



ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε

ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΑΡΤΑΣ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΜΠΑΤΖΕΡΡΗ ΠΥΡΟ

Α.Μ: 13907

ΜΑΘΗΜΑ: ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΔΟΥΜΕΝΗΣ

Άρτα, 2017

Περίληψη

Σε αυτή τη διατριβή κάνω μια μελέτη για εγκατάσταση ασύρματου δικτύου αισθητήρων στην περιοχή της Άρτας. Αρχικά δίνεται ο ορισμός του όρου δίκτυο. Έπειτα γίνεται μια ιστορική αναδρομή και αναφέρεται η εξέλιξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Επίσης, παρουσιάζονται η δομή τους καθώς και οι εφαρμογές που υπάρχουν στον τομέα αυτό. Στη συνέχεια, αναλύονται το μοντέλο ZigBee και το πρωτόκολλο 802.15.4. Ακόμα, παρουσιάζονται η δομή τους, τα επίπεδα, οι τοπολογίες και οι συσκευές που χρησιμοποιούν τα δίκτυα ZigBee. Επιπρόσθετα, γίνεται εκτενής αναφορά στις έννοιες του πρωτοκόλλου ZigBee και τις λειτουργίες του.

Προκειμένου να δούμε στην πράξη τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων πραγματοποιώ μελέτη σε περιοχή του κάμπου της Άρτας. Επιπλέον, οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται λεπτομερώς. Τέλος για την υλοποίηση του έργου μου χρησιμοποίησα το εξειδικευμένο εργαλείο προσομοίωσης που ονομάζεται OPNET .

Λίστα εικόνων:

Εικόνα 1 : Λογότυπο Τ.Ε.Ι Ηπείρου

Εικόνα 2 : Δίκτυο

Εικόνα 3 : Ασύρματο δίκτυο

Εικόνα 4 : Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων

Εικόνα 5 : Εφαρμογές ZigBee

Εικόνα 6 : ZigBee

Εικόνα 7 : OSI επίπεδα

Εικόνα 8 : Επίπεδα

Εικόνα 9 : ZigBee πρωτόκολλο

Εικόνα 10 : Αρχιτεκτονική επιπέδων ZigBee

Εικόνα 11 : Επισκόπηση των επιπέδων του ZigBee

Εικόνα 12 : Τα ZDO στην αρχιτεκτονική του ZigBee

Εικόνα 13 : Συσκευές ZigBee

Εικόνα 14 : Τοπολογίες

Εικόνα 15 : Είδη κόμβων

Εικόνα 16 : Beacon

Εικόνα 17 : Παράδειγμα Superframe

Εικόνα 18 : Δίκτυο mesh

Εικόνα 19 : Δίκτυο με οργάνωση Beacon (16 διευθύνσεις)

Εικόνα 20 : Superframe

Εικόνα 21 : Η πόλη της Άρτας

Εικόνα 22 : Περιοχή επιτήρησης

Εικόνα 23 : Κόμβοι δικτύου

Εικόνα 24 : XBee Pro ZB SMA

Εικόνα 25 : Pin Definition

Εικόνα 26 : DHT-22 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Εικόνα 27 : SMAM-RP Antenna 2 dbi, 2,4GHz dimension 5cm

Εικόνα 28 : air pressure sensor

Εικόνα 29 : Photoresistor LDR CDS 5mm Light-Dependent Resistor Sensor

Εικόνα 30 : Detection sensor module rain and snow

Εικόνα 31 : Noise sensor

Εικόνα 32 : GPS sensor

Εικόνα 33 : Συνοπτικός πίνακας διαθέσιμων περιβαλλόντων προσομοίωσης

Εικόνα 34 : Ροή εργασίας στο λογισμικό OPNET Modeler

Εικόνα 35 : Αρχικό παράθυρο OPNET

Εικόνα 36 : Αρχικό μενού

Εικόνα 37 : Επιλογή τεχνολογίας

Εικόνα 38 : Προεπισκόπηση έργου

Εικόνα 39 : Παλέτα αντικειμένων ZigBee

Εικόνα 40 : Πρώτο σενάριο

Εικόνα 41 : Παραμετροποίηση τερματικών συσκευών

Εικόνα 42 : Παραμετροποίηση δρομολογητών

Εικόνα 43 : Παραμετροποίηση συντονιστή

Εικόνα 44 : Δεύτερο σενάριο

Εικόνα 45 : Παραμετροποίηση τερματικών συσκευών

Εικόνα 46 : Παραμετροποίηση δρομολογητών

Εικόνα 47 : Παραμετροποίηση συντονιστή

Εικόνα 48 : Χρόνοι προσομοίωσης για τα σενάρια

Εικόνα 49 : Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End to end delay)

Εικόνα 50 : Φορτίο (Load)

Εικόνα 51 : Απόδοση (Throughput)

Εικόνα 52 : Φορτίο του δικτύου έναντι απόδοσης

Εικόνα 53 : Ρυθμός άφιξης δεδομένων έναντι καθυστέρησης

Εικόνα 54 : Ποσοστό άφιξης δεδομένων έναντι απόδοσης

Εικόνα 55 : Δεδομένα που λαμβάνονται

Εικόνα 56 : Δεδομένα που αποστέλλονται

Εικόνα 57 : Καθυστέρηση συντονιστή δικτύου (σενάριο πρώτο)

Εικόνα 58 : Καθυστέρηση συντονιστή δικτύου (σενάριο δεύτερο)

Εικόνα 59 : Στατιστικά στοιχεία συντονιστή (σενάριο πρώτο)

Εικόνα 60 : Στατιστικά στοιχεία συντονιστή (σενάριο δεύτερο)

Εικόνα 61 : Κίνηση συντονιστή δικτύου (σενάριο πρώτο)

Εικόνα 62 : Κίνηση συντονιστή δικτύου (σενάριο δεύτερο)

Πίνακας Περιεχομένων :

Περίληψη.....	2
1. Δίκτυο.....	8
1.1 Πλεονεκτήματα δικτύων.....	9
1.2 Ασύρματα δίκτυα.....	10
1.3 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.....	11
1.3.1 Εξέλιξη δικτύων αισθητήρων.....	12
1.3.2 Δομικά στοιχεία ασύρματων δικτύων αισθητήρων.....	13
1.3.3 Κόμβοι ασύρματων δικτύων αισθητήρων.....	13
1.3.4 Εφαρμογές.....	14
2. Χαρακτηριστικά ασύρματων δικτύων.....	15
2.1 Σύνοψη.....	15
2.2 OSI μοντέλο.....	16
2.2.1 Φυσικό επίπεδο.....	16
2.2.2 Επίπεδο ζεύξης δεδομένων.....	17
2.2.3 Επίπεδο δικτύου.....	17
2.2.4 Επίπεδο μεταφοράς.....	17
2.2.5 Επίπεδο συνόδου.....	17
2.2.6 Επίπεδο παρουσίασης.....	18
2.2.7 Επίπεδο εφαρμογών.....	18
2.3 ZigBee.....	18
2.4 IEE 802.14.5 πρωτόκολλο.....	20
2.5 Επίπεδα ZigBee.....	21
2.6 ZigBee συσκευές.....	23
2.6.1 ZigBee coordinator.....	24

2.6.2 ZigBee router.....	24
2.6.3 ZigBee end device.....	25
2.7 Τοπολογίες ZigBee.....	25
2.7.1 Τοπολογία αστέρα.....	26
2.7.2 Τοπολογία δένδρου.....	26
2.7.3 Τοπολογία πλέγματος.....	27
2.8 Είδη κόμβων.....	27
3. Έννοιες Πρωτοκόλλου.....	28
3.1 Services.....	28
3.2 Primitives.....	28
3.3 Constants & attributes.....	28
3.4 Binding.....	29
3.5 Energy detection (ED).....	29
3.6 Carrier sense (CS).....	29
3.7 Link quality indicator.....	29
3.8 Clear channel assessment	30
3.9 Superframe	30
3.10 Beacon.....	30
3.10.1 Λειτουργίες επιπέδου MAC.....	32
3.11 Οργάνωση ραδιοδικτύου.....	33
3.11.1 Με ελεύθερη πρόσβαση (unslotted CSMA/CA).....	33
3.11.2 Με την χρήση Beacon.....	33
4. Μελέτη για την Άρτα.....	35
4.1 Μορφολογία εδάφους.....	35
4.2 Εγκατάσταση δικτύου.....	35
4.3 Διαστασιολόγηση δικτύου.....	36
4.4 Τεχνολογικές παράμετροι.....	37
4.4.1 XBee Pro ZB SMA.....	38
4.4.2 Αισθητήρες.....	40
5. Προσομοίωση δικτύου.....	45
5.1 Εισαγωγή.....	45
5.2 Παρουσίαση OPNET modeler.....	45
5.3 Χαρακτηριστικά OPNET modeler.....	46

5.4 Εργαλεία διαχείρισης στο λογισμικό OPNET modeler	46
5.4.1 Εργαλείο διαχείρισης έργου (Project Editor).....	46
5.4.2 Εργαλείο διαχείρισης κόμβου (Node Editor).....	47
5.4.3 Εργαλείο διαχείρισης μοντέλου διεργασιών (Process Model Editor).....	47
5.4.4 Εργαλείο διαχείρισης μοντέλου διασύνδεσης (Link Model Editor).....	47
5.5 Προσομοίωση στο OPNET modeler.....	48
5.6 Σενάρια προσομοίωσης.....	50
5.6.1 Πρώτο σενάριο.....	51
5.6.2 Δεύτερο σενάριο	53
6. Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	56
7. Προβλήματα που αντιμετωπίσα.....	66
8. Συμπεράσματα.....	66
9. Βιβλιογραφία.....	68

1. Δίκτυο



Εικόνα 2 : Δίκτυο

Στην καθημερινότητα μας χρησιμοποιούμε συχνά τον όρο δίκτυο. Τι είναι όμως ένα δίκτυο; Γενικότερα με τον όρο εννοούμε ένα σύνολο αντικειμένων (π.χ. υπολογιστών) που συνδέονται με ένα τρόπο μεταξύ τους, για να εξυπηρετήσουν έναν σκοπό. Αν ανατρέξουμε στο παρελθόν θα δούμε ότι την δεκαετία του '60 έγινε η πρώτη σύνδεση υπολογιστών μεταξύ τους, ώστε να μπορούν να επικοινωνήσουν. Το πρώτο δίκτυο υπολογιστών (computer network) έγινε πραγματικότητα. Από τότε με τον όρο << δίκτυο υπολογιστών >> εννοούμε ένα σύνολο από δυο οι περισσότερους υπολογιστές που είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους, ώστε να μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα. Τα δίκτυα υπολογιστών διακρίνονται σε αυτά που αποτελούνται από αυτόνομους ή μη αυτόνομους συνδεδεμένους υπολογιστές. Συνδεδεμένοι θεωρούνται όταν οι υπολογιστές μπορούν να ανταλλάξουν πληροφορίες μεταξύ τους και αυτόνομοι θεωρούνται όταν δεν είναι δυνατό κάποιος υπολογιστής να ελέγξει τη λειτουργία κάποιου άλλου.

Τα δίκτυα χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ανάλογα με το μέσο σύνδεσης που επιλέγουμε χαρακτηρίζουμε την σύνδεση ενσύρματη (σύνδεση με καλώδιο) ή ασύρματη (σύνδεση χωρίς καλώδιο).
- Ανάλογα τον φορέα που μεταφέρει τα δεδομένα (δημόσια, ιδιωτικά)
- Ανάλογα με την γεωμετρική έκταση που καλύπτουν. Τοπικά (LAN και WLAN), ευρείας

περιοχής (WAN και WWAN), μητροπολιτικά (MAN και WMAN) και προσωπικά (PAN και WPAN).¹

1.1 Πλεονεκτήματα δικτύων

Τα βασικά πλεονεκτήματα των δικτύων είναι:

- Επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών υπολογιστών και ανταλλαγή δεδομένων
- Διαμοιρασμός εξοπλισμού, προγραμμάτων και δεδομένων του δικτύου
- Εξοικονόμηση χρηστών
- Παροχή υψηλής αξιοπιστίας
- Ευκολία επέκτασης

¹ <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSB101/4/28,73/>

1.2 Ασύρματα δίκτυα

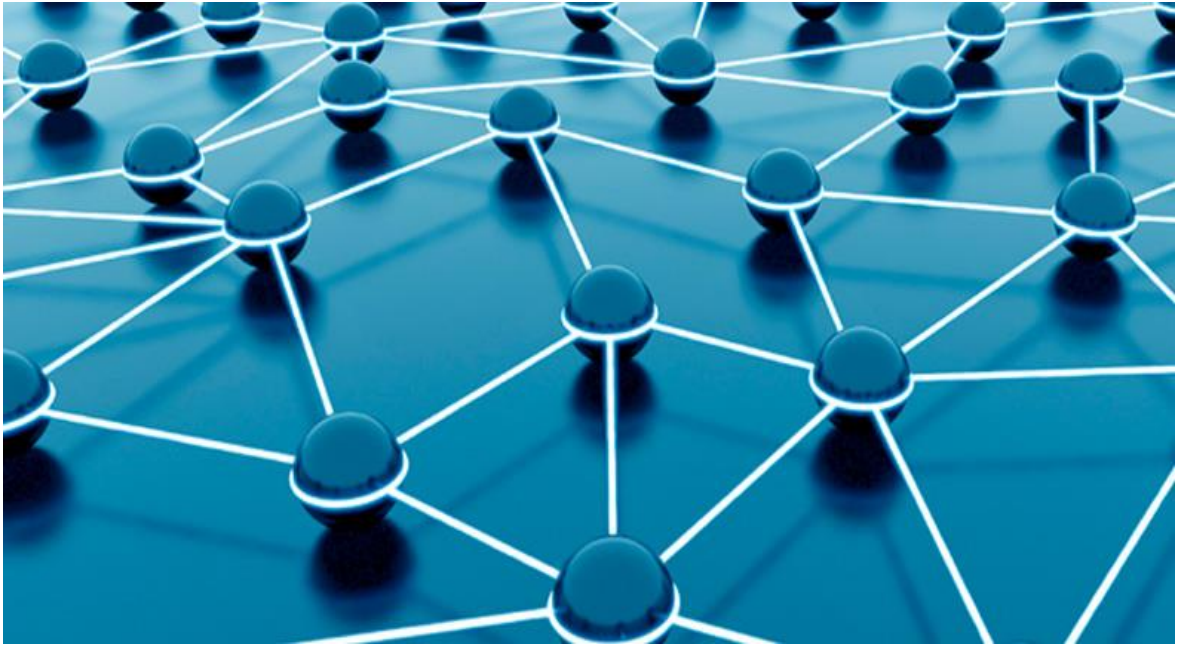


Εικόνα 3 : Ασύρματο δίκτυο

Ως ασύρματο δίκτυο χαρακτηρίζεται το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών, το οποίο χρησιμοποιεί, ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος η οποία εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίξει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία, σε αντίθεση με την ενσύρματη, δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου. Σε παλαιότερες εποχές τα τηλεφωνικά δίκτυα ήταν αναλογικά, αλλά σήμερα όλα τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ψηφιακή τεχνολογία και επομένως, κατά μία έννοια, είναι ουσιαστικώς δίκτυα υπολογιστών. Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN). Η τηλεόραση και το ραδιόφωνο, αν και ως τηλεπικοινωνιακά μέσα είναι εκ φύσεως ασύρματα στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν συμπεριλαμβάνονται στα ασύρματα δίκτυα, καθώς η μετάδοση γίνεται προς πάσα κατεύθυνση χωρίς να υπάρχει κάποιο δομημένο «δίκτυο» τηλεπικοινωνιακών

κόμβων (συσκευών) με τη συνήθη έννοια. Επιπλέον, τα μεταφερόμενα δεδομένα συνήθως είναι αναλογικά και, επομένως, δεν μπορούν να θεωρηθούν δίκτυα υπολογιστών.²

1.3 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων



Εικόνα 4 : Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων

² <https://www.wikipedia.org/>

Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι μια διάρθρωση δικτύου αποτελούμενη από κόμβους αισθητήρων, κάθε κόμβος είναι μικρός, ελαφρύς και φορητός. Κάθε ένας κόμβος είναι εξοπλισμένος με μετατροπέα, μικροϋπολογιστή, πομποδέκτη και μια πηγή ενέργειας. Ο μετατροπέας παράγει ηλεκτρικά σήματα που βασίζονται σε αισθητές φυσικές επιδράσεις και φαινόμενα. Ο μικροϋπολογιστής επεξεργάζεται και αποθηκεύει την έξοδο του αισθητήρα. Ο πομποδέκτης λαμβάνει εντολές από έναν κεντρικό υπολογιστή και μεταδίδει τα δεδομένα σε αυτόν. Τέλος η ενέργεια του κάθε κόμβου προέρχεται από μια μπαταρία. Οι κόμβοι συλλέγουν δεδομένα από ένα περιβάλλον στο οποίο διαμένουν με τις δοθείσες δυνατότητες και μεταδίδουν δεδομένα σε ένα σταθμό βάσης δια μέσου άλλων κόμβων αισθητήρων μετά την επεξεργασία τους. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν παντού όπως στα σπίτια, στην βιομηχανία, στο φυσικό περιβάλλον, στον στρατό, στην υγεία και αλλού. Επιπλέον μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε απρόσιτα μέρη όπως βουνά και επικίνδυνες περιοχές.³

1.3.1 Εξέλιξη δικτύων αισθητήρων

Για να κατανοήσουμε τα δίκτυα αισθητήρων, είναι χρήσιμο να εξετάσουμε σύντομα την ιστορία τους. Όπως πολλές προηγμένες τεχνολογίες, η προέλευση των δικτύων αισθητήρων εντοπίζεται στις στρατιωτικές και βαριές βιομηχανικές εφαρμογές. Το πρώτο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αναπτύχθηκε από την στρατιωτική σχολή των Η.Π.Α τη δεκαετία του '50 κατά την διάρκεια του ψυχρού πολέμου για την ανίχνευση και την παρακολούθηση των σοβιετικών υποβρυχίων. Το ηχητικό σύστημα επιτήρησης SOSUS ("secret weapon" of undersea surveillance) όπως και ονομάζεται, χρησιμοποιούσε βυθισμένους ακουστικούς αισθητήρες κατά μήκος του ατλαντικού και ειρηνικού ωκεανού. Αυτή η τεχνολογία ανίχνευσης εξακολουθεί να λειτουργεί και σήμερα, αν και εξυπηρετείται από επιστήμονες για την παρακολούθηση της υποθαλάσσιας πανίδας και της ηφαιστειακής δραστηριότητας. Το DARPA (united states defense advanced research projects agency) ξεκίνησε το πρόγραμμα Distributed Sensor Network (DSN) το 1980 και αυτό αποτέλεσε μια πρώτη προσέγγιση ενός καταναμεμημένου δικτύου αισθητήρων. Η τεχνολογία WSN σύντομα βρήκε στέγη στον ακαδημαϊκό, πολιτικό και επιστημονικό

³ <http://www.ijcna.org/Manuscripts%5CVolume-2%5CIssue-3%5CVol-2-issue-3-M-03.pdf>

κόσμο. Και έτσι άρχισαν να χρησιμοποιούν WSN σε εφαρμογές προκειμένου να επιτύχουν επιτήρηση και παρακολούθηση. Με την αξιοποίηση αυτής της ερευνητικής κληρονομιάς και με την πρόοδο στις επικοινωνίες και τα υπολογιστικά συστήματα προέκυψε μια νέα γενιά τεχνολογιών δικτύων αισθητήρων.⁴

1.3.2 Δομικά στοιχεία ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Τα δομικά στοιχεία που αποτελούν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι ο αριθμός συσκευών που οποίοι έχουν κατανεμηθεί στην περιοχή υπό επιτήρηση και τουλάχιστον μία συσκευή η οποία λειτουργεί ως σημείο συγκέντρωσης της πληροφορίας που έχει συλλεχθεί από τους κόμβους και καλείται σταθμός βάσης.⁵

1.3.3 Κόμβοι ασύρματων δικτύων αισθητήρων

Η καρδιά κάθε WSN βρίσκεται στους αισθητήρες και τις λειτουργίες τους.

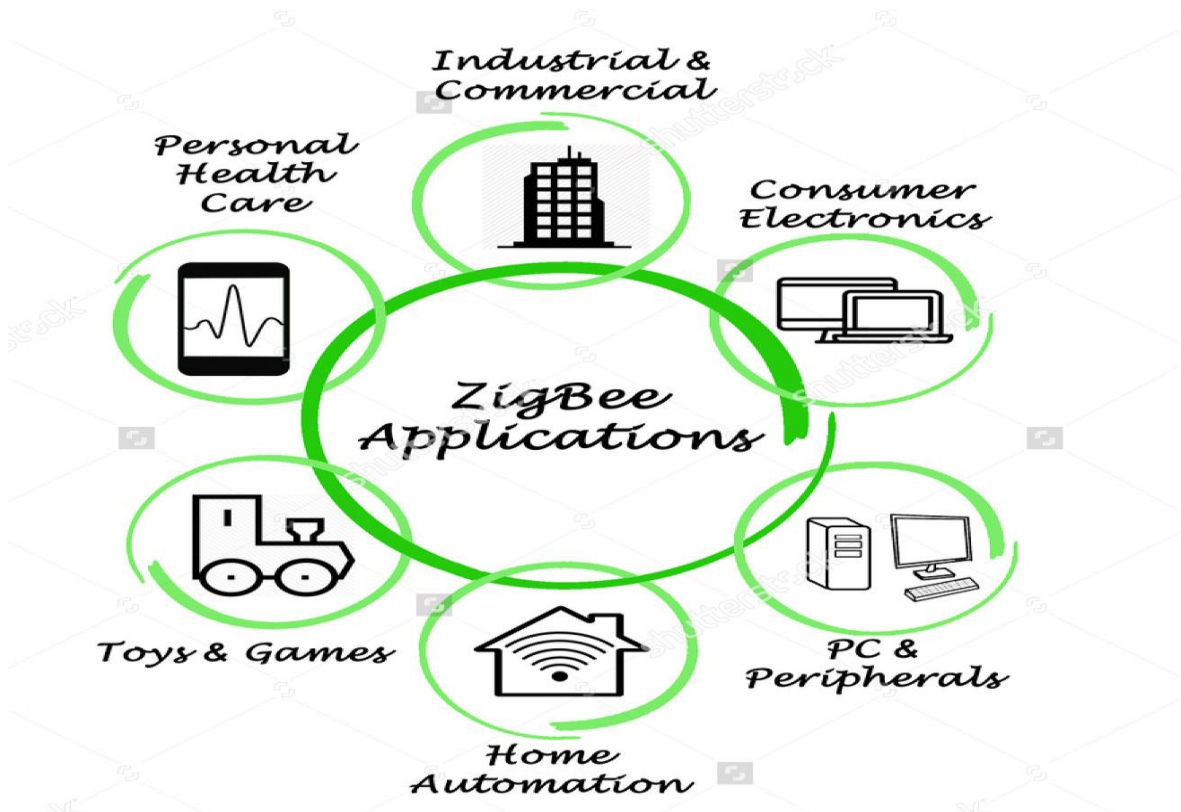
Παρακάτω αναφέρονται ορισμένες τεχνολογίες ανίχνευσης: Μικροηλεκτρονικά συστήματα (MEMS), γυροσκόπια, επιταχυνσιόμετρα, μαγνητόμετρα, αισθητήρες ατμοσφαιρικής πίεσης, ακουστικοί αισθητήρες. Επιπλέον, αισθητήρες με βάση το CMOS, θερμοκρασίας, υγρασίας και χημικής σύνθεσης, αισθητήρες LED, αισθητήρες φωτός, και αισθητήρες περιβαλλοντολογικών μετρήσεων.⁶

⁴ Βούρος Ανδρέας, Διπλωματική εργασία: ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (WSN) ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ, Αθήνα, Μάρτιος 2015

⁵ Δημήτριος Κ. κουτσουβέλας, Ηλίας Δ, Κωστούδης. Διπλωματική εργασία: ασφάλεια σε δίκτυα ad hoc και δίκτυα αισθητήρων, Νοέμβριος, Αθήνα, 2008

⁶ Δημήτριος Κ. κουτσουβέλας, Ηλίας Δ, Κωστούδης. Διπλωματική εργασία: ασφάλεια σε δίκτυα ad hoc και δίκτυα αισθητήρων, Νοέμβριος, Αθήνα, 2008

1.3.4 Εφαρμογές



Εικόνα 5 : Εφαρμογές ZigBee

Αρχικά, τα πρώτα δίκτυα αισθητήρων έχουν χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο εφαρμογών υψηλής τεχνολογίας και σε μέρη δύσβατα για τον άνθρωπο. Όπως συστήματα ανίχνευσης ακτινοβολίας, αισθητήρες όπλων για πλοία, βιοιατρικές εφαρμογές, εφαρμογές εθνικής ασφάλειας και σεισμική παρακολούθηση. Επιπλέον το εξελισσόμενο ενδιαφέρον επεκτείνεται στις άμεσες εφαρμογές των καταναλωτών. Στην σημερινή εποχή ο αριθμός των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται από τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι πολυάριθμος. Οι εφαρμογές αυτές και οι απαιτήσεις τους δίνουν διαρκώς ώθηση στην εξέλιξη των αισθητήρων κάνοντας επιτακτική την ανάγκη ενσωμάτωσης σε αυτούς πλεονεκτημάτων και από άλλους τεχνολογικούς κλάδους.

Ενδεικτικά, σύντομη λίστα εφαρμογών ακολουθεί:

- Στρατιωτικές εφαρμογές
- Περιβαλλοντολογικές εφαρμογές
- Ιατρικές εφαρμογές

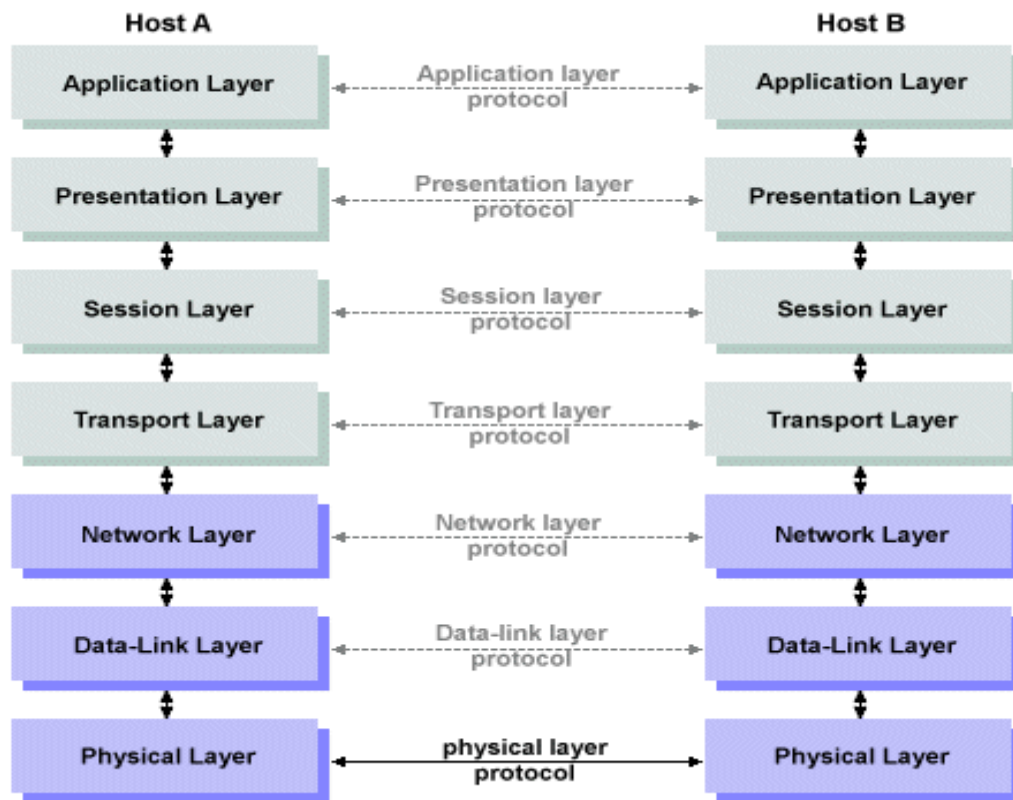
- Εφαρμογές πρόληψης καταστροφών
- Βιομηχανικές εφαρμογές
- Επιτήρηση μηχανημάτων
- Γεωργικές εφαρμογές
- Εφαρμογές ασφάλειας
- Τηλεματική-έλεγχος μεταφορών και συγκοινωνιών
- Εφαρμογές παροχής βοήθειας
- Οικιακός αυτοματισμός
- Αυτοματισμός κτιρίων
- Άλλες εμπορικές εφαρμογές

2. Χαρακτηριστικά ασύρματων δικτύων

2.1 Σύνοψη

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει τις τεχνολογίες των ασύρματων ιδιωτικών δικτύων (WPAN). Σε σύγκριση με τα ενσύρματα δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα παρέχουν υψηλότερο επίπεδο ευελιξίας. Οι ασύρματες συσκευές μπορούν να μετακινηθούν αυθαίρετα, γεγονός που οδηγεί σε μια προηγμένη κινητικότητα για τον χρήστη. Τα περισσότερα πρότυπα στον τομέα των τεχνολογιών WPAN καθορίζονται από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE). Για να είναι σε θέση να δομήσει πρωτόκολλα δικτύου το μοντέλο OSI δημιουργήθηκε και τα επίπεδα του θα συζητηθούν παρακάτω αναλυτικά. Ορισμένα πρωτόκολλα δεν χρησιμοποιούν ξεκάθαρα όλα τα επίπεδα του μοντέλου OSI. Περαιτέρω πρότυπα αντιπροσωπεύουν τα ηγετικά πρωτόκολλα στον τομέα των ασύρματων δικτύων προσωπικού χώρου. Επομένως, παρουσιάζεται λεπτομερής περιγραφή των βασικών εννοιών και η σχέση τους με το πρότυπο OSI κάθε προτύπου. Τέλος, παρουσιάζεται η τεχνολογία ZigBee η οποία είναι το κύριο θέμα αυτής της εργασίας και θα μας απασχολήσει σε όλη την υπόλοιπη έκταση της

2.2 OSI μοντέλο



Εικόνα 7 : OSI επίπεδα

Το μοντέλο OSI που καθορίζεται από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO) αντιπροσωπεύει μια αφηρημένη περιγραφή πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Τα διαφορετικά επίπεδα των πρωτόκολλων δικτύου περιγράφονται από τα επτά επίπεδα του μοντέλου OSI. Παρακάτω αναφέρονται τα επίπεδα OSI και οι κύριες λειτουργίες τους.

2.2.1 Φυσικό επίπεδο

Τα πρωτόκολλα δικτύου χρησιμοποιούν διαφορετικά μέσα μετάδοσης που καθορίζονται από το φυσικό επίπεδο. Το φυσικό επίπεδο ορίζει όλες τις ηλεκτρικές και φυσικές προδιαγραφές της επικοινωνίας. Για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνεστραμμένο καλώδιο, καλώδιο ethernet ή καλώδιο οπτικών ινών για ενσύρματα δίκτυα. Αντίθετα τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούν τον αέρα ως μέσο μετάδοσης. Επιπλέον ορίζει πώς θα κωδικοποιηθούν τα δεδομένα στο μέσο.

2.2.2 Επίπεδο ζεύξης δεδομένων

Σε αυτό το επίπεδο τα κύρια καθήκοντα είναι

- ο η καθιέρωση αξιόπιστων συνδέσεων
- ο και η ανίχνευση και μείωση των σφαλμάτων

Επιπροσθέτως χρησιμοποιούνται μηχανισμοί ελέγχου ροής δεδομένων για να διασφαλιστεί η σωστή μετάδοση των δεδομένων. Εδώ συναντάμε τις δικτυακές γέφυρες (bridge) και τους δικτυακούς διακόπτες (switch).

2.2.3 Επίπεδο δικτύου

Είναι υπεύθυνο για την μεταφορά δεδομένων μεταβλητού μήκους από μια προέλευση σε έναν προορισμό. Το επίπεδο δικτύου εκτελεί λειτουργίες δρομολόγησης και αναφέρει σφάλματα σχετικά με την παράδοση των πακέτων. Ο μηχανισμός Quality of Service (QoS) αποτελεί τμήμα αυτού του επιπέδου. Οι δρομολογητές (routers) λειτουργούν σε αυτό το επίπεδο. Γνωστά πρωτόκολλα στο επίπεδο δικτύου είναι το πρωτόκολλο Internet (IP), πρωτόκολλο Internet protocol 6 (IPv6) και πρωτόκολλο μηνυμάτων ελέγχου Internet (ICMP).

2.2.4 Επίπεδο μεταφοράς

Υπεύθυνο για τον κατακερματισμό των δεδομένων και την αποφυγή συμφόρησης, το επίπεδο μεταφοράς τοποθετείται πάνω από το επίπεδο δικτύου. Ελέγχει την αξιοπιστία ενός χρησιμοποιημένου καναλιού χρησιμοποιώντας ελέγχους ροής και σφαλμάτων. Επιπλέον παρέχεται μια ομοιόμορφη διεπαφή προς τα ανώτερα στρώματα (συνόδου, παρουσίασης και εφαρμογής). Το πιο αναγνωρίσιμο παράδειγμα πρωτοκόλλου μεταφοράς είναι το TCP

2.2.5 Επίπεδο συνόδου

Κύρια λειτουργία του είναι ο έλεγχος των δεδομένων που εναλλάσσονται μεταξύ δύο υπολογιστών. Η ροή δεδομένων είναι οργανωμένη και συγχρονισμένη για να μειώσει τις απώλειες που προκαλούνται από διακοπόμενες περιόδους, οι οποίες επαναλαμβάνονται. Για παράδειγμα το πρωτόκολλο PRC (Remote Procedure Control) βρίσκεται σε αυτό το επίπεδο.

2.2.6 Επίπεδο παρουσίασης

Ορίζει τα συστήματα παγκόσμιας αντιπροσωπεύεις δεδομένων για την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ συστημάτων με διαφορετικούς κωδικούς. Τα δεδομένα υφίστανται κρυπτογράφηση, συμπίεση, κωδικοποίηση και όποια άλλη διαμόρφωση απαιτεί η μορφή των δεδομένων.

2.2.7 Επίπεδο παρουσίασης

Το επίπεδο εφαρμογής επιτρέπει στις εφαρμογές του συστήματος να έχουν πρόσβαση στο δίκτυο. Αυτό το επίπεδο είναι η κύρια διασύνδεση του χρήστη με την εφαρμογή και, συνεπώς με το δίκτυο. Γνωστά πρωτόκολλα σε αυτό το επίπεδο είναι τα Secure Shell (SSH), Network File System (NFS), Telnet, Simple Mail Transfer Protocol (SMTP), Hypertext Transfer Protocol (HTTP), Lightweight Directory Access Protocol (LDAP) κ.ά.⁷

2.3 ZIGBEE



Εικόνα 8 : ZigBee

⁷ https://www.auto.tuwien.ac.at/bib/pdf_thesis/THESIS0017.pdf

Η τεχνολογία ZigBee πρωτοεμφανίστηκε από την ZigBee Alliance το 2002. Σήμερα υπάρχουν πολλά προϊόντα με βάση το ZigBee. Το ZigBee προορίζεται για ασύρματα προσωπικά τοπικά δίκτυα. Οι συχνότητες λειτουργίας του είναι στα 2.4 GHz στην παγκοσμίως ελεύθερη βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική ζώνη (ISM band) και διαθέτει 16 κανάλια, στα 915 MHz με 10 κανάλια (Η.Π.Α και Αυστραλία) και τέλος 868 MHz με ένα μόνο κανάλι (Ευρώπη). Οι χωρητικότητες αυτών των ζωνών συχνοτήτων είναι 250 Kb/s, 40 Kb/s και 20 Kb/s αντίστοιχα. Αυτό που το κάνει ξεχωριστό είναι η εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος η οποία και απαιτείται σε πολλές σύγχρονες εφαρμογές. Η μέγιστη εμβέλεια μιας τέτοιας επικοινωνίας είναι περίπου τα 100 μέτρα, εξαρτώμενη από την παρεχόμενη ισχύ καθώς και το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται το δίκτυο, ενώ η αντίστοιχη εμβέλεια του πρωτοκόλλου Bluetooth είναι τα 10 μέτρα, του WiFi τα 100 μέτρα ενώ του WiMAX 50 χιλιόμετρα. Το ZigBee αναπτύχθηκε από την ZigBee Alliance η οποία ανέπτυξε τα ανώτερα επίπεδα του πρωτοκόλλου ενώ για τα PHY και MAC βασίστηκε πάνω στο πρότυπο 802.15.4, το οποίο είναι μια κατηγορία της οικογενείας των IEEE 802 προτύπων μαζί με μερικά γνωστά πρωτόκολλα όπως το WIFI και το BLUETOOTH. Το πρωτόκολλο ανήκει στην κατηγορία των Low-Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN) διότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων μπορεί να φτάσει έως τα 250 Kbits/s. Σε αντίθεση με το Wi-Fi και το Bluetooth το ZigBee αναπτύχθηκε για ασύρματα προσωπικά δίκτυα (LR-WPAN) που εξασφαλίζουν μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας χρησιμοποιώντας χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων. Για αυτόν τον λόγο δεν ενδείκνυται για υψηλή ποιότητα μετάδοσης φωνής ή εικόνας αλλά προορίζεται περισσότερο για σήματα με χαμηλή ποσότητα πληροφορίας. Εν κατακλείδι, για σήματα με μικρή ποσότητα πληροφορίας και ασύρματη διασύνδεση υπέρμετρου αριθμού συσκευών γεγονός, που σε συνδυασμό με την χαμηλή κατανάλωση ισχύος και το χαμηλό κόστος κατασκευής, καθιστούν το ZigBee την ιδανική λύση.

2.4 IEEE 802.15.4 ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ

ZigBee/IEEE 802.15.4

Εικόνα 9 : ZigBee πρωτόκολλο

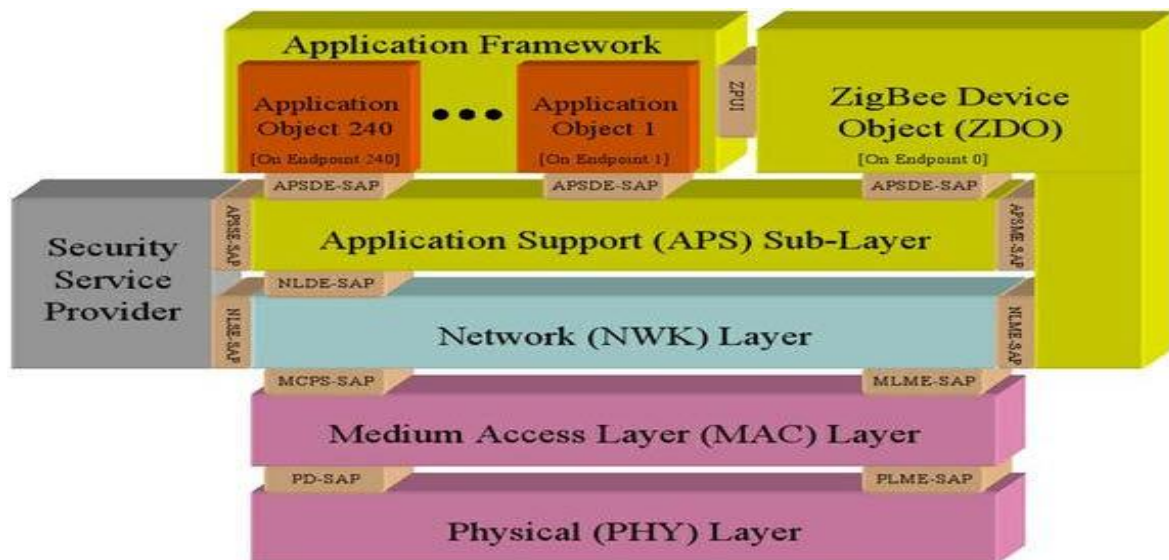
Το IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο εντοπίζεται στα δύο πρώτα επίπεδα PHY και DDL (MAC). Χρησιμοποιείται για ασύρματη επικοινωνία δικτύου χαμηλής κατανάλωσης και καθορίστηκε από την ομάδα εργασίας IEE 802.15.4 που ιδρύθηκε το 2003. Οι συσκευές αυτό-οργανώνονται σε μικρά δίκτυα που ονομάζονται ιδιωτικά δίκτυα (PAN). Το IEEE 802.15.4 ορίζει δύο υποσύνολα τα DDL και MAC. Το υποσύνολο MAC ορίζει την ταυτόχρονη πρόσβαση πολλαπλών συσκευών στο κοινό μέσο χρησιμοποιώντας κατάλληλα πρωτόκολλα (όπως CSMA/CA), ενώ το DDL συντονίζει τη διανομή των πακέτων δεδομένων στις αντίστοιχες υπηρεσίες στο επίπεδο δικτύου. Τα δύο επίπεδα που περιλαμβάνονται στο IEEE 802.15.4 καθορίζουν πλήρως το μέσο που θα χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία, για να έχει πρόσβαση στο μέσο με κατάλληλο τρόπο. Στο φυσικό επίπεδο καθορίζονται ζώνες συχνοτήτων και διάφοροι μηχανισμοί σάρωσης. Η προδιαγραφή του MAC επιπέδου παρέχει συγκεκριμένους μηχανισμούς για την πρόσβαση στο μέσο. Το κύριο μέλημα του MAC επιπέδου είναι να αναγνωρίσει και να αποφύγει τυχόν συγκρούσεις πακέτων. Στο φυσικό επίπεδο του OSI μοντέλου το ZigBee βασίζεται πάνω στο πρότυπο 802.15.4-2003. Η χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας ραδιοεπικοινωνιών χρησιμοποιώντας το O-QPSK (Offset-Quadrature Phase Shift Keying)

και το DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) βελτιώνει τον λόγο σήματος προς θόρυβο. Η αποφυγή συγκρούσεων με την χρήση του CSMA/CA στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων (DLL) μειώνει την πιθανότητα αλλοίωσής του δικτύου. Επιπλέον τα Checksums διασφαλίζουν την ακεραιότητα των δεδομένων. Οι επαναλαμβανόμενες μεταδόσεις και το acknowledgment που στέλνεται σε κάθε κόμβο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της πιθανότητας απώλειας των πακέτων. Τέλος, η αξιοπιστία ενός συνδέσμου ανιχνεύεται λαμβάνοντας υπόψη τον δείκτη ποιότητας σύνδεσης, ο οποίος υπολογίζεται με την χρήση του λόγου σήματος προς θορύβου και της ισχύος λήψης. Το IEEE 802.15.4 πρότυπο ορίζει διαφορετικά εύρη συχνοτήτων. Συνήθως, η ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιείται από τις συσκευές 802.15.4 είναι των 2.4 GHz. Τα ασύρματα δίκτυα LAN (IEEE 802.11) και το Bluetooth (IEEE 802.15.1) χρησιμοποιούν επίσης την ζώνη των 2.4 GHz. Οι ζώνες των 868 MHz/915 MHz χρησιμοποιούνται συχνά από τα στερεοφωνικά και τους αισθητήρες θερμοκρασίας. Το εύρος των 868 MHz το συναντάμε μόνο στην Ευρώπη, ενώ τα 915 MHz είναι κοινά στην Βόρεια Αμερική και την Αυστραλία. Εκτός από τις περιοχές συχνοτήτων που προαναφέρθηκαν, η ομάδα εργασίας της IEEE καθόρισε το πρότυπο 802.15.4a το 2007, το οποίο περιλαμβάνει τη χρήση της τεχνολογίας ultra-wideband (UWB). Η τεχνολογία UWB χρησιμοποιεί ένα μεγάλο εύρος ζώνης ενώ παράγει ενεργειακούς παλμούς σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Ένα από τα πλεονεκτήματα του είναι η μείωση των πολλαπλών προβλημάτων διάδοσης χρησιμοποιώντας ένα εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 500 MHz. Το IEEE 802.15.4 ορίζει δύο τύπου συσκευών. Συσκευές πλήρους λειτουργίας (FFD) και συσκευές μειωμένης λειτουργίας (RFD). Η κύρια διαφορά μεταξύ FFD και RFD είναι ότι τα RFD δεν παρέχουν δυνατότητες για την εκκίνηση ενός PAN. Επομένως ένα PAN ξεκινάει πάντα από συσκευές πλήρους λειτουργίας. Επιπλέον, οι άμεσες συνδέσεις είναι εφικτές μόνο μεταξύ δύο FFD ή ενός FFD και ενός RFD. Δύο RFDs δεν μπορούν να επικοινωνούν απευθείας. Το PAN είναι ένα δίκτυο συσκευών εντός μιας μικρής εμβέλειας. Η συνύπαρξη πολλαπλών PAN είναι δυνατή, ακόμη και όταν χρησιμοποιείται η ίδια συχνότητα. Αυτές οι αυτό-οργανωτικές δομές παρέχουν εύκολη συντηρησιμότητα και μερικούς στοιχειώδεις μηχανισμούς αυτοθεραπείας.

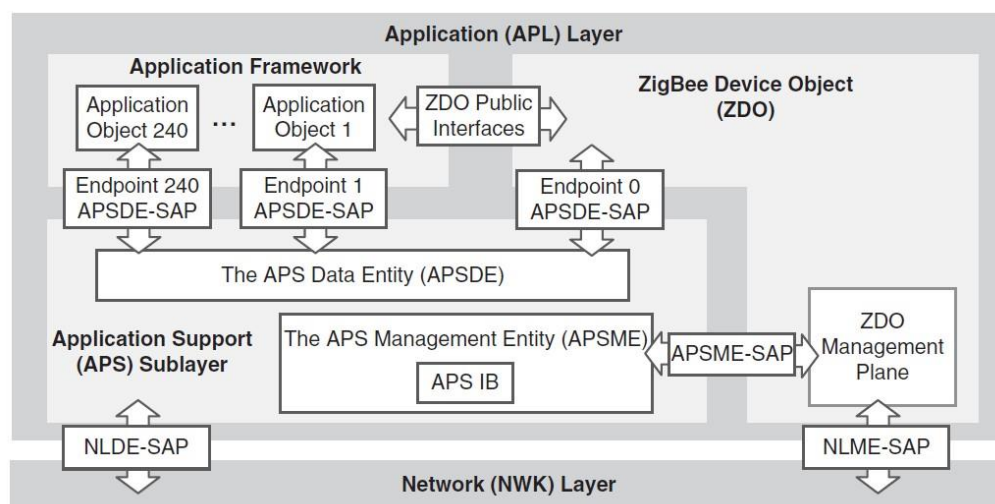
2.5 Επίπεδα ZigBee

Το ZigBee αποτελείται από τέσσερα επίπεδα. Στα ανώτερα επίπεδα, συναντάμε τα επίπεδα δικτύου και εφαρμογής που δημιουργήθηκαν από την ZigBee Alliance για να παρέχουν

πρότυπα κατασκευής. Ενώ τα δύο πρώτα επίπεδα PHY και MAC είναι ορισμένα στο πρότυπο IEEE 802.15.4.

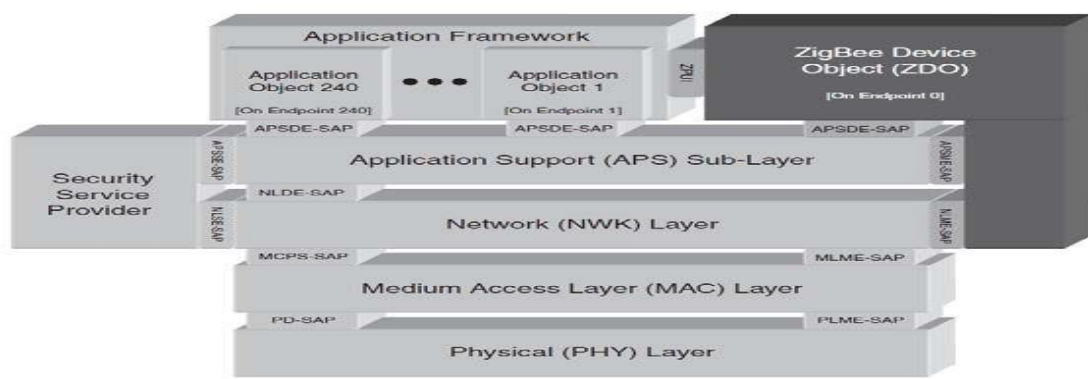


Εικόνα 10 : Αρχιτεκτονική επιπέδων ZigBee



Εικόνα 11 : Επισκόπηση των επιπέδων του ZigBee

Επίσης δημιουργήθηκαν επιπλέον δυο επίπεδα. Το επίπεδο αντικειμένων ZigBee συσκευών (ZigBee Device Objects- ZDOs) και εφαρμογών καθορισμένες από τον κατασκευαστή. Η προσθήκη που παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία στο πρωτόκολλο είναι το επίπεδο αντικειμένων ZigBee συσκευών (ZDOs). Αυτού του είδους οι συσκευές διαχειρίζονται πολλές εργασίες, όπως τον εντοπισμό των συσκευών, την διαχείριση των αιτήσεων για ένταξη στο δίκτυο και την ασφάλεια. Η χαμηλή κατανάλωση ισχύος είναι το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό που κάνει το ZigBee να διαφέρει από άλλες τεχνολογίες π.χ. το Wi-Fi και το καθιστά ιδανικό για πολλές εφαρμογές.⁸



Εικόνα 12 : Τα ZDO στην αρχιτεκτονική του ZigBee

2.6 Συσκευές ZigBee

Συσκευή ZigBee	Συσκευή IEEE 802.15.4	Βασικές Λειτουργίες
Συντονιστής - coordinator	FFD	Ένας σε κάθε δίκτυο. Δημιουργεί το δίκτυο, δίνει τις διευθύνσεις δικτύου, και κρατάει τον πίνακα των δεσμών (binding table).

⁸ Απόστολος Σπένδας, Διπλωματική εργασία : ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ, Ιούλιος 2012

Δρομολογητής - router	FFD	Προαιρετικό. Επεκτείνει το βεληνεκές του δικτύου. Επιτρέπει περισσότερους κόμβους να συνδεθούν. Μπορεί επίσης, να παρακολουθεί και να κάνει λειτουργίες ελέγχου.
end device	FFD ή RFD	Μπορεί να παρακολουθεί και να κάνει λειτουργίες ελέγχου.

Εικόνα 13 : Συσκευές ZigBee

Τα δίκτυα ZigBee μπορούν να περιέχουν ένα μείγμα τριών πιθανών στοιχείων. Αυτά τα στοιχεία είναι ένας ZigBee συντονιστής, ένας ZigBee δρομολογητής και μια τερματική συσκευή ZigBee. Διαφορετικοί τύποι κόμβων θα έχουν διαφορετικούς ρόλους εντός του επιπέδου δικτύου, αλλά όλοι οι διάφοροι τύποι μπορούν να έχουν τις ίδιες εφαρμογές.

2.6.1 ZigBee coordinator

Για κάθε δίκτυο ZigBee, μπορεί να υπάρχει μόνο ένας συντονιστής. Αυτός ο κόμβος είναι υπεύθυνος για την αρχικοποίηση του δικτύου, την επιλογή του κατάλληλου καναλιού και επιτρέπει σε άλλες συσκευές να συνδεθούν στο δίκτυο του. Μπορεί επίσης να είναι υπεύθυνος για την δρομολόγηση της κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο ZigBee. Στην τοπολογία αστέρα ο συντονιστής βρίσκεται στο κέντρο του αστέρα και όλη η κίνηση από οποιοδήποτε τερματική συσκευή καταλήγει σε αυτόν. Μια τερματική συσκευή μπορεί να επικοινωνεί με μία άλλη τερματική συσκευή, όμως η πληροφορία πρέπει να δρομολογηθεί μέσω του συντονιστή. Στην τοπολογία δένδρου, ο συντονιστής βρίσκεται στην κορυφή του δένδρου και σε μια τοπολογία πλέγματος, είναι ο κόμβος ρίζα του πλέγματος. Τέλος ένας συντονιστής ZigBee μπορεί επίσης να συμμετέχει στην παροχή υπηρεσιών ασφάλειας.

2.6.2 ZigBee router

Ένας δρομολογητής είναι σε θέση να μεταδίδει μηνύματα σε ένα δίκτυο, επίσης είναι σε θέση να έχει κόμβους παιδιά συνδεδεμένους σε αυτόν, είτε πρόκειται για άλλο δρομολογητή είτε για τελική συσκευή. Οι λειτουργίες του δρομολογητή χρησιμοποιούνται μόνο στις τοπολογίες δένδρου ή πλέγματος, διότι στην τοπολογία αστέρα όλη η κίνηση του δικτύου μεταφέρεται μέσω του κεντρικού κόμβου, ο οποίος είναι ο συντονιστής. Εάν το δίκτυο υποστηρίζει την τεχνολογία beacon, τότε ο δρομολογητής εισέρχεται σε λειτουργία αδράνειας όταν δεν χρησιμοποιείται και να “ξυπνάει” περιοδικά για να

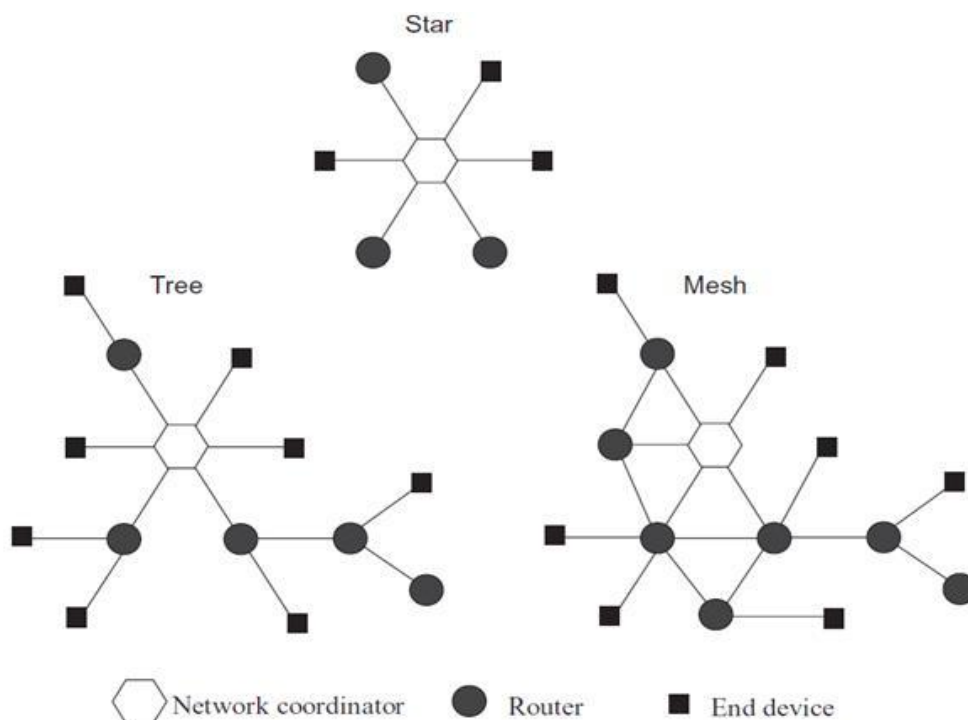
ειδοποιήσει το δίκτυο για την παρουσία του.

2.6.3 ZigBee end device

Τα χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας ενός δικτύου ZigBee μπορούν να πιστωθούν κυρίως στις τερματικές συσκευές. Επειδή αυτοί οι κόμβοι δεν χρησιμοποιούνται για την δρομολόγηση της κυκλοφορίας, μπορούν να κοιμούνται για το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής των μπαταριών αυτών των συσκευών. Αυτοί οι κόμβοι έχουν την δυνατότητα να μιλήσουν σε γονικούς κόμβους, οι οποίοι μπορούν να είναι είτε δρομολογητές είτε συντονιστές. Μια τερματική συσκευή δεν έχει την δυνατότητα να συνδέσει άλλους κόμβους στο δίκτυο της μέσω της τερματικής συσκευής, καθώς πρέπει να είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο είτε μέσω δρομολογητή, είτε απευθείας στον συντονιστή.

2.7 Τοπολογίες ZigBee

Στην επόμενη ενότητα περιγράψω λεπτομερώς τους τρεις διαφορετικούς τύπους τοπολογίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα δίκτυο ZigBee.



Εικόνα 14 : Τοπολογίες

2.7.1 Τοπολογία αστέρα

Η τοπολογία αστέρα αποτελείται από έναν κεντρικό κόμβο (FFD), ο οποίος συμμετέχει σε κάθε επικοινωνία και από τερματικές συσκευές (RFDs) που επικοινωνούν με τον κεντρικό κόμβο. Κάθε φορά που δύο RFDs πρέπει να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, ο πρώτος RFD μεταφέρει την πληροφορία στον κεντρικό κόμβο, ύστερα ο κεντρικός κόμβος μεταδίδει την πληροφορία στον δεύτερο RFD. Αυτό το σύστημα επικοινωνίας απαιτεί υψηλή χρήση του κεντρικού κόμβου. Εάν για οποιοδήποτε λόγο ο κεντρικός κόμβος κατάρρευση, καμία επικοινωνία μεταξύ των συσκευών στο δίκτυο δεν θα είναι πλέον εφικτή. Αυτός ο τύπος τοπολογίας είναι ελκυστικός λόγω της απλότητας του, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζει ορισμένα βασικά μειονεκτήματα. Σε περίπτωση που ο συντονιστής σταματήσει να λειτουργεί, ολόκληρο το δίκτυο τίθεται εκτός λειτουργίας, επειδή όλος ο φόρτος του δικτύου ταξιδεύει μέσω του κέντρου του αστέρα. Για τον ίδιο λόγο, ο συντονιστής θα μπορούσε εύκολα να αποτελέσει εμπόδιο στην κυκλοφορία εντός του δικτύου, ειδικά όταν ένα δίκτυο ZigBee μπορεί να έχει περισσότερους από 60000 κόμβους.

2.7.2 Τοπολογία δένδρου

Στην τοπολογία δένδρου, ένας συντονιστής αρχικοποιεί το δίκτυο και είναι το κορυφαίο (ρίζα) στοιχείο του δένδρου. Ο συντονιστής μπορεί να έχει είτε δρομολογητές είτε τελικές συσκευές συνδεδεμένες σε αυτό. Για κάθε συνδεδεμένο δρομολογητή, περισσότεροι κόμβοι παιδιά μπορούν να συνδεθούν σε αυτόν. Οι κόμβοι παιδιά δεν μπορούν να συνδεθούν σε τερματικές συσκευές γιατί αυτές δεν έχουν την δυνατότητα να μεταδίδουν μηνύματα. Αυτή η τοπολογία επιτρέπει διαφορετικά επίπεδα κόμβων, με τον συντονιστή να βρίσκεται στο υψηλότερο επίπεδο. Για να μεταβιβαστούν μηνύματα σε άλλους κόμβους στο ίδιο δίκτυο, ο κόμβος προέλευσης πρέπει να μεταβιβάσει το μήνυμα στον γονικό του κόμβο, ο οποίος είναι κατά ένα επίπεδο υψηλότερος του κόμβου προέλευσης και το μήνυμα και το μήνυμα συνεχώς μεταδίδεται προς τα πάνω στο δένδρο έως ότου μπορεί να μεταφερθεί προς τα κάτω στον κόμβο προορισμού. Επειδή ο αριθμός των πιθανών διαδρομών που μπορεί να πάρει ένα μήνυμα είναι μόνο ένας, αυτός ο τύπος τοπολογίας δεν είναι ο πιο αξιόπιστος. Σε περίπτωση που ένας δρομολογητής κατάρρευση, τότε όλα τα παιδιά του αποκόπτονται από την επικοινωνία με το υπόλοιπο δίκτυο.

2.7.3 Τοπολογία πλέγματος

Η τοπολογία πλέγματος είναι η πιο ευέλικτη τοπολογία του δένδρου. Υπάρχει ευελιξία επειδή ένα μήνυμα μπορεί να λάβει πολλές διαδρομές από την πηγή προς τον προορισμό. Εάν ένας συγκεκριμένος δρομολογητής αποτύχει, τότε ο μηχανισμός αυτοθεραπείας του ZigBee (γνωστός και ως εντοπισμός διαδρομής) θα επιτρέψει στο δίκτυο να αναζητήσει μια εναλλακτική διαδρομή που θα λάβει το μήνυμα. Στο project μου, ένα από τα σενάρια είναι να ερευνήσω αυτό το χαρακτηριστικό αφαιρώντας ένα τυχαίο δρομολογητή από το δίκτυο κατά τη λειτουργία του και να παρατηρήσω την διαδικασία κατά την οποία οι τερματικές συσκευές βρίσκουν εναλλακτικές διαδρομές έτσι ώστε να επιτευχθεί η επικοινωνία με τον συντονιστή.

2.8 Είδη κόμβων

Συσκευή ZigBee	Συσκευή IEEE 802.15.4	Βασικές Λειτουργίες
Συντονιστής - coordinator	FFD	Ένας σε κάθε δίκτυο. Δημιουργεί το δίκτυο, δίνει τις διευθύνσεις δικτύου, και κρατάει τον πίνακα των δεσμών (binding table).
Δρομολογητής - router	FFD	Προαιρετικό. Επεκτείνει το βεληνεκές του δικτύου. Επιτρέπει περισσότερους κόμβους να συνδεθούν. Μπορεί επίσης, να παρακολουθεί και να κάνει λειτουργίες ελέγχου.
end device	FFD ή RFD	Μπορεί να παρακολουθεί και να κάνει λειτουργίες ελέγχου.

Εικόνα 15 : Είδη κόμβων

Οι τύποι συσκευών που χρησιμοποιούνται είναι είτε ZigBee Routers (ZR) είτε ZigBee End Devices (ZED). Οι διαφορές μεταξύ ZR και ZED επηρεάζουν κυρίως τους τύπους επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο συσκευών. Τα ZED δεν είναι σε θέση να προωθούν πακέτα από άλλους κόμβους. Επομένως ένας ZR είναι πάντα απαραίτητο για την ενσωμάτωση ενός ZED σε ένα δίκτυο ZigBee. Σε κάθε δίκτυο υπάρχει πάντοτε μια FFD που έχει τον ρόλο του συντονιστή του δικτύου (PAN COORDINATOR). Ο συντονιστής και όλοι οι ZigBee router απαιτούν να έχουν FFD (full function device) δυνατότητες. Τα ZEDs μπορούν να είναι είτε RFD είτε FFD. Παρ'όλα αυτά, πολλοί αισθητήρες ZigBee είναι μόνο ZEDs λόγω των μικρών τους απαιτήσεων σε

ενέργεια σε σύγκριση με τις ZR συσκευές.

3. Έννοιες Πρωτοκόλλου

Για την περιγραφή του πρωτοκόλλου είναι αναγκαίο να γίνει αναφορά σε κάποιες καινούριες έννοιες που επεξηγούνται στην ενότητα αυτή. Αυτό θα βοηθήσει και τους αναγνώστες που επιθυμούν να εμβαθύνουν διαβάζοντας το ZigBee Specification.

3.1 Services

Κάθε επίπεδο παρέχει μια σειρά από υπηρεσίες (Services) που εκτελούνται συνήθως για λογαριασμό του μόλις ανώτερου επιπέδου. Όλες οι υπηρεσίες πραγματοποιούνται από το Management Entity εκτός από την μεταφορά δεδομένων που γίνεται από το Data Entity. Ένα υψηλότερο επίπεδο αποκτά πρόσβαση στις υπηρεσίες του χαμηλότερου σε αυτό επιπέδου, με τη βοήθεια των Service Access Points (SAP). Για παράδειγμα αν θέλουμε να ενεργοποιήσουμε το πομποδέκτη μας, θα πρέπει το MAC επίπεδο να χρησιμοποιήσει μέσω του PD-SAP το PHY data service το οποίο θα επιτρέψει την αποστολή και λήψη των PDUs

3.2 Primitives

Κάθε Service αποτελείται από μια σειρά εντολών που ονομάζονται Primitives. Όλα τα primitive έχουν τις παρακάτω λειτουργίες ή ορισμένες από αυτές: • Request • Confirm • Indication • Response Το όνομα του primitive υποδεικνύει συνήθως το επίπεδο στο οποίο ανήκει καθώς και τη χρήση του. Η σύνταξη ενός primitive που περιλαμβάνει κάποια λειτουργία γίνεται ως εξής, όνομα_primitive . τύπος λειτουργίας, π.χ. όταν το φυσικό επίπεδο ολοκληρώσει ένα CCA το αντίστοιχο primitive γράφεται PLME-CCA.confirm.

3.3 Constants & attributes

Τα constants (σταθερές) εκφράζουν κάποιες καθορισμένες τιμές όπως το μέγεθος ενός πακέτου. Στα επίπεδα PHY και MAC τα constants παίρνουν το πρόθεμα -a- ενώ για τα επίπεδα εφαρμογής και δικτύου τα -apsc- και -nwkc- αντίστοιχα. Τα attributes (χαρακτηριστικά) είναι μεταβλητές και μπορούν να αλλάξουν εν ώρα λειτουργίας. Κάθε επίπεδο έχει attributes στην PIB την βάση δεδομένων του. Κάποια από τα attributes είναι μόνο για ανάγνωση που σημαίνει ότι μπορούν να προσπελαστούν από κάθε επίπεδο άλλα

η τιμή τους μπορεί να μεταβληθεί μόνο από εκείνο στο οποίο ανήκουν.

3.4 Binding

Οι συσκευές που συσχετίζονται μεταξύ τους λέμε ότι είναι λογικά συνδεδεμένες και ως Binding ορίζεται η διαδικασία δημιουργίας αυτών των «λογικών» διασυνδέσεων. Για παράδειγμα σε ένα ασύρματο σύστημα συναγερμού η μονάδα ZigBee του αισθητηρίου κίνησης είναι λογικά συνδεδεμένη με την μονάδα ZigBee του κεντρικού πίνακα του συναγερμού. Οι πληροφορίες σχετικά με τις λογικές διασυνδέσεις αποθηκεύονται σε έναν πίνακα ο οποίος ονομάζεται Binding table και δημιουργείται στο επίπεδο εφαρμογής. Οι λογικά συνδεδεμένες συσκευές λέγονται Bound devices.

3.5 Energy detection (ED)

Το ED είναι ένας μηχανισμός ο οποίος κάνει μια εκτίμηση όσο αφορά τα επίπεδα ενέργειας των σημάτων που μπορεί να υπάρχουν σε ένα συγκεκριμένο κανάλι. Ωστόσο αν εντοπίσει κάποιο σήμα δεν δύναται να ξεχωρίσει για τι είδος πρόκειται.

3.6 Carrier sense (CS)

Το CS αποτελεί επίσης μια μέθοδος για την ανίχνευση σήματος σε ένα ράδιο-κανάλι. Η διαφορά του με το ED είναι ότι αν εντοπίσει κάποιο σήμα το αποδιαμορφώνει και ελέγχει τι τύπου είναι.

3.7 Link quality indicator

Το LQI είναι η ένδειξη της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος. Οι παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα είναι ο SNR και το RSS. Ο SNR είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Όταν έχει μεγάλη τιμή, το ωφέλιμο σήμα επηρεάζεται δύσκολα από το σήμα θορύβου και επομένως έχουμε λιγότερες πιθανότητες σφάλματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το SNR τόσο καλύτερη θεωρείται και η ποιότητα σήματος. Ως RSS ορίζεται η συνολική ισχύς του ληφθέντος σήματος.

3.8 Clear channel assessment

Στο 802.15.4 χρησιμοποιείται η τεχνική CSMA-CA. Για την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των πακέτων εφαρμόζει το CCA, έναν έλεγχο για να διαπιστωθεί η διαθεσιμότητα του καναλιού. Το CCA κάνει χρήση των ED και CS για να καθορίσει αν το κανάλι είναι ελεύθερο και έχει τις εξής καταστάσεις λειτουργίας:

- Κατάσταση 1 Γίνεται χρήση μόνο του ED και μόλις το επίπεδο ενέργειας που ανιχνεύεται πέσει κάτω από την τιμή κατωφλίου που έχει οριστεί από τον κατασκευαστή τότε το κανάλι θεωρείται ελεύθερο.
- Κατάσταση 2 Γίνεται χρήση μόνο του CS και το κανάλι θεωρείται κατειλημμένο μόνο αν το επίπεδο ενέργειας που ανιχνεύεται προέρχεται από σήμα ίδιου τύπου με εκείνο του πομπού που κάνει τον έλεγχο.
- Κατάσταση 3 Χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συνδυασμοί των ED και CS με τις λογικές πράξεις ΚΑΙ Η'. Αν το επίπεδο ενέργειας είναι υψηλότερο από το κατώφλι ΚΑΙ αν το σήμα είναι ίδιου τύπου με εκείνο του πομπού το κανάλι θεωρείται κατειλημμένο. Αν το επίπεδο ενέργειας είναι υψηλότερο από το κατώφλι Η' αν το σήμα είναι ίδιου τύπου με εκείνο του πομπού το κανάλι θεωρείται κατειλημμένο.

3.9 Superframe

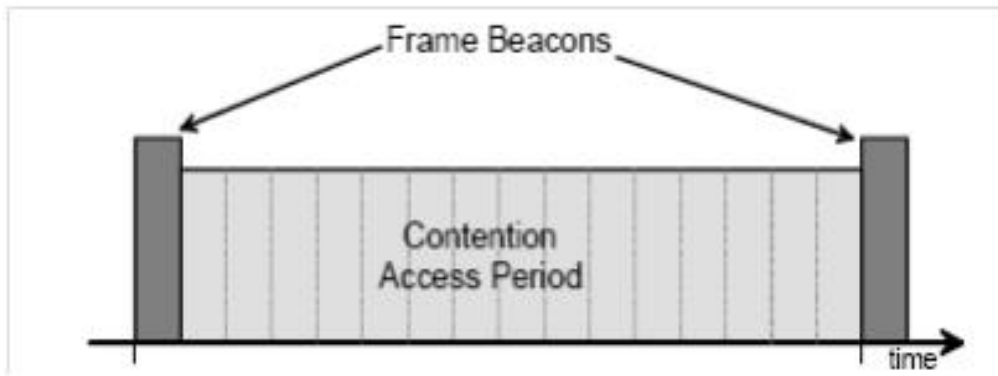
Όταν γίνεται χρήση Beacon σε ένα δίκτυο η πρόσβαση στο κανάλι γίνεται μέσω των superframes. Κάθε superframe περικλείεται από δύο Beacons και αποτελείται από τρεις περιόδους. Την περίοδο CAP, την CFP και την ανενεργή περίοδο. Κατά τη διάρκεια της CAP η συσκευή που θέλει να εκπέμψει δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα κανάλι μόλις το χρειαστεί, γιατί ο μόνος τρόπος για να αποκτήσει πρόσβαση σε αυτό είναι μέσω του μηχανισμού CSMA-CA. Κατά την CFP δεν γίνεται χρήση του CSMA-CA, αλλά δίνεται ένα GTS σε μια συσκευή για να ξεκινήσει τη μετάδοσή της. Αυτός ο τρόπος είναι πολύ χρήσιμος σε εφαρμογές όπου ο χρόνος είναι κρίσιμος και μια συσκευή δεν μπορεί να περιμένει να ελευθερωθεί ένα κανάλι για να μπορέσει να κάνει εκπομπή. Τα CAP και CFP μαζί αποτελούν την ενεργή περίοδο. Στην διάρκεια της ανενεργούς περιόδου η συσκευή μπαίνει σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ισχύος για εξοικονόμηση ενέργειας.⁹

⁹ Μπελόκας Ανδρέας, Πτυχιακή εργασία : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ZIGBEE, Αθήνα, Ιούνιος 2014

3.10 Beacon

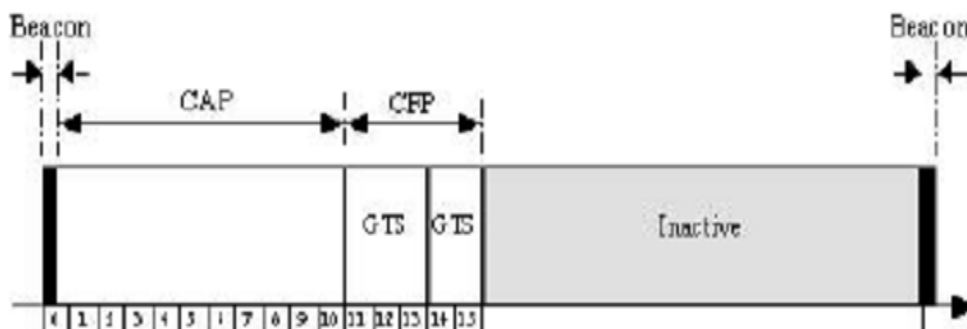
Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων του πρωτοκόλλου 802.15.4 χρησιμοποιεί τον μηχανισμό πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος, αποφυγή συγκρούσεων (CSMA/CA) με ή χωρίς χρονοσχισμές και διαθέτει την λειτουργία Beacon για την πρόσβαση των δεδομένων στο κανάλι. Όταν προτιμάται ο μηχανισμός με χρονοσχισμές (slotted CSMA/CA), οι χρονικές θέσεις επισημαίνονται με ειδικούς συνδυασμούς bit που ονομάζονται Beacon. Ο χρόνος μεταξύ δυο Beacon ονομάζεται beacon interval. Κάθε διάστημα beacon αποτελείται από έναν δεδομένο αριθμό superframes (superframe διάρκεια). Το σύνολο όλων των superframes ονομάζεται περίοδος πρόσβασης με ανταγωνισμό (CAP) (σχήμα). Για κάθε χρονική θέση στο CAP, όλες οι συσκευές που έχουν πακέτα που εκκρεμούν να μεταδώσουν πρέπει να χρησιμοποιήσουν τον μηχανισμό CSMA/CA για να αποκτήσουν το δικαίωμα να μεταδώσουν το επόμενο πακέτο στην αντίστοιχη χρονική θέση. Κάθε συσκευή πριν να μεταδώσει ανιχνεύει το κανάλι. Αν το κανάλι είναι αδρανές αρχίζει να μεταδίδει. Αν είναι κατειλημμένο ο αποστολέας αναβάλλει την μετάδοση μέχρι το κανάλι να γίνει αδρανές. Στο δεύτερο τρόπο χρησιμοποιείται το superframe, το οποίο οριοθετείται από τα αναγνωριστικά σήματα και χωρίζεται σε 16 χρονοσχισμές ίσης διάρκειας. Το αναγνωριστικό σήμα στέλνεται πάντοτε στην πρώτη χρονοσχισμή. Τα σήματα αυτά χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη δομή του superframe, για το συγχρονισμό των συσκευών του δικτύου και για τον προσδιορισμό του δικτύου. Το superframe μπορεί να έχει ένα ενεργό και ένα μη ενεργό μέρος. Η δομή και η διάρκεια του καθορίζονται από το συντονιστή του δικτύου. Κατά τη διάρκεια του μη ενεργού μέρους, ο συντονιστής δεν αλληλοεπιδρά με το δίκτυο του και λειτουργεί με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Το ενεργό μέρος αποτελείται από την περίοδο πρόσβασης με ανταγωνισμό (CAP) και από την περίοδο χωρίς ανταγωνισμό (CFP). Στην CAP κάθε συσκευή που μεταδίδει χρησιμοποιεί το μηχανισμό πολλαπλής πρόσβασης με ανίχνευση φέροντος, αποφυγή συγκρούσεων και χρονοσχισμές (slotted CSMA-CA). Αυτό είναι το ίδιο με το unslotted CSMA-CA, με τη διαφορά ότι οι μεταδόσεις ξεκινούν πάντοτε στην αρχή κάποιας χρονοσχισμής και σε περίπτωση κατειλημμένου καναλιού, ο αποστολέας αναβάλλει τη μετάδοση για τυχαίο αριθμό χρονοσχισμών. Όταν ένα κανάλι είναι αδρανές, η μετάδοση πραγματοποιείται μόνο αν υπάρχει αρκετός χρόνος για να ολοκληρωθεί πριν την λήξη της CAP. ¹⁰

¹⁰ https://www.auto.tuwien.ac.at/bib/pdf_thesis/THESIS0017.pdf



Εικόνα 16 : Beacon

Η CFP περιέχει κρατημένες χρονοσχιμές και βρίσκεται ακριβώς πριν το μη ενεργό μέρος. Οι χρονοσχιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξυπηρέτηση εφαρμογών που απαιτούν συγκεκριμένο εύρος ζώνης.



Εικόνα 17 : Παράδειγμα Superframe

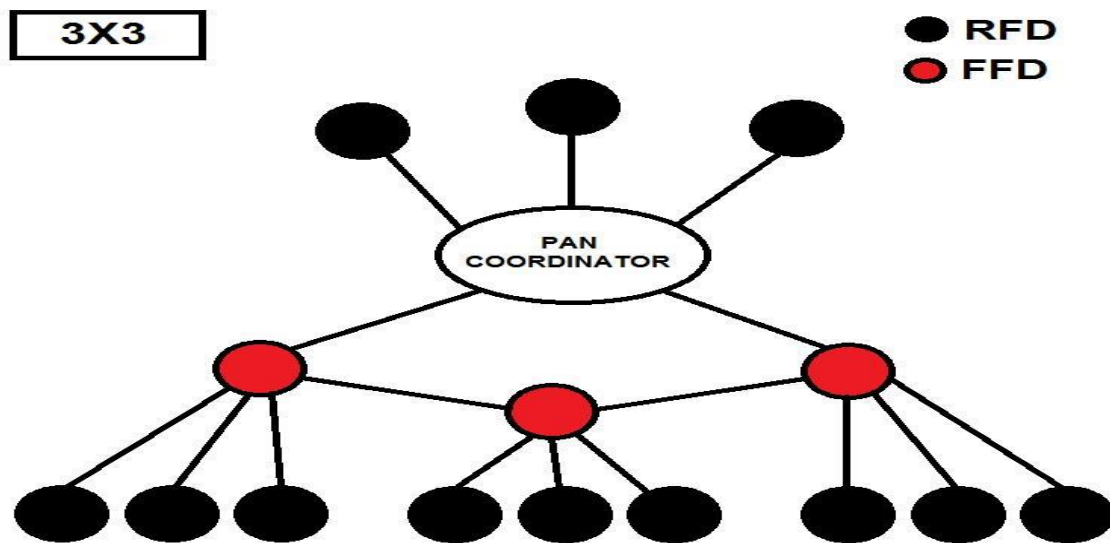
3.10.1 Λειτουργίες επιπέδου MAC

Το επίπεδο MAC χρησιμοποιεί τον μηχανισμό πολλαπλής πρόσβασης CSMA/CA για να αποφύγει τις συγκρούσεις πακέτων. Επομένως, μια συσκευή πρέπει να ακολουθήσει την επικοινωνία στο μέσο και να ανιχνεύσει χρόνους αναμονής, όπου το μέσο δεν χρησιμοποιείται. Ακόμα, οι συγκρούσεις είναι δυνατές κάθε φορά που δύο συσκευές υπολογίζουν το ίδιο χρονικό σημείο για να ξεκινήσουν τη μετάδοση τους. Τέλος η χρήση αναγνωριστικών για όλα τα πακέτα βοηθά στην αναγνώριση συγκρούσεων ή πακέτων που δεν έχουν ληφθεί από τον κόμβο προορισμού.

3.11 Οργάνωση του ραδιοδικτύου

3.11.1 Με ελεύθερη πρόσβαση (unslotted CSMA/CA)

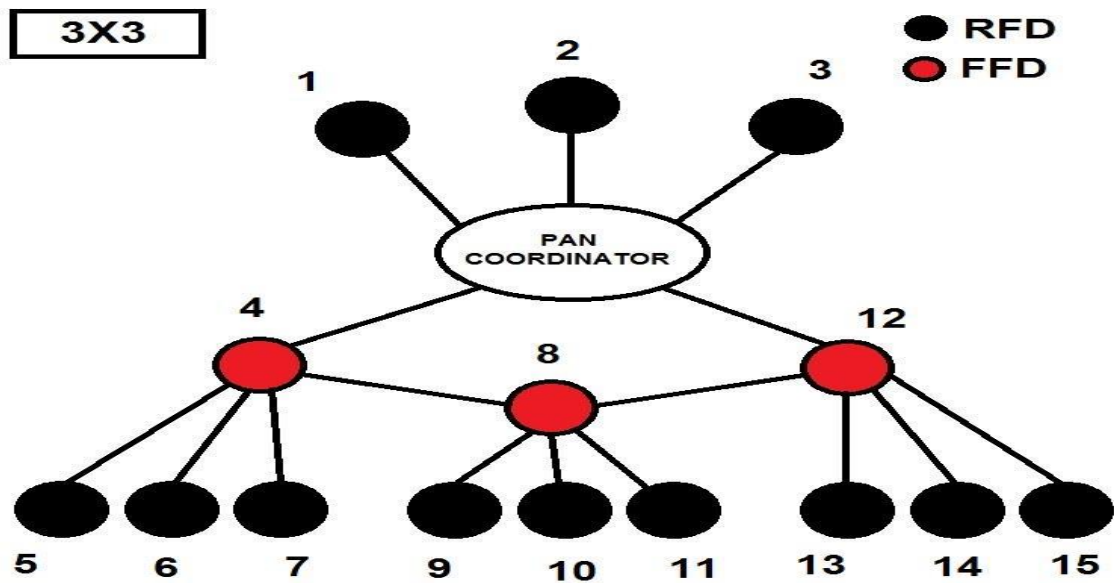
Στην ελεύθερη πρόσβαση όλοι οι κόμβοι στέλνουν data frames συγχρόνως με αποτέλεσμα να συγκρουστεί ένα μεγάλο ποσοστό. Ορισμένοι θα μεταδώσουν τα data frames και οι υπόλοιποι θα κάνουν back off. Έπειτα θα ξαναγίνει μετάδοση των data frames με αποτέλεσμα να επαναλαμβάνεται η διαδικασία έως ότου έχουν μεταδώσει όλοι οι κόμβοι. Παρακάτω παρατηρούμε ένα δίκτυο mesh.



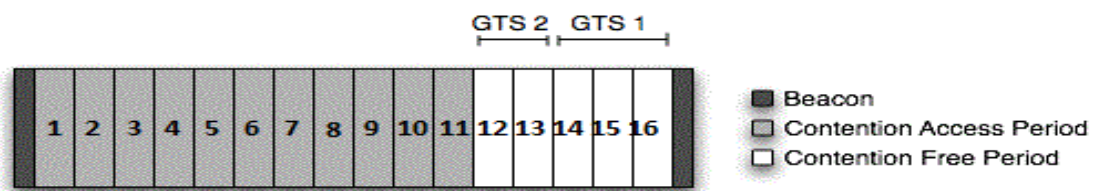
Εικόνα 18 : Δίκτυο mesh

3.11.2 Με την χρήση Beacon

Σε ένα δίκτυο με οργάνωση beacon ο PAN coordinator αποστέλλει ένα superframe το οποίο περιέχει 16 διευθύνσεις κόμβων, όπου με βάση τη σειρά των διευθύνσεων ορίζει ποιος κόμβος θα μεταδώσει τα πακέτα του.



Εικόνα 19 : Δίκτυο με οργάνωση Beacon (16 διευθύνσεις)



Εικόνα 20 : Superframe

4. Μελέτη για την Άρτα



Εικόνα 21 : Η πόλη της Άρτας

4.1 Μορφολογία εδάφους

Το μεγαλύτερο ποσοστό του εδάφους της περιφερειακής ενότητας Άρτας είναι ορεινό και αντιστοιχεί στο 70,4 % του συνολικού εδάφους ενώ το 18,6 % είναι πεδινό και το 11% ημιορεινό. Στα νοτιοδυτικά της περιφερειακής ενότητας βρίσκεται η πεδιάδα της Άρτας, η οποία είναι και η μεγαλύτερη πεδιάδα της Ηπείρου. Η πεδιάδα της Άρτας απαριθμεί 160.000 στρέμματα καλλιεργήσιμης γης με κύριες καλλιέργειες τα πορτοκάλια, τα μανταρίνια, τα ακτινίδια αλλά και τα φυτά μεγάλης καλλιέργειας όπως το καλαμπόκι και βιομηχανικά φυτά όπως το βαμβάκι.¹¹

4.2 Εγκατάσταση δικτύου

Η εφαρμογή αφορά στην συλλογή και μετάδοση μέσω κεντρικού κόμβου των μετρήσεων περιβαλλοντολογικών συνθηκών (μικρόκλιμα), σε περιοχή του κάμπου της Άρτας. Η περιοχή υπό επιτήρηση προσεγγίζεται από ένα παραλληλόγραμμο 3 Km x 3,5 Km

¹¹ <https://www.wikipedia.org/>

Στην περιοχή θα εγκατασταθούν ασύρματοι σταθμοί αισθητήρων σε απόσταση 500 μέτρων μεταξύ τους.



Εικόνα 22 : Περιοχή επιτήρησης

4.3 Διαστασιολόγηση δικτύου

Για διαστάσεις 3 km x 3,5 km και δεδομένου ότι τοποθετούμε κόμβο κάθε 500 μέτρα υπολογίζουμε ότι χρειαζόμαστε :

- 3000/500
- 3500/500

Άρα συνολικά για την επάρκεια της κάλυψης του ραδιοδικτύου της περιοχής, θα χρειαστούμε: 56 κόμβους

φωτοβολταικών στοιχείων. Οι σταθμοί και η διαμόρφωση τους θα επιλεγούν από τον εμπορικό κατάλογο:

<https://www.cooking-hacks.com/shop/waspmote/core-boards> της εταιρείας libelium (<http://www.libelium.com/>)

4.4.1 XBee Pro ZB SMA



Εικόνα 24 : XBee Pro ZB SMA

Οι μονάδες XBee-Pro παρέχουν οικονομική αποδοτική ασύρματη συνδεσιμότητα με συσκευές σε δίκτυα ZigBee. Χρησιμοποιώντας το σύνολο των λειτουργιών ZigBee Pro, αυτές οι λειτουργικές μονάδες είναι συμβατές με άλλες συσκευές ZigBee συμπεριλαμβανομένων των συσκευών και από άλλους κατασκευαστές. Οι προγραμματιζόμενες εκδόσεις της μονάδας XBee-Pro καθιστούν εύκολη την προσαρμογή των εφαρμογών ZigBee, ακόμη και χωρίς την τεχνογνωσία του ασύρματου σχεδιασμού.

Performance (Προδιαγραφές)

RF Data Rate	250 Kbps
Indoor Urban Range	300 ft. (90m)
Outdoor/RF Line of Sight Range	Int'l 5000 ft (1500 m)
Transmit Power	Int'l 10 mw (+10 dBm)
Receiver Sensitivity (1% PER)	-102 dBm

Features (Χαρακτηριστικά)

Adjustable Power	Yes
I/O Interface	3.3V CMOS UART, SPI, I2C, PWM, DIO, ADC
Configuration Method	API or AT commands, local or over-the-air
Frequency Band	2.4 GHz
Interference Immunity	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Serial Data Rate	1200 bps - 1 Mbps
ADC Inputs	(4) 10-bit ADC inputs
Digital I/O	10
Operating Temperature & Humidity	-40° C to +85° C, 0-95% humidity non-condensing

Programmability (Προγραμματισμός)

Memory	32 KB Flash / 2 KB RAM
CPU/Clock Speed	HCS08 / Up to 50.33 MHz

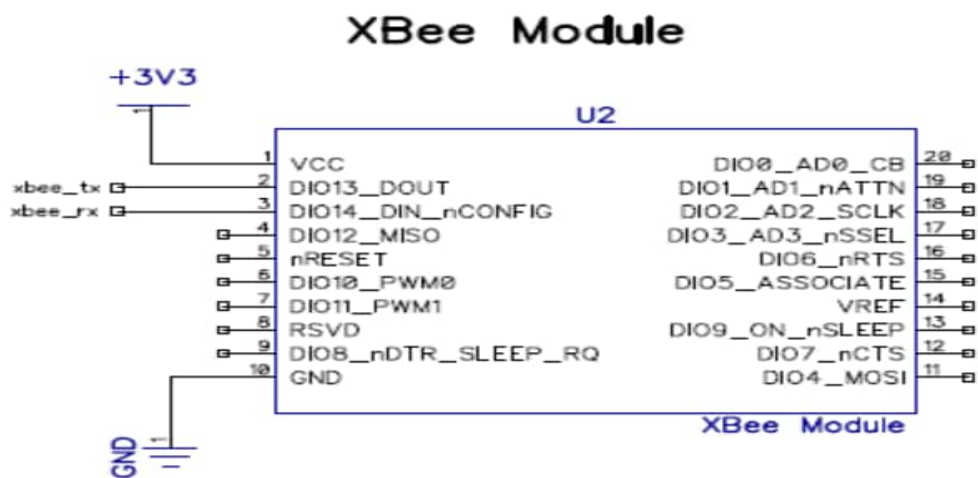
Networking & Security (Δικτύωση και Ασφάλεια)

Encryption	128-bit AES
Reliable Packet Delivery	Retries/Acknowledgments
IDs and Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 15 channels

Power Requirements (Απαιτήσεις ισχύος)

Supply Voltage	2.7 - 3.6VDC
Transmit Current	205 mA

Receive Current	47 mA
Power-Down Current	3.5 uA @ 25° C
Regulatory Approvals	
FCC (USA)	Yes
IC (Canada)	Yes
ETSI (Europe)	Yes
C-TICK (Australia)	Yes
TELEC (Japan)	Yes ¹²

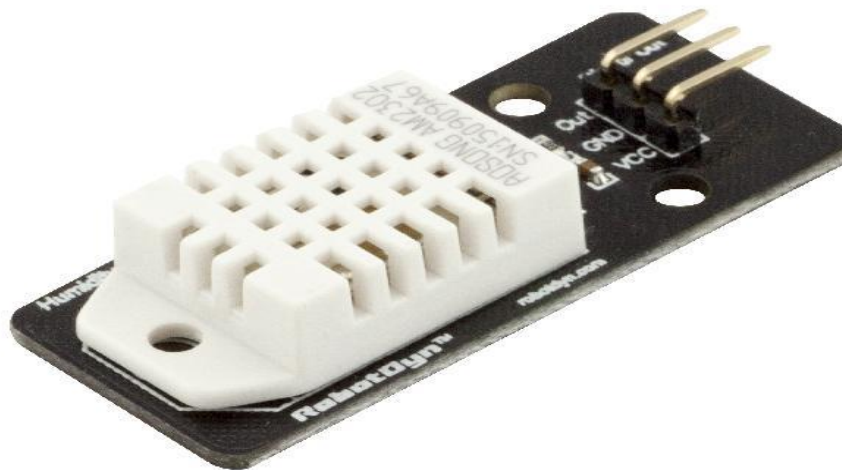


Εικόνα 25 : Pin Definition

4.4.2 Αισθητήρες

- Dht-22

¹² <https://www.cooking-hacks.com/>



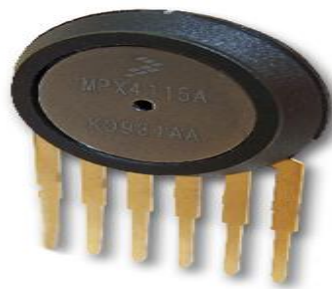
Εικόνα 26 : DHT-22 ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

- Smam-rp antenna



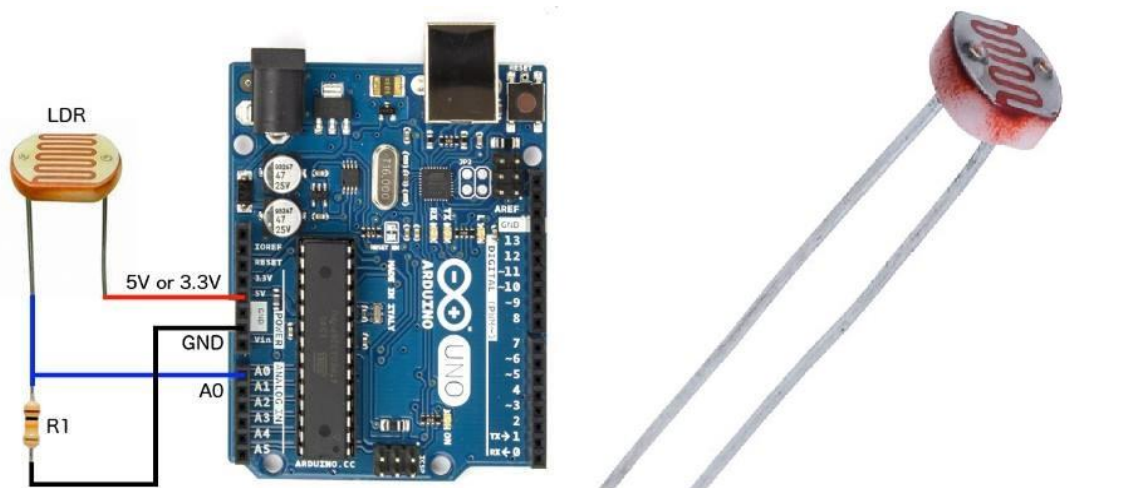
Εικόνα 27 : 2.SMAM-RP Antenna 2 dbi, 2,4GHz dimension 5cm

- Air pressure sensor



Εικόνα 28 : air pressure sensor

- Photoresistor ldr cds 5mm light-dependent resistor sensor



Εικόνα 29 : Photoresistor LDR CDS 5mm Light-Dependent Resistor Sensor

- Detection sensor module rain and snow

Humidity sensor module

(Detection: rain water / snow)



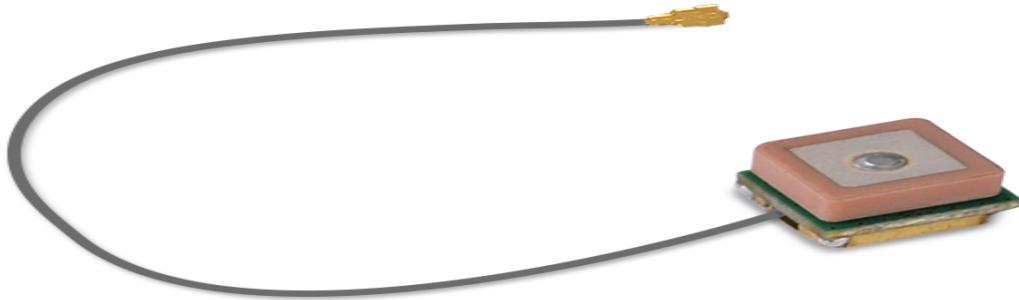
Εικόνα 30 : Detection sensor module rain and snow

- Noise sensor



Εικόνα 31 : Noise sensor

- Gps sensor



Εικόνα 32 : Gps sensor

Το kit συνδεσιμότητας ZigBee με τους αισθητήρες διατίθεται από την libelium στην παρακάτω διεύθυνση:

<https://www.cooking-hacks.com/zigbee-connectivity-kit>

5. Προσομοίωση δικτύου

5.1 Εισαγωγή

Αρκετοί προσομοιωτές είναι διαθέσιμοι σήμερα στην αγορά για την προσομοίωση διαφορετικών τύπων ασύρματων και ενσύρματων δικτύων, όπως το Network Simulator (NS-2), το QualNet, το GLOMOSIM, το OMNET ++ κ.ά. Ωστόσο, σε αυτήν την μελέτη επέλεξα το OPNET για την υλοποίηση του έργου μου.

Στο παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα πιο βασικά περιβάλλοντα προσομοίωσης που είναι διαθέσιμα στην αγορά.

Criterium	GloMoSim	QualNet	OPNET	The ns-2	OMNeT++
Licensing	Open-source	Commercial	Commercial	Open-souce	Open-souce
User interface	Command Line	Qt – 3D	Good – 2D	Tcl/tk	Eclipse framework
Efficiency	–	High	High	Full recompile required	Only changed files recompiled
Development	Stopped	ongoing	ongoing	ongoing	ongoing

Εικόνα 33 : Συνοπτικός πίνακας διαθέσιμων περιβαλλόντων προσομοίωσης

5.2 Παρουσίαση OPNET modeler

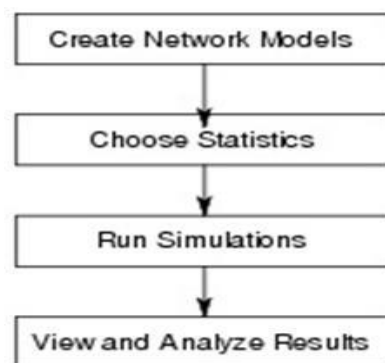
Το OPNET modeler είναι ένα εμπορικό μοντέλο και ένα εξειδικευμένο εργαλείο προσομοίωσης για διαφορετικούς τύπους ασύρματων δικτύων, που προσφέρει τη δυνατότητα με τη βοήθεια ενός γραφικού περιβάλλοντος να μοντελοποιηθούν και να προσομοιωθούν διάφορα είδη κόμβων. Επιπλέον, παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για το σχεδιασμό δικτύων επικοινωνιών και καταναμημένων συστημάτων.

Κατασκευάστηκε από την OPNET Technologies, Inc, και πρόσφατα εξαγοράστηκε από την Riverbed: www.riverbed.com. Το περιβάλλον προσομοίωσης του OPNET συμβάλει

στη προσομοίωση δικτύων με βάση το ZigBee παρέχοντας τους τύπους συσκευών ενός ZigBee δικτύου (coordinator,router,end device).¹³

5.3 Χαρακτηριστικά OPNET modeler

Ένας χρήστης μπορεί να δημιουργήσει ένα δίκτυο χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που του δίνονται για να αναπτύξει ένα παρόμοιο μοντέλο ενός πραγματικού δικτύου για να το αναλύσει και να δει τα αποτελέσματα. Επιπλέον του χρήστη του δίνεται η δυνατότητα να κτίσει ένα μοντέλο δικτύου, χρησιμοποιώντας τα έτοιμα μοντέλα που υπάρχουν στην βιβλιοθήκη του OPNET. Τέλος το περιβάλλον του OPNET ενσωματώνει εργαλεία για όλες τις φάσεις της μελέτης μιας προσομοίωσης, περιλαμβάνοντας σχεδιασμό μοντέλων, προσομοίωση, συλλογή και ανάλυση στοιχείων. Η ροή εργασίας που ακολουθείτε στο λογισμικό OPNET modeler ξεκινά με τη δημιουργία ενός νέου έργου (project). Στη συνέχεια δημιουργούμε ένα μοντέλο δικτύου, έπειτα επιλέγουμε τη συλλογή των στατιστικών στοιχείων από κάθε κόμβο του δικτύου ή από το σύνολο του δικτύου και τέλος εκτελούμε την προσομοίωση για να δούμε τα αποτελέσματα.¹⁴



Εικόνα 34 : Ροή εργασίας στο λογισμικό OPNET Modeler

5.4 Εργαλεία διαχείρισης στο λογισμικό OPNET Modeler

5.4.1 Εργαλείο διαχείρισης έργου (Project Editor)

Το εργαλείο διαχείρισης έργου (Project Editor) αποτελεί το κύριο περιβάλλον του λογισμικού OPNET Modeler. Σας επιτρέπει να οικοδομήσετε ένα μοντέλο δικτύου με τη

¹³ <https://www.riverbed.com/gb/>

¹⁴

http://www2.ensc.sfu.ca/~ljilja/ENSC427/Spring09/Projects/team4/ENSC427_Project_Final_Reportv5.1.pdf

χρήση συστημάτων από την πρότυπη βιβλιοθήκη του λογισμικού, να επιλέξετε την παρουσίαση στατιστικών στοιχείων σχετικών με το δίκτυο, να εκτελέσετε μια προσομοίωση, και να δείτε τα αποτελέσματα. Παρακάτω παρουσιάζεται μια εικόνα του εργαλείου.

5.4.2 Εργαλείο διαχείρισης Κόμβου (Node Editor)

Το εν λόγω εργαλείο σας επιτρέπει να ορίσετε τη συμπεριφορά των κόμβων του δικτύου που προσομοιώνεται. Η συμπεριφορά του κόμβου ορίζεται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο διαφορετικών ενοτήτων, καθεμία από τις οποίες μοντελοποιεί κάποια εσωτερική λειτουργία του κόμβου, όπως τη δημιουργία δεδομένων, την αποθήκευση δεδομένων, κλπ. Κάθε κόμβος αποτελείται από ένα σύνολο υπομονάδων, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω γραμμών μεταφοράς πακέτων ή στατιστικών δεδομένων και καθορίζουν τη συμπεριφορά του.

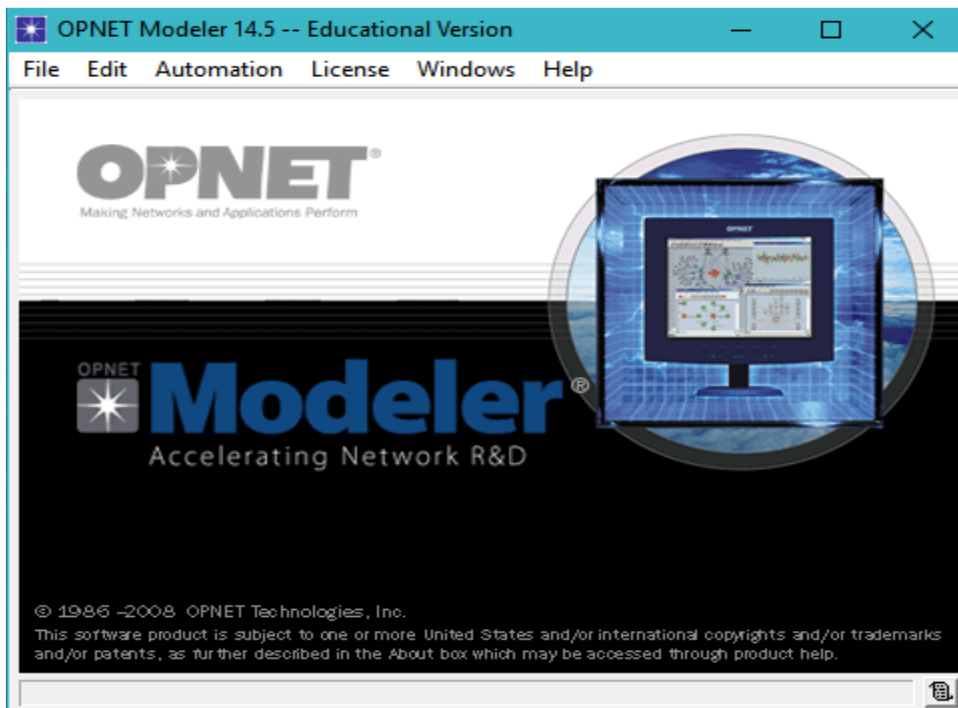
5.4.3 Εργαλείο διαχείρισης μοντέλου διεργασιών (Process Model Editor)

Το εν λόγω εργαλείο σας επιτρέπει να δημιουργήσετε μοντέλα διεργασιών, οι οποίες ελέγχουν τη βασική λειτουργικότητα των κόμβων που δημιουργούνται στο Εργαλείο διαχείρισης κόμβου. Τα μοντέλα διεργασιών αποτελούνται από μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων (FSM), και δημιουργούνται με εικονίδια (εικόνα 5) που αντιπροσωπεύουν καταστάσεις και γραμμές που αντιπροσωπεύουν τις μεταβάσεις μεταξύ καταστάσεων. Οι πράξεις που εκτελούνται σε κάθε κατάσταση ή για τη μετάβαση από μια κατάσταση σε μια άλλη περιγράφονται σε ενσωματωμένα μπλοκ κώδικα C ή C++.

5.4.4 Εργαλείο διαχείρισης μοντέλου διασύνδεσης (Link Model Editor)

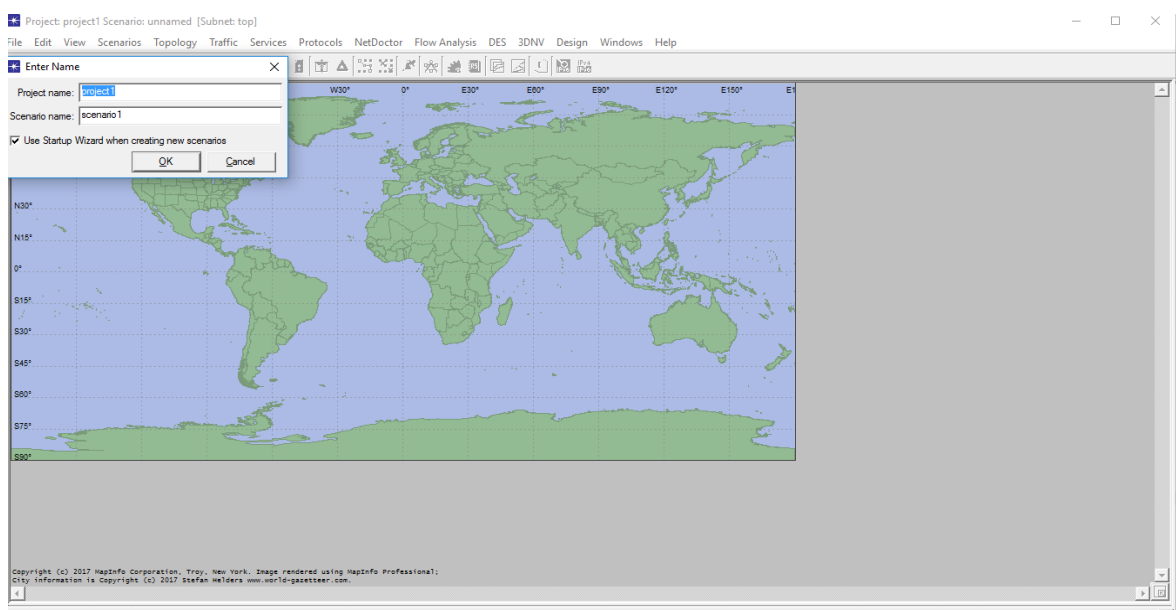
Το εν λόγω εργαλείο σας επιτρέπει να δημιουργήσετε νέους τύπους διασυνδέσεων μεταξύ κόμβων. Κάθε νέος τύπος διασύνδεσης μπορεί να έχει διαφορετικές διεπαφές, χαρακτηριστικά και αναπαράσταση. Μπορούν επίσης να καθοριστούν σχόλια και λέξεις-κλειδιά για εύκολη αναγνώριση των νέων τύπων.

5.5 Προσομοίωση δικτύου στο OPNET modeler

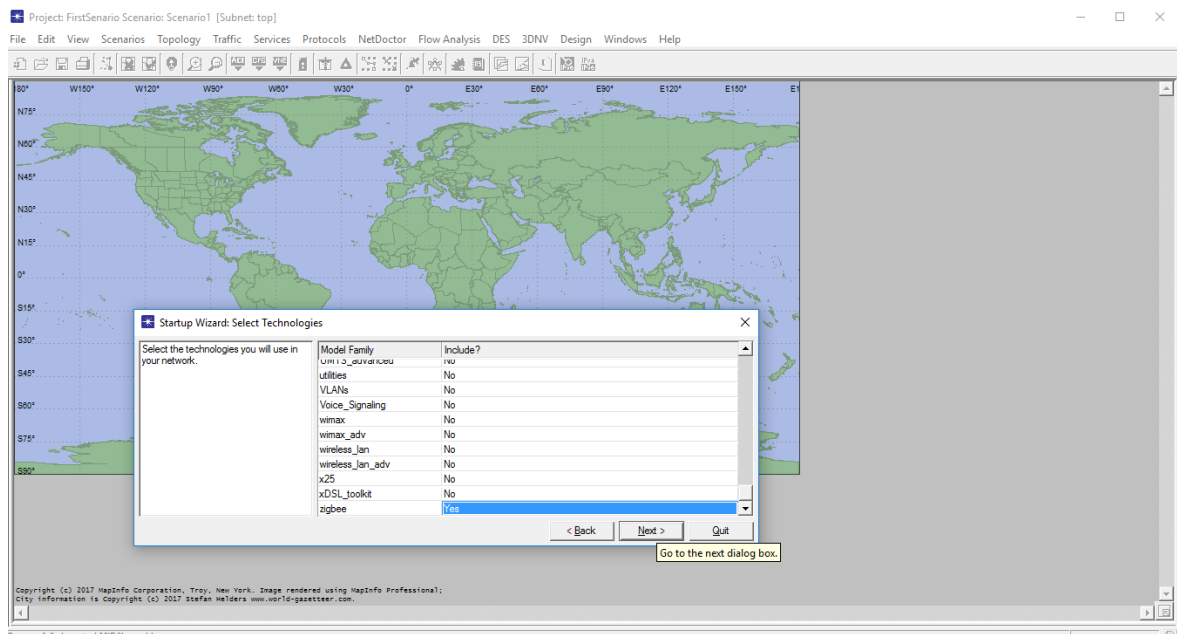


Εικόνα 35 : Αρχικό παράθυρο OPNET

Ξεκινώντας, πρέπει να καθορίσουμε την τοπολογία του δικτύου μας, την κλίμακα και το μέγεθος του, την επιλογή της περιοχής στο χάρτη-υπόβαθρο και τέλος να συσχετίσουμε μια παλέτα αντικειμένων με το σενάριο.

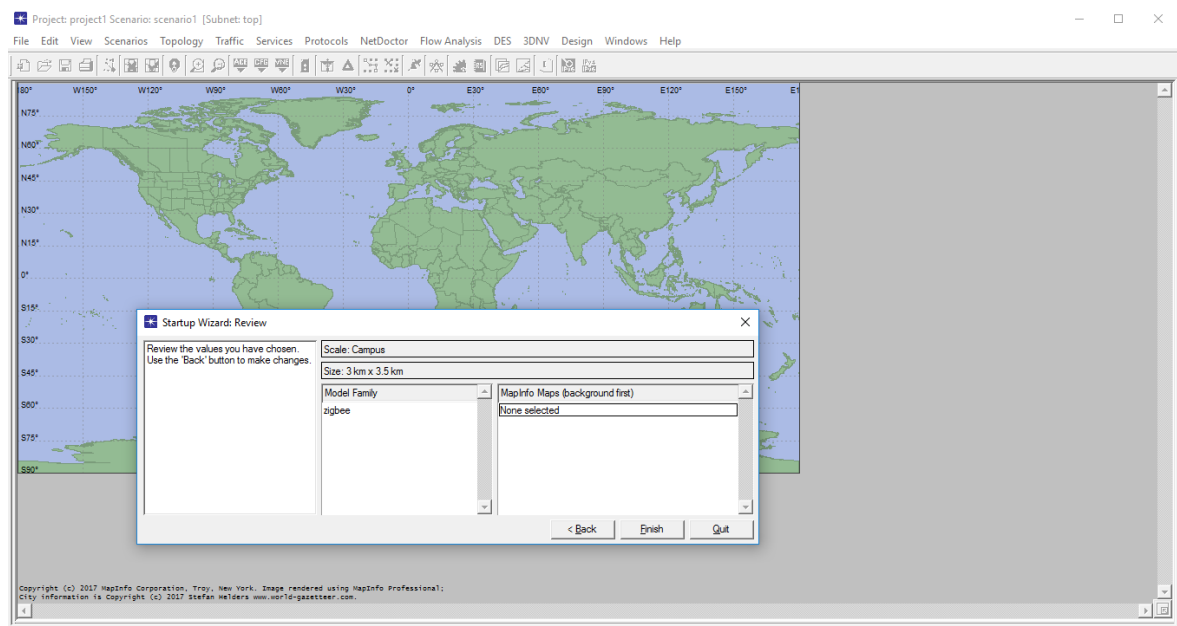


Εικόνα 36 : Αρχικό μενού



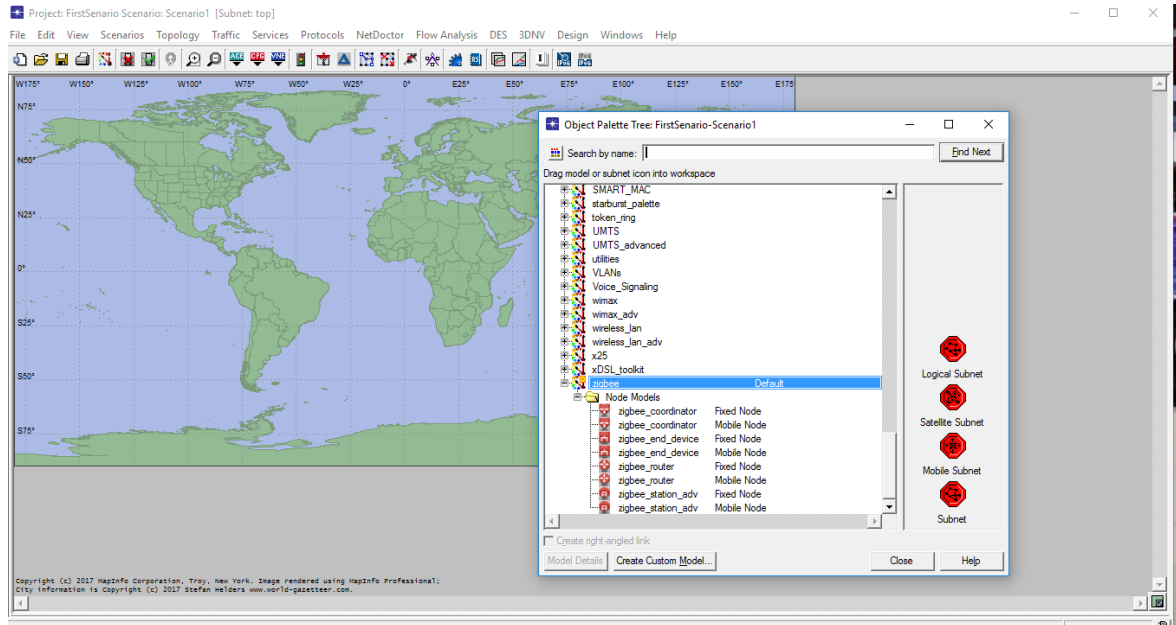
Εικόνα 37 : Επιλογή τεχνολογίας

Ο Οδηγός εκκίνησης (startup wizard) μας επιτρέπει να καθορίσουμε την τοπολογία του δικτύου, την κλίμακα και την επιλογή της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί στο δίκτυο μας. (Εικόνα 37).



Εικόνα 38 : Προεπισκόπηση έργου

Στην εικόνα 38 βλέπουμε τις προδιαγραφές που έχουμε ορίσει για το σενάριο μας.



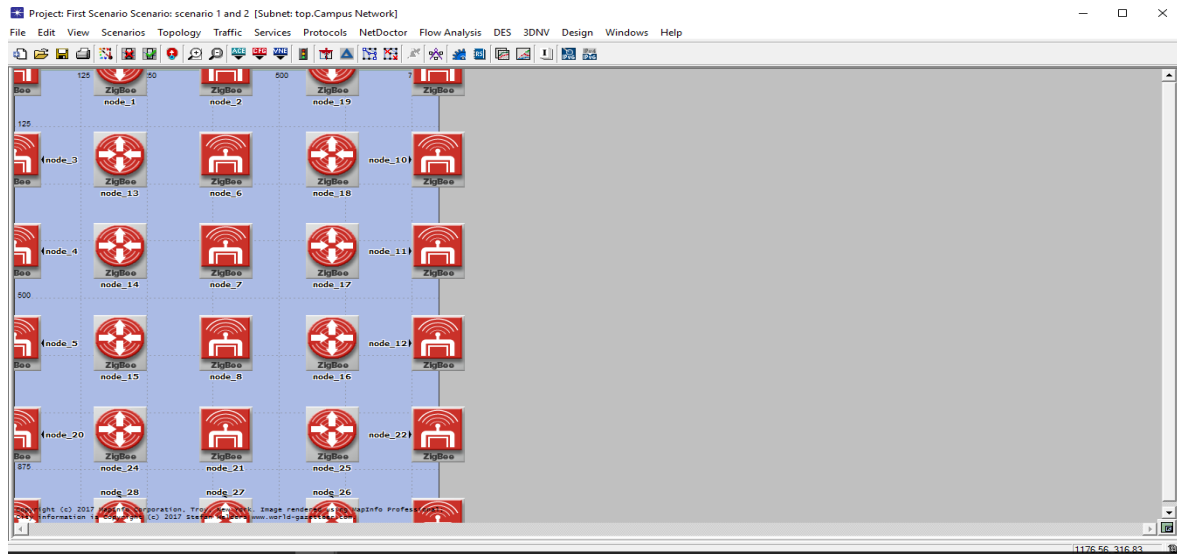
Εικόνα 39 : Παλέτα αντικειμένων ZigBee

Στην εικόνα 39 βλέπουμε την παλέτα αντικειμένων ZigBee, η οποία δημιουργεί ένα δίκτυο άμεσα, αφού επιλέξουμε τα είδη των κόμβων του δικτύου, καθώς και τα είδη των διασυνδέσεων που συνδέουν τους κόμβους.

5.6 Σενάρια προσομοίωσης

Σε αυτό το project θα μελετηθούν δύο σενάρια, χρησιμοποιώντας ένας ZigBee συντονιστή σε κάθε τοπολογία. Και θα συγκρίνουμε την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, την απόδοση, την απώλεια των πακέτων σε σχέση με τον αριθμό κόμβων, την ισχύς, το φορτίο, το ρυθμό άφιξης δεδομένων και την κίνηση που αποστέλλεται και λαμβάνεται και στα δύο σενάρια.

5.6.1 Πρώτο σενάριο

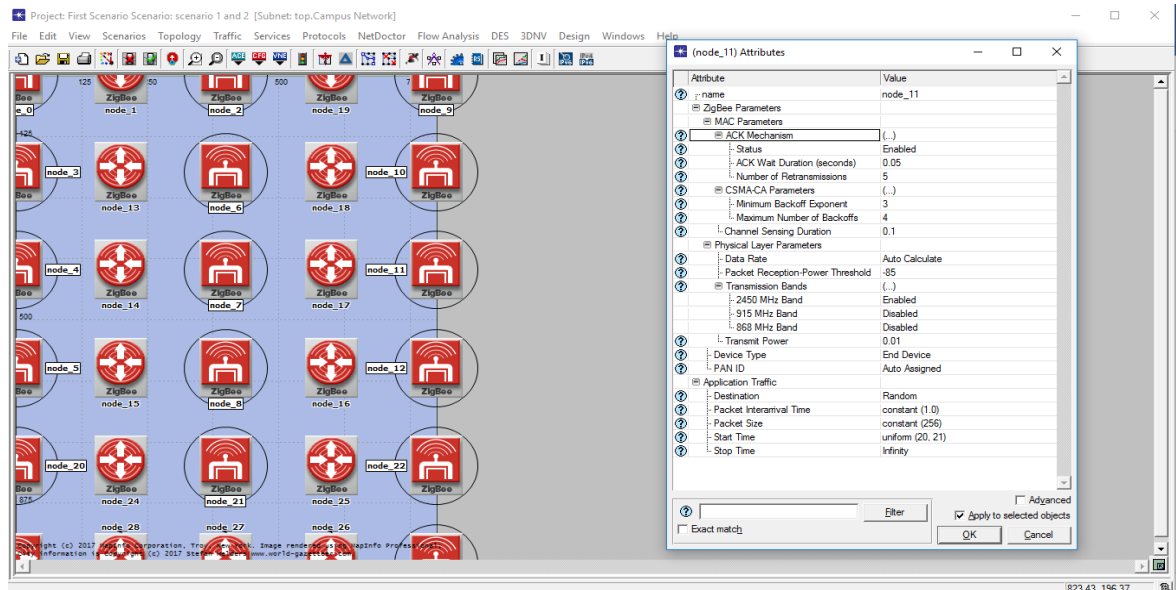


Εικόνα 40 : Πρώτο σενάριο προσομοίωσης

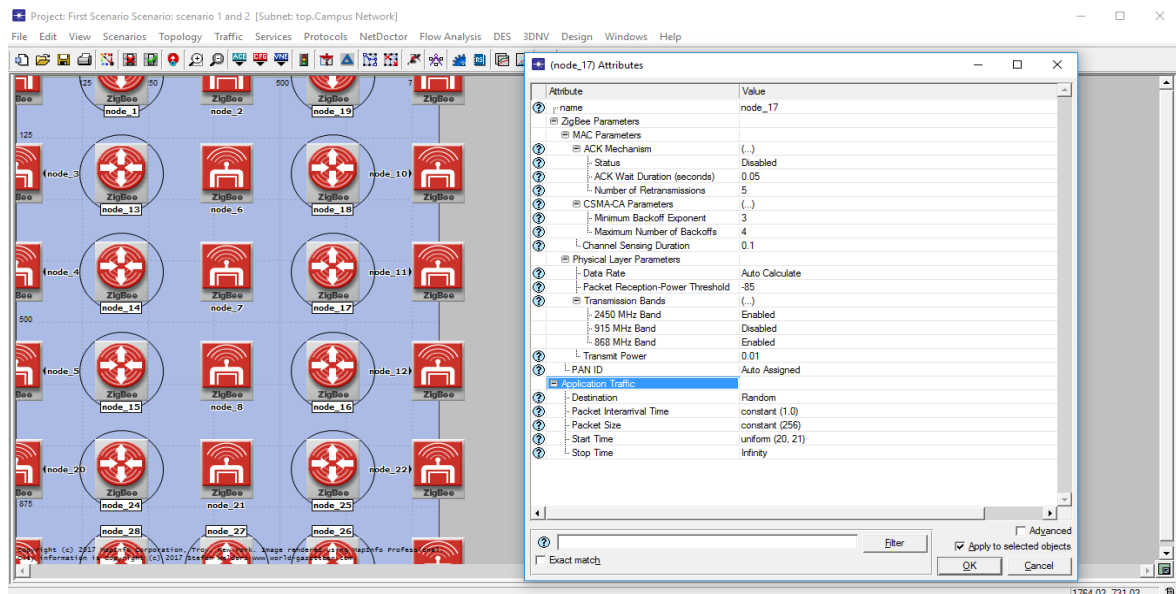
Το πρώτο σενάριο αποτελείται από έναν μόνο συντονιστή δικτύου. Η λογική του σχεδιασμού είναι πολύ απλή, 13 δρομολογητές και 16 τερματικές συσκευές (συνολικά 30 κόμβοι) χρησιμοποιούνται για να καλύψουν ολόκληρο το πεδίο με τους αισθητήρες τοποθετημένους σε απόσταση 200 μέτρων ο ένας από τον άλλον.

Παρακάτω αναφέρονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο σενάριο.

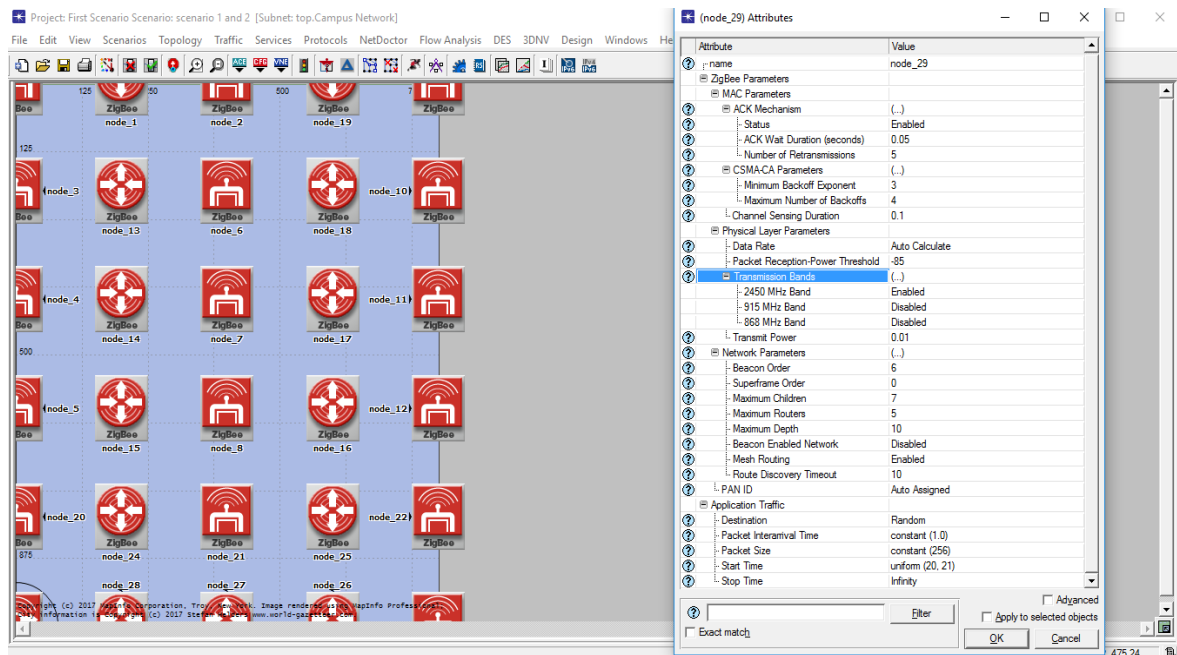
- Οι κόμβοι έχουν τοποθετηθεί σε απόσταση 200 μέτρων
- Η στάθμη ισχύος μετάδοσης έχει οριστεί στα 0.01 Watt
- Η συχνότητα έχει ρυθμιστεί στα 868 MHz
- Οι τελικές συσκευές και οι δρομολογητές έχουν ρυθμιστεί να στέλνουν την κίνηση των πακέτων σε τυχαίους κόμβους
- Ο συντονιστής του δικτύου έχει ρυθμιστεί να συνδέεται μόνο με κοντινούς δρομολογητές ή κόμβους
- Ο μηχανισμός επιβεβαίωσης παραλαβής πακέτων έχει ενεργοποιηθεί και ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων μεταδόσεων είναι ίσος με 5
- Το μέγεθος των πακέτων που αποστέλλονται είναι 256 Bytes



Εικόνα 41 : Παραμετροποίηση τερματικών συσκευών

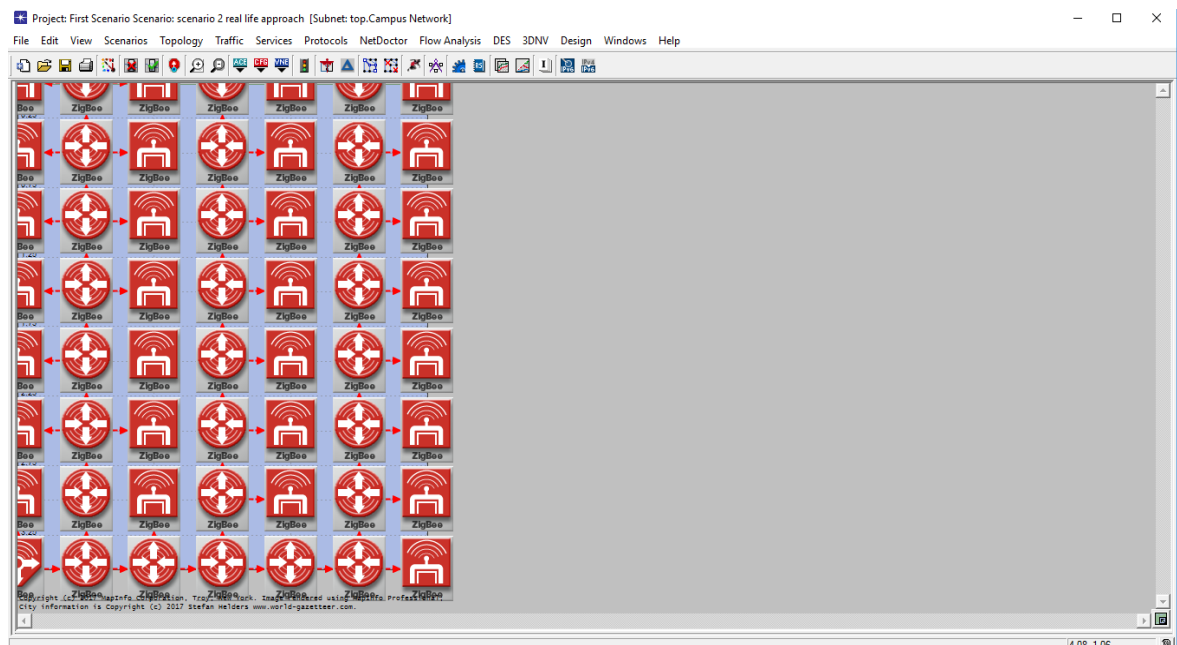


Εικόνα 42 : Παραμετροποίηση δρομολογητών



Εικόνα 43 : Παραμετροποίηση συντονιστή

5.6.2 Δεύτερο σενάριο



Εικόνα 44 : Δεύτερο σενάριο

Το δεύτερο σενάριο βασίζεται σε μία προσέγγιση πραγματικής κλίμακας μιας μεγάλης

γεωργικής έκτασης.

Ως εκ τούτου, ο χρήστης ή ο ιδιοκτήτης έχοντας πρόσβαση στο διαδίκτυο από οπουδήποτε στον κόσμο μπορεί να παρακολουθεί τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες της περιοχής υπό επιτήρηση. Παραδείγματος χάρη να παρακολουθεί τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής πίεσης, την υγρασία, τη θερμοκρασία του εδάφους κλπ.

Όπως και στο προηγούμενο σενάριο έτσι και εδώ υπάρχει μόνο ένας συντονιστής σε ολόκληρο το δίκτυο. Τα πακέτα δρομολογούνται στην επιθυμητή κατεύθυνση με τη βοήθεια των δρομολογητών. Κάθε δρομολογητής έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει έως και δυο κόμβους και έναν άλλον δρομολογητή. Επίσης ο συντονιστής του δικτύου θα συνδεθεί μόνο με κοντινούς δρομολογητές ή απλούς κόμβους. Η ιδέα εδώ είναι να έχουμε έναν κεντρικό κόμβο απ' όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ή σύνδεση στο διαδίκτυο για την παρακολούθηση της περιοχής. Το OPNET προσφέρει δύο τύπους μεταβλητών και μετρήσεων για την συλλογή των δεδομένων στο σύστημα : Τα τοπικά (local) και τα παγκόσμια (global) στατιστικά. Η παρούσα μελέτη ασχολείται με τα δεδομένα που συλλέγονται από τις παγκόσμιες στατιστικές.

Η Παραμετροποίηση των τερματικών συσκευών είναι παρόμοια με των δρομολογητών, η μόνη διαφορά είναι ότι οι τερματικές συσκευές έχουν ρυθμιστεί να στέλνουν πακέτα προς τυχαίους κόμβους σε αντίθεση με τους δρομολογητές που στέλνουν δεδομένα μόνο σε γονικούς κόμβους. Ο κάθε δρομολογητής έχει την ικανότητα να υποστηρίζει μέχρι και δύο κόμβους και ένα άλλον συντονιστή. Επιπλέον ο συντονιστής του δικτύου έχει ρυθμιστεί να συνδέεται μόνο με κοντινούς δρομολογητές οι κόμβους.

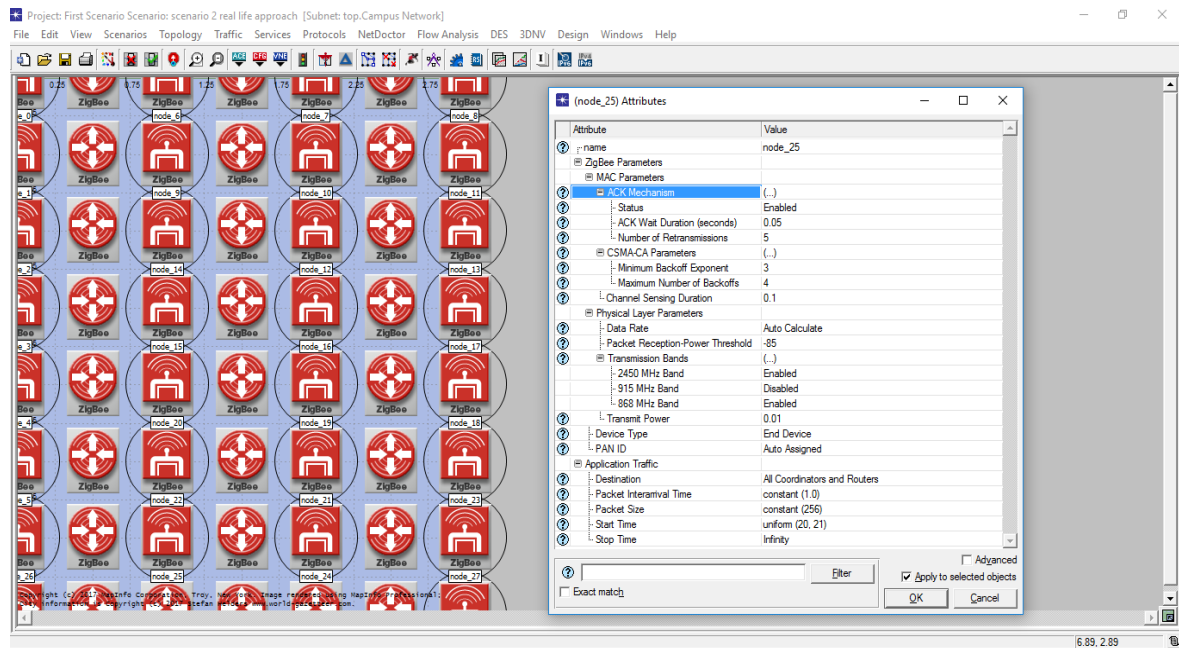
Αναλυτικότερα:

- Οι συσκευές είναι τοποθετημένες σε απόσταση 500 μέτρων η μία από την άλλη
- Το εύρος των 868 MHz που συναντάμε στην Ευρώπη έχει επιλεγεί
- Ο μηχανισμός επιβεβαίωσης παραλαβής (acknowledgment mechanism) έχει ενεργοποιηθεί και ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων μεταδόσεων είναι ίσος με 5
- Ο μηχανισμός αποφυγής συγκρούσεων (CSMA/CA) είναι επιλεγμένος
- Το μέγεθος των πακέτων που αποστέλλονται έχει οριστεί στα 256 Bytes

Ο συντονιστής έχει προεπιλεγμένες τιμές ως προς τον μέγιστο αριθμό παιδιών, το μέγιστο βάθος και το μέγιστο αριθμό δρομολογητών στο δίκτυο. Με αυτούς τους παραμέτρους πολλοί κόμβοι δεν θα είναι σε θέση να συμμετάσχουν στο δίκτυο. Επομένως, πρέπει να ρυθμιστούν εκ νέου πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης. Έτσι όρισα τον μέγιστο αριθμό

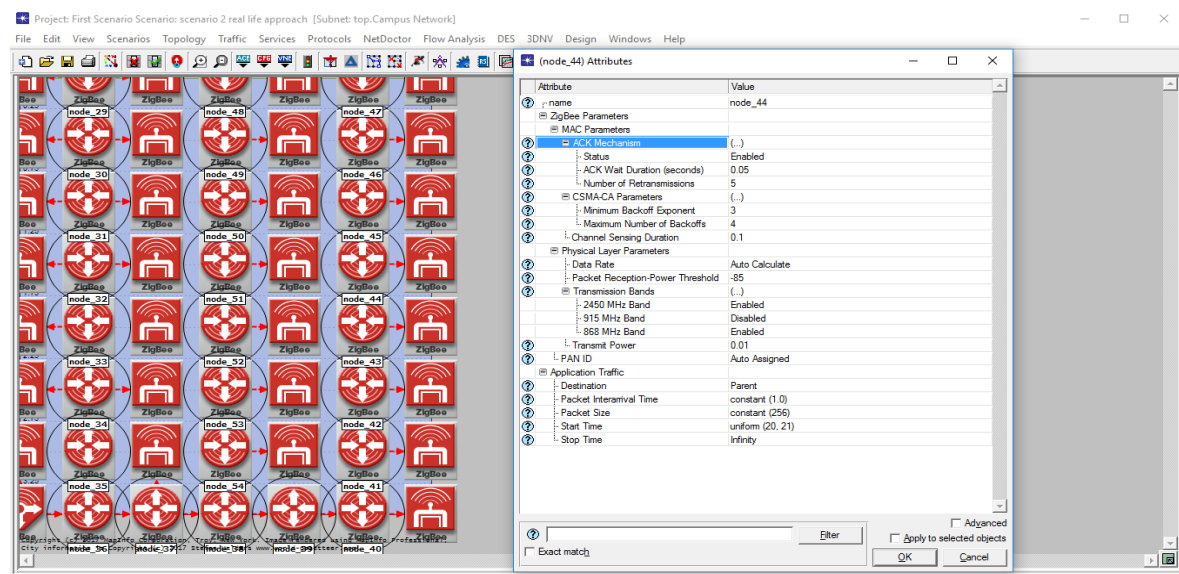
παιδιών ενός δρομολογητή ίσο με 7, τον μέγιστο αριθμό δρομολογητών παιδιών ενός δρομολογητή ίσο με 5 και το μέγιστο βάθος του δικτύου ίσο με 14.

Τέλος η λειτουργία Beacon παραλείφθηκε διότι, δεν διατίθεται στην εμπορική έκδοση του OPNET.

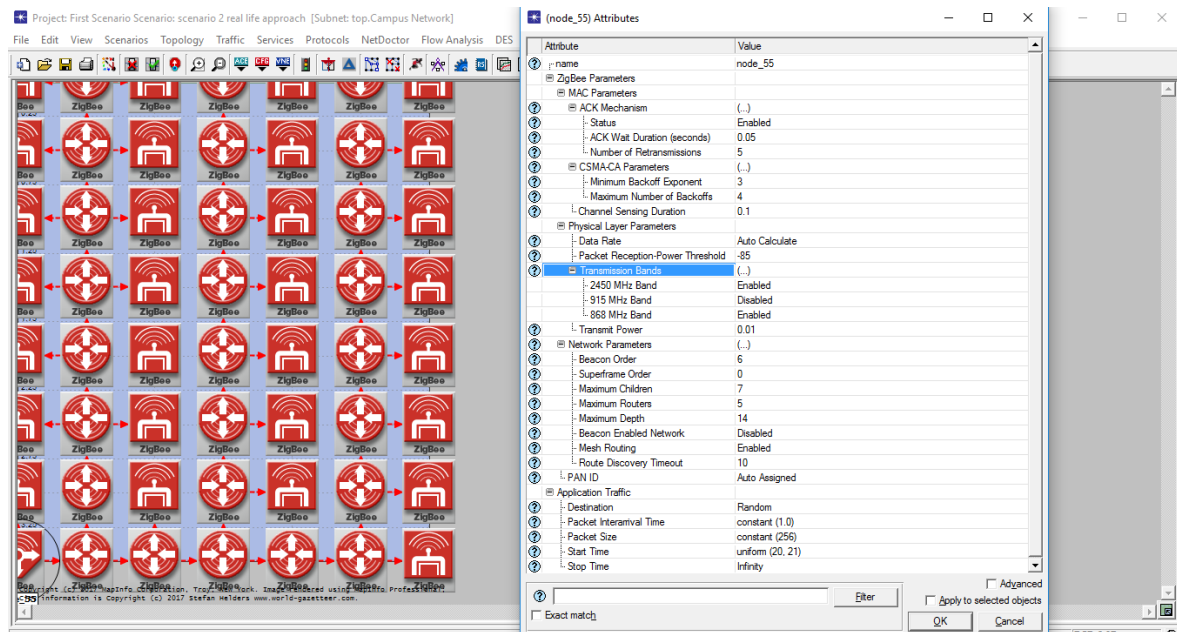


Εικόνα 45 : Παραμετροποίηση τερματικών συσκευών

Στην εικόνα 45 βλέπουμε την παραμετροποίηση των απλών συσκευών του δικτύου μας. Τα πακέτα έχουν ρυθμιστεί να στέλνονται στον κοντινότερο δρομολογητή.



Εικόνα 46 : Παραμετροποίηση δρομολογητών



Εικόνα 47 : Παραμετροποίηση συντονιστή

6. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που συλλέχθηκαν από τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται και αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο. Για προσομοίωση μιας ώρας χρειάστηκαν πάνω από 10 λεπτά για laptop με 4 GB RAM και επεξεργαστή διπλού πυρήνα. Οι χρόνοι προσομοίωσης για τα σενάρια παρουσιάζονται στο σχήμα.

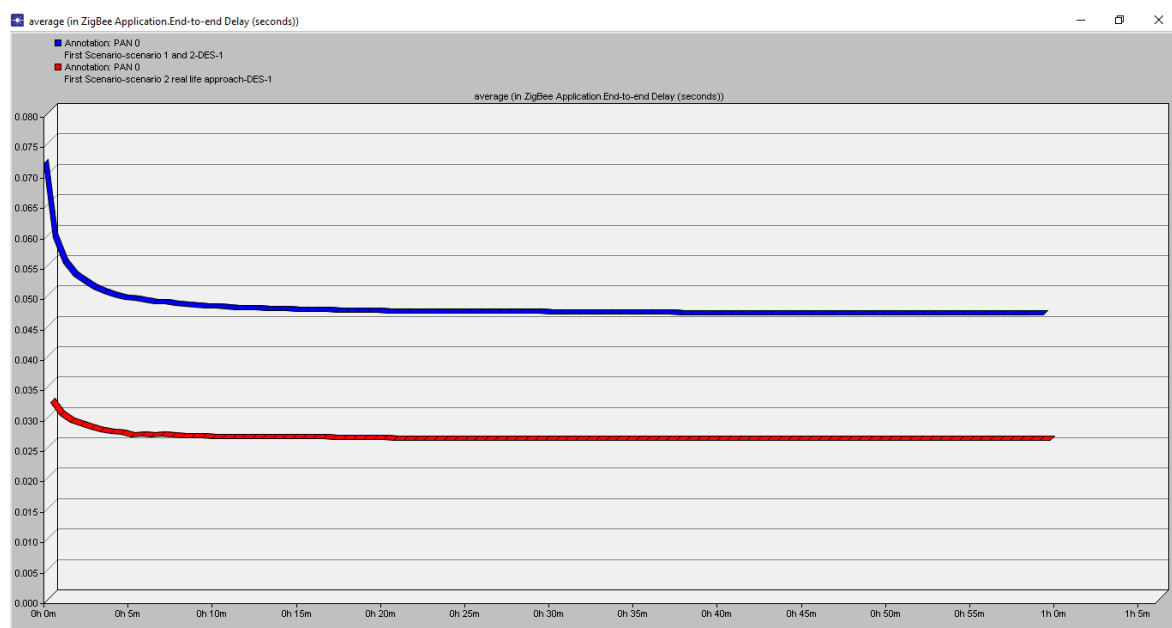
DES Execution Manager: First Scenario

Status	Hostname	Duration	Sim Time Elapsed	Time Elapsed	Time Remaining	Num Events	Total Memory	Avg Ev/s	Cur Ev/s	Num Log Entry
Completed	localhost	0m 00s	1h 00m 00s	1m 24s		46,133,295	13,687	551,734		1
Completed	localhost	0m 00s	1h 00m 00s	2m 23s		33,614,072	14,661	633,119		

View Details | Pause | Stop Run | Stop Set | Stop Sequence | Close | Help

Εικόνα 48 : Χρόνοι προσομοίωσης για τα σενάρια

Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο

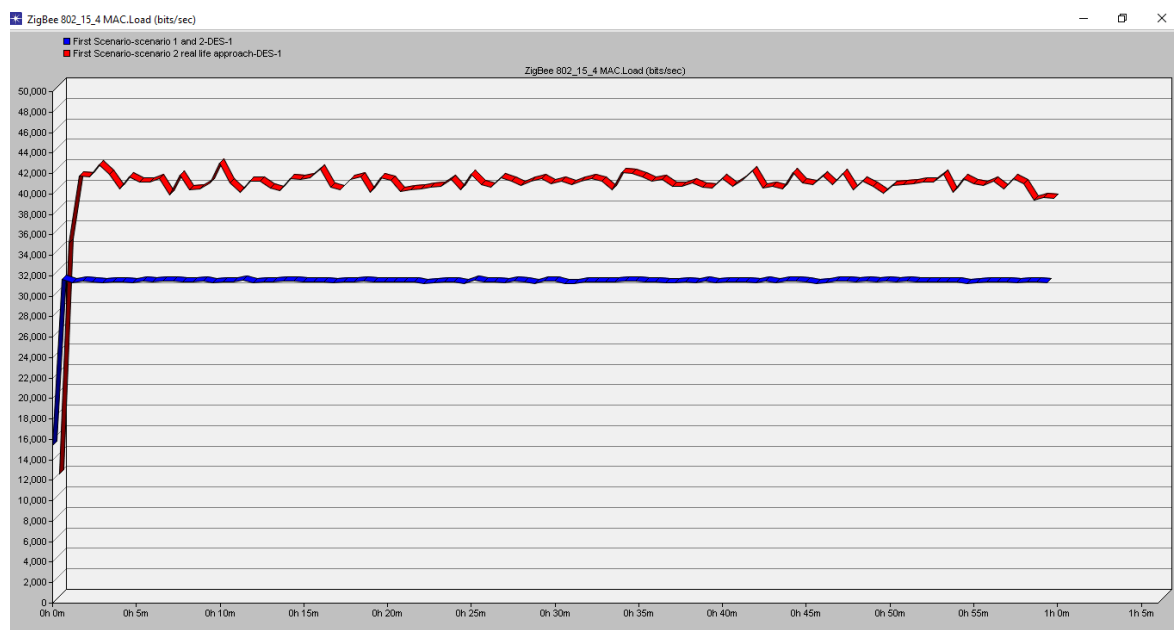


Εικόνα 49 : Καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End to end delay)

Οι δύο παράμετροι που πρέπει πρώτα να λάβουμε υπόψη είναι ο αριθμός των κόμβων και η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Στην εικόνα 49 βλέπουμε τον αριθμό των κόμβων κατά την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο για τα δύο σενάρια. Η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο αποτελεί στατιστικό στοιχείο των παγκόσμιων στατιστικών (global statistics). Οι παγκόσμιες στατιστικές μας παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το συνολικό σύστημα και

μετρούν τις επιπτώσεις σε πραγματικό χρόνο. Στην εικόνα 51 παρουσιάζεται με σκούρο μπλε το πρώτο σενάριο που αποτελείται από 30 κόμβους με απόσταση 200 μέτρων μεταξύ τους. Ενώ με κόκκινο απεικονίζεται το δεύτερο σενάριο με 56 κόμβους τοποθετημένους σε απόσταση 500 μέτρων ο ένας από τον άλλον. Όπως φαίνεται από το γράφημα, η καθυστέρηση για το πρώτο σενάριο είναι υψηλότερη σε σύγκριση με το δεύτερο σενάριο. Θεωρώ πως αυτό συμβαίνει, διότι στο δεύτερο σενάριο ο μηχανισμός αποφυγής συγκρούσεων είναι ενεργοποιημένος.

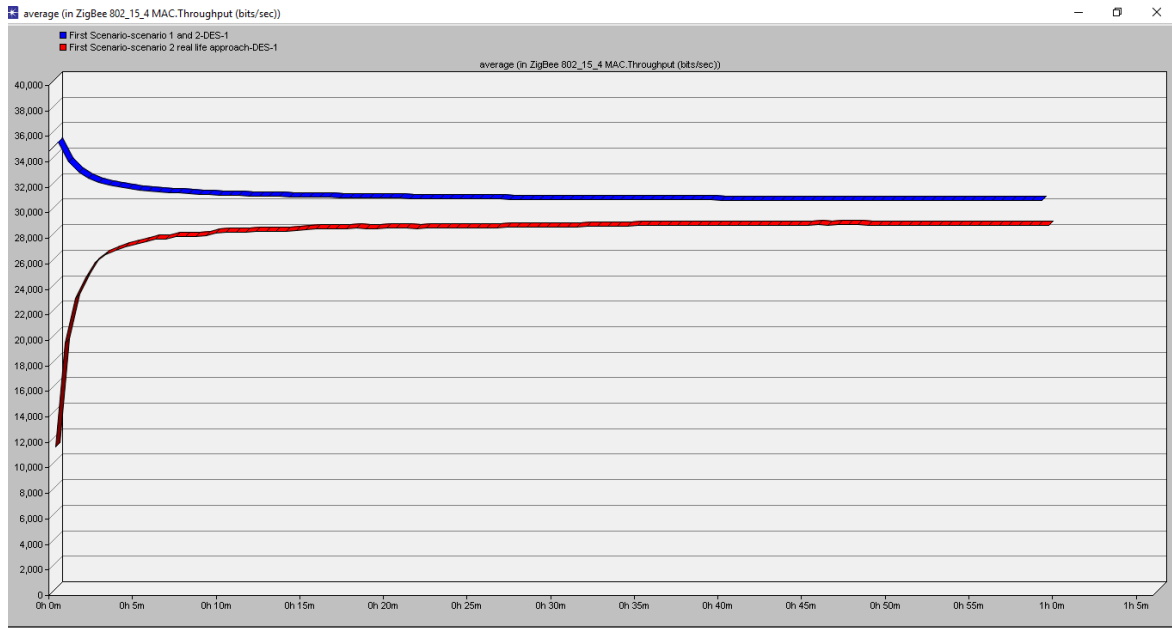
Φορτίο



Εικόνα 50 : Φορτίο (Load)

Το φορτίο του δικτύου μας δείχνει πόσο φορτωμένα είναι τα μονοπάτια που ακολουθούν τα πακέτα και πόσα πακέτα έχουν χαθεί. Στην εικόνα 50 παρατηρώ ότι το δεύτερο σενάριο (με κόκκινο χρώμα) παράγει περισσότερο φορτίο σε σχέση με το πρώτο. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι το φορτίο του δικτύου αυξάνεται καθώς αυξάνεται και ο αριθμός των κόμβων.

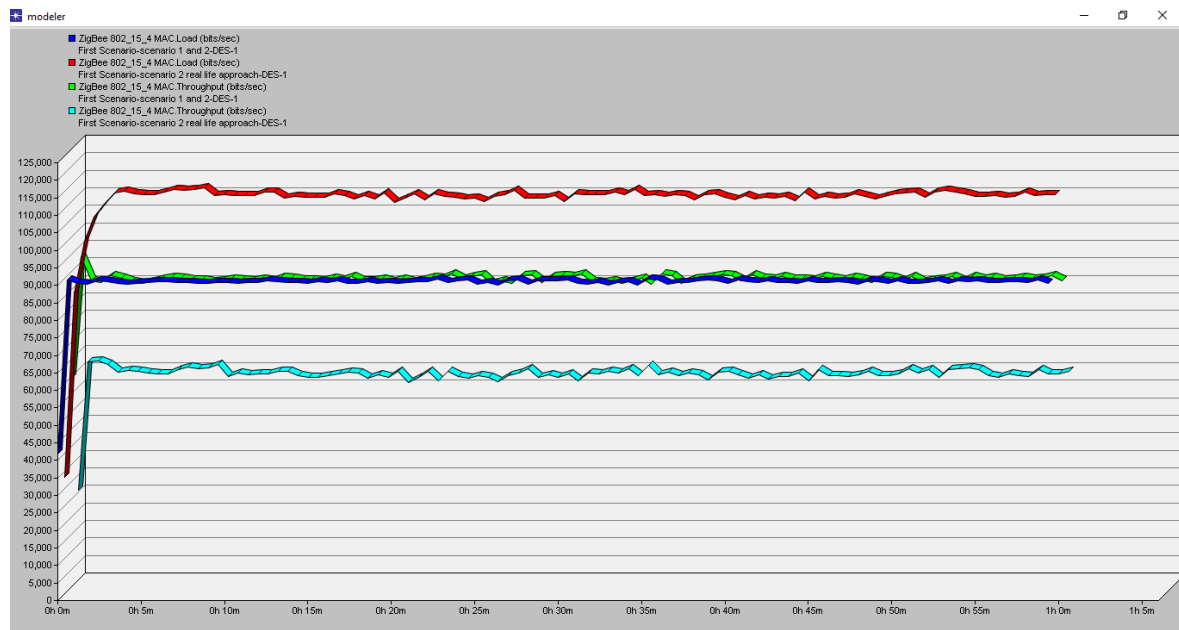
Απόδοση



Εικόνα 51 : Απόδοση (Throughput)

Η ποσότητα των bits ή των πακέτων που έχουν παραληφθεί ή μεταδοθεί επιτυχώς από το κανάλι του δέκτη ή του πομπού ανά δευτερόλεπτο ονομάζεται απόδοση. Η απόδοση αυξάνεται όταν η επικοινωνία μεταξύ του μεγαλύτερου ποσοστού των κόμβων στο δίκτυο λειτουργεί. Παρατηρώ από την εικόνα 51 ότι το πρώτο σενάριο (μπλε γραμμή) παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόδοση, με αποτέλεσμα το ποσό της κίνησης που ανταλλάσσεται στο δεύτερο σενάριο να είναι μικρότερο. Επιπλέον βλέπω ότι το αρχικό ποσό της κίνησης για το δεύτερο σενάριο (12kbps) είναι πάρα πολύ χαμηλό, εξαιτίας πολλών μη συνδεδεμένων κόμβων, αλλά πολύ γρήγορα παρατηρείτε απότομη αύξηση.

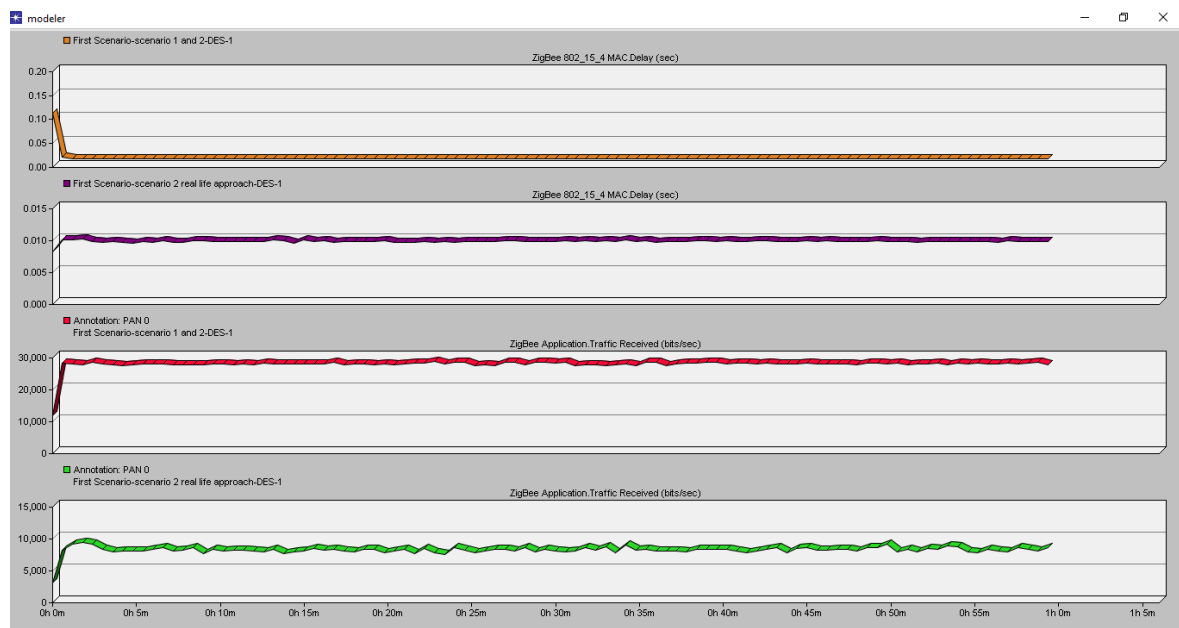
Φορτίο του δικτύου έναντι απόδοσης



Εικόνα 52 : Φορτίο του δικτύου έναντι απόδοσης

Στην εικόνα 52 απεικονίζεται η σύγκριση του φορτίου και της απόδοσης στα δύο σενάρια. Και οι δύο αυτοί παράμετροι μετρούνται στο επίπεδο MAC. Η μέγιστη απόδοση καταγράφηκε στο πρώτο σενάριο. Ενώ το μέγιστο φορτίο στο δεύτερο σενάριο.

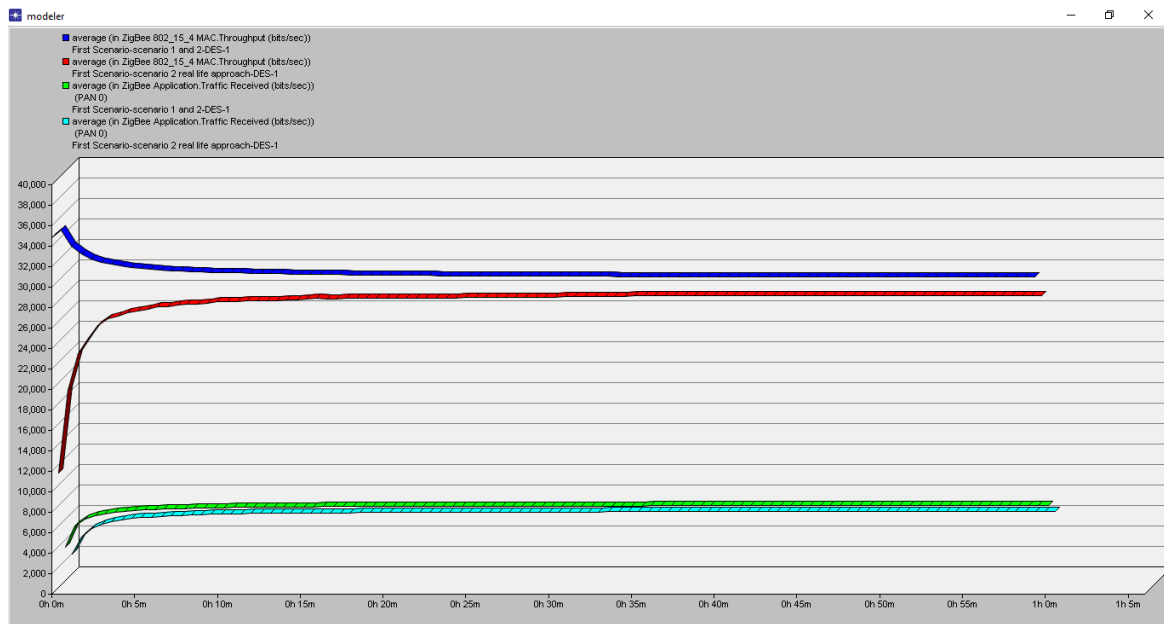
Ρυθμός άφιξης δεδομένων έναντι καθυστέρησης



Εικόνα 53 : Ρυθμός άφιξης δεδομένων έναντι καθυστέρησης

Εδώ ο ρυθμός άφιξης δεδομένων είναι υψηλότερος στο πρώτο σενάριο και η καθυστέρηση επίσης. Ο ρυθμός άφιξης δεδομένων είναι χαμηλός στο δεύτερο σενάριο, πράγμα το οποίο δείχνει ότι δεν υπάρχει μεγάλη επικοινωνία εξαιτίας της απώλειας πακέτων. Τέλος η καθυστέρηση και στα δύο σενάρια είναι αμελητέα.

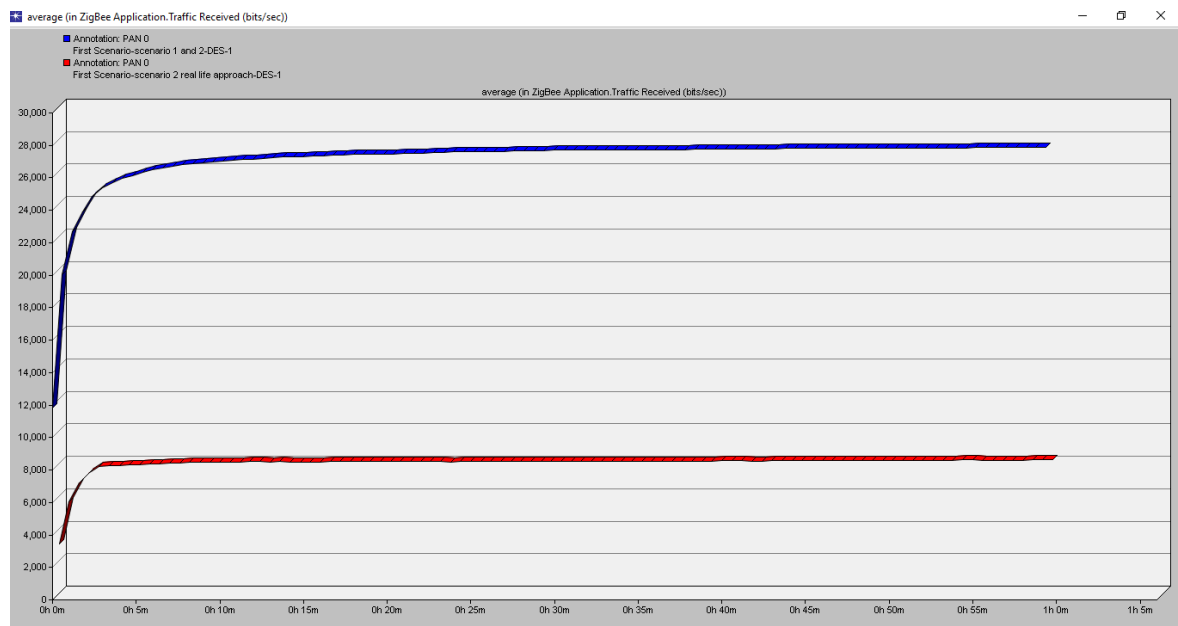
Ποσοστό άφιξης δεδομένων έναντι απόδοσης



Εικόνα 54 : Ποσοστό άφιξης δεδομένων έναντι απόδοσης

Η απόδοση και η άφιξη των δεδομένων είναι επίσης υψηλότερες στο πρώτο σενάριο, ενώ είναι χαμηλότερες στο δεύτερο.

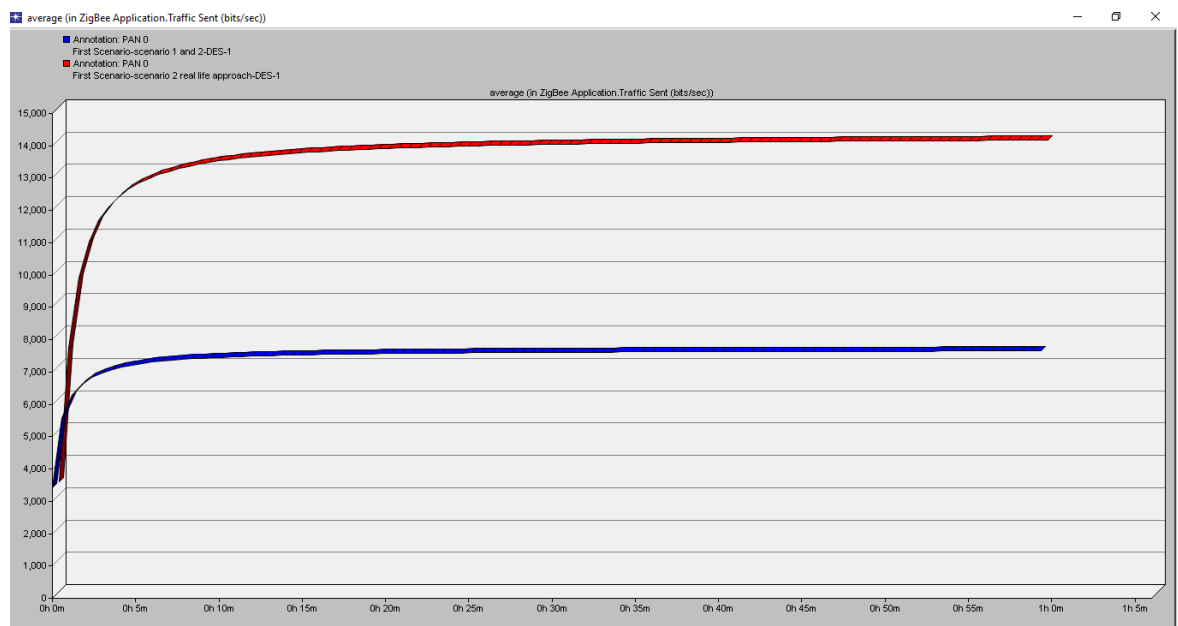
Δεδομένα που λαμβάνονται



Εικόνα 55 : Δεδομένα που λαμβάνονται

Η κυκλοφορία που λαμβάνεται είναι μέγιστη στο πρώτο σενάριο (μπλε γραμμή) και χαμηλότερη στο δεύτερο

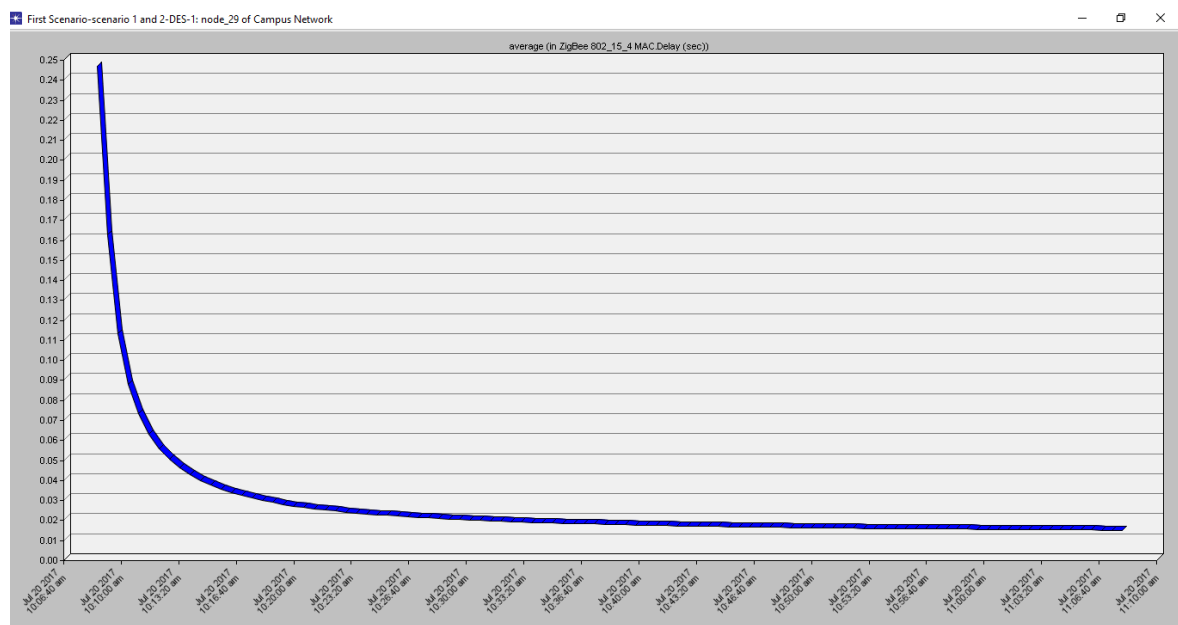
Δεδομένα που αποστέλλονται



Εικόνα 56 : Δεδομένα που αποστέλλονται

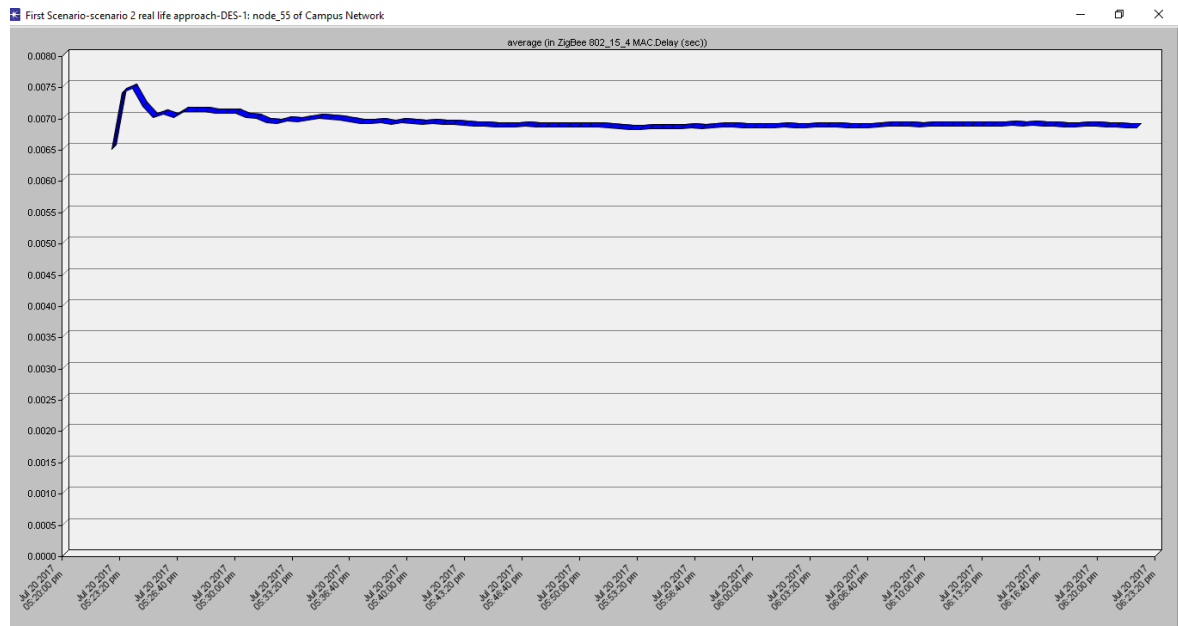
Η μετάδοση δεδομένων που αποστέλλεται ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός των bits που αποστέλλονται από την πηγή στον προορισμό ανά μονάδα χρόνου ανεξάρτητα από το αν φθάνουν ή όχι τα bits στον προορισμό. Η κυκλοφορία που αποστέλλεται στο δεύτερο σενάριο (κόκκινη γραμμή) φθάνει τα 60kbps (η προδιαγραφή για το πρωτοκόλλου 802.15.4 είναι 256kbps) που δείχνει ότι τα δεδομένα δεν αποστέλλονται με τις μέγιστες δυνατές τιμές

Συντονιστές Δικτύων



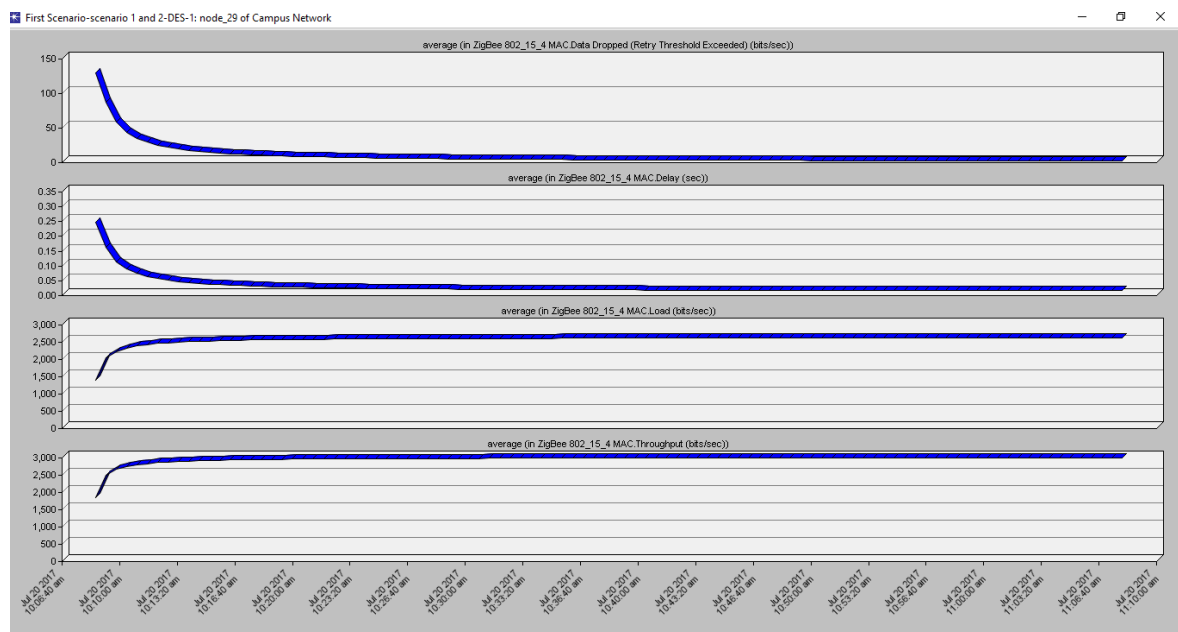
Εικόνα 57 : Καθυστέρηση συντονιστή δικτύου (σενάριο πρώτο)

Στην εικόνα 57 βλέπουμε την καθυστέρηση στον συντονιστή του δικτύου η οποία αρχικά είναι υψηλή και στην συνέχεια μειώνεται σταδιακά, μέχρις ότου ομαλοποιηθεί.

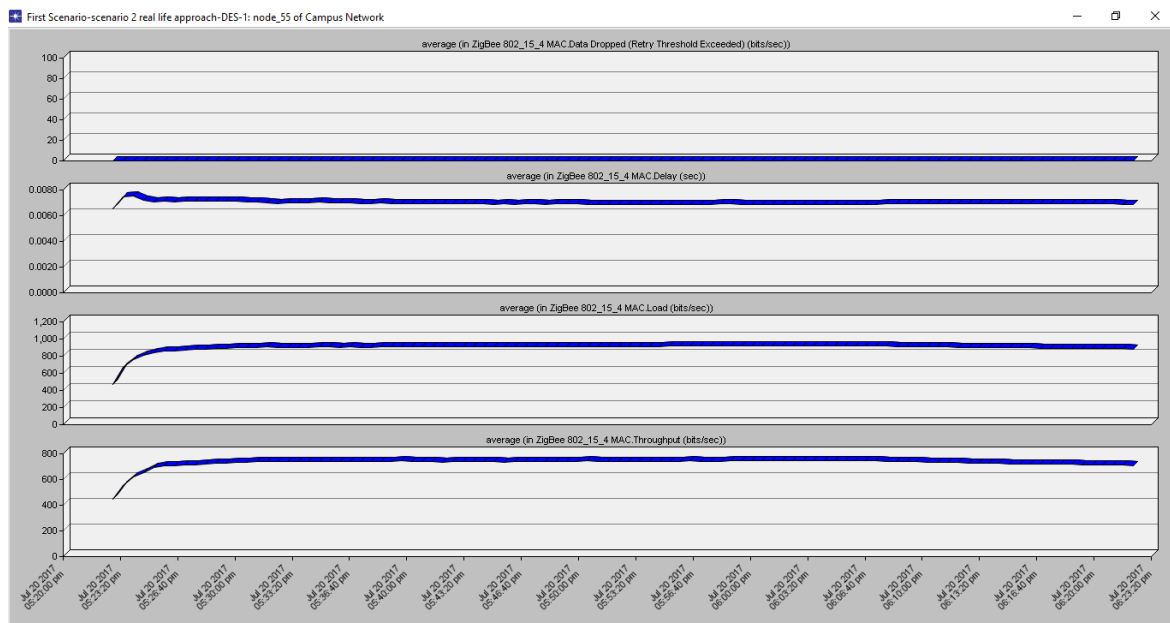


Εικόνα 58 : Καθυστέρηση συντονιστή δικτύου (σενάριο δεύτερο)

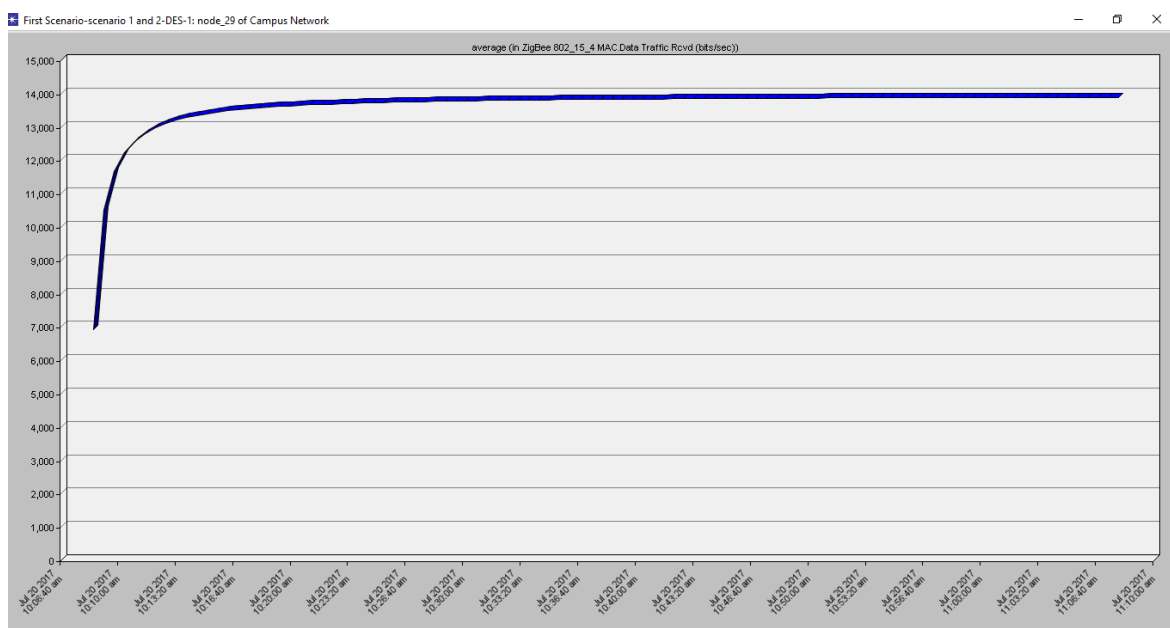
Στην εικόνα βλέπουμε την καθυστέρηση στον συντονιστή δικτύου η οποία κυμαίνεται γύρω στα 0.0070 δευτερόλεπτα.



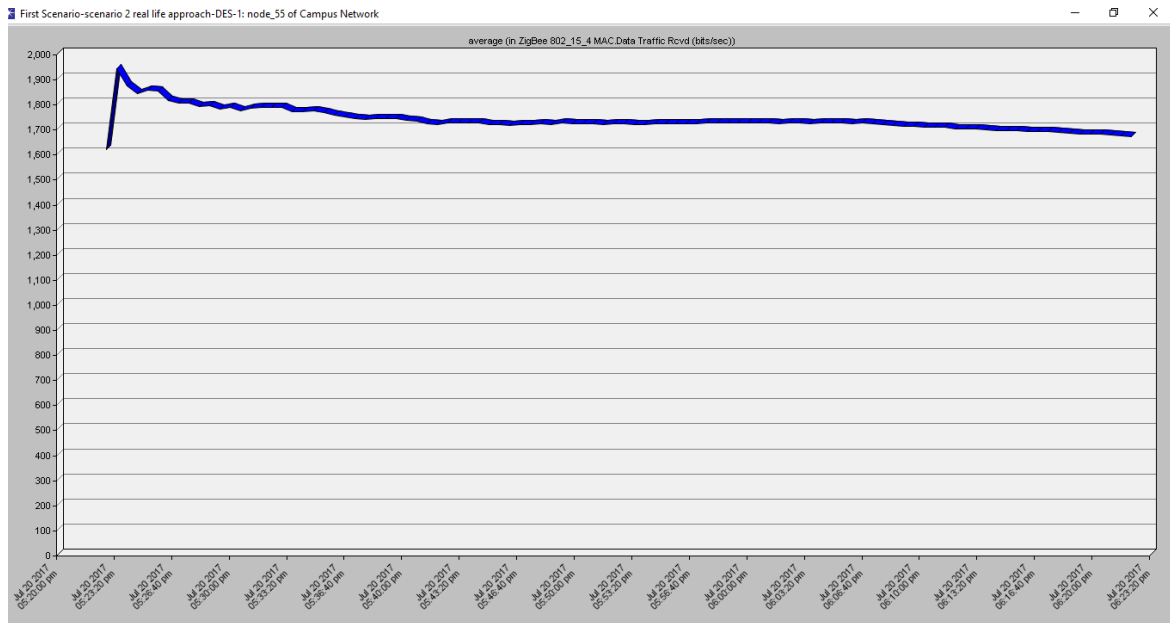
Εικόνα 59 : Στατιστικά στοιχεία συντονιστή (σενάριο πρώτο)



Εικόνα 60 : Στατιστικά στοιχεία συντονιστή (σενάριο δεύτερο)



Εικόνα 61 : Κίνηση συντονιστή δικτύου (σενάριο πρώτο)



Εικόνα 62 : Κίνηση συντονιστή δικτύου (σενάριο δεύτερο)

7. Προβλήματα που αντιμετωπίσα

Το κύριο πρόβλημα σε αυτό το σχέδιο ήταν όταν επιχείρησα να υλοποιήσω σύνδεση στο Internet, παρατήρησα ότι το OPNET δεν υποστηρίζει ZGB (ZIGBEE GATEWAY DEVICE) Εκδόσεις OPNET (14.5/15.5/16.5/17.2).

Δυστυχώς το τελευταίο σενάριο δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί λόγω ελλειπών βιβλιοθήκης μοντέλων ZigBee στο OPNET. Για να πραγματοποιήσουμε αυτό το συγκεκριμένο σενάριο, χρειαζόμαστε πύλη ZigBee για σύνδεση στο διαδίκτυο. Ωστόσο, αυτή η πύλη ZigBee δεν είναι διαθέσιμη στη παλέτα αντικειμένων OPNET. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι ο μηχανισμός Beacon δεν διατίθεται στην εμπορική έκδοση.

8. Συμπεράσματα

Ορισμένες από τις σημαντικές παρατηρήσεις της προσομοίωσης εξετάζονται παρακάτω.

Καθυστέρηση

Η καθυστέρηση στο πρώτο σενάριο είναι υψηλότερη από το δεύτερο σενάριο. Η αρχική καθυστέρηση ήταν μεγαλύτερη για το πρώτο σενάριο, αλλά αργότερα εξαιτίας πολλών μη συνδεδεμένων κόμβων υπήρξε ξαφνική πτώση της καθώς οι μακρινές συσκευές δεν επικοινωνούσαν με τον συντονιστή. Με 30 κόμβους σε απόσταση 200 μέτρων, η

καθυστέρηση ήταν 50-70 μsec . Αλλά καθώς αυξάνουμε των αριθμό των κόμβων, η καθυστέρηση μειώνεται φτάνοντας τα 30 μsec . Η μικρότερη καθυστέρηση σε σενάριο με περισσότερους κόμβους δείχνει ότι πολλοί κόμβοι δεν ήταν σε θέση να συμμετάσχουν στο δίκτυο.

Κίνηση

Η κίνηση στο δεύτερο σενάριο δείχνει ότι τα δεδομένα αποστέλλονται με ταχύτητες της τάξης των 60Kbps. Στο πρώτο σενάριο που ο αριθμός των κόμβων είναι μικρότερος, βλέπουμε ότι τα δεδομένα αποστέλλονται με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης περίπου 30Kbps.

Απόδοση

Για σενάριο με 30 κόμβους σε απόσταση 200 μέτρων, η απόδοση έφτασε τα 32-36 Kbps. Ενώ στο σενάριο με τους 56 κόμβους σε απόσταση 500 μέτρων, η απόδοση παρέμεινε μεταξύ 12-30 Kbps το ανώτατο όριο. Επομένως με μικρότερη απόσταση μεταξύ των κόμβων επιτυγχάνουμε καλύτερη απόδοση.

Πραγματικό σενάριο

Στην εγκατάσταση μου δεν υπήρχαν επαναλήπτες ή πολλαπλοί συντονιστές. Με ένα μόνο συντονιστή το σενάριο με 56 κόμβους σε απόσταση 500 μέτρων που καλύπτουν έκταση 3Km X 3,5Km έχει δείξει ικανοποιητικά αποτελέσματα για παραμέτρους όπως η απόδοση, η καθυστέρηση και η κίνηση στο δίκτυο.

Εν κατακλείδι, βλέποντας τις διάφορες λειτουργίες και τα μοντέλα του OPNET και παρά τα προαναφερθέντα προβλήματα πιστεύω ότι έκανα τη καλύτερη επιλογή χρησιμοποιώντας το εργαλείο προσομοίωσης OPNET. Τέλος τα αποτελέσματα που συνέλεξα φαίνονται ρεαλιστικά για τις γνώσεις μου και μπορούν να συγκριθούν από παρόμοια μοντέλα σε μελλοντικές μελέτες.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βούρος Ανδρέας, Διπλωματική εργασία: ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ (WSN) ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ, Αθήνα, Μάρτιος 2015.
- Δημήτριος Κ. κουτσοβέλας, Ηλίας Δ, Κωστούδης. Διπλωματική εργασία: ασφάλεια σε δίκτυα ad hoc και δίκτυα αισθητήρων, Νοέμβριος, Αθήνα, 2008.
- Απόστολος Σπένδας, Διπλωματική εργασία : ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ, Ιούλιος 2012.
- Μπελόκας Ανδρέας, Πτυχιακή εργασία : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ZIGBEE, Αθήνα, Ιούνιος 2014..
- site <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSB101/4/28,73/>
- site <https://www.wikipedia.org/>
- site https://www.auto.tuwien.ac.at/bib/pdf_thesis/THESIS0017.pdf
- site <https://www.cooking-hacks.com/shop/waspmote/core-boards>
- site <http://www.libelium.com/>
- site <https://www.riverbed.com/gb/>
- site <http://www.ijcna.org/Manuscripts%5CVolume-2%5CIssue-3%5CVol-2-issue-3-M-03.pdf>
- site http://www2.ensc.sfu.ca/~ljilja/ENSC427/Spring09/Projects/team4/ENSC427_Project_Final_Reportv5.1.pdf