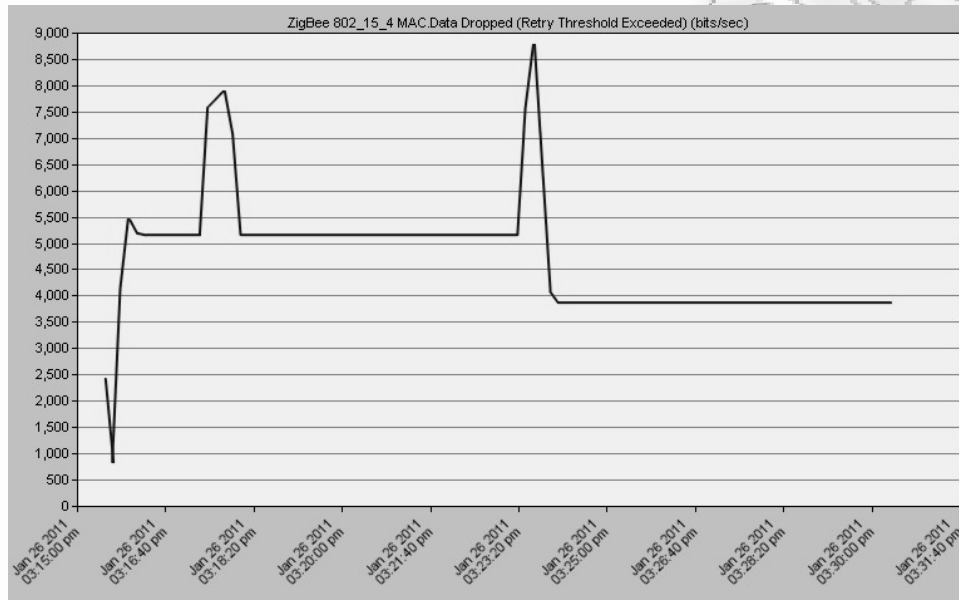
**Σχήμα 4.27** Zigbee\_802\_15\_4\_mac Throughput σε τοπολογία Mesh με data rate 250 Kbps

Τα πακέτα που χάνονται τη φορά από το επίπεδο δικτύου είναι κατά μέσο όρο περίπου 12, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 4.28.



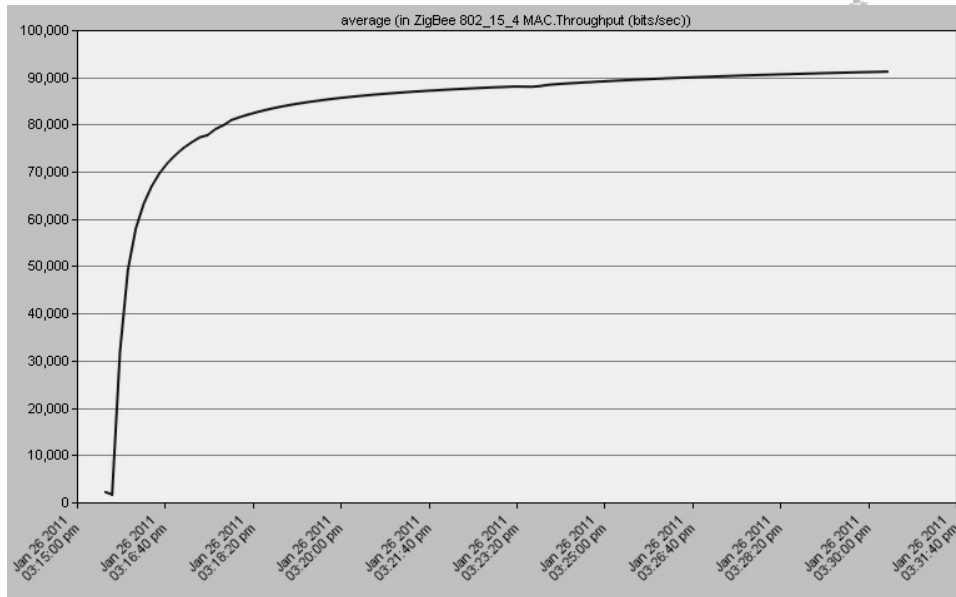
**Σχήμα 4.28** Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Mesh με data rate 250 Kbps

Στο σχήμα 4.29 απεικονίζεται η μεγαλύτερη τιμή πακέτων που χάθηκαν, όταν η τοπολογία του δικτύου είναι Mesh και το data rate είναι 100 Kbps, η οποία δεν ξεπερνάει τα 9000 (9Kbps).



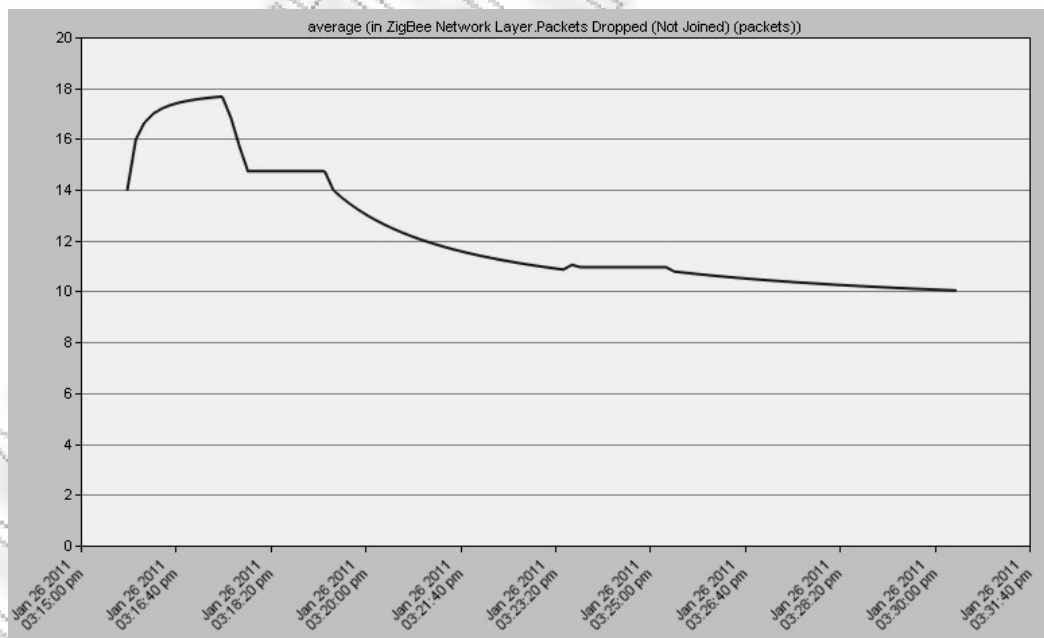
**Σχήμα 4.29** Zigbee\_802\_15\_4\_mac data dropped σε τοπολογία Mesh με data rate 100 Kbps

Στο σχήμα 4.30 παρατηρούμε ότι το συνολικό μέγεθος των bits που στάλθηκαν από το επίπεδο MAC στα υψηλότερα επίπεδα, throughput, είναι κατά μέσο όρο περίπου 90000bits/sec (90Kbps). Μέσα σε αυτά τα bits περιλαμβάνονται και τα bits του μηχανισμού επιβεβαίωσης πακέτων.



**Σχήμα 4.30** Zigbee\_802\_15\_4\_mac Throughput σε τοπολογία Mesh με data rate 100 Kbps

Από το σχήμα 4.31 θα μπορούσαμε να πούμε ότι κατά μέσο όρο τα πακέτα που χάθηκαν στο επίπεδο του δικτύου είναι περίπου 12 το δευτερόλεπτο.



**Σχήμα 4.31** Zigbee Network Layer packets dropped σε τοπολογία Mesh με data rate 100 Kbps

## Κεφάλαιο 5

### Συμπεράσματα

#### 5.1 Ανασκόπηση

Τα δεδομένα των υψηλότερων επιπέδων που χάθηκαν συνολικά από το επίπεδο του MAC, έχοντας στο σενάριό μας τοπολογία tree, είναι 8000 bits/sec ενώ εφαρμόζοντας την τοπολογία Mesh δεν υπάρχει απώλεια δεδομένων γιατί σύμφωνα με την θεωρία το χαρακτηριστικό της «ανακάλυψης διαδρομής" (Route discovery) επέτρεψε στο δίκτυο να βρει την καλύτερη διαθέσιμη διαδρομή για να προωθήσει τα δεδομένα όταν κάποιος κόμβος τεθεί εκτός λειτουργίας.

Το throughput ωστόσο στην τοπολογία Mesh είναι σχεδόν το διπλάσιο από αυτό της τοπολογίας tree. Στην τοπολογία tree το throughput είναι περίπου 27Kbps ενώ στην τοπολογία mesh είναι 55Kbps Αυτό συμβαίνει διότι λόγω των εναλλακτικών οδύσεων των πακέτων γίνεται μεγαλύτερη μεταφορά όγκου δεδομένων και ταχύτερα.

Στο επίπεδο του δικτύου επίσης χάνονται περισσότερα πακέτα στην τοπολογία tree παρά στην mesh και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάποια πακέτα δεν μπόρεσαν να συνδεθούν στο δίκτυο.

Συνεπώς η τοπολογία mesh είναι πιο αξιόπιστη από την tree η οποία έχει το μειονέκτημα ότι δεν υπάρχει εναλλακτική διαθέσιμη διαδρομή μετάδοσης δεδομένων σε περίπτωση που ένας σύνδεσμος βγει εκτός λειτουργίας.

Επιπλέον, όπως ήταν αναμενόμενο το Throughput στην περίπτωση που ο μηχανισμός ACK είναι ενεργοποιημένος είναι πολύ μεγαλύτερο από την περίπτωση όπου δεν είναι ενεργοποιημένο λόγω των επιπλέον πακέτων επιβεβαίωσης που παράγονται. Στην περίπτωση της τοπολογίας tree αγγίζει τα



27kbps με τον μηχανισμό ACK ενεργοποιημένο ενώ στην άλλη περίπτωση είναι περίπου 21kbps.

Στο Zigbee Network Layer τα πακέτα τα οποία χάνονται είναι περίπου ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Αυτό είναι λογικό γιατί το συγκεκριμένο επίπεδο δεν επηρεάζεται με διαφορετικό τρόπο από το μηχανισμό ACK.

Επίσης, συμπεραίνουμε ότι το throughput του δικτύου είναι μεγαλύτερο όταν ο μηχανισμός επιβεβαίωσης πακέτων είναι ενεργοποιημένος διότι μετά από κάθε πακέτο που παραλήφθηκε επιτυχώς από τον δέκτη στέλνεται από τον δέκτη ένα πακέτο επιβεβαίωσης επιτυχούς λήψης πακέτου στον πομπό.

Ωστόσο ενεργοποιώντας τον μηχανισμό ACK υπάρχει πιθανότητα μεγαλύτερης απώλειας πακέτων απ' ότι να είχαμε τον μηχανισμό απενεργοποιημένο. Αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι το δίκτυο είναι περισσότερο απασχολημένο όταν εκτός από τα πακέτα στέλνονται, λίγα δευτερόλεπτα αμέσως μετά, και πακέτα επιβεβαίωσης επιτυχούς λήψης.

Στο πίνακα 5.1 είναι συγκεντρωμένα όλα τα στατιστικά στοιχεία που προέκυψαν από τη μελέτη του σεναρίου της παρούσας εργασίας για να μπορέσουμε να τα συγκρίνουμε μεταξύ τους.

**Πίνακας 5.1.** Συγκριτική παρουσίαση χαρακτηριστικών του σεναρίου αποτυχίας συντονιστή δικτύου

	TREE				MESH			
	ACK	No ACK	100	250	ACK	No ACK	100	250
Packet drop MAC	8 Kbps	0 bits	6.2 Kbps	8 Kbps	>16 Kbps	0 Kbps	>16 Kbps	>16 Kbps
Throughput	27 Kbps	21 Kbps	26 Kbps	27 Kbps	90 Kbps	53 Kbps	90 Kbps	90 Kbps
Packet drop network	≅ 25 packets	≅ 25 packets	≅ 25 packets	≅ 25 packets	≅ 12 packets	≅ 9 packets	≅ 12 packets	≅ 12 packets

## 5.2 Προτάσεις

Τα δίκτυα με τοπολογία Mesh προτείνονται σε περιπτώσεις που θέλουμε να πετύχουμε υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Οι κόμβοι εντός της εμβέλειας είναι σε θέση να επικοινωνούν μεταξύ τους για να διαμορφώνουν ένα πλέγμα, όπου αυτό έχει συνέπεια την ραγδαία εξάπλωση του δικτύου. Τα μηνύματα μπορούν να διαβιβάζονται σε ολόκληρο το δίκτυο με χρήση των διαφόρων σταθμών ως αναμεταδότες. Υπάρχει συνήθως μια επιλογή των διαδρομών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί και αυτό καθιστά το δίκτυο πολύ ισχυρό. Αν υπάρχουν παρεμβολές σε ένα τμήμα του δικτύου, στη συνέχεια, ένα άλλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί αυτού.

Τα δίκτυα με τοπολογία Tree είναι ένα υποσύνολο της τοπολογίας Mesh. Πειραματικά είδαμε επίσης ότι στην τοπολογία Mesh το throughput είναι μεγαλύτερο σε όλες τις περιπτώσεις, είτε μεταβάλλεται το data rate είτε ο μηχανισμός ACK. Θεωρητικά όμως, αυτό έχει ως συνέπεια η ενέργεια που καταναλώνεται να είναι πολύ περισσότερη απ' ό,τι στην τοπολογία tree πράγμα για το οποίο η τεχνολογία zibee αναπτύχθηκε βασισμένη στην όσο το δυνατόν λιγότερη κατανάλωση ενέργειας.

Η κατανάλωση της ενέργειας ήταν ένα θέμα με το οποίο θα ολοκληρώναμε τη μελέτη μας αλλά λόγω ελλείψεων του συγκεκριμένου μοντέλου στο πρόγραμμά μας, OPNET, και ότι βρισκόταν σε πειραματικό στάδιο δεν καταφέραμε να πειραματιστούμε ως προς την κατανάλωση της ενέργειας στο σενάριό μας.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] [http://www.dpactech.com/evaluation\\_support/wireless\\_technology\\_comparison.php](http://www.dpactech.com/evaluation_support/wireless_technology_comparison.php)
- [2] [http://www.media.mit.edu/resenv/ChainMail/usefulFigures/right\\_20.jpg](http://www.media.mit.edu/resenv/ChainMail/usefulFigures/right_20.jpg)
- [3] Jose A. Gutierrez, *Low-Rate Wireless Personal Area Networks – Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4*, November 2003.
- [4] <http://khedo.wordpress.com/>
- [5] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, *Wireless sensor networks: a survey*, December 20, 2001
- [6] I. Khemapech, I. Duncan and A. Miller, *A Survey of Wireless Sensor Networks Technology*
- [7] <http://en.wikipedia.org/wiki/Zigbee>, February 4, 2011
- [8] Sinem Coleri Ergen, *ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary*, September 10, 2004
- [9] <http://www.jennic.com/elearning/zigbee/files/html/module2/module2-1.htm>
- [10] <http://www.ifn.et.tu-dresden.de/~marandin/ZigBee/ZigBeeTutorial.html>
- [11] Bhaskar Krishnamachari, *Networking Wireless Sensors*, 2005
- [12] <http://www.observatorynano.eu/project/document/2326>
- [13] [http://www.washington.edu/lst/help/computing\\_fundamentals/networking/osi](http://www.washington.edu/lst/help/computing_fundamentals/networking/osi)

[14] <http://www.freetechexams.com/certifications/cisco/ccna/OSI-Layer-model.html>

[15] <http://mobliezigbee.blogspot.com/2007/08/lr-wpan-device-architecture.html>

[16]

<http://edocs.soco.agilent.com/display/sv201001/About+ZigBee+Baseband+Verification+Library>